

پیش‌بینی و تشخیص ناهنجاری‌های یونسفری زلزله در محتوای کلی الکترون نقشه‌های جهانی یونسفر (GIM) براساس تکنیک تبدیل موجک به‌منظور کاهش مخاطرات (زلزله ۷/۷ ریشتری سراوان، ۱۶ آوریل ۲۰۱۳)



فریده سبزه‌ای*

کارشناس ارشد ژئودزی - هیدروگرافی گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران

محمدعلی شریفی (Email: sharifi@ut.ac.ir)

دانشیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری و پژوهشکده مهندسی فناوری‌های اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران

مهدی آخوندزاده (Email: makhonz@ut.ac.ir)

استادیار، گروه مهندسی نقشه‌برداری، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۸/۲۲ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۹/۲۶)

چکیده

زلزله‌ها رفتاری ناشناخته و غیرخطی دارند و با توجه به بزرگای زلزله، شاهد تغییراتی در لیتوسفر، اتمسفر و یونسفر خواهیم بود. پارامترهای یونسفر در برابر زلزله‌های بزرگ بسیار حساس‌اند و تحت تأثیر قرار می‌گیرند. علاوه بر تغییرات یونسفری به‌وجودآمده بر اثر فعالیت‌های خورشیدی، تغییرات کوتاه‌مدت قابل توجهی در یونسفر دیده می‌شود که ناشی از تغییرات سریع در فعالیت‌های ژئومغناطیسی است. بنابراین، تشخیص تغییرات ناهنجار یونسفری ناشی از فعالیت‌های خورشیدی و ژئومغناطیسی، بسیار دشوار خواهد بود، به‌ویژه زمانی که توفان‌های ژئومغناطیسی کوچکی هم دخالت داشته باشند. پردازش سری زمانی محتوای کلی الکترون (TEC) یونسفری به‌منظور تشخیص ناهنجاری‌های یونسفری، موضوع بسیار مهم و کاربردی برای کاهش مخاطرات زلزله، از طریق پیش‌بینی بهنگام و در اختیار داشتن زمان لازم برای تصمیم‌گیری و آماده‌سازی وضعیت حاکم برای کاهش تلفات جانی و مالی در زمان رخداد زلزله خواهد بود. از دو تکنیک موجک برای سری‌های زمانی غیرخطی و غیر ثابت محتوای کلی الکترون استفاده شده است: تبدیل موجک تحلیلی (AWT) برای آشکارسازی تغییرات در TEC و تبدیل موجک متقابل (XWT) برای آنالیز روابط دوطرفه میان تغییرات ناهنجاری‌های یونسفری و شاخص‌های ژئومغناطیسی اطراف مرکز زلزله در حوزه زمان-فرکانس. زلزله‌ای در منطقه سراوان (۶۲.۰۵۳ درجه شرقی و ۲۸.۱۰۷ درجه شمالی) با بزرگای ۷/۷ در مقیاس ریشتر در تاریخ ۱۶ آوریل ۲۰۱۳ در زمان بیشینه فعالیت خورشیدی رخ داد. در این تحقیق، این زلزله تحت بازه ۶۲ (۱ مارس تا ۳۱ آوریل ۲۰۱۳) توسط نقشه جهانی یونسفر (GIM) با نرخ دوساعته، بررسی شد و با در نظر گرفتن شاخص‌های ژئومغناطیسی و خورشیدی موجود، شناسایی عوامل به‌وجودآورنده تغییرات در محتوای کلی الکترون صورت گرفت. تحت شرایط آرام ژئومغناطیسی، تنها زلزله، دلیل این تغییرات دانسته شد و در فاصله ۱۰ تا ۱۵ روز قبل از زلزله و ۷ روز پس از زلزله، تغییرات شدیدی مشاهده شد. در بازه مورد مطالعه، سطح فعالیت خورشیدی بالا بود و مقادیر TEC تحت تأثیر تابش‌های ناهنجار خورشیدی دچار تغییرات شدیدی شد. لازم است تغییرات فعالیت‌های خورشیدی و فعالیت‌های ژئومغناطیسی از روی TEC یونسفری حذف شود تا خطایی رخ ندهد. برای شناسایی اینکه آیا اغتشاشات یونسفری تشخیص داده‌شده توسط AWT در ارتباط با فعالیت‌های ژئومغناطیسی است یا نه، از XWT برای سری‌های زمانی TEC و Ap در بازه زمانی ۱ مارس تا ۳۱ آوریل ۲۰۱۳ استفاده شده است. یک منطقه مشترک پرنرزی از طریق دو سری زمانی استخراج شده که برای تاریخ ۱۷ مارس ۲۰۱۳ است. بر این اساس، این افزایش در محتوای کلی الکترون یونسفری به‌دلیل آثار توفان‌های ژئومغناطیسی بوده است. در بازه رخداد زلزله هیچ نقطه مشترک پرنرزی مشاهده نشد که نشان می‌دهد در زمان وقوع زلزله، فعالیت ژئومغناطیسی در ایجاد آنومالی یونسفری نقشی نداشته و عامل دیگری این ناهنجاری را در مقادیر یونسفری به‌وجود آورده است که احتمالاً دلیلی به‌جز زلزله نمی‌تواند داشته باشد. به این ترتیب، به‌منظور کاهش مخاطرات، با بررسی پارامترهای یونسفری می‌توان زمان و فرکانس وقوع زلزله را با داشتن سری زمانی از تغییرات TEC پیش‌بینی و استخراج کرد.

واژه‌های کلیدی: تبدیل موجک، زلزله سراوان، شاخص ژئومغناطیس، کاهش مخاطرات، محتوای کلی الکترون، یونسفر.

