



گزارش زمین لرزه با بزرگای ۶٫۲ ترکیه (اردیبهشت ۱۴۰۴)

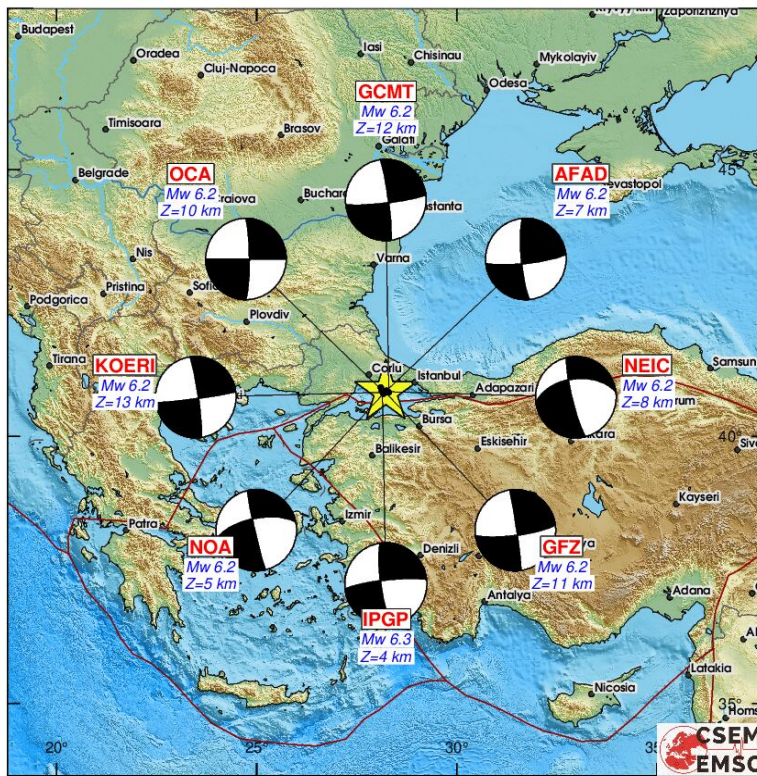
اداره کل نقشه برداری زمینی و بنیادی

کمیته مدیریت بحران

تهیه کننده: دکتر حمید رضا نانکلی رییس کارگروه زلزله

Moment Tensor map of earthquake:

Mag: 6.2 2025-04-23 09:49:11 UTC
Lat: 40.8327 Lon: 28.2267 Depth: 15.2 km

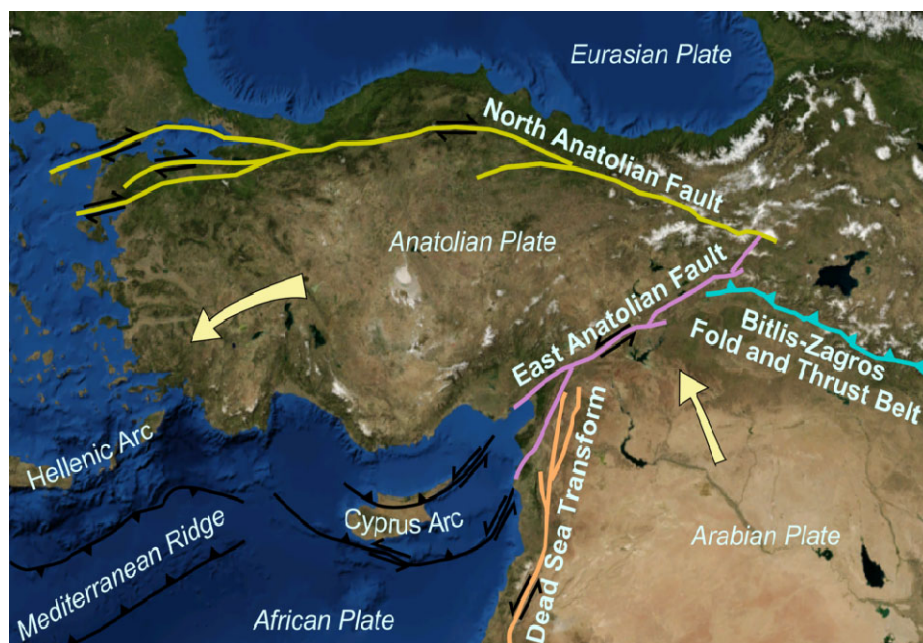


300 km
— Political boundaries
— Tectonic plates boundaries (Bird, P. [2003])

Last updated: 2025-04-24 at 05:29 UTC

۱-مقدمه :

زمین‌لرزه با زتاب یک رویداد زمین‌شناسی است که به صورت جنبش در سطح زمین ظاهر می‌شود. گسیختگی در پوسته جامد زمین که به دلیل جنبش‌های برشی در دو سوی گسل‌ها روی می‌دهد عامل اصلی بروز زمین‌لرزه بوده و پیامد مستقیم انباشتگی تنش‌ها در پی جابه‌جایی ورقه‌های زمین‌ساختی نسبت به یکدیگر می‌باشد. ترکیه یکی از لرزه‌خیزترین کشورهای دنیا است که به عنوان بخشی از کمربند کوه‌زایی آلپ- هیمالیا همواره از لرزه‌خیزی بالایی در طول تاریخ برخوردار بوده است و سوابق زمین لرزه‌های بزرگی را در کارنامه خود دارد. بخش اعظم این کشور بر روی صفحه آناتولی قرار گرفته است: صفحه تکتونیکی کوچکی که در منطقه و برخورد سه گانه (Triple Junction) صفحات عربی اوراسیا و آفریقا قرار دارد (شکل ۱).



