



## Seismic protection of structures by rubber-soil mixture as geotechnical seismic isolation

Hadi Fasihi, Rajab Ali Ahmadi, Alireza Alizada

### Abstract

In this article, geotechnical seismic isolation is studied with the help of finite difference numerical modeling. This work is done by placing a layer of rubber-soil mixture with more damping properties than normal soils under the foundation of the structure. The results of complete dynamic analyze showed that this method can be an effective solution to reduce the amount of acceleration transferred to the structure. The results of complete dynamic analyze showed that this method can be an effective solution to reduce the amplification transferred to the structure. The analyzes showed that the higher the thickness of the damping layer, the higher the deamplification will be. The deamplification value for two different earthquakes used in this research was observed to be almost the same. Also, the analysis of the direct soil structure interaction showed that in the maximum range of earthquake input acceleration from 0.1g to 0.6g, the use of a damping layer leads to a reduction of 1.4 to 1.9 times the amount of drift on the floor.

**Keywords:** geotechnical seismic isolation, numerical modeling, damping.



فصلنامه علمی - تحقیقی علوم فنی

پوهنتون خاتم النبیین (ص)

سال دوم ، شماره دوم، بهار ۱۴۰۳

صفحه ۱۴۹ - ۱۶۵



## حفاظت لرزه‌ای ساختمان‌ها با استفاده از ترکیب خاک و لاستیک به عنوان جداساز لرزه‌ای ژئوتکنیکی

هادی فصیحی، رجب‌علی احمدی، علی‌رضا علی‌زاده

### چکیده

در این مقاله، جداسازی لرزه‌ای ژئوتکنیکی به کمک مدل‌سازی عددی با روش تفاضل محدود و نرم‌افزار Flac بررسی شده است. این کار با جای‌گذاری لایه‌ای از ترکیب خاک و تایر<sup>۱</sup>، با خاصیت میرایی بیشتر از خاک‌های معمولی، در زیر اساس تهاداب ساختمان انجام شده است. نتایج تحلیل‌های دینامیکی کامل نشان دادند که این روش می‌تواند راهکار مؤثری برای کاهش اندازهٔ تعجیل انتقال‌یافته به ساختمان باشد؛ به این صورت که به‌جای بزرگ‌نمایی امواج حین عبور از لایهٔ خاکی، شاهد کوچک‌نمایی خواهیم بود. تحلیل‌ها نشان دادند که هرچه ضخامت لایهٔ میراگر بیشتر باشد، نرخ کوچک‌نمایی نیز بیشتر خواهد شد. مقدار کوچک‌نمایی برای دو زلزلهٔ مختلف<sup>۲</sup> استفاده‌شده در این تحقیق، تقریباً یکسان بود. تحلیل تعامل مستقیم خاک و ساختمان<sup>۲</sup> نشان داد در محدودهٔ حداکثر تعجیل ورودی زلزله از 0.1g تا 0.6g، استفاده از لایهٔ میراگر منجر به کاهش ۱/۴ تا ۱/۹ برابری مقدار جابه‌جایی نسبی (دریفت) طبقهٔ ساختمان می‌شود.

واژگان کلیدی: جداسازی لرزه‌ای ژئوتکنیکی، مدل‌سازی عددی، میرایی.

<sup>1</sup> Rubber Soil Mixture (RSM)

<sup>2</sup> Soil Structure Interaction

یکی از موضوعات مهم انجینیری سیول، انجینیری زلزله و کاهش خسارات ناشی از آن است؛ تلاش‌های زیاد انجام شده در این زمینه، اهمیت این موضوع را نشان می‌دهد که از جمله آن‌ها می‌توان به تدوین کودها، ارائه روش‌های مختلف جهت ساخت ساختمان‌های انعطاف‌پذیر، ساخت مصالح سبک، استفاده از ساختمان‌های هوشمند، استفاده از میراگرها در بخش‌هایی از ساختمان‌ها و استفاده از روش‌های جداسازی لرزه‌ای اشاره کرد. موضوع جداسازی ساختمان از تهداب و خاک زیر آن، به اختصار جداسازی لرزه‌ای ژئوتکنیکی، از روش‌های مطرح شده سال‌های اخیر است. دو نوع جداسازی لرزه‌ای ژئوتکنیکی وجود دارد: یکی استفاده از جداگرهای لغزشی و دیگری استفاده از مصالح دارای خاصیت میرایی بیشتر از خاک معمولی در زیر تهداب ساختمان. درباره جداسازی لرزه‌ای نوع اول، یعنی استفاده از جداگرهای لغزشی، می‌توان به تحقیقات Yegian و Kadakal در سال ۲۰۰۴ اشاره کرد که با تعبیه مواد ژئوسنتتیکی، با اصطکاک داخلی کمتر نسبت به خاک، در زیر تهداب ساختمان توانستند تعجیل انتقال یافته به ساختمان را کاهش دهند [۱]. درباره روش دوم، یعنی جداسازی لرزه‌ای ژئوتکنیکی، با استفاده از مصالح دارای خاصیت میرایی بیشتر از خاک می‌توان به اولین استفاده از تایر برای حافظت لرزه‌ای ساختمانی در سال ۱۹۶۰ در Macedonia اشاره کرد که بلوک‌های بزرگی از تایر در زیر ساختمانی سه طبقه با اسکلت کانکریتی قرار گرفت. از آنجا که صلبیت قائم بلوک تایری تقریباً با صلبیت افقی آن برابر بود، ساختمان در هنگام زلزله به عقب و جلو حرکت می‌کرد؛ برای رفع این مشکل، تایر تقویت شده با صفحات فلزی یا سربی به وجود آمد. مطالعات زیادی روی خواص انجینیری خاک و تایر صورت گرفته است. محققان زیادی آزمایش‌های برش مستقیم و سه محوری روی مخلوط خاک و تایر انجام داده‌اند و به بررسی مقاومت برشی آن پرداخته‌اند؛ همه آن‌ها بر این باورند که افزودن مقداری تایر خرد شده باعث افزایش مقاومت برشی ریگ می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها میزان تشنج نرمال، مقدار تایر موجود در مخلوط، وزن مخصوص ریگ، نسبت ابعاد تایر و میزان تراکم مخلوط به طور قابل ملاحظه‌ای روی مقاومت برشی تأثیر می‌گذارد. در سال ۱۹۹۴، Edil و Bosscher مطالعاتی روی خواص انجینیری و رفتار تراشه‌های تایر فرسوده در حالت مخلوط با خاک انجام دادند. خصوصیات که آن‌ها بررسی کردند شامل تراکم پذیری، مقاومت، تغییر شکل پذیری و قابلیت نفوذپذیری بودند [۲].

