ارزیابی اثر ساختگاه با استفاده از تفسیر داده‌های میکروترمور (مطالعهٔ موردی: شهر بابل)

صادق رضائی، عسکر جانعلی‌زاده*؛
دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکدهٔ مهندسی عمران

تاریخ: دریافت ٩٥/١٠/٠٧ پذیرش ٩٦/٠٤/١٨

چکیده

یکی از مهم‌ترین مباحث ژئوتکنیک لرزه‌ای، بررسی اثر ساختگاه بر مشخصات امواج زمین‌لرزه است. این پدیده در محل‌هایی که دارای خاک نرم و لایه‌ای هستند، باعث تغییر مشخصات امواج لرزه‌ای شده و منجر به تقویت ارتعاشات و افزایش خسارات مالی و جانی می‌شود. امروزه روش‌های متنوعی برای ارزیابی اثر ساختگاه وجود دارد که در میان آن‌ها اندازه‌گیری میکروترمورها به‌دلیل سادگی، هزینهٔ اندک و عملیات اجرایی آسان بیش از سایر روش‌های دیگر استفاده می‌شود. در این پژوهش به‌منظور تخمین فرکانس اساسی و ضریب تقویت ارتعاش در شهر بابل، اندازه‌گیری میکروترمور در ٦٠ ایستگاه انجام گرفت. نگاشت‌های میکروترمور به‌کمک روش ناکامورا (نسبت طیفی H/V) و با استفاده از نرم‌افزار Geopsy پردازش شد و نتایج با معیارهای SESAME صحت‌سنجی شدند. نتایج نشان می‌دهند که فرکانس اساسی بین ٠/٦٥ الی ١١/٤ هرتز تغییر کرده و بخش وسیعی از ناحیهٔ بررسی شده دارای فرکانس اساسی کم‌تر از ١ هرتز است، هم‌چنین مقدار بیشینه و کمینهٔ ضریب تقویت ارتعاش به‌ترتیب ٣/٧١ و ١/١٩ ارزیابی شده است. در ادامه برای بررسی توان‌مندی و دقت این روش، نتایج پردازش میکروترمور با داده‌های ژئوتکنیکی، تحلیل عددی و اطلاعات دستگاه شتاب‌نگار موجود در منطقه مقایسه شدند. این مقایسه نحوهٔ تغییرات فرکانس اساسی در ناحیهٔ بررسی شده را تأیید و اندازه‌گیری میکروترمور را روشی مناسب معرفی کرده است. در انتها با بررسی جنبه‌های مختلف می‌توان اندازه‌گیری میکروترمور را روشی کارآمد و ایده‌آل برای ارزیابی اثر ساختگاه شهر بابل در نظر گرفت.

واژه‌های کلیدی: اثر ساختگاه، نسبت طیفی H/V، میکروترمور، فرکانس اساسی، ضریب تقویت ارتعاش

*نویسنده مسئول Asskar@nit.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

مقدمه

زمین‌لرزه یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی است که بشر از بدو تولد همواره با آن مواجه است. هر ساله بیش از یک میلیون زمین‌لرزه کره زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بنابراین شناخت تمامی زوایای آن برای جوامع امروزی امری مهم تلقی می‌شود. یکی از مهم‌ترین ابعاد پژوهش‌های زمین‌لرزه، بررسی تأثیر شرایط ژئوتکنیکی بر مشخصات زمین‌لرزه در سطح زمین است. لرزش زمین و خسارات ناشی از آن تابع منبع لرزش، مسیر حرکت امواج و شرایط زیرسطحی ژئوتکنیکی است. در خلال یک زمین‌لرزه، آبرفت‌ها با ساختار متفاوت، دارای پاسخ‌های متفاوتی هستند، هم‌چنین ساختار یک آبرفت نیز در زمین‌لرزه‌های مختلف، پاسخ‌های یک‌سانی را به نمایش می‌گذارد، به این پدیده اثر ساختگاه می‌گویند. این پدیده در محل‌هایی که دارای خاک نرم یا توپوگرافی غیریکنواخت هستند، انرژی لرزه‌ای را ذخیره کرده و منجر به تقویت ارتعاشات و در نتیجه افزایش خسارات وارد بر سازه‌ها می‌شود. در زمین‌لرزه‌های ١٩٦٧ کاراکاس، ١٩٨٥ مکزیکوسیتی، ١٩٨٦ کالاماتا، ١٩٨٩ لوماپریتا، ١٩٩٠رودبار، ٢٠٠٣ بم، ٢٠٠٥ کشمیر، ٢٠٠٨ سیچوان، ٢٠١٠ هائیتی و... این پدیده به‌وضوح مشاهده شده و خسارات ناشی از آن در برخی از نواحی بسیار زیاد و جبران ناپذیر بوده است. بنابراین شناسایی و ارزیابی اثر ساختگاه امری بسیار حیاتی تلقی می‌شود [١]، [٢].

روش‌های متنوعی برای ارزیابی اثر ساختگاه وجود دارند، در میان این روش‌ها از میکروترمورها به‌دلیل سرعت زیاد فرآیند برداشت داده‌ها، هزینهٔ اندک، عملیات اجرایی آسان و دقت نسبی نتایج خروجی، استفاده زیادی می‌شود. به‌کمک اندازه‌گیری میکروترمور می‌توان فرکانس اساسی و ضریب تقویت ارتعاش را محاسبه کرد. این دو پارامتر به‌عنوان مهم‌ترین ویژگی‌های لرزه‌ای لایه‌های خاک شناخته می‌شوند [٢]، [٣].

در این پژوهش برای ارزیابی اثر ساختگاه شهر بابل در ٦٠ ایستگاه، برداشت میکروترمور انجام می‌شود و به‌کمک تحلیل آن‌ها، فرکانس اساسی و ضریب تقویت ارتعاش محاسبه می‌شود. برای صحت‌سنجی، نتایج با اطلاعات ژئوتکنیکی، تحلیل عددی و هم‌چنین نسبت طیفی زمین‌لرزه مقایسه می‌شوند. در انتها به‌کمک مقادیر استخراج شده از برداشت میکروترمورها، نقشه‌های ریزپهنه‌بندی ارائه می‌شوند که در برنامه‌ریزی و توسعهٔ شهری کاربرد وسیعی دارند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

اثر ساختگاه

اثر ساختگاه به تغییر ماهیت امواج زمین‌لرزه که به تقویت حرکات ورودی از سنگ بستر و در نتیجه تشدید خرابی‌ها منجر شده، اطلاق می‌شود. بررسی بسیاری از زمین‌لرزه‌های گذشته مشخص ساخته است که شرایط ژئوتکنیک محلی تأثیر زیادی بر توزیع خرابی‌ها در مناطق مسکونی و شریان‌های حیاتی دارد. پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که رسوبات و نهشته‌های نرم، جنبش زمین را تقویت کرده و هم‌چنین خرابی‌های بیش‌تری نسبت به لایه‌های سخت ایجاد می‌کنند [٤]. هنگام وقوع زمین‌لرزه خاک مشابه یک فیلتر عمل کرده و سبب تغییر مشخصات حرکتی زمین در طی زمین‌لرزه می‌شود [٥]. شدت جنبش نیرومند زمین تابع عواملی مانند بزرگی زمین‌لرزه، فاصله تا سطح زمین، ویژگی‌های منشأ لرزه‌ای، لایه‌بندی خاک، توپوگرافی سطحی و شرایط محلی خاک است. در بین این موارد، ژئوتکنیک محلی و لایه‌بندی خاک مهم‌ترین عواملی هستند که تغییرات پاسخ ساختگاه را در هر محل به‌خصوص تعیین می‌کنند [٦]. محققان علم ژئوتکنیک، به‌طورکلی اثر ساختگاه را متأثر از دو عامل اصلی شرایط توپوگرافی و ژئوتکنیک محلی می‌دانند که در نظرگیری آن‌ها در ارزیابی ساختگاه امری ضروری است [٧].

خصوصیات و مبانی نظری امواج میکروترمور

سطح زمین حتی بدون وقوع زمین‌لرزه همواره در حال جنبش است، این ارتعاشات با دامنه کوتاه و ضعیف که در سطح زمین ثبت می‌شوند، میکروترمور نامیده می‌شوند [٨]. دامنهٔ میکروترمورها جز در موارد استثنایی همواره خیلی کوچک است. دامنه ارتعاش این امواج بین ٠/١ تا ١ میکرون و بازهٔ سرعت آن‌ها نیز بین ٠/٠٠١ الی ٠/٠١ سانتی‌متر بر ثانیه است که بسیار پایین‌تر از آستانه احساس انسان است و فقط با لرزه‌نگارها با حساسیت بالا ثبت می‌شوند [٩]. منابع مولد امواج میکروترمور را می‌توان به دو دسته کلی طبیعی (مانند باد، برخورد امواج دریا و اقیانوس‌ها با ساحل) و مصنوعی (مانند فعالیت‌های انسانی، ترافیک و ارتعاش ماشین‌های صنعتی) تقسیم کرد [١٠].

بررسی و مشاهدات فراوان در مورد ماهیت میکروترمورها نشان می‌دهد که این امواج متشکل از امواج حجمی و سطحی هستند ولی تا کنون تئوری مستحکمی در این زمینه وجود

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

نداشته است. از مجموع بررسی‌ها می‌توان استنباط کرد که امواج میکروترمور در فرکانس‌های کم‌تر از ۱ Hz از امواج رایلی تشکیل شده‌اند، در حالی که اجماع کامل و محکمی برای فرکانس‌های بیش‌تر از ۱ Hz وجود ندارد [۱۰]، [۱۱].

