



Investigating the Effect of the Weak Clay Layer on the Seismic Site Response

Sadegh Ghavami¹, Mehrdad Emami Tabrizi², Elnaz Najafi³

1- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Sahand university of Technology, Tabriz, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

3- M.Sc. Graduate, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

ghavamijamal@sut.ac.ir

Abstract

Site conditions, including the shape and depth of soil layers, their location, and the topography of the surrounding area, significantly affect the seismic site response. In this study, the effect of the thickness (0.25 to 15 m) and depth of the weak clay layer on the seismic site response was investigated using the DEEPSOIL software through nonlinear time-domain analysis. Ground motion records from the 1978 Tabas (Iran) and 1935 Helena (USA) earthquakes were selected for the site response analysis. The results showed that when a weak layer is located near the surface with a thickness of up to 5 m, the maximum acceleration increases significantly. However, as the thickness of the weak layer increases beyond 5 m, the seismic response decreases, and the maximum acceleration occurs at longer periods. A comparison of acceleration spectra for different weak layer depths revealed that a weak layer located near the ground surface has the greatest impact on the acceleration spectrum, leading to an increase in maximum acceleration. The findings of this study can contribute to improving geotechnical design practices and mitigating earthquake hazards.

Keywords: Seismic Site Response, Weak Clay Layer, Acceleration Spectra, Nonlinear Analysis

بررسی تأثیر لایه ضعیف رسی بر پاسخ لرزه ای ساختمان

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

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

۳- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

ghavamijamal@sut.ac.ir

چکیده

شرایط ساختمان از جمله شکل و عمق لایه ها، نحوه قرارگیری آنها و توپوگرافی منطقه بر پاسخ لرزه ای ساختمان مؤثر است. در این تحقیق، با استفاده از نرم افزار DEEPSOIL، اثر ضخامت لایه ضعیف رس (۲۵ تا ۱۵ متر) و موقعیت آن در اعماق مختلف بر پاسخ لرزه ای ساختمان با تحلیل غیرخطی در حوزه زمان بررسی می شود. رکورد های زلزله مورد استفاده در این پژوهش، زمین لرزه ۷/۴ ریشتری طیس (ایران) و زمین لرزه ۶ ریشتری هلنا (ایالات متحده آمریکا) است. نتایج نشان داد که در حالت وجود لایه ضعیف سطحی تا ضخامت ۵ متر، شتاب ماکزیمم به طور قابل توجهی افزایش می یابد. با افزایش ضخامت لایه ضعیف به بیشتر از ۵ متر، پاسخ لرزه ای کم تر بوده و شتاب ماکزیمم در دوره های تناوب بالاتر رخ می دهد. مقایسه طیف شتاب برای موقعیت های 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 ماکزیمم می گردد. یافته های این تحقیق برای بهبود طراحی های ژئوتکنیکی و کاهش خطرات زلزله مفید خواهد بود.

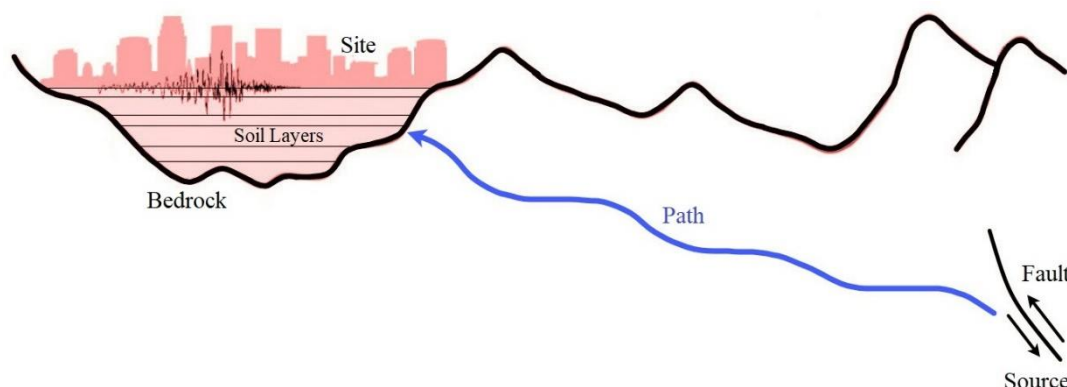
کلمات کلیدی: پاسخ لرزه ای ساختمان، لایه ضعیف رس، طیف شتاب، تحلیل غیرخطی.

