

تعیین موقعیت گسل جنوب مشهد با استفاده از میکروترمورها

مهسا زهانی قائینی^۱، ناصر حافظی مقدس*^۲، محمد غفوری^۲

دریافت مقاله: ۹۱/۱۱/۴ پذیرش مقاله: ۹۴/۱۰/۶

چکیده

در این پژوهش، جهت تعیین موقعیت تقریبی گسل جنوب مشهد از داده‌های میکروترمور استفاده شده است. برای این منظور داده‌های میکروترمور به روش تک ایستگاهی، در ۵ پروفیل و ۲۷ ایستگاه عمود بر ارتفاعات جنوبی شهر برداشت و بروش نسبت طیفی مولفه افقی به مولفه قائم (H/VS_R)، تحلیل شده است. سپس نقشه‌های هم پریود و تغییرات آن، در محدوده ارتفاعات جنوب شهر ترسیم شده و ایستگاه‌های دارای تغییر ناگهانی و مشخص در مقادیر فرکانس بر روی نقشه مشخص شده‌اند. علاوه بر این به کمک جهت داری میکروترمورها و چرخش H/V، تغییرات دامنه تقویت در آزمون‌های مختلف در هر ایستگاه مورد بررسی قرار گرفت و ایستگاه‌های دارای بیشترین آشفتگی در مقادیر دامنه تقویت، نشانه‌گذاری شدند. نهایتاً با مقایسه نتایج حاصل از هر دو روش و با بررسی گمانه‌های منطقه و شواهد فعالیت گسل بر روی عکس‌های هوایی، موقعیت تقریبی پهنه گسلی جنوب مشهد مشخص شده است. نتایج مطالعات همخوانی مناسبی با شواهد صحرایی، تفسیر عکس‌های هوایی و اطلاعات حاصل از گمانه‌ها نشان می‌دهد.

کلید واژه‌ها: میکروترمور، نسبت طیفی مولفه افقی به قائم، پریود تشدید، چرخش H/V، گسل جنوب مشهد

۱. کارشناس ارشد زمین شناسی زیست محیطی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. استاد گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد، nhafezi@um.ac.ir

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

میکروترمورها، ارتعاشاتی خفیف با دامنه کوتاه در حد چند میکرون می‌باشند، که همواره زمین را به نوسان در می‌آورند. این امواج از چشمه‌های ارتعاشی چون باد، امواج دریا، ترافیک، ارتعاش کارخانجات صنعتی و غیره به وجود می‌آیند و در اثر به تله افتادن بین سنگ بستر و ضخامت خاک، به دلیل وجود اختلاف امپدانس بین سنگ بستر و آبرفت روی آن، تقویت می‌شوند. اندازه گیری میکروترمورها امروزه به دلیل سرعت و سهولت انجام در سطح زمین، کاربردهای فراوانی پیدا کرده است؛ این ارتعاشات ابزاری بسیار مفید و موثر در ارزیابی اثرات ساختگاهی و ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهرها می‌باشند. از دیگر کاربردهای آنها می‌توان به تعیین پاسخ لرزه‌ای سازه، تعیین سرعت موج برشی، طبقه‌بندی توده سنگ، ارزیابی وجود ذخایر هیدروکربنی و کشف انفجارات هسته‌ای اشاره کرد؛ همچنین در سال‌های اخیر محققین زیادی جهت شناخت شرایط و ساختارهای زیرسطحی و ضخامت آبرفت از میکروترمورها استفاده کرده‌اند (Seht & Wohlenberg, 1999, Delgado et al., 2000, Noguchi & Nishida, 2002, Toshinawa et al., 2003, Asten, 2004, Uebayashi et al., 2004, Adachi et al., 2008, Gosar & Lenart, 2010, Kuhn & Ohrnberger, 2011, Matsushima & Itoya, 2012, Itoya & Matsushima, 2012, Rudersdorf et al., 2013).

ارزیابی اثرات ساختگاهی بروش نسبت دامنه طیف افقی به قائم اولین بار در سال ۱۹۸۹ توسط ناکامورا، جهت تفسیر نتایج میکروترمور مورد استفاده قرارگرفت. ناکامورا بیان داشت که مؤلفه عمودی حرکت زمین نسبت به مؤلفه افقی واجد اطلاعات بیشتری از منشأ است و به عبارت دیگر مؤلفه عمودی تأثیر کمتری از شرایط زمین‌شناسی سطحی می‌پذیرد. با توجه به این شرایط، نسبت طیف افقی به عمودی نوفه زمینه ثبت شده در سطح یک لایه نرم اجازه می‌دهد که اثر امواج ریلی حذف شوند و فقط اثرات حاصل از ساختار زمین‌شناسی ساختگاه را حفظ کند. بعدها محققین دیگری روش ناکامورا را در مورد داده‌های لرزه‌ای استفاده و تایید نمودند (Chavez-Garcia et al., 1994; Huang, et al., 2002).

Al Yuncha & Luzon, 2000; Cara et al., 2003; Panou, Field & Jacob, 1995, Woolery & Street., 2002, 2004

همانطور که در بالا اشاره شد یکی از کاربردهای میکروترمور که امروزه رونق یافته است، شناسایی گسل‌ها و ساختارهای زیرسطحی به کمک داده‌های حاصل از خرد لرزه‌ها می‌باشد؛ از جمله آنها می‌توان به مطالعات Zhao et al. (2007) اشاره کرد که جهت شناخت ساختارهای گرابن در شهر Yinchuan چین از میکروترمورها استفاده کرده‌اند؛ همچنین Pintor et al. (2004) به کمک میکروترمورها ساختارهای زمین شناسی کم عمق را شناسایی کردند. Matsushima and Itoya (2010, 2012) جهت برآورد ساختارهای زیرسطحی در شبه جزیره Shimabara و اطراف آتشفشان Unzen در ژاپن از نسبت طیفی H/V میکروترمورها استفاده کردند و با استفاده از مدل‌سازی سرعت موج برشی به ضخامت لایه‌های رسوبی در این مناطق پی بردند. همچنین Rudersdorf et al. (2013) همکارانش (۲۰۱۳) در مطالعات خود به منظور شناسایی گسل‌های پنهان در صحرای Gobi در چین از تجزیه و تحلیل میکروترمورها، روش رادار نفوذی به زمین و روش الکترومغناطیسی استفاده کردند. بررسی میکروترمورها در این منطقه انحراف قابل توجه در توپوگرافی سنگ کف نئوژن را به خوبی نشان می‌داد. علاوه بر این پژوهش‌ها، مطالعات دیگری با استفاده از جهت‌داری پاسخ سایت به شرایط و ساختارهای زیرسطحی پی برده‌اند (Cultrera et al., 2003, Martino et al., 2006, Del Gaudio et al., 2008, Coccia et al. 2010, Garambois et al., 2010, Del Gaudio et al., 2011, Del Gaudio & Wasowski, 2011, Garambois et al., 2013).

