مقایسهٔ تحلیل معادل خطی و غیرخطی در پاسخ ساختگاه (مطالعهٔ موردی طبس)

حامد رجب‌زاده، حمید مهرنهاد؛ دانشگاه یزد

تاریخ: دریافت ۹۴/۱۱/۲۳ پذیرش ۹۵/۰۶/۰۶

چکیده

تأثیرات زمین‌شناسی سطحی بر حرکت‌های لرزه‌ای، قابل قبول و شناخته شده است و این آثار را می‌توان عاملی مهم در جنبش ناشی از زمین‌لرزه قلمداد کرد. بررسی شدت و پراکندگی خرابی‌ها در زلزله‌های دهه‌های اخیر، اهمیت اثرات ساختگاهی و شرایط زمین‌شناسی سطحی را بیش از پیش نمایان ساخته است. از دیدگاه مهندسی اهمیت زلزله‌ها به‌دلیل تأثیراتی است که این زلزله‌ها در سازه‌هایی نظیر سدها، نیروگاه‌ها، پل‌ها، مناطق مسکونی و تأسیسات صنعتی ایجاد می‌کند که در اکثر موارد این سازه‌ها نه در سطح توده‌های سنگی بلکه بر سطح زمین یعنی روی لایه‌های آبرفتی واقع بر سنگ بستر بنا می‌شوند. اثر لایه‌های خاک بر امواج زمین لرزه ماحصل یک فرایند پراکنشی پیچیده است که تحت شرایط پایدار خاک این اثر می‌تواند به‌صورت بزرگ‌نمایی دینامیکی باشد که از آن به‌عنوان تشدید یاد می‌شود. به‌منظور تعیین اثر ساختگاه و تأثیر دادن آن در ویژگی‌های جنبش نیرومند زمین روش‌های متعددی وجود دارد، که از میان آن‌ها روش‌های عددی، کم هزینه‌تر و بازه مکانی بیش‌تری را تحت پوشش قرار می‌دهند و به‌همین دلیل معمولاً از این روش‌ها برای ارزیابی تحلیل پاسخ در برابر ارتعاشات زلزله استفاده می‌شود. در این مقاله سعی شده است با استفاده از داده‌های حاصل از حفاری ۵ گمانه در ساختگاه شهر طبس به بررسی اثر ساختگاه در این شهر و هم‌چنین مقایسه روش‌های عددی تحلیل ساختگاه نظیر تحلیل خطی معادل و غیرخطی برای دوره‌های بازگشت زلزله ۷۵، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال با استفاده از نرم‌افزارهای EERA و NERA پرداخته شود. با جمع‌بندی میزان تقویت و هم‌چنین حداکثر شتاب در سطح زمین می‌توان این نکته را بیان کرد که منطقه

واژه‌های کلیدی: اثر ساختگاه، تحلیل خطی معادل، تحلیل غیرخطی، EERA، NERA

*نویسنده مسئول

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]

دیهشک و نواحی مرکزی شهر طبس بیش‌ترین شرایط تشدید را دارد. از طرف دیگر منطقهٔ جنوب محله سرآسیاب و سپس ناحیهٔ امامزاده بیش‌ترین سختی و کم‌ترین تشدید دارد. براساس پژوهش‌های صورت گرفته، پیشنهاد می‌شود تا برنامه توسعهٔ شهری بیش‌تر به‌سمت امامزاده حسین‌بن‌موسی الکاظم (ع) هدایت شود تا ضمن برخورداری ار ساختگاه مناسب‌تر رعایت فاصله‌داری از زون گسلش نیز اعمال شود. با توجه به برآورد دست بالای EERA و همچنین رفتار غیرخطی خاک برای زلزله با دوره بازگشت بالا (۲۴۷۵ سال) از نرم‌افزار NERA برای تحلیل اثر ساختگاه استفاده شد تا بتوان حداکثر شتاب سطح واقع‌بینانه‌تری را به‌دست آورد.

مقدمه

امواج زلزله با دور شدن از کانون و گذشتن از لایه‌های آبرفتی دست‌خوش تغییر و تحولاتی می‌شوند که عوامل مربوط به لایه‌های آبرفتی واقع بر سنگ بستر تحت عنوان "تأثیر ساختگاه" شناخته می‌شوند [۱]. بیش‌تر شهرها و مناطق پرجمعیت، از دیدگاه زمین‌شناسی روی رسوبات نرم واقع شده‌اند که می‌تواند دامنه امواج لرزه‌ای را در بازهٔ بسامدی خاصی تقویت کنند. از نظر فیزیکی علت اصلی وقوع پدیدهٔ تشدید در رسوبات نرم، گیرافتادن امواج لرزه‌ای به‌دلیل اختلاف امپدانس رسوبات با بستر سنگی زیر آن است. بدین‌دلیل ارزیابی پاسخ زمین یکی از مهم‌ترین مسائل برای شناخت و تحلیل عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها شده است[۲].

پاسخ لرزه‌ای نهشته‌های رسوبی وابسته به لایه‌بندی خاک، ویژگی‌های دینامیکی خاک و ویژگی‌های حرکت ورودی است. بسترهای آبرفتی در محتوای فرکانسی امواج زمین‌لرزه‌ها هنگام عبور امواج از پی سنگ به سطح زمین تأثیر می‌گذارد و فرکانس غالب در سطح زمین با فرکانس غالب در سنگ کف یا پی سنگ زیرسازه‌ها متفاوت می‌شود. این امر برای مهندسان طراح یا محاسب حائز اهمیت است. به‌طوری‌که در صورت تعیین محدوده احتمالی فرکانس و پریود زمین و با شناخت محدوده احتمالی فرکانس سازه‌های طراحی شده ، باید کوشش کرد که از عمل رزونانس یا تشدید بین زمین و سازه پرهیز شود و یا تمهیدات لازم را در طراحی سازه پیش‌بینی و به‌کار گرفت [۳]. تعیین محدودهٔ فرکانس و پریود ساختگاه نیازمند

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]

بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی و شناخت نوع ساختگاه و انجام تحلیل‌های دینامیکی ویژه است [٤].

شهر طبس یک بار با همه سابقه تاریخی‌اش در زلزله سال ۱۳۵۷ به کلی ویران شد. بر این اساس بررسی‌های اثرات ساختگاه شهر طبس امری مهم و ضروری است [٤].

موقعیت زمین‌شناختی و ژئوتکنیکی طبس

طبس شهری است در منطقه‌ای فروافتاده و کم ارتفاع که در کناره کویر لوت در شرق ایران واقع شده است. این شهر در فاصله ٥٤٠ کیلومتری جنوب مشهد و در فاصله ٤٢٠ کیلومتری شمال شرق یزد قرار دارد. این شهر به‌واسطه وجود گسل‌های جوان کواترنری فراوان در اطراف آن، مانند گسل طبس، کلمرد، نای‌بند و چشمه رستم دارای پتانسیل لرزه‌خیزی زیادی است. براساس نتایج پژوهش‌های انجام شده و مقاطع عرضی، گسترهٔ شهر طبس به چهار بخش نهشته‌های درشت‌دانه، توالی لایه‌های ضخیم شن و ماسه‌ی ریزدانه، نهشته‌های غیرچسبنده سیلت و ماسه و نهشته‌های چسبنده سیلت و رس قابل تقسیم است. در گسترهٔ بررسی شده با حرکت از شرق به غرب اندازهٔ ذرات تشکیل‌دهنده آبرفت‌های ساختگاه شهر طبس کاهش می‌یابد [٥].

روش‌های متداول در تحلیل پاسخ زمین

مشخصات ساختگاه می‌تواند با دقت‌های متفاوتی تعیین شود. شاید بتوان در یک دسته‌بندی ساده روش‌ها و دقت‌های مربوط را به سه دسته تقسیم کرد:

أ. روش‌های تئوری و عددی مبتنی بر شناسایی دقیق خصوصیات مکانیکی و دینامیکی لایه‌های رسوب و آنالیز پاسخ ساختگاه (دقت III).

