

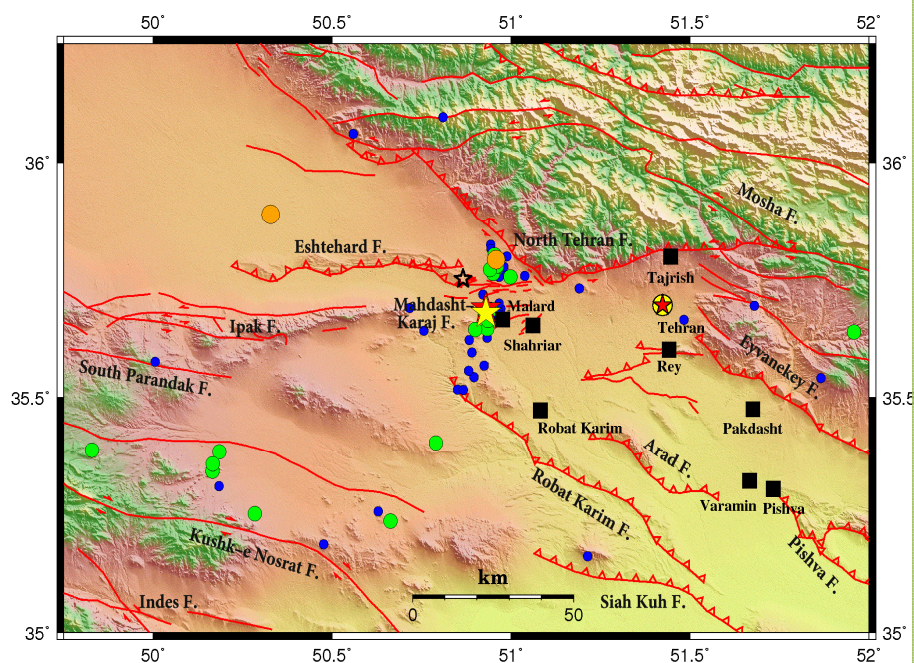


آیا فرونشست زمین عامل تحریک ثانویه زلزله اردیبهشت ماه ۱۴۰۴ با بزرگای ۴ در مرز استان های البرز و تهران بوده؟