در سال ۱۹۹۵، Benson تحقیقاتی روی برخی کاربردهای خرده‌تایر انجام داد. نتایج این تحقیق نشان دادند که مخلوط خرده‌تایر فرسوده و خاک می‌تواند به عنوان



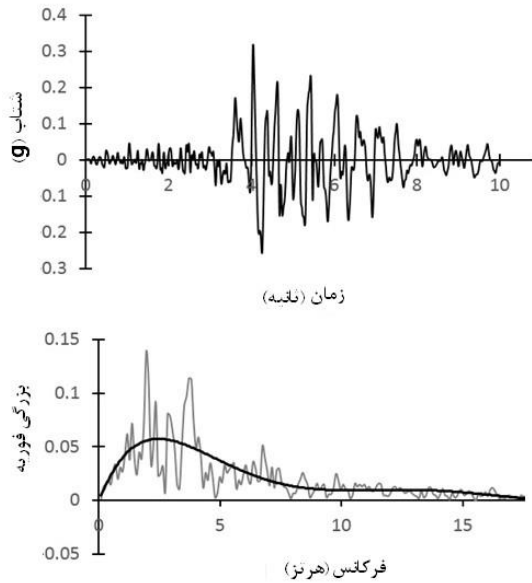


مصالح پرکننده با وزن کم و مقاومت زیاد در پشت ساختمان‌های نگهبان، مانند دیوار-های انتهایی دو طرف پل‌ها و دیوارهای استنادی بزرگ در کنار سرک‌ها، استفاده شود [۳]. جهت تخمین مقاومت خاک‌های ریگی مخلوط‌شده با خرده‌های تایر، آزمایش‌های برش مستقیم توسط Foos و همکارانش در سال ۱۹۹۶ روی نمونه‌های این مخلوط انجام گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که سه عامل تشنج قائم، مقدار تایر و وزن واحد حجم مخلوط ریگ و تایر در مقاومت برشی مؤثر هستند [۴]. به منظور بررسی رابطه تشنج-کرنش، مقاومت تراشه‌های تایر و اختلاط تراشه تایر با ریگ، آزمایش‌هایی توسط Lee و همکارانش در سال ۱۹۹۹ انجام شد. نتایج این آزمایش‌ها نشان می‌دهند بهترین روش، از دیدگاه زیست‌محیطی، استفاده مجدد خرده‌های تایر فرسوده یا مخلوط‌هایی از آن‌ها و ریگ برای احداث برخی پروژه‌ها، مانند بندها و خاکریزها، است؛ همچنین، مطالعات این محقق نشان می‌دهند که استفاده از مخلوط خاک و تایر در این پروژه از لحاظ پایداری مصالح نیز مناسب است [۵]. آزمایش‌های انجام‌شده برای تعیین رفتار دینامیکی مخلوط ریگ و خرده تایر توسط Sutter و Feng در سال ۲۰۰۰ نشان داد به دلیل خاصیت ارتجاعی بالای تایر، مدول برشی مخلوط با افزایش درصد تایر، کاهش چشمگیری می‌یابد؛ همچنین، افزایش درصد تایر تا حدود ۵۰٪ تأثیر اندکی بر میرایی مخلوط دارد، اما با رسیدن تایر به ۷۵٪، میرایی افزایش چشمگیری داشته و به حدود ۵٪ در کرنش‌های اندک و ۲۰٪ در کرنش‌های زیاد می‌رسد. این بررسی نشان داد افزایش تشنج نرمال باعث افزایش چشمگیر در مدول برشی می‌شود؛ اما تأثیری روی میرایی مخلوط ندارد [۶]. در سال ۲۰۰۱، Kim و Konagi نشان دادند پوشش بتنی تونل با روکش نرم و نازکی برای کاهش خسارات زلزله مؤثر است [۷]. با پیشرفت نرم‌افزارهای عددی در انجینیری سیول، توجه زیادی به مدل‌های رفتاری خاک شده است. در این راستا Li و Ding در سال ۲۰۰۲ رفتار غیرخطی نمونه‌های خاک مسلح‌شده با الیاف تحت کرنش‌های کم ناشی از بارگذاری سیکلی را بررسی کردند. نتایج این تحقیقات حاکی از نقش مهم تشنج همه‌جانبه، میزان الیاف و تعداد سیکل‌های بارگذاری روی خواص انجینیری خاک بوده است. نتایج نشان داده‌اند که در اثر افزودن الیاف، تشنج محوری انحرافی زیاد می‌شود؛ همچنین، در تمامی نمونه‌های آزمایش، با افزایش تشنج همه‌جانبه در سیکلی مشخص، سختی محوری نمونه‌ها زیاد می‌شود [۸]. بررسی‌های عددی Youwai و Bergado در سال ۲۰۰۴ نشان می‌دهند که در صورت استفاده از مخلوط ریگ-تایر، به‌عنوان مصالح خاکریز در پشت دیوار استنادی، با افزایش درصد تایر، تغییر مکان جانبی دیوار استنادی و نیروی وارده به مسلح‌کننده‌ها افزایش پیدا می‌کند. این موضوع، به دلیل تغییر کرنش حجمی از حالت انقباضی به حالت انبساطی، با افزایش درصد تایر است [۹]. در سال ۲۰۰۴،