ب. روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری مستقیم (دقت II).

ج. روش‌های آیین‌نامه‌ای (دقت I).

از میان روش‌های مذکور، روش‌های عددی، علاوه بر دقت زیاد، کم هزینه‌تر و بازهٔ مکانی بیش‌تری را تحت پوشش قرار می‌دهند و به‌همین دلیل معمولاً از این روش‌ها برای ارزیابی تحلیل پاسخ در برابر ارتعاشات زلزله استفاده می‌شود [٦]. منظور از روش‌های عددی استفاده

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]

از داده‌های مختلف زمین‌شناسی، ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی برای تبدیل حرکت سنگ بستر به حرکت زمین در مکان دل‌خواه (مثلاً سطح زمین) است. این روش‌ها بسته به رفتار خاک به سه دسته روش‌های خطی، خطی معادل و روش‌های غیرخطی دسته‌بندی می‌شوند [۷]، [۸].

روش خطی در تعیین پاسخ زمین

در این روش رفتار منحنی تنش- کرنش خاک به‌صورت خطی فرض می‌شود. این روش ساده‌ترین راه برای بازسازی عکس‌العمل خاک در اثر رخداد زمین‌لرزه‌ها است و بر پایهٔ مدل ویسکوالاستیک کلوین با استفاده از تابع تبدیل استوار است. مدل کلوین- ویت متداول‌ترین مدل برای مدل‌سازی رفتار خاک است [۲].

روش خطی معادل در تعیین پاسخ زمین

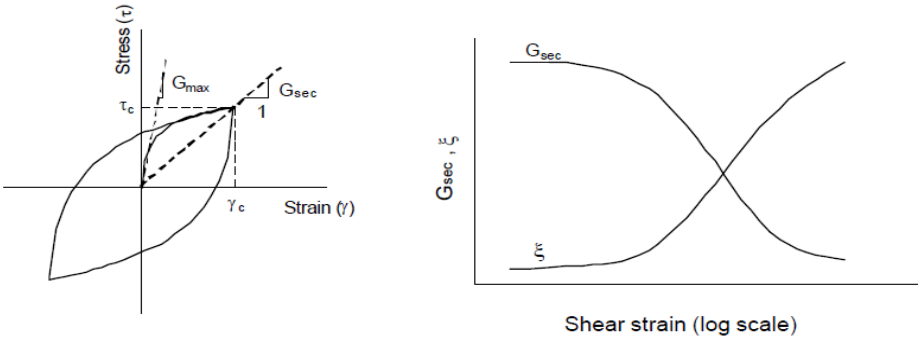
در روش خطی، مدول برشی و ضریب میرایی برای هر لایه خاک ثابت در نظر گرفته می‌شود، در صورتی که در طبیعت مقادیر پارامترهای مذکور، متناسب با تراز کرنش تولید شده در هر لایه است. در روش خطی معادل استفاده از منحنی‌های تغییرات مدول برشی و ضریب میرایی نسبت به کرنش برشی در هر لایه مجزا کاربرد داشته و از این رو نتایج مناسب‌تری مطابق با طبیعت به‌دست می‌آید.

یک نمونه خاک تحت اثر بار سیکلی می‌تواند حلقه هیسترزیسی مطابق آن‌چه‌که در شکل ۱ نشان داده شده، داشته باشد. این منحنی هیسترزیس (منحنی تنش- کرنش تحت بارگذاری و باربرداری) به دو روش قابل توصیف است، روش اول به‌وسیلهٔ خود مسیر واقعی منحنی و روش دوم به‌وسیلهٔ پارامترهایی که شکل عمومی آن را بیان می‌کنند. در بیان کلی دو مشخصه مهم منحنی هیسترزیس شیب و پهنای آن است [۹].

شیب منحنی به سختی خاک بستگی دارد که در حین بارگذاری به‌وسیلهٔ مدول برشی تانژانت (G_{tan}) در هر نقطه قابل بیان است شکل ۲. بدیهی است که G_{tan} در طول یک سیکل بارگذاری تغییر می‌کند، لیکن مقدار میانگین آن در طول یک حلقه کامل، تقریباً معادل مدول برشی سکانت است:

$$G_{tan} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \qquad (۱)$$

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]



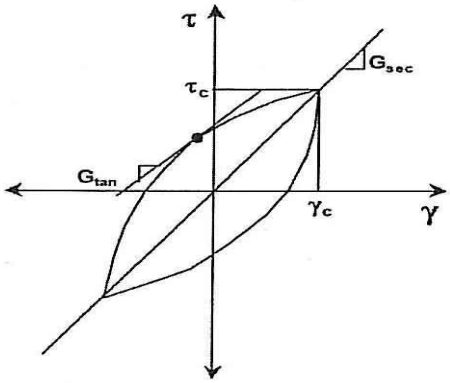
ب الف

شکل ۱. مدل خطی معادل الف) منحنی هیسترزیس تنش- کرنش ب) تغییرات مدول برشی سکانت و نسبت میرایی با دامنه کرنش برشی [۹]

که در آن τ_c و γ_c به‌ترتیب دامنه‌های تنش و کرنش برشی هستند. G_{sec} شیب عمومی منحنی هیسترزیس را بیان می‌کند. پهنای منحنی هیسترزیس، وابسته به سطحی است که به‌عنوان شاخص از استهلاک انرژی به‌وسیلهٔ ضریب میرایی قابل بیان است.

$$\varepsilon = \frac{W_D}{4\pi W_S} = \frac{1}{2\pi}\frac{A_{loop}}{G_{sec}\gamma_c^2} \qquad (۲)$$

A_{loop} سطح منحنی هیسترزیس هستند.

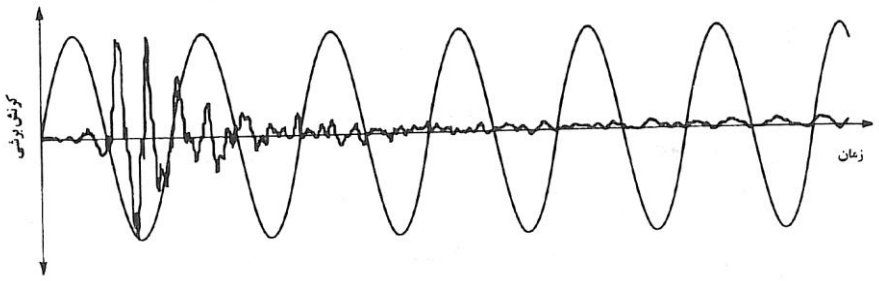


شکل ۲. مدول برشی سکانت (G_{sec}) و تانژانت (G_{tan})

چنان‌که قبلا نیز به آن اشاره شد در این روش باید مقادیر پارامترهای مذکور متناسب با تراز کرنش تولید شده در هر لایه تعیین شود. به هرحال، تاریخچه زمانی کرنش برشی برای یک حرکت نمونه زلزله با یک دامنهٔ ماکزیمم که تنها در اثر تعداد کمی نوسانات غیرعادی ثبت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]

شده باشد خیلی غیرمتعارف است. شکل ۳ تاریخچهٔ زمانی هارمونیک (همانند یک نمونه آزمایشگاهی) و هم‌چنین تاریخچه زمانی گذرا (مانند یک زلزلهٔ واقعی) را که کرنش برشی ماکزیمم سیکلی یک‌سان دارند نشان می‌دهد. گرچه مقادیر کرنش ماکزیمم هر دو حرکت یک‌سان است، بدیهی است که رکورد هارمونیک مبین شرایط بارگذاری شدیدتری نسبت به رکورد گذرا است. در نتیجه معمول این است که رکورد گذرا را بر حسب"کرنش برشی موثر" که به‌صورت تجربی مقداری بین ۵۰ تا ۷۵ درصد کرنش برشی ماکزیمم توصیه شده، در نظر می‌گیرند. هر چند پاسخ محاسبه شده به این درصد حساس نیست اما کرنش برشی مؤثر اغلب ٦٥ درصد کرنش ماکزیمم در نظر گرفته می‌شود [۱۰].