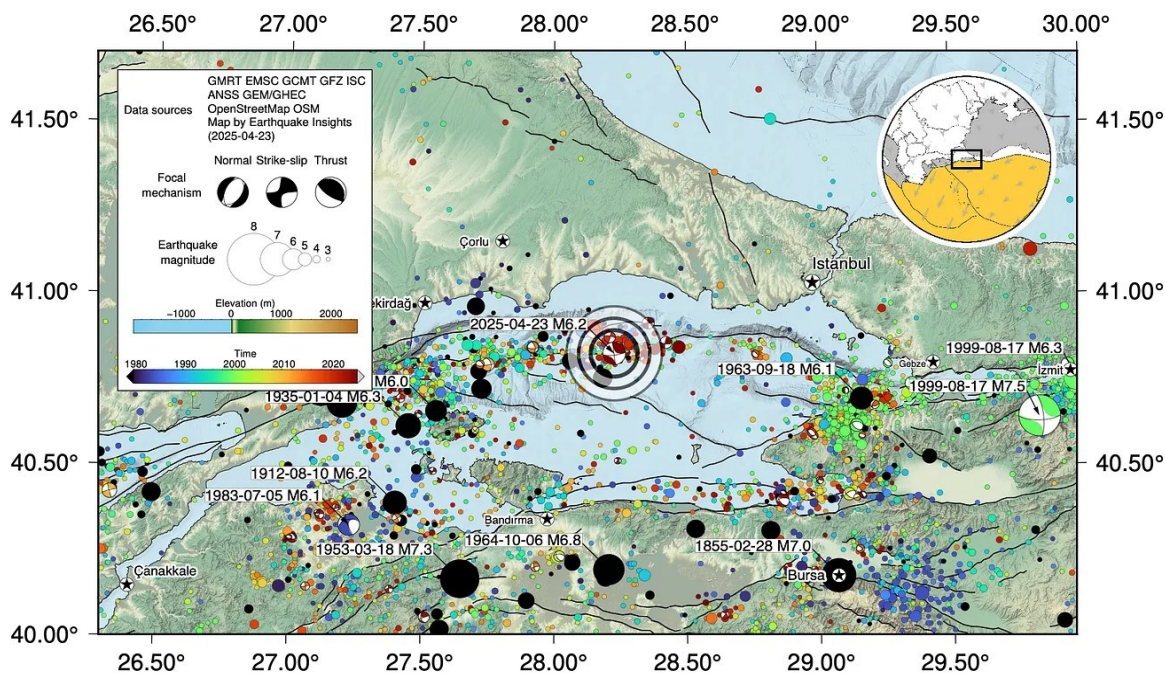
شکل ۱- زمین ساخت ترکیه

۲-زمین ساخت ترکیه

تکتونیک با زمین ساخت این ناحیه دارای پیچیدگی خاص خود می‌باشد و با همگرایی صفحات تکتونیکی منطقه سبب ایجاد زون کوهزایی و پر تنش و لرزه خیز در کل مدیترانه و قسمت غربی اوراسیا شده است از سمت جنوب به شمال عوارض مورفولوژیک مهم پشته مدیترانه قوس و گودال اژه ای یا هلنیک را نام برد. پشته‌ها رشته کوهی زیر آبی هستند و در واقع یک دره ریفتی است که در طول محورش حرکت می‌کند. این پشته‌های تکتونیکی در حقیقت یک مرز گسترش اقیانوسی هستند.

مرز بین دو صفحه آناتولی و اوراسیا در شمال توسط گسل معروف آناتولی شمالی که گسلی امتداد لغز و راستگرد میباشد با نرخ لغزش ۲۵ میلی‌متر در سال که ناشی از (حرکت به سمت غرب صفحه آناتولی نسبت به

اوراسیا و ناشی از فشار کوهزایی و هم‌گرایی صفحه عربی و اوراسیا و دارای سابقه زلزله‌های قابل توجه در قطعات مختلف آن و با طول ۱۰۰۰ کیلومتر است مشخص می‌گردد (شکل ۲). مرز جنوبی صفحه آناتولی با گسل آناتولی شرقی مشخص می‌گردد که گسلی امتداد لغز و چپگرد و با نرخ لغزش ۱۰ میلیمتر در سال است که حرکت آن ناشی از هم‌گرایی دو صفحه عربی و اوراسیا است و حرکت صفحه آناتولی به غرب است.



شکل ۲- زمین لرزه‌های رخ داده در محدوده گسل آناتولی شمالی (Hubbart, 2025)

از طرف دیگر فرورانش صفحه آفریقا به زیر صفحه آناتولی در امتداد مرز جنوبی و در سری از گودال‌های قوسی رخ میدهد. این فرورانش سبب ایجاد تنش کششی در صفحه آناتولی و به سمت گودال‌ها می‌شود و همچنین سهمی در حرکت صفحه آناتولی به سمت غرب دارد. در غرب و شرق صفحه آناتولی تکتونیک پیچیده‌ای را شاهد هستیم. در شرق زون فشارشی ناشی از همگرایی دو صفحه عربی و اوراسیا و در غرب زون گسترده‌ای که با تکتونیک کششی در غرب ترکیه و یونان همراه میشود.

