بررسی عددی رفتار دینامیکی مخلوط خاک-تراشه لاستیک فرسوده

*مسعود عامل سخی، فرزام زائری: گروه مهندسی عمران دانشگاه ارومیه
m.amelsakhi@urmia.ac.ir

تاریخ: دریافت ۹۰/۸/۲۲ پذیرش۹۰/۱۰/۷

چکیده

حجم عظیم لاستیک‌های فرسوده با توجه به تجزیه نشدن در طبیعت باعث ایجاد مشکلات زیست‌محیطی فراوان شده است که رفع آن از دغدغه‌های اصلی کارشناسان این حوزه است. در سال‌های اخیر به استفاده مجدد از این مواد در صنایع مختلف بسیار توجه شده است. این مواد به‌دلیل حالت الاستیک و توانایی زیاد در جذب انرژی به‌عنوان یکی از شناخته شده‌ترین میراگرها محسوب می‌شوند. با توجه به این‌که کاهش لرزش‌های رسیده ناشی از زلزله، به سازه، از موثرترین روش‌های مقابله با نیروی‌های زلزله است، لذا به نظر می‌رسد استفاده از مخلوط خاک-تراشه‌های لاستیک فرسوده در زیر پی می‌تواند به‌عنوان نوعی میراگر عمل کرده و اثرات امواج حاصل رسیده به زیرسازه را کاهش دهد. در این تحقیق مصالح مذکور به‌عنوان میراگر در زیر پی، مدل شده و تأثیر عمق سنگ‌بستر بر روی عمل‌کرد مخلوط در حوزهٔ زمان و فرکانس بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد این مصالح دامنهٔ تشدید، شتاب و انرژی رسیده به سطح زمین را به‌شدت کاهش می‌دهد. همچنین با افزایش عمق سنگ‌بستر عمل‌کرد این مصالح به‌عنوان جداساز لرزه‌ای کاهش می‌یابد. مصالح مذکور در زلزله‌های شدید نسبت به زلزله‌های ضعیف، عمل‌کرد بهتری دارد. مزیت این روش نسبت به روش‌های مشابه هزینهٔ پایین، دسترسی آسان به منابع، عدم نیاز به تکنولوژی بالا و رفع هم‌زمان دو مشکل (لرزش‌های زلزله و مسائل زیست محیطی) است.

واژه‌های کلیدی: میراگر، مخلوط خاک-لاستیک، فرکانس، رفتار لرزه‌ای

*نویسنده مسئول

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.6.6]

مقدمه

ایران از نواحی پرخطر لرزه‌ای دنیا است. بر این اساس، یافتن روش‌های کاهش مخاطرات ناشی از زلزله، از وظایف محققان و جامعهٔ مهندسی کشور است. از موثرترین اقدامات در این زمینه، کاهش نیروهای ورودی ناشی از زلزله به سازه‌ها است. به‌عبارت دیگر با میرا کردن امواج زلزله قبل از ورود به سازه، می‌توان به طرحی سبک‌تر و اقتصادی‌تر برای مقابله با اثرات ناشی از زلزله در ساختمان‌ها دست یافت. با توجه به آن‌چه که مطرح شد، ایزولاسیون پی‌ها در برابر امواج زلزله در همین راستا است. نکتهٔ قابل ذکر در طرح‌های مهندسی استفاده از راه‌حل‌های اقتصادی است که این امر در کشورهای در حال توسعه از اهمیت به‌مراتب بیش‌تری برخوردار است، زیرا، به‌صرفه بودن طرح از نظر اقتصادی، علاوه بر کارفرمایان دولتی، کارفرمایان خصوصی را نیز مشتاق به استفاده از طرح‌های مصوب فنی ارزان قیمت خواهد کرد. بازیافت و استفادهٔ مجدد از لاستیک‌های فرسوده یکی از مشکلات زیست‌محیطی در دوران اخیر است. به‌عنوان مثال هر سال حدود ۵۰ میلیون تایر استفاده شده در ایالات متحده دور انداخته می‌شود [۱]. بر اساس آمارهای ارائه شده، که تنها بخش کوچکی از کل لاستیک‌های فرسوده است، و با توجه به این‌که رها کردن آن‌ها در طبیعت باعث بروز فاجعهٔ زیست‌محیطی می‌گردد، از این رو استفادهٔ مجدد از این مصالح نظر محققان زیادی را به خود جلب کرده است. ارزیابی زیست‌محیطی مخلوط‌های سمی موجود در تایرهای مدفون که ممکن است باعث بروز اثرات منفی بر روی کیفیت آب‌های زیرزمینی شود، از مواردی است که بررسی شده است. بر طبق این تحقیقات بر روی کیفیت آب زیرزمینی در طی دوره دو ساله تأثیر مضر چشم‌گیری مشاهده نشده است [۲]، [۳]، [٤]. بررسی مخلوط خاک رس چسبنده–خرده لاستیک نشان داده است بهینه‌ترین درصد لاستیک برای رسیدن به حداکثر حد روانی و نشانهٔ خمیری۳۰٪ است، هم‌چنین با افزایش درصد لاستیک، نفوذپذیری مخلوط افزایش می‌یابد. علاوه بر این در صورت استفاده از خرده لاستیک ریز با افزایش درصد لاستیک درصد رطوبت بهینه افزایش یافته ولی در خرده لاستیک درشت این تغییر ناچیز است. این بررسی‌ها نشان داد افزودن ٤۰٪ خرده لاستیک باعث دست یافتن به بیش‌ترین چسبندگی و کم‌ترین زاویهٔ اصطکاک داخلی در

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.6.6]

مخلوط می‌شود. هم‌چنین در صورت افزودن ۲۰٪ خرده لاستیک به خاک رس بیش‌ترین مقاومت برشی در آن حاصل می‌شود [۵]. آزمایش‌های انجام گرفته برای تعیین رفتار دینامیکی مخلوط ماسه- خرده لاستیک نشان داد با افزایش درصد لاستیک مدول برشی مخلوط به‌دلیل خاصیت ارتجاعی بالای لاستیک کاهش چشم‌گیری می‌یابد. هم‌چنین افزایش درصد لاستیک تا حدود ۵۰٪ تأثیر اندکی بر روی نسبت میرایی مخلوط دارد ولی با رسیدن به ۷۵٪ نسبت میرایی افزایش چشم‌گیری داشته و به حدود ۵٪ در کرنش‌های اندک و حدود ۲۰٪ در کرنش‌های زیاد می‌رسد. این بررسی‌ها نشان داد افزایش تنش نرمال باعث افزایش چشم‌گیر در مدول برشی می‌شود ولی تأثیری بر روی میرایی مخلوط ندارد [٦]. ساخت خاک‌ریز راه در آمریکا در مقیاس واقعی با استفاده از مخلوط ماسه- خرده لاستیک و ثبت داده‌های ابزار دقیق به‌مدت یک سال نشان داد حداکثر نشست خاک‌ریز که پس از ۲۰۰ روز رخ داد برابر با ۱۲ میلی‌متر بوده و حداکثر حرکت جانبی خاک‌ریز تنها ۲ میلی‌متر ثبت شد و پس از آن تغییر شکل‌ها ثابت باقی ماند [۷]. مدل‌سازی عددی عمل‌کرد خاک لاستیک فرسوده به‌عنوان ایزولاسیون لرزه‌ای در زیرپی نشان داد استفاده از این مصالح در خاک ماسه‌ای متراکم باعث کاهش چشم‌گیر در شتاب‌های رسیده به ساختمان می‌شود. همچنین پاسخ دینامیکی مخلوط در اثر تغییرات ابعاد و ارتفاع ساختمان بررسی شد. مقاسیهٔ دامنهٔ فوریه برای خاک مسلح و غیرمسلح تحت شرایط مذکور نشان دهندهٔ اندکی کاهش دامنهٔ فوریه در خاک مسلح و نیز شیفت فرکانسی در برخی حالت‌ها است [۸].