شکل ۳. دو تاریخچهٔ زمانی کرنش برشی با کرنش‌های برشی ماکزیمم معادل آن‌ها [۱۰]

از آن‌جاکه تراز کرنش محاسبه شده به مقادیر خواص خطی معادل بستگی دارد، به‌منظور اطمینان از این‌که خواص استفاده شده در تحلیل، با تراز کرنش محاسبه شده سازگاری دارد کاربرد یک روند تکراری ضروری است. براساس شکل ٤ روند تکراری بدین‌صورت است:

تخمین اولیه G و ε برای هر لایه. مقادیر اولیه تخمین زده شده متناظر با همان تراز کرنش هستند، غالباً برای تخمین اولیه ترازهای پایین کرنش انتخاب می‌شوند.

مقادیر G و ε تخمین زده شده برای محاسبه پاسخ زمین شامل تاریخچه زمانی کرنش برشی برای هر لایه به‌کار می‌روند.

کرنش برشی موثر در هر لایه از کرنش برشی ماکزیمم در تاریخچه زمانی کرنش برشی بدست می‌آید. برای لایه j:

$$\gamma_{effj}^{i} = R_{\gamma}\gamma_{maxj}^{i} \qquad (۳)$$

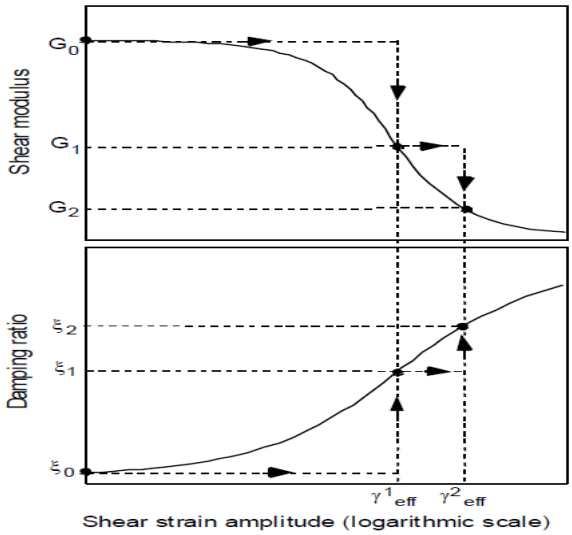
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]

که در این رابطه زیرنویس‌ها به شماره تکرار باز می‌شود و R_γ نسبت کرنش برشی مؤثر به کرنش برشی ماکزیمم است. R_γ به بزرگای زلزله بستگی داشته و از رابطهٔ (٤) محاسبه می‌شود.

$$R_\gamma = \frac{M-1}{10} \qquad (٤)$$

از این کرنش برشی مؤثر، مقادیر خطی معادل جدید، G^{i+1} و ε^{i+1} برای تکرار بعدی انتخاب می‌شوند.

گام‌های ۲ تا ٤ زمانی که اختلاف میان مقادیر محاسبه شده مدول برشی و ضریب میرایی در دو تکرار متوالی کم‌تر از مقدار معینی در همهٔ لایه‌ها شوند، تکرار می‌شود شکل ٤ اگر چه هم‌گرایی مطلق تضمین نمی‌شود اما معمولاً پس از سه تا پنج بار تکرار اختلاف کم‌تر از ۵ الی ۱۰ درصد خواهد شد [۲]، [٤].



شکل ٤. تکرار مدول برشی و نسبت میرایی با کرنش برشی در تحلیل خطی معادل [۷]

اگر چه روش تکرار در جهت حصول خصوصیات سازگار با کرنش خاک روشی مبتنی بر رفتار غیرخطی خاک است، اما یادآوری این نکته مهم است که روش‌های پاسخ پیچیده خاک هنوز مبتنی بر تحلیل خطی هستند. خصوصیات سازگار با کرنش خاک در طول مدت زلزله ثابت هستند بدون توجه به این‌که کرنش‌ها در یک زمان به‌خصوص بزرگ یا کوچک خواهند

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]

بود این روش قابلیت ارائه تغییرات سختی خاک که واقعاً حین زلزله اتفاق می‌افتد را ندارد [۹]، [۱۰].

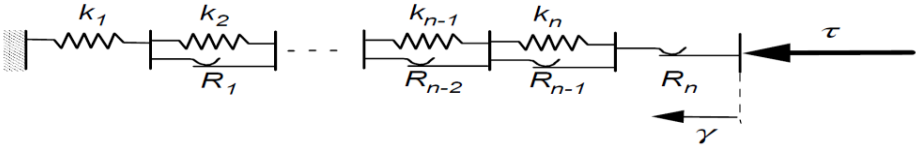
پارامترهای G_{sec} و ε غالباً به‌عنوان پارامترهای خطی معادل مصالح نامیده می‌شوند. برای نوع مشخصی از تحلیل‌های پاسخ زمین، این پارامترها مستقیماً برای توصیف رفتار خاک به‌کار می‌روند، سایر تحلیل‌ها به مسیر واقعی منحنی هیسترزیس نیاز دارند.

روش غیرخطی در تعیین پاسخ زمین

روش دیگر برای تعیین لرزه‌ای زمین، تحلیل پاسخ غیرخطی واقعی توده خاک با استفاده از انتگراسیون مستقیم عددی در حوزه زمان است، با انتگرال‌گیری از معادله حرکت در گام‌های کوتاه زمان، مدل تنش–کرنش غیرخطی را می‌توان حل کرد.

اغلب برنامه‌های کامپیوتری تحلیل پاسخ غیرخطی یک بعدی زمین که در دسترس هستند رفتار تنش-کرنش خاک را با مدل‌های تنش-کرنش سیکلی مانند مدل هیپربولیک (۱۹۷۸)، مدل هیپربولیک اصلاح شده، مدل رمبرگ- اوسگود[1] (۱۹۷۳)، مدل HDCP[2] (۱۹۸۵)، مدل مارتین -داویدنکوف[3] (۱۹۷۸) و مدل نوع ایوان[4] (۱۹۷۷) مشخص می‌کنند [۱۱]، [۱۲].

چنان‌که در شکل ۵ نشان داده شده است. ایوان و امروز[5] (۱۹۶۷) برای مدل کردن منحنی‌های تنش–کرنش غیرخطی استفاده از یک سری از عناصر مکانیکی n، دارای سختی‌های مختلف K_i و مقاومت در برابر لغزش R_i را پیشنهاد دادند. هرافتر[6]، مدل آن‌ها را با عنوان مدل IM نام‌گذاری کرد [۱۱].