اداره کل نقشه برداری زمینی و بنیادی

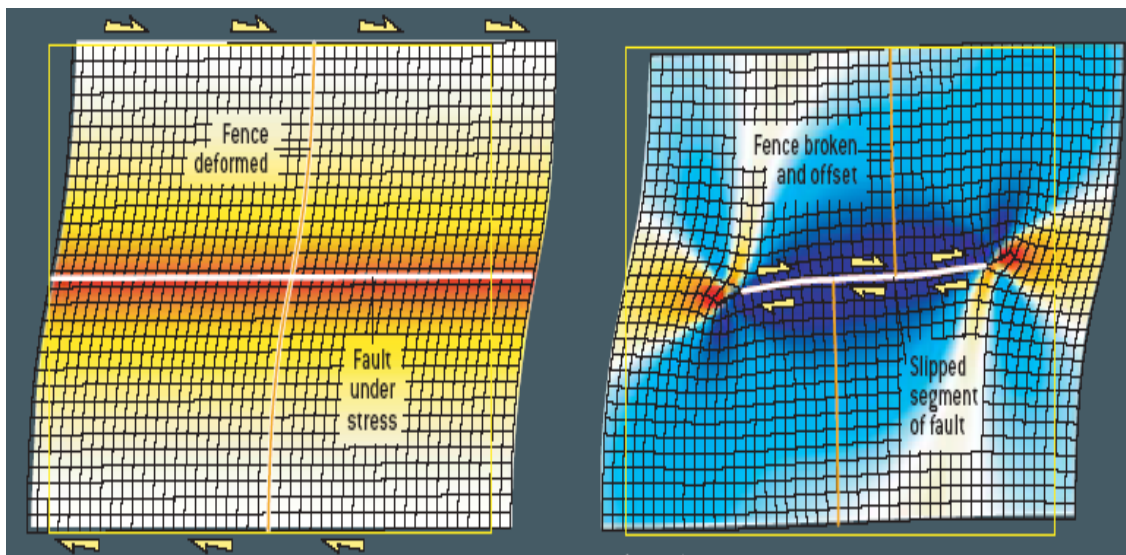
کمیته مدیریت بحران

تهیه کننده: دکتر حمید رضا نانکلی



۱-مقدمه

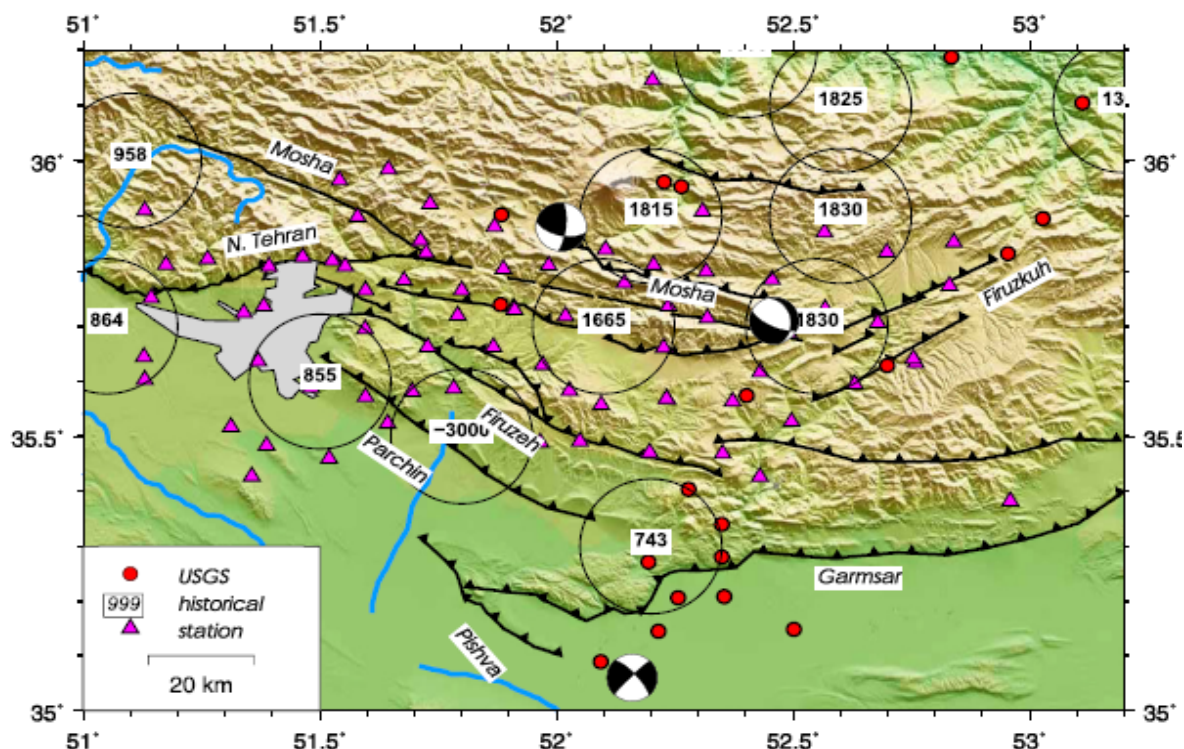
پدیده زمین لرزه یکی از مخاطرات طبیعی است که در اثر تنش انباشته شده بر روی گسل ها در مدت زمان طولانی و آزاد شدن این تنش در چندین ثانیه روی می دهد. تنش برشی - افت تنش و نرخ لغزش از پارامترهای مهم در تحلیل خطرپذیری گسل ها و مدل سازی چرخه زلزله بر روی آنها می باشد. همچنین تنش القا شده ناشی از زلزله بر روی گسل های دیگر با توجه به فیزیک زلزله و مکانیک گسل ها و بر اساس تنش **coulomb** صورت می گیرد شکل ۱.



شکل ۱- وضعیت تنش بر روی گسل امتداد لغز قبل زلزله (سمت چپ) و در حین زلزله (سمت راست)

۲-تکتونیک و لرزه خیزی منطقه

از نقطه نظر لرزه زمین ساختی، کشور ایران بخشی از کمر بند زلزله خیز آلپ- هیمالایا را تشکیل می دهد. وجود گسل های فراوان فعال در منطقه ایران و همچنین زلزله های تاریخی و معاصر گویای پتانسیل بالای تغییر شکل در این منطقه می باشد. از بین ساختارهای تکتونیکی فعال در ایران رشته کوه های البرز که در بر گیرنده تعداد زیادی گسل فعال می باشد بسیار حائز اهمیت می باشد. منطقه البرز مرکزی لرزه خیز بوده و در طی دو هزار سال 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. شکل ۲. منطقه البرز مرکزی لرزه خیز بوده و در طی دو هزار سال 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. آخرین زلزله بزرگ تهران در ۲۷ مارس ۱۸۳۰ میلادی (۱۹۰ سال پیش) با بزرگی بیش از هفت درجه ریشتر به وقوع پیوست. در مورد ابعاد تخریب این زلزله منابع چنین گزارش کرده اند: مناطق شمیرانات و دماوند تقریباً به طور کامل ویران شد و حدود ۷۰ روستا در شرق جاجرود از بین رفتند.



