

بررسی پیش‌نشانگری سیگنال‌های VLF در یافتی در گیرنده مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

صبا نظری^۱، مهدی رضاپور^{۲*} و سمیه صبری^۳

^۱ دانش آموخته کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ استاد، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۳ استادیار، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵)

چکیده

پیش‌بینی کوتاه‌مدت زمین‌لرزه که اطلاعاتی در مورد زمان، بزرگا و مکان رخداد به دست می‌دهد، یکی از اقدامات مهم در جهت کاهش اثرات مخرب زمین‌لرزه و تأمین امنیت عمومی است. در کشورهای لرزه‌خیز مانند ایران، توجه به پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه و ثبت و بررسی آن‌ها، دارای اولویت بالایی برای محققان این زمینه است. این پیش‌نشانگرها شامل پدیدار شدن تغییرات فیزیکی یا شیمیایی قابل توجه در زمان‌های قبل از وقوع زمین‌لرزه هستند. یکی از این تغییرات، مشاهده بی‌هنجاری‌هایی در سیگنال‌های رادیویی VLF/LF است که در مرز پایینی یونوسفر در حال عبور هستند. همچنین ایجاد نوفه‌های رادیویی غیرعادی در یونوسفر، قبل از وقوع زمین‌لرزه‌های مهم بزرگ در چندین کشور و در سال‌های مختلف شناسایی شده‌اند. در این مقاله، پیش‌نشانگری سیگنال‌های VLF دریافت‌شده در گیرنده مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و اثرات ناشی از زمین‌لرزه رخ داده در خوی به بزرگی $M=5/9$ در تاریخ ۱۴۰۱/۱۱/۰۸، مورد بررسی و راستی‌آزمایی قرار گرفته است. چند روز قبل از وقوع زمین‌لرزه، بی‌هنجاری‌های قابل مشاهده‌ای در سیگنال‌های VLF عبوری از بالای رومرکز این زمین‌لرزه تشخیص داده شدند که با بررسی سایر عوامل غیرلرزه‌ای مختلف مؤثر بر سیگنال از جمله اختلالات هواشناسی مثل رعدوبرق، فعالیت‌های خورشیدی و طوفان‌های ژئومغناطیسی و اعمال فیلتر و هموارسازی داده‌ها، مشخص شد که این بی‌هنجاری در سیگنال VLF می‌تواند به‌عنوان پیش‌نشانگر زمین‌لرزه خوی در نظر گرفته شود.

کلمه‌های کلیدی: پیش‌نشانگر، خوی، زمین‌لرزه، سیگنال‌های VLF

۱ مقدمه

پیش‌بینی زمین‌لرزه به شرطی که زمان، اندازه و محل یک رخداد قریب‌الوقوع لرزه‌ای را مشخص سازد، می‌تواند یکی از اقدامات اصلی و مهم در جهت کاهش تأثیرات مخرب زمین‌لرزه باشد. عموماً مناطق فعال زمین‌لرزه در جهان، از نشانه‌هایی قبل از وقوع رخداد‌های مهم لرزه‌ای سخن می‌گویند. پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه مجموعه‌ای از نشانه‌های فیزیکی یا شیمیایی هستند که در زمان‌های قبل از وقوع پدیدار و یا تغییرات قابل توجهی در آن‌ها ایجاد می‌گردد؛ از جمله می‌توان به دگرشکلی‌های سطح و پوسته زمین، تغییر سطح آب‌های زیرزمینی، تغییر در دما و مقدار گاز رادون در منطقه، تغییر دبی چشمه‌ها، بی‌هنجاری‌ها و نوسانات میدان الکتریکی و مغناطیسی، تغییر در مقدار و چگالی الکترون در لایه یونوسفر و مواردی از این دست اشاره کرد. در راستای کنترل این تغییرات و دسترسی به معیارهایی برای پیش‌بینی زمین‌لرزه، تحقیقات بسیار گسترده‌ای در سال‌های اخیر انجام گرفته و یا در حال انجام است.

پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت زمین‌لرزه می‌تواند اطلاعات ویژه‌ای در مورد زمان و مکان یک زمین‌لرزه در چند روز، چند هفته یا چند ماه آینده را فراهم سازد (هایاکاوا و هوبارا، ۲۰۱۰) و در جهت تأمین امنیت عمومی مفید واقع شود. به همین دلیل مطالعه در این زمینه، اولویت بالایی را برای کشورهای لرزه‌خیزی چون ایران دارد. در طول دهه‌های اخیر، تحقیقاتی در زمینه تعامل بین فعالیت‌های لرزه‌ای و اختلال در سیگنال‌های رادیویی انجام شده و پیشرفت‌های زیادی در بررسی آشفتگی‌های امواج رادیویی و استفاده از آن به‌عنوان یک شاخص پیش‌نشانگری داشته است.

حوزه علمی لرزه-الکترومغناطیس با هدف مطالعه و تحلیل این نوع سیگنال‌ها به‌منظور پیش‌بینی کوتاه‌مدت زمین‌لرزه‌ها تعریف شده است. این حوزه علمی ارزشمند و

چالش‌برانگیز، به‌عنوان یک گزینه امیدبخش برای کاهش خسارات اقتصادی و تلفات جانی زمین‌لرزه در کشورهای لرزه‌خیز، از اهمیت بالایی برخوردار است. در طول سالیان اخیر، نوفه‌های رادیویی غیرمعمول در هفته‌ها، ساعت‌ها و روزهای قبل از وقوع زمین‌لرزه شناسایی شده‌اند و پژوهشگران و کارشناسان در جوامع علمی، به‌طور منظم بررسی و تجزیه و تحلیل ارتباط این پدیده‌ها با زمین‌لرزه‌ها را آغاز کرده‌اند. آشفتگی‌های یونوسفری و اثرات الکترومغناطیسی ظاهر شده پیش از زمین‌لرزه‌های بزرگ در نزدیکی محل رومرکز آن‌ها، با اثرات میکروسکوپی لیتوسفر مثل افزایش فشار در نواحی شکستگی پوسته ارتباط دارند. این اثرات الکترومغناطیسی بسته به محیط انتشار فرکانس موج، در فواصل قابل ملاحظه‌ای در لیتوسفر انتشار می‌یابند. برخی از سیگنال‌ها مستقیماً از اعماق پوسته زمین منتشر می‌شوند؛ برخی در حد فاصل سطح زمین و اتمسفر به وجود می‌آیند و برخی دیگر به یونوسفر اشاره دارند. اثرات الکترومغناطیسی زمین‌لرزه که از فعالیت‌های میکروسکوپی در لیتوسفر ناشی می‌شوند، عمدتاً پیش از رویداد لرزه‌ای ظاهر شده و می‌توانند از طریق سیگنال‌های کم‌فرکانس رادیویی در یونوسفر تحتانی منعکس شوند و در فواصل قابل توجهی انتشار یابند.

گزارش‌های علمی برخی تغییرات غیرعادی پیش‌لرزه‌ای در جو و یونوسفر را نشان می‌دهند که ممکن است به‌عنوان پیش‌نشانگرهای بالقوه زمین‌لرزه در نظر گرفته شوند (آخوندزاده و همکاران، ۲۰۱۹)؛ البته اندازه‌گیری‌های جوی و یونوسفری امواج پیش‌لرزه، اغلب در نوفه پس‌زمینه پنهان می‌شوند. این آشفتگی‌ها در واقع بسیار ضعیف هستند و بین آن‌ها همپوشانی‌هایی وجود دارد که ممکن است مربوط به زمین‌لرزه‌ها نباشند، مثلاً بی‌هنجاری‌هایی در انتشار سیگنال‌های رادیویی VLF/LF که ناشی از شرایط موقت هواشناسی از جمله فعالیت‌های کوتاه‌مدت رعدوبرق هستند. همچنین در برهمکنش بین

فعالیت‌های لرزه‌ای منتشر شده است. مطالعات موردی زمین‌لرزه‌های بزرگ مختلف برای بررسی ویژگی‌های زمانی و مکانی آشفستگی‌های لرزه‌ای-یونوسفری، برای پیشرفت در زمینه پیش‌بینی کوتاه مدت زمین‌لرزه و کاهش فاجعه در کشورهای لرزه‌خیز اهمیت حیاتی دارند.

در ایران نیز مطالعاتی در خصوص آشفستگی سیگنال‌های VLF/LF در اثر وقوع زمین‌لرزه صورت گرفته است (الهی سرشت و رضاپور، ۱۳۹۹؛ صفری و همکاران، ۱۴۰۰؛ نظری، ۱۴۰۳؛ معیری منش و همکاران، ۲۰۲۴). مرکز مطالعات پیش‌نشانگری زمین‌لرزه مؤسسه ژئوفیزیک در چند سال اخیر اقدام به نصب گیرنده امواج VLF/LF کرده که در حال حاضر چند ایستگاه در مرکز شبکه‌های لرزه‌نگاری استانی و یک ایستگاه در محل مؤسسه ژئوفیزیک فعال است. در زمان وقوع زمین‌لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱ شهرستان خوی، تنها ایستگاه واقع در ساختمان شماره ۲ مؤسسه ژئوفیزیک فعال بود و امواج دریافتی از ده فرستنده (پنج فرستنده موج VLF و پنج فرستنده موج LF) را ثبت کرده است. هدف از این تحقیق بررسی بی‌هنجاری‌ها و تغییرات سیگنال‌های رادیویی VLF/LF دریافت شده در ایستگاه گیرنده مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران برای یافتن ارتباط آن با زمین‌لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱ خوی، به‌عنوان یکی از روش‌های پیش‌نشانگر زمین‌لرزه است.