شکل ۵. نمایش شماتیک مدل تنش-کرنش استفاده شدهٔ

1. Ramberg-Osgood
2. Hardin-Drnevich-Cundall-Pyke
3. Martin – Davidenkov
4. Iwan
5. Mroz
6. Herafter

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]

Iwan و Mroz (۱۹۶۷)[۱۳]

چنان‌که در شکل ٦ نشان داده شده، زمانی که منحنی تنش-کرنش از قانون شباهت پیروی می‌کند مساحت‌های I_i و J_i به‌ترتیب متناظر با باربرداری از $+\gamma_I$ تا $-\gamma_I$ و در بارگذاری مجدد از $-\gamma_I$ تا، $+\gamma_I$، چهار برابر بزرگ‌تر از مساحت A_i زیر منحنی تنش-کرنش برای بارگذاری از ۰ تا γ_I هستند. مساحت‌های A_i، I_i و J_i به‌صورت (۵) تعریف می‌شوند:

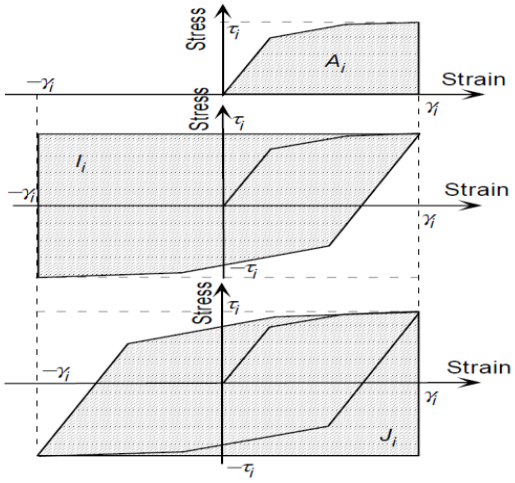
$$A_i = \int_0^{\gamma_i} \tau d\gamma \quad I_i = \int_{\gamma_i}^{-\gamma_i} (\tau_i - \tau) d\gamma = -4A_i \;\; J_i = \int_{-\gamma_i}^{\gamma_i} (\tau_i + \tau) d\gamma \quad = 4A_i \tag{۵}$$

هنگامی که منحنی تنش-کرنش تکه‌های خطی است و توسط n نقطه گسسته (γ_I, G_I) تولید شود، A_i می‌شود:

$$A_1 = 0 \quad A_i = \frac{1}{2}\sum_{j=2}^{i} \left(G_j\gamma_j + G_{j-1}\gamma_{j-1}\right)\left(\gamma_j - \gamma_{j-1}\right) \quad i = 2, \dots, n \tag{٦}$$

و انرژی تلف شده در طول یک چرخه کامل می‌شود:

$$W_{d_i} = 8A_i - 4G_i\gamma_i^2 \quad i = 1, \dots, n \tag{۷}$$



شکل ٦. مساحت‌های A_i، I_i و J_i برای محاسبه حلقه هیسترتیک مدل IM در طول چرخه بارگذاری و باربرداری [۱۱]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]

از آن‌جاکه حداکثر انرژی کرنش ذخیره شده در سیستم برابر است با:

$$W_{s_i} = \frac{1}{2} G_i \gamma_i^2 \qquad (۸)$$

نسبت میرایی بحرانی ε_i در کرنش برشی γ_i می‌تواند بیان شود با:

$$\varepsilon_1 = 0 \quad \varepsilon_i = \frac{W_{d_i}}{4\pi W_{si}} = \frac{2}{\pi}\left(\frac{2A_i}{G_i\gamma_i^2} - 1\right) \quad i = 2, \dots, n \qquad (۹)$$

هنگامی که کرنش برشی γ بیش از γ_n باشد مدل IM فرض می‌کند که تنش برشی با مقاومت برشی R_n برابر است. در این حالت مدول سکانت G و نسبت میرایی بحرانی ε می‌شود:

$$G = \frac{R_n}{\gamma} \quad \text{و} \quad \varepsilon = \frac{2}{\pi}\left(\frac{2\left(A_n + R_n(\gamma - \gamma_n)\right)}{R_n\gamma} - 1\right) \text{برای} \gamma > \gamma_n \qquad (۱۰)$$

برای کرنش برشی بسیار بزرگ، مدول سکانت به سمت صفر و نسبت میرایی به سمت $\frac{2}{\pi}$، تمایل دارد.

در مدل IM می‌تواند همان منحنی‌های $G - \gamma$ به‌عنوان مدل خطی معادل اختصاص داده شود. با این حال منحنی‌های نسبت میرایی در مدل IM با استفاده از معادلهٔ (۷) محاسبه می‌شود. آن‌ها نمی‌توانند همانند مدل خطی معادل به‌طور مستقل تعریف شود. به‌طور خلاصه، به مدل IM و مدل خطی معادل می‌توان منحنی $G - \gamma$ یک‌سانی اختصاص داد اما به‌طورکلی منحنی‌های نسبت میرایی مختلفی دارند [۱۲]، [۱۳].

معرفی نرم‌افزارهای بکارگیری شده

خصوصیات برنامه EERA

گروه عمران دانشگاه کالیفرنیای جنوبی در سال ۱۹۹۸، برنامه کامپیوتری EERA[1] را براساس مفاهیم اصلی برنامه مرجع شیک[2] و در فورترن[3] ۹۰ توسعه داد. EERA به معنای تحلیل خطی معادل پاسخ زلزله است. نرم‌افزار EERA به‌علت استفاده از مدول برشی سکانتی به‌جای مدول برشی تانژانتی و نیز نسبت میرایی محیط خاک را محیطی با رفتار خطی معادل در

1. Equivalent-linear Earthquake Response Analysis
2. SHAKE
3. FORTRAN

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]

نظر می‌گیرد. این نرم‌افزار برای تحلیل یک بعدی پاسخ زمین استفاده می‌شود. در واقع EERA پیاده‌سازی مدرنی از مفاهیم شناخته شده تجزیه و تحلیل خطی معادل پاسخ زمین‌لرزه سایت است. این نرم‌افزار با استفاده از تکنیک روابط برگشتی، روابط حاکم بر تعادل دینامیکی محیط را حل کرده و به‌منظور اعمال رفتار خطی معادل، تکنیک تکرار را به‌کار گرفته است. در این نرم‌افزار شتاب‌نگاشت‌های ورودی به‌صورت تاریخچهٔ زمانی با فواصل زمانی مساوی تعریف می‌شوند. هریک از لایه‌های خاک با معرفی نوع بافت (ریزدانه، درشت دانه و سنگ) ضخامت، دانسیته و مقادیر اولیه سرعت موج برشی و نسبت میرایی تعریف میشود [۹].

ورودی‌ها و خروجی‌های EERA تماماً در برنامهٔ صفحه گستردهٔ اکسل[1] گنجانده می‌شود. این برنامه تمام امتیازات اندازه‌گیری دینامیکی و عملیات ماتریسی فورترن ۹۰ مانند نامحدود بودن در تعداد کلی خواص مواد و لایه‌های خاک را داراست. هم‌چنین جابه‌جایی نسبی، سرعت و شتاب را می‌توان در زیر لایه‌ها محاسبه کرد.

خصوصیات برنامه NERA

در سال ۲۰۰۱، اصول پیاده‌سازی استفاده شده برای EERA به NERA[2]، براساس مدل مواد توسعه یافته شده به‌وسیلهٔ ایوان و امروز اعمال شد. NERA به‌معنای آنالیز پاسخ غیرخطی زلزله محل است. NERA همانند EERA از مزایای کامل فورترن ۹۰ و برنامه صفحه گستردهٔ اکسل بهره می‌گیرد [۱۳].

پارامترهای ورودی

با توجه به این‌که پارامترهای زیادی روی بزرگ‌نمایی تأثیر می‌گذارند که عبارتند از: ۱. سرعت موج برشی ۲. ضخامت لایه‌های خاک ۳. دانسیته خاک ٤. ویژگی‌های دینامیکی خاک ۵. مدت زمان لرزش شدید خاک، بررسی و شناخت مناسب از لایه‌های خاک ساختگاه امری مهم است. یکی از روش‌های مرسوم برای این شناخت، حفر گمانه و جمع‌آوری داده‌های مورد

1. EXCEL
2. Nonlinear Earthquake Response Analysis

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]

نیاز است. هدف اولیه از جمع‌آوری داده‌های گمانه‌ای دست‌یابی به جزئی‌ترین پروفیل سرعت موج لرزه‌ای در محل برای آزمایش‌های ویژه منطقه و خصوصیات ماده است. هم‌چنین هدف از به‌دست آوردن داده‌های گمانه‌ای می‌تواند چندگانه باشد به این معنی که، نتایج سرعت لرزه‌ای به‌دست آمده ممکن است برای ارزیابی پیوستگی عمودی و عرضی ماده، تحلیل‌های روان‌گرایی، بررسی‌های تغییر شکل و یا پژوهش‌های مرتبط با تقویت و یا تضعیف حرکت‌های نیرومند زمین استفاده شود [۲].

