

## شناسایی ویژگی‌های زلزله‌شناختی زمین‌لرزه‌های دوگانه ۲۳ آبان ۱۴۰۰ شمال غرب بندرعباس

حمید خسروی<sup>۱</sup>، مهدیه سفری<sup>۲</sup>، غلام جوان دلویی<sup>۳</sup>، آذر افشار<sup>۴</sup> و خالد حسامی<sup>۵\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری زلزله‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

<sup>۲</sup> کارشناسی ارشد زلزله‌شناسی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

<sup>۴</sup> کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

<sup>۵</sup> استادیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۰۶، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۴)

### چکیده

امروزه، ثبت، پردازش و شناسایی پارامترهای زمین‌لرزه‌های مستقل بزرگ‌تر از  $M_w = 4$  در گستره فلات ایران با استفاده از تجهیزات و سخت‌افزارهای پیشرفته، نرم‌افزارها و متخصصان باتجربه، در کمتر از ۱۰ دقیقه به‌صورت خودکار به‌آسانی انجام می‌شود. زمین‌لرزه‌های دوگانه ۲۳ آبان ۱۴۰۰، با اختلاف زمانی اندک (کمتر از ۹۰ ثانیه) در فاصله نزدیک به هم به‌ترتیب با بزرگای ۶/۱ و ۶/۴ در شمال غرب بندرعباس به‌وقوع پیوست. پارامترهای مکان، زمان و بزرگای رویداد اول و پارامترهای سازوکار کانونی آن به کمک نرم‌افزارهای نیمه‌خودکار یا خودکار امکان‌پذیر شد. با وجود این، تداخل فازهای لرزه‌ای رویداد اول و رویداد دوم در ایستگاه‌های دورتر، چالشی جدی برای محاسبه خودکار و نیمه‌خودکار موقعیت مکان، زمان، بزرگای و همچنین پارامترهای سازوکار کانونی رویداد دوم ایجاد کرده است. در این مطالعه با تلفیق لرزه‌نگاشت‌ها و شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری داخل کشور، پارامترهای این زمین‌لرزه دوگانه و دو پس‌لرزه اصلی آن با بزرگای ۵/۱ و ۵/۴ به دست آمده است. سازوکار کانونی این چهار رویداد نیز بر اساس روش‌های قطبش اولین رسید موج P، نسبت دامنه موج‌های P و S و مدل‌سازی تانسور گشتاور لرزه‌ای محاسبه شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد با توجه به مکان و سازوکارهای محاسبه‌شده برای زمین‌لرزه دوگانه و دو پس‌لرزه اصلی، فعالیت گسل پی‌سنگی هندون با شیب به سمت جنوب مسبب زمین‌لرزه‌های دوگانه ۲۳ آبان ۱۴۰۰ و دو پس‌لرزه اصلی آن در شمال غرب بندرعباس است.

**واژه‌های کلیدی:** زمین‌لرزه دوگانه، بندرعباس، سازوکار کانونی، گسل هندون، مدل‌سازی شکل موج

## ۱ مقدمه

در ساعت ۱۵:۳۷:۰۴ عصر روز یکشنبه ۲۳ آبان‌ماه ۱۴۰۰ هجری شمسی، مطابق با ساعت ۱۲:۰۷:۰۴ (وقت جهانی) روز ۱۴ نوامبر ۲۰۲۱ میلادی زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۶/۱ در مقیاس محلی در ۶۰ کیلومتری شمال غرب بندرعباس به وقوع پیوست و خسارات سازه‌ای به نسبت وسیعی را در منطقه به بار آورد. کمتر از دو دقیقه بعد از آن، رویداد دوم در همان منطقه با بزرگای ۶/۴ در مقیاس محلی رخ داد. وقوع دو رویداد در فاصله زمانی و مکانی اندک، مؤید دوگانه بودن این زمین‌لرزه است. این موضوع، یادآور زمین‌لرزه دوگانه ۲۱ مرداد ۱۳۹۱ ورزقان-اهر با بزرگاهای ۶/۴ و ۶/۱ (قدس و همکاران، ۲۰۱۵) در شمال غرب ایران و زمین‌لرزه‌های ۵ فروردین ۱۳۸۵ فین با بزرگاهای ۵/۸ و ۵/۴ (ایلاعی و همکاران، ۱۳۸۹) در شمال بندرعباس است؛ از این رو بررسی دقیق مشخصات زمین‌لرزه‌های دوگانه در فلات ایران با توجه به اندازه زمین‌لرزه‌های دوگانه فوق که به احتمال بیانگر فعالیت گسله یا گسله‌های پی‌سنکی در منطقه وقوع این رخدادها است، از اهمیت زیادی برخوردار است.

از اهداف اصلی پژوهش حاضر، بررسی دقیق فعالیت گسله‌های شمال بندرعباس در محدوده زاگرس شرقی بر اساس پردازش و تحلیل لرزه‌نگاشت‌ها و شتاب‌نگاشت‌های زمین‌لرزه دوگانه ۲۳ آبان ۱۴۰۰ و دو پس‌لرزه اصلی آن است. با توجه به وجود سری نمکی هرمز در قاعده پوشش رسوبی زاگرس شرقی و نبود اثر سطحی حاصل از گسیختگی زمین‌لرزه‌ها در سطح، ردیابی گسله‌های زاگرس

شرقی با استفاده از شواهد زمین‌شناسی دشوار است؛ بنابراین ثبت، پردازش و تحلیل پارامترهای چشمه زمین‌لرزه‌های ۲۳ آبان ۱۴۰۰ اهمیت زیادی برای شناخت مطمئن‌تر ویژگی‌های لرزه‌خیزی و لرزه‌زمین‌ساخت زاگرس شرقی فراهم خواهد کرد.

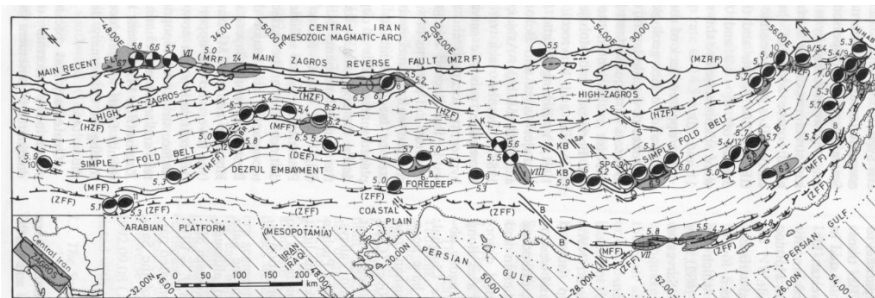
## ۲ زمین‌شناسی منطقه

کمر بند زاگرس با راستای شمال غرب-جنوب شرق به طول حدود ۱۶۰۰ کیلومتر از کوه‌های تاوروس در شمال شرق ترکیه تا تنگه هرمز ادامه دارد (شکل ۱). حد شمال شرقی کمر بند زاگرس با گسل معکوس اصلی زاگرس مشخص شده است که پهنه سندج-سیرجان را از کوه‌های زاگرس جدا می‌کند (اشتوکلین، ۱۹۷۴ و بربریان، ۱۹۹۵). تغییر شکل‌های ایجاد شده در کمر بند زاگرس در واقع ناشی از همگرایی نسبی بین عربستان و ایران مرکزی (اوراسیا) از اواخر کرتاسه است. چین‌خوردگی و گسلش در رسوبات عهد حاضر و همچنین وقوع زمین‌لرزه‌های مکرر بر ادامه حرکات کوهزایی ناشی از همگرایی کنونی دو صفحه ایران مرکزی (اوراسیا) و عربستان با آهنگی حدود  $9 \pm 2$  میلیمتر بر سال در زاگرس (در طول جغرافیایی بندرعباس) دلالت دارند (حسامی و همکاران، ۲۰۰۶). کمر بند زاگرس شامل مجموعه‌ای از گسل‌های معکوس و تاقدیس‌های نزدیک به هم است که سطح محوری آنها بیشتر با روند شمال غربی-جنوب شرقی است. حد شرقی زاگرس با پهنه گسلی زندان-میناب-پالامی محدود می‌شود و آن را از رشته کوه‌های مکران جدا می‌کند. حد جنوبی و جنوب

نمکی کشور در همین منطقه قرار دارد. تزریق نمک در میان رسوب‌ها، اغلب لایه‌های فوقانی را شکافته است و در سطح زمین، توپوگرافی خاصی را به‌وجود آورده‌است.

