

بررسی اثر فعالیت‌های پیش لرزه‌ای در سیگنال‌های VLF ثبت شده در گیرنده تهران

معصومه الهی سرشت^۱ و مهدی رضاپور^{۲*}

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه زلزله‌شناسی، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲. استاد، گروه زلزله‌شناسی، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۹۸/۵/۱۲، پذیرش نهایی: ۹۸/۱/۱)

چکیده

پدیده‌های الکترومغناطیسی از جمله اختلال در سیگنال‌های رادیویی (VLF, Very Low Frequency) برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت زمین‌لرزه از چند سال پیش در دنیا مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سیگنال‌های VLF از مرز پایینی یونوسفر بازتاب می‌یابند بنابراین هر تغییری در منطقه D یونوسفر شرایط بازتاب امواج VLF را تغییر می‌دهد. احتمالاً یکی از عواملی که پارامترهای مختلف یونوسفر را تحت تأثیر قرار می‌دهد، فرآیندهای اطراف کانون زمین‌لرزه قبل از وقوع آن است. تاکنون چند فرضیه برای مکانیسم نفوذ انرژی از کانون زمین‌لرزه‌های با عمق کمتر از ۴۰ کیلومتر به یونوسفر به صورت تئوری پیشنهاد شده است. یکی از مناسب‌ترین فرضیه‌ها نقش امواج گرانشی جوی در این رابطه است با این حال مدارک مشاهده‌ای زیادی وجود ندارد. در این تحقیق تغییرات مشاهده شده در سیگنال‌های VLF دریافت شده در گیرنده مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (TEH)، به‌عنوان پیش‌نشانگر قبل از وقوع رخداد لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در بازه زمانی و مسیرهای مورد مطالعه تنها زمین‌لرزه نسبتاً بزرگ، زمین‌لرزه Mn 5.8 سیرچ کرمان در تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۲۲ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که اختلالات واضحی چند روز قبل از وقوع زمین‌لرزه سیرچ کرمان مشاهده می‌شود که پس از بررسی عوامل مختلف مؤثر بر سیگنال می‌توان آن را به‌عنوان یک پیش‌نشانگر برای این زمین‌لرزه در نظر گرفت. همچنین تحلیل طیفی سیگنال‌های VLF فرستنده VTX3 در جنوب هند که در گیرنده تهران دریافت شده‌اند، بررسی شده است و نتایج آن نقش نوسانات گرانشی جوی را به‌عنوان مکانیسم اتصال لیتوسفر-یونوسفر به‌صورت مشاهده‌ای تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: پیش‌نشانگر زمین‌لرزه، یونوسفر، امواج گرانشی جوی، سیگنال‌های فرکانس خیلی پایین، زمین‌لرزه سیرچ کرمان.

۱. مقدمه

جدیدی در اندازه‌گیری پدیده‌های غیر لرزه‌ای طی سال‌های اخیر برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت زمین‌لرزه صورت گرفته است. این تحقیقات در زمینه تعامل بین فعالیت‌های لرزه‌ای و اختلال در سیگنال‌های رادیویی انجام شده است و پیشرفت‌های زیادی خصوصاً در بررسی سیگنال‌های VLF داشته است.

امواج VLF از مرز پایینی یونوسفر زمین بازتاب می‌یابند. یونوسفر یک لایه یونی در جو زمین است که حدوداً در ارتفاعی بین ۷۵ تا ۶۴۰ کیلومتری بالای سطح زمین قرار دارد. این لایه در اثر تابش خورشید و پرتوهای کیهانی یونیزه می‌شود و محیط الکتریکی آن امواج رادیویی را منعکس می‌کند. یونوسفر با توجه به چگالی الکترونی آن به لایه‌های D، E و F تقسیم می‌شود.

برای یک زمین‌لرزه بزرگ که با یک گسلش چند ده کیلومتری رخ می‌دهد، انرژی فوق‌العاده‌ای نیاز است و احتمالاً فرآیند تجمع انرژی لازم برای این شکست، می‌تواند سبب فعال شدن مکانیسم‌های ایجاد و انتشار برخی از پیش‌نشانگرها شود (موگی، ۱۹۸۴). تاکنون ده‌ها پیش‌نشانگر مختلف از جمله گل‌آلود شدن چشمه‌ها و تغییر دبی آنها، تغییر در میزان دما و گاز رادون آب‌های زیرزمینی، نوسانات ایجاد شده در میدان الکتریکی و مغناطیسی، تغییر در مقدار و شیب چگالی الکترون در لایه یونوسفر و غیره مشاهده شده است. پیچیدگی پدیده‌های زمین‌شناختی علی‌رغم پیشرفت‌های صورت گرفته، بشر را در پیش‌بینی وقوع زمین‌لرزه ناتوان کرده است. با این حال فعالیت‌های علمی

فرستنده و فاصله فرستنده-گیرنده ثابت باشد، دامنه و فاز انتشارات VLF دریافت شده عمدتاً وابسته به مقدار و شیب چگالی الکترون در نزدیکی مرز جو- یونوسفر است (روژنوی و همکاران، ۲۰۰۹). این مقادیر تحت تأثیر (۱) شارجهای خورشیدی (۲) فعالیت‌های ژئومغناطیسی (۳) رعد و برق قرار دارد (رودگر و مک کورمیک، ۲۰۰۶). علاوه بر این اثرات خورشیدی و زمینی، می‌توان اثر زمین‌لرزه‌ها یا فعالیت لرزه‌ای را در یونوسفر پایینی پیشنهاد کرد (هایاکاوا، ۲۰۰۷).

اولین پیشنهاد برای مطالعه اثر زمین‌لرزه‌ها بر روی منطقه D یونوسفر توسط محققان روسی در حدود ۲۰ سال پیش مطرح شده است (گوخبرگ و همکاران، ۱۹۸۹). آنها همچنین انتشار یک ناهنجاری قابل توجه در چند روز قبل از زمین‌لرزه M 6.8 اسپیتاک ارمنستان را نمایش دادند. نتایج متقاعدکننده‌تری برای آشفتگی‌های لرزه یونوسفری توسط هایاکاوا و همکاران (۱۹۹۶) برای زمین‌لرزه M 6.8 کوبه در سال ۱۹۹۵ و با عمق ۲۰ کیلومتر با استفاده از سیگنال VLF که از فرستنده تسوشیما ارسال و در گیرنده اینوبو دریافت شده بود به دست آمد. مولچانوو و هایاکاوا (۱۹۹۸) اطلاعاتی را طی ۱۳ سال برای همان مسیر تسوشیما-اینوبو بررسی کردند و نتیجه گرفتند که اختلالات یونوسفری برای حدود ۸۰ درصد زمین‌لرزه‌هایی که بزرگی بیشتر از ۶ و عمق کم دارند و رومرکز آنها در منطقه اول فرنل مسیر فرستنده-گیرنده قرار دارد، ظاهر می‌شود. منطقه اول فرنل، منطقه‌ای بیضوی‌گون در اطراف مسیر دید مستقیم (LOS, Line Of Sight) بین دو آنتن فرستنده و گیرنده است که نسبت به طول مسیر و قدرت سیگنال رادیویی تغییر می‌کند. ارسال سیگنال الکترومغناطیسی بین دو آنتن دقیقاً در یک خط مستقیم LOS انجام نمی‌شود، بلکه انرژی سیگنال در یک فضای سه بعدی بیضوی‌گون منتقل می‌شود. طبق استاندارد برای داشتن یک ارتباط بی‌سیم پایدار می‌بایست که حداقل ۶۰ درصد منطقه فرنل خالی از موانع باشد. اگر فرستنده (T) و گیرنده

لایه D ارتفاع ۷۵ الی ۹۵ کیلومتری از سطح زمین را دربر دارد. لایه E ارتفاع ۹۵ الی ۱۵۰ کیلومتر و لایه F که از دو لایه F1 و F2 تشکیل شده است ارتفاع بالاتر از ۱۵۰ کیلومتر را شامل می‌شود (کلی، ۲۰۰۹). امواج VLF از مرز لایه D یونوسفر منعکس شده و نسبت به امواج فرکانس بالا که به لایه D نفوذ می‌کنند کمتر تحت تأثیر اختلالات این ناحیه قرار دارند. لایه D شب‌ها از بین می‌رود و امواج VLF در این هنگام از مرز لایه E بازتاب می‌یابند.

باند فرکانسی سیگنال‌های VLF و LF مورد استفاده جهت ارتباط رادیویی به ترتیب در محدوده ۱۵ تا ۶۰ کیلوهرتز و ۱۵۰ تا ۳۰۰ کیلوهرتز قرار دارد هر چند که باند فرکانسی VLF و LF طبق تقسیم‌بندی در نظر گرفته شده به ترتیب ۳-۱۰ کیلوهرتز و ۳۰-۳۰۰ کیلوهرتز می‌باشد. این سیگنال‌ها طول موج بلندی دارند بنابراین با تضعیف کم در طول مسیر انتشار می‌یابند و برای انتقال از راه دور بسیار مناسب هستند. با این حال سطح نوفه جوی در VLF بسیار بالاست بنابراین قدرت فرستنده بالا و آنتن‌های بزرگ مورد نیاز است. از این رو هزینه انتشار آن گران و نیز پهنای باند فرکانسی در دسترس محدود است (وات، ۱۹۶۷). این سیگنال‌ها برای پشتیبانی ناوبری و اهداف نظامی در سطح جهان استفاده می‌شوند. بیشتر انرژی تأیید شده توسط فرستنده‌های VLF بین زمین و یونوسفر پایینی به دام می‌افتد و موجبر زمین-یونوسفر تشکیل می‌شود. سیگنال‌های VLF فرویونوسفری از منطقه D یونوسفر که احتمالاً ناشناخته‌ترین منطقه جو زمین است بازتاب می‌شوند. این ارتفاعات (۹۰-۷۰ کیلومتر) برای بالن‌ها بسیار دور و برای ماهواره‌ها بسیار کم است و تنها روش ممکن برای بررسی این منطقه، سیگنال‌های رادیویی فرویونوسفری VLF می‌باشد (رودگر و میکورمیک، ۲۰۰۶).