شکل ۲- پهنه البرز مرکزی، تاتار و همکاران: (۱۳۸۵)

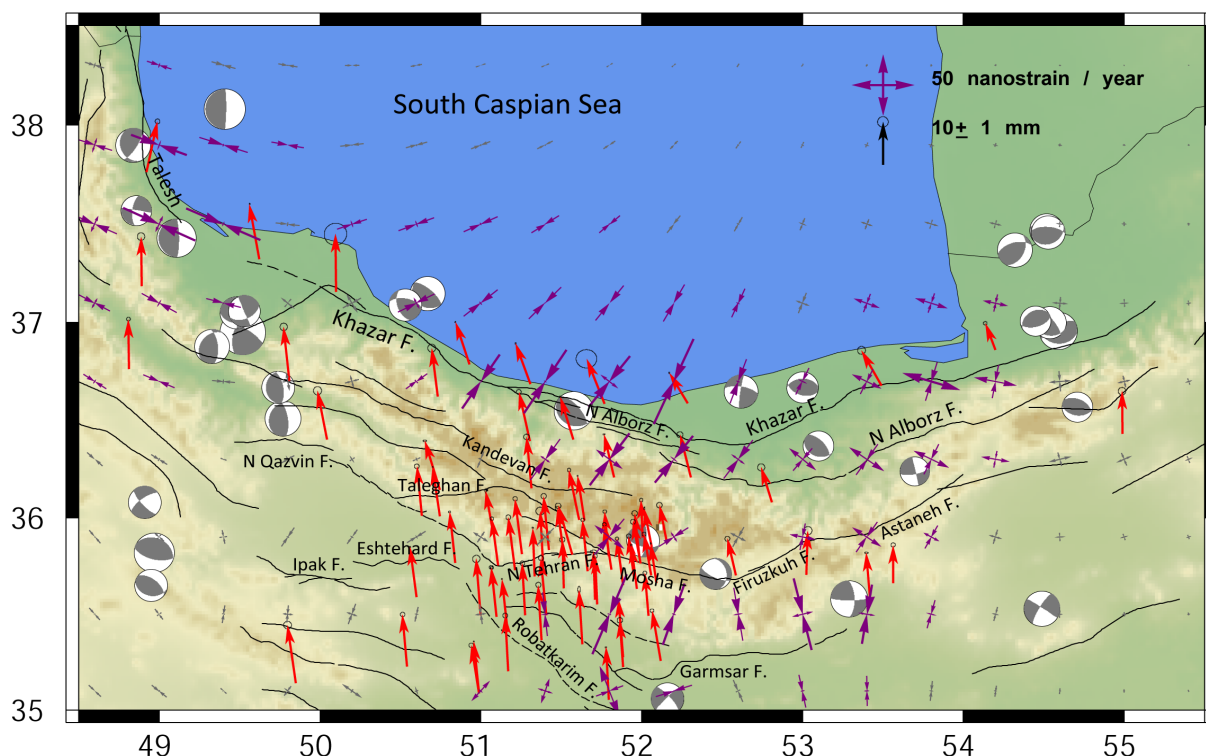
۳-رخداد اردیبهشت ماه ۱۴۰۴

به گزارش مرکز لرزه نگاری کشوری در ساعت ۲۱ روز شنبه ۱۳ اردیبهشت ۱۴۰۴، زمین لرزه‌ای با بزرگای چهار ریشتر منطقه ماهدشت در نزدیکی کرج را لرزاند. این رویداد در نزدیکی کانون زلزله ۲۹ آذر ۱۳۹۶ با بزرگای ۵٫۲ ریشتر ملارد رخ داده است. این زمین لرزه در پهنه گسلی اشتهاارد-ماهدشت-جنوب کرج و با فاصله از راندگی شمال تهران رخ داده است. راندگی یا گسل اشتهاارد گسلی است با راستای خم‌دار خاوری-باختری و طولی نزدیک به ۶۰ کیلومتر، این گسل در فاصله چهار کیلومتری شمال اشتهاارد در جنوب استان البرز قرار دارد. گسل ماهدشت یکی از گسل‌های جنوب البرز مرکزی می‌باشد. طول این گسل به ۳۰ کیلومتر با راستای شرقی-غربی است. این گسل از عوامل خطرناک تهدید کننده استان البرز و جنوب غربی استان تهران است. همچنین مجاورت این گسل با گسل‌های ایک و گسل اشتهاارد و خطر تحریک آن گسل‌ها توسط گسل ماهدشت بر مخاطرات این گسل می‌افزاید (سلیمانی و حسینی ۱۳۷۷). بنا بر گزارش مرکز لرزه نگاری کشوری طی ۱۹ سال اخیر ۴۲۰ زمین لرزه با بزرگای ۲٫۵ به بالا تا مرز ۵ ریشتر در این پهنه (تا شعاع ۱ درجه از کانون این زمین لرزه) رخ داده است. تا کنون ۳ پس لرزه در این منطقه به ثبت رسیده است.

۳- مدل حرکت منطقه البرز با استفاده از نتایج شبکه های GNSS موردی و دائمی سازمان نقشه برداری کشور

میدان سرعت و نرخ کرنش در شکل ۳ به ترتیب نحوه تغییر شکل در امتداد و در سراسر محدوده البرز را نشان میدهد. نمودار نرخ استرین نشان می دهد که تغییر شکل درون محدوده البرز به شدت در امتداد و در سراسر کمربند در حال تغییر کردن است. در بخش شرقی تغییر شکل به صورت حرکت چپگرد و کوتاه شدگی روی لبه جنوبی کمربند دیده می شود. در البرز مرکزی (از ۵۱ درجه شرقی تا ۵۲٫۵ درجه شرقی) تغییر شکل به صورت مایل و فشارش نسبتاً بزرگتری مشاهده می شود.

جهت فشارش اغلب عمود بر راستای کمربند در آن بخش است. نرخ استرین محاسبه شده نشان می دهد که در البرز مرکزی بخشی از همگرایی بین دو صفحه عربستان و اوراسیا از طریق کوتاه شدگی صورت گرفته توسط گسل های تراستی شمال البرز، خزر (۱٫۸ میلیمتر در سال قائم)، پارچین و گرمسار جذب میگردد. در حالی که تغییر شکل به صورت امتداد لغز چپگرد درون محدوده کوهستانی در امتداد گسل های طالقان و مشا (با نرخ لغزش ۱٫۵ و ۱۰ میلیمتر) دیده می شود و این نشان می دهد که نوع تغییر شکل در البرز مرکزی تنها بصورت چین خورده و بالا آمده نیست. تعدادی از بخش های البرز (البرز غربی) میزان فشار خیلی کوچکی را نشان می دهد که بیانگر تغییر شکل در شمال البرز است، 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، محاسبه نرخ استرین ژئوتیک و برشی با استفاده از بردارهای سرعت می باشد.