بر مبنای مدل ارائه‌شده برای زاگرس (جکسون، ۱۹۸۰)، پوسته در مراحل اولیه تشکیل حوضه زاگرس دچار کشیدگی و نازک‌شدگی شده که با تشکیل گسل‌های نرمال در پی‌سنگ همراه شده است. با گذشت زمان، گسل‌های نرمال پی‌سنگی در زیر رسوبات دریایی (پوشش رسوبی) با ضخامت ۵ تا ۱۲ کیلومتر دفن شده‌اند. وجود ضخامت از رسوبات تبخیری (سازند هرمز) روی پی‌سنگ زاگرس، لایه جداکننده‌ای بین پی‌سنگ و پوشش رسوبی ایجاد کرده است. همگرایی دو صفحه عربستان و ایران باعث شد گسل‌های نرمال پی‌سنگی به‌صورت گسل‌های معکوس فعال شوند. در این فرایند، فعالیت گسل‌های معکوس با ضخیم‌شدگی نسبی در پی‌سنگ همراه بوده و هم‌زمان سبب ایجاد چین‌خوردگی شدید در پوشش رسوبی بالایی شده است. با ادامه همگرایی در شمال شرق زاگرس (جنوب غرب راندگی اصلی زاگرس) بر اثر فشار مماسی ناشی از

غربی آن تا بستر خلیج فارس ادامه می‌یابد و بعضی از جزایر را شامل می‌شود. روند چین‌خوردگی‌های زاگرس هنگامی که به فارس می‌رسد (از نصف‌النهار لار به سمت شرق)، شرقی-غربی می‌شود و آنگاه در شمال تنگه هرمز به علت پیش‌آمدگی راس موسندام روند چین‌ها بیشتر به سوی شرق-شمال شرق متمایل می‌شود و کمان فارس به‌صورت قوسی با انحنای شمالی درمی‌آید (شکل ۱). بیشتر چین‌ها در کمربند زاگرس نامتقارن هستند و یال‌های پرشیب تاقدیس‌ها در پهلوی جنوب غربی آن قرار دارند. گاهی دگرشکلی زیاد موجب شده است پهلوی جنوب غربی تاقدیس‌ها برگشته شود. در محل یال برگشته یا سطح محوری تاقدیس‌ها، راندگی‌هایی تشکیل شده است. اغلب راندگی‌های زاگرس شیبی به سمت شمال شرق دارند. از طرفی، شدت تغییر شکل‌ها به سمت شمال شرق افزایش می‌یابد و گسلش نقش مهم‌تری در تکامل ساختاری پیدا می‌کند. علاوه بر تغییر جهت محورها در ناحیه فارس، دخالت نیروهای شناوری به‌صورت تزریق نمک (دی‌پایر نمکی) ویژگی خاصی به کوه‌های زاگرس در این منطقه بخشیده است، به‌گونه‌ای که بزرگ‌ترین تجمع دی‌پایرهای



شکل ۱. حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های روی داده در امتداد گسل جبهه کوهستان (MFF) و سایر گسل‌های تراستی فعال در زاگرس (بربریان، ۱۹۹۵). همان‌طور که مشاهده می‌شود، گسل جبهه کوهستان در شرق گسل کازرون فعالیت لرزه‌خیزی کمتری نسبت به غرب گسل کازرون دارد. لرزه‌خیزی در جنوب شرق زاگرس بر جبهه توپوگرافی ۲۰۰۰ متر، واقع در ۱۰۰ کیلومتری شمال MFF تمرکز دارد.

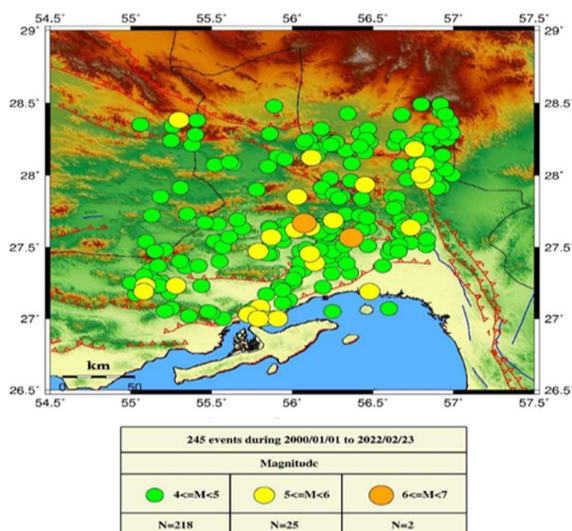
کشور است. درباره زمین‌لرزه‌های تاریخی در منطقه شمال بندرعباس اطلاعات کافی در دست نیست؛ با این حال در صد و بیست سال اخیر، ۳۶۰ رویداد لرزه‌ای با بزرگای بیش از ۵ در منطقه هرمزگان رخ داده است (بانک زمین‌لرزه‌های ایران، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، [www.epp.iiees.ac.ir](http://www.epp.iiees.ac.ir)). در تاریخ ۱۳۸۵/۰۱/۰۵ پنج زمین‌لرزه در منطقه فین (شمال بندرعباس) با بزرگای بیش از ۴/۵ رخ داده است. ابتدا در ساعت ۱۱:۵۸ به وقت محلی، زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۵/۸ و به دنبال آن زمین‌لرزه‌هایی در ساعت ۱۴:۲۵ (۵/۴)، ۱۴:۳۰ (۵/۲)، ۱۵:۳۳ (۴/۷) و ۱۶:۴۳ (۴/۶) به وقوع پیوست. ایلماغی و همکاران (۱۳۸۹) با مطالعه زمین‌لرزه‌های ۱۳۸۵/۰۱/۰۵ و بررسی ممان لرزه‌ای زمین‌لرزه اصلی و پس‌لرزه‌ها، این موضوع را مطرح کردند که ممکن است چهار زمین‌لرزه رخ داده پس از زمین‌لرزه اول، پس‌لرزه‌های آن نباشند، اما با توجه به اینکه این زمین‌لرزه‌ها در بازه زمانی و مکانی زمین‌لرزه اول رخ داده‌اند و از طرفی، سازوکارهای آنها با زمین‌لرزه اول یکسان است، به‌نظر می‌رسد زمین‌لرزه‌های ۱۳۸۵/۰۱/۰۵ منطقه فین در شمال بندرعباس همانند زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه در پژوهش حاضر از نوع زمین‌لرزه چندگانه باشند؛ از این رو می‌توان چنین استنباط کرد که وقوع زمین‌لرزه‌های چندگانه، ویژگی اصلی لرزه‌خیزی منطقه جنوب شرقی زاگرس باشد. در شکل ۲ زمین‌لرزه‌هایی نشان داده شده است که بزرگای بیش از ۴ دارند و از ۲۰۰۰/۰۱/۰۱ تا ۲۰۲۲/۰۲/۲۳ ثبت شده‌اند.

ایران مرکزی، پوشش رسوبی روی سازند هرمز می‌لغزد و چین می‌خورد. این چین‌خوردگی به تدریج در مقاطع مختلف زمانی به سمت جنوب غرب مهاجرت می‌کند. این عمل که جداگانه و مستقل از پی‌سنگ صورت می‌گیرد، باعث شده است تغییر شکل‌های ایجادشده در پی‌سنگ با پوشش رسوبی مطابقت نداشته باشد.

