

## مقایسه تحلیل معادل خطی و غیرخطی در پاسخ ساختگاه (مطالعه 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 پراکنندگی خرابی‌ها در زلزله‌های دهه‌های اخیر، اهمیت اثرات ساختگاهی و شرایط زمین‌شناسی سطحی را بیش از پیش نمایان ساخته است. از دیدگاه مهندسی اهمیت زلزله‌ها به دلیل 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 به صورت بزرگ‌نمایی دینامیکی باشد که از آن به عنوان تشدید یاد می‌شود. به منظور 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 به همین 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

دیهشک و نواحی مرکزی شهر طبس بیش‌ترین شرایط تشدید را دارد. از طرف دیگر منطقه جنوب محله سرآسیاب و سپس ناحیه امامزاده بیش‌ترین سختی و کم‌ترین تشدید دارد. براساس پژوهش‌های صورت گرفته، پیشنهاد می‌شود تا برنامه توسعه شهری بیش‌تر به سمت امامزاده حسین بن موسی الکاظم (ع) هدایت شود تا ضمن برخورداری از 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 به دست 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 بازه بسامدی خاصی تقویت کنند. از نظر فیزیکی علت اصلی وقوع پدیده تشدید در رسوبات نرم، گیرافتادن امواج لرزه‌ای به دلیل اختلاف امپدانس رسوبات با بستر سنگی زیر آن است. بدین دلیل 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. به طوری که در صورت تعیین محدوده احتمالی فرکانس و پیوند 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 به کار گرفت [۳]. تعیین محدوده فرکانس و پیوند ساختگاه نیازمند

بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی و شناخت نوع ساختگاه و انجام تحلیل‌های دینامیکی ویژه است [۴].

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 [۴].

### موقعیت زمین‌شناختی و ژئوتکنیکی طبس

طبس شهری است در منطقه‌ای فراافتاده و کم ارتفاع که در کناره کویر لوت در شرق ایران واقع شده است. این شهر در فاصله ۵۴۰ کیلومتری جنوب مشهد و در فاصله ۴۲۰ کیلومتری شمال شرق یزد قرار دارد. این شهر به واسطه 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، گستره شهر طبس به چهار بخش نهشته‌های درشت‌دانه، توالی لایه‌های ضخیم شن و ماسه‌ی ریزدانه، نهشته‌های غیرچسبیده سیلت و ماسه و نهشته‌های چسبیده سیلت و رس قابل تقسیم است. در گستره بررسی شده با حرکت از شرق به غرب اندازه ذرات تشکیل‌دهنده آبرفت‌های ساختگاه شهر طبس کاهش می‌یابد [۵].

### 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 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 [۶]. منظور از روش‌های عددی استفاده

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

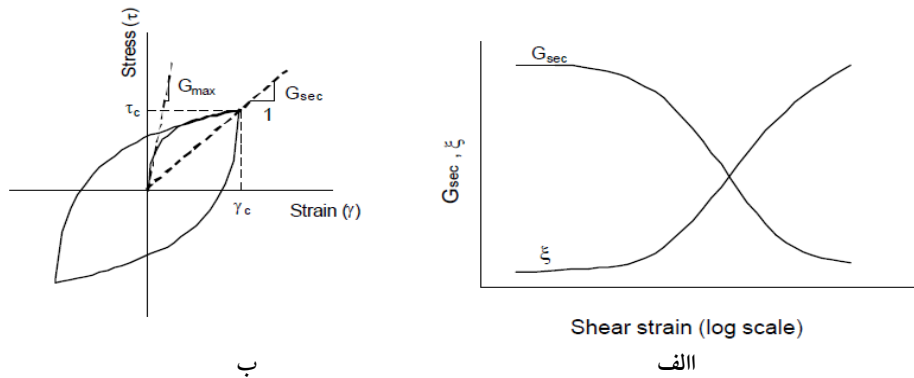
### روش خطی معادل در تعیین پاسخ زمین

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 به دست می‌آید.

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

شیب منحنی به سختی خاک بستگی دارد که در حین بارگذاری به وسیله 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:

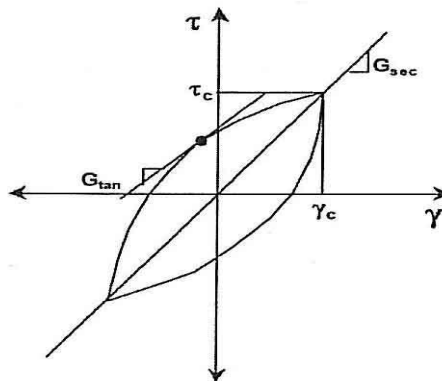
$$G_{tan} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad (1)$$



شکل ۱. مدل خطی معادل الف) منحنی هیستریزس تنش- کرنش ب) تغییرات مدول برشی سکانت و نسبت میرایی با دامنه کرنش برشی [۹] که در آن  $\tau_c$  و  $\gamma_c$  به ترتیب دامنه‌های تنش و کرنش برشی هستند.  $G_{sec}$  شیب عمومی منحنی هیستریزس را بیان می‌کند. پهنای منحنی هیستریزس، وابسته به سطحی است که به‌عنوان شاخص از استهلاک انرژی به‌وسیله ضریب میرایی قابل بیان است.