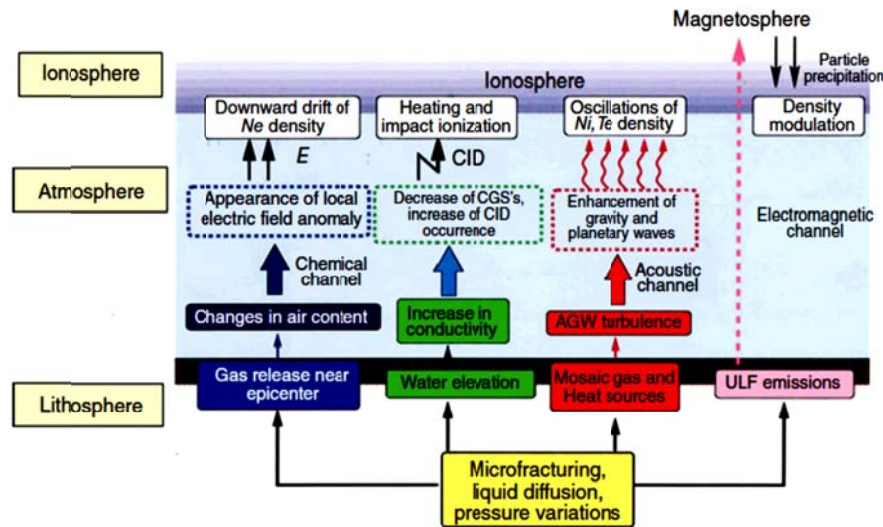
هر تغییری در منطقه D یونوسفر، به تغییرات در شرایط انتشار امواج VLF منجر می‌شود. اگر فرکانس

پریودهای خاصی دارند (مولچانو و همکاران، ۲۰۰۱). بیاجی و همکاران (۲۰۰۳) تأثیر جریان‌های جوی بر روی انتشار سیگنال رادیویی LF را در داده‌های ثبت شده در طول چهار سال بررسی کرده‌اند. آنها بر داده‌های ثبت شده، فیلترهای میان‌گذر با پهنای بند ۱۱-۱۳ ساعت، ۰/۹-۱/۲ روز، ۱۳-۱۵ روز و ۲۶-۳۰ روز اعمال کردند و مشاهده کردند که در میدان الکتریکی ثبت شده، هارمونیک‌های ۰/۵، ۱، ۱۴ و ۲۸ روز (فرکانس مرکزی پهنای‌بند فیلترهای اعمال شده) که مربوط به امواج جوی هستند قبل از زمین‌لرزه مارس ۱۹۹۸ اسلوانی افزایش یافته‌اند و با این زمین‌لرزه مرتبط هستند. اما چنین ارتباطی با اعمال فیلتر میان‌گذر ۲۲-۲۴ روز با فرکانس مرکزی ۲۳ روز که در باند هارمونیک‌های جوی نیست ظاهر نمی‌شود.

اینکه مرحله آماده‌سازی زمین‌لرزه می‌تواند به صورت محلی نواسانات جوی ایجاد کند احتمالاً به این دلیل است که مرحله آماده‌سازی زمین‌لرزه موجب گسترش نفوذ سیال‌ها و در نتیجه کاهش گرانش زمین در ناحیه اطراف رومرکز زمین‌لرزه آتی می‌شود، این فرض منطقی است زیرا انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش نرخ شارش چشمه‌ها و یا سطح آب‌چاه‌ها قبل از زمین‌لرزه بارها مشاهده شده است. بنابراین احتمالاً آشفتگی در سطح زمین مانند دما و فشار در یک منطقه لرزه‌ای فعال، نوسانات جو را به سمت یونوسفر هدایت می‌کند (بیاجی و همکاران، ۲۰۰۳). همچنین نتایج مولچانو و همکاران (۲۰۰۱)؛ میاکی و همکاران (۲۰۰۲)؛ شوتس و همکاران (۲۰۰۴a، ۲۰۰۴b)، نقش مهم (AGW, Atmospheric Gravity Wave) را در اتصال لیتوسفر-جو-یونوسفر نشان می‌دهد.

(R) در کانون‌های بیضوی قرار گیرند و M بیانگر مکان هندسی سطح بیضوی باشد منطقه اول فرنل برای امواج با طول موج λ جایگاه نقاطی است که شرط $TM+MR=TR+\lambda/2$ در آن برقرار باشد (هایاکاوا، ۲۰۱۵).

در طول دو دهه گذشته مقالات زیادی در مورد اختلالات سیگنال رادیویی VLF/LF مربوط به فعالیت‌های لرزه‌ای منتشر شده است (روژنوی و همکاران، ۲۰۰۴؛ شوتس و همکاران، ۲۰۰۴a، ۲۰۰۴b؛ ماکاوا و همکاران، ۲۰۰۶؛ بیاجی و همکاران، ۲۰۰۳؛ بیاجی و همکاران ۲۰۱۱). با وجود اینکه به احتمال زیاد یونوسفر قبل از زمین‌لرزه آشفتگی می‌شود و تغییراتی در پارامترهای مختلف یونوسفر از جمله تغییر در ارتفاع لایه D و ضریب بازتاب یونوسفر R و محتوای کل الکترونی TEC به وجود می‌آید، اما دلیل آن هنوز به خوبی مشخص نشده است. هایاکاوا و همکاران (۲۰۰۴a، ۲۰۰۴b) چند فرضیه ممکن را در مورد مکانیسم نفوذ انرژی از کانون زمین‌لرزه به یونوسفر پیشنهاد کرده‌اند: (۱) شیمیایی (میدان الکتریکی)؛ (۲) موج آکوستیک و گرانشی؛ و (۳) الکترومغناطیسی. این فرضیه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. اولین مورد، همان‌طور که مقادیر ژئوشیمیایی (مانند دمای سطح، انتشار رادون) موجب ایجاد آشفتگی در رسانایی جو می‌شود، منجر به تغییرات یونوسفری از طریق میدان الکتریکی جوی نیز می‌شود. مورد دوم بر اساس نقش کلیدی نوسانات جو در اتصال لیتوسفر-جو-یونوسفر است. جریان‌های گرانشی جوی می‌تواند در ضریب بازتاب یونوسفر R تغییر ایجاد کند بنابراین شدت میدان الکتریکی امواج VLF/LF در گیرنده تغییر می‌کند. امواج جوی متشکل از هارمونیک‌هایی هستند که



شکل ۱. مکانیسم‌های مختلف شیمیایی؛ موج آکوستیک و گرانشی؛ و الکترومغناطیسی برای اتصال لیتوسفر-جو-یونوسفر (هایاکاوا و همکاران، ۲۰۰۴a).

مکانیسم است. برای این منظور در این پژوهش تحلیل طیفی سیگنال‌های VLF فرستنده VTX3 در جنوب هند که در گیرنده تهران دریافت شده‌اند و تحت تأثیر زمین‌لرزه Mn 5.8 سیرچ کرمان در تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۲۲ قرار گرفته، بررسی شده است.

۲. روش پژوهش

۱-۲. پردازش داده VLF

تاکنون دو روش برای پردازش داده VLF پیشنهاد شده است. ابتدا روش «نوسان شبانه» (Night time fluctuation method) است که در آن توجه ویژه‌ای به داده‌ها در طول شبانه محلی می‌شود زیرا دامنه مربوط به روز، تغییرات بسیار کمی را برای تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد و تحت تأثیر اختلالات ناگهانی یونوسفر ناشی از اشعه ایکس می‌باشد بنابراین بهتر است از داده شب استفاده شود (شوتس و همکاران، ۲۰۰۴b). روش نوسان شبانه همچنین در مطالعات آماری ماکاوا و همکاران (۲۰۰۶) و کاساهارا و همکاران (۲۰۰۸) مورد استفاده قرار گرفته است. در اینجا روش تحلیل نوسان شبانه به‌طور خلاصه بیان می‌شود. شکل ۲-الف تغییرات روزانه دامنه برای یک مسیر خاص (فرستنده-گیرنده) در یک روز خاص را به رنگ قرمز در

مکانیسم سوم این است که انتشارات رادیویی در هر محدوده فرکانسی که در لیتوسفر تولید شده است به داخل یونوسفر نفوذ کرده و با گرم کردن و یا یونیزاسیون، یونوسفر را تغییر می‌دهد. اما این مکانیسم به دلیل شدت ضعیف انتشارات رادیویی لیتوسفری مفید نیست. بنابراین اولین و دومین مکانیسم، احتمالاً برای بیان این اتصال مناسب هستند (مولچانو و هایاکاوا، ۲۰۰۸).