در بسیاری از مقاطع ساختاری ارائه شده برای زاگرس، تنها صفحات با شیب رو به شمال شرق حاصل از سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های روی داده در منطقه ترسیم شده است (بربریان، ۱۹۹۵). به عبارت دیگر، در بیشتر حالت‌ها، آن دسته از صفحات کمکی را صفحه گسلی انتخاب کرده‌اند که به دور از صفحه عربستان شیب دارند. دلیل این انتخاب آن است که شیب گسل‌های نرمال که در یک حاشیه قاره‌ای غیرفعال (تحت کشش) ایجاد می‌شوند، بیشتر به سمت اقیانوس تمایل دارد و از آنجا که به‌نظر می‌رسد گسل‌های معکوس زاگرس در نتیجه فعالیت مجدد ناشی از همگرایی بین عربستان و ایران ایجاد شده باشند، انتخاب صفحات کمکی با شیب به سمت شمال شرق منطقی به‌نظر می‌رسد. با این وصف، در برخی از مقاطع ارائه‌شده برای پی‌سنگ زاگرس، به احتمال وجود گسل‌های معکوس لرزه‌زا با شیب به سمت جنوب غرب نیز اشاره شده است (نی و برزننگی، ۱۹۸۶ و تاتار و همکاران، ۲۰۰۴).

### ۳ لرزه‌خیزی

استان هرمزگان و مناطق همجوار آن با داشتن گسل‌های جنب و بنیادی یکی از لرزه‌خیزترین مناطق



شکل ۲. لرزه‌خیزی دو دهه اخیر منطقه زاگرس شرقی.

#### ۴ روش تحقیق و داده‌ها

بر اساس تعریف آستیز و کاناموری (۱۹۸۴) زمین‌لرزه دوگانه به زمین‌لرزه‌ای گفته می‌شود که در آن دو رویداد لرزه‌ای به فاصله مکانی زیر ۱۰۰ کیلومتر، فاصله زمانی کمتر از ۳ سال و اختلاف بزرگای کمتر از ۰/۲ واحد از یکدیگر رخ دهند. زمین‌لرزه دوگانه ۲۳ آبان ۱۴۰۰ شمال غرب بندرعباس اولین زمین‌لرزه دوگانه دستگاهی است که با اختلاف زمانی کمتر از ۲ دقیقه در ایران رخ داده است. در چنین مواردی اصولاً با دو مشکل اساسی مواجه هستیم: (۱) اگر زمین‌لرزه‌ها به فاصله زمانی اندکی از هم رخ دهند، تفکیک شکل موج‌ها از یکدیگر سخت می‌شود و به همین دلیل سامانه‌های پردازش خودکار، توانایی تشخیص فازهای زمین‌لرزه دوم را ندارند. در این مطالعه چنین مشکلی در تعیین محل زمین‌لرزه دوم وجود داشت به طوری - که در این زمین‌لرزه در ایستگاه‌های با فاصله بیش از ۱۰۰ کیلومتر، شکل موج زمین‌لرزه دوم در شکل موج

زمین‌لرزه اول ادغام شده است. (۲) به دلیل تداخل شکل موج‌ها، سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها را از برخی روش‌های متداول نمی‌توان حل کرد و باید همه روش‌های حل سازوکار را بررسی کرد تا به نتیجه قابل اعتماد رسید.

برای حل مشکلات پیش رو در شناسایی سازوکار کانونی و تعیین محل دقیق آنها، در این پژوهش سعی شده است زمین‌لرزه دوگانه شمال غرب بندرعباس با تأکید بر دو رهیافت زیر بررسی شود:

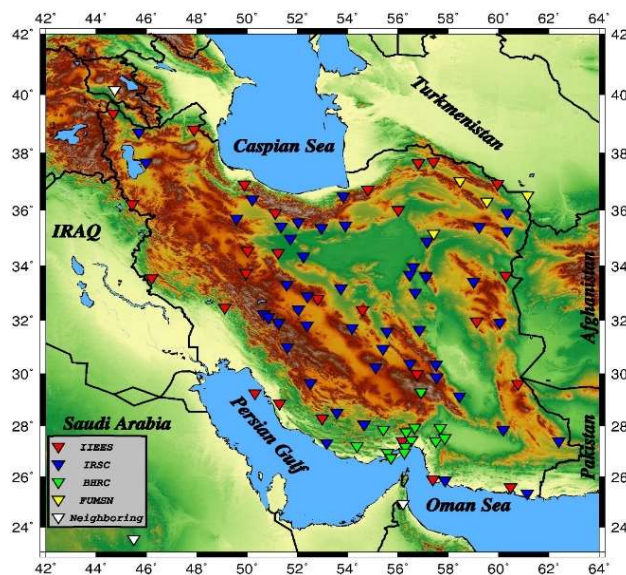
(۱) با تلفیق لرزه‌نگاشت‌های ثبت شده در شبکه باندپهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIIES)، شبکه لرزه‌نگاری کشوری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IRSC)، شبکه لرزه‌نگاری باندپهن دانشگاه فردوسی مشهد (FUMSN)، شبکه شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (BHRC) و داده‌های برخی از ایستگاه‌های کشورهای پیرامون، سعی شده است داده‌ها پوشش کاملی از

فردوسی مشهد، چهارده ایستگاه شبکه شتاب‌نگاری مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی و همچنین چهار ایستگاه منطقه‌ای استفاده شده است (شکل ۳). در این راستا، نخست داده‌های شبکه شتاب‌نگاری تصحیح و سپس همه داده‌های شبکه‌های مورد استفاده جهت پردازش به قالب mseed تبدیل شدند. برای مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها از مدل سرعتی پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله ([www.epp.iices.ac.ir](http://www.epp.iices.ac.ir)) استفاده شده است. نتیجه محاسبات تعیین محل و بزرگای چهار زمین‌لرزه مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است.

پرتوهای منتشرشده از رویداد لرزه‌ای را داشته باشد. برای حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها با توجه به زمین‌لرزه مدنظر و محدودیت‌های آن، از روش‌های مختلفی همچون قطبش اولین رسید موج P، نسبت دامنه موج‌های S و P و همچنین مدل‌سازی شکل موج برای حل تانسور گشتاور لرزه‌ای استفاده شده است. برای مکان‌یابی زمین‌لرزه‌ها در این مطالعه، از داده‌های لرزه‌ای ثبت‌شده در بیست و هشت ایستگاه لرزه‌نگاری شبکه باندپهن پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، چهل و هشت ایستگاه شبکه لرزه‌نگاری کشوری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، سه ایستگاه شبکه لرزه‌نگاری باندپهن دانشگاه

جدول ۱. مشخصات زمین‌لرزه‌های بررسی‌شده در این مطالعه.

نبرد آزموتی	RMS	بزرگا	عمق (Km)	طول جغرافیایی (°E)	عرض جغرافیایی (°N)	زمان
۴۹	۰/۷	۶/۱	۱۴	۵۶/۰۶	۲۷/۶۳	۲۰۲۱/۱۱/۱۴ ۱۲:۰۷:۰۴
۸۹	۰/۸	۶/۴	۱۶	۵۶/۲۶	۲۷/۵۶	۲۰۲۱/۱۱/۱۴ ۱۲:۰۸:۳۸
۸۶	۰/۷	۵/۱	۱۴	۵۶/۱۵	۲۷/۶۳	۲۰۲۱/۱۱/۱۵ ۱۳:۳۶:۱۱
۸۶	۰/۷	۵/۲	۱۵	۵۶/۲۵	۲۷/۶۴	۲۰۲۱/۱۲/۲۷ ۰۷:۳۱:۵۵



شکل ۳. ایستگاه‌های لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری استفاده‌شده در این مطالعه.

