

مقایسه تحلیل پاسخ ساختگاه به روش های خطی و خطی معادل مطالعه

موردی - جزیره TREASURE

محمدعلی مرادی

دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ایران، تهران

ma.moradi@iiees.ac.ir

یاسر جعفریان

هیات علمی، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ایران، تهران

yjafarianm@iiees.ac.ir

کلید واژه‌ها: جزیره Treasure، روش خطی و خطی معادل، میرایی خاک، زلزله قوی و ضعیف

چکیده

با بررسی زلزله های مخرب رویداده در ایران و جهان، به خوبی می توان به اهمیت مشخصات خاک سطح زمین بر موج زلزله و خرابی های ناشی از زلزله که اصطلاحاً اثرات ساختگاهی نامیده می شود، پی برد. به عنوان مثال، در نوزدهم اکتبر ۱۹۸۹ زلزله ای با بزرگای $M_s=7.1$ در نزدیکی کوه های لوماپریتا در ۱۰۰ کیلومتری جنوب سانفرانسیسکو و آکلند در کالیفرنیا اتفاق افتاد. زلزله لوماپریتا لرزه هایی با شدت VIII در مقیاس مرکالی اصلاح شده در محدوده کانونی خود به وجود آورد. اما در حقیقت شدت ها در بخش هایی از سانفرانسیسکو و آکلند بزرگتر بودند (IX در مقیاس مرکالی اصلاح شده). این حقیقت که زلزله، خرابی گسترده ای در نواحی خاص و خرابی هایی جزئی در دیگر نقاط بوجود آورد، مؤید اهمیت اثرات محلی ساختگاه می باشد. بنابراین تعیین اثر ساختگاه به عنوان یکی از مهم ترین مراحل است که باید در مطالعات ریزپهنه بندی و طراحی سازه های مقاوم در برابر زلزله انجام گیرد که این کار با روش های مختلفی انجام می شود که گاهی جواب های این روش ها با هم تفاوت زیادی دارند. بنابراین اطلاع از منشا اختلاف این جواب ها می تواند به تصمیم گیری بهتری برای انتخاب روش و بعضی از پارامترهای خاک، کمک شایانی بکند. در این تحقیق، به بررسی پاسخ پروفیل جزیره Treasure تحت رکوردهای قوی و ضعیف زلزله به دو روش خطی و خطی معادل، مقایسه نتایج این دو روش و بحث درباره عوامل ایجاد اختلاف نتایج در دو روش پرداخته شد است. همچنین نمودارهای طیف پاسخ نرمالیزه شده برای این پروفیل با نمودارهای Seed و همکاران (۱۹۷۶) مقایسه شده است.

مقدمه

با نگرشی بر زلزله های مخرب رویداده در ایران و جهان همانند زلزله های Loma prieta کالیفرنیا (۱۹۸۹)، Michoacán مکزیک (۱۹۸۲)، منجیل ایران (۱۹۹۰) و Kobe ژاپن (۱۹۸۵)، پتانسیل تأثیرگذاری زمین شناسی سطحی خاک بر حرکت قوی زمین و خرابی های ناشی از زلزله که اصطلاحاً اثرات ساختگاهی نامیده می شود، به خوبی مشخص می گردد. بنابراین تعیین اثر ساختگاه به عنوان یکی از مهم ترین مراحل است که باید در مطالعات ریزپهنه بندی و طراحی سازه های مقاوم در برابر زلزله انجام گیرد.

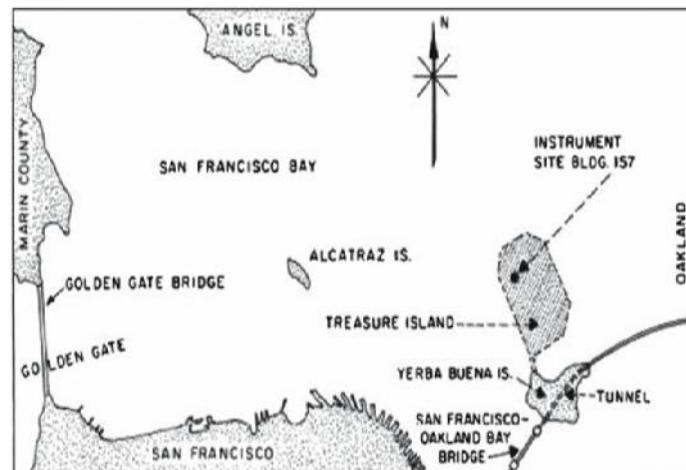
پارامترهای مختلفی در پاسخ ساختگاه، تأثیر دارند که از مهمترین این پارامترها می توان به سرعت موج برشی خاک، ضخامت لایه خاک، پارامترهای دامنه زلزله (مانند شتاب ماکزیموم زمین PGA)، پارامترهای محتوای فرکانسی زلزله (مانند پیروید میانگین T_m)، مدت زلزله و هندسه حوزه اشاره کرد. شرایط محلی ساختگاه بر کلیه خصوصیات مهم حرکت نیرومند زمین شامل دامنه، محتوای فرکانس و مدت، اثر قابل ملاحظه ای می گذارد. طبیعت اثرات محلی ساختگاه را می توان با بهره گیری از روش های مختلف مانند تحلیل ساده تئوری پاسخ زمین، اندازه گیری های حرکات واقعی سطحی و زیرسطحی در همان ساختگاه و اندازه گیری حرکات زمین در ساختگاه هایی با شرایط متفاوت از ساختگاه مورد نظر تشریح نمود. در تحلیل پاسخ زمین، انتخاب روش مناسب تحلیل و تعیین پارامترهای مربوطه از اهمیت ویژه ای برخوردار است و جواب ها را تحت تأثیر قرار می دهد. به همین دلیل اطلاع از منابع ایجاد اختلاف در نتایج روش ها، می تواند در انتخاب روش مناسب تحلیل، به طراحان کمک کند.



