

## تأثیر جداساز لرزه‌ای مخلوط لاستیک و خاک بر تقاضای لرزه‌ای

### قاب خمشی فولادی در حوزه نزدیک گسل

سامان یغمایی سابق<sup>۱</sup>، مونا رحمانی<sup>۲</sup>  
(دریافت ۹۰/۵/۲۶، پذیرش ۹۱/۸/۱۲)

#### چکیده

استفاده از جداسازی لرزه‌ای عموماً در کشورهای در حال توسعه و مربوط به سازه‌های با اهمیت و خاص بوده است، اما امروزه کاربرد این فناوری در خانه‌های مسکونی، مدارس و بیمارستان‌ها که هزینه جبران خسارت زلزله در آنها می‌تواند بسیار قابل توجه باشد ضروری بنظر می‌رسد. این مسئله در مورد کشورهای در حال توسعه‌ای مانند ایران که جزء مناطق با لرزه خیزی بالا محسوب می‌شوند اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در این راستا، سیستم جداسازی لرزه‌ای با مخلوط لاستیک و خاک (RSM) بعنوان یک روش نوین در سال ۲۰۰۸ برای این کشورها پیشنهاد شده است که دارای مزایای ویژه‌ای از جمله ارزان قیمت بودن است. در این مقاله، کارایی این سیستم جداسازی لرزه‌ای در برابر زلزله‌های نزدیک گسل با یا بدون خاصیت جهت‌داری رو به جلو مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر اساس نتایج بدست آمده، عملکرد RSM علاوه بر خصوصیات لایه RSM و ویژگی‌های روسازه، به مشخصات زلزله‌های نزدیک گسل نیز بستگی دارد. لذا در طراحی این سیستم‌ها، ضروری است تأثیر ویژگی‌های این گونه زلزله‌ها در کاهش تقاضای لرزه‌ای به دقت مورد ارزیابی قرار گیرد.

#### کلمات کلیدی

جداسازی لرزه‌ای، مخلوط لاستیک و خاک، زلزله‌های نزدیک گسل، جهت‌داری رو به جلو، قاب خمشی فولادی، تقاضای لرزه‌ای

## Effect of Seismic Isolation by Rubber-Soil Mixture on Seismic Demand of Steel Moment Frame in Near-Fault Area

Saman Yaghmaei-Sabegh, Mona Rahmani

#### ABSTRACT

The application of seismic isolation system in developing countries was generally associated with important and special structures, but nowadays it seems necessary the relevance of this technology in residential homes, schools and hospitals where the replacement cost due to earthquake damage can be very significant. It is more imperative in developing countries such as Iran, which are located in areas prone to earthquakes. In this regard, seismic isolation system by rubber-soil mixture has been proposed in 2008 year for developing countries as a new method with distinctive advantages such as low cost. In this paper, the efficiency of this new seismic isolation system has been evaluated in near-fault area with or without forward directivity effect. Based on the results of this paper, performance of RSM depends on near-fault earthquake characteristics in addition to properties of RSM layer and super structure. Consequently, in design process of these systems, significant effect of characteristics of near-fault ground motions on seismic demand reduction should be assessed carefully.

#### Key Word

Seismic Isolation, Rubber-Soil Mixture, Near Fault Earthquakes, Forward Directivity, Steel Moment Frame, Seismic Demand

۱. استادیار، گروه سازه، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز، s\_yaghmaei@tabrizu.ac.ir (نویسنده مسئول)

۲. کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه تبریز، rahmani.mona@gmail.com

۱۱ بخش مختلف تشکیل شده است. پس از اراده مقدمه در بخش اول، پیشینه استفاده از جداسازهای لرزه‌ای (بخش دوم) ارائه و سیستم جدید جداساز لرزه‌ای مرکب از لاستیک و خاک معرفی شده است (بخش سوم). خواص مهندسی مخلوط خاک و لاستیک RSM در بخش چهارم ارائه و عملکرد RSM تحت اثر زلزله‌های نزدیک گسل در بخش پنجم بررسی شده است. ویژگی‌های زلزله‌ای نزدیک گسل و معرفی مدل‌های مورد استفاده به ترتیب در بخش‌های ششم و هفتم مورد توجه قرار گرفته است. بخش‌های هشتم و نهم شامل مدلسازی خاک و سازه بوده و بخش‌های دهم و یازدهم به ارائه نتایج و بحث پیرامون آنها اختصاص داده شده است.

## ۲- پیشینه جداسازی لرزه‌ای

مفهوم جداسازی لرزه‌ای به عنوان یک ابزار محافظتی در برابر زلزله به بیش از ۱۰۰ سال قبل باز می‌گردد [۴]. با اینکه اصول و مبانی مقدماتی جداسازی لرزه‌ای حداقل برای یک قرن معلوم و مشخص بود، تعداد سازه‌هایی که در گذشته بر این اساس ساخته شده اند زیاد نیست. تنها در چند دهه اخیر است که سیستم‌های کاربردی در جهت نائل شدن به جداسازی لرزه‌ای در سازه‌ها در دسترس قرار گرفته و این مفهوم بطور گسترده پذیرفته شده است [۳]. البته بخش اعظم کاربرد این روش مربوط به کشورهای توسعه یافته بوده و استفاده از آن در سایر کشورها بعلاوه نیاز به تکنولوژی بالا و نیروی متخصص و کار ماهر محدود و انگشت شمار می‌باشد. اولین ساختمانی که از یک سیستم جداسازی لاستیکی در آن استفاده شده است ساختمان یک مدرسه سه طبقه می باشد که در سال ۱۹۶۹ در اسکاپچ یوگوسلاوی ساخته شده است. این ساختمان بر بلوک‌هایی از لاستیک متکی می‌باشد که برخلاف شکل امروزی آن، دارای صفحات مسلح کننده فلزی افقی داخلی نیستند [۳]. با پیشرفت و توسعه تکیه‌گاه‌های الاستومری چندلایه، مفهوم جداسازی لرزه‌ای در ۲۰ سال اخیر تبدیل به یک واقعیت عملی شده است. مفهوم جداسازی اکنون به

نخستین و اصلی‌ترین رویکرد به منظور طراحی سازه مقاوم در برابر زلزله، «ساختن یک سازه مقاوم و شکل پذیر و اتصال دادن آن بصورت ایمن به زمین است [۱]. در زلزله‌های شدید نه تنها هزینه ساخت ساختمان با استفاده از سیستم مقاوم لرزه‌ای سستی افزایش می‌یابد بلکه ممکن است طراحی سازه نیز مشکل شود، علاوه بر آن سیستم مذکور در برخی شرایط خیلی ایمن نیست. لذا اکنون وظیفه مبرم در مهندسی زلزله یافتن سیستم‌های سازه‌ای مقاوم لرزه‌ای جدیدی است که ایمن و ارزان بوده و قابل استفاده به طور گسترده باشند. بنظر می‌رسد کنترل لرزه‌ای سازه‌ها پاسخی به این نیاز باشد. در میان مجموعه روشهای کنترل لرزه‌ای، جداسازی لرزه‌ای یکی از رشد یافته‌ترین تکنیک‌ها می‌باشد. این تکنیک کاراتر، اقتصادی‌تر، ساده‌تر و کاربردی‌تر بوده و بر اساس این ویژگی‌ها کاربرد گسترده تری در سراسر جهان دارد [۲]. امروزه این روش یک استراتژی اصلی و عمده در طراحی ساختمانهای مقاوم در برابر زلزله می‌باشد. ایده اصلی این رویکرد بسیار ساده و بدیهی است: «جدا کردن ساختمان از زمین بطوریکه حرکات زمین به هنگام زلزله به ساختمان انتقال پیدا نکند یا دست کم بسیار کمتر انتقال پیدا کند» [۱]. یک سیستم جداسازی لرزه‌ای بصورت یک رابط انعطاف پذیر یا لغزنده تعریف می‌شود که بین یک سازه و شالوده آن قرار می‌گیرد، با این هدف که حرکات زمین را از حرکات سازه جدا نماید، تا در نتیجه آن خسارت وارد شده به سازه و اجزای آن از طرف زلزله کاهش یابد [۳]. در ساختمانهای جداسازی شده از انتقال اغلب حرکات زمین به ساختمان جلوگیری می‌شود، بنابراین کاهش قابل توجهی در شتاب طبقه و تغییر مکانهای نسبی بین طبقات رخ داده و در نتیجه نیروهای طراحی سازه کاهش یافته و اجزای ساختمان و محتویات آن در برابر زمین لرزه محافظت می‌شوند [۱].