۲ روش پژوهش

برای مشاهده و مطالعه اثرات لرزه-الکترومغناطیسی، دو روش اصلی وجود دارد:

الف) اندازه‌گیری مستقیم تشعشعات الکترومغناطیسی از لیتوسفر توسط رصدخانه‌های مغناطیسی مجهز به دستگاه‌های با حساسیت بالا و با پوشش کافی که احداث چنین رصدخانه‌هایی به این تعداد در نزدیکی رومرکز زمین‌لرزه‌ها، صرف هزینه زیادی را می‌طلبد.

فعالیت‌های ژئومغناطیسی خورشیدی و میدان مغناطیسی زمین، یونوسفر به‌عنوان لایه محافظ اصلی زمین، درست در داخل مگنتوسفر است. در عین حال، تغییرات برخی پارامترها در زمین، اتمسفر و یونوسفر که در مرحله آماده‌سازی زمین‌لرزه‌ها رخ می‌دهد، می‌تواند باعث ایجاد اختلال در سیگنال‌های ذکر شده شود؛ بنابراین همه محققان سعی می‌کنند عوامل غیرلرزه‌ای را با استفاده از اعمال هموارسازی و فیلترهای مختلف بر روی داده‌ها و با استفاده از مطالعات آماری که به‌طور قابل‌توجهی تأثیر نوفه‌های محیطی را کاهش می‌دهد، فیلتر کنند.

اولین تلاش برای نشان دادن اثرات امواج VLF/LF بر یونوسفر و تغییر در فرکانس بحرانی در لایه D توسط محققین روسی (گوخبرگ و همکاران، ۱۹۸۹) صورت گرفت. آن‌ها موفق به یافتن یک بی‌هنجاری قابل‌توجه انتشارات الکترومغناطیسی، چند روز قبل از زمین‌لرزه معروف اسپیتاک ارمنستان در سال ۱۹۸۸ با بزرگای ۶/۸ شدند. بعدها نتایجی از آشفستگی‌های لرزه-یونوسفری برای زمین‌لرزه سال ۱۹۹۵ کوبه ژاپن با بزرگای ۷/۳ و عمق ۷ km با استفاده از سیگنال VLF توسط هایاکاوا و همکاران (۲۰۱۲) به‌دست آمد.

دانشمندان با پژوهش‌های چندین ساله همبستگی‌های آماری بین بی‌هنجاری‌های انتشار زیریونوسفری VLF/LF با زمین‌لرزه‌های بزرگ کم‌عمق یافته و مشاهده کردند که هنگام وقوع زمین‌لرزه‌های با بزرگی بیش از ۵/۵ و در اعماق کم، در مناطق نزدیک رومرکز، یونوسفر پایین نسبت به قبل از رخداد زمین‌لرزه، به هم می‌خورد. آن‌ها نتیجه گرفتند که برای بیش از ۸۰٪ زمین‌لرزه‌های با بزرگای بیشتر از ۶/۰ و با عمق کانونی کم که رومرکز آن‌ها در مناطق اولیه فرنل مسیر فرستنده-گیرنده قرار دارد، بی‌هنجاری‌های یونوسفری ظاهر می‌شود. پس از آن مقالات بسیاری در مورد اختلالات سیگنال رادیویی VLF مربوط به



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های فعال رهگیری شده فرستنده امواج VLF/LF که سیگنال آن‌ها در گیرنده TEH در زمان وقوع زمین‌لرزه مدنظر، دریافت شده است. نشانک زردرنگ ایستگاه گیرنده مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و نشانک بنفش رومرکز زمین‌لرزه خوی را نشان می‌دهند. ایستگاه‌های قرمز رنگ فرستنده امواج VLF و ایستگاه‌های آبی رنگ فرستنده امواج LF هستند.

اساس این روش به این صورت است که یک فرستنده الکترومغناطیسی پر قدرت، امواج رادیویی VLF/LF را از طریق آنتن بلند در فضا گسیل می‌کند. این امواج پس از برخورد با لایه‌های زیرین یونوسفر به سمت زمین بازمی‌تابند. این بازتابش می‌تواند چندین بار تکرار شده و توسط آنتن گیرنده VLF/LF در زمین دریافت و ثبت شود. چنانچه یکی از این بازتابش‌ها از زیریونوسفر بالای منطقه در حال فعالیت آماده‌سازی برای یک رخداد زمین‌لرزه متوسط به بالا عبور کرده و متأثر شود، سیگنال‌های شبانه‌روزی دریافت شده در ایستگاه گیرنده، نسبت به شرایط معمول (بدون فعالیت لرزه‌ای) تغییر کرده و دچار نوسانات نامعمول و بی‌هنجاری می‌شوند. اگر این بی‌هنجاری در چند ایستگاه گیرنده VLF/LF که خط واصل آن‌ها به فرستنده‌ها از میان منطقه لرزه‌خیز می‌گذرد تشخیص داده شود، با درصدی از احتمال می‌توان محل تأثیرپذیری سیگنال (متناظر یونوسفر زیرین بالای منطقه لرزه‌خیز) را تشخیص داد و به‌عنوان

ب) مطالعه غیرمستقیم؛ یعنی اندازه‌گیری اثر تشعشعات الکترومغناطیسی از لیتوسفر بر لایه یونوسفر و یا اثر آن بر انتشار امواج VLF/LF ارسالی توسط فرستنده‌ها جهت برقراری ارتباطات رادیویی. در این روش بی‌هنجاری‌های ایجاد شده در دامنه و فاز سیگنال‌های رادیویی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. هزینه این روش به مراتب کمتر از روش اول است. تنها کافی است این سیگنال‌های رادیویی توسط گیرنده‌های مناسب و با پوشش کافی ثبت شوند.

دستگاه گیرنده امواج VLF/LF الکترونیکا (Elettronika) در مرکز مطالعات پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه تهران داده‌های امواج رادیویی در ۱۰ بازه فرکانسی از فرستنده‌های رادیویی پر قدرت را ثبت می‌کند. شکل ۱ ایستگاه‌های فعال رهگیری شده فرستنده امواج VLF/LF که سیگنال آن‌ها در زمان قبل و بعد از رویداد مدنظر در گیرنده مؤسسه ژئوفیزیک TEH دریافت شده را نشان می‌دهد.

$$NF = \int_{N_s}^{N_e} (dA(t))^2 dt \quad (۳)$$

که N_e و N_s به ترتیب زمان شروع و پایان زمان شبانه است. مطالعات نشان داده‌اند که هر اثر لرزه‌زایی تقریباً به‌طور هم‌زمان با کاهش قابل توجه روند و افزایش قابل توجه در پراکندگی و نوسان شبانه مشخص می‌شود. انتخاب فرستنده:

به‌منظور انتخاب فرستنده مناسب برای مطالعه بی‌هنجاری‌های سیگنال‌های رادیویی مرتبط با زمین‌لرزه‌ها، چندین عامل باید مورد توجه قرار گیرد. اولاً، طول مسیر فرستنده-گیرنده (T-R) تأثیر زیادی بر کیفیت سیگنال دریافتی دارد. هرچه طول این مسیر بیشتر باشد، نوفه‌های محیطی که به سیگنال افزوده می‌شود، بیشتر خواهد بود. این نوفه‌ها می‌توانند تأثیر منفی بر دقت تحلیل‌ها بگذارند و باعث ایجاد اختلال در شناسایی بی‌هنجاری‌های واقعی مرتبط با فعالیت‌های لرزه‌ای شوند. بنابراین، به‌منظور کاهش این نوفه‌ها و افزایش کیفیت سیگنال، ترجیحاً باید کوتاه‌ترین مسیرهای ممکن بین فرستنده و گیرنده انتخاب شوند. این امر به‌ویژه در بررسی‌های دقیق و حساس مانند پیش‌بینی زمین‌لرزه اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

ثانیاً، انتخاب فرستنده‌هایی با توان بالاتر می‌تواند به‌طور قابل توجهی کیفیت سیگنال دریافتی را بهبود بخشد. این امر به‌ویژه زمانی که سیگنال‌ها از فواصل طولانی ارسال می‌شوند یا تحت تأثیر نوفه‌های جوی و محیطی قرار دارند، اهمیت بیشتری دارد. فرستنده‌هایی که توان بالاتری دارند، می‌توانند سیگنال‌های قوی‌تر و با نویز کمتری تولید کنند که به‌طور طبیعی شانس عبور از سطح نویزهای جوی را افزایش داده و امکان تحلیل دقیق‌تر بی‌هنجاری‌ها را فراهم می‌آورد.

یکی از نکات دیگر در انتخاب فرستنده مناسب این است که زمین‌لرزه‌ها تنها زمانی می‌توانند از نظر بی‌هنجاری سیگنال‌های رادیویی بررسی شوند که مرکز رومرکز آن‌ها در ناحیه فرنل پوشش‌دهنده مسیر فرستنده-گیرنده (T-R)

پیش‌نشانگر یک فعالیت لرزه‌ای دانست. هرچه تشخیص آنومالی ناشی از فعالیت لرزه‌ای در سیگنال مشاهداتی دقیق‌تر و تعداد ایستگاه‌های پوششی بیشتر باشند، تعیین منطقه رومرکز زمین‌لرزه در حال وقوع نیز با دقت و قابلیت اعتماد بیشتری همراه خواهد بود. مکان نسبی قرارگیری فرستنده-گیرنده نیز باید به‌گونه‌ای باشد که گیرنده نسبت به فرستنده در منطقه حساس فضای گسیل امواج رادیویی قرار گیرد.