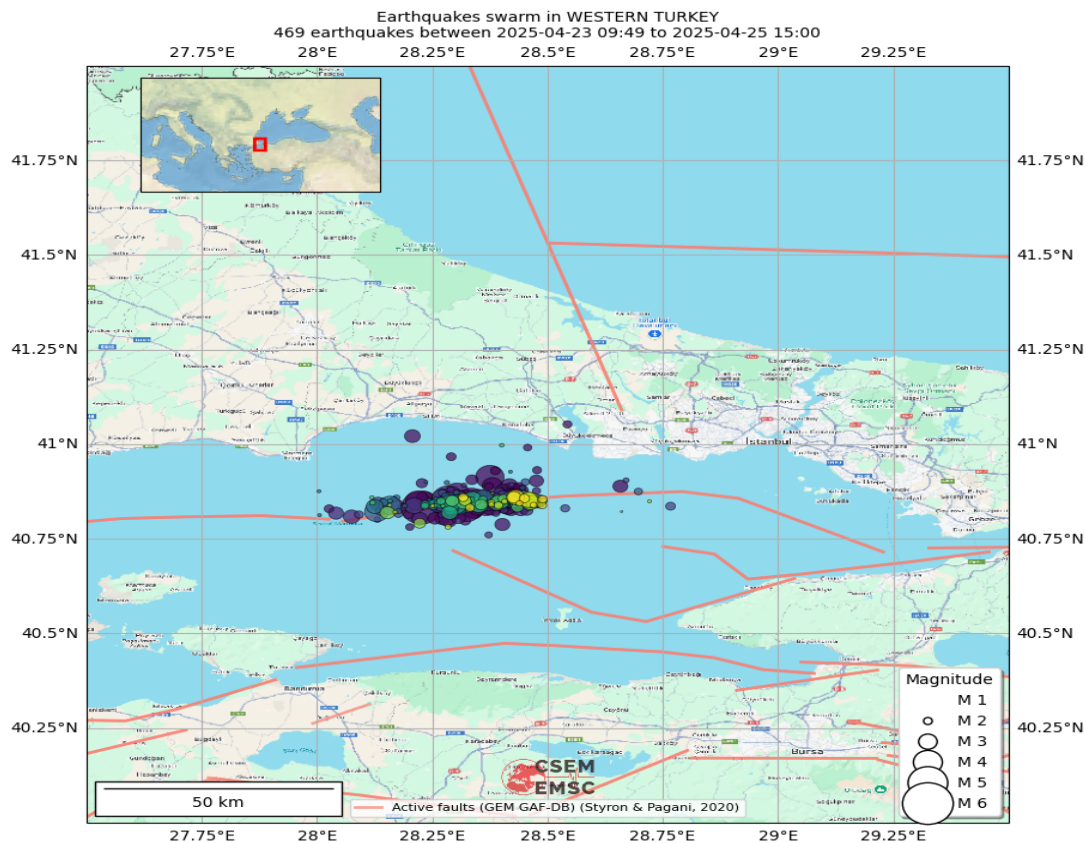
۳- گسل آناتولی شمالی و شرقی

بسیاری از زلزله‌های شدید ترکیه بر روی یکی از دو گسلی رخ داده‌اند که در طرفین صفحه آناتولی قرار دارند؛ گسل‌های آناتولی شمالی و آناتولی شرقی. بین سال‌های ۱۹۳۹ تا ۱۹۹۹ زلزله‌های بزرگ ترکیه با بزرگای ۷٫۸ تا ۷٫۰ و گسیختگی روی سطح از ۱٫۶۵ تا ۷٫۵ متر با توجه به بزرگای زلزله در امتداد گسل آناتولی شمالی و به سمت غرب رخ داده‌اند. این نکته باعث به وجود آمدن این ترس شده است که استانبول در نزدیکی این گسل قرار دارد نیز بالاخره روزی خواهد لرزید. در سال ۱۹۹۹ زلزله‌ای به قدرت ۷٫۶ ریشتر در مجاورت ازمیر که تنها ۷۰ کیلومتر از استانبول فاصله دارد رخ داد، با این وجود از سال ۲۰۰۳، فعالیت‌ها به گسل آناتولی شرقی منتقل شد. در آن سال،

بیش از ۱۰۰ نفر در زلزله‌ای نزدیک شهر بینگول کشته شدند. گسل آناتولی شرقی در سال ۲۰۰۴ مجدداً لرزید و زلزله ۶٫۱ ریشتری حاصله باعث کشته شدن ۵۱ نفر شد.

۴-رخداد ۳ اردیبهشت ماه ۱۴۰۴ ترکیه

در ۲۳ آوریل ۲۰۲۵ در ساعت ۱۲:۴۹ به وقت محلی، زمین لرزه‌ای به بزرگی ۶٫۲ ریشتر در زیر دریای مرمره در ترکیه رخ داد. این زمین لرزه به طور گسترده در شمال غربی ترکیه احساس شد و بیش از سه هزار گزارش به EMSC ارائه شد. این زمین لرزه در امتداد گسل مرمره - بخشی به طول ۱۰۰۰ کیلومتر از گسل آناتولی شمالی که از دریای مرمره عبور می‌کند (شکل ۳) و در جنوب غربی استانبول رخ داد. بر اساس گزارش مرکز زمین شناسی ایالات متحده، زمین لرزه در عمق حدود ۱۱٫۵ کیلومتری و بر اساس رصدخانه Kandilli دانشگاه بوغازیچی استانبول در عمق ۱۵٫۲ کیلومتری زمین رخ داده است. این زمین لرزه خیلی زود با پس لرزه‌هایی همراه شد. کاتالوگ EMSC تاکنون بیش از ۳۰۰ پس لرزه را فهرست کرده است که سه مورد آن به ۵M رسیده است. اولین مورد تنها دو دقیقه پس از شوک اصلی بود. دومی سیزده دقیقه و سومی تقریباً دو ساعت و نیم بعد. **پس لرزه‌ها عمدتاً یک گسیختگی گسلی را نشان می‌دهند که تا حدود ۲۰ تا ۲۵ کیلومتری شرق کانون اصلی زلزله ادامه دارد.**



شکل ۳-پراکندگی پس لرزه‌های رخ داده که به سمت شرق متمایل شدند. EMSC, 2025

۵- مدل سازی حرکت منطقه با استفاده از ایستگاه های دائمی GNSS

از اهداف مهم در ایجاد شبکه ژئودینامیک اندازه‌گیری و تعیین تغییرات پوسته زمین در طول زمان می‌باشد. در این راستا با اندازه‌گیری‌های دائم GPS در ایستگاه‌های شبکه ژئودینامیک، پردازش و آنالیز نتایج می‌توانیم به شناخت کاملتری از وضعیت و حرکات پوسته زمین در 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 کاربرد دارد. از جمله این شبکه‌ها در منطقه تکتونیکی اوراسیا عربی می‌توان به شبکه ایستگاه های دائمی سازمان نقشه برداری کشور ایران و شبکه ایستگاه های دائمی ترکیه را نام برد که نقش بسزایی در مدلسازی حرکت تکتونیکی منطقه دارند. **مدل حرکت در منطقه ایران توسط سازمان نقشه برداری کشور تهیه شده** است که بر اساس آن جهت و نرخ حرکت و تغییرشکل مشخص است (شکل ۴).