۱- مقدمه

هنگامی که یک گسل در زیر سطح زمین گسیخته می شود، امواج لرزه ای از منبع به تمام جهات منتشر می شوند. از آنجا که این امواج از میان ده ها کیلومتر سنگ و غالباً کمتر از صد متر خاک عبور می کنند و به سطح زمین می رسند، لایه های خاک نقش بسیار مهمی در تعیین خصوصیات حرکت سطح زمین ایفا می کنند (شکل ۱). شرایط محلی خاک، زمین شناسی و توپوگرافی یا به طور خلاصه «شرایط ساختمان» باعث تغییر در دامنه، محتوای فرکانسی و مدت زمان حرکت نیرومند زمین و در نهایت آسیب به سازه ها می گردد [1-3]. در طراحی لرزه ای سازه ها، روش های طراحی و ساخت که با ویژگی های ساختمان سازگار هستند، می توانند به طور مؤثری آسیب های وارد بر سازه را زلزله را کاهش داده و با افزایش عمر مفید آن، به پایداری سازه کمک کنند. در سال های اخیر، تأثیر شرایط خاک نزدیک به سطح بر حرکات زمین مورد توجه فزاینده ای قرار گرفته است و مشاهدات حرکت نیرومند زمین نشان می دهد که اثر تشدید حرکت سطحی زمین در خاک های نرم و سست نسبت به خاک های سخت مشهودتر است [3-6]. به طور مثال، مشاهدات میدانی پس از زلزله ۱۹۰۶ سانفرانسیسکو نشان داد که میزان خسارت در مناطق مختلف به طور قابل توجهی با ماهیت خاک های سطحی مرتبط است و آسیب به سازه های واقع بر خاک نرم بسیار شدیدتر بود [7]. در موردی دیگر، در زمین لرزه ای که در سال ۱۹۸۵ در مکزیک رخ داد، خسارات در مکزیکوسیته که در فاصله ۴۰۰ کیلومتری از مرکز زمین لرزه قرار داشت، نسبت به مناطق دیگر شدیدتر بود. بررسی ها نشان داد که مکزیکوسیته در یک حوضه رسوبی ضعیف واقع شده است که باعث تشدید حرکت لرزه ای و طولانی شدن مدت زمان آن شده است [8]. براساس زمین لرزه های مخربی که در سه دهه گذشته رخ داده اند (نورتیج در آمریکا (۱۹۹۴)، کوبه در ژاپن (۱۹۹۵)، کوجالی در ترکیه (۱۹۹۹)، سیچوان در چین (۲۰۰۸)، شیلی (۲۰۱۰)، کرایست چرچ در نیوزیلند (۲۰۱۱) و نیال (۲۰۱۵))، می توان به این نتیجه رسید که تأثیر شرایط ساختمان بر توزیع خسارت زلزله در مقایسه با اثرات مسیر امواج و اثرات ناشی از نزدیکی به منبع زلزله قابل توجه است [9]. مطالعات پیشین با استفاده از مدل های المان محدود یا تفاضل محدود، اهمیت تأثیر دره آبرفتی و حوضه رسوبی را بر حرکات لرزه ای یافته و مشخص کردند که امواج سطحی محلی ایجاد شده و به دام افتادن آنها در لایه های نرم