مقدمه

یونسفر، بخشی از اتمسفر زمین در ارتفاع ۵۰ تا ۱۴۰۰ کیلومتر است. این منطقه از اتمسفر، از تعامل بین پرتو X و فرابنفش با اتمسفر خنثی و همچنین آثار تابش خورشیدی به وجود آمده است. قبل از تعریف واژه یونسفر توسط واتسون-وات در ۱۹۲۶، واژه‌هایی مانند Heaviside layer و Appleton layer استفاده می‌شد [۱۵]. ضخامت یونسفر زمین که از چند لایه منعکس‌کننده تشکیل شده است با عواملی نظیر شب و روز و آشفتگی پلاسمای سطح خورشید در ارتباط نزدیک است. زمین دارای میدان مغناطیسی است و می‌تواند بر یون‌ها و به‌طور خلاصه پلاسمای فضای اطرافش اثر بگذارد. در حقیقت یونسفر، یک منطقه گذری بین اتمسفر خنثی و پلاسمای تمام‌یونیزه‌شده مگنوتوسفر است [۱۶]. با در اختیار داشتن ارتفاع لایه‌های مختلف یونسفر می‌توان ترکیب یون، چگالی یون و تغییرات یونسفر را تعیین کرد. هر لایه (D, E, F_1, F_2) یک فرکانس بحرانی هم دارد (foD, foE, foF_1, foF_2) که حداکثر فرکانسی است که در برخورد قائم از آن لایه می‌تواند منعکس شود [۱۷، ۱۸]. خورشید منبع اصلی یونیزاسیون یونسفر به‌شمار می‌رود و با تغییر زمان، فصل، فعالیت خورشیدی، فعالیت ژئومغناطیسی و موقعیت جغرافیایی، یونسفر هم تغییر می‌کند. یونسفر تغییرات زمانی و مکانی زیادی دارد. تغییرات زمانی منظم و نامنظم‌اند و عوامل دیگری هم دخیل‌اند که ناشی از رفتارهای غیرعادی خورشید نظیر توفان‌های یونسفری، توفان‌های وابسته به شفق‌های قطبی و ... است [۱۹-۲۱]. الکترون‌های آزاد و یون‌هایی که در طی فعل‌وانفعالات ناشی از فرایند یونیزاسیون تولید شده‌اند، لایه یونسفری را تشکیل می‌دهند. محتوای کلی چگالی الکترون (TEC) یکی از پارامترهای مؤثر در تعیین رفتار یونسفری است. TEC از مجموع الکترون‌های موجود در استوانه‌ای به سطح مقطع ۱ متر مربع و در مسیر سیگنال از ماهواره تا گیرنده گسترده شده است. عدد TEC مقدار بزرگی است و از واحد TECU که معادل 10^{16} الکترون بر متر مربع است استفاده می‌شود. سری‌های زمانی زلزله‌ها از رفتار سیستماتیک و مشخصی تبعیت نمی‌کنند. آنومالی TEC معمولاً در لایه‌های D, E و F اتفاق می‌افتند و در بازه‌های زمانی ۱ تا ۱۰ روز قبل از زلزله و چند روز بعد از زلزله مشاهده می‌شوند [۲-۴]. فعالیت‌های لرزه‌ای فقط با لیتوسفر در ارتباط نیستند و می‌توانند اغتشاشاتی در اتمسفر و یونسفر ایجاد کنند که دلیلی جز زلزله برایشان نمی‌توان سراغ داشت [۵، ۷، ۹]. پارامترهای یونسفری به زمین‌لرزه‌های بزرگ بسیار حساس‌اند [۶، ۸، ۱۰-۱۴]. علاوه بر فعالیت‌های خورشیدی، فعالیت‌های ژئومغناطیسی بسیار سریع در یونسفر تأثیر می‌گذارند، بنابراین تشخیص اینکه تغییرات ناهنجاری یونسفری به دلیل فعالیت‌های لرزه‌ای

است یا فعالیت ژئومغناطیسی، کاری سخت خواهد بود، به‌ویژه اگر در آن زمان توفان‌های ژئومغناطیسی کوچک هم دخالت داشته باشند [۲-۴]. با پوشش زمانی و مکانی بسیار بالای مشاهدات ماهواره‌های GPS/GLONASS و صدها ایستگاه زمینی متناظر پخش شده در سرتاسر دنیا، داده‌ی TEC یونسفری برای تشخیص و اندازه‌گیری تغییرات یونسفری و ناهنجاری‌های آن به‌منظور کاهش مخاطرات زلزله بسیار خوب عمل می‌کند. مورد مطالعاتی، زلزله‌ای در جنوب شرق ایران، سراوان با بزرگی ۷/۷ در روز ۱۶ آوریل ۲۰۱۳ ساعت ۱۷:۴۴:۱۰ UTC است. نقشه‌های جهانی یونسفر (GIM) با رزولوشن زمانی دوساعته و رزولوشن مکانی 5° در طول جغرافیایی و $2/5^\circ$ در عرض جغرافیایی برای تاریخ ۱ مارس تا ۳۱ آوریل استخراج شد و با در نظر گرفتن شاخص‌های ژئومغناطیس و خورشیدی و با استفاده از تبدیل موجک یکپارچه (IWAM) به بررسی زمان و فرکانس زلزله و ارتباطسنجی آنومالی به‌وجودآمده در TEC یونسفری و عامل ژئومغناطیسی پرداخته شد.

