



نگرشی نوین بر پتانسیل لرزه خیزی کشور (پیش بینی؟-پیش نشاگیری) با استفاده از ایستگاه های دائمی GNSS

اداره کل نقشه برداری زمینی و بنیادی

تهیه کننده: دکتر حمید رضا نانکلی





۱-مقدمه :

در ده سال گذشته دنیای ناوبری ماهواره‌ای تغییرات زیادی کرده است این تغییرات در اولین آرایش آسمانی ماهواره‌ها (GPS) و همچنین در ۵ آرایش جدید جهانی یا محلی که شامل QZSS, IRNSS, BeiDou, Galileo, Glonass می‌شود؛ ایجاد و به سیستم‌های قابل اعتمادی جهت اهداف تعیین موقعیت و ناوبری و زمان تبدیل شده است. این سیستم‌های ناوبری مستقل به عنوان مکملی برای SBAS هستند تا دسترسی، دقت و اعتماد را در کاربردهای بحرانی افزایش دهند. توانایی و کاربرد این سیستم‌های ناوبری جهانی به اثبات رسیده و علیرغم مسائل سیاسی و استقلال این سیستم در بحث تعیین موقعیت و زمان ترکیب چندگانه آرایش آسمانی، این سامانه‌ها مزایای زیادی را نسبت به GPS دارند که نتایج آن را می‌توان در بحث چندمسیری - تداخل امواج و ارسال تصحیحات DGNSS ملاحظه کرد. همچنین با استفاده از افزایش تعداد ماهواره‌ها، دریافت سیگنال‌های متفاوت، دقت بهتری در تعیین مدل‌سازی شرایط جوی (یونسفر - ترپسفر Occultation - ایجاد می‌شود و همچنین روش‌های جدیدی را برای حل ابهام فاز در معادلات مشاهدات فاز حامل و روش‌های نسبی و PPP ارائه می‌دهد. سیستم‌های ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS) که برای اهداف نظامی و موقعیت‌یابی غیر نظامی طراحی شده‌اند شیوه نوین و منتخبی برای مطالعه محدوده وسیعی از پدیده ژئوفیزیک هستند. اندازه‌گیری‌های GNSS هم اکنون برای تعیین حرکت صفحات تکتونیکی زمین مطالعه تغییر شکل در اطراف گسل‌ها (اندازه‌گیری حرکات قبل و در حین زلزله - بعد و بین دو زلزله) و آتشفشان‌ها و اندازه‌گیری حرکات پوسته ناشی از رجعت ایزوستای پس از ذوب شدن یخها - فرونشست زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجا که تاخیر سیگنال‌های GNSS همانطور که از اتمسفر زمین می‌گذرند قابل اندازه‌گیری هستند؛ اندازه‌گیری‌های GNSS حتی در مطالعات اتمسفر (مدلسازی بخار آب و TEC)، نیز به صورت پیش‌نشانگر قابل استفاده است.

۲- شبکه ایستگاه های دائمی GNSS ژئودینامیک ایران

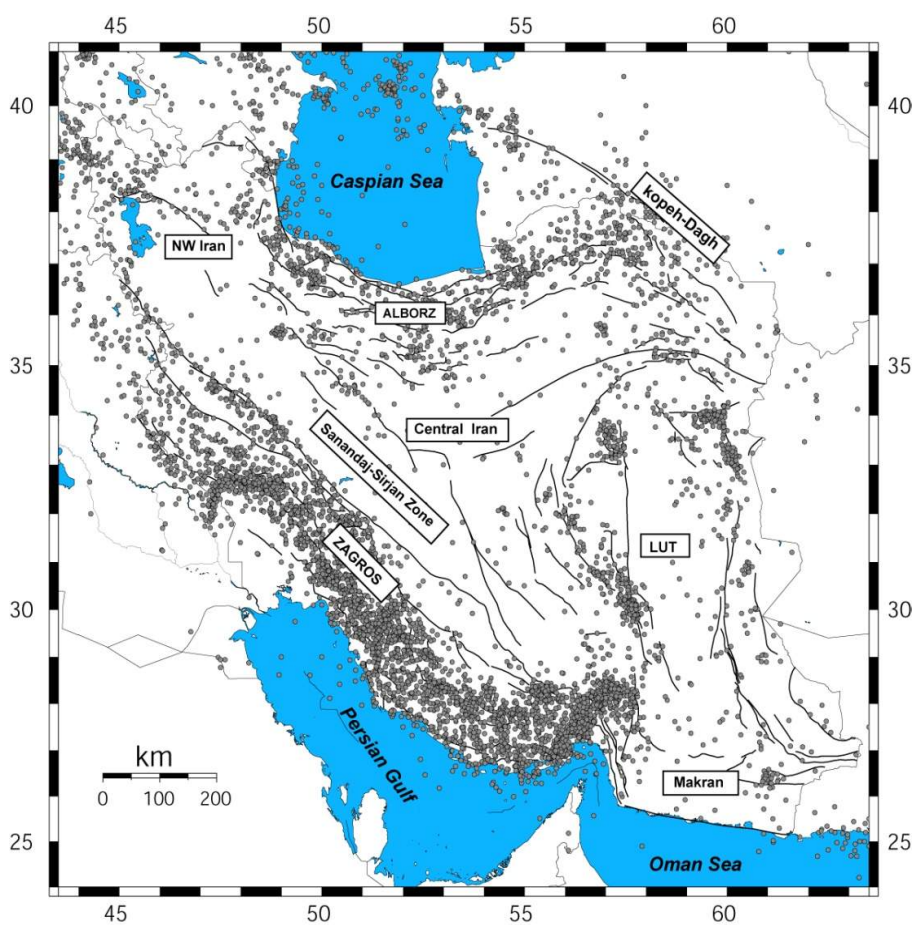
از اهداف مهم در ایجاد شبکه ژئودینامیک علاوه بر تعیین چارچوب مرجع کشوری و ارائه خدمات به کاربران (داده های خام در فرمت راینکس و ارسال تصحیحات) از سوی سازمان نقشه برداری کشور به عنوان مرجع حاکم و قانونی نقشه برداری کشور اندازه‌گیری و پایش تغییرات پوسته زمین در طول زمان می‌باشد. در این راستا با اندازه‌گیری‌های دائم GNSS در ایستگاه‌های شبکه ژئودینامیک، پردازش و آنالیز نتایج می‌توانیم به شناخت کاملتری از وضعیت و حرکات پوسته زمین در کشور دست یابیم و بتوانیم حرکات آنها را مدل‌سازی کنیم. اندازه‌گیری‌های دقیق ژئودینامیک در تعیین حرکات صفحات تکتونیک قاره‌ای، بررسی حرکات گسل‌های فعال و پیش‌بینی روند جابجایی آنها، تعیین جابجایی و حرکت پوسته زمین برای کاهش خسارات احتمالی ناشی از زلزله و همچنین جهت مکانیابی بهینه سازه‌ها در پروژه‌های عظیم مهندسی عمران نظیر سدها، نیروگاه‌ها، پالایشگاه‌ها و تشخیص محل و میزان افت ذخایر حیاتی آب، نفت و گاز و منابع زیرزمینی کاربرد دارد. یکی از اصلی‌ترین بررسی‌های ژئودینامیکی دستیابی به مدل جنبشی بلوک‌ها و پهنه‌های ساختاری زمین‌شناسی و میزان واکنش و همکنش پهنه‌ها، گسل‌های فعال نسبت به یکدیگر است.

۳- لرزه خیزی فلات ایران و ریبولوژی پوسته - لیتوسفر

چشمه های لرزه زا (seismic sources) عارضه هایی هستند که زمین لرزه از آن ها منشا می گیرد و موج های صادر شده از آن ها در تمام جهات در درون زمین پخش می شود. گسله ها مهم ترین چشمه های لرزه زا هستند، اما زمین لرزه ها ممکن است در موارد نادر از فعالیتهای آتشفشانی، ریزش سقف غارها و انفجارهای هسته ای نیز ایجاد شود. حرکتیایی که بصورت دائم، کند و نامحسوس در بخش های بیرونی زمین روی می دهند، سبب ایجاد تنش (Stress) در پوسته زمین می گردند. این تنش ها به تدریج انباشته می شوند و هنگامی که مقدار آن ها از حد مقاومت سنگ ها بیشتر می شود، گسیختگی روی می دهد به این ترتیب بخش بزرگی از تنش هایی که در طی چند ده چندصد یا چندین هزار سال انباشته

شده اند در زمانی بسیار کوتاه به ناگهان رها می شود. این فرایند بازجهش کشسانی (elastic rebound) خوانده می شود. آزادشدن تنش مزبور با انتشار موجهای لرزه ای (زمین لرزه) همراه است. بیشتر زمین لرزه های دنیا در زرفای نسبتا کمی از خارجی ترین بخش زمین سرچشمه می گیرند.

