

**گزارش زمین لرزه ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶ سرپل ذهاب  
استان کرمانشاه (ویرایش پنجم)**

**جلد اول  
جنبه‌های زلزله‌شناسی**

۵ دی ماه ۱۳۹۶



پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

## عناوین جلدها

۱-۳۶

جلد اول: جنبه های زلزله شناسی

فصل اول: لرزه زمین ساخت، لرزه خیزی و مدل سازی حرکت قوی زمین

۳۷-۱۲۱

جلد دوم: پدیده های ژئوتکنیکی

فصل دوم: اثرات ساختگاهی

فصل سوم: ناپایداری های زمین شناختی و ژئوتکنیکی ناشی از زمین لرزه

۱۲۲-۳۸۷

جلد سوم: سازه و شریان های حیاتی

فصل چهارم: ارزیابی سریع ساختمان ها

فصل پنجم: ساختمان های بتن آرمه

فصل ششم: عملکرد ساختمان های با اسکلت فولادی

فصل هفتم: ساختمان های مصالح بنایی

فصل هشتم: عملکرد ساختمان های مسکن مهر

فصل نهم: بررسی موردی علل تخریب دو ساختمان فولادی کنار هم

فصل دهم: شریان های حیاتی

فصل یازدهم: سازه های صنعتی

فصل دوازدهم: عملکرد لرزه ای امکانات فیزیکی شبکه درمان

فصل سیزدهم: رفتار انواع سازه مدارس

فصل چهاردهم: رفتار اعضای غیر سازه ای

۳۸۸-۴۳۱

جلد چهارم: مدیریت بحران

فصل پانزدهم: بررسی مقدماتی فرایند مدیریت بحران

## فهرست مطالب جلد اول

صفحه	عنوان
	فصل اول: لرزه زمین ساخت، لرزه خیزی و مدل سازی حرکت قوی زمین
۱	۱-۱- معرفی رویداد
۱	۲-۱- زمین ساخت زاگرس
۳	۳-۱- لرزه زمین ساخت
۶	۴-۱- پس لرزه های ثبت شده
۸	۵-۱- نصب شبکه لرزه نگاری محلی
۱۱	۶-۱- تحلیل پس لرزه های ثبت شده در شبکه محلی
۱۵	۷-۱- تغییر شکل پوسته زمین
۱۶	۸-۱- پیشینه لرزه خیزی منطقه
۱۹	۹-۱- تعیین پارامترهای گسل مسبب و پراکندگی حرکات توانمند زمین در زلزله سرپل ذهاب
۱۹	۱-۹-۱- مقدمه
۱۹	۲-۹-۱- روش و نحوه تحلیل
۲۰	۳-۹-۱- تحلیل داده های شتابنگاری ثبت شده در محدوده نزدیک گسل
۲۴	۱۰-۱- مدل گسل و پارامترهای گسلش ارائه شده بر اساس امواج دور لرزه
۲۵	۱۱-۱- مدل گسل و پارامترهای گسلش ارائه شده بر اساس نگاهت های حوزه نزدیک گسل
۲۹	۱۲-۱- نقشه توزیع شتاب (بیشینه شتاب زمین) زلزله سرپل ذهاب
۳۵	۱۳-۱- جمع بندی

## فصل اول

# لرزه زمین ساخت، لرزه خیزی و مدل سازی حرکت قوی زمین

محمد تاتار

محمد رضا قایمقامیان

فرزام یمینی فرد

خالد حسامی آذر

انوشیروان انصاری

عرفان فیروزی

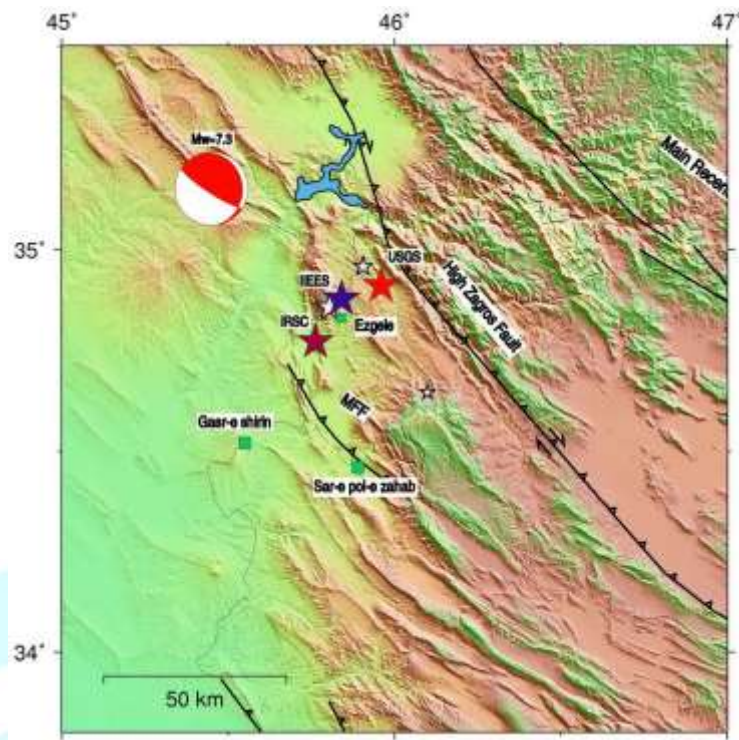
## ۱-۱- معرفی رویداد

در ساعت ۲۱ و ۴۸ دقیقه (به وقت محلی) روز ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶ هجری شمسی، مطابق با ساعت ۱۸ و ۱۸ دقیقه (به وقت جهانی) روز ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ میلادی زمین لرزه‌ای با بزرگای گشتاوری ۷/۳ در فاصله ۱۰ کیلومتری از گله و حدود ۳۷ کیلومتری شمال غرب شهرستان سرپل ذهاب از استان کرمانشاه، واقع در مرز ایران و عراق به وقوع پیوست (شکل ۱-۱). رومرکز این رویداد براساس لرزه‌نگاشت‌های ثبت شده در مرکز ملی شبکه لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه (IIIES) در مختصات ۳۴/۸۸ درجه عرض شمالی و ۴۵/۸۴ درجه طول خاوری قرار دارد. سایر مراکز لرزه‌نگاری جهانی نیز در موقعیت مشابهی و با بزرگای گشتاوری تقریباً یکسانی، زمین لرزه فوق را گزارش نمودند. شبکه لرزه‌نگاری کشوری وابسته به موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، با توجه به استفاده از ایستگاه‌های محلی، بویژه قرائت‌های فاز سه ایستگاه واقع در کشور عراق، کانون زمین لرزه را در مختصات ۳۴/۷۷ درجه عرض شمالی و ۴۵/۷۶ درجه طول خاوری مکانیابی نمود که از دقت مطلوب‌تری برخوردار است. بر اساس آخرین مکانیابی صورت گرفته، عمق کانونی زمین لرزه حدود ۱۸ کیلومتر برآورد شده است.

بر اساس گزارش مرکز لرزه‌نگاری کشوری، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران این زمین لرزه دارای ۳ پیشلرزه با بزرگای بین ۴/۵-۱/۹ و دارای ۵۲۶ پس‌لرزه با بزرگای ۴/۷-۱/۸ (تا ساعت ۱۲ ظهر روز ۹۶/۰۹/۰۷) می‌باشد (شکل ۱-۱). کانون این زمین لرزه در ۱۰ کیلومتری گسل جبهه کوهستان زاگرس (MFF) قرار دارد. مطابق با نقشه تهیه شده، کانون زمین لرزه ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶ با بزرگای گشتاوری ۷/۳ در جنوب از گله به فاصله حدود ۱۰ کیلومتری، شمال شرق قصرشیرین به فاصله ۳۳ کیلومتری، و شمال غرب سرپل ذهاب به فاصله ۳۷ کیلومتر واقع می‌گردد (شکل ۱-۱)

## ۱-۲- زمین ساخت زاگرس

کوه‌های زاگرس از شمال به فلات ایران و از جنوب به حوضه‌های فعال بین‌النهرین و خلیج فارس محدود می‌شود. طول کوه‌های زاگرس در ایران حدود ۱۵۰۰ کیلومتر و پهنای آن از حدود ۲۰۰ کیلومتر در شمال غرب به حدود ۳۵۰ کیلومتر در جنوب شرق افزایش می‌یابد. ارتفاع ساختارهای زمین‌شناسی و سن نسبی کوه‌های زاگرس به سمت شمال شرق افزایش می‌یابد. این افزایش با پله‌های تدریجی از تاقدیس‌های دست نخورده حاشیه خلیج فارس تا خط الراس ارتفاعات گسل خورده زاگرس مرتفع ادامه دارد.



شکل ۱-۱- موقعیت مرکز سطحی زمین لرزه ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶ سرپل ذهاب مطابق با گزارش مراکز مختلف لرزه نگاری. سه پیش‌لرزه این زمین لرزه (ستاره های سفید رنگ) بر گرفته از مرکز لرزه نگاری کشوری وابسته به موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IRSC)، و سازوکار کانونی زمین لرزه بر اساس حل تانسور ممان (مرکز زلزله شناسی سازمان زمین شناسی آمریکا، USGS) در شکل نشان داده شده اند. گسل ها برگرفته از نقشه گسل های فعال ایران (حسامی و همکاران، ۱۳۸۲) می باشند.

زاگرس به مجموعه پستی و بلندی های منظم و ویژه ای گفته می شود که از کوه های تاوروس در ترکیه تا حوالی تنگه هرمز گسترده شده اند. ساخت زمین شناسی آن ساده، ملایم و شامل مجموعه ای از رشته تاقدیس های نزدیک هم با سطح محوری متغیر ولی در مجموع روند شمال غربی - جنوب شرقی است. حد شرقی آن توسط گسل میناب محدود می شود و آن را از رشته کوه های مکران جدا می نماید. بخش باریکی از زاگرس در شرق تنگه هرمز نیز کشیده شده و در آنجا خاتمه می یابد. از نظر تاثیر ساختارهای زمین شناسی (عمدتاً چین خوردگی ها) در شکل ظاهری کوه ها، زاگرس یکی از انواع مهم چین خوردگی هاست که در دنیا به نام چین خوردگی ژورائی شناخته می شود. چین های زاگرس منظم و در بیشتر موارد محور آنها موازی است. جهت محوره های چین خوردگی در آن نیز مستقیماً حاصل برخورد پلاتفرم عربستان است و کوچکترین تغییر در شکل لبه پلاتفرم عربستان در مرفولوژی زاگرس منعکس شده است. بیشتر چین ها در کمربند چین خورده - رانده زاگرس نامتقارن بوده و یال های پرشیب تاقدیس ها در پهلوی جنوب غربی آن قرار دارند. چین خوردگی نامتقارن بیان کننده حرکت رو به شمال صفحه عربستان نسبت به ایران مرکزی است. گاه دگرشکلی زیاد موجب گردیده تا پهلوی جنوب غربی تاقدیس ها برگشته شود. در برخی موارد نیز در محل یال برگشته و یا سطح محوری تاقدیس ها، راندگی هایی تشکیل شده است. اغلب راندگی های زاگرس دارای شیبی به سمت مال



شرق هستند. شدت تغییر شکل‌ها به سمت شمال شرق زاگرس افزایش یافته و گسلش نقش مهمتری در تکامل ساختاری می‌یابد.

بنابراین مکانیسم کوتاه شدگی پوسته در زاگرس در اعماق مختلف متفاوت است. اعماق کمتر از ۱۰ کیلومتر (بالتر از نمک هرمز) پوشش رسوبی عمدتاً توسط چین خوردگی تغییر شکل می‌دهد. از عمق ۱۰ تا ۲۵ کیلومتر ضخامت پوسته فوقانی در طول گسل‌های معکوس بزرگ زاویه افزایش می‌یابد. از عمق ۲۵ کیلومتری تا اعماق موهو، پوسته زیرین بر اثر خزش و یا جریان پلاستیکی مواد ضخیم می‌گردد. بنابراین، گوشته فوقانی به دلیل صلب بودن به زیر پوسته عربستان و ایران می‌لغزد.

ساختار پوسته در زیر زاگرس را می‌توان از نوع حاشیه قاره‌ای غیرفعال در نظر گرفت. مقطع ارائه شده توسط جکسن (۱۹۸۰) با شواهد زمین ساختی دال بر برخورد قاره‌ای بین عربستان و ایران انطباق دارد. بر مبنای مدل ارائه شده، پوسته در مراحل اولیه تشکیل حوضه زاگرس متحمل کشیدگی و نازک شدگی گردیده که با تشکیل گسل‌های عادی در پی‌سنگ همراه بوده است. گسل‌های عادی پی‌سنگی با گذشت زمان در زیر رسوبات دریائی (پوشش رسوبی) که ضخامت آن از ۵ تا ۱۲ کیلومتر متغیر است دفن گردیدند. همگرایی دو صفحه عربستان و ایران باعث شد گسل‌های پی‌سنگی به صورت گسل‌های معکوس فعال شوند. این وارونگی جنبشی باعث ضخیم شدگی غیر عادی پوسته بلورین و یا فرورانش آن نمی‌گردد و احتمالاً تا زمانی که پی‌سنگ به ضخامت اولیه خود برسد، ادامه خواهد یافت. در این فرایند فعالیت گسل‌های معکوس با ضخیم شدگی نسبی در پی‌سنگ همراه بوده و سبب ایجاد چین خوردگی شدید در پوشش رسوبی گردیده است. با ادامه همگرایی، در شمال شرق زاگرس (جنوب شرقی گسل اصلی زاگرس) بر اثر فشار تانژانتی ناشی از ایران مرکزی، پوشش رسوبی بر روی سازند هرمز لغزیده و چین می‌خورد. این چین خوردگی به تدریج در طی مقاطع مختلف زمانی به سمت جنوب غرب مهاجرت می‌کند. این عمل که به طور مجزا و مستقل از پی‌سنگ صورت می‌گیرد باعث شده که تغییر شکل‌های ایجاد شده در پی‌سنگ با پوشش رسوبی مطابقت نداشته باشد.

### ۱-۳- لرزه زمین ساخت

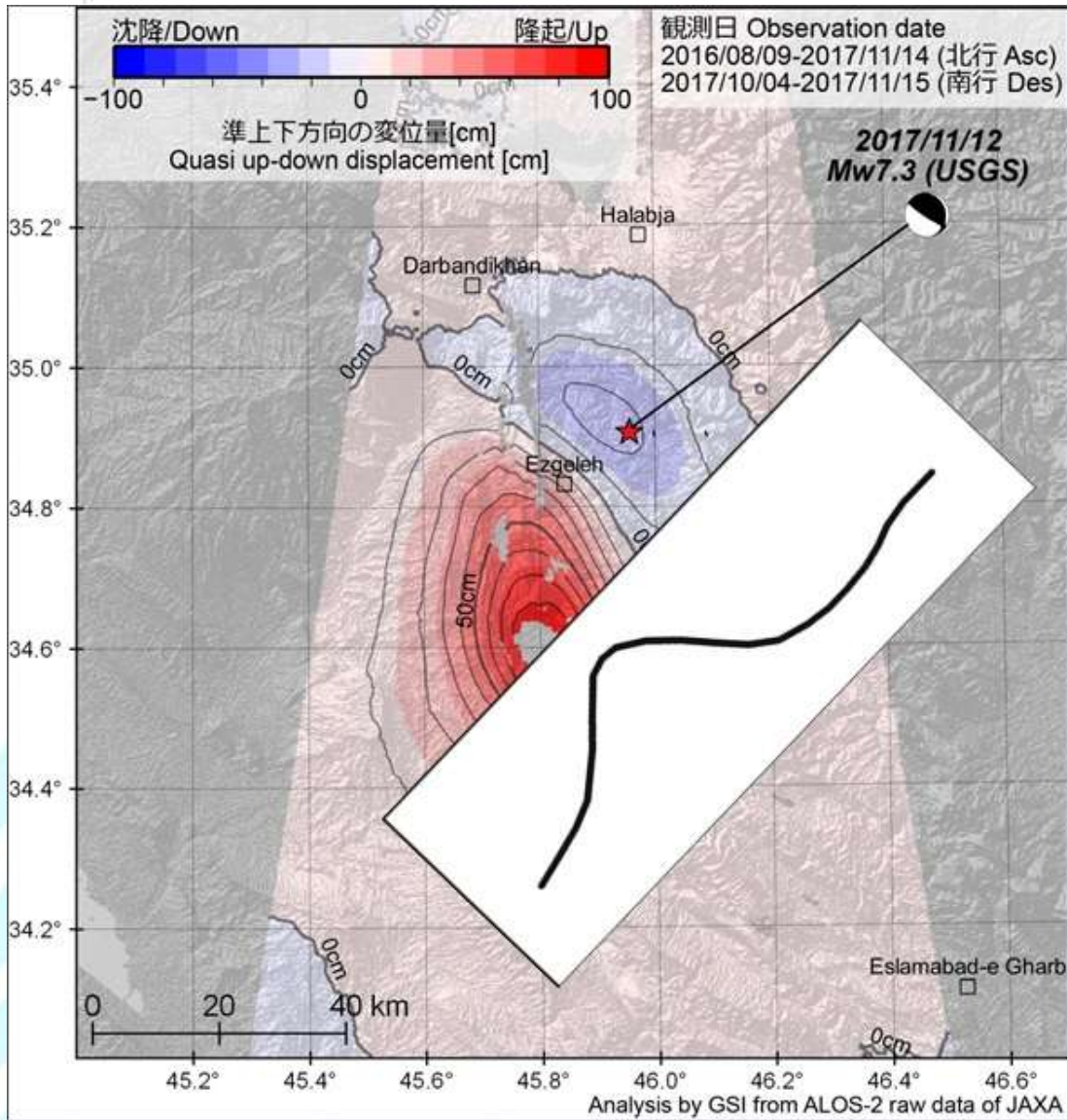
بررسی‌های لرزه زمین ساختی منطقه زاگرس به طور عمده به مطالعات لرزه‌خیزی این منطقه محدود گردیده است. این موضوع از آنجا ناشی می‌شود که گسلش لرزه‌زا در منطقه زاگرس در سطح زمین رخنمون ندارد. اساساً تغییر شکل الاستیک و رویداد زمین لرزه‌های بزرگ در امتداد زون‌های گسلی اصلی در منطقه زاگرس به فوقانی‌ترین بخش پی‌سنگ (ژرفای ۸ تا ۱۲ کیلومتر) محدود گردیده و به دلیل وجود لایه‌های تبخیری که در افق‌های مختلف پوشش رسوبی وجود دارد، شکستگی به سطح زمین نمی‌رسد. به دلیل محدودیت مذکور، از مدت‌ها پیش بررسی ساخت‌های ریخت شناختی زاگرس در پیوند با تمرکز سطحی زمین لرزه‌ها مورد توجه

پژوهشگران قرار گرفته است. نتیجه این بررسی‌ها به شناسایی تعدادی از عوارض ریخت‌زمین‌ساختی لرزه‌زا منجر گردید (فالکن، ۱۹۶۱؛ نی و برزنگی، ۱۹۸۶؛ بربریان، ۱۹۹۵).