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

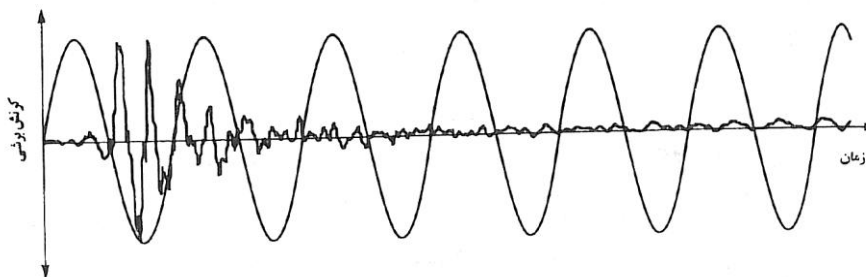
$A_{loop}$  سطح منحنی هیستریزس هستند.



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

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

شده باشد خیلی غیرمتعارف است. شکل ۳ تاریخچه زمانی هارمونیک (همانند یک نمونه آزمایشگاهی) و همچنین تاریخچه زمانی گذرا (مانند یک زلزله 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 به صورت 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 موثر اغلب ۶۵ درصد کرنش ماکزیمم در نظر گرفته می‌شود [۱۰].



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

از آن‌جا که 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 ۴ روند تکراری بدین صورت است: تخمین اولیه  $G$  و  $\mathcal{E}$  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  $\mathcal{E}$  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  $j$ :

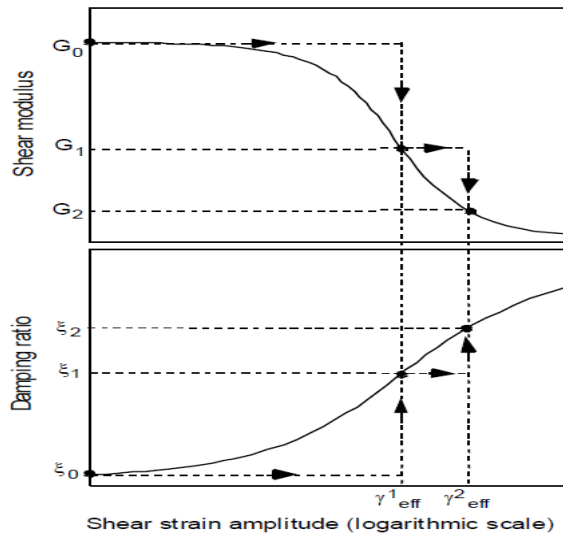
$$\gamma_{effj}^i = R_{\gamma} \gamma_{maxj}^i \quad (3)$$

که در این رابطه زیرنویس‌ها به شماره تکرار باز می‌شود و  $R_\gamma$  نسبت کرنش برشی مؤثر به کرنش برشی ماکزیمم است.  $R_\gamma$  به بزرگای زلزله بستگی داشته و از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$R_\gamma = \frac{M-1}{10} \quad (۴)$$

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

گام‌های ۲ تا ۴ زمانی که اختلاف میان مقادیر محاسبه شده مدول برشی و ضریب میرایی در دو تکرار متوالی کم‌تر از مقدار معینی در همه لایه‌ها شوند، تکرار می‌شود شکل ۴ 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]، [۴].



شکل ۴. 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

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

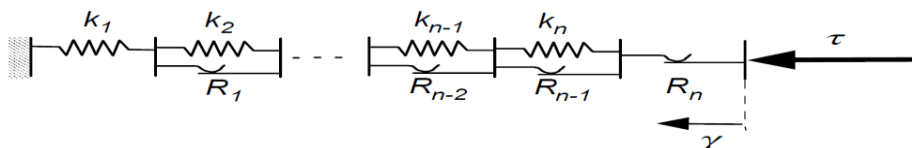
پارامترهای  $G_{sec}$  و  $\varepsilon$  غالباً به‌عنوان پارامترهای خطی معادل مصالح نامیده می‌شوند. برای نوع مشخصی از تحلیل‌های پاسخ زمین، این پارامترها مستقیماً برای توصیف رفتار خاک به‌کار می‌روند، سایر تحلیل‌ها به مسیر واقعی منحنی هیستریزس نیاز دارند.

### 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<sup>۱</sup> (۱۹۷۳)، مدل HDCP<sup>۲</sup> (۱۹۸۵)، مدل مارتین-داویدنکوف<sup>۳</sup> (۱۹۷۸) و مدل نوع ایوان<sup>۴</sup> (۱۹۷۷) مشخص می‌کنند [۱۱]، [۱۲].

چنان‌که در شکل ۵ نشان داده شده است. ایوان و امروزه<sup>۵</sup> (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. هراfter<sup>۶</sup>، مدل آن‌ها را با عنوان مدل IM نام‌گذاری کرد [۱۱].