کشور ایران در بخشی از جهان با خطر لرزه ای بالا واقع شده است. پوسته زمین در این منطقه به علت قرارگرفتن بین صفحه اوراسیا در شمال و صفحه عربستان در جنوب، دچار دگرگونی و تغییر شکل بوده که نرخ متوسط کوتاه شدگی آن در حدود ۲۲ میلی متر در سال برآورد می گردد شکل ۱. حرکات پوسته زمین در این منطقه، موجب رخ دادن زمین لرزه های ویرانگر بسیاری در گذشته شده و با توجه به تداوم این حرکات انتظار وقوع چنین حوادثی در آینده نیز بسیار محتمل است. زلزله خیزبودن این سرزمین پهناور و خسارات جانی و مالی ناشی از آن، متخصصین و مسئولین امر را بر آن داشت تا با ایجاد شبکه های ژئودینامیکی مطالعات جامعی را جهت درک و شناخت بهتر از حرکات پوسته زمین و تغییر شکل های تکتونیکی در ایران انجام دهند و نتایج آن را به اطلاع مسئولین کشور برسانند.



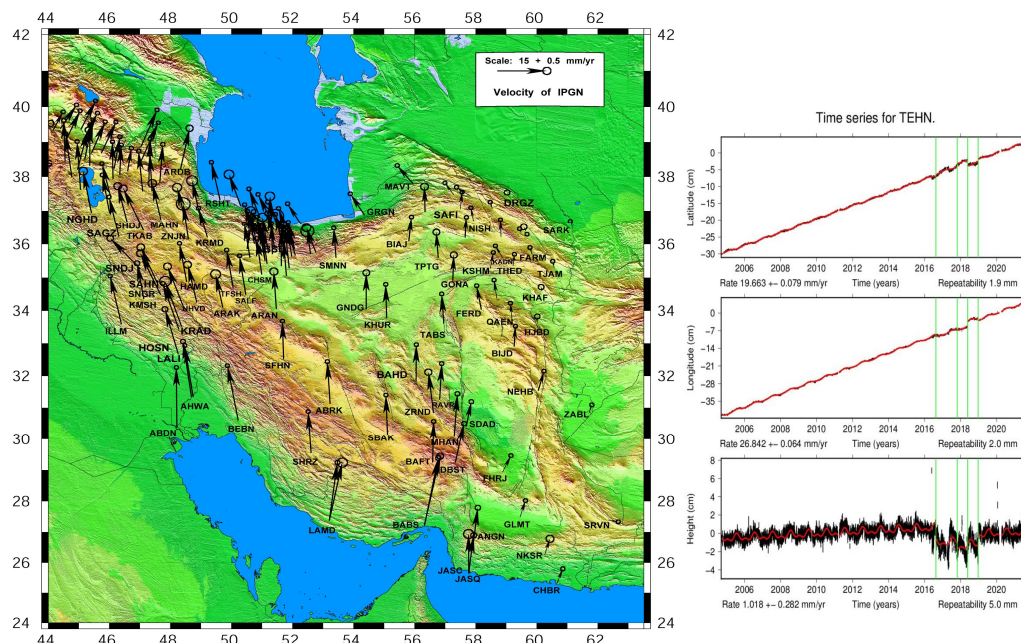
شکل ۱- نقشه لرزه خیزی فلات ایران

بیشتر زمین لرزه های فلات ایران در قسمت پوسته بالایی رخ میدهد که دارای عمقی بین ۸ تا ۲۵ کیلومتر با فراوانی ۱۵ کیلومتر هستند و این همان قسمت شکننده پوسته است که دارای رفتار الاستیک با گرمای کم و فشار زیاد است لذا رفتار پوسته با رفتار منتل متفاوت است. هر قسمت رفتار خاص خود را دارد که تابع فشار درجه حرارت گرم و سرد، دانسیته و رئولوژی خشک و تر است. البته در مناطقی از جهان مثل تبت عکس این قضیه را داریم رفتار پوسته و منتل کوپل است و

مثل هم عمل میکنند، رفتاری کاملا متفاوت با ساختار لیتوسفر ایران. نتایج حاصل از شبکه ایستگاه های دائمی GNSS سازمان نقشه برداری کشور که شامل سری های زمانی، میدان سرعت و نرخ استرین است به عنوان مقادیر و شرایط مرزی اولیه در مدلسازی تکتونیکی و رفتارگسل ها و چرخه زلزله نقش اساسی دارد که نمونه های آن در زلزله اهر و رزقان- سراوان- سرپل ذهاب- مشا و بم به خوبی دیده شده و همچنین مقایسه آن با استرین لرزه ای کمک شایانی در زمینه نسبت لرزه ای - غیر لرزه ای خواهد بود. نتایج حاصله از مدلسازی نشان میدهد که ژئوترم سرد و رئولوژی خشک تطابق خوبی با لیتوسفر فلات ایران دارد.

۴- نتایج حاصل از شبکه ایستگاه های دائمی GNSS و ژئودینامیک سازمان نقشه برداری کشور

شبکه ایستگاه های دائمی ژئودینامیک و GNSS در سال ۱۳۸۳ توسط سازمان نقشه برداری کشور به عنوان مرجع قانونی و حاکم بر فعالیت های نقشه برداری کشور ایجاد گردید و فاز اول آن، شامل ۱۰۶ ایستگاه در اوایل دی ماه ۱۳۸۵ به بهره برداری رسید و گزارش مربوط به پردازش اولیه ارائه و مختصات نقاط شبکه در چارچوب مرجع مختصاتی ITRF2000 و سیستم مختصات WGS84 با اعمال پارامترهای ترانسفورماسیون محاسبه گردید. سپس با افزایش تعداد ایستگاه های شبکه و جمع آوری طولانی مدت داده ها، پردازش مجدد در سال ۱۳۸۹ انجام و مختصات ۱۱۲ ایستگاه شبکه در چارچوب مرجع مختصاتی ITRF2005 و سیستم مختصات WGS84 با اعمال پارامترهای ترانسفورماسیون ارائه گردید. پس از آن در سال ۱۳۹۲ با خرید گیرنده های جدید، فاز دوم شبکه ایستگاه های دائم تا ۱۲۷ ایستگاه تکمیل گردید. سپس به منظور گسترش شبکه ژئودینامیک و همچنین با هدف راه اندازی شبکه DGPS، تعدادی ایستگاه با کاربرد دو منظوره به شبکه اضافه شد که با احتساب آنها به ۱۳۴ ایستگاه رسید. در شبکه ایستگاه های دائمی ژئودینامیک و GNSS ایران، گیرنده ها به صورت ۲۴ ساعته و با نرخ ۳۰ ثانیه به ردیابی و ثبت سیگنال های دریافتی از ماهواره های GNSS می پردازند. داده های جمع آوری شده در هر ایستگاه که شامل فایل های مشاهداتی و ناوبری می باشد در مرکز اصلی (تهران) پردازش می شوند و در چارچوب مرجع کشوری و ITRF2014 و ITRF2020، نمایش داده می شوند. نتایج ثانویه به صورت سری های زمانی-میدان سرعت و نرخ استرین ارائه میگردد.



شکل ۲- سری زمانی و میدان سرعت نسبت به اوراسیا



محاسبات جدید میدان سرعت ایستگاه های دائمی سازمان نقشه برداری کشور داده های جدیدی را جهت کمی کردن حرکات امروزی و تغییر شکل فعال در ایران فراهم نموده است. سرعت های حاصل از اندازه گیری با GPS در طول حاشیه شمال شرقی صفحه عربستان بیانگر آن است که صفحه عربستان نسبت به اوراسیا با سرعت کمتری در مقایسه با آنچه توسط DeMets et.al, 1990 پیش بینی کرده بود بسوی شمال در حرکت است. به عبارت دیگر در طول جغرافیایی بحرین عربستان با سرعتی معادل $22 \pm 2^\circ$ میلی متر در سال در راستای $E 5^\circ \pm 8^\circ N$ در حرکت است. با استفاده از نتایج این اندازه گیری ها بردار چرخش صفحه عربستان نسبت به اوراسیا با پارامترهای زیر قابل تعریف است. $E 4^\circ \pm 0.27/9^\circ$ ، $Myr^{-1} 19/5^\circ \pm 0.41^\circ$.