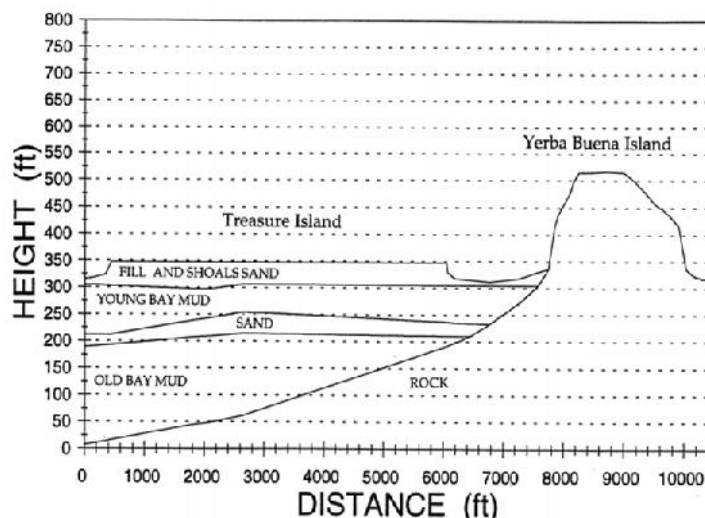
در برخی از مطالعات مربوط به پاسخ ساختگاه، محققین از رکوردهای ثبت شده در زلزله لوماپریتا در دو ایستگاه جزایر Treasure و Yerba Buena و روش های خطی معادل (Seed et al., 1990) و غیرخطی (Finn et al., 1993 و Matasovic, 1993) استفاده کرده اند. در این تحقیقات، طیف پاسخ محاسبه شده سطح زمین با مقدار طیف پاسخ ثبت شده در کل مطابقت دارد. اما برخی از این تحلیل ها در لحاظ کردن پاسخ در پیوندهای پایین ضعف دارند. در این تحقیق نیز به بررسی پاسخ دینامیکی سایت جزیره Treasure به دو روش خطی و خطی معادل با استفاده از نرم افزار DeepSoil پرداخته شده است. همچنین تفاوت رفتار پروفیل خاک در زلزله های ضعیف و قوی در دو روش تحلیل بررسی و عوامل آن ذکر شده است.

بررسی زلزله لوماپریتا ۱۹۸۹

در نوزدهم اکتبر ۱۹۸۹ زلزله ای با بزرگای $M_s=7.1$ در نزدیکی کوه های لوماپریتا در ۱۰۰ کیلومتری جنوب سانفرانسیسکو و آکلند در کالیفرنیا اتفاق افتاد. زلزله لوماپریتا لرزه هایی با شدت VIII در مقیاس مرکالی اصلاح شده در محدوده کانونی خود به وجود آورد. اما در حقیقت شدت ها در بخش هایی از سانفرانسیسکو و آکلند بزرگتر بودند (IX در مقیاس مرکالی اصلاح شده) این حقیقت که زلزله، خرابی گسترده ای در نواحی خاص و خرابی هایی جزئی در دیگر نقاط بوجود آورد، موید اهمیت اثرات محلی ساختگاه می باشد. محدوده سانفرانسیسکو در شکل 1 نشان داده شده است. خلیج سانفرانسیسکو به طور وسیعی با نهشته های رسوبی از رس و رس لای دار تا رس ماسه دار به همراه لایه هایی از خاک های ماسه ای و شنی پر شده است. نهشته های عمیق تر با پایین رفتن تدریجی سطح دریا پیش تحکیم شده است. اما لایه بالاتر پس از فروکش سطح دریا رسوب کرده است. این مصالح که به گل خلیج سانفرانسیسکو مشهور است، رس لای دار عادی تحکیم یافته می باشند. این لایه شدیداً تراکم پذیر بوده و مقاومت آن در سطح زمین پایین و در اعماق متوسط است.