خاک منجر به تشدید پاسخ های لرزه ای می شود [10]. مطالعات عددی انجام شده توسط Liu و همکاران [11] تأیید کرد که با وقوع زمین لرزه، شیب با لایه خاک نرم نسبت به شیب بدون لایه خاک نرم، راحت تر تخریب می شود. بررسی طیف پاسخ شتاب در ۳۲ سایت در هند نشان داد که شکل طیف پاسخ شتاب تحت تأثیر زمین شناسی منطقه و شرایط ساختگاه است [12]. نتایج مطالعات Wang و همکاران [13] بر 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 ماکزیمم می شود، بلکه دوره های غالب حرکت زمین را نیز افزایش می دهد. Moradi و همکاران [14] با شبیه سازی عددی نتیجه گرفتند که وجود لایه ضعیف سبب ایجاد ناپیوستگی و پرش در طیف پراکندگی (تغییرات سرعت در برابر فرکانس) امواج رابلی می شود که با افزایش عمق مدفون لایه ضعیف، موقعیت ناپیوستگی و پرش از فرکانس های بالاتر به سمت فرکانس های پایین جابجا می شود.

همان گونه که مرور ادبیات فنی نشان می دهد، وجود لایه ضعیف تأثیر قابل توجهی بر پاسخ لرزه ای ساختگاه دارد. در این تحقیق، با استفاده از نرم افزار DEEPSOIL تأثیر ضخامت لایه سطحی رس نرم و عمق مدفون آن بر پاسخ لرزه ای ساختگاه مورد بررسی قرار می گیرد.



شکل ۱- تصویر شماتیک برای نشان دادن اثرات منبع، مسیر و ساختگاه بر روی شکل موج لرزه ای ثبت شده