شکل ۴- مدل سازی حرکت منطقه با استفاده از ایستگاه های دائمی GNSS

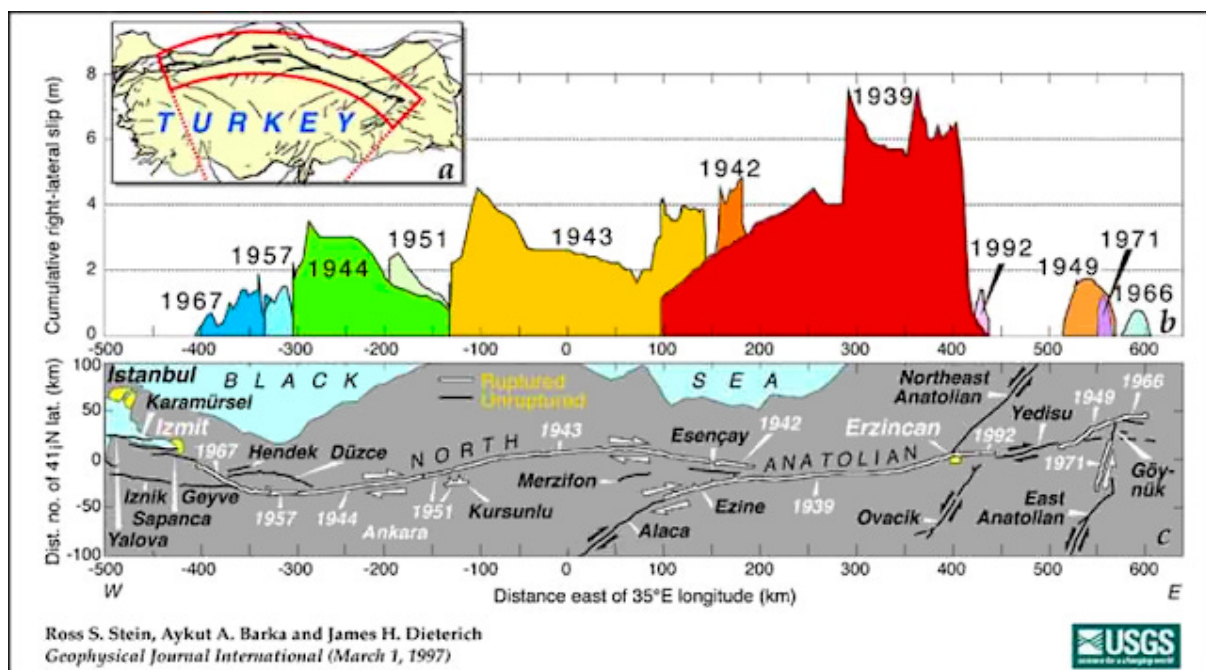
اگر چه آناتولی مرکزی در بسیاری از مطالعات به عنوان یک منطقه بدون تغییر شکل در نظر گرفته شده است، اما آناتولی و مناطق اطراف آن طیف گسترده‌ای از پدیده‌های تکتونیکی را شامل می‌شود، از جمله (گسل‌های آناتولی شمالی و شرقی)، برخورد قاره‌ها و کوه‌زایی بیتلیس-زاگرس، قفقاز، فروورانش (نوبیا، عربستان)، فشارش (قفقاز، دریای مرمهره)، گسترش (آناتولی غربی) و فرآیندهای متعدد در مقیاس کوچک (مک کنزی ۱۹۷۲؛ جکسون و مک کنزی ۱۹۸۴؛ تایماز و همکاران ۱۹۹۱؛ بارکا و Reilinger 1997؛ علاوه بر این، مطالعات اخیر ژئودتیک نشان می‌دهد که افزایش تدریجی سرعت به سمت غرب در امتداد NAFZ اتفاق افتاده است. بردارهای GPS توسط Reilinger و همکاران (۱۹۹۷)، مک کلو سکی و همکاران (۲۰۰۰)، و Reilinger و همکاران (۲۰۰۶) نشان می‌دهد که آناتولی شمالی در امتداد NAF به سمت غرب حرکت می‌کند. این حرکت صفحه اوراسیا منجر به فرار به سمت غرب صفحه آناتولی در امتداد دو گسل بزرگ NAF و EAF می‌گردد (شکل ۴).

میدان سرعت بدست آمده از مشاهدات GPS برای هر صفحه نسبت به اوراسیا نشان داده شده است. میدان سرعت نشان می‌دهد که بخش عمده و وسیعی از منطقه شامل صفحه عربستان در مجاورت مناطق زاگرس و ایران مرکزی ترکیه و دریای اژه با نرخ‌های ۲۰ تا ۳۰ میلی‌متر سال حرکتی در جهت خلاف عقربه‌های ساعت انجام می‌دهند. این حرکت نسبتاً سریع در چارچوب حرکت‌های نسبی (حرکت ۵ میلی‌متری آهسته صفحه‌های نوبیای اوراسیا و سومالی رخ می‌دهد). افزایش سرعت تا ۳۳ میلی‌متر در سال به سمت سیستم کمان و گودال هلینیک نشان می‌دهد که فروورانش در مدیترانه شرقی روند غالب دارد.

