

مطالعه و صحت‌سنجی داده‌های VLF/LF دریافتی در ایستگاه گیرنده پیش‌نشانگری

موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

محسن صفری^۱، علیرضا محمودیان^{۲*} و مریم فلاح راد^۳

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

۲. استادیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه فیزیک زمین، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: ۹۹/۹/۱۲، پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۳/۴)

چکیده

از جمله اقدامات صورت‌گرفته برای پیش‌نشانگری زمین‌لرزه می‌توان به بررسی فعالیت‌های تکتونیکی صفحات پوسته زمین، بررسی تغییرات سرعت امواج درونی زمین در منطقه زلزله، نصب سنسور در کف اقیانوس‌ها، رصد گسل‌های فعال توسط ماهواره و استفاده از فرکانس شیفت داپلر در ماهواره و مطالعه امواج الکترومغناطیسی در باندهای فرکانسی مختلف از جمله (VLF، ۳ تا ۳۰ کیلوهرتز) و (LF، ۳۰ تا ۳۰۰ کیلوهرتز) اشاره کرد. بررسی تغییرات ویژگی‌های امواج LF/VLF از قبیل دامنه، فاز، بررسی جابه‌جایی‌های زمانی و مکانی سیگنال در طی مسیر انتقال از فرستنده تا گیرنده مواردی است که از سال ۱۹۹۵ و پس از زمین‌لرزه کوبه ژاپن، به‌طور جدی‌تری دنبال شد و امروزه با کامل‌تر شدن این تحقیقات نتایج بسیار خوبی در مورد ارتباط تغییرات سیگنال رادیویی منتشر شونده در محدوده زلزله با ناهنجاری‌های یون‌سپهر ناشی از فعالیت‌های ژئوشیمیایی قبل از زلزله به‌دست آمده است. در این تحقیق سیگنال‌های LF/VLF دریافت شده توسط ایستگاه تهران در سال ۲۰۱۹ مورد تجزیه و تحلیل کوتاه‌مدت، بلندمدت و فصلی قرار گرفته و ویژگی‌های آنها بانمودارهای تغییرات روزانه و میانگین ماهیانه چگالی الکترون یون‌سپهر برحسب زمان که در طول مسیر انتشار سیگنال از طریق مدل تجربی IRI به‌دست می‌آید، مطابقت داده شده است. داده‌های سیگنال‌های دریافتی مورد صحت‌سنجی قرار گرفته و با بررسی تغییرات دامنه سیگنال، میزان چگالی بارالکترون و وضعیت لایه تحتانی یون‌سپهر (Lایه D) در طول مسیر انتشار امواج در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به نتایج به‌دست آمده، عملکرد دستگاه گیرنده رادیویی مؤسسه ژئوفیزیک مورد تأیید قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی: امواج الکترومغناطیس، امواج VLF/LF، تغییرات دامنه سیگنال، نوسانات چگالی بار یون‌سپهر.

۱. مقدمه

زمین‌لرزه یکی از مؤثرترین و مخرب‌ترین رویدادهایی است که زندگی بشر را به خطر انداخته است. بشر همیشه از این سانحه طبیعی هراس داشته و همواره سعی بر پیدا کردن راهی برای مقابله با آن نظیر ایمن‌تر ساختن محیط زندگی خویش داشته است و حتی در فکر یافتن نشانه‌های وقوع آن و پیش‌بینی اینگونه حوادث بوده است. پیش‌نشانگرهای زمین‌لرزه مجموعه‌ای از عوامل و نشانه‌های محیطی، فیزیکی یا شیمیایی هستند که در هنگام وقوع زمین‌لرزه یا در دوره‌هایی قبل از آن پدیدار شده یا در آنها تغییرات قابل توجهی ایجاد می‌شود. لذا با توجه به تغییرات یا پدیدار شدن این عوامل می‌توان با تحت‌نظر گرفتن آنها به معیارهایی برای پیش‌بینی

زمین‌لرزه دست یافت. هدف از مطالعه پیش‌نشانگرها آگاهی از زمان، مکان، بزرگی و احتمال وقوع رویداد زمین‌لرزه به‌منظور آمادگی در برابر آن است. پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت دقیق، زندگی را نجات می‌دهد و کسب و کار را قادر می‌سازد تا زودتر بهبود یابد. فقط با یک هشدار ۱۰ دقیقه‌ای، قطارها می‌توانند از تونل‌ها خارج شوند و مردم می‌توانند به بخش‌های ایمن ساختمانها پناه ببرند یا از ساختمان‌های ناامن فرار کنند (الهی سرشت، ۱۳۹۷). برای یک زمین‌لرزه بزرگ که با یک گسلش چندده کیلومتری رخ می‌دهد، انرژی فوق‌العاده‌ای نیاز است و احتمالاً فرایند 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 یون سپهر و غیره مشاهده شده است و فعالیت‌های علمی جدیدی در اندازه‌گیری تغییرات ایجاد شده قبل از زمین‌لرزه در 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 آشفتگی سیگنال‌های VLF/LF و استفاده از آن به‌عنوان یک شاخص پیش‌نشانگری داشته است. محققین در طول سالیان متمادی با بررسی ناهنجاری‌هایی که از چند روز قبل از زمین‌لرزه در پوسته زمین و جو نزدیک به زمین رخ می‌دهد، به دنبال الگو و مدلی برای ارتباط دادن این ناهنجاری‌ها به یکدیگر بودند تا بتوانند هر یک از آنها را در کنار سایر عوامل توجیه کنند که در نهایت پس از بررسی‌های زیاد منجر به ارائه مدل اتصال لیتوسفر-اتمسفر-یون‌سپهر (Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling Model) شد. توسط این مدل (LAIC) می‌توان انتشار گازی قبل از وقوع زمین‌لرزه بر روی گسل‌های فعال زمین ساختی و مرزهای صفحه تکتونیکی و انتشار گرمای نهان و ناهنجاری‌های گرمایی در زنجیره مشترک، که در آن نقش کلیدی را فرایند یونیزاسیون گازهای جوی ایفا می‌کند و همچنین تغییرات به‌وجودآمده در چگالی الکترون‌های لایه پایینی یون‌سپهر را متحد کنیم. ایده‌های اول این مدل توسط پولیتس و همکاران (۲۰۰۶ و ۲۰۰۷) ارائه شد که در آن چندین عامل مانند رادیواکتیویته طبیعی، هواویزها و برق جو، در تلاش برای توضیح ارتباط تغییرات لرزه‌ای لیتوسفر و یون‌سپهر جمع‌آوری شدند. وقتی قبل از وقوع زمین‌لرزه‌های قوی، انتشارات مربوط به ناهنجاری‌های

گرمای نهان مشاهده شد، ایده‌های جدید پدید آمد (دای و سینگ، ۲۰۰۳). ناهنجاری‌های یون‌سپهر و حرارتی از طریق فرایند یونیزاسیون تولید شده، با نشت غیرعادی رادون همراه هستند و چنین ایده‌هایی ابتدا توسط پولیتس و بویارچاک (۲۰۰۴) مطرح شدند. لازم به ذکر است که اشباع بخار آب برای تراکم بعضی از مراکز چگالشی لازم است تا روند کار را انجام دهد. هواشناسی سنتی آژورسل‌ها را به‌عنوان مراکز اصلی تراکم آب و تشکیل مراکز هسته‌گذاری در نظر گرفته است. اما اخیراً با شدت بخشیدن به مطالعات پرتوهای کیهانی در مورد تشکیل پوشش ابر تأیید شد که یون‌های خالص همچنین می‌توانند مراکز تراکم بخار آب باشند (اسونس مارک و همکاران، ۲۰۰۶). مدل (LAIC) که اخیراً توسعه یافته است این امید را برای توسعه راه‌های جدید در پیش‌بینی کوتاه‌مدت زمین‌لرزه به وجود می‌آورد. در اینجا به چند جزئیات مهم اشاره می‌شود.

۱- رادون از پوسته زمین به‌طور مداوم نشت می‌کند. آنچه به‌عنوان یک روند غیرعادی مشاهده می‌شود انحراف شدت انتشار رادون از حالت معمولی است و اینکه فعالیت رادون غیرعادی بلافاصله (طی چند روز) پس از شوک اصلی متوقف می‌شود.

۲- رابطه انتشار انرژی گرمایی به‌شکل گرمای نهان با انرژی صرف‌شده برای یونیزاسیون در محدوده (10^4 - 10^8) برابر است. به‌همین دلیل حتی با انعطاف‌پذیری‌های ساده هواشناسی می‌توان انحرافات کوچک را از حالت آشفته تشخیص داد (میلیکیس، ۱۹۸۶).

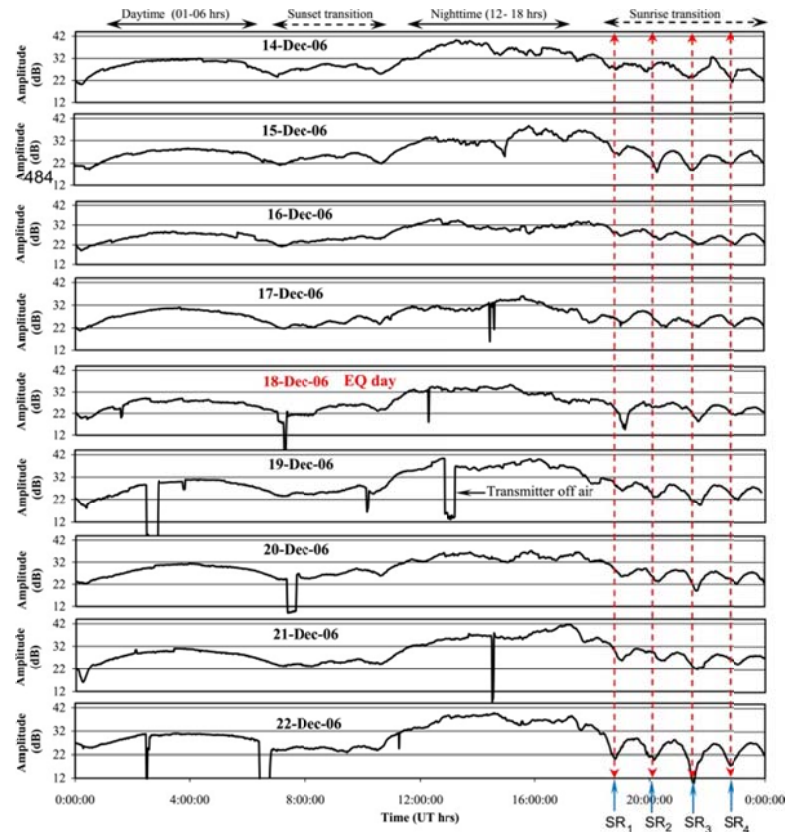
۳- الگوی مکانی توزیع ناهنجاری‌های گرمایی به‌وضوح نشان می‌دهد که روند مشاهده شده با فعالیت تکتونیکی مرتبط است، زیرا تصاویر ماهواره‌ای به‌طور مشخص نشانگر فعال‌سازی گسل‌های تکتونیکی و افزایش انتشار گرما در مرزهای صفحه تکتونیکی است که در آن رومرکز مشرف به زمین‌لرزه واقع شده است.