کوتاه شدگی در ایران به دو شکل متفاوت در بخش های شرقی و غربی ایران روی می دهد. در شرق طول 58° درجه بیشتر کوتاه شدگی در پهنه فروانش مکران اتفاق می افتد ($19/5^\circ \pm 1^\circ$ میلی متر در سال) و مابقی آن (یعنی $1^\circ \pm 6/5^\circ$ میلی متر در سال) در منطقه کپه داغ مستهلک می گردد. در غرب طول جغرافیایی 58° درجه تغییر شکل ناشی از همگرایی بر روی چندین کمر بند کوهزایی توزیع یافته در طول جغرافیایی تهران نرخ کوتاه شدگی در کوه های زاگرس و البرز به ترتیب $1^\circ \pm 6/5^\circ$ و $1^\circ \pm 5^\circ$ میلی متر در سال می باشد. نرخ جابجایی راستگرد بر روی گسل جوان زاگرس $1^\circ \pm 3^\circ$ میلی متر در سال برآورد گردیده است. در مقابل نرخ کوتاه شدگی در شمال غرب ایران بسیار زیاد می باشد ($1^\circ \pm 8^\circ$ میلی متر در سال). بلوک ایران مرکزی بطور نسبی بصورت یک جسم صلب عمل کرده و دارای یک حرکت منسجم و یکپارچه است. نقاط واقع در شرق طول جغرافیایی 61° درجه جابجایی بسیار کمی را نسبت به اوراسیا نمایش می دهند. تفاوت سرعت ونحوه دگرشکلی مشاهده شده در شرق و غرب ایران در قالب حرکات امتداد لغز در طول حاشیه بلوک لوت خودنمایی می کند. پهنه گذر زاگرس به مکران در جنوب شرق ایران با سرعتی معادل $1^\circ \pm 11^\circ$ میلی متر در سال بصورت راستگرد در حال حرکت است.

۵- نرخ تغییر شکل (استرین)

روش های مختلفی برای توصیف انواع تغییر شکل وجود دارد. تغییر شکل یک جسم را می توان در طول زمان بیان کرد، که در این صورت پارامتری به نام نرخ استرین تعریف می شود. تعیین و بررسی تنسور نرخ استرین پوسته زمین، امکان توصیف فرآیندهای ژئودینامیکی مانند تجمع استرین گسل ها را که یک پارامتر مهم در ارزیابی خطر لرزه های محسوب می شود، فراهم می آورد. یکی از کاربردهای مهم شبکه ایستگاه های دائمی ژئودینامیک و GNSS ایران، محاسبه نرخ استرین ژئوتیک و برشی با استفاده از بردارهای سرعت می باشد.

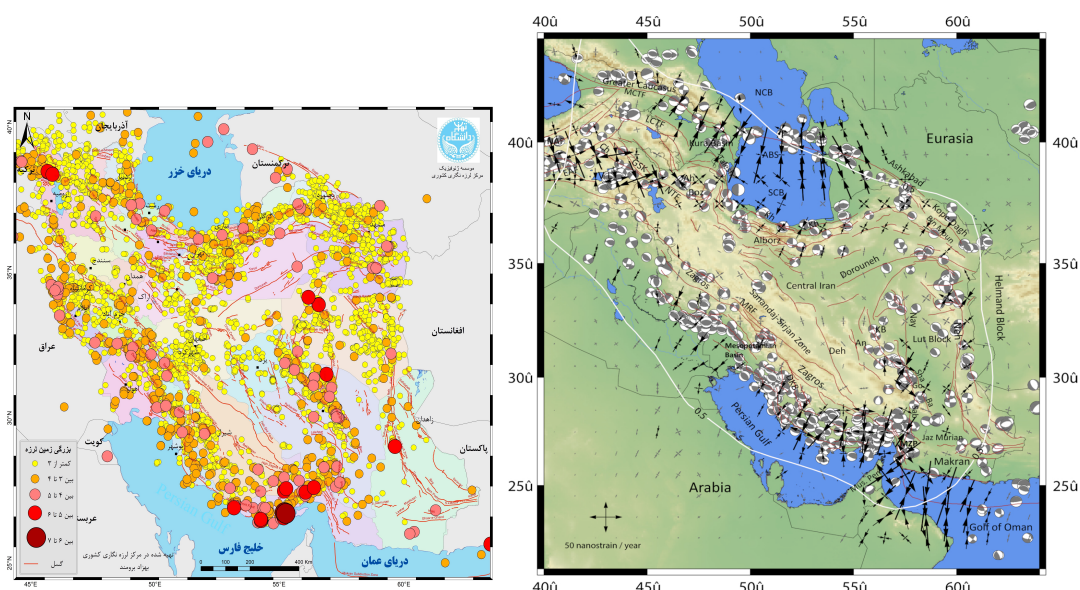
تغییر شکل پوسته در ایران دو وجه عمده دارد یکی ضخیم شدگی پوسته و دیگری حرکات جانبی پوسته به اطراف که در نتیجه این دو سازوکار دو دسته عمده از گسل ها به وجود آمده که قسمت ناپیوسته این تغییر شکل را سبب شده اند. دسته اول گسل های معکوس هستند که ضخیم شدگی در زاگرس، البرز و کپه داغ را موجب شده است. دسته دوم گسل های امتداد لغز هستند که باعث چرخش های ساختاری در شرق ایران و هم چنین حرکات جانبی کوچکتر در البرز و زاگرس شده اند. سرعت های نسبی، میدان تنش و لرزه خیزی موجود در پوسته ایران کاملاً وابسته به فعالیت این گسل ها و خصوصیات دینامیکی آنها است. رئولوژی و ضریب اصطکاک درونی این گسل ها مقدار تنش برشی و آهنگ حرکت نسبی بر روی آنها را تعیین می کند. اطلاعاتی که درباره تنش برشی در روی گسل ها بدست می آید یکی از داده های پایه هر مطالعه آنالیز خطر لرزه ای را تشکیل می دهد. حرکت در طول یک گسل فعال می تواند بصورت تدریجی و پیوسته (خزش زمین ساختی) و یا تناوبی از دوره های آرامش و حرکت ناگهانی با رها شدن انرژی بصورت زمین لرزه باشد. نرخ لغزش گسل های فعال یکی از پارامترهای اصلی در بازخوانی رفتار گسل در گذشته و پیش بینی جنبش آن در آینده است.

عمومی ترین مکانیزمی که برای تشریح تغییر شکل های شکننده در قسمت بالای لیتوسفر (پوسته) استفاده می گردد، شکست برشی یا shear failure می باشد که معمولاً با قانون کولمب بیان می گردد. این معیار شکست با حذف چسبندگی یا cohesion صفر و بادر نظر گرفتن ضریب اصطکاک و اصطکاک لغزشی (Ranalli, 1995) مشابه قانون آمونتون می باشد.

شکست مواد زمانی اتفاق می افتد که تغییر شکل دائمی رخ می دهد و در این حالت مقدار استرس deviatoric به یک حد بحرانی می رسد که به آن استرس تسلیم می گوئیم. این شکست می تواند بصورت تغییر شکل ناپیوسته مثل یک ترک یا تغییر شکل پیوسته و غیرقابل برگشت یعنی رفتار پلاستیک باشد که در حالت اول تغییر شکل مواد بصورت شکننده یا brittle تعریف می شود و در حالت دوم بصورت ductile یا خمیری شکل تعریف می گردد. گسل، چین خوردگی به عنوان مثالهایی از رفتارهای شکننده و خمیری هستند. یکی از اطلاعاتی که در ارزیابی آسیب پذیری لرزه ای لازم است شناخت دقیق نرخ واقعی لغزش هر گسل است. همانطور که گفته شد رفتار کشسانی پوسته زمین برای یک گسل قفل شده باعث می شود که مقدار جابجایی و تغییر شکل تکتونیکی مناطق گسلی بر حسب ویژگی های هندسی و فیزیکی گسل دارای تغییراتی باشد.

۶- لرزه خیزی فلات ایران

لرزه های که در ایران رخ میدهد به دو دسته تقسیم می کنم لرزه های بین دو صفحه زمین ساخت و لرزه های درون صفحه ای. این لرزه ها از لحاظ بزرگا و افت تنش و میزان انرژی رها شده متفاوت هستند.