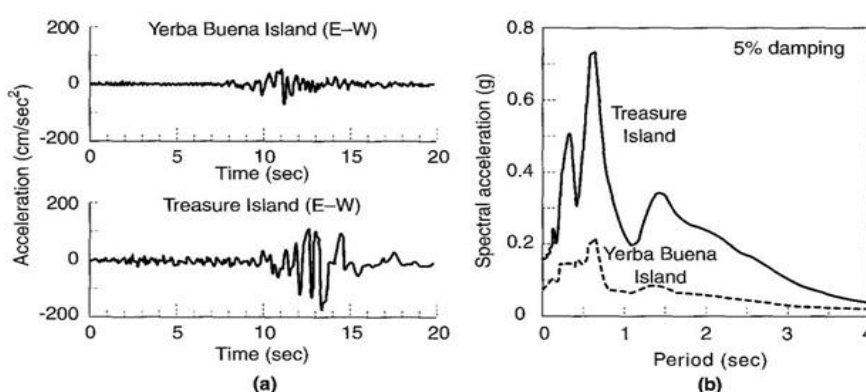
شکل ۱: محدوده خلیج سانفرانسیسکو و جزایر آن



شکل ۲: مقطع شمال غربی- جنوب شرقی از جزایر Treasure Yerba Buena (De Alba et al., 1994)

پاسخ دو دستگاه که یکی در جزیره Yerba Buena و دیگری در جزیره Treasure در وسط خلیج سانفرانسیسکو نصب شده اند، قابل تامل و بررسی می باشد. موقعیت این دو جزیره در شکل 1 نشان داده شده است. جزیره Yerba Buena یک رخنمون سنگی می باشد و لرزه نگار آن منطقه، مستقیماً بر روی سنگ واقع شده است. جزیره Treasure خاکریزی به وسعت ۱۶۲ هکتار می باشد که به صورت هیدرولیکی (مصنوعی) اجرا و ساخته شده است. لایه بندی خاک در این منطقه به گونه ای است که یک لایه ماسه، بین دو لایه گل خلیج سانفرانسیسکو قرار گرفته است. این توضیحات در شکل 2 مشخص می باشد.

مکانیزم گسل در زلزله لومپریتا از نوع معکوس مورب (Reverse oblique) می باشد. فاصله سایت از منبع زلزله برای ایستگاه Yerba Buena برابر 75/1 کیلومتر می باشد. این مقدار برای جزیره Treasure برابر 77/3 کیلومتر می باشد. بنابراین فاصله دستگاه های این دو جزیره از منبع زلزله تقریباً یکسان می باشد. اما حرکات سطح زمین که این دو ثبت نموده اند، کاملاً متفاوت می باشد. همان طور که در شکل ۳ - الف مشخص می باشد، شتاب های ماکزیموم در جزیره Yerba Buena در جهت E-w، 0/06g، و در جهت N-S، 0/03g بوده است. مقادیر متناظر برای جزیره Treasure به ترتیب 0/16g و 0/11g می باشد. طیف پاسخ برای این دو ساختمان در شکل ۳ - ب نشان داده شده است. کاملاً روشن است که وجود خاک های نرم در ساختمان Treasure سبب تشدید قابل ملاحظه ای در حرکت بستر سنگی زیر خود شده است.



شکل ۳: شتاب و طیف پاسخ سطح زمین در جزایر Yerba Buena و Treasure (Seed et al., 1990)

