



Semnan University

Journal of Transportation Infrastructure Engineering

Journal homepage: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

ISSN: 2821-0549



Research Article

Investigating the Effects of Thickness, Depth and Number of Weak Soil Layers on Seismic Site Response

Sadegh Ghavami^{a, *}, Mehrdad Emami Tabrizi^b, Elnaz Najafi^c

^a Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, I. R. Iran.

^b Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Sahand university of Technology, Tabriz, I. R. Iran.

^c M.Sc. Student, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, I. R. Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2025-02-10

Revised: 2025-02-26

Accepted: 2025-03-15

Keywords:

Seismic site response,
Weak layer,
Acceleration spectra,
Nonlinear analysis.

ABSTRACT

Site conditions, including the shape and depth of the layers, their location, and the area's topography, affect the seismic site response, which can influence the performance of transportation infrastructure. This study investigates the effect of a weak layer, including soft clay and loose sandy soil, on the seismic site response using DEEPSOIL software through nonlinear time-domain analysis. The Tabas earthquake record ($M_w=7.4$) was selected for site response analysis in this study. Effects of various parameters, such as thickness of the weak layer, its location at different depths, and number of layers were considered. Results showed that in the case of a weak clay layer with a thickness of 3 m and a weak sand layer with a thickness of 5 m at the surface, maximum acceleration increases significantly. As the thickness of the shallow weak layer increases, the seismic response decreases, and maximum acceleration occurs at longer periods. A comparison of acceleration spectra for different weak layer positions showed that presence of a weak layer near the ground surface and at a lower depth has the greatest effect on the acceleration spectrum, increasing the maximum acceleration. Although multiplicity of weak layers reduces the maximum acceleration, the acceleration spectrum exhibits successive peaks at different periods, particularly in loose sandy soils.

* Corresponding author.

E-mail address: s_ghavamijamal@civileng.iust.ac.ir

How to cite this article: Ghavami, S. , Emami Tabrizi, M. and Najafi, E. (2025). Investigating the Effects of Thickness, Depth, and the Number of Weak Soil Layers on Seismic Site Response . *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 11(1), 97-107. <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.36870.1715>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



مقاله پژوهشی

بررسی تأثیرات ضخامت، عمق و تعداد لایه‌های ضعیف خاک بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان

صادق قوامی جمال^{۱*}، مهرداد امامی تبریزی^۲، الناز نجفی^۳

^۱استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

^۲دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

^۳دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۲	شرایط ساختمان، از جمله شکل و عمق لایه‌ها، نحوه قرارگیری آنها و توپوگرافی منطقه بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان مؤثر است که می‌تواند عملکرد زیرساخت‌های حمل و نقل را تحت تأثیر قرار دهد. در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار DEEPSOIL، تأثیر وجود لایه ضعیف شامل خاک رس نرم و خاک ماسه‌ای سست بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان با تحلیل غیرخطی در حوزه زمان بررسی می‌شود. رکورد زلزله مورد استفاده در این پژوهش، زمین لرزه ۷/۴ ریشتری طبرستان است. اثر پارامترهای مختلف مانند ضخامت لایه ضعیف، موقعیت آن در اعماق مختلف و تعداد لایه‌ها در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که در حالت وجود لایه ضعیف رسی با ضخامت ۳ متر و لایه ضعیف ماسه‌ای با ضخامت ۵ متر در سطح، شتاب بیشینه به ترتیب ۲/۷ و ۲/۳ برابر شتاب در سنگ بستر است. با بیشتر شدن ضخامت لایه ضعیف سطحی، پاسخ لرزه‌ای کمتر بوده و شتاب بیشینه در دوره‌های تناوب بالاتر رخ می‌دهد. مقایسه طیف شتاب برای موقعیت‌های مختلف لایه ضعیف نشان داد که وجود لایه ضعیف در نزدیکی سطح زمین و عمق کمتر، بیشترین تأثیر را بر طیف شتاب دارد و موجب افزایش شتاب بیشینه می‌گردد. اگر چه تعدد لایه‌های ضعیف موجب کاهش شتاب بیشینه می‌شود، اما طیف شتاب، پیک‌های متوالی در دوره‌های تناوب مختلف، به‌خصوص برای خاک ماسه‌ای سست، را نشان می‌دهد.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: s_ghavamijamal@civileng.iust.ac.ir

استناد به این مقاله: قوامی جمال، صادق، امامی تبریزی، مهرداد و نجفی، الناز. (۱۴۰۴). بررسی تأثیرات ضخامت، عمق و تعداد لایه‌های ضعیف خاک بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۱(۱)، ۹۷-۱۰۷. <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.36870.1715>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱. مقدمه