بررسی‌های انجام گرفته بر پایه آزمون‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در صورت افزودن خردهٔ لاستیک به ماسهٔ متوسط، میزان تغییر شکل گسیختگی متناسب با تنش قائم افزایش می‌یابد [۹]. و از سوی دیگر، با درصد لاستیک، کرنش ماندگار و مدول فشردگی کاهش می‌یابد که با افزایش تنش عمودی مؤثر رابطه عکس دارد [۱۰]. نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که وزن مخصوص مخلوط ماسه - لاستیک فرسوده خشک، به درصد ماسه وابستگی زیادی دارد و از درصد رطوبت اثرپذیری کم‌تری دارد. از سوی دیگر این مصالح دارای اندرکنش بهتری با ژئوگرید تک محوره نسبت به دیگر انواع ژئوگریدها هستند [۱۱]. آزمون‌ها نشان

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.6.6]

می‌دهد که در صورت استفاده از تایرهای فرسوده به‌صورت شبکه‌ای از سلول‌های به هم‌پیوسته، و به‌کار بردن آن‌ها در لایه‌های افقی در زیر پی، ظرفیت باربری خاک افزایش و میزان نشست کاهش می‌یابد [۱۲]. آزمایش‌های گستردهٔ انجام گرفته بر روی بتن آسفالتی مخلوط با لاستیک نشان می‌دهد که اضافه کردن لاستیک باعث کاهش تغییر شکل دائم، محدود کردن سختی و مقاومت زیاد در برابر ترک خوردگی حرارتی می‌شود [۱۳]. بررسی‌های انجام شده بر روی عمل‌کرد مخلوط ماسه– خرده لاستیک فرسوده نشان می‌دهد که در صورت استفاده از این مصالح به‌عنوان خاک‌ریز پشت دیوار حائل تحت بارهای لرزه‌ای، تغییر مکان دائم و فشار دینامیکی کاهش محسوسی می‌یابد [۱٤]. بررسی‌های عددی نشان می‌دهد در صورت استفاده از مخلوط ماسه– خرده لاستیک به‌عنوان مصالح خاک‌ریز در پشت دیوار حایل مسلح، با افزایش درصد لاستیک، تغییر مکان جانبی دیوار حایل و نیز نیروی وارده به مسلح کننده‌ها افزایش می‌یابد. این موضوع به‌دلیل تغییر کرنش حجمی از حالت انقباضی به‌حالت انبساطی با افزایش درصد لاستیک است [۱۵]. آزمون‌ها بر روی خصوصیات مقاومتی مخلوط خرده لاستیک – ماسه سیلتی با نسبت اختلاط ۰:۱۰۰ الی ۳۰:۷۰ نشان داد درصد رطوبت بهینه وابستگی اندکی به درصد لاستیک دارد. هم‌چنین نتایج نشان‌دهندهٔ کاهش مقاومت برشی مخلوط در صورت یخزدن است. علاوه براین با افزایش درصد لاستیک مدول تغییرشکل و مقاومت کششی مخلوط کاهش یافته و وابستگی آن به دما نیز کاهش می‌یابد. هم‌چنین در صورت افزودن خردهٔ لاستیک به ماسهٔ سیلتی، مخلوط با وجود تحمل تنش کششی کم‌تر، کرنش‌های بیش‌تری را تحمل می‌کند [۱٦]. پژوهش‌های صورت گرفته بر روی خصوصیات خاک رس نشان داد در صورت اصلاح خاک، با افزودن ۱٪ الی ۵٪ الیاف خرده لاستیک فرسوده به خاک رس، علاوه بر درصد لاستیک، اندازهٔ الیاف لاستیکی نیز نقش مهمی در بهبود مقاومت فشاری محدود نشده مخلوط ایفا می‌کند، درصد لاستیک و اندازهٔ الیاف بهینه به‌ترتیب ۲٪ و ۱۰ میلی‌متر به‌دست آمد. هم‌چنین با افزودن ۲٪ الیاف لاستیک به خاک رس بیش‌ترین مدول برشی و نسبت میرایی در مخلوط مشاهده شد [۱۷]. از سوی دیگر از لاستیک‌های فرسوده می‌توان به‌عنوان مصالح مسلح کنندهٔ خاک استفاده کرد. نتایج بررسی‌های محققان

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.6.6]

مختلف نشان‌دهندهٔ افزایش پارامترهای مقاومت برشی خاک، یعنی چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک است [۱۸]، [۱۹]. تحقیقات گذشتهٔ مؤلفان نشان می‌دهد که استفاده از این مصالح در زیر ساختمان‌های واقع بر خاک‌های رسی بسیار نرم باعث میرا شدن امواج رسیده به‌سازه شده است [۲۰]. در تحقیق حاضر به بررسی رفتار لرزه‌ای استفاده از مخلوط خاک- لاستیک فرسوده در زیر پی با نگاهی ویژه به حوزهٔ فرکانس پرداخته شده است.

مشخصات و مدل رفتاری مصالح

در جدول ۱ مشخصات مصالح استفاده شده در مدل‌سازی عددی ارائه شده است. در این مدل‌ها محیط خاک از جنس رس متوسط (مدول الاستیسیته در حدود $5\ MN/m^2$) و در زیر پی مخلوطی متشکل از ۷۵ درصد لاستیک فرسوده و خاک ماسه‌ای است. مشخصات مصالح مخلوط، با توجه به آزمون‌هایی که فنگ[۱] و ساتر[۲] در سال ۲۰۰۰ انجام دادند [٦]، تعیین شد. به‌دلیل وجود ۷۵٪ تراشهٔ لاستیک فرسودهٔ الاستیک، عمل‌کرد خطی و نیز عدم احتمال پلاستیک شدن این مصالح در برابر بارگذاری‌های دینامیکی مدل رفتاری مخلوط خاک ماسه‌ای-لاستیک (RSM)[۳] الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. مدل رفتاری رس موهر-کولمب با توجه به احتمال ورود خاک رس به محدودهٔ خمیری تحت بارگذاری لرزه‌ای، انتخاب شده است (نتایج نهایی بررسی‌ها عدم ورود خاک رس به محدودهٔ پلاستیک را نشان می‌دهد).