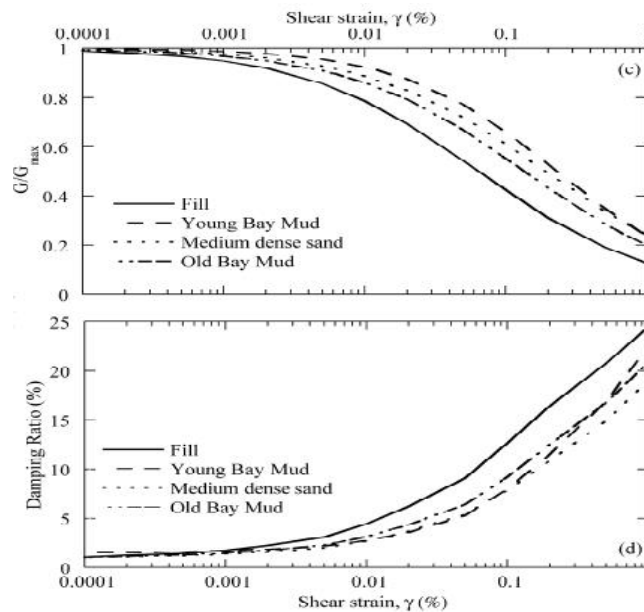
ویژگی های ژئوتکنیکی سایت جزیره Treasure

مشخصات پروفیل جزیره Treasure در جدول ۱ آورده شده است. همچنین منحنی های نسبت مدول برشی و میرایی بر حسب کرنش برشی، که در تحلیل خطی معادل مورد استفاده می باشد، در شکل ۴ آورده شده است. مقدار ضریب میرایی ثابت که برای تحلیل خطی مورد استفاده می باشد، برای ۳ لایه بالایی برابر ۱۰ درصد و برای بقیه لایه ها ۵ درصد در نظر گرفته شده است. همچنین ضریب میرایی سنگ بستر برابر ۵ درصد و سرعت موج برشی در آن برابر ۱۰۰۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: مشخصات لایه های خاک جزیره Treasure (Hashash and Park, 2001)

Layer No	Thick (m)	Depth (m)	Vs (m/s)	Density (kg/m ³)	Material type
1	2/4	-2/4	250	2063	Gravelly sand fill (GS)
2	5/8	-8/2	135	2133	Loose sand fill (LS)
3	5/5	-13/7	170	1842	Silty losse sand fill (LSS)
4	15/2	-28/9	175	1794	Young bay mud (YBM)
5	12/2	-41/1	315	1922	Dense silty sand (DFS)
6	33/5	-74/6	265	1842	Old bay mud (OBC)
7	13/7	-88/3	380	2082	Gravelly sands / stiff clays (FGS)
Bedrock	-	-	1000	2082	Elastic

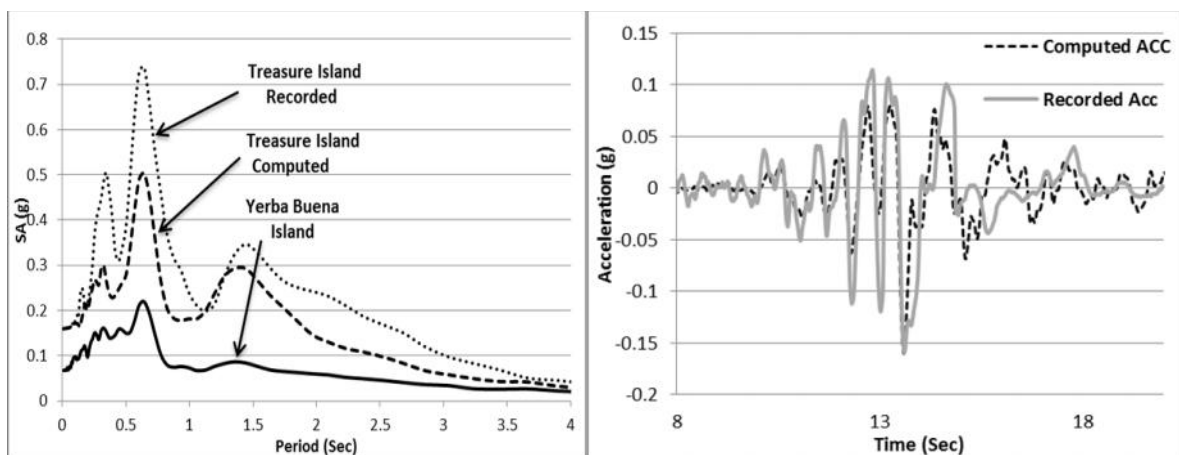




شکل ۴: منحنی های میرایی و نسبت مدول برشی بر حسب کرنش برشی (Hwang and Stokoe, 1993)

مقایسه پاسخ محاسبه شده و ثبت شده پروفیل خاک در زلزله لوماپریتا ۱۹۸۹

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 باشد. 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. 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 (شکل ۵). 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).