روش‌شناسی

محاسبه آنومالی محتوای کلی الکترون با استفاده از میانگین‌گیری

با استفاده از رابطه ۱ به بررسی آنومالی محتوای کلی الکترون پرداخته شده است. در رابطه ۱، mean میانگین و σ انحراف از معیارند. مقادیری را که خارج از این بازه قرار خواهند گرفت می‌توان آنومالی قبل و بعد از زلزله به حساب آورد، ولی در ادامه با احتساب شاخص‌های ژئومغناطیسی با شروط $kp < 2/5$ و $Dst > -20$ و $Ap < 25$ ، آنومالی‌های حاصل که ناشی از توفان‌های ژئومغناطیسی، تغییرات و فعالیت‌های خورشیدی و میدان مغناطیسی است در نظر گرفته نمی‌شود و آنچه را که برجای می‌ماند نمی‌توان به چیزی جز زلزله نسبت داد [۲-۴].

$$\left| \frac{(TEC - \text{mean}(TEC))}{\sigma} \right| > 1/5 \quad (1)$$

اگر شاخص‌های مورد نظر در سطح پایینی قرار داشته باشند، به‌عنوان روز آرام مطرح می‌شوند و می‌توان آنومالی TEC را که اغتشاش یونسفری را به‌وجود آورده، مربوط به زلزله دانست، ولی اگر شاخص‌ها برای روزهای متلاطم باشند (بالا بودن سطح مقادیر شاخص‌ها)، نتیجه می‌گیریم آنومالی TEC به‌وجودآورنده اغتشاش یونسفری مربوط به میدان‌های مغناطیسی و عوامل جوی است و ارتباطی با زلزله نخواهد داشت.

شکل ۳ مقادیر TEC را در بازه ۶۲ روزه برای منطقه سراوان به همراه استخراج آنومالی TEC با در نظر گرفتن شاخص‌های ژئومغناطیسی و بدون در نظر گرفتن شاخص‌های ژئومغناطیسی نشان می‌دهد.

استخراج آنومالی محتوای کلی الکترون با استفاده از تبدیل موجک

روش IWAM (روش آنالیز موجک یکپارچه) برای آنالیز TEC یونسفری از دو ترکیب تبدیل موجک تحلیلی (AWT) و تبدیل موجک متقابل (XWT) استفاده می‌کند. تبدیل AWT برای کشف و شناسایی اغتشاشات TEC یونسفری و XWT برای تشخیص اینکه آیا آشفتگی TEC یونسفری واقعاً به زلزله ارتباط دارد یا نه استفاده شده است [۲۳].

- کشف اغتشاشات TEC یونسفری با روش AWT

تبدیل موجک تحلیلی یک ویژگی عالی برای تحلیل و ارزیابی تغییرات زمانی و فرکانسی آنومالی‌های محلی TEC یونسفری را دارا بوده و به صورت رابطه ۲ قابل بیان است.

$$w(u, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt = w_R(u, s) + i w_I(u, s) \quad (2)$$

که $\psi^*(t)$ مزدوج مختلط تابع موجک پیوسته در زمان و در فرکانس است و موجک مادر نام دارد؛ s فاکتور تأخیر؛ u پارامتر انتقال؛ و $f(t)$ سری زمانی مورد بررسی است.

$$\begin{cases} w_R(u, s) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_R \left(\frac{t-u}{s} \right) dt \\ w_I(u, s) = \frac{-1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_I \left(\frac{t-u}{s} \right) dt \end{cases} \quad (3)$$

دامنه $f(t)$ موجود با مقیاس‌های مختلف s از سیگنال حقیقی براساس رابطه ۴ برآورد می‌شود:

$$w_A(u, s) = \sqrt{w_R(u, s)^2 + w_I(u, s)^2} \quad (4)$$

$|w_A(u, s)|^2$ ، طیف چگالی انرژی موجک تحلیلی است که اجازه استخراج ویژگی‌های دامنه از سیگنال موجود را می‌دهد. این تبدیل، توانایی آشکارسازی آنومالی‌های لرزه‌ای یونسفری را از سایر آشفتگی‌ها داراست [۲۳].

- تشخیص آشفستگی یونسفر توسط XWT

XWT روش تجزیه و تحلیل سیگنال است که به منظور به دست آوردن رابطه متقابل دو سری زمانی در دامنه زمان-فرکانس روی مقیاس‌های چندفرکانسه اعمال می‌شود. بنابراین XWT می‌تواند برای آنالیز روابط بین تغییرات سیگنال یونسفری و شاخص‌های ژئومغناطیسی اطراف منطقه زلزله استفاده شود. دو سری زمانی X و Y دارای توابع موجک $W^X(u,s)$ و $W^Y(u,s)$ هستند. تبدیل موجک متقابل به صورت رابطه ۵ قابل تعریف است.

$$W^{XY}(u,s) = W^X(u,s)W^{Y*}(u,s) \quad (5)$$

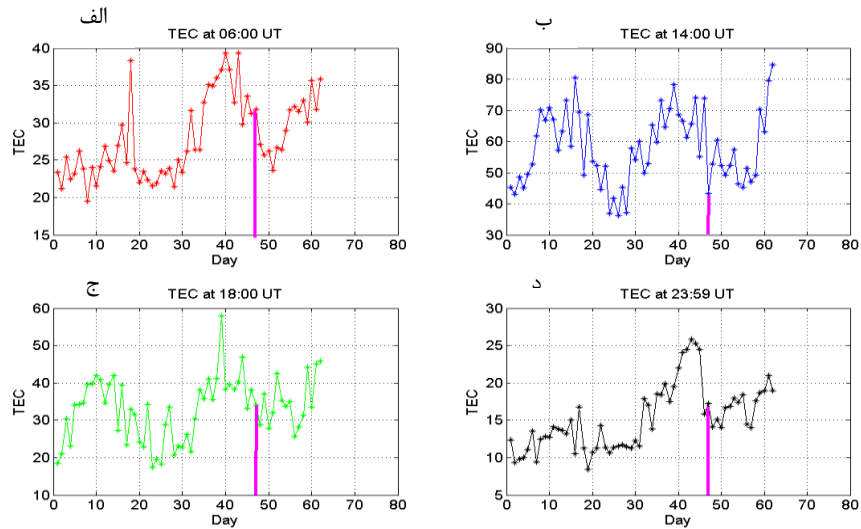
در رابطه ۵، $W^{Y*}(u,s)$ مزدوج مختلط $W^{Y*}(u,s)$ و $|W^{XY}(u,s)|$ طیف انرژی موجک متقابل است. اگر دو سری زمانی، ارتباط محلی با یکدیگر داشته باشند، انرژی طیف موجک متقابل، اشتراک محلی (منطقه پراثری) را نشان می‌دهد [۲۲، ۲۳].