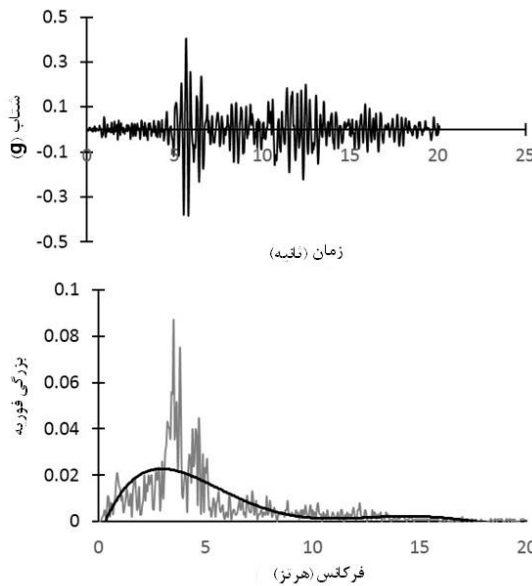
Zornbeng و همکاران با انجام آزمایش‌هایی روی مخلوط ریگ و خرده تاپر به این نتیجه رسیدند که با افزودن خرده تاپر، مقاومت برشی افزایش می‌یابد و در اختلاط ۳۵٪ به مقدار بیشینه خود می‌رسد؛ سپس میزان مقاومت در بیش از ۳۵٪، کاهش می‌یابد [۱۰]. در سال ۲۰۰۸، Tsang سیستم جداسازی لرزه‌ای با استفاده از مخلوط خاک و تاپر (RSM) را پیشنهاد داد. مزیت اصلی این روش، کاهش ارتعاشات هم‌زمان افقی و قائم ناشی از زلزله است. این پیشنهاد الگویی مناسب برای مصرف توده‌های بزرگ تاپرهای فرسوده در جهان نیز است. وی مدل‌سازی تحلیلی را از طریق تئوری موج انجام داد. نتایج، کاهش زیاد جابه‌جایی نسبی بالای لایه‌ی RSM به پایین آن را در بیشتر فرکانس‌های امواج زلزله نشان می‌دهند؛ به جز محدوده‌ی باریکی (حدود ۱ تا ۲ هرتز) که با افزایش مواجه شد [۱۱ و ۱۲]. قابل ذکر است که نتایج حاصله وابسته به خصوصیات دینامیکی و زمین‌شناسی لایه RSM هستند؛ علاوه بر این، Tsang پنج موضوع مهم شامل تأثیرات تشدید خاک، پاسخ غیرخطی مکانی، روان‌گرایی، نشست زمین و تأثیرات زیست‌محیطی این مصالح را نیز بررسی کرد. Tsang و همکاران در سال ۲۰۱۲ با انجام مطالعات عددی به وسیله نرم‌افزار Quad4m به این نتیجه رسیدند که استفاده از مخلوط خاک و تاپر می‌تواند تعجیل و جابه‌جایی نسبی افقی طبقات ساختمان را کاهش دهد؛ همچنین خاک تقویت شده با تاپر، در مقایسه با خاک معمولی، افزایش قابل توجهی در مقاومت برشی و توانایی جذب انرژی خواهد داشت [۱۳]. با توجه به مطالب عنوان شده، موضوع جداسازی لرزه‌ای ژئوتکنیکی با جایگزینی لایه خاکی مرکبی، برای مثال ترکیب خاک و تاپر، با خاصیت میرایی بیشتر از خاک معمولی در زیر ساختمان‌ها و تحلیل دینامیکی کامل با استفاده از مدل‌سازی عددی به روش تفاضل محدود با نرم‌افزار Flac در این مقاله بررسی می‌شود.

## ۲. تعجیل‌نگاشت‌های استفاده‌شده

برای انجام تحلیل‌ها دو تعجیل‌نگاشت فروبلی و کهک انتخاب شد. ابتدا، تاریخچه زمانی تعجیل‌نگاشت‌های انتخابی فیلتر شدند و محدوده فرکانس بین ۰/۱ تا ۲۵ هرتز در نظر گرفته شد. برای فیلتر کردن از روش Butter Worth مرتبه ۴ استفاده شد؛ علاوه بر این، تعجیل‌نگاشت‌ها برای خط مبنا به نحوی نیز اصلاح شدند که تاریخچه زمانی جابه‌جایی در انتهای زلزله صفر می‌شود که فرایند مذکور توسط نرم‌افزار seismsignal صورت گرفت. تاریخچه زمانی زلزله‌های انتخاب شده به همراه طیف فوریه آن‌ها در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۱ و ۲ مشخص است، فرکانس غالب دوزلزله فروبلی و کهک به ترتیب تقریباً برابر با ۲ و ۳/۵ هرتز هستند؛ همچنین، زمان ارتعاشات قوی دوزلزله فوق به ترتیب برابر با ۱۰ و ۲۰ ثانیه است.



شکل ۱: تاریخچه زمانی تعجیل نگاشت زلزله فرویلی و طیف فوریه آن



شکل ۲: تاریخچه زمانی تعجیل نگاشت زلزله کهک و طیف فوریه آن

### ۳. صحت سنجی تحلیل ها

در تجزیه و تحلیل های صورت گرفته، برای تعریف لایه ی میراگر از میرایی هستریسی موجود در کتابخانه نرم افزار Flac استفاده شده است؛ بنابراین، ابتدا صحت عملکرد

نرم افزار و مدل رفتاري استفاده شده ارزیابی می شود که برای این منظور از نرم افزار Shake91 استفاده شده است. این نرم افزار، براساس روش تحلیلی با فرض رفتار غیرخطی معادل، پاسخ لرزهای لایه های خاکی را تخمین می زند؛ بنابراین، بلوک خاکی به عرض ۱ و ارتفاع ۴۵ متر، در ۱۰ لایه با مدول های برشی مختلف مدل شده است. مشخصات مصالح، شامل مدول برشی اولیه و دانسیته لایه ها، در جدول ۱ ارائه شده اند. با توجه به وابستگی مدول برشی و میرایی به کرنش، خاک به صورت غیرخطی رفتار خواهد کرد. روند تغییرات مدول برشی و میرایی مورد استفاده در دو نرم افزار Shake و Flac در شکل ۳ نشان داده شده است.

برای تعریف میرایی در نرم افزار Shake91 از نمودار پیشنهادی کاهش مدول و میرایی Seed و Iress (۱۹۷۰) که برای ریگ ارائه شده، استفاده شده است. از آنجایی که رفتار غیرخطی مصالح، شامل تغییرات مدول برشی و میرایی در مقابل کرنش برشی، در نرم افزار Shake به صورت عددی تعریف می شوند و در نرم افزار Flac از مدل رفتاري موجود آن ها استفاده شده است، اختلاف کمی بین آن دو در این شکل دیده می شود. برای بار دینامیکی نیز از زلزله Loma Prieta با تعجیل های بیشینه مختلف از ۰/۰۰۰۱g تا ۱g استفاده شده است. تعجیل های بیشینه استفاده شده را در جدول ۲ و تاریخچه زمانی تعجیل-زمان این زلزله را در شکل ۴ نشان داده ایم. نتیجه تحلیل به صورت حداکثر تعجیل دریافتي در سطح زمین نسبت به تعجیل ورودی در کف لایه حاصل از دو نرم افزار به صورت مقایسه ای در شکل ۵ رسم شده است. در شکل ۶ نیز تاریخچه زمانی تعجیل دریافتي در بالای هر دو مدل برای بیشینه تعجیل اعمالی ۰/۰۰۰۱g نشان داده شد است. همان طور که مشخص است هر دو روش عددی و تحلیلی نتایج نزدیک به هم نشان داده اند؛ به عنوان مثال، طبق شکل ۶، حداکثر تعجیل محاسبه شده در سطح زمین براساس نرم افزارهای Shake و Flac به ترتیب ۰/۰۰۰۵۹۲g و ۰/۰۰۰۵۹۹g است.