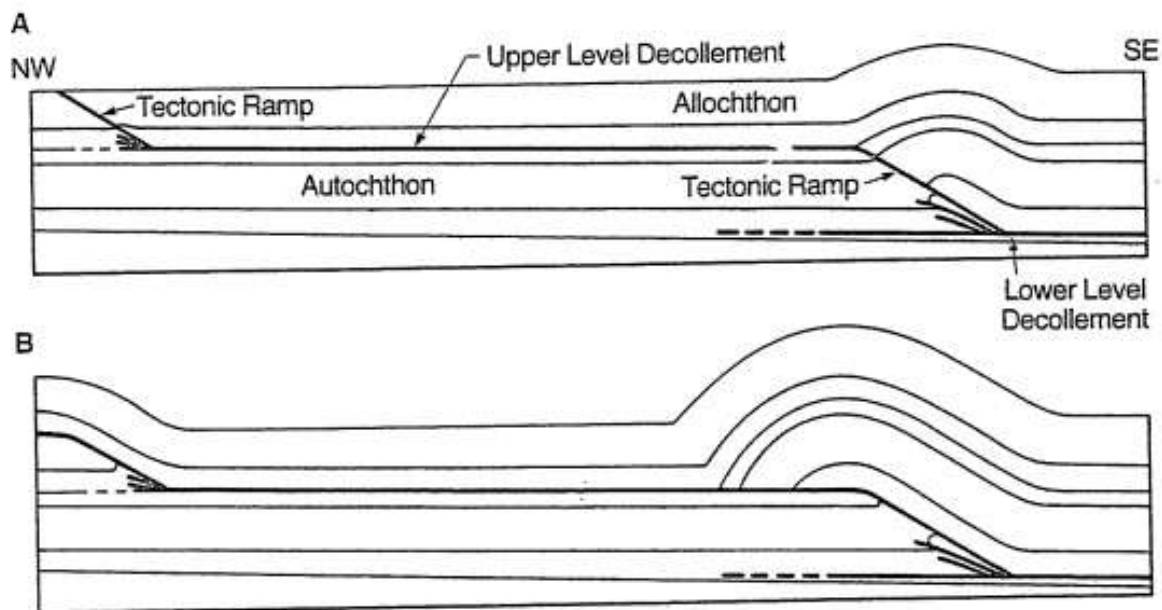
از میان عوارض مزبور، خمیدگی جبهه کوهستان (فالکن، ۱۹۶۱) که بعداً توسط بربریان (۱۹۹۵) نامیده شد، از ویژگی‌های خاصی برخوردار است. بربریان (۱۹۹۵) به تمرکز زمین‌لرزه‌های متوسط و بزرگ بر روی این ساختار (در شمال غرب گسل کازرون) اشاره نموده و آن را به فعالیت گسل پی‌سنگی مسبب این ساختار نسبت داد. تمرکز زمین‌لرزه‌های متوسط و بزرگ بر روی گسل جبهه کوهستان (MFF) و همچنین بالاترین نرخ کوتاه‌شدگی بدست آمده از اندازه‌گیری‌های GPS در طول آن بیانگر آن است که امروزه این گسل نسبت به سایر گسل‌های معکوس زاگرس از بیشترین فعالیت لرزه‌خیزی در شمال غربی زاگرس برخوردار است.

کانون سطحی و سازوکار کانونی زمین‌لرزه ۲۱ آبان سرپل‌ذهاب حکایت از این دارد که گسل مسبب این زمین‌لرزه یکی از قطعه‌های با راستای شمال-شمال غرب گسل جبهه کوهستان (MFF) است که با زاویه بسیار کم (۱۵-۱۰ درجه) به سمت شرق شیب دارد. اگرچه این زمین‌لرزه با گسلش سطحی همراه نبود ولی نتایج بدست آمده از داده‌های رادار (SAR Interferometry) گویای آن است که این زمین‌لرزه با یک چین خوردگی کم دامنه (۹۰ سانتی متر فرایش تاقدیس و ۳۰ سانتی متر فرونشست ناودیس) با طول موج وسیع (حدود ۶۰ کیلومتر) همراه بوده است (شکل ۱-۲). شکل چین مزبور با یک چین خم گسل (Fault bend fold) انطباق خوبی نشان می‌دهد (شکل ۱-۳).





شکل ۱-۲- بیشینه جابجائی مشاهده شده در فاصله ۲۰ کیلومتری شمال غرب سرپل ذهاب (GSI).

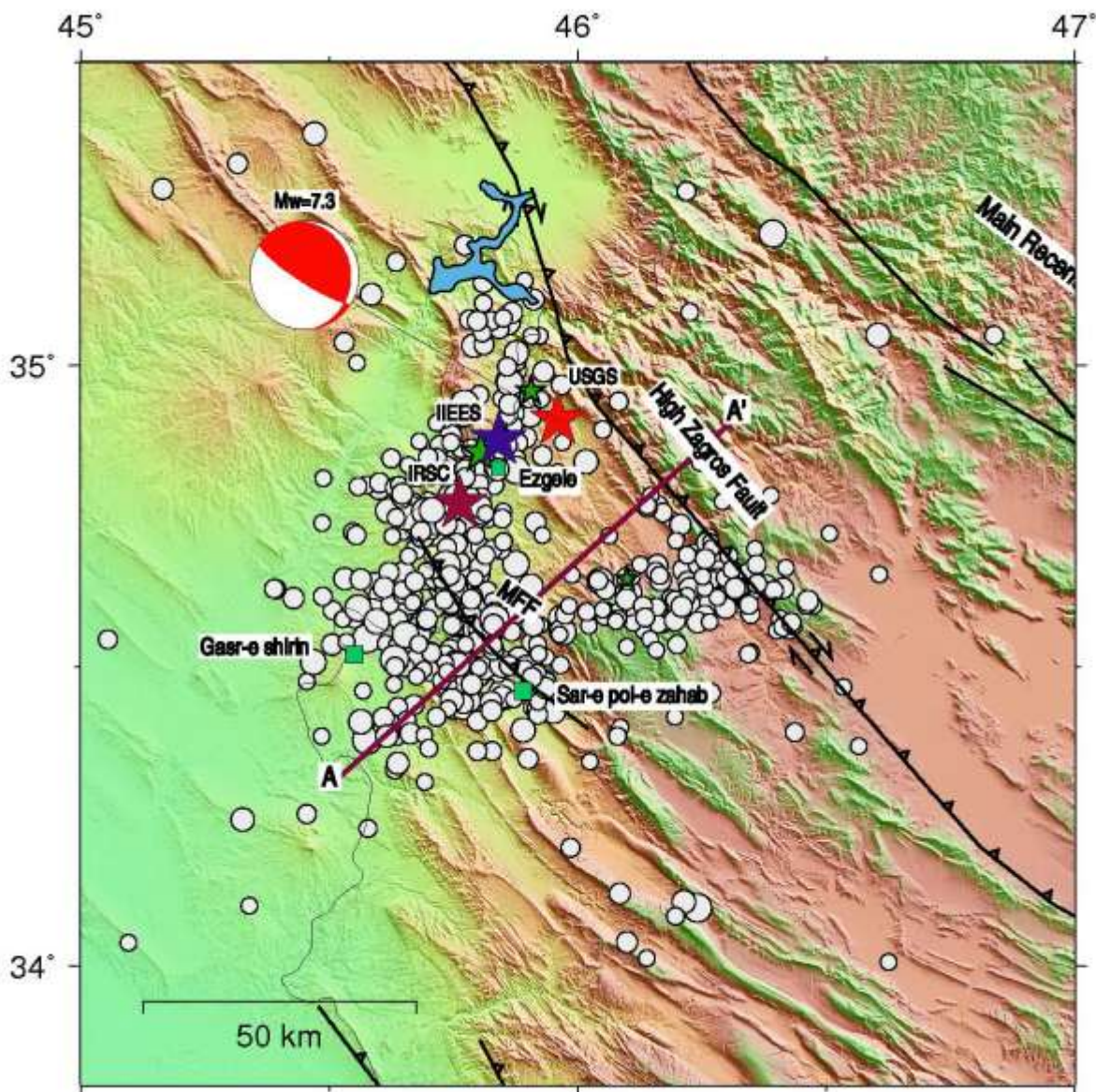


شکل ۱-۳- طرح شماتیکی از یک چین خم گسل

#### ۴-۱- پس لرزه‌های ثبت شده

توزیع پس لرزه‌ها علی رغم پراکندگی نسبتاً زیاد، کماکان بر یک روند شمال غرب - جنوب شرق موازی با روند گسل‌های اصلی منطقه چون گسل پیشانی کوهستان (MFF) و گسل زاگرس مرتفع (HZF) دلالت دارند. این روند مشابه روند صفحه اصلی گسل مسبب زمین لرزه ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶ سرپل ذهاب مطابق با حل سازوکار کانونی زمین لرزه اصلی (USGS) می باشد. پهنای زیاد زون پس لرزه‌ها (شکل ۱-۴)، بخوبی بر شیب خیلی کم گسل مسبب زمین لرزه دلالت دارد. وجود خوشه‌های پراکنده از تجمع پس لرزه‌ها می تواند نشانی از فعالیت گسل‌های کوچک از قبل موجود، در اثر تجمع تنش آزاد شده از زمین لرزه سرپل ذهاب باشند.

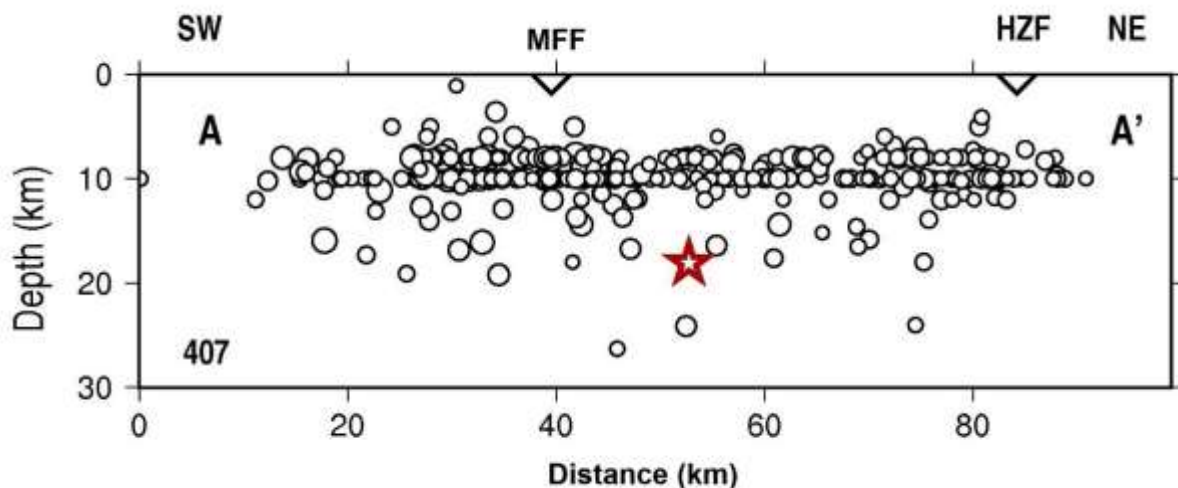




شکل ۱-۴ موقعیت مرکز سطحی زمین‌لرزه ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶، سرپل ذهاب مطابق با گزارش مراکز مختلف لرزه‌نگاری. سه پیش‌لرزه این زمین‌لرزه (ستاره‌های سبز)، ۵۲۶ پس‌لرزه (دایره‌های سفید) ثبت شده توسط مرکز لرزه‌نگاری کشوری وابسته موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IRSC) تا تاریخ ۱۳۹۶/۰۹/۰۷، سازوکار کانونی زمین‌لرزه بر اساس حل تانسور ممان (مرکز زلزله‌شناسی سازمان زمین‌شناسی آمریکا، USGS)، و موقعیت مقطع عرضی عمود بر لرزه‌خیزی و گسل‌های فعال در شکل نشان داده شده‌اند. گسل‌ها برگرفته از نقشه گسل‌های فعال ایران (حسامی و همکاران، ۱۳۸۲) می‌باشند.

توزیع پس‌لرزه‌های ثبت و مکانیابی شده توسط شبکه لرزه‌نگاری کشوری (موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران) بر روی مقطع عرضی که بصورت عمود بر روند لرزه‌خیزی مشاهده‌ای و گسل‌های منطقه رسم شده است، هیچگونه بخط شدگی واضح از رویدادها که دلالت بر فعالیت گسلی خاص نماید را نشان نمی‌دهد (شکل ۱-۵). این خود ناشی از خطای زیاد موجود در برآورد عمق کانونی پس‌لرزه‌ها بدلیل نبود ایستگاه‌های لرزه‌نگاری نزدیک به محل وقوع پس‌لرزه‌ها، عدم پوشش کامل منطقه، و نبود مدل سرعتی دقیق گستره مورد مطالعه می‌باشد. توزیع پس‌لرزه‌ها، هیچ صفحه شیب دار مشخص، نه با شیب کم به سمت شمال شرق، و نه با شیب زیاد به سمت جنوب غرب

را بگونه‌ای که در سازوکار کانونی محاسبه شده (USGS) دیده می‌شود نشان نمی‌دهد. تنها نکته قابل برداشت از توزیع فوق، پهنای زیاد زون پس‌لرزه‌هاست که با وجود یک صفحه کم شیب سازگارتر است. لازمه تعیین هندسه، ابعاد دقیق، و سازوکار گسل یا گسل‌های مسبب زمین‌لرزه سرپل‌ذهاب، نصب و راه‌اندازی یک شبکه لرزه‌نگاری متراکم و پر تعداد از ایستگاه‌ها، و تحلیل و تفسیر پس‌لرزه‌های ثبت شده در این شبکه خواهد بود.



شکل ۱-۵ توزیع پس‌لرزه‌های ثبت و مکانیابی شده توسط شبکه لرزه‌نگاری کشوری در راستای مقطع عرضی رسم شده بصورت عمود بر روند لرزه‌خیزی و گسل‌های منطقه (شکل ۱-۲). موقعیت کانون زمین‌لرزه اصلی سرپل‌ذهاب ( $M_w=7.3$ ) با ستاره نشان داده شده است. موقعیت گسل‌های منطقه، در راستای مقطع عرضی رسم شده، با مثلث وارون نشان داده شده است. MFF: گسل پیشانی کوهستان، HZF: گسل زاگرس مرتفع.

## ۱-۵ نصب شبکه لرزه‌نگاری محلی

با توجه به عدم وجود شبکه‌های لرزه‌نگاری محلی در گستره زمین‌لرزه ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶ سرپل‌ذهاب، پس‌لرزه‌های ثبت و مکانیابی شده توسط شبکه لرزه‌نگاری کشوری و شبکه ملی لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه، همانطور که در شکل (۱-۵) نیز نشان داده شد، از دقت کافی جهت شناسایی هندسه گسل مسبب و تعیین ابعاد آن برخوردار نیستند. وقوع پس‌لرزه‌های متعدد در پی زمین‌لرزه بزرگی چون زلزله سرپل‌ذهاب، داده‌های لرزه‌ای ارزشمندی را جهت به نقشه در آوردن یکی از گسل‌های زاگرس، که توانایی ایجاد یکی از بزرگترین زمین‌لرزه‌های این زون لرزه زمین‌ساختی را داشته است، فراهم می‌کند.

بنابراین، نصب و راه‌اندازی یک شبکه لرزه‌نگاری متراکم از ایستگاه‌های موقت، جهت ثبت و به نقشه در آوردن پس‌لرزه‌های زمین‌لرزه فوق‌الذکر از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. با آگاهی از این مهم، و بعنوان یکی از مأموریت‌ها و وظایف اصلی پژوهشگاه، بعنوان تنها مرکز پژوهشی که سابقه پایش پس‌لرزه‌های ده‌ها زمین‌لرزه بزرگ کشور را در کارنامه خود دارد، بلافاصله بعد از آگاهی از وقوع زلزله سرپل‌ذهاب، اقدام به تدارک مقدمات اعزام تیم تخصصی برای نصب و راه‌اندازی یک شبکه لرزه‌نگاری موقت در منطقه گردید.



از آنجائیکه پوشش منطقه مهلزهای با تعداد کافی از دستگاه‌های لرزه‌نگاری با رعایت فواصل بین ایستگاهی در محدوده ۱۰ تا ۱۵ کیلومتر ضروری است، آگاهی از موقعیت کانون زمین لرزه اصلی و توزیع پس‌لرزه‌های ثبت شده توسط شبکه لرزه‌نگاری کشوری که از تعداد بیشتر ایستگاه‌های لرزه‌نگاری در منطقه جهت ثبت و گزارش رویدادهای اصلی و پس‌لرزه‌ها بهره می‌برد، نقش مؤثری در انتخاب موقعیت‌های مناسب برای ایستگاه‌ها دارد.

لذا از همان دقایق ابتدایی صبح روز بعد از وقوع زمین لرزه، نقشه‌های لازم شامل زمین شناسی، توپوگرافی، جاده‌های دسترسی، توزیع روستاها، تصویر Google map و نقشه توزیع پس‌لرزه‌ها تهیه و یا ترسیم گردید. بحث‌های مفصلی جهت جایابی اولیه موقعیت ایستگاه‌های لرزه‌نگاری با توجه به موقعیت کانون زمین لرزه، سازوکار کانونی محاسبه شده، توزیع پس‌لرزه‌ها، نحوه توزیع راه‌های دسترسی، و موقعیت روستاها صورت گرفت. نقشه‌های لازم ترسیم و در اختیار تیم اعزامی قرار گرفت. همزمان دستگاه‌های لرزه‌نگاری شامل لرزه‌سنج‌های موجود که از دو نوع Lennarty (20 Sec-50HZ) و CMG-6TD (10sec-50HZ) می‌باشد، شتابنگارها که از نوع CMG-5TD هستند، و دیجیتایزرهای TITAN به‌همراه متعلقات شامل گیرنده GPS، صفحه خورشیدی، باتری خشک، منبع تغذیه و کابل‌های مربوطه جهت نصب و راه‌اندازی حداقل ۲۴ ایستگاه لرزه‌نگاری آماده ارسال شدند.