آشفتگی‌های لرزه یونوسفری هم در زمان و هم در فضا بسیار نایکناخت است و منجر به تغییرات بسیار متنوعی حتی برای یک زمین‌لرزه در مسیرهای مختلف انتشار می‌شود (یاموچی و همکاران، ۲۰۰۷). بنابراین مشاهدات متعدد رویدادهای لرزه-یونوسفری در نقاط مختلف جهان و در مسیرهای متنوع فرستنده-گیرنده برای درک فرآیندهای مرتبط ضروری است. لذا در این تحقیق تغییرات سیگنال‌های VLF دریافت شده در گیرنده مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (TEH) برای یافتن اثرات پیش‌نشانگری زمین‌لرزه در ایران، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با وجود اینکه نقش AGWها در مکانیسم اتصال لیتوسفر-یونوسفر به‌صورت تئوری نشان داده شده است اما مدارک مشاهده‌ای، زیاد نیستند، بنابراین نیاز به جمع‌آوری داده و شواهد بیشتر در مورد این

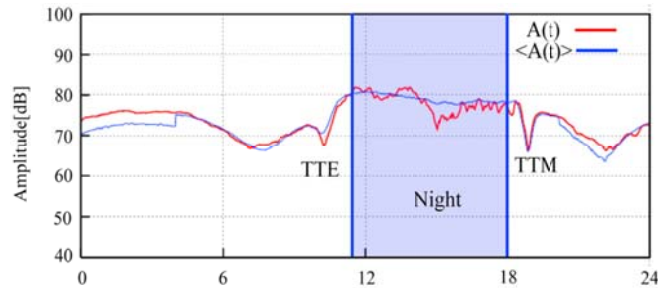
دادند. به این ترتیب، آنها به زمان‌های پایان‌دهنده (Terminator times) صبح و عصر توجه کردند. روش زمان پایان‌دهنده برای اولین بار برای زمین‌لرزه کوبه استفاده شد. موقعیت این زمین‌لرزه در شکل ۳-الف نشان داده شده است. فاصله فرستنده تسوشیما تا رصدخانه اینوبو تقریباً ۱۰۰۰ کیلومتر می‌باشد و رومرکز زمین‌لرزه ۱۹۹۵ کوبه در داخل منطقه اول فرنل قرار دارد. این روش تاکنون به‌عنوان یک روش تحلیل استاندارد VLF مورد استفاده قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۳-ب نشان داده شده است شیفت‌های قابل‌توجهی در زمان‌های پایان‌دهنده قبل از زمین‌لرزه مشاهده می‌شود. زمان پایان‌دهنده صبح (t_m) به ساعت‌های قبل شیفت پیدا می‌کند، درحالی‌که زمان پایان‌دهنده شب (t_e) به ساعت‌های بعد شیفت می‌یابد. این بدان معنی است که سیگنال‌های VLF، طول روز را در روزهای قبل از زمین‌لرزه طولانی‌تر نشان می‌دهند.

قالب UT (ساعت هماهنگ جهانی) نشان می‌دهد که در آن می‌توان به‌طور واضح ساعت‌های پایانی شب و صبح که هر دو در وقت محلی تعریف شده‌اند را مشخص کرد. دوره شبانه محلی در قسمت سایه نشان داده شده است. اختلاف تغییرات روزانه از میانگین تغییرات در ± 15 روز به‌صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود.

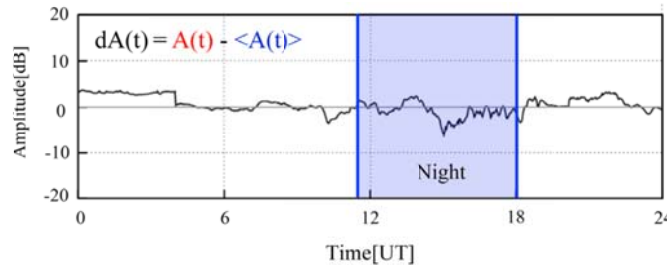
$$dA(t) = A(t) - \langle A(t) \rangle \quad (1)$$

که در آن $A(t)$ دامنه در زمان t در روز جاری است و $\langle A(t) \rangle$ میانگین در همان زمان t ، ± 15 روز قبل و بعد از روز مربوطه است. $dA(t)$ در شکل ۲-ب ترسیم شده است. اگر $dA(t)$ بیشتر از انحراف استاندارد (σ) مربوط به آن باشد به‌عنوان ناهنجاری در نظر گرفته می‌شود (روژنوی و همکاران، ۲۰۰۴).

هایاکاوا و همکاران (۱۹۹۶) دریافتند روش نوسان شبانه برای مسیر کوتاه انتشار (کمتر از ۲۰۰۰ کیلومتر)، خیلی مفید نیست بنابراین روش دیگری برای تجزیه و تحلیل ارائه

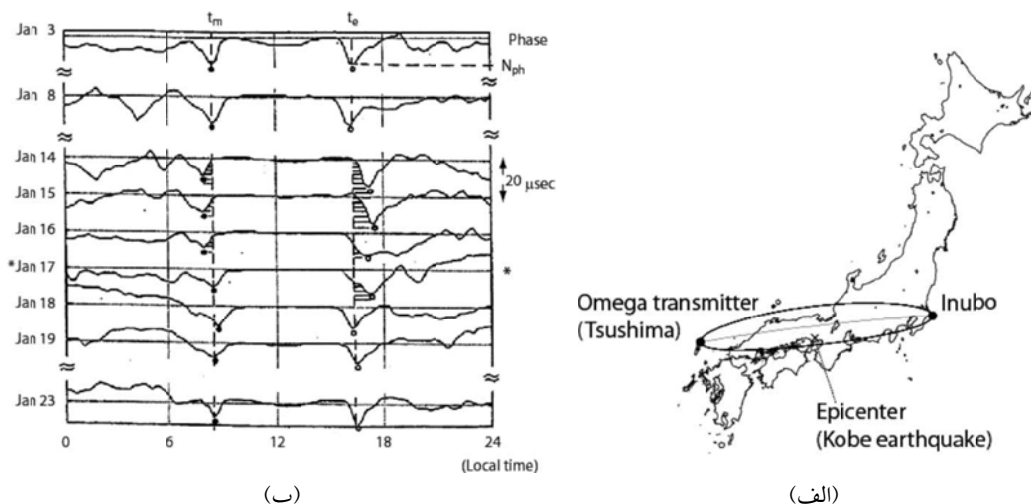


Time[UT]
(الف)



Time[UT]
(ب)

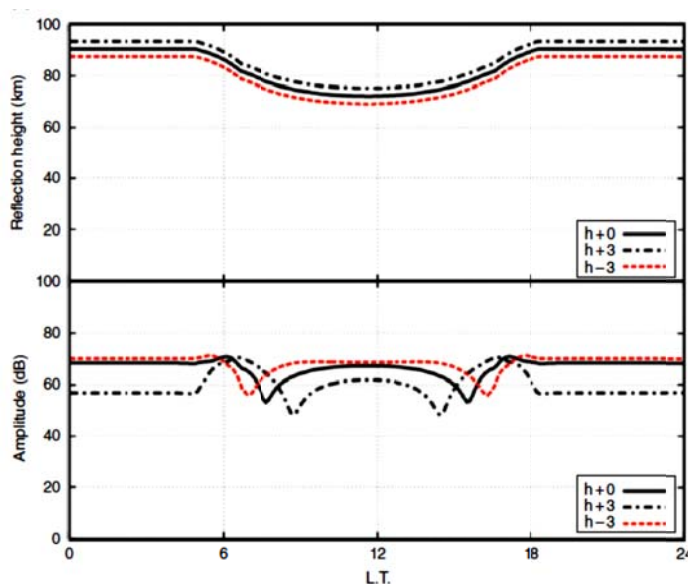
شکل ۲. الف) تغییرات روزانه دامنه برای یک مسیر در یک روز خاص به رنگ قرمز $A(t)$ و میانگین تغییرات دامنه در بیش از ± 15 روز حول روز موردنظر رنگ آبی $\langle A(t) \rangle$. ب) اختلاف $dA(t) = A(t) - \langle A(t) \rangle$ (هایاکاوا و هوبارا، ۲۰۱۰).



شکل ۳. الف) موقعیت نسبی فرستنده VLF امگا در تسوشیما و زمین‌لرزه ۱۹۹۵ کوبه. بیضی رسم شده منطقه اول فرنل بین فرستنده تسوشیما و گیرنده اینوبو را به‌طور تقریبی نشان می‌دهد. فاصله فرستنده تسوشیما با گیرنده اینوبو حدود ۱۰۰۰ کیلومتر و فاصله رومرکز زمین‌لرزه ۱۹۹۵ کوبه تا گیرنده اینوبو تقریباً ۵۰۰ کیلومتر است. ب) تصویر متوالی تغییرات روزانه فاز (تقریباً همان الگو برای دامنه). t_m زمان پایان‌دهنده صبح و t_e زمان پایان‌دهنده عصر می‌باشند. نواحی هاشور زده ناهنجاری‌ها را به‌صورت شیفت از مقدار میانگین ماهیانه نشان می‌دهند (هایاکاوا و همکاران، ۱۹۹۶؛ مولچانو و همکاران، ۱۹۹۸؛ هایاکاوا و هویارا، ۲۰۱۰).

