

## چکیده

علی‌رغم مطالعات گسترده‌ای که در زمینه پردازش‌های میکروترمور و تحلیل نسبت طیفی مؤلفه افقی به قائم (H/V) انجام یافته است، در مطالعات محدودی تلاش شده است که این مشاهدات و نتایج تجربی از طریق مدل‌سازی‌های عددی دو و سه بعدی تفسیر و توجیه گردد. این موضوع در مقاله حاضر با انتخاب حوضه رسوبی شهر ارومیه مورد توجه قرار گرفته است. مطالعات قبلی ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای در این شهر نشان‌دهنده‌ی قله‌های نسبت طیفی H/V پهن یا دو قله نزدیک به هم در نقاطی از حاشیه حوضه رسوبی است. با بررسی توابع تبدیل حاصل از تحلیل‌های عددی یک و دو بعدی انجام یافته روی یک مقطع شرقی-غربی از حوضه رسوبی شهر ارومیه، مشخص شد که این مسئله می‌تواند ناشی از تغییر ناگهانی ضخامت آبرفت و تداخل موج‌های برشی دو محیط مختلف در طرفین نقطه اندازه‌گیری شده به علت وجود شرایط دو بعدی باشد. در این بررسی همخوانی بسیار مناسبی بین موقعیت دو قله تلفیق شده در منحنی H/V و منحنی تابع بزرگنمایی حاصل از تحلیل عددی دو بعدی به دست آمد. این مطالعه نشان داد که فرکانس‌های غالب در شرایطی که اثرات دو بعدی حاکم باشد نسبت به شرایط یک‌بعدی به سمت فرکانس‌های بالاتر جابه‌جا می‌گردد. همچنین این مطالعه پیشنهاد می‌کند که در تفسیر منحنی‌های H/V جهت تشخیص قله‌های واقعی مرتبط با اثر ساختگاه، روند تغییرات فرکانس‌های غالب منطقه مورد توجه قرار گیرد و هر منحنی به‌صورت منفرد ارزیابی نشود.

**واژگان کلیدی:** اثر دو و سه‌بعدی ساختگاه، حاشیه حوضه رسوبی، میکروترمور، تداخل موج‌های برشی.

## بررسی اثر ساختگاه در حاشیه حوضه رسوبی از طریق پردازش داده‌های میکروترمور و تحلیل عددی

### مه‌دی کولانی‌فر

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

### ابراهیم حق‌شناس (نویسنده مسئول)

استادیار، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، haghshen@iiees.ac.ir

### محسن کمالیان

استاد، پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

### هادی بهادری

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

## ۱- مقدمه

روش نسبت طیفی مؤلفه افقی به قائم (H/V) پیشنهادی توسط ناکامورا [۱] استوار است به‌عنوان ابزاری ساده برای برآورد اثر ساختگاه و تعیین پارامترهای مرتبط (فرکانس طبیعی و ضریب تشدید) شناخته شده است [۲]. کارایی این روش در مقایسه با دیگر روش‌های تجربی مطالعه اثر ساختگاه (از جمله روش نسبت طیفی استاندارد) توسط محققین مختلف از جمله حق‌شناس و همکاران [۳] به اثبات رسیده است. همچنین بونفوی کلوده و همکاران [۴] با استفاده از شبیه‌سازی یک‌بعدی ارتعاشات محیطی کارایی این روش را نشان دادند. در خصوص برداشت‌های

آگاهی دقیق از مشخصات دینامیکی و ساختار لایه‌های زیرسطحی زمین در برآورد جنبش لرزه‌ای سطح زمین و پهنه‌بندی لرزه‌ای از اهمیت زیادی برخوردار است. روش‌های ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی متداول در بررسی این مشخصات از طرفی مستلزم صرف هزینه زیاد و زمان طولانی و از طرف دیگر در مناطق شهری با مشکلات اجرایی مواجه هستند. در مقابل امروزه روش‌های مبتنی بر استفاده از برداشت‌های میکروترمور به دو شیوه تک‌ایستگاهی و آرایه‌ای به دلیل سهولت و قیمت مناسب بسیار رواج یافته‌اند. شیوه تک‌ایستگاهی که مبتنی بر

کشته و ۳۰۰۰ مجروح بر جای گذاشت [۱۴]. همچنین در اکتبر ۲۰۱۱ زلزله وان با بزرگای ۷/۱ در کشور همسایه ترکیه در فاصله ۱۸۳ کیلومتری از شهر ارومیه اتفاق افتاده و ۶۰۰ کشته در پی داشت [۱۵]. وقوع زلزله‌های مخرب گذشته در سلماس در ۷۰ کیلومتری ارومیه و در شهر تبریز در فاصله ۱۲۰ کیلومتری آن نیز مؤید لرزه‌خیزی بالای این منطقه می‌باشد. لذا با توجه به اهمیت این موضوع دو مرحله مطالعات پهنه‌بندی لرزه‌ای برای این شهر انجام یافته است. سری اول مطالعات در دو فاز توسط قلندرزاده در سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۸۲ [۱۶-۱۷] با دقت متوسط (سطح دو در دستورالعمل TC4 کمیته فنی انجمن بین‌المللی ژئوتکنیک) [۱۸] انجام شد. این مطالعه بیشتر بر روی اندازه‌گیری های نوفه‌های محیطی متمرکز بود که طی آن در مجموع در دو مرحله در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۰ در ۲۲۰ ایستگاه اندازه‌گیری صورت گرفت و به روش  $H/V$  تحلیل شد. در هر ایستگاه، حداقل تعداد سه رکورد سه مؤلفه‌ای به طول ۲ دقیقه و به فاصله زمانی ۱۵ الی ۲۰ دقیقه برداشت گردید. در مرحله اول مطالعات آزمایش‌های صحرائی به‌طور گسترده انجام نشده و در مجموع حفاری انجام یافته به ۲۰۰ متر محدود شده بود. ۹ سال بعد در سال ۱۳۸۹ مهندسین مشاور صحراکاو سری جدیدی از مطالعات را با دقت بالا (سطح سه دستورالعمل TC4) انجام دادند و علاوه بر برداشت میکروترمور، آزمایش‌های صحرائی ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی نیز در مطالعات در نظر گرفته شد. در مطالعه اخیر برداشت و تحلیل داده‌های میکروترمور به روش تک‌ایستگاهی توسط پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، به سفارش مهندسین مشاور صحراکاو [۱۹] انجام شد.

در این مطالعه، شهر به ابعاد یک کیلومتر در یک کیلومتر شبکه‌بندی گردید و تقریباً در هر سلول شبکه در یک یا دو نقطه و در مجموع در ۱۵۰ نقطه شهر برداشت‌های میکروترمور پیوسته به مدت ۳۰ دقیقه‌ای انجام شد. همچنین ۱۰۸ گمانه ژئوتکنیکی به عمق ۷ تا ۵۲ متر نیز حفر شد. روش برآورد اثر ساختگاه در هر دو مطالعه بر اساس تحلیل‌های  $H/V$  و تحلیل دینامیکی یک‌بعدی آبرفت بوده است.

میکروترمور به شیوه آرایه‌ای می‌توان به روش خودهمبستگی مکانی (SPAC) و روش تحلیل فرکانس-عدد موج ( $f-k$ ) اشاره نمود. تئوری این روش بر اساس ویژگی پراکندگی امواج سطحی در لایه‌های زیرسطحی بوده و قادر است پروفیل سرعت موج برشی آبرفت را ارائه نماید [۵-۸].

از روش  $H/V$  استفاده زیادی در تعیین پروفیل سرعت موج برشی بر اساس رابطه ساده  $T_0 = 4h/Vs$  شده است اما با توجه به نظرات مختلف محققین در اعتبار روش‌های مبتنی بر داده‌های میکروترمور برای محیط‌های با لایه‌بندی افقی و شرایط انتشار یک‌بعدی موج، استفاده از این روش برای شرایط دو و سه‌بعدی ساختگاه احتمالاً می‌تواند نتایج گمراه‌کننده‌ای را ارائه نماید [۹]. عده‌ای از محققین، از جمله گیلیبر و همکاران [۱۰]، بر اساس تحلیل‌های عددی و عده‌ای دیگر بر اساس مشاهدات تجربی [۱۱-۱۳] این مطلب را تأیید کرده‌اند. با این وجود به دلیل تنوع ساختارهای زمین‌شناسی و عوامل متعدد دخیل در مسائل چندبعدی ساختگاه، اظهار نظرات به‌صورت موردی بوده و ارائه یک جمع‌بندی در این زمینه شاید به‌سادگی امکان‌پذیر نباشد.

در این راستا، در مطالعه حاضر مقطعی عرضی از شرق به غرب حوضه رسوبی ساختگاه شهر ارومیه به طول ۱۰ کیلومتر به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است و سپس با تمرکز بر حاشیه این حوضه رسوبی به‌عنوان نمونه‌ای از مناطقی که شرایط یک‌بعدی حاکم نیست به بررسی نتایج روش  $H/V$  و مقایسه آن با نتایج حاصل از تحلیل عددی یک و دو بعدی پرداخته شده است.