۵- تحلیل گسیختگی و حرکات پسا لرزه‌ای

چرخه زمین لرزه این قطعه گسل آناتولی شمالی که مسبب زلزله با بزرگای ۶٫۲ ترکیه بوده است عامل دو تغییر شکل در این منطقه شده-۱: تغییر شکل آبی سطح زمین: در قسمت بالای پوسته تا عمق ۱۰-۲۰ کیلومتر که دارای دمای کم - اصطکاک و شکننده است و به آن تغییر شکل هم لرزه‌ای می‌گویم -۲: تغییر شکل دوم: بلافاصله پس از وقوع زلزله مکانیسم آزاد شدن تنش به دلیل ویسکوزیته کم و دمای بالا در قسمت پایین یا شکل‌پذیر پوسته زمین فعال شده که منجر به تغییر شکل‌های پس لرزه‌ای در این قطعه گسلی شده. این سیکل با توجه به بزرگای زمین لرزه مربوط به یک دوره از چند دقیقه تا ماه‌ها یا سال‌ها پس از زلزله است که پوسته و گسل هر دو به حالت تغییرات تنش پوسته ناشی از زلزله تنظیم می‌شوند. در طول دوره پس لرزه‌ای حداقل دو فرآیند مشخص باعث ایجاد حرکت اضافی پوسته می‌شود. یکی شامل لغزش اضافی که معمولاً جزئی و در امتداد گسل رخ داده است و دوم مناطق عمیق تری از پوسته پایین‌تر از ۲۰ کیلومتر در پاسخ به تغییرات تنش پوسته جریان دارند. پس لرزه‌ها دنباله‌ای از زمین لرزه‌ها هستند که پس از وقوع شوک اصلی در یک گسل اتفاق می‌افتند پس لرزه‌ها در نزدیکی منطقه گسل که در آن گسیختگی اصلی اتفاق افتاده رخ می‌دهد و بخشی از "روند تنظیم مجدد" پس از لغزش اصلی در صفحه گسلی است. پس لرزه‌ها با گذشت زمان کمتر می‌شوند و می‌توانند برای روزها، هفته‌ها، ماه‌ها ادامه داشته باشند. وقوع پس لرزه‌ها پس از یک رخداد زمین لرزه بزرگ ناشی از به تعادل رسیدن و ثبات تنش تکتونیکی حاکم بر پوسته زمین پس از رخداد زمین لرزه اصلی است. پس لرزه‌ها به عبارتی باقی مانده انرژی است که از رخداد اصلی در زمین باقی مانده است. پس از یک زلزله بزرگ حرکات پوسته متوقف نمی‌شود و پس لرزه‌هایی به دنبال دارد که برخی از آنها آسیب‌زا هستند. لغزش مربوط به این پس لرزه‌ها را پس لغزش می‌نامند و ممکن است به صورت زمین لرزه‌های معمولی یا به صورت لغزش کند رخ دهد که احساس نمی‌شود.

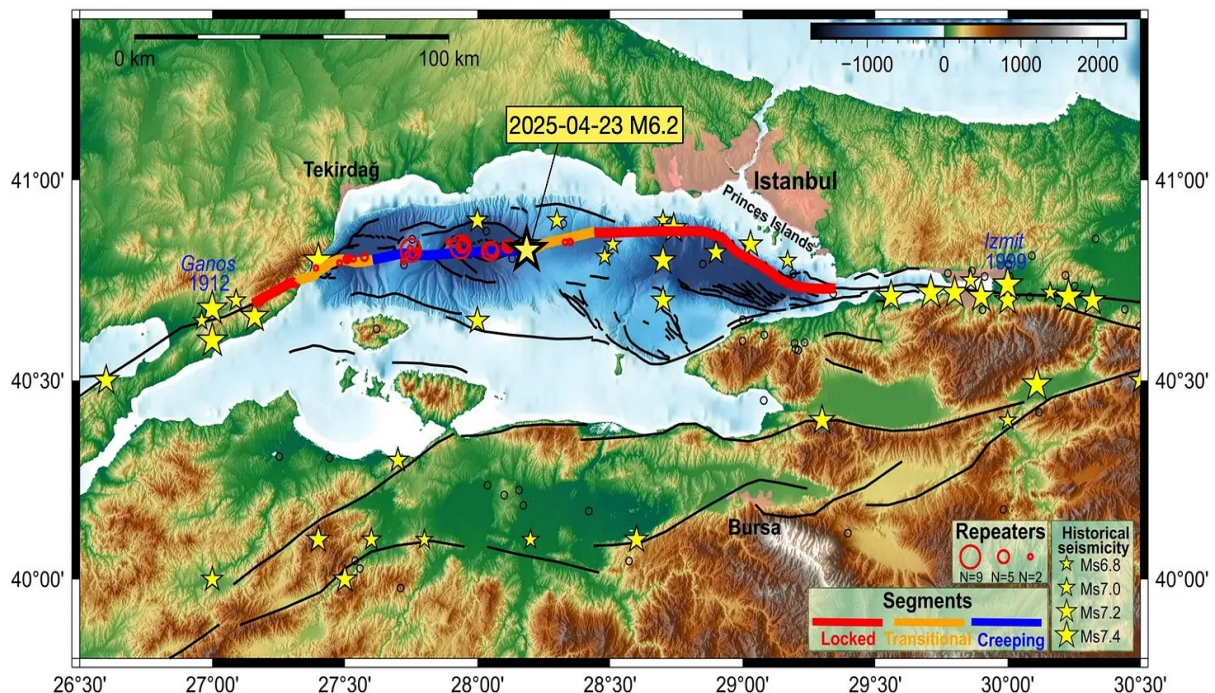
گسل آناتولی شمالی به طور گسترده ای مورد مطالعه قرار گرفته است، این گسل در طول قرن گذشته در یک سری زمین لرزه های بزرگ گسیخته شده است که این گسیختگی ها از شرق شروع شده به تدریج به سمت غرب حرکت می کند. این تحریک آشکار و انتقال تنش در سگمنت های مختلف گسل آناتولی شمالی بین زمین لرزه ها، کمک بزرگی به دانشمندان در درک چگونگی انتقال تنش توسط زلزله به گسل های مجاور ایفا کرده است. شکل ۵ در سال ۱۹۹۷ منتشر شده است. دو سال بعد، غربی ترین قسمت گسل در زلزله مرگبار Izmit ۷٫۶M 'گسیخته شد. البته، یکی از پیامدهای این انتشار زمین لرزه به سمت غرب این است که این الگو ممکن است با یک زلزله بزرگ در نزدیکی استانبول ادامه یابد.



شکل ۵- نمایش زمین لرزه های دومینویی بر روی گسل آناتولی شمالی، که از سال ۱۹۳۹ آغاز شد. منبع: استین و همکاران (۱۹۹۷).