دوروش خاص برای تجزیه و تحلیل داده‌های VLF/LF زیریونوسفری وجود دارد. روش اول، روش «زمان پایان‌دهنده» است. در این روش به دنبال یک تغییر غیرعادی در زمان‌های پایان‌دهنده حول طلوع و غروب خورشید هستند (هایاکاوا، ۱۹۹۶). روش دوم، روش «نوسانات شبانه» نامیده می‌شود که در آن از روی داده‌های طول شب، میانگین دامنه، پراکندگی و نوسانات شبانه را تخمین می‌زنند (شوتس و همکاران، ۲۰۰۴؛ روزنوی و همکاران، ۲۰۰۴). که در این روش، اگر مقدار $dA(t)$ یا باقیمانده تغییرات روزانه از میانگین تغییرات از انحراف استاندارد (σ) مربوطه بالاتر باشد، به‌عنوان بی‌هنجاری در نظر گرفته می‌شود (روزنوی و همکاران، ۲۰۰۴).

تفاوت یا باقیمانده تغییرات روزانه از میانگین تغییرات به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$dA(t) = A(t) - \langle A(t) \rangle \quad (۱)$$

که در آن $A(t)$ دامنه در زمان t در روز جاری است و $\langle A(t) \rangle$ میانگین در همان زمان t در ± 15 روز (قبل و بعد از روز مربوطه) است.

سه مقدار فیزیکی برای دامنه یعنی روند (Trend) به صورت میانگین دامنه شبانه، پراکندگی شبانه (مجذور انحراف معیار) (D) و نوسانات شبانه (NF) برآورد می‌شود (ماکاوا و همکاران، ۲۰۰۶).

$$\text{Trend} = \frac{\int_{N_s}^{N_e} dA(t) dt}{N_e - N_s} \quad (۲)$$

قرار داشته باشد. منطقه فرنل که ناحیه‌ای بیضوی شکل است، از نظر علمی به عنوان منطقه‌ای در نظر گرفته می‌شود که در آن امواج رادیویی منتشر شده توسط فرستنده قادر به رسیدن به گیرنده خواهند بود. بنابراین، در انتخاب فرستنده‌ها باید این نکته را مدنظر قرار داد که حتماً رومرکز زمین‌لرزه در ناحیه فرنل پوشش‌دهنده مسیرهای T-R ایستگاه‌های فرستنده و گیرنده رادیویی قرار گیرد تا امکان دریافت صحیح سیگنال فراهم شود. در غیر این صورت، سیگنال‌ها ممکن است تحت تأثیر موانع جغرافیایی یا تغییرات محیطی قرار بگیرند و نتایج تحلیل‌ها به دقت کافی نرسند.

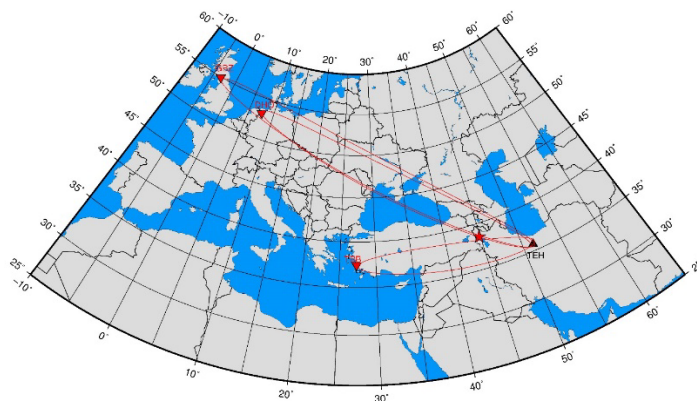
مسئله انتخاب فرستنده‌ای که تمامی ویژگی‌های فوق را در کنار هم داشته باشد، کار دشواری است. با این حال، با بررسی دقیق فرستنده‌های مختلف امواج الکترومغناطیسی VLF/LF و با توجه به موقعیت رومرکز زمین‌لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱ خوی و ایستگاه گیرنده TEH در تهران، فرستنده‌های TBB ترکیه با فرکانس ۲۶/۷ kHz، فرستنده GBZ آلمان با فرکانس ۲۳/۴ kHz و فرستنده انگلستان با فرکانس ۱۹/۵۸ kHz، به عنوان مناسب‌ترین فرستنده‌های VLF برای مطالعه اختلالات امواج ارسالی ناشی از زمین‌لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱ خوی انتخاب شدند (جدول ۱).

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های انتخابی فرستنده امواج LF/VLF که سیگنال آن‌ها در گیرنده TEH در زمان وقوع زمین‌لرزه مدنظر دریافت شده است.

Station Name		Location	Frequency	Coordinates	Distance
V LF	GBZ	Anthorn, Cumbria, UK	19.58 kHz	54.911683° N 3.278738°W	4635 km
V LF	DH O38	Rhauderfehn, Germany	23.4 kHz	53.087341° N 7.608652°E	3900 km
V LF	TBB	Bafa, Didim district, Turkey	26.7 kHz	37.409420° N 27.325273°E	2155 km

همان‌طور که در شکل ۲ قابل مشاهده است، فرستنده (T) و گیرنده (R) در کانون‌های سطح مقطع صفحه بیضوی ناحیه فرنل روی نقشه فرض می‌شوند، که موقعیت دقیق آن‌ها برای تحلیل دقیق بی‌هنجاری‌های سیگنال‌های رادیویی در این منطقه حیاتی است. این انتخاب به عنوان

گامی مهم در جهت بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و تحلیل‌های لرزه‌ای با استفاده از تکنیک‌های لرزه‌الکترومغناطیسی است و می‌تواند به عنوان یک الگوی مؤثر برای انتخاب فرستنده‌های مناسب در مطالعات مشابه در نظر گرفته شود.



شکل ۲. نقشه فرستنده-گیرنده (T-R) و محدوده ناحیه پنجم فرنل. مثلث‌های وارونه قرمز رنگ موقعیت فرستنده‌ها و مثلث سیاه رنگ موقعیت گیرنده را مشخص می‌کنند. ستاره قرمز رنگ رومرکز زمین‌لرزه خوی را نشان می‌دهد. همچنین بیضوی‌های قرمز رنگ، محدوده منطقه پنجم فرنل از فرستنده‌ها تا گیرنده را مشخص می‌کنند.

۳ داده‌ها

TBB, DHO38 و GBZ ارسال شده‌اند و توسط گیرندهٔ Elettronika در مرکز پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران دریافت شده‌اند. این سیگنال‌ها پس از عبور از مسیرهای مختلف و تحت تأثیر احتمالی محیط لرزه‌ای خوی، تحلیل و پردازش شده‌اند.

هایاکاوا (۲۰۱۵) با بررسی بی‌هنجاری مشاهده شده در امواج VLF/LF ثبت شده در شبکهٔ VLF/LF ژاپن، نتیجه گرفت که برای پیش‌بینی زمین‌لرزه با استفاده از امواج VLF، رومرکز زمین‌لرزه باید در ناحیه پنجم فرنل مسیر فرستنده-گیرنده قرار بگیرد و فاصلهٔ آن، کمتر از ۳۰۰ کیلومتر از هر دو باشد. او با تحلیل بیش از ۳۰ زمین‌لرزه نشان داد که در این شرایط، بی‌هنجاری‌های قابل توجهی در امواج VLF/LF پیش از زمین‌لرزه ظاهر می‌شود که قابلیت پیش‌بینی را فراهم می‌کند. همچنین برقی و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از روش آنالیز موجک (wavelet) روی داده‌های زمین‌لرزه کوماموتو ژاپن در سال ۲۰۱۶، مشاهده کردند که وقتی رومرکز زمین‌لرزه در فاصله کمتر از ۳۰۰ کیلومتر از فرستنده و گیرنده باشد، بی‌هنجاری‌های VLF/LF واضح‌تر و قابل تشخیص‌تر است. با این حال، در مطالعات آن‌ها نیز، بی‌هنجاری‌هایی در فواصل بیش از ۳۰۰ کیلومتر گزارش شده است. این نشان می‌دهد که معیار فاصله ۳۰۰ کیلومتر می‌تواند بسته به شرایط تکنیکی نواحی مختلف متفاوت باشد و نباید به عنوان یک معیار مطلق تلقی شود. در پژوهش حاضر، به علت نبود ایستگاه‌های گیرندهٔ VLF/LF دیگر در زمان وقوع زمین‌لرزه خوی، فقط ایستگاه گیرندهٔ تهران مورد استفاده قرار گرفته است که امکان اعمال دقیق این معیار را محدود می‌کند. از طرفی با توجه به شکل ۲ رومرکز زمین‌لرزه خوی تقریباً در ناحیه پنجم فرنل در مسیر فرستنده‌ها به گیرنده قرار دارد که تاحدودی معیاری برای اعتبار داده‌ها است.