ارتفاع بازتاب است. ملاحظه می‌شود که زمانی که ارتفاع بازتاب ۳ کیلومتر پایین می‌آید، t_e به ساعت‌های قبل و t_m به ساعت‌های بعد منتقل می‌شود. از این شکل قابل استنباط است که تغییر در زمان پایان‌دهنده، می‌تواند به‌طور منطقی با پایین آمدن یونسفر توضیح داده شود (مولچانو و همکاران، ۱۹۹۸).

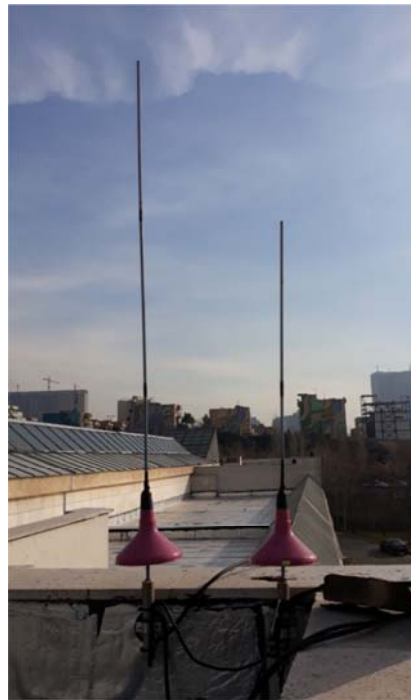
مولچانو و همکاران (۱۹۹۸) نتایج تئوری تغییر زمان‌های t_m و t_e را با تغییر ارتفاع بازتاب یونسفر نشان دادند. شکل ۴ تغییر ارتفاع بازتاب و سیگنال VLF متناظر با آن را نشان می‌دهد. در این شکل خط چین-نقطه چین مشکی مربوط به زمانی است که ارتفاع بازتاب ۳ کیلومتر بالاتر رفته است و نقطه چین قرمز مربوط به کاهش ۳ کیلومتری



شکل ۴. تغییر زمان‌های t_m و t_e هنگامی که ارتفاع بازتاب به اندازه ۳ کیلومتر تغییر می‌کند (مولچانو و همکاران، ۱۹۹۸).

شده است فرستنده‌هایی انتخاب شود که سیگنال دریافتی از آنها کمترین نوفه ممکن را داشته باشند و نیز مناطق مهم لرزه‌خیز ایران، درون ناحیه پنجم فرنل در مسیر فرستنده-گیرنده قرار بگیرد. این ناحیه، ناحیه حساس موج است که پژوهشگران از جمله ماکاوا و همکاران (۲۰۰۶) در تحقیقات خود در نظر گرفته‌اند. مشخصات این فرستنده‌ها در جدول ۱ درج شده است. همچنین موقعیت فرستنده‌های منتخب و گیرنده تهران (TEH) در شکل ۶ نشان داده شده است. فرستنده‌های VLF/LF در اروپا بیشتر هستند و توزیع آنها در اطراف ایران یکنواخت نیست البته بر حسب نیاز و زمان می‌توان فرستنده‌هایی که سیگنال آنها در ایستگاه تهران ثبت می‌شود را تغییر داد و هر لحظه با اتصال به گیرنده از طریق اینترنت و راه دور می‌توان تنظیمات گیرنده از جمله نرخ نمونه‌برداری، فرکانس سیگنال‌های دریافتی از فرستنده‌های VLF/LF را تغییر داد یا داده ثبت شده را دانلود کرد.

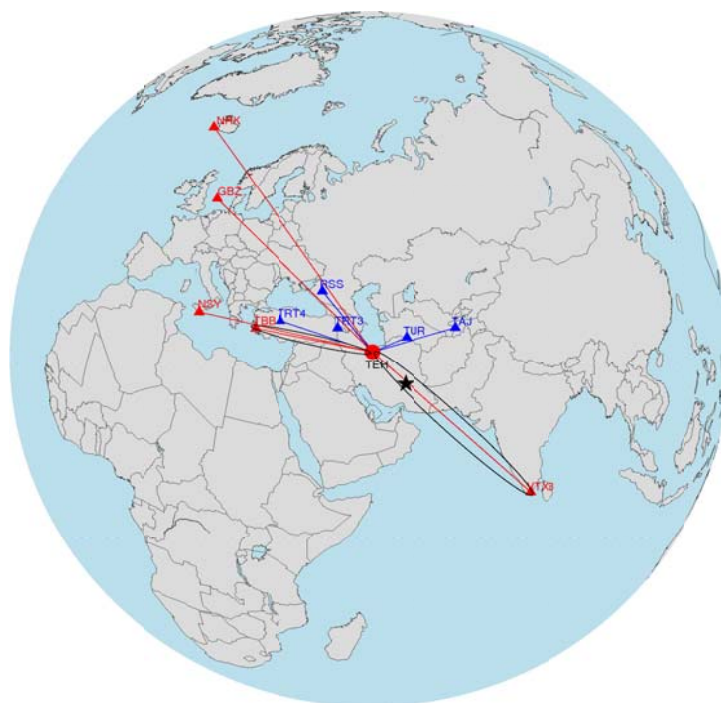
۳. تجزیه و تحلیل داده VLF ثبت شده در ایستگاه تهران
برای ثبت سیگنال‌ها از گیرنده TEH واقع در مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران استفاده شده است. نام گیرنده Eletronika و ساخت کشور ایتالیا می‌باشد. این گیرنده در دو محدوده فرکانسی ۱۵ تا ۵۰ کیلوهرتز و ۱۵۰ تا ۳۰۰ کیلوهرتز قادر است سیگنال‌های ده فرستنده VLF/LF را ثبت کند. گیرنده سیگنال‌ها را از دو آنتن VLF و LF متصل به خود دریافت می‌کند و نرخ نمونه‌برداری آن از ۲۰ ثانیه تا ۶۰۰ ثانیه قابل تنظیم می‌باشد. داده‌های دریافتی در این دستگاه با فرمت ASCII و با نرخ نمونه‌برداری ۱ دقیقه به صورت روزانه ذخیره می‌شوند. شکل ۵ گیرنده Eletronika و دو آنتن آن را نشان می‌دهد. این گیرنده دو تقویت کننده جداگانه برای امواج VLF و LF دارد که به آنتن‌ها متصل هستند و میزان تقویت آنها قابل تنظیم می‌باشد.
پس از بررسی فرستنده‌های VLF/LF موجود در اطراف ایران و نیز مناطق مهم لرزه‌خیز در ایران، سعی



شکل ۵. گیرنده Eletronika و آنتن‌های VLF و LF آن.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های فرستنده VLF/LF که سیگنال آنها در گیرنده TEH دریافت می‌شود.

VLF			LF		
Location	Station name	Frequency (kHz)	Location	Station name	Frequency (kHz)
India	VTX3	18.2	Turkey	TRT-4	162
England	GBZ	19.58	Russia	R Chechnya	171
Turkey	TBB	26.7	Turkey	TRT-4	180
Island	NRK	37.5	Tajikistan	Tajik Radio	252
Italy	NSY	45.5	Turkmenistan	Turkmen	279



شکل ۶. موقعیت فرستنده‌های VLF و LF که سیگنال آنها در گیرنده TEH دریافت می‌شود. مثلث‌های قرمز و آبی به ترتیب موقعیت فرستنده‌های VLF و LF را نشان می‌دهند. دایره قرمز و ستاره مشکی به ترتیب موقعیت ایستگاه گیرنده TEH و رومرکز زمین لرزه سیرج کرمان را نشان می‌دهند. بیضی مشکی رنگ منطقه اول فرنل را به طور شماتیک و تقریبی نشان می‌دهد.

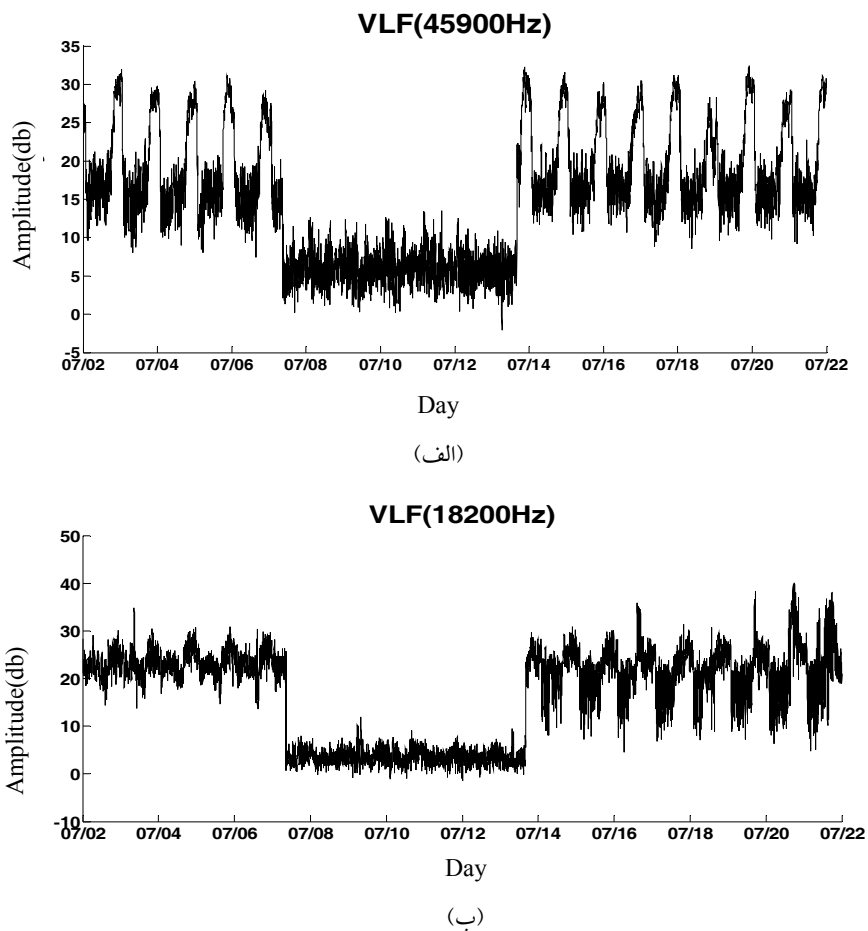
شود تا بتوان ارتباط آماری بین فعالیت لرزه‌ای و ناهنجاری‌های VLF/LF را یافت (روژنوی و همکاران، ۲۰۰۴). در این تحقیق به دلیل وقفه‌های مکرر در مجموعه داده که عمدتاً به دلیل نوفه‌های مکان گیرنده یا خرابی دستگاه رخ داده است و همچنین نبود داده بلندمدت، داده ثبت شده در گیرنده تهران تنها با