## ۲- معرفی ساختگاه مورد مطالعه و انتخاب پروفیل انتخابی

شهر ارومیه در شمال غرب ایران واقع شده است که با توجه به طبقه‌بندی آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران ویرایش چهارم (سال ۱۳۹۲) دارای لرزه‌خیزی زیاد بوده و برای آن شتاب مبنای طراحی ۰/۳ شتاب ثقل زمین ( $g$ ) در نظر گرفته شده است. از مهم‌ترین رخداد‌های زلزله پنج سال اخیر که در شعاع ۲۰۰ کیلومتری شهر ارومیه اتفاق افتاده می‌توان به زلزله ۲۰۱۲ هر-ورزقان در ۱۸۰ کیلومتری شمال شرقی ارومیه با بزرگای ۶/۴ اشاره نمود که ۳۰۶

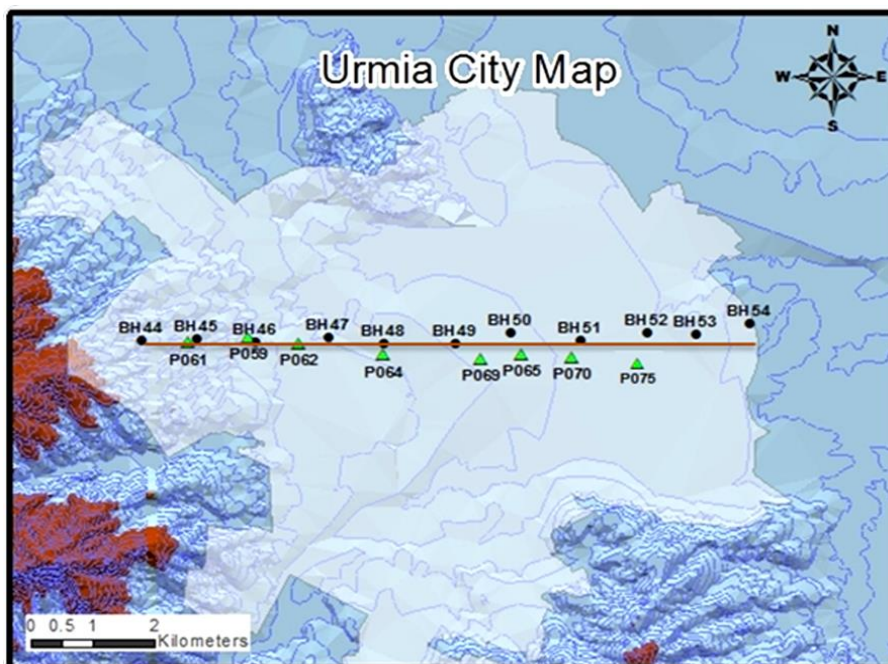
استفاده از بسته نرم‌افزاری ژئوپسی<sup>۱</sup>، تهیه شده به وسیله کنسرسیوم اروپایی سزامی<sup>۲</sup>، طی مراحل زیر محاسبه شد:

۱. اعمال فیلتر بالاگذر ۰/۰۵ هرتز برای رفع خطای حاصل از مدوله شدن فرکانس‌های پایین بر سیگنال؛
۲. در طول نگاهت‌های ۳۰ دقیقه‌ای ثبت شده، پنجره‌های زمانی ۲۵ تا ۴۰ ثانیه‌ای از نویزهای گذرا انتخاب گردید. انتخاب این پنجره‌ها بر مبنای استفاده از الگوریتم تحریک آستانه معکوس تعبیه شده در نرم‌افزار به همراه کنترل چشمی و اصلاحات دستی مورد نیاز برای همه نقاط اندازه‌گیری شده، انجام شد. الگوریتم مورد نظر از محاسبه متوسط دامنه‌های ارتعاشات در کوتاه‌مدت<sup>۳</sup> به بلندمدت<sup>۴</sup> و نسبت این دو متوسط استفاده می‌نماید. بدین منظور در این مطالعه حد پایین و بالای STA/LTA برای انتخاب پنجره‌های مانا به ترتیب برابر ۰/۵ و ۲ در نظر گرفته شد. مدت زمان پنجره انتخاب شده، برای پنجره میانگین کوتاه‌مدت (STA) ۱ ثانیه و برای LTA، ۳۰ ثانیه انتخاب شد. به این ترتیب تنها پنجره‌های با طول مورد نظر که معیار نسبت STA/LTA در طول آنها صادق باشد در محاسبه نسبت طیفی مد نظر قرار گرفت؛

در پژوهش حاضر به منظور انجام تحلیل‌های عددی دو بعدی در این حوضه رسوبی مقطعی شرقی-غربی (عمود بر ارتفاعات غربی شهر) مورد توجه قرار گرفت (شکل ۱). مسیر مقطع انتخابی از نزدیکی چندین ایستگاه اندازه‌گیری میکروترمور و همچنین گمانه‌های ژئوتکنیکی حفر شده عبور می‌نماید. بررسی لوگ گمانه‌های ژئوتکنیکی نشان می‌دهد که بخش غربی پروفیل انتخابی محل شروع حوضه رسوبی است. این حوضه از رسوبات سطحی بیشتر رسی-سیلتی با پلاستیسیته پایین و ضخامت کم (۵ متر) بر روی لایه‌ای از مارن و شیل تشکیل شده است. با حرکت به سمت شرق ضخامت رسوبات افزایش می‌یابد که در بعضی مناطق به ۳۰ متر نیز می‌رسد. در برخی گمانه‌ها میان لایه‌های عدسی شکل از جنس ماسه سیلتی نیز مشاهده می‌گردد.

### ۳- نتایج پردازش داده‌های میکروترمور

به منظور مقایسه نتایج پردازش داده‌های تک‌ایستگاهی میکروترمور با نتایج تحلیل‌های عددی، تعداد هشت ایستگاه اندازه‌گیری که به گمانه‌های ژئوتکنیکی نزدیک تر بودند انتخاب شدند. برای این ایستگاه‌ها نسبت طیفی مؤلفه افقی به قائم با



شکل (۱): نقشه توپوگرافی شامل گستره شهر ارومیه (رنگ خاکستری)، موقعیت مقطع شرقی-غربی (خط قهوه‌ای) به همراه موقعیت ایستگاه‌های ثبت میکروترمور (با علامت مثلث و حرف P) و گمانه‌های ژئوتکنیکی (با علامت دایره و حرف BH).

۲. یک مقدار فرکانسی ( $f^-$ ) وجود دارد که بین دو مقدار  $Fhv$  و  $Fhv/4$  واقع است به طوری که رابطه  $Ahv/A(f^-) > 2$  برای آن صدق می‌کند. در این رابطه دامنه  $H/V$  در فرکانس  $f^-$  می‌باشد؛

یک مقدار فرکانسی ( $f^+$ ) وجود دارد که بین دو مقدار  $Fhv$  و  $4 \times Fhv$  قرار دارد به طوری که رابطه  $Ahv/A(f^+) > 2$  برای آن صدق می‌کند. در این رابطه دامنه  $H/V$  در فرکانس  $f^+$  می‌باشد.

بر اساس موارد مذکور منحنی‌های  $H/V$  هشت ایستگاه مطابق شکل‌های (۲) و (۳) محاسبه شده است. شکل (۲) مربوط به پنج ایستگاه واقع در ناحیه مرکزی حوضه است که در واقع در نیمه شرقی مقطع مطالعه شده قرار دارند و شکل (۳) مربوط به سه ایستگاه دیگر واقع در حاشیه حوضه رسوبی است که نیمه غربی مقطع را شامل می‌شوند. در بررسی نسبت طیفی  $H/V$  مربوط به پنج ایستگاه P064، P069، P065، P070 و P075 واقع در نیمه شرقی مطابق شکل (۲) قله‌های واضحی دیده می‌شود. این قله‌ها تمامی معیارهای تیم سزازی را برآورده کرده و وضوح قله‌ها بیانگر وجود تباین<sup>۷</sup> سرعتی نسبتاً قوی و تبعیت انتشار امواج از شرایط یک‌بعدی است [۹]. از این رو مقدار فرکانس‌های پیک در آنها نشان‌دهنده‌ی فرکانس‌های غالب بوده که در محدوده ۱/۱ الی ۱/۹ هرتز هستند.

با بررسی نمودار نسبت طیفی  $H/V$  سه ایستگاه دیگر در شکل (۳) مشخص می‌شود که بر خلاف پنج نقطه قبلی برای ایستگاه‌های P059، P062 و P061 تشخیص قله‌ای شاخص بسیار دشوار است. منحنی نسبت طیفی در این سه نقطه قله‌هایی پهن تلفیق شده از دو قله با دامنه کم به ترتیب در بازه‌های فرکانسی ۳/۷-۶، ۵/۵-۷/۵ و ۵/۵-۹/۵ هرتز را نشان می‌دهند. قائم‌میان [۲۱] وجود چنین حالتی را ناشی از تداخل سرعت‌های موج برشی وارد شده از دو محیط مختلف معرفی نموده و توابع بزرگنمایی تداخلی<sup>۸</sup> را از طریق یک روش تحلیلی به دست آورده است. ایشان در بررسی حاشیه حوضه‌های رسوبی ظهور دو قله نزدیک به هم را در منحنی‌های طیفی بزرگنمایی از طریق

۳. اعمال پنجره نرم‌کننده کسینوسی<sup>۵</sup> ۵ درصد برای به حداقل رساندن اثرات مرزی؛

۴. محاسبه طیف دامنه هر پنجره برای سه مؤلفه  $Z$ ،  $N$ ،  $E$  با استفاده از تبدیل سریع فوریه؛

۵. هموار کردن<sup>۶</sup> طیف دامنه پنجره انتخابی با استفاده از روش هموارسازی کونو-اوماچی (۱۹۹۷) و انتخاب ضریب ۴۰؛

۶. میانگین‌گیری طیف دامنه فوریه برای دو مؤلفه افقی و محاسبه نسبت میانگین مؤلفه افقی به مؤلفه قائم برای هر پنجره و در نهایت میانگین‌گیری از تمامی پنجره‌ها برای به دست آوردن تابع بزرگنمایی ساختگاه.

به منظور افزایش اعتمادپذیری نتایج روش  $H/V$  توصیه‌های ارائه شده در راهنمای کاربری روش نسبت طیفی مؤلفه افقی به قائم [۲۰] به شرح زیر مد نظر قرار گرفت.

