

برآورد پارامتر شدت زلزله در منطقه گسل با استفاده از داده‌های حرارتی سنجش از دور

آرش کریمی زارچی - دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران
محمد رضا سراجیان* - دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

دریافت: ۱۴۰۰/۰۲/۲۱ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۶

چکیده

زلزله یکی از پیش‌بینی‌ناپذیرترین و خطرناک‌ترین پدیده‌های طبیعی است که هر ساله خسارات مالی و جانی فراوانی را باعث می‌شود. هنگام وقوع زلزله تنش‌ها و فعالیت‌های محدوده گسل افزایش می‌یابد و باعث تغییرات دمایی محسوسی نسبت به دمای نرمال می‌شود. این تغییرات دمایی خود را به صورت بی‌هنجاری‌هایی در مکان یا زمان نشان می‌دهند. در این تحقیق با استفاده از محصولات حرارتی سنجنده مادیس و شیپ‌فایل گسل‌های ایران، هفت زلزله با شدت بیشتر از ۳ شش ریشتر، که در ایران رخ داده، بررسی شده است. در این پژوهش با استفاده از تشکیل تصویر زمان-دما - فاصله در گسل مربوط به زلزله به‌عنوان ورودی دو روش تشخیص بی‌هنجاری حرارتی روی داده‌ها بررسی شده است. در نهایت، با استفاده از نتایج حاصل از بهترین روش تشخیص بی‌هنجاری پارامتر شدت با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی برآورد شده است. نتایج الگوریتم‌های تشخیص ناهنجاری نشان می‌دهد هرچند هر دو روش تشخیص بی‌هنجاری حرارتی مربوط به هر زلزله را در روز زلزله در شعاع نزدیک به گسل شناسایی کرده‌اند روش چارکی (Interquartile) نسبت به روش میانگین - انحراف معیار نتایج مناسب‌تری را برای ورودی الگوریتم شبکه عصبی فراهم می‌کند. نتایج در مدل‌سازی نیز نشان می‌دهد پارامتر شدت زلزله، که با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی بررسی شد، دقت کلی ۰/۷۳ را داشته است. ذکر این نکته لازم است که پیش‌نشانگر تغییرات دمای سطح و بی‌هنجاری‌های حرارتی به‌تنهایی نمی‌تواند برای بررسی کامل پارامترهای زلزله کافی و دقت لازم را برای تحلیل زلزله داشته باشد. ولی با توجه به حجم پایین داده‌های حرارتی و سادگی کار با آن‌ها، توصیه می‌شود از آن‌ها برای بررسی‌های ابتدایی و آغازین زمین‌لرزه استفاده شود و در صورت تأیید نسبی آن برای تحلیل‌های بیشتر، از روش‌ها و پیش‌نشانگرهای دیگر، که در آن‌ها اعمال الگوریتم‌ها و پردازش‌های سنگین و پیچیده نیاز است، استفاده شود.

واژگان کلیدی: پیش‌نشانگر زلزله، گسل فعال، مدل‌سازی شبکه عصبی مصنوعی، ناهنجاری حرارتی.

مقدمه

زمین‌لرزه لرزش و جنبش زمین است که به علت آزاد شدن سریع انرژی ناشی از گسیختگی در گسل‌های پوسته زمین به صورت ناگهانی و در زمان بسیار کوتاهی روی می‌دهد (جلر و همکاران، ۱۹۹۷؛ صراف و همکاران، ۲۰۰۹). به بیانی دیگر، زمین‌لرزه نتیجه رهایی ناگهانی انرژی از داخل پوسته زمین است که به ایجاد امواج ارتعاشی در زمین منجر می‌شود. زمین‌لرزه‌ها ناشی از افزایش فشار استراتژیک‌اند و از الگوی خاصی برای مدل‌سازی احتمال وقوع آن‌ها در آینده پیروی نمی‌کنند (کنسول و همکاران، ۲۰۰۲). این امر آن‌ها را به یکی از پیش‌بینی‌ناپذیرترین و همچنین یکی از خطرناک‌ترین پدیده‌های طبیعی تبدیل کرده است (مارانو و همکاران، ۲۰۱۰). با توجه به اینکه کشور ایران بر روی کمربند لرزه‌ای فعال آلپ هیمالیا قرار گرفته و آن را جزو مناطق زلزله‌خیز دنیا کرده است، بررسی این بحران طبیعی در ایران از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است.

بسیاری از تحقیقات نشان می‌دهد پدیده زلزله ارتباط بسیا زیادی با تغییر شکل زمین، افزایش دمای سطح زمین، گازها و آئروسول‌ها، و اختلالات الکترومغناطیسی در جو دارد و این امکان را به محققان می‌دهد که این پدیده را از جنبه‌های مختلف بررسی کنند (وایس، ۱۹۹۱). تکنولوژی سنجنش از دور در باند حرارتی امکان قابل اتکایی برای پایش پدیده زلزله در اختیار محققان قرار می‌دهد و داده‌های مادون قرمز حرارتی منبع داده‌ای بسیار مهم و با قابلیت‌های بالا هست. سنجنده AVHRR که بر روی ماهواره NOAA نصب شده، سنجنده MODIS که بر روی دو ماهواره Terra و Aqua نصب شده، سنجنده ASTER که بر روی ماهواره Terra نصب شده، و سنجنده‌های ETM+ و TIRS که بر روی ماهواره‌های Landsat7 و Landsat8 نصب شده‌اند از جمله سنجنده‌هایی هستند که در تحقیقات مختلف از آن‌ها برای بررسی پدیده زلزله استفاده می‌شود.

افزایش غیرطبیعی تابش مادون قرمز حرارتی (TIR) از سطح زمین در نزدیکی زمان زلزله که اغلب توسط سنجنده‌های نصب‌شده روی ماهواره قابل اندازه‌گیری است می‌تواند بی‌هنجاری حرارتی نامیده شود (فروند و همکاران، ۲۰۰۵). عوامل به‌وجودآورنده این ناهنجاری حرارتی به پنج بخش اصلی تقسیم می‌شود: مکانیزم گاززدایی زمین؛ بی‌هنجاری آب‌های زیرزمینی؛ گرمایش به‌وجودآمده بر اثر اصطکاک؛ تراکنش‌های لرزه‌ای یونسفری؛ و مکانیزم واکنش جابه‌جایی اکسیژن حفره پی (P-Hole). هر یک از این عوامل به‌صورت مستقیم یا با افزایش دمای اتمسفر در نزدیکی سطح زمین باعث افزایش دمای سطح زمین می‌شوند.

اولین مطالعات انجام‌شده مربوط به زمین‌لرزه از طریق سنجنش از دور حرارتی به اواخر دهه هشتاد برمی‌گردد. گورنی و همکاران در ۱۹۸۸ و ۱۹۹۷ برای اولین بار پیشنهاد دادند که بی‌هنجاری‌های حرارتی در باندهای مادون قرمز حرارتی می‌تواند اطلاعات مفیدی درباره فعالیت‌های لرزه‌ای زمین در دسترس قرار دهد (کیانگ و همکاران، ۱۹۹۷). در سال ۱۹۹۹ کیانگ و همکاران چندین زلزله را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در چنین شرایطی دمای هوا کاهش می‌یابد و زمین‌لرزه بعد از یک دوره آرام رخ می‌دهد. همچنین، ممکن است افت دما در زیر دمای معمولی منطقه در حوالی دوره زلزله اتفاق افتد و متعاقباً به حالت عادی برگردد؛ به این معنا که دما در نزدیکی زمان زلزله کاهش یابد و مجدداً به حالت عادی بازگردد (کیانگ و همکاران، ۱۹۹۹). روش محاسبه و تشخیص بی‌هنجاری RAT^۱ برای اولین بار توسط تراموتولی در ۱۹۹۸ برای بررسی روابط احتمالی بین وقوع زمین‌لرزه و نوسانات مکان-زمان تابش مادون قرمز حرارتی مطرح‌شده از زمین برای زلزله Irpinia در ایتالیا در ۲۳ نوامبر ۱۹۸۰ به‌شدت ۶٫۹ ریشتر به‌عنوان داده‌های قابل مشاهده از سنجنده AVHRR پیشنهاد شد و متعاقباً روش تعمیم‌یافته آن با نام RST^۲ برای سایر ماهواره‌ها مطرح شد (تراموتولی، ۱۹۹۸). صراف و همکاران (۲۰۰۸) زلزله‌های بم و زرنده را که به‌ترتیب با شدت‌های ۶٫۶ و ۶٫۴ ریشتر رخ داد بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد ناهنجاری دمای سطح زمین با شدت ۵ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد شش روز قبل از زلزله قابل مشاهده بوده است. مشکل بزرگی که در بسیاری از تحقیقاتی که تا آن زمان انجام شده بود عدم محاسبه پارامترهای آماری مربوط به بی‌هنجاری‌ها بود و همه این بی‌هنجاری‌ها به‌صورت بصری نشان داده شده بود (صراف و همکاران، ۲۰۰۸).