به طور کلی دو رویکرد برای یافتن ناهنجاری‌های ناشی از فعالیت‌های لرزه‌ای وجود دارد. اولین روش انتخاب یک رویداد لرزه‌ای و بررسی آن در زمان چند روز قبل و بعد از وقوع رویداد است. این روش عمدتاً به زمین‌لرزه‌های بزرگ و منفرد اعمال می‌شود. روش دوم این است که یک دوره زمانی بلندمدت بررسی

نشان می‌دهد. اولاً یک افت شدید از تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۰۷ تا ۲۰۱۸/۰۷/۱۴ در سیگنال این مسیرها مشاهده می‌شود که پس از بررسی‌های لازم مشخص شد که این افت مربوط به مشکلی در آنتن VLF گیرنده بوده است و به همین دلیل به‌طور همزمان در همه مسیرهای VLF نمایان شده است که در اینجا برای نمونه سیگنال دو مسیر نمایش داده شده است.

ثانیاً علاوه بر این پس از حذف نوفه گیرنده در شکل ۸ به‌صورت کیفی می‌توان پی برد که در سیگنال مسیر VTX3-TEH با فرکانس ۱۸۲۰۰ Hz از تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۱۷ تا ۲۰۱۸/۰۷/۲۲ زمین‌لرزه یعنی ۲۰۱۸/۰۷/۲۲ افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در دامنه سیگنال وجود دارد.

توجه به رویکرد اول، مورد بررسی قرار گرفته است. طبق اعلام مرکز لرزه نگاری زمین‌لرزه با بزرگی ۵/۸ و با عمق ۷/۱ کیلومتر در تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۲۲ در منطقه سیرج کرمان رخ داده است. موقعیت رومرکز آن $30^{\circ}/35^{\circ}$ شمالی و $57^{\circ}/50^{\circ}$ شرقی اعلام شده است. رومرکز زمین‌لرزه سیرج کرمان در داخل منطقه اول فونل فرستنده VTX3 هند و گیرنده TEH قرار گرفته است (شکل ۶). بنابراین تنها داده‌های این مسیر مورد تحلیل قرار گرفت و ۴ مسیر VLF دیگر به‌عنوان مسیرهای کنترل در نظر گرفته شدند. شکل ۷ سیگنال‌های مربوط به دو مسیر NSY-TEH و VTX3-TEH را از تاریخ ۲۰۱۸/۰۷/۰۲ تا ۲۰۱۸/۰۷/۲۲



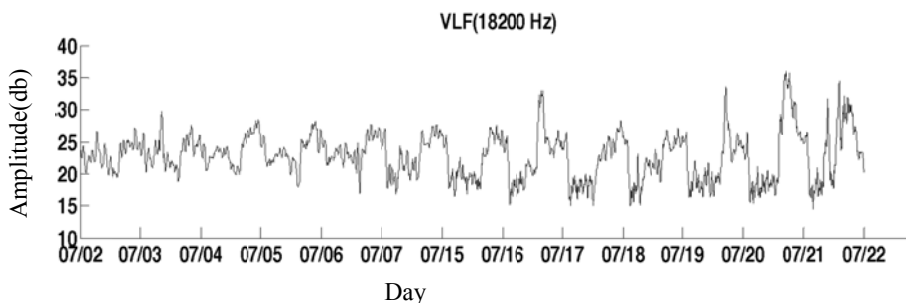
شکل ۷. تغییرات دامنه سیگنال‌های دریافتی از دو فرستنده NSY در ایتالیا و VTX3 در هند در بازه زمانی ۲۰۱۸/۰۷/۰۲ تا ۲۰۱۸/۰۷/۲۲. (الف) سیگنال مسیر NSY-TEH و (ب) سیگنال مسیر VTX3-TEH.

می‌شود. در این روش نخست سیگنال به پنجره‌هایی به طول n تقسیم‌بندی سپس یک منحنی چند جمله‌ای با درجه محدود m به نقاط این بخش از سیگنال با روش حداقل مربعات خطا برازش می‌شود. از این روانتخاب طول پنجره‌ها و درجه چندجمله‌ای (که بیشتر یک انتخاب تجربی است) دارای اهمیت است به طوری که ضمن افزایش نسبت سیگنال به نویز، اطلاعات پیک‌ها هم حفظ شود (ساویتزکی و گولای، ۱۹۶۴). برای این منظور در اینجا از چندجمله‌ای‌های درجه ۲ و طول پنجره ۳۱ استفاده شده است.

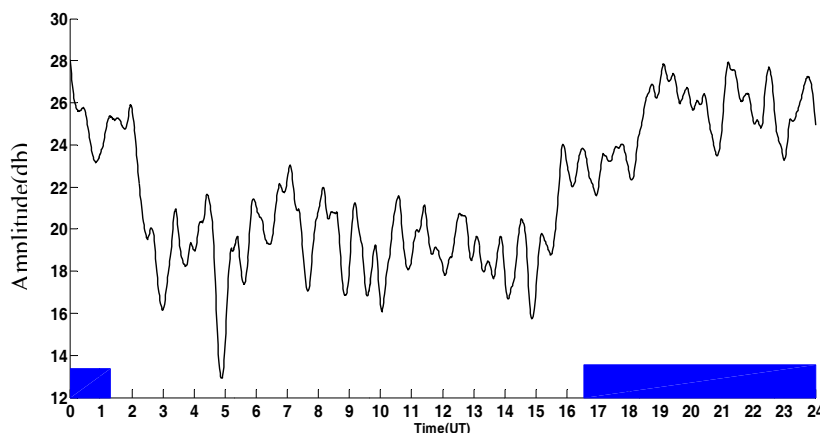
سپس با در نظر گرفتن زمان‌های طلوع و غروب خورشید در بازه زمانی هفتمین ماه میلادی و همچنین سیگنال‌های مربوطه، زمان شب محلی در این دوره، از ساعت ۹ شب تا ۵:۳۰ بامداد در نظر گرفته شد. این زمان به وقت گرینویچ از ساعت ۱۶:۳۰ تا ۰۱:۳۰ بامداد می‌باشد و در شکل ۹ نشان داده شده است.

روش زمان پایان‌دهنده، عمدتاً برای جهت انتشار E-W و فواصل کوتاه کمتر از ۲۰۰۰ کیلومتر مؤثر است (ماکاوا و هایاکاوا، ۲۰۰۶)، اما مسیر انتشار VTX3-TEH تقریباً در جهت N-S است همچنین طول این مسیر حدود ۳۸۰۰ کیلومتر است بنابراین روش زمان پایان‌دهنده برای این مسیر خیلی کارآمد نیست لذا از روش نوسان شبانه استفاده شد.

در فرآیند پردازش داده در محیط نرم‌افزار متلب، در ابتدا به منظور حذف مؤلفه‌های فرکانس بالا و هموارسازی سیگنال، فیلتر Savitzky-Golay اعمال شد. هموارسازی ساویتزکی-گولای یک شیوه مفید هموارسازی است. این هموارسازی یک فیلتر دیجیتال است که می‌توان آن را به مجموعه‌ای از داده‌های دیجیتال به منظور هموارکردن سری زمانی اعمال کرد. هدف اصلی این روش افزایش نسبت سیگنال به نوفه است و این کار تا حد زیادی بدون خدشه‌دار شدن سیگنال نخستین انجام



شکل ۸. تغییرات دامنه سیگنال VLF دریافتی از فرستنده VTX3 بر حسب روز در بازه زمانی ۲۲ روز قبل از زمین‌لرزه Mn 5.8 سیرج کرمان.