جدول ۱. مشخصات مصالح در مدل‌های عددی

نوع مصالح	وزن مخصوص (kN/m^3)	مدول الاستیسیته (kN/m^2)	مدول برشی (kN/m^2)	ضریب پواسون	سرعت موج برشی (m/s)	زاویهٔ اصطکاک داخلی(درجه)	چسبندگی (kN/m^2)
مخلوط خاک- لاستیک (RSM)	۹/۵	۱۹۵۰۰	۷۵۰۰	۰/۳	۸۸	-	-
رس متوسط	۱۷	۵۱۸۰	۱۹۱۹	۰/۳۵	۳۳	۱۰	۵۰

۱. Feng ۲. Sutter ۳. Rubber-Soil Mixture

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.6.6]

فرآیند مدل‌سازی عددی

استفاده از روابط تحلیلی کلاسیک برای بررسی رفتار خاک، به‌دلیل در نظر گرفتن کل خاک به‌عنوان توده‌ای ثابت، نتایج چندان دقیقی به‌دست نمی‌آید. لذا به‌نظر می‌رسد مدل‌سازی تودهٔ خاک به المان‌های کوچک و استفاده از روش‌های عددی بر دقت محاسبات می‌افزاید و نتایج را به رفتار تودهٔ خاک نزدیک‌تر می‌کند. به‌همین دلیل نرم‌افزار المان محدود (Plaxis) نسخه ۸/۵ با المان‌های مثلثی برای مدل‌سازی در این تحقیق مناسب تشخیص داده شد. از آن‌جا که المان مثلثی ۳ گره‌ای توانایی تحلیل غیرخطی را ندارد، لذا در نرم‌افزار (Plaxis) از المان‌های مثلثی ٦ و ۱۵ گره‌ای برای تحلیل‌های غیرخطی استفاده می‌شود. در این مدل‌سازی به‌جای زیاد کردن تعداد المان‌ها برای رسیدن به جواب‌های دقیق‌تر از المان‌هایی با مرتبهٔ بالاتر (۱۵گره‌ای) استفاده شده است.

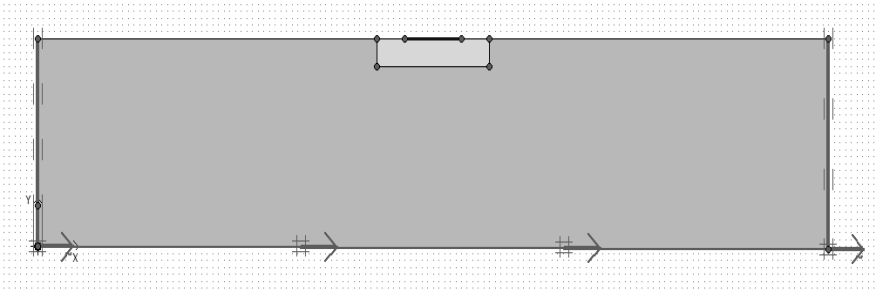
۱. مدل هندسی و شرایط مرزی

برای مدل‌سازی هندسی از ابعادی استفاده شد که به‌طور طبیعی در پروژه‌های واقعی قابل استفاده و استناد باشد. بر این اساس عمق سنگ‌بستر(ارتفاع مدل) که پارامتر اصلی بررسی شده در این تحقیق است، حداقل ۱۰ و حداکثر ۳۵ متر و با گام‌های ۵ متری در نظر گرفته شد. هم‌چنین برای تعیین میزان تأثیر ضخامت پی بر عمل‌کرد این مصالح از سه ضخامت متفاوت ٦۰ ، ۸۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر استفاده شده است. خاک محل با توجه به جدول ۱ و توصیهٔ محققان [۲۱]، رس متوسط انتخاب شد. مرزهای عمودی می‌تواند برای تحلیل‌های دینامیکی و در مواردی که بار دینامیکی از کف به مدل وارد می‌شود (بار زلزله)، موجب بازتاب امواج به داخل تودهٔ خاک شده و تأثیر منفی بر پاسخ‌های دینامیکی بگذارد. با توجه به تحقیقات گذشتهٔ مؤلفان [۲۰]، در صورتی که در این مدل خاص، مرزهای مدل از هر طرف حدود ۳۰ متر بزرگ‌تر در نظر گرفته شود می‌توان انتظار داشت که اثرات منفی از بین برود (در صورت استفادهٔ هم‌زمان از مرزهای جاذب). از این‌رو طول کل مدل ۱٤۰ متر و طول محدودهٔ مسلح شده با RSM ۲۰ متر تعیین شد. استفاده از ضخامت‌های بیش‌تر از ٤ متر به‌دلیل حجم زیاد خاک‌برداری و نیاز به مقدار بیش‌تر تراشه‌های لاستیکی در عمل از نظر اقتصادی به‌صرفه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.6.6]

نیست، بنا بر این در این تحقیق یک ضخامت ثابت ٤ متر برای محدودهٔ مسلح در نظر گرفته شد. مدل دارای غلتک‌های قائم در مرزهای قائم و در مرزهای افقی (کف مدل) دارای تکیه‌گاه‌های مفصلی است و نیروی زلزله در جهت افقی به کف مدل وارد شده است. تصویر یکی از مدل‌های ساخته شده برای انجام تحلیل‌های عددی در نرم افزار (Plaxis) در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. تصویر یکی از مدل‌های ساخته شده در نرم افزار PLAXIS

۲. میرایی مصالح

پارامتر متداول بیان میرایی، نسبت میرایی(ζ) است. در روش المان محدود (FEM)، میرایی رایلی یکی از اندازه‌گیری‌های مناسب است که اثرات میرایی را در ماتریس جرم و سختی سیستم اعمال می‌کند. α پارامتری است که اثر جرم و β اثر سختی را در میرایی سیستم تعیین می‌کند. با افزایش α فرکانس‌های کم و با افزایش β فرکانس‌های بالا بیش‌تر مستهلک می‌شود. در این تحقیق نیز برای اعمال میرایی مصالح از روابط میرایی رایلی مطابق این رابطه استفاده شد:

$$\alpha + \beta\omega_i^2 = 2\omega_i\zeta_i \qquad (۱)$$

پارامترهای β و α پارامترهای رایلی، ζ میرایی مصالح متناظر با مود ارتعاشی و ω فرکانس ارتعاشی مود مورد نظر مصالح است که از این رابطه قابل محاسبه است.

$$\omega = \frac{V_s}{H}\left(\frac{\pi}{2} + n\pi\right),\ n = 0, 1, 2, \ldots, \infty \qquad (۲)$$

که در آن V_s سرعت موج برشی، H ضخامت لایه و n شمارهٔ مود مذکور است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.6.6]

رابطهٔ ۱ دارای دو مجهول α و β است و با استفاده از دو فرکانس ارتعاشی (ω) که بیش از ۹۰٪ جرم مؤثر مودی در آن شرکت دارد، مقادیر مجهول تعیین می‌شود. به این منظور بر روی سیستم نشان داده شده در شکل ۱ با استفاده از نرم افزار ANSYS آنالیز مودال انجام شد و مودهای اول و سوم با توجه به جرم‌های مؤثر بالای آن‌ها برای تعیین پارامترهای مجهول α و β استفاده شدند. مقادیر به‌دست آمده در تحلیل‌های دینامیکی استفاده شدند.