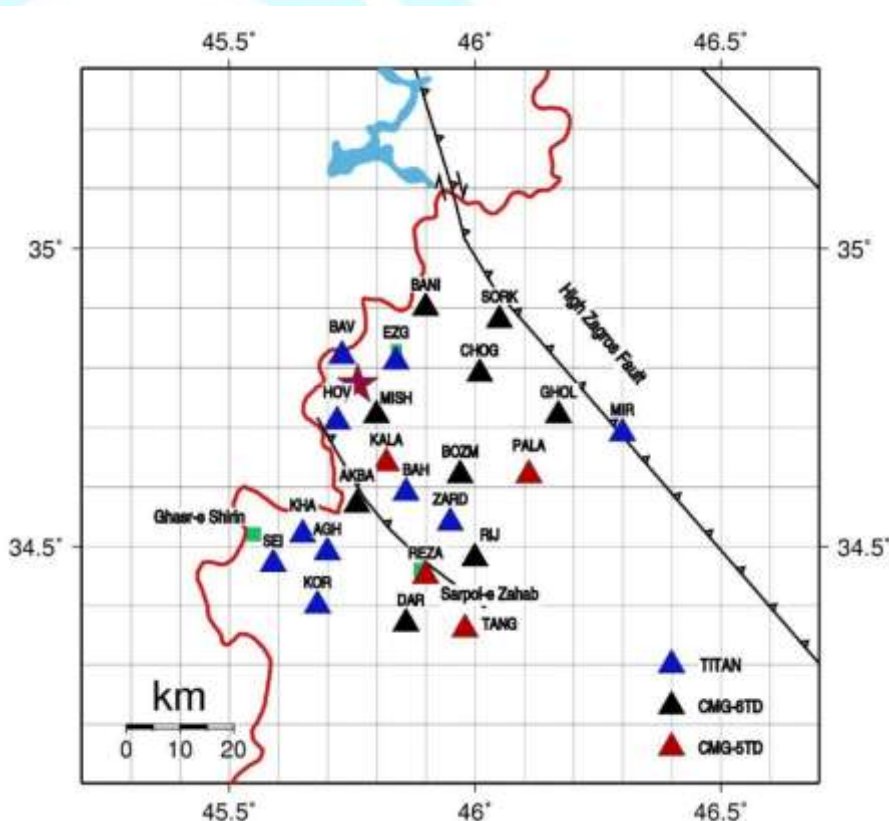
تیم اعزامی به‌همراه کلیه تجهیزات صبح روز بعد، یعنی دومین روز پس از وقوع زلزله عازم منطقه شدند، و بلافاصله پس از رسیدن، اقدام به شناسایی موقعیت‌های مناسب جهت نصب دستگاه‌ها نمودند. معمولاً در مناطق زلزله زده، بدلیل وسعت خرابی‌ها، ترافیک زیاد راه‌های دسترسی، عدم امکان یاری گرفتن از مسئولین روستاها و شوراها بدلیل در اولویت قرار داشتن امداد و کمک رسانی، کار جایابی ایستگاه‌ها به کندی و با دشواری زیاد انجام می‌گیرد. علی‌رغم تلاش زیاد و صرف بیش از ۱۲ ساعت کار مداوم، ساعت‌ها رانندگی در جاده‌ها، عمداً امکان نصب بیش از سه ایستگاه لرزه‌نگاری در روز برای تیم اعزامی میسر نگردید.

مختصات ایستگاه‌های لرزه‌نگاری نصب شده، بلافاصله به تهران ارسال می‌شد تا با پلات موقعیت‌ها بر روی نقشه به روز شده توزیع پس‌لرزه‌ها، نسبت به جایابی ایستگاه‌های جدید، در فواصل و جهات معین از ایستگاه‌های نصب شده، تصمیم لازم صورت گیرد. هماهنگی زیاد میان تیم اعزامی و تیم مستقر در تهران، و تبادل اطلاعات فیما بین که گاهاً تا پاسی از نیمه شب بطول می‌انجامید، نهایتاً منجر به نصب شبکه‌ای منسجم از ایستگاه‌ها با فواصل مناسب از یکدیگر گردید. علی‌رغم دشواری راه‌های دسترسی، منطقه‌ای مهلزهای بخوبی تحت پوشش دستگاهی قرار گرفت. موقعیت ۲۳ ایستگاه لرزه‌نگاری نصب شده در طی ۸ روز کار مداوم در شکل (۱-۶) نشان داده شده است. شبکه بندی صورت گرفته در نقشه‌های ترسیمی که بطور مرتب هر شب بعد از به روز رسانی و پلات کردن ایستگاه‌های جدید، برای تیم اعزامی مستقر در منطقه ارسال می‌گردید، کمک مؤثری در جایابی مناسب ۲۳ ایستگاه لرزه‌نگاری در منطقه گردید. موقعیت نهایی شبکه لرزه‌نگاری متراکم نصب شده شامل ۲۳ دستگاه موقت لرزه‌نگاری در شکل (۱-۷) رسم شده است. توزیع مناسب ایستگاه‌ها، پوشش کامل

منطقه کانونی زمین لرزه اصلی و پس لرزه های مکانیابی و گزارش شده توسط شبکه لرزه نگاری کشوری، بخوبی در شکل مشهود است.

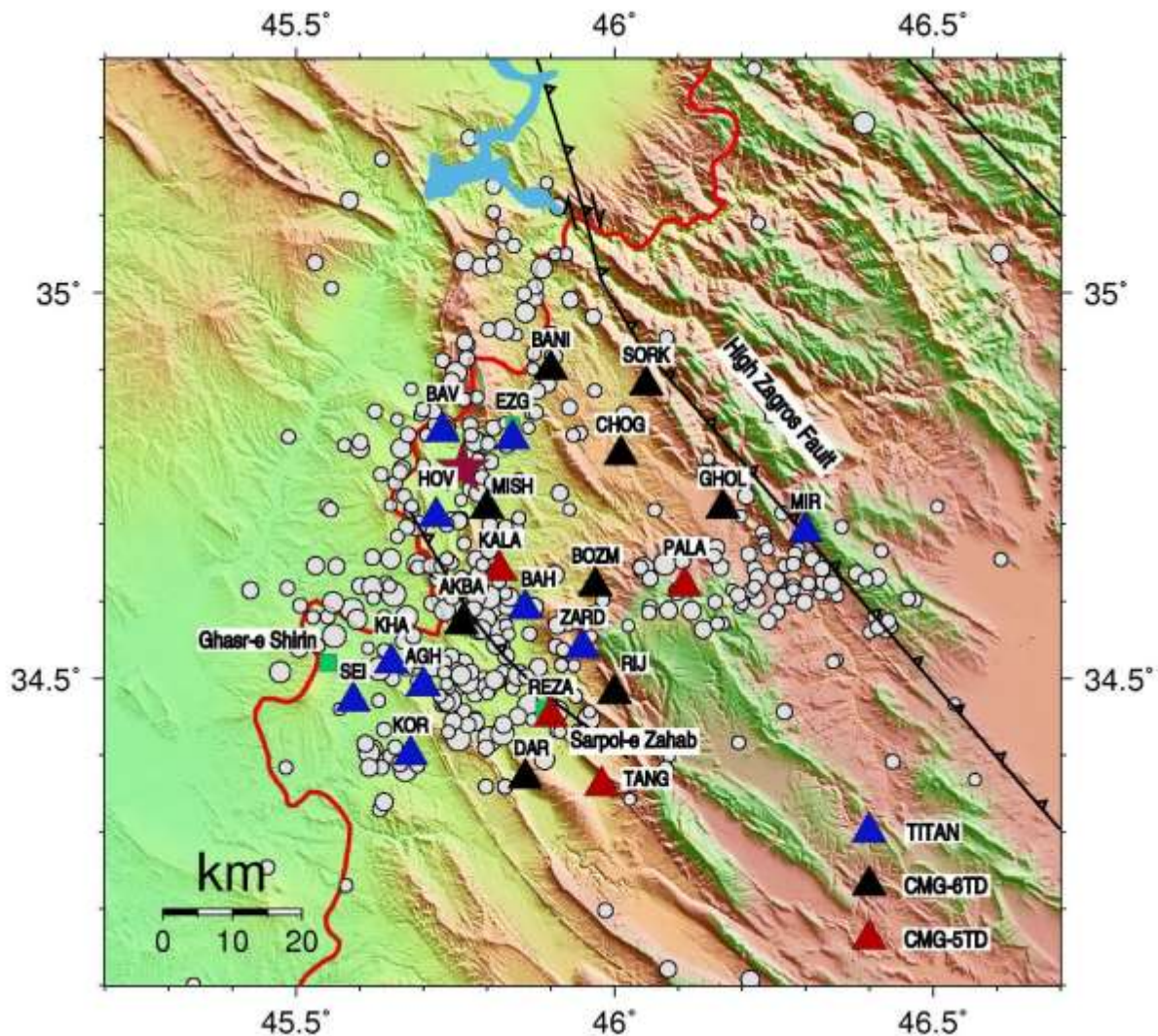
تعداد بالای ایستگاه های لرزه نگاری، و فواصل بین ایستگاهی کم، امکان ثبت و مکانیابی پس لرزه های رویداده با دقت بسیار بالا را میسر ساخته و لذا شناسایی هندسه، ابعاد و سازوکار گسل مسبب زمین لرزه، که اطلاعاتی بسیار ارزشمند خواهند بود، پس از تحلیل پس لرزه ها ممکن خواهد شد.

امکان تکمیل شبکه لرزه نگاری موقت نصب شده در مراحل بعد وجود دارد که حتماً انجام خواهد شد. پس از ارزیابی اولیه توزیع پس لرزه های ثبت و مکانیابی شده در روزهای اول توسط شبکه فوق الذکر، جابجایی برخی ایستگاه های نصب شده و یا اضافه کردن چند ایستگاه جدید در صورت نیاز در دستور کار تیم اعزامی دوم قرار خواهد گرفت. در مراحل بعدی و بهنگام پردازش و تحلیل پس لرزه های زمین لرزه سرپل ذهاب، از داده های زمین لرزه های ثبت شده در ایستگاه های وابسته به شبکه های لرزه نگاری دائمی مستقر در منطقه، شامل ایستگاه های شبکه لرزه نگاری کشوری وابسته به مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، شبکه لرزه نگاری سدهای داریان و جاوه وابسته به شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، و ایستگاه های باند پهن مرکز ملی شبکه لرزه نگاری باند پهن پژوهشگاه، حتماً استفاده خواهد شد.



شکل ۱-۶ توزیع ایستگاه های لرزه نگاری شبکه موقت نصب و راه اندازی شده توسط تیم اعزامی پژوهشگاه جهت ثبت و پایش پس لرزه های زمین لرزه ۱۳۹۶/۰۸/۲۱ سرپل ذهاب. توزیع مناسب ایستگاه ها، و پوشش خوب گستره مورد مطالعه، حتی در مناطق مرزی، علی رغم دشواری راه های دسترسی بخوبی در شکل مشهود است.





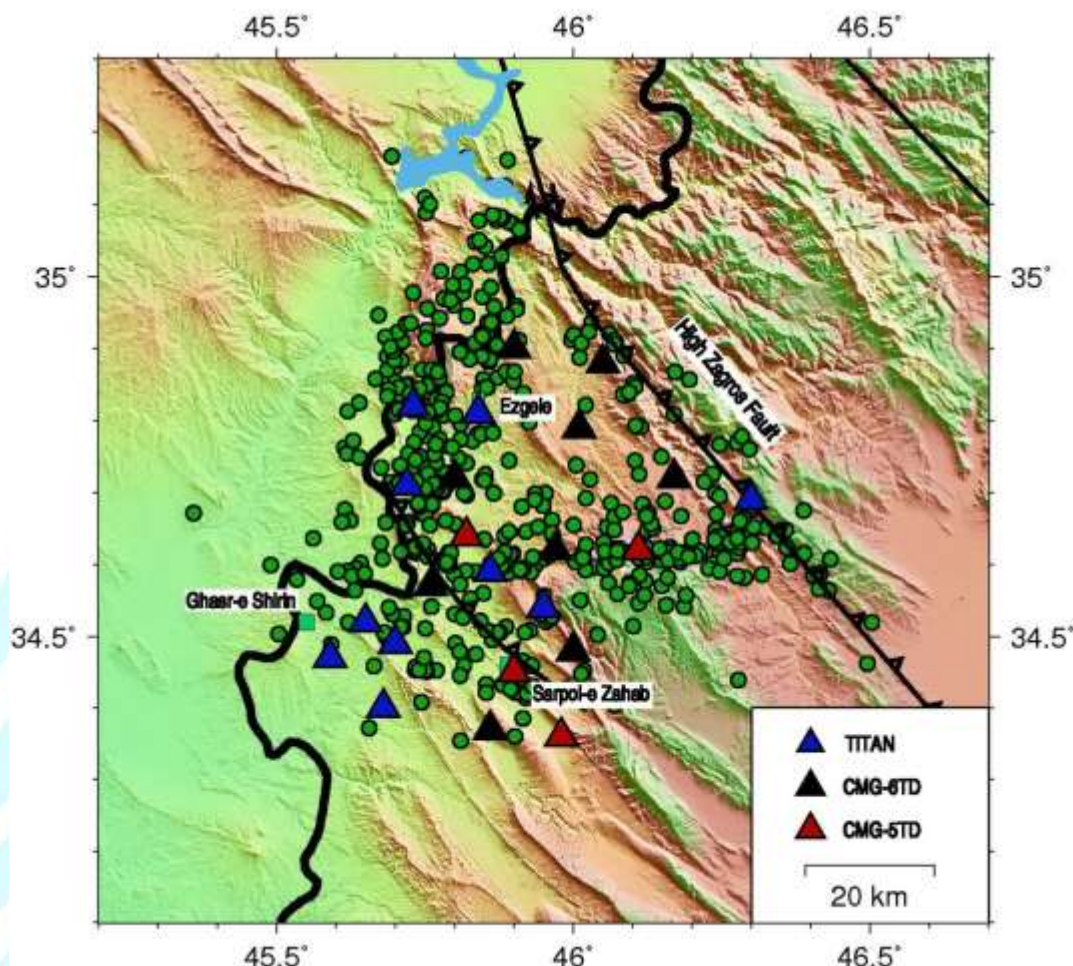
شکل ۱-۷ توزیع نهائی ایستگاه‌های لرزه نگاری شبکه موقت نصب و راه اندازی شده توسط تیم اعزامی پژوهشگاه، همراه با پس‌لرزه‌های ثبت و گزارش شده تا زمان نصب شبکه موقت. توزیع مناسب ایستگاه‌ها، و پوشش خوب گستره مورد مطالعه با توجه به گستردگی پس‌لرزه‌ها، در شکل بخوبی مشهود است. در شبکه لرزه‌نگاری موقت نصب شده، از دو نوع دستگاه لرزه‌نگاری و یک نوع دستگاه شتاب‌نگاری استفاده گردید که در شکل نحوه توزیع آنها مشهود است.

## ۱-۶ تحلیل پس‌لرزه‌های ثبت شده در شبکه محلی

از آنجائیکه امکان گردآوری داده‌های ثبت شده در تمامی ۲۳ ایستگاه نصب شده، بلافاصله پس از اتمام مرحله نصب میسر نبود، در تحلیل اولیه داده‌ها، تنها داده‌های ثبت شده در ۹ ایستگاه لرزه‌نگاری CMG-6TD در محدوده زمانی ۲۵ تا ۲۸ آبان ماه، مورد بررسی قرار گرفت. بدیهی است که دقت تعیین محل لرزه‌ها با استفاده از داده تمامی ایستگاه‌ها بسیار دقیق‌تر از نتایج بدست آمده از تحلیل ۹ ایستگاهی خواهد بود.

پس از استخراج ۵۶۴ پس‌لرزه از داده‌های پیوسته و قرائت فازها، این پس‌لرزه‌ها توسط مدل استاندارد ارائه شده برای استان کرمانشاه تعیین محل گردید. توزیع مکانی پس‌لرزه‌های تعیین محل شده نشان می‌دهد که شبکه

طراحی شده بخوبی پس لرزه‌ها را پوشش داده است. با این حال جهت پوشش بهتر گستره پس لرزه‌ها، نصب چند لرزه‌نگار دیگر، در حین بازدید اول از شبکه، در دستور کار قرار گرفت.