برای حذف نویز ناشی از اختلالات گیرنده و اثرات مربوط به عوامل غیرلرزه‌ای که می‌توانند بر سیگنال تأثیر

در این تحقیق، از روش تحلیل نوسانات شبانه برای شناسایی بی‌هنجاری‌های سیگنال‌های VLF مرتبط با فعالیت‌های لرزه‌ای استفاده شده است. این روش مبتنی بر تشخیص نوسانات غیرعادی در دامنه سیگنال‌های VLF است که به‌طور آماری تحلیل می‌شود. روش‌های مشابهی قبلاً توسط محققان برجسته‌ای مانند هایاکاوا و بیاجی در زمینه لرزه‌الکترومغناطیس استفاده شده است و اعتبار آن‌ها در پیش‌بینی بی‌هنجاری‌های ناشی از زمین‌لرزه‌ها اثبات شده است. به‌طور خاص، این روش با بررسی روند تغییرات دامنه $A(t)$ امواج VLF (در رابطه ۲) و مقایسه آن با نوسانات طبیعی سیگنال، به شناسایی تغییرات غیرعادی و بی‌هنجاری‌های مرتبط با فعالیت‌های لرزه‌ای می‌پردازد. این بی‌هنجاری‌ها می‌توانند در نتیجه فعالیت‌های لرزه‌ای تأثیرگذار بر امواج رادیویی ایجاد شوند، به‌طوری‌که تغییرات مشاهده‌شده در سیگنال به‌عنوان $dA(t)$ در رابطه ۱ نشان داده می‌شود.

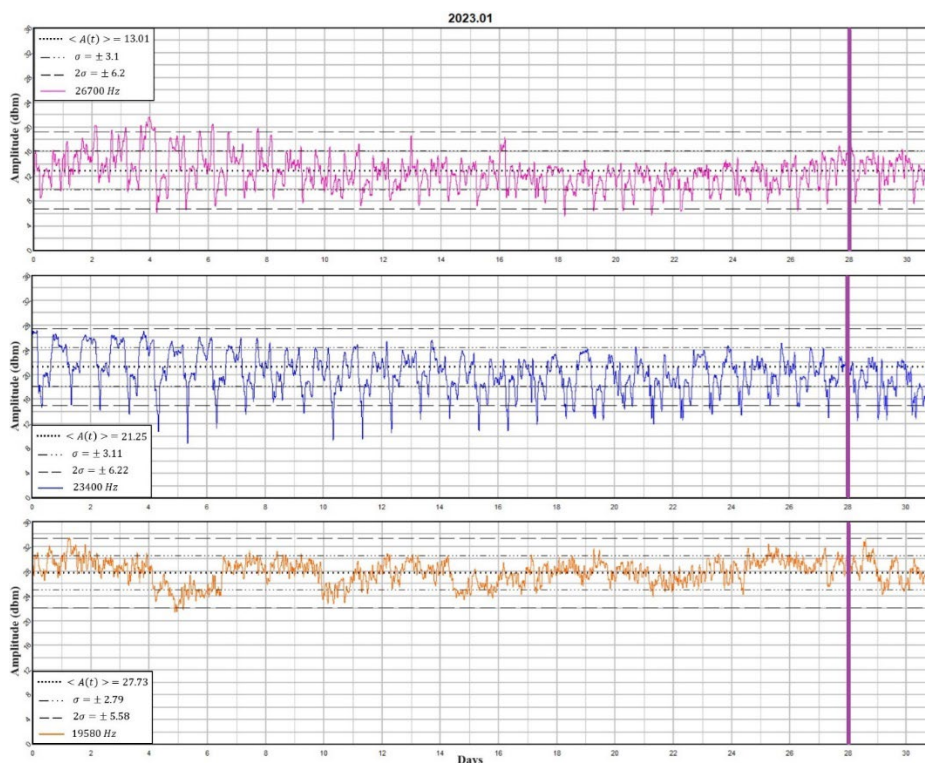
یک معیار آماری کلیدی در این روش، انحراف استاندارد ($\pm\sigma$) دامنه سیگنال از میانگین آن است. این معیار با استفاده از نمونه‌های دامنه متوسط $\langle A(t) \rangle$ در یک پنجرهٔ زمانی خاص، که معمولاً شامل چندین روز قبل و بعد از بی‌هنجاری‌های محلی است، محاسبه می‌شود. در واقع، دامنه سیگنال در شرایط عادی در حدود میانگین خود تغییر می‌کند و هر گونه افزایش غیرطبیعی دامنه فراتر از محدوده‌ای مشخص می‌تواند به‌عنوان بی‌هنجاری تلقی شود. به‌طور تجربی، محدوده‌ای که شامل انحراف استاندارد $2\pm\sigma$ است، به‌عنوان مرز قابل اعتماد برای شناسایی بی‌هنجاری‌های مرتبط با فعالیت‌های لرزه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این مطالعه، از داده‌های سیگنال VLF با فرکانس‌های ۲۶۷۰۰ هرتز، ۲۳۴۰۰ هرتز و ۱۹۵۸۰ هرتز استفاده شده است که به‌ترتیب از فرستنده‌های

می‌دهد. این شکل به‌وضوح تغییرات معمول و بی‌هنجاری‌های موجود در سیگنال‌ها را قبل از وقوع زمین‌لرزه ۲۸ ژانویه ۲۰۲۳ نمایش می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهند که سیگنال‌های VLF در این بازه زمانی با تغییرات قابل توجهی در دامنه مواجه شده‌اند که می‌تواند به‌عنوان پیش‌نشانگری برای وقوع زمین‌لرزه مورد استفاده قرار گیرد. این تحلیل، از اهمیت استفاده از داده‌های VLF در مطالعات لرزه‌الکترومغناطیس و پیش‌بینی فعالیت‌های لرزه‌ای در مناطق فعال لرزه‌ای مانند منطقه خوی حمایت می‌کند و پتانسیل این روش را برای پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت زمین‌لرزه‌ها مورد تأکید قرار می‌دهد.

بگذارند، دامنه سیگنال‌ها هموارسازی شده است که هرگونه روند خطی به داده‌ها را حذف می‌کند، به‌طوری‌که دامنه‌های اول و آخر صفر باشد؛ سپس از فیلتر پایین‌گذر بر روی داده‌ها استفاده کرده و در نهایت روند خطی را مجدداً در دامنه‌ها وارد می‌کند. این الگوریتم استفاده شده، از دستورات عددی گرفته شده است. هموارسازی به‌منظور از بین بردن نوسانات کوتاه‌مدت و تغییرات ناگهانی که ممکن است ناشی از عواملی غیر از زمین‌لرزه‌ها باشند، انجام شده است. در نهایت، شکل ۳ سیگنال‌های دریافتی هموارسازی شده را برای سه فرکانس انتخاب شده بصورت پیوسته در طول ماه ژانویه ۲۰۲۳ در گیرنده تهران نشان



شکل ۳. سیگنال‌های VLF پیوسته برای سه مسیر TBB-TEH، DHO38-TEH و GBZ-TEH در طول ماه ۲۰۲۳/۰۱. خط بنفش زمین‌لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱ خوی را نشان می‌دهد.

توسط خط‌چین‌هایی مشخص شده است؛ طبق تحقیقات روزنوی و همکاران (۲۰۰۴)، اگر مقدار $dA(t)$ یا اعوجاجات دامنه بیشتر از انحراف استاندارد (σ) مربوطه

مقدار انحراف استاندارد (برای اطمینان بیشتر مقدار 2σ) و دامنه سیگنال میانگین $\langle A(t) \rangle$ از روی داده‌های میانگین محاسبه شده و روی هر یک از نمودار سیگنال‌ها

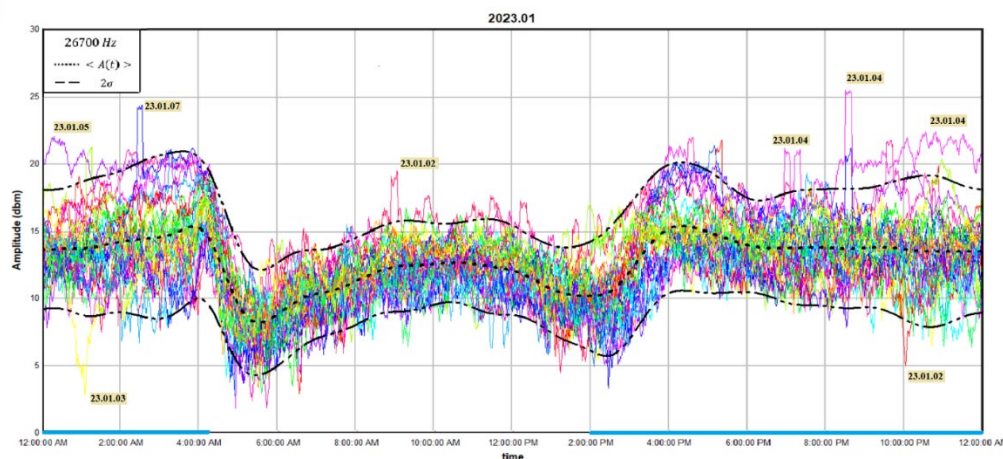
۱) در نمودار سیگنال VLF با فرکانس ۲۶۷۰۰ Hz مربوط به مسیر TBB-TEH (شکل ۴)، در دهه اول ماه که تقریباً ۲۰ تا ۲۶ روز پیش از وقوع زمین‌لرزه ۲۸ ژانویه ۲۰۲۳ را شامل می‌شود، افزایش یا کاهش قابل توجه و محسوس در دامنه سیگنال نسبت به میانگین کلی ثبت شده است. این پیک‌ها نه تنها به صورت بصری در نمودار قابل تشخیص است، بلکه از نظر آماری نیز از حدود نرمال یعنی مرزهای $\pm 2\sigma$ عبور کرده است که نشان‌دهنده یک بی‌هنجاری معنی‌دار در رفتار سیگنال طی این بازه زمانی است. چنین عبوری از حدود آماری معمولاً نشان‌دهنده اختلال در شرایط طبیعی انتشار امواج VLF است که می‌تواند ناشی از برهم‌کنش‌های غیرمعمول در ناحیه لیتوسفر-یونوسفر در مراحل پیش‌لرزه‌ای باشد.