در تحقیقات ذکرشده از داده‌های سنجنده AVHRR استفاده شده است، ولی با شروع فعالیت سنجنده MODIS با قدرت تفکیک مکانی و طیفی بهتر اغلب محققان داده‌ها و محصولات این سنجنده را جای‌گزین داده‌های AVHRR کردند و برای انجام‌دادن تحقیقات بعدی در این زمینه استفاده کردند. اوزونوف و فروند (۲۰۰۴) از جمله اولین محققانی بودند که از محصول دمای سطح زمین سنجنده MODIS برای بررسی پرتو مادون قرمز ساطع‌شده از سطح زمین در نزدیکی زمان زلزله استفاده کردند. زلزله‌ای که آن‌ها بررسی کردند از جمله مخرب‌ترین زلزله‌های اتفاق‌افتاده در آن دوره

1. Robust AVHRR Technique
2. Robust Satellite Technique

با شدت ۷٫۷ ریشتر واقع در هند در ۲۶ ژانویه سال ۲۰۰۱ بود (اوزونوف و فروند، ۲۰۰۴). نتایج تحقیقات ایشان نشان داد ناهنجاری حرارتی با ۳ تا ۴ درجه سانتی‌گراد در فاصله زمانی پنج روز قبل از زمان زلزله قابل مشاهده است. ذکر این نکته لازم است که صراف و چودهوری با استفاده از داده‌های سنجنده AVHRR همین زلزله را بررسی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد ناهنجاری حرارتی ۵ تا ۷ درجه سانتی‌گراد در فاصله زمانی ۱۲ روز قبل از زمان زلزله قابل مشاهده بوده است. دلیل این تفاوت را می‌توان به تفاوت در روش‌های مورد استفاده در هر تحقیق نسبت داد. در سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸ تحقیقات متعددی در باب این موضوع صورت گرفت و بسیاری از زلزله‌های رخ داده تا آن زمان بررسی شدند. ولی این موضوع که تغییرات دمای به‌وجودآمده از عواملی به غیر از عامل لرزه مانند دلایل تغییرات فصلی است از داده‌ها حذف نشده بود. همچنین، اتکای صرف به نتایج بصری و عدم محاسبه پارامترهای آماری این ناهنجاری‌های حرارتی دقت این تحقیقات را پایین می‌آورد (صراف و همکاران، ۲۰۰۸).

آخوندزاده و سراجیان در ۲۰۱۱ با استفاده از روش‌های تشخیص بی‌هنجاری میانگین و انحراف از معیار، چارکی، تبدیل موجک و فیلتر کالمن زلزله‌های بزرگ ایران را بررسی کردند (آخوندزاده، ۲۰۱۲). همچنین، آخوندزاده در ۲۰۱۴ با استفاده از دو روش شبکه عصبی مصنوعی و بهینه‌سازی ذرات روی زلزله سراوان با شدت ۷٫۷ که در ۱۶ آوریل ۲۰۱۳ رخ داد مطالعات خود را ادامه داد. از روش بهینه‌سازی ذرات برای حل مشکلات بهینه‌سازی در سطح گسترده استفاده می‌شود؛ در حالی که روش شبکه عصبی مصنوعی بسته به وضعیت داده‌ها در نقاط کمینه محلی می‌تواند دچار خطا شود. آخوندزاده با استفاده از روش بهینه‌سازی ذرات نقاط ضعف شبکه عصبی مصنوعی را پوشش داد و با ترکیب این دو روش راه‌حلی مناسب برای تشخیص بی‌هنجاری حرارتی در زمان زلزله ارائه داد (آخوندزاده، ۲۰۱۲؛ آخوندزاده ۲۰۱۴).

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق هفت زلزله با شدت بیشتر از شش ریشتر، که در ایران رخ داده، بررسی شده است. ایران کشوری است در جنوب غربی آسیا و در منطقه خاورمیانه با ۱۶۴۸۱۹۵ کیلومتر مربع وسعت در ۲۵ تا ۴۵ درجه عرض شمالی و ۴۴ تا ۶۳ درجه طول شرقی واقع شده است. کشور ایران بر روی کمربند لرزه‌ای فعال آلپ هیمالیا قرار گرفته و جزو مناطق زلزله‌خیز دنیا محسوب می‌شود. در جدول ۱ نام زلزله‌ها و پارامترهای مربوط به هر یک ارائه شده است.

جدول ۱. زلزله‌های مورد بررسی و پارامترهای مرتبط به آن‌ها

نام شهر	مختصات مرکز زلزله	تاریخ	زمان	شدت
ازگله	34.81 N 45.83 E	۲۱ آبان ۱۳۹۶	۲۱:۴۸	۷٫۳
گوهران	26.52 N 57.76 E	۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۲	۰۶:۳۸	۶٫۲
سراوان	27.11 N 62.05 E	۲۷ فروردین ۱۳۹۲	۱۵:۱۴	۷٫۸
شنبه	28.48 N 51.58 E	۲۰ فروردین ۱۳۹۲	۱۶:۲۲	۶٫۳
فهرج	28.49 N 59.12 E	۲۹ آذر ۱۳۸۹	۰۱:۴۲	۶٫۵
بروجد	34.57 N 48.79 E	۱۱ فروردین ۱۳۸۵	۰۵:۳۷	۶٫۱
ساری	36.27 N 51.57 E	۸ خرداد ۱۳۸۳	۱۷:۰۸	۶٫۳

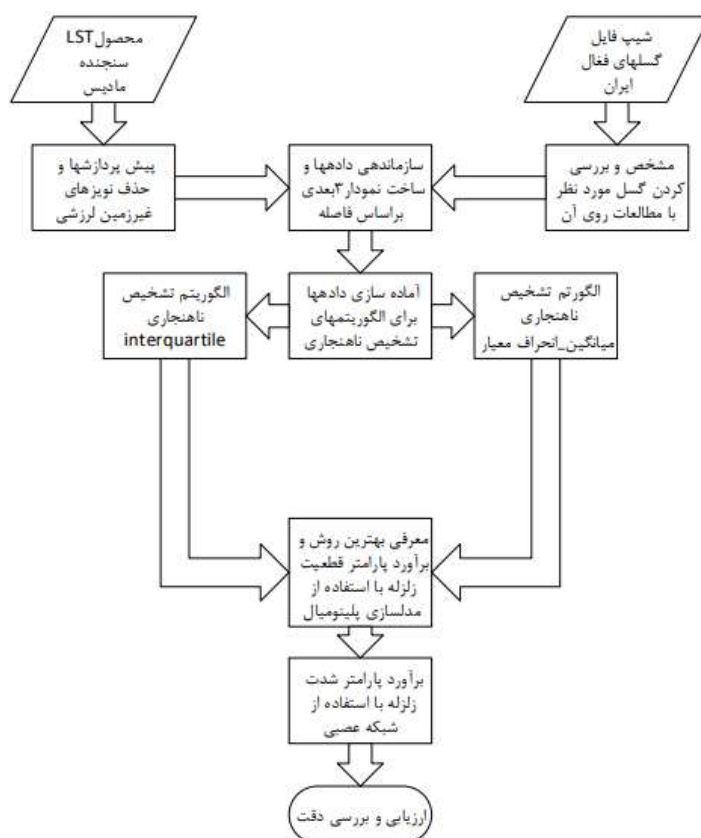
داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق از داده‌های سنجنده MODIS و لایه اطلاعاتی گسل‌های ایران استفاده شده است. محصول دمای سطح زمین (MODISMOD11A1) یکی از محصولات سنجنده MODIS است که در هر ۲۴ ساعت، دو تصویر با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر از قسمت روشن و قسمت تاریک زمین ارائه می‌دهد. این محصول همچنین دارای لایه‌های اطلاعاتی نظیر درجه حرارت سطح زمین در روز، در شب، زمان مشاهده، زاویه دید زنیته، و چندین لایه اطلاعاتی دیگر

است. سیستم مختصات این محصول به صورت سینوسی است. در این محصول تصحیحات هندسی و رادیومتریکی اعمال و پیکسل‌هایی که در آن‌ها ابر باشد حذف شده است. از الگوریتم پنجره مجزا به منظور تولید دمای سطح زمین و با استفاده از باندهای ۳۱ و ۳۲ این سنجنده استفاده می‌شود. شیپ‌فایل گسل‌های فعال ایران شامل فایل برداری‌ای است که موقعیت و شکل گسل‌های فعال ایران در آن به صورت خطوط نشان داده شده است.