در زیر دریای مرمره، برخی از گسل ها به طور فعال در حال خزیدن هستند - یعنی به طور پیوسته می لغزند. با استفاده از ایستگاه های GNSS و ابزارهای نصب شده در کف دریا در سراسر قسمت غربی دریا مستقیماً این حرکت را (۱۰ میلی متر در سال) مشاهده کرده اند (یاماموتو و همکاران، ۲۰۱۹). در مقابل، به نظر می رسد گسل مرمره در قسمت شرقی کاملاً قفل شده است. یک مطالعه لرزه ای که توسط (بکر و همکاران، ۲۰۲۳). انجام شده است نشان میدهد زمین لرزه های کوچک و هم بزرگ ناشی از لغزش مکرر در قسمت غربی رخ میدهد که باعث رها شدن تنش میگردد، ولی در قسمت شرقی این رفتار مشاهده نمی شود و تجمع تنش و قفل شدگی وجود دارد.

همانطوریکه در شکل ۶ مشاهده می گردد به نظر می رسد نقطه شروع زمین لرزه ۶٫۲M در لبه شرقی سگمنت خزنده بوده است (رنگ آبی) که نشان میدهد تجمع استرین در مرز عبور خزش/قفل شده گی بوده است. همچنین با توجه به پراکندگی پس لرزه ها گسیختگی به سمت شرق، و به سمت منطقه قفل شده ادامه پیدا کرده است. جایی که بیشترین تنش (استرس) انباشته شده است و این می تواند زنگ خطری برای زلزله استانبول باشد.

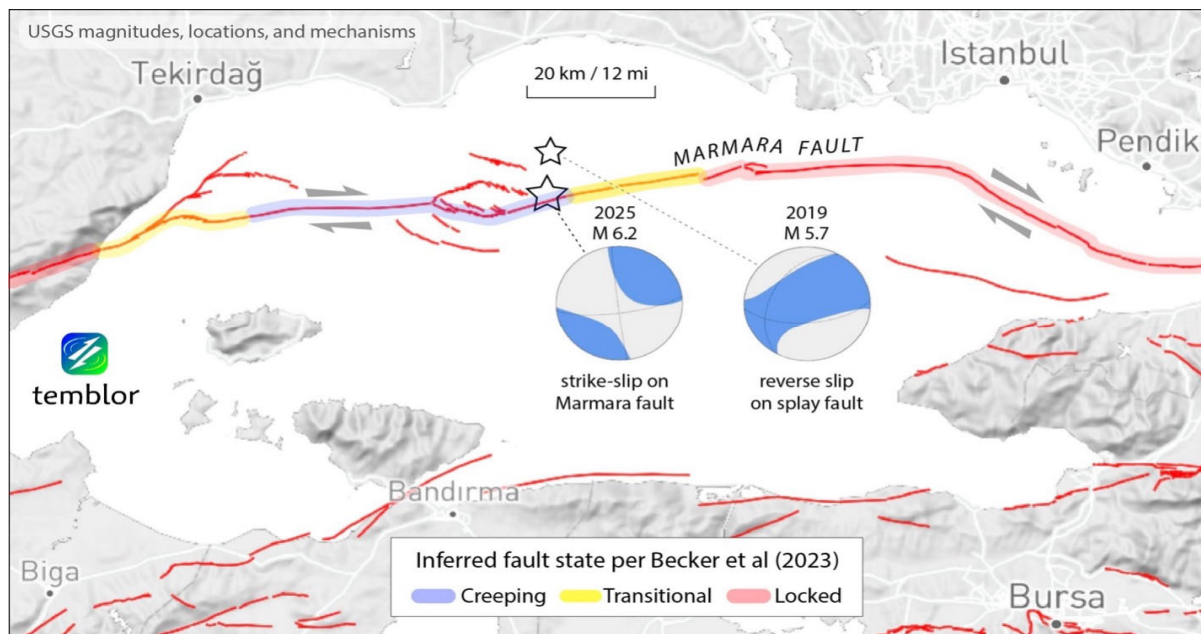


شکل ۶-دریای مرمره. دایره های قرمز تکرار کننده های لرزه ای را نشان می دهند. خزش (آبی)، قفل (قرمز) یا رفتار انتقالی (نارنجی) ، Hubbard2025

۶-انتقال و برهم کنش تنش استاتیک و دینامیک

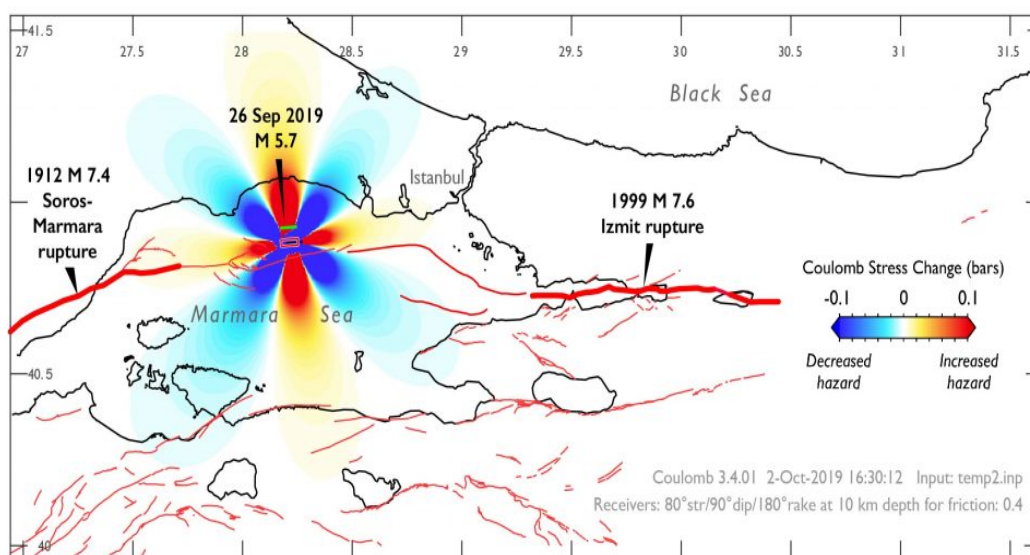
زمین لرزه ها می توانند با همدیگر بر هم کنش داشته باشند و این موضوع می تواند منجر به توالی زمین لرزه ها و خوشه بندی ورخ داد پس لرزه ها گردد. برانگیختگی تنش بدین صورت است که گسل ها به تنشی که از گسل ها یا زمین لرزه های مجاور دریافت می کنند پاسخ می دهند. حرکت بلوکهای دو طرف یک گسیختگی باعث ایجاد تغییر در تنش ایستایی محیط اطراف آن میشود. این تغییر تنش روی سطوح گیرنده اطراف گسیختگی دارای دو مولفه نرمال و برشی میشود. معیار کلمب یکی از معیارهای است که گسیخته شدن نو پدید و به جنبش در آمدن گسل ها ی قدیمی را در حال شکننده و در محیط الاستیک تحت تاثیر تنش کنترل می کند که تابع هر دو تنش نرمال و برشی اعمال شده روی سطوح گیرنده است.