آسیب‌پذیری لرزه‌ای زیرساخت‌های حمل و نقل با خطرات مرتبط با حرکت زمین و معیارهای عملکرد تعیین می‌شود (ژای، ۲۰۱۱؛ یزدان دوست و همکاران، ۲۰۱۵). شرایط محلی خاک، زمین‌شناسی و توپوگرافی یا به طور خلاصه «شرایط ساختگاه» باعث تغییر در دامنه، محتوای فرکانسی و مدت زمان حرکت نیرومند زمین و در نهایت آسیب به سازه‌ها می‌گردد (گلینسکی و همکاران، ۲۰۱۹؛ جئونگ و همکاران، ۲۰۱۹؛ کرامر و استوارت، ۲۰۲۴). در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها، روش‌های طراحی و ساخت که با ویژگی‌های ساختگاه سازگار هستند، می‌توانند به طور مؤثری آسیب‌های وارد بر سازه بر اثر زلزله را کاهش داده و با افزایش عمر مفید آن، به پایداری سازه کمک کنند. در سال‌های اخیر، تأثیر شرایط خاک نزدیک به سطح بر حرکات زمین مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته است و مشاهدات حرکت نیرومند زمین نشان می‌دهد که اثر تشدید حرکت سطحی زمین در خاک‌های رسی و ماسه‌ای نرم تا سختی متوسط نسبت به خاک‌های سخت مشهودتر است (شفک، ۲۰۰۱؛ رهنما و میراثی، ۲۰۱۲؛ جهانپور و همکاران، ۲۰۱۷؛ یانگ و همکاران، ۲۰۲۱؛ کرامر و استوارت، ۲۰۲۴). به طور مثال، زلزله ۱۹۰۶ سانفرانسیسکو باعث آسیب شدید به سازه‌های واقع بر خاک نرم شد (بورچرت و گیس، ۱۹۷۶). در موردی دیگر، در زمین لرزه‌ای که در سال ۱۹۸۵ در مکزیک رخ داد، خسارات در مکزیکوسیتی که در فاصله ۴۰۰ کیلومتری از مرکز زمین لرزه قرار داشت، نسبت به مناطق دیگر شدیدتر بود. بررسی‌ها نشان داده که مکزیکوسیتی در یک حوضه رسوبی ضعیف واقع شده که باعث تشدید حرکت لرزه‌ای و طولانی شدن مدت زمان آن شده است (سید و همکاران، ۱۹۸۸). بر اساس زمین لرزه‌های مخربی که در سه دهه گذشته رخ داده‌اند (نورتریچ در آمریکا (۱۹۹۴)، کوبه در ژاپن (۱۹۹۵)، کوجالی در ترکیه (۱۹۹۹)، سیچوان در چین (۲۰۰۸)،

شیلی (۲۰۱۰)، کریست چرچ در نیوزیلند (۲۰۱۱) و نپال (۲۰۱۵)) می‌توان به این نتیجه رسید که تأثیر شرایط ساختگاه بر توزیع خسارت زلزله در مقایسه با اثرات مسیر امواج و اثرات ناشی از نزدیکی به منبع زلزله قابل توجه است (استانکو و همکاران، ۲۰۱۷). بو و همکاران (۲۰۰۴) با استفاده از روش تحلیل خطی معادل یک بُعدی نشان دادند که خاک نرم موجب افزایش دوره مشخصه طیف پاسخ می‌شود. مطالعات عددی انجام شده توسط لیو و همکاران (۲۰۰۶) تأیید کرد که با وقوع زمین لرزه، شیب با لایه خاک نرم نسبت به شیب بدون لایه خاک نرم، راحت‌تر تخریب می‌شود. بررسی طیف پاسخ شتاب در ۳۲ سایت در هند نشان داد که شکل طیف پاسخ شتاب تحت تأثیر زمین‌شناسی منطقه و شرایط ساختگاه است (چوپرا و چودوری، ۲۰۱۱). نتایج مطالعات وانگ و همکاران (۲۰۱۹) در فلات لس (Loess) در چین نشان داد که تأثیر ضخامت رسوبات نرم و توپوگرافی بر حرکت زمین قابل توجه است، به طوری که نه تنها موجب تشدید شتاب بیشینه می‌شود، بلکه دوره‌های غالب حرکت زمین را نیز افزایش می‌دهد. مرادی و همکاران (۲۰۲۳) با شبیه‌سازی عددی نتیجه گرفتند که وجود لایه ضعیف سبب ایجاد ناپیوستگی و پرش در طیف پراکندگی (تغییرات سرعت در برابر فرکانس) امواج ریلی می‌شود که با افزایش عمق مدفون لایه ضعیف، موقعیت ناپیوستگی و پرش از فرکانس‌های بیشتر به سمت فرکانس‌های کم جابجا می‌شود. با تحلیل پاسخ لرزه‌ای ساختگاه با وجود لایه نرم توسط لی و همکاران (۲۰۲۳)، مشخص شد که یک لایه نرم ضخیم منجر به شتاب بیشینه کمتر در سطح زمین می‌شود و تضعیف آن در نزدیکی سطح سریعتر رخ می‌دهد و ضریب تقویت دینامیکی شتاب بیشینه با افزایش عمق مدفون لایه نرم کاهش می‌یابد.

همان گونه که مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد، وجود لایه ضعیف تأثیر قابل توجهی بر پاسخ لرزه‌ای ساختگاه دارد. تأثیر ضخامت و عمق مدفون یک لایه ضعیف

توصیف رفتار سیکلیک خاک از مدل هایپربولیک استفاده شد. خصوصیات دینامیکی خاک با استفاده از منحنی های کاهش مدول برشی و میرایی ارائه شده توسط درندلی (۲۰۰۱) تعیین گردید:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + 31.44 \gamma^{0.9174} e^{(0.0314\gamma - 0.0375\gamma^2)}} \quad (1)$$

$$D(\%) = [(6 e^{1.812 \log_{10} \gamma}) \times (\log_{10}(\gamma + 1.1))^{-1.082}] + 2 \quad (2)$$

که γ دامنه کرنش برشی است. براساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران، در طبقه بندی نوع زمین براساس سرعت موج برشی، خاک های متوسط تا نرم دارای سرعت موج برشی کمتر از ۱۷۵ متر بر ثانیه هستند. مشخصات خاک های مختلف در مدل سازی در جدول ۱ براساس مقادیر توصیه شده توسط داس (۲۰۱۱) ارائه شده است.