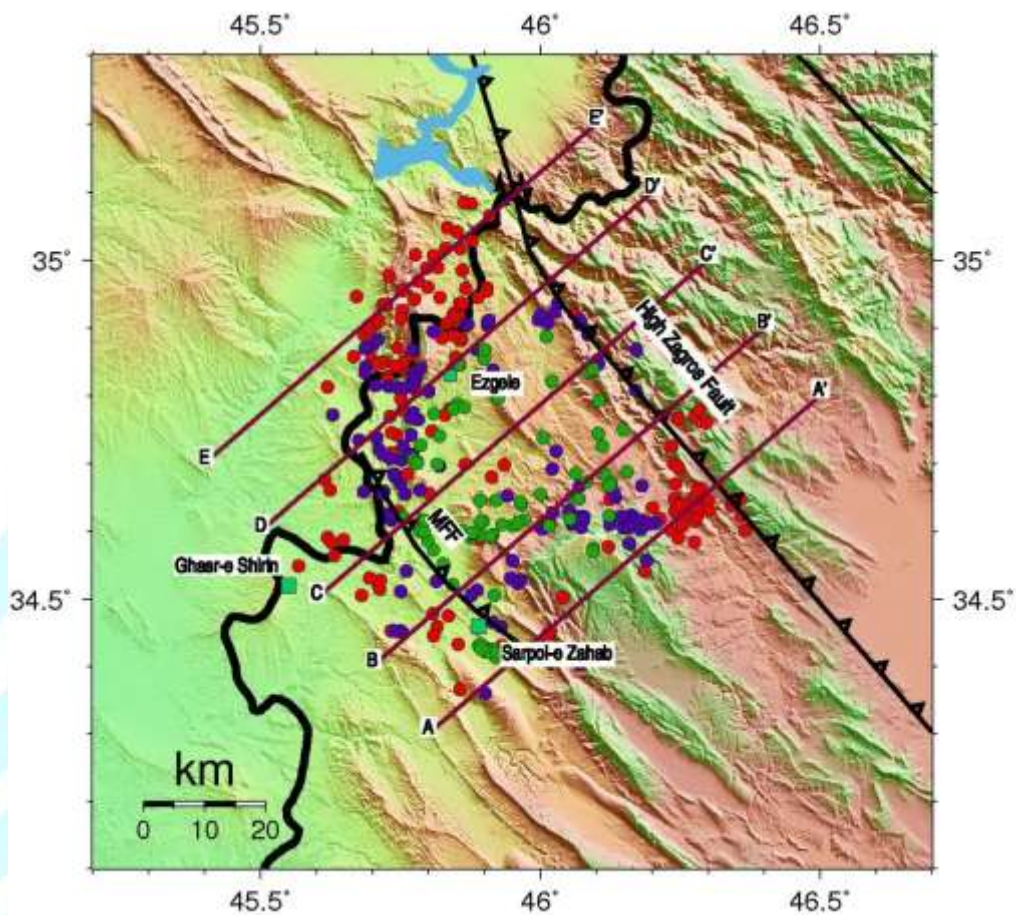


شکل ۸-۱ توزیع ۵۶۴ پس لرزه ثبت شده توسط ۹ ایستگاه CMG-6TD شبکه لرزه نگاری موقت (مثلث‌های سیاه رنگ) از مجموع ۲۳ ایستگاه نصب شده در طی چهار روز از ۲۵ تا ۲۸ آبان ماه ۱۳۹۶

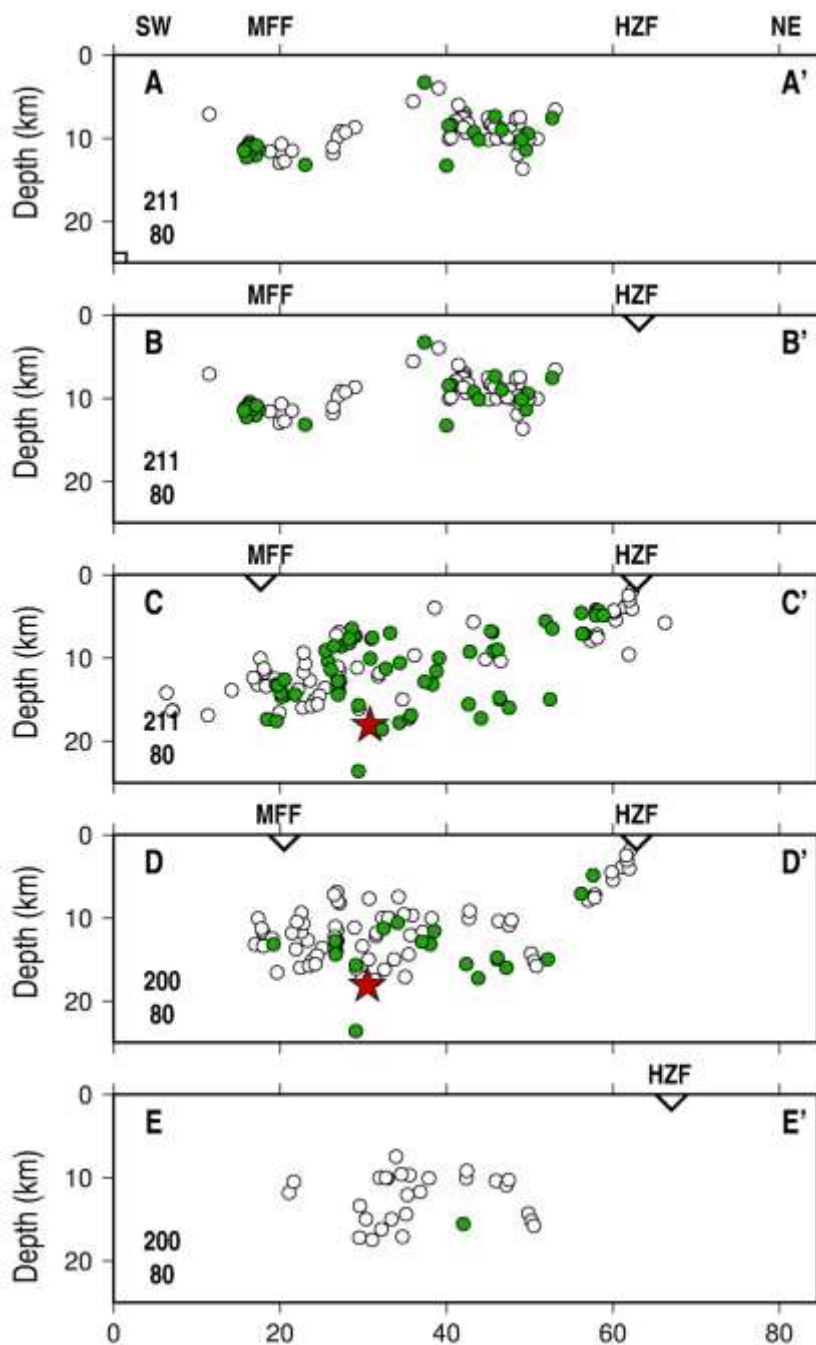
توزیع مناسب ایستگاه‌ها، و پوشش خوب گستره مورد مطالعه با توجه به گستردگی پس لرزه‌ها، در شکل (۸-۱) بخوبی مشهود است. همانطور که در شکل فوق مشهود است، پس لرزه‌ها در منطقه وسیعی توزیع شده‌اند و حکایت از یک شکستگی بزرگ قابل انتظار برای زمین لرزه‌ای با بزرگای بیش از ۷ دارند. بطور کلی سه روند اصلی لرزه‌خیزی: تقریباً شمالی- جنوبی نزدیک به مرز ایران و عراق، شمال غرب- جنوب شرق که از شهر سرپل ذهاب عبور می‌کند، و روند تقریباً شرقی- غربی در حد فاصل دو گسل MFF و HZF از توزیع تمامی ۵۶۴ پس لرزه قابل استنباط است. جهت بررسی دقیق‌تر، توزیع پس لرزه‌ها با معیارهای دقت مکانی ۵ کیلومتر و گپهای آزمون‌های ۲۰۰ و ۲۷۰ درجه مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۹-۱). توزیع پس لرزه‌های انتخابی موارد ذکر شده در خصوص توزیع کل ۵۶۴ پس لرزه تعیین محل شده (شکل ۸-۱) را تایید می‌کنند و سه روند یاد شده با وضوح بیشتری



قابل مشاهده است. توزیع کانون عمقی زمین لرزه‌ها در راستای مقاطع عرضی عمود بر لرزه خیزی در شکل (۱) - (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۱-۹ توزیع پس لرزه‌های انتخابی تعیین محل شده با ۹ ایستگاه لرزه نگاری، از ۲۵ تا ۲۸ آبان ماه ۱۳۹۶. خطای مکانی تمامی پس لرزه‌های انتخابی کمتر از ۵ کیلومتر می باشد. دایره های سبز رنگ معرف پس لرزه‌های انتخابی با معیار گپ آزمونوتی کوچکتر از ۲۰۰ درجه و دایره های آبی رنگ معرف پس لرزه‌های انتخابی با معیار گپ آزمونوتی کوچکتر از ۲۷۰ درجه می باشند.



شکل ۱-۱۰ توزیع عمقی ۲۰۰ و ۸۰ پس لرزه انتخابی با خطای مکانیابی کمتر از ۵ کیلومتر و انفصال آزیموتی به ترتیب ۲۷۰ و ۲۰۰ درجه، در راستای مقاطع عرضی رسم شده بصورت عمود بر لرزه خیزی و روند گسل‌های منطقه. موقعیت گسل‌ها در راستای مقاطع و کانون عمقی زمین لرزه اصلی سرپل ذهاب (ستاره) در شکل نشان داده شده‌اند. روندی نسبتاً پُر شیب که امتداد آن به رد گسل MFF می‌رسد در مقطع CC' قابل استنباط است. پس لرزه‌های تعیین محل شده در شمال شرق شبکه از عمق‌های کمتری برخوردار هستند (مقاطع AA', BB' و CC').

توزیع کانون ژرفی پس لرزه‌ها در راستای پنج مقطع عمود بر ساختارهای تکتونیکی اصلی منطقه (شکل ۱-۱۰) نشان می‌دهد پس لرزه‌های انتخابی (با خطای حداکثر  $\pm 5$  کیلومتر) در بازه عمقی ۵ تا ۲۰ کیلومتر واقع شده‌اند.

در هر حال بررسی دقیق توزیع پس لرزه ها که ارتباط لرزه خیزی با گسل های فعال را نشان خواهد داد، نیازمند تعیین محل پس لرزه های بیشتر بکمک داده های جمع آوری شده از تمامی ایستگاه ها می باشد.

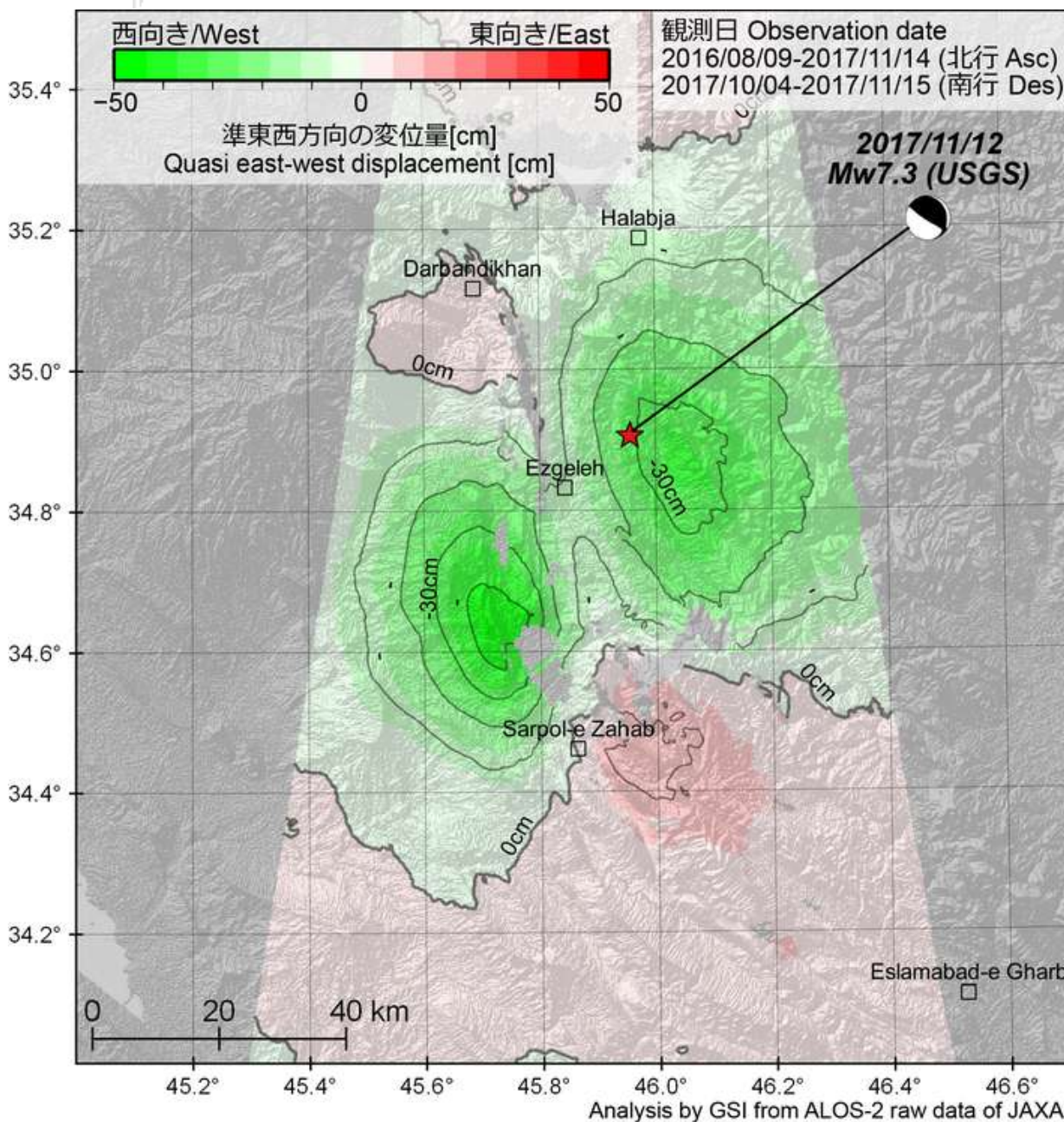
نکته قابل توجه دیگر در توزیع عمقی پس لرزه ها، به خط شدگی رویدادها لرزه ای در مقطع 'CC است که امتداد آن از کانون زمین لرزه عبور می کند و به رد گسل MFF در سطح زمین می رسد. این بخت شدگی نسبتاً شیب تندی را به سمت شمال شرق نشان می دهد. البته نسبت دادن زمین لرزه سرپل ذهاب به فعالیت این گسل است، و یا تعیین هندسه گسل مسبب و گسل های فعال شده در اثر شوک اصلی، نیاز به تحلیل پس لرزه های بیشتر، ثبت شده در ایستگاه های بیشتر، و مکانیابی مجدد با مدل سرعتی بهینه منطقه و استفاده از روش های پیشرفته تر مکانیابی دارد.

بطور خلاصه توزیع رومرکز پس لرزه های ثبت شده در شبکه موقت محلی از ۲۵ تا ۲۸ آبان ماه ۱۳۹۶، در عمقی بین ۵ تا ۲۰ کیلومتر واقع شده و حداقل سه راستای متفاوت به خط شدگی را نشان می دهند که بر یک شکستگی مرکب و یا فعال شدن گسل های منطقه در اثر شوک اصلی دلالت دارد. با نگاهی به سازوکار تعیین شده برای این زمین لرزه (شکل ۱-۱)، روند شمالی-جنوبی پس لرزه ها، با صفحه نودالی که دارای امتداد شمالی-جنوبی است، سازگار است و ترکیبی از لغزش های معکوس و امتداد لغز راستگرد را نشان می دهد. علاوه بر این روند، روند دیگری از رومرکز پس لرزه ها، با راستای شرقی-غربی قابل مشاهده است که می تواند به فعالیت گسلی فرعی، متأثر از تنش آزاد شده روی گسل اصلی نسبت داده شود. این لرزه خیزی، از عمق نسبتاً کمتری نسبت به پس لرزه های ثبت شده در غرب و جنوب شبکه موقت برخوردار هستند.

## ۱-۷ تغییر شکل پوسته زمین

مطابق با مدل اولیه تهیه شده توسط موسسه GSI کشور ژاپن ( Geospatial Information Authority of Japan)، بر پایه تحلیل داده های InSAR، جابجائی بیشینه حدود ۹۰ سانتی متر به سمت بالا، و حدود ۵۰ سانتی متر به سمت غرب در فاصله ۲۰ کیلومتری شمال غرب سرپل ذهاب مشاهده می گردد (اشکال ۱-۲ و ۱-۱۱). در محل کانون زمین لرزه، بیشینه جابجائی حدود ۳۰ و ۳۵ سانتی متر به ترتیب به سمت پایین و غرب محاسبه شده است. منطقه با جابجائی بیش تر از ۱۰ سانتی متر، حداقل ۸۰ کیلومتر گسترش دارد (اشکال ۱-۲ و ۱-۱۱).





شکل ۱-۱ پیشینه جابجائی مشاهده شده در محل کانون زمین لرزه ۹۶/۰۸/۲۱ سرپل ذهاب (GSI).

### ۱-۸ پیشینه لرزه خیزی منطقه

توزیع زمین لرزه‌های تاریخی و دستگاهی صده اخیر در گستره مهلزهای زمین لرزه ۱۳۹۶/۰۸/۲۱ سرپل ذهاب (Mw=7.3)، دلالت بر سابقه فعالیت لرزه‌ای کم منطقه دارد. بجز زمین لرزه‌های مشاهده شده در فاصله حدود ۲۵ کیلومتری جنوب قصرشیرین که مرتبط با وقوع فوج زمین لرزه‌های شهرستان قصرشیرین در آذرماه ۱۳۹۲ است، عملاً فعالیت لرزه‌ای قابل توجهی در منطقه در طی صد سال اخیر مشاهده نمی‌گردد. غالب زمین لرزه‌های دستگاهی رویداده در منطقه دارای بزرگای گشتاوری کمتر از ۵ هستند. عملاً در بخش وسیعی از گستره اطراف کانون زمین لرزه اخیر سرپل ذهاب، زمین لرزه‌ای با بزرگای بالای ۶ مشاهده نمی‌گردد (شکل ۱-۱۲).