۵ مکان‌یابی و سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها

۱-۵ زمین‌لرزه ۲۰۲۱/۱۱/۱۴ ساعت ۱۲:۰۷:۰۴

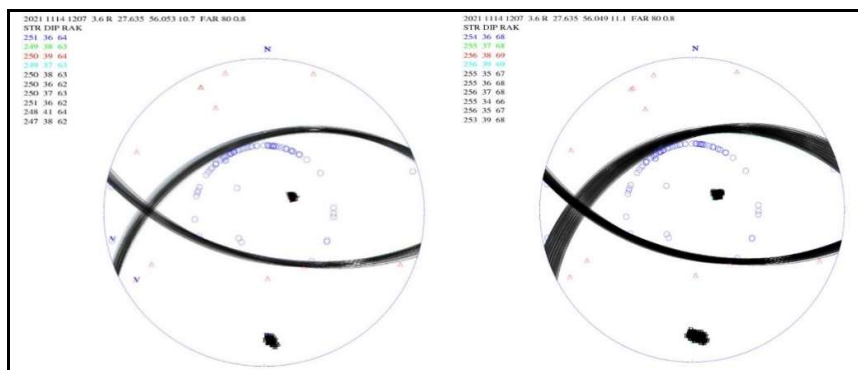
برای مکان‌یابی این زمین‌لرزه از نرم‌افزار SEISAN استفاده شده است. با توجه به اینکه برای این زمین‌لرزه فقط اولین رسید موج P را به‌وضوح می‌توان تشخیص داد، برای حل سازوکار کانونی، از روش قطبش اولین رسید موج P استفاده شد. برای افزایش دقت حل سازوکار کانونی از نسبت دامنه نیز استفاده شد که نتایج آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

مقایسه مشخصات محاسبه‌شده برای زمین‌لرزه اول با گزارش سایر مراکز علمی در جدول ۲ ارائه و در شکل ۵ نشان داده شده است.

۲-۵ زمین‌لرزه ۲۰۲۱/۱۱/۱۴ ساعت ۱۲:۰۸:۳۸

برای مطالعه این زمین‌لرزه ابتدا با توجه به اختلاف زمانی بین زمان رسید موج دو زمین‌لرزه، شکل موج مربوط به زمین‌لرزه دوم از زمین‌لرزه اول تفکیک و سپس با استفاده از شکل موج جدا شده، زمین‌لرزه دوم مکان‌یابی شد.

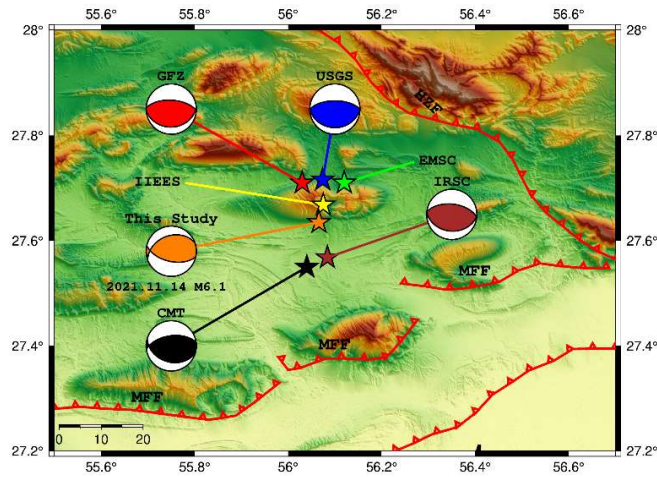
از آنجاکه قطبش موج P زمین‌لرزه دوم را به‌آسانی نمی‌توان تشخیص داد، برای حل سازوکار آن، از روش مدل‌سازی شکل موج در نرم‌افزار ISOLA، تانسور گشتاور لرزه‌ای محاسبه شده است. هنگام مدل‌سازی شکل موج، فیلترهای میان‌گذر متناسب با فاصله رومرکزی برای هر ایستگاه در نظر گرفته شده است (شکل ۶). مشخصات سازوکار کانونی این زمین‌لرزه در شکل ۷ نشان داده شده است.



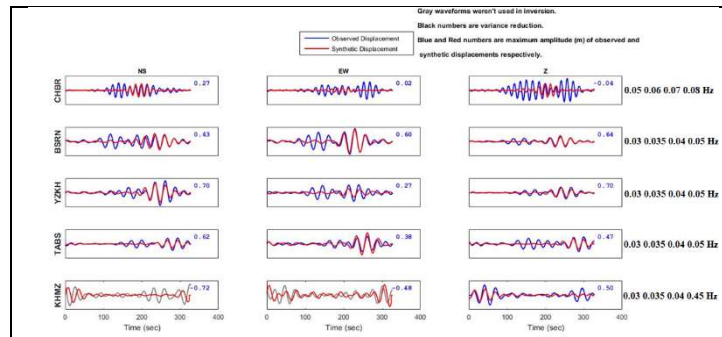
شکل ۴. حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه ۲۰۲۱/۱۱/۱۴ ساعت ۱۲:۰۷:۰۴ با استفاده از ۸۹ قطبش (سمت راست) و با استفاده از قطبش و نسبت دامنه (سمت چپ).

جدول ۲. مقایسه موقعیت و سازوکار کانونی گزارش‌شده زمین‌لرزه ۲۰۲۱/۱۱/۱۴ ساعت ۱۲:۰۷:۰۴.

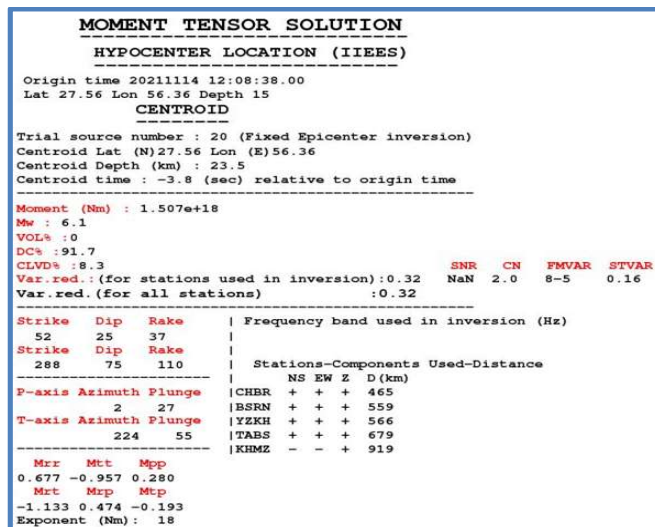
	عرض جغرافیایی (°N)	طول جغرافیایی (°E)	عمق (Km)	بزرگا	امتداد (°)	شیب (°)	زاویه لغزش (°)
USGS	۲۷/۷۱۶	۵۶/۰۷۴	۹	۶/۰	۹۱	۲۷	۹۱
GFZ	۲۷/۷۱۰	۵۶/۰۳۰	۱۰/۰	۶/۰	۸۴	۲۸	۸۲
EMSC	۲۷/۷۱۰	۵۶/۱۲۰	۱۰/۰	۶/۰	---	---	---
CMT	۲۷/۵۵۰	۵۶/۰۴۰	۱۲/۰	۶/۰	۱۰۶	۳۵	۱۱۰
IRSC	۲۷/۵۶۸	۵۶/۰۸۴	۲۰/۰	۶/۲	۹۴	۳۴	۸۹
IIIES	۲۷/۶۶۸	۵۶/۰۷۵	۱۴/۰	۶/۳	---	---	---
این مطالعه	۲۷/۶۳۵	۵۶/۰۶۶	۱۴	۶/۱	۱۰۳	۵۷	۱۱۰



شکل ۵. موقعیت و سازوکار کانونی زمین‌لرزه ۲۰۲۱/۱۱/۱۴ ساعت ۱۲:۰۷:۰۴ و مقایسه آن با گزارش سایر مراکز لرزه‌نگاری داخلی و خارجی.



شکل ۶. شکل موج واقعی و شبیه‌سازی شده زمین‌لرزه ۲۰۲۱/۱۱/۱۴ ساعت ۱۲:۰۸:۳۸.

