

تأثیر اضافه کردن لایه خاک به سطح زمین بر پاسخ لرزه ای ساختمان

مجید محمدی

هیات علمی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ایران، تهران
m.mohammadigh@iiees.ac.ir

احمد حسنی

دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ایران، تهران
a.hassani@iiees.ac.ir

محمدعلی مرادی

دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ایران، تهران
ma.moradi@iiees.ac.ir

کلید واژه‌ها: طیف پاسخ، سرعت موج برشی، لایه خاک اضافه شده، شتاب بیشینه، لایه ضعیف

چکیده

مشخصات ژئوتکنیکی لایه‌های سطحی زمین تأثیرات زیادی را بر موج زلزله و میزان خرابی‌های ناشی از آن می‌گذارد. از این رو، اخیراً برخی از محققان، با استفاده از روش‌های خاص سعی در کاهش PGA و تغییر در محتوای فرکانسی موج زلزله قبل از رسیدن به سازه به منظور کم کردن پاسخ سازه به زلزله پرداخته‌اند که می‌توان به استفاده از لایه‌های مصنوعی خاص نظیر ژئوتکستایل و یا مخلوط لاستیک و خاک در زیر پی سازه اشاره کرد.

در این تحقیق به بررسی اثر یک لایه خاک اضافه شده به سطح یک پروفیل خاک مشخص (پروفیل شهر بم)، بر پاسخ ساختمان پرداخته شده است. لایه اضافه شده دارای سه ضخامت ۱، ۳ و ۶ متر و سرعت موج برشی ۸۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ متر بر ثانیه می‌باشد. همچنین تأثیر اضافه کردن یک لایه ضعیف ۱ متری که در زیر یک لایه سخت ۲ متری قرار دارد، بررسی شده است که عملاً مشابه حالتی است که لایه سطحی یک زمین سست با استفاده از تراکم، تزریق و ... بهسازی می‌شود. تحلیل‌ها در حوزه فرکانس و به روش خطی معادل انجام شده است. نتایج حاصل از تحلیل‌ها، در دو دسته شتاب بیشینه سطح زمین و ضریب بازتاب با هم مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از یک لایه ضعیف با ضخامت کافی یا یک لایه ضعیف در زیر یک لایه سخت، می‌تواند باعث تضعیف قابل توجه موج زلزله بخصوص در پریودهای پایین در زلزله‌های قوی بشود. البته بدلیل پایین بودن ظرفیت باربری و نشست‌های زیاد سازه در لایه ضعیف با ضخامت بالا، استفاده از یک لایه ضعیف در زیر یک لایه سخت، روشی عملی‌تر و بهتر برای کاهش پاسخ سازه می‌باشد.

مقدمه

هر سازه با توجه به ویژگی‌های خود و موج ورودی زلزله، پاسخ متفاوتی از خود نشان می‌دهد. مهمترین پارامترهایی که پاسخ سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهند عبارتند از: بیشینه شتاب موج ورودی، محتوای فرکانسی موج ورودی، میرایی و پریود سازه. از بین این چهار عامل، دو عامل اول مربوط به موج ورودی و دو عامل دیگر مربوط به ویژگی‌های سازه می‌باشد. برای بررسی روش مناسب برای کاهش پاسخ سازه به زلزله باید روی این پارامترها تمرکز کرد و با تغییر در این پارامترها، پاسخ سازه را کاهش داد.

الف- تغییر در پارامترهای سازه

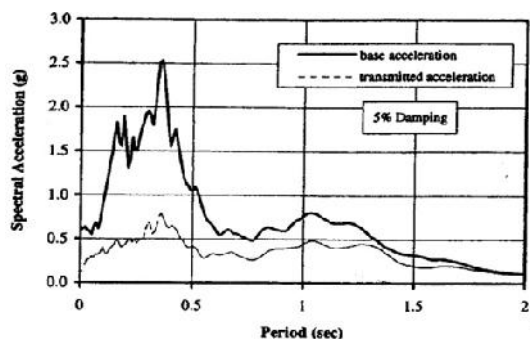
از مرسوم‌ترین روش‌های کاهش پاسخ سازه، افزایش پریود (به غیر از سازه‌های خیلی کوتاه) و افزایش میرایی آن می‌باشد. با افزایش پریود و میرایی سازه، شتاب طیفی و در نتیجه برش پایه سازه کاهش پیدا می‌کند. این تغییرات در سازه را به روش‌های مختلفی می‌توان اعمال



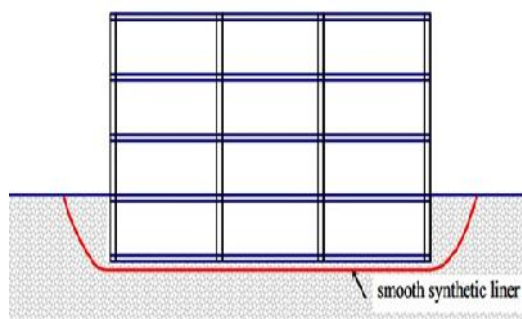
کرد. به عنوان مثال، برای افزایش میرایی سازه می توان از میراگر در مهاربندهای سازه و همچنین به منظور افزایش پریود سازه از سیستم های جداسازی پایه استفاده کرد.