این نوسانات اغلب به صورت موضعی و کوتاه‌مدت هستند، اما از نظر دامنه و شدت، به گونه‌ای‌اند که از دامنه سیگنال در زمان‌های قبل و بعد از آن‌ها به‌طور مشخص متمایزند. این اختلالات ناگهانی می‌تواند ناشی از تغییرات سریع در ویژگی‌های الکترومغناطیسی محیط انتشار و یا ناشی از آزاد شدن انرژی تنش‌های تجمع‌یافته در سنگ‌کره در آستانه زمین‌لرزه باشند.

باشد، به‌عنوان بی‌هنجاری در نظر گرفته می‌شود که در ادامه به صورت دقیق‌تر بررسی خواهند شد.

با بررسی تغییرات شبانه‌روزی داده‌ها (بازه‌های ۲۴ ساعته)، این سیگنال‌ها به صورت گسسته برای طول ماه ژانویه ۲۰۲۳ برای هر سه مسیر در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ رسم شده است. با محاسبه مقادیر انحراف استاندارد $\pm\sigma$ و دامنه سیگنال میانگین $\langle A(t) \rangle$ از روی آن داده‌های گسسته، بصورت جداگانه برای هر ساعت از روز، حدود تغییرات طبیعی سیگنال VLF سه مسیر TBB-TEH (شکل ۴)، DHO38-TEH (شکل ۵) و GBZ-TEH (شکل ۶) در طول ۲۰۲۳/۰۱ در طول شبانه‌روز به دست آمده و مقادیر خارج از این حدود یا محدوده عدم قطعیت داده‌ها، به عنوان آنومالی یا بی‌هنجاری در نظر گرفته می‌شوند (طاهری نیا و پوربیرانوند ۱۴۰۰). همان‌طور که مشخص است، بی‌هنجاری و افزایش میزان دامنه در چند قسمت از نمودار سیگنال‌ها مشهود بوده و می‌توان آن‌ها را به‌عنوان بی‌هنجاری‌های قبل از وقوع زمین‌لرزه در نظر گرفت.

با تحلیل دقیق نمودارها، بی‌هنجاری‌هایی به شرح زیر تشخیص داده شدند:



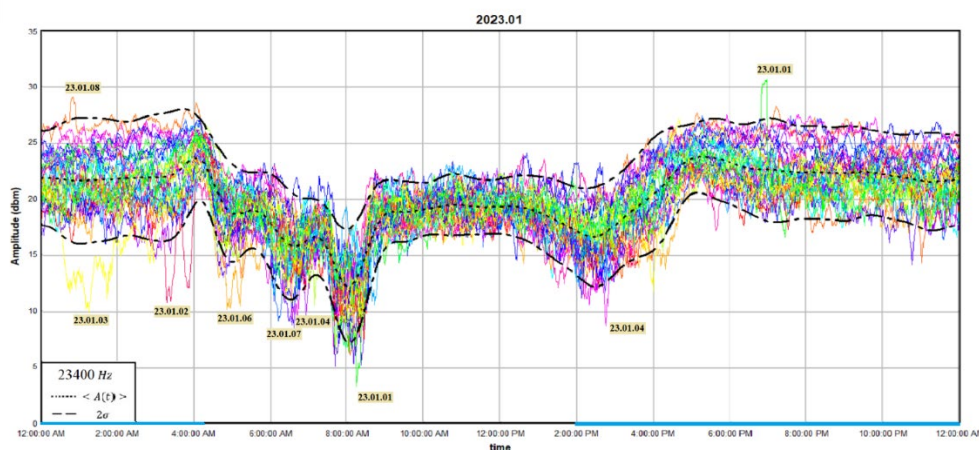
شکل ۴. حدود تغییرات شبانه‌روزی طبیعی سیگنال‌های VLF مسیر TBB-TEH در طول ۲۰۲۳/۰۱ (۳۱ منحنی رنگی مربوط به ۳۱ روز از ماه ژانویه). انحراف استاندارد $\pm 2\sigma$ با خط چین و دامنه سیگنال میانگین $\langle A(t) \rangle$ با نقطه‌چین روی شکل مشخص شده است. داخل مستطیل‌های زردرنگ، تاریخ مربوط به نمودار بی‌هنجار مشخص شده در شکل، نوشته شده است.

لرزه‌ای است. چنین افزایشی می‌تواند نشانه‌ای از ناپایداری‌های اولیه در ناحیه لیتوسفر-یونوسفر تلقی شود که پیش از زمین‌لرزه‌های بزرگ ظاهر می‌شود. عبور دامنه سیگنال از این مرزهای آماری نشان‌دهنده بروز بی‌هنجاری غیرعادی است که احتمالاً در اثر تغییرات شدید در شرایط الکتروپدینامیکی یونوسفر پایین و ناشی از فرآیندهای پیش‌لرزه‌ای ایجاد شده است.

این الگوی بی‌هنجاری، در مطالعات پیشین نیز به‌عنوان یک الگوی رایج پیش‌نشانگر لرزه‌ای گزارش شده است (هایاکاوا و مولکانف ۲۰۰۲) که ممکن است بیانگر تغییر تدریجی در ویژگی‌های الکتریکی محیط انتشار سیگنال باشد که از فازهای مختلف تنش در سنگ‌کره تا لحظه گسیختگی نهایی منشأ می‌گیرد.

ترکیب الگوهای این نوسانات ناگهانی در سیگنال مسیر TBB-TEH، با نتایج سایر مسیرهای مورد بررسی در این مطالعه و همچنین یافته‌های مطالعات پیشین (هایاکاوا و همکاران ۲۰۱۰) هم‌راستا بوده و می‌تواند به‌عنوان یکی از شاخص‌های تشخیص زودهنگام ناپایداری‌های لرزه‌ای در نظر گرفته شود.

۲) در نمودار سیگنال VLF با فرکانس ۲۳۴۰۰ Hz مربوط به مسیر DHO38-TEH (شکل ۵)، در دهه اول ماه که تقریباً ۲۰ تا ۲۸ روز پیش از زمین‌لرزه ۲۸ ژانویه ۲۰۲۳ را شامل می‌شود، افزایش یا افت ناگهانی قابل توجهی در دامنه سیگنال نسبت به میانگین بلندمدت دامنه مشاهده می‌شود، به طوری که مقادیر دامنه از مرزهای $\pm 2\sigma$ عبور کرده‌اند. این تغییرات از نظر آماری نیز معنادار بوده و بیانگر انحراف از رفتار نرمال سیگنال در شرایط بدون رخداد



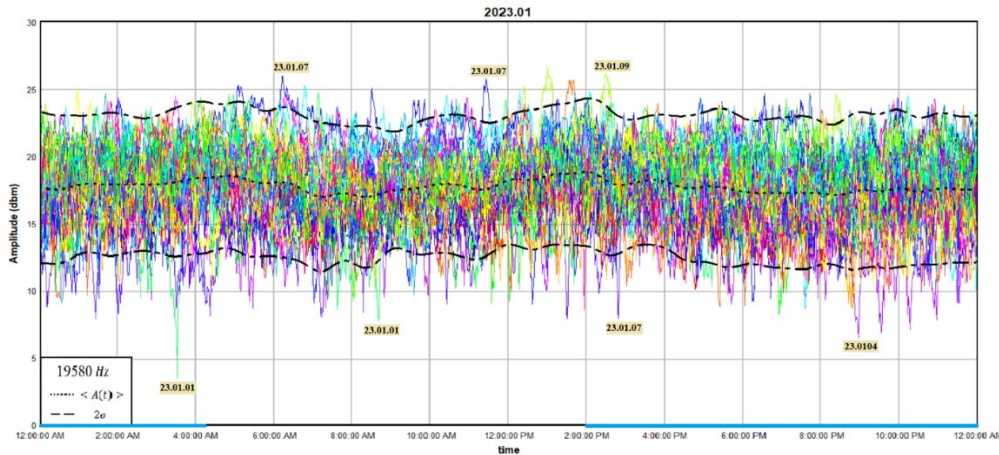
شکل ۵. حدود تغییرات شبانه‌روزی طبیعی سیگنال‌های VLF مسیر DHO38-TEH در طول ۲۰۲۳/۰۱ (۳۱ منحنی رنگی مربوط به ۳۱ روز از ماه ژانویه). انحراف استاندارد $\pm 2\sigma$ با خط چین و دامنه سیگنال میانگین $\langle A(t) \rangle$ با نقطه‌چین روی شکل مشخص شده است. داخل مستطیل‌های زردرنگ، تاریخ مربوط به نمودار بی‌هنجار مشخص شده در شکل، نوشته شده است.

نوسانات در دامنه می‌توانند به‌عنوان نشانه‌ای از تغییرات سریع و ناگهانی در ویژگی‌های الکترومغناطیسی یونوسفر در نزدیکی زمان وقوع زمین‌لرزه در نظر گرفته شوند، که ممکن است ناشی از آزاد شدن انرژی تنش‌های درون زمین و تأثیر آن بر امواج رادیویی باشد.