۳. المان‌بندی

برای بالا بردن دقت محاسبات با توجه به مطالب ذکر شده در بخش قبل، افزایش تعداد المان‌ها و نیز بالا بردن مرتبه المان مفید است. برای انجام تحلیل‌های دینامیکی در مسائل ژئوتکنیکی به‌روش المان محدود، اندازهٔ حداکثر بعد قائم المان، برای رسیدن به دقت‌های قابل قبول از این رابطه محاسبه می‌شود.

$$h_{max} = \frac{1}{N} \frac{V_s}{f_{max}} \qquad (۳)$$

در رابطهٔ مذکور f_{max} بیش‌ترین فرکانس، V_s سرعت موج برشی در مصالح و N ضریب ثابتی است که مطابق توصیهٔ برخی محققان در بازهٔ ۸ تا ۱۰ است [۲۲]. در این تحقیق برای رسیدن به‌دقت بیش‌تر از مقدار بازهٔ ۱۰ استفاده شد. مشخصات فرکانسی رکوردهای زلزله و المان‌بندی در جدول ۲ ارائه شده است. در روند المان‌بندی این تحقیق توصیهٔ مذکور منظور شده است.

٤. رکوردهای زلزله

برای بررسی عمل‌کرد مصالح مسلح کنندهٔ (RSM) در برابر زلزله‌های ضعیف و قوی در تحلیل‌های انجام شده از دو شتاب‌نگاشت ضعیف و قوی استفاده شد که مشخصات فیلتر شده شتاب‌نگاشت‌ها در بازهٔ ۰/۱ تا ۱۰ هرتز در جدول ۲ آمده است. در شکل ۲ تاریخچهٔ زمانی محرک‌های ورودی قوی و ضعیف و نیز در شکل ۳ طیف فوریه شتاب‌نگاشت‌های ذکر شده ارائه شده است.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

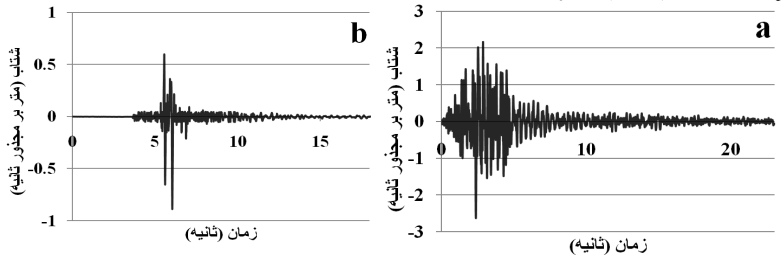
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.6.6]

جدول۲. مشخصات زلزله، طول موج و اندازهٔ المان‌ها

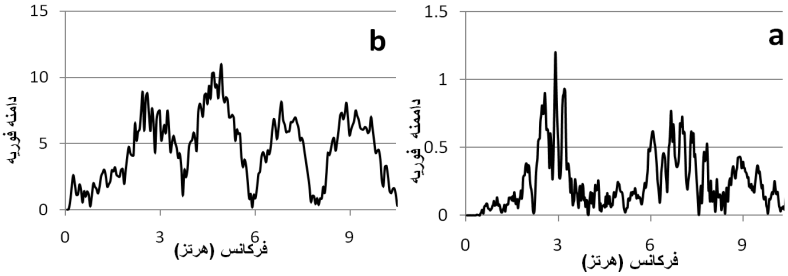
شتاب نگاشت	تاریخ	بزرگای محلی	PGA (m/s^2)	T_p(S)	V_s (m/s)	f_{max} (m)	l_e^* (m)
قوی	۱۹۹۰/۲/۲۸	۵/٤	۲/٦۳	۰/۱٤	۳۳/۲٦	۱۰	۰/۳۳
ضعیف	۲۰۰۲/۱۰/۳۱		۰/۸۸	۰/۲	۳۳/۲٦	۱۰	۰/۳۳

I_e. میانگین اندازهٔ المان در تحلیل‌های انجام شده

T_p. دورهٔ تناوب غالب محرک ورودی



شکل۲. تاریخچهٔ زمانی محرک‌های ورودی قوی (a) و ضعیف (b)



شکل۳. طیف فوریه محرک‌های ورودی قوی(a) وضعیف (b)

بررسی نتایج

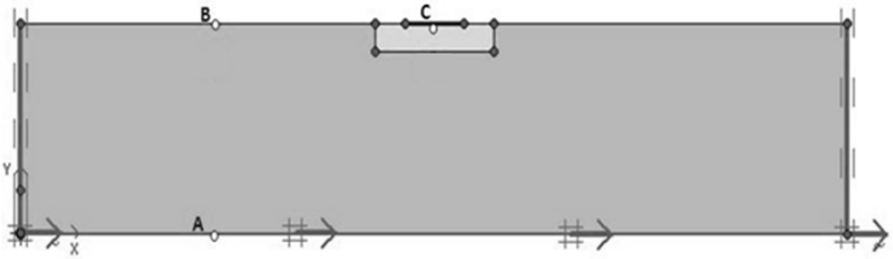
برای مقایسهٔ نتایج ۳ نقطه بدین شرح در نظر گرفته شده است:

نقطه A در کف مدل برای ثبت محرک ورودی، نقطه B در سطح زمین غیرمسلح به فاصله ۳۰ متر از مرز قائم و نقطه C در سطح زمین و در وسط ناحیه مسلح. طرح نهایی مدل همراه با نقاط ذکر شده در شکل ٤ ارائه شده است. شتاب حداکثر زمین [۱](PGA)، شتاب مؤثر طراحی [۲](EDA)، شدت شتاب طیفی [۳](ASI)، حوزهٔ فرکانس (دامنه فوریه [٤](FA))

۱. Peak Ground Acceleration
۲. Effective Design Acceleration
۳. Acceleration Spectrum Intensity
٤. Fourier Amplitude

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.6.6]

و ضخامت پی، فاکتورهای تصمیم‌گیری در تحلیل نتایج به‌دست آمده است.