شکل ۳- نرخ استرین ژئودتیک (خرمیی ۲۰۱۹) و لرزه خیزی فلات ایران (مرکز لرزه نگاری کشوری)

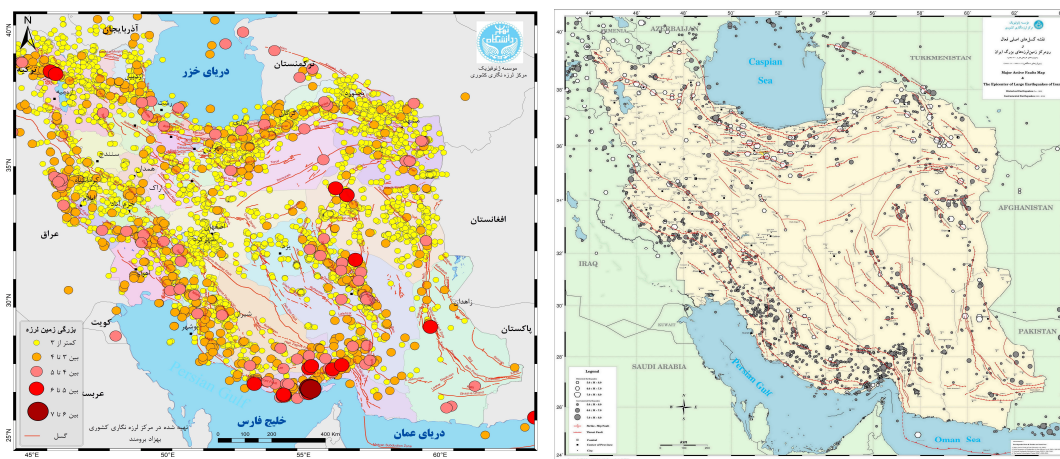
در نقشه تهیه شده توسط مرکز لرزه نگاری کشوری (شکل ۳) بیشترین تراکم را در زاگرس می بینیم و دلیل آن این است که راندگی اصلی زاگرس یا خط درزه با طول ۱۳۰۰ کیومتر که از کوه های تاوروس شروع و تا بندر عباس ادامه دارد مرز بین دو صفحه عربی و اوراسیا است و در زون ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتری لرزه ها رخ میدهد. مرز دیگر تغییر شکل از کوه زایی به فرورانش که به زون عبوری نیز معرف است و در منطقه میناب روی گسل زندان میناب پالمی قرار دارد. با توجه به شکل ۳ پراکندگی زمین لرزه ها شامل مناطق زاگرس - استان کرمان - جنوب استان خراسان رضوی، وحاشیه بلوک لوت - البرز و شمال غرب میشود. نکته دیگری که باید مد نظر داشت در منطقه فرورانشی مکران است که تراکم لرزه ای کمتری دارد. منطقه ای که محل برخورد ۳ گانه صفحه عربی - اوراسیا و هند است و دارای نرخ فرورانش ۱۹ میلیمتر در سال و لرزه های آرام یا خاموش است که در ایستگاه های GNSS سازمان دیده میشود. لرزه های آرام، لرزه هایی غیرممتد یا لرزش هایی نظیر زمین لرزه هستند منتهی با این تفاوت که در انواع معمول زمین لرزه انرژی تنها ظرف چند ثانیه یا چند دقیقه آزاد میشود اما در لرزه های آرام انرژی در خلال یک دوره نسبتاً طولانی از چند

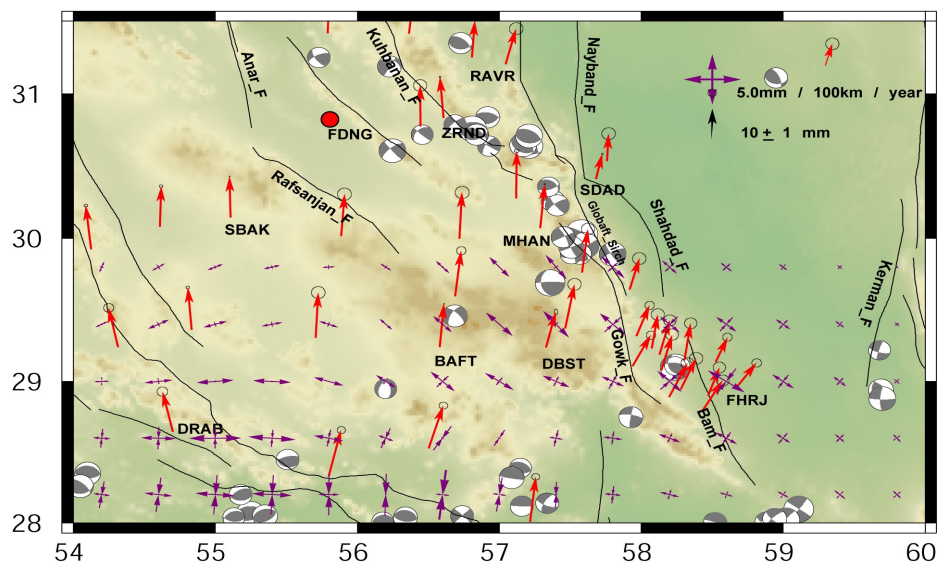
ساعت گرفته تا چند ماه آزاد می شود. همچنین وجود آب موجود باعث کاهش اصطکاک بین دو صفحه میشود. در اثر فرورانش صفحه اقیانوسی به زیر صفحه قاره ای با شیب کم و وارد شدن آن به منتل زمین لرزه ها در عمق زیاد رخ میدهد برعکس مناطق دیگر که زمین لرزه ها در عمق ۸ تا ۲۰ کیلومتر رخ می دهد. منطقه البرز مرکزی لرزه خیز بوده و در طی دو هزارسال گذشته بیش از ۲۰ زمین لرزه با بزرگی ۶/۵ (درمقیاس امواج) سطحی در این منطقه بوقوع پیوسته است. از دیدگاه زمین ساخت البرز مرکزی توان ایجاد زمین لرزه های بزرگ را دارد و گسل های توانمندی در البرز مرکزی قرار دارند که بارزترین چشمه خطر برای شهر تهران گسل مشاء-فشم و گسل شمال تهران می باشد. در محدوده تهران حدود ۱۴ گسل اصلی وجود دارد که گسل شمال تهران حالت قفل شده دارد و تغییرات خاصی در آن دیده نشده است. اما گسل "مشا" که از مشا تا هشتگرد امتداد دارد به طول حدود ۲۰۰ کیلومتر گسلی هست که تغییر شکل دارد و نرخ لغزش در آن محاسبه شده است. تجزیه و تحلیل ترکیبی از میدان نرخ کرنش ژئودزیکی و میدان نرخ کرنش لرزه ای به ما امکان می دهد که سبک تغییر شکل های لرزه ای و غیر لرزه ای تشخیص دهیم. در زاگرس (کمتر از ۵ درصد تغییر شکل لرزه ای) مشاهده می شود و بقیه به صورت غیر لرزه ای رخ میدهد. مناطق البرز - کپه داغ (بیش از ۳۰ تا ۱۰۰ درصد تغییر شکل لرزه ای) دارند.

۷- تحلیل نتایج

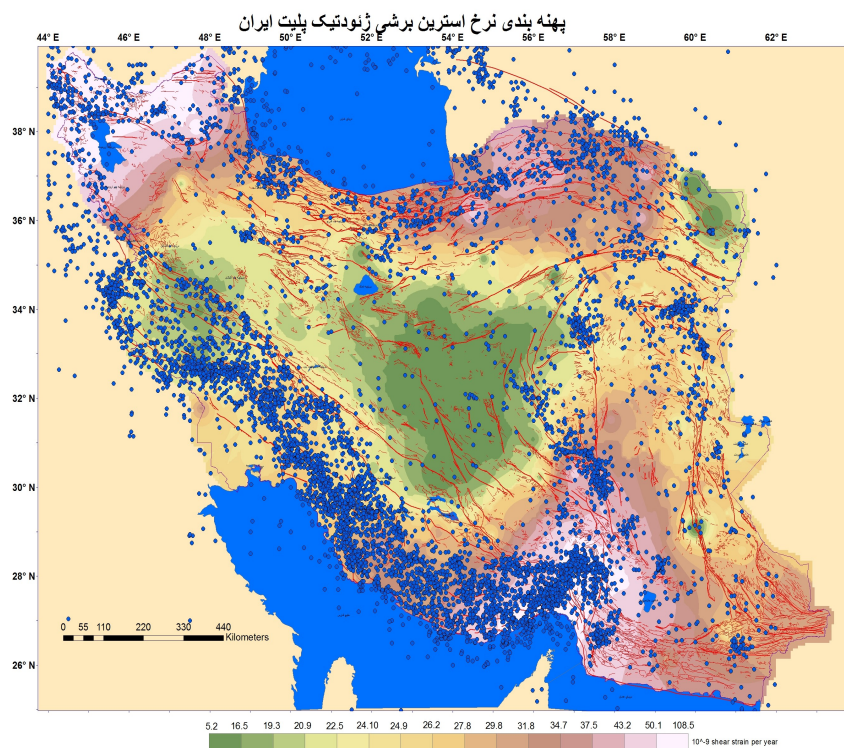
تجزیه و تحلیل خطر زلزله به شدت وبه نحوه تفسیر توزیع مکانی زمین لرزه ها بستگی دارد. شکل ۴: آیا گپ لرزه ای مناطق با خطر بالا در انتظار زلزله های جدید هستند یا این گپ ها غیر لرزه ای هستند و بنابراین مناطق کم خطر را نشان می دهند؟ این دیدگاه دوگانه از در نظر گرفتن فرآیندهای گاه کوتاه مدت و برخی اوقات درازمدت ناشی می شود. تفسیر تغییر شکل پوسته عمدتاً به مقیاس زمانی فرآیندهای مدل سازی شده بستگی دارد، پوسته به طور الاستیک در دوره های کوتاه تغییر شکل می دهد، زمانی که تنش ها از قدرت تسلیم (تغییر شکل لرزه ای) فراتر می رود و به صورت ویسکوزیته در مقیاس های زمانی طولانی زمین شناسی تغییر شکل می دهند. تغییر شکل های حاصل از شبکه های GNSS و نرخ های تغییر شکل ناشی از زمین شناسی متفاوت است. GNSS جابجایی ها را در چرخه زلزله اندازه گیری می کند، اما به دلیل رفتار ویسکوالاستیک پوسته، تغییر شکل به طور قابل توجهی در اوایل و اواخر چرخه متفاوت است. در اوایل چرخه، جریان چسبناک در پوسته پایینی، کششی را بر روی پوسته بالایی اعمال می کند و گرادبان با سرعت بالا در نزدیکی گسل ایجاد می کند. در اواخر چرخه برعکس اتفاق می افتد و گرادبان های سرعت در نزدیکی گسل ها کاهش می یابد. گرادبان های سرعت، به ویژه مؤلفه های نرخ کرنش، و تغییرات بین صفحه ای، از نتایج اصلی شبکه های دائمی GPS هستند که نقش مهمی در ارزیابی خطر لرزه ای در مناطق تکتونیکی فعال دارند.