در ایران نیز پژوهشگران زیادی برای پروژه‌های ریز پهنه‌بندی شهرها، تعیین اثرات ساختگاه، تشخیص ضخامت آبرفت و پروفیل سرعت موج برشی از میکروترمورها استفاده کرده‌اند. (رستمی و همکاران، ۱۳۹۱؛ حافظی مقدس و همکاران، ۱۳۹۰؛ قلندرزاده و کاوند، ۱۳۸۹؛ مجرب و همکاران، ۱۳۸۷؛ حافظی مقدس و همکاران، ۱۳۸۷؛ قائم‌مقامیان و فریدونی، ۱۳۸۸؛ قلندرزاده و همکاران، ۱۳۸۲؛ حافظی مقدس و قائم‌مقامیان، ۱۳۸۶؛ داوودی و همکاران، ۱۳۸۷؛ حفیظی و

با گسل در محدوده نمایشگاه بین‌المللی، افزایش شکستگی‌های توده‌سنگ در رخنمون‌های آذرین و دگرگونی، عریض شدن بستر رودخانه چهل بازه، تغییر مشخص در توپوگرافی زمین در امتداد بلوار پیروزی، از دیگر شواهد فعالیت گسل مذکور می‌باشد که در پروژه ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهر مشهد (حافظی مقدس، ۱۳۸۵) به آنها اشاره شده است. همچنین در این پروژه، گسل مذکور به همراه گسل جنوب چناران، به عنوان یک چشمه لرزه‌زا واحد، انتخاب و با درازای بیش از ۱۰۰ کیلومتر، بیشینه بزرگا $7/3 Ms$ برای آنها در نظر گرفته شده است (حافظی مقدس، ۱۳۸۵).

به جهت تکتونیک فعال منطقه و پتانسیل بالای خطر زلزله در کلان شهر مشهد و وجود شواهد فعالیت این گسل، لزوم شناسایی هر چه دقیق‌تر آن احساس می‌شود؛ این امر بویژه به دلیل عدم رعایت حریم گسل فوق در ساخت و ساز، که در بیشتر موارد به جهت عدم آگاهی می‌باشد و همچنین افزایش فعالیت‌های عمرانی در حاشیه جنوبی شهر، امری ضروری تلقی می‌شود



شکل ۱. جابجایی مخروط افکنه چهل بازه به طرف جنوب در اثر عملکرد گسل جنوب مشهد بر روی عکس هوایی ۱:۵۰۰۰۰ (حافظی مقدس، ۱۳۸۵)

زیرسطحی و گسل‌ها می‌باشد. روش‌های مختلفی برای این منظور ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به تغییرات فرکانس غالب اشاره کرد. (Zhao et al. (2007) به کمک

نادری، ۱۳۸۵؛ حافظی مقدس و همکاران، ۱۳۸۸؛ شرفی و همکاران، ۱۳۸۸ می‌باشد)

در این پژوهش، جهت تشخیص موقعیت تقریبی گسل جنوب شهر مشهد، از میکروترمورها استفاده شده است.

۲. گسل جنوب مشهد

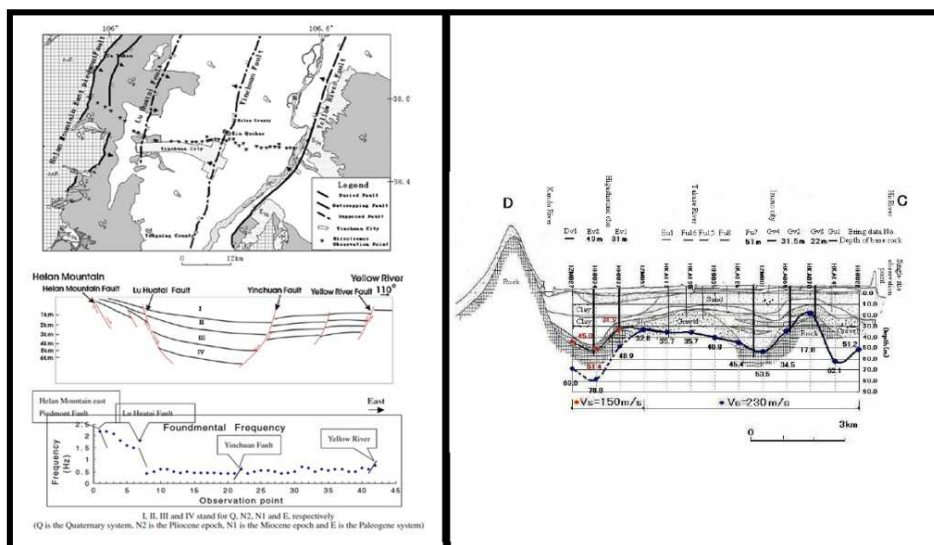
گسل جنوب مشهد با راستای شمال غرب-جنوب شرق، در حد بین کوه و دشت و مرز برخورد سنگ‌های الترابازیک، اسپیلیت‌ها و سنگ‌های دگرگونی متعلق به پالئوزوئیک با رسوبات آبرفتی کواترنری دشت مشهد، قرار گرفته است. این گسل که سازنده ارتفاعات جنوب شهر می‌باشد، علی‌رغم تلاش‌های صورت گرفته، صفحه گسلی آن در سطح تماس سنگ و آبرفت، به جهت عواملی از قبیل خردشدگی توسط نیروهای زمین‌ساختی، هوازدگی و همچنین گسترش شهر تا روی آن، مشاهده نشده است. جابه‌جایی مخروط افکنه چهل بازه به طرف جنوب، مهمترین شاهد فعالیت این گسل می‌باشد (شکل ۱)؛ علاوه بر این، حضور شکاف‌هایی در امتداد

۳. تعیین موقعیت گسل با استفاده از میکروترمورها

همانطور که در مقدمه عنوان شد یکی از کاربردهای میکروترمورها استفاده از آنها جهت شناسایی ساختارهای

میکروترمورها ساختار گرابن در حوضه رسوبی شهر Yinchuan را بررسی کرده‌اند. آنها با استفاده از تغییرات فرکانس غالب، عمود بر ساختار مورد نظر، نشان دادند که چگونه عملکرد سیستم گسلی موجود در منطقه، بر مقادیر فرکانس تاثیرگذار بوده است. شکل ۲ بخشی از نتایج آنها را نشان می‌دهد. همان طور که در تصویر گویاست در بخش افتاده (گرابن) به جهت افزایش ضخامت رسوبات سخت نشده، مقادیر فرکانس غالب نسبت به بخش بالا آمده (هرست) کمتر می‌باشد. این تغییرات در حاشیه شکستگی‌ها به خوبی قابل مشاهده است و می‌توان با ثبت داده‌های

میکروترمور در سطح زمین و بررسی تغییرات فرکانس غالب به موقعیت گسل پی برد (Zhao et al., 2007). Adachi et al. (2008) در بخشی از مطالعات خود جهت تعیین ساختارهای زیرسطحی دشت Izumo، در شمال غرب ژاپن، از میکروترمورها استفاده کرده‌اند؛ به این ترتیب که پس از برآورد میانگین سرعت موج برشی و تعیین پریود تشدید، با استفاده از روابط تجربی ضخامت آبرفت را محاسبه کرده و پروفیل عرضی از شرایط زیرسطحی و تغییرات ضخامت خاک را به نمایش گذاشته‌اند (شکل ۲).



شکل ۲. نتایج مطالعات Zhao et al. (2007) (سمت چپ تصویر) و Adachi et al. (2008) (سمت راست تصویر)

جهت لغزش و جهت حداقل نسبت طیفی، عمود بر آن قرار دارد. از دیگر مطالعاتی که به تغییرات آزمون‌تقویت ساختگاه در زون‌های گسلی پرداخته‌اند می‌توان به Cultrera et al. (2003) و Martino et al. (2006) اشاره کرد؛ آنها برای این منظور از حرکات لرزه‌ای ضعیف و قوی زمین و همچنین ارتعاشات محیطی استفاده کردند. بر اساس مطالعات آنها تقویت ساختگاه با پدیده به تله افتادن امواج در زون خرد شده گسلی مرتبط می‌باشد. در چنین مواردی می‌توان انتظار داشت حداقل میرایی (یا حداکثر لرزش) به موازات جهت سیستم شکستگی‌ها باشد (Carter and Kendall, 2006).