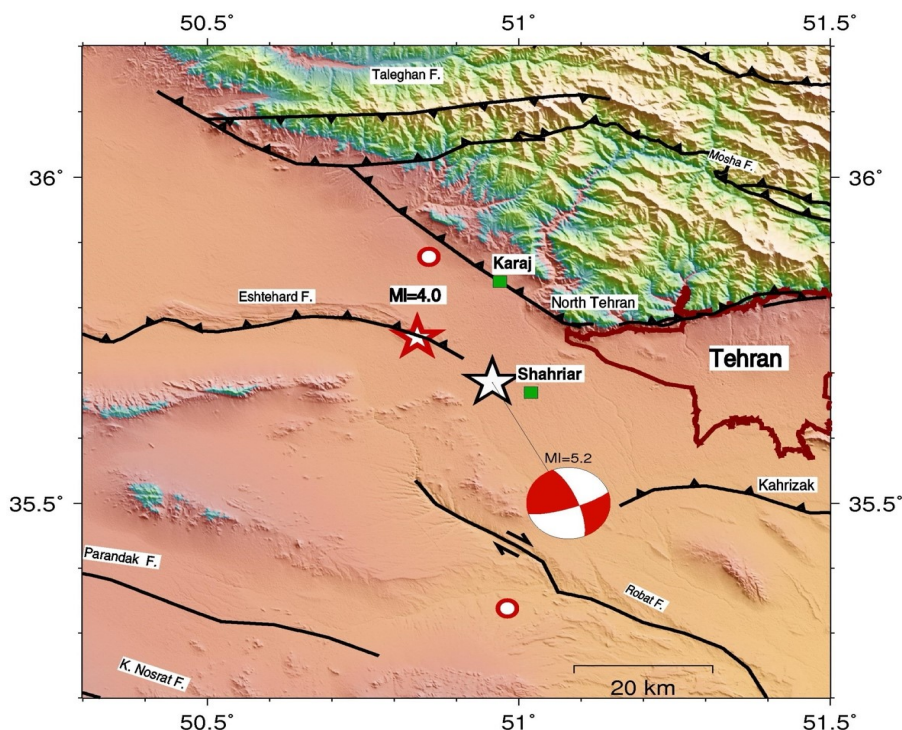


شکل ۳- میدان سرعت و نرخ کرنش (استرین) در پهنه البرز (سازمان نقشه برداری کشور)

نتایج بدست آمده از سری های زمانی و میدان سرعت و استرین شبکه ایستگاه های دائمی سازمان نقشه برداری کشور در منطقه حاکی از **رژیم فشارشی غالب است سمت غرب (نرخ استرین پایین) به سمت مرکزافزایش و شرق کاهش میابد.** نرخ کاهش این استرین با توجه به عمق زلزله ها و فاصله از زون گسلی تا ۲۱ نانو استرین در سال می 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 استرین (کرنش) 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. مناطق با نرخ کرنش بالا به طور متوسط تحت فعالیت لرزه ای بالا هستند، 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. بالعکس نرخ کرنش کمتر نشان دهنده وجود گسل های قفل شده و رخ داد های اصلی در آینده است.

۴- انتقال و برهم کنش تنش استاتیک

زمین لرزه ها می توانند با همدیگر بر هم کنش داشته باشند و این موضوع می تواند منجر به توالی زمین لرزه ها و خوشه زمین بندی ورخداد پس لرزه ها گردد. برانگیختگی تنش بدین صورت است که گسل ها به تنشی که از گسل ها یا زمین **لرزه های مجاور** دریافت می کنند پاسخ می دهند. حرکت بلوکهای دو طرف یک گسیختگی باعث ایجاد تغییر در تنش ایستایی محیط اطراف آن میشود.



شکل ۴- نمایش دو زمین لرزه سال ۱۳۹۶ با بزرگای ۵٫۲ و سال ۱۴۰۴ با بزرگای ۴ در زون گسلی ماهدشت-اشتهارد-کرج IIEES, 2025



این تغییر تنش روی سطوح گیرنده اطراف گسیختگی دارای دو مولفه نرمال و برشی میشود. وقوع زمین لرزه نزدیک به هم در زمان و مکان که به صورت خوشه ای لحاظ می شود براساس تئوری انتقال تنش و اثر متقابل آن محاسبه می شود، تنش انباشته شده در روی یک گسل به عنوان کلید اصلی به منظور آغاز گسیختگی در نظر گرفته می شود و در هنگام وقوع زلزله به سادگی از بین نمی رود. تنش آزاد شده از یک گسل می تواند هر چند کم می تواند تنش را روی گسل های مجاور و نزدیک را **افزایش** یا **کاهش** دهد و بالقوه باعث ایجاد گسیختگی و زلزله یا تاخیر در زمان رخداد شود. برای این منظور نرخ بلند مدت تنش تکنونیک بر روی یک گسل فعال باید مشخص باشد. انتقال تنش مثبت (یعنی افزایش تنش) می تواند چرخه لرزه ای گسل را به طور موقت اصلاح کند و زلزله بعدی را با یک دوره زمانی T پیش برد و بر عکس کاهش تنش باعث تاخیر در گسیختگی و زمان وقوع زلزله می شود (دوران آرامش). در سال ۱۳۹۶ زمین لرزه ای با بزرگای ۵٫۲ در فاصله ۱۵ کیلومتری از زمین لرزه اخیر در این منطقه روی داده است (شکل ۴)، که احتمالا باعث چکانش زمین لرزه اردیبهشت ماه با تاخیر شده است.