۱. طول پنجره‌های انتخابی ( $Lw$ ) از ۱۰ برابر پریرود مورد نظر که در واقع پریرود مربوط به قله نمودار  $H/V$  می‌باشد بزرگ‌تر در نظر گرفته شد  $Lw < Fhv$  در این رابطه  $Fhv$  فرکانس مربوط به قله نمودار  $H/V$  می‌باشد؛

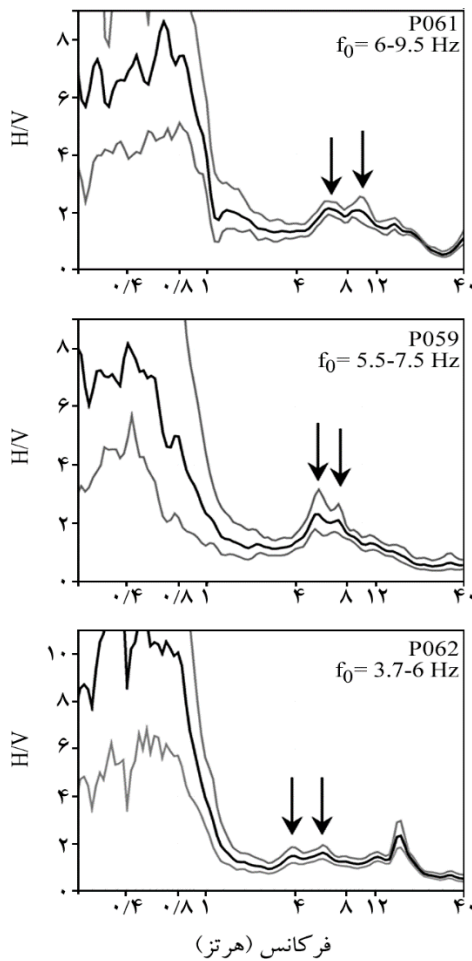
۲. جهت تعیین نمودار میانگین  $H/V$ ، نمودارهای  $H/V$  برای تعداد پنجره کافی محاسبه شد. تعداد پنجره‌ها ( $Nw$ ) با توجه به فرکانس قله نمودار  $H/V$  و طول پنجره با تبعیت از رابطه  $Lw \times Nw \times Fhv > 200$  تعیین شد؛ در این رابطه عدد ۲۰۰ به تبعیت از پروژه سزازی انتخاب شده است؛

۳. یک سطح حداقل برای پراکندگی داده‌های میانگین مورد نیاز است. انحراف معیار مربوط به منحنی میانگین  $H/V$  می‌بایست برای یک بازه فرکانسی حداقل کمتر از  $0.5 Fhv$  و  $2 Fhv$  باشد و پیشنهاد شده است که انحراف معیار کمتر از دو برابر یک فاکتور برای حالت  $Fhv > 0.5 Hz$  یا کمتر از سه برابر یک فاکتور  $Fhv < 0.5 Hz$  باشد که در این مطالعه لحاظ شد.

همچنین در پروژه سزازی جهت صحت‌سنجی مقادیر قله‌های نمودار  $H/V$  به منظور تعیین مقدار تشدید سه بند زیر توصیه شده است که در مراحل تحلیل در نظر گرفته شد [۲۰].

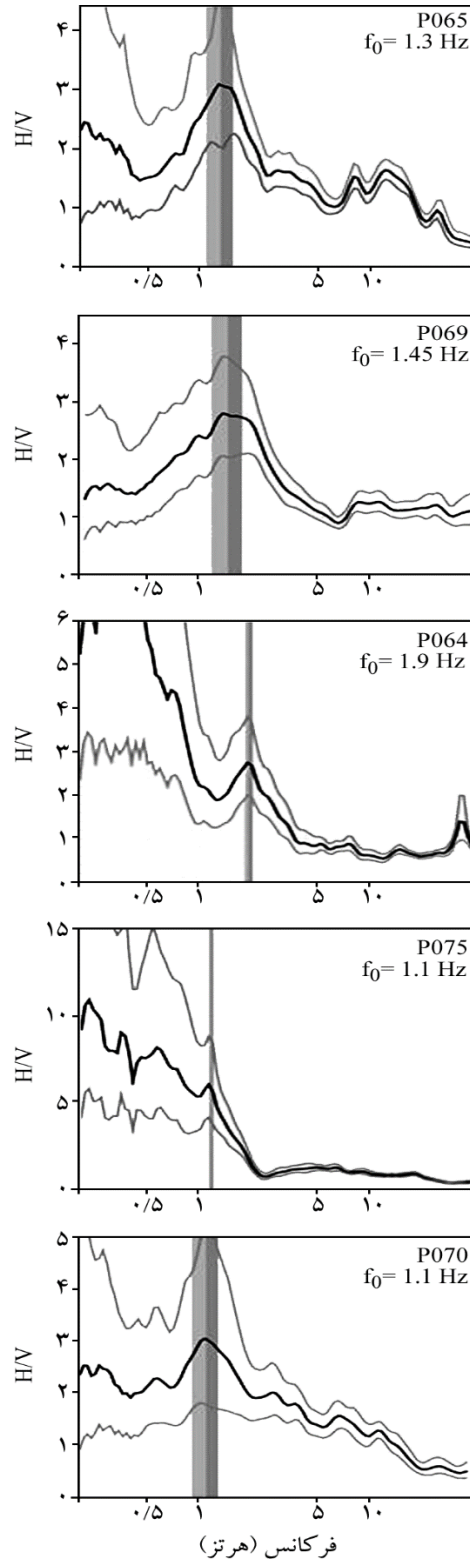
۱. دامنه قله ( $Ahv$ ) نمودار  $H/V$  باید بزرگ‌تر از ۲ باشد؛

مشاهدات تجربی حاصل از رکوردهای زلزله قوی و ضعیف و نیز مدل‌سازی عددی نشان داده است.

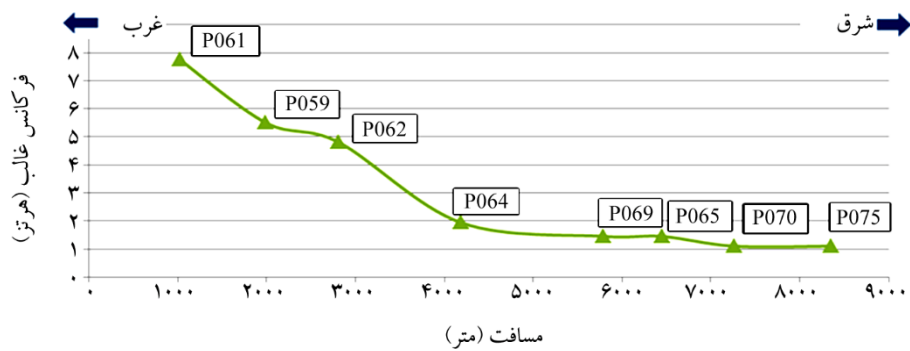


شکل (۳): منحنی‌های  $H/V$  برای سه ایستگاه واقع در نیمه غربی مقطع شرقی- غربی ارومیه.

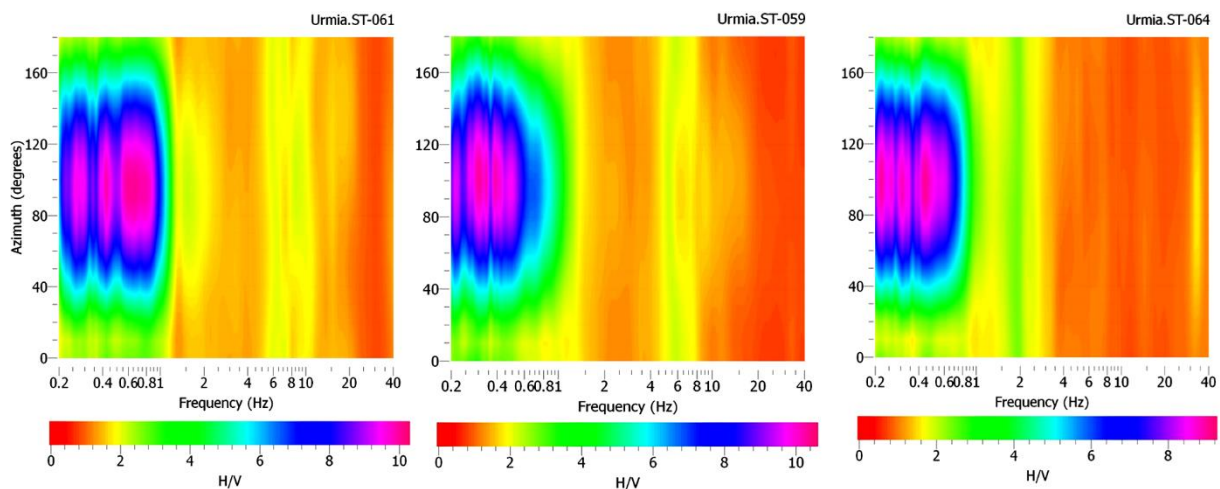
اگرچه در این سه نقطه نمودار طیفی  $H/V$  قله‌ای را نیز در فرکانس کمتر از یک هرتز نشان می‌دهد ولی چنین مقداری با روند تغییرات فرکانس در کل حوضه و نیز با اطلاعات زمین‌شناسی سطحی از منطقه سازگاری ندارد. شکل (۴) نحوه تغییرات مقادیر فرکانس غالب را در طول مقطع مورد مطالعه نشان می‌دهد. در ترسیم منحنی این شکل فرکانس‌های کمتر از یک در نظر گرفته نشده است و برای ایستگاه‌های P059، P061 و P062 از مقادیر میانگین دو فرکانس پیک مربوط به دو قله تلفیقی به عنوان فرکانس غالب منتخب برای آن ایستگاه‌ها استفاده شده است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود مقادیر فرکانس غالب از شرق به غرب روند افزایشی دارد که با روند کاهش ضخامت آبرفت از قسمت وسط حوضه به سمت حاشیه حوضه رسوبی همخوانی دارد.



شکل (۴): منحنی‌های  $H/V$  برای پنج ایستگاه واقع در نیمه شرقی مقطع شرقی- غربی ارومیه.



شکل (۴): روند تغییرات فرکانس‌های غالب هشت ایستگاه واقع بر روی پروفیل شرقی- غربی ارومیه.



شکل (۵): نسبت طیفی H/V در صفحات افقی با آزمون‌های مختلف از ۰ تا ۱۸۰ درجه با فواصل ۱۰ درجه‌ای برای سه ایستگاه P061 و P059، P064.