از آنجایی که ویژگی‌های ساختاری می‌تواند نقش مهمی در جهت‌داری پاسخ سایت ایفا کند برخی از مطالعات با بررسی تغییرات آزمون‌تقویت دامنه طیف به آن پرداخته‌اند. Del Gaudio et al. (2008, 2011) با استفاده از روش HVSR تغییرات نسبت طیفی H/V دامنه‌های مستعد لغزش در ایتالیا در آزمون‌های مختلف را بررسی کردند. مطالعات آنها با مقایسه داده‌های حاصل از میکروترمور و نگاشت‌های ثبت شده در طی زمین لرزه در منطقه، مشخص کرد که جهت پیک اصلی H/V با جهت حداکثر انرژی لرزش سازگاری نشان می‌دهد. همچنین جهت حداکثر پیک طیف میکروترمورها در امتداد

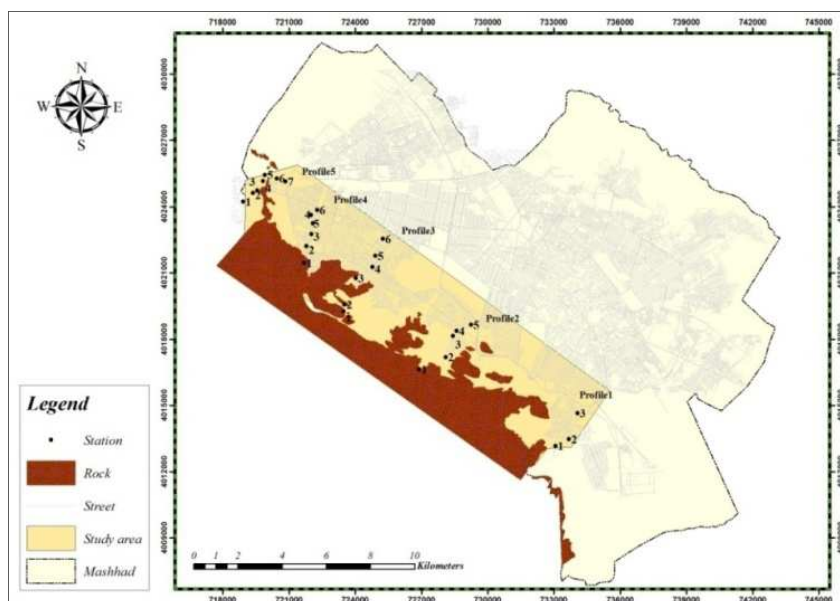
۴. تعیین موقعیت گسل جنوب مشهد با استفاده از میکروترمورها

۴-۱. ثبت داده‌های میکروترمورها

با انجام مطالعات زمین‌شناسی، بررسی گمانه‌های موجود و بازدیدهای صحرایی ۵ پروفیل و ۲۷ ایستگاه عمود بر ارتفاعات جنوبی شهر مشهد جهت ثبت میکروترموهای تک ایستگاهی انتخاب شدند (شکل ۳). تمام پروفیل‌ها از سنگ به طرف آبرفت و در جهت شمال شرق- جنوب غرب می‌باشند و تنها برداشت از پروفیل شماره ۵ در داخل کال چهل بازه با توجه به شواهد فعالیت گسل و جابجایی مخروط افکنه صورت گرفت. ثبت داده‌ها به مدت ۱۵ دقیقه به کمک دستگاه لرزه‌سنج سه کاناله SL07 ساخت شرکت SARA ایتالیا، با فرکانس طبیعی ۴/۵ هرتز و میرایی طبیعی ۰/۷ که دارای یک رقومی کننده سه کاناله ۲۴ بیتی، یک واحد پردازنده مرکزی با قابلیت ذخیره رکوردها و یک گیرنده GPS می‌باشد، انجام شد. در نقاط پر تردد به منظور حداقل تاثیر عوامل ترافیکی و سر و صدای محیطی بر روی داده‌ها، اقدامات احتیاطی لازم در نظر گرفته شد؛ به گونه‌ای که برخی از اندازه‌گیری در ساعات ۱۱ شب تا ۶ صبح و مابقی به دور از خیابان‌های پر ترافیک و ماشین‌های سنگین انجام شد.

(Garambois and Voisin (2013) نیز به منظور تحلیل اثرات سایت زمین‌لغزش Utiko در نیوزلند و نوسانات آن نسبت به زمان و مکان از داده‌های زمین لرزه و ارتعاشات محیطی استفاده کردند. مطالعات آنها ناهمسانگردی مشخص تقویت ساختگاه را در ایستگاه‌های واقع بر سطح لغزش در زوایای مختلف نشان می‌دهد، به طوری که جهت حداکثر تقویت سایت در ارتباط با جهت جابه‌جایی لغزش عنوان شده است. به طور کلی جهت‌گیری پاسخ سایت با یا بدون تقویت حرکات زمین در زون‌های گسلی، شیب‌های گسلی و زمین‌لغزش‌ها دیده می‌شود (Del Gaudio et al., 2008)؛ همچنین مقادیر پیک منحنی HVSr در نزدیکی شیب‌ها (شیب مستعد لغزش یا شیب ناشی از صفحه گسلی) ناهمسانگردی و آشفتگی مشخصی نشان می‌دهد.

در مطالعه پیش رو، ابتدا مقادیر فرکانس غالب و نتایج حاصل از ناهمسانگردی دامنه تقویت استخراج و سپس این نتایج با شواهد فعالیت گسل در عکس‌های هوایی و اطلاعات گمانه‌های موجود در منطقه مقایسه و منطبق می‌شود و نهایتاً با در نظر گرفتن تمام داده‌ها، موقعیت احتمالی گسل جنوب مشهد تعیین شده است.

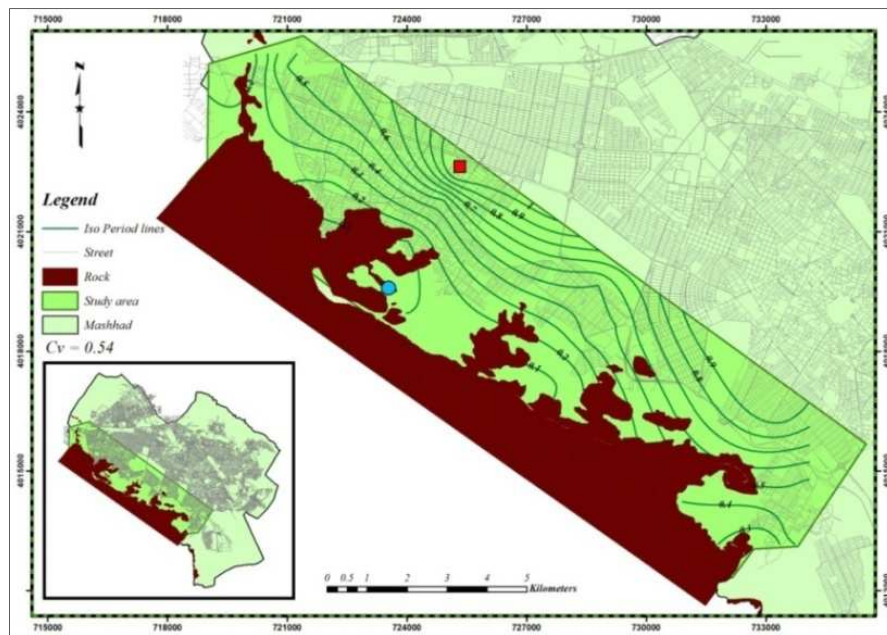


شکل ۳. موقعیت محدوده مورد مطالعه در شهر مشهد و ایستگاه‌های برداشت میکروترمورها

۲-۴. پردازش و تحلیل داده‌ها

تحلیل نگاشت‌های ثبت شده به روش نسبت طیفی مولفه افقی به عمودی (Nakamura, 1989) صورت گرفت. برای این منظور، تمام رکوردها در نرم‌افزار GEOPSY فراخوانی و پنجره‌های زمانی ۲۰ ثانیه‌ای برای مراحل بعدی انتخاب شدند (پنجره‌های زمانی دارای آشفتگی غیرمعمول نیز به صورت دستی حذف گردید). اعمال فیلتر باتروورث باندگذر (Band Pass) با حداقل فرکانس ۰/۲۵ هرتز و حداکثر فرکانس ۱۵ هرتز، به منظور حذف نوفه‌های شهری صورت گرفت. همچنین، طیف دامنه هر پنجره برای ۳ مولفه با استفاده از تبدیل فوریه سریع (FFT) محاسبه شد. نرم کردن طیف نیز با