اندازه‌گیری، مشاهده و محاسبه

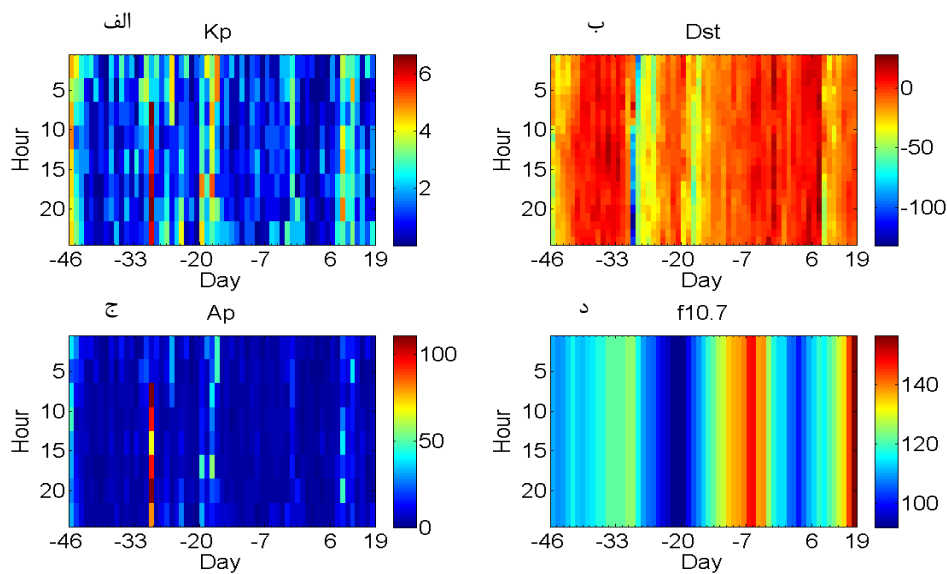
شاخص‌های ژئومغناطیسی

شاخص‌های مغناطیسی می‌توانند ارتباط میان یونسفر و مگنوتسفر و خورشید را به خوبی بیان کنند. شاخص k_p برای اندازه‌گیری نوسانات نامنظم مؤلفه‌های کارترین میدان مغناطیسی زمین در دوره‌های سه‌ساعته روز خورشیدی استفاده می‌شود. این نوسانات نامنظم به اختلالات میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده در واحد گاماس مربوط می‌شوند. ۱۳ ایستگاه مشاهداتی برای اندازه‌گیری شاخص K_p ، در عرض‌های مغناطیسی شمالی و جنوبی بین عرض‌های ۴۶ و ۶۳ درجه واقع شده‌اند. شاخص K_p ، یک شاخص سه‌ساعته جهانی است که برای اندازه‌گیری جهانی فعالیت‌های خورشیدی طراحی شده است و از میانگین حسابی مقادیر K محاسبه شده در ۱۳ ایستگاه به دست می‌آید. شاخص K_p دارای ۲۸ گام از صفر تا نه است. شاخص DST (Disturbance Storm Time)، شاخص اختلال مغناطیسی استوایی، هر یک ساعت و برحسب نانوآمپیه محاسبه می‌شود. شاخص A_p مشتق از شاخص K_p و برای یک شبانه‌روز شامل ۸ مقدار سه‌ساعته است. در شکل ۲، تغییرات شاخص‌های ژئومغناطیسی و خورشیدی از ۱ مارس تا ۳۱ آوریل ۲۰۱۳ نمایش داده شده است.

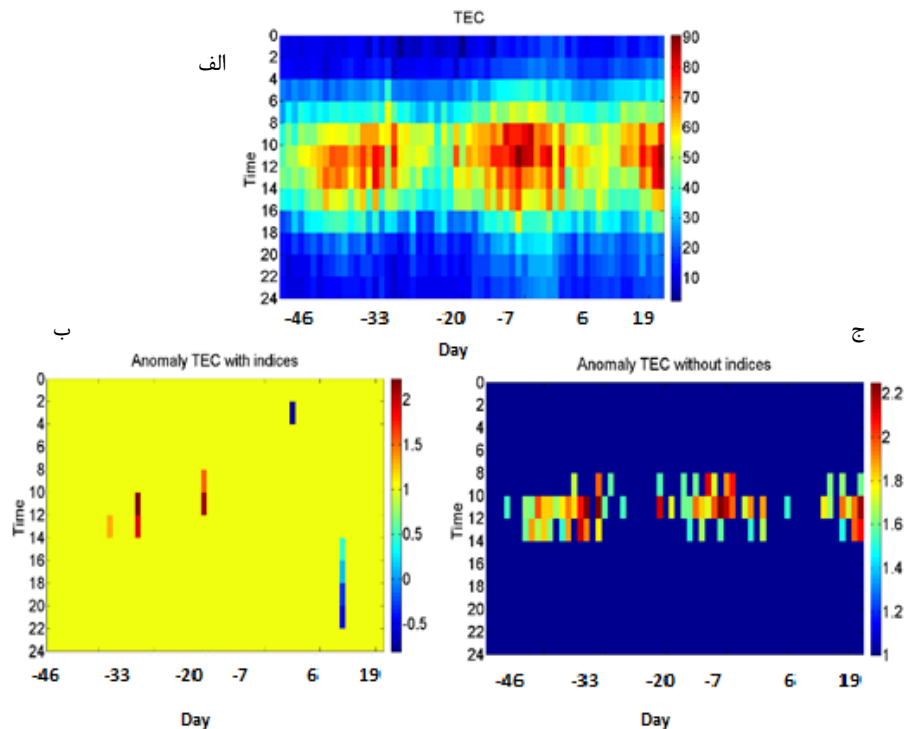
در شکل ۱ تغییرات TEC منطقه سراوان، در ۴ ساعت مختلف از شبانه‌روز در بازه ۱ مارس تا ۳۱ آوریل ۲۰۱۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۱. روند تغییرات TEC منطقه سران در روزهای ۱ مارس تا ۳۱ آوریل ۲۰۱۳ در چهار ساعت (الف) ۶ صبح، (ب) ۱۴ بعد از ظهر، (ج) ۱۸ بعد از ظهر، (د) نیمه شب (خط صورتی زمان رخداد زلزله را بیان می کند).