رکورد زلزله مورد استفاده در این تحقیق، رکورد زمین لرزه ۷/۴ ریشتری طبرس در سال ۱۳۵۷ است که در عمق ۱۰ کیلومتری زمین رخ داد (شکل ۱). این رکورد از پایگاه داده حرکات زمین PEER دریافت گردید.

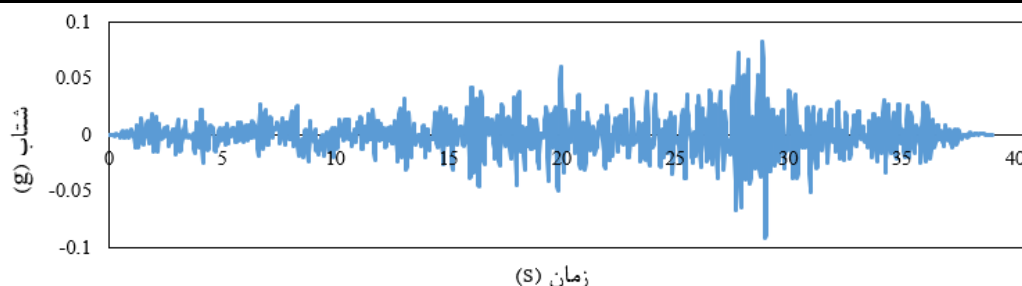
توسط محققین مختلف بررسی شده است، اما تعدد لایه های ضعیف کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی، لایه ضعیف می تواند رس نرم یا ماسه سست باشد که مقایسه اثرات این خاک ها بر پاسخ لرزه ای ساختگاه در مطالعات پیشین دیده نمی شود. از این رو، در این تحقیق، پس از تشریح شبیه سازی عددی پاسخ لرزه ای ساختگاه با استفاده از نرم افزار DEEPSOIL و صحت سنجی آن، مطالعه پارامتریک به منظور تأثیر ضخامت لایه سطحی ضعیف شامل رس نرم و ماسه سست، عمق مدفون لایه ضعیف و تعدد لایه های ضعیف در چینش های مختلف انجام شد و در پایان، نتایج مدل سازی عددی تحلیل و بررسی گردید.

۲. مدل سازی عددی

در این تحقیق، از نرم افزار DEEPSOIL به منظور تحلیل غیرخطی اثرات ساختگاه بر پاسخ لرزه ای استفاده شد. تحلیل غیرخطی، معادله دینامیک حرکت را در حوزه زمان با استفاده از روش نیومارک-بتا^۱ حل می کند. برای

جدول ۱. پارامترهای مکانیکی لایه های خاک در پروفیل های مدل سازی عددی

لایه	وزن مخصوص (kN/m ³)	سرعت موج برشی (m/s)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	عدد نفوذ استاندارد	OCR	شاخص پلاستیسیته (%)	ضریب فشار خاک
رس نرم	۱۵	۱۰۰	۵	۲	۱	۴۰	۰/۹۱۲
ماسه سست	۱۶	۱۵۰	۳۰	۶	۱	۰	۰/۵
ماسه سخت	۲۰	۶۰۰	۴۲	۶۰	۱	۰	۰/۳۳

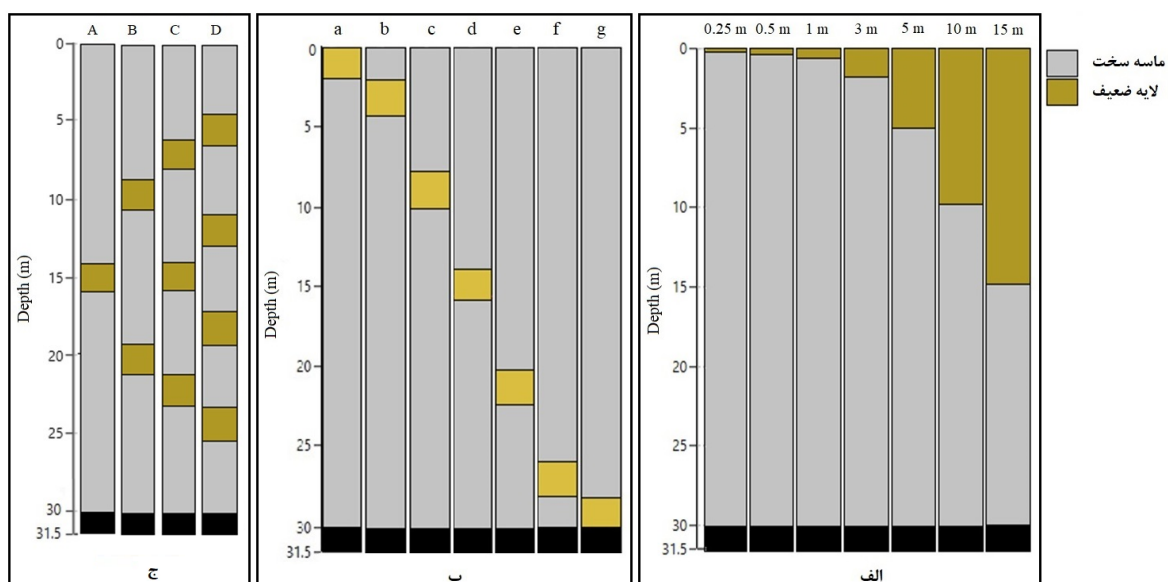


شکل ۱. حرکت ورودی زلزله (زلزله طبرس)

^۱- Newmark-Beta

بعدی، به منظور بررسی تأثیر موقعیت لایه ضعیف بر پاسخ لرزه‌ای، لایه ضعیف با ضخامت ۲ متر در عمق‌های مختلف مطابق شکل ۲-ب قرار گرفت. در گام آخر، لایه‌های ضعیف با تعداد مختلف در اواسط پروفیل قرار گرفتند (شکل ۲-ج).