شکل ۶: طیف پاسخ سطح زمین در جزیره Treasure و Yerba Buena

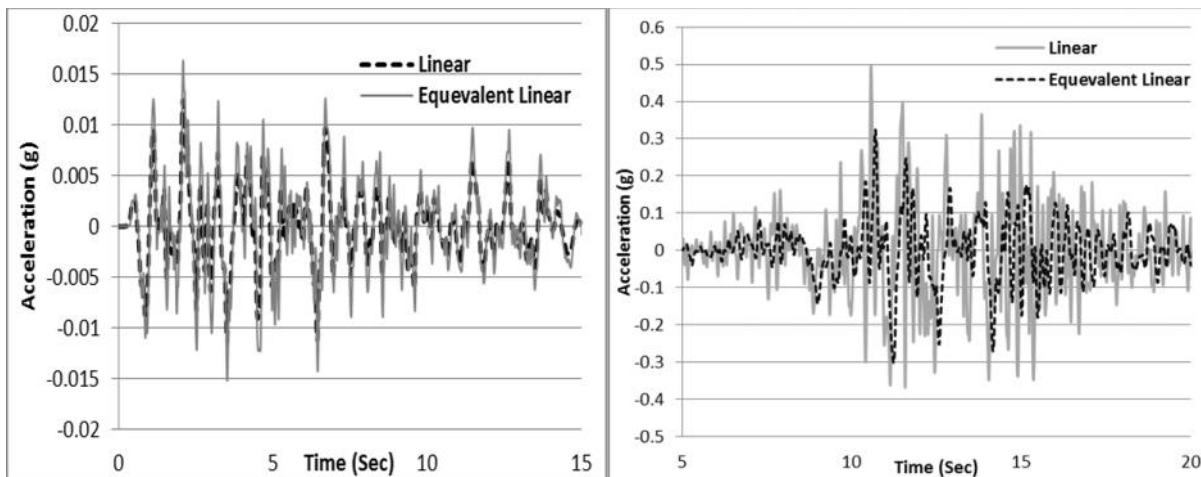
شکل ۵: شتاب سطح زمین در جزیره Treasure

مقایسه شتاب در روش خطی و خطی معادل

در شکل های ۷ و ۸ نمودار شتاب در دو لایه مختلف در دو روش تحلیل خطی و خطی معادل با هم مقایسه شده است. شکل ۷، مربوط به لایه دوم خاک که مقاومت پایینی دارد، می باشد. در این لایه به دلیل مقاومت کم لایه خاک، کرنش های نسبتاً بزرگ اتفاق می افتد و بزرگ بودن کرنش های برشی، باعث می شود که مقدار میرایی خاک در روش خطی معادل، افزایش محسوس پیدا کند. در نتیجه، مقدار میرایی در روش

خطی معادل از مقدار میرایی ثابت فرض شده در روش خطی بیشتر بوده و پاسخ خاک در روش تحلیل خطی معادل، نسبت به روش تحلیل خطی کمتر می باشد. (هر چه میرایی خاک بیشتر باشد، ضریب تشدید خاک کمتر می باشد).

مقایسه بالا مربوط به زلزله های قوی می باشد. در زلزله های ضعیف، موضوع برعکس می باشد. در زلزله های ضعیف، چون کرنش برشی خیلی پایین می باشد، مقدار میرایی در روش خطی معادل نسبت به روش خطی پایین تر می باشد و در نتیجه این امر، مقدار شتاب در روش خطی معادل از روش خطی بیشتر می شود (شکل ۸).



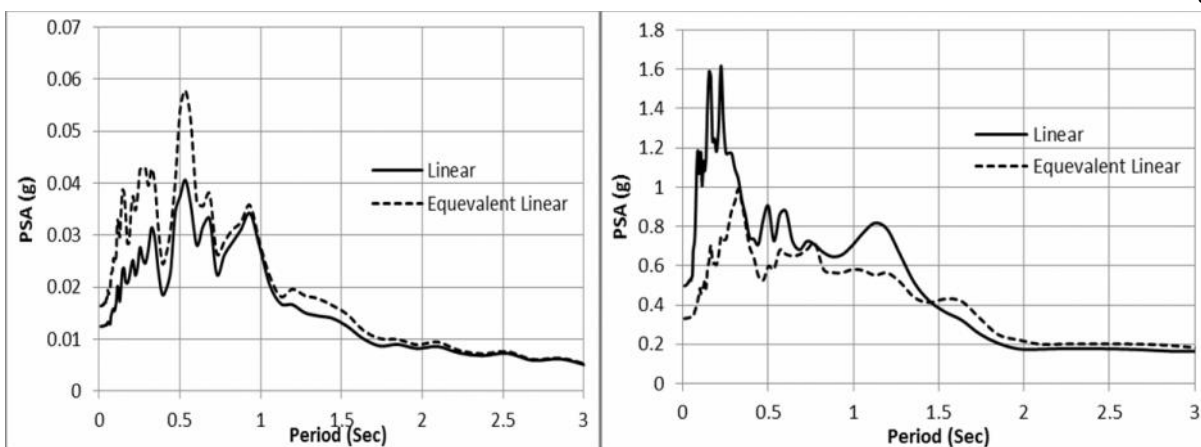
شکل ۷: شتاب در روش خطی و خطی معادل در زلزله های قوی / شکل ۸: شتاب در روش خطی و خطی معادل در زلزله های ضعیف

مقایسه طیف پاسخ در روش خطی و خطی معادل

با افزایش مقدار میرایی در خاک، ضریب تشدید (بزرگنمایی) خاک کاهش پیدا می کند. با کاهش مقدار ضریب تشدید، مقدار طیف پاسخ نیز کاهش پیدا می کند. در نتیجه، مقدار میرایی و مقدار طیف پاسخ، رابطه معکوس با هم دارند.