ب- تغییر در پارامترهای موج ورودی

همانطور که گفته شد، از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار بر پاسخ سازه، مشخصات موج ورودی نظیر بیشینه شتاب موج ورودی (PGA) و محتوای فرکانسی می باشد. با افزایش بیشینه شتاب موج ورودی، پاسخ سازه نیز افزایش پیدا می کند. همچنین اگر پریود سازه با پریود موج ورودی به هم نزدیک باشند، پاسخ سازه تشدید می شود و بالعکس با فاصله گرفتن پریود موج ورودی از پریود سازه، پاسخ سازه کاهش پیدا می کند. بنابراین به منظور کاهش پاسخ سازه، باید بیشینه شتاب موج ورودی را کاهش داد و همچنین با تغییر محتوای فرکانسی موج ورودی به سازه، پریود موج ورودی را از پریود طبیعی سازه دور کنیم. برای نیل به چنین اهدافی، روش های مختلفی ارائه شده است. یکی از روش هایی که اخیراً مورد توجه قرار گرفته است، استفاده از سیستم های جداسازی پی از خاک با استفاده از لایه های مصنوعی نظیر بعضی از ژئوتکستایل ها می باشد (شکل ۱). با استفاده از این سیستم، بیشینه شتاب و طیف پاسخ موج پس از عبور از لایه مصنوعی به شدت کاهش پیدا می کند (شکل ۲). در این سیستم، جابجایی لغزشی ماندگار به دلیل اثر نیروی بازگرداننده ناشی از وزن لایه خاک جداسازی شده، کم می باشد.

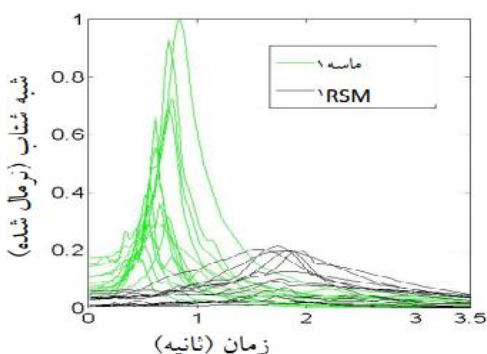


شکل ۲: اثر لایه مصنوعی در کاهش طیف پاسخ موج عبوری (Yegian and Catan, 2004)

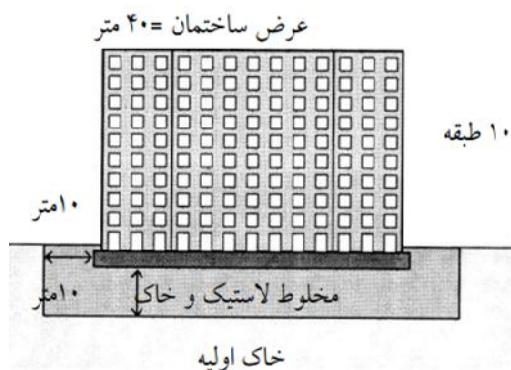


شکل ۱: سیستم جداسازی پی از خاک با لایه مصنوعی

از دیگر روش های تضعیف موج ورودی به سازه، استفاده از مخلوط لاستیک و خاک (RSM) در زیر پی سازه می باشد (شکل ۳). در این روش، با استفاده از مخلوط لاستیک و خاک در زیر پی سازه، محتوای فرکانسی موج رسیده به پی به شدت تغییر کرده و پریود غالب موج افزایش می یابد. در این روش، شتاب طیفی بیشینه کاهش پیدا می کند (شکل ۴). اما به دلیل افزایش شتاب طیفی در پریودهای بالا، این سیستم را تنها برای سازه های با پریود کوتاه می توان به کار برد. مشکل دیگر این سیستم، افزایش جابجایی های سازه (دریفت طبقات ساختمان) می باشد.