شکل ۵. نمایش شماتیک مدل تنش-کرنش استفاده شده

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



**Mroz و Iwan (۱۹۶۷) [۱۳]**

چنان‌که در شکل ۶ نشان داده شده، زمانی که منحنی تنش-کرنش از قانون شباهت پیروی می‌کند مساحت‌های  $I_i$  و  $J_i$  به ترتیب 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  $\gamma_I$  هستند. مساحت‌های  $A_i$ ،  $I_i$  و  $J_i$  به صورت (۵) تعریف می‌شوند:

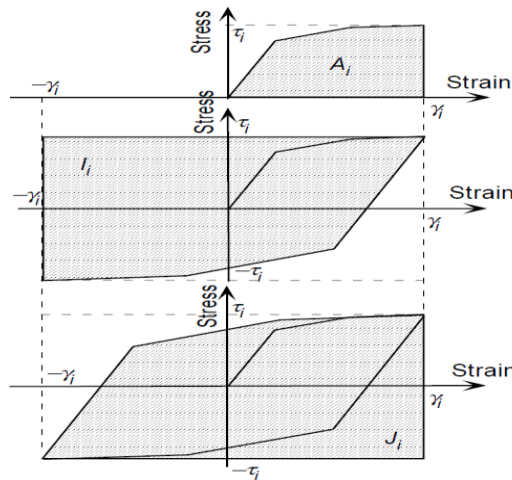
$$A_i = \int_0^{\gamma_i} \tau d\gamma \quad I_i = \int_{\gamma_i}^{-\gamma_i} (\tau_i - \tau) d\gamma = -4A_i \quad J_i = \int_{-\gamma_i}^{\gamma_i} (\tau_i + \tau) d\gamma = 4A_i \quad (5)$$

هنگامی که منحنی تنش-کرنش تکه‌های خطی است و توسط  $n$  نقطه گسسته  $(\gamma_j, G_j)$  تولید شود،  $A_i$  می‌شود:

$$A_1 = 0 \quad A_i = \frac{1}{2} \sum_{j=2}^i (G_j \gamma_j + G_{j-1} \gamma_{j-1}) (\gamma_j - \gamma_{j-1}) \quad i = 2, \dots, n \quad (6)$$

و انرژی تلف شده در طول یک چرخه کامل می‌شود:

$$W_{d_i} = 8A_i - 4G_i \gamma_i^2 \quad i = 1, \dots, n \quad (7)$$



شکل ۶. مساحت‌های  $A_i$ ،  $I_i$  و  $J_i$  برای محاسبه حلقه هیسترتیک مدل IM در طول چرخه بارگذاری و باربرداری [۱۱]

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

$$W_{Si} = \frac{1}{2} G_i \gamma_i^2 \quad (۸)$$

نسبت میرایی بحرانی  $\varepsilon_i$  در کرنش برشی  $\gamma_i$  می‌تواند بیان شود با:

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

هنگامی که کرنش برشی  $\gamma$  بیش از  $\gamma_n$  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  $\varepsilon$  می‌شود:

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

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 معادله (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 به‌طور کلی منحنی‌های نسبت میرایی مختلفی دارند [۱۲]، [۱۳].

### معرفی نرم‌افزارهای بکارگیری شده

#### خصوصیات برنامه EERA

گروه عمران دانشگاه کالیفرنیا جنوبی در سال ۱۹۹۸، برنامه کامپیوتری  $EERA^1$  را براساس مفاهیم اصلی برنامه مرجع شیک<sup>۲</sup> و در فورترن<sup>۳</sup> 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

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 زمین لرزه سایت است. این نرم‌افزار با استفاده از تکنیک روابط برگشتی، روابط حاکم بر تعادل دینامیکی محیط را حل کرده و به منظور اعمال رفتار خطی معادل، تکنیک تکرار را به کار گرفته است. در این نرم‌افزار شتاب‌نگاشت‌های ورودی به صورت تاریخچه 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 برنامه صفحه گسترده اکسل<sup>۱</sup> 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<sup>۲</sup> براساس مدل مواد توسعه یافته شده به وسیله ایوان و امروز اعمال شد. NERA به معنای آنالیز پاسخ غیرخطی زلزله محل است. NERA همانند EERA از مزایای کامل فورترن ۹۰ و برنامه صفحه گسترده اکسل بهره می‌گیرد [۱۳].

### پارامترهای ورودی

با توجه به این که پارامترهای زیادی روی بزرگ‌نمایی تأثیر می‌گذارند که عبارتند از: ۱. سرعت موج برشی ۲. ضخامت لایه‌های خاک ۳. دانسیته خاک ۴. 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