نگاشت میکروترمور، مانند نگاشت زمین‌لرزه، اطلاعات خام است و برای دست‌یابی به نتایج مطلوب برای ارزیابی اثر ساختگاه باید روی آن‌ها تحلیل‌هایی صورت گیرد. پرکاربردترین و قابل قبول‌ترین روش برای ارزیابی اثر ساختگاه به‌وسیلهٔ میکروترموها روش ناکامورا یا نسبت طیفی H/V است. این روش را ناکامورا در سال ۱۹۸۹ ارائه کرده است. روش H/V شامل ثبت میکروترمورها و سپس محاسبه نسبت طیفی مؤلفه‌های افقی به عمودی میکروترمورهای ضبط شده است [۱۰]، [۱۲]. فرض اساسی در استفاده از میکروترمور برای تخمین اثر ساختگاه این است که امواج برخوردی با لایه‌های زمین، به هنگام ثبت در گیرنده‌های سطحی، حاوی مشخصات لایه‌های خاکی هستند که از آن‌ها عبور کرده‌اند [۱۳]. ناکامورا روش خود را در سال ۱۹۸۹ بر مبنای فرضیات زیر بنا کرد:

۱. میکروترمورها شامل چندین موج هستند، اما اغلب از امواج حجمی تشکیل شده‌اند و در لایهٔ سطحی نرم بر لایهٔ سخت حرکت می‌کنند (پژوهش‌های بعد از وی نشان داده‌اند که میکروترمورها اغلب از امواج رایلی تشکیل شده‌اند و این فرض ناکامورا صحیح نیست).
۲. چهار دامنهٔ طیف فوریه میکروترمورها به‌ترتیب شامل مؤلفه‌های افقی و عمودی جنبش در سطح و بستر لایه $(S_{HS}, S_{VS}, S_{HB}, S_{VB})$ است.
۳. میکروترمورها از منابع سطحی منشأ می‌گیرند (مانند باد، امواج دریا و...).
۴. برای محدودهٔ فرکانسی وسیع نسبت دامنه طیفی مؤلفه‌های افقی به عمودی در انتهای لایه (S_{HB} / S_{VB})، نزدیک به یک است.
۵. اثر امواج رایلی برای مؤلفه‌های افقی و قائم یک‌سان است.
۶. اثر امواج رایلی در طیف قائم سطح وجود دارد، اما در بستر موجود نیست.

بر اساس فرضیات مذکور، ناکامورا تابع انتقال جدیدی ارائه کرد تا تقویت مؤلفهٔ افقی لایه‌های سطحی را نشان دهد. تابع انتقالی لایه سطحی (S_T) برای حرکت افقی برابر است با:

$$S_T = S_{HS} / S_{HB} \quad (۱)$$

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

که در این رابطه S_{HS} مؤلفه افقی طیف لرزه در سطح زمین و S_{HB} مؤلفهٔ افقی طیف لرزه در سنگ بستر است. S_{HS} تحت تأثیر امواج سطحی است و از آن‌جاکه امواج میکروترمور عمدتاً به‌عنوان امواج رایلی منتشر می‌شوند، از این‌رو، S_{HS} تحت تأثیر امواج رایلی قرار دارد. امواج رایلی در طیف قائم سطح وجود دارند اما در بستر موجود نیستند. با فرض این‌که مؤلفهٔ قائم میکروترمور با لایه‌های سطحی تقویت نمی‌شود، مقدار E_S، تأثیر امواج رایلی را بر مؤلفهٔ قائم نشان می‌دهد:

$$E_S = S_{VS} / S_{VB} \qquad (۲)$$

E_S مشارکت امواج رایلی را در جنبش قائم لرزه نشان می‌دهد. با فرض این‌که تأثیر امواج رایلی بر مؤلفه‌های قائم و افقی یک‌سان است، آن‌گاه می‌توان رابطهٔ S_T / E_S را برای تعریف تابع انتقال حرکت افقی به‌کار برد، هدف از این کار حذف اثر امواج رایلی است:

$$S_{TT} = S_T / E_S = (S_{HS} / S_{HB}).(S_{VB} / S_{VS}) = R_S / R_B \qquad (۳)$$

که در رابطهٔ (۳) $R_S = S_{HS} / S_{VS}$ و $R_B = S_{HB} / S_{VB}$ است. R_S از تقسیم طیف مؤلفهٔ افقی بر مؤلفهٔ قائم که هر دو در سطح زمین اندازه گرفته شده‌اند به‌دست می‌آید. طبق فرضیات ناکامورا $R_B = ۱$، بنابراین:

$$S_{TT} = R_S = S_{HS} / S_{VS} \qquad (٤)$$

این رابطه نشان می‌دهد که تابع انتقال لایه سطحی را می‌توان از اندازه‌گیری در سطح زمین و فقط با استفاده از یک دستگاه به‌دست آورد. به‌عبارت دیگر ارتعاش قائم در سطح، ویژگی‌های ارتعاش افقی در لایه زیرین را همراه با خود دارد. ناکامورا برای اثبات این نظریه تابع انتقال S_T را در ناحیهٔ بررسی شده خود از مشاهدات لرزه‌ای به‌دست آورد و با نتایج تابع انتقال S_{TT} که ناشی از اندازه‌گیری میکروترمور است، مقایسه کرد. نتایج نشان می‌دهد که S_{TT} از نظر فرکانس اوج، ضریب بزرگ‌نمایی و شکل منحنی، شبیه S_T است. وی نتیجه گرفت که مقدار حداکثر ضریب بزرگ‌نمایی را می‌توان از مکان اوج منحنی نسبت طیفی S_{TT} به‌دست آورد [۱۰]، [۱٤]، [۱۵]، [۱٦]، [۱۷].

این روش از زمان معرفی آن در سال ۱۹۸۹ تا کنون به‌طور مکرر در نقاط مختلف دنیا به‌کار گرفته شد و تحقیقات گسترده‌ای روی جوانب مختلف آن به‌خصوص در مورد نتایج آن (پاسخ

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

ساختگاه) انجام گرفت و با نتایج حاصل از سایر روش‌های متداول مقایسه شد. امروزه پتانسیل استفاده از میکروترمورها با استفاده از روش ناکامورا برای تعیین ویژگی ساختگاه به‌دلیل ساده و اقتصادی بودن نسبی این روش، بسیار زیاد است [۱۸]، [۱۹].

از آن‌جاکه امروزه پژوهش‌گران بر این باورند که میکروترمورها غالباً از امواج سطحی (امواج رایلی) تشکیل شده‌اند، بنابراین میزان تقویت ارتعاش به‌دست آمده از این روش برخلاف ایده ناکامورا مقدار دقیقی نیست. برخی از پژوهش‌گران معتقدند که تقویت به‌دست آمده از تحلیل میکروترمورها را باید به‌عنوان حداقل ضریب تقویت ارتعاش واقعی ساختگاه در نظر گرفت [۲۰]، [۲۱]، [۲۲].

زمین‌شناسی و لرزه‌خیزی ناحیهٔ بررسی شده

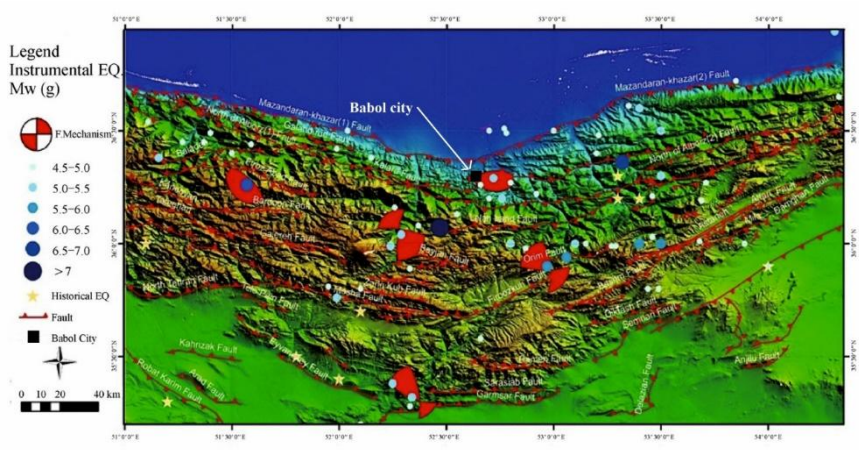
ناحیهٔ بررسی شده این پژوهش شهر بابل در استان مازندران است. شهر بابل در دشت نسبتاً مسطحی واقع گشته که تغییرات توپوگرافی در این محدوده اندک است. از نظر زمین‌شناسی، شهر بابل در پهنهٔ البرز مرکزی قرار دارد و با انباشته‌های کواترنر پوشیده شده است. این انباشته‌ها شامل رسوبات دریایی، رودخانه‌ای، دلتایی و کرانه‌ای و در بخش‌هایی باتلاقی هستند. به‌طورکلی بافت و ضخامت نهشته‌های رسوبی در بابل متأثر از عملکرد رودخانه‌ها به‌خصوص رودخانهٔ بابل‌رود و فرآیندهای ساحلی دریای مازندران است. شهر بابل روی خاک آبرفتی ناشی از نهشته‌های مخروط افکنه‌ای رودخانه بابل‌رود قرار دارد. فرونشست دائمی دشت خزر نیز سبب تجمع زیاد رسوبات و ضخیم شدن نهشته‌های دامنه‌ای و مخروط افکنه‌ای در این قسمت شده که این موضوع می‌تواند سبب تقویت ارتعاش زمین در هنگام زمین‌لرزه شود. با توجه به اطلاعات گمانه‌های ژئوتکنیکی موجود در ناحیهٔ بررسی شده (۳۵ گمانه ژئوتکنیکی به‌عمق ۳۰ متر)، تفسیر عکس‌های هوایی و هم‌چنین ارزیابی روند رسوب‌گذاری در دشت می‌توان شرایط زیرسطحی و بافت خاک شهر بابل را تعیین کرد. از این اطلاعات برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از اندازه‌گیری میکروترمور استفاده می‌شود.

برای ارزیابی وضعیت لرزه‌خیزی ناحیهٔ بررسی شده، در این پژوهش گسل‌هایی که در شعاع ۱۵۰ کیلومتری شهر بابل وجود دارند به‌کمک نقشه‌های زمین‌شناسی شرکت نفت، نقشه‌های سازمان زمین‌شناسی، تصاویر ماهواره‌ای نرم‌افزار گوگل ارث و نقشه‌های توپوگرافی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

بررسی شده و در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. محدودهٔ ۱۵۰ کیلومتری پیرامون شهر بابل در دو ناحیهٔ زمین‌ساختی رشت-گرگان و البرز مرکزی قرار دارد و از خصوصیات لرزه‌خیزی این دو ناحیه پیروی می‌کند. در حال حاضر گسل البرز مرکزی به‌شدت فعال است و بسیاری از زمین‌لرزه‌های گیلان و مازندران در نتیجه فعالیت این گسل رخ می‌دهند.

با بررسی وضعیت زمین‌شناسی و لرزه‌خیزی در محدودهٔ بررسی شده مشخص می‌شود که این ناحیه پتانسیل زیادی برای خرابی لرزه‌ای دارد و در نظرگیری اثر ساختگاه در شهر بابل امری ضروری تلقی می‌شود.