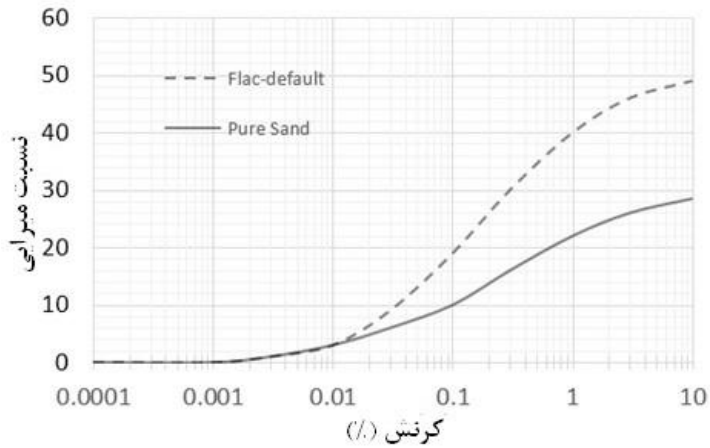
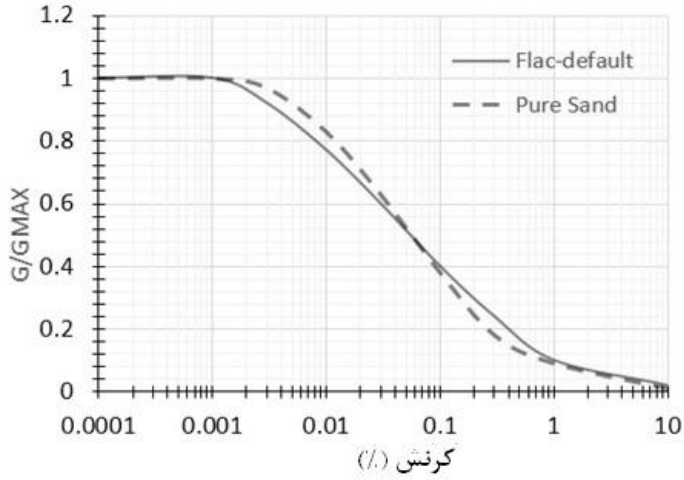
جدول ۱: مشخصات مصالح مورد استفاده در دو نرم افزار برای صحت سنجی

Soil	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gmax (MPa)	150	168	180	186	225	327	379	435	495	627
(kg/m <sup>3</sup> ) $\gamma$	2000	2000	2000	2000	2000	2082	2082	2082	2082	2082

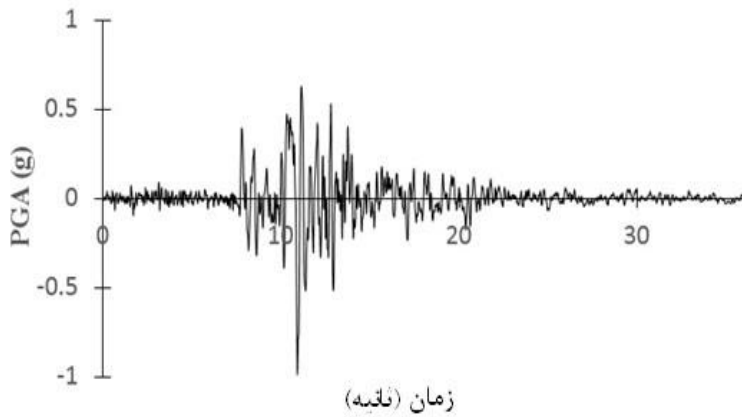
جدول ۲: بیشینه تعجیل اعمال شده در مدل صحت سنجی

تحلیل	1	2	3	4	5
PGA (g)	0/0001	0/001	0/01	0/1	1



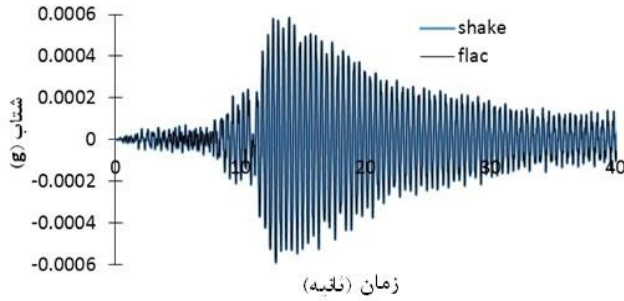


شکل ۳: کاهش مدول و میرایی، استفاده شده در هر دو نرم افزار

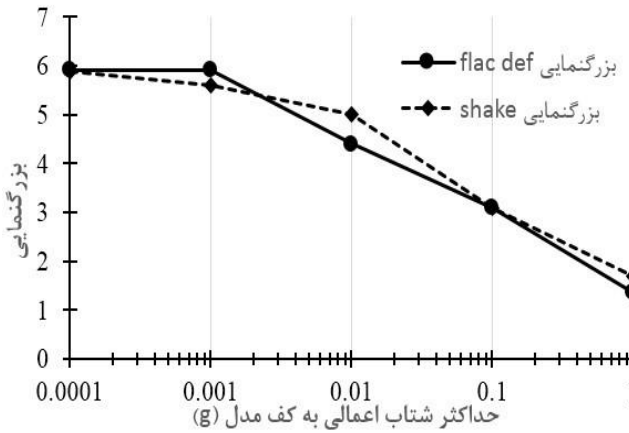


شکل ۴: تاریخچه زمانی تعجیل زلزله Loma Prieta (۱۹۸۳)





شکل ۵: بزرگ‌نمایی حاصل از دو نرم‌افزار



شکل ۶: تعجیل ضبط‌شده براساس دو نرم‌افزار Shake و Flac

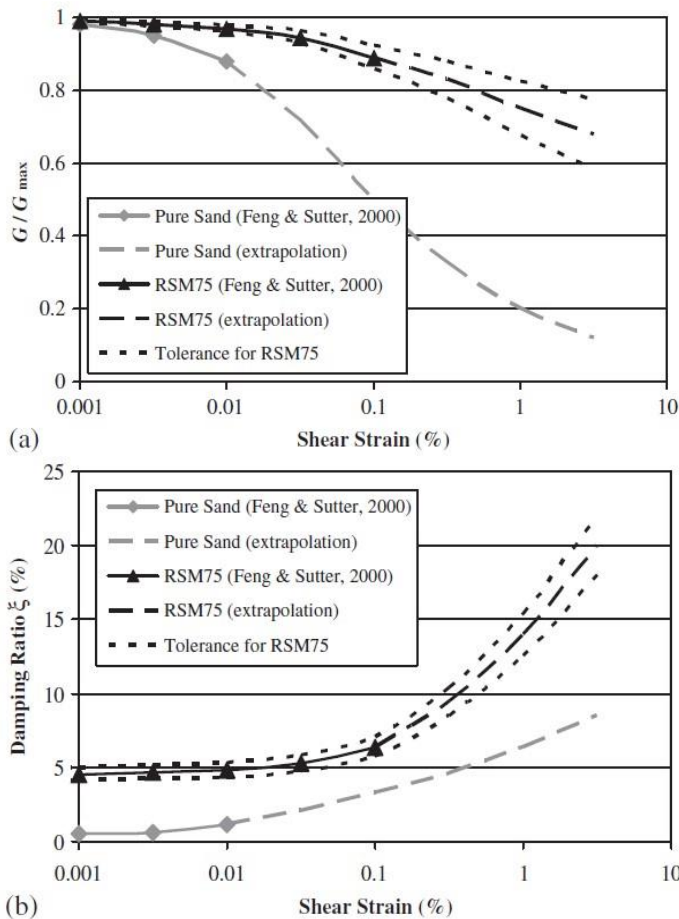
#### ۴. مشخصات مصالح استفاده‌شده در تحلیل‌ها