شکل ۴: تاثیر RMS بر طیف پاسخ نرمالیزه شده شتاب (یغمایی سابق و رحمانی، ۲۰۱۲)



شکل ۳: جداسازی لرزه ای با مخلوط لاستیک و خاک

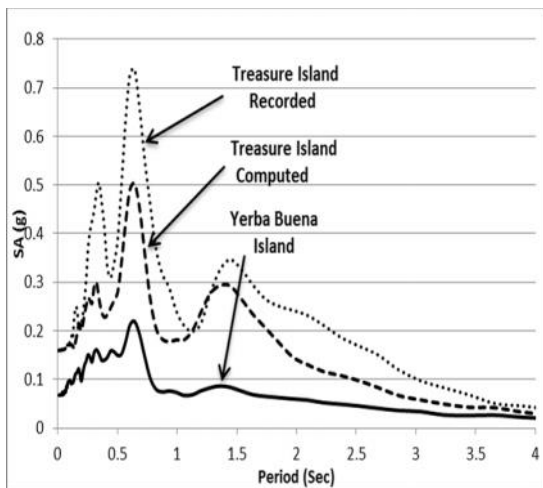
با توجه به مباحث فوق، می توان دریافت که تضعیف موج زلزله قبل از رسیدن به سازه، روشی مناسب و کارآمد برای کاهش پاسخ سازه می باشد. هدف از این تحقیق نیز بررسی اثر اضافه کردن یک لایه با مشخصات معین به سطح یک پروفیل خاص در پاسخ ثبت شده سطح زمین و اینکه آیا می توان با استفاده از یک یا چند لایه سطحی، پاسخ ثبت شده سطح زمین را تضعیف کرد؛ می باشد. برای این منظور ابتدا صحت عملکرد

نرم افزار بررسی شد. سپس پروفیل های انتخاب شده تحت ۵ رکورد مختلف زلزله با مقدار PGA بین 0.14g تا 0.79g تحلیل شده و میانگین پاسخ ها با هم و همچنین با پاسخ پروفیل اولیه (بدون لایه اضافی) مقایسه شده اند. تحلیل ها در حوزه فرکانس، با نرم افزار DeepSoil و به روش خطی معادل انجام شده است.

صحت سنجی عملکرد نرم افزار

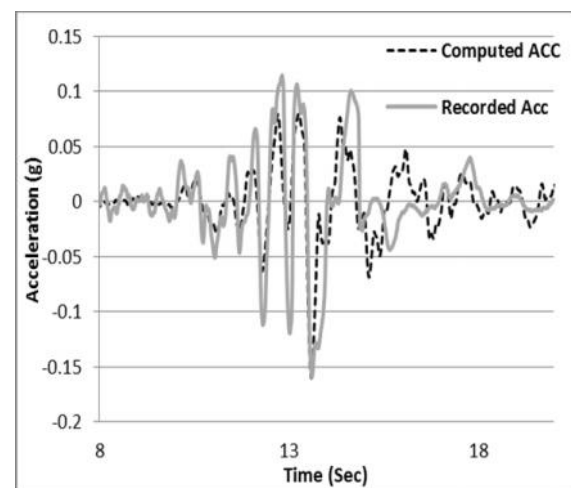
برای صحت سنجی نرم افزار، از دو رکورد ثبت شده در ایستگاه های جزایر Yerba Buena و Treasure در زلزله ۱۹ اکتبر ۱۹۸۹ لوماپریتا استفاده شده است. فاصله ایستگاه های جزایر Yerba Buena و Treasure از منبع (کانون) زلزله تقریباً یکسان می باشند. می توان این گونه فرض کرد که شتاب ثبت شده در ایستگاه سنگی Yerba Buena مشابه شتاب رسیده به سنگ بستر Treasure می باشد. بنابراین هنگامی که پروفیل خاک جزیره Treasure را تحت زلزله ثبت شده در Yerba Buena قرار می دهیم، انتظار بر این است که شتاب و طیف پاسخ محاسبه شده توسط نرم افزار با مقادیر ثبت شده در سایت Treasure مشابه باشد. مشخصات ژئوتکنیکی ایستگاه جزیره Treasure در (Foerster and Modaressi, 2007) آمده شده است.

با محاسبه پاسخ پروفیل جزیره Treasure تحت رکورد جزیره Yerba Buena مشخص شد که شتاب محاسبه شده توسط نرم افزار همخوانی مناسبی از لحاظ مقدار و شکل با شتاب ثبت شده در ایستگاه دارد. مقدار پیک شتاب برای هر دو، تقریباً برابر 0/16g می باشد. طیف پاسخ محاسبه شده توسط نرم افزار از لحاظ شکل، همخوانی مناسبی با طیف پاسخ شتاب ثبت شده در ایستگاه دارد. اما از لحاظ مقدار، کمی با هم فاصله دارند که این تفاوت به روش تحلیل استفاده شده (روش خطی معادل) بر می گردد و لذا منطقی به نظر می رسد.