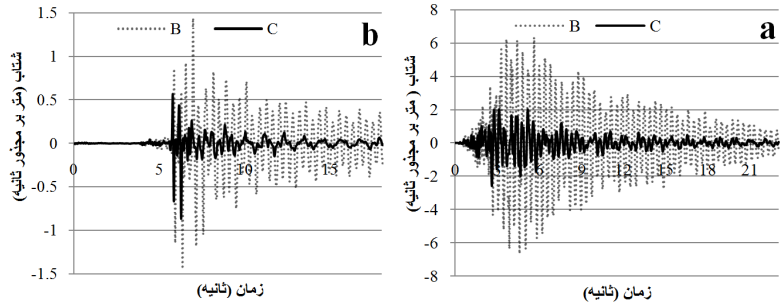
شکل٤. نقاط واقع در مدل برای بررسی نتایج تحلیل‌ها

۱. شتاب حداکثر زمین

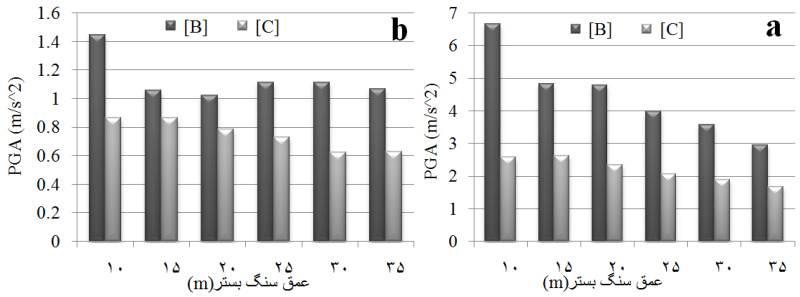
اولین معیار و فاکتور در نظر گرفته شده برای تحلیل و مقایسهٔ نتایج تحلیل، شتاب حداکثر زمین است. مقایسهٔ نتایج اثر تغییرات عمق سنگ‌بستر بر شتاب حداکثر رسیده به سطح زمین مسلح و غیرمسلح (نقاط B و C) نشان می‌دهد مصالح RSM به‌خوبی شتاب حداکثر رسیده به سطح زمین را میرا می‌کند. شتاب‌های رسیده به سطح زمین برای خاک مسلح و غیرمسلح در صورت اعمال شتاب‌نگاشت قوی و ضعیف برای بالاترین عمل‌کرد مصالح RSM در شکل ٥ نشان داده شده است. با توجه به شکل٥ می‌توان مشاهده کرد به‌دلیل حرکت موج از محیط سخت (سنگ بستر) به محیط نرم (خاک رس) شتاب حداکثر تشدید شده و پس از وارد شدن به محیط نیمه‌سخت (مصالح RSM) دو باره کاهش یافته است که این مسئله مطابق با اصول دینامیک خاک و مبحث انتشار امواج است. خلاصهٔ نتایج مربوط به PGA رسیده به سطح زمین در شکل ٦ به‌صورت نمودار ارائه شده است. بررسی نتایج نشان می‌دهد مصالح RSM در زلزله‌های شدید حداقل ٤٣٪ و حداکثر ٦١٪ و در زلزله‌های ضعیف حداقل ١٣٪ و حداکثر٤٤٪ شتاب‌های رسیده به سطح زمین را میرا می‌کند. لذا به نظر می‌رسد این مصالح در برابر زلزله‌های شدید عمل‌کرد بهتری را از خود نشان می‌دهند. همچنین با توجه به شکل ٦ تقریباً می‌توان بیان داشت در بین عمق سنگ‌بسترهای در نظر گرفته شده، بهترین عمل‌کرد در عمق سنگ بستر برابر با ١٠ متر حاصل شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده در شتاب‌نگاشت ورودی ضعیف، تعیین عمقی از سنگ‌بستر که نشان‌دهندهٔ بهترین وضعیت میراکنندگی مصالح

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.6.6]

RSM را داشته باشد به‌سادگی میسر نیست (عمق‌های ۱۰، ۳۰ و ۳۵ متر) ولی در شتاب‌نگاشت قوی، عمقی که بیش‌ترین تأثیر را نشان داده است مربوط به سنگ‌بستر در عمق ۱۰ متر است.



شکل۵. تاریخچهٔ زمانی شتاب رسیده به سطح زمین برای عمق سنگ‌بستر برابر با۱۰متردر اثر شتاب‌نگاشت قوی(a) و ضعیف(b)



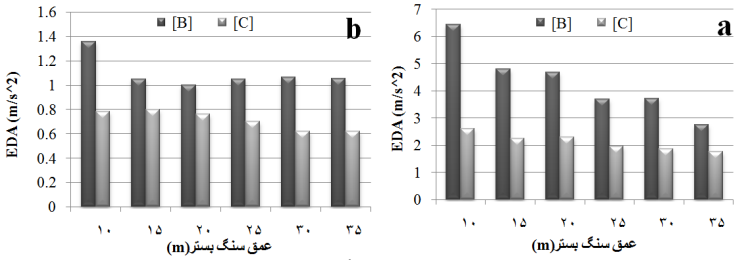
شکل٦. PGA در سطح زمین برای شتاب نگاشت قوی (a) و ضعیف (b)

۲. شتاب مؤثر طراحی (EDA)

در این مرحله از شتاب مؤثر به‌عنوان معیاری برای مقایسه نتایج استفاده شده است. با توجه به این‌که فرکانس طبیعی ارتعاش اکثر سازه‌های مهندسی کم‌تر از ۱۰ هرتز است، لذا امواجی با فرکانس بیش‌تر از این مقدار تأثیر چندانی بر سازه‌ها ندارد. از این رو می‌توان EDA را با فیلتر کردن شتاب‌نگاشت رسیده به سطح زمین مسلح و غیرمسلح برای فرکانس‌های بیش‌تر از ۱۰ هرتز به‌دست آورد. EDA رسیده به سطح زمین مسلح و غیرمسلح برای اعماق مختلف سنگ‌بستر در شکل ۷ با یک‌دیگر مقایسه شده است. با توجه به شکل ۷ می‌توان دریافت مصالح RSM توانایی زیادی در میرا نمودن امواج رسیده به سطح زمین در صورت مبنا قرار

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.6.6]

دادن EDA را دارد. نتایج نشان می‌دهد با استفاده از مصالح مورد نظر، شتاب‌نگاشت قوی حداکثر ٦٠٪ و حداقل ٣٦٪ و شتاب‌نگاشت ضعیف حداکثر ٤٢٪ و حداقل ٢٤٪ میرا می‌گردد.