روش پیشنهادی

فلوچارت مراحل کلی اجرای تحقیق در شکل ۱ ارائه شده است. با توجه به توضیحات داده‌شده در مورد داده‌های مورد استفاده در تحقیق، در ادامه به تشریح هر یک از مراحل فلوچارت پرداخته می‌شود.



شکل ۱. فلوچارت کلی مراحل اجرای تحقیق

پیش پردازش‌ها

تصحیحات هندسی و رادیومتریکی از قبل بر روی محصول حرارتی سنجنده MODIS اعمال شده است. پیکسل‌های دارای ابر نیز حذف شده‌اند. بنابراین، در ارتباط با پیش‌پردازش داده‌ها، به حذف خطای تغییرات ناشی از عوامل غیرزمین لرزشی موجود در داده‌ها اقدام شده است.

داده‌های حرارتی مورد استفاده برای هر زلزله از سی روز قبل از زلزله تا ده روز بعد از وقوع آن انتخاب شده‌اند. تغییرات دمایی در طول این بازه چهار روزه علاوه بر تغییرات ناشی از زلزله به عوامل مختلفی مانند تغییرات فصلی، تغییرات رطوبتی، و تغییرات زاویه تابش خورشید نیز بستگی دارد. در این مرحله سعی شده تغییرات حرارتی که ناشی از عوامل غیرزمین لرزشی‌اند تا حد امکان حذف شوند. برای این کار، یک مدل خطی از تغییرات دمایی روی داده‌های حرارتی مناطق مورد نظر در مدت مشابه در سال قبل، که فعالیت لرزشی‌ای رخ نداده است، برازش داده شود.

شناسایی گسل و تشکیل نقشه فاصله از گسل

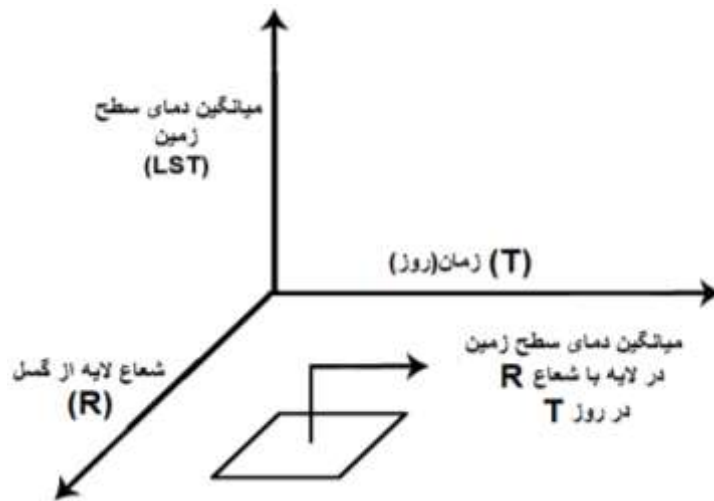
با توجه به محل زلزله، می‌توان گسل‌های نزدیک به محل را شناسایی و با بررسی آن‌ها فعال بودن گسل در ارتباط با زمین‌لرزه را مشخص کرد. حال نیاز به ایجاد تصویری از منطقه است که در آن پیکسل‌ها بر اساس فاصله از گسل مربوطه مقداردهی شوند. به این معنی که، به‌عنوان مثال، پیکسل‌هایی که در شعاع یک کیلومتر از گسل قرار دارند مقدار ۱، پیکسل‌هایی که در شعاع دو کیلومتر قرار دارند مقدار ۲، و به همین منوال برای سایر پیکسل‌ها تا شعاع ۲۰ کیلومتر این تصویر تشکیل می‌شود. این تصویر را تصویر فاصله از گسل نام‌گذاری می‌کنیم. فاصله لایه اول نسبت به گسل مربوطه ۱ کیلومتر و فاصله لایه آخر نسبت به آن گسل ۲۰ کیلومتر است. شکل ۲ نحوه تشکیل نقشه فاصله از گسل را نمایش می‌دهد که در آن پیکسل‌های سفید نمایانگر گسل منطقه‌اند.

3	3	2	2	2	2	2	3
3	2	2	1	1	1	2	3
2	2	1	1	0	1	2	3
2	1	1	0	0	1	2	3
2	1	0	0	1	1	2	3
2	1	1	1	1	2	2	3
2	2	2	2	2	2	3	3
3	3	3	3	3	3	3	4

شکل ۲. نحوه تشکیل نقشه فاصله از گسل

سازمان‌دهی داده‌ها براساس نقشه فاصله از گسل

میانگین دمای سطح زمین برای هر لایه با استفاده از داده‌های حرارتی پیش‌پردازش شده و تصویر فاصله از گسل محاسبه می‌شود. همان‌طور که بیان شد، شعاع داخل هر لایه برابر با ۱ کیلومتر است. شعاع هر لایه نسبت به گسل مربوطه از ۱ تا ۲۰ کیلومتر در نظر گرفته شده است. در واقع، هر لایه در فاصله مشخص از گسل شامل فقط پیکسل‌هایی است که در این شعاع از گسل قرار دارند و داده‌های لایه‌های قبلی (کوچک‌تر) در آن محسوب نشده‌اند. با در دست داشتن میانگین دمای سطح زمین برای هر لایه در هر روز می‌توان با استفاده از شکل ۳ داده‌ها را سازمان‌دهی و نمودار مورد نظر برای ورود به الگوریتم شناسایی ناهنجاری را تشکیل داد. با توجه به سه‌بعدی بودن این نمودار می‌توان آن را به صورت تصویر نیز برای درک بهتر نشان داد که به این معنا نیست که ماهیت سطر و ستون آن‌ها یکسان است، زیرا یکی از نوع زمان و دیگری از نوع فاصله است. به‌عنوان مثال، فرض کنید مقدار پیکسل ردیف ۳ و ستون ۴، با توجه به شکل ۳، برابر است با میانگین دمای سطح زمین برای لایه‌ای که پیکسل‌های آن در شعاع ۳ کیلومتری از گسل و در روز ۴م (۲۶ روز قبل از وقوع زلزله) از بازه زمانی مورد نظر قرار دارند. با تشکیل این نمودار می‌توان تغییرات دمایی را در اطراف گسل که تأثیر زیادی از عوامل زمین‌لرزشی می‌گیرد در محدوده زمانی زلزله نشان داد.



شکل ۳. نحوه سازمان‌دهی داده‌های و تشکیل نمودار

روش‌های تشخیص بی‌هنجاری

حال با در دست داشتن نمودارهای تشکیل‌شده در مرحله پیش می‌توان الگوریتم‌های تشخیص بی‌هنجاری را روی آن‌ها اعمال کرد. نخست لازم است داده‌ها به فضای ۰ تا ۱ برده شوند. به دلیل تفاوت ماهیت سطر و ستون تصویر نیاز است که ابتدا داده‌ها در سطر به این فضا برده شوند و سپس داده‌های حاصل در ستون به فضای ۰ تا ۱ منتقل شود. الگوریتم‌های متنوعی برای تشخیص بی‌هنجاری وجود دارند که باید بر مبنای نوع بی‌هنجاری و نوع توزیع داده‌ها انتخاب شوند. در این تحقیق از روش‌های تشخیص بی‌هنجاری میانگین-انحراف معیار و چارکی (Interquartile) برای شناسایی بی‌هنجاری استفاده شده است.