شکل ۶: طیف پاسخ سطح زمین در جزیره

Yerba Buena و Treasure



شکل ۵: شتاب سطح زمین در جزیره Treasure

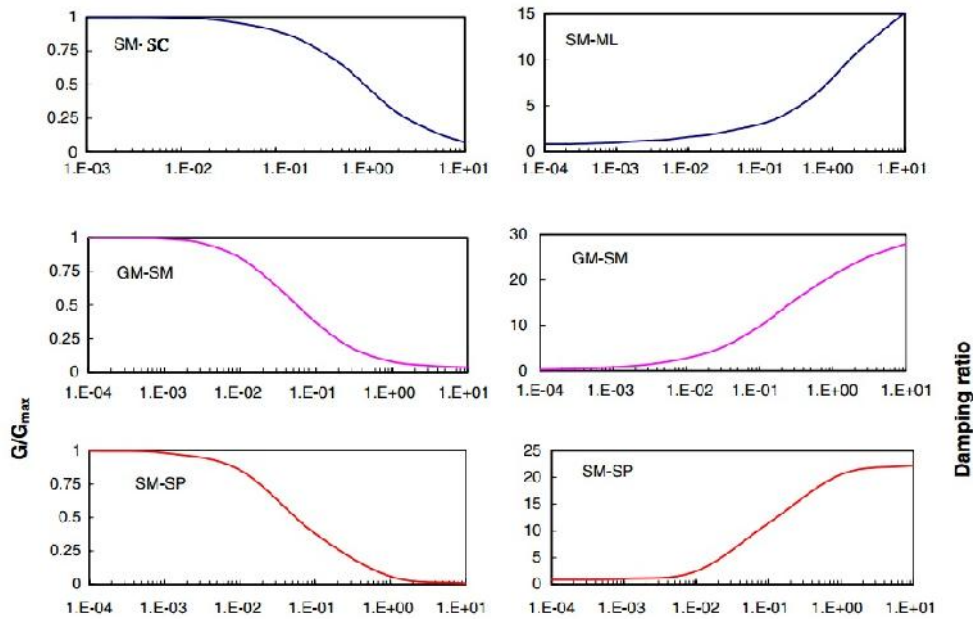
معرفی پروفیل انتخاب شده

پروفیل خاک انتخاب شده برای این تحقیق، از دو گمانه نزدیک به ایستگاه بم در شهر بم بدست آمده است. عمق این گمانه ها ۳۰ متر می باشد. با توجه به مشخصات خاک در دو گمانه، یک پروفیل نهایی برای آنالیز ارائه شده است (جدول ۱). همچنین با توجه به مشخصات خاک و روابط پیشنهادی ارائه شده توسط ایشی باشی و ژانگ (۱۹۹۳)، نمودارهایی برای میرایی و نسبت مدول برشی بر حسب میزان کرنش ارائه شده است (شکل ۷).

جدول ۱: مشخصات پروفیل خاک برای آنالیز (Rayhani et al., 2007)

Depth (m)	Soil type	V_s (m/s)	γ (kN/m ³)	Poisson's ratio	G (MPa)	E (MPa)
0-6	SM-SC	205	18.8	0.39	81	216
6-15	GM-SM	370	20.0	0.33	278	739.5
15-30	SM-SP	560	21.5	0.30	688	1,788
30<	SB	670	23.0	0.28	955	2,546





شکل ۷: نمودارهای میرایی و نسبت مدول برشی بر حسب کرنش برشی (Rayhani et al., 2007)

در این تحقیق به منظور بررسی تاثیر اضافه کردن یک لایه خاک به سطح زمین (بدون خاکبرداری و با اضافه کردن لایه جدید به سطح پروفیل موجود) بر پاسخ سایت، حالت های زیر علاوه بر حالت واقعی سایت، در نظر گرفته و تحلیل شده است:

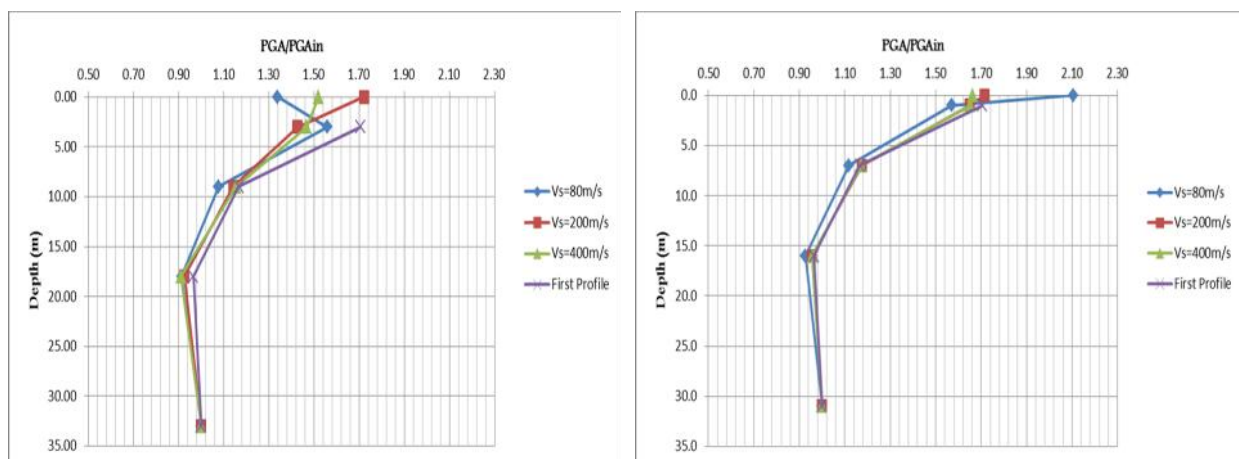
الف) ۱ متر خاک با سرعت موج برشی ۸۰ - ۲۰۰ - ۴۰۰ متر بر ثانیه بر روی سطح زمین