استفاده از روش (Konno and Ohmachi (1998) با عرض باند ۴۰ صورت گرفت. منحنی‌های H/V به دست آمده، براساس دستورالعمل عنوان شده در پروژه سزای (SESAME, 2004) مورد بررسی قرار گرفتند و مقادیر پریود تشدید و دامنه تقویت، برای هر ایستگاه استخراج شد. سپس نقشه هم پریود منطقه در نرم‌افزار Arc view 3.2 و با استفاده از روش Kriging درون یابی و ترسیم شده است (شکل ۴). همانطور که ملاحظه می‌شود مقادیر حداقل و حداکثر پریود در منطقه به ترتیب ۰/۰۵ ثانیه در انتهای بلوار هاشمیه (دایره آبی) و ۱/۱۶ ثانیه در ایستگاه ششم (مستطیل قرمز) در نزدیکی بزرگراه وکیل آباد می‌باشد.



شکل ۴. نقشه هم پریود منطقه مورد مطالعه

قرار گیرد، کمترین مقدار دامنه تقویت و به موازات گسلش مقدار حداکثر دامنه تقویت را شاهد باشیم. این امر برای نقاط دور از صفحه گسلی رخ نمی‌دهد و آن ایستگاه‌ها مقادیر یکسان و همگنی از دامنه تقویت را خواهند داشت. در جدول ۱ آزمون حداکثر و حداقل برای دامنه تقویت در هر ایستگاه، آورده شده است.

۳-۴. ارزیابی جهت داری داده‌های میکروترمورها

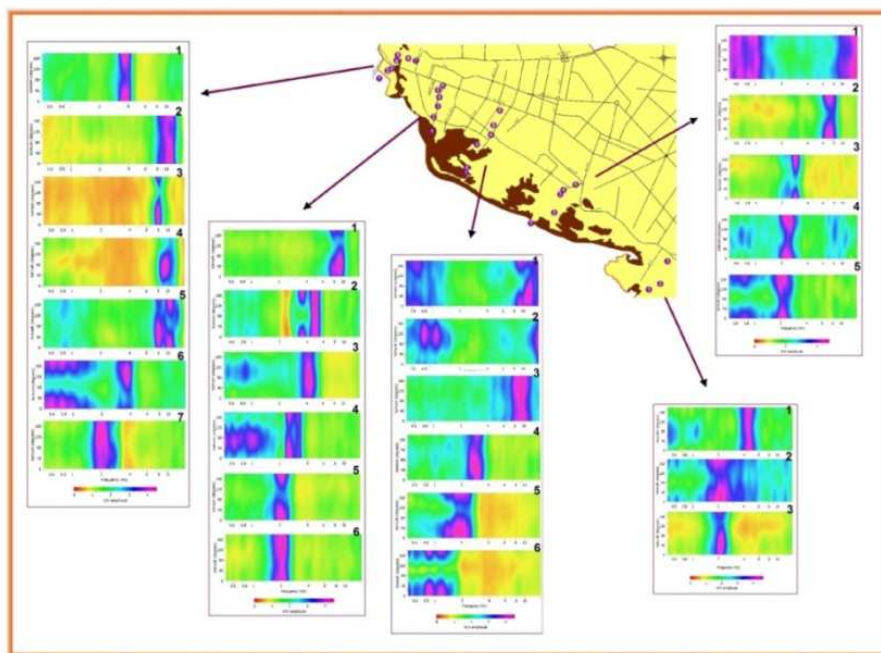
حضور موانع فیزیکی نظیر گسل‌ها سبب می‌شود امواج میکروترموور در یک جهت کانالیزه شوند؛ با توجه به این موضوع، مقادیر دامنه تقویت در آزمون‌های مختلف ناهمگنی نشان می‌دهد و انتظار می‌رود زمانیکه برآیند دو مولفه شمالی- جنوبی و شرقی- غربی، عمود بر خط گسل

جدول ۱. آزمون دامنه حداقل و حداکثر برای هر ایستگاه

ایستگاه	اول		دوم		سوم		چهارم		پنجم	
	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل
St1	۷۰	۱۸۰	۵۰	۱۴۰	۱۰۰	۱۰۰	۵۰	۱۴۰	۱۰۰	۱۸۰
St2	۱۱۰	۳۰	۱۰۰	۱۰	۱۸۰	۹۰	۱۲۰	۱۶۰	۴۰	۴۰
St3	۱۴۰	۴۰	۷۰	۱۶۰	۱۸۰	۹۰	۸۰	۱۲۰	۴۰	۴۰
St4	-	-	۸۰	۱۵۰	۱۴۰	۴۰	۲۰	۱۷۰	۷۰	۷۰
St5	-	-	۸۰	۱۶۰	۱۱۰	۳۰	۱۰	۱۲۰	۵۰	۵۰
St6	-	-	-	-	۱۱۰	۲۰	۱۳۰	۶۰	۱۳۰	۱۳۰
St7	-	-	-	-	-	-	-	۳۰	۱۱۰	۱۱۰

زده باشد، که باعث این تغییرات در آزمون‌های مختلف شده است. همچنین در اکثر ایستگاه‌ها با چرخش حدود ۴۰ درجه‌ای برآیند دو مولفه افقی و قائم، بیشترین مقدار را خواهیم داشت و با چرخش حدود ۱۰۰ درجه کمترین مقدار آنرا به دست خواهیم آورد. این به این معناست که زمانی که برآیند دو مولفه به موازات ارتفاعات (یا به موازات گسل) قرار می‌گیرد، بیشترین مقدار دامنه و زمانی که عمود بر ارتفاعات (عمود بر گسل) قرار می‌گیرد، کمترین مقدار آن به دست می‌آید.