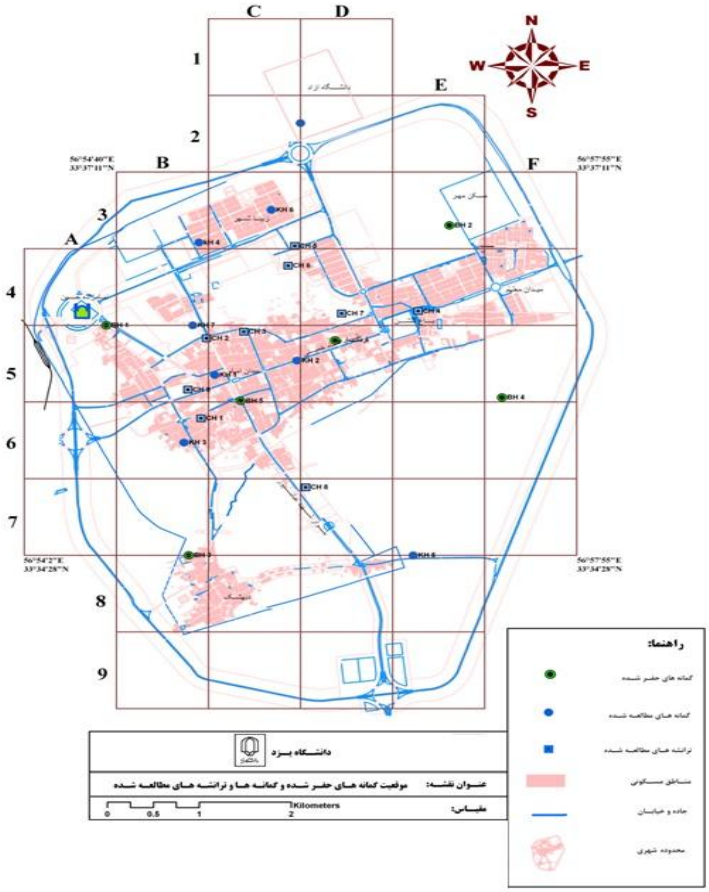
تکنیک‌های گمانه‌ای بیش‌ترین کاربرد را زمانی دارند که تحقیق‌های محلی فاز یک، حاکی از متغیر بودن خواص افقی و به‌ویژه عمودی ماده باشند، زمانی‌که لایه‌هایی با چگالی و یا سختی متغیر در منطقه شناسایی شده و یا در حین بررسی‌های درجا به آن برخورد کنیم، آن‌گاه آزمایش‌های لرزه‌ای درون گمانه‌ای برای تعیین سرعت‌های داخل هر لایه پیشنهاد می‌شود. داده‌های لرزه‌ای درون گمانه‌ای به‌دست آمده، بی‌نظمی‌های پنهان لایه‌ای را که از طریق روش‌های سطحی متعارف قابل شناسایی نیستند تعیین کرده، امکان تفسیر نهایی دیگر داده‌های ژئوفیزیکی سطحی (لرزه‌ای یا الکتریکی) را فراهم آورده و ارتباط تئوریک و عملی آن را با دیگر پارامترهای ژئوتکنیکی ماده معلوم می‌کند [۲]. در این پژوهش به‌منظور شناسایی چگونگی گسترش رسوبات و تعیین ویژگی‌های دینامیکی لایه‌های خاک در ساختگاه شهر طبس، اطلاعات کامل ژئوتکنیکی و ژئوفیزیکی ۵ گمانه حفاری شده و ترانشه‌های مربوط به پروژه‌های قبلی جمع‌آوری و برای تحلیل استفاده می‌شود شکل ۷ لازم به ذکر است که برای به‌دست آوردن اطلاعات ژئوفیزیکی از آزمایش درون گمانه‌ای استفاده شده است.

منحنی‌های رفتاری:

چنان‌که اشاره شد برای تحلیل در این نرم‌افزارها نیاز به تقسیم‌بندی خاک‌های موجود در هر گمانه است. این تقسیم‌بندی براساس نوع نمودار میرایی و مدول برشی در برابر کرنش صورت می‌گیرد. برای تعیین این نمودارها تحقیق‌های گسترده‌ای انجام شده است. خاک‌های ماسه‌ای و رسی و سنگ دارای سه نوع نمودار میرایی و مدول برشی در برابر کرنش هستند که

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]

در پیش فرض نرم‌افزار ارائه شده است. منحنی‌های به‌کار رفته در این پژوهش منحنی‌های ارائه شدهٔ سید و سان (۱۹۸۹) و ادریس (۱۹۹۰) برای رس، ماسه و سنگ بستر است.



شکل۷. نقشهٔ جانمایی گمانه‌های حفر شده و گمانه‌ها و ترانشه‌های بررسی شده در گستره شهر طبس [٤]

مشخصات خاک

خصوصیات ژئوتکنیکی لایه‌های خاک گمانه‌های حفر شده براساس آزمون ژئوفیزیکی امواج نزولی در جدول‌های ۱ تا ۵ آورده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]

جدول ۱. مشخصات لایه‌های به‌دست آمده در گمانه BH1

لایه	رقوم (متر)	V_p (متر بر ثانیه)	V_s (متر بر ثانیه)
اول	۲ – ۰	۵۲۹	۲۳۳
دوم	۳ – ۲	٦٤۰	۲۸۵,٦
سوم	۵ – ۳	۷۳۸	۳۳۰
چهارم	۸ – ۵	۸٤۹	۳۷۸,۳
پنجم	۱۱ – ۸	۹۲۵	٤۱۱,۵
ششم	۱٦ – ۱۱	۱۰۰۷	٤۵۳
هفتم	۱۸ – ۱٦	۱۰٦۷	٤۸٦,۳
هشتم	۲۷ – ۱۸	۱۱۱٤	۵۱۱,۳
نهم	۲۹ – ۲۷	۱۱۵۷	۵۳٦,٦۳
دهم	۳۵ – ۲۹	۱۱۸٤	۵۵۳,۵

جدول ۲. مشخصات لایه‌های به‌دست آمده در گمانه BH2

لایه	رقوم (متر)	V_p (متر بر ثانیه)	V_s (متر بر ثانیه)
اول	۲ – ۰	٤٦۲	۲۰۹
دوم	٤ – ۲	٦۵۰	۲۹۳
سوم	۵ – ٤	۷۸۷	۳۵٤,۵
چهارم	۷ – ۵	۸۸۰	٤۰۱
پنجم	۸ – ۷	۹٤۷	٤۳۱,۳
ششم	۱۵ – ۸	۱۰۵٤	٤۸۵,۳
هفتم	۲٤ – ۱۵	۱۲۰۱	۵٦۹,۱۳
هشتم	۳۰ – ۲٤	۱۲٦۹	٦۱۰,۲

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]

جدول ۳. مشخصات لایه‌های به‌دست آمده در گمانه BH3

لایه	رقوم (متر)	V_p (متر بر ثانیه)	V_s (متر بر ثانیه)
اول	٤ – ٠	٤٨٣	٢١٧
دوم	٥ – ٤	٦٥٠	٢٩٦,٧
سوم	٧ – ٥	٧٠٥	٣١٤,٤
چهارم	٨ – ٧	٧٢٨	٣١٨,٥٥
پنجم	١٢ – ٨	٧٧٦	٣٣٧
ششم	١٤ – ١٢	٨٣٣	٣٦١,٥
هفتم	٢٠ – ١٤	٨٨٧	٣٨٨
هشتم	٢٢ – ٢٠	٩٣٠	٤١٠,٥
نهم	٣٠ – ٢٢	٩٤٩	٤١٨