شکل ۲. تغییرات شاخص های ژئومغناطیسی و خورشیدی از ۱ مارس تا ۳۱ آوریل ۲۰۱۳. (الف)، (ب)، (ج)، (د) شاخص Kp، شاخص Dst، شاخص Ap و شاخص خورشیدی f10.7.

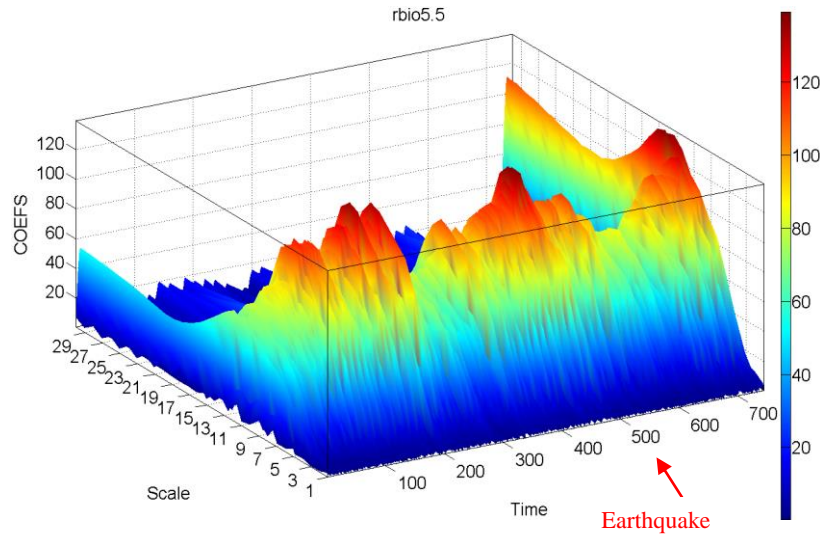


شکل ۳. الف) مقدار TEC، ب) آنومالی TEC با در نظر گرفتن شاخص‌های ژئومغناطیس و خورشیدی، ج) آنومالی TEC بدون در نظر گرفتن شاخص‌های ژئومغناطیس و خورشیدی.

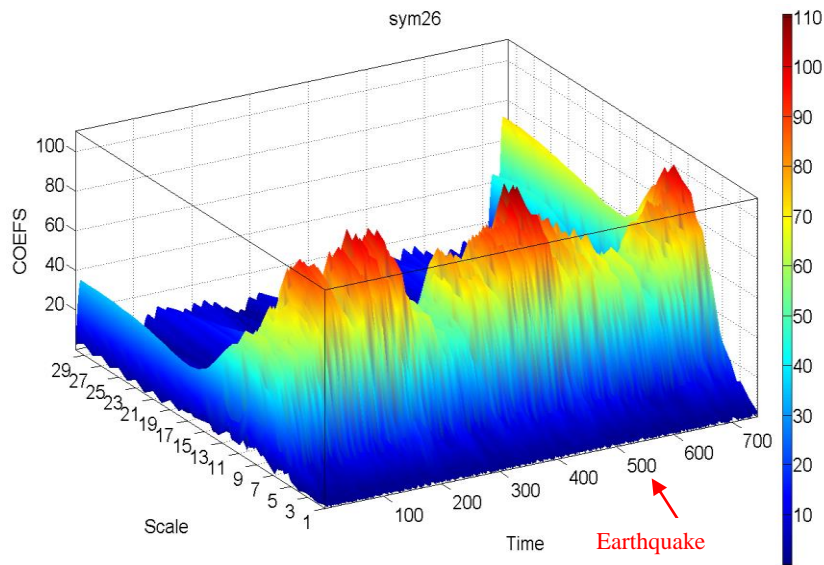
آنومالی TEC توسط رابطه ۱ محاسبه شده است. شکل ۳ ج، این آنومالی را نشان داده است. تغییرات دیگری هم در خارج از بازه رخداد زلزله وجود دارد و نمی‌توان زلزله را دلیل قطعی تغییرات TEC دانست.

عوامل دیگری از جمله شاخص‌های ژئومغناطیس، بادهای و توفان‌های خورشیدی و غیره هم در این تغییرات تأثیرگذارند. شکل ۳ ب، این آنومالی را با در نظر گرفتن شاخص‌های ژئومغناطیس نشان می‌دهد، تنها مقداری که برایش باقی مانده است مربوط به زمان وقوع زلزله است و بیانگر این مطلب است که اگر تأثیر تمام شاخص‌ها را از روی آنومالی TEC یونسفری برداریم، آنچه باقی می‌ماند به چیزی غیر از عوامل اتمسفری و ژئومغناطیسی ارتباط دارد و می‌تواند به دلیل زلزله باشد.