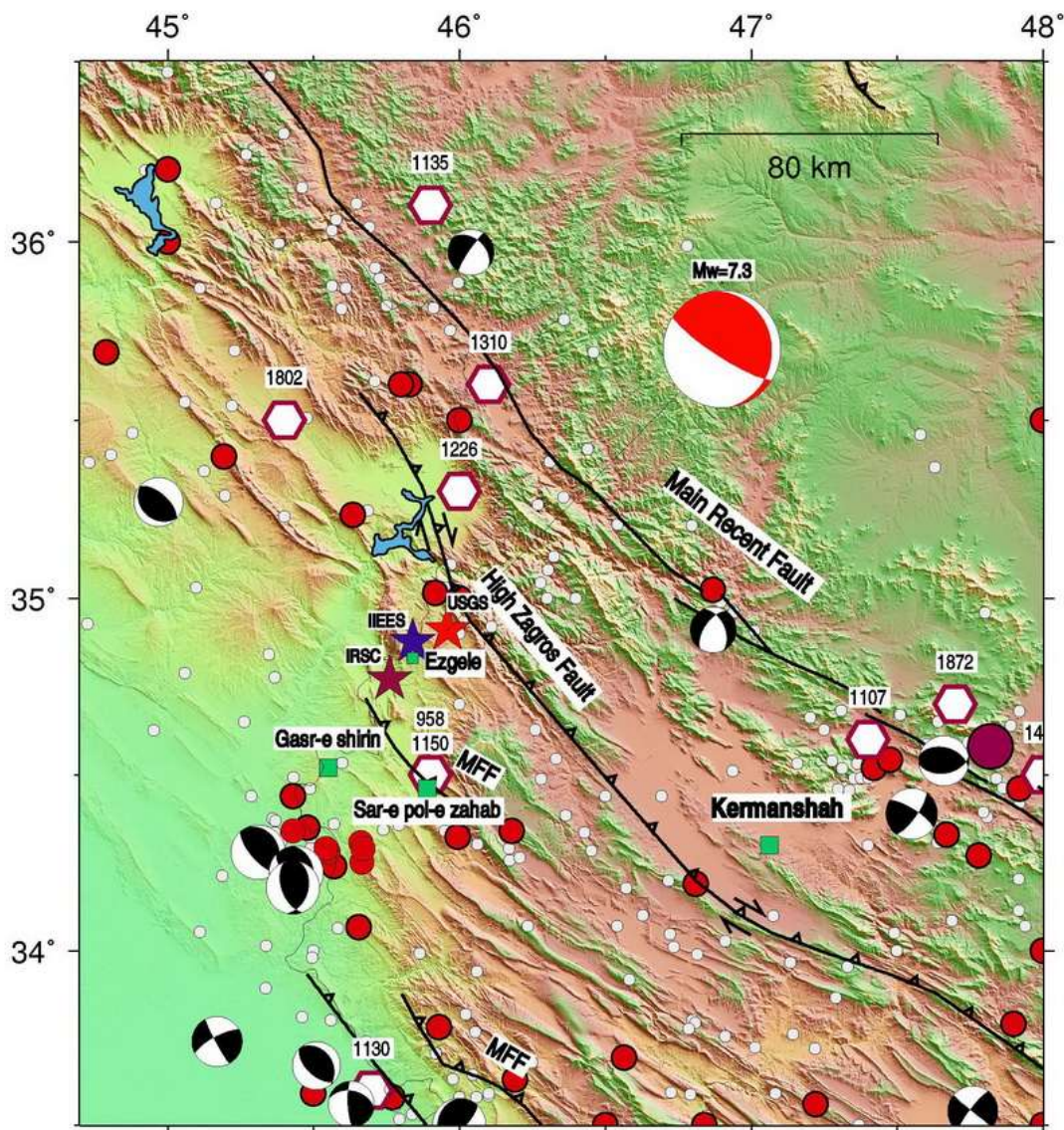


یکی از مناطقی که فرضیه عدم وقوع زمین لرزه های با بزرگای بالا ۷ در بخش چین خورده - رورانده زاگرس را قوت می بخشید، این بخش از زون لرزه-زمین ساختی زاگرس بود.

بلحاظ لرزه خیزی تاریخی اما دو زمین لرزه ۹۵۸ و ۱۱۵۰ میلادی با بزرگای تخمینی به ترتیب ۶/۴ و ۵/۹ در مجاورت شهر سرپل ذهاب گزارش شده اند که سابقه لرزه خیزی بالای این شهر را نشان می دهد. زمین لرزه آوریل ۹۵۸ میلادی حلوان، سرپل ذهاب کنونی را ویران کرد و بسیاری را در جبال کشت. زمین لرزه که در بغداد حس شد و پس لرزه های آن که به تناوب در سرتاسر ماه های نخست سال ادامه داشت، بر منابع آب زیرزمینی در زاگرس اثر گذاشت. بزرگای زمین لرزه ی اصلی ۶/۴ در مقیاس امواج سطحی (Ms) برآورد شده است (آمبرسیز و ملویل، ۱۹۸۲).

زمین لرزه آوریل ۱۱۵۰ میلادی حلوان نیز زمین لرزه ی ویرانگر دیگری است که در منطقه ی حلوان (سرپل ذهاب) روی داد و سبب دگرریختی های زمین در کوه ها شد. رباط بهروزی ویران شد و شمار زیادی از کوچ نشینان ترکمن کشته شدند. در بغداد زمین لرزه به شدت حس شد و زمین به هنگام جنبش چندبار شکل امواج به خود گرفت و باعث ترک خوردن برخی دیوارها شد. بزرگای این زمین لرزه ۵/۹ در مقیاس امواج سطحی (Ms) برآورد شده است (آمبرسیز و ملویل، ۱۹۸۲).

از نظر سازوکار گسل های این بخش از زاگرس، همانطور که مشاهده می گردد غالب سازوکارهای حاکم بر زمین لرزه های این زون از نوع معکوس یا تراستی بر روی صفحه های با روند شمال غرب-جنوب شرق کم و بیش مشابه سازوکار زمین لرزه اخیر سرپل ذهاب هستند (شکل ۱-۱۲).



شکل ۱-۱۲ نقشه زمین‌لرزه‌های تاریخی (شش ضلعی‌ها) بر گرفته از آمبرسیز و ملویل (۱۹۸۲) و لرزه‌خیزی دستگاہی (۱۹۰۰-۲۰۱۷) بر اساس کاتالوگ مرکز ملی شبکه لرزه‌نگاری باند پهن پژوهشگاه. دایره‌های سفید زمین‌لرزه‌های دستگاہی با بزرگای کمتر از ۵، دایره‌های قرمز زمین‌لرزه‌های با بزرگای بین ۵ و ۶، و دایره‌های صورتی زمین‌لرزه‌های با بزرگای ۶ تا ۷ را نشان می‌دهند. موقعیت مرکز سطحی زمین‌لرزه ۲۱ آبان‌ماه ۱۳۹۶ سرپل‌ذهاب مطابق با گزارش مراکز مختلف لرزه‌نگاری، و گسل‌های فعال منطقه (حسامی آذر و همکاران ۱۳۸۲) در شکل نشان داده شده‌اند.

## ۹-۱ تعیین پارامترهای گسل مسبب و پراکندگی حرکات توانمند زمین در زلزله سرپل

### ذهاب

#### ۱-۹-۱- مقدمه

زمین لرزه سرپل ذهاب با بزرگای  $7/3$  در ساعت  $21/48$  به وقت محلی در بیست و یکم آبان ماه ۱۳۹۶ در نزدیکی شهر ازگله در استان کرمانشاه واقع در شمال غرب ایران به وقوع پیوست. این زلزله در پهنه وسیعی از ایران و صدها کیلومتر دور از مرکز زمین لرزه حتی در شهر تهران حس گردید که نشانگر وسعت بالای پهنای گسلش مربوط به گسل مسبب این زمین لرزه است. بعلاوه بررسی وسعت و شدت تخریب‌های شدید ساختمانی حاصل از این زمین لرزه نشانگر این حقیقت است که خسارات در مناطق و جهات خاصی در اطراف گسل مسبب تجمع یافته و از مقدار آن در دیگر مناطق به شدت کاسته می‌شود. این امر نشان‌دهنده تاثیر پذیری شدید حرکات توانمند زمین در سطح از فرایند گسلش در عمق، نظیر جهت انتشار گسیختگی، مقادیر لغزش و الگوی انتشار آن بر پراکندگی حرکات توانمند زمین در سطح می‌باشد. یک دلیل محکم بر این مدعا بیشینه شتاب بالا ثبت شده در شهر سرپل ذهاب با مقدار  $0/68g$  و کاهش شدید آن با فاصله در شهر گورسفید به میزان نصف این مقدار است. از آنجائیکه خسارات ساختمانی و جانی ارتباطی مستقیم با بیشینه شتاب زلزله در هر نقطه داشته و این بیشینه شتاب در فواصل نزدیک از گسل به شدت تابع مشخصات چشمه زلزله و نحوه گسلش در گسل مسبب زمین لرزه است، لذا لازم است تا پارامترهای گسلش در این زمین لرزه با دقت بالا تعیین گردد. بدین منظور در این قسمت مطالعات و بررسی‌های اولیه انجام شده جهت تعیین پارامترهای عمومی (مختصات کانونی، عمق، شیب، امتداد) و خاص گسلش (مقادیر لغزش، الگوی لغزش، سرعت انتشار گسیختگی و ...) در این زمین لرزه و ارتباط آن با پراکندگی حرکات توانمند زمین تشریح شده است.

#### ۱-۹-۲- روش و نحوه تحلیل

برای تعیین پارامترهای گسل مسبب زمین لرزه، استفاده از روش و اندازه‌گیری‌های مستقیم به دلیل عمق زیاد زلزله، وسعت سطح گسلش، ارتباط پارامترهای انتشار گسیختگی با زمان و فراوانی مقادیر مجهول امری محال است. لذا برای تعیین این پارامترها، از روش‌های معکوس به کمک تحلیل‌های برگشتی استفاده می‌شود. برای این منظور لازم است تا از لرزه‌نگاشت‌ها (سرعت‌سنج) و شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده از این زلزله در ایستگاه‌های مختلف لرزه‌نگاری استفاده نمود. بدین منظور مدلی از سطح گسل و پوسته زمین در محل (محیط انتشار موج) ساخته و پارامترهای گسل و گسلش آن با کمک روش‌های مختلف بهینه سازی به گونه‌ای تعیین می‌گردد که بهترین تطابق بین نگاشت‌های ثبت شده و مدل شده حاصل و پارامترهای گسلش تعیین گردد. جهت تعیین دقیق پارامترها در حوزه نزدیک گسل، لازم است تا سطح گسل به تعداد زیادی زیر گسل تقسیم شود. ضمناً



مشخصات مدل پوسته (محیط انتشار موج) شامل سرعت امواج P و S، ضخامت و دانسیته هر لایه به همراه روابط بیان کننده میرایی امواج با فاصله نیز از پارامترهای ورودی مدل بوده و باید قبل از انجام تحلیل تعیین گردد.

معمولا پارامترهای گسلش را می توان با استفاده از دو دسته داده های دور لرزه (Teleseismic) و لرزه نگاشت یا شتابنگاشت های نزدیک گسل تعیین نمود. استفاده از داده های دور لرزه ای می تواند در تعیین پارامترهای عمومی گسل مفید باشد ولی برای تعیین پارامترهای خاص گسلش به دلیل استفاده از محتوای فرکانس پایین کارایی لازم را ندارد. لازم به ذکر است که برای تعیین حرکات توانمند زمین در نزدیکی گسل و ارتباط آن با خسارات ساختمانی و جانی لازم است تا پارامترهای خاص گسلش را تعیین نمود و بدین منظور استفاده از داده های حوزه نزدیک گسل امری ضروری و اجتناب ناپذیر است.

### ۱-۹-۳- تحلیل داده های شتابنگاری ثبت شده در محدوده نزدیک گسل

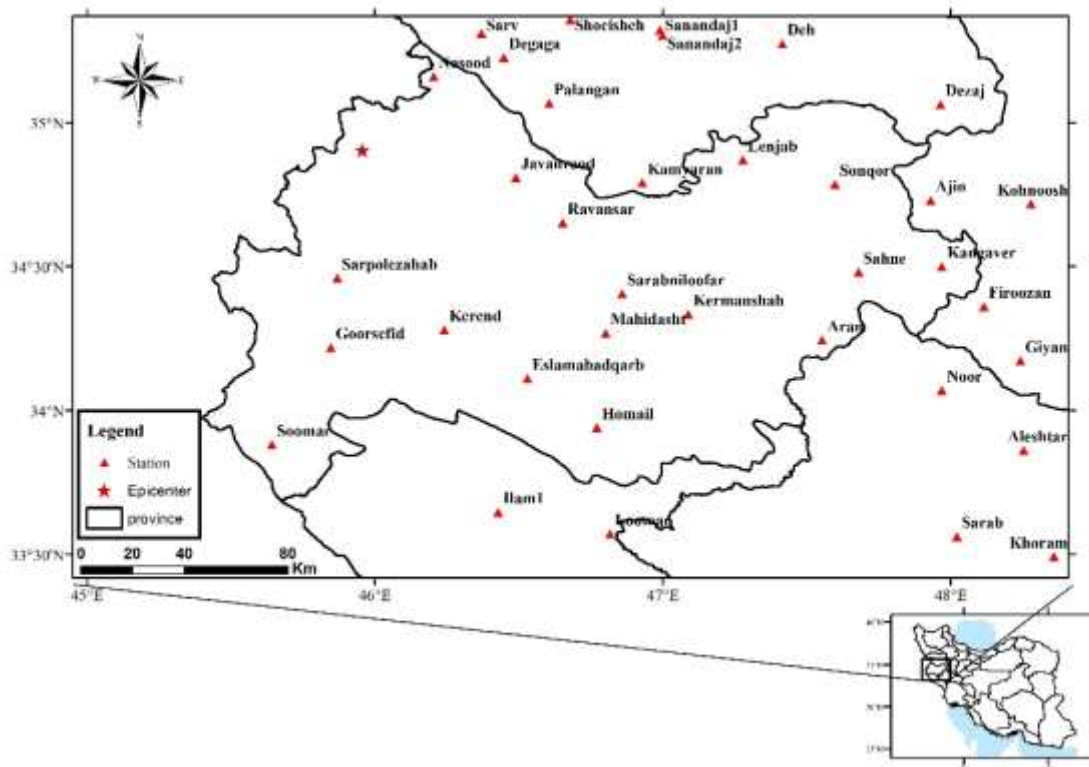
همانطور که در توضیحات فوق اشاره گردید، برای تعیین دقیق پارامترهای گسل مسبب زمین لرزه لازم است تا از داده های لرزه نگاری و شتابنگاری در فواصل نزدیک به مرکز زمین لرزه و گسل مسبب استفاده نمود. در این راستا می توان از داده های لرزه نگاری موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و یا داده های شتابنگاری مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن استفاده نمود. بررسی فواصل ایستگاه های لرزه نگاری موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران و ایستگاه های شتابنگاری مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن با مرکز زلزله، نشان داد که داده های شتابنگاری مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن در فواصل به مراتب نزدیکتری و به تعداد بیشتری به مرکز زمین لرزه واقع شده اند. لذا در این تحقیق از داده های مربوط به این مرکز استفاده شده است. در شکل (۱-۱۳) پراکندگی ایستگاه های شتابنگاری این مرکز در منطقه نشان داده شده است.

نقشه پراکندگی بیشینه شتاب ثبت شده در ایستگاه ها شتابنگاری مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن به روش درون یابی محاسبه و در شکل (۱-۱۴) نشان داده شده است. در این شکل بالاترین شتاب در ایستگاه سرپل ذهاب با مقدار  $0/68g$  ثبت شده است و این شتاب در گورسفید به حدود  $0/30g$  یعنی نصف، کاهش یافته است. با توجه به فاصله نه چندان دور این ایستگاه به مرکز سطحی زلزله، این تفاوت امری عجیب بنظر میرسد و توجه ما را به امکان رخداد پدیده ای خاص در این ایستگاه جلب می نماید. بدین منظور شتابنگاشت ثبت شده در این ایستگاه به همراه سرعت نگاشت محاسبه شده به کمک مشتق شتاب و اعمال فیلتر مناسب در شکل (۱-۱۵) نشان داده شده است. در سرعت نگاشت ایستگاه سرپل ذهاب حضور پالس سرعت که معمولا در حوزه نزدیک گسل بوقوع می پیوندد کاملا مشخص است. این پدیده که به پالس جهت یافتگی (Directivity Pulse) معروف است در اثر همراستایی جهت انتشار گسلش با جهت لغزش در سطح گسل به سمت ایستگاه لرزه نگاری سرپل ذهاب اتفاق افتاده است و باعث شده تا بیشینه شتاب در این ایستگاه به مقدار بیش از دو برابر

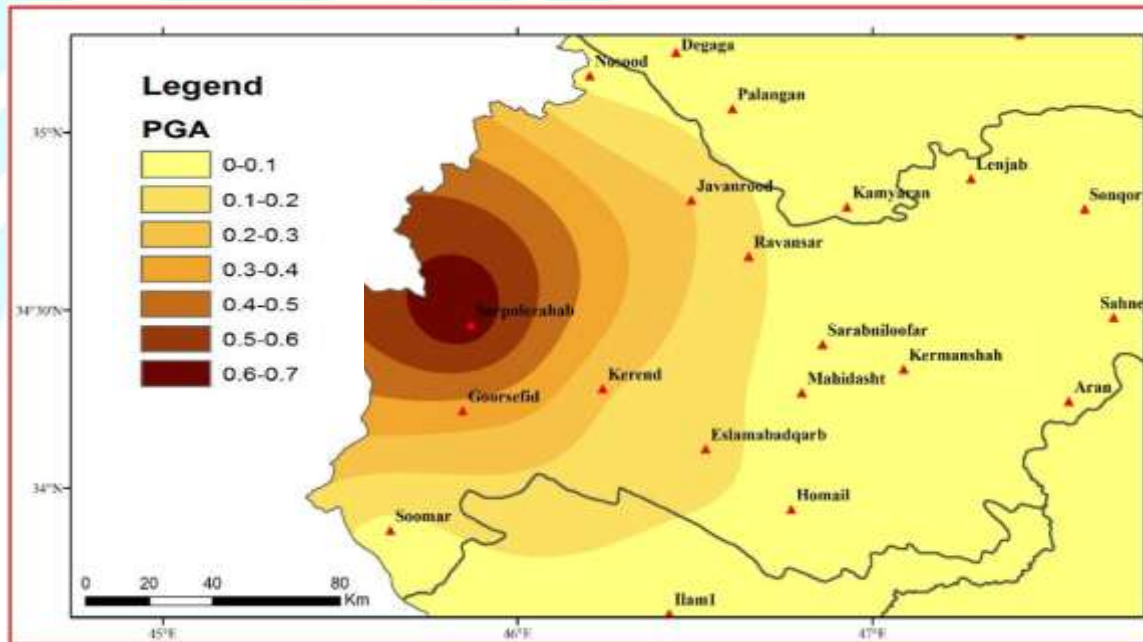
بیشینه شتاب در ایستگاه‌های دیگر با فواصل مشابه افزایش یابد. بدین ترتیب خساراتی بمراتب شدیدتر در اطراف این ایستگاه یعنی در شهر سرپل ذهاب و شهرک‌های (زراعی و قره‌بلاغ اعظم) و روستاهای (مجموعه روستاهای کوئیک) اطراف آن را موجب گردیده است.