این مقاله که قصد دارد به ارزیابی عملکرد لرزه‌ای یک سیستم نوین لرزه‌ای در حوزه نزدیک گسل بپردازد از



فعالیت سازمان توسعه صنعتی ملل متحد (UNIDO) در زمینه توسعه سیستم‌های جداساز لرزه‌ای کم هزینه با استفاده از تحمل کننده‌هایی که اساس لاستیک طبیعی دارند، بسیار مؤثر بوده است [۷]. از جمله این کشورها، می‌توان کشورهای مصر، هند و اندونزی را برشمرد. برای اینکه یک سیستم ابداعی در چنین کشورهایی در سطح وسیع پذیرفته شود، باید از نظر هزینه مناسب و از لحاظ فنی کارآمد باشد. پروژه‌های جداسازی لرزه‌ای دیگری نیز در چین و اندونزی [۶] و شیلی توسط UNIDO پشتیبانی شده است. یک روش جدید جداسازی لرزه‌ای که برای کشورهای در حال توسعه با توجه به امکانات و منابع تکنولوژی موجود در آنها مناسب می‌باشد، روش جداسازی لرزه‌ای با استفاده از مخلوط لاستیک و خاک می‌باشد. این روش در سال ۲۰۰۸ توسط تیسانگ [۷] ابداع گردیده است و دارای مزایایی همچون کم هزینه بودن و سهولت در اجرا می‌باشد و نیاز به فن‌آوری پیشرفته‌ای ندارد.

### ۳-۱- روش نوین جداسازی لرزه‌ای با استفاده از

#### مخلوط خاک و لاستیک

از آنجاییکه خصوصیات خاک می‌تواند ماهیت ارتعاشات سطح زمین را بسیار تحت تاثیر قرار دهد، شرایط ساختگاه بر کلیه مشخصات مهم حرکت نیرومند زمین، شامل دامنه، محتوای فرکانسی و مدت اثر قابل ملاحظه‌ای می‌گذارد. مبنای عملکرد سیستم جداساز لرزه‌ای مخلوط لاستیک و خاک (RSM) نیز تغییر شرایط ساختگاه موجود می‌باشد بگونه‌ای که باعث کاهش سطح لرزش زمین گردد. در این روش یک لایه از خاک زیر شالوده سازه یعنی ساختگاه توسط مخلوطی از خاک و نسبت مشخصی از لاستیک در یک ضخامت معین جایگزین می‌شود. اثر ساختگاه متشکل از مخلوط لاستیک و خاک (RSM) به هندسه یعنی ضخامت لایه و خصوصیات مصالح آن بستگی دارد. جداساز لرزه‌ای پیشنهاد شده توسط تیسانگ بصورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است.

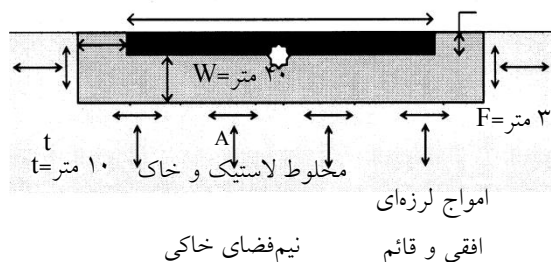
میزان زیادی در نواحی لرزه‌خیز جهان برای محافظت سازه‌های با اهمیت در برابر حرکات قوی زمین پذیرفته شده و به کار گرفته می‌شود [۵]، در حال حاضر نمونه‌های زیادی در ایالات متحده آمریکا و ژاپن وجود دارد. تعداد کمتری از ساختمان‌های جداسازی شده نیز در اروپا، چین [۲] و نیوزیلند [۶] ساخته شده‌اند که اغلب شامل ساختمان‌های بزرگ و با اهمیت هستند. می‌توان گفت فناوری جداسازی لرزه‌ای اکنون به مرحله تکامل رسیده است. این فناوری در عمل نیز آزمون‌هایی چون زلزله ۱۹۹۴ لس آنجلس و زلزله بزرگ هانشین در سال ۱۹۹۵ را با موفقیت پشت سر نهاده و عملکرد آن در این آزمون‌ها تأیید شده است، از این رو استفاده از آن به عنوان یک گزینه در طراحی سازه‌ها یا ساختمان‌ها در مناطق لرزه‌خیز، بویژه در ساختمان‌هایی که خود ساختمان یا محتویات و اجزای آن ارزش زیادی دارد، توصیه می‌شود [۶].

### ۳-۲- جداسازی لرزه‌ای در کشورهای در حال توسعه

تاکنون در کشورهای در حال توسعه کاربرد جداسازی بعنوان سیستم مقاوم لرزه‌ای عمدتاً مربوط به سازه‌های با اهمیت و خاص بوده است اما امروزه کاربرد این فناوری در خانه‌های مسکونی، مدارس و بیمارستان‌های عادی که هزینه جبران خسارت زلزله در آنها می‌تواند بسیار قابل توجه باشد ضروری بنظر می‌رسد، بویژه در کشورهای در حال توسعه‌ای مانند ایران که در مناطق لرزه‌خیز واقع شده‌اند. مسائل اقتصادی از جمله مسائل تأثیرگذار در زمینه انتخاب و طراحی جداسازی لرزه‌ای است و باید مورد توجه ویژه قرار گیرد. اینکه چگونه هزینه جداسازی لرزه‌ای یک ساختمان را در عین حفظ سطح ایمنی بالا در آن کاهش دهیم، مسئله بسیار مهمی می‌باشد چرا که این مسئله بطور مستقیم بر روی گسترش کاربرد جداسازی لرزه‌ای ساختمان‌ها تأثیر می‌گذارد، بویژه در مناطقی که لرزه‌خیزی بالایی دارند و وضعیت اقتصادی آنها اجازه صرف هزینه‌های بالا را در ساخت ساختمان‌ها به آنها نمی‌دهد [۲].

1. United Nations Industrial Development Organization  
2. Rubber-Soil Mixture

بدین ترتیب همانطور که در شکل (۲) مشاهده می شود، لایه یکنواختی از RSM بالای یک نیم فضای خاکی قرار می گیرد که در معرض انتشار امواج لرزه ای می باشد.



شکل (۲): مدل مرجع در مدلسازی المان محدود [۷]

در شبیه سازی های رایانه ای جهت ساده سازی، وزن کل سازه ساختمان در شالوده آن متمرکز شده است. بمنظور بررسی اثرات RSM موقعیت انتخاب شده برای ثبت تاریخچه های زمانی شتاب بعد از عبور از RSM یا ماسه خالص نقطه میانی زیر شالوده یا سرپوش شمع می باشد، که با حرف A در شکل (۲) نمایش داده شده است. این نقطه می تواند به عنوان نقطه اعمال حرکت زلزله به منظور آنالیز سازه ای در نظر گرفته شود [۷].

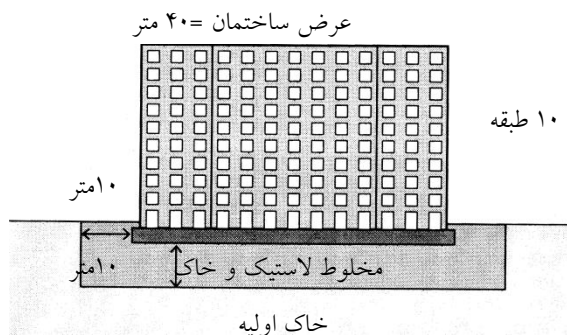
بعلاوه، یک مطالعه پارامتری برای تعدادی از متغیرهای مهم توسط تیسانگ انجام شده است که شامل ارتفاع ساختمان (تعداد طبقات)، عرض و تعداد طبقات زیرزمین (عمق سازه در زیر زمین، که با علامت F در شکل (۲) نشان داده شده است)، ضخامت RSM، خطاهای بالقوه در خصوصیات دینامیکی RSM، سطح لرزش و محتوای فرکانسی حرکات زمین اعمال شده می باشد.