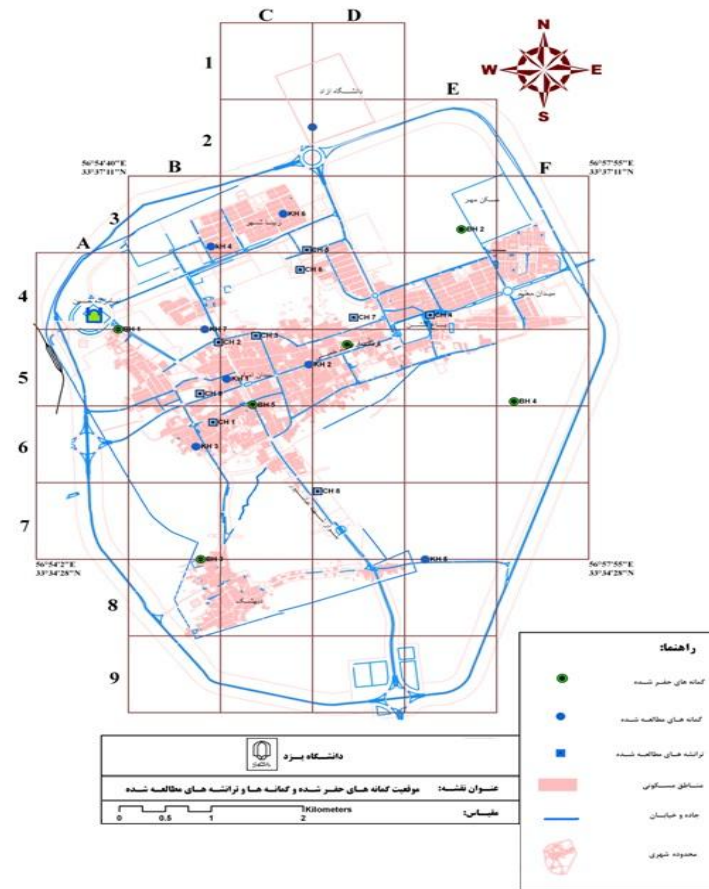
نیاز است. هدف اولیه از جمع‌آوری داده‌های گمانه‌ای دست‌یابی به جزئی‌ترین پروفیل سرعت موج لرزه‌ای در محل برای آزمایش‌های ویژه منطقه و خصوصیات ماده است. هم‌چنین هدف از به‌دست آوردن داده‌های گمانه‌ای می‌تواند چندگانه باشد به این معنی که، نتایج سرعت لرزه‌ای به‌دست آمده ممکن است برای ارزیابی پیوستگی عمودی 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، زمانی که 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

در پیش فرض نرم افزار ارائه شده است. منحنی‌های به کار رفته در این پژوهش منحنی‌های ارائه شده سید و سان (۱۹۸۹) و ادریس (۱۹۹۰) برای رس، ماسه و سنگ بستر است.



شکل ۷. نقشهٔ جانمایی گمانه‌های حفر شده و گمانه‌ها و ترانشه‌های بررسی شده در گستره شهر طبرس [۴]

### مشخصات خاک

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

جدول ۱. مشخصات لایه‌های به‌دست آمده در گمانه BH1

| لایه  | رقوم (متر) | $V_p$ (متر بر ثانیه) | $V_s$ (متر بر ثانیه) |
|-------|------------|----------------------|----------------------|
| اول   | ۰ - ۲      | ۵۲۹                  | ۲۳۳                  |
| دوم   | ۲ - ۳      | ۶۴۰                  | ۲۸۵,۶                |
| سوم   | ۳ - ۵      | ۷۳۸                  | ۳۳۰                  |
| چهارم | ۵ - ۸      | ۸۴۹                  | ۳۷۸,۳                |
| پنجم  | ۸ - ۱۱     | ۹۲۵                  | ۴۱۱,۵                |
| ششم   | ۱۱ - ۱۶    | ۱۰۰۷                 | ۴۵۳                  |
| هفتم  | ۱۶ - ۱۸    | ۱۰۶۷                 | ۴۸۶,۳                |
| هشتم  | ۱۸ - ۲۷    | ۱۱۱۴                 | ۵۱۱,۳                |
| نهم   | ۲۷ - ۲۹    | ۱۱۵۷                 | ۵۳۶,۶۳               |
| دهم   | ۲۹ - ۳۵    | ۱۱۸۴                 | 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   | ۰ - ۲      | ۴۶۲                  | ۲۰۹                  |
| دوم   | ۲ - ۴      | ۶۵۰                  | ۲۹۳                  |
| سوم   | ۴ - ۵      | ۷۸۷                  | ۳۵۴,۵                |
| چهارم | ۵ - ۷      | ۸۸۰                  | ۴۰۱                  |
| پنجم  | ۷ - ۸      | ۹۴۷                  | ۴۳۱,۳                |
| ششم   | ۸ - ۱۵     | ۱۰۵۴                 | ۴۸۵,۳                |
| هفتم  | ۱۵ - ۲۴    | ۱۲۰۱                 | ۵۶۹,۱۳               |
| هشتم  | ۲۴ - ۳۰    | ۱۲۶۹                 | ۶۱۰,۲                |

**جدول ۳. مشخصات لایه‌های به‌دست آمده در گمانه BH3**

| لایه  | رقوم (متر) | $V_p$ (متر بر ثانیه) | $V_s$ (متر بر ثانیه) |
|-------|------------|----------------------|----------------------|
| اول   | ۰ - ۴      | ۴۸۳                  | ۲۱۷                  |
| دوم   | ۴ - ۵      | ۶۵۰                  | ۲۹۶٫۷                |
| سوم   | ۵ - ۷      | ۷۰۵                  | ۳۱۴٫۴                |
| چهارم | ۷ - ۸      | ۷۲۸                  | ۳۱۸٫۵۵               |
| پنجم  | ۸ - ۱۲     | ۷۷۶                  | ۳۳۷                  |
| ششم   | ۱۲ - ۱۴    | ۸۳۳                  | ۳۶۱٫۵                |
| هفتم  | ۱۴ - ۲۰    | ۸۸۷                  | ۳۸۸                  |
| هشتم  | ۲۰ - ۲۲    | ۹۳۰                  | ۴۱۰٫۵                |
| نهم   | ۲۲ - ۳۰    | ۹۴۹                  | ۴۱۸                  |