شکل ۴- زمین لرزه های تاریخی (سمت راست و زمین لرزه های دستگاهی سمت چپ)





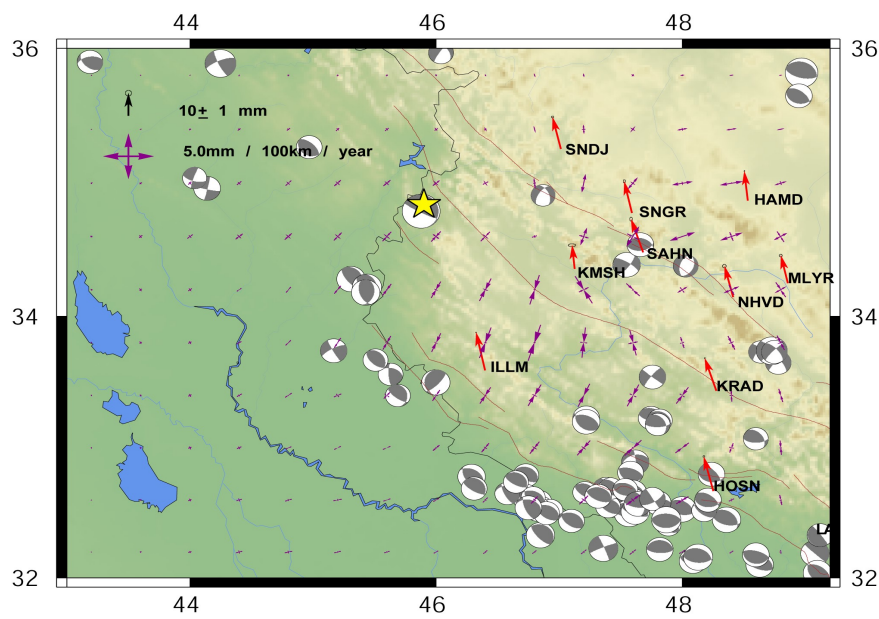
شکل ۵- میدان سرعت و نرخ استرین در محدوده استان کرمان (خرمی و همکاران-۲۰۱۹)



شکل ۶- پهنه بندی نرخ استرین برشی در فلات ایران و زمین لرزه های ۱۰۰ سال اخیر (علیجان زاده- نانکلی ۱۴۰۱)

همانطوریکه در شکل ۴ دیده می شود و با مقایسه نرخ استرین برشی شکلهای ۵ و ۶ نواحی با لرزه خیزی کم (ایران مرکزی شامل یزد-اصفهان-مرکزی-همدان-جنوب استان کردستان-شرق استان خراسان رضوی) ممکن است مناطقی باشند که گسل ها در حال خزش هستند و هیچ کرنش الاستیکی انباشته نشده است یا مناطقی که گسل ها قفل شده اند و مقدار بیشتری از کرنش الاستیک را بارگذاری می کنند. از طرف دیگر، برخی از مناطق با نرخ کرنش بالا به طور متوسط تحت فعالیت لرزه ای بالا هستند (استان کرمان-هرمزگان. شکل ۵). اما برای ارزیابی خطر چنین مناطقی باید دانست که آیا چرخه لرزه ای در مرحله اولیه است یا بعدی. نرخ کرنش بالا در مناطق خاص ممکن است ناشی از زلزله باشد، نه قبل از وقوع آن. بنابراین، همبستگی بین لرزه خیزی و تغییر شکل محلی و نرخ کرنش از سرعت های بین لرزه ای GNSS ممکن است شاخصی از وقوع رویداد لرزه ای آینده باشد.

تجزیه و تحلیل کرنش و تغییرات آن در طول زمان در یک منطقه فعال زمین ساختی می تواند ابزار قدرتمندی در پیش بینی مکان و بزرگی مورد انتظار زلزله های آینده باشد. مناطق با نرخ بالای کرنش (استانهای آذربایجان غربی و شرقی-اردبیل-گلستان-هرمزگان-کرمان-خراسان شمالی و جنوب سیستان و بلوچستان) را می توان به عنوان مناطقی تفسیر کرد که در آن پوسته بالایی و پایینی در حال خزش هستند و به طور متناوب بارگذاری زمین ساختی در آن اثر دارد، به طوری که زلزله های با بزرگی کوچک و متوسط مورد انتظار است. بالعکس نرخ کرنش کمتر (ایران مرکزی-کرمانشاه-لرستان-ایلام-شمال غرب استان کرمان-غرب تهران-سرخس و شمال سیستان و بلوچستان) نشان دهنده وجود گسل های قفل شده و رخ داد های شدید و اصلی در آینده است. شکل ۷



شکل ۷-میدان سرعت و نرخ استرین در زلزله ۱۳۹۶ سرپل ذهاب (خرمی و همکاران ۲۰۱۹)

بر مبنای تقسیم بندی های صورت گرفته زلزله ها از نظر بزرگی به هفت دسته تقسیم می شوند. زلزله های با بزرگی کمتر از ۲ ریشتر در گروه خرد لرزه ها (micro)، بین ۲ تا ۴ ریشتر، ریز (minor)، بین ۴ تا ۵ ریشتر، کوچک (light)، بین ۵ تا ۶ ریشتر، متوسط (moderate)، بین ۶ تا ۷ ریشتر، شدید (strong)، بین ۷ تا ۸ ریشتر، اصلی (major) و بیش از ۸ ریشتر، بزرگ (great) اطلاق می شود.



۸-پیشگویی و پیش بینی زلزله-هوش مصنوعی

به اعتقاد بربریان، "پیش بینی زلزله" یعنی اعلام شود که در کدام گسل تا چند سال آینده چه زلزله ای با چه بزرگایی رخ دهد و "پیشگویی" زلزله به معنای تعیین زمان و مکان دقیق زلزله ها در آینده است. برای پیشگویی زلزله نیاز است که بدانیم در یک رخداد لرزه ای کل انرژی گسل تخلیه شده یا بخشی از آن؛ از این رو شناسایی رفتار گسل ها مهم است.

پیش بینی زمان، مکان و بزرگی زلزله یک کار چالش برانگیز است زیرا زلزله الگوهای خاصی را نشان نمی دهد که منجر به پیش بینی نادرست یا غلط می شود. تکنیک های مبتنی بر هوش مصنوعی (AI) به دلیل توانایی خود در یافتن الگوهای پنهان در داده ها به خوبی شناخته شده اند. در مورد پیش بینی زلزله، این مدل ها نیز یک نتیجه امیدوارکننده و نوید بخش به دنبال دارند. در مجموع ۸۴ مقاله علمی پژوهشی که استفاده از تکنیک های مبتنی بر هوش مصنوعی در پیش بینی زلزله را گزارش کرده اند، این مطالعات شامل طیف وسیعی از تکنیک های هوش مصنوعی از جمله روش های مبتنی بر قاعده، یادگیری ماشینی کم عمق و الگوریتم های یادگیری عمیق است.

دقت بالا در پیش بینی زلزله ها همچنان یک چالش علمی کلیدی است و هوش مصنوعی به عنوان تکنیکی برای افزایش توانایی های ما در این زمینه حیاتی مورد بررسی قرار گرفته است، چرا که هوش مصنوعی می تواند مجموعه داده های بزرگی از فعالیت های لرزه ای را تجزیه و تحلیل کند و الگوها یا ناهنجاری هایی را که ممکن است از دید تحلیلگران انسانی پنهان بماند، شناسایی کند. بنابراین الگوریتم های یادگیری ماشینی می توانند به پژوهشگران در درک بهتر الگوهای زلزله کمک کنند. امروزه برخی از مدل های هوش مصنوعی با بررسی ویژگی های زمین شناسی و داده های لرزه ای قبلی برای پیش بینی زمین لرزه هایی با درجه احتمال بالا استفاده می شوند. این مدل ها احتمال وقوع زمین لرزه در مناطق خاص را در یک دوره زمانی معین محاسبه می کنند. با این حال، این پیش بینی ها معمولاً دقیق نیستند.