سناریوهای مختلف جهت بررسی تأثیر ضخامت لایه ضعیف، عمق قرارگیری لایه ضعیف و تعداد لایه‌های ضعیف در نظر گرفته شد. ضخامت لایه ضعیف (رس نرم یا ماسه سست) به صورت مرحله به مرحله از ۰/۲۵ متر تا ۱۵ متر افزایش یافت (شکل ۲-الف).



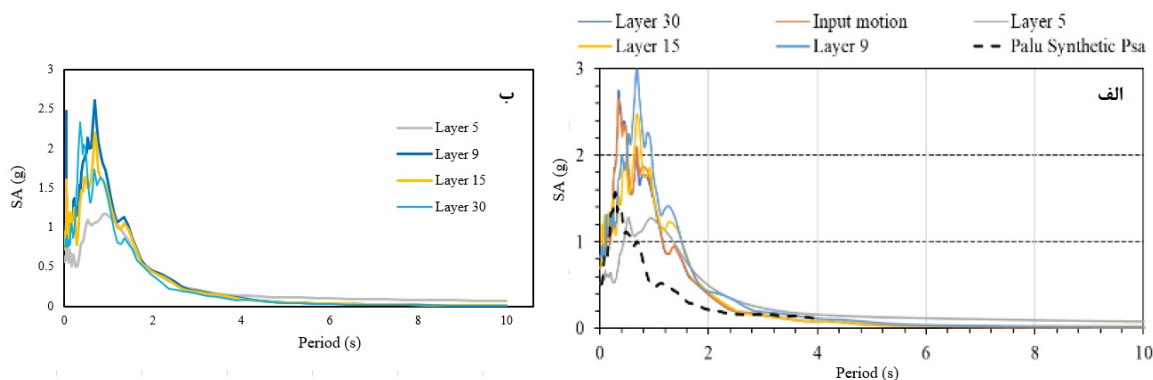
شکل ۲. تصویر شماتیک از سناریوهای مختلف: الف) تغییر ضخامت لایه ضعیف، ب) قرارگیری لایه ضعیف با ضخامت ۲ متر در عمق‌های مختلف، ج) چینش لایه‌های ضعیف با ضخامت ۲ متر با تعداد مختلف در پروفیل

مطالعات جلیل و همکاران (۲۰۲۱) بررسی شده بود. همان طور که در شکل ۳ مشخص است، انطباق خوبی بین طیف پاسخ به دست آمده و نتایج جلیل و همکاران (۲۰۲۱) وجود دارد. مقایسه مقادیر شتاب بیشینه و دوره مشخصه در جدول ۳ مؤید این موضوع است.

به منظور صحت‌سنجی مدل عددی در تعیین شتاب بیشینه و دوره مشخصه پاسخ لرزه‌ای سازه، پروفیل خاک به ضخامت ۳۰ متر و با مشخصات ارائه شده در مطالعات جلیل و همکاران (۲۰۲۱) شبیه‌سازی شد. زلزله کوبه برای تحلیل پاسخ سازه اعمال گردید. طیف پاسخ چهار لایه با مشخصات ارائه شده در جدول ۲ در

جدول ۲. پارامترهای مکانیکی لایه‌های خاک در مطالعات جلیل و همکاران (۲۰۲۱) جهت صحت‌سنجی

شماره لایه	جنس لایه	ضخامت لایه (m)	وزن مخصوص (kN/m ³)	سرعت موج برشی (m/s)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	OCR	ضریب فشار خاک
۵	ماسه سیلت دار	۱	۱۷/۵	۱۶۴/۲۳	۳۰	۱	۰/۵
۹	ماسه شن دار	۱	۱۷/۵	۲۴۳/۶۳	۴۵	۱	۰/۲۹
۱۵	ماسه	۱	۱۷/۵	۲۳۳/۴۷	۳۰	۱	۰/۵
۳۰	ماسه شن دار	۱	۱۷/۵	۳۱۸/۹۶	۴۲	۱	۰/۳۳



شکل ۳. مقایسه طیف پاسخ به دست آمده از: الف) مطالعات جلیل و همکاران (۲۰۲۱) و ب) مدل سازی عددی در این تحقیق.

جدول ۳. مقایسه شتاب بیشینه و دوره مشخصه به دست آمده در این تحقیق با مدل جلیل و همکاران (۲۰۲۱)

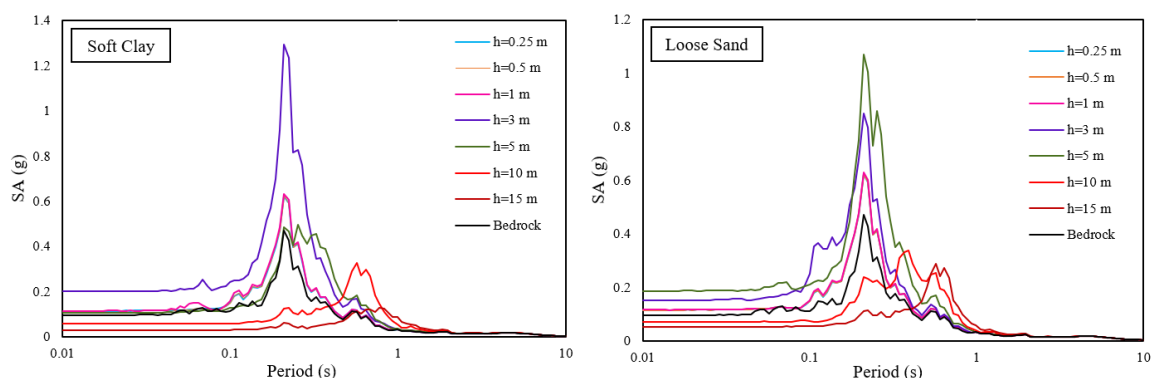
لایه	PGA (g)			دوره مشخصه (s)		
	مدل جلیل و همکاران	در این تحقیق	درصد خطا	مدل جلیل و همکاران	در این تحقیق	درصد خطا
۵	۱/۲۳	۱/۱۸	۴/۱	۰/۸۵	۰/۹۳	۹/۴
۹	۳	۲/۶	۱۳/۳	۰/۷۵	۰/۶۸	۹/۳
۱۵	۲/۳	۲/۲	۴/۳	۰/۷	۰/۸	۱۴/۳
۳۰	۲/۶۵	۲/۳۴	۱۱/۷	۰/۳۸	۰/۳۴	۱۰/۵