۳) در نمودار سیگنال VLF با فرکانس ۱۹۵۸۰ Hz مربوط به مسیر GBZ-TEH (شکل ۶)، در دهه اول ماه که به مدت زمانی مشخص حدود ۲۰ تا ۲۸ روز قبل از وقوع زمین‌لرزه ۲۸ ژانویه ۲۰۲۳ مربوط می‌شود، بی‌هنجاری‌های چشمگیر در دامنه سیگنال مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده یک انحراف قابل توجه از الگوی طبیعی سیگنال است. این

به‌وضوح با الگوهای مشابه در مطالعات پیشین، به‌ویژه در رابطه با پیش‌بینی زمین‌لرزه‌ها، تطابق دارند و می‌توانند به‌عنوان ابزار مفیدی برای پیش‌بینی‌های لرزه‌ای مورد استفاده قرار گیرند.

این بی‌هنجاری‌ها، الگوی پیچیده‌ای از نوسانات در سیگنال را به‌وجود می‌آورد که ممکن است نشان‌دهنده تغییرات تدریجی و سپس انفجاری در شرایط الکتروپنایمی محیط یونوسفر باشد. این بی‌هنجاری‌ها



شکل ۶. حدود تغییرات شبانه‌روزی طبیعی سیگنال‌های VLF مسیر GBZ-TEH در طول ۲۰۲۳/۰۱ (۳۱ منحنی رنگی مربوط به ۳۱ روز از ماه ژانویه). انحراف استاندارد $\pm 2\sigma$ با خط چین و دامنه سیگنال میانگین $\langle A(t) \rangle$ با نقطه‌چین روی شکل مشخص شده است. داخل مستطیل‌های زردرنگ، تاریخ مربوط به نمودار بی‌هنجار مشخص شده در شکل، نوشته شده است.

۴ بحث

صحت‌سنجی بی‌هنجاری‌ها:

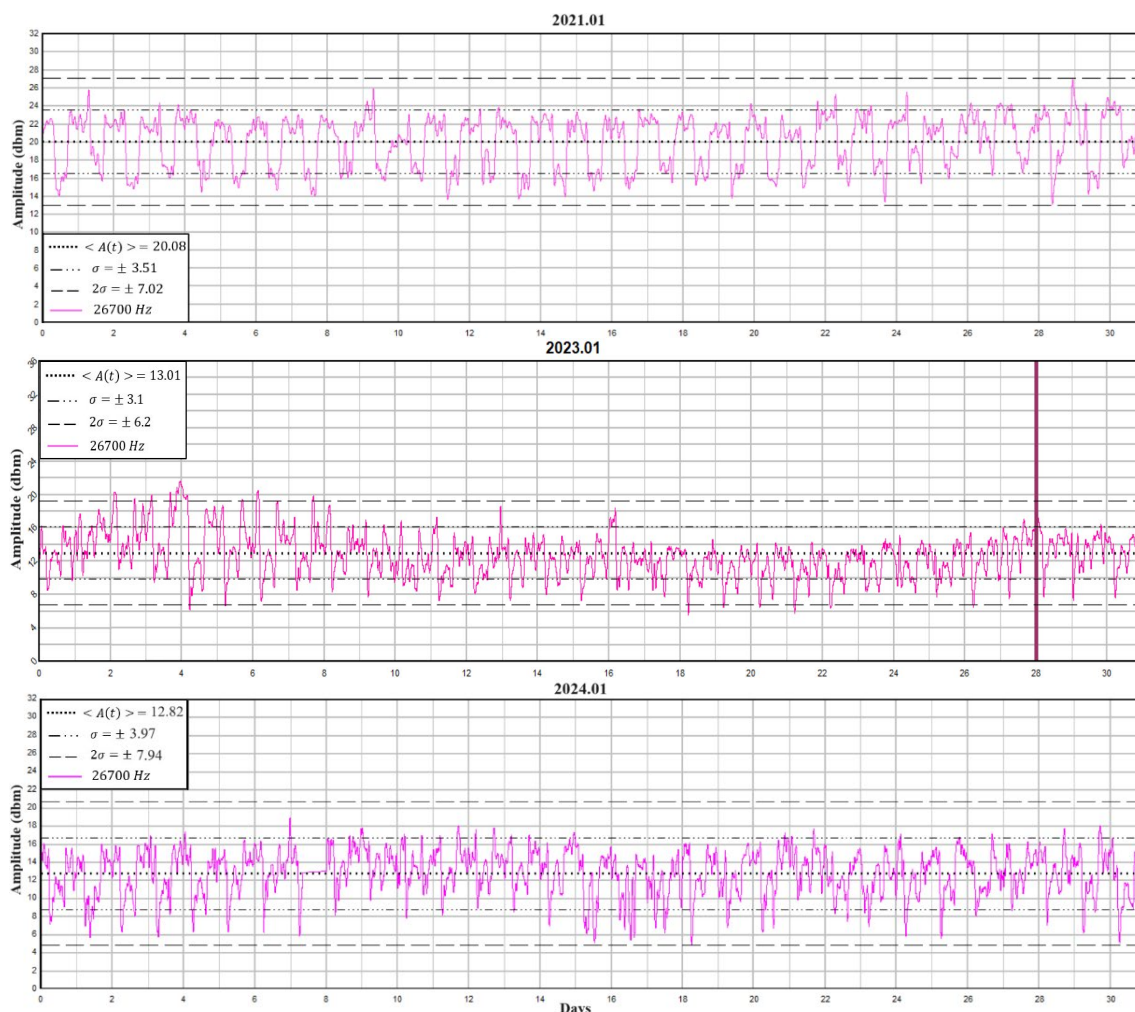
متأسفانه از نیمه سال ۲۰۲۱ تا نیمه سال ۲۰۲۲ به دلیل قطعی‌های مکرر گیرنده، داده‌ها ناقص بوده و برای ماه ۲۰۲۲/۰۱ یعنی یک سال قبل از وقوع زمین‌لرزه، هیچ داده‌ای ثبت نشده است. پس داده‌های سیگنال VLF فرکانس ۲۶/۷ kHz مسیر TBB-TEH دریافتی، در طول ماه ۲۰۲۱/۰۱ و ۲۰۲۴/۰۱ یعنی دو سال قبل و یک سال بعد از وقوع زمین‌لرزه، در شکل ۷ بررسی شده است که سیگنال به‌صورت پیوسته و منظم دیده می‌شود، تقریباً هیچ‌گونه اختلالی در سیگنال مشاهده نشده و دامنه آن اصلاً از خط $\pm 2\sigma$ عبور نکرده است.

از آنجایی که مشهودترین بی‌هنجاری و پراکندگی در فرکانس ۲۶۷۰۰ Hz مسیر TBB-TEH که نزدیک‌ترین فرستنده سیگنال VLF به گیرنده تهران است دیده می‌شود، به‌عنوان سوژه اصلی مورد بررسی و صحت‌سنجی قرار می‌گیرد.

در مجموع، مقایسه بین دوره‌ای انجام‌شده در این تحقیق به‌وضوح نشان می‌دهد که بی‌هنجاری‌های سیگنال مشاهده‌شده در روزهای منتهی به زمین‌لرزه خوی نه تنها از الگوهای طبیعی و دوره‌ای سیگنال پیروی نمی‌کنند، بلکه در مقایسه با بازه‌های زمانی بدون زمین‌لرزه، دارای ویژگی‌هایی منحصر به فرد و غیرعادی هستند. بنابراین،

یکی از روش‌های مؤثر برای راستی‌آزمایی بی‌هنجاری‌های ثبت‌شده در سیگنال‌های VLF/LF، مقایسه آن‌ها با داده‌های مربوط به همان مسیر و همان فرکانس در بازه‌های زمانی مختلف است؛ به‌ویژه در بازه‌هایی که هیچ زمین‌لرزه‌ای رخ نداده است. این مقایسه می‌تواند به‌عنوان روشی برای بررسی صحت بی‌هنجاری‌ها و حذف خطاهای احتمالی ناشی از عوامل غیر بلایای طبیعی مانند شرایط جوی، فعالیت خورشیدی یا اختلالات تجهیزات در نظر گرفته شود.

می‌توان با اطمینان بیشتری این بی‌هنجاری‌ها را به‌عنوان
پیش‌نشانگرهای لرزه‌ای در نظر گرفت و در مسیر توسعه
سامانه‌های پیش‌بینی و هشدار سریع زمین‌لرزه، بر آن‌ها تکیه
کرد.



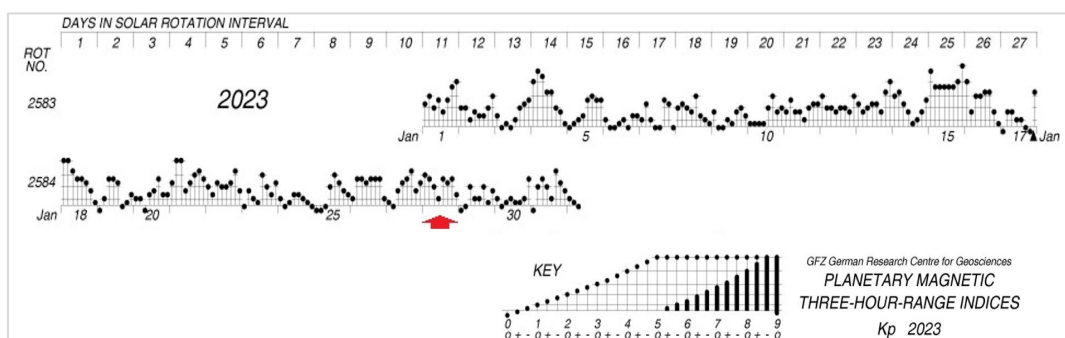
شکل ۷. سیگنال VLF مسیر TBB-TEH مربوط به ماه ژانویه ۲۰۲۱ و ۲۰۲۴ در مقایسه با ژانویه ۲۰۲۳. انحراف استاندارد $\pm\sigma$ و $\pm 2\sigma$ و دامنه میانگین $\langle A(t) \rangle$ روی شکل مشخص شده است.