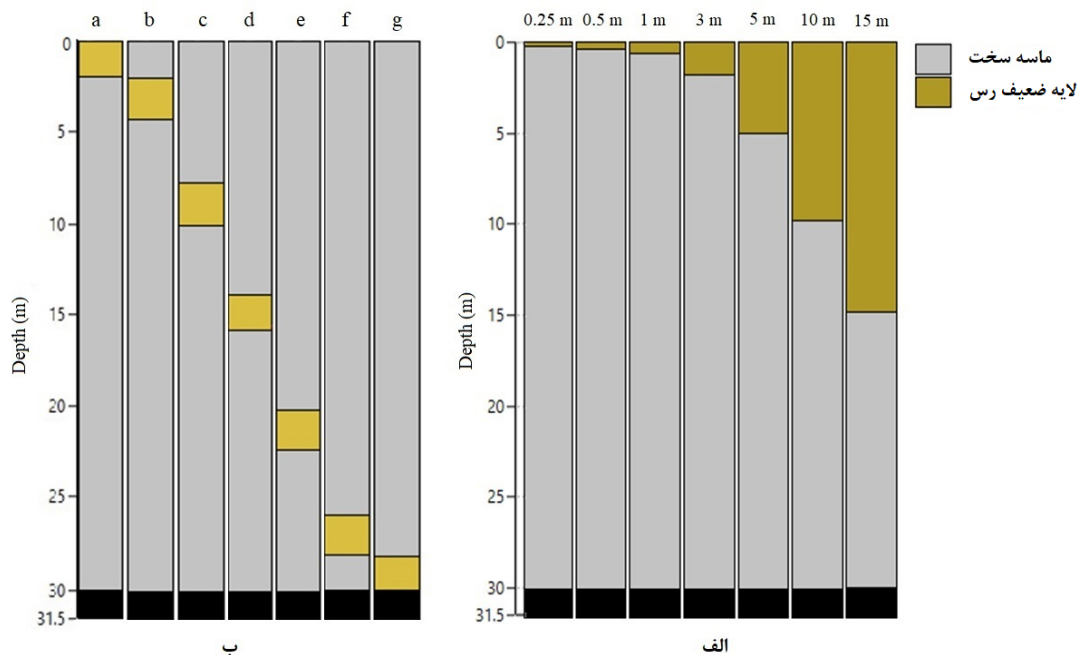
۲- مدل سازی عددی

در این تحقیق، از نرم افزار DEEPSOIL به منظور تحلیل غیرخطی اثرات ساختگاه بر پاسخ لرزه ای استفاده شد. تحلیل غیرخطی، معادله دینامیکی حرکت را در حوزه زمان با استفاده از روش نیومارک-بتا (Newmark-Beta) حل می کند. برای توصیف رفتار سیکلیک خاک از مدل هایپربولیک استفاده شد. خصوصیات خاک با استفاده از منحنی های کاهش مدول برشی و میرایی ارائه شده توسط Darendeli [15] تعیین گردید. مشخصات خاک های مختلف در مدل سازی در جدول ۱ براساس مقادیر توصیه شده توسط Das [16] ارائه شده است. یکی از رکوردهای زلزله مورد استفاده در این تحقیق، رکورد زمین لرزه ۷/۴ ریشتری طبرس در سال ۱۳۵۷ هجری شمسی است که در عمق ۱۰ کیلومتری زمین رخ داد و دیگری رکورد زمین لرزه ۶ ریشتری هلنا در ایالت مونتانا ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۳۵ میلادی است.

سناریوهای مختلف جهت بررسی تأثیر ضخامت لایه ضعیف رسی و عمق قرارگیری آن در نظر گرفته شد. ضخامت لایه رس به صورت مرحله به مرحله از ۰/۲۵ متر تا ۱۵ متر افزایش یافت (شکل ۲-الف). در گام بعدی، به منظور بررسی تأثیر موقعیت لایه ضعیف رسی بر پاسخ لرزه ای، لایه ضعیف با ضخامت ۲ متر در عمق های مختلف مطابق شکل ۲-ب قرار گرفت.

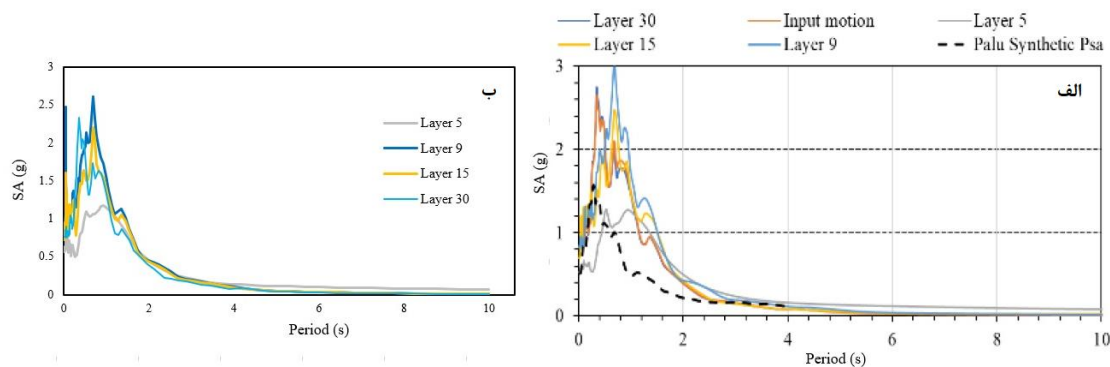
جدول ۱- پارامترهای مکانیکی لایه های خاک در پروفیل های مدل سازی عددی

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



شکل ۲- تصویر شماتیک از سناریوهای مختلف: الف) تغییر ضخامت لایه ضعیف رس، ب) قرارگیری لایه ضعیف رس با ضخامت ۲ متر در عمق‌های مختلف

به منظور صحت سنجی مدل عددی، پروفیل خاک به ضخامت ۳۰ متر و با مشخصات ارائه شده در مطالعات Jalil و همکاران [17] شبیه‌سازی شد. زلزله کوبه برای تحلیل پاسخ ساختمان اعمال گردید. همانطور که در شکل ۳ مشخص است انطباق خوبی بین طیف پاسخ به دست آمده و نتایج Jalil و همکاران [17] وجود دارد.