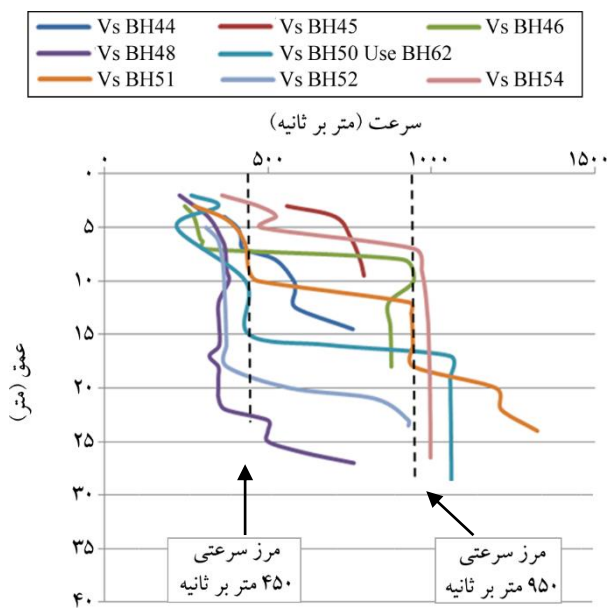
به صورت افزایش دامنه بزرگنمایی در فرکانس‌های زیر یک هرترز نمایان می‌شود. همچنین موجیاری و همکاران [۲۳] در مطالعه‌ای دیگر نشان دادند که نقش باد در تأثیر مستقیم آن بر روی دستگاه‌های لرزه‌نگار به خاطر ایجاد جریان‌های گردابی در اطراف دستگاه است.

در جدول (۱) سرعت و جهت باد در روزی که اندازه‌گیری میکروترمور در ایستگاه P061 انجام شده به‌عنوان نمونه آورده شده است. اطلاعات جدول (۱) بیانگر آن است که در آن روز وزش باد در جهت غربی غالب بوده است. همان جهتی که طیف مؤلفه افقی سرعت امواج میکروترمور نسبت به جهات دیگر دارای دامنه بزرگ‌تری می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه نقاط حاشیه حوضه از مرتفع‌ترین مناطق شهر بوده و حدوداً ۲۰۰ متر بالاتر از مناطق دشتی شهر است سرعت باد در این مناطق بیشتر است.

از طرفی قله‌های مربوط به فرکانس‌های کمتر از ۱ هرترز می‌تواند ناشی از وجود تباین سرعتی دیگر در عمق‌های بسیار زیاد یا خطای ناپایداری دستگاه‌های لرزه‌نگار در این فرکانس باشد. رفتار این قله‌های فرکانس پایین با مشاهده روند تغییرات دامنه آنها بر حسب آزمون دقیق‌تر مورد بررسی قرار گرفت. بر این اساس برای سه ایستگاه اول واقع شده در حاشیه حوضه رسوبی نسبت طیفی H/V در صفحات افقی با آزمون‌های مختلف از ۰ تا ۱۸۰ درجه با فواصل ۱۰ درجه‌ای محاسبه شد (شکل ۵). پردازش آزمون‌های داده‌ها نشان می‌دهد که مقادیر نسبت طیفی در فرکانس‌های پایین بشدت وابسته به آزمون است و در راستای شرقی- غربی مقادیر بزرگ‌تری نسبت به راستاهای دیگر نشان می‌دهند. خطای ایجاد شده می‌تواند ناشی از تأثیرپذیری دستگاه از بادهای فصلی باشد همان‌گونه که موجیاری [۲۲] نشان داده است تأثیر باد بر روی منحنی H/V

جدول (۱): مقادیر سرعت و جهت باد در شهر ارومیه در روز اندازه‌گیری ایستگاه P061 بر اساس داده‌های تارنمای سازمان هواشناسی کشور [۲۴].

ساعت اندازه‌گیری	سرعت باد (کیلومتر در ساعت)	جهت باد
۰	۱۰/۸	غربی
۳	۱۰/۸	غربی
۶	۷/۲	غربی
۹	۷/۲	جنوبی
۱۲	۷/۲	شرقی
۱۵	۰	-
۱۸	۱۰/۸	غربی
۲۱	۱۰/۸	غربی



شکل (۶): منحنی تغییرات سرعت موج برشی نسبت به عمق برای ۸ گمانه ژئوتکنیکی.

با سرعت متوسط ۴۵۰ متر بر ثانیه که عمدتاً از مصالح رسی-سیلتی با پلاستیسیته پایین تشکیل یافته و در طول مقطع دارای ضخامتی در محدوده ۷ الی ۲۷ متر می‌باشد. در زیر این لایه، لایه دیگری با سرعت ۹۵۰ متر بر ثانیه وجود دارد که عمدتاً از جنس مصالح سنگ مارن هوازده و مارن است که تا سنگ بستر زمین‌شناسی ادامه یافته است.

**۴-۲- تعیین مشخصات ژئوتکنیکی لایه‌های زیر سطحی عمیق**  
با توجه به محدود بودن عمق گمانه‌های مربوط به آزمایش لرزه‌ای درون‌چاهی، بمنظور تعیین مشخصات لایه‌های عمیق‌تر تا عمقی که در مطالعات مقاومت الکتریکی به‌عنوان بستر سنگی تعیین شده است و تعیین مشخصات ژئوتکنیکی آنها از اطلاعات زیر استفاده شده است.

**۴-۲-۱- استفاده از نتایج برداشت‌های مقاومت الکتریکی**  
نتایج تعیین بستر سنگی حاصل از برداشت‌های مقاومت الکتریکی انجام شده در مطالعات قلندرزاده و همکاران [۱۶-۱۷] در شکل (۷) نشان داده شده است. بر اساس این نقشه، عمق سنگ بستر در غرب مقطع کمتر از ۱۰ متر بوده که با پیشروی به سمت شرق به تدریج افزایش می‌یابد و در بخش شرقی به بیش از

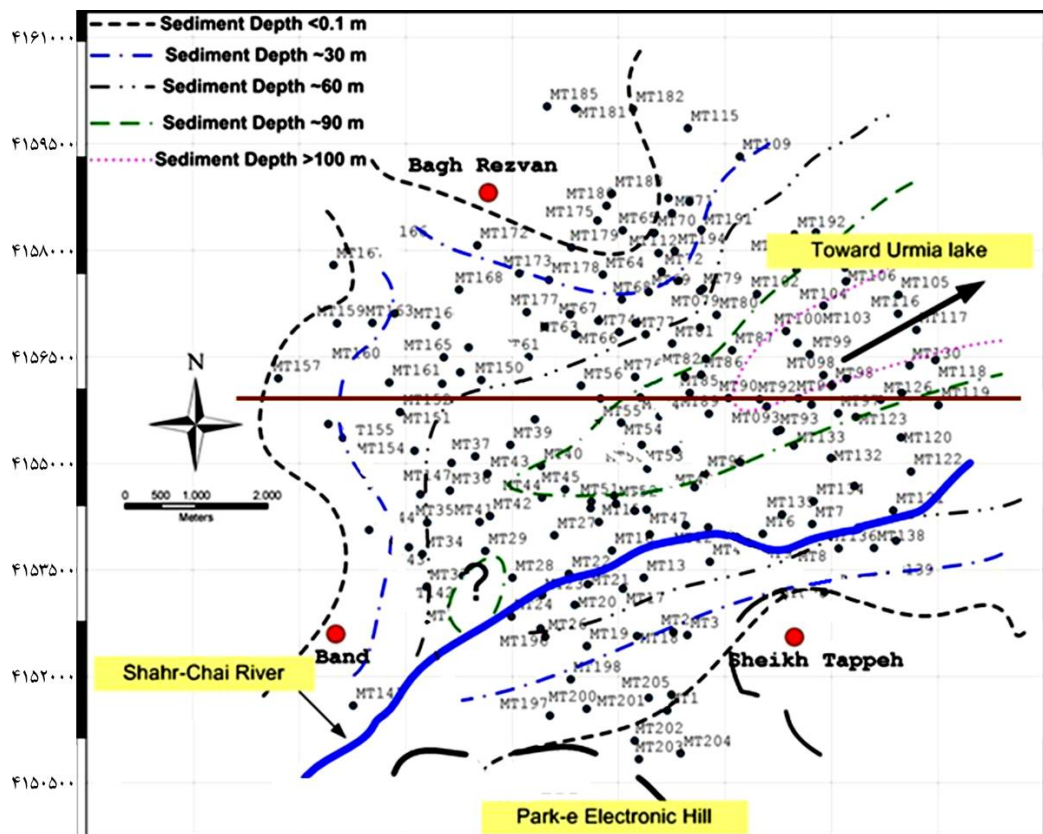
البته وجود این قله‌های زیر ۱ متر می‌تواند ناشی از وجود تباین سرعتی قوی در اعماق زیاد در درون لایه‌های سنگ‌بستر زمین‌شناسی منطقه نیز باشد که به خاطر متأثر شدن از اثر باد وضوح خود را از دست داده‌اند. با توجه به اینکه هدف از پژوهش حاضر بررسی بخش آبرفتی منطقه بوده است در این مقاله این فرکانس‌ها مورد بررسی قرار نگرفته‌اند.

#### ۴- تهیه مدل ژئوتکنیکی مقطع مورد مطالعه

به‌منظور تهیه یک مدل ژئوتکنیکی مناسب برای استفاده در تحلیل‌های عددی از سه دسته داده شامل داده‌های ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی حاصل از گمانه‌های حفاری شده در طول مسیر، برداشت‌های مقاومت الکتریکی و وارون‌سازی<sup>۹</sup> امواج میکروترمور استفاده شد.

#### ۴-۱- تعیین مشخصات ژئوتکنیکی لایه‌های زیر سطحی کم‌عمق

در تعیین لایه‌بندی مدل برای اعماق سطحی از داده‌های گمانه‌های حفاری شده در طول مسیر و آزمایش‌های لرزه‌ای درون‌چاهی انجام شده در این گمانه‌ها استفاده شد. با توجه به تغییرات سرعت‌های موج برشی مربوط به هشت گمانه ژئوتکنیکی موجود در مسیر مقطع، دو لایه با سرعت‌های متوسط ۴۵۰ و ۹۵۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد (شکل ۶). لایه فوقانی



شکل (۷): خطوط هم‌تراز بستر سنگی بر اساس آزمایش‌های ژئوفیزیک انکساری و آزمایش مقاومت الکتریکی و موقعیت مقطع شرقی- غربی (خط پهلوهای رنگ) [۱۶-۱۷].