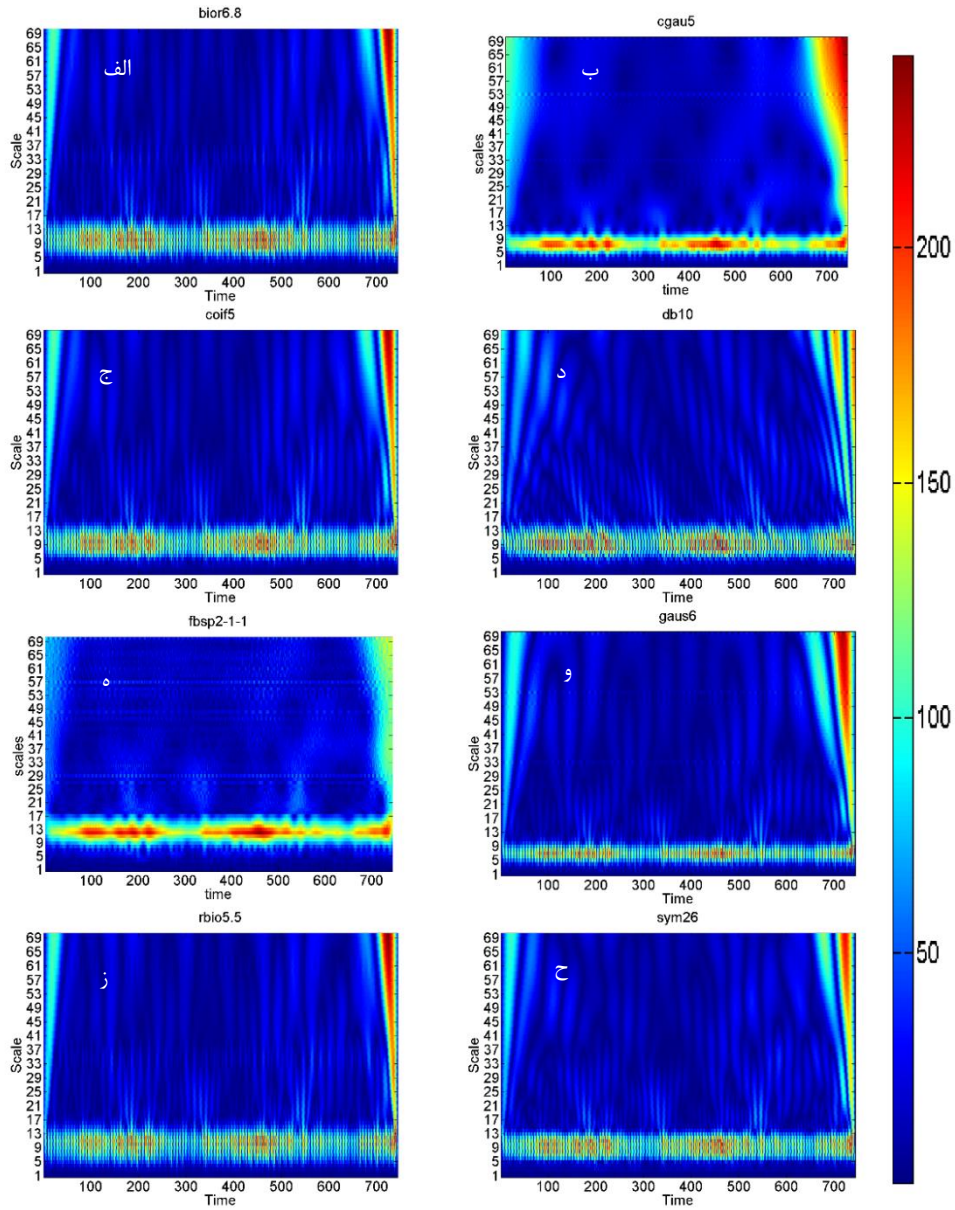
الف



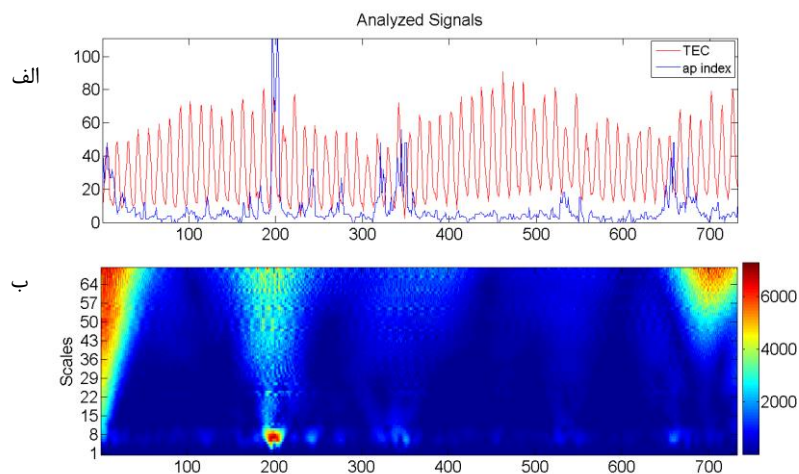
ب



شکل ۴. تبدیل موجک تحلیلی سه بعدی و استخراج آنومالی محتوای کلی الکترون توسط توابع مادر الف) rbio5.5 و ب) sym ۲۶ هستند.



شکل ۵. مقایسه توابع مادر مختلف از تبدیل موجک تحلیلی که به ترتیب شامل (الف) bior6.8، (ب) cgau5، (ج) coif5، (د) db10، (ه) fbsp2-1-1، (و) gaus6، (ز) rbio5.5، (ح) sym26 هستند.



شکل ۶: الف) سری زمانی TEC یونسفری منطقه سراوان و تغییرات شاخص ژئومغناطیس ap از ۱ مارس تا ۳۱ آوریل ۲۰۱۳ به ترتیب با رنگ‌های قرمز و آبی مشخص شده‌اند. ب) طیف موجک متقابل برای سری زمانی TEC و ap با استفاده از تابع موجک مادر ۵-۱-۰-۲-fb. sp