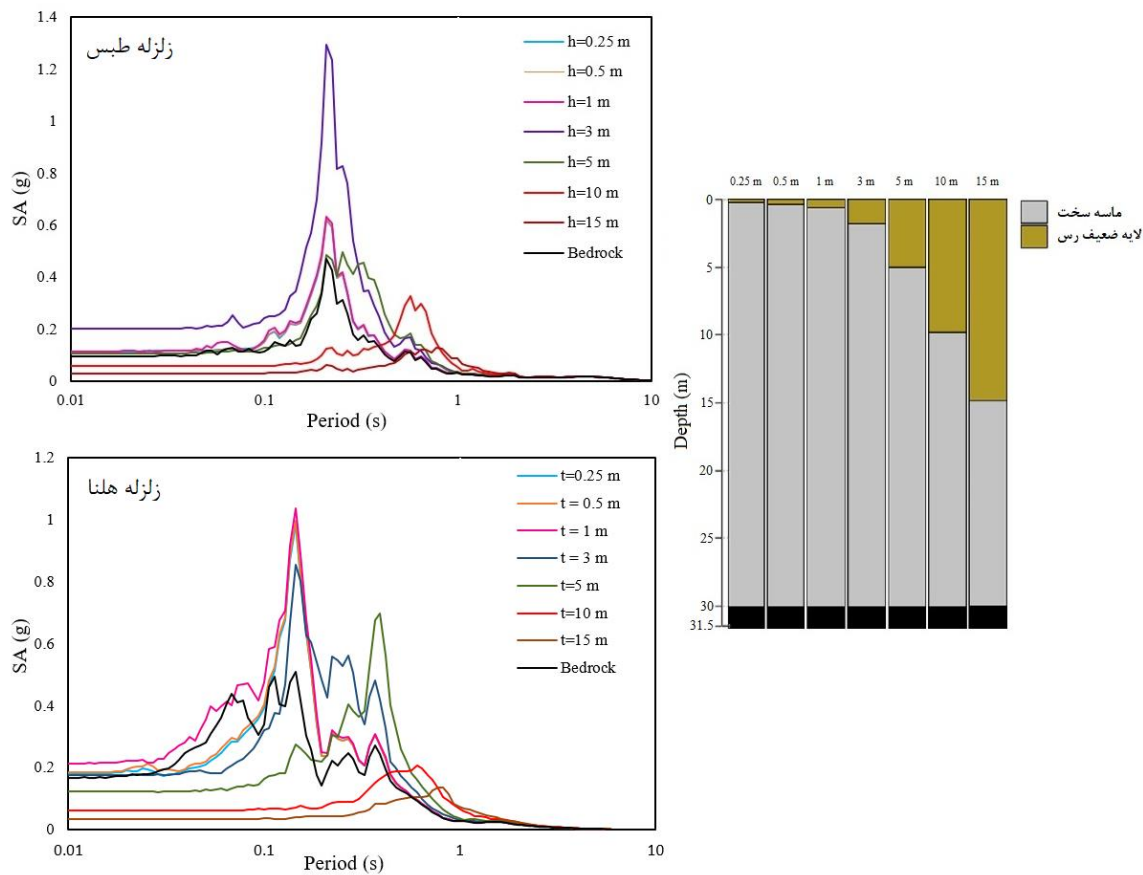
شکل ۳. مقایسه طیف پاسخ به دست آمده از الف) مطالعات Jalil و همکاران [17] و ب) مدلسازی عددی در این تحقیق.