در شکل ۵ نتایج حاصل از چرخش H/V در نرم‌افزار GEOPSY آورده شده است. در تصاویر محور افقی فرکانس (هرتز) و محور عمودی آزمون می‌باشد؛ مقادیر دامنه تقویت نیز با مقیاس نواری رنگی، نشان داده شده است؛ همانطور که ملاحظه می‌شود برخی از ایستگاه‌ها در تمام زوایا، تغییرات اندک در دامنه تقویت را نشان می‌دهند، که ناشی از یکنواختی و همگنی شرایط زیرسطحی می‌باشد. اما در این میان ایستگاه‌هایی دارای تغییرات زیاد در مقادیر حداکثر و حداقل دامنه تقویت مشاهده می‌شوند که انتظار می‌رود عملکرد گسل در محدوده این ایستگاه‌ها، شرایط زیرسطحی ناهمگن را رقم



شکل ۵. نتایج حاصل از چرخش H/V برای تمام پروفیل‌ها

۴-۴. تفسیر نتایج

با توجه به نقشه هم پریود، در برخی از ایستگاه‌ها مقادیر پریود، تغییرات ناگهانی را نشان می‌دهد که ناشی از تغییر در شرایط زیرسطحی می‌باشد و می‌تواند متاثر از گسل خوردگی در منطقه باشد؛ با توجه به اینکه گسل جنوب مشهد یک گسل کوهپایه‌ای و در مرز بین کوه دشت می‌باشد، در نتیجه عملکرد آن سبب شده در فاصله بین دو ایستگاه مشخص، در یک سمت صفحه گسلی، بالاآمدگی سنگ بستر و افزایش مقادیر فرکانس و کاهش مقادیر پریود تشدید و در طرف دیگر افتادگی آن و در نتیجه افزایش ضخامت رسوبات آبرفتی و به دنبال آن افزایش پریود تشدید را شاهد باشیم. با در نظر گرفتن این توضیحات ایستگاه‌های دارای تغییرات مشخص در مقادیر فرکانس غالب علامت‌گذاری شده و انتظار می‌رود گسل از محدوده آن ایستگاه‌ها عبور کرده باشد. (این ایستگاه‌ها در شکل ۶ با رسم دایره مشخص می‌باشند).

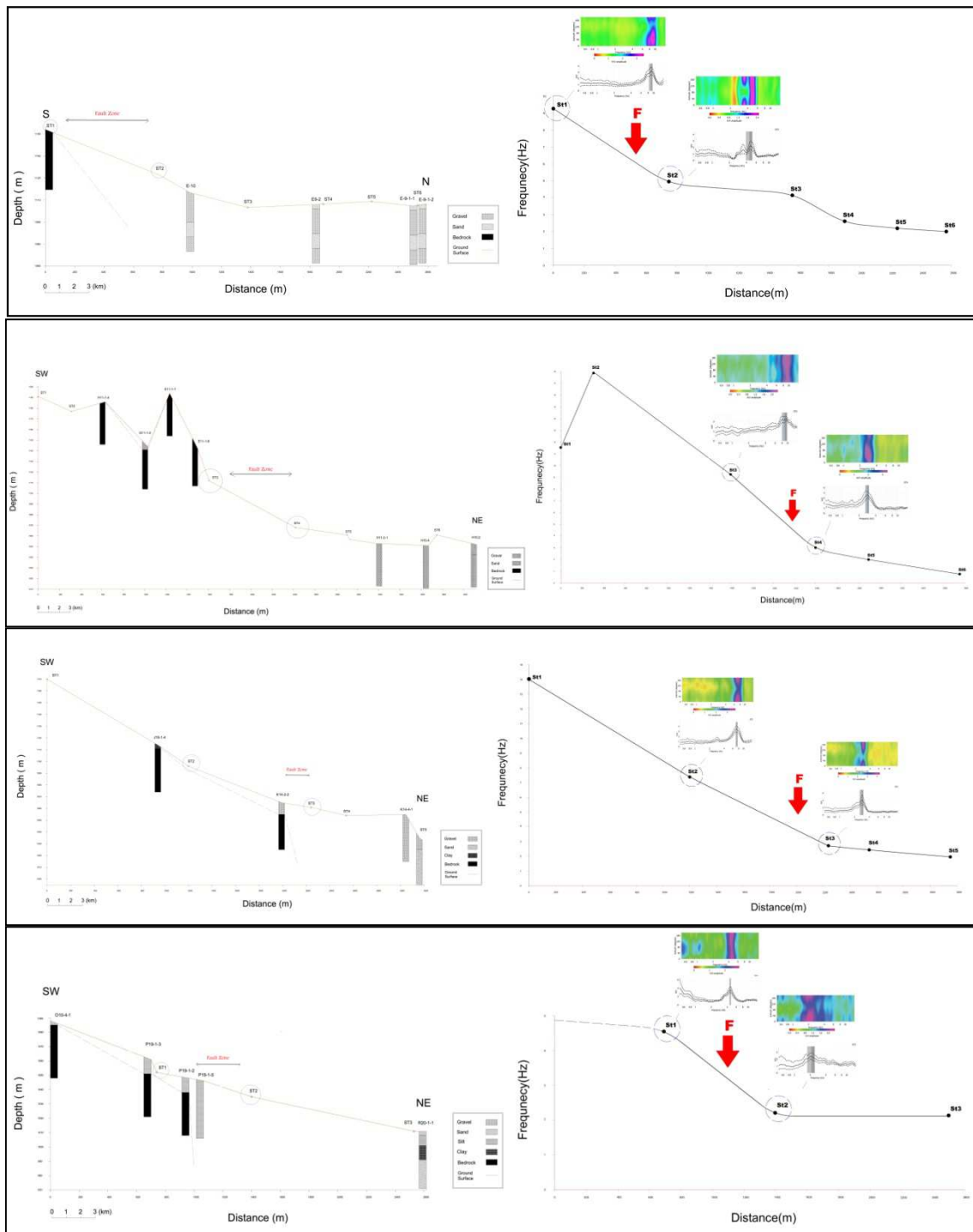
علاوه بر بررسی و مطالعه میکروترمورها در هر پروفیل به منظور درک بهتر از شرایط زیرسطحی اطلاعات گمانه‌های حفاری شده در منطقه جمع‌آوری و مقطع عرضی پروفیل‌ها به کمک اطلاعات گمانه‌های با عمق ۴۰ متر رسم گردیده است. در محدوده کال چهل بازه (پروفیل ۵) به دلیل عدم وجود اطلاعات گمانه‌ای مقطع توپوگرافی ترسیم نشده است. شکل ۶ مقطع عرضی از تغییرات پریود تشدید را در کنار مقطع توپوگرافی در تمام پروفیل‌ها به ترتیب از پروفیل اول تا چهارم به نمایش می‌گذارد. به منظور شناسایی موقعیت گسل، داده‌های حاصل از میکروترمورها و گمانه‌های موجود در طول هر پروفیل، مورد بررسی قرار گرفته است. این بررسی‌ها نتایج زیر را در اختیار ما قرار داده‌اند:

با توجه به شکل ۶ در پروفیل شماره ۱ (منطقه خلیج)، تغییرات فرکانس به ترتیب از ایستگاه اول تا سوم ۴/۶، ۲/۱ و ۲/۱ هرتز می‌باشد. با توجه به نقشه هم پریود و مقادیر فرکانس، در فاصله بین ایستگاه ۱ و ۲ تغییر مشخصی دیده می‌شود؛ بررسی گمانه‌ها در طول این پروفیل به خوبی

افتادگی ناگهانی سنگ کف در فاصله بین این دو ایستگاه را نشان می‌دهد (شکل ۶). همچنین چرخش H/V برای این پروفیل مشخص کرد که در دومین ایستگاه مقادیر دامنه تقویت، آشفتگی زیادی در زوایای مختلف به نمایش می‌گذارد. با توجه به نتایج حاصل از گمانه‌ها و تغییرات پریود غالب در این پروفیل و مطابقت هر دو روش، این تغییرات و ناهمسانگردی را می‌توان به عملکرد گسل نسبت داد.

در پروفیل شماره ۲، St1 در کنار رخنمون سنگ‌های الترامافیکی می‌باشد و فرکانس غالب ثبت شده برای این ایستگاه ۱۴ هرتز است. در سایر ایستگاه‌ها به ترتیب فرکانس غالب ۷/۲، ۲/۸، ۲/۵ و ۱/۹ هرتز می‌رسد (شکل ۶). تغییر ناگهانی در مقادیر فرکانس و افتادگی پی سنگ در فاصله ایستگاه دوم و سوم را می‌توان به عملکرد گسل در فاصله بین این دو ایستگاه نسبت داد (شکل ۶). داده‌های حاصل از چرخش H/V برای این پروفیل نیز نتایج مشابهی را نشان می‌دهد؛ به این ترتیب که مقادیر دامنه تقویت برای این پروفیل در ایستگاه سوم، بازه بیشتری از تغییرات را در زوایای مختلف نشان می‌دهد که این آشفتگی را می‌توان در ارتباط با گسل دانست (شکل ۵).