این پدیده یکی از اثرات شاخص چشمه گسلش در منطقه نزدیک به گسل بوده و بار دیگر بر اهمیت شناخت فرایند گسلش در درک بهتر از بیشینه شتاب و پراکندگی آن در منطقه تاکید می‌نماید. افزون بر این، در زمین لرزه ۱۳۸۲ بم نیز همین اثر مشاهده و با ایجاد بیشینه شتاب حدود  $0.18g$  خسارات گسترده جانی و مالی را در شهر بم موجب گردید. این پالس با توجه به پیوند آن که معمولاً بزرگتر از ۱ ثانیه می‌باشد، خصوصاً می‌تواند برای ساختمان‌های بلند مرتبه (تقریباً ۸ یا ۱۰ طبقه به بالا)، سدها، پل‌ها، شریان‌های حیاتی (خطوط لوله آب، گاز و خطوط انتقال برق) بسیار خطر آفرین باشد و متأسفانه در آیین نامه طراحی ساختمان در ایران (استاندارد ۲۸۰۰) نیز از توجه به آن در طراحی ساختمان‌ها خصوصاً ساختمان‌های بلند مرتبه و با اهمیت بالا غفلت شده است.

در شکل (۱-۱۶) طیف شتاب زلزله سرپل ذهاب با طیف طراحی ارائه شده در آیین نامه طراحی ساختمان ایران بر حسب نوع خاک II مقایسه شده است. همانطور که از این شکل مشخص است شتاب طیفی چه در پیوندهای زیر یک ثانیه و چه در پیوندهای بالای ۱ ثانیه مقادیر بسیار بزرگتری را از مقادیر آیین نامه‌ای نشان می‌دهد. باید دقت نمود که علیرغم وجود ساختمان‌های مهندسی ساز در شهر سرپل ذهاب، ساختمان‌های بلند مرتبه یا برج در این شهر وجود نداشته و در صورت وجود چنین ساختمان‌هایی خسارت وارده می‌توانست بمراتب بالاتر باشد. کما اینکه وقوع خسارات گسترده به خطوط لوله آب و گاز یا ساختمان‌های صنعتی با پیوند بالا نظیر سیلوها خود می‌تواند دلیلی بر این مدعا باشد. وجود این پالس در زمین لرزه‌های بم و سرپل ذهاب و افزایش خسارات حاصل از آنها، بر لزوم مد نظر قراردادن این پدیده و انجام تمهیدات لازم در آیین نامه طراحی برای پیش‌بینی اثر آن در طراحی ساختمان‌ها خصوصاً ساختمان‌های بلند مرتبه تاکید و تایید می‌نماید. بدین ترتیب می‌توان در صورت بروز آن در اطراف شهرهای بزرگ با مجموعه‌ای از ساختمان‌های بلند مرتبه و برج‌ها از وقوع و تشدید خسارات سنگین به این نوع ساختمان‌ها جلوگیری نمود.

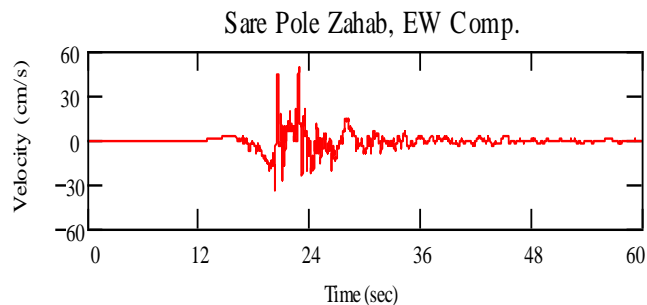
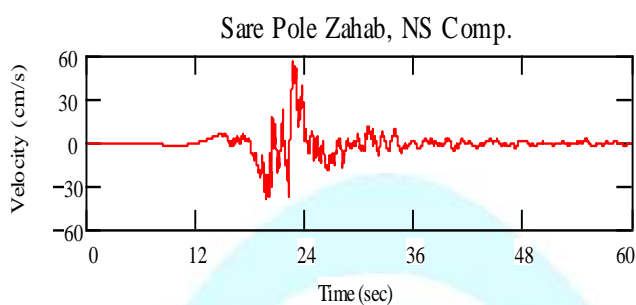
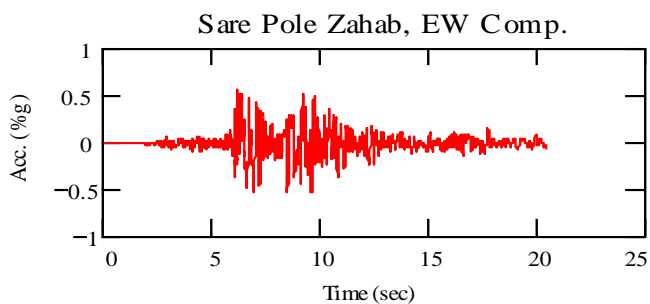
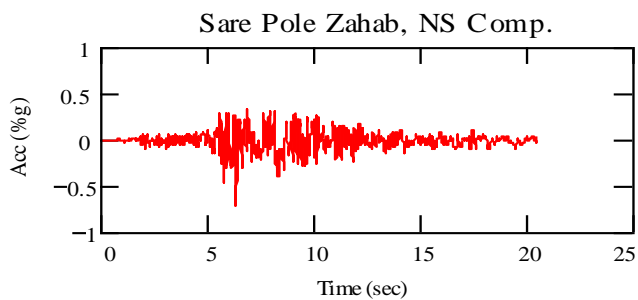


شکل ۱-۱۳ پراکندگی ایستگاههای شتابنگاری مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن در غرب ایران به همراه موقعیت رو مرکز زلزله

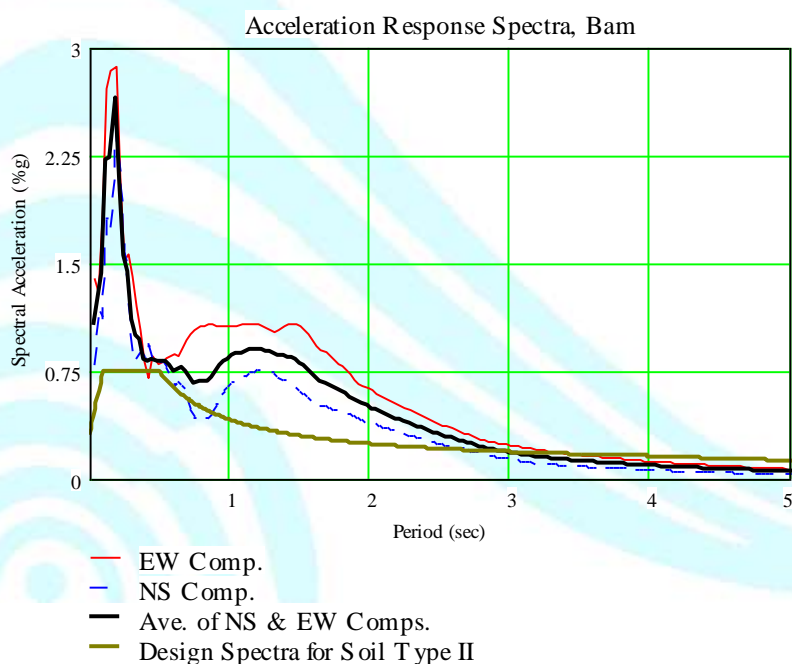
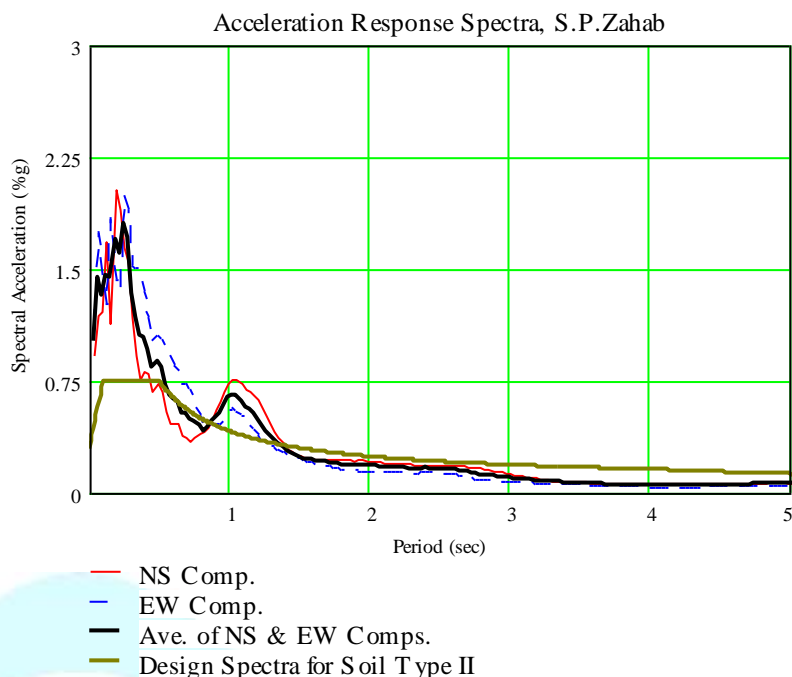


شکل ۱-۱۴ پراکندگی بیشینه شتاب در منطقه که به روش درون یابی براساس بیشینه شتابهای ثبت شده اصلاح نشده در ایستگاههای شتابنگاری محاسبه شده است.





شکل ۱-۱۵ شتاب‌نگاشت ثبت شده در ایستگاه سرپل ذهاب و سرعت‌نگاشت محاسبه شده آن.



شکل ۱-۱۶ مقایسه طیف طراحی برای خاک نوع II با شتاب‌نگاشت ثبت شده در زمینلرزه‌های ۱۳۹۶ سرپل‌زهاب و ۱۳۸۲ بم.

### ۱-۱۰ مدل گسل و پارامترهای گسلش ارائه شده بر اساس امواج دورلرزه

انرژی زلزله‌ای با بزرگای ۷٫۳ به قدری بالا است که تقریباً تمامی لرزه‌نگاشت‌های نصب شده توسط مراکز مختلف لرزه‌نگاری در نقاط مختلف کره زمین ثبت آنرا خواهند داشت. ولی با عبور امواج از لایه‌های زمین و طی مسافت طولانی محتوای فرکانس بالای امواج توسط لایه‌های زمین حذف یا فیلتر شده و امواج فرکانس پایین به این ایستگاه‌ها خواهند رسید. به عبارت دیگر حجمی از اطلاعات مهم یک لرزه‌نگاشت مربوط

به فرکانس‌های بالا با طی مسیر زیاد حذف و فقط اطلاعات مربوط به فرکانس پایین به ایستگاه‌های دور دست می‌رسد که به همین علت این امواج، امواج دور لرزه یا تله‌سایزمیک می‌نامند.

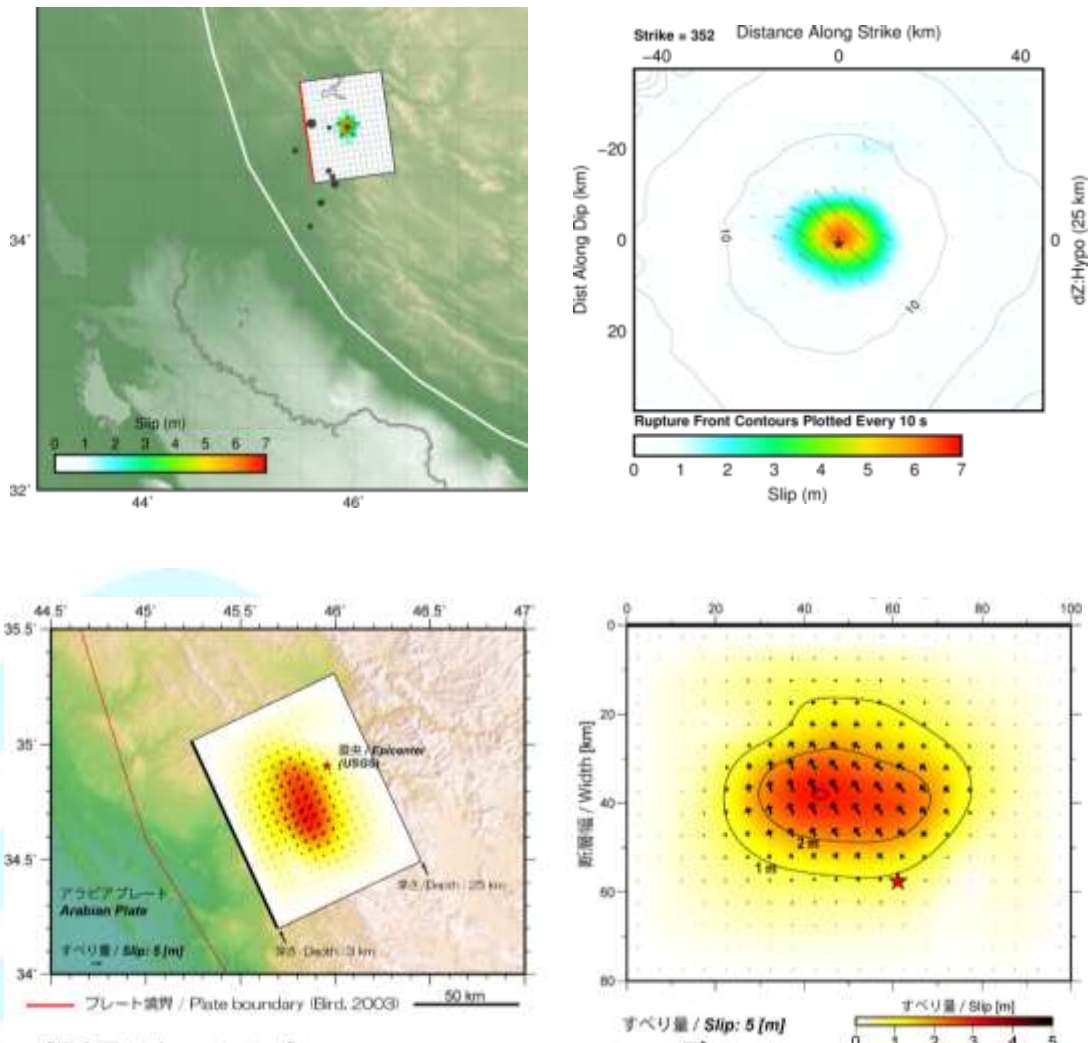
معمولا کشورهای لرزه‌خیز با شبکه‌های گسترده لرزه‌نگاری نظیر ژاپن یا آمریکا با دسترسی گسترده به بانک‌های اطلاعاتی لرزه‌ای در سرتاسر دنیا توسط یک سیستم اتوماتیک نسبت به برآورد مشخصات چشمه‌ای زلزله برای زلزله‌های مهم (با بزرگای بالای ۶) واقع در دیگر نقاط دنیا اقدام می‌نمایند. در این راستا سازمان زمین‌شناسی آمریکا و مرکز اطلاعات جغرافیای ژاپن نسبت به ارائه پارامترهای گسلش برای زمین‌لرزه سرپل‌نهاب اقدام نمودند که مدل‌های ارائه شده توسط آنها در شکل (۱-۱۷) نشان داده شده است.

در خصوص پارامترهای عمومی گسلش هر دو مرکز، کانون زمین‌لرزه یا موقعیت شروع گسلش را مختصات  $34/90.5$  درجه شمالی و  $45/95.6$  درجه شرقی و شیب آنرا  $16$  درجه اعلام نموده ولی عمق کانونی توسط سازمان زمین‌شناسی  $21$  کیلومتر و توسط مرکز اطلاعات جغرافیای ژاپن  $19$  کیلومتر عنوان شده است. در خصوص پارامترهای خاص گسلش همانطور که شکل (۱-۱۶) مشخص است، هر دو مدل جهت لغزش (با فلش‌های مشکی بر روی سطح گسل نشان داده شده است) برای زیر گسل‌های مختلف بر روی سطح گسل را متغیر بین  $120$  تا  $160$  درجه نشان می‌دهد. بعلاوه در هر دوی شکل‌ها یک منطقه با لغزش بالا بر روی سطح گسل که با مناطق قرمز نشان داده شده است و اصطلاحا اسپریتی نامیده میشود را معرفی کرده‌اند. بنابر تعریف، اسپریتی مناطقی بر روی سطح گسل است که میزان لغزش در آنها از میانگین لغزش بر روی کل سطح گسل بیشتر می‌باشد. بنابر این هر دو مدل یک تک اسپریتی را نشان می‌دهند ولی میزان حداکثر لغزش توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا  $6/5$  متر و توسط مرکز اطلاعات جغرافیای ژاپن  $4$  متر برآورده شده است. بعلاوه موقعیت و گسترش اسپریتی بین این دو مدل متفاوت می‌باشد. این مدل‌ها بسیار ابتدایی بوده و لازم است تا توسط لرزه‌نگاشت‌ها یا شتاب‌نگاشت‌های حوزه نزدیک گسل تدقیق شوند و استفاده از پارامترهای خاص گسلش ارائه شده توسط این مدل‌ها بدون تدقیق اطلاعات شتاب‌نگاری و لرزه‌نگاری حوزه نزدیک گسل می‌تواند به نتایج گمراه‌کننده‌ای منجر گردد.

## ۱-۱۱ مدل گسل و پارامترهای گسلش ارائه شده بر اساس نگاشت‌های حوزه نزدیک

### گسل

جهت تعیین دقیق پارامترها و مدل گسلش زمین‌لرزه سرپل‌نهاب، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله مطالعات گسترده‌ای را برای انجام تحلیل برگشتی و بهینه‌سازی پارامترهای مدل به کمک داده‌های شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در حوزه نزدیک گسل به انجام رساند. بدین منظور در ابتدا لازم بود تا نگاشت‌های سرعت به کمک شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده برای هر ایستگاه محاسبه گردد.



شکل ۱-۱۷ مدل گسلش زمین لرزه سرپل ذهاب توسط سازمان زمین شناسی امریکا (بالا) و مرکز اطلاعات جغرافیای ژاپن (پایین).