برای محاسبه و بررسی میزان چگالی یون‌های موجود در یون‌سپهر بالای یک منطقه، می‌توان از مدلی تجربی به نام

برای بالن‌ها خیلی دور است و برای ماهواره‌ها خیلی کم است، اندازه‌گیری‌ها در اینجا بسیار کم است. تنها روش ممکن برای کاوش در منطقه D، سیگنال‌های رادیویی VLF/LF مربوط به یون‌سپهرتختانی است. اثر سیگنال VLF یون‌سپهرتختانی قابل اطمینان مربوط به فعالیت لرزه‌ای برای اولین بار توسط هایاکاوا و همکاران (۱۹۹۶) گزارش شد. در ارتباط با زمین‌لرزه بزرگ کوبه. هایاکاوا و همکاران (۱۹۹۶) نشان دادند که داده‌های VLF از رصدخانه Inubo، که از فرستنده Omega ارسال شده است، در فاصله ۱۰۰۰ کیلومتری، ممکن است تحت تأثیر فرایندهای قبل از زمین‌لرزه باشد. آنها دریافتند که روش نوسان شبانه مانند گذشته، برای مسیر انتشار کوتاه (زیر ۲۰۰۰ km) چندان مؤثر نبوده است؛ به طوری که آنها روش دیگری به نام روش پایان‌دهنده، برای تجزیه و تحلیل را در پیش گرفتند. اولین نسخه از مدل (LAIC) را به عنوان نفوذ میدان الکتریکی غیرعادی از سطح زمین به یون‌سپهر و اثرات میدان نفوذیافته در یون‌سپهر در نظر گرفته شد (پولیتس، ۲۰۰۷). با بررسی زلزله سوماترا که در ۱۸ دسامبر سال (۲۰۰۶) اتفاق افتاد کومار به همراه همکاران به نتایج متقاعدکننده‌ای در مورد تأثیر آشفتگی لرزه یون‌سپهری بر روی امواج VLF قبل از EQ رسیدند و نتایج آن‌را در مقاله خود در سال (۲۰۱۳) منتشر کردند. همان‌طور که از شکل ۲ پیداست، در بازه ± 4 روز نسبت به EQ حداقل زمان شروع طلوع خورشید در این بازه به اندازه ۲۰ دقیقه تغییر کرده و در واقع طول شب ۲۰ دقیقه افزایش می‌یابد و ضمناً کاهش دامنه هرچه به روز EQ نزدیک‌تر می‌شویم بیشتر خود را نشان می‌دهد. ۴ شاخص S1، S2، S3 و S4 به خوبی این تغییرات را آشکار می‌کنند. لازم به ذکر است به علت عدم ثبت سیگنال در بعضی از ساعات اولیه غروب و آفلاین بودن گیرنده از بررسی زمان پایان‌دهنده غروب در این مقاله خودداری شده است. در این تحقیق به خوبی پیداست که ارتفاع بازتاب شبانه پایین‌تر از ارتفاع بازتاب موج در روز می‌باشد.

مدل (International Reference Ionosphere modle) IRI استفاده کرد. توسط IRI و با تکیه بر اکثر مشاهدات موجود و قابل اعتماد از پلاسما یون‌سپهری از زمین و فضا، می‌توان میانگین ماهانه چگالی الکترون، دمای الکترون، دمای یون، ترکیب یون و چندین پارامتر اضافی را در ارتفاع ۶۰ تا ۲۰۰۰ کیلومتری زمین تخمین زد. مدل‌های مرجع بین‌المللی یون‌سپهر توصیف‌کننده مقادیر متوسط چگالی الکترونی به صورت تابعی از ارتفاع برای یک موقعیت و زمان مشخص می‌باشند. به علت اینکه این توابع از داده و مشاهدات چگالی الکترونی به دست می‌آیند، به آنها تجربی گفته می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان اطلاعات زیادی را در مورد یک مجموعه داده به دست آورد. به علت اهمیت توابع متعامد تجربی در مدل‌سازی یون‌سپهر در بخش ارتفاعی، در این پژوهش نحوه محاسبه این توابع با استفاده از داده چگالی الکترونی به دست آمده از مدل IRLNEQUICK مورد بحث و بررسی واقع شده و نیز این توابع برای تمامی ایستگاه‌های محلی که در مسیر انتشار سیگنال از کشورهای فرستنده تا ایران در نظر گرفته شده‌اند، مورد محاسبه و ارزیابی واقع می‌شود. نتایج به دست آمده از مدل تجربی IRI در مورد چگالی الکترون لایه تختانی یون‌سپهر در طول مسیر انتشار سیگنال‌های رسیده به گیرنده تهران تأییدکننده تغییرات ویژگی‌های سیگنال در اثر تأثیر یون‌سپهر بوده و هرچه تعداد ایستگاه‌های فرضی بین گیرنده و فرستنده بیشتر باشد این همخوانی نتایج بسیار قابل قبول‌تری را نشان خواهد داد.

اولین تلاش برای بررسی اثرات لرزه‌ای-یون‌سپهر با امواج رادیویی VLF/LF توسط همکاران روسی انجام شد (گوخبرگ و همکاران، ۱۹۸۹؛ گفلدو همکاران، ۱۹۹۲) که پروپاتون VLF را در مسافت طولانی از Reunion (فرستنده امگا) مطالعه کرد. بیشتر انرژی تابش شده توسط فرستنده VLF/LF بین موج‌بر زمین و یون‌سپهر تختانی به دام می‌افتد. سیگنال‌های VLF/LF مربوط به یون‌سپهر تختانی از ناحیه D، که پایین‌ترین منطقه مورد مطالعه جو زمین است، منعکس می‌شوند. این ارتفاعات ۷۰-۹۰ km



شکل ۲. تغییرات زمان طلوع خورشید. ± 4 روز نسبت به زلزله سوماترا. (کومار وهمکاران، ۲۰۱۳).

در این مقاله با بررسی تغییرات زمان پایان دهنده (T_e و T_m) برای سیگنال‌هایی که تحت تأثیر چند زلزله رخ داده در سال ۲۰۱۹ قرار گرفته‌اند، این مورد و روش تحقیق بیشتر مورد بحث و گفت‌وگو قرار خواهد گرفت.

۲. مشاهدات دستگاهی
یک گیرنده رادیویی در مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ثبت امواج VLF/LF را از اواخر سال ۲۰۱۸ میلادی شروع کرده است. این گیرنده توسط دو آنتن

می‌دهند. فرکانس‌هایی که در حال حاضر توسط گیرنده تهران دریافت می‌شود، شامل ۱۰ فرکانس LF/VLF می‌باشد که در جدول ۱ آمده است.

۲. گیرنده رادیویی و آنتن‌های LF و VLF واقع در مؤسسه ژئوفیزیک تهران.



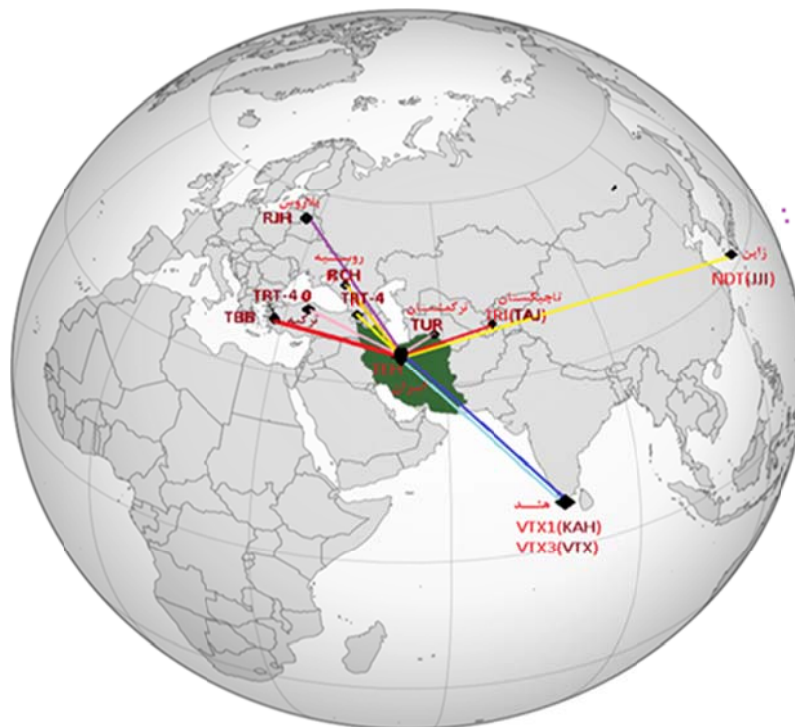
شکل ۲. گیرنده رادیویی و آنتن‌های LF و VLF واقع در مؤسسه ژئوفیزیک تهران.

جدول ۱. فرکانس‌ها، نام و مختصات ایستگاه‌های فرستنده امواج دریافتی در ایستگاه موسسه ژئوفیزیک تهران.