خصوصیات مصالح، شامل ویژگی‌های استاتیکی خاک و ترکیب خاک و تاثیر به‌عنوان لایه میراگر- از قبیل مدول الاستیسیته، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و ضریب پواسون- براساس تحقیقات Edil و Bosscher (۱۹۹۴) و Masad و همکاران (۱۹۹۶) انتخاب شده‌اند. خصوصیات دینامیکی مصالح نیز از تحقیقات Feng و sutter (۲۰۰۰) به دست آمده‌اند [۶ و ۱۴]. مقادیر پارامترهای استاتیکی استفاده‌شده در این تحقیق در جدول ۳ ارائه شده‌اند.

جدول ۳: خصوصیات استاتیکی مصالح استفاده‌شده در تجزیه و تحلیل‌ها [۲]

نوع مصالح	$G_{max}$ (MPa)	C (kpa)	$\varphi$ ( $^{\circ}$ )	$\gamma$ ( $\frac{kg}{m^3}$ )	$\nu$	$\psi$ ( $^{\circ}$ )
ریگ	222	5	38	1740	0.29	8
خاک و ۷۵٪ لاستیک	7.5	42	18	950	0.29	0

علاوه بر این، ویژگی‌های دینامیکی مصالح- شامل نمودارهای کاهش مدول برشی، افزایش میرایی ریگ و ترکیب ریگ و تایلر- که در تحقیق Tsang (۲۰۰۸) ارائه شده بودند با استفاده از مدل‌های رفتاری نرم افزار Flac تا حد امکان شبیه‌سازی شده است [۱۶ و ۶]. لازم به ذکر است نمودارهای استفاده شده در تحقیق Tsang همگی کرنش‌ها را پوشش نداده‌اند؛ بنابراین، تحقیق مذکور برون‌یابی‌ای برای محدوده‌ی کرنش‌های بزرگتر انجام داده است. نمودارهای مذکور را می‌توان در شکل ۷ مشاهده کرد. نمودارهای تغییرات مدول برشی و میرایی شبیه‌سازی شده را می‌توان در شکل ۸ مشاهده نمود. شکل ۹ نیز میرایی (لوپ هیسترسیس) متعارف نمونه خاکی را در مقایسه با ماده مرکب خاکی، برای مثال ترکیب خاک و تایلر که در نرم‌افزار Flac شبیه‌سازی شده است، نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۹ مشخص است، شیب (سختی) و سطح لوپ (میرایی) مربوط به خاک خالص در کرنش ثابت به ترتیب بیشتر و کمتر از ترکیب خاک-لاستیک هستند.

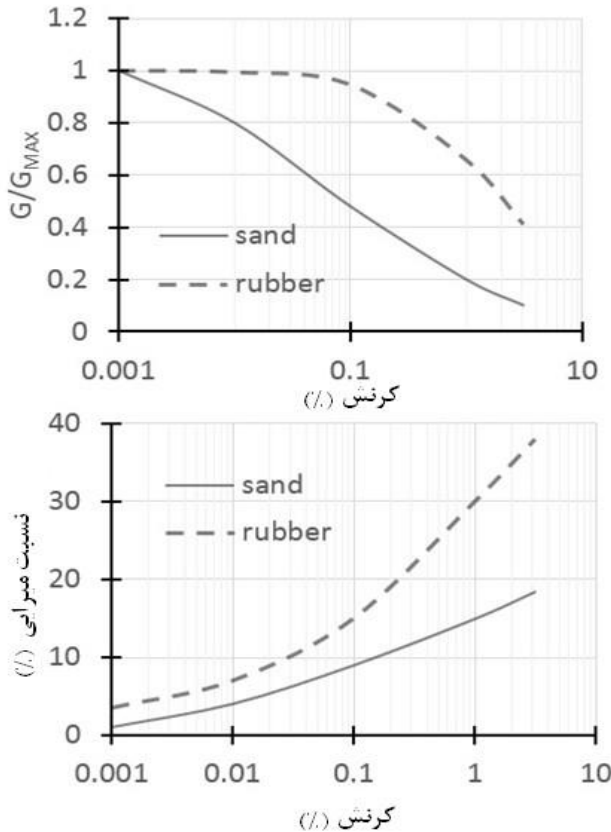


شکل ۷: نمودار منحنی‌های کاهش مدول و میرایی استفاده شده [۱۱]

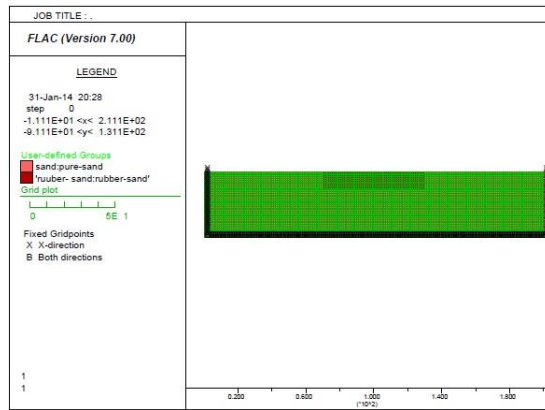
## ۵. فرایند مدل‌سازی

مدل ساخته شده در این تحقیق با فرض ساختمانی به طول ۴۰ متر در سطح زمین انتخاب شده است. برای کاهش اثرات اندازه‌ی مدل روی پاسخ‌ها، مدل از هر طرف به اندازه ۵ برابر نصف تهداب فرضی امتداد داده شد. ارتفاع لایه خاکی نیز ۴۰ متر انتخاب شد. طول لایه جاذب انرژی زلزله (لایه میراگر ترکیب خاک و تایلر) از اطراف تهداب به اندازه ۱۰ متر در نظر گرفته شد. شکل ۱۰ مدل ساخته شده را نشان می‌دهد. برای جلوگیری از پدیده‌ی انعکاس امواج، از مرزهای جاذب انرژی در طرفین مدل استفاده شد. بارگذاری زلزله به صورت تاریخیچه زمانی تعجیل از کف مدل به صورت افقی اعمال شد. تعجیل زلزله فرویلی با بیشینه‌های مختلف به کف مدل اعمال و تعجیل دریافتی در بالای مدل برای دو نقطه در سطح لایه خاک و تایلر و خاک ثبت شد.