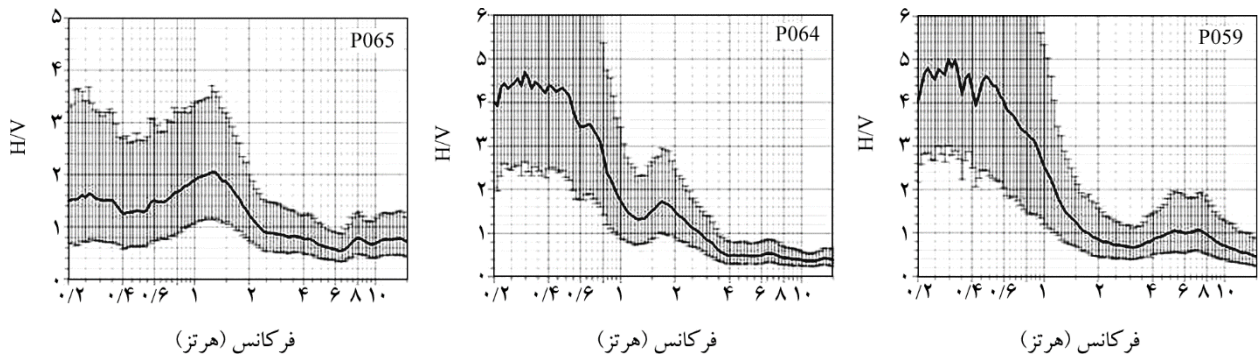
امواج درونی و لاو از طریق محاسبه نسبت طیفی مؤلفه افقی به قائم به روش زمان-فرکانس (HVTFA)، می‌توان منحنی بیضی‌واری امواج ریلی را به دست آورد که منطبق بر مقادیری از منحنی HVTFA است که بین فرکانس اصلی تشدید و اولین حداقل بعد از آن قرار دارد [۲۵]. نتایج محاسبه نسبت طیفی مؤلفه افقی به قائم به روش زمان-فرکانس برای سه نقطه اندازه‌گیری میکروترموور P065، P064، P059 در شکل (۸) نشان داده شده است. انتخاب این ایستگاه‌ها بر این اساس بود که منحنی‌های  $H/V$  تا حد امکان دارای قله واضح باشند تا بتوان از فرض انتشار یک‌بعدی امواج در آن موقعیت‌ها اطمینان حاصل نمود. پس از انتخاب این سه ایستگاه، بهترین منحنی‌های بیضی‌واری امواج ریلی از طریق تحلیل طیفی زمان-فرکانس برای آنها تعیین شده سپس فرکانس قله به همراه دیواره سمت راست قله‌های منتخب منحنی‌های  $H/V$  این سه ایستگاه جهت استفاده در تحلیل وارون‌سازی سرعت موج برشی، استخراج شدند.

۱۰۰ متر نیز می‌رسد. برای تعیین سرعت لایه سنگ بستر و نیز تدقیق سرعت ۹۵۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده برای لایه دوم و همچنین موقعیت مرز لایه دوم با سنگ بستر از وارون‌سازی امواج ریلی استفاده گردید که در ادامه روش کار توضیح داده می‌شود.

#### ۲-۲-۴- استفاده از وارون‌سازی امواج ریلی

با توجه به وابستگی بیضی‌واری امواج ریلی به پروفیل سرعت موج برشی لایه‌های زیرسطحی، در صورت داشتن بیضی‌واری می‌توان با وارون‌سازی، پروفیل سرعت موج برشی محیط را تخمین زد. برای استخراج منحنی بیضی‌واری امواج ریلی در منطقه مورد بررسی از داده‌های میکروترموور برداشت شده و تحلیل نسبت طیفی مؤلفه افقی به قائم استفاده شده است. اساس این روش بر این فرض استوار است که در ساختارهای زمین‌شناسی یک‌بعدی قله نسبت طیفی مؤلفه‌های افقی به قائم متأثر از بیضی‌واری امواج ریلی است. با حذف یا کاهش اثرات



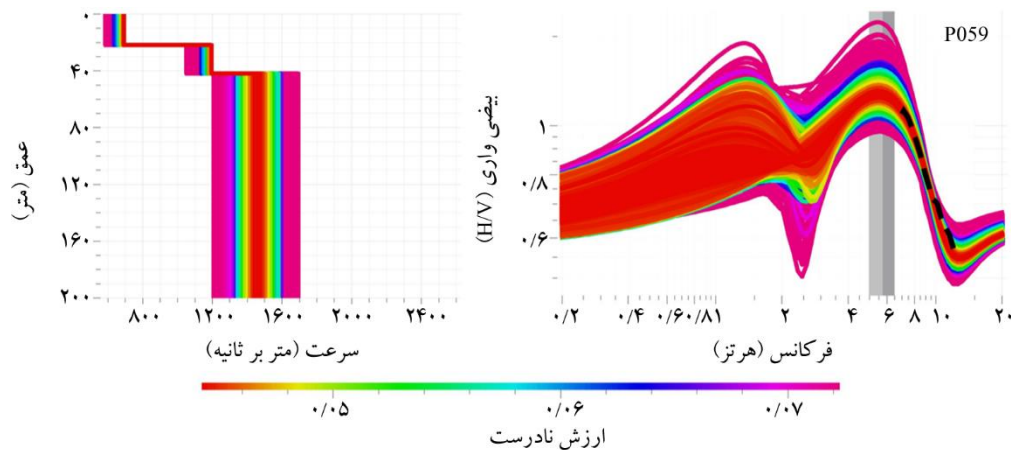


شکل (۸): نسبت طیفی مؤلفه افقی به قائم به روش زمان - فرکانس برای سه نقطه P065، P064 و P059.

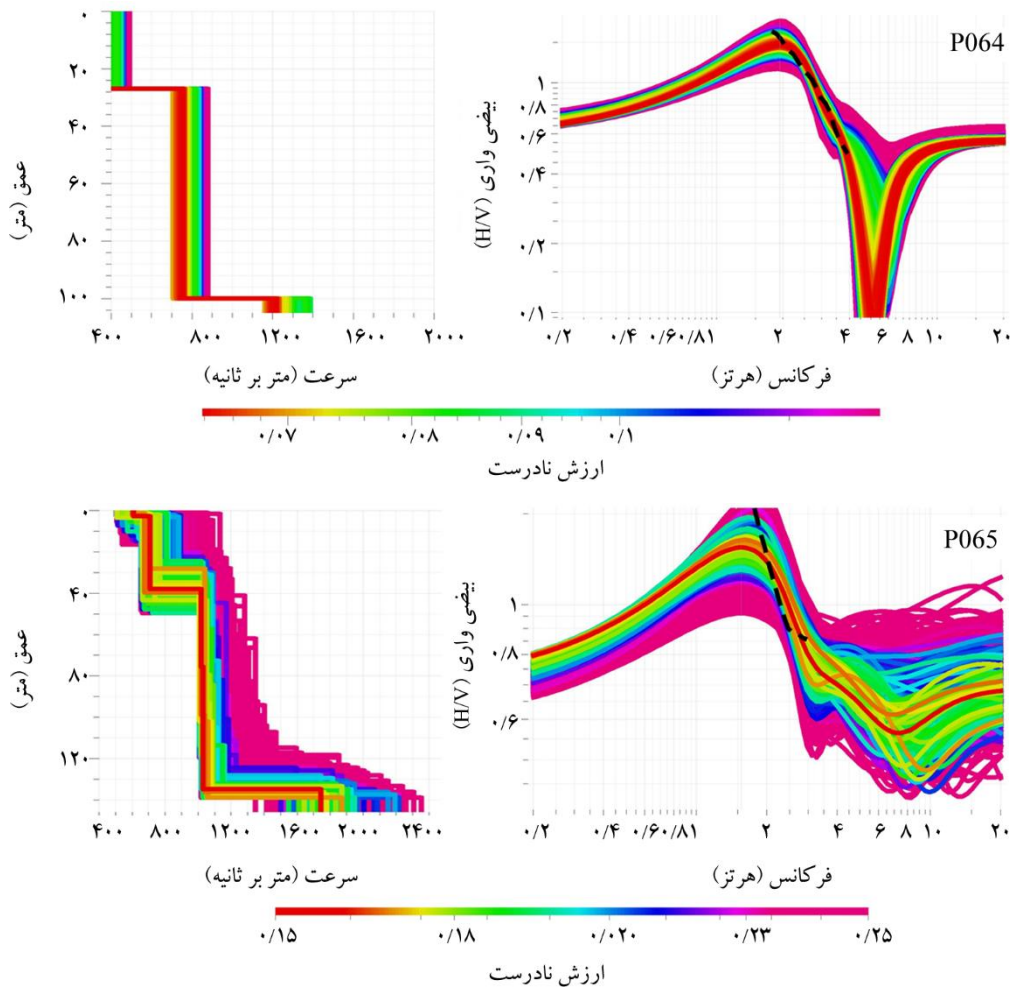
برشی محدود به ۱۵۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شد [۲۶]. در فرایند وارون‌سازی مقدار ناهمگون<sup>۱۱</sup> منحنی‌های مشاهداتی (دیواره سمت راست قله منتخب منحنی بیضی‌واری و قله منحنی نسبت طیفی) و محاسباتی توسط الگوریتم همسایگی به روش حداقل مربعات محاسبه می‌شود [۲۷]. بدین ترتیب نتایج تحلیل وارون‌سازی برای سه نقطه مذکور مطابق شکل (۹) به دست می‌آیند. در این شکل برای هر ایستگاه منحنی‌های بیضی‌واری امواج ریلی محاسباتی و پروفیل‌های سرعت موج برشی ارائه شده است.

نتیجه حاصل از تلفیق این اطلاعات به صورت مدل دو بعدی برای مقطع مورد بررسی در شکل (۱۰) نشان داده شده است که یک مدل دو لایه بر روی نیم فضا با مشخصات ارائه شده در جدول (۲) می‌باشد.