نام ایستگاه	VTX1 (KAH)	VTX3 (VTX)	RJH69 (RJH)	NDT (JJI)	BAFA (TBB)	TRT-4 (TRT)	RCH	TRT-40	TRI (TAJ)	TUR
نام کشور	هند	هند	بلاروس	ژاپن	ترکیه	ترکیه	روسیه	ترکیه	تاجیکستان	ترکمنستان
فرکانس (kHz)	۱۶/۳	۱۸/۲	۲۰/۵	۲۲/۲	۲۶/۷	۱۶۲	۱۷۱	۱۸۰	۲۵۲	۲۷۹
مختصات	۸/۳۸۷N	۸/۳۸۷N	۵۴/۴۶۳N	۳۲/۰۸۲N	۳۷/۴۱۲N	۳۹/۷۷۳N	۴۵/۴۸۵N	۳۹/۷۵۶N	۳۸/۴۸۱N	۳۷/۸۵۱N
فرستنده	۷۷/۷۵۲E	۷۷/۷۵۲E	۲۶/۷۷۵E	۱۳۰/۸۲۸E	۲۷/۳۲۳E	۴۳/۰۰۴E	۴۰/۰۸۹E	۳۲/۴۱۸E	۶۸/۸۰۸E	۵۸/۳۵۱E

برای تمام ماه‌ها و فصل‌های سال (۲۰۱۹). ۲- بررسی تغییرات اختلاف دامنه بیشینه (A_{max}) و دامنه کمینه (A_{min}) در نمودارهای تغییرات دامنه برحسب زمان مربوط به سیگنال‌های دریافتی از ۱۰ فرستنده در طول شبانه‌روز برای تمام ماه‌ها و فصل‌های سال (۲۰۱۹). ۳- بررسی علت تغییرات مشاهده شده در نمودارهای دامنه برحسب زمان برای تمامی سیگنال‌های دریافتی و بحث در مورد علل آن. شکل ۳ موقعیت ایستگاه‌های فرستنده را نشان می‌دهد.

در ایستگاه گیرنده تهران ۱۰ فرکانس VLF و LF دریافت و ثبت می‌شود که در اینجا به بررسی نمودارهای مربوط به آنها می‌پردازیم و این بررسی از چندین جهت انجام شده که می‌توان به‌طور خلاصه هدف از این تحقیق را به شرح زیر نام برد: ۱- بررسی ۴ بازه زمانی در نمودارهای تغییرات دامنه برحسب زمان مربوط به سیگنال‌های دریافتی از ۱۰ فرستنده از لحاظ زمان شروع افت دامنه و زمان کمینه اول و کمینه دوم و زمان بازگشت دامنه به حالت اولیه خود



شکل ۳. موقعیت ایستگاه‌های فرستنده امواج VLF/LF که توسط گیرنده رادیویی در تهران دریافت می‌شود.

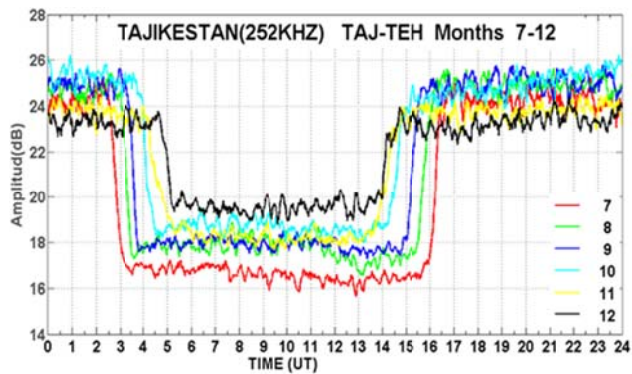
افزایشی داشته و در شش ماه دوم این زمان روند کاهشی پیدا می‌کند.

همان‌طور که از شکل ۴ پیداست اختلاف بیشترین دامنه (A_{max}) و کمترین دامنه (A_{min}) روزی، در نیمسال دوم روند کاهشی داشته ولی در دیگر ماه‌ها از نظم خاصی پیروی نمی‌کند.

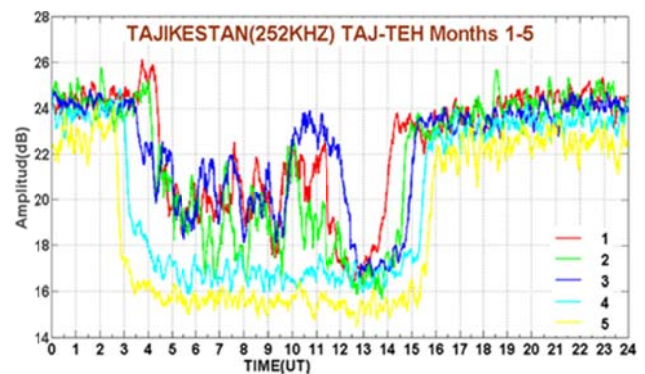
در شکل ۵، نوسانات غیرعادی در دامنه سیگنال در طول سال مشاهده نمی‌شود و فقط عامل تغییر فصل و طلوع و غروب خورشید بر تغییرات دامنه-زمان، حاکم است و این تغییرات در طول سال تکرار می‌شوند.

در شکل ۴ در فصل زمستان (ژانویه (۱)، فوریه (۲) و مارچ (۳)) در بازه زمانی (۱۴/۵-۳/۵) UT موج با دامنه بزرگ رفتار سینوسی پیدا می‌کند و کاهش دامنه به‌طور پلکانی

صورت می‌گیرد که علت آن یک پدیده هواشناسی می‌باشد؛ همچنین در شش ماه اول سال زمان شروع افت دامنه روند کاهشی داشته و در شش ماه دوم این روند افزایشی است که دلالت بر طولانی شدن روزها در نیمسال اول و کوتاه شدن روزها در نیمسال دوم دارد. از طرفی در ۶ ماه اول زمان شروع افزایش دامنه روند

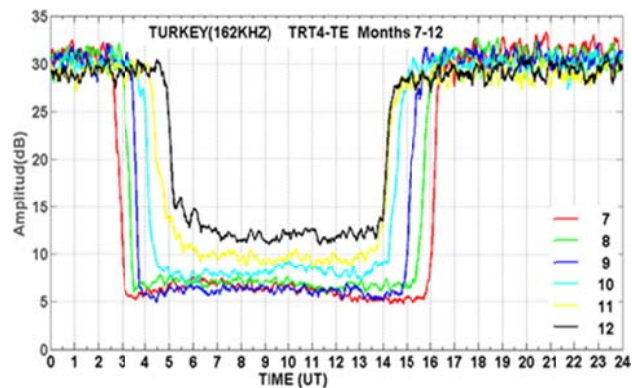


(ب)

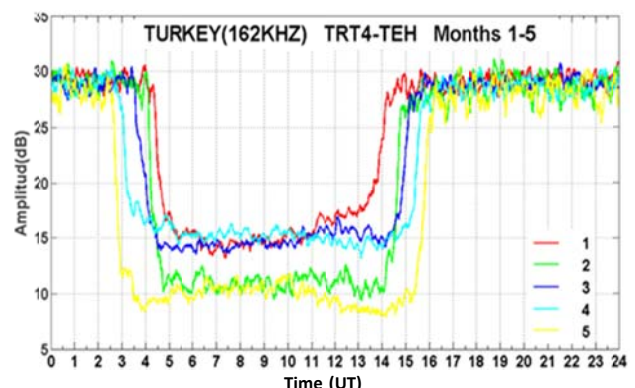


(الف)

شکل ۴. نمودار دامنه زمان برای امواج LF با فرکانس ۲۵۲ kHz از فرستنده TAJ تاجیکستان در سال ۲۰۱۹. الف) شش ماه اول سال و ب) شش ماه دوم سال.

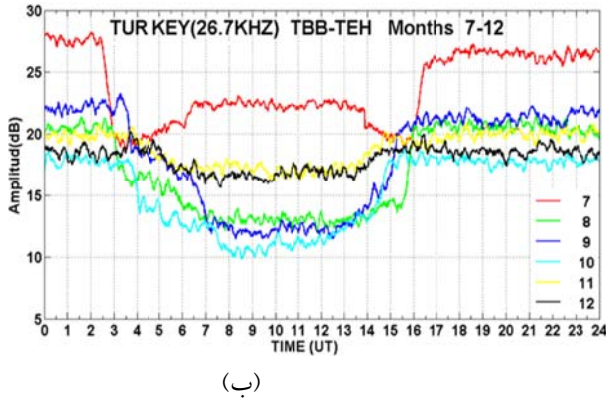


(ب)

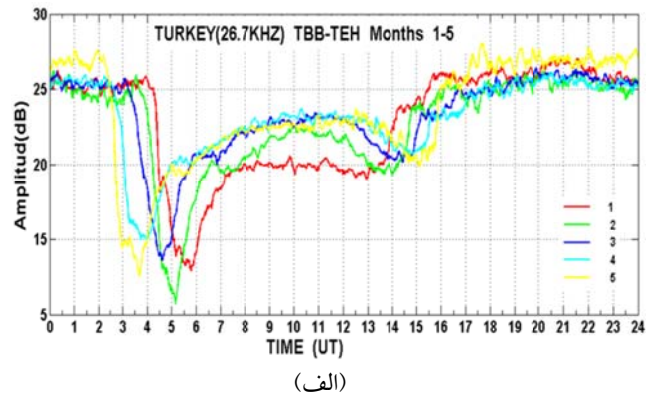


(الف)

شکل ۵. نمودار دامنه برحسب زمان برای موج LF با فرکانس ۱۶۲ kHz از فرستنده TRT4 ترکیه در سال ۲۰۱۹. الف) شش ماه اول سال و ب) شش ماه دوم سال.



(ب)



(الف)

شکل ۶. نمودار دامنه برحسب زمان برای موج VLF با فرکانس ۲۶/۷ kHz از فرستنده TBB ترکیه در سال ۲۰۱۹. الف) شش‌ماه اول سال و ب) شش‌ماه دوم سال.

پلازما با امواج گرانشی است. همچنین شرایط و پارامترهای هواشناسی نیز در بعضی از آنومالی‌های به‌وجودآمده نقش مؤثری دارد. در اینجا بدون آن‌که بخواهیم مطالب گذشته را تکرار کنیم، تنها به بیان این نکته بسنده می‌کنیم که بیشترین مقدار اختلاف بیشینه و کمینه دامنه یعنی $A_{max}-A_{min}$ را می‌توان در امواج LF یافت (۳۱/۲۵ dB) و کمترین مقدار ($A_{max}-A_{min}$) را می‌توان در امواج VLF پیدا کرد که مقدار ۳/۲۵dB می‌باشد که می‌تواند به‌علت تأثیرپذیری بیشتر امواج LF در اثر عوامل محیطی، به‌خاطر فرکانس بالاتر آنها دانست.