۳- بیان و تحلیل نتایج

نمودارهای شتاب طیفی که در شکل ۴ ارائه شده است، نشان می‌دهد که وجود لایه ضعیف رس با ضخامت‌های مختلف، موجب تغییر شتاب طیفی می‌شود. در لایه‌های نازک‌تر، پاسخ لرزه‌ای افزایش می‌یابد. براساس نتایج، ضخامت بحرانی لایه ضعیف رسی در سطح برای رکورد زلزله طبس و هلنا به ترتیب ۳ متر و ۱ متر به دست آمد. به طوری که در این ضخامت‌ها، شتاب ماکزیمم به ترتیب ۲/۷ و ۲ برابر شتاب در سنگ بستر بود. همانطور که از

جدول ۲ مشخص است دوره مشخصه تا ضخامت بحرانی تغییری نمی‌کند. تغییر ناچیز دوره مشخصه تا یک ضخامت معین در آزمایش‌های میز لرزه انجام شده توسط Wang و همکاران [13] نیز مشاهده شده است.

با افزایش ضخامت لایه رس از یک مقدار مشخص، پاسخ لرزه‌ای کم‌تر بوده و شتاب ماکزیمم 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، برای رکورد زلزله طیس و هلنا به ترتیب $3/7$ و $5/7$ 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.

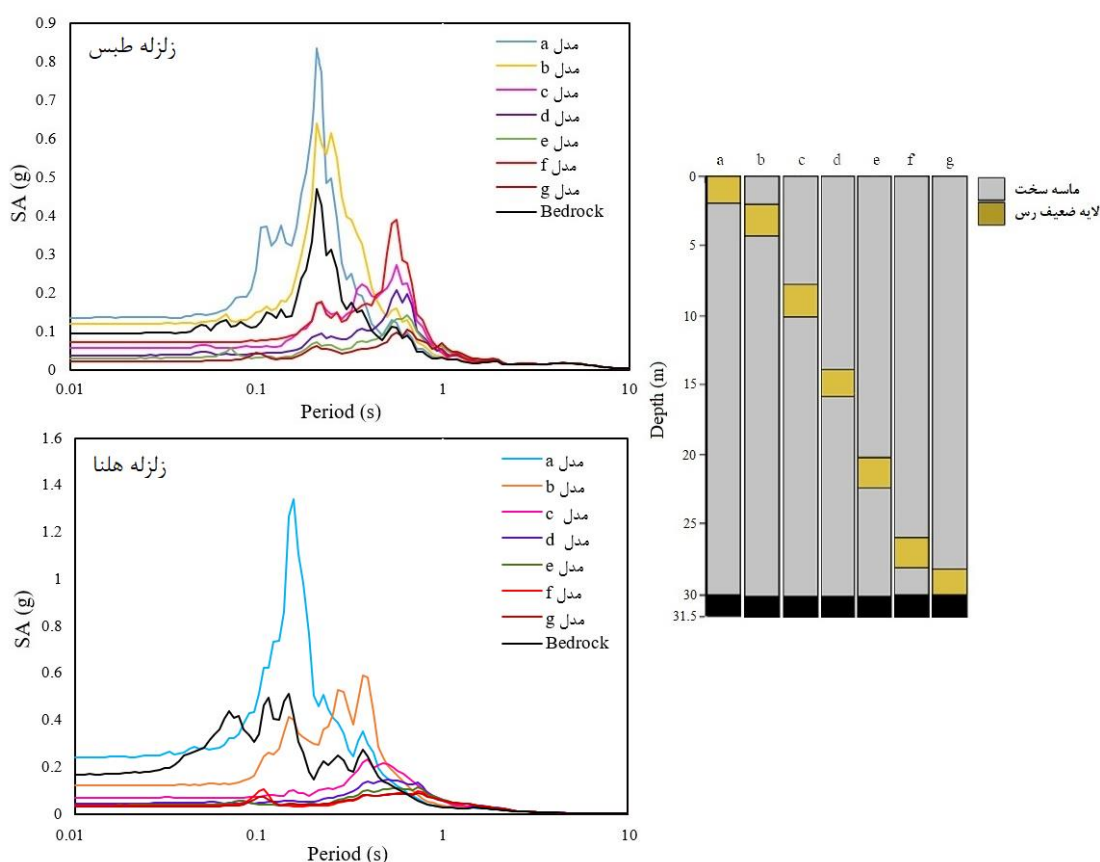


شکل ۴- طیف شتاب برای ضخامت‌های مختلف لایه ضعیف رس در سطح

جدول ۲- مقادیر حداکثر شتاب زمین (PGA) و دوره مشخصه برای لایه ضعیف رس در سطح با ضخامت‌های مختلف