۳. نتایج و تحلیل آنها

۳-۱. تأثیر ضخامت لایه ضعیف سطحی

نمودارهای شتاب طیفی که در شکل ۴ ارائه شده است، نشان می دهند که وجود لایه رس نرم و ماسه سست با ضخامت های مختلف موجب تغییر شتاب طیفی می شود. در لایه های نازک تر، پاسخ لرزه ای افزایش می یابد. برای خاک رسی، ضخامت بحرانی ۳ متر و برای خاک ماسه ای سست، ضخامت بحرانی ۵ متر مشاهده شد. به طوری که در این ضخامت ها، شتاب بیشینه به ترتیب ۲/۷ و ۲/۳

برابر شتاب در سنگ بستر بود. چنین افزایش قابل توجهی به دلیل وجود لایه ضعیف، در مطالعات شیا و همکاران (۲۰۱۴) نیز مشاهده شده است. بیشتر بودن شتاب بیشینه در خاک رسی نسبت به خاک ماسه ای ناشی از میرایی کمتر خاک های رسی در مقایسه با ماسه است (کرامر و استوارت، ۲۰۲۴). همانطور که از جدول ۴ مشخص است دوره مشخصه تا ضخامت بحرانی تغییری نمی کند. تغییر ناچیز دوره مشخصه تا یک ضخامت معین در آزمایش های میز لرزه انجام شده توسط وانگ و همکاران (۲۰۱۹) نیز مشاهده شده است.



شکل ۴. طیف شتاب برای ضخامت‌های مختلف لایه ضعیف سطحی (رس نرم (Soft clay) و ماسه سست (Loose sand))

جدول ۴. مقادیر حداکثر شتاب زمین (PGA) و دوره مشخصه برای لایه ضعیف سطحی با ضخامت‌های مختلف

نوع خاک	ضخامت (m)	۰/۲۵	۰/۵	۱	۳	۵	۱۰	۱۵	سنگ بستر
رس نرم	PGA (g)	۰/۶۲	۰/۶۲	۰/۶۳	۱/۲۹	۰/۵۰	۰/۳۳	۰/۱۳	۰/۴۷
	دوره مشخصه (s)	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۵۶	۰/۷۷	۰/۲۱
ماسه سست	PGA (g)	۰/۶۲	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۸۵	۱/۰۷	۰/۳۴	۰/۲۹	۰/۴۷
	دوره مشخصه (s)	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۳۹	۰/۵۶	۰/۲۱

یکدیگر هستند، مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن به صورت مبسوط در مطالعات نجفی (۲۰۲۴) ارائه شده است. برای این شش رکورد، مشابه رکورد زلزله طبرس، نتایج به دست آمده برای ضخامت‌های مختلف نشان داد که تمامی طیف‌ها در ضخامت‌های کم (بین ۰/۲۵ تا ۳ متر) دچار تشدید قابل توجهی در دوره‌های تناوب کوتاه می‌شوند.

۲-۳. تأثیر موقعیت لایه ضعیف

نمودارهای شتاب طیفی برای قرار گرفتن لایه ضعیف در عمق‌های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که از نتایج بخش ۳-۱ انتظار می‌رود، قرارگیری لایه ضعیف در عمق بحرانی موجب افزایش شتاب بیشینه می‌شود؛ به طوری که با حضور لایه ضعیف رسی در سطح و در عمق دو متری از سطح زمین، شتاب بیشینه نسبت به سنگ بستر به ترتیب ۱/۸ و ۱/۴ برابر و با حضور لایه ماسه سست، ۱/۷ و ۱/۳ برابر بود. از نمودارهای

با افزایش ضخامت لایه ضعیف از یک مقدار مشخص، پاسخ لرزه‌ای کمتر بوده و شتاب بیشینه در دوره‌های تناوب بالاتر اتفاق می‌افتد. این نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لایه ضعیف سطحی، قابلیت تغییر شکل آن کاهش یافته و می‌تواند با مستهلک کردن انرژی، تشدید شتاب کمتری به همراه داشته باشد. مقدار دوره مشخصه در ضخامت ۱۵ متر به ترتیب برای خاک رسی و ماسه‌ای ۳/۷ و ۲/۷ برابر دوره مشخصه در سنگ بستر بود. دوره مشخصه حرکات زمین به ضخامت خاک و سرعت موج برشی آن وابسته است. بنابراین، با افزایش ضخامت لایه ضعیف و کاهش سختی خاک، افزایش دوره مشخصه قابل انتظار است. افزایش دوره مشخصه در ضخامت‌های بیشتر باید در طراحی سازه‌های با دوره تناوب بالا مورد توجه قرار گیرد.