جدول ٤. مشخصات لایه‌های به‌دست آمده در گمانه BH4

لایه	رقوم (متر)	V_p (متر بر ثانیه)	V_s (متر بر ثانیه)
اول	٣ – ٠	٨٦٨	٤١٦,٤
دوم	٦ – ٣	١٠٨٨,٥	٥٢٤
سوم	١٠ – ٦	١٢٤٠	٦٠٤,٥٤
چهارم	١١ – ١٠	١٣٠٧	٦٤١,٦
پنجم	١٢ – ١١	١٣١٣,٥	٦٤٢,٧٥
ششم	٢٠ – ١٢	١٣٧١	٦٧٤,٤٢
هفتم	٣٠ – ٢٠	١٤٦١	٧٣٠

جدول ٥. مشخصات لایه‌های به‌دست آمده در گمانه BH5

لایه	رقوم (متر)	V_p (متر بر ثانیه)	V_s (متر بر ثانیه)
اول	٤ – ٠	٤٤٠	١٨٦
دوم	٧ – ٤	٦١٣	٢٦١
سوم	١٢ – ٧	٧٤٦	٣٢٢
چهارم	٢٠ – ١٢	٨٨١	٣٨٩
پنجم	٣٠ – ٢٠	٩٩١	٤٤٧

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]

حرکت ورودی:

مهم‌ترین زمینه‌های تشابه شتاب‌نگاشت‌ها را بیشینه شتاب و محتوای فرکانسی آن‌ها تشکیل می‌دهد. اگر چه شتاب‌نگاشت‌های مختلف را می‌توان از لحاظ بیشینه شتاب با اعمال ضرایب مناسب هم پایه کرد، اما تشابه آن‌ها در محتوی فرکانس امری پیچیده‌تر است که جز با تشابه با مکانسیم گسلش، بزرگی زمین‌لرزه، عمق کانونی، فاصله رومرکزی و غیره به‌دست نمی‌آید. به‌همین سبب در این پژوهش از شتاب نگاشت زلزله سال ۱۳۵۷ طبس شکل ۸ که می‌تواند به‌عنوان بیشینه زلزله باورپذیر در گستره طبس باشد استفاده شده است تا تشابه‌سازی در محتوی فرکانس مورد نیاز نباشد [٤].

با توجه به بررسی‌های تحلیل خطر انجام شده برای منطقهٔ شهری طبس حداکثر شتاب افقی به شرح زیر محاسبه و به‌عنوان مبنای شتاب بر سنگ بستر لرزه‌ای معرفی شده است [۵].

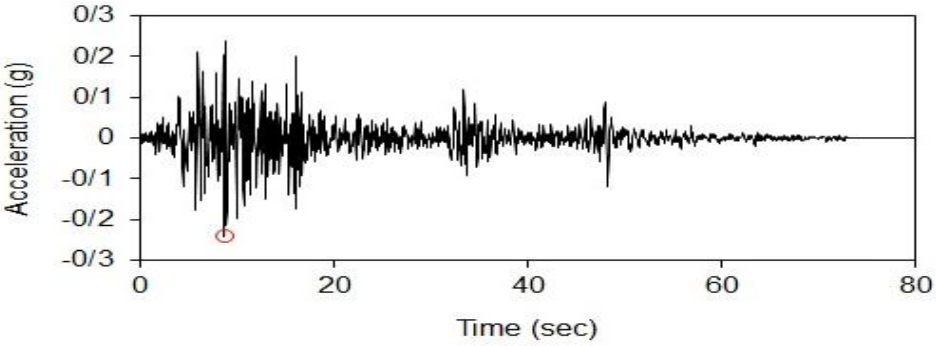
مؤلفه افقی

شتاب بیشینه افقی بر روی سنگ بستر لرزه‌ای با دوره بازگشت ۷۵ سال، معادل با g۰/۲٤ شکل ۹.

شتاب بیشینه افقی بر سنگ بستر لرزه‌ای با دوره بازگشت ٤۷۵ سال، معادل با g۰/۳٦ شکل ۱۰.

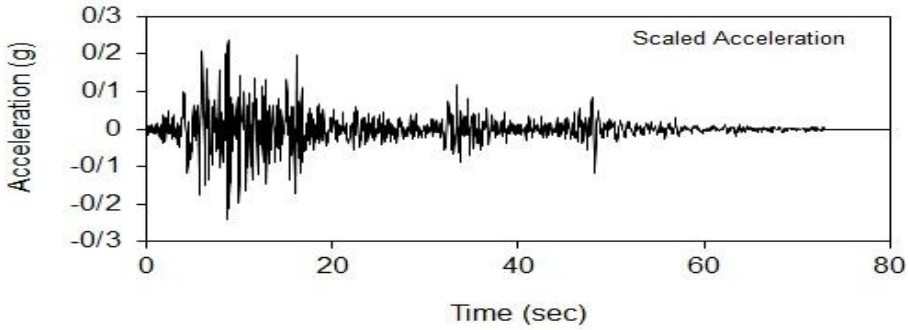
شتاب بیشینه افقی بر سنگ بستر لرزه‌ای با دوره بازگشت ۲٤۷۵ سال، معادل با g۰/۵۰ شکل ۱۱.

برای برآورد مشخصات حرکت نیرومند زمین، به‌ازای زلزله مبنای طرح، یعنی زمین‌لرزه‌های با دورهٔ بازگشت ۷۵، ٤۷۵ و ۲٤۷۵ سال، استفاده شده است.

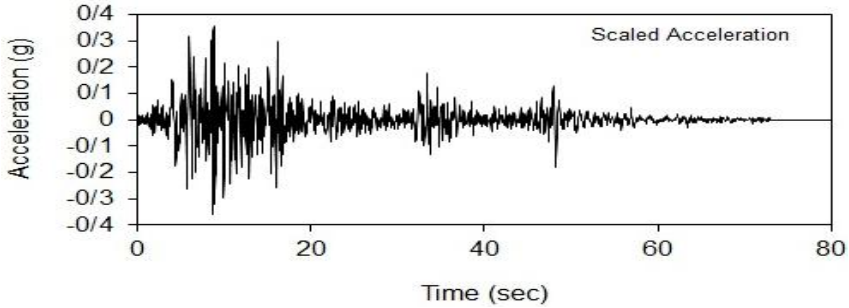


شکل ۸. شتاب‌نگاشت دیهوک-زلزله ۲۵ شهریورماه سال ۱۳۵۷ طبس

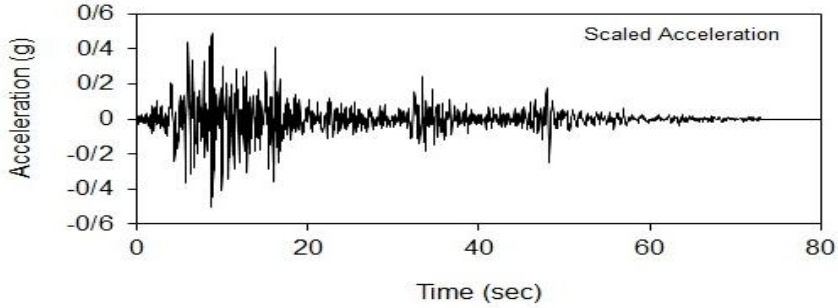
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]



شکل ۹. شتاب‌نگاشت دیهوک-زلزله سال ۱۳۵۷ طبس مقیاس شده برای زلزله‌های با دوره بازگشت ۷۵ سال



شکل ۱۰. شتاب‌نگاشت دیهوک-زلزله سال ۱۳۵۷ طبس مقیاس شده برای زلزله‌های با دوره بازگشت ٤٧٥ سال



شکل ۱۱. شتاب‌نگاشت دیهوک-زلزله سال ۱۳۵۷ طبس مقیاس شده برای زلزله‌های با دوره بازگشت ٢٤٧٥ سال

خروجی تحلیل

نتایج تحلیل‌های صورت گرفته برای هر یک از گمانه‌ها به تفکیک نرم‌افزارهای به‌کارگیری شده و هم‌چنین دوره بازگشت مورد نظر، به‌ترتیب شکل‌های ۱۲ تا ۱۷ و جدول‌های ٦ تا ۸. است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]

جدول‌های ٦ تا ٨ نتایج تحلیل را نشان می‌دهند.