ب و ج) مانند حالت الف که ضخامت خاک به ترتیب به ۳ متر و ۶ متر افزایش یافته است.

د) ۱ متر خاک با سرعت موج برشی ۸۰ متر بر ثانیه و بالای آن لایه دیگر ۲ متری با سرعت موج برشی ۴۰۰ متر بر ثانیه

حالت آخر همانند حالتی است که لایه سطحی یک زمین سست با استفاده از تراکم، تزریق و ... بهسازی می شود. مثلا ۲ متر بالای یک لایه ۳ متری سست با سرعت ۸۰ متر بر ثانیه بهسازی شده و سرعت موج برشی در آن به ۴۰۰ متر بر ثانیه رسیده باشد. پروفیل فرودگاه سانفرانسیسکو به صورت طبیعی مشابه این حالت می باشد.

الف) تاثیر لایه های مختلف بر روی بیشینه شتاب در عمق

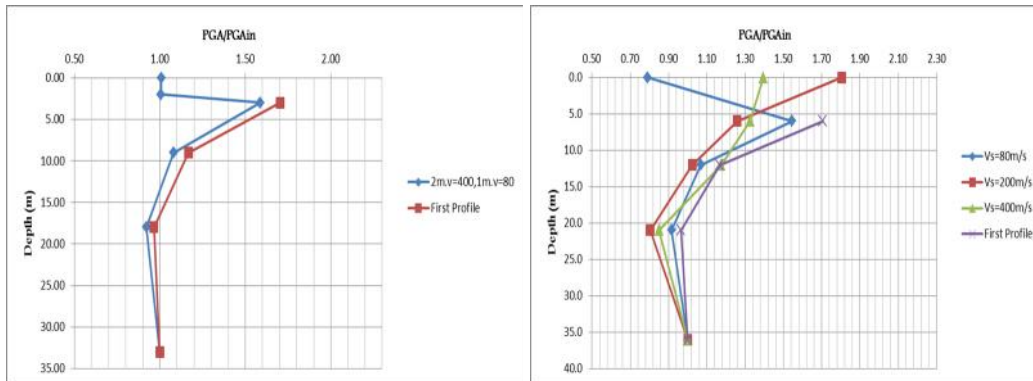


شکل ۹: تغییرات نسبت PGA در عمق - حالت ب

شکل ۸: تغییرات نسبت PGA در عمق - حالت الف

در حالت الف، اضافه کردن لایه ۱ متری با سرعت ۲۰۰ متر بر ثانیه و ۴۰۰ متر بر ثانیه تاثیر چندانی بر بیشینه شتاب ندارد. اما لایه با سرعت ۸۰ متر بر ثانیه باعث افزایش شتاب (بیش از ۲۰ درصد) می شود. در حالت ب، افزودن لایه ۳ متری با سرعت ۲۰۰ متر بر ثانیه تاثیری بر شتاب ندارد. ولی لایه با سرعت ۴۰۰ متر بر ثانیه باعث کاهش ۱۱ درصدی و لایه با سرعت ۸۰ متر بر ثانیه باعث کاهش ۲۰ درصدی شتاب می

شود. در حالت ج، اضافه کردن لایه ۶ متری با سرعت ۲۰۰ متر بر ثانیه باعث افزایش ناچیز شتاب می شود. لایه با سرعت ۴۰۰ متر بر ثانیه باعث کاهش حدود ۲۰ درصدی شتاب می شود. اما لایه ضعیف با سرعت ۸۰ متر بر ثانیه باعث کاهش شدید ۵۰ درصدی شتاب می شود. در حالت د، افزودن لایه ضعیف به همراه لایه سخت در بالای آن، باعث کاهش شدید شتاب (بیش از ۴۰ درصد) می شود.