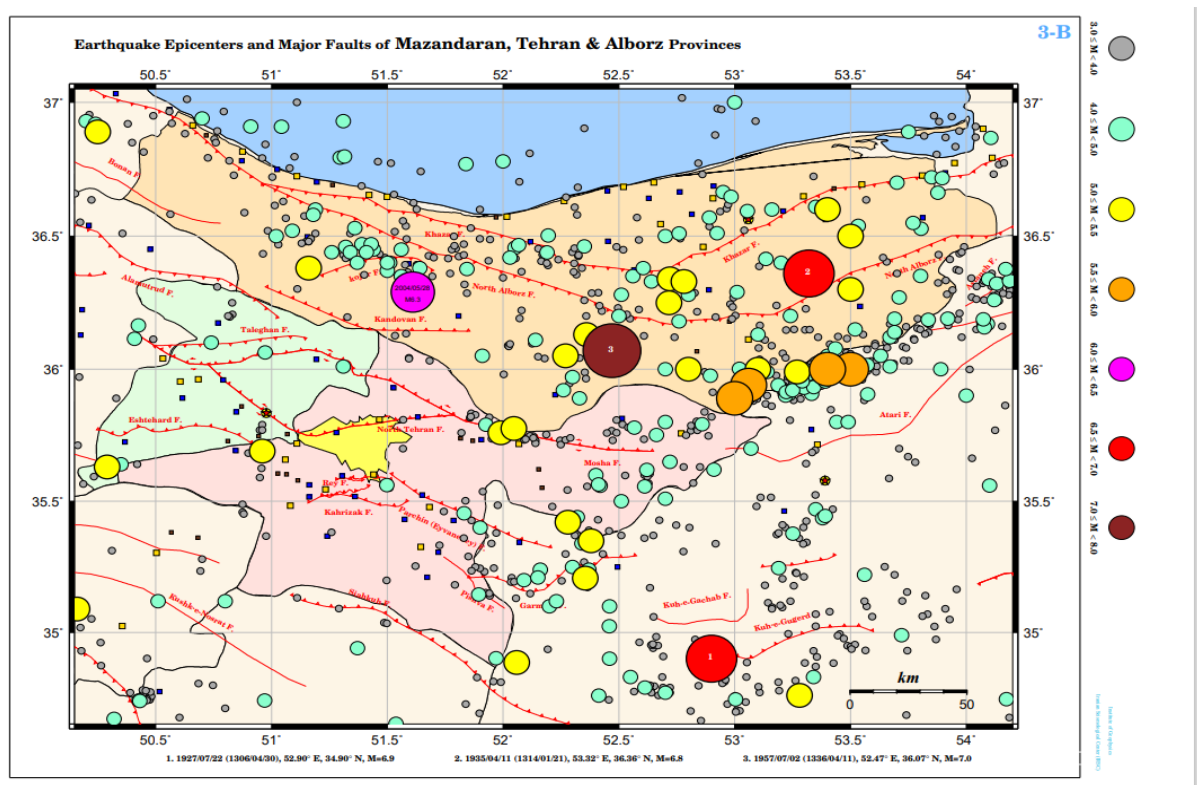
۴- آیا وابستگی بین زمین لرزه اخیر و فرونشست منطقه وجود دارد؟

زمین لرزه های غیر طبیعی می توانند در اثر هر گونه اختلال قابل توجه با مداخله انسانی در رژیم هیدرولوژیکی ایجاد شوند. در مناطقی که گسل های بالقوه فعال در حال حاضر نزدیک به شکست هستند، افزایش فشار منافذ ناشی از تزریق سیال، یا به طور متناوب، استخراج انبوه سیال یا گاز، می تواند تنش و/یا کرنش کافی را ایجاد کند که با گذشت زمان **احتمال دارد** منجر به یک زلزله شود. زمین لرزه های ناشی از تزریق معمولاً سبب کاهش مقاومت اصطکاکی در صفحات گسلی می شود. به نظر می رسد زمین لرزه های مرتبط با فرونشست، تخلیه پوسته و تغییرات متخلخل الاستیک در پاسخ به کرنش های اعمال شده ناشی از برداشت انبوه مواد زیر سطحی پاسخ می دهند.