حرکات زمین نزدیک گسل که دارای سطح لرزش بالا هستند کانون مطالعه تیسانگ قرار داشته و مدل مورد نظر تحت سه تحریک زلزله که در جدول (۱) نشان داده شده، توسط تیسانگ تحلیل گردیده است.

شکل های (۳- الف) و (ب) به ترتیب طیف دامنه فوریه شتاب های افقی و قائم زمین را برای RSM و ماسه خالص در مدل مرجع نشان می دهند. شکل (۳- پ) و (ت) نیز تاریخچه زمانی شتاب زمین نرمال شده در جهت افقی و قائم هر دو سناریو را نشان می دهد. هر تاریخچه زمانی

مخلوط لاستیک و خاک بعلت اینکه دارای خواص مهندسی ویژه ای می باشد؛ علاوه بر کاهش سطح لرزش در راستای افقی مانند سایر جداسازهای لرزه ای، باعث کاهش قابل توجه سطح لرزش در راستای قائم نیز می شود، که اخیراً در مهندسی زلزله توجه فزاینده ای به آن می شود. از این روش حتی می توان برای محافظت تونلها و دیگر سازه های مدفون در زیر زمین استفاده کرد [۸].

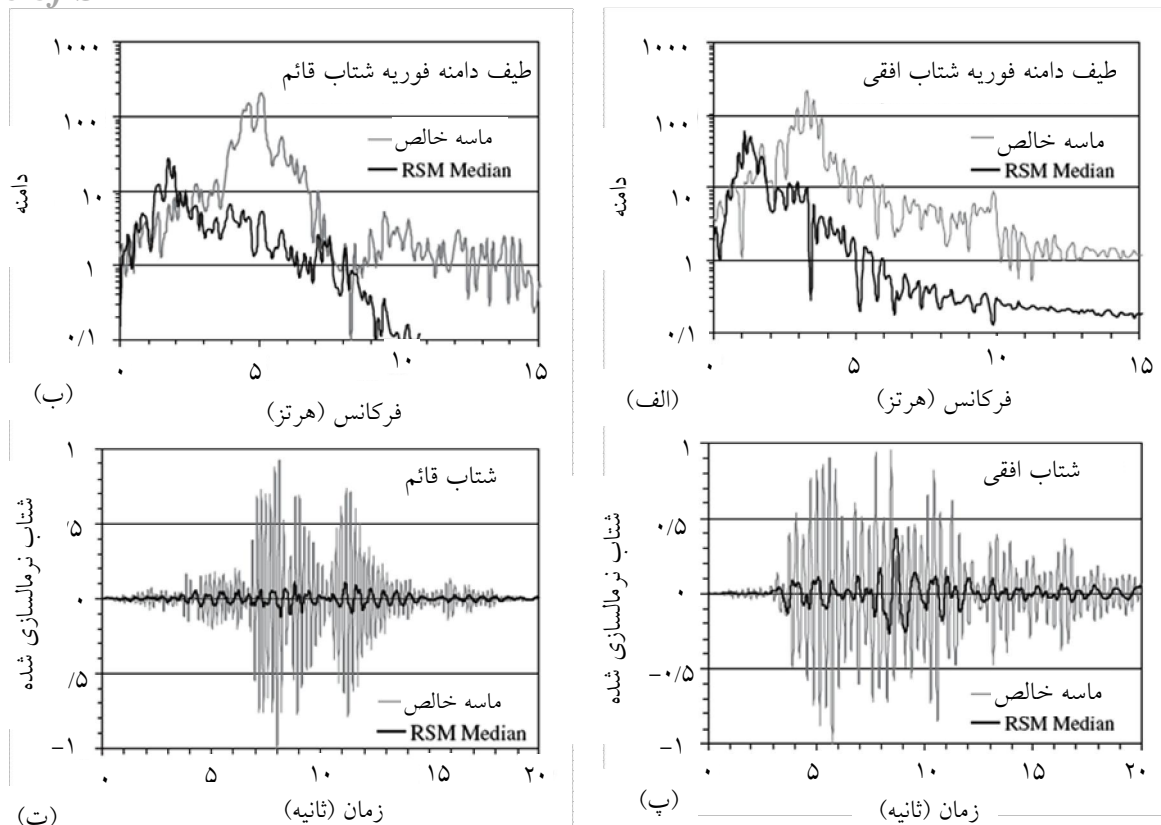
بعلاوه RSM می تواند بعنوان یک سیستم جداساز لرزه ای گسترده، که کل سطح تماس پی سازه با زمین را در بر می گیرد، تعمیم داده شود. این ویژگی، این روش را از سایر سیستم های مرسوم (سیستم های لغزنده یا تحمل کننده های لاستیکی لایه ای) که بر مبنای جداسازی نقاط گسسته تکیه گاهی طراحی می شوند، بعنوان یک شیوه کاملاً جدید ژئوتکنیکی متمایز می سازد [۹].



شکل (۱): جداسازی لرزه ای با مخلوط لاستیک و خاک [۷]

تیسانگ کارایی روش جداسازی لرزه ای RSM را توسط مجموعه ای از شبیه سازی های عددی به اثبات رسانده است.

پیکربندی مدل مرجع در نظر گرفته شده توسط او شامل یک ساختمان فرضی دارای ابعاد تپ یک بیمارستان یا یک ساختمان اداری (۱۰ طبقه به عرض ۴۰ متر) و شامل شالوده (برای ساختمان های کم ارتفاع) یا سرپوش شمع (برای ساختمان های با ارتفاع زیاد) می باشد. در این مدل یک لایه خاک در زیر شالوده ساختمان به ضخامت حدود ۱۰ متر توسط مخلوط خاک با نسبت ۷۵ درصد از لاستیک جایگزین شده است (شکل (۱)) [۷].



شکل (۳): طیف دامنه فوریه شتاب‌های افقی و قائم زمین و تاریخچه زمانی نرمالیزه شده شتاب زمین در جهت افقی و قائم [۷]

برای حرکت قائم ۱۰ تا ۲۰ درصد می باشد. مقدار کاهش مخصوصاً در مورد نسبت شتاب افقی، به ضخامت RSM بسیار حساس است. این نسبت بر پایه تغییر ضخامت از ۵ تا ۲۰ متر، از حدود ۲۰ تا ۶۰ درصد تغییر می کند. بعبارت دیگر نتایج مطالعات پارامتری تیسانگ بطور چشمگیری نشان از کارایی بهتر (نسبت شتاب کوچکتر) در کاهش شتاب افقی در سازه‌های سنگین تر دارد، که توسط یک ساختمان با ارتفاع و عرض بزرگتر ارائه می شود. در حالیکه نسبت شتاب قائم تنها به میزان کمی تأثیر می پذیرد. در مقابل، با افزایش عمق سازه زیر زمین تأثیر RSM ضعیف‌تر می شود [۷].

#### ۴- استفاده از لاستیک و خواص مهندسی مخلوط خاک و لاستیک RSM

اتلاف انرژی، اصلی ترین مکانیسمی است که کاهش سطح لرزش را در روش جداسازی RSM توضیح می دهد. لاستیک قدرت جذب انرژی بسیار خوبی دارد که

بوسیله شتاب زمین ماکزیمم مطلق سناریو با ماسه خالص نرمالسازی می شود، تا اینکه ضریب کاهش براحتی مشاهده شده و مستقیماً مقایسه شود [۷].