بحث

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، مقادیر محتوای کلی الکترون قبل از وقوع زلزله در سطح بالایی قرار داشته است و پس از وقوع زلزله دچار افت شدیدی شده‌اند. در ساعات ۶ صبح و نیمه‌شب کاملاً این قضیه را می‌توان مشاهده کرد. در شکل ۲، همان‌طور که مشاهده می‌شود تقریباً در بازه‌های ۲۰ و ۳۰ روزه قبل از زلزله آنومالی‌های ژئومغناطیسی شدیدی (توفان‌های ژئومغناطیسی و ...) وجود دارند (شاخص‌های K_p , A_p و Dst)، همچنین یک هفته قبل از وقوع زلزله، فعالیت‌های خورشیدی هم دچار تغییر شدیدی شد و بیشترین مقدار را نسبت به روزهای قبل خود تجربه کرد. در شکل ۳ ابتدا مقادیر TEC در ساعات شبانه‌روز برای بازه دو ماهه (۶۲ روز) ترسیم و سپس به محاسبه آنومالی با روش میانگین‌گیری پرداخته شده است. آنومالی‌ها آشکار شدند، ولی دلیل این تغییرات باید بررسی و از روند کار حذف شوند تا چیزی که باقی می‌ماند تنها به دلیل وقوع زلزله باشد (شکل ۳ ب). بنابراین با مشاهده مقادیر TEC به تنهایی نمی‌توان وقوع زلزله را پیش‌بینی کرد. روش میانگین‌گیری در کنار روش دیگری مرسوم به تبدیل موجک یکپارچه به منظور استخراج و شناسایی آنومالی‌ها به کار گرفته شده است. در شکل ۴ به صورت سه‌بعدی این آنومالی‌ها با تکنیک تبدیل موجک تحلیلی استخراج شده‌اند و مقادیر بیشینه‌ای مشاهده می‌شود که به دلیل تغییرات شدید ژئومغناطیسی بوده

است، ولی موضوع جالب آن است که در بازهٔ رخداد زلزله (۱۰ تا ۱۵ روز قبل از زلزله) ماکزیممی وجود دارد که می‌توان وقوع زلزله را پیش‌بینی کرد. در شکل ۵ توابع موجک مادر مختلفی استفاده شده‌اند و تفاوت نمایش و میزان حساسیت آنومالی‌ها را با این توابع می‌توان مشاهده کرد. نقاط قرمز در تصاویر ۴، ۵ و ۶ حاکی از تغییرات زیاد و نشان‌دهندهٔ تغییرات ناگهانی در سری زمانی است و با تحلیل این مناطق و نقاط همسایهٔ آنها، احتمال وقوع زلزله بررسی شده است. در شکل ۶ از تکنیک موجک متقابل برای بررسی دو سری زمانی مقادیر TEC یونسفری و شاخص ژئومغناطیس Ap استفاده شده است و هدف، یافتن زمان‌هایی است که آنومالی در مقدار TEC مشاهده شده و در همان زمان فعالیت ژئومغناطیسی هم در سطح بالایی قرار داشته است. این منطقهٔ پرانرژی در شکل ۶ به خوبی مشاهده می‌شود و در شکل ۲ ج هم این حداکثری به چشم می‌خورد. استفاده از تبدیل موجک متقابل بیانگر این مطلب است که سری زمانی فعالیت ژئومغناطیسی در بازهٔ رخداد زلزله هیچ تغییر ناگهانی نداشته و در مقادیر TEC آنومالی ایجاد نکرده است. قابلیت استخراج و پیش‌بینی زلزله با پیش‌نشانگرهای یونسفری می‌تواند در آگاه‌سازی مردم و مسئولان و کاهش تلفات جانی و مالی و امکان‌سنجی و امداد بعد از وقوع زلزله بسیار مؤثر واقع شود [۱]. با بررسی پیوسته و دائمی تغییرات TEC یونسفری برای مناطق لرزه‌خیز (ایستگاه) با توجه به وضعیت ژئومغناطیسی و خورشیدی حاکم، به‌منظور کاهش مخاطرات، پیش‌بینی دقیقی از زمان رخداد زلزله، فرکانس و توانایی احساس زلزله برای مناطق مجاور ایستگاه، با در نظر گرفتن سطح تغییرات به‌وجودآمده در میزان TEC یونسفری آن مناطق قابل برآورد است.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، توانایی زیاد تبدیل موجک در شناسایی و استخراج آنومالی‌ها نشان داده شده است. پس از تشخیص آنومالی و استخراج زمان و فرکانس رخداد زلزله، مقایسه‌ای با توابع مادر مختلف تبدیل موجک انجام گرفت و نتیجه گرفته شد که توابع پایهٔ 1-1-fbsp2 و 5-cgau قابلیت شناسایی و نمایش بهتری از ناهنجاری‌ها را دارند. رزولوشن زمانی و مکانی نقشه‌های جهانی نسبت به نقشه‌های محلی بسیار کم است، ولی با توجه به این موضوع، زلزله به‌حدی شدت داشته است که در پوشش مکانی وسیعی احساس شده و توانایی تغییر در لایهٔ یونسفر و محتوای کلی الکترون و همچنین قابلیت استخراج و تحلیل را داشته است. بنابراین برای زلزله‌های به نسبت بزرگ می‌توان از نقشه‌های جهانی برای تشخیص آنومالی‌ها استفاده کرد. در صورتی می‌توان تغییرات به‌وجودآمده در محتوای کلی الکترون را به وقوع زلزله نسبت داد که

وضعیت ژئومغناطیسی و خورشیدی که بیانگر ارتباط میان میدان مغناطیسی و الکتریکی زمین با خورشید و فضای اطراف آنهاست، بررسی شود و دانش مربوط به آنها نیز در اختیار باشد و دلیل این تغییرات ناگهانی در یونسفر را نتوان به عامل دیگری غیر از زلزله نسبت داد. با داشتن مشاهدات ماهواره‌ای GNSS یا نقشه‌های GIM یونسفری و شاخص‌های ژئومغناطیسی و خورشیدی می‌توان احتمال وقوع زلزله را با داشتن بازه مشاهداتی حداقل ۳۰ روز قبل از وقوع زلزله پیش‌بینی کرد و با مقایسه با پارامترهای دیگر قبل از وقوع زلزله، مانند خروج گاز رادون از داخل زمین و تغییر در دما و سطح آب چاه‌ها، تشخیص ناهنجاری یونسفری را هم به‌عنوان پیش‌نشانگر دیگری به‌منظور آگاه‌سازی قبل از واقعه زلزله مطرح کرد. با توجه به غیرهموزن و ناهمگن بودن زمین، نباید انتظار داشت تمامی پیش‌نشانگرها همزمان و برای تمامی مناطق جواب بدهند [۱]. برای منطقه سراوان، تکنیک موجک تحلیلی و متقابل، توانایی استخراج زمان و فرکانس رخداد زلزله را با توجه به تغییرات TEC روزهای قبل و بعد زلزله داشته است. به‌منظور کاهش مخاطرات، با در نظر گرفتن همزمان تغییرات ژئومغناطیسی و خورشیدی و تغییرات TEC، می‌توان از تکنیک موجک به‌عنوان سیستم هشدار زودهنگام برای آگاه‌سازی وقوع زلزله در روزهای آتی ایستگاه تحت بررسی استفاده کرد.