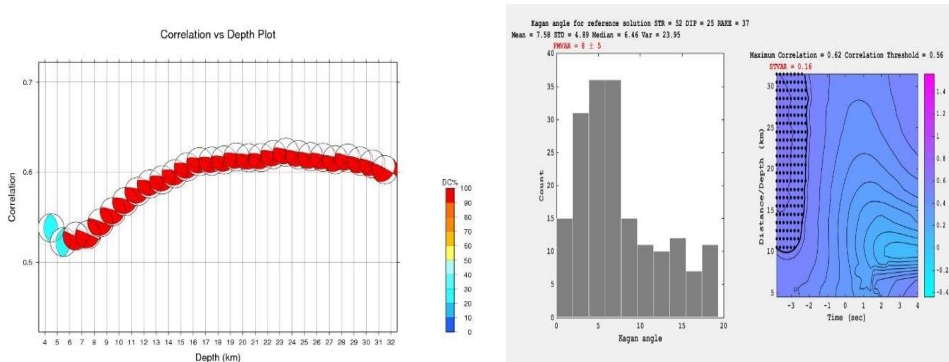


شکل ۷. محاسبه سازوکار کانونی زمین‌لرزه ۲۰۲۱/۱۱/۱۴ ساعت ۱۲:۰۸:۳۸ با استفاده از مدل‌سازی شکل موج و حل تانسور گشتاور لرزه‌ای.



نشان‌دهنده حل مناسب نیست و همیشه باید همراه با سایر شاخص‌ها برای ارزیابی کیفیت حل استفاده شود. پس ضروری است شاخص‌های دیگری مدنظر قرار گیرد (زاهدانیک و سوکوس، ۲۰۱۳) که از جمله آنها می‌توان به شاخص تغییرپذیری سازوکار کانونی ( $FMVAR < 30^\circ$ )، شاخص تغییرپذیری فضا-زمان ( $STVAR < 0.3$ )، عدد وضعیت ( $C.N. < 10$ ) و مقدار همبستگی بین شکل موج‌های تجربی و مصنوعی ( $Correlation > 0.6$ ) اشاره کرد. در شکل ۸ نمودارهای خروجی این پارامترها ارائه شده است. برای مقایسه، موقعیت رومرکزی و سایر پارامترهای محاسبه‌شده زمین‌لرزه دوم و گزارش سایر مراکز علمی در جدول ۳ و شکل ۹ ارائه شده است.

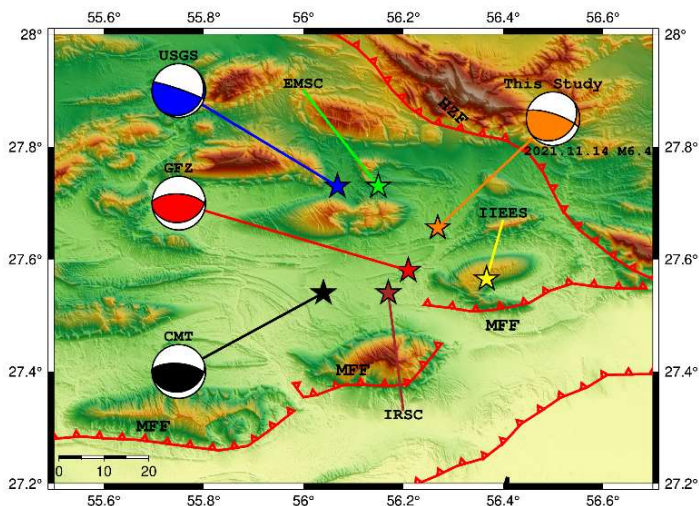
برای اعتبارسنجی و انتخاب سازوکار مناسب زمین‌لرزه در نرم‌افزار ISOLA باید یک سری پارامترها را در نظر داشت. کمیت واریانس (Var) یکی از شاخص‌های رایج برای اعتبارسنجی حل سازوکار است که البته دو محدودیت دارد: الف) واریانس معیاری جهانی برای تطابق شکل موج است، اما ممکن است در ایستگاه‌هایی با دامنه‌های بزرگ که معمولاً مناسب‌ترین هستند، سوگیری داشته باشد. به عبارت دیگر، ممکن است به دلیل وجود شکل موج‌های نامناسب در برخی ایستگاه‌ها، واریانس مقدار زیادی داشته باشد؛ ب) زمانی که از تعداد کمی ایستگاه در وارون‌سازی استفاده شود، واریانس ممکن است بسیار بزرگ شود؛ بنابراین مقدار بزرگ واریانس



شکل ۸. خروجی پارامترهای حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه ۲۰۲۱/۱۱/۱۴ ساعت ۱۲:۰۸:۳۸.

جدول ۳. مقایسه موقعیت و سازوکار کانونی زمین‌لرزه ۲۰۲۱/۱۱/۱۴ ساعت ۱۲:۰۸:۳۸.

	عرض جغرافیایی (°N)	طول جغرافیایی (°E)	عمق (Km)	بزرگا	امتداد (°)	شیب (°)	زاویه لغزش (°)
USGS	۲۷/۷۳۰	۵۶/۰۶۸	۱۰	۶/۴	۴۱	۱۲	۲۲
GFZ	۲۷/۵۸	۵۶/۲۱	۱۰	۶/۱	۷۹	۲۸	۷۷
EMSC	۲۷/۷۳	۵۶/۱۵	۱۰	۶/۳	---	---	---
CMT	۲۷/۵۴	۵۶/۰۴	۱۲/۹	۶/۱	۷۶	۲۵	۷۳
IRSC	۲۷/۵۴	۵۶/۱۷	۱۰	۶/۳	---	---	---
IIIES	۲۷/۵۶۵	۵۶/۳۶۷	۱۵	۶/۴	---	---	---
این مطالعه	۲۷/۶۵۶	۵۶/۲۶۹	۱۶	۶/۴	۵۵	۲۵	۴۰



شکل ۹. موقعیت و سازوکار کانونی محاسبه شده زمین لرزه ۲۰۲۱/۱۱/۱۴ ساعت ۱۲:۰۸:۳۸ و مقایسه آن با گزارش سایر مراکز لرزه نگاری.

۶ پس لرزه های ۲۰۲۱/۱۱/۱۵ و ۲۰۲۱/۱۲/۲۷

برای حل سازوکار کانونی این پس لرزه ها پس از مکان یابی در نرم افزار SEISAN، از روش قطبش اولین رسید موج P و برای افزایش دقت حل سازوکارهای کانونی از نسبت دامنه موج های P و S استفاده شده است. موقعیت رومرکزی به دست آمده برای پس لرزه ها در مقایسه با سایر مراکز علمی به ترتیب در جداول ۴ و ۵ نشان داده شده است. شایان ذکر است سایر مراکز علمی برای این پس لرزه ها حل سازوکار کانونی ارائه ندادند. موقعیت رومرکزی و حل

سازوکار کانونی به دست آمده برای این پس لرزه ها به همراه دو زمین لرزه اصلی در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

۷ بحث

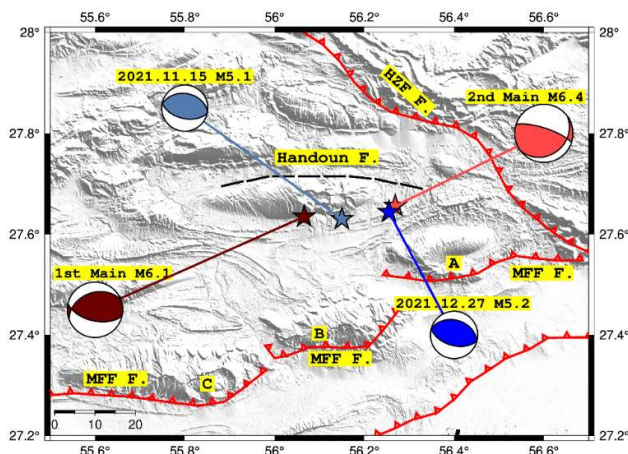
بر اساس گزارش های منتشر شده از زمین لرزه های منطقه زاگرس، گسلش لرزه زا در پی سنگ زاگرس به دلیل وجود سازند نمکی هرمز و دیگر واحدهای تبخیری در پوشش رسوبی آن، با گسیختگی سطحی همراه نبوده است.