بی‌هنجاری‌های کوتاه‌مدت در سیگنال‌های VLF دریافتی در طول مسیر TBB-TEH شود، گزارش روزهای همراه با پدیده رعدوبرق در طول ماه ژانویه ۲۰۲۳ در ایستگاه هواشناسی خوی-۴۰۷۰۳ و خوی (فرودگاه)-۸۸۱۰۴ از سایت سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. مشخص شد که در طول این ماه، هیچ پدیده رعدوبرق قابل توجهی وجود نداشته و احتمال ارتباط با بی‌هنجاری‌های مشهود در

(۲) بی‌هنجاری‌های سیگنال‌های VLF/LF زمانی می‌توانند به‌عنوان پیش‌نشانگر زمین‌لرزه در نظر گرفته شوند که به عوامل دیگر ایجاد اختلال روی آن سیگنال‌ها نیز توجه شود؛ چراکه سایر عوامل مثل فعالیت‌های خورشیدی، رعد و برق‌ها و عوامل مصنوعی ساخته دست بشر نیز می‌توانند این بی‌هنجاری‌ها را ایجاد کنند (لی و همکاران، ۲۰۲۳). برای بررسی عدم وجود پدیده رعدوبرق به‌عنوان یکی از عوامل هواشناسی که ممکن است باعث ایجاد

داده‌های سیگنال VLF دریافتی فرکانس ۲۶/۷ kHz مسیر TBB-TEH وجود ندارد. (۳) برای بررسی عدم وجود اثر فعالیت شعله‌های خورشیدی که یکی از عوامل ایجاد بی‌هنجاری‌های کوتاه‌مدت در سیگنال‌های VLF/LF هستند، لیست داده شاخص شعله‌وری فعالیت‌های خورشیدی از سایت اداره ملی اقیانوسی و جوی ایالات متحده دریافت شده و مشخص شد که در طول ماه ژانویه ۲۰۲۳، میانگین شاخص فعالیت شعله‌های خورشیدی بسیار پایین است و در ده روز اول این ماه که بیشترین بی‌هنجاری در سیگنال VLF دریافتی فرکانس ۲۶/۷ kHz مسیر TBB-TEH دیده می‌شود، فعالیت‌های

خورشیدی چشمگیری وجود نداشته است. (۴) برای بررسی عدم وجود طوفان‌های ژئومغناطیسی که یکی از اصلی‌ترین عوامل ایجاد بی‌هنجاری‌ها در سیگنال‌های VLF/LF هستند، داده‌های شاخص Kp مربوط به فعالیت‌های بلندمدت ژئومغناطیسی جهانی در طول ماه ژانویه ۲۰۲۳ دریافت شد که نمودار آن در شکل ۸ نشان داده شده است. مقدار Kp از صفر تا ۹ متغیر است؛ مقدار صفر به معنی فعالیت ژئومغناطیسی بسیار کم، مقادیر $Kp > 5$ نشان‌دهنده فعالیت بالای ژئومغناطیسی و مقدار ۹ به معنی طوفان شدید ژئومغناطیسی است (دو و همکاران، ۲۰۱۰؛ محمودیان و همکاران، ۲۰۲۲).



شکل ۸. نمودار شاخص Kp در طول ماه ژانویه ۲۰۲۳. روز وقوع زمین‌لرزه با فلش قرمز مشخص شده است.

(<https://wdc.ugi.kyoto-u.ac.jp/>)

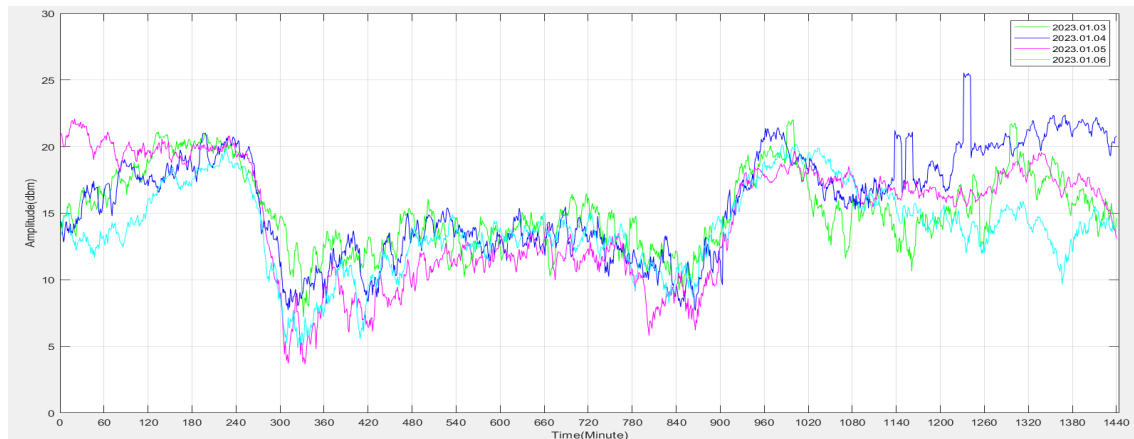
باتوجه به نمودار شاخص Kp (شکل ۸)، در طول این مدت مقدار Kp در روزهای ۴ و ۱۵ ژانویه به نزدیکی مقدار ۵ رسیده و به این معناست که فعالیت ژئومغناطیسی متوسطی در این مدت رخ داده است. البته اندازه‌گیری شاخص Kp هر سه ساعت یکبار محاسبه می‌شود. فاصله سه‌ساعته بسیار بزرگ‌تر از مقیاس‌های زمانی واکنش‌های یونوسفر است و عملاً این شاخص نمی‌تواند به سرعت در طول طوفان‌های بزرگ تغییر کند (دو و همکاران، ۲۰۱۰). برای توجه به تأثیر این فعالیت ژئومغناطیسی ضعیف، از آنجایی که بیشترین بی‌هنجاری در سیگنال VLF دریافتی فرکانس

۲۶/۷ kHz مسیر TBB-TEH، در ده روز اول این ماه دیده می‌شود، سیگنال‌های روزهای ۳ تا ۶ ژانویه در شکل ۹ بررسی و مقایسه شده است.

نتیجه‌گیری می‌شود که اولاً باتوجه به این شکل، اثر فعالیت ژئومغناطیسی تنها در پنج ساعت انتهایی روز ۲۰۲۳/۰۱/۰۴ و دو ساعت ابتدایی روز ۲۰۲۳/۰۱/۰۵ (در بازه‌های حدوداً ۷ ساعته) دیده می‌شود و ساعات دیگر در طول این چند روز، روند دامنه مشابهی باهم داشته و اختلال خاصی در آنها مشاهده نمی‌شود. ثانیاً اگرچه اثرات و بی‌هنجاری‌ها روی سیگنال‌های VLF ناشی از فعالیت‌های

شده و افزایش کاملاً محسوس میزان دامنه در سیگنال VLF دریافتی فرکانس ۲۶/۷ kHz مسیر TBB-TEH (شکل ۴) که در بازه روزهای ۲ الی ۱۰ ژانویه در مقایسه با کل سیگنال مشاهده می‌شود، مستقل از اثر این فعالیت ژئومغناطیسی، برای ما قابل استناد هستند.

لرزه‌ای و ژئومغناطیسی بسیار مشابه است، اما از آنجایی که طوفان‌های ژئومغناطیسی فرآیندهای جهانی هستند، درحالی‌که اختلالات ناشی از وقوع زمین‌لرزه‌ها در یونوسفر یک ویژگی محلی دارند، دقت پایینی نسبت به اثرات لرزه‌ای خواهند داشت؛ پس بی‌هنجاری‌های تشخیص داده



شکل ۹. مقایسه نمودار سیگنال‌های VLF مسیر TBB-TEH در روزهای ۳ تا ۶ ژانویه ۲۰۲۳.

پراکندگی در فرکانس ۲۶۷۰۰ Hz مسیر TBB-TEH که نزدیک‌ترین فرستنده سیگنال VLF به گیرنده تهران است، دیده می‌شد که به‌عنوان سوژه اصلی مورد بررسی قرار گرفت.

همچنین سیگنال مدنظر به صورت گسسته برای طول ماه ژانویه ۲۰۲۳ بررسی شد. و با محاسبه مقادیر انحراف استاندارد $\pm\sigma$ و دامنه سیگنال میانگین $\langle A(t) \rangle$ از روی آن داده‌های گسسته، بصورت جداگانه برای هر ساعت از روز، حدود تغییرات طبیعی سیگنال در طول شبانه‌روز به دست خواهد آمد و مقادیر خارج از این حدود یا محدوده عدم قطعیت داده‌ها، به عنوان آنومالی یا بی‌هنجاری در نظر گرفته می‌شوند. بی‌هنجاری و افزایش میزان دامنه در چند قسمت از نمودارها مشهود بوده که می‌توان آن‌ها را به‌عنوان بی‌هنجاری‌های قبل از وقوع زمین‌لرزه در نظر گرفت. برای راستی‌آزمایی بی‌هنجاری‌ها، فرکانس ۲۶/۷ kHz مسیر TBB-TEH، در طول ماه ۲۰۲۱/۰۱ یعنی دو سال قبل از

۵ نتیجه‌گیری

در این تحقیق، داده‌های VLF دریافتی در ایستگاه تهران از فرستنده‌های TBB ترکیه، DHO38 آلمان و GBZ انگلستان مورد تحلیل قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد که در روزهای منتهی به زمین‌لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱ (۲۸ ژانویه ۲۰۲۳)، اختلالات مشخصی در مسیرهای عبوری سیگنال‌ها رخ داده است. این اختلالات شامل افزایش بی‌هنجاری در دامنه شبانه، کاهش دامنه روزانه، پراکندگی بیشتر سیگنال و نوسانات غیرعادی بوده‌اند. این بی‌هنجاری در تمامی مسیرهایی که رومرکز زمین‌لرزه در ناحیه فرنل آن‌ها قرار دارد، قابل شناسایی بود. اختلالات محسوس در هر سه مسیر انتشار که رومرکز زمین‌لرزه خوی در ناحیه فرنل آن‌ها قرار دارد، به‌صورت افزایش یا کاهش قابل‌توجه در روند، افزایش واضح در پراکندگی و نوسانات شبانه غیرعادی در نمودار سیگنال VLF، برای روزهای قبل از زمین‌لرزه $M=5/9$ خوی مشاهده شد. مشهودترین بی‌هنجاری و

۲۰۱۸ ژاپن (Mw=6.6)، یافته‌های نوین زمین‌شناسی

کاربردی، ۱۵(۲۹)، ۱۳۵-۱۴۸.