#### جدول (۱): جزئیات زلزله‌های بکار رفته توسط تیسانگ

مشخصات زلزله	نورتریج، کالیفرنیا	والپارازو، شیلی	دوزچی، ترکیه
تاریخ وقوع	۱۹۹۴/۰۱/۱۷	۱۹۸۵/۰۳/۰۳	۱۹۹۹/۱۱/۱۲
بزرگای زلزله	۶/۷ (Mw)	۷/۸ (Ms)	۷/۱ (Mw)
ماکزیمم شتاب افقی (g)	۱/۷۸	۰/۴۵	۱/۰۳
ماکزیمم شتاب قائم (g)	۱/۰۵	۰/۸۷	۰/۳۳

نتایج تیسانگ نشان می دهد که RSM می تواند شتاب‌های زمین را در هر دو جهت افقی و قائم بطور مؤثری کاهش دهد. بر اساس نتایج این محقق، نسبت شتاب برای حرکت افقی بطور متوسط ۳۰ تا ۴۰ درصد و

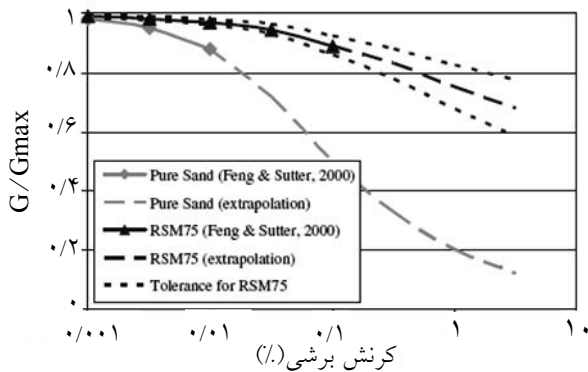
در مخلوط‌های آسفالتی برای روسازی راهها، روش RSM یک راهکار نوید دهنده را در جهت کاهش توده عظیم ضایعات تایر فراهم می‌نماید بویژه اینکه هر پروژه می‌تواند حجم وسیعی از تایر را مصرف کند [۷]. رفتار مکانیکی خاکها، که تحت بارهای استاتیکی می‌تواند کاملاً پیچیده باشد، طبعاً در شرایط بارهای لرزه‌ای بسیار پیچیده‌تر خواهد بود. خاک‌ها تحت شرایط بارگذاری سیکلی رفتار تنش- کرنش غیرخطی و غیر الاستیک نشان می‌دهند [۱۳]. بطور کلی با توجه به نتایج آزمایشات می‌توان گفت مخلوط‌های لاستیک و خاک می‌توانند با استفاده از اصول مکانیک خاک متداول با کمی اصلاح مدل شوند. مدول برشی آنها توسط درصد لاستیک بمیزان زیادی متأثر می‌شود. با افزایش مقدار لاستیک مدول برشی آنها کاهش و ضریب میرایی آنها افزایش می‌یابد [۱۴].

خواص مهندسی بنیادی RSM، مانند مشخصات تراکم، تراکم پذیری، نفوذ پذیری، مقاومت برشی، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون در موارد متعددی بررسی شده است [۱۰ و ۱۱ و ۱۵]. بر اساس مقادیر ارائه شده توسط ماساد [۱۱] چگالی RSM با ۷۵ درصد لاستیک در واحد حجم برابر با ۹/۵ نیوتن بر مترمکعب و چگالی ماسه برابر با ۱۷/۴ نیوتن بر مترمکعب در نظر گرفته شده است. این مقادیر توسط ادیل و بوسچر [۱۰] نیز تأیید شده است. مقدار ضریب پواسون نیز برابر ۰/۳ فرض شده است [۱۰]. خصوصیات دینامیکی خاک‌ها بطور قابل توجهی به کرنش برشی خاک بستگی دارد. تیسانگ از نرم افزار QUAD4M [۱۶] برای تحلیل‌های خود استفاده کرده است. این نرم‌افزار روش خطی معادل را برای تحلیل پاسخ زمین به کار می‌برد که در آن خصوصیات غیر خطی خاک‌ها می‌تواند توسط دو پارامتر مربوط به مصالح که وابسته به کرنش می‌باشد یعنی مدول برشی مماسی G و نسبت میرایی  $\xi$  بیان شود. خصوصیات دینامیکی RSM بکار برده شده در این مطالعه از نتایج مطالعات فنگ و ساتر [۱۴] برداشت شده است. مدول برشی ماکزیمم خاک (Gmax) که در شرایط کرنش برشی خیلی کم محاسبه می‌شود؛ برابر با ۲۲۲ مگاپاسکال و

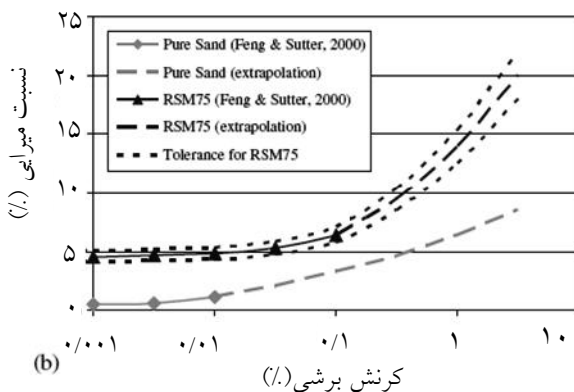
کاربردهای وسیع آن را برای کنترل میزان سطح لرزش و میرا کردن حرکات توجیه می‌کند بنابراین استفاده از لاستیک بخش کلیدی در این روش بشمار می‌رود [۷]. اولین کاربرد لاستیک برای محافظت سازه ساختمان در برابر زلزله به سال ۱۹۶۹ در مقدونیه برمیکرد. این سازه بتنی سه طبقه روی بلوک‌های بزرگی از لاستیک طبیعی غیر مسلح ساخته شده بود، اما در هنگام زلزله به بالا می‌جهید و به جلو و عقب حرکت می‌کرد. این مشکل در روش RSM وجود ندارد چرا که در این روش تکه‌های لاستیک با استفاده از مصالح خاکی مسلح می‌شوند. این شیوه مسلح کردن لاستیک عملاً شبیه به تحمل کننده‌های لاستیکی لایه‌ای متداول می‌باشد. از این رو استفاده از لاستیک خالص در RSM توصیه نمی‌شود. در حقیقت، تکه‌های لاستیک و ذرات خاک مکمل عملکرد یکدیگر هستند [۷]. ثابت شده است که خاک مسلح شده با لاستیک افزایش قابل توجهی در مقاومت برشی در مقایسه با خاک‌های معمولی دارد [۱۰ و ۱۱] و از آن مهم‌تر افزایش چشم‌گیری در توانایی اتلاف انرژی در آن دیده می‌شود. از جمله مسائلی مهمی که ارتباط مستقیم با گسترش میزان استفاده از سیستم‌های جداسازی لرزه‌ای در سراسر جهان دارد، تأمین و فراهم کردن مواد و مصالحی با کیفیت بالا و هزینه کم است که در ساخت و تولید این سیستم‌ها به کار گرفته می‌شوند. از اینرو ضایعات تایر و لاستیک بازیافت شده که گفته می‌شود در آینده نزدیک نقش مهمی در جداسازی تکیه‌گاهی بازی می‌کند، بطور بالقوه منبع مناسبی برای مصالح استفاده شده در RSM می‌باشد. بعلاوه دفع و انهدام توده عظیم ضایعات تایر به یک مشکل زیست محیطی تبدیل شده است [۷]. گفته می‌شود سالانه ۸۰۰ میلیون تایر مستعمل در سراسر جهان تولید می‌شود [۱۲] که نشان دهنده سرعت بالای رشد ضایعات تایر می‌باشد، بنابراین یافتن راه‌های سودمند و جدید برای بازیافت و استفاده مجدد از توده‌های عظیم ضایعات یک موضوع مهم به شمار می‌رود. از این رو، در میان روش‌های بازیافت تایر مانند استفاده از آن به عنوان سوخت در واحدهای نیروگاهی یا



شالوده می باشد، بایستی به خصوصیات لرزه شناسی زلزله های نزدیک گسل که برای تحلیل مدل های ارزیابی انتخاب می شوند توجه ویژه ای داشت.