برای دستیابی به نتایج دقیق‌تر، سناریوی تغییر ضخامت لایه ضعیف رسی با استفاده از شش رکورد که از نظر بزرگی، فاصله از گسل و ویژگی‌های حرکتی مشابه

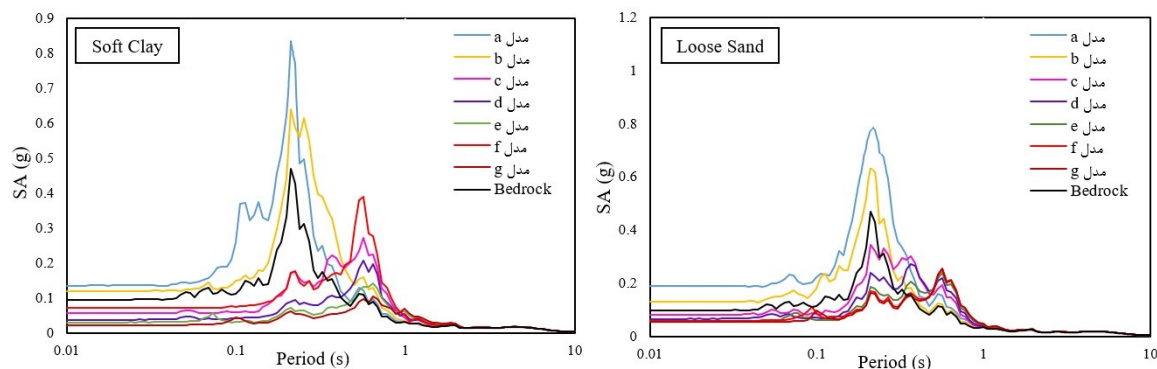
شتاب طیفی مشخص است که عمق مدفون لایه ضعیف مانع تشدید امواج لرزه‌ای می‌شود.

ضعیف، نزدیک سنگ بستر قرار داشت (۰/۶۴ ثانیه برای خاک رسی و ۰/۵۶ ثانیه برای خاک ماسه سست). می‌توان نتیجه گرفت که لایه ضعیف در عمق مدفون بیشتر، مانع انتشار موج در دوره‌های تناوب کم می‌شود. بنابراین، برای سازه‌های کوتاه‌مرتبه، وجود لایه ضعیف نزدیک به سطح زمین و برای سازه‌های بلندمرتبه، وجود لایه ضعیف در اعماق می‌تواند موجب تشدید آسیب به سازه‌ها گردد.

با قرارگیری لایه ضعیف تا عمق بحرانی، تغییری در دوره مشخصه مشاهده نشد (جدول ۵). با وجود لایه ضعیف در اعماق بیشتر از عمق بحرانی، شتاب بیشینه کاهش یافته و مقدار آن در دوره‌های تناوب بالا مشاهده می‌شود. بیشترین دوره مشخصه زمانی بود که لایه

جدول ۵. مقادیر حداکثر شتاب زمین (PGA) و دوره مشخصه برای موقعیت‌های مختلف لایه ضعیف

نوع خاک	مدل	a	b	c	d	e	f	g	سنگ بستر
رس نرم	PGA (g)	۰/۸۵	۰/۶۵	۰/۲۷	۰/۲۱	۰/۱۴	۰/۳۹	۰/۱۱	۰/۴۷
	دوره مشخصه (s)	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۶۴	۰/۵۶	۰/۶۴	۰/۲۱
ماسه سست	PGA (g)	۰/۸۰	۰/۶۲	۰/۳۴	۰/۲۷	۰/۲۴	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۴۷
	دوره مشخصه (s)	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۳۶	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۵۶	۰/۲۱



شکل ۵. طیف شتاب برای موقعیت‌های مختلف لایه ضعیف (رس نرم (Soft clay) و ماسه سست (Loose sand))

آن منعکس شده و بخشی از آن به لایه سخت‌تر منتقل می‌شود. تعدد لایه‌های ضعیف بین لایه‌های سخت، باعث این انعکاس و انتقال متوالی در لایه‌ها می‌گردد. اگرچه وجود چندین لایه ضعیف منجر به کاهش شتاب بیشینه می‌شود، اما در طیف شتاب، پیک‌های متوالی در دوره‌های تناوب مختلف، به‌خصوص برای خاک ماسه‌ای سست، مشهود است که نشان می‌دهد در صورت تعدد لایه‌های ضعیف، سازه‌ها با دوره‌های تناوب مختلف می‌توانند