ثبت داده‌های میکروترمورها در پروفیل ۳ در طول بلوار هاشمیه انجام شد. در این پروفیل از ایستگاه یک به سمت ایستگاه سوم فرکانس غالب به ترتیب ۱۱/۶، ۱۸ و ۹/۲ هرتز می‌باشد. در ایستگاه چهارم، فرکانس غالب با اختلاف زیاد نسبت به ایستگاه سوم به ۲/۸ هرتز می‌رسد؛ اختلاف مشخص در فرکانس و بررسی مقاطع عرضی، به خوبی تغییر در شرایط زیرسطحی و تاثیر گسلش را در فاصله بین این دو ایستگاه مشخص می‌کند. (شکل ۶). همچنین نتایج چرخش H/V از ایستگاه چهارم به بعد، آشفتگی مشخص مقادیر دامنه در جهات مختلف را نشان می‌دهد (شکل ۵). تغییر مشخص در شیب زمین نیز می‌تواند شواهدی بر عملکرد گسل در فاصله ایستگاه ۳ و ۴ باشد (شکل ۶).

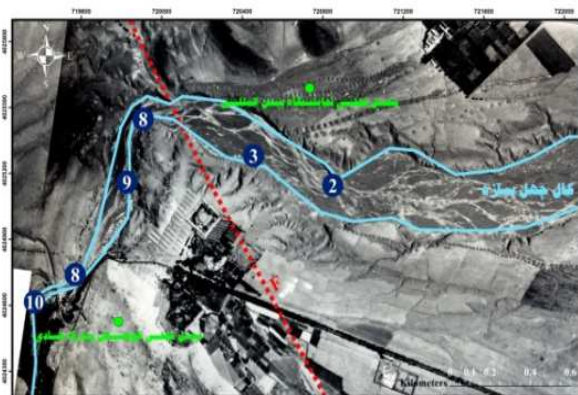


شکل ۶. مقطع عرضی توپوگرافی و تغییرات پریرود تشدید در پروفیل اول تا چهارم به ترتیب از بالا.

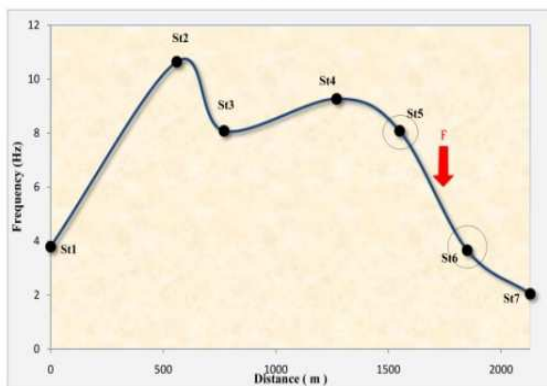
فرکانس $4/8$ و $4/2$ هرتز می باشد که نشان دهنده ضخامت قابل توجهی از خاک سخت است. این مقدار در ایستگاه های بعد افت می کند و به ترتیب از $2/5$ تا 2 هرتز تغییر می کند (شکل ۶). این نتایج و رسم پروفیل عرضی برای ما مشخص

داده های میکروترمو در چهارمین پروفیل در طول بلوار لادن برداشت شده است و در اولین ایستگاه فرکانس غالب $9/2$ هرتز می باشد که ساختگاه سنگی با ضخامت کمی از خاک را به نمایش می گذارد. در ایستگاه های دو و سه به ترتیب مقدار

همچنین تغییر در تعداد انشعاب آنها به صورت ناگهانی اشاره کرد (شکل ۸). همانطور که عنوان شد گسل جنوب مشهد، یک گسل معکوس و احتمالاً با مولفه راستگرد می‌باشد؛ این موضوع سبب شده تغییر مسیر در آبراهه‌ها بیشتر به سمت شرق - جنوب باشد. این اطلاعات در شکل ۸ نشان داده شده است.



نویسرات فرکانس غالب در مسیر کال چهل بازه
مطابق فرکانس غالب (هرتز) از توابع آکسی راسک قابل مشاهده می‌باشد

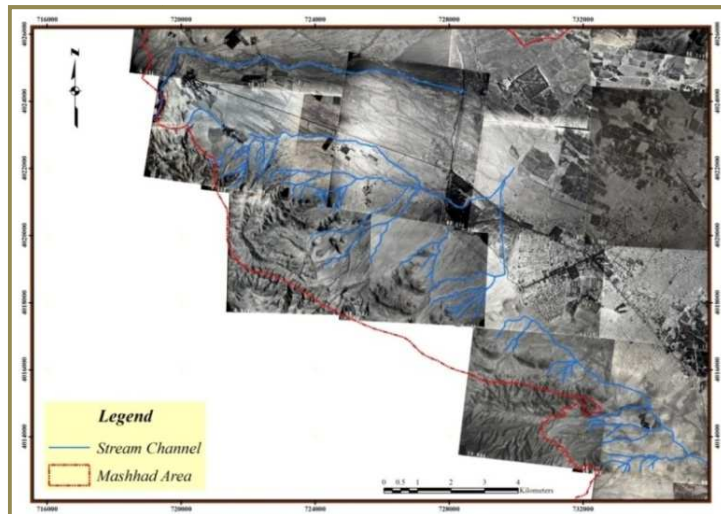


شکل ۷. جانمایی پروفیل پنجم بر روی عکس هوایی و تغییرات فرکانس غالب در طول آن

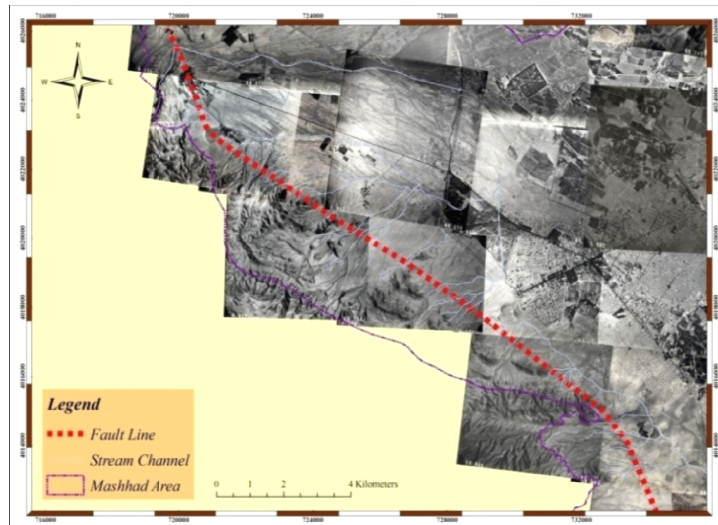
با توجه به نتایج حاصل از نقشه‌های هم‌پریود و اطلاعات حاصل از گمانه‌ها و مقایسه آن با نتایج چرخش H/V و همچنین با بررسی نشانه‌های جابه‌جایی گسل در عکس‌های هوایی محل احتمالی عبور گسل جنوب مشهد تعیین و در شکل ۹ نشان داده شده است.