پیش بینی زمین لرزه یک کار چالش برانگیز است، زیرا زمین لرزه ها ناشی از حرکت صفحات تکتونیکی (زمین ساخت صفحه ای) در اعماق پوسته زمین هستند؛ فرآیندی که متغیرها و عدم قطعیت ها را در خود دارد. اگرچه هوش مصنوعی می تواند به تجزیه و تحلیل داده های مرتبط با زلزله و تقویت سیستم های هشدار اولیه کمک کند، اما پیش بینی دقیق زمان، موقعیت و بزرگی یک زلزله هنوز یک فرآیند دشوار است.

طی آزمایشی هفت ماهه در چین، یک الگوریتم هوش مصنوعی برای تشخیص ناهنجاری های آماری در داده های لرزه ای بلادرنگ و سوابق تاریخی زلزله ارائه شد. این پیشرفت قرار است واکنش سریع کمک ها را پس از زلزله بهبود بخشد که قطعاً نقطه عطف بزرگی است. هوش مصنوعی ۷۰ درصد از زمین لرزه ها را از قبل به دقت پیش بینی کرد که شامل ۱۴ پیش بینی در فاصله ۲۰۰ مایلی از مکان های تخمینی و مطابق با بزرگی پیش بینی شده برای آنها بود اما هشت اخطار نادرست صادر کرد. نتایج نشان دهنده یک گام رو به جلو در پیش بینی زلزله مبتنی بر هوش مصنوعی است که یک برنامه طولانی مدت محسوب می شود.

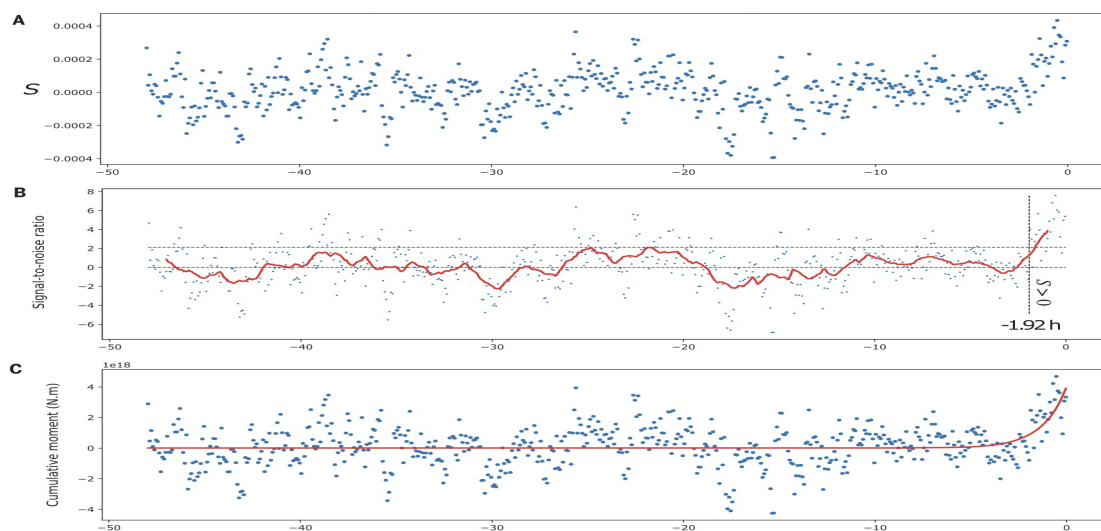
پژوهشگران اکنون می خواهند مدل خود را در مناطقی با فعالیت لرزه ای قوی مانند کالیفرنیا، ایتالیا، ژاپن، یونان، ترکیه و تگزاس آزمایش کنند. آموزش بر روی این داده ها به این مدل اجازه می دهد تا نرخ دقت پیش بینی تاریخ رخداد را بهبود بخشد و تخمین مکان خود را به فاصله چند ده کیلومتری از مرکز واقعی زلزله محدود کند.

در تحقیق دیگر توسط پژوهشگران استنفورد یک مدل برای شناسایی زلزله های بسیار کوچک با سیگنال های ضعیف طراحی شد که معمولاً در روش های کنونی نادیده گرفته می شوند. پژوهشگران سیستم جدید خود را «ترانسفورماتور زلزله» نامگذاری کرده اند.

برای آزمایش ترانسفورماتور زلزله، تیم الگوریتم خود را با اطلاعات شامل یک میلیون لرزه نگاشت در دو دهه اخیر در سراسر جهان، آموزش دادند. برای انجام آزمایش، آن ها اطلاعاتی که به مدت ۵ هفته در ژاپن ثبت شده بود را انتخاب کردند که مربوط به یک زلزله ۶٫۶ ریشتری می شود. در طی این آزمایش، هوش مصنوعی محققان استنفورد توانست ۲۱۰۹۲ رویداد را تشخیص و مکان یابی کند که دو و نیم برابر تعدادی است که به صورت دستی جمع آوری شده. علاوه بر این موضوع، ترانسفورماتور زلزله تنها از اطلاعات ۱۸ ایستگاه از میان ۵۷ ایستگاه مورد استفاده دانشمندان ژاپنی استفاده کرده است. به اعتقاد این تیم، می توان از این سیستم در دنیای واقعی استفاده کرد. این تیم چندین سیستم یادگیری ماشینی برای تشخیص زلزله توسعه داده که در میان آن ها می توان به «CRED» در سال ۲۰۱۹ اشاره کرد که از الگوریتم های محرک صدا در سیستم های دستیار مجازی الهام گرفته است.

۹-پیش نشانگری زلزله با استفاده از ایستگاه های دائمی GNSS

توانایی پیش بینی زلزله مدت ها است که یک چالش بوده است. در حال حاضر پیش بینی کوتاه مدت زلزله با هدف صدور اخطارها طی چند دقیقه قبل از وقوع آن انجام می شود، اما این هشدارها به سیگنال های ژئوفیزیکی و قابل مشاهده وابسته هستند. مطالعات قبلی به وجود مرحله مقدماتی لغزش لرزه ای آهسته در گسل ها قبل از وقوع زلزله های بزرگ اشاره کرده اند. لغزش های لرزه ای، حرکات آهسته و تقریباً نامحسوس در طول صفحه گسل هستند که باعث لرزش قابل تشخیص زمین نمی شوند. با این حال، ارتباط آنها با گسیختگی های لرزه ای که موجب حرکت سریع و ناگهانی گسل می شوند، نامشخص است. علاوه بر این، لغزش های لرزه ای اغلب بدون وقوع زلزله رخ می دهند. کوئنتین بلتری و ژان ماتیو نوکت از دانشگاه کوت دازور فرانسه (Côte d'Azur) در تلاش برای روشن کردن این معما، جستجوی سیستماتیک جهانی را برای لغزش اولیه گسل ها قبل از وقوع زلزله های بزرگ انجام دادند که نتایج آن در نشریه **Science 2023** به چاپ رسید. آنها با استفاده از مجموعه سری های زمانی **GPS** از بیش از ۳۰۰۰ ایستگاه در سراسر جهان، و در فاصله ۵۰۰ کیلومتری از محل رخداد جابجایی گسل ها را که منجر به ۹۰ زمین لرزه هفت ریشتری و بالاتر شده بود، اندازه گیری کردند. تجزیه و تحلیل آنها یک سیگنال ظریف و در عین حال حیاتی را نشان داد که حاکی از دوره ای از افزایش سرعت لغزش گسل در نزدیکی مرکز زمین لرزه بود که تقریباً دو ساعت قبل از گسیختگی رخ می دهد. شکل ۸. به گفته پژوهشگران، این یافته ها نشان می دهد که بسیاری از زمین لرزه های بزرگ ممکن است با یک مرحله لغزش مقدماتی آغاز شوند یا اینکه این مشاهدات نشان دهنده انتهای یک فرآیند بسیار طولانی تر لغزشی هستند.