جدول ۴. مقایسه موقعیت و سازوکار کانونی زمین لرزه ۲۰۲۱/۱۱/۱۵.

	عرض جغرافیایی (°N)	طول جغرافیایی (°E)	عمق (Km)	بزرگا	امتداد (°)	شیب (°)	زاویه لغزش (°)
USGS	۲۷/۷۰۷	۵۶/۰۳۱	۱۰	۵/۰	---	---	---
GFZ	۲۷/۵۹	۵۶/۰۸	۱۰	۴/۷	---	---	---
EMSC	۲۷/۶۷	۵۶/۱۴	۱۰	۵/۲	---	---	---
IRSC	۲۷/۵۹	۵۶/۱۵	۱۷	۵/۰	---	---	---
IIEES	۲۷/۶۳	۵۶/۱۱۲	۱۲	۵/۰	---	---	---
این مطالعه	۲۷/۶۳	۵۶/۱۵	۱۴	۵/۱	۱۰۳	۵۳	۹۲

جدول ۵. مقایسه موقعیت و سازوکار کانونی زمین‌لرزه ۲۰۲۱/۱۲/۲۷.

	عرض جغرافیایی (°N)	طول جغرافیایی (°E)	عمق (Km)	بزرگا	امتداد (°)	شیب (°)	زاویه لغزش (°)
USGS	۲۷/۷۱۳	۵۶/۱۹۰	۱۰	۴/۸	---	---	---
GFZ	۲۷/۷۱	۵۶/۲۸	۱۰	۵/۲	---	---	---
EMSC	۲۷/۶۹	۵۶/۳۳	۱۰	۵/۲	---	---	---
IRSC	۲۷/۵۹	۵۶/۲۷	۱۷	۵	---	---	---
IIEES	۲۷/۶۸	۵۶/۲۵	۸	۵/۱	---	---	---
این مطالعه	۲۷/۶۴	۵۶/۲۵	۱۵	۵/۲	۱۰۵	۵۳	۹۰



شکل ۱۰. موقعیت و سازوکار کانونی زمین‌لرزه دو گانه ۲۳ آبان ۱۴۰۰ شمال غرب بندرعباس و دو پس‌لرزه اصلی آن در ۲۰۲۱/۱۱/۱۵ و ۲۰۲۱/۱۲/۲۷.

از چندین قطعه با ابعاد ۱۵ تا ۱۱۵ کیلومتر و با طول کلی ۱۳۵۰ کیلومتر در منطقه جنوب زاگرس تشکیل شده است (بربریان، ۱۹۹۵). بنابراین در زاگرس، نسبت دادن زمین‌لرزه‌ها به گسل‌های مسبب دشوار است. از این‌رو دو سناریو برای دو زمین‌لرزه اصلی و دو پس‌لرزه آن، می‌توان حدس زد. در سناریوی اول گسل مسبب به احتمال راندگی MFF است که در شمال بندرعباس با قطعه جنوب شرقی گسل زاگرس مرتفع (HZF) در ناحیه خورگو قطع می‌شود. نقشه گسل‌های منطقه نشان می‌دهد گسل MFF در منطقه مورد مطالعه از سه بخش A، B و C تشکیل شده است (شکل ۱۰). رخنمون سطحی گسل MFF به

شاید بتوان زمین‌لرزه ۱۹۹۰ فورگ (واکر و همکاران، ۲۰۰۵) را تنها نمونه استثناء دانست. به علت محدودیت مذکور، از مدت‌ها پیش بررسی ساخت‌های ریخت‌شناختی زاگرس در پیوند با تمرکز سطحی زمین‌لرزه‌ها توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است. نتیجه این بررسی‌ها به شناسایی تعدادی از عوارض ریخت‌زمین‌ساختی لرزه‌زا منجر شد. از میان عوارض مزبور، خمش لبه کوهستان (فالكون، ۱۹۶۱)، که بعدها گسل جبهه کوهستان (MFF) نام‌گذاری شد (بربریان، ۱۹۹۵)، از ویژگی‌های خاصی برخوردار است. گسل جبهه کوهستان (MFF) یک گسل راندگی لرزه‌زای اصلی در پی سنگ زاگرس است که

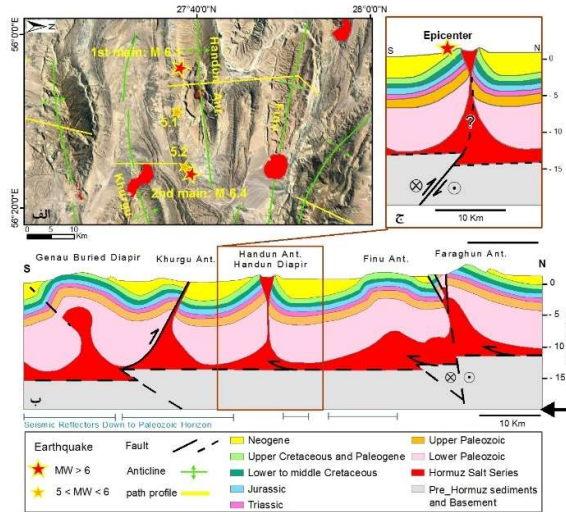
فاصله تقریباً ۲۰-۱۰ کیلومتری جنوب رومرکز زمین‌لرزه‌های اصلی واقع است که می‌تواند تا حدودی مطابق با نتایج حل سازوکارها در نظر گرفت. سازوکار کانونی به‌دست‌آمده زمین‌لرزه اول با مقدار ۳۸ درجه رو به شمال، یا با قطعه B رخنمون گسل MFF یا در ادامه قطعه A به سمت غرب، که به نقشه در نیامده است، می‌تواند منطبق باشد که با توجه به شیب و فاصله زمین‌لرزه از گسل، نسبت دادن آن به ادامه قطعه A محتمل تر است. شیب سازوکار کانونی زمین‌لرزه دوم با مقدار ۷۴ درجه رو به شمال، با قطعه A رخنمون گسل MFF می‌تواند متناسب باشد. شیب سازوکارهای کانونی پس‌لرزه‌های اول و دوم با مقدار ۳۷ درجه رو به شمال با توجه به زاویه‌های شیب و فاصله می‌تواند به قطعه A نسبت داده شود.

در سناریوی دوم می‌توان زمین‌لرزه‌ها را با گسل پی‌سنگی هندون مرتبط دانست. بسیاری از پژوهشگران توسعه دیاپیرهای نمکی زاگرس را در ارتباط با فعالیت گسل‌های پی‌سنگی دانسته‌اند (هاینز و مک کویلان، ۱۹۷۴؛ ادگل، ۱۹۹۶؛ حسامی و همکاران، ۲۰۰۱؛ بهرودی و کویی، ۲۰۰۳ و کویی و همکاران، ۲۰۰۸). جهانی و همکاران (۲۰۰۹) در مقطع زمین‌شناسی عمود بر تاقدیس هندون (شکل ۱۱)، در زیر دیاپیر نمکی هندون که در هسته تاقدیس هندون قرار دارد، تنها به ترسیم یک شاخه گسل رانندگی انشعاب‌یافته از پهنه دکولمان اکتفا کرده‌اند و گسترش احتمالی این شاخه گسلی را به سمت پایین (پی‌سنگ) و به سمت بالا (در امتداد دیاپیر) مدنظر قرار نداده‌اند. هیستوگرام مربوط به شیب صفحات گسلی حاصل از حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های