شکل ۱. موقعیت گسل‌ها و فعالیت لرزه‌ای در شعاع ۱۵۰ کیلومتری شهر بابل

اندازه‌گیری و تحلیل میکروترمور در سطح شهر بابل

برای اندازه‌گیری میکروترمور در شهر بابل، این ناحیه به ٦۰ شبکه منظم مربع شکل به ابعاد ۷۰۰ متر تقسیم‌بندی شد و در داخل هر شبکه یک ایستگاه برای اندازه‌گیری مشخص شد. از آن‌جاکه به‌دلیل مشکلات میدانی امکان اندازه‌گیری دقیقاً روی مختصات اولیه وجود نداشت، در نهایت اندازه‌گیری میکروترمور با نظم نسبی به‌صورتی که در شکل ۲ نمایش داده شده است، انجام گرفت. شکل ۲ نقشه شبکه‌بندی، موقعیت مقطع و گمانه‌های ژئوتکنیکی، ایستگاه‌های میکروترمور و شتاب‌نگار را نشان می‌دهد، جدول ۱ نیز مختصات ایستگاه‌های برداشت میکروترمور را ارائه می‌کند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

در زمان اندازه‌گیری داده‌ها، همهٔ توصیه و معیارهای ارائه شده برای برداشت داده‌های مناسب به‌وسیلهٔ مراجع مختلف به‌ویژه معیارهای توصیه‌نامه SESAME مورد توجه قرار گرفت. مدت زمان ثبت میکروترمور، تابعی از حداقل پریود تشدید مورد انتظار است. در این پژوهش مدت زمان برداشت ۱۵ دقیقه‌ای برای ثبت میکروترمور مناسب تشخیص داده شد.



شکل ۲. نقشهٔ شبکه‌بندی، مقطع و گمانه‌های ژئوتکنیکی، ایستگاه‌های میکروترمور و شتاب‌نگار

در این پژوهش با توجه به شرایط محدودهٔ بررسی شده، تراکم بافت شهری و ترافیک، عمده برداشت‌ها در ساعاتی انجام شد (۲۲ الی ٦ بامداد) که نوفه‌های مزاحم گذرا و ممتد به کم‌ترین مقدار خود در طی ٢٤ ساعت رسیده‌اند. برداشت در این زمان از شبانه‌روز به‌علت به حداقل رسیدن عوامل مزاحم اندازه‌گیری (ترافیک، کارخانه‌ها، مردم و غیره) بیش‌ترین بازدهی را هم از برای سرعت در برداشت و هم در صحت داده‌های اندازه‌گیری شده دارد. برای اطمینان

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

از پایداری امواج، لازم است چند دقیقه قبل از برداشت دستگاه باید روشن باشد، در این پژوهش بر اساس دفترچه راهنمای دستگاه استفاده شده، این زمان ۵ دقیقه بوده است. در زمان اندازه‌گیری، نباید منشأ تولید امواج (منشأ گذرا) در نزدیکی دستگاه وجود داشته باشد. عبور خودروها، افراد پیاده و فعالیت هر نوع کارگاه و کارخانه می‌تواند نتایج را تحت تأثیر قرار داده و بیشینهٔ مصنوعی در منحنی نسبت طیفی ایجاد کند. در زمان برداشت داده‌ها، این شرایط در حد ممکن رعایت شده است.

در پژوهش حاضر اندازه‌گیری‌ها تا حد امکان بر سطح خاک انجام گرفت، تنها در چند ایستگاه در نواحی مرکزی شهر که به‌علت تراکم زیاد ساختمانی هیچ‌گونه بیرون‌زدگی خاک در آن نواحی وجود نداشت، اندازه‌گیری روی سطح آسفالت انجام شد. ابزارهای استفاده شده برای اندازه‌گیری میکروترمور شامل لرزه‌سنج سه کاناله SL07، رایانه قابل‌حمل، قطب‌نما و سیستم موقعیت‌یاب جهانی است. لرزه‌سنج استفاده شده در این پژوهش، از لرزه‌سنج سه مؤلفه‌ای هوستن، ساخت آمریکا که شرکت ایتالیایی سارا با نام لرزه‌سنج SL07، آن را عرضه کرده است، استفاده شد. این لرزه‌سنج دارای یک رقومی کننده سه‌کاناله ٢٤ بیتی، یک گیرندهٔ موقعیت‌یاب جهانی و یک واحد پردازنده مرکزی با قابلیت ذخیره اندازه‌گیری است. زمان‌بندی و ثبت تاریخ برداشت به‌وسیلهٔ گیرندهٔ موقعیت‌یاب جهانی پشتیبانی می‌شود. با بررسی تمامی جوانب، برداشت با فرکانس نمونه‌برداری ۱۰۰ هرتز انجام شد.

به‌منظور پردازش داده‌های میکروترمور شهر بابل، از نرم‌افزار Geopsy استفاده شد. Geopsy، نرم‌افزاری است که از سال ۲۰۰۵ تاکنون برای تحقیقات ژئوفیزیکی در حال توسعه است. در حقیقت این نرم‌افزار در مدت تحقیقات گروه SESAME و برای پردازش داده‌های میکروترمور به‌منظور ارزیابی ساختگاه تهیه شده است. در حال حاضر این نرم‌افزار قدرتمندترین و پرکاربردترین نرم‌افزار موجود برای تحلیل داده‌های میکروترمور محسوب می‌شود. روند تحلیل گام به گام داده‌های میکروترمور بدین‌شرح است (برای آشنایی بیش‌تر با موارد زیر می‌توان به [۱]، [۱۲]، [۲۳] مراجعه کرد):

- تقسیم داده‌ها به پنجره‌های زمانی مناسب
- حذف پنجره‌های زمانی نامناسب و اعمال فیلتر
- محاسبهٔ طیف دامنهٔ فوریه برای پنجره‌های هر یک از مؤلفه‌های شمالی، شرقی و عمودی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

جدول ١. مختصات ایستگاه‌های اندازه‌گیری میکروترمور

نام ایستگاه	مختصات		نام ایستگاه	مختصات	
	Easting	Northing		Easting	Northing
B1	٦٥١٨٥٠	٤٠٤٩٢٥٠	B31	٦٥١٨٠٠	٤٠٤٥٥٠٠
B2	٦٥٠٨٠٠	٤٠٤٩٥٠٠	B32	٦٥١٢٠٠	٤٠٤٥٤٥٠
B3	٦٥٠٢٠٠	٤٠٤٩٣٠٠	B33	٦٥٠٣٠٠	٤٠٤٥٥٠٠
B4	٦٤٩٦٥٠	٤٠٤٩٢٥٠	B34	٦٤٩٤٠٠	٤٠٤٥٧٠٠
B5	٦٤٨٦٥٠	٤٠٤٩٥٠٠	B35	٦٤٨٥٠٠	٤٠٤٥٦٠٠
B6	٦٤٧٨٠٠	٤٠٤٩٦٠٠	B36	٦٤٧٧٠٠	٤٠٤٥٤٠٠
B7	٦٥٢٢٥٠	٤٠٤٨٥٥٠	B37	٦٥١٨٥٠	٤٠٤٤٣٥٠
B8	٦٥١١٥٠	٤٠٤٨٥٠٠	B38	٦٥١١٥٠	٤٠٤٤٥٠٠
B9	٦٥٠٥٠٠	٤٠٤٨٥٠٠	B39	٦٥٠٣٥٠	٤٠٤٤٦٠٠
B10	٦٤٩٤٠٠	٤٠٤٨٤٠٠	B40	٦٤٩٥٠٠	٤٠٤٤٦٠٠
B11	٦٤٨٨٠٠	٤٠٤٨٥٠٠	B41	٦٤٨٨٠٠	٤٠٤٤٦٥٠
B12	٦٤٧٨٠٠	٤٠٤٨٦٠٠	B42	٦٤٨١٠٠	٤٠٤٤٨٠٠
B13	٦٥١٩٥٠	٤٠٤٨٠٠٠	B43	٦٥٢١٠٠	٤٠٤٣٥٠٠
B14	٦٥٠٨٥٠	٤٠٤٨٠٥٠	B44	٦٥١٠٠٠	٤٠٤٣٨٥٠
B15	٦٤٩٦٥٠	٤٠٤٨٠٠٠	B45	٦٥٠٣٥٠	٤٠٤٣٦٠٠
B16	٦٤٩٢٠٠	٤٠٤٨١٠٠	B46	٦٤٩٥٥٠	٤٠٤٤٠٠٠
B17	٦٤٨٨٥٠	٤٠٤٧٨٠٠	B47	٦٤٨٥٠٠	٤٠٤٣٨٥٠
B18	٦٤٨٠٠٠	٤٠٤٧٩٠٠	B48	٦٤٧٧٠٠	٤٠٤٣٨٥٠
B19	٦٥١٩٠٠	٤٠٤٧١٠٠	B49	٦٥٢٠٠٠	٤٣٤٣٠٠٠
B20	٦٥١٠٥٠	٤٠٤٧٠٠٠	B50	٦٥١٣٥٠	٤٠٤٢٧٥٠
B21	٦٥٠٣٥٠	٤٠٤٧٢٠٠	B51	٦٥٠٢٠٠	٤٠٤٢٥٠٠
B22	٦٤٩٧٥٠	٤٠٤٧١٠٠	B52	٦٤٩٥٥٠	٤٠٤٣٣٥٠
B23	٦٤٨٨٥٠	٤٠٤٧٢٠٠	B53	٦٤٨٥٥٠	٤٠٤٣١٠٠
B24	٦٤٨٠٠٠	٤٠٤٧١٠٠	B54	٦٤٧٧٠٠	٤٠٤٣٢٠٠
B25	٦٥٢١٠٠	٤٠٤٦٥٠٠	B55	٦٥٢٢٥٠	٤٠٤٢٢٠٠
B26	٦٥١٣٠٠	٤٠٤٦٢٥٠	B56	٦٥١٢٠٠	٤٠٤٢٢٥٠
B27	٦٥٠٤٠٠	٤٠٤٦٣٥٠	B57	٦٥٠٥٠٠	٤٠٤٢٢٠٠
B28	٦٤٩٣٥٠	٤٠٤٦٧٠٠	B58	٦٤٩٥٥٠	٤٠٤٢٣٠٠
B29	٦٤٨٦٠٠	٤٠٤٦٣٥٠	B59	٦٤٨٦٠٠	٤٠٤٢٣٥٠
B30	٦٤٧٩٠٠	٤٠٤٦٣٠٠	B60	٦٤٨٠٠٠	٤٠٤٢٤٠٠