شکل۷ : EDAدر سطح زمین برای شتاب نگاشت قوی (a) و ضعیف(b)

۳. شدت شتاب طیفی (ASI)

معیار دیگر تحلیل و مقایسهٔ نتایج این تحقیق، شدت شتاب طیفی است. برای بررسی دقیق انتشار امواج در خاک و تعیین پاسخ دینامیکی ساختمان‌های متداول ساخته شده در یک منطقه، فارغ از مشخصات ساختمان (سیستم باربر جانبی، ارتفاع و ...) دانستن پتانسیل ایجاد خرابی منطقه در اثر وقوع زلزله می‌تواند کمک بالقوه‌ای به مدیران بخش ساختمان کند. از آن‌جا که فرکانس طبیعی ارتعاش اکثر ساختمان‌های متداول در بازه ۲ تا ۱۰ هرتز است، لذا می‌توان مساحت زیر منحنی پاسخ شتاب در این بازه را به‌عنوان پتانسیل ایجاد خرابی و یا به تعبیر دقیق‌تر، شدت شتاب طیفی نام‌گذاری کرد که از این رابطه محاسبه می‌شود:

$$ASI = \int_{2}^{10} S_a\,(\xi = 0.05, f)df \qquad (٤)$$

که در آن S_a شتاب طیفی و f فرکانس متناظر با شتاب طیفی است.

در این تحقیق برای برآورد میزان عمل‌کرد مصالح RSM، شدت شتاب طیفی (ASI) بررسی و نتایج در شکل ۸ ارائه شد. با توجه به شکل ۸ می‌توان مشاهده کرد استفاده از این مصالح، شدت شتاب طیفی را به‌مقدار چشم‌گیری کاهش می‌دهد. نتیجهٔ به‌دست آمده نشان دهندهٔ مناسب بودن این مصالح برای استفاده در زیر پی اکثر ساختمان‌های متداول است.

با توجه به اهمیت شدت شتاب طیفی در تصمیم‌گیری مدیران بخش ساختمان، برای بررسی دقیق‌تر عمل‌کرد این جداساز لزره‌ای (RSM) در برابر تغییرات عمق سنگ‌بستر،

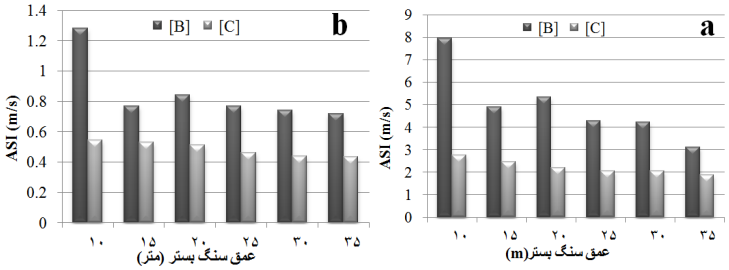
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.6.6]

مؤلفان پارامتری را با نام "نسبت کاهش شدت (RIR)[۱]" معرفی کردند که طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود را و از آن برای مقایسهٔ نتایج استفاده کردند. نتایج این بررسی در شکل ۹ ارائه شده است.

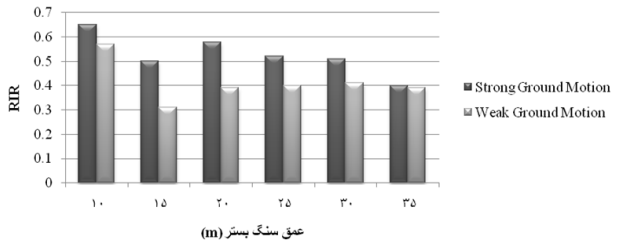
$$RIR = \frac{ASI(B) - ASI(C)}{ASI(B)} \quad (۵)$$

که در آن ASI(B) و ASI(C) به‌ترتیب شدت شتاب طیفی در سطح زمین غیرمسلح و مسلح است.

با توجه به شکل ۹ مشاهده می‌شود این مصالح در عمق سنگ‌بستر ۱۰ متر بهترین عمل‌کرد را داشته و موجب بیش‌ترین کاهش در شدت شتاب طیفی شده ولی در اعماق دیگر سنگ‌بستر عمل‌کرد آن به شدت کاهش می‌یابد.



شکل۸ ASI برای شتاب نگاشت قوی (a) و ضعیف (b)



شکل۹. نسبت کاهش شدت(RIR) برای شتاب‌نگاشت قوی و ضعیف

٤. حوزه فرکانس

در تحلیل سازه‌ها، در برابر بار دینامیکی، مسئلهٔ تشدید یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین مباحث است. تبدیل سریع فوریه (FFT)[۲] قادر است رکورد زلزله را از حوزهٔ زمان به حوزهٔ

۱. Reduction Intensity of Ratio ۲. Fast Fourier Transform

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.6.6]

فرکانس تبدیل کرده و فرکانسی که در آن تشدید رخ می‌دهد و همچنین دامنهٔ تشدید را مشخص کند. تبدیل سریع فوریه با استفاده از این روابط انجام می‌شود.

$$F(\omega) = C(\omega) - i\,S(\omega) \quad (٦)$$

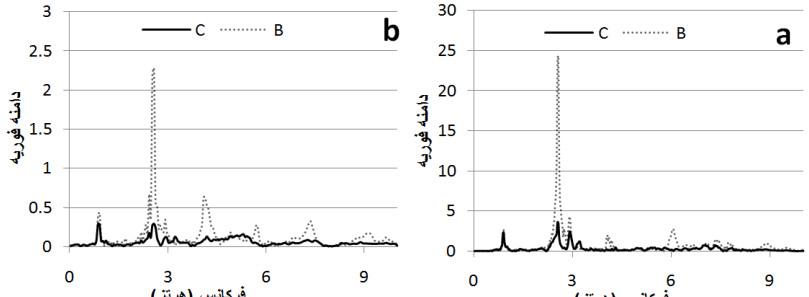
$$C(\omega) = \int_0^{T_0} a_g(t)\cos(\omega t)\,dt \quad (٧)$$

$$S(\omega) = \int_0^{T_0} a_g(t)\sin(\omega t)\,dt \quad (٨)$$

که در آن T_0 دورهٔ تناوب، ω فرکانس زاویه‌ای و $a_g(t)$ سری زمانی مربوط به شتاب زمین است. از آن‌جا که $F(\omega)$ یک تابع با مقادیر مختلط است لذا می‌توان آن را با استفاده از رابطهٔ زیر به طیف دامنهٔ فوریه (FAS)[1] بر حسب دورهٔ تناوب (یا فرکانس) تبدیل کرد.

$$FAS = \sqrt{C^2(\omega) + S^2(\omega)} \quad (٩)$$

با توجه به مطالب ذکر شده، در این تحقیق برای بررسی عمل‌کرد سیستم جداساز لرزه‌ای پیشنهادی (RSM) در حوزهٔ فرکانس از (FFT) برای بررسی پدیدهٔ تشدید استفاده شده است. برای مقایسهٔ بهتر نتایج، نمودار دامنهٔ فوریه- فرکانس برای شتاب‌نگاشت‌های قوی و ضعیف مربـوط به پایین‌ترین و بالاترین عمل‌کرد این مصالح در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. خلاصهٔ مقایسهٔ نتایج مربوط به فرکانس و دامنهٔ تشدید برای خاک مسلح و غیرمسلح برای شتاب نگاشت‌های ضعیف و قوی در جدول ۳ آمده است.