در زلزله های با قدرت بالا، مقدار کرنش های وارده به خاک، زیاد می باشد. در نتیجه در روش تحلیل خطی معادل، میرایی خاک افزایش می یابد. اما در روش تحلیل خطی، میرایی ثابت فرض شده نسبت به کرنش وارد شده به المان های خاک، پایین می باشد. در نتیجه، مقدار میرایی در روش خطی، کمتر از روش خطی معادل بوده و همین امر، باعث بیشتر شدن مقدار طیف پاسخ در روش خطی می شود (شکل ۹).

در زلزله های با قدرت کم، مقدار کرنش های وارده به المان های خاک، کم می باشد. در نتیجه در روش تحلیل خطی معادل، میرایی خیلی پایین می باشد. اما در روش تحلیل خطی، میرایی ثابت فرض شده نسبت به کرنش وارد شده به المان های خاک، بالا می باشد. در نتیجه، مقدار میرایی در روش خطی، بالاتر از روش خطی معادل بوده و همین امر، باعث بیشتر شدن مقدار طیف پاسخ در روش خطی معادل می شود (شکل ۱۰).



شکل ۹: طیف پاسخ روش خطی و خطی معادل در زلزله قوی / شکل ۱۰: طیف پاسخ روش خطی و خطی معادل در زلزله ضعیف

نکته دیگری که از نمودارهای فوق می توان دریافت این است که بدلیل پایین بودن مقدار کرنش برشی در زلزله های ضعیف، مقدار مدول برشی در روش خطی معادل، کاهش چندانی پیدا نمی کند و تقریباً برابر با مدول برشی روش خطی است. بنابراین، مقدار بیشینه طیف پاسخ در دو روش برای زلزله های ضعیف، در پیرودی مشابه اتفاق می افتد. اما در زلزله های قوی، مقدار مدول برشی و به تبع آن، سرعت موج برشی، بدلیل



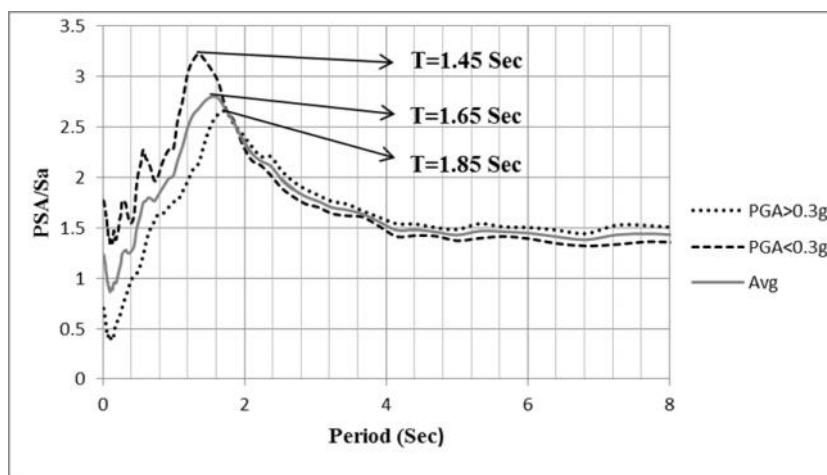
افزایش کرنش برشی، کاهش می یابد. بنابراین پریود طبیعی خاک افزایش یافته و مقدار بیشینه طیف پاسخ در پریود بالاتری نسبت به روش خطی رخ می دهد.

تعیین پریود طبیعی پروفیل خاک

مقدار پریود طبیعی پروفیل خاک به صورت تئوری از مجموع پریودهای هر لایه بدست می آید.

$$T = \sum \frac{4H}{V_s} = 0.04 + 0.17 + 0.13 + 0.35 + 0.15 + 0.51 + 0.14 = 1.49 \text{ Sec}$$

در خاک های چند لایه بهتر است از روی طیف پاسخ، مقدار پریود طبیعی پروفیل خاک را بدست آورد. در یک پروفیل خاک، هنگامیکه تحت یک زلزله ای با دامنه وسیعی از فرکانس ها، قرار گیرد؛ معمولاً مقدار نسبت طیفی (نسبت طیف پاسخ لایه بالایی به طیف پاسخ موج ورودی) در پریودی نزدیک به پریود طبیعی پروفیل خاک دارای مقدار حداکثر می باشد. بر همین اساس، با میانگین گیری از نمودارهای نسبت طیفی برای زلزله های با PGA بالاتر از 0/3g، مقدار بیشینه نسبت طیفی در پریود 1/85 ثانیه و برای زلزله های با PGA کمتر از 0/3g، مقدار بیشینه نسبت طیفی در پریود 1/45 ثانیه اتفاق می افتد (شکل ۱۱). مقدار پیک پاسخ با میانگین گیری از تمام نمودارهای نسبت طیفی (PGA کمتر و بیشتر از 0/3g) در پریود 1/65 ثانیه اتفاق می افتد. از آنجا که روش تئوری محاسبه پریود طبیعی خاک بر اساس ماکزیموم سرعت موج برشی (سرعت موج برشی در کرنش های پایین) می باشد، این مقدار با مقدار محاسبه شده به روش خطی بسیار نزدیک بهم می باشد.