سپس مدل پوسته در زاگرس بر اساس مطالعات انجام یافته توسط تاتار و همکاران (۲۰۰۴) ساخته شد و روابط میرایی مورد استفاده از مطالعات قائمقامیان و هیسادا انتخاب گردید. در ادامه سطح گسل به ابعاد ۶۰ در ۸۰ در نظر گرفته شد و به ۲۴۰ زیر گسل تقسیم گردید.

تحلیل برگشتی در سه مرحله به انجام رسید. در قدم اول، مدلی اولیه بر اساس نتایج سازمان زمین شناسی امریکا تهیه و سرعت نداشت ها برای موقعیت جغرافیایی ایستگاه های ثبت بر اساس این مدل شبیه سازی شد. مقایسه سرعت نداشت های شبیه سازی و ثبت شده تفاوت های فاحشی را بین نتایج نشان داد. در قدم دوم مدلی بر اساس مطالعات مرکز اطلاعات جغرافیای ژاپن ساخته و مجدداً سرعت نداشت های شبیه سازی و ثبت شده مقایسه شد که اگرچه نتایج بهتری را از مدل ارائه شده توسط سازمان زمین شناسی امریکا ارائه نمود ولی هنوز تطابق بسیار ضعیف بود. در قدم سوم یک مدل تصادفی از تلفیق دو مدل ساخته و پارامترهای آن بعد از محاسبات سنگین و طاقت فرسای شبانه روزی و انجام بیش از ۱۵۰۰ اجرای کامپیوتری و مقایسه نتایج، بهینه

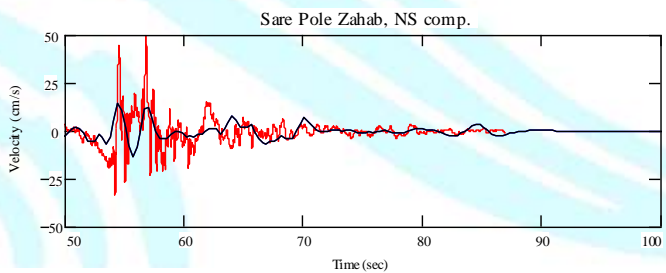
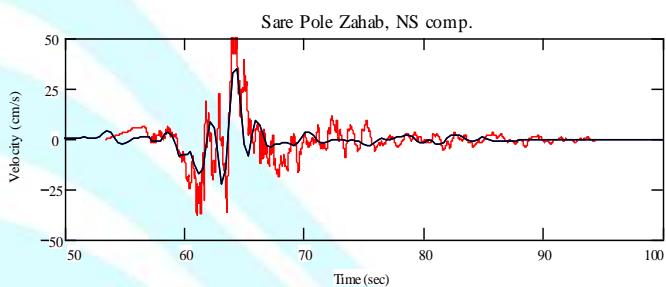
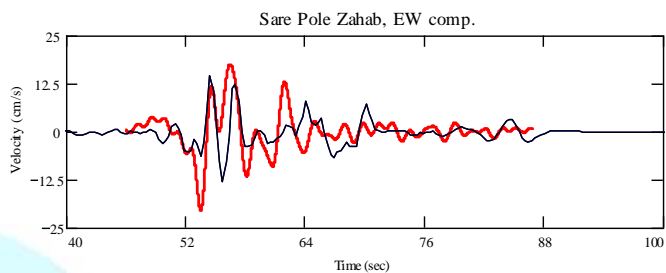
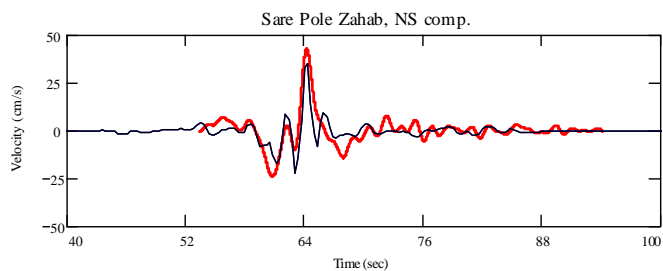
سازی گردید. این مدل توانست بخوبی سرعت نگاشت ثبت شده در ایستگاه سرپل‌ذهاب را شبیه‌سازی نماید. در شکل (۱-۱۸) سرعت نگاشت ثبت شده (خط قرمز) با شبیه‌سازی شده در ایستگاه سرپل‌ذهاب با یکدیگر مقایسه شده است.

به منظور بررسی یکتایی پاسخ بر اساس این مدل، سرعت نگاشت‌های ایستگاه‌های دیگر که در تحلیل برگشتی مورد استفاده قرار نگرفته بود، شبیه‌سازی و با سرعت‌نگاشت ثبت شده مقایسه و تطابق خوب نتایج بین آنها تاییدی بر یکتایی مدل بود. در شکل (۱-۱۹) مدل ساخته شده توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله ارائه شده است. اگرچه تطابق خوبی بین نتایج ایستگاه‌ها مشاهده شده ولی این نتایج هنوز نیازمند انجام برخی محاسبات ریز برای ارائه مدل نهایی است. در هر صورت اسکلت مدل نهایی بصورت مدل ارائه شده در شکل (۱-۱۹) خواهد بود. با توجه به شکل (۱-۱۹) ملاحظه می‌گردد که مدل پژوهشگاه زلزله‌شناسی نیز همانند دیگر مدل‌ها دارای یک اسپریتی بوده ولی شکل و الگوی اسپریتی بسیار متفاوت از مدل‌های ارائه شده توسط محققین آمریکایی و ژاپنی می‌باشد و بیشینه لغزش در سطح گسل ۵/۵ متر و جهت متوسط لغزش ۱۴۰ درجه محاسبه شده است.

یک نکته حائز اهمیت در شکل (۱-۱۹)، قرار گرفتن دو شهر سرپل‌ذهاب و گورسفید بر روی اسپریتی با لغزش بالا است. به عبارت دیگر شهرهای که بر روی نقاطی از گسل با لغزش بالا قرار گرفته‌اند، بیشترین شتاب را تجربه و لذا خسارات بالای را نشان می‌دهند. این مشاهده با آنچه که در زمین‌لرزه ۱۳۸۲ بم اتفاق افتاد کاملاً تطابق داشته و در شهر بم نیز نقاط با خسارت بالا بر روی اسپریتی با لغزش بالا قرار داشتند. این مشاهدات نشانگر این حقیقت است که موقعیت و شکل اسپریتی و مقدار لغزش می‌تواند نقش بسزایی را در الگوی خسارت ایفا نماید.

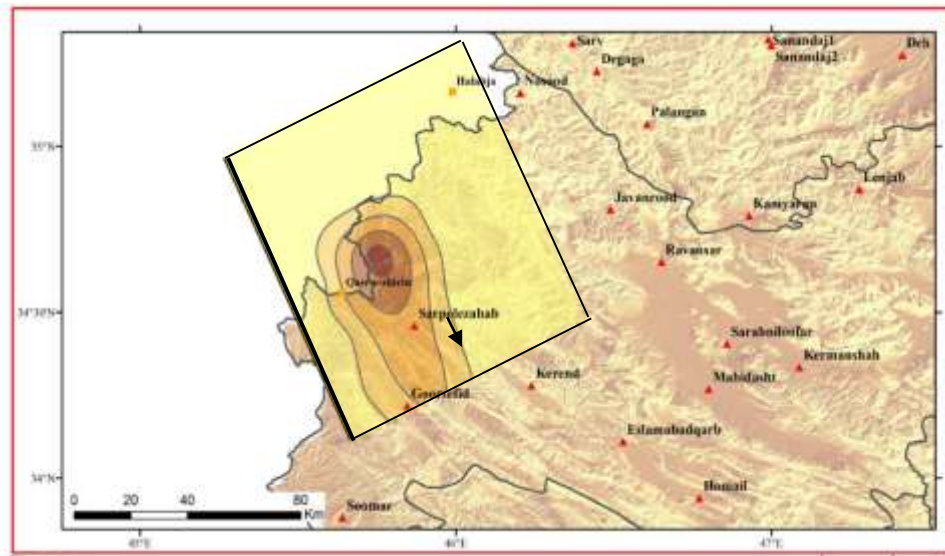
حال با داشتن مدل گسلش می‌توان حرکات توانمند زمین را در هر نقطه مدل‌سازی و برآورد نمود. به عنوان مثال در این زمین‌لرزه یک سوال عمومی مطرح بود که چرا علیرغم اینکه مرکز رو سطحی زمین‌لرزه نزدیک عراق است بیشتر خسارت در ایران اتفاق افتاده است. ضمن اینکه یک دلیل مهم جهت شیب گسل است که به سمت ایران بوده و شهرهای خسارات دیده روی سطح گسل واقع شده‌اند ولی می‌توان این ایده را نیز با شبیه‌سازی نگاشت در مثلاً شهر حلبچه بررسی نمود. بدین منظور نگاشت زمین‌لرزه در شهر حلبچه شبیه‌سازی و در شکل (۱-۲۰) به تصویر کشیده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود بیشینه سرعت در شهر حلبچه تقریباً یک سوم مقدار بیشینه ثبت شده در شهر سرپل‌ذهاب است که ضمن تایید دقت محاسبات بیانگر خسارات پایین مشاهده شده در این شهر است.



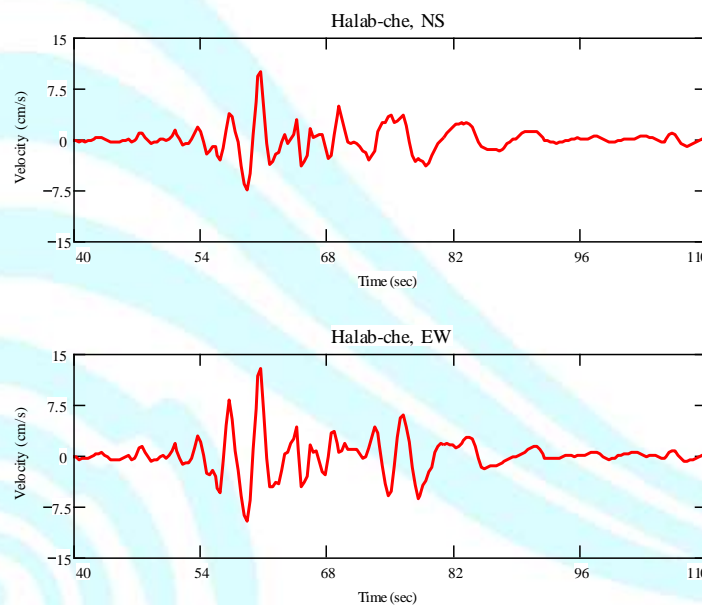


شکل ۱-۱۸ مقایسه سرعت نگاشت ثبت شده (خط قرمز رنگ) با شبیه‌سازی شده (خط مشکی) در ایستگاه سرپل. دو شکل فوق مقایسه سرعت نگاشت فیلتر شده در محدوده ۰/۱ تا ۲ هرتز بوده و دو شکل پایین مقایسه بین سرعت نگاشت‌ها بدون فیلتر می‌باشد.





شکل ۱-۱ مدل گسلش زمین‌لرزه سرپل‌ذهاب ارائه شده توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله- ایران.



شکل ۱-۲ سرعت‌نگاشت شبیه‌سازی شده در شهر حلبچه عراق بر اساس مدل گسلش ارائه شده توسط پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله که با خسارت اعلامی در آن منطقه همخوانی خوبی را نشان می‌دهد.

## ۱-۱۲ نقشه توزیع شتاب (بیشینه شتاب زمین) زلزله سرپل‌ذهاب

یکی از مباحث مهم در زمینه مدیریت بحران و پاسخ اضطراری بعد از وقوع زلزله، تهیه سریع نقشه‌های توزیع شتاب می‌باشد. در واقع نقشه‌های توزیع شتاب ابزاری می‌باشند که به کمک آن می‌توان بلافاصله بعد از وقوع یک حادثه، تجسمی از شدت و دامنه اثرات ناشی از وقوع زلزله در منطقه بر اساس پارامترهای مهندسی مانند شتاب بدست آورد. همچنین این نقشه‌ها به عنوان پایه‌ای برای سامانه‌های برآورد سریع خسارات ناشی زلزله می‌باشند، که بر اساس آن سازمان‌های مربوطه می‌توانند نیروهای امداد و تجهیزات را متناسب با وسعت شدت خرابی به مناطق زلزله زده اعزام نمایند. امری که در حال حاضر در کشور بر اساس گزارش‌های رسیده از مردم

و دیگر نهادهای دولتی مانند فرمانداریها و استانداریها صورت می گیرد، که با توجه به وجود آشفتگی و سراسیمگی در زمان زلزله و ارسال گزارشهای اغراق آمیز و بعضا نادرست مردمی مانع از اجرای بهینه عملیات امدادرسانی می گردد. به عنوان نمونه در زلزله اخیر سرپل ذهاب (کرمانشاه) تا ساعات اولیه پس از زلزله، سردرگمی و تناقضات بسیاری در گزارشهای ارسالی از وسعت خرابی و تلفات ناشی از زلزله وجود داشت. بگونه ای که در ساعات اولیه، مسئولین امر مدیریت بحران در سطح استان و کشور آمارهایی بسیار کمتر از تلفات و خسارات واقعی ناشی از زلزله را ارائه نمودند. مشخصا همین امر منجر به تاخیر و سردرگمی نیروهای امداد و نجات و در نتیجه تلفات فراوان در ساعات و روزهای اولیه بعد از بحران می شود.

با توجه به اهمیت موضوع، تا کنون روشهای مختلفی مانند روش های کریجینگ<sup>۱</sup>، بیزین<sup>۲</sup> و روشهای ترکیب وزنی مقادیر شتاب مشاهده شده و روابط کاهندگی برای تهیه نقشه های توزیع پارامترهای مهندسی حرکت زمین بلافاصله بعد از وقوع حادثه ارائه شده است. در این میان روش ترکیب وزنی مقادیر شتاب مشاهده شده و روابط کاهندگی که توسط والد و آلن<sup>۳</sup> (۲۰۱۰) ارائه است، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. این روش نخستین بار در سازمان زمین شناسی آمریکا (USGS)<sup>۴</sup> مورد استفاده قرار گرفت و هم اکنون نسخه های مشابه از آن در ترکیه، سوئیس، ایتالیا، رومانی و غیره مورد استفاده قرار گرفته است. نحوه ی تهیه نقشه توزیع پارامترهای مهندسی حرکت زمین با استفاده از روش ترکیب وزنی در شکل (۱-۲۱) ارائه شده است. در این روش از مقادیر شتاب ثبت شده بر روی سطح زمین در ایستگاههای شتابنگاری برای تهیه نقشه توزیع شتاب استفاده می شود. بگونه ای که ابتدا اثرات ساختگاهی از مقادیر شتاب ثبت شده بر روی سطح زمین حذف می گردد و سپس بر اساس ترکیب وزنی مقادیر شتاب ثبت شده و روابط کاهندگی مقادیر شتاب بر روی سنگ بستر<sup>۵</sup> در منطقه مورد مطالعه بدست خواهد آمد و در نهایت مجددا با لحاظ نمودن اثرات ساختگاهی مقادیر شتاب بر روی سطح زمین در منطقه بدست خواهد آمد. مشخصا هر چه توزیع ایستگاههای شتابنگاری در منطقه مورد استفاده متراکم تر باشد، نقشه تهیه شده دقت بالاتری خواهد داشت.

با وجود اینکه در نگاه نخست نحوه ی تهیه نقشه های توزیع شتاب، فرآیندی ساده در نظر گرفته می شود، ولی نگاهی ریزبینانه تر نماینگر وجود عدم قطعیت های بسیار در تهیه اینگونه نقشه ها می باشد. انتخاب روابط کاهندگی مناسب برای تعیین مقادیر شتاب در نقاطی که تراکم ایستگاههای شتابنگاری کم می باشد و اعمال مناسب اثرات ساختگاهی از مهمترین فاکتورهای مورد استفاده در این روش می باشد.