رکورد	ضخامت (m)	۰/۲۵	۰/۵	۱	۳	۵	۱۰	۱۵	سنگ بستر
طیس	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
هلنا	PGA (g)	۰/۹۸	۰/۹۸	۱/۰	۰/۸۵	۰/۷۰	۰/۲۱	۰/۱۴	۰/۵۱
	دوره مشخصه (s)	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۴	۰/۶	۰/۸۲	۰/۱۴

نمودارهای شتاب طیفی برای قرار گرفتن لایه رس در عمق های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که از نتایج ذکر شده در بالا انتظار می رود، قرارگیری لایه رس در عمق بحرانی موجب افزایش شتاب ماکزیمم می شود. به طوری که با حضور لایه رس در سطح و در عمق دو متری از سطح زمین، برای رکورد زلزله طبس، شتاب ماکزیمم نسبت به سنگ بستر به ترتیب ۱/۸ و ۱/۴ برابر بود. برای رکورد زلزله هلنا این نسبت به ترتیب ۲/۶ و ۱/۲ به دست آمد. از نمودارهای شتاب طیفی مشخص است که عمق مدفون لایه ضعیف رس مانع تشدید امواج لرزه ای می شود. با قرارگیری لایه رس تا عمق بحرانی، تغییری در دوره مشخصه مشاهده نشد (جدول ۳). با وجود لایه ضعیف رس در اعماق بیشتر از عمق بحرانی، شتاب ماکزیمم کاهش یافته و مقدار آن در دوره های تناوب بالا مشاهده می شود. بیش ترین دوره مشخصه زمانی بود که لایه رس، نزدیک سنگ بستر قرار داشت (۰/۶۴ ثانیه برای رکورد زلزله طبس و ۰/۷۲ ثانیه برای رکورد زلزله هلنا). می توان نتیجه گرفت که لایه ضعیف رس در عمق مدفون بیشتر، مانع انتشار موج در دوره های تناوب پایین می شود. بنابراین، برای سازه های کوتاه مرتبه، وجود لایه ضعیف رس نزدیک به سطح زمین و برای سازه های بلندمرتبه، وجود لایه ضعیف رس در اعماق می تواند موجب تشدید آسیب به سازه ها گردد.



شکل ۵- طیف شتاب برای موقعیت های مختلف لایه ضعیف رس

جدول ۳- مقادیر حداکثر شتاب زمین (PGA) و دوره مشخصه برای موقعیت های مختلف لایه ضعیف رس

رکورد	مدل	a	b	c	d	e	f	g	سنگ بستر
طبس	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
هلنا	PGA (g)	۱/۳۴	۰/۵۹	۰/۲۳	۰/۱۴	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۰۹	۰/۵۱
	دوره مشخصه (s)	۰/۱۴	۰/۳۶	۰/۳۹	۰/۵	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۱۴