۳. روش تحقیق و پردازش داده‌ها

تاکنون دو روش برای پردازش داده VLF/LF پیشنهاد شده است، اولی روش (نوسان شبانه) و دومی زمان‌های پایان‌دهنده (صبح و عصر) می‌باشد. روش زمان پایان‌دهنده برای اولین بار برای زمین‌لرزه کوبه استفاده شد که تاکنون به‌عنوان یک روش تحلیل VLF/LF مورد استفاده قرار گرفته است. روش نوسان شبانه برای مسیر کوتاه انتشار (کمتر از ۲۰۰۰ km)، خیلی مفید نیست و از روش زمان‌های پایان‌دهنده استفاده می‌شود.

۳-۱. روش نوسان شبانه

دلیل استفاده از داده‌های شبانه این است که دامنه روزانه

در شکل ۶ در شش‌ماه اول تغییرات دامنه سیگنال، تابع پدیده هواشناسی و جوی بوده و در ماه جولای (۷) دامنه سیگنال با نویز جمع بسته شده است. همان‌طور که پیداست فاصله زمانی بین زمان کمینه اول تا زمان شروع افزایش دامنه در شش‌ماه اول سال روبه افزایش بوده و در نیمسال دوم کاهش می‌یابد که طبق پیش‌بینی علت آن تغییر فصل و زاویه تابش خورشید می‌باشد.

همان‌طور که از شکل‌های ۳، ۴ و ۵ پیداست، تغییرات میانگین ماهانه دامنه برحسب زمان تابع شرایطی از قبیل زمان طلوع و غروب خورشید و شرایط فصلی و همچنین شرایط و پارامترهای هواشناسی می‌باشد. البته عوامل دیگری از قبیل رعدوبرق و لکه‌ها و طوفان‌های خورشیدی نیز می‌توانند مؤثر باشند ولی تأثیر رعدوبرق زیاد آشکار نبوده و طوفان‌های خورشیدی نیز بیشتر در مناطق قطبی آشکار می‌شوند. امواج الکترومغناطیسی LF همانند امواج VLF در طول مسیر انتشار تحت تأثیر عوامل و پارامترهای مختلف محیطی قرار گرفته و در مجموع موج رسیده به گیرنده، حامل بسیاری از اطلاعات می‌باشد که با بررسی دقیق موج‌ها می‌توان به کشف آنها پرداخت. امواج LF همانند امواج VLF در طول فصل‌های سال رفتار مشابهی را از نظر تغییرات بازه زمانی شروع افت دامنه تا شروع افزایش دوباره آن از خود نشان می‌دهند. چنین تأثیراتی را می‌توان به کانال‌های فرعی (در مسیر بازتاب یونسپهر-زمین) نسبت داد که یک نتیجه از مدولاسیون چگالی

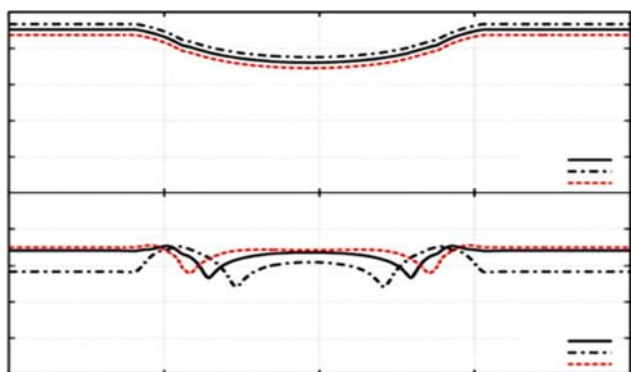
به‌خوبی بیش از دو برابر انحراف استاندارد (2σ) می‌باشد. این بدان معنی است که مدت‌زمان روزی که سیگنال‌های VLF تحت یونسپهری نشان می‌دهند، برای چند روز در اطراف زمین‌لرزه طولانی‌تر است.

این احتمال قوی وجود دارد که آنومالی زمان پایان‌دهنده، برای زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۶ ریشتر که نسبتاً نزدیک به مسیر فرستنده گیرنده قرار گرفته‌اند، اتفاق می‌افتد. این روش توسط یک گروه هندی به نام ساسمال و همکاران (۲۰۱۰) تکامل یافت و آنها زمان مور نیاز برای تشکیل لایه D در طلوع خورشید و زمان از بین رفتن آن هنگام غروب خورشید را محاسبه کردند و همبستگی بالایی بین این دو مقدار و لرزه‌خیزی را به‌دست آوردند.

۴. تحلیل نتایج به‌دست آمده با استفاده از مدل

یونسپهری IRI

در شکل ۸ مسیر انتشار سیگنال از فرستنده‌های TAJ، TRT4 و TBB به سمت ایستگاه گیرنده تهران به‌همراه ایستگاه‌های فرضی که در طول مسیر در نظر گرفته شده‌اند به نمایش درآمده که می‌توان فاصله گیرنده از فرستنده‌ها را از روی این شکل به‌دست آورد.



(ب)

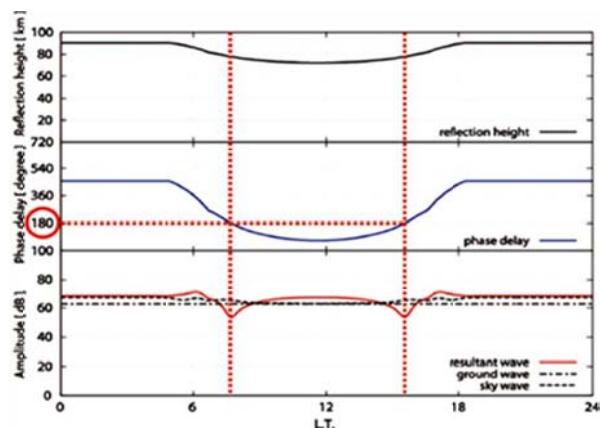
تغییرات بسیار کمی را برای تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد و نیز به شدت تحت تأثیر اختلالات ناگهانی یونسپهر ناشی از اشعه ایکس می‌باشد. اختلاف تغییرات روزانه از میانگین تغییرات در ± 15 روز به صورت زیر تعریف می‌شود:

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

که در آن $A(t)$ دامنه در زمان t در روز جاری است و $\langle A(t) \rangle$ میانگین دامنه در همان زمان t ، ± 15 روز نسبت به زلزله است.

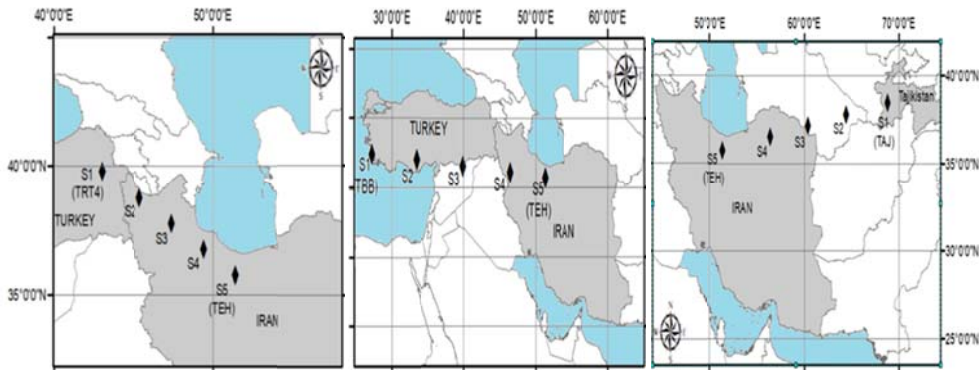
۳-۲. روش زمان پایان‌دهنده

باتوجه به اینکه روش نوسانات شبانه برای مسیرهای کوتاه قابل استفاده نیست به این ترتیب، هایاکاوا و همکاران (۱۹۹۶) به زمان‌های پایان‌دهنده (صبح و عصر) توجه کردند. شیفت‌های قابل توجهی در زمان‌های پایان‌دهنده قبل از زمین‌لرزه مشاهده می‌شود. زمان پایان‌دهنده صبح (t_m) به ساعت‌های قبل، جابه‌جایی پیدا می‌کند، در حالی که زمان پایان‌دهنده شب (t_e) به ساعت‌های بعد، شیفت می‌یابد. این نکته توسط یک مجموعه داده بسیار طولانی در حدود ± 4 ماه به صورت آماری مورد بررسی قرار گرفته است که نشان می‌دهد، شیفت فاز در t_e



(الف)

شکل ۷. الف) تشکیل زمان‌های پایان‌دهنده و ب) تغییر زمان‌های t_m و t_e هنگامی که ارتفاع بازتاب 3 km کاهش دارد (مولچانو و همکاران، ۱۹۹۸).

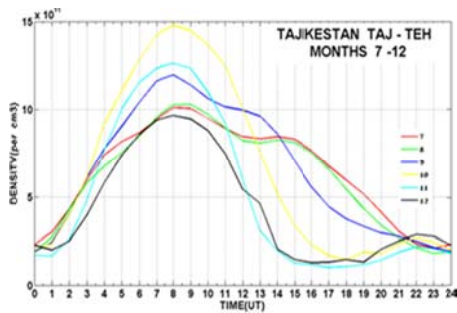


شکل ۸. موقعیت ۳ فرستنده (TAJ, TRT4, TBB) و گیرنده تهران با رسم ایستگاه‌های فرضی در طول مسیر انتشار سیگنال‌ها.

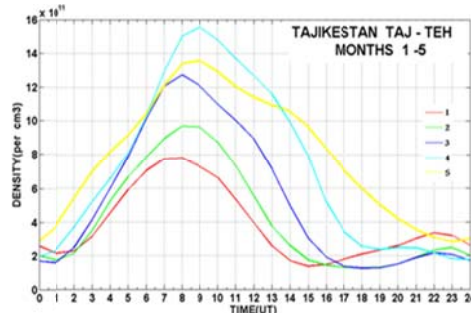
اطلاعات مربوط به چگالی الکترون یونسپهر را در ساعات مختلف از سال ۲۰۱۹ میلادی و در مسیر تمامی امواج دریافت شده در تهران ثبت کرد.

در شکل ۹ تغییرات مجموع چگالی‌بار برای مسیر انتشار (TAJ-TEH) در طول سال ۲۰۱۹ میلادی رسم شده است و همان‌طور که پیداست میزان پیک چگالی در زمستان و تابستان به تدریج افزایش می‌یابد ولی در فصل‌های دیگر سال نظم معینی نمی‌توان برای آن معرفی کرد. از طرفی بازه زمانی بین طلوع و غروب خورشید در نمودارهای شکل ۹ دقیقاً با نمودارهای شکل ۴ که مربوط به دامنه میانگین سیگنال می‌باشد، هماهنگ است.