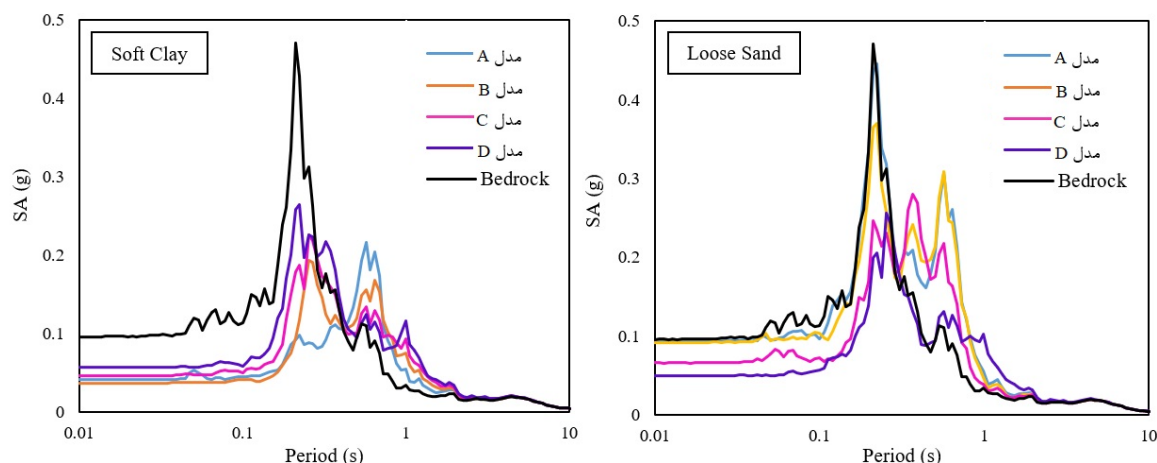
۳-۳. تأثیر تعداد لایه‌های ضعیف

با در نظر گرفتن یک تا چهار لایه ضعیف در پروفیل خاک، مشاهده شد که طیف شتاب مطابق شکل ۶ تغییر می‌کند. شتاب بیشینه با وجود چهار لایه رسی و ماسه‌ای سست در عمق‌های مختلف حدود ۴۷ درصد کاهش یافت. افزایش تعداد لایه‌های ضعیف میانی باعث انعکاس و انکسار قوی‌تر امواج لرزه‌ای می‌گردد. وقتی امواج تنش در لایه ضعیف به لایه سخت‌تر می‌رسند، بخشی از انرژی

نسبت به حرکت ورودی دارد. برای خاک ماسه‌ای سست نسبت به خاک رسی، شتاب بیشینه بیشتری مشاهده شد که نشان می‌دهد تعداد لایه‌ها می‌تواند میرایی مصالح را تحت تأثیر قرار دهد.

تحت تأثیر قرار بگیرند. این پیک‌های متوالی ناشی از تشدید لایه‌های ضعیف است و براساس طیف شتاب، با افزایش عمق مدفون لایه ضعیف، دامنه پیک اول افزایش می‌یابد.

همانطور که از جدول ۶ مشخص است دوره مشخصه در حالت وجود دو لایه و بیشتر، افزایش کمی



شکل ۶. طیف شتاب برای تعداد مختلف لایه‌های ضعیف (رس نرم (Soft clay) و ماسه سست (Loose sand))

جدول ۶. مقادیر حداکثر شتاب زمین (PGA) و دوره مشخصه برای تعداد مختلف لایه‌های ضعیف

نوع خاک	مدل	A	B	C	D	سنگ بستر
رس نرم	PGA (g)	۰/۲۱	۰/۱۹	۰/۲۱	۰/۲۵	۰/۴۷
	دوره مشخصه (s)	۰/۵۶	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۲۱
ماسه سست	PGA (g)	۰/۴۴	۰/۳۷	۰/۲۷	۰/۲۵	۰/۴۷
	دوره مشخصه (s)	۰/۳۶	۰/۲۲	۰/۲۲	۰/۲۵	۰/۲۱

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با استفاده از نرم‌افزار DEEPSOIL تأثیر لایه ضعیف شامل رس نرم و ماسه سست بر پاسخ لرزه‌ای ساختگاه بررسی شد. پارامترهای مختلف از جمله ضخامت لایه ضعیف سطحی، عمق قرار گیری لایه ضعیف و تعداد لایه‌های ضعیف در نظر گرفته شدند. نتایج زیر از تحلیل و بررسی پاسخ لرزه‌ای ساختگاه در حالت‌های مختلف به دست آمد:

- خاک رس نرم تا ضخامت ۳ متر و خاک ماسه‌ای سست تا ضخامت ۵ متر در سطح زمین موجب افزایش شتاب بیشینه و تشدید آسیب به سازه‌ها می‌شود. به طوری که مشاهده گردید در این حالت‌ها شتاب بیشینه به ترتیب ۲/۷ و ۲/۳ برابر شتاب در سنگ بستر است. بنابراین، باید از احداث سازه‌های مهم مانند زیرساخت‌های حمل و نقل در ساختگاه-هایی با خاک ضعیف سطحی اجتناب کرد یا با روش-های مختلف بهسازی، خصوصیات مکانیکی آن را

مشاهده شد. با این وجود، در این حالت، پیک‌های متوالی در دوره‌های تناوب متفاوت، به‌خصوص برای خاک ماسه‌ای سست، می‌تواند آسیب به سازه‌ها با دوره‌های تناوب مختلف را در پی داشته باشد. همچنین، مشخص شد که تعدد لایه‌ها، میرایی مصالح را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به طوری که در صورت چندین لایه ضعیف، میزان کاهش شتاب در خاک ماسه‌ای سست نسبت به خاک رس نرم کمتر بود.

- در بین پارامترهای بررسی شده، مشاهده شد که وجود لایه ضعیف با ضخامت مشخص در سطح، نسبت به عمق قرارگیری لایه ضعیف و تعدد لایه‌های ضعیف، بیشترین تأثیر را بر افزایش شتاب بیشینه نسبت به سنگ بستر دارد.

شکل و شیب لایه‌ها و فشار آب حفره‌ای در لایه‌ها از پارامترهای مهم دیگری هستند که در کنار استفاده از نتایج این تحقیق، تأثیر آنها باید در نظر گرفته شود.

بهبود بخشید. با بیشتر شدن ضخامت، شتاب بیشینه کاهش، اما دوره مشخصه افزایش می‌یابد که می‌تواند برای سازه‌های بلندمرتبه مشکل‌ساز باشد.