شکل (۴): منحنی کاهش مدول برشی [۷]



شکل (۵): منحنی نسبت میرایی [۷]

رکوردهای انتخاب شده توسط تیسانگ با اینکه رکوردهای مربوط به زلزله های نزدیک گسل می باشند اما دارای خاصیت جهت داری روبه جلو نیستند، از این رو ارزیابی کارایی RSM در زمینه عملکرد آن تحت زلزله های نزدیک گسل با خاصیت جهت داری رو به جلو ضروری بنظر می رسد. با توجه به آنچه که در توضیح روش RSM گذشت، تیسانگ کارایی روش پیشنهادی خود را با استفاده از مدل های تحلیلی تنها تحت سه زلزله نزدیک گسل (جدول (۱)) مورد ارزیابی قرار داده است. هدف او از گزینش سه رکورد مذکور انتخاب زلزله های قوی با سطح لرزش بالا بوده است که دارای شتاب ماکزیمم بزرگ در جهت افقی و یا قائم باشند، بدون اینکه ویژگی های لرزه شناسی رکوردهای نزدیک گسل را مدنظر داشته باشد.

۷/۵ مگاپاسکال بترتیب برای ماسه و RSM اختیار شده اند. نسبت  $(G/G_{max})$  برای تعیین مقدار کاهش مدول برشی بر حسب کرنش در شکل (۴) با استفاده از خطوط پرننگ نشان داده شده است. توجه به این نکته لازم است که مقادیر بدست آمده از مقاله فنگ و ساتر [۱۴] در تمام محدوده های کرنشی که در این مطالعه مورد نیاز می باشد کامل نیست لذا برای محدوده های کرنش برشی بزرگتر بر اساس مقاله وستیک و دوبری [۱۷] برون یابی انجام شده است، که توسط خط تیره در شکل نشان داده شده است. همچنین منحنی نسبت میرایی حاصل شده از آزمایشات فنگ و ساتر [۱۴] در شکل (۵) ترسیم شده است، عملیات برون یابی مشابهی نیز در محدوده کرنش های برشی بزرگتر انجام شده، که بوسیله خط تیره در شکل نشان داده شده است. نظر به اینکه در تخمین خصوصیات دینامیکی مصالح خاکی به ناچار عدم قطعیت هایی وجود دارد، تیسانگ یک دامنه تغییرات  $(\pm 10\%)$  در مدل سازی کاهش مدول برشی و مقدار میرایی در نظر گرفته است. برای رسیدن به این هدف، منحنی های فرضی در بالا و پایین منحنی اصلی به شکل های (۴) و (۵) اضافه شده است که توسط نقطه چین نشان داده شده اند.

### ۵- عملکرد RSM تحت اثر زلزله های نزدیک گسل

از جمله مسائل مهمی که باید در طراحی سیستم های جداسازی لرزه ای در نظر گرفته شود عبارت است از اثر مشخصات حرکت زمین بر روی پاسخ سازه که شامل پدیده گسل نزدیک می باشد. در زلزله های نزدیک گسل اثرات مربوط به منبع نقشی اساسی در مشخصات زلزله بازی می کند و سبب می شود که اغلب این زلزله ها خصوصیات ویژه ای داشته باشند که آنها را از سایر زلزله ها متمایز می سازد. از جمله این خواص خاصیت جهت داری گسیختگی رو به جلو می باشد.

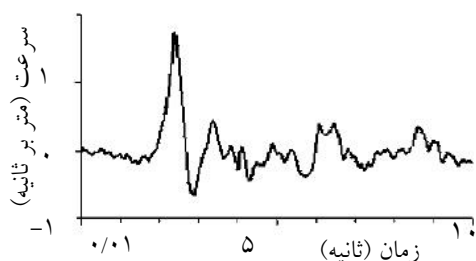
با توجه به اینکه اثرات مربوط به منبع، از اهمیت شرایط محلی ساختمانی در زلزله های نزدیک گسل می کاهد و از طرفی نیز اساس روش RSM بر پایه تغییر شرایط محلی ساختمانی با جایگزین کردن RSM به جای خاک زیر

دامنه شتاب‌های زمین که شامل اثرات جهت‌داری روبه جلو هستند ۵۰ درصد بزرگتر از شتاب‌هایی است که جهت‌داری متوسط دارند.

ضوابط جدید UBC97 برای حرکات نزدیک گسل مقدار مناسبی برای زمان‌های تناوب کوچکتر از ۰/۸ ثانیه بدست می‌دهند اما مقدار بدست آمده برای زمان‌های تناوب طولانی، بطور قابل توجهی کمتر است [۲۰]، که یک محدوده بسیار مهم برای سازه‌های فولادی می‌باشد.

چنانچه ساختگاه در نزدیکی مرکز زلزله باشد و انتشار شکست به سمت دور شدن از ساختگاه باشد در این حالت جهت‌داری رو به عقب رخ می‌دهد. زلزله در حالت جهت‌داری رو به عقب دارای مدت زمان بیشتر و دارای پالس‌های متعدد با دوره تناوب کوتاه و دامنه کوچک بوده بطوریکه انرژی زلزله در طول مدت ارتعاش پراکنده می‌شود. اگر فاصله ساختگاه از منشا زلزله زیاد باشد و ساختگاه خارج از محدوده جهت‌داری شکست باشد، در این حالت زلزله‌های دور از گسل یا محدوده جهت‌داری خنثی را خواهیم داشت [۱۹].

به بیان ساده‌تر، می‌توان گفت اثر جهت‌داری رو به جلو باعث می‌شود تا یک پالس ضربه‌ای در مولفه افقی عمود بر امتداد گسل ایجاد شود؛ بطوریکه این مولفه از دو مولفه افقی موازی و عمود بر امتداد گسل در حالت جهت‌داری رو به عقب بطور عمده بزرگتر است. شکل (۶) تاریخچه زمانی سرعت زلزله ۱۹۹۴ نورتریج، ثبت شده در ایستگاه رینالدی، را نشان می‌دهد که نمونه‌ای از یک زلزله نزدیک گسل پالسداری جهت‌دار رو به جلو می‌باشد.



شکل (۶): نمونه‌ای از یک زلزله نزدیک گسل با جهت‌داری رو به جلو، ثبت شده از زلزله ۱۹۹۴ نورتریج در ایستگاه رینالدی [۲۱]

## ۶- زلزله‌های نزدیک گسل پالسداری

عوامل متعددی بر روی حرکات زمین اثر می‌گذارند از اینرو هر زلزله ای مشخصات ویژه و منحصر به فردی دارد. در میان این عوامل اثرات منبع در ساختگاه‌های نزدیک گسل، مسیره‌های انتشار و اثرات ساختگاه برای ساختگاه‌های دور از گسل تاثیر زیادی در مشخصات زلزله‌ها دارند [۱۸].

ساختگاه نزدیک گسل شامل ناحیه‌ای است که ابعاد آن در حدود عمق منبع می‌باشد. در این ناحیه، جهت‌داری گسیختگی نقش مهمی بازی می‌کند. در این ساختگاه‌ها، زلزله‌ها دارای ویژگی‌های حرکت زمین پالس دار به همراه مؤلفه‌های قائم قابل توجه و سرعت بالا می‌باشند [۱۸]. مشخصات اصلی آنها به تأثیر جهت‌داری گسیختگی رو به جلو بر می‌گردد.