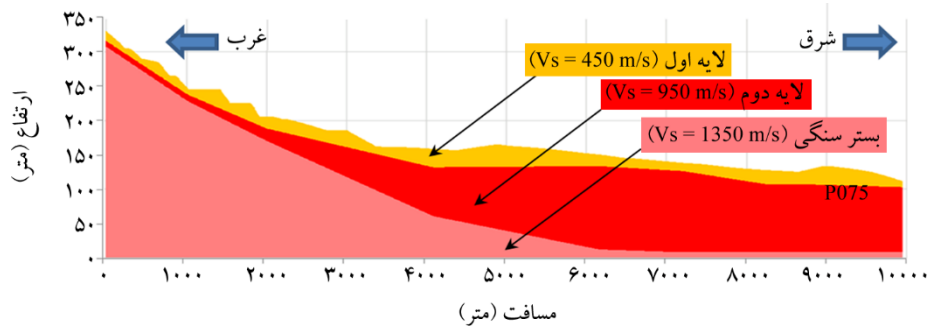
برای وارون‌سازی از ماژول DINVER در مجموعه نرم‌افزاری ژئوپسی استفاده شده است. این نرم‌افزار با استفاده از الگوریتم همسایگی<sup>۱۰</sup> و گرفتن یک مدل اولیه فرضی به عنوان ورودی، حالت‌های بیشماری از مدل سرعتی زمین منطبق بر قیدهای داده شده را محاسبه می‌کند [۸]. روش الگوریتم همسایگی یک روش جستجوی مستقیم تصادفی برای یافتن مدل‌های دارای انطباق قابل قبول بر داده‌های مشاهده‌ای در فضای پارامتری می‌باشد. این روش با تولید نمونه‌های تصادفی و محاسبه منحنی‌های بیضی‌واری برای این مدل‌ها مسئله را حل می‌کند. برای ارائه مدل اولیه به نرم‌افزار در نقاط مورد بررسی از نتایج برداشت‌های لرزه‌ای درون‌چاهی برای عمق‌های کم و استنتاج زمین‌شناسی برای عمق‌های بیشتر استفاده شد و لایه سنگ مارل در عمق‌های بیشتر به عنوان سنگ بستر لرزه‌ای با سرعت موج



شکل (۹): از راست به چپ: منحنی بیضی‌واری امواج ریلی محاسباتی به همراه دیواره سمت راست قله منتخب (خط چین سیاه‌رنگ) حاصل از پردازش HVTFA، پروفیل سرعت موج برشی بر اساس وارون‌سازی برای سه ایستگاه P065، P064 و P059.



ادامه شکل (۹).



شکل (۱۰): مدل دو بعدی مقطع شرقی - غربی شهر ارومیه.

جدول (۲): مشخصات لایه‌بندی مدل ژئوتکنیکی مقطع مورد مطالعه.

بستر سنگی (نیم فضا)	لایه دوم	لایه اول	
۱۳۵۰	۹۵۰	۴۵۰	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)
۲۰۰۰	۱۸۰۰	۱۸۰۰	دانسیته (کیلوگرم بر مترمکعب)
$3/64 \times 10^9$	$1/62 \times 10^9$	$3/6 \times 10^8$	مدول برشی (کیلوگرم بر مترمربع)
$4 \times 10^{11}$	$1/6 \times 10^{11}$	$7 \times 10^9$	مدول بالک (کیلوگرم بر مترمربع)

## ۵- مدل سازی عددی در نرم افزار FLAC<sup>2D</sup>

### ۵-۱- هندسه مدل تحلیلی و مدل رفتاری

جهت مقایسه بهتر و لحاظ شرایط یکسان، برای هر دو تحلیل عددی یک و دو بعدی از نرم افزار تفاضل محدود FLAC<sup>2D</sup> [۲۸] استفاده شد. به منظور مدل سازی دو بعدی مقطع شرقی- غربی ارومیه از مشخصات هندسی و مکانیکی مدل ژئوتکنیکی به دست آمده در قسمت قبل استفاده شد. بر این اساس لایه بندی و هندسه مدل عددی منطبق بر مدل شکل (۱۰) ساخته شد. سپس با توجه به مشخصات مکانیکی ارائه شده در جدول (۱) و فرض رفتار ویسکوالاستیک به هر یک از لایه های مدل، پارامترهای مربوطه به برنامه معرفی گردید. در این مدل سازی مدل میرایی رایلی معادل با نسبت میرایی ۰/۰۵ به تمامی لایه های مدل اختصاص یافت. با توجه به اینکه ناحیه مورد مطالعه در طول ۱۰ کیلومتر گسترده دارد، اندازه المان ها در مدل دو بعدی در نرم افزار به گونه ای انتخاب شد که شرایط عبور طول موج های مورد نظر از یک المان تأمین گردد. بر اساس رابطه  $\Delta l \leq \lambda / 10$  ارائه شده توسط کولمیر و لیسمر [۲۹] اندازه المان ( $\Delta l$ ) می بایست ۱۰ درصد کوچک ترین طول موج ( $\lambda$ ) مورد انتظار در محیط تحلیل باشد. بر این اساس و به جهت رسیدن به دقت قابل قبول و مدت زمان بهینه تحلیل، المان هایی به طول تقریبی ۱۰ متر و عرض ۵ متر برای لایه فوقانی و عرض حداکثر ۲۰ متر برای المان های لایه تحتانی به کار گرفته شدند؛ به این ترتیب برای مدل مورد نظر در جهت افقی ۱۲۰۰ المان و در جهت قائم ۱۲ المان استفاده شده است. در مدل سازی یک بعدی یک ستون خاک در نظر گرفته شد و برای هشت موقعیت ایستگاه برداشت میکروترموور با در نظر گرفتن لایه های افقی خاک و لحاظ شرایط منطبق بر نقاط ذکر شده در مدل دو بعدی مدل سازی های یک بعدی انجام گرفت.

### ۵-۲- شرایط مرزی

یکی از مسائل در تحلیل های دینامیکی جلوگیری از انعکاس امواج به داخل محیط در مرزها است. یکی از راه حل های برطرف نمودن این مشکل دور کردن مرزهای مدل می باشد که مستلزم در

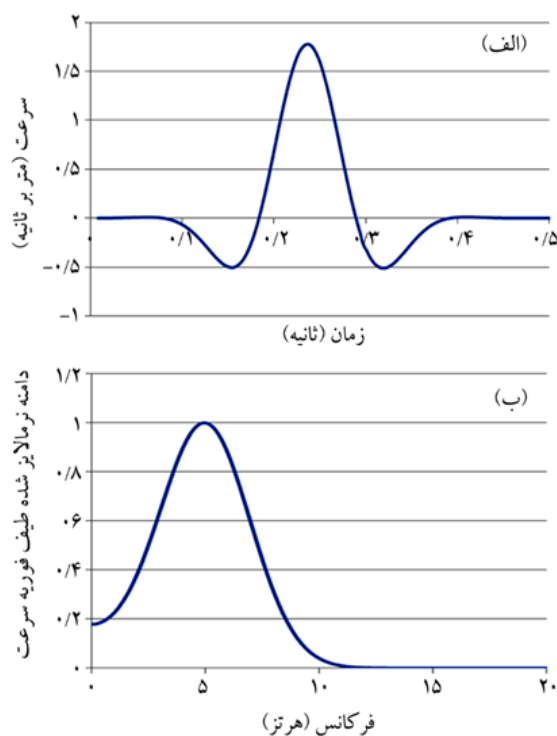
نظر گرفتن ناحیه بزرگ تر و در نتیجه صرف زمان طولانی تر در انجام تحلیل است. راه حل جایگزین استفاده از مرزهای ویسکوز [۳۰] است که در نرم افزار FLAC<sup>2D</sup> این مرزها تحت عنوان مرزهای آرام<sup>۱۱</sup> به کار می روند که برای مرز تحتانی مدل عددی ساخته شده مورد استفاده قرار گرفته است. در مدل ایجاد شده برای مرزهای جانبی نیز از مرزهای میدان آزاد<sup>۱۳</sup> استفاده شده است.

### ۵-۳- موج محرک ورودی

تحریک لرزه ای استفاده شده در این مطالعه، از نوع تنش برشی درون صفحه است که بر اساس رابطه (۱) به قسمت تحتانی مدل اعمال می گردد و به صورت قائم انتشار می یابد.

$$\tau_{xy} = 2 \times \rho \times c_s \times wave \quad (1)$$

تنش برشی ( $\tau_{xy}$ ) در این رابطه به صورت تابعی از متغیرهای سرعت نسبت به زمان ( $wave$ ) به صورت موج Gabor در راستای افقی مطابق شکل (۱۱)، سرعت موج برشی محیط ( $c_s$ ) و دانسیته ( $\rho$ ) در گام های زمانی تحلیل محاسبه و به برنامه معرفی می شود.

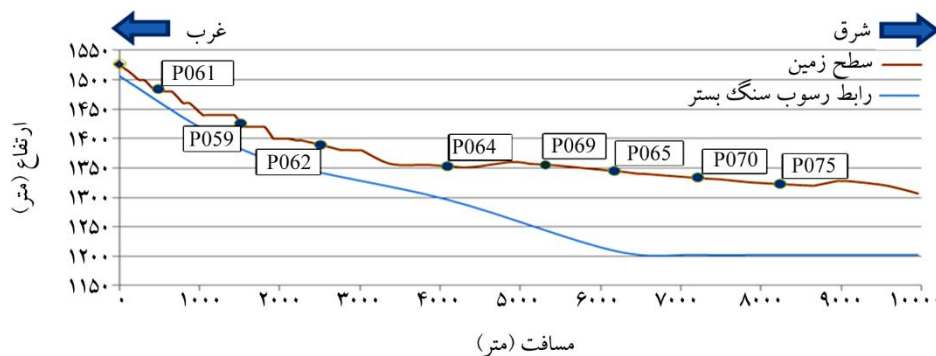


شکل (۱۱): (الف) منحنی تغییرات سرعت موج محرک Gabor نسبت به زمان و (ب) طیف فوریبه نرمالایز شده موج Gabor نسبت به فرکانس.