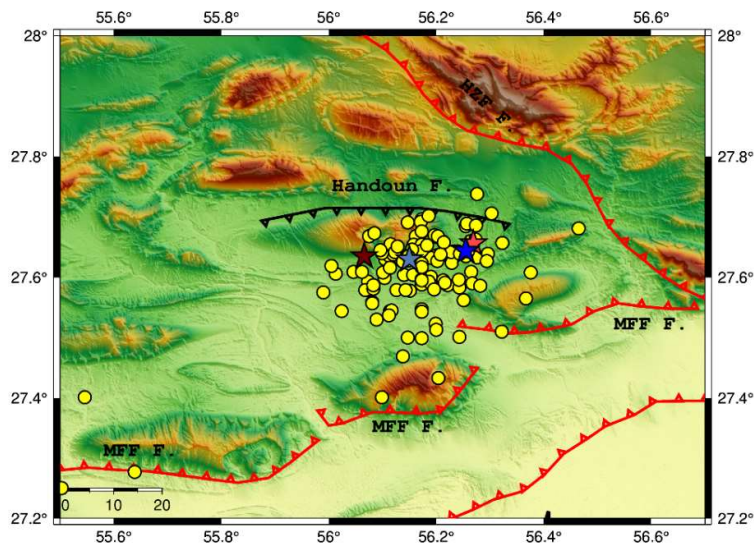
زاگرس نشان‌دهنده آن است که شیب بیشتر صفحات گسلی، زیاد و بین ۳۰ تا ۶۵ درجه متغیر است (طالبیان و جکسون، ۲۰۰۴). شیب زیاد گسل‌های معکوس پی‌سنگی زاگرس مشابه شیب گسل‌های نرمال حاشیه قاره‌ها در سایر نقاط دنیا است؛ لذا این ایده تقویت می‌شود که گسل‌های معکوس پی‌سنگی در زاگرس حاصل فعالیت مجدد گسل‌های نرمال هستند. در هر صورت، وجود صفحات گسلی معکوس پرشیب در زاگرس، احتمال وقوع زمین‌لرزه روی گسل‌های تراستی کم‌شیب انشعاب‌یافته از پهنه دکولمان را بسیار کم می‌کند. از آنجاکه بر اساس شواهد زمین‌شناسی، دیاپیر نمکی هندون پیش از کوهزایی زاگرس نزدیک سطح بوده و تنها در اثر کوتاه‌شدگی و چین‌خوردگی در سطح آشکار شده است (جهانی و همکاران، ۲۰۰۷)، می‌توان نتیجه گرفت که به احتمال زیاد بالا آمدگی دیاپیر نمکی هندون پیش از کوهزایی و در ارتباط با گسلش پی‌سنگی در مراحل ابتدایی کشش حوضه بوده است که طی مراحل بعدی کوهزایی به‌صورت گسل معکوس در زیر این دیاپیر نمکی تجدید فعالیت کرده است.

موقعیت زمین‌لرزه‌های بررسی‌شده در پژوهش حاضر روی دامنه جنوبی تاقدیس هندون با اثر سطحی یک گسل پرشیب در زیر دیاپیر نمکی در پی‌سنگی انطباق دارد (شکل ۱۱). شیب رو به جنوب دو زمین‌لرزه اصلی به ترتیب با مقادیر ۵۷ و ۲۵ درجه و میانگین ۴۱ درجه که با یک مؤلفه امتدادلغز همراه هستند، معرف یک گسل پی‌سنگی فعال (گسل هندون) در زیر دیاپیر نمکی هندون است. رومرکز پس‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۲/۵ زمین‌لرزه

دوگانه ۲۳ آبان ۱۴۰۰ شمال غرب بندرعباس در بازه پنج ماهه از کاتالوگ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله بررسی شد. توزیع این پس‌لرزه‌ها بیانگر این است که گسل پی‌سنگی هندون باید شیب به سمت جنوب داشته باشد (شکل ۱۲).



شکل ۱۱. موقعیت رومرکز زمین‌لرزه‌های اصلی و دو پس‌لرزه آن در تصویر ماهواره‌ای گوگل ارث در شکل (الف) با ستاره مشخص شده است. خطوط زردرنگ بیانگر مسیرهایی است که جهانی و همکاران (۲۰۰۹) با توجه به نیم‌رخ‌های عرضی زمین‌شناسی آنها (شکل ب)، گسل‌هایی را در پی‌سنگی شناسایی کردند و به دلیل نبود تصویر بازتاب لرزه‌ای از بخش زیرین تاقدیس هندون و تنها با شناخت زمین‌ساخت نمک و داده ساختاری، احتمال وجود گسلی را در دکولمان قاعده‌ای مطرح کردند. موقعیت رومرکز، ژرفا و سازوکار زمین‌لرزه‌های اصلی ۲۳ آبان ۱۴۰۰ و پس‌لرزه‌های آن به شناسایی گسلی پی‌سنگی در زیر تاقدیس هندون و بازنگری نیم‌رخ عرضی از تاقدیس هندون در مطالعه حاضر منجر شد که در شکل (ج) نشان داده شده است.



شکل ۱۲. توزیع رومرکز پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه دوگانه ۲۳ آبان ۱۴۰۰ شمال غرب بندرعباس (برگرفته از [www.epp.iiees.ac.ir](http://www.epp.iiees.ac.ir)).

## ۸ نتیجه‌گیری

دهه‌های گذشته در این منطقه به مطالعات زلزله شناسی پرداخته‌اند. از سوی دیگر، اختلاف رومرکز محاسبه‌شده در این مطالعه با گزارش سایر مراکز، می‌تواند تفسیر ما از گسل مسبب را تحت تأثیر قرار دهد. از آنجا که به دلیل وجود سازند نمکی هرمز، گسلش لرزه‌زا در پی‌سنگ زاگرس با گسیختگی سطحی همراه نیست، موقعیت دقیق گسل مسبب تنها در پیوند با محل دقیق رومرکز زمین‌لرزه‌ها امکان‌پذیر است. با توجه به اینکه رومرکز زمین‌لرزه دو گانه و دو پس‌لرزه بزرگ آن در این مطالعه، در یک راستا هستند و در امتداد دامنه جنوبی تاقدیس هندون واقعند و روند پس‌لرزه‌های پنج ماه پس از آن، به وضوح نشان‌دهنده شیب رو به جنوب سطح گسلش است (شکل ۱۲)، به احتمال زیاد گسل مسبب این زمین‌لرزه‌ها در دامنه شمالی تاقدیس مزبور و با شیب زیاد به سمت جنوب در اعماق ۱۴ تا ۱۶ کیلومتری گسترش داشته و پی‌سنگ را درگیر کرده است (شکل ۱۱-ج). سازوکارکانونی زمین‌لرزه‌های دو گانه، به وضوح صفحات پرسیب (میانگین شیب ۴۱ درجه) با شیب رو به جنوب را نشان می‌دهد که با یک مؤلفه امتدادلغز همراهند (شکل ۱۰).