لازم به ذکر است که ابتدا مدل، تحت وزن خودش و در حالت استاتیکی تحلیل شد، سپس تغییر شکل‌ها صفر و زلزله اعمال شد؛ بدین ترتیب صرفاً نتایج حاصل از تحلیل لرزه‌ای به دست می‌آیند.



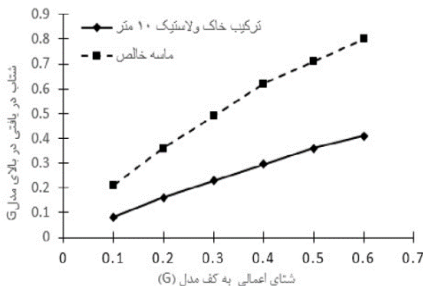
شکل ۹: لوب انرژی شبیه ساختمانی شده برای خاک و ترکیب خاک و تایلر در نرم‌افزار Flac



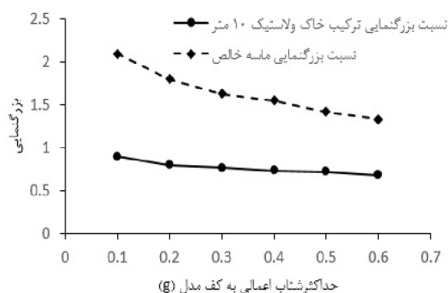
شکل ۱۰: مدل ساخته شده در نرم افزار FLAC

## ۶. نتایج تحلیل ها

شکل ۱۱، تعجیل دریافتی بالایی مدل را برای زلزله فرویلی با تعجیل وروری حداکثر  $0.2g$  برای محیط خاک و تایلر ریگ خالص نشان می دهد؛ این شکل حاکی از آن است که استفاده از لایه ای با خاصیت میرایی زیاد در زیر تهداب منجر به کاهش تعجیل زلزله در سطح زمین می شود. شکل ۱۲ نشان می دهد که استفاده از لایه میراگر، تعجیل دریافتی در سطح زمین، حین عبور از لایه ریگی خالص، دچار بزرگ نمایی شده است؛ درحالی که تعبیه ۱۰ متر لایه میراگر در زیر تهداب منجر به کوچک نمایی تعجیل حداکثر ورودی در کف مدل شده است. بزرگ نمایی لایه ریگی خالص با افزایش حداکثر تعجیل ورودی کاهش یافت و کوچک نمایی لایه میراگر بیشتر شده است؛ چراکه با بزرگتر شدن اندازه زلزله، میرایی سیستم نیز افزایش می یابد. با این حال لایه ریگی همچنان منجر به بزرگ نمایی و لایه میراگر منجر به کوچک نمایی می شوند. استفاده از لایه ۱۰ متری میراگر به طور متوسط باعث شده است تعجیل دریافتی در سطح زمین به نصف برسد.



(ب)

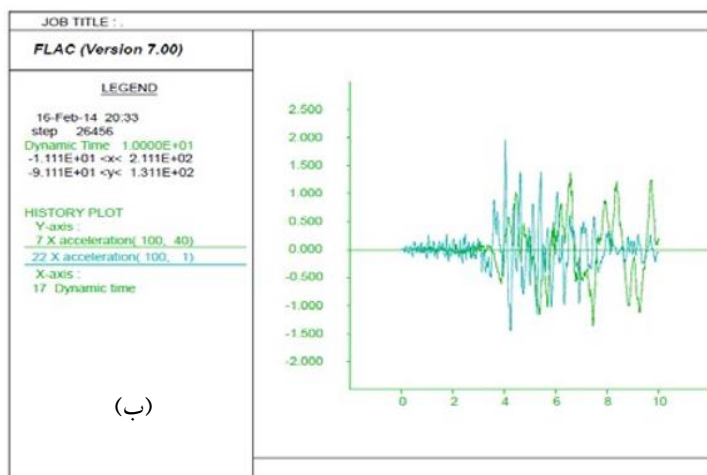
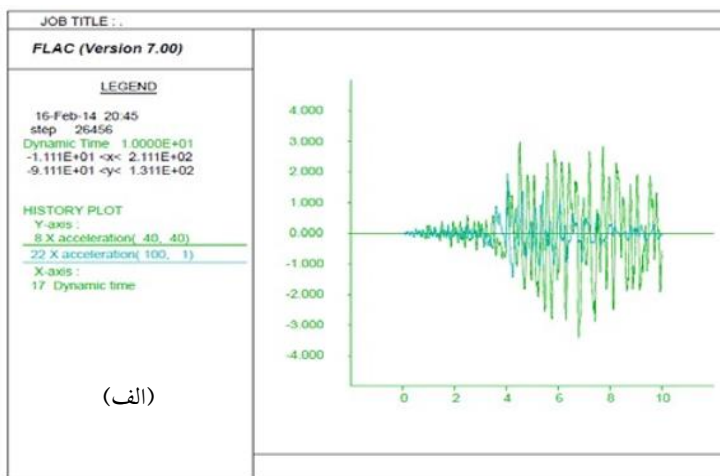


(الف)

شکل ۱۱: تعجیل دریافتی بالایی مدل برای زلزله فرویلی با تعجیل حداکثر  $0.2g$  (لف). برای

محیط خاک و تایلر؛ ب. ریگ خالص)





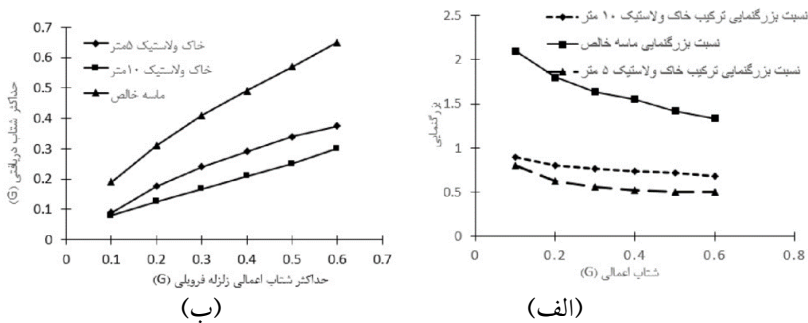
شکل ۱۲: الف. پاسخ ریگ و تایلر ریگ خالص برای زلزله فرویلی؛ ب. نسبت بزرگ‌نمایی برای زلزله فرویلی با بزرگی‌های مختلف برای خاک و لاستیک و ریگ خالص