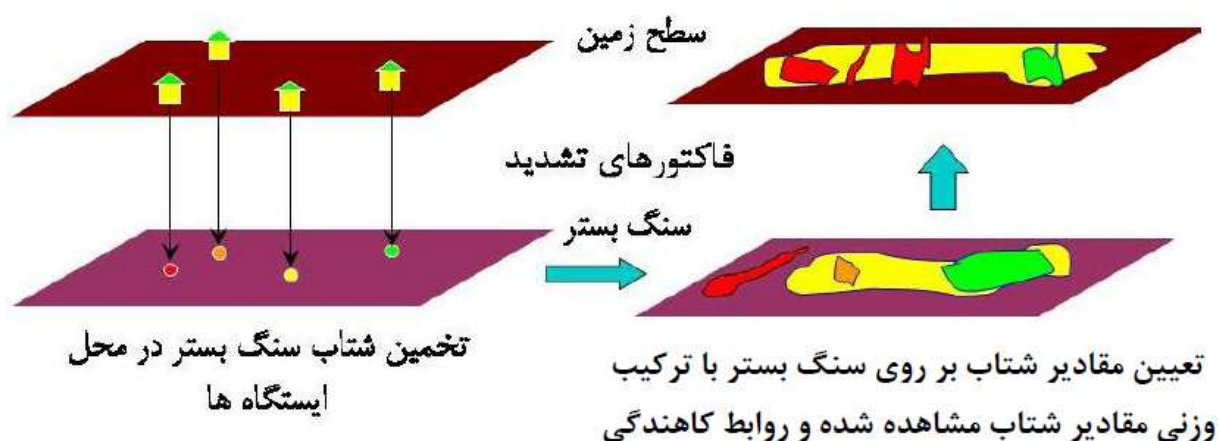
<sup>۱</sup> Kriging

<sup>۲</sup> Bayesian

<sup>۳</sup> Wal and Allen

<sup>۴</sup> United States Geological Survey

<sup>۵</sup> Wal and Allen



شکل ۱-۲۱ نحوه تهیه نقشه توزیع شتاب در منطقه

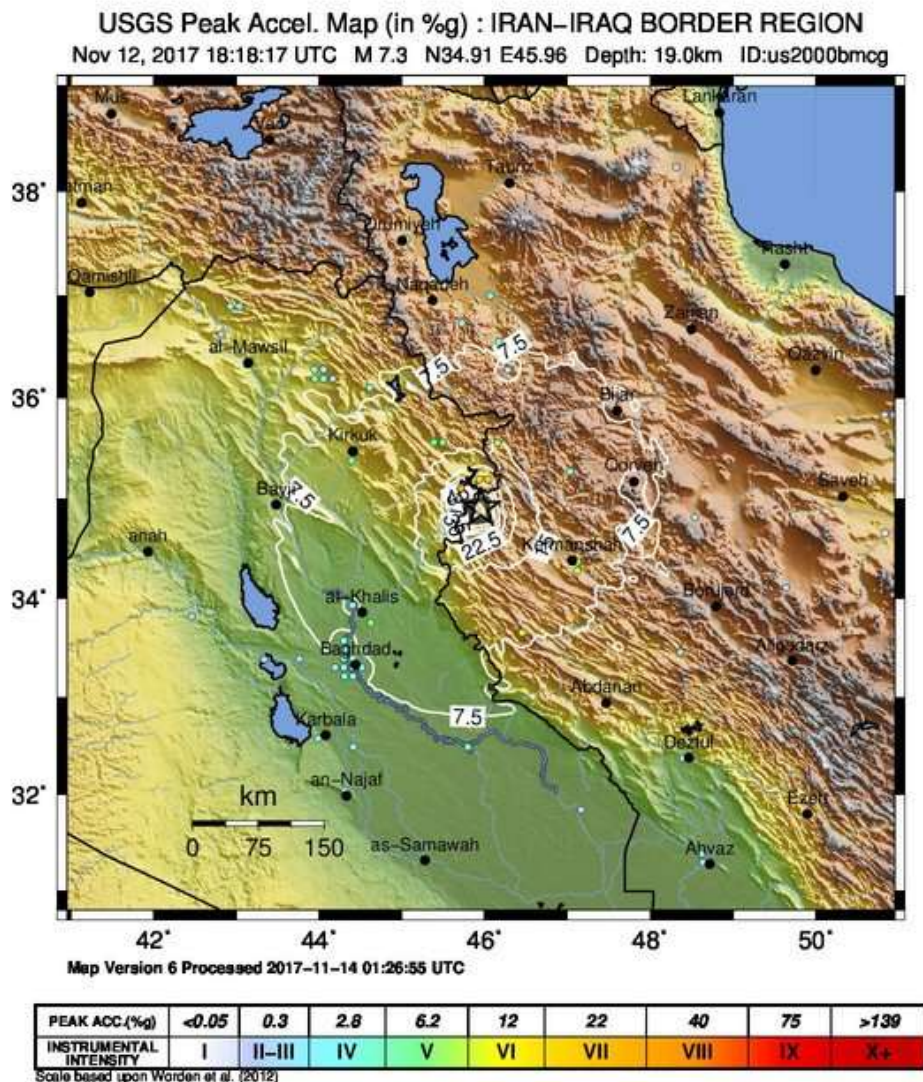
با وجود اینکه در نگاه نخست نحوه تهیه نقشه‌های توزیع شتاب، فرآیندی ساده در نظر گرفته می‌شود، ولی نگاهی ریزبینانه‌تر نمایانگر وجود عدم قطعیت‌های بسیار در تهیه اینگونه نقشه‌ها می‌باشد. انتخاب روابط کاهندگی مناسب برای تعیین مقادیر شتاب در نقاطی که تراکم ایستگاه‌های شتاب‌نگاری کم می‌باشد و اعمال مناسب اثرات ساختمانی از مهمترین فاکتورهای مورد استفاده در این روش می‌باشد.

متأسفانه با وجود نیاز کشور به راه‌اندازی سامانه‌ای برای برآورد سریع خسارت در ساعات اولیه وقوع زلزله می‌باشد. تا کنون اقدام جدی‌ای در این راستا صورت نپذیرفته است. غالباً نقشه‌های توزیع شتاب برای زمین لرزه‌های ایران توسط سازمان USGS ارائه شده است که در سایت اینترنتی این سازمان قابل دسترسی می‌باشد. اما این نقشه‌ها صرفاً بر اساس موقعیت کانونی و با استفاده از روابط کاهندگی برای زمین لرزه‌های ایران تهیه شده است. البته برای زلزله‌های اخیر ایران، سازمان USGS علاوه بر استفاده از روابط کاهندگی از اطلاعات ایستگاه‌های شتاب‌نگاری ایران نیز استفاده نموده است اما تحلیل و بررسی‌ها، نشان دهنده عدم تطابق داده‌های ایستگاه‌های شتاب‌نگاری ایران و اطلاعات برداشت شده توسط این سازمان می‌باشد (شاهوار ۲۰۱۳).

در پی زلزله ۲۱ آبان ماه ۱۳۹۶ سرپل ذهاب (کرمانشاه) با بزرگای  $7/3$  نیز این سازمان نقشه‌ای اولیه از توزیع شتاب در منطقه ارائه نمود. متأسفانه بدلیل اینکه در لحظات اولیه بعد از وقوع زلزله پارامترهای دقیق زلزله و همچنین مقادیر شتاب ثبت شده در ایستگاه‌های شتاب‌نگاری موجود نیست (مقادیر شتاب ثبت شده در ایستگاه‌های مرکز تحقیقات و مسکن غالباً با تاخیر یک هفته‌ای بر روی سایت قرار می‌گیرد)، نقشه‌های اولیه ارائه شده توسط این سازمان غالباً دقت مناسبی ندارد. در شکل (۱-۲۲) نقشه توزیع ارائه شده توسط سامانه ShakeMap بعد از وقوع زلزله نمایش داده شده است. در جدول (۱-۱) و (۲-۱) نیز پارامترهای مورد استفاده در تهیه نقشه توزیع شتاب ارائه شده توسط سازمان ShakeMap ارائه شده است. همانطور که مشخص است،



در تهیه نقشه از داده‌های شدت ثبت شده در ۱۲۰ نقطه استفاده شده است و هیچ داده‌ی شتابنگاری استفاده نشده است.



شکل ۱-۲۲ نقشه توزیع شتاب (بیشینه شتاب زمین) ارائه شده توسط سامانه ShakeMap سازمان USGS.



جدول ۱-۱ پارامترهای مورد استفاده توسط سامانه ShakeMake برای تهیه نقشه توزیع شتاب زلزله سر پل ذهاب

Description	IRAN-IRAQ BORDER REGION
ID	us2000bmcg
Magnitude	7.3
Depth	19.0 km
Longitude	45.956°E
Latitude	34.905°N
Origin Time	2017-11-12T18:18:17Z
Mechanism	ALL
Mechanism source	composite
Location	IRAN-IRAQ BORDER REGION
Flinn Engdahl region	346 - IRAN-IRAQ BORDER REGION
Fault file(s)	hayes_fault.txt
Fault reference(s)	Hayes, personal communication
Tectonic regime	ACR (deep)
Number of seismic stations	0
Number of DYFI stations	120

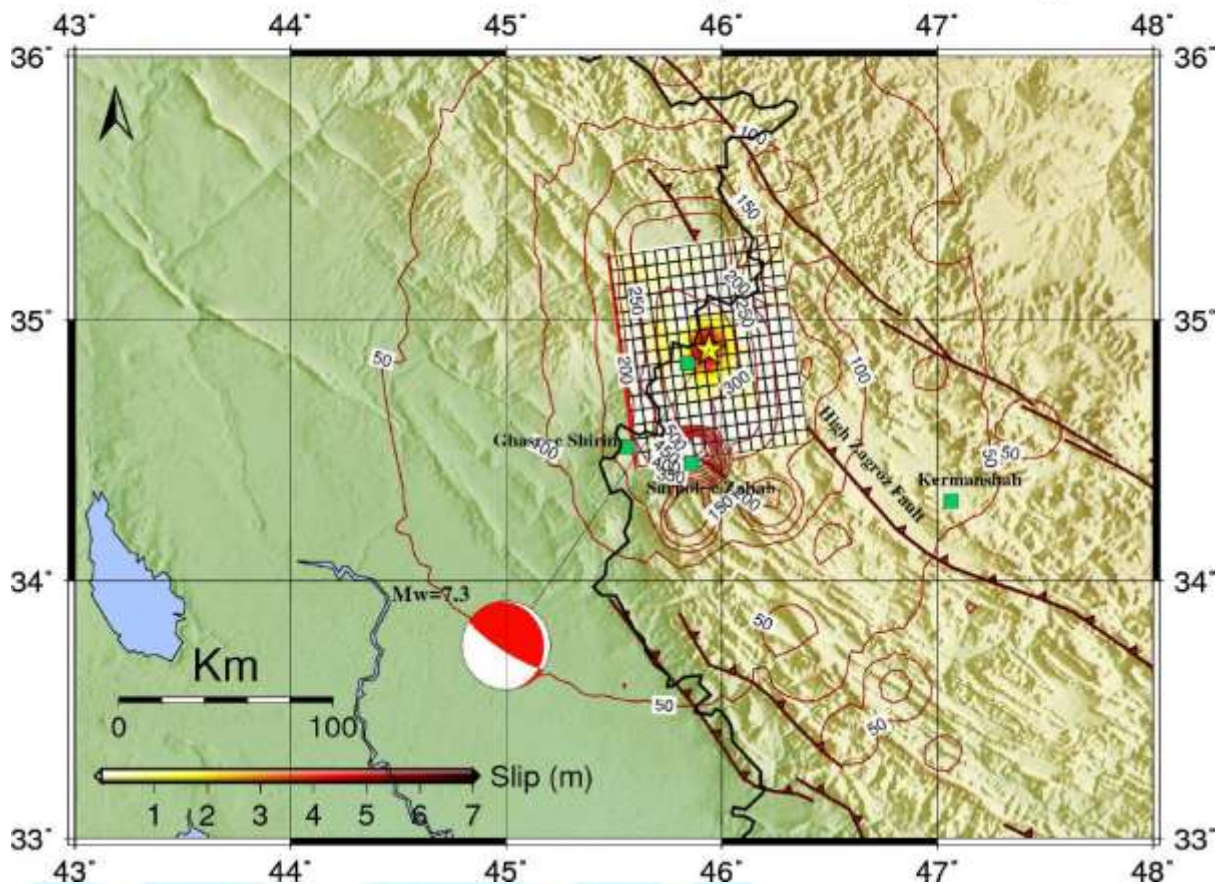
جدول ۲-۱ روابط کاهندگی مورد استفاده توسط سامانه ShakeMake برای تهیه نقشه توزیع شتاب زلزله سر پل ذهاب

Type	Module	Reference
GMPE	ASB13	Akkar, et al. (2013)
IPE	DefaultIPE	ShakeMap Manual (2015)
GMICE	WGRW11	Worden et al. (2012)
IGMICE	WGRW11	Worden et al. (2012)
Directivity	None	None
Basin	None	None

با توجه به توضیحات فوق و با توجه به اینکه داده‌های ایستگاه‌های شتابنگاری زلزله سر پل ذهاب توسط مرکز تحقیقات و مسکن ارائه شده است. تصمیم بر آن شد که بار دیگر نقشه توزیع شتاب بر اساس داده‌های جدید تهیه گردد. همانطور که مشخص است، ۱۰۲ ایستگاه شتابنگاری این زلزله را ثبت نموده‌اند که ۱۴ ایستگاه در فاصله رومرکزی کمتر از ۱۰۰ کیلومتر نسبت به کانون زلزله قرار دارند. در شکل (۱-۲۳) نقشه توزیع شتاب زلزله بر اساس داده‌های شتابنگاری و استفاده از روابط کاهندگی قاسمی و همکاران (۲۰۰۹)، زعفرانی و همکاران (۲۰۱۷)، کانو و همکاران (۲۰۰۶)، کتا و همکاران (۲۰۱۶) و آبراهامسون و همکاران (۲۰۱۴) تهیه شده است (جدول ۱-۳). لازم به ذکر است که وزن‌های اختصاص شده به هر رابطه بر اساس آزمون‌های LH و LLH و بانک داده‌های شتابنگاری ایران استخراج شده است.

### IIES Hazard MAP: Sar-Pol-Zahab

Date: 2017-11-12 18:18:19 Mw: 7.3 Depth: 19.0 km ID: Event\_99



شکل ۱-۲۳ نقشه توزیع شتاب زلزله سرپل ذهاب با لحاظ نمودن داده‌های ایستگاه‌های شتابنگاری سازمان مرکز تحقیقات و مسکن (مثلث‌های قرمز رنگ) (مقادیر شتاب ارائه شده بر حسب gal می‌باشد).

جدول ۱-۳ روابط کاهندگی و وزن‌های اختصاص داده شده به آن‌ها برای تهیه نقشه توزیع شتاب زلزله

GMPE	Weight
Zafarani et al (2017)	0.22
Ghasemi et al (2009)	0.21
Kanno et al (2006)	0.21
Kotha et al (2016)	0.19
Abrahamson et al (2014)	0.17

## ۱-۱۳ جمع بندی

زمین لرزه شامگاه ۲۱ آذر ماه ۱۳۹۶ با بزرگای گشتاوری  $7/3$  یکی از بزرگترین و مخربترین زمین لرزه های دو دهه اخیر ایران است که بیش از نیمی از کشورمان را به لرزه درآورد و منجر به از بین رفتن جمع کثیری (۴۳۶ نفر طبق آخرین آمار منتشر شده) از هموطنان عزیزمان در استان کرمانشاه و به بار آمدن خسارات مالی گسترده‌ای در این استان گردید.

دقیق ترین مکانیابی صورت گرفته (شبکه لرزه نگاری کشوری) بر قرار گرفتن کانونی زمین لرزه در  $10$  کیلومتری جنوب ازگله و حدود  $37$  کیلومتری شمال غرب شهرستان سرپل ذهاب، در عمق حدود  $18$  کیلومتری دلالت دارد.

سازوکار محاسبه شده بر اساس حل تانسور ممان (USGS، CMT، EMSC)، و مدل سازی تغییر شکل پوسته بر اساس تحلیل داده های InSAR برگسلش فشاری با روند شمال شمال غرب - جنوب جنوب شرق، با شیب کمی به سمت شمال شرق دلالت دارند.

علی رغم فاصله کمتر کانون سطحی زمین لرزه به ازگله، واقع شدن منطقه با بیشینه جابجائی  $3$  متر به فاصله کمی در شمال شهر سرپل ذهاب، منجر شده است تا بیشینه شتاب و حداکثر تخریب در این شهر مشاهده و ثبت شود.

تحلیل اولیه پس لرزه‌های ثبت شده در شبکه لرزه نگاری موقت، نشانگر وقوع آنها در عمق‌های  $5$  تا  $20$  کیلومتری و فعالیت چند قطعه گسلی در منطقه است. نتایج اولیه بر وجود حداقل سه روند گسلش مختلف دلالت دارد. روند تقریباً شمال-جنوبی مشابه با روند گسل اصلی مسبب زمین لرزه سرپل ذهاب، روند مال غرب-جنوب شرق به موازات گسل MFF، و روند شرقی-غربی که احتمالاً متأثر از فعال شدن ساختارهای قدیمی در اثر تنش زیاد آزاد شده در حین زلزله اصلی می‌باشند.

بررسی وسعت و شدت تخریب‌های شدید ساختمانی حاصل از زمین لرزه سرپل ذهاب، نشانگر این حقیقت است که خسارات در مناطق و جهات خاصی در اطراف گسل مسبب تجمع یافته و از مقدار آن در دیگر مناطق به شدت کاسته شده است. مشاهده بیشینه شتاب بالا ثبت شده در شهر سرپل ذهاب با مقدار  $0/68g$  و کاهش شدید آن با فاصله در شهر گورسفید به میزان نصف این مقدار دلیل دیگری بر عملکرد متفاوت زمین لرزه مستقل از فاصله از منطقه مورد نظر است. این امر نشان دهنده تاثیرپذیری شدید حرکات توانمند زمین در سطح از فرایند گسلش در عمق، نظیر جهت انتشار گسیختگی، مقادیر لغزش و الگوی انتشار آن بر پراکندگی حرکات توانمند زمین در سطح می‌باشد. مشاهده پالس سرعت یا پالس جهت یافتگی (Directivity Pulse) در سرعت-نگاشت ایستگاه سرپل ذهاب، که معمولاً در حوزه نزدیک گسل بوقوع می‌پیوندد، دلالت بر همراستایی جهت انتشار گسلش با جهت لغزش در سطح گسل به سمت ایستگاه لرزه نگاری سرپل ذهاب دارد که باعث شده است

بیشینه شتاب در این ایستگاه به مقدار بیش از دو برابر بیشینه شتاب در ایستگاه‌های دیگر با فواصل مشابه افزایش یابد. مشاهده خسارات بمراتب شدیدتر در شهر سرپل‌ذهاب و یکسری روستاهای مجاور، تماماً ناشی از پدید جهت یافتگی می‌باشد.

مقایسه طیف شتاب زلزله سرپل‌ذهاب با طیف طراحی ارائه شده در آیین‌نامه طراحی ساختمان ایران بر حسب نوع خاک II نشان می‌دهد که شتاب طیفی چه در پریودهای زیر یک ثانیه و چه در پریودهای بالای ۱ ثانیه مقادیر بسیار بزرگتری را از مقادیر آیین‌نامه‌ای دارد.

نتایج حاصل از مدل‌سازی گسل و پارامترهای گسلش بر اساس لرزه‌نگاشت‌های حوزه نزدیک بروش حل معکوس نشان می‌دهد که دو شهر سرپل‌ذهاب و گورسفید بر روی اسپریتی با لغزش بالا قرار گرفته‌اند. لذا بیشترین شتاب و بیشترین خسارات را متحمل شده‌اند.

نقشه توزیع شتاب زلزله بر اساس داده‌های شتابنگاری و استفاده از روابط کاهندگی مناسب بخوبی با مشاهدات میدانی از خرابی‌های اتفاق افتاده در زمین لرزه سرپل‌ذهاب انطباق دارد.

اگرچه سابقه لرزه‌خیزی زون لرزه زمین‌ساختی زاگرس، مطالعات زلزله‌شناسی انجام گرفته قبلی، و تمامی فرضیات موجود، وقوع زمین‌لرزه‌ای با بزرگای بیشتر از ۷ را در این زون و بویژه در قسمت چین‌خورده - روراند زگرس منتفی می‌دانست، وقوع زمین‌لرزه اخیر با بزرگای گشتاوری ۷/۳ نشان داد که لازم است در برآورد خطر وقوع زمین‌لرزه‌های بزرگ در این زون بازنگری اساسی نمود.