- بررسی تأثیر عمق قرارگیری لایه ضعیف نشان داد که وجود لایه ضعیف در عمق بحرانی (۳ متر برای خاک رسی و ۵ متر برای خاک ماسه‌ای سست) منجر به افزایش شتاب بیشینه نسبت به سنگ بستر می‌شود. اما قرارگیری لایه ضعیف در عمق‌های پایین‌تر، کاهش شتاب بیشینه را به دنبال دارد. از طرفی، نتایج نشان داد که حضور لایه ضعیف در اعماق بیشتر، دوره مشخصه را افزایش داده که در طراحی‌های لرزه‌ای باید مورد توجه قرار گیرد.
- طیف شتاب پروفیل خاک با چندین لایه ضعیف مؤید کاهش شتاب بیشینه نسبت به سنگ بستر بود. به طوری که با وجود چهار لایه ضعیف، کاهش حدود ۴۷ درصدی شتاب بیشینه نسبت به سنگ بستر

۵. مراجع

- Bo, J. S., Li, X. L., Liu, H. S., Wu, Z. Y. and Liu, D. D. 2004. "Effects of soil layer construction on characteristic periods of response spectra". 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 2729.
- Borcherdt, R. D. and Gibbs, J. F. 1976. "Effects of local geological conditions in the San Francisco Bay region on ground motions and the intensities of the 1906 earthquake". Bull. Seismol. Soc. Am., 66(2): 467-500.
- Chopra, S. and Choudhury, P. 2011. "A study of response spectra for different geological conditions in Gujarat, India". Soil Dyn. Earthq. Eng., 31(11): 1551-1564.
- Darendeli, M. B. 2001. "Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves". Ph.D. Thesis, University of Texas at Austin.
- Das, B. M. 2011. "Principles of foundation engineering". 7th Edition, Cengage Learning.
- Glinisky, N., Bertrand, E. and Régnier, J. 2019. "Numerical simulation of topographical and geological site effects. Applications to canonical topographies and Rognes hill, South East France". Soil Dyn. Earthq. Eng., 116: 620-636.
- Jahanpoor, F., Sepahvand, M. and Nasrabadi, A. 2017. "Soil natural frequency assessment for planned grade-separated junctions and under-development areas in the city of Kerman". J. Transport. Infrastruct. Eng., 3(3): 97-114.
- Jalil, A., Fathani, T. F., Satyarno, I. and Wilopo, W. 2021. "Nonlinear site response analysis approach to investigate the effect of pore water pressure on liquefaction in Palu". IOP Conference Series: Earth and Environ. Sci., 871(1): 012053.
- Jeong, S., Asimaki, D., Dafni, J. and Wartman, J. 2019. "How topography-dependent are topographic effects? Complementary numerical modeling of centrifuge experiments". Soil Dyn. Earthq. Eng., 116: 654-667.
- Kramer, S. L. and Stewart, J. P. 2024. "Geotechnical earthquake engineering". 2nd Edition, CRC Press.
- Li, Y., Hao, B., Chen, Z., Zhou, Z., Bian, Z., Han, Y. and Peng, C. 2023. "Discussion on adjustment method of the characteristic period of site response spectrum with soft soil layer". Sustainability, 15(11): 8837.
- Liu, L. P., Zhan, B., Li, Y. and Yang, S. 2006. "The effect of soft soil layer on dynamic property for the slope". 4th International Conference on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan, Paper No. 35.

- Moradi, M. M., Rahnema, H. and Mirassi, S. 2023. "Evaluation the impact of weak layer in layered soil media using MASW method". *Sci. Quarter. J. Iran. Assoc.Eng. Geol.*, 15(4): 31-46.
- Najafi, E. 2024. "Investigating the effect of the weak layer on the seismic response of the construction". Master of Science Thesis, Department of Civil Engineering, Sahand University of Technology.
- Rahnema, H. and Mirasi, S. 2012. "Seismic and geotechnical study of land subsidence and vulnerability of rural buildings". *Int. J. Geosci.*, 3(4A): 878-884.
- Şafak, E. 2001. "Local site effects and dynamic soil behavior". *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 21(5): 453-458.
- Seed, H. B., Romo, M. P., Sun, J. I., Jaime, A. and Lysmer, J. 1988. "The Mexico earthquake of September 19, 1985-Relationships between soil conditions and earthquake ground motions". *Earthq. Spectra*, 4(4): 687-729.
- Stanko, D., Markušić, S., Strelec, S. and Gazdek, M. 2017. "Equivalent-linear site response analysis on the site of the historical Trakošćan Castle, Croatia, using HVSR method". *Environ. Earth Sci.*, 76: 642.
- Wang, L., Wu, Z., Xia, K., Liu, K., Wang, P., Pu, X. and Li, L. 2019. "Amplification of thickness and topography of loess deposit on seismic ground motion and its seismic design methods". *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 126: 105090.
- Xia, X., Wang, Y. B., Xi, S. Y., Sun, J., Xu, H. D. and Huang, Y. 2014. "Study on effects of earthquake response of soft interlayer". *Adv. Mater. Res.*, 1049-1050: 205-208.
- Yang, S., Han, X., Lei, Q., Yu, S. and Liu, C. 2021. "Study on the seismic effect of the interbedded soil layer in the Yinchuan Alluvial Plain". *Adv. Civ. Eng.*, 1519750.
- Yazdandoust, M., Komak Panah, A. and Ghalandarzadeh, A. 2015. "Determination of pseudo-static coefficient of hybrid soil nail/MSE walls based on seismic performance levels". *J. Transport. Infrastruct. Eng.*, 1(2): 1-19.
- Zhai, E. 2011. "An overview of seismic ground motion design criteria for transportation infrastructures in USA". *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, 3(3): 244-249.