### ۱-۶. اثر ضخامت لایه میراگر خاک و تایلر

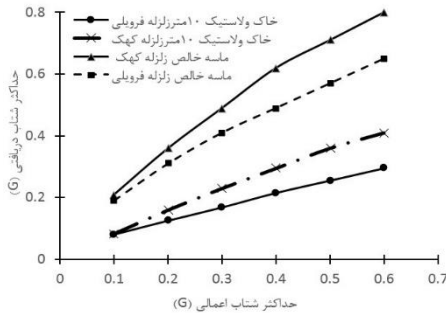
به منظور بررسی اثر ضخامت ترکیب خاک و تایلر روی پاسخ دریافتی تعجیل اعمال شده، مدلی با همان شرایط ذکر شده با ضخامت ترکیب خاک و تایلر ۵ متر ساخته شد؛ سپس، زلزله فرویلی، با تعجیل‌های بیشینه مختلف، به کف مدل اعمال شد. نتایج تحلیل در شکل ۱۳ به صورت تعجیل دریافتی در سطح زمین و بزرگ‌نمایی نشان داده شده‌اند. طبق شکل ۱۳ با کاهش ضخامت ترکیب خاک و تایلر، حداکثر تعجیل دریافتی در بالای مدل افزایش می‌یابد. به طور متوسط به غیر از تعجیل حداکثر ورودی  $1g$  / ۰ می‌توان گفت نصف شدن ضخامت لایه میراگر، تعجیل دریافتی در سطح زمین را تقریباً ۲۵٪ افزایش داده است.

## ۶-۲. اثر نوع زلزله

به منظور بررسی اثر نوع زلزله و محتوای فرکانسی آن بر رفتار دینامیکی سیستم، علاوه بر زلزله فرویلي، زلزله کهک نیز، با تعجیل‌های حداکثر مختلف، به مدل اعمال شد. قابل ذکر است که ضخامت ترکیب لایه میراگر خاک و تایلر ۱۰ متر در نظر گرفته شد. نتیجه تحلیل‌ها در شکل ۱۴ نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که برای هر زلزله، اختلاف تعجیل دریافتی بین دو حالتی که ریگ خالص و ترکیب خاک و تایلر مدل شده، تقریباً یکسان است؛ به عبارت دیگر، محتوای فرکانسی زلزله بسیار بر عملکرد میراکنندگی لایه میراگر مؤثر نبوده است. در این باره شاید بتوان گفت اثر میرایی لایه میراگر بیشتر از اثر تغییر خواص دینامیکی ناشی از تغییر نوع مصالح بوده است؛ هر چند بهتر است تعداد بیشتری زلزله در این مورد استفاده شود تا نتایج دقیق‌تری حاصل شود.



شکل ۱۳: اثر ضخامت خاک و تایلر روی الف. تعجیل دریافتی در سطح زمین؛ ب. بزرگ‌نمایی



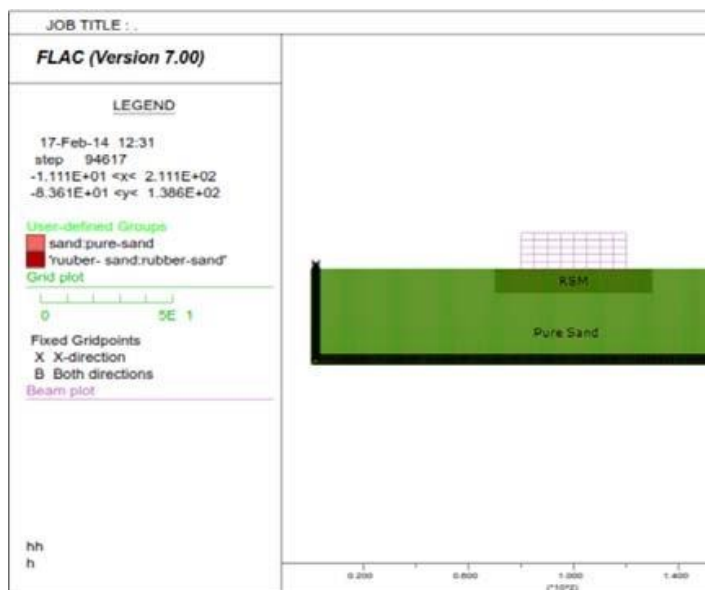
شکل ۱۴: اثر نوع زلزله اعمال شده

## ۶-۳. تحلیل مستقیم تعامل خاک و ساختمان

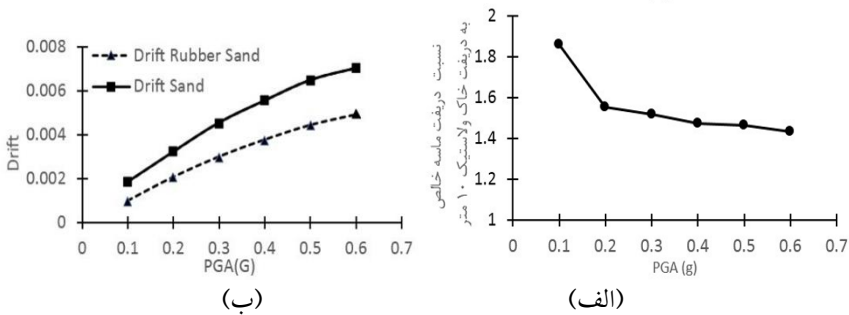
به منظور بررسی اثر تعامل خاک و ساختمان، ساختمان ۵ طبقه بتنی ای به طول ۴۰ متر و ارتفاع ۱۵ متر با تهادی گسترده به طول ۴۰ متر و ضخامت ۱/۲ متر مدل شد. طول بلوک خاک نیز ۵ برابر اندازه نصف تهاداب از هر طرف امتداد داده شد. ارتفاع بلوک خاک ۴۰ متر لحاظ شد. ابعاد ستون‌ها ۵/۵×۰/۵ و تیرها ۰/۳×۰/۴ متر انتخاب شد. فاصله ستون‌ها برابر با ۵ متر و ارتفاع طبقات نیز ۳ متر فرض شد. وزن مخصوص مصالح برابر با  $2400 \text{ kg/m}^3$  و مدول الاستیسیته