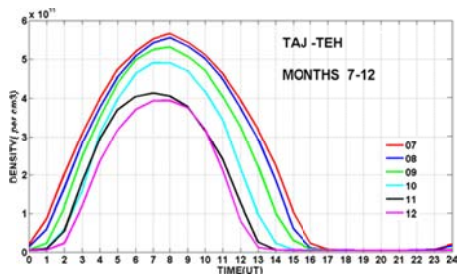
در مسیرهای انتشار، فاصله ایستگاه‌های فرضی بین گیرنده و فرستنده یکسان در نظر گرفته شده است و در ضمن هرچه تعداد ایستگاه‌ها بیشتر باشد، نتایج به دست آمده از مدل تجربی IRI دقیق‌تر و قابل‌استنادتر خواهد بود. با استفاده از مدل تجربی بین‌المللی یونسپهری IRI و با در نظر گرفتن چندین ایستگاه در طول مسیر هریک از امواج ارسالی به طرف تهران، با دادن مختصات هریک از این ایستگاه‌ها به برنامه و تنظیماتی که روی آن انجام گرفت چگالی الکترون را برای یونسپهر در تمامی این ایستگاه‌ها و برای ارتفاع ۸۰-۵۰۰ km و همچنین ۸۰-۱۵۰ km از سطح زمین محاسبه کرده و می‌توان



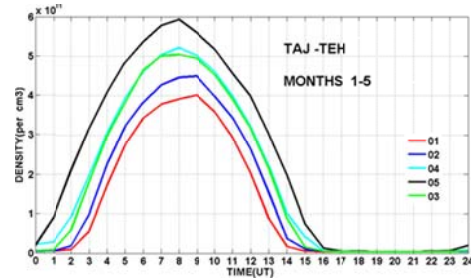
(ب)



(الف)

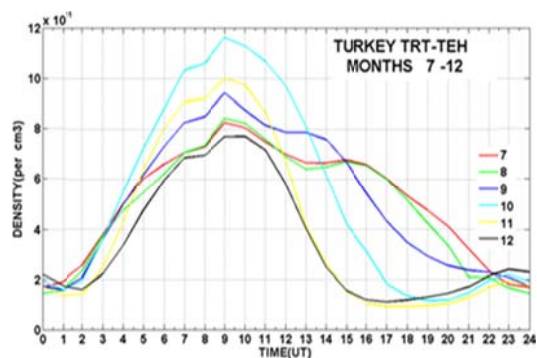


(د)

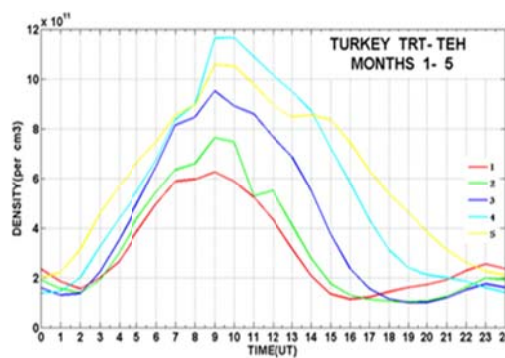


(ج)

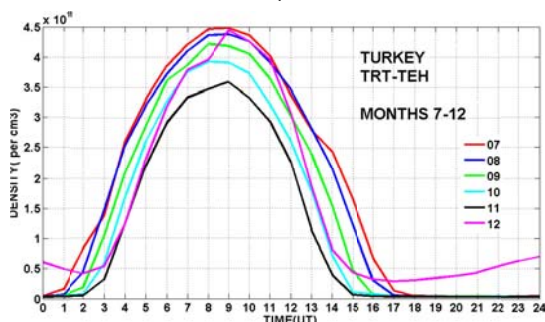
شکل ۹. تغییرات مجموع میانگین چگالی الکترون در طول مسیر انتشار TAJ-TEH. (الف و ب) برای ارتفاع ۵۰۰-۸۰ کیلومتر (ج و د) برای ارتفاع ۱۵۰-۸۰ کیلومتر نسبت به سطح زمین ترسیم شده‌اند.



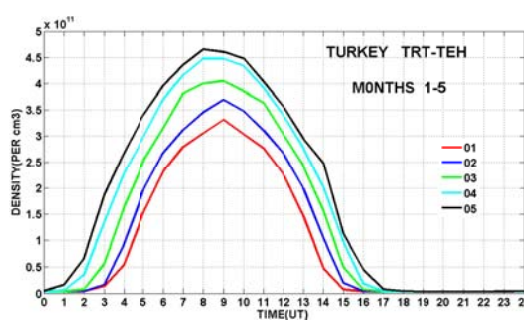
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

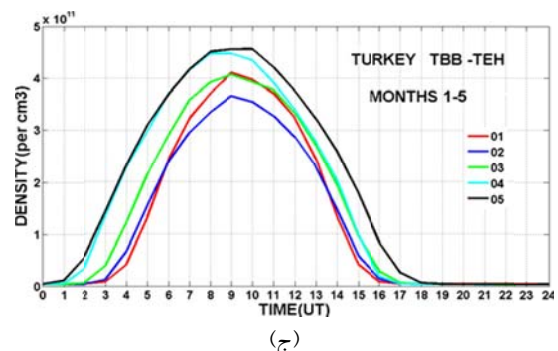
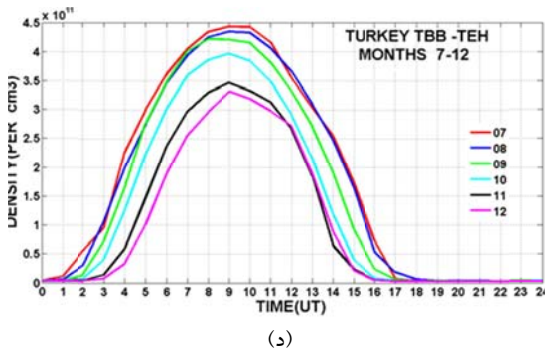
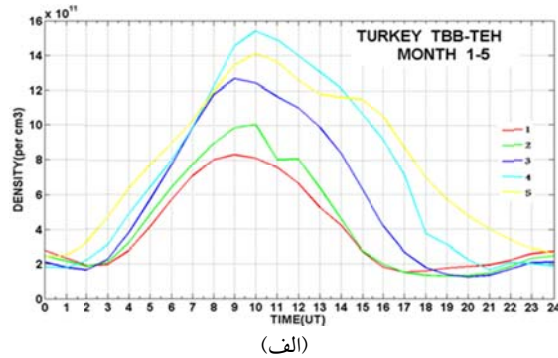
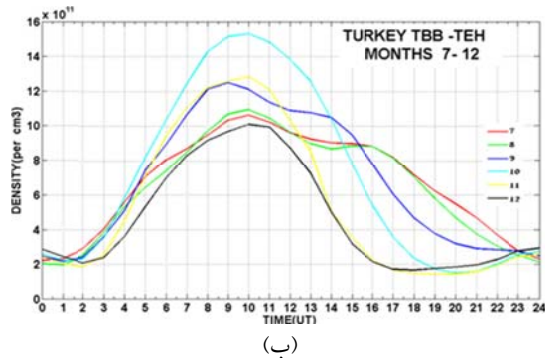
شکل ۱۰. تغییرات مجموع میانگین چگالی الکترون در طول مسیر انتشار TRT4-TEH. (الف) و (ب) برای ارتفاع ۵۰۰-۸۰ کیلومتر و (ج) و (د) برای ارتفاع ۱۵۰-۸۰ کیلومتر نسبت به سطح زمین ترسیم شده‌اند.

از مطالعات تغییرات رفتاری در انتشار سیگنال‌های VLF/LF را کاملاً مبتنی بر تأثیر لایه پایین یونسپهر می‌دانند. تغییرات کل نمودارهای شکل ۹ ج و د با تغییرات نمودارهای الف و ب مشابهت دارد. تنها تفاوت عمده، کاهش چگالی الکترونی و حذف لایه پایین یونسپهر در ساعات شب می‌باشد. مقایسه دقیق با نتایج مشاهداتی داده‌های LF با فرکانس ۲۵۲KHZ در مسیر TAJ-TEH که در شکل ۴ نمایش داده شده است، نشان می‌دهد که تغییرات زمان شروع افت دامنه و افزایش آن هماهنگی بسیار بیشتری با تغییرات مجموع میانگین الکترون‌های آزاد در محدوده ۵۰۰-۸۰ km دارد. به عبارت دیگر امواج VLF/LF تحت تأثیر لایه پلاسما در یونسپهر بوده و حضور این لایه برای کنترل انتشار و رسیدن این امواج در مسیر فرستنده-گیرنده الزامی می‌باشد. افزایش چگالی الکترون آزاد در لایه پایینی یونسپهر سبب بازتاب امواج الکترومغناطیسی از لایه در ارتفاع پایین‌تر شده و موجب می‌شود تا موج منتشر شونده در مسیر فرستنده-گیرنده مسافت بیشتری را طی کند. لذا

شکل ۹ تغییرات مجموع میانگین چگالی الکترون در طول مسیر TAJ-TEH را نشان می‌دهد. شکل ۹ الف و ب، تغییرات چگالی الکترون را در محدوده ۵۰۰-۸۰ km و شکل ۹ ج و د، تغییرات چگالی الکترون را در محدوده ۱۵۰-۸۰ km از سطح زمین نشان می‌دهند. همان‌طور که از شکل ۹-الف مشخص است با تغییر ماه سال از ژانویه (۱) به می (۵) زمان افزایش چگالی الکترونی در ساعات اولیه روز از ۴-۵ UT به ۱-۲ UT کاهش می‌یابد؛ همچنین ساعت افت دامنه چگالی الکترونی آزاد نیز از ساعت ۱۰-۱۲ UT در ماه ژانویه (۱) به ساعت ۱۶-۱۷ UT در ماه می (۵) افزایش می‌یابد، که این تغییرات متناسب با تغییرات زمانی در طول شبانه‌روز می‌باشد. در شش ماه دوم سال تغییرات مجموع میانگین چگالی الکترون آزاد در ارتفاع ۵۰۰-۸۰ km و در مسیر TAJ-TEH یعنی شکل ۹-ب روند کاهشی مدت زمان افزایش چگالی الکترون را از ماه جولای (۷) تا دسامبر (۱۲) نشان می‌دهد. شکل ۹ ج و د تغییرات چگالی الکترون را در لایه پایین یونسپهر نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که بعضی

مشاهداتی راتایید می‌کند. مطالعه دیگری که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت مربوط به سیگنال LF با فرکانس ۱۶۲ kHz در مسیر TRT-TEH می‌باشد. نتایج مدل‌سازی با استفاده از مدل IRI مربوط به این مسیر در شکل ۱۰ نشان داده شده است. افزایش بازه زمانی لحظه شروع صعود چگالی الکترون از بازه ۴-۵ UT در ماه ژانویه (۱) به بازه ۲-۳ UT در ماه می (۵) در شکل ۱۰-الف مشخص است. زمان شروع افت چگالی نیز در بازه مورد نظر از حدود ۱۲-۱۴ UT به بازه ۱۶-۱۸ UT افزایش می‌یابد. این تغییرات برای شش‌ماه دوم سال شکل ۱۰-ب به ترتیب افزایش از حدود ۲-۳ UT به ۴-۵ UT در لحظه طلوع خورشید و کاهش از حدود ۱۷-۱۹ UT به بازه ۱۳-۱۴ UT در زمان غروب خورشید را نشان می‌دهد. نتایج مشاهداتی در شکل ۵-الف مربوط به پنج‌ماه اول سال نیز هماهنگی بسیار خوبی را با بازه زمانی تغییرات چگالی الکترون به‌دست‌آمده از مدل IRI را نشان می‌دهد. اختلاف اندکی در مورد زمان شروع خیز سیگنال در لحظه طلوع خورشید در حدود کمتر از یک ساعت مشاهده می‌شود.