در محدوده نزدیک گسل معمولاً زلزله‌ها به سه عامل وابسته‌اند. این عوامل عبارتند از مکانیزم شکست، جهت انتشار شکست نسبت به ساختگاه و تغییر مکان‌های دائمی ناشی از لغزش گسل. این پارامترها باعث ایجاد دو اثر به نامهای جهت‌داری شکست و گام پرتابی می‌شود. جهت‌داری شکست می‌تواند به صورت جهت‌داری رو به جلو<sup>۱</sup> یا جهت‌داری رو به عقب<sup>۲</sup> ظاهر شود. زمانی که یک گسل شروع به شکسته شدن می‌کند، شکست از نقطه‌ای بر روی امتداد گسل ایجاد شده و بسته به محل آغاز گسیختگی به ابتدا، انتها و یا هر دو جهت گسترش می‌یابد. به گسترش شکست در امتداد گسل اصطلاحاً جهت‌داری شکست گفته می‌شود. در این حالت اگر انتشار شکست گسل به سمت ساختگاه باشد و جهت لغزش گسل نیز در راستای ساختگاه باشد، آنگاه جهت‌داری رو به جلو رخ می‌دهد. این اثر به دلیل نزدیک بودن سرعت انتشار شکست به سرعت موج برشی در سنگ نزدیک منبع زلزله رخ می‌دهد. معمولاً در جهت‌داری رو به جلو سرعت شکست کمی کوچکتر از سرعت موج برشی می‌باشد [۱۹].

1. Forward Directivity
2. Backward Directivity



نوع روسازه یک ساختمان سه طبقه فولادی است، ضخامت لایه RSM نیز در مدل اول ۵ متر و در مدل دوم ۱۰ متر اختیار شده است. سه مدل بعدی نیز در دسته دوم قرار می‌گیرند که شامل یک روسازه ۹ طبقه فولادی و لایه‌های RSM بترتیب به ضخامت‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ متر می‌باشند. بمنظور مقایسه نتایج، ابتدا هر مدل با در نظر گرفتن ماسه خالص در زیر شالوده مورد تحلیل قرار گرفته سپس ماسه خالص در یک ضخامت معین توسط RSM با ۷۵ درصد لاستیک جایگزین شده و مدل بصورت یک لایه RSM که بر روی نیم فضای ماسه‌ای قرار گرفته است تحلیل گردیده است. بنابراین هر مدل از دو بخش مجزا تشکیل شده است، مدل خاکی و مدل سازه‌ای. شبیه‌سازی المان محدودی هر بخش بوسیله دو نرم افزار متفاوت انجام شده است.

برای مدل‌سازی بخش خاکی نرم‌افزار QUAD4M [۱۶] جهت تحلیل پاسخ دینامیکی بروش خطی معادل و برای بخش سازه‌ای نرم‌افزار OPENSEES<sup>۱</sup> [۲۴] جهت تحلیل دینامیکی غیر خطی تاریخچه زمانی به کار برده شده است.

در شکل (۶) پالس ضربه‌ای (شوک) در ابتدای نگاهت بوضوح دیده می‌شود [۲۱]. همچنین در حالت جهت داری رو به جلو مولفه افقی عمود بر امتداد گسل از مولفه موازی با امتداد گسل بطور مشخص بزرگ‌تر است [۱۹]. نگاهت‌های عددی زلزله‌های نزدیک گسل جابجایی‌های ماندگاری ناشی از تغییرشکل ثابت حوزه زلزله را نشان می‌دهد، به این جابجاییها، تغییر مکان‌های گام پرتابی می‌گویند؛ که در فواصل زمانی مجزا در چند ثانیه در طی لغزش گسل رخ می‌دهند. تغییر مکان‌های گام پرتابی در جهت لغزش گسل (عمود بر اثر جهت‌داری شکست) رخ می‌دهند و از این رو بطور عمده با جابه‌جایی‌های دینامیکی ناشی از اثرات جهت‌داری شکست ترکیب نمی‌شوند [۱۹]. شناسایی پالسها و طبقه‌بندی انواع آنها از طریق روش‌های متعددی امکان‌پذیر می‌باشد برای اطلاعات بیشتر می‌توانید به مراجع [۲۲ و ۲۳] مراجعه کنید.

#### ۷- مدل‌های مورد استفاده

بمنظور انجام مطالعات ارزیابی از پنج مدل المان محدود استفاده شده است که بطور کلی در دو دسته قابل طبقه‌بندی هستند. در دسته اول که شامل ۲ مدل می‌باشد

جدول (۲): مشخصات ۱۲ زلزله جدید استفاده شده

نوع زلزله	شماره	نام زلزله	ایستگاه	بزرگای زلزله	فاصله (km)	نوع خاک	PGA(g)
پالس‌دار	۱	امپریال ولی	H-E06230	۶/۵	۱	C	۰/۴۳۹
	۲	نورتریج	SYL360	۶/۷	۶/۴	C	۰/۸۴۳
	۳	نورتریج	SCE018	۶/۷	۶/۱	C	۰/۸۲۸
	۴	نورتریج	RRS228	۶/۷	۷/۱	C	۰/۸۳۸
	۵	امپریال ولی	H-E07230	۶/۵	۰/۶	C	۰/۴۶۳
	۶	نورتریج	SCS052	۶/۷	۶/۲	C	۰/۶۱۲
	۷	نورتریج	JEN022	۶/۷	۶/۲	C	۰/۴۲۴
بدون پالس	۹	لوما پرتیبا	WAH090	۶/۹	۱۶/۹	-	۰/۶۳۸
	۱۰	نورتریج	CEN155	۶/۷	۳۰/۹	C	۰/۴۶۵
	۱۲	نورتریج	WST270	۶/۷	۲۹	B	۰/۳۶۲
	۱۳	لوما پرتیبا	PAE000	۶/۹	۳۶/۱	-	۰/۲۰۴
	۱۴	کوبه	NIS000	۶/۹	۱۱/۱	D	۰/۵۰۹

1. Open System for Earthquake Engineering Simulation

کرده است. این برنامه پاسخ ساختگاه را با تقریب منطقی تخمین زده و شبیه سازی می کند [۷].

در هر مدل المان محدود، لایه ماسه یا RSM با استفاده از المان های مربعی ۴ گرهی با ابعاد ۰/۵ متر در ۰/۵ متر المان بندی شده است. عرض لایه RSM که باید جایگزین خاک زیر فونداسیون سازه گردد بر اساس عرض روسازه مشخص می شود، بدین ترتیب که عرض لایه RSM به اندازه ضخامتی که برای آن اختیار شده است در هر دو طرف سازه بزرگتر از عرض سازه می باشد. ارتفاع کل مدل نیز برابر مجموع ضخامت لایه RSM، فونداسیون و طبقات زیرزمین روسازه است. بمنظور وارد کردن اثر روسازه واقع بر روی لایه RSM قسمت فونداسیون و طبقات زیرزمین روسازه ها (در صورت وجود) با استفاده از المان های مربعی ۴ گرهی با ابعاد ۰/۵ متر در ۰/۵ متر مدل می شوند. وزن کل طبقات سازه نیز با استفاده از چگالی معادل بین المان های فونداسیون و طبقات زیرزمین توزیع شده و به مدل اضافه می گردد. خواص المان های فونداسیون از نوع بتنی و بصورت صلب در نظر گرفته شده است. بعد از مشخص شدن عرض و ارتفاع کل مدل دو بعدی، تعداد المانها و تعداد گره های آنها محاسبه شده و به برنامه QUAD4M معرفی می گردد. این مشخصات برای هر ۵ مدل در جدول (۳) ارائه شده است. منحنی های کاهش مدول و میرایی (شکل های (۴ و ۵)) که دو بخش اصلی روش خطی معادل تحلیل پاسخ دینامیکی خاک می باشند برای

برای انجام تحلیل ها از ۱۴ رکورد مربوط به زلزله های نزدیک گسل استفاده شده است. از این زلزله ها، ۷ زلزله نزدیک گسل، پالس دار با خاصیت جهت داری رو به جلو و ۵ زلزله نزدیک گسل، بدون پالس می باشد (جدول (۲)). دو زلزله دیگر نیز مربوط به زلزله های بدون پالس استفاده شده توسط تیسانگ است (جدول (۱))، که یکی زلزله نورتریج استفاده شده در سناریوی مرجع (شماره ۱۱) و دیگری زلزله ۱۹۸۵ واپارازو، شیلی (شماره ۸) است که بر اساس نتایج مطالعات پارامتری انجام شده توسط تیسانگ، میان ۳ زلزله انتخاب شده توسط او، بدترین سناریو می باشد. مشخصات (مولفه افقی) ۱۲ زلزله جدید استفاده شده در جدول (۲) آورده شده است. زلزله ها بر حسب میزان پیروید غالب بصورت صعودی شماره گذاری شده اند.