برابر با  $30 \text{ GPa}$  در نظر گرفته شد. فاصله ستون‌ها و تیرها در جهت عمود بر صفحه  $5 \text{ متر}$  در نظر گرفته شد. بار دال کف طبقات و بار زنده و مرده معادل به جرم هر تیر اضافه شد. جرم معادل شده‌ی دال با وزن مخصوص  $2400 \text{ kg/m}^3$  و ضخامت  $10$  سانتی‌متر برابر با  $1690$  کیلوگرم در هر متر طول تیر است. جرم معادل بار زنده و مرده نیز برابر با  $2500$  کیلوگرم در هر متر طول است؛ در تحلیل دینامیکی، این جرم نیز به تیرها انتقال داده شد. ابتدا تحلیل استاتیکی صورت گرفت؛ بدین صورت که ابتدا زمین، مدل و تحلیل شد؛ سپس جابه‌جایی‌ها و نشست‌های حاصله صفر شد. برای مدل‌سازی ساختمان، ابتدا تهداب ساختمان اضافه و تحلیل شد؛ در ادامه، ستون‌های طبقه همکف، سقف طبقه همکف تا طبقه آخر اضافه و تحلیل شد. پس از هر مرحله اضافه شدن ستون‌ها یا تیرها تحلیل استاتیکی انجام شد و مدل به تعادل رسید تا اینکه مدل کامل شد. شکل ۱۵، مدل ساخته‌شده را در انتهای ساخت نشان می‌دهد. پس از اتمام تحلیل استاتیکی، نشست‌ها صفر شد و زلزله فرویولی از کف مدل اعمال شد. جهت مقایسه اثر لایه میراگر، جابه‌جایی نسبی طبقه آخر به صورت نسبت جابه‌جایی طبقه تقسیم‌بر ارتفاع آن در برابر حداکثر تعجیل ورودی زلزله در شکل ۱۶. الف نشان داده شده است. نسبت دو پارامتر مذکور، حاصل از حالت بدون وجود لایه میراگر به حالت وجود لایه میراگر در شکل ۱۶. ب نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل‌ها مشخص است، وجود لایه میراگر در زیر ساختمان منجر به کاهش جابه‌جایی نسبی طبقه آخر ساختمان شده است؛ همچنین، شکل ۱۶. ب نشان می‌دهد استفاده از لایه میراگری به ضخامت  $10$  متر منجر به کاهش تقریباً  $1/4$  تا  $1/9$  برابری جابه‌جایی نسبی شده است.



شکل ۱۵: مدل شبیه‌سازی‌شده ساختمان ۵ طبقه



شکل ۱۶: اثر استفاده از لایه میراگر با ضخامت ۱۰ متر روی جابه‌جایی نسبی طبقه آخر ساختمان. الف. مقدار مطلق جابه‌جایی نسبی؛ ب. نسبت جابه‌جایی نسبی در حالت بدون استفاده از لایه میراگر به حالت استفاده از آن

## ۷. نتیجه‌گیری

استفاده از لایه میراگر خاکی مرکب می‌تواند روش مؤثری برای کاهش اندازه تعجیل انتقال‌یافته به ساختمان تلقی شود؛ بدین صورت که به‌جای بزرگ‌نمایی امواج، حین عبور از لایه خاکی، شاهد کوچک‌نمایی آن خواهیم بود. نتایج تحلیل‌ها نشان دادند که می‌توان، با توجه به اندازه بیشینه تعجیل ورودی از  $0.1g$  تا  $0.6g$ ، بزرگ‌نمایی لایه خاکی زیر تهداب را بیش از ۲ برابر کاهش داد. هرچه ضخامت لایه میراگر خاکی مرکب بیشتر شود، مقدار کوچک‌نمایی نیز بیشتر خواهد شد؛ هرچند نرخ کوچک‌نمایی اندازه تعجیل زلزله متناسب با نرخ افزایش ضخامت لایه میراگر نیست. مقدار کوچک‌نمایی برای دو زلزله مختلف فرویلی و کهک، با محتوای فرکانسی مختلف که در این تحقیق استفاده شدند، تقریباً یکسان ملاحظه شد؛ هرچند نیاز به تحلیل‌های بیشتر با تعداد زلزله بیشتر در این زمینه وجود دارد. تحلیل اندرکنش مستقیم ساختمان و خاک نشان داد که استفاده از لایه میراگر منجر به کاهش مقدار جابه‌جایی نسبی (دریفت) طبقات ساختمان می‌شود. جابه‌جایی نسبی طبقه آخر ساختمان ۵ طبقه‌ای، بدون استفاده از لایه میراگر نسبت به استفاده از خاک مرکب ۱۰ متری، با توجه به حداکثر تعجیل ورودی از  $0.1g$  تا  $0.6g$ ، ۱.۴ تا ۱.۹ برابر می‌شود.



- [1] M. Yegian and U. Kadakal, "Foundation isolation for seismic protection using a smooth synthetic liner," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 130, no. 11, pp. 1121-1130, 2004.
- [2] T. B. Edil and P. J. Bosscher, "Engineering properties of tire chips and soil mixtures," *Geotechnical testing journal*, vol. 17, pp. 453, 1994.
- [3] C. Benson, "Using shredded scrap tires in civil and environmental construction," *Resource Recycling*, vol. 14, pp. 71, 1995.
- [4] G. J. Foose, C. H. Benson, and P. J. Bosscher, "Sand reinforced with shredded waste tires," *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 122, no. 9, pp. 760-767, 1996.
- [5] J. Lee, R. Salgado, A. Bernal, and C. Lovell, "Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill," *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 125, no. 2, pp. 132-141, 1999.
- [6] Z.-Y. Feng and K. G. Sutter, "Dynamic properties of granulated rubber/sand mixtures," *Geotechnical Testing Journal*, vol. 23, no. 3, pp. 338-344, 2000.
- [7] D. S. Kim and K. Konagai, "Key parameters governing the performance of soft tunnel coating for seismic isolation," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 30, no. 9, pp. 1333-1343, 2001.
- [8] J. Li and D. Ding, "Nonlinear elastic behavior of fiber-reinforced soil under cyclic loading," *Soil dynamics and earthquake engineering*, vol. 22, no. 9-12, pp. 977-983, 2002.
- [9] S. Youwai, D. Bergado, and N. Supawiwat, "Interaction between hexagonal wire reinforcement and rubber tire chips with and without sand mixture," *Geotechnical Testing Journal*, vol. 27, no. 3, pp. 260-268, 2004.
- [10] J. G. Zornberg, A. R. Cabral, and C. Viratjandr, "Behaviour of tire shred sand mixtures," *Canadian geotechnical journal*, vol. 41, no. 2, pp. 227-241, 2004.
- [11] X. Xu, S. Lo, H.-H. Tsang, and M. N. Sheikh, "Earthquake protection by tire-soil mixtures: numerical study," in *Proceedings of the New Zealand Society for Earthquake Engineering (NZSEE) Conference*, Wellington, New Zealand, 2009, pp. 3-5.
- [12] H. H. Tsang, "Seismic isolation by rubber-soil mixtures for developing countries," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 37, no. 2, pp. 283-303, 2008.
- [13] H. H. Tsang, S. Lo, X. Xu, and M. Neaz Sheikh, "Seismic isolation for low-to-medium-rise buildings using granulated rubber-soil mixtures: numerical study," *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 41, no. 14, pp. 2009-2024, 2012.
- [14] E. Masad, R. Taha, C. Ho, and T. Papagiannakis, "Engineering properties of tire/soil mixtures as a lightweight fill," *Geotechnical testing journal*, vol. 19, pp. 297-304, 1996.