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

- محاسبه میانگین طیف افقی با ترکیب این مؤلفه‌ها با رابطهٔ (۵):

$$H_{avg} = \sqrt{(N^2(f) + E^2(f)/2)} \quad (۵)$$

- نرم کردن میانگین مؤلفهٔ افقی و مؤلفهٔ عمودی
- محاسبهٔ نسبت طیفی افقی به عمودی (H/V) برای هر پنجره
- محاسبهٔ نسبت طیفی افقی به عمودی نهایی با میانگین‌گیری این نسبت همهٔ پنجره‌ها
- ترسیم نمودار نسبت طیفی مؤلفهٔ افقی به عمودی
- ارزیابی صحت نتایج به‌کمک معیارهای SESAME

تفسیر نتایج میکروترمور و نقشه‌های ریزپهنه‌بندی

به‌کمک روش توصیف شده در بخش قبلی، داده‌های میکروترمور شهر بابل پردازش شدند و در انتها نسبت طیفی H/V، فرکانس اساسی و ضریب تقویت ارتعاش به‌عنوان خروجی و نتایج اندازه‌گیری‌ها ارائه شده است. شکل ۳ نتایج تحلیل‌ها را در چند ایستگاه اندازه‌گیری میکروترمور نشان می‌دهد. به‌کمک مختصات نقاط و مقادیر فرکانس و ضریب تقویت ارتعاش محاسبه شده، نقشه ریزپهنه‌بندی بر اساس فرکانس اساسی و ضریب تقویت ارتعاش ساختگاه تهیه شده است. شکل ٤ نقشه ریزپهنه‌بندی بر اساس فرکانس اساسی و ضریب تقویت ارتعاش را نشان می‌دهد.

چنان‌که از شکل ٤ مشخص است، بخش وسیعی از شهر دارای فرکانس اساسی کم‌تر از ۱ Hz است. تنها در بخش‌هایی از شمال غربی و جنوب شهر فرکانس اساسی بیش از ۱ Hz وجود دارد.

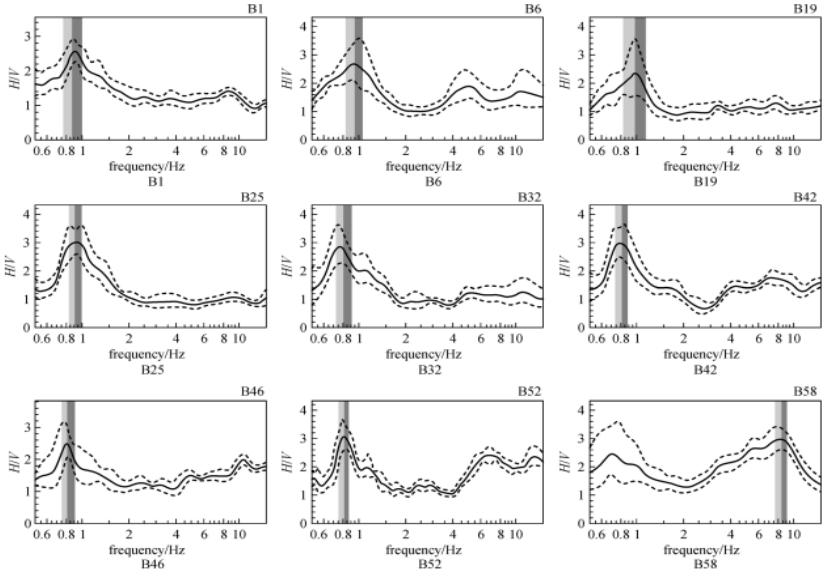
مقدار بیشینه و کمینهٔ فرکانس اساسی در این پژوهش به‌ترتیب ۱۱/٤ و ۰/٦۵ هرتز است. هم‌چنین مقدار بیشینه و کمینهٔ ضریب تقویت ارتعاش به‌ترتیب ۳/۷۱ و ۱/۱۹ محاسبه شده است. شکل ۵ نمودار درصد فراوانی برای داده‌های فرکانس اساسی و ضریب تقویت ارتعاش را نشان می‌دهد.

نکته قابل توجه دیگر حضور چند ایستگاه با فرکانس اساسی بسیار بالا در نواحی شمال غربی و جنوب است. در هنگام مواجه با این پدیده، برداشت میکروترمور و تحلیل داده‌ها

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

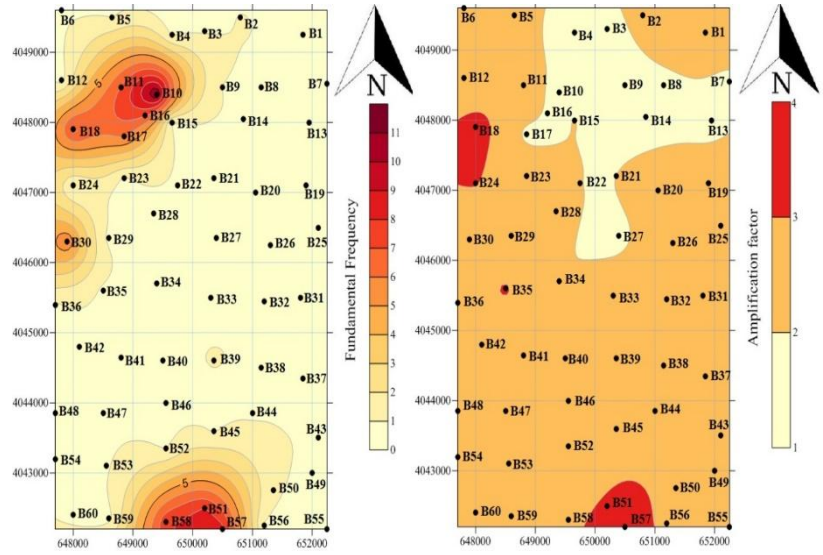
دوباره انجام شد، اما نتایجی مشابه با نتایج اندازه‌گیری نوبت اول به‌دست آمد. با بررسی موقعیت این ایستگاه‌ها مشاهده می‌شود که تمامی آن‌ها در نزدیکی رودخانه بابل‌رود قرار دارند. با توجه به نبودن اطلاعات ژئوتکنیکی کافی، باید به‌کمک سایر روش‌ها این پدیده بررسی شود. برای این منظور از اطلاعات آزمایش ژئوالکتریک انجام شده در سطح شهر بابل استفاده شده است.

با بررسی نتایج آزمایش‌های ژئوالکتریک (نتایج آن در جلد دوم گزارش پروژه ریزپهنه‌بندی خطر زمین‌لرزه و مدیریت بحران شهر بابل موجود است، اما از ارائه نتایج آن به‌دلیل محدودیت حجم مقاله خودداری شده است)، مشاهده می‌شود که در مناطق محدودی واقع در شمال غربی، جنوب و جنوب شرقی توده‌های سخت حضور دارند. انحراف بابل‌رود در قسمت جنوب و برگشت آن در شمال به وضعیت سابق (شکل ۲)، احتمالاً به‌علت وجود همین توده‌های نسبتاً سخت است. وجود این توده‌های سخت، فرکانس اساسی بالا را توجیه می‌کند. با مقایسه نتایج این دو آزمایش مشاهده می‌شود که برداشت ژئوالکتریک، نتایج حاصل از تحلیل داده‌های میکروترمور را تأیید می‌کند.

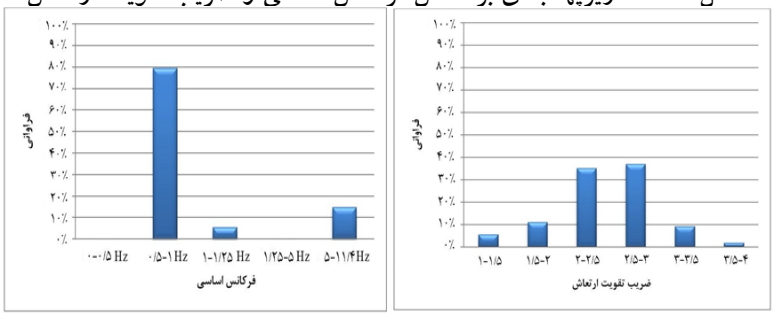


شکل ۳. نسبت طیفی H/V در چند ایستگاه اندازه‌گیری میکروترمور

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]



شکل ٤. نقشه ریزپهنه‌بندی بر اساس فرکانس اساسی و ضریب تقویت ارتعاش



شکل ٥. توزیع فرکانس اساسی و ضریب تقویت ارتعاش

صحت‌سنجی نتایج اندازه‌گیری میکروترمور

نتایج تحلیل داده‌های میکروترمور می‌توانند با روش‌های علمی و معتبر دیگری مقایسه و صحت‌سنجی شوند. برای این هدف می‌توان از نسبت طیفی امواج زمین‌لرزه، روش‌های عددی (معادل خطی و غیرخطی) و ارزیابی بافت و مشخصات ژئوتکنیکی استفاده کرد. معتبرترین روش، مقایسه‌ی نتایج میکروترمور با نسبت طیفی زمین‌لرزه است [٢٤]، [٢٥]، [٢٦]، برای این منظور به داده‌های شبکه لرزه‌نگاری در ساختگاه نیاز است که متأسفانه در شهر بابل شبکه لرزه‌نگاری وجود ندارد. در فرمانداری این شهر یک دستگاه شتاب‌نگار وجود دارد که با

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

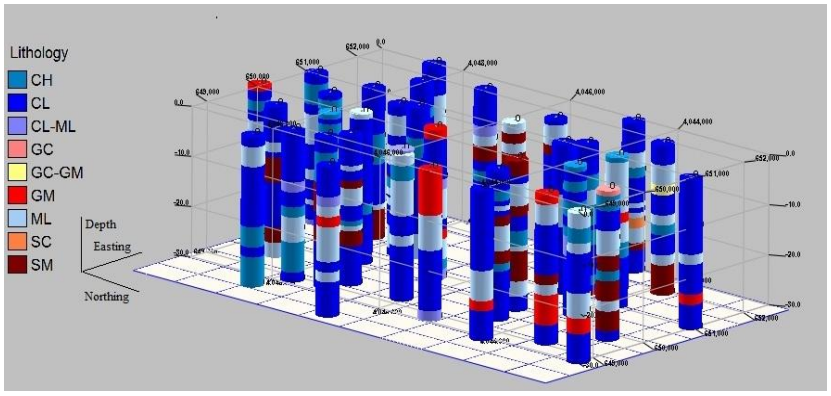
استفاده از نگاشت‌های ثبت شده با این دستگاه می‌توان به ارزیابی نتایج یک ایستگاه میکروترمور که در نزدیکی آن وجود دارد پرداخت. برای تحلیل معادل خطی و غیرخطی ساختگاه نیز، احتیاج به شناسایی لایه‌های خاک، سرعت موج برشی تا سطح سنگ بستر و هم‌چنین عمق سنگ بستر در ساختگاه است، چنین داده‌هایی در لاگ گمانه‌های ژئوتکنیکی موجودند. هم‌چنین می‌توان برای مقایسه نتایج، از ارزیابی بافت خاک و مشخصات ژئوتکنیکی استفاده کرد. پژوهش‌های متعددی از این روش بهره برده‌اند [۲۷]، [۲۸]، [۲۹]. در تمامی این پژوهش‌ها، نتایج اندازه‌گیری میکروترمور با شرایط ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی ناحیه مقایسه شده است. با استفاده از این روش می‌توان به‌صورت کیفی به ارزیابی نتایج میکروترمور پرداخت، به‌عبارتی دیگر شرایط ژئوتکنیکی نحوه تغییرات فرکانس اساسی را تأیید می‌کند.