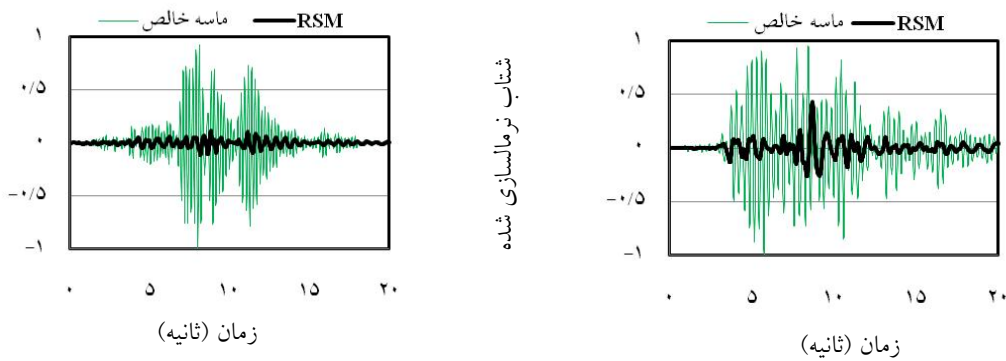
#### ۸- مدلسازی خاک یا لایه RSM زیر شالوده ساختمان

جهت مدلسازی خاک یا لایه RSM زیر شالوده ساختمان از برنامه QUAD4M استفاده شده است، که یک برنامه المان محدود دو بعدی خطی معادل در حوزه زمان با قابلیت تحلیل دینامیکی است. این برنامه بهبود یافته برنامه QUAD4 می باشد که در آن بخش های مربوط به بستر انعطاف پذیر، الگوریتم مربوط به گام زمانی و الگوریتم مربوط به ماتریس های میرایی و... بهبود داده شده است [۱۶]. برنامه QUAD4M یک ابزار قوی برای تحلیل خاکی است که کاربرد ۳۰ ساله این برنامه این امر را بخوبی اثبات

جدول (۳): مشخصات بخش خاکی مدل های المان محدود

دسته	شماره مدل	نوع روسازه	ضخامت RSM (متر)	عرض مدل (متر)	ارتفاع مدل (متر)	عرض پی روسازه (متر)	عمق پی و زیرزمین (متر)	چگالی معادل وزن (نیوتن بر مترمربع)	تعداد المان	تعداد گره
۱	۱	۳ طبقه	۵	۴۷	۶	۳۷	۱	۴۱۵۰۰۰	۱۱۲۸	۱۲۳۵
	۲	(SAC3)	۱۰	۵۷	۱۱	۳۷	۱	۴۱۵۰۰۰	۲۵۰۸	۲۶۴۵
۲	۳	۹ طبقه (SAC9)	۵	۵۶	۱۲	۴۶	۷	۱۶۳۱۸۴	۲۶۸۸	۲۸۲۵
	۴		۱۰	۶۶	۱۷	۴۶	۷	۱۶۳۱۸۴	۴۴۸۸	۴۶۵۵
	۵		۱۵	۷۶	۲۲	۴۶	۷	۱۶۳۱۸۴	۶۶۸۸	۶۸۸۵





شکل (۷): نتایج شبیه‌سازی مجدد مدل مرجع تیسانگ

#### ۹- مدلسازی بخش سازه‌ای

نرم افزار OPENSEES، یک برنامه کامپیوتری برای تحلیل المان محدودی می‌باشد که توسط دانشگاه برکلی تهیه و ارائه شده است [۲۴]. کاربرد این برنامه بیشتر در کارهای تحقیقاتی می‌باشد. مهمترین خصوصیت این برنامه، قابلیت ایجاد تغییر در متن اصلی برنامه و همچنین ترکیب کردن برنامه‌های موجود با هم و یا اضافه کردن برنامه‌های مورد نظر کاربر به آن، بدون نیاز به تغییر در کدهای موجود می‌باشد. OPENSEES قادر به مدلسازی و تحلیل مسائل سازه‌ای و ژئوتکنیکی بصورت یک، دو و سه بعدی است. ساختمان‌هایی که به عنوان روسازه در این مطالعه به کار گرفته شده‌اند، ساختمان‌های ۳ و ۹ طبقه با قاب خمشی فولادی (SMRF<sup>۱</sup>) هستند که توسط شرکای برنندو و جانستون برای پروژه فولادی SAC<sup>۲</sup> فاز دوم طراحی شده‌اند. این سازه‌ها مطابق آیین نامه لرزه‌ای آمریکا می‌باشند و ساختمان‌های تیب با ارتفاع کم و متوسط را ارائه می‌دهند [۲۶]. به منظور مدلسازی تیرها و ستونها در نرم‌افزار OPENSEES، از المانهای تیر-ستون فرمول‌بندی شده بر مبنای جابجایی استفاده شده است. در این نوع المان منشوری پلاستیسیته مصالح بصورت گسترده در نظر گرفته شده است و انتگرال‌گیری در طول آن بر پایه قاعده یک چهارم گاوس- لژاندر قرار دارد [۲۴]. همچنین از مدل دو خطی الاستیک- پلاستیک کامل برای معرفی مصالح

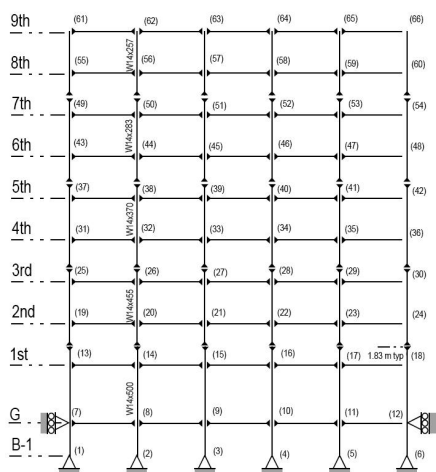
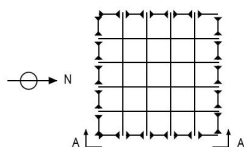
ماسه، RSM، بتن فونداسیون و طبقات زیرزمین بر حسب میزان کرنش به برنامه QUAD4M معرفی می‌شود. برای معرفی هر گره به برنامه نیز مختصات آن و نوع شرایط مرزی که در آن گره برقرار خواهد بود (برحسب اینکه در قسمت کناری یا تحتانی مدل واقع شده است یا نه) در فایل ورودی اصلی مورد نیاز خواهد بود. در برنامه QUAD4M بمنظور کاهش انعکاس امواج لرزه‌ای در مرزهای مدل المان محدود، از مرزهای انتقال دهنده یا جذب کننده انرژی که توسط لایزمر و کوهلمیر [۲۵] بصورت یک روش ساده پیشنهاد گردیده (یعنی بکارگیری میراگرها) استفاده شده است، از این رو در گره‌هایی که در جوانب و یا قسمت تحتانی مدل واقع هستند، از میراگرها استفاده می‌شود. مشخصات میراگرها در جهت عمود بر مرز و موازی با آن بترتیب برابر  $PV_{pl}$  و  $PV_{sl}$  می‌باشد، که  $\rho$  چگالی،  $V_p$  و  $V_s$  سرعت امواج فشاری و برشی ماده کناری RSM یا نیم فضای تحتانی آن است و  $L$  عرض مربوط به گره می‌باشد که برابر نصف فاصله از گره‌های کناری واقع در دو طرف گره است [۱۶]. جهت اطمینان از صحت مدل سازی، مدل مرجع تیسانگ بار دیگر تحت تحریک زلزله نورتریج مورد تحلیل قرار داده شد. همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌کنید نتایج حاصل مطابقت کامل با نتایج مدل مرجع تیسانگ دارد که نشانگر صحت مدلسازی می‌باشد.