**جدول ۴. مشخصات لایه‌های به‌دست آمده در گمانه BH4**

| لایه  | رقوم (متر) | $V_p$ (متر بر ثانیه) | $V_s$ (متر بر ثانیه) |
|-------|------------|----------------------|----------------------|
| اول   | ۰ - ۳      | ۸۶۸                  | ۴۱۶٫۴                |
| دوم   | ۳ - ۶      | ۱۰۸۸٫۵               | ۵۲۴                  |
| سوم   | ۶ - ۱۰     | ۱۲۴۰                 | ۶۰۴٫۵۴               |
| چهارم | ۱۰ - ۱۱    | ۱۳۰۷                 | ۶۴۱٫۶                |
| پنجم  | ۱۱ - ۱۲    | ۱۳۱۳٫۵               | ۶۴۲٫۷۵               |
| ششم   | ۱۲ - ۲۰    | ۱۳۷۱                 | ۶۷۴٫۴۲               |
| هفتم  | ۲۰ - ۳۰    | ۱۴۶۱                 | ۷۳۰                  |

**جدول ۵. مشخصات لایه‌های به‌دست آمده در گمانه BH5**

| لایه  | رقوم (متر) | $V_p$ (متر بر ثانیه) | $V_s$ (متر بر ثانیه) |
|-------|------------|----------------------|----------------------|
| اول   | ۰ - ۴      | ۴۴۰                  | ۱۸۶                  |
| دوم   | ۴ - ۷      | ۶۱۳                  | ۲۶۱                  |
| سوم   | ۷ - ۱۲     | ۷۴۶                  | ۳۲۲                  |
| چهارم | ۱۲ - ۲۰    | ۸۸۱                  | ۳۸۹                  |
| پنجم  | ۲۰ - ۳۰    | ۹۹۱                  | ۴۴۷                  |

## 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 محتوای فرکانس امری پیچیده‌تر است که جز با تشابه با مکانسیم گسلش، بزرگی زمین‌لرزه، عمق کانونی، فاصله رومرکزی و غیره به دست نمی‌آید. به همین سبب در این پژوهش از شتاب‌نگاشت زلزله سال ۱۳۵۷ طیس شکل ۸ که می‌تواند به عنوان بیشینه زلزله باورپذیر در گستره طیس باشد استفاده شده است تا تشابه‌سازی در محتوای فرکانس مورد نیاز نباشد [۴].

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

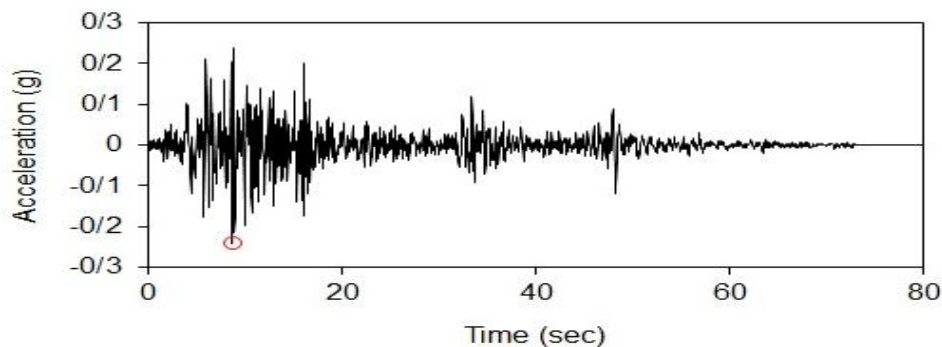
## مؤلفه افقی

شتاب بیشینه افقی بر روی سنگ بستر لرزه‌ای با دوره بازگشت ۷۵ سال، معادل با  $g/0.24$  شکل ۹.

شتاب بیشینه افقی بر سنگ بستر لرزه‌ای با دوره بازگشت ۴۷۵ سال، معادل با  $g/0.36$  شکل ۱۰.

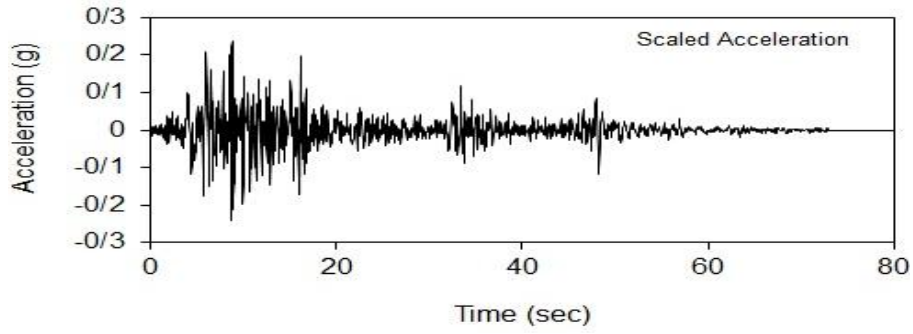
شتاب بیشینه افقی بر سنگ بستر لرزه‌ای با دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال، معادل با  $g/0.50$  شکل ۱۱.

برای برآورد مشخصات حرکت نیرومند زمین، به‌ازای زلزله مبنای طرح، یعنی زمین‌لرزه‌های با دوره بازگشت ۷۵، ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال، استفاده شده است.