جدول ٦. پارامترهای تقویت و حداکثرشتاب سطح برای زلزله با دوره ۷۵ سال

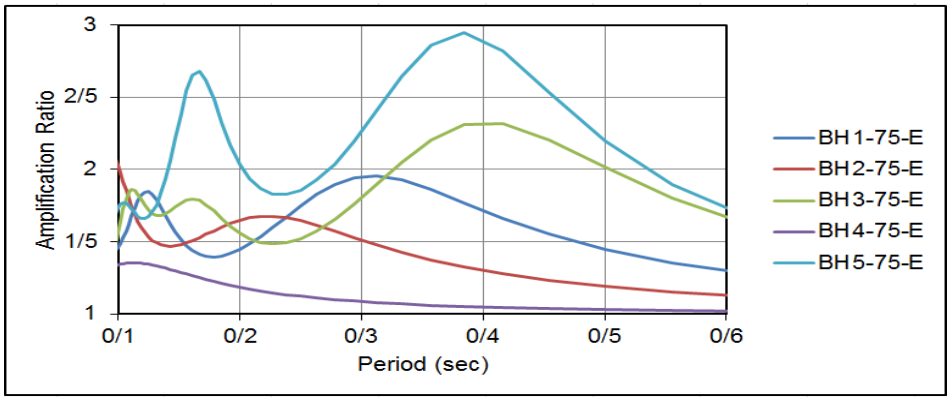
گمانه	۱		۲		۳		٤		٥	
	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N
تقویت	۱,۹٥	۱۰,۲٦	۲,۰۱	۸,٦۹	۲,۳۲	۱٤,۹	۱,۳٦	۳,٥٦	۲,۹٥	۹,۳
حداکثر شتاب سطح	۰,٤۹	۰,٤۲۳	۰,٥٤۷	۰,٤۱٦	۰,٦۱٤	۰,۳٦	۰,٤	۰,۳۲	۰,۷۸	۰,٤۸

جدول ۷. پارامترهای تقویت و حداکثرشتاب سطح برای زلزله با دوره ٤۷٥ سال

گمانه	۱		۲		۳		٤		٥	
	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N
تقویت	۱,۹٤	۹,۷	۲,٥	۷,٤	۲,۳	۹,۱٥	۱,۳٦	۳,۳	۲,۸۸	٦,۲۸
حداکثر شتاب سطح	۰,٦٥۳	۰,٦۰۷	۰,۸٦٥	۰,٦۱۸	۰,۸٤۳	۰,۷٦	۰,٦	۰,٤۲۳	۰,۹۷	۰,٥٤

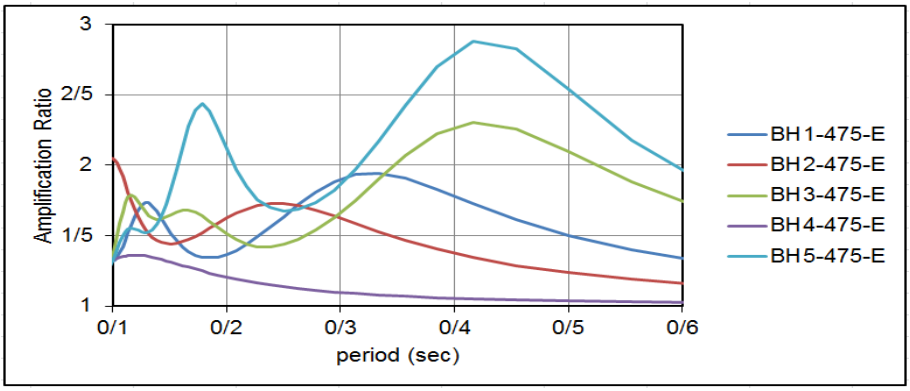
جدول ۸. پارامترهای تقویت و حداکثرشتاب سطح برای زلزله با دوره ۲٤۷٥ سال

گمانه	۱		۲		۳		٤		٥	
	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N
تقویت	۱,۹۲	۷,۰٦	۲	۷,۸٥	۲,۲۸	۹,۷	۱,۳۷	۳,۹	۲,۹	۷,۸
حداکثر شتاب سطح	۰,۷۸۱	۰۷۹۸	۱,۲۱	۰,۸	۱,۰۲	۰,۹	۰,۸٤	۰,۷۱	۱,۰۳	۰,۷۱

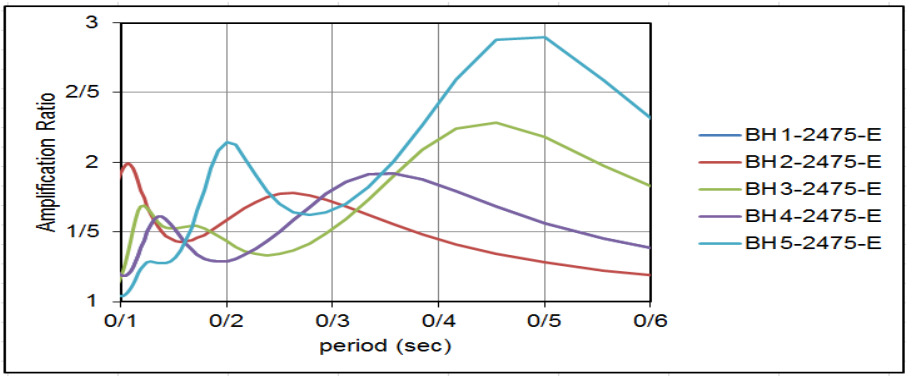


شکل ۱۲. طیف تقویت پروفیل‌های انتخابی با دوره بازگشت ۷۵ سال خروجی برنامه ارا

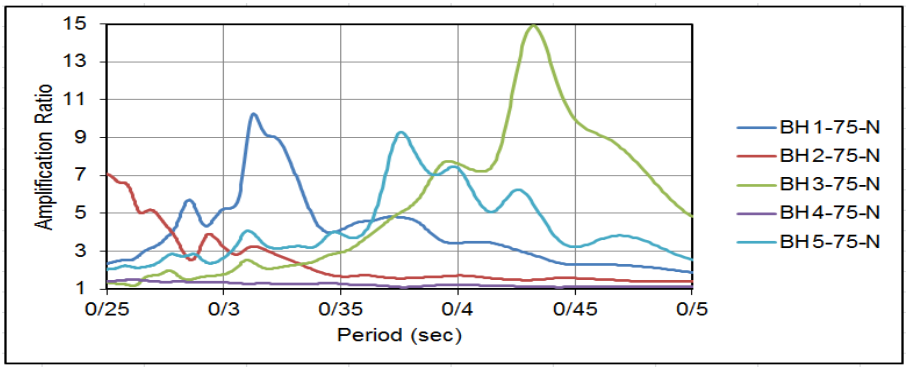
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]