تداخلی سرعت‌های موج برشی منتشر شده دو محیط مختلف در طرفین نقطه مورد نظر باشد که بیانگر اثرات دو بعدی در این ساختگاه‌ها است. همچنین مقایسه نتایج تحلیل‌های یک‌بعدی و دو بعدی برای نقاط نزدیک به حاشیه حوضه رسوبی (نقاط انتهایی غربی مدل) حاکی از جابه‌جایی فرکانس‌های غالب به دست آمده از تحلیل دو بعدی به سمت فرکانس‌های بالاتر می‌باشد به طوری که در توابع بزرگنمایی دو قله‌ای، فرکانس دومین قله به صورت مشخص از فرکانس غالب تحلیل یک‌بعدی بزرگ‌تر است که این نیز خود نشان‌دهنده‌ی حاکم بودن شرایط دو بعدی در این بخش است. برای نقاط بعدی شامل P064، P069، P065، P070 و P075 که از حاشیه حوضه فاصله دارند و در واقع در نیمه شرقی مقطع مورد مطالعه قرار دارند فرکانس قله‌های به دست آمده از دو روش تحلیلی تقریباً یکسان است و تنها در مقدار بزرگنمایی تفاوت اندکی بین دو روش دیده می‌شود.

## ۷- مقایسه نتایج پردازش داده‌های میکروترمور با نتایج تحلیل عددی دو بعدی

جهت ارزیابی و مقایسه نتایج تحلیل‌های  $H/V$  امواج میکروترمور با نتایج تحلیل عددی دو بعدی، مقادیر فرکانس غالب به دست آمده از این دو روش در هشت ایستگاه برداشت میکروترمور مطابق شکل (۱۴) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این شکل برای نشان دادن مقدار فرکانس غالب در سه نقطه P061، P059 و P062 از مقدار میانگین دو قله تلفیقی به عنوان فرکانس غالب منتخب استفاده شده است.



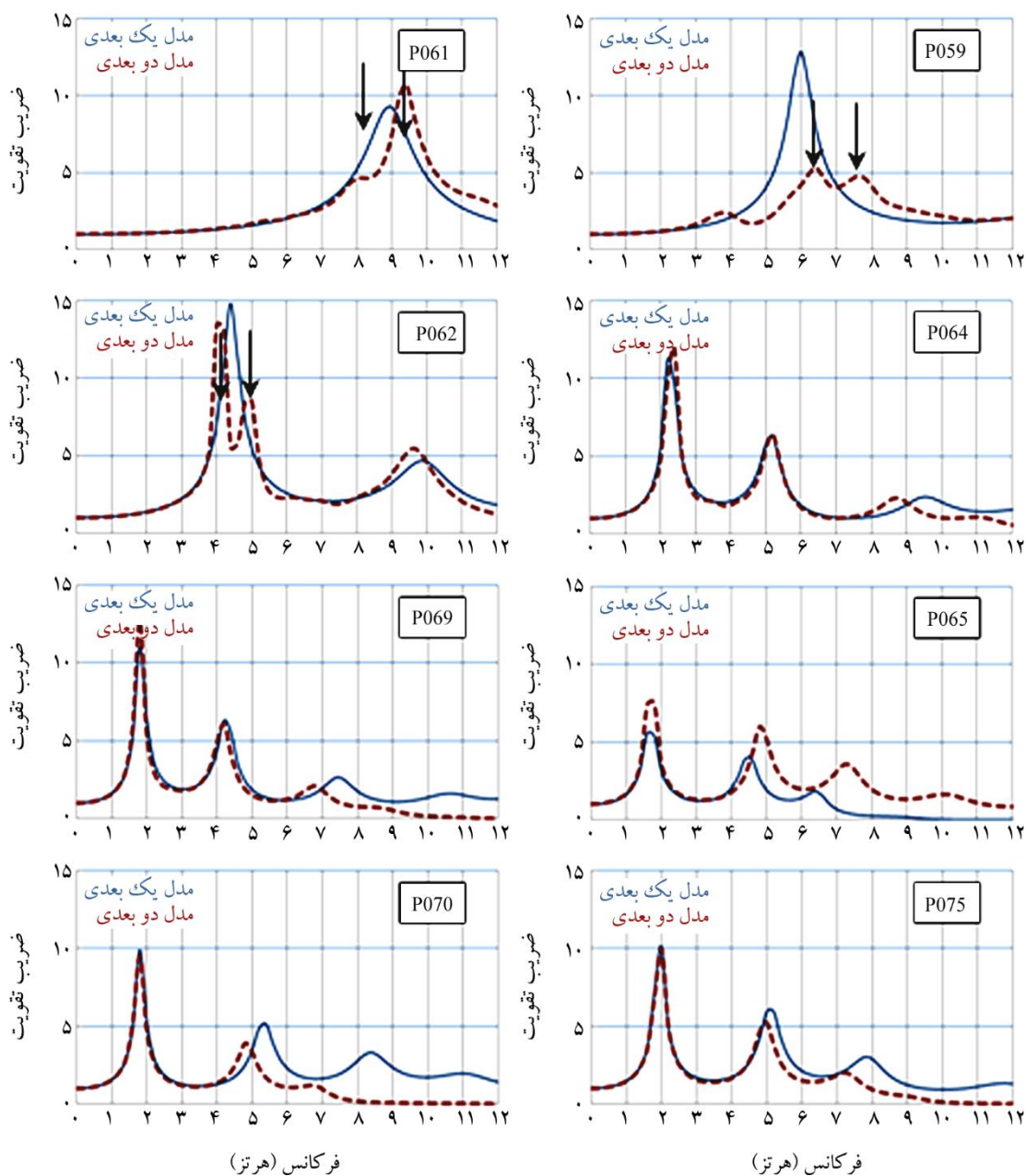
شکل (۱۲): موقعیت نقاط در نظر گرفته شده برای تعیین توابع تبدیل از طریق تحلیل‌های عددی.

مدت زمان اعمال تحریک لرزه‌ای ۵ ثانیه است که تغییرات دامنه سرعت موج Gabor نسبت به زمان و طیف فوریه نرمالایز شده متناظر با آن در این شکل نشان داده شده است. این پالس سرعت، باند فرکانسی ۰/۱ تا ۱۵ هرتز را که مناسب برای تحلیل‌های دینامیکی ساختگاه، است پوشش می‌دهد

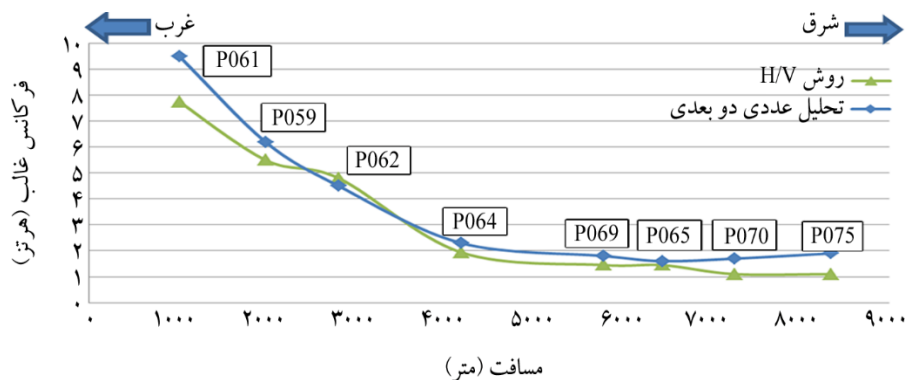
## ۶- نتایج تحلیل یک و دو بعدی

پس از انجام مدل‌سازی عددی مناسب از منطقه به ترتیبی که در بالا اشاره شد پاسخ لرزه‌ای زمین در طول مقطع مورد مطالعه با استفاده از تحلیل‌های یک‌بعدی و دو بعدی محاسبه گردید و پاسخ ساختگاه حاصل از آنها در نقاط منطبق بر نقاط اندازه‌گیری‌های میکروترمور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است محاسبه شد. برای محاسبه توابع بزرگنمایی در موقعیت‌های ذکر شده از تقسیم طیف سرعت سطح زمین بر طیف سرعت در سنگ بستر لرزه‌ای که در اینجا منطبق بر سنگ بستر زمین‌شناسی (مرز لایه‌های دوم و سوم) می‌باشد، استفاده شد.

در شکل (۱۳) نتایج تحلیل‌های یک و دو بعدی نشان داده شده است. با بررسی این شکل دیده می‌شود که در نقاط P061، P059 و P062 توابع بزرگنمایی مربوط به تحلیل دو بعدی دارای دو قله نزدیک به هم هستند که با دو قله مشاهده شده در نسبت‌های طیفی حاصل از داده‌های میکروترمور از نظر موقعیت فرکانسی همخوانی زیادی با یکدیگر دارند. ظهور این دو قله در توابع بزرگنمایی همان‌گونه که در مطالعه قائم‌مقامیان [۲۱] ذکر شده است می‌تواند ناشی از تغییرات شدید ضخامت آبرفت و اثر



شکل (۱۳): توابع انتقال حاصل از تحلیل‌های عددی یک بعدی و دو بعدی برای هشت موقعیت پروفیل انتخابی.



شکل (۱۴): مقایسه فرکانس‌های غالب حاصل از تحلیل‌های H/V امواج میکروترموگراف با نتایج تحلیل عددی دو بعدی در مسیر مقطع مورد مطالعه.

دیگر مطالعه حاضر در رابطه با حوضه رسوبی شهر ارومیه که از مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی یک و دو بعدی به دست آورده شد، حاکم بودن شرایط یک‌بعدی در قسمت مرکزی این حوضه رسوبی در مقایسه با شرایط دو بعدی در حاشیه حوضه است. این نتیجه‌گیری از منطبق بودن فرکانس‌های غالب به دست آمده از دو روش تحلیل یک‌بعدی با دو بعدی در مرکز حوضه و اختلاف آنها در حاشیه حوضه منتج می‌گردد.