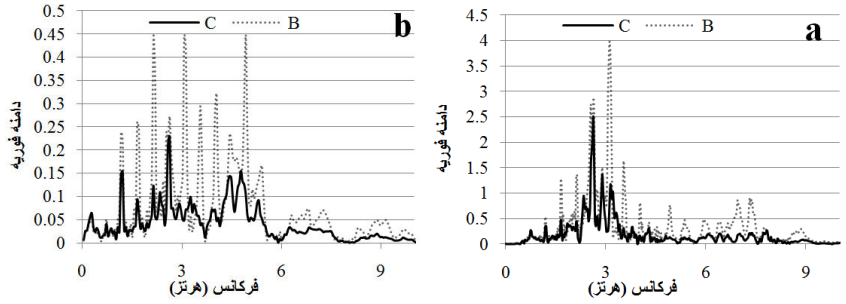


شکل ۱۰. طیف دامنهٔ فوریه برای پایین‌ترین عمل‌کرد RSM (در عمق ۳۵ متری سنگ‌بستر)در اثر شتاب‌نگاشت قوی (a) و ضعیف (b)

۱. Fourier Amplitude Spectrum

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.6.6]



شکل ۱۱. طیف دامنهٔ فوریه برای بالاترین عمل‌کرد RSM (در عمق ۱۰ متری سنگ‌بستر)دراثر شتاب‌نگاشت قوی(a) و ضعیف (b)

جدول۳. فرکانس تشدید و دامنهٔ فوریه در زمان تشدید

عمق سنگ بستر (متر)														
مشخصات زلزله		۱۰		۱۵		۲۰		۲۵		۳۰		۳۵		
		B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	
شتاب‌نگاشت قوی	فرکانس	۲/۵٦	۲/۵٦	۲/۷۸	۳/۲۲	۲/۹٤	۳/۲۲	۲/۳۲	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۳/۱۲	۲/٦۳	
	دامنه فوریه	۲٤/۳۳	۳/٦۱	۱۵/٤۲	۲/۵۹	۲۱/۱	۱/۸	۹/٦	۲/۰۲	۱۰/۱٦	۲/۱۳	۳/۹۸	۲/۵	
شتاب‌نگاشت ضعیف	فرکانس	۲/۵۹	۲/۵۹	۲/۷۳	۳/۲۲ ٤/٦٤	۲/۹۳	۲/۱۹ ۳/۲۲ ٤/۵٤	۲/۳٤ ۲/۹۷	۲/٤٤ ٤/۷٤	۲/۵٤	۲/٤ ۳/۵ ٤/۵٤	۲/۱۵ ۳/۰۸ ٤/۹۸	۲/٦٤ ٤/۷۸	
	دامنه فوریه	۲/۲۷	۰/۲۹	۱/۲٦	۰/۱۹ ۰/۲٦	۱/۱٤	۰/۲۱ ۰/۱٦ ۰/۱۷	۰/۸۸ ۰/۷	۰/۱۵ ۰/۱۹	۰/۷	۰/۱۵ ۰/۱٦ ۰/۲۲	۰/٤٤ ۰/٤۵ ۰/٤۵	۰/۲۳ ۰/۱٦	

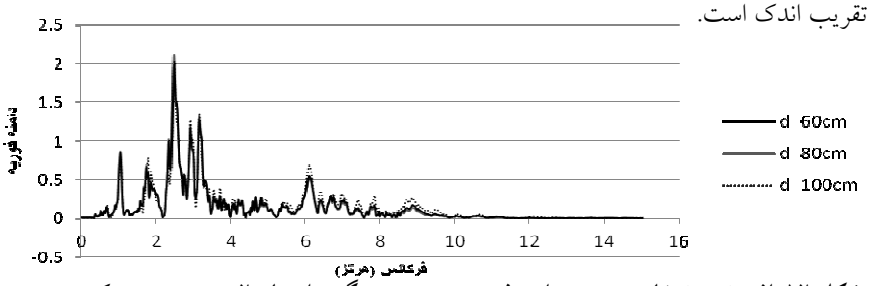
مقایسهٔ نتایج نشان می‌دهد با افزایش عمق سنگ‌بستر از بزرگای دامنهٔ فوریه در هر دو خاک مسلح و غیرمسلح کاسته شده ولی در تمام اعماق دامنهٔ فوریه مربوط به خاک مسلح به میزان چشم‌گیری از خاک غیرمسلح کم‌تر است. در نتیجه می‌توان دریافت در صورت قرارگیری مصالح RSM در زیر پی ساختمان‌ها، حتی اگر در زمان زلزله پدیدهٔ تشدید نیز رخ دهد این مصالح میزان تشدید را کاهش می‌دهد. هم‌چنین با توجه به شکل‌های ۱۰، ۱۱ و جدول ۳ مشخص می‌شود در اثر شتاب‌نگاشت قوی وجود این مصالح باعث شیفت فرکانسی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.6.6]

چشم‌گیری نشده است ولی در اثر شتاب‌نگاشت ضعیف برای اعماق سنگ‌بستر بزرگ‌تر از ۱۰ متر فرکانس با دامنهٔ حداکثر به سمت فرکانس‌های بالاتر میل کرده است. چنان‌که جدول ۳ نشان می‌دهد در صورت استفاده از مصالح RSM به‌علت افزایش سختی نسبت به خاک خالص، مقادیر فرکانس‌های حداکثر افزایش می‌یابد و از سوی دیگر مشاهده می‌گردد که با افزایش نسبت عمق قرارگیری سنگ‌بستر به ضخامت RSM (در عمق ۳۵ متر) از روند افزایش مقادیر فرکانس کاسته می‌شود و دلیل آن نیز غالب بودن ضخامت آبرفت نسبت به مصالح RSM است.

۵. ضخامت پی

برای بررسی میزان تاثیر ضخامت پی بر عمل‌کرد مصالح RSM، سه ضخامت متفاوت ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر برای پی مدنظر قرار گرفت. در ابتدا با توجه به سختی کم پی‌های معمول در برابر سختی تودهٔ خاک بررسی شده، مولفان معتقدند که ضخامت پی، بر پاسخ‌های رسیده به سطح زمین مسلح تأثیر اندکی دارد، ولی با این وجود برای صحت‌سنجی این ایده در یکی از مدل‌ها (با عمق سنگ‌بستر برابر ۲۵ متر و تحت اثر محرک ورودی قوی) سه ضخامت یاد شده پی، بررسی شد که نتایج به‌دست آمده در شکل ۱۲ ارائه گردیده است. با مقایسهٔ نتایج ارائه شده در شکل ۱۲ می‌توان دریافت که تغییرات ضخامت پی در محدوده‌های معمول اجرایی، تأثیر ناچیزی بر عمل‌کرد مصالح RSM دارد که این نشان‌دهندهٔ درستی ایده اولیه و قابل تعمیم بودن نتایج ارائه شده با ضخامت ۱۰۰ سانتی‌متر به سایر ضخامت‌های معمول و با تقریب اندک است.