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 تا صد کیلومتر افزایش یا کاهش دهد و بالقوه باعث ایجاد گسیختگی و زلزله یا تاخیر در زمان رخداد شود. برای این منظور نرخ بلند مدت تنش تکتونیکی 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 ببرد و بر عکس کاهش تنش باعث تاخیر در گسیختگی و زمان وقوع زلزله می شود(دوران آرامش).



شکل ۷- رویدادهای ۲۰۱۹ و ۲۰۲۵ ۸ کیلومتر از هم فاصله دارند، دو مکانیزم کانونی و نرخ لغزش مختلف. بکر و همکاران (۲۰۲۳)

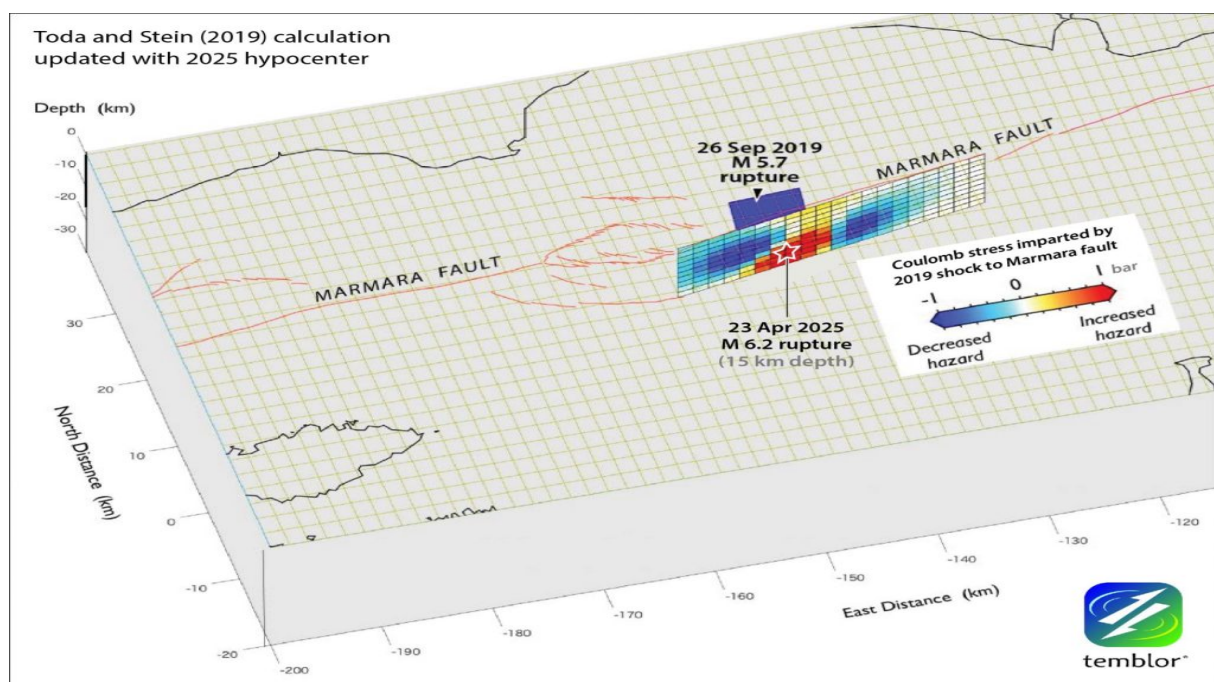
با توجه به شکل ۷ زمین لرزه ۵٫۷ ریشتری ۲۰۱۹ بر روی یک گسل با سازکار معکوس رخ داده است که فشاری را در امتداد سگمندی از گسل مرمره ایجاد کرده است. محاسبه تنش ناشی از زلزله ۵٫۷ سپتامبر ۲۰۱۹ به گسل مرمره نشان میدهد که سگمندی از این گسل به آستانه شکست نزدیک شده است که با محل زلزله اخیر تطابق دارد. شکل ۸



شکل ۸- تنش کولمب ناشی از زلزله ۵٫۷ سال ۲۰۱۹ (Toda and Stein, 2019).