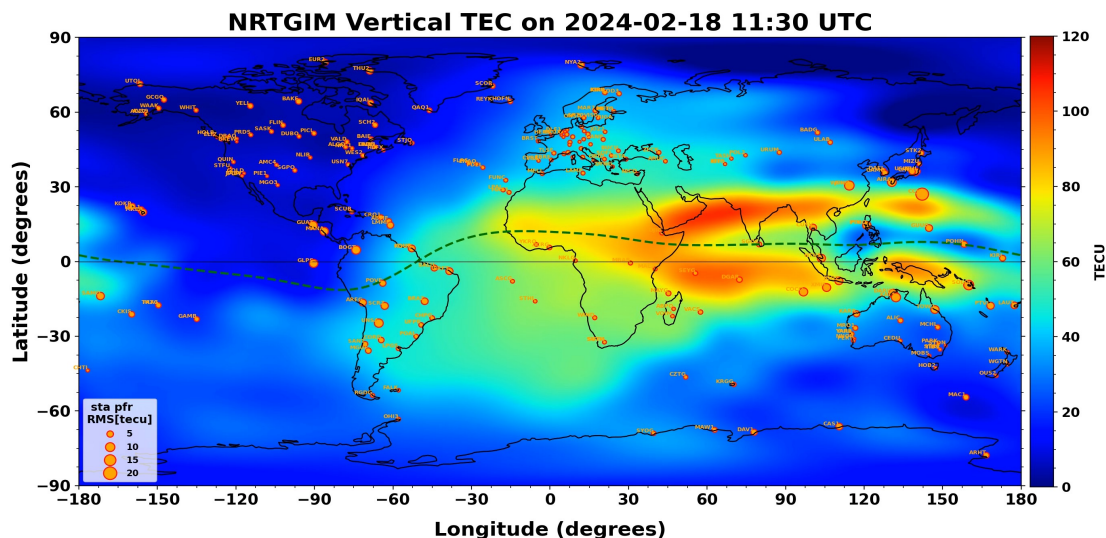


شکل ۸- سری زمانی ترکیب شده به صورت جهانی که در انتهای آن روند افزایش را نشان میدهد

۱۰-پیش نشانگری یونسفری

چندین پدیده طبیعی و انسانی روی زمین و فضا، مانند سونامی، فوران های آتشفشانی، زمین لرزه ها، و طوفان های ژئومغناطیسی و خورشیدی نشانه های به راحتی قابل تشخیص در یونسفر زمین به جای می گذارند. بنابراین، پایش یونسفر در زمان واقعی می تواند سیستم های هشدار اولیه ما را برای این رویدادها بسیار افزایش دهد. در مطالعات قبلی، پاسخ یونسفر به این منابع چند روز تا هفته پس از وقوع رویداد مورد مطالعه قرار گرفته است. برای اینکه یونسفر به عنوان رسانه ای برای هشدار خطر استفاده شود، باید در زمان واقعی با تجزیه و تحلیل هایی که به موقع تر ارائه می شوند، مورد نظارت و پایش قرار گیرد. سیستم جهانی ناوبری ماهواره ای GNSS اکنون به طور گسترده برای مطالعه آشفتگی های یونسفر ناشی از زمین لرزه و در فاصله نزدیک و دور تا شعاع ۶۰۰ کیلومتر از کانون زلزله استفاده می شود که حاوی اطلاعاتی در مورد ویژگی های منبع لرزه ای/تکتونیکی، جهت انتشار گسیختگی و رانش زمین می باشد. با این حال، مطالعات متعدد هشدار داده اند که قبل از استخراج نتایج بر اساس TEC لرزه ای، سهم مکانیسم های غیر زمین ساختی باید مورد بررسی قرار گیرد. با تجزیه و تحلیل علل ناهنجاری های یونسفر از جمله میدان های ژئومغناطیسی و فعالیت های خورشیدی و حذف آن ها از پردازش های مورد نظر، نتایج حاصل نشان می دهد که برخی از این ناهنجاری ها ناشی از وقوع زلزله است و به کارگیری الگوریتم های هوشمند توانسته است کارآیی مناسبی در جهت پیش نشانگری داشته باشد. شبکه اطلاعات و هشدار بلایای بلادرنج جوی فوقانی مبتنی بر GNSS یک سامانه مانیتور تقریباً واقعی پیشرفته است که برای ارائه تخمین هایی از محتوای کل الکترون یونسفر (TEC) از باند L طراحی شده است (شکل ۹). سیگنال های فرکانس رادیویی ارسال شده توسط ماهواره های سیستم جهانی ناوبری ماهواره ای (GNSS) که شامل مشاهدات فاز حامل و کد هستند. در این سیستم سری های زمانی TEC برای ۹۰ ایستگاه در اطراف حلقه آتش اقیانوس آرام با تأخیر تقریبی ۳ دقیقه تولید می شود. GUARDIAN بر روی قابلیت GPS دیفرانسیل جهانی JPL (GDGPS) و شبکه خدمات بین المللی (IGS) GNSS استوار است که داده های فاز GNSS را از شبکه ای ایستگاه های آبی در سراسر جهان جمع آوری می کند.

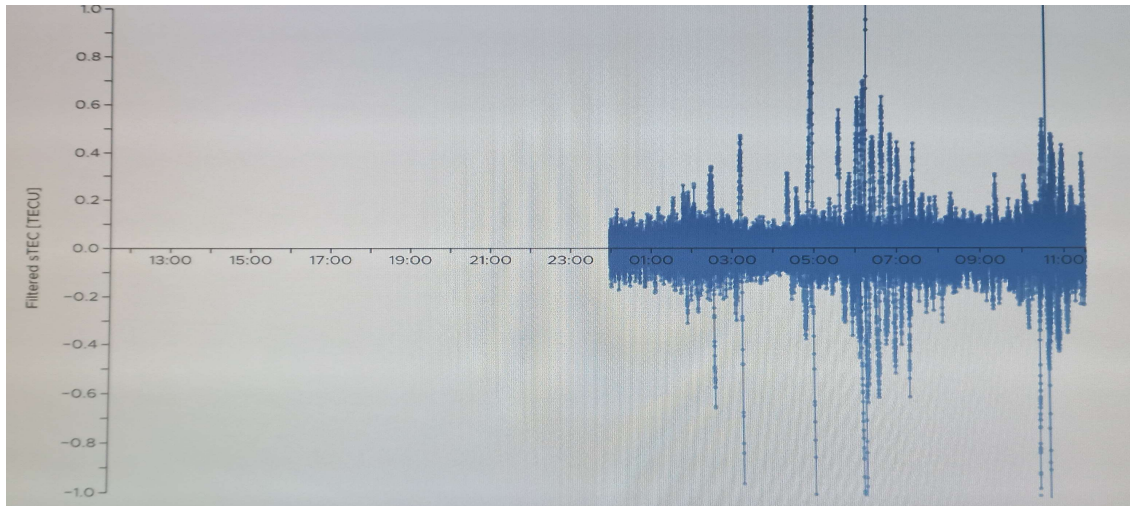
شکل ۹-مدلسازی TEC بر اساس شبکه ایستگاه های دائمی به صورت آبی برای روز ۱۸ فوریه ۲۰۲۴



GUARDIAN یک نرم افزار نظارت بر یونسفر برای هشدار خطرات طبیعی است. GUARDIAN از سری زمانی (TEC) NRT استفاده می کند تا به کاربران اجازه دهد آشفتگی های TEC را به دلیل رویدادهای طبیعی و انسانی روی زمین کشف کنند و خطرات طبیعی بالقوه را مشخص کنند. هدف GUARDIAN تکمیل سیستم های هشدار زودهنگام خطرات طبیعی موجود EWS است و در حال حاضر تنها نرم افزاری است که قادر به ارائه سری های زمانی چند GNSS NRT TEC در منطقه اقیانوس

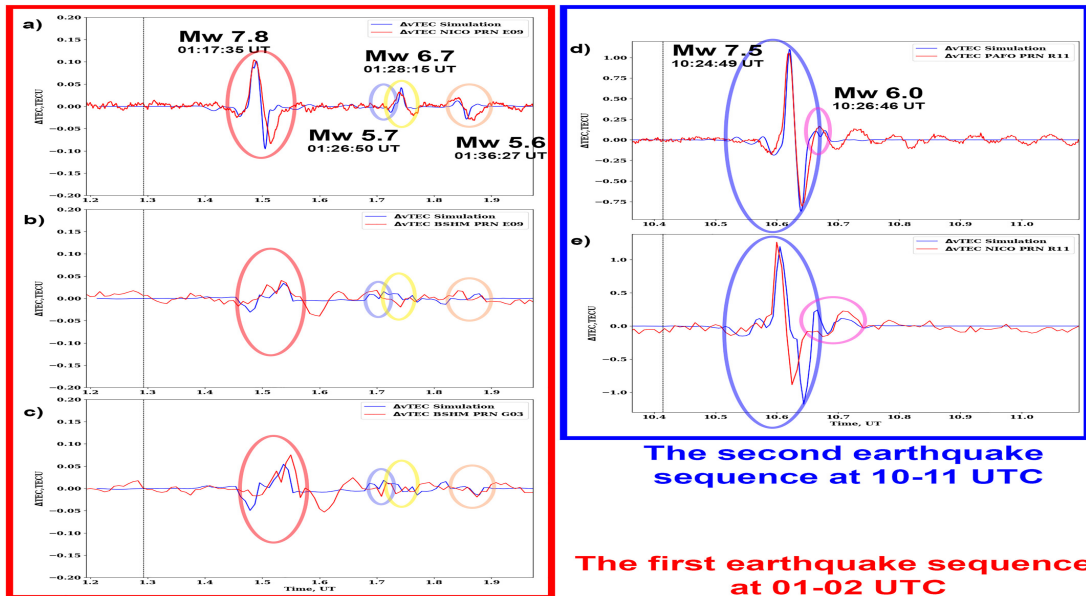


آرام برای عموم مردم و جامعه علمی است. از کاربردهای این سیستم در زلزله ۲۰۲۳ ترکیه که به صورت آنی در شکل ۱۰ نمایش داده شده.