صحت‌سنجی به‌کمک مدل‌سازی مشخصات ژئوتکنیکی خاک

برای دست‌یابی به توزیع بافت خاک محدودهٔ بررسی شده از نرم‌افزار RockWorks استفاده شده است. در این پژوهش ورودی نرم‌افزار لایه‌های خاک و سرعت موج برشی بوده است که در نهایت نحوهٔ تغییرات آن به‌صورت جامع در نتایج مشاهده می‌شود.

به‌منظور مدل‌سازی لایه‌های خاک، ابتدا ابعاد پروژه مشخص شد و سپس حجم عظیم اطلاعات ژئوتکنیکی وارد پایگاه داده‌ی نرم‌افزار می‌شود. در این پژوهش از اطلاعات ۳۵ گمانه ژئوتکنیکی که برای پروژه ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای شهر بابل حفر شده‌اند، استفاده شده است. شکل ٦، لاگ ۳۵ گمانه ژئوتکنیکی به‌همراه موقعیت آن‌ها در ناحیهٔ بررسی شده را نشان می‌دهد. اطلاعات ورودی به نرم‌افزار شامل سطح آب زیرزمینی، لایه‌بندی خاک، عمق و جنس هر لایه، درصد ریزدانه، چسبندگی، مقاومت برشی، حد خمیری، حد روانی و عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده است. اطلاعات تکمیلی دیگر از جمله سرعت موج برشی که به‌کمک آزمایش درون گمانه‌ای به‌دست آمده و نتایج آزمایش ژئوالکتریک نیز برای ناحیهٔ بررسی شده وجود دارد. با توجه به سطح وسیع ناحیهٔ بررسی شده، ۷ مقطع در نواحی مختلف ترسیم شده است. در هنگام ترسیم مقاطع سعی بر آن بوده است که نواحی مختلف و مشکوک تحت پوشش قرار گیرند. شکل ۲ موقعیت مقاطع را نشان می‌دهد. با توجه به محدودیت حجم مقاله نتیجه ۳ مقطع برای نمونه ارائه می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]



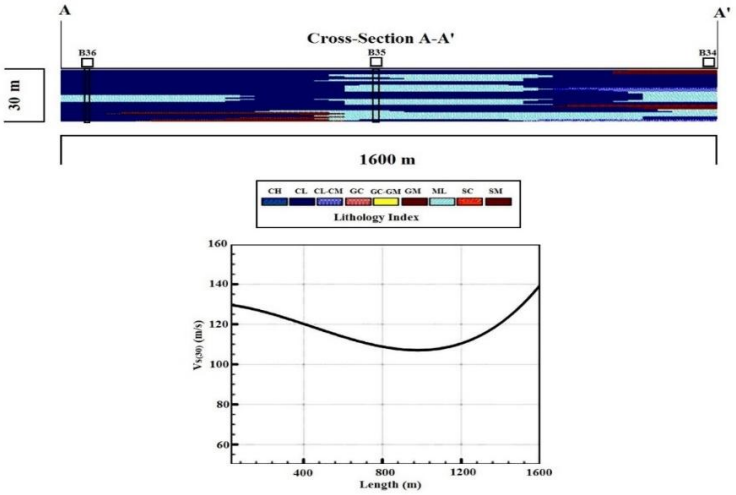
شکل ٦. لاگ و موقعیت گمانه‌های ژئوتکنیکی

مقطع عرضی A-A`

این مقطع عرضی به‌طول ۱٦۰۰ متر، در غرب ناحیهٔ بررسی شده قرار دارد و دارای راستای غربی–شرقی است. با بررسی شکل ۷ مشاهده می‌شود که قسمت عمده این مقطع از رس و لای با خاصیت خمیری کم تشکیل شده و در برخی نواحی در ابتدا و انتهای مسیر شن و ماسه لای دار وجود دارد. بررسی نتایج آزمایش درون گمانه‌ای و روابط تخمینی با استفاده از عدد نفوذ استاندارد، نشان می‌دهد که مقادیر سرعت موج برشی در ابتدای مسیر زیاد بوده است و به‌سمت میانه مقطع از سرعت کاسته می‌شود. در ادامهٔ مسیر از میانه به‌سمت انتها، میزان سرعت موج برشی به‌صورت محسوسی افزایش می‌یابد. با توجه به توزیع لایه‌های خاک، عدد نفوذ استاندارد و سرعت موج برشی انتظار می‌رود که فرکانس از ابتدای مقطع به‌سمت میانه آن کاهش و در ادامه به‌سمت انتها افزایش یابد. این مقطع از ۳ ایستگاه اندازه‌گیری سی و شش، سی و پنج و سی و چهار عبور می‌کند. این ایستگاه‌ها به‌ترتیب دارای مقادیر فرکانس ۰/۸٦، ۰/۸۲ و ۰/۹۳ هرتز است. مشاهده می‌شود که شرایط ژئوتکنیکی، نحوهٔ تغییرات فرکانس اندازه‌گیری شده با میکروترمور را تأیید می‌کند.

این مقطع عرضی به‌طول ۳۱۰۰ متر، طولانی‌ترین مقطع ترسیم شده است و در جنوب غربی ناحیهٔ بررسی شده قرار داشته و در راستای غربی–شرقی قرار دارد. با بررسی شکل ۸ مشاهده می‌شود که این مقطع نسبت به مقاطع دیگر، دارای تغییرات بافت و لایه‌های خاک

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]



شکل (٧) مقطع عرضی A-A`

مقطع عرضی C-C`

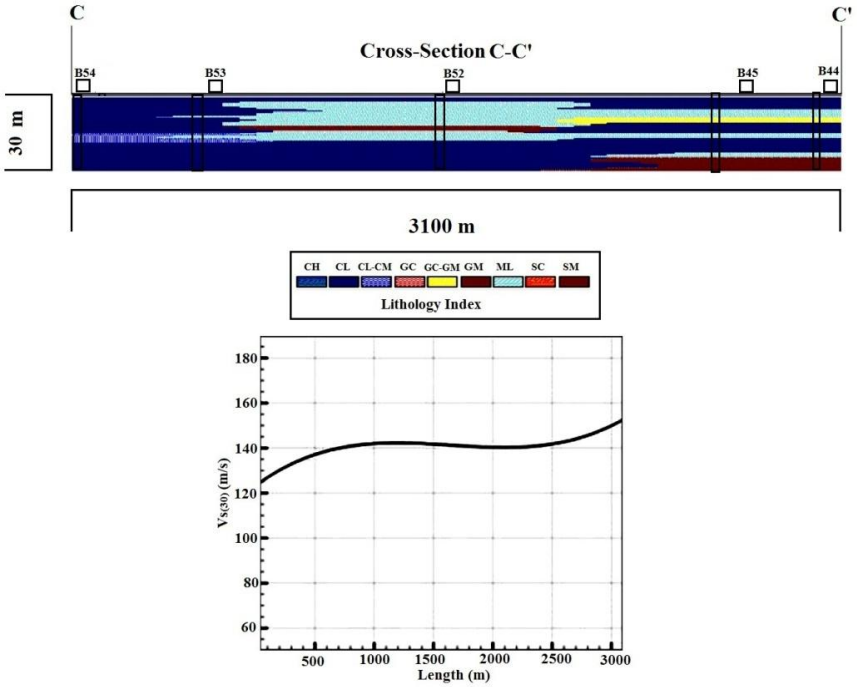
بیش‌تری است. در این مقطع رس و لای با خاصیت خمیری کم، شن و ماسه لای‌دار و شن رس‌دار مشاهده می‌شوند. بررسی نتایج آزمایش درون گمانه‌ای و روابط تخمینی با استفاده از عدد نفوذ استاندارد، نشان می‌دهد که مقادیر سرعت موج برشی در ابتدای مسیر کم است، سپس در مسافت طولانی سرعت دارای تغییرات ناچیزی است، ولی نسبت به ابتدای مقطع بیش‌تر است. در انتهای مسیر، میزان سرعت تا حدی افزایش می‌یابد. عدد نفوذ استاندارد به‌دست آمده از لاگ گمانه ژئوتکنیکی نیز، تقریباً روندی مشابه با تغییرات سرعت موج برشی دارد. با توجه به توزیع لایه‌های خاک، عدد نفوذ استاندارد و سرعت موج برشی انتظار می‌رود که فرکانس در ابتدای مسیر دارای کم‌ترین مقدار باشد، سپس در ادامه مسیر میزان آن افزایش یافته و در انتها با افزایش جزئی همراه شود. این مقطع از ٥ ایستگاه اندازه‌گیری پنجاه و چهار، پنجاه و سه، پنجاه و دو، چهل و پنج و چهل و چهار عبور می‌کند. این ایستگاه‌ها به‌ترتیب دارای مقادیر فرکانس ٠/٨٧، ٠/٩١، ٠/٩٢، ٠/٩١ و ٠/٩١ هرتز هستند. چنان‌که پیش‌بینی شد، ابتدای مسیر دارای کم‌ترین مقدار فرکانس است و هم‌چنین در مسیری طولانی لایه‌های خاک و سرعت موج برشی تغییرات ناچیزی دارند و همین شرایط، یک‌سان بودن میزان فرکانس را

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

تأیید می‌کند. در انتهای مسیر انتظار افزایش فرکانس وجود دارد که در نتایج میکروترمور چنین موردی مشاهده نمی‌شود. دلایل گوناگونی برای هم‌خوان نبودن نتایج وجود دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به این موارد اشاره کرد:

۱. با توجه به این‌که داده‌های ژئوتکنیکی تا عمق ۳۰ متری موجود هستند، احتمال دارد که لایه تأثیرگذاری در پایین‌تر از این عمق وجود داشته باشد.