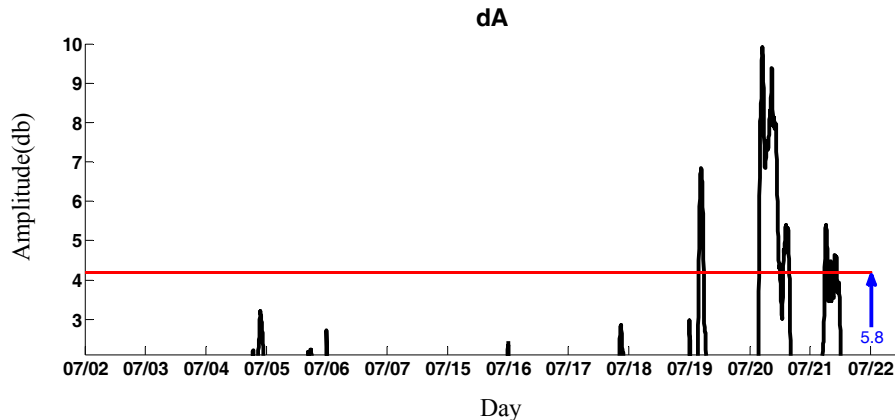


شکل ۹. تغییرات دامنه سیگنال VLF دریافتی در طول یک شبانه روز. زمان شب محلی روی محور زمان با رنگ آبی مشخص شده است.

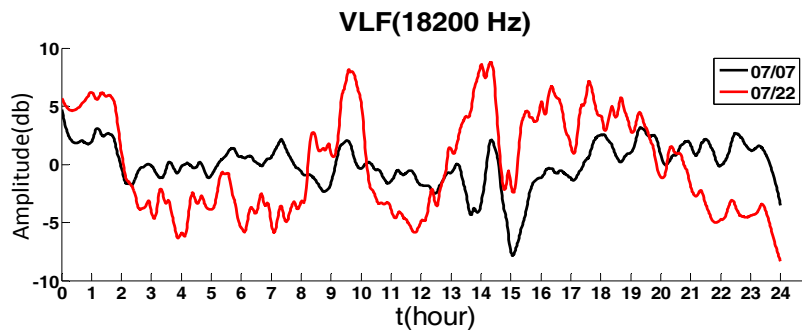
زمین‌لرزه یعنی ۲۲ جولای ۲۰۱۸ و یک روز قبل از زمین‌لرزه یعنی ۲۱ جولای با روز ۷ جولای ۲۰۱۸ یعنی ۱۵ روز قبل از زمین‌لرزه در شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ب مقایسه شده است. همچنین مسیرهای دیگر گیرنده TEH کنترل شده‌اند به‌عنوان نمونه سیگنال‌های مسیر TBB-TEH و NSY-TEH به ترتیب در شکل‌های ۱۴-پ و ۱۴-ت برای ۲۲ جولای ۲۰۱۸ و روز ۷ جولای ۲۰۱۸ ترسیم شده است. ملاحظه می‌شود که دامنه سیگنال در مسیرهای TEH و NSY-TEH برخلاف مسیر VTX3-TEH تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای ندارد. از این شکل‌ها مشخص است که یک کاهش در دامنه روزانه و یک افزایش در دامنه شبانه در مسیر VTX3-TEH قبل از زمین‌لرزه رخ داده است.

شکل ۱۰ تغییرات مقدار dA یعنی $dA(t)=A(t)-\langle A(t) \rangle$ را برای حدود ۲۰ روز قبل از زمین‌لرزه سیرج کرمان را نشان می‌دهد. $A(t)$ دامنه شبانه سیگنال در روز مربوطه و $\langle A(t) \rangle$ میانگین دامنه شبانه در طول دوره ۲۰۱۸/۰۷/۰۲ تا ۲۰۱۸/۰۷/۲۲ می‌باشد. سطح 2σ (دو برابر انحراف از میانگین) نیز در شکل به رنگ قرمز رسم شده است. روزهای ۲۰۱۸/۰۷/۰۸ تا ۲۰۱۸/۰۷/۱۴ به دلیل وجود اختلال در گیرنده و ثبت نکردن داده حذف شده‌اند.

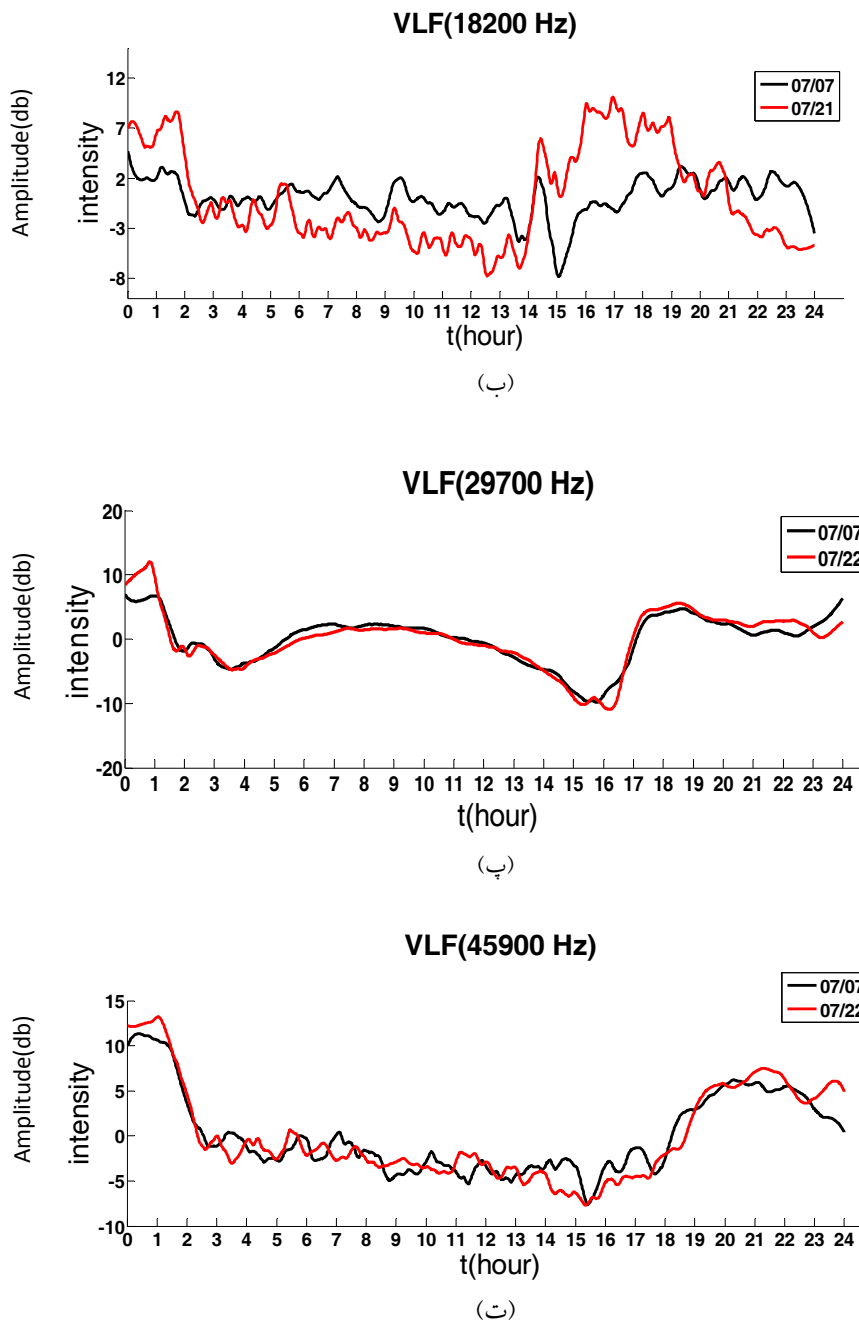
ملاحظه می‌شود که $dA(t)$ از چهار روز قبل از زمان وقوع زمین‌لرزه از دو برابر انحراف معیار (2σ) بیشتر شده است در نتیجه به‌عنوان یک ناهنجاری و پیش‌نشانگر در نظر گرفته می‌شود. سیگنال مسیر VTX3-TEH برای روز



شکل ۱۰. اختلاف دامنه از مقدار میانگین بالاتر از سطح σ (انحراف استاندارد). سطح 2σ نیز در شکل به رنگ قرمز رسم شده است. بردار آبی، روز زمین‌لرزه سیرج کرمان را نشان می‌دهد.



(الف)



شکل ۱۱. مقایسه سیگنال روزهای ۲۱ و ۲۲ جولای (قرمز) و سیگنال روز ۷ جولای (مشکی) برای مسیرهای (الف) VTX3-TEH (فرکانس ۱۸۲۰۰ Hz) (ب) VTX3-TEH (فرکانس ۱۸۲۰۰ Hz) (پ) TBB-TEH (فرکانس ۲۷۹۰۰ Hz) و (ت) NSY-TEH (فرکانس ۴۵۹۰۰ Hz).