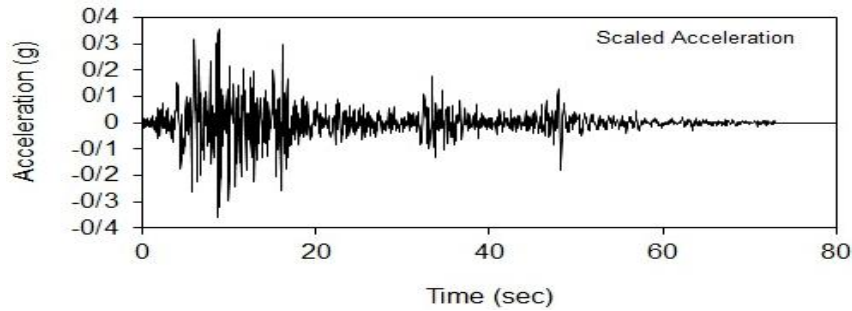


شکل ۸. شتاب‌نگاشت دیهوک-زلزله ۲۵ شهریورماه سال ۱۳۵۷ طیس

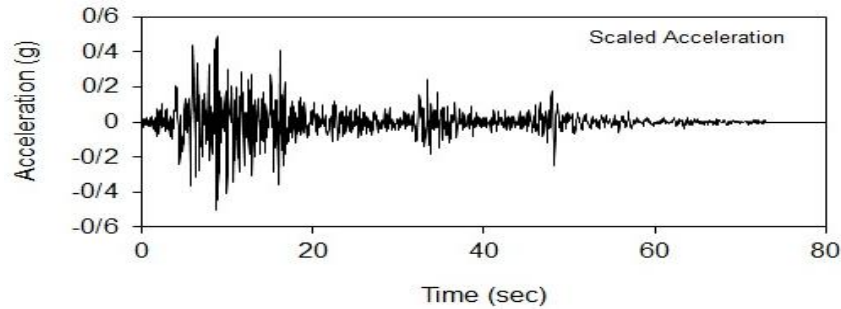




شکل ۹. شتاب‌نگاشت دیهوک-زلزله سال ۱۳۵۷ طبس مقیاس شده برای زلزله‌های با دوره بازگشت ۷۵ سال



شکل ۱۰. شتاب‌نگاشت دیهوک-زلزله سال ۱۳۵۷ طبس مقیاس شده برای زلزله‌های با دوره بازگشت ۴۷۵ سال



شکل ۱۱. شتاب‌نگاشت دیهوک-زلزله سال ۱۳۵۷ طبس مقیاس شده برای زلزله‌های با دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال

### خروجی تحلیل

نتایج تحلیل‌های صورت گرفته برای هر یک از گمانه‌ها به تفکیک نرم‌افزارهای به‌کارگیری شده و هم‌چنین دوره بازگشت مورد نظر، به ترتیب شکل‌های ۱۲ تا ۱۷ و جدول‌های ۶ تا ۸ است.

جدول‌های ۶ تا ۸ نتایج تحلیل را نشان می‌دهند.

جدول ۶. پارامترهای تقویت و حداکثر شتاب سطح برای زلزله با دوره ۷۵ سال

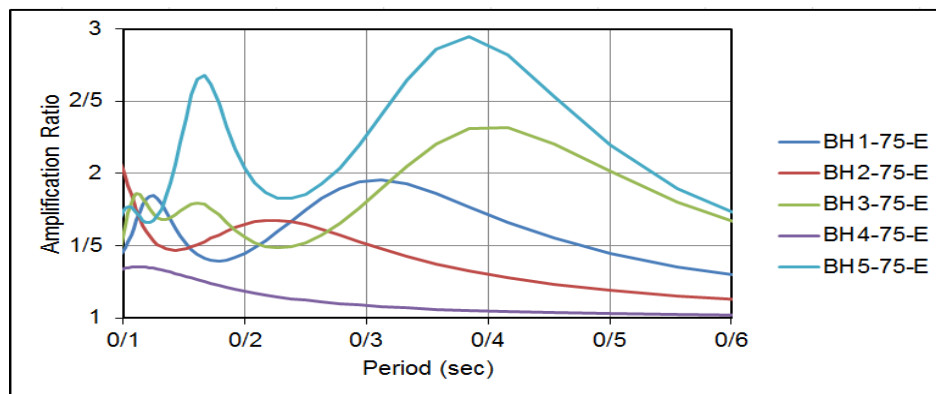
| گمانه           | ۱    |       | ۲     |       | ۳     |      | ۴    |      | ۵    |      |
|-----------------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|
|                 | E    | N     | E     | N     | E     | N    | E    | N    | E    | N    |
| تقویت           | ۱,۹۵ | ۱۰,۲۶ | ۲,۰۱  | ۸,۶۹  | ۲,۳۲  | ۱۴,۹ | ۱,۳۶ | ۳,۵۶ | ۲,۹۵ | ۹,۳  |
| حداکثر شتاب سطح | ۰,۴۹ | ۰,۴۲۳ | ۰,۵۴۷ | ۰,۴۱۶ | ۰,۶۱۴ | ۰,۳۶ | ۰,۴  | ۰,۳۲ | ۰,۷۸ | ۰,۴۸ |