۲. شرایط زیرسطحی پیچیده‌ای در این ناحیه رخ داده که احتمال دارد اندازه‌گیری میکروترمور را با خطا همراه کرده باشد.



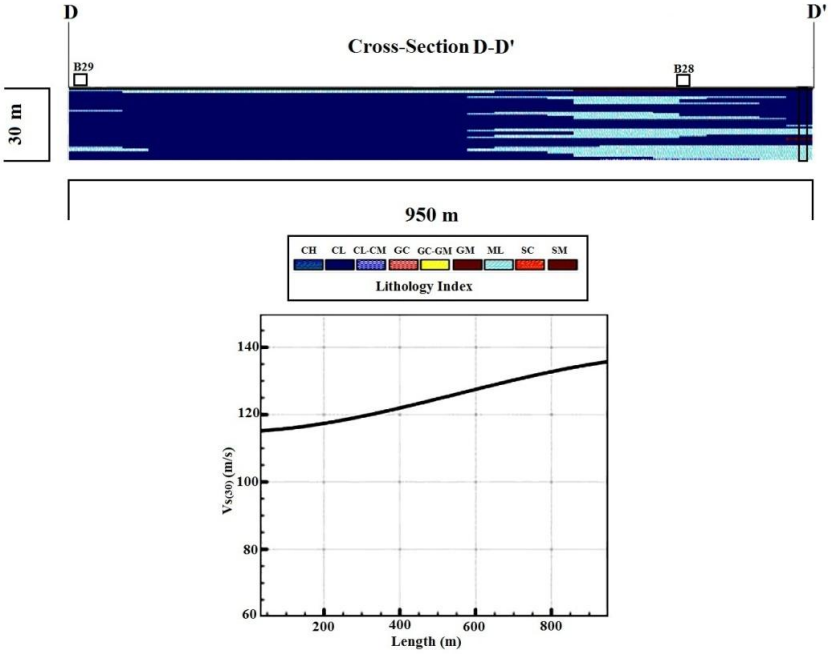
شکل ۸. مقطع عرضی C-C`

مقطع عرضی D-D`

این مقطع عرضی به طول ۹۵۰ متر، کوتاه‌ترین مقطع ترسیم شده است که در میانه ناحیهٔ بررسی شده قرار داشته و دارای راستای غربی–شرقی است. با بررسی شکل ۹ مشاهده می‌شود که تقریباً تمام مقطع از رس با خاصیت خمیری کم تشکیل شده و در انتهای مقطع لای با خاصیت خمیری کم و ماسه لای‌دار وجود دارد. با توجه به لایه‌های خاک، عدد نفوذ

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

استاندارد و سرعت موج برشی انتظار می‌رود که فرکانس این مقطع به خصوص در ابتدای آن بسیار پایین باشد. در بخش انتهایی آن با توجه به وجود ماسه، افزایش سرعت موج برشی و هم‌چنین افزایش محسوس عدد نفوذ استاندارد، انتظار افزایش فرکانس اساسی می‌رود. این مقطع از ٢ ایستگاه اندازه‌گیری بیست و نه و بیست و هشت عبور می‌کند. این ایستگاه‌ها به‌ترتیب دارای مقادیر فرکانس ٠/٧١ و ٠/٨٦ هرتز هستند. مشاهده می‌شود که شرایط ژئوتکنیکی، نحوهٔ تغییرات فرکانس اندازه‌گیری شده با میکروترمور را تأیید می‌کند. نکته قابل



شکل ٩. مقطع عرضی `D-D

توجه دیگر تأثیر چشم‌گیر سرعت موج برشی و یا در واقع میزان سختی خاک است. با توجه این‌که نوع خاک در انتها تغییرات قابل ملاحظه‌ای نداشته، اما به‌دلیل افزایش سرعت موج برشی (سختی)، فرکانس خاک با افزایش روبرو شده است.

صحت‌سنجی به‌کمک روش معادل خطی

برای مقایسه دقیق‌تر نتایج حاصل از اندازه‌گیری میکروترمور، تحلیل معادل خطی انجام شد. از اطلاعات گمانه‌ها و سرعت موج برشی و هم‌چنین زمین‌لرزه‌های رخ داده در شهر بابل،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

برای انجام این تحلیل استفاده شد. تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار SHAKE2000 صورت پذیرفت. این نوع مقایسه تنها در ایستگاه‌هایی که تمامی اطلاعات لازم را داشته باشند، انجام می‌گیرد. از آن‌جاکه ۳۵ گمانه در ناحیهٔ بررسی شده موجود است، بنابراین برای ۳۵ ایستگاه اندازه‌گیری که در نزدیکی گمانه‌ها واقع شده‌اند، تحلیل معادل خطی صورت پذیرفت. در این تحلیل، پارامترهای دانسیته ρ، مدول برشی G و نسبت میرایی D از پارامترهای اساسی به شمار می‌روند. با توجه به‌این‌که سرعت موج برشی در دسترس است، از این رو، نرم‌افزار به‌صورت خودکار مدول برشی را محاسبه می‌کند. هم‌چنین با انتخاب نمودار مناسب تغییرات ضریب میرایی در مقابل کرنش برشی، رفتار مناسب خاک‌های مختلف شبیه‌سازی می‌شود.

جدول ۲ به مقایسهٔ نتایج حاصل از تحلیل معادل خطی و اندازه‌گیری میکروترمور می‌پردازد. این جدول نشان می‌دهد که دو روش تطابق قابل قبولی دارند. هم‌چنین با بررسی دقیق‌تر مشخص می‌شود که تقریباً در بیش‌تر ایستگاه‌ها، مقادیر فرکانس اساسی حاصل از تحلیل معادل خطی کم‌تر از اندازه‌گیری میکروترمور است. رفتار غیرخطی خاک سبب رخداد چنین شرایطی است. خاک در هنگام زمین‌لرزه رفتار خطی خود را از دست داده و رفتار غیرخطی می‌گیرد و همین موضوع سبب کاهش فرکانس اساسی می‌شود. چنین شرایطی مشابه تحقیقات بور و همکاران (۱۹۹۸) و قلندرزاده و همکاران (۱۳۸۲) است [۲۵].

صحت‌سنجی به‌کمک اطلاعات زمین‌لرزه

چنان‌که پیش‌تر مطرح شد، معتبرترین روش برای مقایسهٔ نتایج میکروترمور، استفاده از داده‌های زمین‌لرزه است، اما به‌دلیل محدود بودن تعداد ایستگاه‌های شتاب‌نگاری و اطلاعات لازم، این نوع مقایسه کم‌تر استفاده می‌شود. برای انجام چنین مقایسه‌ای در محدودهٔ بررسی شده از داده‌های دستگاه شتاب‌نگار موجود در فرمانداری شهر بابل استفاده شده است. دو زمین‌لرزه با این دستگاه شتاب‌نگار ثبت شده و اطلاعات آن در دسترس است، جدول ۳ مشخصات این زمین‌لرزه‌ها را نشان می‌دهد.

برای محاسبهٔ نسبت طیفی H/V زمین‌لرزه در محدودهٔ تحقیقاتی، طیف فوریه نگاشت زمین‌لرزه در سه راستا محاسبه شده است و از دو طیف افقی میانگین‌گیری شده و در نهایت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

با تقسیم میانگین طیف‌های افقی بر طیف عمودی نسبت طیفی H/V زمین‌لرزه به‌دست می‌آید. شکل ۱۰ نسبت طیفی H/V زمین‌لرزه‌های سال ۲۰۰٤ و ۲۰۱۲ را نشان می‌دهند. چنان‌که در

جدول ۲. مقایسهٔ نتایج حاصل از تحلیل معادل خطی و اندازه‌گیری میکروترمور

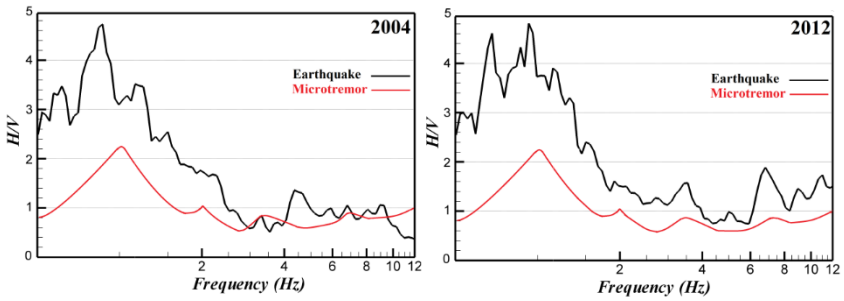
نام ایستگاه	فرکانس اساسی (Hz)		نام ایستگاه	فرکانس اساسی (Hz)	
	میکروترمور	معادل خطی		میکروترمور	معادل خطی
B1	۰/۹٤	۰/۸٦	B31	۰/۹۲	۰/۹۷
B2	۱/۰۵	۰/۹۱	B32	۰/۸۲	۱/۰۱
B4	۰/۸٦	۰/۸۲	B35	۰/۸۲	۰/۷۵
B5	۰/۹۸	۰/۹٦	B36	۰/۸٦	۰/۸٦
B7	۰/۹۱	۰/۹٤	B37	۰/۸۵	۰/۸۰
B11	۷/۰۵	٦/۵۹	B39	۱/۰٦	۰/۹۷
B12	۰/٦۵	۰/۷۱	B42	۰/۸۱	۰/۷۲
B15	۰/۸۸	۰/۸۳	B43	۰/۹۸	۰/۹۵
B16	۷/۳۱	٦/۸۵	B44	۰/۹۱	۰/۹۰
B18	۷/۳۵	٦/۹٤	B45	۰/۹۲	۰/۸۳
B19	۱/۰۱	۰/۹۹	B50	۱/۱۱	۱/۰۱
B21	۰/۸٦	۰/۸۲	B52	۰/۹۲	۰/۸۸
B22	۰/۹۰	۰/۸۵	B53	۰/۹۱	۰/۹۵
B23	۰/۸۳	۰/۸۲	B54	۰/۸۷	۰/۸۳
B25	۰/۹۲	۰/۹۷	B56	۰/۸۳	۰/۷۹
B26	۰/۹۳	۰/۸۲	B57	۸/۳۳	۷/۸۸
B27	۰/۹۵	۰/۸٤	B58	۷/۷۸	۷/۵٦
B28	۰/۸٦	۰/۸۱			