شکل ۱۲: اثر تغییر ضخامت پی بر دامنه فوریه در عمق سنگ برابر با ۲۵ متر تحت محرک ورودی قوی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.6.6]

نتیجه‌گیری

۱. استفاده از مصالح RSM باعث کاهش شتاب حداکثر رسیده به سطح زمین می‌شود.
۲. مصالح RSM در زلزله‌های شدید عمل‌کرد بهتری نسبت به زلزله‌های ضعیف دارد.
۳. با افزایش عمق سنگ‌بستر تأثیر مصالح RSM در کاهش لرزش‌های رسیده به سطح زمین کم‌تر می‌شود.
٤. مصالح RSM شتاب مؤثر طراحی را به‌شدت کاهش داده که این کاهش برای زلزله قوی در بازهٔ ۳٦٪ تا ٦۰٪ و برای زلزله ضعیف در بازهٔ ۲٤٪ تا ٤۲٪ است.
۵. استفاده از مصالح RSM باعث کاهش شدت شتاب طیفی شده و در واقع پتانسیل ایجاد خرابی در ساخت‌گاه مورد نظر را کاهش می‌دهد.
٦. با قرارگیری سنگ‌بستر در عمق ۱۰ متری بیش‌ترین کاهش در شدت شتاب طیفی مشاهده شد ولی در دیگر اعماق از این روند کاهش در شدت شتاب طیفی کاسته می‌شود.
۷. با افزایش عمق سنگ‌بستر از بزرگای دامنهٔ فوریه برای هر دو خاک مسلح و غیرمسلح کاسته شده ولی این کاهش برای خاک مسلح بیش‌تر از خاک غیرمسلح است.

منابع

1. Blumenthal, M., "Scrap Tire Market Development: the Impact of State Programs", Resource Recycling XVII (3) (1998) 15-19.
2. O'Shaughnessy, V., Garga, V. K., "Tire-Reinforced Earth Fill", Part3: Environmental Assessment, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 37, (2000) 117-131.
3. Humphrey, D. N., Katz, L. E., "Water Quality Effects if Using Tire Shreds Below the Ground Water Table", Final Report, Department of

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.6.6]

Civil and Environmental Engineering, University of Main, Orono, ME, (2002).

4. Moon, C. M., "Environmental Effect of Waste Tires as Earth Reinforcing Material", Master Thesis, Inha University (in Korean) (2003).
5. Cetin, H., Fener, M., Gunaydin, O. "Geotechnical Properties of Tire-Cohesive Clayey Soil Mixtures, Engineering Geology", Vol. 88, No. 2, September (2006) 110-120.
6. Feng, Z. Y., Sutter, K. G., "Dynamic Properties of Granulated Rubber/ Sand Mixtures", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 23, No. 3, September (2000) 338-344.
7. Yoon, S., Prezzi, M., Siddiki, N. Z., Kim, B., "Construction of a Test Embankment using a Sand-Tire Shred Mixture as Fill Material", Waste Management, Vol. 26, No. 9, October (2006) 1033-1044.
8. Tsang, H. H., "Seismic Isolation by Rubber–Soil Mixtures for Developing Countries, Earthqueke Engineering And Structural Dynamincs", Vol. 37 (2008) 283-303.
9. Edinçliler, A., Baykal, G., Dengili, K., "Determination of Static and Dynamic Behavior of Recycled Materials for Highways", Resources, Conservation and Recycling, Vol. 42 (2004) 223-237.
10. Mavroulidom, M., Etan, O., Suntharaligam, M., "Mechanical Properties of Granulated Tyre Rubber Sand Mixture", Proceeding of the 11th Internatio-nal Conference on Enviromental Science and Technology, China (2009).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.6.6]

11. Tanchaisawat, T., Bergado, D. T., Voottipruex, P., Shehzad, K., "Interaction Between Geogrid Reinforcement and Tire Chip–Sand Light-weight Backfill", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 28 (2010) 119-127.

12. Yoon, Y. W., Heo, S. B, Kim, K. S., "Geotechnical Performance of Waste Tires for Soil Reinforcement from Chamber Tests", Geotextiles and Geomembranes, Vol. 26 (2008) 100-107.

13. Pasquini, E., Canestrari, F., Cardone, F., Santagata, F. A., "Performance Evaluation of Gap Graded Asphalt Rubber Mixtures", Construction and Building Materials, Vol. 25 (2011) 2014-2022.

14. Nakhaei, A., Marandi, S. M., Sani Kermani, S., "Effect of Granulated Rubber-Soil Mixture on Reducing Retaining Walls Displacement Under Earthquake Forces", Applied Mechanics and Materials, Vols. 94-96 (2011) 3-17.

15. Youwai, S., Bergado, D. T., "Numerical Analysis of Reinforced Wall using Rubber Tire Chips–Sand Mixtures as Backfill Material", Computers and Geotechnics, Vol. 31 (2004) 103-114.

16. Christ, M., Park, G. B., "Laboratory Determination of Strength Properties of Frozen Rubber-Sand Mixtures", Cold Regions Science and Technology, Vol. 60, NO. 13 August (2009) 169-175.

17. Akbulut, S., Arasan, S., Kalkan, E., "Modification of Clayey Soils using Scrap Tire Rubber and Synthetic Fibers", Applied Clay Science, Vol. 38, No.1 February (2007) 23-32.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.6.6]

18. Ghazavi, M., Amel Sakhi, M., "Optimization of Aspect Ratio of Waste Tire Shreds in Sand-Shred Mixtures Using CBR Tests", Geotechnical Testing Journal, Vol. 28, No. 6 (2005) 1-6.

19. Ghazavi, M., Amel Sakhi, M., "Influence of Optimized Tire Shreds on Shear Strength Parameters of Sand", International Journal of Geomechanics, ASCE, Vol. 5, No. 1, March (2005) 58-65.

۲۰. زائری، ف. و عامل سخی، م.، "*استفاده از مخلوط خاک-لاستیک فرسوده به‌عنوان میراگر در زیر پی ساختمان‌های واقع بر خاک رس*"، اولین کنفرانس ملی مدیریت بحران: زلزله و آسیب‌پذیری اماکن و شریان‌های حیاتی، تهران، ایران (۱۳۹۰) ۱۵۶.

21. Joseph E. Bowles, "Foundation Analysis and Design", Fifth[ed], McGraw-Hill (1996).

22. Lysmer J., Udaka T., Tsai CF., Seed H. B., "FLUSH, A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems", Report No, EERC (1975) 75-30.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.2.6.6]