شکل ۱۱: تغییرات نسبت PGA در عمق - حالت د

شکل ۱۰: تغییرات نسبت PGA در عمق - حالت ج

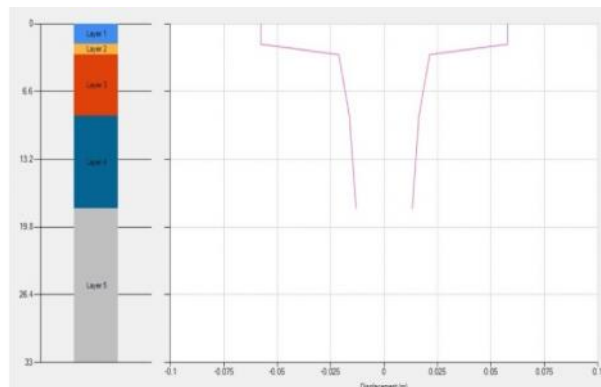
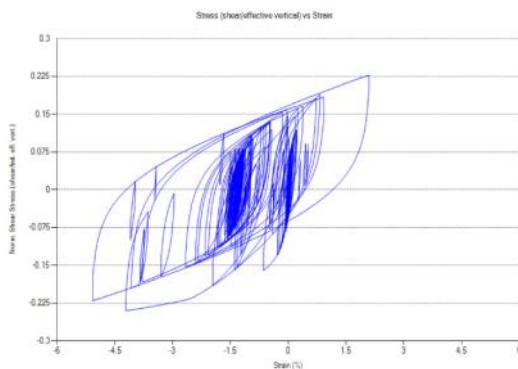
با توجه به نمودارهای فوق می توان به نتایج زیر رسید:

۱- افزودن لایه ای که دارای سرعتی نزدیک به سرعت لایه سطحی خاک می باشد، تاثیر چندانی بر شتاب بیشینه سطح زمین ندارد. در اینجا، با افزودن لایه خاک با سرعت ۲۰۰ متر بر ثانیه بر روی لایه بالایی پروفیل که سرعت ۲۰۵ متر بر ثانیه دارد، شتاب تغییر چندانی نمی کند.

۲- افزودن لایه سخت (با سرعت موج برشی بالا) روی لایه سطحی خاک، تا حدودی باعث کاهش بیشینه شتاب می شود که این کاهش شتاب با افزایش ضخامت لایه سخت، بیشتر می شود.

۳- افزودن یک لایه ضعیف با ضخامت کم می تواند باعث افزایش بیشینه شتاب بویژه در رکوردهای ضعیف زلزله بشود (افزایش ۴۹ درصدی شتاب در زلزله با شتاب بیشینه 0/14g برای حالت الف). اما اضافه کردن لایه ضعیف با ضخامت کافی به بالای پروفیل خاک، باعث کاهش شدید بیشینه شتاب بویژه در رکوردهای قوی زلزله می شود (کاهش ۷۸ درصدی شتاب در زلزله با شتاب بیشینه 0/79g برای حالت ج). دلیل اصلی کاهش شدید شتاب در رکوردهای قوی زلزله، رفتار غیرخطی خاک می باشد. هنگامی که خاک تحت نیروی برشی قرار می گیرد، دچار کرنش برشی شده و با افزایش کرنش برشی، میرایی آن افزایش پیدا می کند و با افزایش میرایی، پاسخ لایه خاک کاهش پیدا می کند.

۴- برای حالتی که یک لایه سخت و یک لایه ضعیف به بالای پروفیل خاک اضافه می شود (حالت د)، لایه ضعیف با وجود ضخامت کمی که دارد، باعث کاهش شدید بیشینه شتاب می شود. این رفتار همانند رفتار سیستم های جداساز خاک با لایه های مصنوعی نظیر ژئوتکستایل می باشد. با تحلیل تاریخچه زمانی برای این حالت، مشاهده می شود که لایه ضعیف، نقش یک لایه لغزنده را بازی می کند که دچار جابجایی های نسبتاً زیادی می شود و این رفتار لایه ضعیف خاک، باعث کاهش بیشینه شتاب می شود (شکل ۱۲). در این تحلیل، همچنین مشاهده شد که وجود لایه ضعیف باعث استهلاک شدید انرژی موج به دلیل رفتار هیسترسیس خود شده است (شکل ۱۳). ضعیف بودن لایه باعث ایجاد کرنش های بالا در خاک و به تبع آن افزایش میرایی و استهلاک انرژی موج می شود.

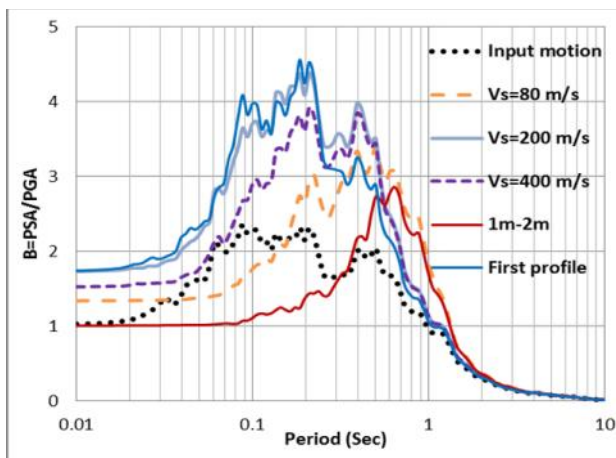


شکل ۱۲: نمودار جابجایی ماکزیموم خاک در عمق در زلزله قوی شکل ۱۳: نمودار تنش-کرنش لایه ضعیف ۱ متری در زلزله قوی