جدول ۳. مشخصات زمین‌لرزه‌های ثبت شده در شهر بابل

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	تاریخ وقوع	ساعت وقوع	ژرفای کانونی (کیلومتر)	فاصله رومرکزی (کیلومتر)	بزرگی (ریشتر)
بابل	۵۲/٦۷	۳٦/۵۳	۲۰۰٤/۵/۲۸	۱۲:۳۸:٤٦	۱٦	۱۰۰	٦/٤
بابل	۵۲/٦۷	۳٦/۵۳	۲۰۱۲/۱/۱۱	۱۷:۰۸:۰۰	۱۸	۱۸	۵/۲

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

شکل ۲ مشاهده می‌شود، دستگاه شتاب‌نگار تقریباً در نزدیکی ایستگاه B39 نصب شده است. فرکانس اساسی در این ایستگاه ۱/۰۶ هرتز است و از طرفی فرکانس اساسی در زمین‌لرزه‌های سال ۲۰۰٤ و ۲۰۱۲ به‌ترتیب ۰/۹۰ و ۰/۹۵ هرتز است. از این رو، مشاهده می‌شود که مقدار فرکانس اندازه‌گیری شده با میکروترمور بسیار نزدیک به مقادیر به‌دست آمده با داده‌های شتاب‌نگار است. اندازه‌گیری‌های میکروترمور مربوط به رفتار خطی خاک هستند و هنگام رخداد زمین‌لرزه خاک رفتار خطی خود را از دست داده و رفتار غیرخطی می‌گیرد، بنابراین اثرات غیرخطی سبب کاهش مختصر در فرکانس اساسی به طرف فرکانس‌های پایین‌تر می‌شوند. در نتیجه کم‌تر بودن میزان فرکانس اساسی در زمین‌لرزه‌ها نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده با میکروترمور کاملاً منطقی است. تنها در سطح دامنه‌ی ارزیابی شده دو روش تفاوت وجود دارد، که این تفاوت با توجه به بحث‌های گذشته (عدم اعتبار زیاد ضریب تقویت ارتعاش محاسبه شده با میکروترمور) قابل پیش‌بینی بوده است.



شکل ۱۰. نسبت طیفی H/V زمین‌لرزه‌های سال ۲۰۰٤ و ۲۰۱۲

بحث و بررسی

در این بخش، نتایج حاصل از این پژوهش با آیین‌نامه ۲۸۰۰ مقایسه می‌شود. یکی از مواردی که در آیین‌نامه ۲۸۰۰ بسیار حائز اهمیت است، ضریب شکل طیف طرح (B_1) است. ضریب شکل طیف طرح، بزرگ‌نمایی خاک در پریودهای مختلف را نشان می‌دهد. شهر بابل طبق دسته‌بندی آیین‌نامه ۲۸۰۰ در پهنه با خطر زمین‌لرزه زیاد قرار دارد و بخش وسیعی از خاک آن، نوع IV (خاک متوسط تا نرم) است [۳۱]. با بررسی و مقایسه ضریب تقویت

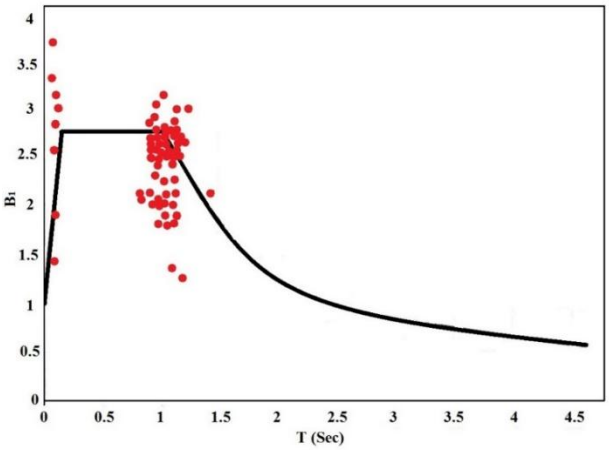
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

ارتعاش حاصل از اندازه‌گیری میکروترمور و ضریب شکل طیف طرح، دقت و کارایی آیین‌نامه ۲۸۰۰ ارزیابی می‌شود. چنان‌که پیش‌تر ذکر شد، مقدار ضریب تقویت ارتعاش به‌دست آمده از میکروترمور چندان قابل اعتماد نیست و برخی از پژوهش‌گران اعتقاد دارند، این مقدار باید به‌عنوان حداقل ضریب تقویت ارتعاش در نظر گرفته شود. شکل ۱۱ مقدار ضریب تقویت ارتعاش به‌دست آمده از اندازه‌گیری میکروترمور را در برابر ضریب شکل طیف طرح ارائه شده در آیین‌نامه ۲۸۰۰ برای شهری با خطر زمین‌لرزه زیاد و خاک نوع IV نشان می‌دهد. با بررسی شکل مشخص می‌شود که در برخی از ایستگاه‌های اندازه‌گیری، مقدار تقویت بیش از مقدار پیش‌بینی شده در آیین‌نامه ۲۸۰۰ است و این موضوع لزوم انجام تحقیقات ژئوتکنیکی و تعیین نوع خاک به‌طور دقیق‌تر را روشن می‌سازد.

با مقایسهٔ فرکانس اساسی به‌دست آمده از این پژوهش و فرکانس طبیعی سازه‌های مختلف در نواحی گوناگون شهر، می‌توان سازه‌هایی که در خطر تشدید و آسیب جدی قرار دارند را شناسایی کرد. از آن‌جاکه فرکانس اساسی در بیش‌تر نواحی کم‌تر از ۱ هرتز است، بنابراین سازه‌های ۱۰ طبقه و بلندتر در معرض خطر بیش‌تری قرار دارند و چنین موضوعی باید در طراحی سازه‌های جدید و نقشهٔ توسعه شهری مد نظر قرار گیرد.

با بررسی نتایج حاصل از این پژوهش و پژوهش‌های پیشین مانند ارزیابی اثر ساختگاه با استفاده از اندازه‌گیری میکروترمور در شهرهای شیراز، بم، ارومیه و... مشخص می‌شود که این روش در نواحی با شرایط ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی مختلف کاربرد دارد. مقادیر ضریب تقویت ارتعاش به‌دست آمده در این پژوهش، نسبت به پژوهش‌های پیشین کم‌تر است. با توجه به داده‌های ژئوتکنیکی مشخص است که خاک ناحیهٔ بررسی شده آبرفتی و نسبتاً یک‌نواخت است و امپدانس لرزه‌ای قوی در زیر سطح زمین رخ نمی‌دهد، بنابراین مقادیر اندک ضریب تقویت ارتعاش نسبت به شهرهای دیگر منطقی است. تغییرات فرکانس اساسی نیز در این پژوهش کم‌تر از سایر پژوهش‌ها است، که این موضوع نیز با یک‌نواختی شرایط ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی ناحیهٔ بررسی شده توجیه می‌شود. مقادیر فرکانس اساسی نیز نسبت به سایر پژوهش‌ها کم‌تر است. این شرایط ناشی از وجود امپدانس لرزه‌ای در اعماق زیاد است، زیرا در سایر پژوهش‌ها سنگ بستر و یا خاک سخت در اعماق سطحی وجود دارد و این موضوع

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]



شکل ١١. مقایسهٔ ضریب تقویت ارتعاش و ضریب شکل طیف طرح آیین‌نامه ٢٨٠٠

سبب افزایش فرکانس اساسی در آن مناطق می‌شود. لازم به ذکر است که بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که مقادیر فرکانس اساسی به‌دست آمده از روش معادل خطی معمولاً کم‌تر از مقادیر حاصل از اندازه‌گیری خردلرزه است که چنین شرایطی در این پژوهش نیز رخ داد. به‌طورکلی جواب‌های به‌دست آمده از این پژوهش در تطابق خوبی با نتایج پژوهش‌های پیشین قرار دارد [٣٢]، [٣٣]، [٣٤]، [٣٥].

نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای ارزیابی اثر ساختگاه و تخمین خصوصیات جنبش نیرومند زمین در شهر بابل، اندازه‌گیری میکروترمور در ٦٠ ایستگاه انجام گرفت. داده‌ها بر اساس روش ناکامورا پردازش شدند و به‌کمک این روش فرکانس اساسی، ضریب تقویت ارتعاش و نسبت طیفی H/V در ناحیهٔ بررسی شده محاسبه و نقشه‌های ریزپهنه‌بندی ارائه شد. در ادامه، برای ارزیابی دقت و کارایی این روش، نتایج با داده‌های ژئوتکنیکی موجود در ناحیهٔ تحقیقاتی، روش عددی (معادل خطی) و اطلاعات شتاب‌نگار نصب شده در فرمانداری شهر بابل مقایسه گردیدند. خلاصهٔ نتایج به‌دست آمده بدین شرح است:

١. مقدار بیشینه و کمینهٔ فرکانس اساسی در این پژوهش به‌ترتیب ١١/٤ و ٠/٦٥ هرتز است. هم‌چنین مقدار بیشینه و کمینهٔ ضریب تقویت ارتعاش به‌ترتیب ٣/٧١ و ١/١٩ محاسبه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

شده است. علاوه بر این، با بررسی نتایج مشاهده می‌شود که بخش عمده‌ای از خاک شهر بابل دارای فرکانس اساسی کم‌تر از ۱ هرتز است که این موضوع با شرایط ژئوتکنیکی هم‌خوانی دارد.

۲. با توجه به ارزیابی نتایج ۷ مقطع عرضی ترسیم شده می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات فرکانس‌های اندازه‌گیری شده با میکروترمور تطابق قابل قبولی با شرایط ژئوتکنیکی ناحیهٔ تحقیقاتی دارد (در مقاله نتایج ۳ پروفیل ارائه شد). به‌عبارت دیگر، این روش برای ارزیابی خصوصیات جنبش نیرومند زمین و اثر ساختگاه در شهر بابل مناسب است. هم‌چنین مشاهده شده که بیش از نوع خاک، سختی خاک عاملی تأثیرگذار در تغییرات فرکانس است.