### مراجع

1. Nakamura, Y. (1989) A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 30(1).
2. Bard, P.-Y. (1998) Microtremor measurements: a tool for site effect estimation. In: *Proceeding of the Second International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, AA Balkema Rotterdam, 1251-1279.
3. Haghshenas, E., Bard, P.-Y., Theodulidis, N., and Team, S.W. (2008) Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(1), 75-108.
4. Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, C., Bard, P.Y., Cotton, F., Moczo, P., Kristek, J., and Fah, D. (2006) H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations. *Geophysical Journal International*, 167(2), 827-837, doi:10.1111/j.1365-246X.2006.03154.x.
5. Parolai, S., Richwalski, S., Milkereit, C., and Fäh, D. (2006) S-wave velocity profiles for earthquake engineering purposes for the Cologne area (Germany). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(1), 65-94.
6. Rosa-Cintas, S., Clavero, D., Delgado, J., López-Casado, C., Galiana-Merino, J.J., and Garrido, J. (2017) Characterization of the shear wave velocity in the metropolitan area of Málaga (S Spain) using the H/V technique. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92, 433-442. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.10.016.
7. Satoh, T., Kawase, H., Iwata, T., Higashi, S., Sato,

مقایسه به عمل آمده در شکل نشان می‌دهد فرکانس‌های حاصل از تحلیل‌های H/V در مقایسه با نتایج تحلیل‌های عددی با اینکه در حالت کلی تطابق خوبی دارند ولی تفاوت اندکی بین دو روش وجود دارد. مقادیر فرکانس به دست آمده از تحلیل عددی مقدار کمی نسبت به فرکانس‌های به دست آمده از میکروترومور بیشتر است که با توجه به عدم قطعیت‌های موجود قابل اغماض می‌باشد. بخشی از این اختلاف که در ناحیه وسط حوضه دیده می‌شود ناشی از کم برآورد شدن عمق سنگ بستر زمین‌شناسی در مطالعات مقاومت الکتریکی می‌باشد که مبنای مطالعات عددی بوده است.

### ۸- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله با هدف ارزیابی روش تجربی پردازش میکروترومور در تعیین اثر ساختگاه در حاشیه حوضه‌های رسوبی، نتایج حاصل از روش H/V با نتایج به دست آمده از روش مدل‌سازی عددی تفاضل محدود یک‌بعدی و دو بعدی برای یک مقطع شرقی- غربی از حوضه رسوبی شهر ارومیه مورد مقایسه قرار گرفت. این مطالعه نشان داد که برای نقاط واقع در حاشیه حوضه‌های رسوبی که ضخامت آبرفت به‌طور محلی تغییر می‌کند، منحنی‌های نسبت طیفی H/V به جای یک قله مشخص و واضح، قله‌های دو گانه نزدیک به هم نشان می‌دهند. این نتیجه از طریق مدل‌سازی عددی انجام شده به کمک نرم‌افزار Flac نیز حاصل شد. علت این امر با فرضیه اثر تداخلی موج‌های برشی منشأ گرفته از دو محیط مختلف مجاور هم در حاشیه حوضه‌های رسوبی و در مناطق حوضه‌ای کوچک مقیاس که فرکانس غالب ساختگاه در آنها بالای یک هرتز است قابل توضیح است. این اثر که در مطالعات پیشین بر اساس داده‌های زمین‌لرزه‌های واقعی و نیز انجام مدل‌سازی‌های عددی و فیزیکی [۳۱، ۲۱] تشریح شده است نشان‌دهنده‌ی تأثیر شرایط دو بعدی است و می‌تواند نتیجه گرفت که در مناطق حاشیه حوضه‌های رسوبی که می‌تواند محل تغییر ضخامت آبرفت باشد لازم است از تحلیل‌های عددی دو بعدی برای بررسی صحیح اثر ساختگاه استفاده گردد. نتیجه

- and Parsons, B. (2013) The 2011 mw 7.1 Van (eastern Turkey) earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **118**(4), 1619-1637.
16. Ghalandarzadeh, A. (2001) *Seismic Microzonation of Urmia City- Fase I. Research Project*. Management and Planning Organization of West Azarbaijan Province.
17. Ghalandarzadeh, A. (2002) *Seismic Microzonation of Urmia City- Fase II*. Research project. Management and Planning Organization of West Azarbaijan Province.
18. Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, T., ISSMGE. (1999) *Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards (Revised Version)*. Japanese Geotechnical Society.
19. Eng., S.K.C. (2013) *Report Of Urmia City Seismic Microzonation*.
20. Bard, P. (2005) SESAME-Team (2005). Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations-measurements, processing and interpretations. *SESAME European Research Project*.
21. Ghayamghamian, M.R. (2008) Evidence for shear-wave coupling due to small-scale lateral irregularities, and the influence on site-response estimation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **98**(3), 1429-1446.
22. Mucciarelli, M. (1998) Reliability and applicability of Nakamura's technique using microtremors: an experimental approach. *Journal of Earthquake Engineering*, **2**(04), 625-638.
23. Mucciarelli, M., Gallipoli, M.R., Di Giacomo, D., Di Nota, F., Nino, E. (2005) The influence of wind on measurements of seismic noise. *Geophysical Journal International*, **161**(2), 303-308.
24. <https://irimo.ir/far/wd>.
25. Fah, D., Kind, F., Giardini, D. (2003) Inversion of local S-wave velocity structures from average H/V ratios, and their use for the estimation of site-effects. *Journal of Seismology*, **7**(4), 449-467, doi:10.1023/b:jose.0000005712.86058.42.
26. Martin, G.R. and Dobry, R. (1994) Earthquake site response and seismic code provisions. *NCEER*
- T., Irikura, K., and Huang, H.-C. (2001) S-wave velocity structure of the Taichung basin, Taiwan, estimated from array and single-station records of microtremors. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **91**(5), 1267-1282.
8. Wathelet, M., Jongmans, D., and Ohrnberger, M. (2004) Surface-wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements. *Near Surface Geophysics*, **2**(4), 211-221.
9. Bonnefoy-Claudet, S., Baize, S., Bonilla, L.F., Berge-Thierry, C., Pasten, C., Campos, J., Volant, P., and Verdugo, R. (2009) Site effect evaluation in the basin of Santiago de Chile using ambient noise measurements. *Geophysical Journal International*, **176**(3), 925-937, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.04020.x.
10. Guillier, B., Cornou, C., Kristek, J., Moczo, P., Bonnefoy-Claudet, S., Bard, P., and Fäh, D. (2006) Simulation of seismic ambient vibrations: does the H/V provide quantitative information in 2D-3D structures. *Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Grenoble, France.
11. Bard, P. (1998) A tool for site effect estimation. *Proceedings of the Second International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion*.
12. Field, E.H. (1996) Spectral amplification in a sediment-filled valley exhibiting clear basin-edge-induced waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **86**(4), 991-1005.
13. Uebayashi, H. (2003) Extrapolation of irregular subsurface structures using the horizontal-to-vertical spectral ratio of long-period microtremors. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**(2), 570-582.
14. Copley, A., Faridi, M., Ghorashi, M., Hollingsworth, J., Jackson, J., Nazari, H., Oveisi, B., and Talebian, M. (2014) The 2012 August 11 Ahar earthquakes: consequences for tectonics and earthquake hazard in the Turkish-Iranian Plateau. *Geophysical Journal International*, **196**(1), 15-21. doi:10.1093/gji/ggt379.
15. Elliott, J., Copley, A.C., Holley, R., Scharer, K.,

*Bulletin*, 8(4), 1-6.

27. Wathelet, M. (2008) An improved neighborhood algorithm: parameter conditions and dynamic scaling. *Geophysical Research Letters*, 35(9).
28. Inc, I.C.G. (1993) *FLAC: Fast Lagrangian Analysis of Continua*. 5.0 Edn.
29. Kuhlemeyer, R.L. and Lysmer, J. (1973) Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Div*, 99(Tech Rpt).
30. Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L. (1969) Finite dynamic model for infinite media. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 95(4), 859-878.
31. Ghayamghamian, M., Tobita, T., and Iai, S. (2008) Seismic behavior of small-scale basin using centrifuge testing. *In 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*.

#### واژه‌نامه

GEOPSY	۱- ژئوپسی
SESAME	۲- سزامی
Short Term Average (STA)	۳- متوسط دامنه‌های ارتعاشات در کوتاه‌مدت
Long Term Average (LTA)	۴- متوسط دامنه‌های ارتعاشات در بلندمدت
Cosine Taper	۵- نرم‌کننده کسینوسی
Smoothing	۶- هموار کردن
Contrast	۷- تباین (کانتراست)
Coupled Amplification Functions	۸- توابع بزرگنمایی تداخلی
Inversion	۹- وارون سازی
Neighborhood Algorithm	۱۰- الگوریتم همسایگی
Misfit Value	۱۱- مقدار ناهمگون
Quiet Boundaries	۱۲- مرزهای آرام
Free Field Boundaries	۱۳- مرزهای میدان آزاد



## Site Effect Evaluation in Basin Edge Using Microtremor Data and Numerical Modeling

Mahdi Koukhanifar<sup>1</sup>, Ebrahim Haghshenas<sup>2\*</sup>, Mohsen Kamalian<sup>3</sup>, and Hadi Bahadori<sup>4</sup>

1. Ph.D. Student, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2. Associate Professor, Geotechnical Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran, \*Corresponding Author, email: haghshen@iiees.ac.ir
3. Professor, Geotechnical Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran
4. Associate Professor, Urmia University, Urmia, Iran

Despite extensive studies on the microtremor processing technics and horizontal to vertical (H/V) spectral ratio analysis, limited studies have been tried to interpret the observations and experimental results and confirming them via two and three-dimensional numerical modeling. The present article deals with this issue by selecting the Urmia alluvial basin. Previous seismic microzonation studies in this city show a broad peak or two neighboring peaks, close to each other at some points near to the edge of sedimentary basin. By examining the transfer functions obtained from one-dimensional and two-dimensional numerical analysis performed on an east-west section of the Urmia sedimentary basin, it was found that this issue could be due to a sudden change in thickness of the soil profiles on either side of measuring point and coupling of shear waves passing through these two different environments. This study shows a very good agreement between the frequency position of the two neighboring peaks between the H/V curve and two-dimensional transfer function. In addition, this study shows that when two-dimensional site effect is predominant, the resonance frequencies are higher compared to one-dimensional conditions. This study also suggests that for recognition of the real peaks in H/V curves, the variation trend of dominant frequencies between the different measuring points in study area should be considered and each curve should not be evaluated individually.

**Keywords:** Microtremor; Two and Three-Dimensional Site Effects; Alluvial Basin Edge; Shear Waves Coupling.