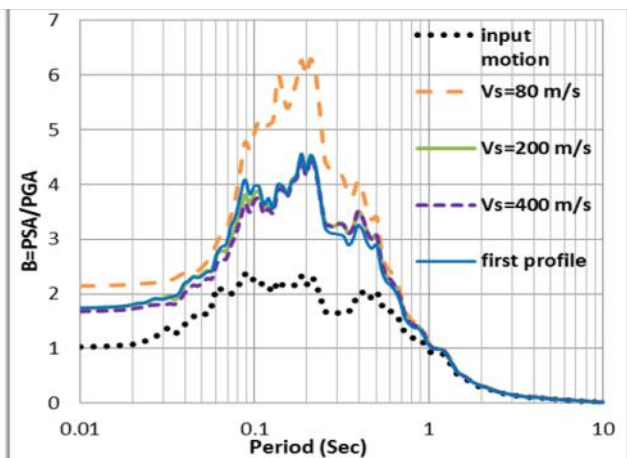


تأثیر لایه های مختلف بر روی محتوای فرکانسی موج

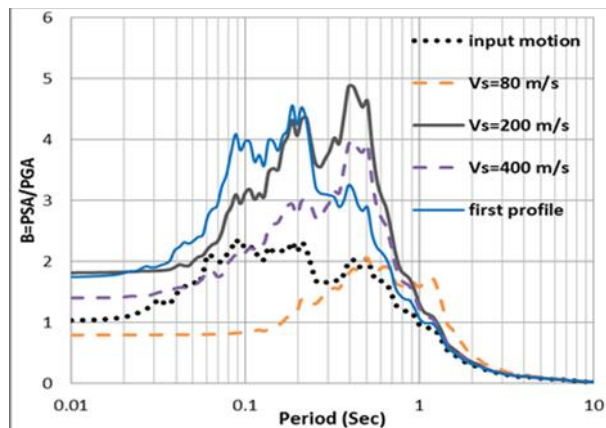
به منظور بررسی تأثیر لایه اضافه شده بر محتوای فرکانسی موج، به مقایسه نمودارهای ضریب بازتاب B که از تقسیم شتاب طیفی سطح زمین به بیشینه شتاب موج ورودی بدست می آید، پرداخته شده است.



شکل ۱۵: ضریب بازتاب - حالت ب و د



شکل ۱۴: ضریب بازتاب - حالت الف



شکل ۱۶: ضریب بازتاب - حالت ج

با توجه به نمودارهای فوق، می توان به موارد زیر پی برد.

- در نمودار پروفیل اولیه خاک، بیشینه مقدار B برابر 4/6 و متناظر پریود حدود 0/2 ثانیه می باشد. بیشترین مقادیر B برای موج ورودی نیز در همین محدوده پریود می باشد. بنابراین پروفیل اولیه تأثیر چندانی در جایجایی محتوای فرکانسی امواج ورودی ندارد.
- در نمودارهای حالت الف مشاهده می شود که لایه های با سرعت موج برشی ۲۰۰ و ۴۰۰ متر بر ثانیه، تأثیر چندانی بر تغییر محتوای فرکانسی موج ندارد. همچنین مقادیر ضریب B برای این دو حالت، نسبت به پروفیل اولیه تغییر چندانی نمی کند. اما لایه با سرعت ۸۰ متر بر ثانیه، با وجود اینکه بیشینه مقدار B را از 4/6 به 6/3 افزایش می دهد؛ ولی باز هم محتوای فرکانسی آن را تغییر چندانی نمی دهد.
- در نمودارهای حالت ب مشاهده می شود که لایه با سرعت ۲۰۰ متر بر ثانیه تأثیر چندانی بر بیشینه مقدار B و محتوای فرکانسی ندارد. لایه با سرعت ۴۰۰ متر بر ثانیه، بیشینه مقدار B را اندکی کاهش می دهد و محتوای فرکانسی موج را به پریود بلند تر منتقل می کند. لایه با سرعت ۸۰ متر بر ثانیه باعث کاهش بیشینه مقدار B می شود و محتوای فرکانسی را به پریود بلند تر منتقل می کند و امواج با پریود کمتر از 0/2 ثانیه تضعیف و امواج با پریودی بین 0/4 تا ۲ ثانیه کمی تقویت می شود.
- برای حالت د (۲ متر لایه سخت بالای ۱ متر لایه ضعیف)، بیشینه مقادیر B به شدت کاهش می یابد و محتوای فرکانسی نیز به پریودهای بالاتری منتقل می شود. بطوری که امواج با پریود کمتر از 0/5 ثانیه به شدت تضعیف و امواج با پریود بین 0/6 تا ۲ ثانیه، کمی تقویت می شوند.
- در نمودارهای حالت ج، مشاهده می شود که برای حالات سرعت ۲۰۰ متر بر ثانیه و ۴۰۰ متر بر ثانیه، امواج با پریود کمتر از 0/3 تضعیف و امواج با پریود بیشتر از 0/3 تقویت شده اند. به عبارتی، محتوای فرکانسی به سمت امواج با پریود بالاتر رفته است. برای حالتی که ۶ متر لایه با سرعت ۸۰ متر بر ثانیه اضافه می کنیم، امواج بشدت تضعیف می شوند. امواج با پریود کمتر از 0/6 ثانیه تضعیف شده اند و محتوای فرکانسی امواج