روش شناسایی بی‌هنجاری میانگین-انحراف معیار

روش میانگین-انحراف معیار روشی ساده است و در بسیاری از تحقیقات برای تشخیص بی‌هنجاری از آن استفاده می‌شود. این روش برای داده‌هایی که از توزیع نرمال پیروی می‌کنند، در عین سادگی از دقت بسیار بالایی برخوردار است. در این روش با استفاده از دو پارامتر آماری میانگین و انحراف از معیار مقادیری محاسبه می‌شود که می‌توان از آن‌ها برای اعمال شرط‌هایی برای بررسی وجود یا فقدان بی‌هنجاری استفاده کرد. با استفاده از رابطه ۱ می‌توان وجود ناهنجاری را تشخیص داد (سراجیان و آخوندزاده، ۲۰۱۱).

$$x > \mu + k \times \sigma \quad \text{رابطه ۱}$$

در رابطه ۱، μ مقدار میانگین و σ مقدار انحراف از معیار در مشاهدات را نشان می‌دهد. k مقدار ثابتی است که می‌توان با تغییر آن شرایط تشخیص ناهنجاری را تغییر داد. با افزایش مقدار آن شرایط سخت و با کاهش آن شرایط آسان‌تر می‌شود. به‌منظور محاسبه مقدار k از معلوم در نظر گرفتن چند زلزله قبلی استفاده و برای زلزله مورد بررسی برآورد شده است. در این برآورد از نتایج تحقیقات قبلی در منطقه استفاده شده است. مقدار این پارامتر برای مناطق مورد نظر مقداری بین ۱,۳ تا ۱,۶ برآورد می‌شود که با توجه به نتایج تحقیقاتی مانند مقاله آخوندزاده و سراجیان در ۲۰۱۱ مقدار ۱,۳ در نظر گرفته شده است.

روش شناسایی بی‌هنجاری چارکی

روش تشخیص بی‌هنجاری چارکی (Interquartile) روشی مشابه به روش پیشین است؛ با این تفاوت که به جای استفاده از پارامترهای آماری میانگین و انحراف از معیار از مقادیر میانه و بازه چارکی برای ساخت شرط بررسی

بی‌هنجاری استفاده می‌شود. با توجه به اینکه در این روش از مقدار میانه به جای میانگین استفاده می‌شود، به یکایک مقادیر موجود وابسته نیست. از این روش نیز مشابه روش قبل بیشتر برای داده‌هایی که از توزیع نرمال پیروی می‌کنند استفاده می‌شود؛ با این تفاوت که این روش برای داده‌هایی که از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند از دقت بیشتری در مقایسه با روش اول برخوردار است. در رابطه ۲ نحوه ساخت شرط بررسی بی‌هنجاری ارائه شده است (آخوندزاده، ۲۰۱۴).

$$x > M + k \times IQR \quad \text{رابطه ۲}$$

در رابطه ۲ نیز M مقدار میانه و IQR مقدار بازه چارکی را نشان می‌دهد. k نیز مقدار ثابتی است که همانند روش قبل برآورد می‌شود. با توجه به نتایج تحقیقاتی مانند مقاله آخوندزاده در سال ۲۰۱۴ مقدار ۱٫۶ در نظر گرفته شده است.

مدل‌سازی و برآورد پارامترهای زلزله

با توجه به اینکه شبکه عصبی مصنوعی در تحقیقات بسیاری استفاده شده است (ساهو و همکاران، ۲۰۱۶)، مفاهیم پایه آن در موارد زیادی توضیح داده شده است. به همین دلیل، در این تحقیق فقط به صورت مختصر درباره بحث‌های تئوری شبکه عصبی مصنوعی توضیح داده و بیشتر به جزئیات و نتایج آن درباره این تحقیق پرداخته می‌شود. شبکه عصبی مصنوعی یک مدل ریاضی است که با استفاده از یک مجموعه داده آموزشی ساخته می‌شود. از این شبکه می‌توان بعدها برای تبدیل هر داده‌ای به خروجی استفاده کرد (ندیک و همکاران، ۲۰۱۴). بسته به اینکه شبکه به چه صورت آموزش می‌یابد، شبکه‌های عصبی به دو دسته شبکه‌های پیش‌انتشار و پس‌انتشار تقسیم‌بندی می‌شوند. در این تحقیق، از شبکه عصبی پرسپترون چندلایه - یکی از پرکاربردترین شبکه‌های پس‌انتشار - استفاده شده است. این شبکه نیز مانند شبکه‌های دیگر شامل سه لایه ورودی، پنهان، و خروجی است که با بهینه‌سازی مقادیر وزن و بایاس شبکه نهایی شکل می‌گیرد.

در این تحقیق، با توجه به اینکه زلزله در زمان‌های مختلف سال رخ داده است، از اختلاف دمای هر پیکسل در لایه‌های مختلف از گسل با پیکسل بی‌هنجاری تشخیص داده شده در هر زلزله به عنوان داده آموزشی استفاده شده است تا تأثیرات اختلافات دمایی در شبکه به حداقل برسد. همچنین، ذکر این نکته لازم است که همه داده‌های حرارتی استفاده شده مربوط به سی روز قبل از وقوع زلزله است و از داده‌های حرارتی بعد از زلزله در امر مدل‌سازی استفاده نشده است.