فرونشست زمین در ایران از بحران های زیست محیطی مهم چند سال اخیر ایران است که مهم ترین علل آن در حال حاضر بحران آب است. ایران جزو کشورهایی با بیشترین فرونشست زمین است، ۹۰ هزار کیلومتر مربع و ۵ درصد مساحت کشور. در حال حاضر ۳۰۰ دشت ایران دچار این بحران هستند؛ در برخی از دشت های ایران شرایط از فرونشست عبور کرده و زمین وارد مرحله بحرانی ایجاد فروچاله ها قرار گرفته است، از مناطق با شرایط بحرانی می توان به دشت کاشمر دشت کبودرآهنگ همدان، دشت ورامین، دشت نظرآباد، دشت تهران، دشت مشهد و نیشابور، دشت های استان کرمان، اصفهان و قزوین اشاره کرد. بنا بر گزارش سازمان نقشه برداری کشور محدوده تحت تأثیر پدیده فرونشست در البرز حدود ۷۰۰ کیلومتر مربع است و بیشترین نرخ فرونشست سالانه قابل توجه به میزان ۲۹ سانتی متر در سال، مربوط به زمین های زراعی جنوب اتوبان کرج- قزوین در محدوده روستای حاجی آباد است. در محدوده نظرآباد، ماهدشت، اشتهارد نیز این نرخ به ترتیب به ۴ سانتی متر در سال نزدیک شده است. آمار چاه های آب موجود و مشخصات سفره آبخوان و ژرفای سطح آب زیرزمینی، نشانگر میزان برداشت سالانه و کاهش سطح آب های زیر زمینی بین ۸۰ سانتی متر تا ۱۰۰ سانتی متر است.

استخراج سیالات در عمق **زیاد** فشار منفذی را تغییر می دهد و میدان تنش محلی را در امتداد گسل های لرزه ای تغییر میدهد و باعث افزایش فعالیت لرزه ای می شوند که به صورت ازدحام لرزه ای ثبت می شود. ازدحام زلزله دنباله ای از رویدادهای لرزه ای است که در یک منطقه محلی در مدت زمان نسبتاً کوتاهی رخ می دهد که می تواند از روزها تا ماه ها طول بکشد. برخلاف زمین لرزه های معمولی، ازدحام ها بیشتر از زمین لرزه های کوچک تشکیل شده اند و یک لرزه اصلی قابل شناسایی ندارند. آنها اغلب در مکان های یکسانی تکرار می شوند و می توانند توسط عوامل مختلفی از جمله حرکت ماگما، آب یا خزش ثابت در امتداد گسل ها ایجاد شوند. بسیاری از زمین لرزه ها از الگوی غیر ازدحامی پیروی می کنند که به عنوان توالی لرزه اصلی-پس لرزه شناخته می شود. در ساده ترین شکل آن، این بدان معنی است که بزرگترین زمین لرزه ابتدا در این توالی رخ می دهد و به دنبال آن یک سری شوک های کوچکتر رخ می دهد که در یک دوره زمانی از هفته ها تا

دهه ها از بین می روند. با این حال، همه توالی های زمین لرزه از این الگو پیروی نمی کنند. گاهی اوقات، بزرگترین رویداد ممکن است اولین رویداد در یک دنباله نباشد. در عوض ممکن است در وسط رخ دهد. گاهی اوقات دنباله ها می توانند زمین لرزه های زیادی با بزرگی مشابه بزرگترین زمین لرزه دنباله داشته باشند. گاهی اوقات توالی ها در طول زمان از بین نمی روند، بلکه ثابت می مانند یا حتی در طول دوره های روزها، هفته ها یا حتی ماه ها افزایش می یابند. سکانس هایی که با الگوی پس لرزه اصلی مطابقت ندارند معمولاً ازدحام در نظر گرفته می شوند. مطابق با کاتالوگ لرزه ای مرکز لرزه نگاری کشوری و جستجوی زمین لرزه ها در طی ۲۰ سال اخیر ازدحام لرزه ای در محل رخ داد اخیر ثبت نشده است. شکل ۵. **نتایج حاصل از مدلسازی نشان میدهد که زلزله اخیر ماهیت تکتونیکی داشته (زمین لرزه اصلی و ۳ پس لرزه) و سیگنالی از تغییرات تنش ناشی از فرونشست که بتواند محرکی یا هم افزایی با سیگنال تکتونیکی (۴ مگاپاسکال تنش قبل از رخ داد و افت تنش ۷، مگاپاسکال) برای چکانش یا تحریک گسل مسبب باشد مشاهده نشده است. تغییرات تنش مدلسازی شده ناشی از فرونشست با توجه به نرخ منطقه (۴ سانتیمتر در سال) و افت سطح آب و هندسه گسلها نسبت به عمق از سطح زمین تا ۱۰ کیلومتر ۰،۰۰۲ تا ۰،۰۰۵ مگاپاسکال است که برای تحریک گسل و لغزش آن کافی نیست.**



شکل ۵- پیراکندهی زمین لرزه های رخ داده در بازه ۲۰ساله (مرکز لرزه نگاری کشوری)

۵-نتایج

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 هزارسال 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.