شکل ۱۰-پیش نشانگری زمین لرزه ۷,۸ ترکیه مشاهده شده در ایستگاه GNSS شبکه ترکیه

در ۶ فوریه ۲۰۲۳، دو زمین لرزه با شدت بالا در منطقه قهرمان ماراش در جمهوری ترکیه را لرزاند. رخداد های ۷,۵ و ۷,۸ هر دو دارای مکانیزم امتداد لغز چپ گرد در امتداد گسل آناتولی شرقی بودند و هزاران پس لرزه را به دنبال داشتند. این دو رخداد منجر به کشته شدن بیش از پنجاه هزار نفر در جمهوری ترکیه و جمهوری عربی سوریه شدند که در آن جاده ها و ساختمان های (۱۰۰ هزار سازه) محلی به شدت آسیب دیدند. زیان ویرانی ها ۳۴ میلیارد دلار بوده و و طبق برآوردهای یکی از موسسات ترکیه، خسارت بازسازی ۱۱۸ میلیارد دلار برآورد شده است. سیگنال های یونوسفر واضح از زلزله ۷,۸ ریشتری را می توان در ساعت ۱:۳۰ و برای زمین لرزه ۷,۵ ریشتری نیز سیگنال یونوسفری را در ساعت ۱:۴۰ UTC مشاهده کرد، شکل ۱۱. محاسبات به صورت پس پردازش بوده است.

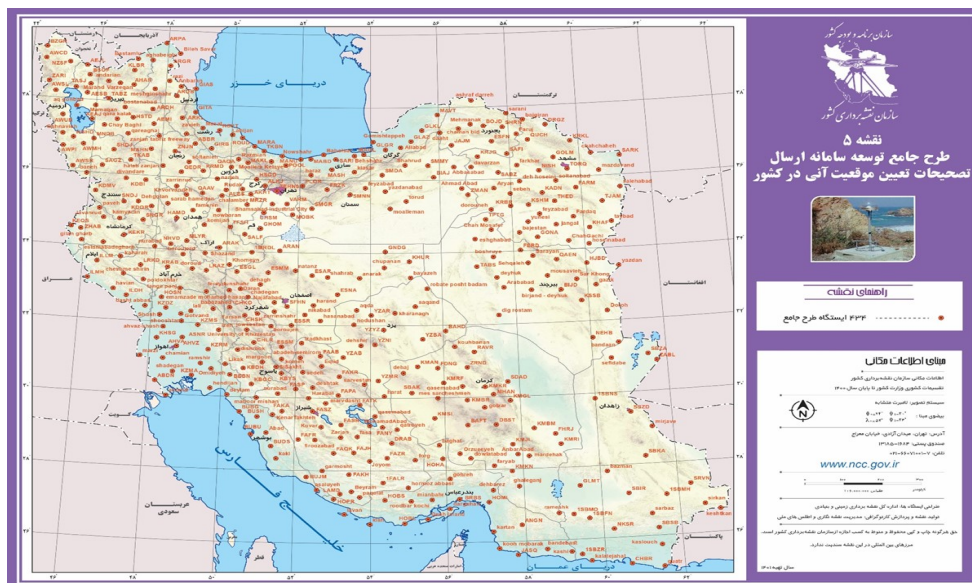


شکل ۱۱-افست های ایجاد شده در سری زمانی TEC ناشی از زمین لرزه های ۷,۵ و ۷,۸ ترکیه, (Maletckii 2023)



۱۱-وضعیت جاری در کشور و اقدام عملی

از اهداف مهم در ایجاد شبکه ژئودینامیک اندازه گیری و تعیین تغییرات پوسته زمین در طول زمان می باشد. در این راستا با اندازه گیری های دائم GPS در ایستگاه های شبکه ژئودینامیک، پردازش و آنالیز نتایج می توانیم به شناخت کاملتری از وضعیت و حرکات پوسته زمین در کشور دست یابیم و بتوانیم حرکات آنها را مدل سازی کنیم. اندازه گیری های دقیق ژئودینامیک در تعیین حرکات صفحات تکتونیک قاره ای، بررسی حرکات گسل های فعال و پیش بینی روند جابجایی آنها، تعیین جابجایی و حرکت پوسته زمین برای کاهش خسارات احتمالی ناشی از زلزله و همچنین جهت مکانیابی بهینه سازه ها در پروژه های عظیم مهندسی عمران نظیر سدها، نیروگاه ها، پالایشگاه ها و تشخیص محل و میزان افت ذخایر حیاتی آب، نفت و گاز و منابع زیرزمینی کاربرد دارد. لذا یکی از اصلی ترین بررسی های ژئودینامیکی دستیابی به مدل جنبشی بلوک ها و پهنه های ساختاری زمین شناسی و میزان واکنش و همکنش پهنه ها، گسل های فعال نسبت به یکدیگر است. خوشبختانه در ۱۵ سال گذشته اطلاعات بسیار خوبی در زمینه نرخ تغییر شکل فلات ایران و لغزش گسل های اصلی در کشور توسط ایستگاه های دائمی سازمان نقشه برداری کشور بدست آمده است که زیر ساخت لازم برای پیش نشانگری زلزله را فراهم ساخته است. وقوع زمین لرزه تابع پارامتر های بسیاری است از جمله عمق -رئولوژی پوسته و منتل -ویسکوزیته -ضریب اصطکاک -نرخ همگرایی صفحات -تنش تکتونیکی و نرخ آن - نرخ استرین (کرنش) در سال و جهت محور های اصلی آن می باشد. سرعت های نسبی، میدان تنش و لرزه خیزی موجود در ایران کاملاً وابسته به فعالیت این گسل ها و خصوصیات دینامیکی آنها است. رئولوژی و ضریب اصطکاک درونی این گسل ها مقدار تنش برشی و آهنگ حرکت نسبی بر روی آنها را تعیین می کند. حرکت در طول یک گسل فعال می تواند بصورت تدریجی و پیوسته (خزش زمین ساختی) و یا تناوبی از دوره های آرامش و حرکت ناگهانی با رها شدن انرژی بصورت زمین لرزه باشد. در حال حاضر با هم افزایی دو سامانه هدی و شمیم و توسعه شبکه های استانی از طریق سازمان مدیریت و برنامه ریزی استانها گام مهمی در زمینه توسعه سامانه ملی تعیین موقعیت آنی در کشور برداشته شد و پوششی مترکم تری در سطح کشور برای کاربردهای علمی و اجرایی ایجاد گردید است.



شکل ۱۱- طرح جامع توسعه سامانه ارسال تعیین موقعیت آنی در کشور



از طرف دیگر با وجود طرح جاری اشاره شده و وظایف محوله به سازمان در راستای برنامه ملی کاهش خطر حوادث وسوانح مصوب ۱۴۰۰/۹/۲۴ شورای عالی مدیریت بحران کشور بایستی شبکه های دائمی GNSS در اطراف بعضی از گسل های فعال و مناطق حساس که دارای نرخ استرین کم می باشند و دارای زمین لرزه های تاریخی و دستگاهی بزرگ می باشند و پارینه لرزه شناسی روی آنها انجام شده باشد نیز اضافه و متراکم گردد تا اینکه با بهره گیری از این سیستم به عنوان یکی از پیش نشانگرهای کوتاه مدت و سیستم هشدار زلزله احتمالا بتوان در جهت جلوگیری از خسارات جانی و مالی استفاده نمود. لذا با توجه به دو زیر ساخت مهم اشاره شده که شامل مشخص بودن نرخ تغییر شکل و مدل حرکت فلات ایران و نرخ لغزش گسل های اصلی و متراکم سازی شبکه GNSS در کشور می باشد و با وجود نرم افزارهای مدیریت و کنترل ارسال تصحیحات ایستگاه های دائمی پیاده سازی الگوریتم محاسبه سری زمانی TEC مبتنی بر هوش مصنوعی و در محدوده Realtime می توان گام مهمی در زمینه یکی از پیش نشانگرهای کوتاه مدت برای زمین لرزه ها با برزگای بیشتر از ۵٫۵ ریشتر-سونامی و آتشفشان برداشت. با پیشرفت فناوری و شناخت از زلزله، امید به صدور هشدارهای پیش از وقوع زلزله که نجات دهنده جان بسیاری از افراد خواهد بود، ممکن است روزی به واقعیت تبدیل شود. در حال حاضر، آمادگی و تاب آوری بهترین دفاع در برابر این بلای طبیعی تاکنون غیر قابل پیش بینی است.