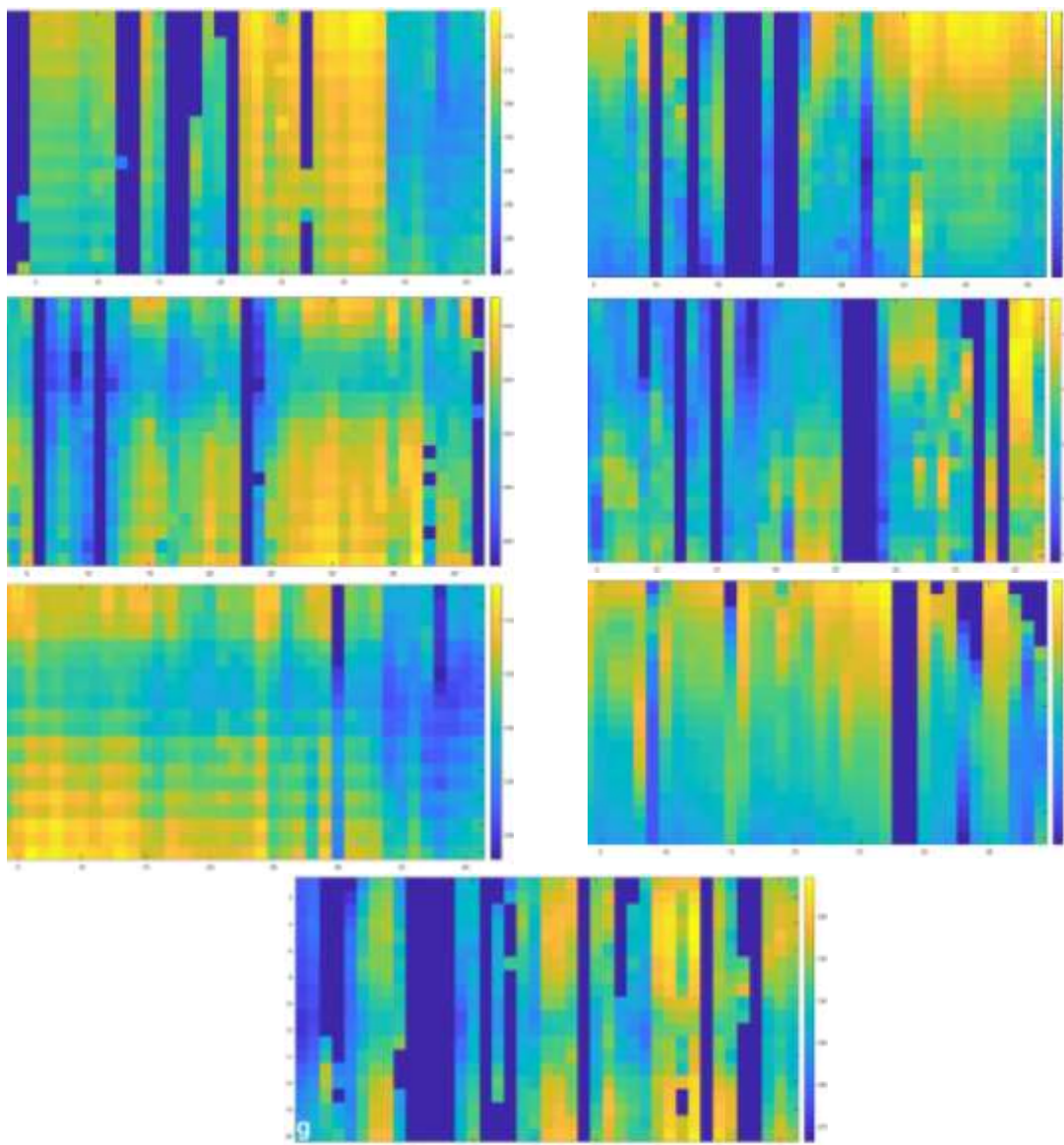
یافته‌های پژوهش

تصویر سه‌بعدی زمان - مکان - دما

با توجه به توضیحات ارائه شده، نخست داده‌های حرارتی بعد از جمع‌آوری وارد مرحله پیش‌پردازش شده و نویزهای حرارتی که مربوط به تغییرات فصلی بوده با استفاده از مدل‌سازی خطی آن‌ها و با توجه به داده‌های سال گذشته از داده‌های اصلی حذف شده است. همچنین، با مطالعات انجام شده روی گسل‌های موجود در هر منطقه، گسل‌های فعالی که بیشترین احتمال را در ارتباط با فعالیت زمین‌لرزشی داشتند شناسایی شده‌اند. با در اختیار داشتن اطلاعات به دست آمده، تصویر فاصله از هر گسل برای هر زلزله ساخته شده است. با در دست داشتن داده‌های مورد نیاز برای هر زلزله، می‌توان آن‌ها را به گونه‌ای که در بخش قبل توضیح داده شد سازمان‌دهی و آن‌ها را به عنوان ورودی وارد الگوریتم‌های شناسایی بی‌هنجاری کرد. شکل ۴ تصاویر ساخته شده برای هر یک از هفت زلزله را نشان می‌دهد. در این تصاویر، دمای سطح زمین در شعاع‌های مختلف ۱ الی ۲۰ کیلومتری از گسل در هر روز از بازه زمانی مورد نظر قابل مشاهده است.

ذکر این نکته لازم است که بازه زمانی از سی روز قبل از روز وقوع زلزله آغاز می‌شود. بنابراین، روز زلزله در این تصاویر مربوط به پیکسل‌های ستون ۳۱م است. همان‌گونه که در بخش قبل توضیح داده شد، در این تصاویر شماره ردیف معادل فاصله لایه مورد نظر از گسل است. بنابراین، پیکسل‌های ردیف اول یعنی پیکسل‌های بالای تصویر مربوط به نزدیک‌ترین لایه به گسل اند و هر چه به سمت پایین تصویر حرکت کنیم فاصله لایه از گسل بیشتر می‌شود.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، دمای سطح زمین در اغلب زلزله‌ها در اطراف گسل دارای مقدار بیشتری نسبت به مناطق دورتر از گسل‌اند. همچنین، حتی به صورت بصری نیز می‌توان به وضوح مشاهده کرد که دمای سطح زمین در روز زلزله در نزدیک‌ترین فاصله به گسل مقدار بسیار بالایی دارد و انتظار می‌رود در روش‌های شناسایی بی‌هنجاری به‌عنوان یکی از آن‌ها شناخته شود. در هر تصویر، هر ستون معرف یک روز، هر ردیف فاصله بر حسب کیلومتر، و درجه خاکستری هر پیکسل دما بر حسب کلون است.



شکل ۴. تصاویر ایجادشده با سازمان‌دهی داده‌ها به‌عنوان ورودی الگوریتم‌های شناسایی بی‌هنجاری برای زلزله‌های به‌ترتیب (a) از گله، (b) گوهران، (c) سراوان، (d) شنبه، (e) فهرج، (f) بروجرد، (g) ساری

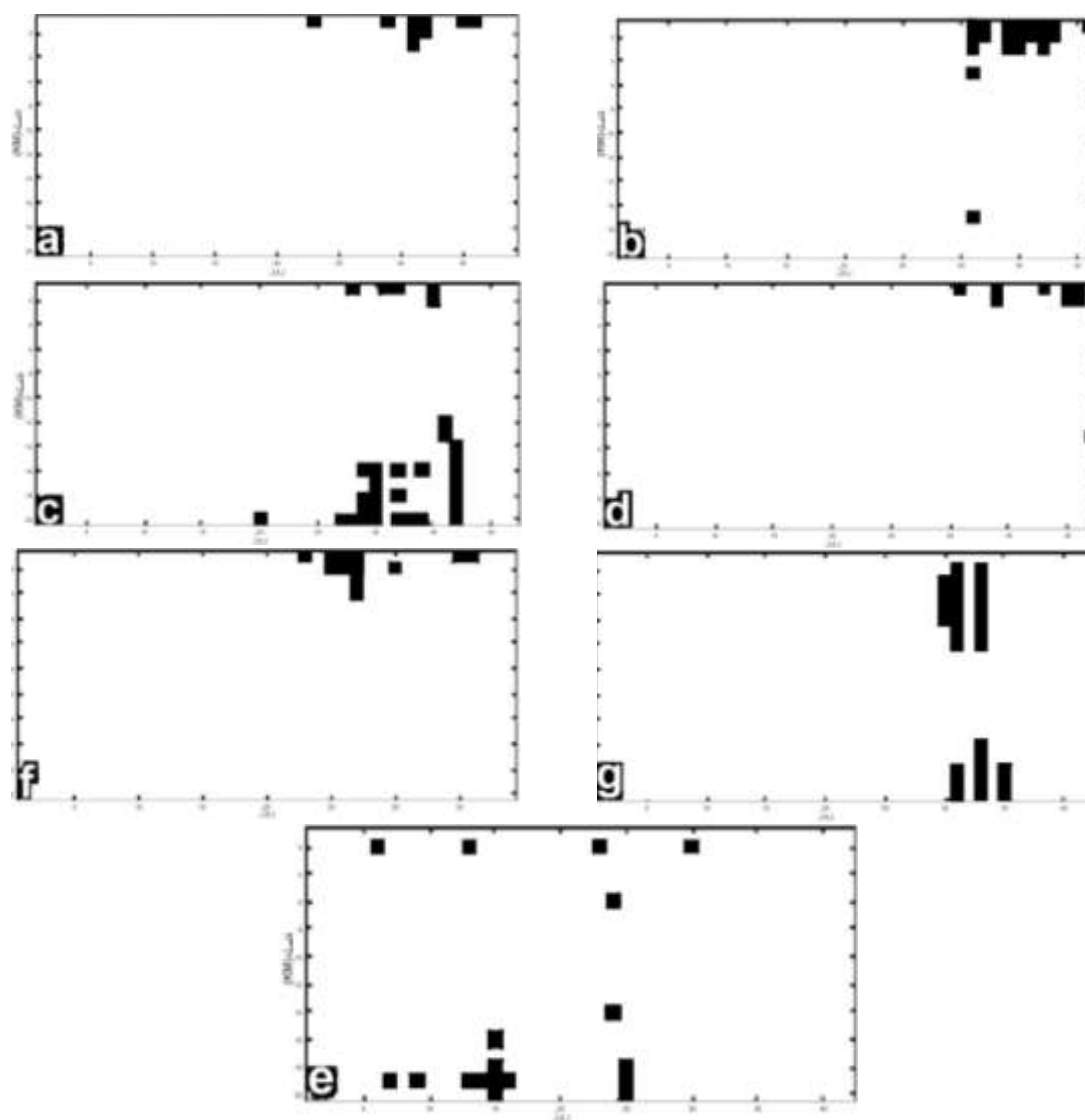
نتایج روش‌های تشخیص بی‌هنجاری

الگوریتم شناسایی بی‌هنجاری میانگین - انحراف معیار در همه زلزله‌ها یک بی‌هنجاری در فاصله نزدیک به گسل در روز زلزله تشخیص داده است. ولی این الگوریتم بی‌هنجاری‌های متعدد دیگری را نیز در روزهای غیر از زلزله تشخیص داده است که باعث پایین آمدن دقت مدل‌سازی می‌شود. به همین دلیل از نتایج روش چارکی در ادامه کار استفاده شده است.