شکل ۱۳. طیف تقویت پروفیل‌های انتخابی با دوره بازگشت ٤٧٥ سال خروجی برنامه ارا

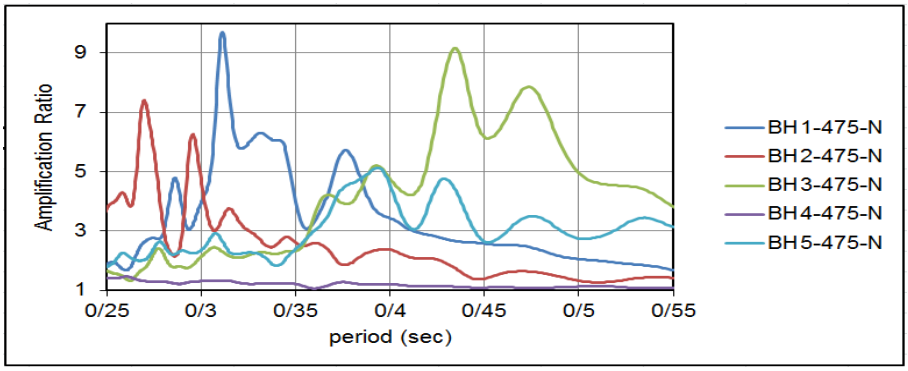


شکل ١٤. طیف تقویت پروفیل‌های انتخابی با دوره بازگشت ٢٤٧٥ سال خروجی برنامه ارا

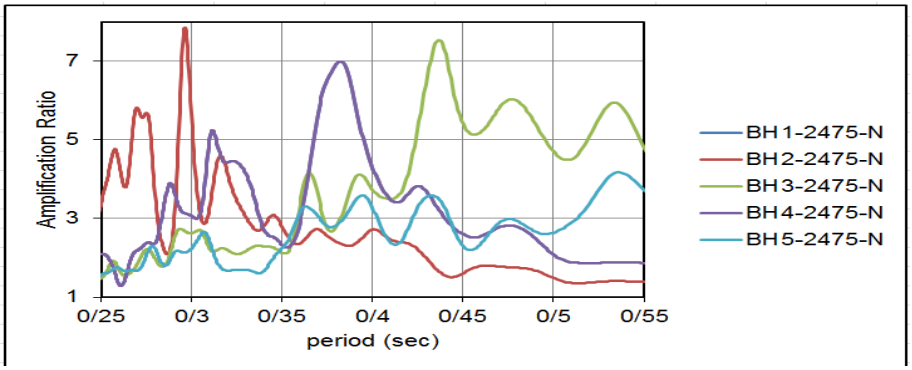


شکل ۱۵. طیف تقویت پروفیل‌های انتخابی با دوره بازگشت ۷۵ سال خروجی برنامه نرا

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]



شکل ۱۶. طیف تقویت پروفیل‌های انتخابی با دوره بازگشت ۴۷۵ سال خروجی برنامه نرا



شکل ۱۷. طیف تقویت پروفیل‌های انتخابی با دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال خروجی برنامه نرا

نتیجه‌گیری

حداکثر شتاب سطح و حداکثر سرعت نسبی در گمانه BH4 نسبت به سایر گمانه‌ها در هر دو نرم‌افزار کم‌تر است که علت آن تقویت کم در این گمانه و هم‌چنین نبودن لایه‌های رسی است. با توجه به‌این‌که عمق سنگ بستر در گمانه BH3، ۵۰ متر بوده و از سایر گمانه‌ها بیش‌تر است، در نتیجه دورهٔ حداکثر شتاب در این گمانه برای هر دو نرم‌افزار به‌کارگیری شده از سایر گمانه‌ها بیش‌تر است که مهر تأییدی بر این مطلب است که با افزایش ضخامت و سستی خاک داوره‌ای که در آن حداکثر شتاب روی می‌دهد افزایش می‌یابد. هم‌چنین با میانگین‌گیری از سرعت موج برشی در این گمانه این مطلب روشن می‌شود که خاک این گمانه جزء سست‌ترین خاک‌ها در بین خاک گمانه‌های بررسی می‌شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]

با جمع‌بندی میزان تقویت و هم‌چنین حداکثر شتاب در سطح زمین می‌توان این نکته را بیان کرد که منطقهٔ دیهشک و نواحی مرکزی شهر طبس بیش‌ترین شرایط تشدید را دارند. از طرف دیگر منطقهٔ جنوب محلهٔ سرآسیاب و سپس ناحیهٔ امامزاده بیش‌ترین سختی و کم‌ترین تشدید را دارد. براساس بررسی‌های انجام شده پیشنهاد شد تا برنامهٔ توسعه شهری بیش‌تر به سمت امامزاده حسین‌بن‌موسی‌الکاظم (ع) هدایت شود تا ضمن برخورداری از ساختگاه مناسب‌تر رعایت فاصله‌داری از زون گسلش نیز اعمال شود. ساخت و ساز در سایر نواحی شهری نیز باید با در نظر گرفتن پارامترهای تقویت و شتاب ماکزیمم ساختگاه انجام شود. نحوهٔ کاربرد و تفسیر هر یک از این روش‌ها نیاز به داشتن اطلاعاتی در باب فرضیات بستر، تفهیم نحوهٔ عملکرد هر روش و تشخیص محدودیت‌های آن‌ها دارد. هیچ‌کدام را نمی‌توان به‌صورت ریاضی قوی و یا دقیق در نظر گرفت، اما به‌علت رفتار غیرخطی خاک در دوره زلزله ٢٤٧٥ سال و پیش‌بینی شتاب حداکثر سطح زیاد با EERA بهتر است از نرم‌افزار NERA به‌منظور تحلیل غیرخطی پاسخ ساختگاه استفاده شود.

منابع

١. یزدان‌پرست م.، "بررسی اثر ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی بر بزرگ‌نمایی لرزه‌ای ساختگاه (مطالعه موردی)"، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد عمران، گرایش خاک و پی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی(ره) (آذرماه ١٣٩١).

٢. صحرائی م.، "بررسی مشخصات دینامیکی خاک منطقهٔ میبد با استفاده از نتایج مطالعات ژئوتکنیک لرزه‌ای"، عمران-خاک و پی، دانشگاه یزد (١٣٨٩).

٣. دهقانی ز.، "بررسی پتانسیل تشدید خاک ساختگاه شهر اردکان با استفاده از روش ژئوفیزیکی امواج نزولی"، پایان نامهٔ کارشناسی ارشد، زمین‌شناسی‌مهندسی، دانشگاه یزد (١٣٩٠).

٤. عصاری م.، "بررسی خصوصیات زمین‌شناسی‌مهندسی ساختگاه با استفاده از روش ژئوفیزیکی امواج نزولی در منطقه شهری طبس"، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، زمین‌شناسی‌مهندسی، دانشگاه یزد (١٣٨٧).

٥. ادیب ا.، مهرنهاد ح.، "گزارش مطالعات ریز پهنه‌بندی ژئوتکنیکی لرزه‌ای شهر طبس"، جلد اول، لرزه‌زمین‌ساخت و برآورد خطر زمین‌لرزه، پژوهشکدهٔ سوانح طبیعی (١٣٨٦).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]

٦. قلندرزاده ع.، معتمد ر.، سدیدخوی ا.، "ریزپهنه‌بندی لرزه شهر ارومیه با استفاده از اندازه‌گیری‌های میکروترمور"، اردیبهشت، تهران (۱۳۸۲) ۲۲-۲٤.

7. Arsalan H., Siyahi B., "A comparative study on linear and nonlinear site response analysis" Environ Geol (2006) DIO 10.1007/s00254-006-0291-4.

8. Arsalan H., Siyahi B., "Effect of nonlinearity on site response and ground motion due to earthquake excitation", Bull Eng Environ (2009) DIO 10.1007/S 10064-009-0254-6.

9. Bardet J. P., Ichii K., Lin C. H., "EERA, A computer program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of layered soil deposits", Department of Civil Engineering, August (2000).

۱۰. میرحسینی م.، عارف‌پور ب.، "مهندسی ژئوتکنیک لرزه‌ای" انتشارات پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، چاپ اول (۱۳۷۸).

11. Segelman D. J., Star M. J., "Inversion of Masing models via continuous Iwan systems", International Journal of Non-Linear Mechanics, 43 (2008) 74-80.

12. Yoshida N., "Seismic Ground Response Analysis", Department of Civil and Environment Engineering, Tohoko Gakuin University, Miyagi, Japan (2015).

13. Bardet J. P., Tobita T., "NERA, A computer program for Nonlinear Earthquake site Response Analyses of layered soil deposits", Department of Civil Engineering, April (2001).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.1.5.9]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.1.41]