زمین لرزه پدیده زمین ساختی است که در قسمت شکننده پوسته رخ می دهد (۱۰ تا ۲۰ کیلومتر). 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 و در مناطق فرورانشی با عمق بیشتر تا ۸۰ کیلومتر. فرونشست پدیده ای محلی است که در اثر استخراج مایعات تا عمق ۳۰۰ متری رخ میدهد (چاه های استخراج نفت و گاز با توجه به شرایط زمین شناسی محل عمق بیشتری دارند). البته ذکر این نکته ضروری است که در مناطق فرورانشی فرونشست با منشاء تکتونیک نیز وجود دارد. تغییرات تنش ناشی از فرونشست زمین می تواند به عمق های مختلفی بستگی داشته باشد، اما به طور کلی این تغییرات بیشتر در لایه های سطحی و لایه های نزدیک به سطح رخ می دهند. عواملی که بر عمق تأثیرگذار هستند عبارتند از: نوع خاک و سنگ: خاک های نرم و متراکم تر معمولاً تغییرات بیشتری در تنش را تجربه می کنند و فرونشست در این لایه ها بیشتر محسوس است. شدت فرونشست: در مناطق با فرونشست شدید، تغییرات تنش می توانند به عمق های بیشتری نفوذ کنند. در این حالت، لایه های زیرین ممکن است تحت تأثیر قرار گیرند و تغییراتی در ساختار تنش در اعماق بیشتر نیز مشاهده شود. ویژگی های جغرافیایی و هندسی: عواملی مانند شیب زمین، ساختار لایه های زیرین و نوع کاربرد زمین (مثل استفاده های صنعتی یا شهری) می توانند بر عمق تأثیرگذار باشند. در نتیجه، عمده تغییرات تنش ناشی از فرونشست بیشتر در لایه های سطحی (معمولاً تا عمق ۱۰ تا ۱۰۰ متر) مشاهده می شود، اما در مواردی که فرونشست شدید باشد، ممکن است تغییرات تا اعماق بیشتری (بیش از ۱۰۰ متر) نیز دیده شود. در سال ۲۰۱۱ زمین لرزه ای با بزرگای ۵.۱ Mw در شهر Lorca جنوب شرقی اسپانیا رخ داد. زمین لرزه ای کم عمق و مخرب که خسارات زیادی به بار آورد. نویسندگان (گونزالز و همکاران، ۲۰۱۲) نشان می دهند که برداشت گسترده آب زیرزمینی در این منطقه، باعث کاهش وزن پوسته (crustal unloading) و در نتیجه تغییرات تنش شده که گسل را به لغزش نزدیک تر کرده است. در طول سال ها، آب های زیرزمینی منطقه Lorca به شدت استخراج شده اند. این برداشت باعث کاهش فشار عمودی (تنش نرمال) در پوسته شده که در اصطلاح زمین شناسی به آن unloading می گویند. ۲۵۰ متر در طی ۵۰ سال سطح آب افت کرده است. زمین لرزه Lorca نه فقط نتیجه فرآیندهای طبیعی تکتونیکی، بلکه به شدت تحت تأثیر تغییرات تنش القاشده توسط انسان بوده است. این مقاله از اولین مستندات علمی است که نقش مستقیم فعالیت انسانی (برداشت آب) را در تغییر الگوی لغزش گسل و وقوع زلزله نشان می دهد.

برای تشخیص این که یک زلزله خاص ناشی از تحریک فرونشست بوده است، باید چندین عامل و رویداد به طور همزمان مورد بررسی قرار گیرد. از جمله این عوامل می توان به موقعیت مکانی، عمق و شدت زلزله، تغییرات تنش ایجاد شده در اثر فرونشست، تحلیل گسل ها، و مشاهدات میدانی اشاره کرد. به طور کلی، اگر شواهد کافی در دسترس باشد که نشان دهد تغییرات تنش ناشی از فرونشست موجب تحریک گسل ها شده است، می توان گفت که فرونشست در وقوع زلزله نقش داشته است.