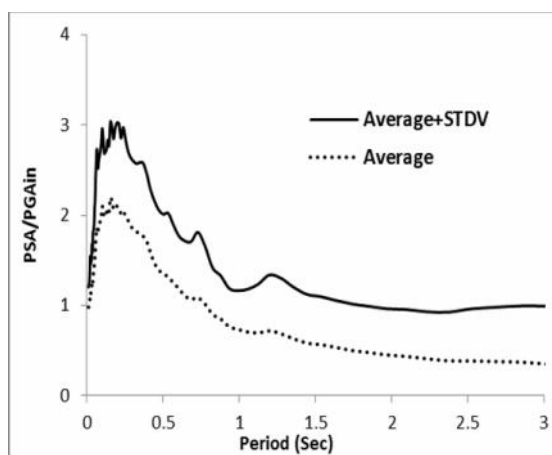


شکل ۱۱: میانگین نمودارهای نسبت طیفی برای زلزله های قوی، ضعیف و کل زلزله ها

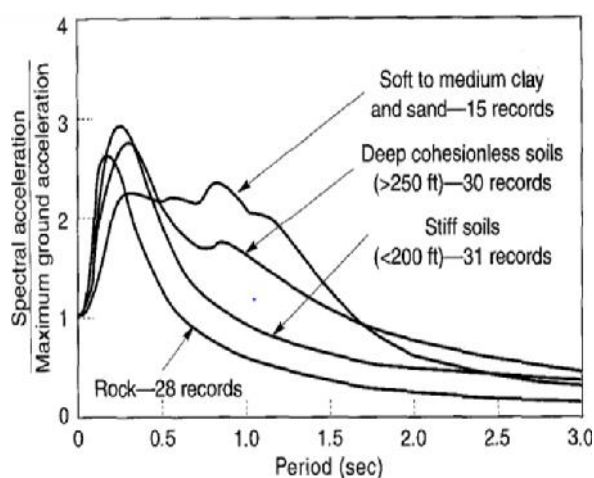
طیف پاسخ نرمالیزه شده (ضریب بازتاب)

طیف پاسخ نرمالیزه شده یا همان ضریب بازتاب، با تقسیم طیف پاسخ سطح زمین به بیشینه شتاب موج ورودی در هر پریود بدست می آید. در شکل ۱۲، میانگین طیف پاسخ نرمالیزه شده و میانگین بعلاوه یک انحراف معیار برای ۲۰ رکورد زلزله محاسبه شده است. این نمودارها، بیشتر شبیه به نمودار خاک های غیرچسبنده عمیق در نمودارهای Seed و همکاران (۱۹۷۶) (شکل ۱۳) و نمودار خاک تیپ S2 در آیین نامه UBC (۱۹۹۴) می باشد. همچنین این نمودار شبیه به نمودار ضریب بازتاب برای خاک تیپ ۳ آیین نامه ۲۸۰۰ (خاکهای با تراکم متوسط، طبقات شن و ماسه با پیوند متوسط بین دانه ای و رس با سختی متوسط) می باشد.

در آیین نامه ۲۸۰۰، نمودارهای ضریب بازتاب برای مناطق با خطر نسبی زیاد و خیلی زیاد (شتاب ماکزیموم 0/30g و 0/35g) و برای مناطق با خطر نسبی متوسط و کم (شتاب ماکزیموم 0/20g و 0/25g) ارائه شده است. با توجه به این نمودارها، ضریب بازتاب خاک تیپ ۴ برای مناطق با خطر نسبی متوسط و کم نسبت به مناطق با خطر نسبی زیاد و خیلی زیاد، بیشتر می باشد. دلیل این موضوع این است که خاک های ضعیف (تیپ ۴ آیین نامه) در زلزله های قوی، متحمل کرنش های برشی بزرگتر و به دنبال آن افزایش میرایی و کاهش پاسخ نسبت به زلزله های ضعیف تر می شوند. در آیین نامه UBC نیز این موضوع در ضریب خاک (S) که از ۱ تا ۲ برای چهار تیپ خاک ارائه شده، لحاظ شده است.