۱۰- تحلیل رخداد

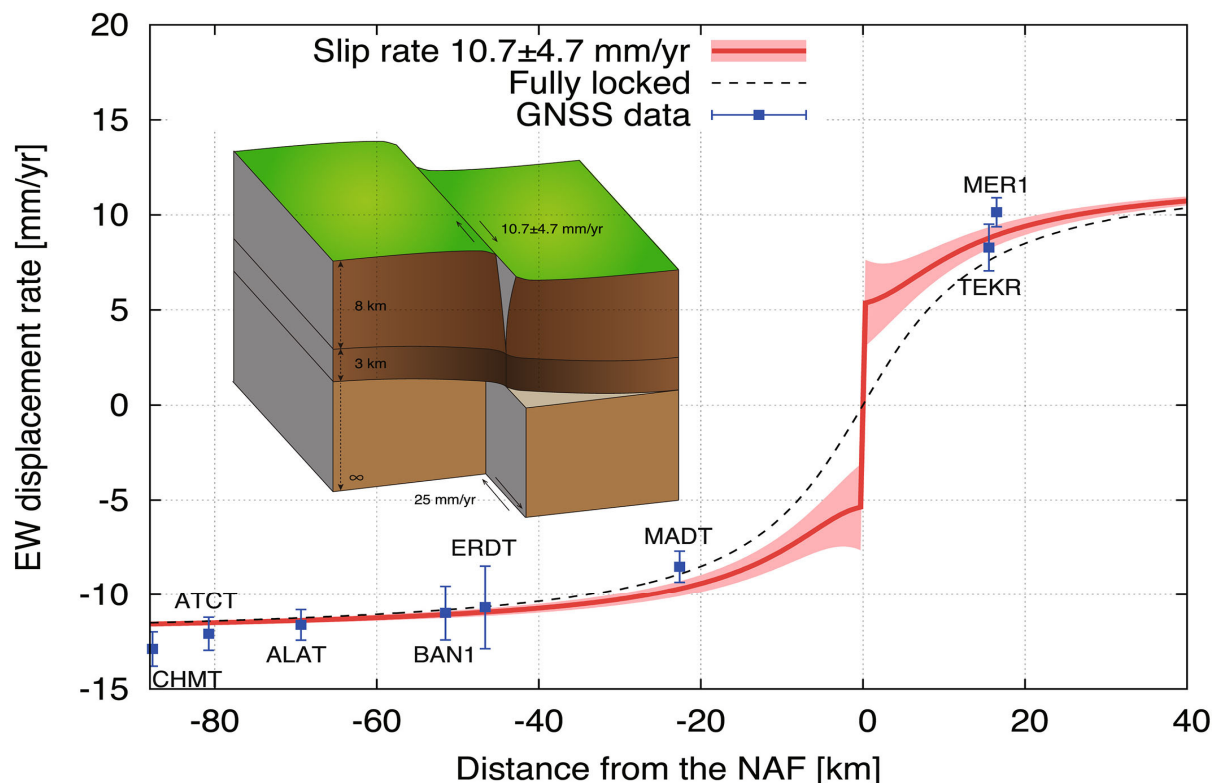
آنچه در زلزله ۲۰۲۵ ترکیه با بزرگای ۶٫۲ رخ داده است در اثر تجمع تنش فعال ناشی از حرکات صفحه تکتونیکی AR-EU در طول زمان و غلبه این تنش بر استحکام بلوک گسلی NAF و شکست آن (تنش برشی بر تنش ناشی از اصطکاک غلبه کرده) گسیختگی ایجاد و لغزش بر روی صفحه گسلی ثانویه انجام شده است. در این حالت انتقال تنش به سمت دم گسل تا ۰٫۲ بار و قسمت پایین و بالای پوسته منتقل شدند که با پراکندگی پس لرزه ها تطابق دارد. میزان تنش قبل از زلزله و آغاز گسیختگی بر روی این قسمت از گسل آناتولی شمالی ۱۴ مگا پاسکال می‌باشد. در این حالت تنش برشی بر تنش قبل از زلزله غلبه کرده و لغزش در صفحه گسل آناتولی شمالی رخ داده. افت تنش در این زمین لرزه ۱٫۵ مگا پاسکال بر آورد می‌گردد.



شکل ۹- تنش کولمب ناشی از زلزله ۵٫۷ سال ۲۰۱۹ و اثر آن بر گسل مرمره (افزایش تنش با رنگ قرمز مشخص است). (Toda & Stein, 2019)

همانطوریکه در شکل ۹ مشاهده می‌گردد منطقه ای که در آن زمین لرزه رخ داده است دارای نرخ تغییر شکل بالا در محدوده ۸۰ تا ۱۰۰ نانو استرین در سال می‌باشد و نقطه شروع گسیختگی زمین لرزه ۶٫۲M در لبه شرقی سگمنت خزنده (با نرخ ۱۰ میلیمتر در سال) شکل ۱۰ و در محل افزایش تنش انتقالی ناشی از زمین لرزه سال ۲۰۱۹ در مرز عبور خزش/قفل شده گی (عمق ۱۲ تا ۱۵ کیلومتر) بوده است. به عبارت دیگر ۲ عامل انتقال تنش-استرین بالا نقش اساسی در این رخ داد داشتند.

تنش منتقل شده توسط زلزله ۶۰۲ ریشتری ۲۰۲۵ به گسل های اطراف نشان می‌دهد که سگمنت های دورتر از انتهای گسیختگی به سمت شرق (نزدیک به استانبول) با توجه به پراکندگی پس لرزه ها به سمت شرق احتمالاً به آستانه شکست نزدیک شده اند که بایستی مورد توجه و پایش جدی قرار گیرد.



شکل ۱۰- نرخ خزش مشاهده شده گسل مرمره (بکر و همکاران، ۲۰۲۳)

اگر بازه تقریباً ۲۵۰ ساله بین زمین لرزه های ۱۵۰۹ و ۱۷۶۶ را به عنوان دوره بازگشت رویدادهایی با بزرگای ۷٫۴ در گسل مرمره در نظر بگیریم. آیا به زمان زلزله بزرگ بعدی رسیده ایم؟.

سوابق لرزه ای و دیرینه لرزه شناسی در اینجا و جاهای دیگر نشان می دهد که وقوع زمین لرزه بسیار نامنظم است، به استثنای گسل آلپ در نیوزیلند (بريمن و همکاران، ۲۰۱۲)، وقوع زمین لرزه تابع پارامترهای 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 محورهای اصلی آن .سرعت های نسبی، میدان تنش و لرزه خیزی موجود در منطقه کاملاً وابسته به فعالیت این گسل ها و خصوصیات دینامیکی آنها است. لذا ممکن است زلزله رخ دهد، اما لزوماً قریب الوقوع نیست.