نظری، ص. (۱۴۰۳). بررسی اختلالات سیگنال‌های

VLF/LF به‌عنوان پیش‌نشانگر زمین‌لرزه ۸ بهمن ۱۴۰۱

خوی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مؤسسه ژئوفیزیک

دانشگاه تهران.

Akhoondzadeh, M., De Santis, A., Marchetti, D., Piscini, A., & Jin, S. (2019). Anomalous seismo-LAI variations potentially associated with the 2017 Mw=7.3 Sarpol-e Zahab (Iran) earthquake from Swarm satellites, GPS-TEC and climatological data. *Advances in Space Research*, 64(1), 143-158.

Barghi, W., Delavar, M. R., Shahabadi, M., Zare, M., EslamiNezhad, S. A., & Bayat, H. (2021). Earthquake prediction evaluation based on VLF data using a novel intersection-union method., *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, V-4-2021, 25-32, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-V-4-2021-25-2021>, 2021.

Du, D., Xu, W. Y., Zhao, M. X., Chen, B., Lu, J. Y., & Yang, G. L. (2010). A sensitive geomagnetic activity index for space weather operation. *Space Weather*, 8(12).

Gokhberg, M. B., Gufeld, I. L., Rozhnoy, A. A., Marenko, V. F., Yampolsky, V. S., & Ponomarev, E. A. (1989). Study of seismic influence on the ionosphere by super long-wave probing of the Earth-ionosphere waveguide. *Physics of the earth and planetary interiors*, 57(1-2), 64-67.

Gonzalez, W. D., Joselyn, J. A., Kamide, Y., Kroehl, H. W., Rostoker, G., Tsurutani, B. T., & Vasylunas, V. M. (1994). What is a geomagnetic storm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 99(A4), 5771-5792.

Hayakawa, M. (1996). The precursory signature effect of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signals. *J. Comm. Res. Lab., Tokyo*, 43(2), 169-180.

Hayakawa, M. (2015). *Earthquake Prediction with Radio Techniques*. John Wiley & Sons, Singapore, 294 p. <https://doi.org/10.1002/9781118770368>.

Hayakawa, M., & Hobara, Y. (2010). Current status of seismo-electromagnetics for short-term earthquake prediction. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 1(2), 115-155.

Hayakawa, M., Hobara, Y., Yasuda, Y., Yamaguchi, H., Ohta, K., Izutsu, J., and

وقوع، بررسی شد که دارای سیگنالی پیوسته و منظم بوده و هیچ‌گونه اختلالی در سیگنال مشاهده نشد.

بررسی‌های تکمیلی برای حذف سایر عوامل تداخلی

نظیر رخدادهای لرزه‌ای همزمان، شرایط فصلی، فعالیت‌های

خورشیدی و اختلالات و طوفان‌های ژئومغناطیسی انجام

گرفت که نشان داد تنها عامل محتمل بروز این

بی‌هنجاری‌ها، زمین‌لرزه خوی بوده است. بنابراین،

یافته‌های این تحقیق را می‌توان به‌عنوان تأییدی بر قابلیت

کاربرد سیگنال‌های VLF در پایش بی‌هنجاری‌های لرزه‌ای

و به‌عنوان بخشی از سامانه‌های هشدار زودهنگام در نظر

گرفت. این مطالعه همچنین ضرورت تقویت شبکه‌های

مانیتورینگ VLF/LF در مناطق لرزه‌خیز ایران را برای

توسعه مدل‌های پیش‌بینی گرایانه مؤثرتر بر جسته می‌سازد.

تشکر و قدردانی

از مرکز مطالعات پیش‌نشانگری زمین‌لرزه، مؤسسه

ژئوفیزیک دانشگاه تهران برای در اختیار قرار دادن داده‌های

ثبت شده توسط گیرنده VLF/LF ایستگاه TEH تشکر و

قدردانی می‌شود.

منابع

الهی‌سرشت، م.، و رضاپور، م. (۱۳۹۹). بررسی اثر

فعالیت‌های پیش‌لرزه‌ای در سیگنال‌های VLF ثبت شده

در گیرنده تهران. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۱(۴۶)،

۳۵-۴۹.

صفری، م.، محمودیان، ع.، و فلاح‌راد، م. (۱۴۰۰). مطالعه

و صحت‌سنجی داده‌های VLF/LF دریافتی در ایستگاه

گیرنده پیش‌نشانگری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه

تهران. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۲(۴۷)، ۲۴۱-۲۵۶.

طاهری‌نیا، ح. و پوربیرانوند، ش. (۱۴۰۰)، بررسی داده‌های

ژئومغناطیس به‌عنوان پیش‌نشانگر زمین‌لرزه ۵ سپتامبر

- Nakamura, T. (2012). Possible precursor to the March 11, 2011, Japan earthquake: ionospheric perturbations as seen by subionospheric very low frequency/low frequency propagation. *Annals of Geophysics*, 55(1).
- Hayakawa, M., & Molchanov, O. A. (2002). *Seismo Electromagnetics: Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling*. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB).
- Li, Z., Chen, Z., Huang, J., Li, X., Han, Y., Yang, X., & Li, Z. (2023). Study on VLF electric field anomalies caused by seismic activity on the western coast of the pacific rim. *Atmosphere*, 14(11), 1676.
- Maekawa, S., Horie, T., Yamauchi, T., Sawaya, T., Ishikawa, M., Hayakawa, M., & Sasaki, H. (2006). A statistical study on the effect of earthquakes on the ionosphere, based on the subionospheric LF propagation data in Japan. In *Annales geophysicae* (Vol. 24, No. 8, pp. 2219-2225). Göttingen, Germany: Copernicus Publications.
- Mahmoudian, A., Safari, M., & Rezapour, M. (2022). Earthquake prediction assessment using VLF radio signal sounding and space-based ULF emission observation. *Acta Geophysica*, 70(3), 1269-1284.
- Moayeri Manesh, F., Mahmoudian, A., & Rahimi, H., (2024). Detection of the pre-seismic anomalies in stratospheric temperature and radio emission using space-based observations, *Advances in Space Research*, 73(10), 5114-5133, doi.org/10.1016/j.asr.2024.02.040.
- Rozhnoi, A., Solovieva, M. S., Molchanov, O. A., & Hayakawa, M. (2004). Middle latitude LF (40 kHz) phase variations associated with earthquakes for quiet and disturbed geomagnetic conditions. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 29(4-9), 589-598.
- Shvets, A. V., Hayakawa, M., & Maekawa, S. (2004). Results of subionospheric radio LF monitoring prior to the Tokachi (m= 8, Hokkaido, 25 September 2003) earthquake. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(5/6), 647-653.

Investigation of the pre-indicator of VLF signals received at the receiver of the Institute of Geophysics, University of Tehran

Saba Nazari¹, Mehdi Rezapour^{2*} and Somayeh Sabri³

¹ M.Sc., Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

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

³ Assistant Professor, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 11 May 2025, Accepted: 16 Desember 2025)

Summary

Short-term earthquake prediction is vital for mitigating the destructive impacts of seismic events by providing timely information on the expected time, magnitude, and location, thus enabling preparedness days or months in advance. This is especially critical in seismically active regions such as Iran, where monitoring earthquake precursors is a major research focus. Among various precursors, anomalies in Very Low Frequency/Low Frequency (VLF/LF) radio signals propagating through the lower ionosphere have been repeatedly observed prior to significant earthquakes. In this study, we analyzed VLF signals recorded by the Geophysics Institute of the University of Tehran in relation to the M=5.9 earthquake that occurred in Khoy on January 28, 2023. A few days before the event, distinct anomalies were detected along the TBB-TEH signal path passing above the earthquake epicenter. To verify these anomalies as precursors, we compared the 26.7 kHz VLF signal data from this path on the earthquake day and the anomaly occurrence day (January 4, 2023) with baseline data from January 2021, which exhibited stable signal propagation. The analysis revealed clear amplitude variations, with elevated nighttime and reduced daytime amplitudes preceding the earthquake, while investigations excluded other seismic or environmental factors as causes. These findings affirm that the observed VLF signal anomalies are linked to the Khoy earthquake, highlighting the potential of VLF monitoring as an effective tool for short-term earthquake prediction in tectonically active regions.

Keywords: Earthquake, Khoy, precursor, VLF signals