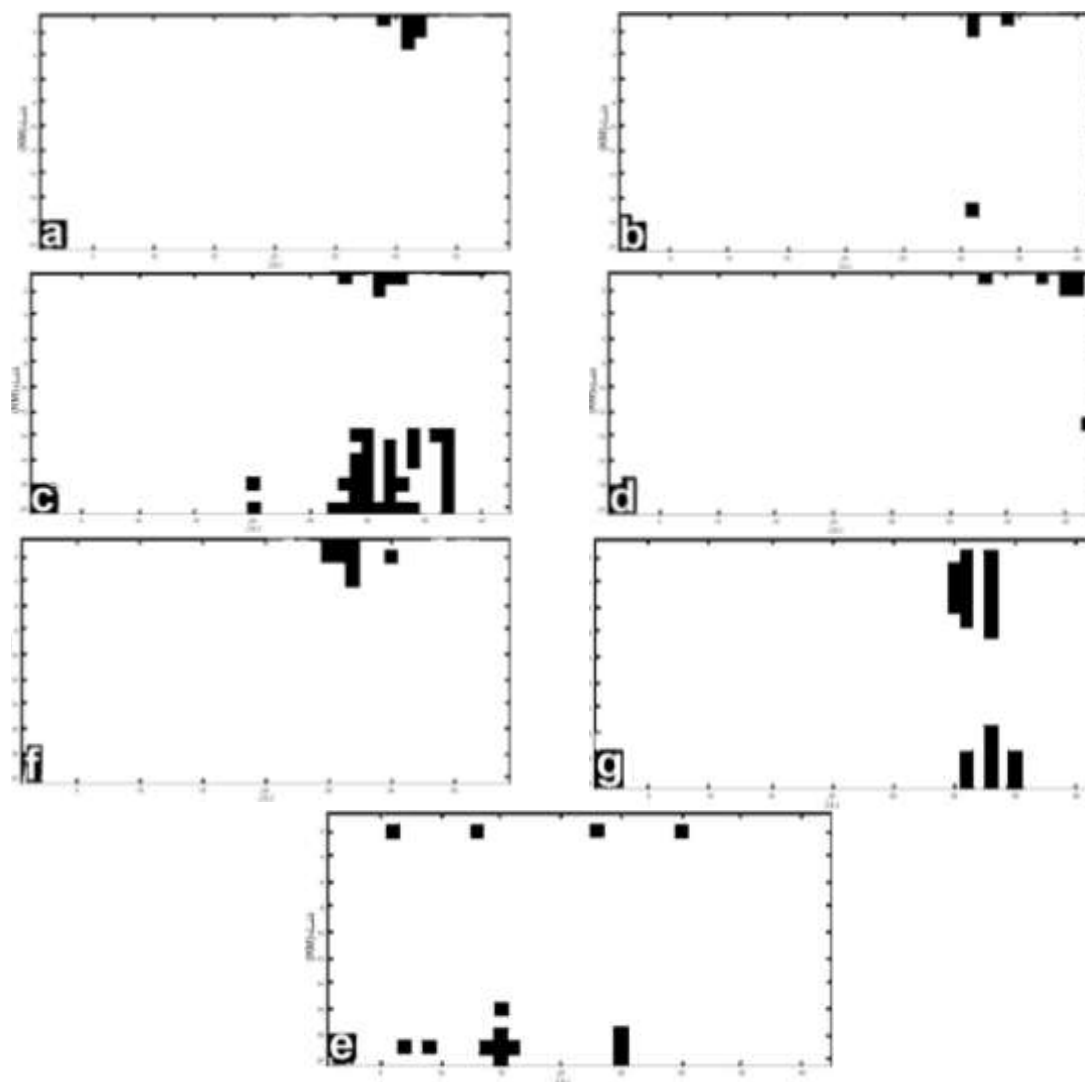
شکل ۵ نتایج الگوریتم میانگین - انحراف معیار را نشان می‌دهد. در زلزله‌های ازگله، شنبه، و بروجرد پیکسل‌هایی هم قبل و هم بعد از زلزله به‌عنوان بی‌هنجاری شناسایی شده‌اند. در زلزله ازگله هشت روز قبل و شش روز بعد از زلزله، در زلزله شنبه پنج روز قبل و هشت روز بعد از زلزله و در زلزله بروجرد نیز پنج روز قبل و هشت روز بعد از زلزله پیکسل‌هایی هستند که به‌عنوان بی‌هنجاری شناخته شده‌اند. در زلزله شنبه بی‌هنجاری شناخته شده بعد از زلزله شدت بیشتری نسبت به بی‌هنجاری تشخیص داده شده برای روز زلزله است. در مورد زلزله گوهران تعدادی پیکسل مربوط به چهار تا هفت روز بعد از زلزله به‌عنوان بی‌هنجاری شناخته شده است. در زلزله سراوان چهار و شش روز قبل از زلزله و در زلزله فهرج شش، هفده، و بیست و یک روز قبل از زلزله به‌عنوان بی‌هنجاری شناخته شده که زلزله فهرج را در پایین‌ترین سطح دقت این الگوریتم قرار می‌دهد. در زلزله ساری بی‌هنجاری تشخیص داده شده فقط در روز زلزله تشخیص داده شده است، ولی برخلاف بقیه بی‌هنجاری‌های تشخیص داده شده این بی‌هنجاری مربوط به پیکسل نزدیک‌ترین فاصله به گسل نیست و در شعاع ۴ کیلومتری از گسل این بی‌هنجاری بیشینه شدت خود را نشان می‌دهد.

ذکر این نکته لازم است که به‌طور قطع نمی‌توان درباره بی‌هنجاری‌های تشخیص داده شده بعد از شعاع ۱۵ کیلومتر در ارتباط با زلزله صحبت کرد. ولی با توجه به اینکه بی‌هنجاری‌های شناسایی شده در فواصل نزدیک به گسل از اطمینان بالاتری و همچنین دقت بهتری در امر مدل‌سازی برخوردار است، از کاربرد بی‌هنجاری‌های بعد از شعاع ۱۵ کیلومتر در مدل‌سازی صرف‌نظر شده است. استفاده نکردن از پیکسل‌هایی که در فاصله زیاد از گسل قرار دارند باعث می‌شود دقت الگوریتم‌های تشخیص بی‌هنجاری پایین آید. به همین دلیل، با وجودی که از این داده‌ها به‌عنوان ورودی در الگوریتم‌های تشخیص بی‌هنجاری استفاده می‌شود، وزن آن‌ها نسبت به بقیه داده‌ها کمتر است و از پیکسل‌های بی‌هنجاری تشخیص داده شده در این ناحیه‌ها صرف‌نظر می‌شود.

شکل ۶ نتایج الگوریتم چارکی را نشان می‌دهد. الگوریتم شناسایی بی‌هنجاری چارکی نیز همانند روش قبل در همه زلزله‌ها یک بی‌هنجاری در فاصله نزدیک به گسل در روز زلزله تشخیص داده است. ولی این الگوریتم در مقایسه با روش قبل بی‌هنجاری‌های کمتر دیگری را در روزهای غیر از زلزله نیز تشخیص داده است که دقت این الگوریتم را نسبت به روش میانگین - انحراف معیار بهتر می‌کند. نتایج این الگوریتم تشخیص بی‌هنجاری نشان می‌دهد در بیشتر زلزله‌ها بی‌هنجاری تشخیص داده شده (به استثنای زلزله‌های شنبه و فهرج) فقط مربوط به زلزله است. در زلزله شنبه یک بی‌هنجاری در هشت روز بعد از زلزله با شدت نسبتاً بالایی تشخیص داده شده و در زلزله فهرج که مانند الگوریتم میانگین - انحراف معیار شش، هفده، و بیست و یک روز قبل از زلزله به‌عنوان بی‌هنجاری شناخته شده است در بقیه زلزله‌ها بی‌هنجاری تشخیص داده شده با دقت خوبی صحیح بوده است. نتایج در مورد زلزله ساری مشابه الگوریتم میانگین - انحراف معیار است و بی‌هنجاری‌های تشخیص داده شده مربوط به پیکسل نزدیک‌ترین فاصله به گسل نیست و در شعاع ۴ کیلومتری از گسل بیشینه شدت خود را نشان می‌دهد.