به سمت امواج با پریودهای بالاتر رفته است.

بنابراین افزودن یک لایه ضعیف با ضخامت کافی به منظور کاهش پاسخ یک سازه در حین زلزله، برای ساختمان های کوتاه که پریود پایینی دارند، امری معقول و مفید می باشد. اما این کار برای ساختمان های بلند که دارای پریود بالاتری هستند (بیشتر از 0/5 ثانیه)، ممکن است شرایط سازه را نسبت به حالت اولیه آن بدتر کند و پاسخ های سازه به زلزله افزایش پیدا کند. همچنین استفاده از یک لایه ضعیف در زیر لایه قوی نیز می تواند مانند حالت فوق، باعث کاهش پاسخ سازه با پریود پایین شود. اما از آنجا که استفاده از یک لایه ضعیف با ضخامت بالا در زیر یک سازه، از نظر ظرفیت باربری و نشست، ایجاد مشکل می کند، استفاده از یک لایه ضعیف در زیر یک لایه سخت، پیشنهاد می شود.

نتیجه گیری

بمنظور کاهش پاسخ سازه ها در زلزله دو دیدگاه وجود دارد. دیدگاه اول که یک دیدگاه سازه ای است، مبتنی بر تغییر در مشخصات سازه نظیر پریود طبیعی سازه و میرایی آن می باشد. دیدگاه دوم که یک دیدگاه ژئوتکنیکی است، مبتنی بر تغییر موج ورودی قبل از رسیدن به سازه با روش هایی همچون استفاده از لایه های مصنوعی در خاک می باشد. در این تحقیق نیز دیدگاه دوم دنبال شده است و این که آیا می توان با افزودن یک یا دو لایه خاک با ویژگی های مشخص به سطح زمین، موج ورودی را تضعیف کرد یا نه؟ تحقیقات نشان داد که یک لایه ضعیف با ضخامت کافی (۶ متر)، می تواند یک موج ورودی قوی را بشدت تضعیف کند (بخصوص در پریودهای پایین). اما استفاده از یک لایه ضعیف با ضخامت بالا در عمل، مشکلاتی همچون ظرفیت باربری ناکافی و نشست زیاد را به دنبال دارد. به همین دلیل استفاده از یک لایه ضعیف یک متری در زیر یک لایه سخت دو متری در سطح زمین پیشنهاد می شود. زیرا بررسی های این تحقیق نشان می دهد که این حالت نیز مثل حالت قبل، باعث کاهش شدید شتاب های رسیده به سطح زمین در پریودهای پایین (کمتر از ۰.۵ ثانیه) و انتقال محتوای فرکانسی موج به پریودهای بالاتر می شود، با این مزیت که دیگر مشکل نشست و ظرفیت باربری وجود ندارد. همچنین اگر در عمل یک لایه سطحی سست وجود داشته باشد، با بهسازی سطحی این لایه، می توان حالتی مشابه حالت اخیر پدید آورد که علاوه بر افزایش ظرفیت باربری خاک و کاهش نشست های آن، شتاب رسیده به سطح زمین نیز کاهش یابد.

مراجع

یغمایی سابق س و رحمانی م (۲۰۱۲) تاثیر جداساز لرزه ای مخلوط لاستیک و خاک بر تقاضای لرزه ای قاب خمشی فولادی در حوزه نزدیک گسل، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، انجمن سازه های فولادی ایران

Foerster E and Modaressi H (2007) nonlinear numerical method for earthquake site response analysis II - case studies, *Bull Earthquake Eng*

Kramer SL (1996) *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice-Hall international series in civil engineering and engineering mechanics, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall

Rayhani MHT, Naggar MHE and Tabatabaei SH (2007) Nonlinear Analysis of Local Site Effects on Seismic Ground Response in the Bam Earthquake, *Geotech Geol Eng*

Yegian MK and Catan M (2004) Soil isolation for seismic protection using a smooth synthetic liner, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE*