منابع

- [۱]. مقیمی، ابراهیم (۱۳۹۳). دانش مخاطرات (برای زندگی با کیفیت بهتر و محیط پایدارتر)، مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
- [2]. Akhoondzadeh, M., (2011), Comparative study of the earthquake precursors obtained from satellite data. Ph.D. thesis, University of Tehran, Surveying and Geomatics Engineering Department, Remote Sensing Division, pp. 1–157.
- [3]. Akhoondzadeh, M., (2012). Anomalous TEC variations associated with the powerful Tohoku earthquake of 11 March 2011. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12, 1453–1462.
- [4]. Akhoondzadeh, M., (2014). Thermal and TEC anomalies detection using an intelligent hybrid system around the time of the Saravan, Iran, (Mw = 7.7) earthquake of 16 April 2013. *J. Adv. Space Res.*, (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2013.12.017>
- [5]. Jin, S., Han, L., and Cho, J., (2011), Lower atmospheric anomalies following the 2008 Wenchuan Earthquake observed by GPS measurements, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 73, 810–814, doi:10.1016/j.jastp.2011.01.023.

- [6]. Kon, S., Nishihashi, M., and Hattori, K.,(2011), Ionospheric anomalies possibly associated with M_{6.0} earthquakes in the Japan area during 1998–2010: Case studies and statistical study, *J. Asian Earth Sci.*, 41, 410-420, doi:10.1016/j.jseaes.2010.10.005.
- [7]. Kuo, C., Huba, J., Joyce, G., and Lee, L.,(2011), Ionosphere plasma bubbles and density variations induced by pre-earthquake rock currents and associated surface charges, *J. Geophys. Res.*, 116, A10317, doi:10.1029/2011JA016628 .
- [8]. Leonard, R. and Barnes Jr., R.,(1965), Observations of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake, *J. Geophys. Res.*, 70, 1250–1253, doi:10.1029/JZ070i005p01250.
- [9]. Liu, J., Chen, Y., Pulinets, S., Tsai, Y., and Chuo, Y.,(2000), Seismo-ionospheric signatures prior to M_{6.0} Taiwan earthquakes, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3113–3116, doi:10.1029/2000GL011395.
- [10]. Liu, J., Chen, Y., Chuo, Y., and Tsai, H.,(2001), Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi Earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1383–1386, doi:10.1029/2000GL012511 .
- [11]. Liu, J., Chen, Y., Chen, C., Liu, C., Chen, C., Nishihashi, M., Li, J., Xia, Y., Oyama, K., and Hattori, K.,(2009), Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 Mw7. 9 Wenchuan earthquake, *J. Geophys. Res.*, 114, A04320, doi:10.1029/2008JA013698.
- [12]. Li, M. and Parrot, M.,(2013), Statistical analysis of an ionospheric parameter as a base for earthquake prediction, *J. Geophys. Res.*, 118, 3731–3739, doi:10.1002/jgra.50313.
- [13]. Pisa, D., Parrot, M., and Santolík, O.,(2011), Ionospheric density variations recorded before the 2010 Mw 8.8 earthquake in Chile, *J. Geophys. Res.*, 116, A08309, doi:10.1029/2011ja016611.
- [14]. Zhao, B., Wang, M., Yu, T., Wan, W., Lei, J., Liu, L., and Ning, B.,(2008), Is an unusual large enhancement of ionospheric electron density linked with the 2008 great Wenchuan earthquake?, *J. Geophys. Res.*, 113, A11304, doi:10.1029/2008JA013613.
- [15]. Rishbeth, H., Kohl, H., and Barclay, W.(1996), A history of ionospheric physics and radio communications, in: *Modern Ionospheric Science*, pp. 4–31.
- [16]. Baumjohann, W. and Treumann, R. A.: *Basic Space Plasma Physics*, Imperial College Press, 57 Shelton Street, Covert Garden London WC2H9HE, 1997.
- [17]. McNamara, L. F.,(1999), *The Ionosphere, Communications, Surveillance, and Direction Finding*, Krieger publishing company.
- [18]. Habarulema, J. B., McKinnell, L.-A., and Opperman, B. D. L.,(2010), TEC measurements and modelling over Southern Africa during magnetic storms ; a comparative analysis, *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, 72(5-6), 509–520.
- [19]. Kelley, M. C. ,(2009), *The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics* (2nd ed.). United States of America: Academic Press.

-
- [20]. Hargreaves, J. K. ,(1992),The Solar-Terrestrial Environment: an introduction to geospace - the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere. (A. J. Dessler, J. T. Houghton, & M. J. Rycroft, Eds.) Cambridge: Cambridge University Press .
- [21]. Skone, S. ,(1998), Wide area ionosphere grid modelling in the auroral region. PhD Thesis, University of Calgary, Department of Geomatics Engineering, Calgary, Alberta, Canada.
- [22]. Grinsted, A., Moore, J., and Jevrejeva, S.,(2004), Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series,Nonlinear Proc. Geoph., 11, 561–566.
- [23]. He L. M., L. X. Wu, A. De Santis, S. J. Liu and Y. Yang ,(2014), Is there a one-to-one correspondence between ionospheric anomalies and large earthquakes along Longmenshan faults?, Annales Geophysicae, 32, 187-196.