## منابع

- Astiz, L., and Kanamori, H., 1984, An earthquake doublet in Ometepec, Guerrero, Mexico: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **34**(1-2), 24-45, doi: 10.1016/0031-9201(84)90082-7.
- Bahroudi, A., and Koyi, H. A., 2003, Effect of spatial distribution of Hormuz salt on deformation style in the Zagros fold and thrust belt: an analogue modeling approach: *Journal of Geological Society of London*, **160**, 719-733.
- Berberian, M., 1995, Master "blind" thrust faults

در این مطالعه با تلفیق لرزه‌نگاشت‌ها و شتاب‌نگاشت‌های ثبت‌شده از زمین‌لرزه دو گانه ۲۳ آبان ۱۴۰۰ در ایستگاه‌های لرزه‌نگاری و شتاب‌نگاری ایران و با استفاده از داده‌های تعدادی از ایستگاه‌های پیرامون کشور، پارامترهای مکان، زمان و بزرگای دو رویداد مزبور محاسبه شد. این دو رویداد با اختلاف زمانی کمتر از ۹۰ ثانیه و در فاصله‌ای بسیار نزدیک به هم به وقوع پیوسته‌اند. نتایج این محاسبات بیانگر آن است که بزرگای محاسبه‌شده در این مطالعه تفاوت بسیار زیادی با بزرگای محاسبه‌شده در سایر مراکز کشوری و بین‌المللی ندارد، اما اختلاف مشاهده‌شده در رومرکز و عمق کانونی محاسبه‌شده در این مطالعه با مراکز دیگر، بر تفسیر ما از لرزه‌خیزی زاگرس به شدت اثر می‌گذارد. از آنجا که عمق پی‌سنگ زاگرس در حوالی منطقه مورد مطالعه حداکثر ۱۰ تا ۱۲ کیلومتر برآورد می‌شود، عمق‌های کانونی محاسبه‌شده در این مطالعه (۱۴ الی ۱۶ کیلومتر) برای زمین‌لرزه‌های اصلی و پس‌لرزه‌ها، به وضوح بر پی-سنگی بودن کانون زمین‌لرزه‌های مزبور دلالت دارد، درحالی که عمق‌های حدود ۱۰ کیلومتر محاسبه‌شده در سایر مراکز لرزه‌نگاری می‌تواند این تردید را به وجود آورد که زمین‌لرزه‌های مزبور، در پوشش رسوبی و بالای پی‌سنگ رخ داده‌اند. اهمیت موضوع از آنجا بهتر آشکار می‌شود که در غیاب اطلاع دقیق ما از ضخامت پوشش رسوبی (عمق پی‌سنگ) در نقاط مختلف زاگرس، انتساب زمین‌لرزه‌های متوسط و بزرگ زاگرس به پوشش رسوبی یا پی‌سنگ زیر آن، از مباحث مطرح در بین زلزله‌شناسانی است که از

- 308, doi:10.1007/978-3-540-69426-7\_15.
- Jahani, S., Callot, J. P., Letouzey, J., and de Lamotte, D. F., 2009, The eastern termination of the Zagros Fold-and-Thrust Belt, Iran: Structures, evolution, and relationships between salt plugs, folding, and faulting: *Tectonics*, **28**(6), 1–22, <https://doi.org/10.1029/2008TC002418>.
- Koyi, H. A., Ghassemi, A., Hessami, K., and Dietl, C., 2008, Modelling the role of strike-slip faults in triggering Salt Diapirs in the Zagros fold-thrust belt: *Journal of the Geological Society, London*, **165**, 1031-44.
- Ni, J., and Barazangi, M., 1986, Seismotectonics of the Zagros continental collision zone and a comparison with the Himalayas: *Journal of Geophysical Research*, **91**, 8205-8218.
- Stöcklin, J., 1974, Possible ancient continental margins in Iran, in Burke, C., and Drake, C., eds., *The Geology of Continental Margins*: Springer-Verlag, New York, 873-877.
- Talebian, M., and Jackson, J., 2004, A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountains of Iran: *Geophysical Journal International*, **156**(3), 506–526, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02092.x>.
- Tatar, M., Hatzfeld, D., and Ghafory-Ashtiany, M., 2004, Tectonics of the Central Zagros (Iran) deduced from microearthquake seismicity: *Geophysical Journal International*, **156**, 255–266.
- Walker, R. T., Andalibi, M. J., Gheitanchi, M. R., Jackson, J. A., Karegar, S., and Priestley, K., 2005, Seismological and field observations from the 1990 November 6 Furg (Hormozgan) earthquake: a rare case of surface rupture in the Zagros mountains of Iran: *Geophysical Journal International*, **163**, 567–579.
- Zahradník, J., and Sokos, E., 2013, Evaluating centroid-moment-tensor uncertainty in the new version of ISOLA software: *Seismological Research Letters*, **84**(4), 656–665, <https://doi.org/10.1785/0220130002>.
- hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics: *Tectonophysics*, **241**(3–4), doi: 10.1016/0040-1951(94)00185-C.
- Edgell, H. S., 1996, Salt tectonism in the Persian Gulf basin, in Alsop, G. I., Blundell, D. J., and Davison, I., eds., *Salt Tectonics: Special Publication of Geological Society, London*, **100**, 129-151.
- Falcon, N. L., 1961, Major earth-flexuring in the Zagros Mountains of south-west Iran: *The Quarterly Journal of the Geological Society of London*, **117**, 367-376.
- Ghods, A., Shabaniyan, E., Bergman, E., et al., 2015, The Varzaghan–Ahar, Iran, Earthquake Doublet (Mw 6.4, 6.2): implications for the geodynamics of northwest Iran: *Geophysical Journal International*, **203**, 522–540, doi: 10.1093/gji/ggv306.
- Haynes, S. J., and Mcquillan, H., 1974, Evolution of the Zagros suture zone, southern Iran: *Geological Society of America Bulletin*, **85**, 739-744.
- Hessami, K., Koyi, H. A., and Talbot, C. J., 2001, The significance of strike-slip faulting in the basement of the Zagros fold and thrust belt: *Journal of Petroleum Geology*, **24**, 5-28.
- Hessami, K., Nilforoushan, F., and Talbot, C. J., 2006, Active deformation within the Zagros Mountains deduced from GPS measurements: *Journal of the Geological Society*, **163**, 143–148.
- Ilaghi, H., Yamini-Fard, F., and Tatar, M., 2010, Aftershock analysis of the March 25, 2006, Fin earthquake, MW = 5.9 (Zagros - Iran): *Iranian Journal of Geophysics*, **4**(1), 17-32.
- Jackson, J., 1980, Reactivation of basement faults and crustal shortening in orogenic belts: *Nature*, **283**, 343-346.
- Jahani, S., Callot, J. P., de Lamotte, D. F., and Letouzey, J., 2007, The Salt Diapirs of the Eastern Fars Province (Zagros, Iran): A Brief Outline of their Past and Present, in *Thrust Belts and Foreland Basins*, 10.1007/978-3-540-69426-7(Chapter 15), 289–

## North-West Bandar-Abbas earthquake doublet (Mw 6.1, 6.4) and its source identification

Hamaid Khosravi<sup>1</sup>, Mahdieh Safari<sup>2</sup>, Gholam Doloei Javan<sup>3</sup>, Azar Afshar<sup>4</sup> and Khaled Hessami<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. student, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

<sup>2</sup> M.Sc. Graduate, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

<sup>3</sup> Associated professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

<sup>4</sup> M.Sc. Graduate, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

<sup>5</sup> Assistant Professor, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

(Received: 26 March 2022, Accepted: 14 May 2022)

### Summary

Recording, processing and identifying the parameters of independent earthquakes larger than  $M_w = 4$  using advanced equipment, software and professional experts, can be calculated nowadays in less than 10 minutes automatically in the Iranian plateau. Double earthquake of November 14, 2021 with a small time difference (less than 90 seconds) occurred at a very close distance with magnitudes of 6.1 and 6.4, respectively. The calculation of the parameters of location, time and magnitude of the first event, in addition to the calculation of its focal mechanism parameters, was made possible with the help of semi-automatic or automatic software. However, the interference of the seismic phases of the first event with the second one in farther stations poses a serious challenge to the automatic and semi-automatic calculation of location, origin time, magnitude, as well as the parameters of the focal mechanism of the second event. In this study, by merging recorded seismograms and accelerograms in seismic stations within the country, the parameters of this double earthquake and their two main aftershocks with magnitudes of 5.1 and 5.4 have been calculated. In addition, the calculation of the focal mechanism of these four events is carried out based on the polarization method of the first P-wave polarity, the amplitude ratio of P and S waves and the modeling of seismic moment tensor. The results of this study show that according to the locations and focal mechanisms calculated for the double earthquake and both major aftershocks, the activity of the Handun basement fault, which is probably related to the formation of the Handun salt dome, caused double earthquakes of November 14, 2021 and its two main aftershocks in the northwest of Bandar-Abbas, south of Iran.

**Keywords:** Bandar-Abbas, double earthquake, Handun fault, source mechanism, waveform modeling