کرد که احتمالاً گسل از نزدیکی ایستگاه دوم عبور کرده است. با عبور از ایستگاه دوم نیز تغییری مشخص در شیب زمین نیز رخ داده، که می‌تواند شاهدهی بر تاثیر گسل در این محدوده باشد (شکل ۶). نتایج مربوط به چرخش H/V در این پروفیل نیز ناهمگنی در مقادیر دامنه تقویت را در دومین ایستگاه نشان می‌دهد.

آخرین پروفیل در محدوده کال چهل بازه واقع شده است. در این پروفیل با توجه به شواهد فعالیت گسل جنوب مشهد و جابه‌جایی رودخانه چهل بازه نقاط برداشت میکروترومور انتخاب شده‌اند. پس از ثبت داده‌ها و تحلیل آنها، مقادیر فرکانس غالب به خوبی شرایط زیرسطحی پیش‌بینی شده برای این محدوده را آشکار کرده‌اند. مقدار فرکانس غالب از ایستگاه اول تا پنجم به ترتیب ۳/۷، ۱۰/۶، ۸، ۹/۲ و ۸ هرتز می‌باشد. فاصله بین ایستگاه پنجم و ششم در محدوده جابه‌جایی کال می‌باشد و به همین دلیل به خوبی شاهد تغییر ناگهانی در مقادیر فرکانس غالب از ۸ هرتز در ایستگاه پنج، به ۳/۶ هرتز در ایستگاه شش هستیم (شکل ۷). در این پروفیل به خوبی عملکرد گسل با شواهد زیادی به نمایش گذاشته شده است؛ به این ترتیب که ایستگاه‌های دارای فرکانس بالا، ناشی از بالا آمدگی پی سنگ می‌باشد و این ایستگاه‌ها (دو، سه، چهار و پنج) بر قسمت فرادیواره گسل قرار گرفته‌اند. همچنین اختلاف ناگهانی در مقدار فرکانس غالب از ایستگاه پنج به شش و هفت به خوبی نشان می‌دهد که ایستگاه پنج بر فرادیواره و ایستگاه شش و هفت در قسمت فرو دیواره گسل واقع شده است. نتایج حاصل از چرخش H/V آشفتگی نسبی از مقادیر دامنه تقویت را برای تمام ایستگاه‌ها به نمایش می‌گذارد که این ناهمگنی به عملکرد گسل ارتباط پیدا می‌کند. پس از دستیابی به نتایج حاصل از میکروترومورها، به کمک عکس‌های هوایی ۱:۵۰۰۰۰ شهر مشهد، شواهد فعالیت گسل در این محدوده مورد بررسی قرار گرفت. بر روی این عکس‌ها با تمرکز بر مسیر آبراهه‌ها در محدوده مورد مطالعه، شواهد فعالیت گسل نشانه‌گذاری شده است. از جمله آنها می‌توان به تغییر مشخص در مسیر آبراهه‌ها یا رودخانه‌ها و



شکل ۸. تغییر در مسیر آبراهه‌ها و انشعاب آنها بر روی عکس هوایی



شکل ۹. موقعیت تقریبی عبور گسل جنوب مشهد بر روی عکس هوایی

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، جهت تعیین موقعیت گسل جنوب مشهد، پس از ثبت و تحلیل داده‌های میکروترمور، مقادیر پرلود تشدید و دامنه تقویت استخراج شدند؛ به دنبال آن، نقشه هم‌پرلود برای محدوده‌ی مورد بررسی، رسم گردید. علاوه بر این، در نرم‌افزار GEOPSY جهت دستیابی به شرایط زیرسطحی هر ایستگاه در تمام جهات، چرخش H/V صورت گرفت و مقادیر دامنه تقویت در آزمون‌های مختلف استخراج شد. در نهایت با بررسی و تفسیر اطلاعات کسب شده از میکروترمورها و گمانه‌های منطقه و مقایسه آنها، و

بررسی شواهد فعالیت گسل در عکس‌های هوایی، موقعیت تقریبی گسل جنوب مشهد مشخص گردید. با توجه به بررسی فوق احتمالاً، گسل جنوب مشهد، از ضلع غربی شهر مشهد، در انتهای بزرگراه وکیل‌آباد و حدفاصل نمایشگاه بین‌المللی و دپوی قطار شهری، وارد محدوده‌ی شهر می‌شود. سپس از فاصله بلوار شهید فکوری و بلوار پیروزی، در محدوده‌ی بلوار لادن، گذر کرده و هم‌راستا و تقریباً موازی با بلوار شهید فکوری، کشیده شده و از حدفاصل کوهسنگی و منطقه آبادگران عبور کرده و در محدوده خلیج و از حدود ۲/۵ کیلومتری جنوب غربی فرودگاه، از شهر خارج می‌شود.

منابع

- حافظی مقدس، ن.، ۱۳۸۵. گزارش زمین شناسی مهندسی طرح ریز پهنه بندی لرزه ای شهر مشهد. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور مدیریت منطقه شمال شرق.
- حافظی مقدس، ن.، قائم مقامیان، م.ر.، ۱۳۸۸. ارزیابی ضخامت آبرفت در شهر مشهد بر اساس بررسی های میکروترمور. نشریه زمین شناسی مهندسی، جلد سوم، شمار ۱. ۵۱۲-۴۹۳.
- حافظی مقدس، ن.، قائم مقامیان، م.ر.، قزی، ا.، ۱۳۸۷. ارزیابی اثرات آبرفت و طبقه بندی زمین در شهر مشهد بر اساس روش نسبت طیفی امواج خرد لرزه ای. رخساره های رسوبی، جلد ۱، شماره ۱، ۳۰-۱۹.
- حافظی مقدس، ن.، قزی، ا.، مهران، ح.، ۱۳۸۸. ارزیابی بزرگ نمایی آبرفت در سطح شهر خاش. ششمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
- حافظی مقدس، ن.، یزدان فر، ر.، رستمی، ا.، مهران، م.، ۱۳۹۰. برآورد پاسخ لرزه ای ساختگاه رسوبی توسط ریز ارتعاشات تک ایستگاهی مطالعه موردی. ایرانشهر. سی امین گردهمائی علوم زمین.
- حقیقی، م.ک.، نادری، ا.، ۱۳۸۵. تعیین پریود غالب خاک با مایکروترمورها در شمال غرب تهران، مجله فیزیک زمین و قضا، جلد ۳۲، شماره ۱، ۲۶-۱۵.
- قائم مقامیان، م.ر.، فریدونی، آ.، ۱۳۸۸. تحلیل آرایه ای نیکروترمورها به روش ضرایب خود همبستگی مکانی به منظور برآورد ساختار سرعتی موج برشی در جنوب خاور شهر بم، مجله علوم زمین، شماره ۷۱، ۱۴۲-۱۳۷.
- داودی، م.، حق شناس، ا.، میر جلیلی، م.، ۱۳۸۷. کاربرد روش آرایه ای خرد لرزه ها در تعیین پروفیل سرعت موج برشی لایه های تحت الارضی در یک نمونه سایت در شهر تهران (پارک شقایق)، مجله زلزله شناسی و مهندسی زلزله (JSEE)، سال دهم. ۲۱۵-۲۰۵.
- رستمی، ا.، حافظی مقدس، ن.، سدیدی خوی، ا.، آزادی، ا.، ۱۳۹۱. ارزیابی ساختار سرعتی موج برشی در غرب مشهد به روش آرایه میکروترمورها (ReMi) و مقایسه آن با داده های درون گمانه ای، شانزدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران.
- قلندرزاده، ع.، کاوند، ع.، ۱۳۸۹. تعیین سرعت موج برشی در لایه های رسوبات آبرفتی با به کارگیری اندازه گیری میکروترمور، نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری، شماره ۴، ۵۳۶-۵۲۵.
- قلندرزاده، ع.، معتمد، ر.، ۱۳۸۳. اندازه گیری میکروترمور ابزاری مناسب در مطالعات پاسخ ساختگاه، نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۸، شماره ۶، ۷۹۰-۷۷۷.
- شرفی، ح.، حائری، م.، راد ملک شاهی، م.، ۱۳۸۵. ریز پهنه بندی لرزه ای مناطق شهری با استفاده از اندازه گیری مایکروترمورها (مطالعه موردی شهر کرمانشاه). هفتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران.
- قلندرزاده، ع.، معتمد، ر.، سدیدی خوی، ا.، ۱۳۸۲. ریز پهنه بندی لرزه ای شهر ارومیه با استفاده از اندازه گیری میکروترمور، چهارمین کنفرانس بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.
- مجرب، م.، معماریان، ح.، زارع، م.، روزخس، پ.، ۱۳۸۶. بررسی ضخامت آبرفت روی سنگ بستر با استفاده از سرعت موج برشی و خرد لرزه های محیطی با مطالعه موردی شهرکرد. پنجمین همایش زمین شناسی و محیط زیست ایران.
- Adachi, M., Noguchi, T., Nishida, R., Ohata, I., Yamashita, T., Omura, K., 2008. Determination of subsurface structure of Izumo plain, southwest Japan using microtremors and gravity anomalies. The 14th world conference on earthquake engineering, Beijing, China.
- Asten M.W., 2004. Thickness and shear-velocity mapping of Holocene-Pleistocene sediments by array studies of microtremors. USGS/NEHRP Program No. 04HQR0030.
- Cultrera, G., Rovelli, A., Mele, G., Azzara, R., Caserta, A., Marra, F., 2003. Azimuth-dependent amplification of weak and strong ground motion within a fault zone (Nocera Umbra, central Italy). Journal of Geophysical Research, 108 (B3): 2156-2170.
- Cara, F., Di Giulio, G, and Rovelli, A., 2003. A study on seismic noise variations at Colfiorito, central Italy: Implications for the use of H/V spectral ration. Geophysical research letters, 30(18): 10-1-10-4, doi: 10.1029/2003GL017807.