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با استفاده از نرم افزار DEEPSOIL تأثیر وجود لایه ضعیف رس بر پاسخ لرزه ای ساختمان بررسی شد. پارامترهای ضخامت لایه ضعیف سطحی و عمق قرار گیری آن در نظر گرفته شدند. نتایج نشان داد که لایه خاک ضعیف رس تا ضخامت مشخصی در سطح زمین موجب افزایش شتاب ماکزیمم و تشدید آسیب به سازه ها می شود. بنابراین باید از احداث سازه های مهم در ساختمان هایی با خاک رس نرم اجتناب کرد یا با روش های مختلف بهسازی، خصوصیات مکانیکی آن را بهبود بخشید. ضخامت بحرانی لایه خاک ضعیف رس در سطح، برای رکورد زلزله طبس، ۳ متر و برای رکورد زلزله هلنا، ۱ متر به دست آمد. با بیشتر شدن ضخامت، شتاب ماکزیمم کاهش، اما دوره مشخصه افزایش می یابد که می تواند برای سازه های بلند مرتبه مشکل ساز باشد. بررسی تأثیر عمق قرار گیری لایه ضعیف رس نشان داد که وجود لایه ضعیف در عمق بحرانی منجر به افزایش شتاب ماکزیمم نسبت به سنگ بستر می شود. اما قرار گیری لایه ضعیف رس در عمق های پایین تر، کاهش شتاب ماکزیمم را به دنبال دارد. از طرفی نتایج نشان داد که حضور لایه ضعیف رس در اعماق بیشتر، دوره مشخصه را افزایش داده که در طراحی های لرزه ای باید مورد توجه قرار گیرد.

۵- مراجع

1. Glinsky, N., Bertrand, E., & Régnier, J. (2019). Numerical simulation of topographical and geological site effects. Applications to canonical topographies and Rognes hill, South East France. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116, 620-636.
2. Jeong, S., Asimaki, D., Dafni, J., & Wartman, J. (2019). How topography-dependent are topographic effects? Complementary numerical modeling of centrifuge experiments. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116, 654-667.
3. Kramer, S.L. & Stewart, J.P. (2024). *Geotechnical Earthquake Engineering*. 2nd Edition, CRC Press.
4. Şafak, E. (2001). Local site effects and dynamic soil behavior. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 21(5), 453-458.
5. Rahnema, H., & Mirasi, S. (2012). Seismic and Geotechnical Study of Land Subsidence and Vulnerability of Rural Buildings. *International Journal of Geosciences*, 3(4A), 878-884.
6. Yang, S., Han, X., Lei, Q., Yu, S., & Liu, C. (2021). Study on the Seismic Effect of the Interbedded Soil Layer in the Yinchuan Alluvial Plain. *Advances in Civil Engineering*, 1519750.
7. Sánchez-Sesma, F.J., & Crouse, C.B. (2015). Effects of site geology on seismic ground motion: Early history. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(7), 1099-1113.
8. Seed, H.B., Romo, M.P., Sun, J.I., Jaime, A., & Lysmer, J. (1988). The Mexico Earthquake of September 19, 1985- Relationships Between Soil Conditions and Earthquake Ground Motions. *Earthquake Spectra*, 4(4), 687-729.
9. Stanko, D., Markušić, S., Strelec, S., & Gazdek, M. (2017). Equivalent-linear site response analysis on the site of the historical Trakošćan Castle, Croatia, using HVSR method. *Environmental Earth Sciences*, 76, 642.
10. Chen, H.T., & Ho, J.C. (2000). Effects of Ground water on seismic response of basin. *Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland New Zealand. Paper no. 0770.
11. Liu, L.P., Zhan, B., Li, Y., & 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.
12. Chopra, S., & Choudhury, P. (2011). A study of response spectra for different geological conditions in Gujarat, India. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(11), 1551-1564.
13. Wang, L., Wu, Z., Xia, K., Liu, K., Wang, P., Pu, X., & Li, L. (2019). Amplification of thickness and topography of loess deposit on seismic ground motion and its seismic design methods. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 126, 105090.
14. Moradi, M. M., Rahnema, H. & Mirassi, S. (2023). Evaluation the impact of weak layer in layered soil media using MASW method. *Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology*, 15(4), 31-46.
15. 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.
16. Das, B. M. (2011). *Principles of Foundation Engineering*. 7th Edition, Cengage Learning.
17. Jalil, A., Fathani, T. F., Satyarno, I., & 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 Environmental Science*, 871(1), 012053.