شکل ۵. نتایج الگوریتم شناسایی بی‌هنجاری میانگین - انحراف معیار برای زلزله‌های به ترتیب (a) ازگله، (b) گوهران، (c) سراوان، (d) شنبه، (e) فهرج، (f) بروجرد، (g) ساری



شکل ۶. نتایج الگوریتم شناسایی بی‌هنجاری چارکی برای زلزله‌های به ترتیب (a) ازگله، (b) گوهران، (c) سراوان، (d) شنبه، (e) فهرج، (f) بروجرد، (g) ساری

پارامتر شدت زلزله

در پایان، پارامتر شدت زلزله برای هر زلزله مدل‌سازی و محاسبه شده است. شدت زلزله بر حسب ریشتر برآورد شده و نمایانگر شدت زلزله‌ای است که می‌تواند بی‌هنجاری تشخیص داده شده در نزدیکی گسل را باعث شود. داده‌های ورودی و آموزشی شبکه عصبی برای مدل‌سازی پارامتر شدت زلزله اختلاف میانگین دمای سطح در شعاع‌های مختلف اطراف گسل در هر روز نسبت به میانگین دمای سطح مربوط به ناهنجاری حرارتی تشخیص داده شده برای هر زلزله‌اند. این پارامترها به گونه‌ای تعریف شده‌اند که در شعاع‌های مختلف و روزهای متفاوت تأثیر خود را به خوبی در آموزش شبکه داشته باشند. میانگین دمایی در روز زلزله در هر شعاع پارامتر مجزایی را تشکیل می‌دهد تا اگر برای مثال میانگین دما در روز زلزله هم در قسمت بی‌هنجاری و هم شعاع‌های دیگر بالا بود شدت مدل‌سازی پایین برآورد شود، زیرا بالا بودن میانگین دمای سطح در آن روز دلیلی به غیر از بالا بودن شدت زلزله داشته و ممکن است فقط دما در این روز از سال بالا بوده است. دقت هر شدت بر اساس مقدار واقعی آن، که مقدار مشخصی دارد و قبلاً ثبت شده، محاسبه شده است.

برآورد پارامتر شدت زلزله در منطقه گسل با استفاده از داده‌های حرارتی سنجش از دور
 Error! Reference source not found. جدول ۲ پارامتر شدت زلزله به همراه دقت مربوط به هر یک را نشان می‌دهد.

جدول ۲. زلزله‌های مورد بررسی و پارامترهای مرتبط به آن‌ها

نام زلزله	شدت برآوردشده زلزله (MS)	دقت برآوردشده براساس مقدار واقعی
ازگله	۷,۳۰۱	۰,۰۰۱
گوهران	۶,۳۰۲	۰,۱۰۲
سراوان	۷,۷۱۹	۰,۰۸۱
شنبه	۶,۲۹	۰,۰۱
فهرج	۶,۶۵۳	۰,۱۵۳
بروجرد	۶,۲۸	۰,۰۲
ساری	۶,۲۴۵	۰,۱۴۵

همان‌گونه که توضیح داده شد، به دلیل دقت بالاتر روش تشخیص بی‌هنجاری چارکی در امر مدل‌سازی، از نتایج و بی‌هنجاری‌های تشخیص‌داده‌شده با آن برای آموزش شبکه عصبی و ساخت مدل مورد نظر استفاده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بهترین دقت مربوط به زلزله ازگله و پایین‌ترین آن مربوط به زلزله فهرج است. با توجه به محدود بودن تعداد زلزله‌ها یعنی هفت مورد زلزله مورد بررسی، مدل‌سازی شبکه عصبی با مشکلاتی همراه است. ولی متقابلاً تعداد داده‌ها و پارامترهای ورودی شبکه عصبی برای هر زلزله کافی است و می‌توان با پارامتربندی مناسب صورت گرفته در ساخت شبکه عصبی مورد نظر به منظور مدل‌سازی پارامتر شدت زلزله به دقت خوبی دست یافت.

مقایسه با نتایج سایر تحقیقات

یکی از تحقیقاتی که در سال ۲۰۲۰ سه زلزله گوهران، سراوان، و بروجرد را بررسی کرد مربوط به مقاله نکویی می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد بی‌هنجاری‌های حرارتی در زلزله سراوان پنج روز قبل از زلزله قابل مشاهده بوده است. این در حالی است که در مورد زلزله گوهران این عدد به ۱۳ و در رابطه با زلزله بروجرد به شش روز می‌رسد. این بی‌هنجاری‌های حرارتی رینجی در حدود ۵ تا ۷ درجه کلون را نشان می‌دهند. با وجود اینکه بی‌هنجاری‌های تشخیص‌داده‌شده در تحقیق ذکرشده شدت بالاتری نسبت به بی‌هنجاری‌های تشخیص‌داده‌شده در این تحقیق دارد، بی‌هنجاری‌های تشخیص‌داده‌شده در روزهای متفاوتی پیش از زلزله مشاهده شده است که از الگوی خاصی پیروی نمی‌کنند. به همین دلیل، نمی‌توان از زمان زلزله اطلاعاتی به دست آورد. نکته دیگری که باید در مقایسه این تحقیقات در نظر گرفته شود این است که نکویی در تحقیق خود بی‌هنجاری‌های حرارتی را در اطراف مرکز زلزله بررسی کرده است؛ این در حالی است که در این تحقیق بی‌هنجاری‌های حرارتی در اطراف گسل بررسی شده است که می‌تواند دلیل پایین تر بودن شدت بی‌هنجاری‌های تشخیص‌داده‌شده باشد.

بحث و نتیجه گیری

همان‌گونه که در تحقیقات پیشین و این تحقیق نشان داده شد، تغییر حرارت سطح زمین یکی از قوی‌ترین پیش‌نشانگرها در مورد پدیده زلزله با توجه به حجم پایین داده‌ها و همچنین ساده بودن بسیاری از الگوریتم‌های مورد استفاده برای تحلیل آن است. در این تحقیق به جای استفاده از نمودار دو بُعدی زمان-دما که در اغلب تحقیقات از آن استفاده می‌شود، داده‌ها در نمودار سه بُعدی زمان-دما-فاصله به صورتی سازمان‌دهی شده است که بر اساس آن نمودار دمای سطح زمین در یک روز از بازه زمانی مورد نظر در شعاع مشخص مقداردهی می‌شود. نمودار سه بُعدی بی‌هنجاری‌های حرارتی را نسبت به نمودار دو بُعدی بهتر نشان می‌دهد؛ حتی در بسیاری از موارد به صورت بصری نیز این ناهنجاری‌ها قابل رؤیت‌اند. ولی نکته مهم‌تر این است که در نمودار دو بُعدی تعداد زیادی بی‌هنجاری حرارتی شناخته‌شده مربوط به

زلزله نیستند. این در حالی است که در روش پیشنهادی، تشخیص این موارد به‌عنوان بی‌هنجاری‌ها توسط الگوریتم‌ها به‌شدت کاهش یافته و دقت را به‌صورت قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. همچنین، استفاده از نمودار دوبُعدی ملزم به آن است که مرکز زلزله مشخص باشد. بنابراین، بررسی زلزله‌ها فقط بعد از رخ‌دادن زلزله انجام‌شدنی است. این در حالی است که نمودار سه‌بُعدی - که مبنای فاصله آن گسل مربوطه است - می‌تواند روی هر گسلی که پتانسیل بالایی برای زلزله دارد - اعمال شود. بنابراین، استفاده از این روش می‌تواند به درک بهتر این پدیده و حتی پیش‌بینی بهتر آن کمک فراوانی کند.