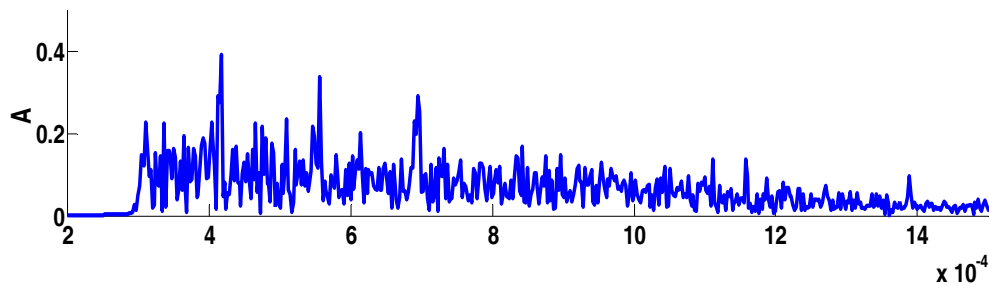
عوامل مؤثر دیگر ظاهر نشوند. معمولترین عوامل مؤثر روی سیگنال VLF/LF اثر شعله‌های خورشیدی (solar flare) است. مدت‌زمان این اثر در سیگنال بسیار کوتاه است (کمتر از ده دقیقه). عامل مؤثر دیگر اثر

در تعیین پیش‌نشانگرهای VLF/LF زمین‌لرزه‌ها باید به عوامل دیگر بر روی اختلالات آنها توجه شود. در واقع ناهنجاری سیگنال‌های VLF/LF تنها زمانی می‌تواند به‌عنوان پیش‌نشانگر زمین‌لرزه در نظر گرفته شود، که

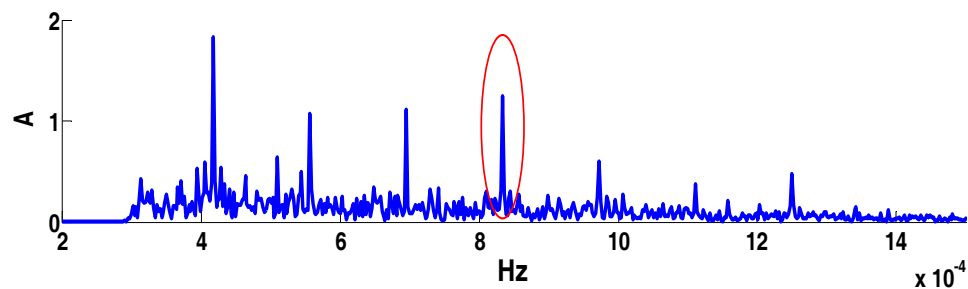
امواج گرانشی - جوی هستند دیده می‌شود، درحالی‌که این دوره‌ها در طیف مختل شده توسط طوفان‌های ژئومغناطیسی وجود ندارند. برای بررسی این موضوع در اینجا طیف روزهای آرام از ۲۰۱۸/۰۷/۰۳ تا ۲۰۱۸/۰۷/۰۷ و روزهای قبل از زمین‌لرزه از ۲۰۱۸/۰۷/۱۸ تا ۲۰۱۸/۰۷/۲۲ در شکل ۱۵ رسم شده است. برای نشان دادن دوره‌های ذکر شده بر روی سیگنال فیلتر میان گذر (۱۵ - ۰/۲۸ mHz) اعمال شده است. شکل ۱۵-الف مربوط به روزهای آرام و شکل ۱۵-ب مربوط به روزهای قبل از زمین‌لرزه است. دوره ۲۰ دقیقه در طیف روزهای قبل از زمین‌لرزه با بیضی قرمز رنگ نشان داده شده است. این دوره در طیف روزهای آرام دیده نمی‌شود. این نتیجه علاوه بر اینکه احتمال اثر ژئومغناطیسی بر سیگنال را رد می‌کند، نقش AGWها را در مورد مکانیسم تولید اختلالات لرزه-یونوسفری نشان می‌دهد. بر اساس این مشاهدات، ناهنجاری رادیویی تحت مطالعه می‌تواند به‌عنوان پیش‌نشانگر زمین‌لرزه سیرج کرمان در نظر گرفته شود.

رعدوبرق است که این هم کوتاه‌مدت است (از مرتبه چند دقیقه) (هایاکاوا، ۲۰۱۵)؛ اما ناهنجاری مشاهده شده در این تحقیق بلندمدت است و حدود ۴ روز به طول انجامیده است. اثرات هواشناسی نیز بیشتر بر روی سیگنال LF مؤثرند و تأثیر قابل توجهی در سیگنال VLF ندارند (بیاجی و همکاران، ۲۰۱۱).

جدی‌ترین مشکل برای تشخیص اثرات لرزه-یونوسفری، فعالیت‌های ژئومغناطیسی می‌باشد. زیرا این فعالیت‌ها بلندمدت هستند و تغییرات مشابهی با اثرات زمین‌لرزه بر سیگنال‌های VLF/LF دارند (هایاکاوا، ۲۰۱۵). روزنوی و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند که اگرچه اثرات القا شده توسط زمین‌لرزه‌ها و فعالیت‌های ژئومغناطیسی خیلی مشابه هستند اما مقیاس ناهمگنی در یونوسفر بسیار متفاوت است. طوفان‌های مغناطیسی فرآیندهای جهانی هستند درحالی‌که اختلالات لرزه القایی ویژگی محلی دارند؛ این اختلاف می‌تواند از تحلیل طیفی سیگنال‌ها دیده شود. بدین‌صورت که در طیف سیگنال‌های لرزه القایی دوره‌هایی در حدود ۸ تا ۲۰ دقیقه که مربوط به دوره‌های



(الف)



(ب)

شکل ۱۵. طیف فرکانس سیگنال مسیر TEH-VTX3 با اعمال فیلتر میان‌گذر (۱۵ - ۰/۲۸ mHz) (الف) مربوط به روزهای آرام از ۲۰۱۸/۰۷/۰۳ تا ۲۰۱۸/۰۷/۰۷ و (ب) مربوط به روزهای قبل از زمین‌لرزه از ۲۰۱۸/۰۷/۱۸ تا ۲۰۱۸/۰۷/۲۲.

۴. بحث و نتیجه گیری

دقیق‌تر این سیگنال‌ها نظارت منظم بر داده بلندمدت و همچنین تعداد گیرنده‌های بیشتر در کشور مورد نیاز است. در مورد سه ویژگی مهم یک پیش‌نشانگر زمین‌لرزه یعنی زمان، مکان و بزرگی زمین‌لرزه در روش VLF/LF آنومالی‌ها از حدود یک هفته تا حداکثر ده روز قبل از زمین‌لرزه‌ها رخ می‌دهند (بیاجی، ۲۰۰۹) و برای پیش‌بینی کوتاه مدت مناسبند اما هنوز زمان دقیق زمین‌لرزه مشخص نیست. اختلالات برای زمین‌لرزه‌های با بزرگی کمتر از ۵/۵ ظاهر نمی‌شود و برای زمین‌لرزه‌های با بزرگی ۵/۵-۶ اختلالات شدت کمتری نسبت به زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۶ دارند بنابراین این روش می‌تواند تخمینی از بزرگی زمین‌لرزه داشته باشد. همچنین با استفاده از پوشش مناسب شبکه‌ای از گیرنده‌های VLF/LF و استفاده از روش‌های پردازشی مناسب می‌توان تا حدودی زمین‌لرزه را مکان‌یابی کرد. در نهایت می‌توان گفت این حوزه جدید علم به‌عنوان یک نامزد امیدوارکننده برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت زمین‌لرزه برای کاهش خسارات زمین‌لرزه در کشورهای لرزه‌خیز نظیر ایران به‌شمار می‌رود.

تشکر و قدردانی

از مرکز مطالعات پیش‌نشانگری زمین‌لرزه، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران برای در اختیار قرار دادن داده ثبت شده توسط گیرنده VLF/LF ایستگاه TEH تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- Biagi, P. F., Piccolo, R., Capozzi, V., Ermini, A., Martellucci, S., and Bellecci, C., 2003, Exalting in atmospheric tides as earthquake precursor, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3, 197-201.
- Biagi, P. F., 2009, Pre and post seismic disturbances revealed on the geochemical data collected in Kamchatka (Russia) during the last 30 years, In *Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*, 4, 97-117.
- Biagi, P. F., Maggipinto, T. and Ermini A., 2011, The European VLF/LF radio network to search for earthquake precursors, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 333-34.
- Gokhberg, M. B., Gufeld, I. L., Rozhnoy, A. A., Marenko, V. F., Yampolsky, V. S. and Ponomarev, E. A., 1989, Study of seismic influence on the ionosphere by super long wave probing of the Earth-ionosphere waveguide, *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 57, 64-67.
- Hayakawa, M., Molchanov, O. A., Ondoh, T. and Kawai, E., 1996, The precursory signature effect of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signals, *Journal of Communications Research Laboratory*, Tokyo, 43, 169-180.
- Hayakawa, M., Molchanov, O. A. and

تاکنون پیشرفت‌های زیادی مخصوصاً در زمینه اندرکنش بین فعالیت‌های لرزه‌ای و اختلالات سیگنال‌های رادیویی از جمله VLF صورت گرفته است. نظریه‌هایی به‌ویژه در مورد اینکه چرا و چطور یونوسفر قبل از زمین‌لرزه مختل می‌شود وجود دارد اما این‌ها باید با مشاهدات بیشتر به‌صورت تجربی تأیید شوند. در این تحقیق پس از بررسی تغییرات سیگنال‌های VLF دریافت شده در گیرنده مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (TEH)، اختلالاتی به‌صورت کاهش در دامنه شبانه و افزایش در دامنه روزانه بیش از دوبرابر انحراف استاندارد، چهار روز قبل از وقوع زمین‌لرزه Mn 5.8 سیرچ کرمان مشاهده شد. این ناهنجاری‌ها تنها در مسیر VTX3-TEH قرار داشتند بنابراین ارتباطی به اختلال در فرستنده یا گیرنده نداشتند. ارتباط این ناهنجاری‌ها با عوامل مؤثر بر یونوسفر از جمله پرتوهای خورشیدی، رعدوبرق، هواشناسی و فعالیت‌های ژئومغناطیسی نیز بررسی شد و احتمال ارتباط با این عوامل رد شد. این ناهنجاری‌ها حدود چهار روز قبل از زمین‌لرزه آغاز شده بودند و تا روز زمین‌لرزه ادامه داشتند؛ بنابراین احتمالاً با اثرات پیش‌نشانگری زمین‌لرزه سیرچ کرمان مرتبط هستند. همچنین تحلیل طیفی سیگنال‌ها تأثیر امواج گرانشی جوی را در مکانیسم اتصال لیتوسفر-جو-یونوسفر برای این زمین‌لرزه نشان می‌دهد. اختلالات زمین‌لرزه سیرچ کرمان یک شاهد دیگر از وقوع اختلالات رادیویی در فرکانس VLF قبل از رویداد زمین‌لرزه را ارائه می‌دهد. با این وجود برای بررسی‌های