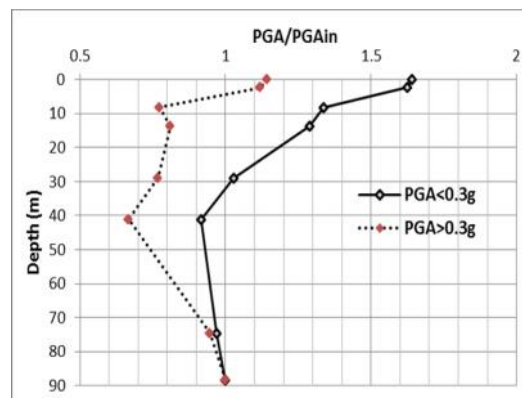
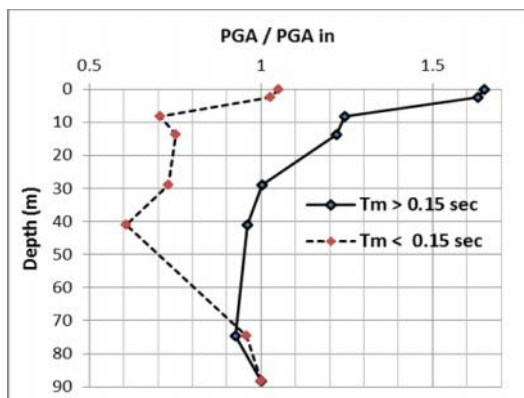
شکل ۱۲: میانگین و میانگین بعلاوه یک انحراف معیار طیف های پاسخ نرمالیزه شده



شکل ۱۳: طیف پاسخ نرمالیزه شده Seed و همکاران (۱۹۷۶)

نسبت شتاب بیشینه در عمق

نمودارهای زیر، مقدار میانگین نسبت شتاب بیشینه هر لایه به شتاب بیشینه ورودی زلزله را برای ۳۰ رکورد نشان می دهد. این نمودارها یک بار بر حسب شتاب بیشینه موج ورودی و یک بار بر حسب پیروید میانگین موج ورودی جداسازی شده اند. از آنجا که زلزله های با بیشینه شتاب بالا، اغلب مربوط به زلزله های حوزه نزدیک هستند و این زلزله ها، پیروید میانگین پایینی دارند، این نمودارها شبیه به هم شده اند. بدلیل کرنش های بالاتر خاک و افزایش میرایی آن در زلزله های قوی نسبت به زلزله های ضعیف، نسبت بیشینه شتاب در زلزله های قوی، کمتر افزایش می یابد.



شکل ۱۵: نمودارهای نسبت PGA هر لایه به PGA موج ورودی در عمق



مشخصات ژئوتکنیکی لایه های سطحی زمین تأثیرات زیادی را بر امواج زلزله و میزان خرابی های ناشی از آن می گذارد. بنابراین تعیین اثرات ساختگاه به عنوان یکی از مهم ترین مراحل است که باید در مطالعات ریزپهنه بندی و طراحی سازه های مقاوم در برابر زلزله انجام گیرد. این کار با روش های مختلفی انجام می شود که گاهی جواب های این روش ها با هم تفاوت زیادی دارند. بنابراین اطلاع از منشا اختلاف این جواب ها می تواند به تصمیم گیری بهتری برای انتخاب روش و بعضی از پارامترهای خاک، کمک شایانی بکند. در این تحقیق به بررسی پاسخ پروفیل جزیره Treasure در زلزله های ضعیف و قوی به دو روش خطی و خطی معادل پرداخته شده است. در زلزله های ضعیف، مقدار پاسخ روش خطی کمتر از روش خطی معادل می باشد. اما در زلزله های قوی، روش خطی معادل پاسخ کمتری نسبت به روش خطی می دهد. مقدار پررود طبیعی پروفیل خاک که از نمودارهای نسبت طیفی بدست می آید، در زلزله های قوی، بیشتر از زلزله های ضعیف است. همچنین مقدار افزایش شتاب بیشینه در لایه های مختلف خاک، در زلزله های ضعیف، بیشتر از زلزله های قوی می باشد. دلیل اصلی نتایج فوق، رفتار غیرخطی، کاهش سختی و افزایش میرایی خاک با افزایش کرنش برشی می باشد. بنابراین برای انتخاب روش تحلیل مناسب و تخصیص برخی از پارامترهای خاک، اطلاع از سختی خاک و قدرت موج ورودی، ضروری می باشد.

مراجع

- De Alba P, Benoit J, Pass DG, Carter JJ, Youd TL and Shakal AF (1994) Deep instrumentation array at the Treasure Island Naval Station, Loma Prieta earthquake of October 17, 1989: Strong ground motion and ground failure, R.D. Brocherdt, ed., USGS Prof. Paper P 1551-A, A155-A168
- Foerster E and Modaressi H (2007) Nonlinear numerical method for earthquake site response analysis II - case studies, *Bull Earthquake Eng*
- Hashash YMA and Park D (2001) Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment, *Engineering Geology*
- Hashash YMA and Park D (2002) Viscous damping formulation and high frequency motion propagation in non-linear site response analysis, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*
- Kramer SL (1996) *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice-Hall international series in civil engineering and engineering mechanics, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall
- Laurie G, Baise M, Steven D, Glaser M and Dreger D (2003) Site Response at Treasure and Yerba Buena Islands, California, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*