جدول ۷. پارامترهای تقویت و حداکثر شتاب سطح برای زلزله با دوره ۴۷۵ سال

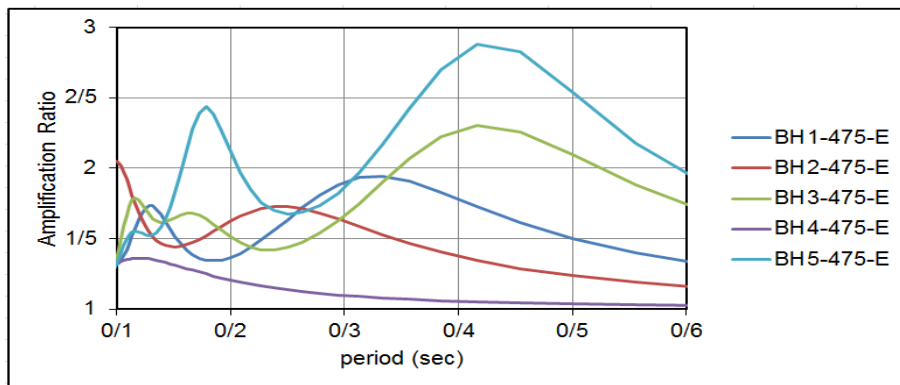
| گمانه           | ۱     |       | ۲     |       | ۳     |      | ۴    |       | ۵    |      |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|------|
|                 | E     | N     | E     | N     | E     | N    | E    | N     | E    | N    |
| تقویت           | ۱,۹۴  | ۹,۷   | ۲,۵   | ۷,۴   | ۲,۳   | ۹,۱۵ | ۱,۳۶ | ۳,۳   | ۲,۸۸ | ۶,۲۸ |
| حداکثر شتاب سطح | ۰,۶۵۳ | ۰,۶۰۷ | ۰,۸۶۵ | ۰,۶۱۸ | ۰,۸۴۳ | ۰,۷۶ | ۰,۶  | ۰,۴۲۳ | ۰,۹۷ | ۰,۵۴ |

جدول ۸. پارامترهای تقویت و حداکثر شتاب سطح برای زلزله با دوره ۲۴۷۵ سال

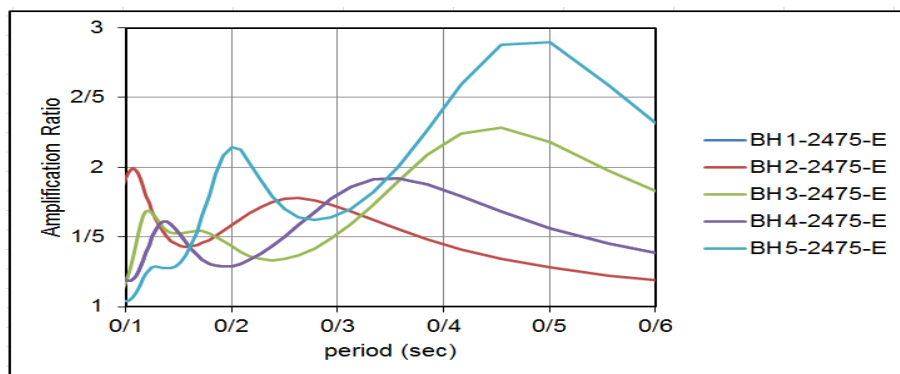
| گمانه           | ۱     |       | ۲    |      | ۳    |     | ۴    |      | ۵    |      |
|-----------------|-------|-------|------|------|------|-----|------|------|------|------|
|                 | E     | N     | E    | N    | E    | N   | E    | N    | E    | N    |
| تقویت           | ۱,۹۲  | ۷,۰۶  | ۲    | ۷,۸۵ | ۲,۲۸ | ۹,۷ | ۱,۳۷ | ۳,۹  | ۲,۹  | ۷,۸  |
| حداکثر شتاب سطح | ۰,۷۸۱ | ۰,۷۹۸ | ۱,۲۱ | ۰,۸  | ۱,۰۲ | ۰,۹ | ۰,۸۴ | ۰,۷۱ | ۱,۰۳ | ۰,۷۱ |



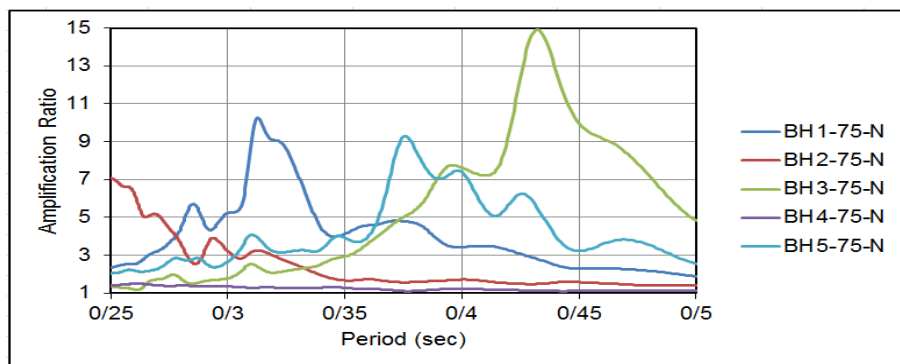
شکل ۱۲. طیف تقویت پروفیل‌های انتخابی با دوره بازگشت ۷۵ سال خروجی برنامه ارا