- Nasda/UEC Team, 2004 a, Summary report of NASDA's Earthquake Remote Sensing Frontier Project, *Physics and Chemistry of the Earth*, 29, 617–625.
- Hayakawa, M., Molchanov, O. A. and Nasda/UEC Team, 2004 b, Achievements of NASDA's Earthquake Remote Sensing Frontier Project, *Atmospheric and Oceanic Sciences*, 15, 311–328.
- Hayakawa, M., 2007, VLF/LF radio sounding of ionospheric perturbations associated with earthquakes, *Sensors*, 7, 1141–1158.
- Hayakawa, M. and Hobarra, Y., 2010, Current status of seismo-electromagnetics for short-term earthquake prediction, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 1(2), 115–155.
- Hayakawa, M., 2015, *Earthquake prediction with radio techniques*, first ed, John Wiley & Sons, Singapore Pte. Ltd.
- Kasahara, Y., Muto, F., Horie, T., Yoshida, M., Hayakawa, M., Ohta, K., Rozhnoi, A., Solovieva, M. and Molchanov, O. A., 2008, On the statistical correlation between the ionospheric perturbations as detected by subionospheric VLF/LF propagation anomalies and earthquakes, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, 653–656.
- Kelley, M., 2009, *The Earth's Ionosphere*, 2nd Edition. ISBN-9780120884254, Printbook.
- Maekawa, S. and Hayakawa, M., 2006, A statistical study on the dependence of characteristics of VLF/LF terminator times on the propagation direction, *IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials*, 126, 220–226.
- Maekawa, S., Horie, T., Yamauchi, T., Sawaya, T., Ishikawa, M., Hayakawa, M. and Sasaki, H., 2006, A statistical study on the effect of earthquakes on the ionosphere, based on the subionospheric LF propagation data in Japan, *Annales Geophysicae*, 24, 2219–2225.
- Miyaki, K., Hayakawa, M. and Molchanov, O. A., 2002, The role of gravity waves in the lithosphere–ionosphere coupling, as revealed from the subionospheric LF propagation data, In *Seismo Electromagnetics: Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling*, M. Hayakawa and O. A. Molchanov (Eds), 229–232.
- Mogi, K., 1984, A collection of papers of international symposium on continental seismicity and earthquake prediction, *Seismological press*, 619–652.
- Molchanov, O. A. and Hayakawa, M., 1998, Subionospheric VLF signal perturbations possibly related to earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, 17, 489–504.
- Molchanov, O. A., Hayakawa, M., Oudoh, T. and Kawai, E., 1998, Precursory effects in the subionospheric VLF signals for the Kobe earthquake, *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 105, 239–248.
- Molchanov, O. A. and Hayakawa, M., 2008, *Seismo-electromagnetics and Related Phenomena, History and Latest Results Vol. 189*. (Tokyo: Terra Scientific).
- Molchanov, O. A., Hayakawa, M. and Miyaki, K., 2001, VLF/LF sounding of the lower ionosphere to study the role of atmospheric oscillations in the lithosphere–ionosphere coupling, *Advances in Polar Upper Atmosphere Research*, 15, 146–158.
- Rodger, C. and McCormick, R. J., 2006, Remote sensing of the upper atmosphere by VLF, In *Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges*, 167–190.
- Rozhnoi, A., Solovieva, M. S., Molchanov, O., Schwingenschuh, K., Boudjada, M., Biagi, P. F., Maggipinto, T., Castellana, L., Ermini, A., and Hayakawa, M., 2009, Anomalies in VLF radio signals prior the Abruzzo earthquake (M=6.3) on 6 April 2009, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1727–1732.
- Rozhnoi, A., Solovieva, M. S., Biagi, P. F., Schwingenschuh, K. and Hayakawa, M., 2012, Low frequency signal spectrum analysis for strong earthquakes, *Annals of Geophysics*, 55, 181–186.
- Rozhnoi, A., Solovieva, M. S., Molchanov, O. A. and 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*, 29, 589–598.
- Savitzky, A. and Golay, M. J., 1964, Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures, *Analytical chemistry*, 36, 1627–1639.
- Shvets, A. V., Hayakawa, M. and Maekawa, S., 2004 a, Results of subionospheric radio LF monitoring prior to the Tokachi (M=8, Hokkaido, 25 September 2003) earthquake, *Nat. Hazards and Earth Syst. Sci.*, 4, 647–653.
- Shvets, A. V., Hayakawa, M., Molchanov, O. A. and Ando, Y., 2004 b, A study of ionospheric response to regional seismic activity by VLF radio sounding, *Physics and Chemistry of the Earth*, 29, 627–637.
- Yamauchi, T., Maekawa, S., Horie, T., Hayakawa, M. and Soloviev, O., 2007, Subionospheric VLF/LF monitoring of ionospheric perturbations for the 2004 Mid-Niigata earthquake and their structure and dynamics, *Journal of Atmospheric and Solarterrestrial Physics*, 69, 793–802.
- Watt, A. D., 1967, *V.L.F. Radio Engineering*, Pergamon Press, Oxford, 701p.

Investigation of pre-seismic activity effect on recorded VLF signals in Tehran receiver

Elahiseresht, M.¹ and Rezapour, M.^{2*}

1. M.Sc. Graduated, Department of Seismology, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Professor, Department of Seismology, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 3 Aug 2019, Accepted: 21 Jan 2020)

Summary

Electromagnetic phenomena such as disturbance of VLF (very low frequency) radio signals, have been used for prediction of short-term earthquakes in the world from some years ago. VLF signals are reflected from the lower bound of the ionosphere, so any change in the ionosphere D region leads to changes in the conditions of the VLF wave propagation. One of the factors that influences the various parameters of the ionosphere is the processes surrounding the earthquake center before it occurs. So far, several hypotheses have been proposed for the mechanism of energy penetration from the earthquake to the ionosphere in theory. One of the most appropriate hypotheses is the role of atmospheric gravitational waves in this regard. However, there are not many observational evidence. In this study, after a review of variations in VLF signals received at the receiver of Tehran University's Institute of Geophysics (TEH), significant disturbances were observed several days prior to the onset of the Mn 5.8 Sirch earthquake that occurred on 22 July, 2018, in Kerman province, southeastern Iran. These abnormalities appeared as decreasing in the night range and increasing in the amplitude of the day and were only in the VTX3-TEH pathway, so they did not have any relation to the disorder in the transmitter or receiver. The association of these abnormalities with the factors affecting the ionosphere, including Solar flares, Lightning, Meteorological and geomagnetic activities was also studied and risk associated with these factors were rejected. These abnormalities began about four days before the earthquake and continued until the day of the earthquake; therefore, they are probably related to the precursor effects of the Sirch Kerman earthquake. Spectral analysis of signals was also performed and a 20 minutes harmonic was found in the spectrum of days before the earthquake. This period is not observed in the quiet days. This result, in addition to denying the probability of a geomagnetic effect on the signal, shows the effect of atmospheric gravitational waves in the lithosphere-atmospheric-ionospheric coupling mechanism for this earthquake. Based on these observations, the radio anomaly under study can be considered as a precursor of the Sirch earthquake in Kerman. The 22 July 2018 Mn 5.8 Sirch earthquake disturbances in Kerman provide another evidence of radio frequency disturbances at the VLF frequency before the earthquake. However, for more accurate monitoring of these signals, regular monitoring of long-term data as well as the number of more receivers in the country is required. In this case three important features, an earthquake pre-indicator, the time, location and magnitude of the earthquake in VLF/LF anomalies, occur from about a week to a maximum of 10 days before the earthquakes (Biagi, 2009) and are suitable for short-term forecasting, but still the exact time of earthquake is not clear. The disturbances do not appear for earthquakes with magnitude less than 5.5 and for earthquakes between 5-6 disturbances are less severe than earthquakes larger than 6, so this method may estimate the magnitude of the earthquake. Also, using an appropriate network coverage of the VLF/LF receivers and the use of appropriate processing methods, it is possible to locate somewhat an earthquake. Finally, it can be said that this new field of science is considered as a promising candidate for short-term earthquake prediction to reduce earthquake damage in active area such as Iran.

Keywords: Earthquake Precursor, Ionosphere, Atmospheric Gravitational Waves, VLF Signals, Kerman-Sirch earthquake.

* Corresponding author:

rezapour@ut.ac.ir