این افزایش مسیر باعث اتلاف بیشتر سیگنال در طول روز می‌شود. در ساعات شبانگاهی و با حذف لایه پایینی یون‌سپهر (لایه D)، مسیر امواج الکترومغناطیسی در طی انتشار به‌علت بازتاب از ارتفاعات بالاتر یون‌سپهر کاهش می‌یابد. در نتیجه افزایش دامنه سیگنال در این ساعات انتظار می‌رود. با توجه به نتایج محاسباتی با استفاده از مدل IRI نیز همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است، زمان افت سیگنال از بازه ۴-۵ UT در ماه ژانویه (۱) به بازه ۲-۳ UT در ماه می (۵) کاهش می‌یابد؛ همچنین زمان شروع افزایش دامنه از حدود ۱۳-۱۴ UT در ماه ژانویه (۱) به بازه ۲۵-۱۶ UT در ماه می (۵) افزایش می‌یابد. مقایسه این تغییرات با مقادیر به‌دست‌آمده از مدل IRI هماهنگی خوبی را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که نتایج به‌دست‌آمده از مدل IRI برای تعداد ایستگاه‌های محدود به‌دست‌آمده است، لذا با بهبود مدل‌سازی انتظار می‌رود هماهنگی بین مشاهدات و نتایج مدل‌سازی افزایش یابد. مقایسه تغییرات در شش‌ماه دوم سال نیز افزایش زمان افت دامنه را از حدود ۲-۳ UT به ۴-۵ UT نشان می‌دهد. مقایسه با نتایج مدل‌سازی نیز هماهنگی مورد نظر را نشان داده و نتایج



شکل ۱۱. تغییرات مجموع میانگین چگالی الکترون در طول مسیر انتشار TBB-TEH. (الف) و (ب) برای ارتفاع ۵۰۰-۸۰ کیلومتر و (ج) و (د) برای ارتفاع ۱۵۰-۸۰ کیلومتر نسبت به سطح زمین ترسیم شده‌اند.

همین رفتار شامل اختلاف اندک مربوط به ماه دسامبر (۱۲) در شکل ۵-ب و مقایسه آن با نتایج به دست آمده از مدل IRI مشاهده می‌شود. تغییرات دامنه سیگنال مشاهده شده با فرکانس ۲۶/۷ kHz در مسیر TBB-TEH نیز هماهنگی قابل قبولی با نتایج مدل سازی به کمک مدل IRI دارد. اختلاف مشاهده شده حداکثر کمتر از یک ساعت و محدود به برخی از ماه‌های سال می‌باشد. انتظار می‌رود افزایش تعداد ایستگاه‌های فرضی بین فرستنده و گیرنده جهت محاسبه مجموع میانگین چگالی الکترون، اختلاف مورد نظر را بیشتر کاهش دهد.

۱-۴. نحوه محاسبه و پردازش داده‌ها توسط IRI

پس از اینکه نمودارهای میانگین تغییرات دامنه بر حسب زمان ترسیم شد با انتخاب ایستگاه‌های فرضی بین فرستنده‌ها و گیرنده تهران، طبق شکل ۸ و با استفاده از مدل تجربی بین‌المللی یون‌سپهری IRI و برای ارتفاعات ۵۰۰-۸۰ کیلومتری و همچنین ۵۰۰-۸۰ کیلومتری سطح زمین، چگالی الکترون در طول مسیر انتشار موج، برای هر ایستگاه فرضی و در طول ۲۴ ساعت برای تمام ماه‌های سال محاسبه شده و میانگین ماهیانه چگالی به دست آمده است. پس از آن نمودار میانگین چگالی بر حسب زمان برای تمام ماه‌های سال رسم می‌شود که به صورت نمودارهایی با

طیف رنگی در مقاله حاضر آورده شده‌اند. پس از آن با به دست آوردن مجموع میانگین چگالی، نمودار تغییرات آن بر حسب زمان رسم می‌شود، که تغییرات چگالی بر حسب زمان را در هر ماه از سال بر حسب ساعت UT می‌توان از آن به دست آورد. در مرحله آخر که مقایسه نمودارهای تغییرات دامنه، میانگین چگالی، مجموع میانگین چگالی بر حسب زمان با یکدیگر است، از این طریق می‌توان میزان دقت و صحت داده‌های رسیده به ایستگاه تهران را ارزیابی کرده و همچنین می‌توان با صحت‌سنجی داده‌ها میزان دقت مدل تجربی IRI را با توجه به مسیرهای مختلف انتشار موج و شرایط موجود در طول هر مسیر مورد بررسی قرارداد و از نتایج حاصل در مواردی مانند هواشناسی، پیش‌نشانگری زلزله و غیره می‌توان استفاده کرد. در ادامه و در قسمت ۴-۲ این مقایسه و بررسی برای دو مسیر تاجیکستان-تهران و ترکیه-تهران صورت گرفته که نتایج آن در این مقاله آمده است. در جدول‌های ۲ و ۳، زمان شروع افت چگالی و زمان شروع افزایش چگالی الکترون و همچنین میزان چگالی در این دو زمان خاص برای مسیر انتشار سه سیگنال مطرح شده در قسمت‌های بالا آورده شده است تا با مقایسه آنها در تمام ماه‌های سال بتوان به نتایج دقیق‌تری در مورد نحوه تغییرات چگالی بار یون‌سپهر با تغییرات ماه و فصل دست یافت.

جدول ۲. زمان شروع افت چگالی و میزان چگالی بار یون‌سپهر در این زمان‌ها برای تمام ماه‌های سال ۲۰۱۹.

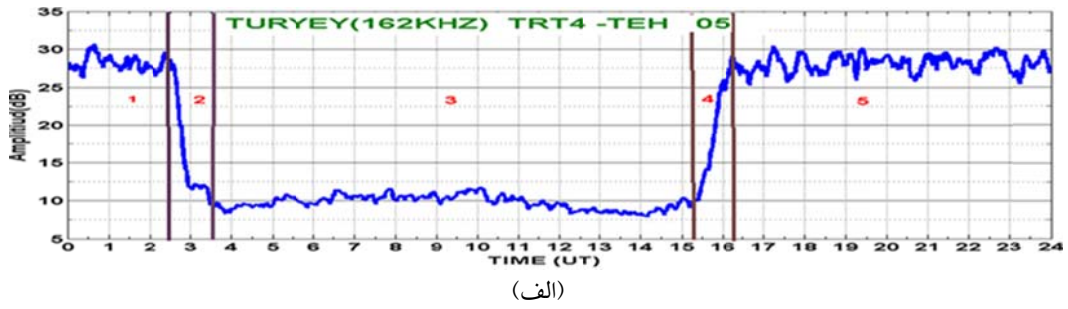
ماه	۱	۲	۳	۴	۵	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	میانگین چگالی مسیر (x _۱ ^{۱۱})
	۲/۷۵	۳	۲/۷۵	۲/۵	۳/۷۵	۳/۵	۳/۵	۴/۵	۵	۴	۵	مسیر TBB-TEH (x _۱ ^{۱۱})
ساعت (UT)	۴	۳/۵	۳/۲۵	۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۵	۲/۵	۳/۵	۳/۵	۳/۷۵	۴/۷۵	
	۲/۵	۳	۳	۳	۳/۵	۳	۳/۵	۲/۵	۴	۴/۵	۴	مسیر TRT4-TEH (x _۱ ^{۱۱})
ساعت (UT)	۴	۴	۳/۵	۲/۵	۲/۲۵	۲/۵	۲/۷۵	۲/۲۵	۳/۲۵	۴/۲۵	۴/۵	
	۴/۸	۵/۲	۶	۵	۶/۵	۵	۵/۷۵	۶/۵	۷/۵	۷/۵	۶/۷۵	مسیر TAJ-TEH (x _۱ ^{۱۱})
ساعت (UT)	۳/۵	۴	۳/۲۵	۲/۷۵	۲/۲۵	۲/۲۵	۲/۵	۳	۳/۵	۴	۴/۷۵	
	۱/۵	۱/۷۵	۱/۴	۱/۲۵	۱/۷۵	۱/۴	۱/۷۵	۲	۲/۵	۲/۴	۱/۶	مسیر VTX3-TEH (x _۱ ^{۱۱})
ساعت (UT)	۳/۷۵	۳/۷۵	۳	۲/۲۵	۲/۷۵	۲/۵	۳	۳/۲۵	۳/۵	۳/۷۵	۳	

جدول ۳. زمان شروع افزایش چگالی و میزان چگالی بار یون‌سپهر در این زمان‌ها برای تمام ماه‌های سال ۲۰۱۹.