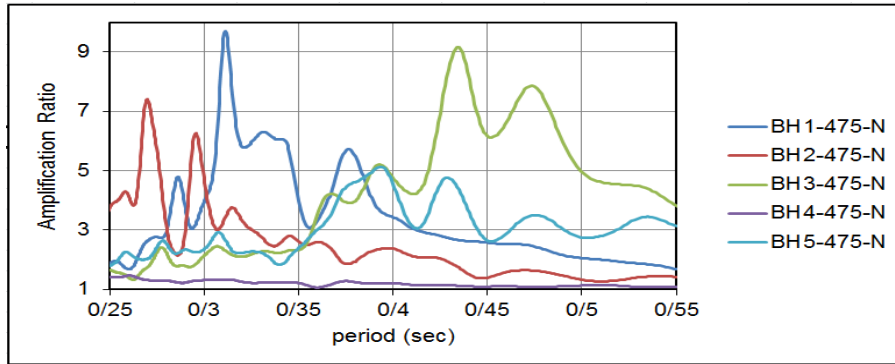
شکل ۱۳. طیف تقویت پروفیل‌های انتخابی با دوره بازگشت ۴۷۵ سال خروجی برنامه ارا



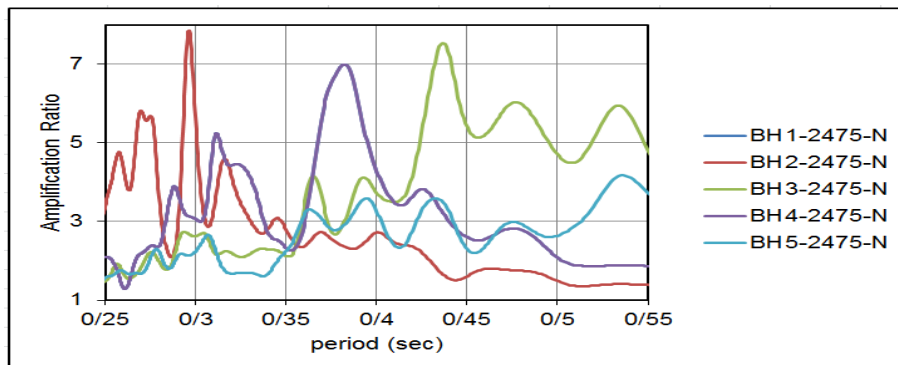
شکل ۱۴. طیف تقویت پروفیل‌های انتخابی با دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال خروجی برنامه ارا



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



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 به این‌که عمق سنگ بستر در گمانه BH3، ۵۰ متر بوده و از سایر گمانه‌ها بیش‌تر است، در نتیجه دوره 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 دوره‌های 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.

با جمع‌بندی میزان تقویت و هم‌چنین حداکثر شتاب در سطح زمین می‌توان این نکته را بیان کرد که منطقه دیهشک و نواحی مرکزی شهر طبس بیش‌ترین شرایط تشدید را دارند. از طرف دیگر منطقه جنوب محله سرآسیاب و سپس ناحیه امام‌زاده بیش‌ترین سختی و کم‌ترین تشدید را دارد. براساس بررسی‌های انجام شده پیشنهاد شد تا برنامه 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. نحوه کاربرد و تفسیر هر یک از این روش‌ها نیاز به داشتن اطلاعاتی در باب فرضیات بستر، تفهیم نحوه 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 ۲۴۷۵ سال و پیش‌بینی شتاب حداکثر سطح زیاد با EERA بهتر است از نرم‌افزار NERA به‌منظور تحلیل غیرخطی پاسخ ساختگاه استفاده شود.

### منابع

۱. یزدان‌پرست م، "بررسی اثر ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی بر بزرگ‌نمایی لرزه‌ای ساختگاه (مطالعه موردی)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران، گرایش خاک و پی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره) (آذرماه ۱۳۹۱).
۲. صحرائی م، "بررسی مشخصات دینامیکی خاک منطقه میبد با استفاده از نتایج مطالعات ژئوتکنیک لرزه‌ای"، عمران-خاک و پی، دانشگاه یزد (۱۳۸۹).
۳. دهقانی ز، "بررسی پتانسیل تشدید خاک ساختگاه شهر اردکان با استفاده از روش ژئوفیزیکی امواج نزولی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه یزد (۱۳۹۰).
۴. عصارى م، "بررسی خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه با استفاده از روش ژئوفیزیکی امواج نزولی در منطقه شهری طبس"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه یزد (۱۳۸۷).
۵. ادیب ا، مهرنهاد ح، "گزارش مطالعات ریز پهنه‌بندی ژئوتکنیکی لرزه‌ای شهر طبس"، جلد اول، لرزه‌زمین‌ساخت و برآورد خطر زمین‌لرزه، پژوهشکده سوانح طبیعی (۱۳۸۶).

۶. قلندرزاده ع.، معتمد ر.، سدیدیخوی ا.، "ریزیپهنه‌بندی لرزه شهر ارومیه با استفاده از اندازه‌گیری‌های میکروترومور"، اردیبهشت، تهران (۱۳۸۲) ۲۲-۲۴.
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, Tohoku 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).