نکته‌ای که درباره استفاده از گسل مربوطه و تصویر فاصله از گسل باید به آن توجه کرد این است که گسل‌های فعال موجود، که بررسی می‌شوند، خود منطقه بزرگی را شامل می‌شوند و بزرگی آن‌ها بعضاً به ۱۰۰ کیلومتر نیز می‌رسد. این موضوع باعث می‌شود که در تصویر فاصله از گسل پیکسل‌هایی که در یک شعاع قرار می‌گیرند بسته به طول گسل فاصله بسیار زیادی از هم داشته باشند و نوع پوششی که پیکسل آن‌ها را شامل می‌شود متفاوت باشد. بنابراین، در بعضی موارد، در شعاع‌های دور از گسل پیکسل‌ها ممکن است از پوشش‌های متفاوتی تشکیل شده باشند که این پوشش‌ها به‌شدت در درجه حرارت آن‌ها تأثیر می‌گذارد. با وجود اینکه این تفاوت درجه حرارت جزو ناهنجاری حرارتی مربوط به زلزله شناسایی نمی‌شود، روی خود الگوریتم‌های تشخیص بی‌هنجاری تأثیر می‌گذارد و ممکن است باعث پایین‌آمدن دقت مورد نظر شود.

در این تحقیق از دو روش تشخیص بی‌هنجاری میانگین - انحراف‌معیار و چارکی استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد هرچند هر دو روش تشخیص بی‌هنجاری حرارتی بی‌هنجاری حرارتی مربوط به هر زلزله را در روز زلزله در شعاع نزدیک به گسل شناسایی کرده‌اند، روش میانگین - انحراف‌معیار نسبت به روش چارکی بی‌هنجاری‌های حرارتی در روزهایی به غیر از روز زلزله بیشتری را شناسایی کرده است. با توجه به اینکه این ناهنجاری‌ها در هر زلزله متفاوت است، نتایج روش تشخیص بی‌هنجاری چارکی نسبت به روش میانگین - انحراف‌معیار به‌عنوان ورودی مدل‌سازی بهتر بود و در این تحقیق از نتایج این روش استفاده شد.

در این پژوهش پارامتر شدت زلزله مدل‌سازی و برآورد شد. نتایج مدل‌سازی نیز نشان می‌دهد پارامتر شدت زلزله، که با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی انجام شد، با دقت کلی ۰/۷۳ برآورد شده است. با وجود اینکه تعداد زلزله‌های مورد بررسی برای آموزش شبکه عصبی نسبتاً کم بوده است، داشتن تعداد داده فراوان در مورد هر زلزله دقت کافی را فراهم کرده است. ذکر این نکته لازم است که بخش مهمی از فرایند مدل‌سازی وابسته به نتایج الگوریتم‌های تشخیص بی‌هنجاری و دقت خروجی آن‌هاست، زیرا در مدل‌سازی‌های صورت‌گرفته برای آموزش شبکه عصبی به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم از شدت ناهنجاری‌های شناسایی شده استفاده شده است.

در پایان، ذکر این نکته لازم است که پیش‌نشانگر تغییرات دمای سطح و ناهنجاری‌های حرارتی به‌تنهایی نمی‌تواند برای بررسی کامل پارامترهای زلزله کافی باشد و دقت لازم را برای تحلیل زلزله داشته باشد. ولی با توجه به حجم پایین داده‌های حرارتی و سادگی کار با آن‌ها، توصیه می‌شود از آن‌ها برای بررسی‌های مقدماتی زمین‌لرزه استفاده شود و در صورت تأیید نسبی آن برای تحلیل‌های بیشتر از روش‌ها و پیش‌نشانگرهای دیگر - که نیازمند اعمال الگوریتم‌ها و پردازش‌های سنگین و پیچیده است - استفاده شود. همچنین، می‌توان از ترکیب این پیش‌نشانگر با پیش‌نشانگرهای ساده دیگر برای رسیدن به دقت قابل قبول و معتبر استفاده کرد.

منابع

- Akhoondzadeh, M. (2012). Anomalous TEC variations associated with the powerful Tohoku earthquake of 11 March 2011, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 12, no. 5, p. 1453.
- Akhoondzadeh, M. (2014). Thermal and TEC anomalies detection using an intelligent hybrid system around the time of the Saravan, Iran, (Mw= 7.7) earthquake of 16 April 2013, *Advances in Space Research*, vol. 53, no. 4, pp. 647-655.
- Asiltürk, I. and Çunkaş, M. (2011). Modeling and prediction of surface roughness in turning operations using artificial neural network and multiple regression method, *Expert systems with applications*, vol. 38, no. 5, pp. 5826-5832.
- Belayneh, A.; Adamowski, J.; Khalil, B. and Ozga-Zielinski, B. (2014). Long-term SPI drought forecasting in the Awash River Basin in Ethiopia using wavelet neural network and wavelet support vector regression models, *Journal of Hydrology*, vol. 508, pp. 418-429.
- Console, R.; Pantosti, D. and D'Addezio, G. (2002). Probabilistic approach to earthquake prediction, *Annals of Geophysics*, vol. 45, no. 6.
- Freund, F. *et al.* (2005). Enhanced mid-infrared emission from igneous rocks under stress, 2005, in *Geophys Res Abstr*, vol. 7, p. 09568.
- Geller, R. J.; Jackson, D. D.; Kagan, Y. Y. and Mulargia, F. (1997). Earthquakes cannot be predicted, *Science*, vol. 275, no. 5306, pp. 1616-1616.
- Goh, A. T. (1995). Back-propagation neural networks for modeling complex systems, *Artificial Intelligence in Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 143-151.
- Marano, K. D.; D. J. Wald, and Allen, T. I. (2010). Global earthquake casualties due to secondary effects: a quantitative analysis for improving rapid loss analyses, *Natural hazards*, vol. 5, no. 2, pp. 319-328.
- Miikkulainen, R. (2010). Topology of a neural network, *Encyclopedia of Machine Learning*, pp. 988-989.
- Nedic, V.; Despotovic, D.; Cvetanovic, S.; Despotovic, M. and Babic, S. (2014). Comparison of classical statistical methods and artificial neural network in traffic noise prediction, *Environmental Impact Assessment Review*, no.49, pp. 24-30.
- Nekoe, M. and Shah-Hosseini, R. (2020). Thermal anomaly detection using NARX neural network method to estimate the earthquake occurrence time. *Earth Observation and Geomatics Engineering*, 4(2): 98-108.
- Ouzounov, D. and Freund, F. (2004). Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data, *Advances in space research*, vol. 33, no. 3, pp. 268-273.
- Park, D. C.; El-Sharkawi, M.; Marks, R.; Atlas, L. and Damborg, M. (1991). Electric load forecasting using an artificial neural network, *IEEE transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 2, pp. 442-449.
- Qiang, Z.-j.; X.-d. Xu and Dian, C.-g. (1997). Case 27 thermal infrared anomaly precursor of impending earthquakes, *Pure and Applied Geophysics*, vol. 149, no. 1, pp. 159-171.
- Qiang, Z. *et al.* (1999). Atellitic thermal infrared brightness temperature anomaly image-short-term and impending earthquake precursors, *Science in China series D: Earth Sciences*, vol. 42, no. 3, pp. 313-324.

- Sahoo, S.; Dhar, A. and Kar, A. (2016). Environmental vulnerability assessment using Grey Analytic Hierarchy Process based model, *Environmental Impact Assessment Review*, no. 56, pp. 145-154.
- Saradjian, M. R. and Akhoondzadeh, M. (2001). Thermal anomalies detection before strong earthquakes ($M > 6.0$) using interquartile, wavelet and Kalman filter methods, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 11, no. 4, p. 1099.
- 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 satellites, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 11, no. 6, pp. 373-379.
- Saraf, A. K. *et al.* (2008). Satellite detection of earthquake thermal infrared precursors in Iran, *Natural Hazards*, vol. 47, no. 1, pp. 119-135.
- Tramutoli, V. (1998). Robust AVHRR Techniques (RAT) for environmental monitoring: theory and applications, in *Earth surface remote sensing II*, vol. 3496, pp. 101-113: International Society for Optics and Photonics.
- Wyss, M. (1991). Evaluation of proposed earthquake precursors, *Eos*, Transactions American Geophysical Union, vol. 72, no. 38, pp. 411-411.