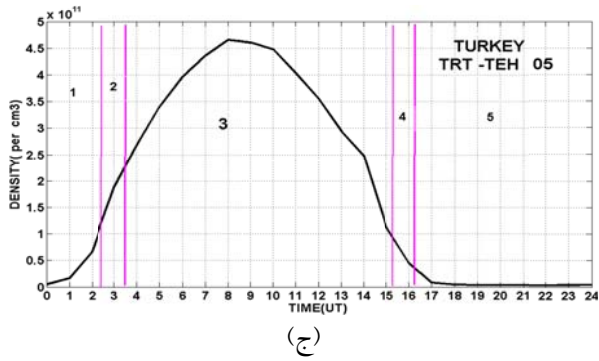
ماه	۱	۲	۳	۴	۵	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	میانگین چگالی مسیر ^(۱۱) (x _۱)
	۵	۵/۲۵	۸	۱۱	۱۱/۲۵	۹	۹	۱۰/۸	۱۴	۸/۷۵	۶	مسیر TBB-TEH ^(۱۱) (x _۱)
ساعت (UT)	۱۳/۵	۱۴	۱۴/۵	۱۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۱۳/۵	۱۲	۱۳	۱۳/۵	
	۴/۵	۳	۵/۵	۸	۸/۵	۶/۵	۶/۵	۷	۶	۳/۵	۳/۷۵	مسیر TRT4-TEH ^(۱۱) (x _۱)
ساعت (UT)	۱۲	۱۴	۱۴	۱۴/۵	۱۵	۱۵/۷۵	۱۵/۵	۱۴/۷۵	۱۴/۲۵	۱۳/۵	۱۳/۵	
	۳/۷۵	۳/۷۵	۴	۸	۹/۷۵	۸/۲۵	۸	۷/۷۵	۵	۲/۵	۴	مسیر TAJ-TEH ^(۱۱) (x _۱)
ساعت (UT)	۱۲/۵	۱۳/۵	۱۴/۵	۱۵	۱۵/۲۵	۱۵/۵	۱۵/۲۵	۱۴/۷۵	۱۴	۱۳/۵	۱۳/۲۵	
	۱/۵	۱/۵	۲	۲/۵	۲	۱/۵	۳/۲۵	۴/۲۵	۵	۴/۲۵	۳/۲۵	مسیر VTX3-TEH ^(۱۱) (x _۱)
ساعت (UT)	۱۳/۵	۱۴/۵	۱۴/۵	۱۴/۵	۱۴/۷۵	۱۵/۲۵	۱۲/۵	۱۲/۲۵	۱۱/۲۵	۹/۷۵	۷/۵	

۱۲-ج با شکل ۱۲-الف به خوبی آشکار است که تغییرات چگالی هماهنگ با دامنه تغییر می‌کند و همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیک چگالی در ساعت ۹/۵ UT اتفاق می‌افتد که در نمودارهای آ و ج کاملاً این مسئله پیداست. در نمودارهای الف و ب همان‌طور که دامنه سیگنال در زمان‌های صفر و ۲۴ UT باهم برابر است. چگالی الکترون نیز در این ساعات باهم برابر است. از طرفی اگر در بعضی از ساعات بین دامنه و چگالی الکترون هماهنگی لازم به چشم نمی‌خورد، یکی از دلایل آن می‌تواند تعداد کم ایستگاه‌ها بین فرستنده و گیرنده باشد که دو ایستگاه بیشتر وجود ندارد و این دقت محاسبه چگالی بار را در یون‌سپهر مسیر انتشار پایین می‌آورد. نکاتی که در مورد نمودارهای شکل ۱۲ گفته شد در مورد شکل ۱۳ که برای مسیر TAJ-TEH می‌باشد نیز تاحدی قابل تأیید است. فقط پنج بازه زمانی که در نمودارهای بالا مشاهده شد در نمودارهای شکل ۱۳ کمی تغییر می‌کنند.

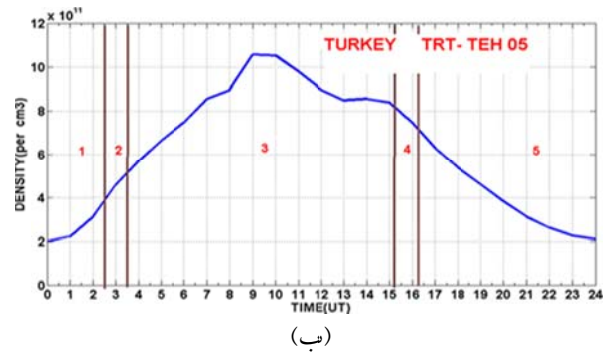
۴-۲. مقایسه نمودارهای دامنه، چگالی میانگین الکترون و مجموع چگالی میانگین برای چند مسیر انتشار سیگنال در شکل ۱۲ و ۱۳ تغییرات دامنه، چگالی میانگین و مجموع چگالی میانگین الکترون برای مسیرهای انتشار سیگنال TRT-THE و TAJ-THE را در ماه می (۵) مشاهده می‌کنید. همان‌طور که از شکل ۱۲-الف پیداست مرحله یک از ساعت ۰-۲/۵ UT می‌باشد که مربوط به قبل از طلوع خورشید است. مرحله دو که از ساعت ۲/۵-۳/۵ UT است. مرحله طلوع خورشید و افت دامنه سیگنال است و مرحله سه که از ساعت ۳/۵-۱۵/۲۵ UT می‌باشد، دامنه سیگنال در پایین‌ترین حد خود قرار می‌گیرد. مرحله ۴ که از ساعت ۱۵/۲۵-۱۶/۲۵ UT می‌باشد، مصادف با غروب خورشید است و در این مرحله دامنه به حالت قبل از طلوع برگشته و چگالی میانگین نیز به حداقل خود برمی‌گردد. در مرحله ۵ که دامنه تقریباً ثابت می‌ماند، از ساعت ۱۶/۲۵-۲۴ UT ادامه دارد. از مقایسه شکل‌های ۱۲-ب و



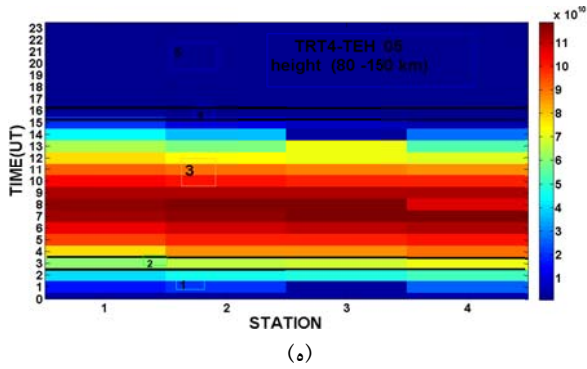
(الف)



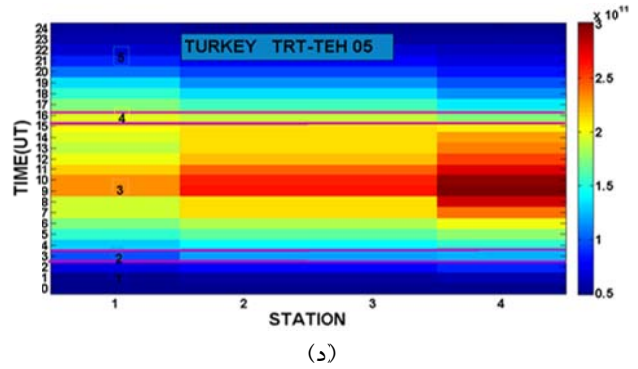
(ب)



(ج)

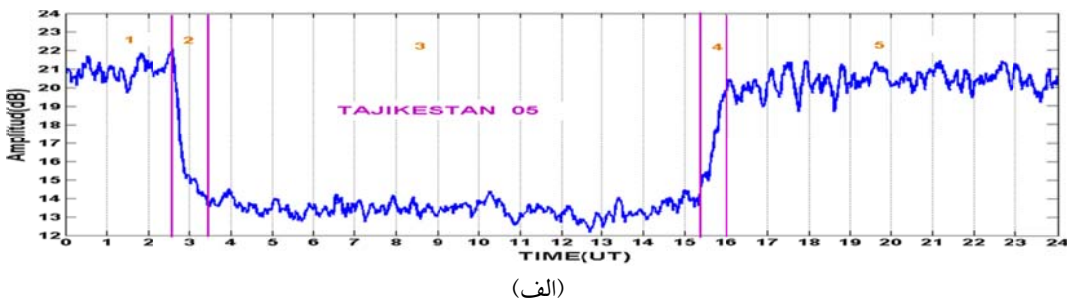


(د)

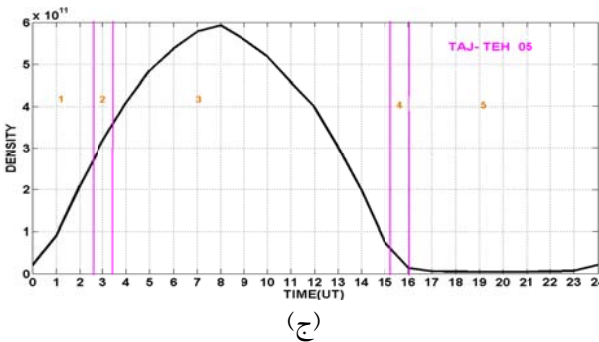


(ه)

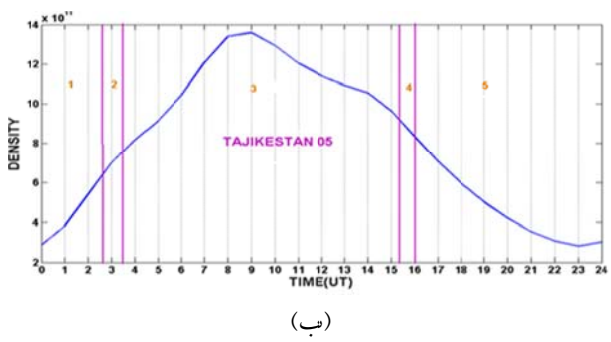
شکل ۱۲. مقایسه الف) نمودار تغییرات دامنه میانگین، مجموع چگالی میانگین و چگالی میانگین برای مسیر TRT4-THE در ماه می (۵) از سال ۲۰۱۹ (د) و (ب) برای ارتفاع ۵۰۰-۸۰ کیلومتر و (ج) و (ه) برای ارتفاع ۱۵۰-۸۰ کیلومتر نسبت به سطح زمین ترسیم شده‌اند.