- Carter, A.J., Kendall, J.M., 2006. Attenuation anisotropy and the relative frequency content of split shear waves. *Geophysical Journal International*, 165: 865–874.
- Chavez-Garcia, F.J and P.Y. 1994. Site effects in Mexico city eight years after the September 1985 Michoacan earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 13: 229-247.
- Coccia, S., Del Gaudio, V., Venisti, N., Wasowski, J., 2010. Application of Refraction Microtremor (ReMi) technique for determination of 1-D shear wave velocity in a landslide area. *Journal of Applied Geophysics*, 71: 71–89.
- Delgado, J., Lopez Casado, C., Estevez, J., Giner, L., Cuenca, A., Molina, S., 2000. Mapping of soft soil in the Segura river valley (SE Spain): a case study of microtremores as an exploration tool, *Journal of Applied Geophysics* 45(1): 19-32.
- Del Gaudio, V., Coccia, S., Wasowski, J., Gallipoli, M.R., Mucciarelli, M. 2008. Detection of directivity in seismic site response from microtremor spectral analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8: 751-762.
- Del Gaudio, V., Wasowski, J., 2011. Advances and problems in understanding the seismic response of potentially unstable slopes. *Engineering Geology*, 122: 73–83.
- Del Gaudio, V., Wasowski, J., Lee, C.T. 2011. Tests of microtremor measurements with a broad-band sensor for the characterization of seismic response of landslide prone slopes. *National Department of Solid Earth Geophysics, Session 2.2*.
- Field, E.H., & Jacob, K., 1995. A comparison and test of various site response estimation techniques, including three that are non reference-site dependant, *Bulletin of. Seismological Society of America*, 85: 1127-1143.
- Garambois, S., Voisin, C., 2013. Landslide site effects analysis in a seismic area: the Utiku landslide (New-Zealand) , *Trosiemes Journes Aleas Gravitaires*, Grenoble, France.
- Garambois, S., Qunitero, A., Massey, C., Voisin, C., 2010. Azimuthal and thickness variabilities of seismic site effect response of the Utiku landslide (North Island, New-Zealand). *Geophysical Research Abstracts*, 12: EGU2010-2430.
- Gosar, A., Lenart, A., Mapping the thickness of sediments in the Ljubljana Moor basin (Slovenia) using microtremors, 2010. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8:501-518.
- Huang H. C., Yang Y. T., Chiu, H. C., .2002. Site response evaluation using H/V ratio at te Yan-Lian in Hualien, Taiwan. *Pure and Applied Geophysics*, 159: 2715-2731.
- Ibs-von Sehat, M. and Wohlenberg, J., 1999. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediment. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(1): 205-259.
- Itoya, N., Matsushima, T., 2012. Estimation of subsurface structure in the Shimabara Peninsula using microtremor H/V spectral ratio, *Science Reports, Department of Earth and Planetary Sciences, Kyushu University*, 23(1): 1-12.
- Konno, K., Ohmachi, T., 1998. Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(1): 228-241.
- Kuhn, D., Ohrnberger, M., 2011. Imaging a shallow salt diapir using ambient seismic vibrations beneath the densely built-up city area of Hamburg Northern Germany . *Seismology*, 15: 507-531.
- Martino, S., Minutolo, A., Paciello, A., Rovelli, A., Scarascia Mugnozza, G., Verrubbi, V., 2006. Evidence of amplification effects in fault zone related to rock mass jointing. *Natural Hazards*, 39: 419–449.
- Matsushima, T., Itoya, N., 2012. Estimation of subsurface structure using microtremor H/V spectral ratio around Unzen volcano, Japan. *International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior*.
- Nakamura, Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI)*, 30(1).
- Noguchi, T., Nishida, R., 2002. Determination of subsurface structure of Tottori plain using microtremors and gravity anomaly, *Natural Disaster Science*, 24(1): 1-13.
- Panou, A.A., 2004. Ambient noise horizontal-to-vertical spectral ratio for assessing site effect in urban environments: The case of Thessaloniki city (northern Greece)", *Bulletin of the Geological Society of Greece*, XXXVI: 1467-1476

- Pintor, G.M., Toshinawa, T., Nishimura, T., Amano, H., 2004. Use of microtremors for the evaluation of the shallow geologic structure. Asia Conference on Earthquake Engineering, Manila, Philipines.
- Rudersdorf, A., Holz, S., Torgoev, A., Havenith, H.B., Reicherter, K., 2013. Hidden fault in the Gobi desert (inner Mongolia, China) revealed by microtremor analysis, ground-penetrating radar, and squid-supported electromagnetic. European Geoscience Union General assembly.
- Sesame, 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectralratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretations. SESAME European research project EVG1-CT-2000-00026, deliverable D23.12.
- Toshinawa, T., Inoue M., Yoneyama N., Hoshino Y., Mimura K., Yokoi Y., 2003. Geologic-profile estimates of Kofu Basin, Japan , by making use of microtremor observations, Geophysical Research Abstract, 5: 02079.
- Uebayashi, H., Kawabe, H., Takeuchi, Y., 2004. A high-resolution modeling technique of irregular subsurface structures using H/V spectral ration of long – period mocrotremors, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, Paper No. 365.
- Woolery, E., Street, R., 2002. 3D near-surface soil response from H/V ambient-noise ratios, Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 22: 865-876.
- Zhao, B., Xie, X., Chai, C., Ma H., Xu, X., Peng, D., Yin, W., Tao, J., 2007. Imaging the graben structure in the deep basin with a microtremor profile crossing the Yinchuan City. Geophysical. Engineering, 4: 293-300