۳. نتایج روش اندازه‌گیری میکروترمور و معادل خطی تطابق قابل قبولی دارند. تقریباً در بیش‌تر ایستگاه‌ها، مقادیر فرکانس اساسی حاصل از تحلیل معادل خطی کم‌تر از اندازه‌گیری میکروترمور است. رفتار غیرخطی خاک سبب رخداد چنین شرایطی است. خاک در هنگام زمین‌لرزه رفتار خطی خود را از دست داده و رفتار غیرخطی می‌گیرد و همین موضوع سبب کاهش فرکانس اساسی می‌شود.

۴. با استفاده از داده‌های ثبت شده با شتاب‌نگار موجود در فرمانداری شهر بابل، نسبت طیفی H/V دو زمین‌لرزه محاسبه و نتایج آن با نزدیک‌ترین ایستگاه اندازه‌گیری میکروترمور مقایسه شد. با بررسی نسبت‌های طیفی مشاهده شده است که مقدار فرکانس اندازه‌گیری شده با میکروترمور (۱/۰٦ هرتز) بسیار نزدیک به مقادیر به‌دست آمده به‌وسیلهٔ داده‌های شتاب‌نگار است (۰/۹۵ و ۰/۹۰ هرتز). به‌عبارت دیگر، روش معتبر و قابل قبول نسبت طیفی زمین‌لرزه، نتیجهٔ اندازه‌گیری میکروترمور در ایستگاه نزدیک به دستگاه شتاب‌نگار را تأیید می‌کند.

۵. با مقایسهٔ ضریب تقویت به‌دست آمده از تحلیل میکروترمور و ضریب شکل طیف طرح آیین‌نامه ۲۸۰۰ مشخص می‌شود که در برخی از ایستگاه‌های اندازه‌گیری، مقدار تقویت بیش از مقدار پیش‌بینی شده در آیین‌نامه ۲۸۰۰ است و این موضوع لزوم انجام تحقیقات ژئوتکنیکی و تعیین نوع خاک به‌طور دقیق‌تر را روشن می‌سازد. هم‌چنین از آن‌جاکه فرکانس اساسی در بیش‌تر نواحی کم‌تر از ۱ هرتز است، بنابراین سازه‌های ۱۰ طبقه و

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

بلندتر در معرض خطر بیش‌تری قرار دارند و چنین موضوعی باید در طراحی سازه‌های جدید و نقشهٔ توسعهٔ شهری مد نظر قرار گیرد.

منابع

۱. رضائی ص.، "بررسی اثرات ساختگاه و تخمین خصوصیات جنبش نیرومند زمین با استفاده از داده‌های میکروترمور و مقایسهٔ نتایج آن با مدل‌سازی پروفیل خاک (مطالعهٔ موردی: شهر بابل) "، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی بابل (۱۳۹۲).

2. Choobbasti A. J., Rezaei S., Farrokhzad F., Heidarzadeh Azar P., "Evaluation of site response characteristics using nonlinear method (Case study: Babol, Iran)", Frontiers of Structural and Civil Engineering, Vol. 8(1) (2014) 69-82.

3. Rezaei S., Choobbasti A. J., "Liquefaction assessment using microtremor measurement, conventional method and artificial neural network (Case study: Babol, Iran)", Frontiers of Structural and Civil Engineering, Vol. 8 (3) (2014) 292-307.

4. Del Gaudio V., Muscillo S., Wasowski J., "What we can learn about slope response to earthquakes from ambient noise analysis: an overview", Engineering Geology, Vol. 182 (2014) 182-200.

5. Panzera F., Lombardo G., Rigano R., "Evidence of topographic effects through the analysis of ambient noise measurements", Seismological Research Letters, Vol. 82 (2011) 413-419.

6. Molnar S., Ventura C. E., Boroschek R., Archila M., "Site characterization at Chilean strong-motion stations: comparison of downhole and microtremor shear-wave velocity methods", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 79 (2015) 22-35.

7. Singh A. P., "Seismic hazard evaluation in Anjar city area of western India: microtremor array measurement", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 71 (2015) 143-150.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

8. Guo Z., Aydin A., Kuszmaul J. S., "Microtremor recordings in northern Mississippi", Engineering Geology, Vol. 179 (2014) 146-157.
9. Mundepi A. K., Galiana-Merino J. J., Asthana A. K. L., Rosa-Cintas S., "Soil characterizations in Doon Valley (north west Himalaya, India) by inversion of H/V spectral ratios from ambient noise measurements", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 77 (2015) 309-320.
10. Nakamura Y., "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface", Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, Vol. 30 (1989) 25-33.
11. Chavez-Garcia F. J., Kang T. S., "Lateral heterogeneities and microtremors: limitations of HVSR and SPAC based studies for site response", Engineering Geology, Vol. 174 (2014) 1-10.
12. Rezaei S., Choobbasti A. J., Kutanaei S. S., "Site effect assessment using microtremor measurement, equivalent linear method, and artificial neural network (case study: Babol, Iran)", Arabian Journal of Geosciences, Vol.8 (2015) 1453-1466.
13. Choobbasti A. J., Rezaei S., Farrokhzad F., "Evaluation of site response characteristics using microtremors", Gradevinar, Vol. 65 (2013) 731-741.
14. Choobbasti A. J., Rezaei S., Naghizadeh M., "Liquefaction assessment by microtremor measurements in Babol city", Proceedings of fifth international conference- GEOMATE2015 Geotechnic, Construction Materials and Environment Osaka, Japan (2015).
15. Burjanek J., Fah D., Pischiutta M., Rovelli A, Calderoni G., Bard P. Y., "NERA-JRA1 working group. Site effects at sites with pronounced topography: overview & recommendations", Research for EU project NERA (2014).
16. Jongmans D., Baillet L., Larose E., Bottelin P., Mainsant G., Chambon G., Jaboyedoff M., "Application of ambient vibration techniques for

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

monitoring the triggering of rapid landslides", Engineering Geology for Society and Territory. Springer (2015).

17. Kockar M. K., Akgun H., "Evaluation of the site effects of the Ankara basin, Turkey", Journal of Applied Geophysics, Vol. 83 (2012) 120-134.
18. Rezaei S., Choobbasti A. J., "Application of the microtremor measurements to a site effect study", Earthquake Sciences, DOI 10.1007/s11589-017-0187-2 (2017)
19. Navarro M., García-Jerez A., Alcalá F. J., Vidal F., Enomoto T, "Local site effect microzonation of Lorca town (SE Spain)", Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 12(5) (2014) 1933-1959.
20. Konno K., Omachi T., "Ground motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremors", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 88(1) (1998) 228-241.
21. Lachet C., Bard P. Y., "Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique", Journal of Physics of the Earth, Vol. 42(5) (1994) 377-397.
22. Fäh D., Kind F., Giardini D., "A theoretical investigation of average H/V ratios",Geophysical Journal International, Vol. 145 (2) (2001) 535-549.

۲۳. رضائی ص.، "ارزیابی زمین‌لغزش با استفاده از تفسیر داده‌های خردلرزه و ژئوالکتریک"، پروپوزال دکتری، دانشگاه صنعتی بابل (۱۳۹۵).

24. Mukhopadhyay S., Bormann P., "Low cost seismic microzonation using microtremor data: an example from Delhi, India", Journal of Asian Earth Sciences, Vol. 24 (2004) 271-280.
25. Gue´ Guen P., Cornou C., Garambois S. P., Banton J., "On the limitation of the H/V spectral ratio using seismic noise as an exploration tool: application to the Grenoble valley (France), a small apex ratio basin", Pure and Applied Geophysics, Vol. 164 (2007) 115-134.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]

26. Teves-Costa P., Matias L., Bard P. Y., "Seismic behavior estimation of thin alluvium layers using microtremor recordings", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 15 (1996) 201-209.
27. Purnachandra Rao, N., Rabi Kumar M., Seshunarayana T., Shukla A. K., Suresh G., Pandey Y., Dharma Raju R., Pimprikar S. D., Chandra D., Kalpna G., Mishra P. S., Harsh G., "Site amplification studies towards seismic microzonation in Jabalpur urban area, central India", Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 36 (2011) 1247-1258.
28. Pilz M., Parolai S., Bindi D., Saponaro A., Abdybachaev U., "Combining seismic noise techniques for landslide characterization", Pure and Applied Geophysics, Vol. 171 (2014) 1729-1745.
29. Matassoni L., Fiaschi A., Silengo M. C., Lotti A., Saccorotti G., "Preliminary seismic microzonation in a mountain municipality of Tuscany (Italy)", Open Geosciences, Vol. 7 (2015) 559-571.
30. Bour M., Fouissac D., Dominique P., Martin C., "On the use of microtremor recordings in seismic microzonation", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 17 (1998) 465-474.

٣١. کمیتهٔ دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، "آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ٢٨٠٠ (ویرایش چهارم) "، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (١٣٩٣).
٣٢. قلندرزاده ع.، معتمد ر.، "اندازه‌گیری‌های میکروترمور ابزاری مناسب در مطالعات پاسخ ساختگاه"، نشریهٔ دانشکدهٔ فنی، ٣٨، (١٣٨٣) ٧٩٠-٧٧٧.
٣٣. زارع م.، قیطانچی م.ر.، اسدی ف.ج.، فریدونی ف.، "بررسی اثر ساختگاه با استفاده از اندازه‌گیری‌های میکروترمور و شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده در گستره شهر شیراز"، اولین کنفرانس بین‌المللی مقاوم‌سازی لرزه‌ای، تبریز (١٣٨٧).
٣٤. قلندرزاده ع.، کاوند ع.، "کاربرد اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای و آرایه‌ای میکروترمور برای ارزیابی اثرات ساختگاهی در شهرهای ارومیه و بم"، اولین همایش ملی مدیریت بحران زلزله در شهرهای دارای بافت تاریخی، یزد (١٣٨٥).
٣٥. قلندرزاده ع.، معتمد ر.، سدیدخوی ا.،" ریزپهنه‌بندی لرزه شهر ارومیه با استفاده از اندازه‌گیری‌های میکروترمور"، چهارمین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران (١٣٨٢).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.4.5.5]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.4.659]