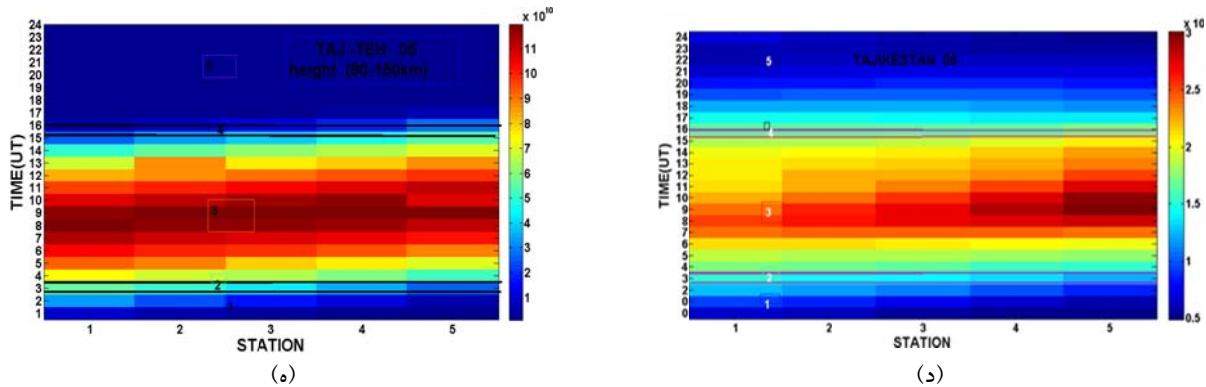
(الف)



(ب)



(ج)



شکل ۱۳. مقایسه الف) نمودار تغییرات دامنه میانگین، مجموع چگالی میانگین و چگالی میانگین برای مسیر TAJ-THE در ماه می (۵) از سال (۲۰۱۹). د) و ب) برای ارتفاع ۵۰۰-۸۰ کیلومتر و ج) و ه) برای ارتفاع ۱۵۰-۸۰ کیلومتری سطح زمین ترسیم شده‌اند.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در پژوهش حاضر نه تنها ویژگی‌ها و کاربرد امواج الکترومغناطیسی VLF/LF به‌طور همزمان مورد بررسی قرار گرفت، بلکه انتشار این امواج در ۱۰ مسیر متفاوت نیز توسط نمایه چگالی الکترونی در طول مسیر انتشار مورد مطالعه قرار گرفت که یکی از مزایای تحقیق پیش‌رو می‌باشد. از طرفی با بررسی زمان‌های شروع افت دامنه و زمان‌های کمینه اول و کمینه دوم دامنه سیگنال‌ها توانستیم به نتایج جالبی در زمینه شاخص‌هایی برای پیش‌نشانگری زمین‌لرزه برسیم که به علت همسو نبودن با عنوان مقاله از درج آن در اینجا خودداری کردیم. بعضی از نتایج قابل توجه در پژوهش را در زیر مطرح می‌کنیم:

۱- تغییرات دامنه سیگنال‌های VLF/LF رسیده به ایستگاه تهران نه تنها حاوی اطلاعات مهمی از وضعیت لایه تحتانی D می‌باشد، بلکه این حقیقت را آشکار می‌سازند که عوامل متعددی از قبیل طلوع و غروب خورشید، پارامترهای هواشناسی و جوی، نویزهای مختلف و رعدوبرق و طوفانهای ژئومغناطیسی و ... بر این تغییرات مؤثر بوده است؛ همچنین تعداد کانال‌های اضافی بازتاب در موج‌بر (زمین- یون‌سپهر) می‌تواند با ایجاد مقاومت سرراه سیگنال باعث افت دامنه آن نیز شود.

۲- داده‌های ارسالی از ۱۰ فرستنده در طول سال ۲۰۱۹ در گیرنده تهران دریافت و صحت‌سنجی شده‌اند.

۳- مدل تجربی IRI می‌تواند به‌عنوان یک ابزار کمکی

برای بررسی و صحت‌سنجی سیگنال‌های دریافتی در گیرنده تهران به کار رود و به کمک این مدل می‌توان به وضعیت چگالی لایه D یون‌سپهر در طول شبانه‌روز پی برد.

۴- تعداد ایستگاه‌های فرضی بین فرستنده و گیرنده می‌تواند در بالارفتن دقت نتایج به‌دست آمده از مدل IRI نقش مؤثری داشته باشد و هرچه تعداد آنها بیشتر باشد، هماهنگی بین تغییرات دامنه سیگنال و چگالی الکترون به‌دست آمده برای یون‌سپهر بیشتر خواهد بود.

بررسی تمامی سیگنال‌های دریافتی در گیرنده تهران نتایج خوبی از اطلاعات رسیده را به‌دست می‌دهد و این امیدواری را می‌دهد که به‌تراست به فکر توسعه شبکه لرزه یون‌سپهری خود در سراسر ایران باشیم و تعداد فرستنده‌ها و گیرنده‌ها در نقاط مختلف ایران را افزایش دهیم. با این شبکه می‌توان با توجه به مدل اتصال LAIC به‌خوبی فعالیت‌های لرزه یون‌سپهری قبل از زمین‌لرزه را متوجه شد و اطلاعات سیگنال‌های متعدد رسیده، تأییدکننده و مکمل یکدیگر بوده و از آن می‌توان به‌عنوان یکی از راه‌های پیش‌نشانگری زمین‌لرزه و یا بررسی تغییرات اقلیمی و هواشناسی استفاده کرد.

مراجع

الهی سرشت، م. ۱۳۹۷، بررسی اثر فعالیت‌های پیش لرزه‌ای در سیگنال‌های VLF ثبت شده در گیرنده تهران، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تهران.

- Dey S. and Singh R., 2003, Surface Latent Heat flux as an earthquake precursor, *Natural Hazards and Earth System Sci.*, 3, 749-755.
- Gufeld, A., Rozhnoi, A., Tyumentsev, S. N., Sherstyuk, S. V. and Yampolsky, V. S., 1992, Disturbances of Radiowave Fields before the Rudbar and Rachinsk Earthquakes, *Izv. Akad. Nauk, Ser. Fiz. Zemli*, 3, 102-106.
- 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. *J. Comm. Res.*
- Kumar A., Kumar S., Hayakawa M. and Menk F., 2013, Subionospheric VLF perturbations observed at low latitude associated with earthquake from Indonesia region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 102, 71-80.
- Mil'kis M. R., 1986, Meteorological Precursors of Earthquakes, *Izvestiya, Earth Physics*, 22, 195-204.
- Mogi, K., 1984, Temporal variation of crustal deformation during the days preceding a thrust-type great earthquake The 1944 Tonankai earthquake of magnitude 8.1, Japan. *PAGEOPH* 122, 765-780.
- Pulinets, S.A. and Boyarchuk, K., 2004, *Ionospheric Precursors of Earthquakes*. Springer, Berlin, 315 pp.
- Pulinets S. A., Kotsarenko A. N., Ciraolo L. and Pulinets I. A., 2007, Special case of Ionospheric day-to-day variability associated with earthquake preparation, *Adv. Space Res.*, 39 (5), 970-977.
- Pulinets S. A., Ouzounov D., Karelin A.V., Boyarchuk K. A. and Pokhmelnikh L. A., 2006, The physical nature of the thermal anomalies observed before strong earthquakes, *Physics and Chemistry of the Earth*, 31, 143-153, 2006b Based on the subionospheric LF propagation data in Japan, *Ann. Geophys.*, 24, 2219-2225, doi: 10.5194/angeo-24-2219-2006.
- Rozhnoi, A., Solovieva, M., 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, doi: 10.5194/nhess-9-1727-2009.
- Svensmark, H., 2006, Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric conditions, published: 03 October 2006 -17.
- Sasmal S., Chakrabarti S. K. and Chakrabarti S., 2010, Studies of the correlation Between ionospheric anomalies and seismic activities in the Indian subcontinent, *AIP Conference Proceedings*, 1286, 270-290.

Study and validation of VLF / LF data received at the probe receiver station of the Institute of Geophysics, University of Tehran

Safari, M.¹, Mahmoudian, A. R.^{2*} and Fallahrad, M.³

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

2. Assistant Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

3. M.Sc. Graduated, Department of Earth Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

(Received: 2 Dec 2020, Accepted: 25 May 2021)

Summary

For a long time, two very important issues have been raised for humans in relation to the phenomenon of earthquakes: 1) Predicting the exact time of an earthquake, 2) Controlling the conditions caused by an earthquake. In many advanced societies, valuable work has been done on the second, which has reduced the loss of life and property, but the actions taken on the first have brought us closer to our goal. These measures include studying the tectonic activity of the Earth's crustal plates, investigating changes in wave velocity (P, S) in an area, installing sensors on the ocean floor, monitoring active faults by satellite and using Doppler shift frequency in satellites, studying the behavior of some animals and etc. The mentioned study has also pointed out that some of them were able to inform us even 15 minutes before the earthquake.

But we are looking for a way that, in addition to being efficient, accurate and comprehensive, can cover a wider area and give us more time before the main earthquake occurs. The study of changes in the characteristics of VLF / LF waves such as signal amplitude, phase signal, temporal and spatial transmissions of the signal along the transmitter-transmitter are cases that have been followed more seriously by Hayakawa et al. since 1995. Since most of the studies have been with the help of VLF wave propagation and less LF waves have been used for investigation and pre-marking, so we want to analyze the first VLF / LF signals arrived at Tehran station in 2019 and also match them with daily density change diagrams. Electrons in terms of time obtained during the signal propagation path from the experimental IRI model associated with each month of the year. The proposed approach in this paper allows us to examine the ability of the IRI model in explaining the temporal evolution of the received signal. Here is a comprehensive way to advance IRI estimates of the current state of the ion sphere. This technique is proven to not only validate the experimental observations of recorded LF and VLF signals at the Tehran station, but also to propose a new approach for improving the estimate of the current state of the ionosphere using the IRI model. More observations could lead to a better estimation of averaged ionospheric densities along the signal propagation path at the morning and evening termination time.

By examining the changes in amplitude and phase of the signal, we examine the amount of charge density and the condition of the lower layer of the sphere ion (layer D) along the propagation path of the waves. We are looking for signs to reach a premonition for other earthquakes that will occur in the future. This approach could be used as an indicator of pre-seismic activities produced through the well-known Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere coupling (LAIC) process. Such a methodology could lead to a solid approach for earthquake prediction in Iran using the physics-based analogy. Therefore, this study investigated a new technique for ionosphere remote sensing as well as a new approach for earthquake prediction in Iran.

Keywords: Electromagnetic waves, VLF / LF waves, Signal amplitude changes, Ionospheric charge density fluctuations.

* Corresponding author:

a.mahmoudian@ut.ac.ir