1. Steel Moment Resistant Frame  
2. SAC: The Structural Engineers Association of California (SEAOC), the Applied Technology Council (ATC) and California Universities for Research in Earthquake Engineering (CUREE)

ستونها از نوع فولاد با مقاومت تسلیم ۳۴۵ مگاپاسکال و تیرها از نوع بال پهن با مقاومت تسلیم ۲۴۸ مگاپاسکال هستند [۲۶]. پروفیل‌های بکار رفته برای تیرها و ستونها روی شکل سازه نشان داده شده است. جرم لرزه‌ای شامل هر دو قاب شمالی - جنوبی برای اولین و دومین طبقه ۹۵۷۰۰۰ و سومین طبقه ۱۰۴۰۰۰۰ کیلوگرم می‌باشد. جرم لرزه‌ای کل سازه نیز ۲۹۵۰۰۰۰ کیلوگرم است [۲۶].

#### ۹-۲- سازه نه طبقه

ابعاد سازه نه طبقه در پلان ۴۵/۷۳ متر در ۴۵/۷۳ متر و ارتفاع کل آن ۳۷/۱۹ متر است. پنج دهانه به عرض ۹/۱۵ متر در هر دو جهت شمالی - جنوبی و شرقی - غربی وجود دارد. سیستم باربری جانبی ساختمان شامل قاب‌های خمشی پیرامونی با قاب ساده روی دورترین نقطه از قاب شرقی - غربی جنوبی می‌باشد. دهانه‌های داخلی سازه شامل قاب ساده با طبقات کامپوزیت است. طبقات ساختمان نسبت به سطح زمین شماره‌گذاری شده‌اند. نهمین طبقه، طبقه پشت بام می‌باشد. ساختمان یک طبقه زیر زمین دارد که B-1 علامت گذاری شده است. قاب خمشی شمالی - جنوبی ۹ طبقه در شکل (۹) نشان داده شده است. ارتفاع تپ کف تا کف ۳/۹۶ متر می‌باشد.



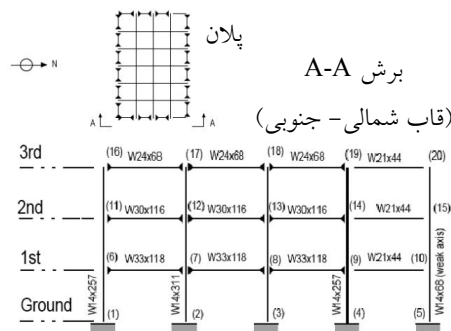
شکل (۹): پلان و قاب خمشی شمالی - جنوبی

ساختمان ۹ طبقه [۲۶]

فولادی اجزای سازه‌ای به OPENSEES استفاده شده است. مقاطع تمامی تیرها و ستونها از نوع بال پهن بوده و مدلسازی آنها با بهره‌گیری از مفهوم مقطع فیبری انجام شده است. با استفاده از محدود کردن درجات آزادی، طبقات سازه‌ها بصورت کف صلب تعریف شده و شرایط تکیه‌گاهی نشان داده شده در اشکال (۸ و ۹) به سازه‌ها اعمال شده است. بعلاوه، تغییرات هندسی سختی و مقاومت مربوط به اثر P-delta به OPENSEES معرفی شده‌اند. جرم لرزه‌ای سازه با توجه به اجزای مختلف سازه، شامل قاب بندی فولادی، دال‌های طبقات، اندودکاری/ کف‌سازی، اجزای مکانیکی / الکتریکی، تیغه بندی، پوشش عایق بندی پشت بام و خرپشته واقع بر روی پشت بام محاسبه شده است [۲۶]. جزئیات کامل مربوط به هر کدام از این سازه‌ها در بخش‌های بعدی ارائه می‌شود.

#### ۹-۱- سازه سه طبقه

ابعاد سازه سه طبقه در پلان ۵۴/۸۷ متر در ۳۶/۵۸ متر و ارتفاع کل آن ۱۱/۸۹ متر می‌باشد. در این ساختمان ۴ دهانه در جهت شمال - جنوب و ۶ دهانه در جهت شرقی - غربی با عرض ۹/۱۵ متر وجود دارد. سیستم باربری جانبی ساختمان شامل قابهای خمشی محیطی است، البته دو قاب در دورترین نقطه از قاب خمشی شرقی غربی جنوبی از نوع قاب ساده می‌باشند. دهانه‌های داخلی سازه شامل قاب‌های ساده همراه با طبقات کامپوزیت است [۲۶]. قاب خمشی شمالی - جنوبی ۳ طبقه در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل (۸): پلان و قاب خمشی شمالی - جنوبی

ساختمان ۳ طبقه [۲۶]

شتاب ماکزیمم (PGA) رکوردهای عبوری از ماسه خالص، مبنای ارزیابی در نظر گرفته شده است. واضح است که هر چه این نسبت کوچکتر باشد نشان دهنده عملکرد بهتر RSM در کاهش سطح لرزش می باشد. نسبت های شتاب محاسبه شده بر اساس شتاب نگاشت های حاصل از QUAD4M در جدول (۴) بصورت درصد نشان داده شده اند.

جدول (۴): نسبت ماکزیمم شتاب زلزله (RSM (PGA)

به ماسه (%)

مدل	۱	۲	۳	۴	۵
سازه	SAC3		SAC9		
RSM زلزله	۵ متر	۱۰ متر	۵ متر	۱۰ متر	۱۵ متر
تیرهای بکار رفته	۱	۴۱	۳۸	۴۰	۶۱
	۲	۲۹	۳۷	۴۸	۴۶
	۳	۴۷	۳۳	۳۷	۳۴
	۴	۷۳	۵۹	۶۱	۳۴
	۵	۷۹	۶۱	۴۲	۵۱
	۶	۱۰۷	۶۲	۷۰	۳۱
	۷	۱۳۱	۵۷	۶۶	۶۲
میانگین	۷۲	۵۰	۵۲	۴۶	۴۰
تیرهای بکار رفته	۸	۳۹	۲۳	۳۳	۹
	۹	۵۱	۳۶	۵۶	۱۶
	۱۰	۱۸	۱۱	۱۹	۱۶
	۱۱	۲۰	۲۲	۲۵	۲۰
	۱۲	۲۶	۱۳	۱۱	۲۵
	۱۳	۵۴	۲۹	۳۳	۳۱
	۱۴	۲۱	۱۰	۱۱	۱۴
میانگین	۳۳	۲۱	۲۷	۱۹	۱۹

همانطور که مشاهده می شود تمامی نسبت های شتاب به استثنای چند مورد حاکی از کاهش میزان شتاب ماکزیمم رکوردهای زلزله با عبور از لایه RSM می باشد. تنها در چند مورد که مربوط به رکوردهای پالسداری در مدل ۱ هستند، شتاب ماکزیمم بجای کاهش افزایش پیدا کرده است که در ادامه بحث خواهد شد.

ارتفاع کف تا کف طبقه زیر زمین ۳/۶۵ متر و اولین طبقه ۵/۴۹ متر است. پایه ستون ها به صورت مفصلی بوده و به زمین محکم شده اند. فرض می شود که دیوارهای شالوده بتنی و خاک مجاور از جابه جایی افقی سازه در سطح زمین جلوگیری می کنند. ستونها از نوع فولاد با مقاومت تسلیم ۳۴۵ مگاپاسکال و تیرها از نوع بال پهن با مقاومت تسلیم ۲۴۸ مگاپاسکال هستند. پروفیل های بکار رفته برای تیرهای طبقه همکف تا دوم W36x160، طبقه سوم تا ششم W36x135، طبقه هفتم W30x99، طبقه هشتم W27x84 و طبقه نهم W27x68 می باشد [۲۶]. پروفیل های بکار رفته برای ستونها نیز روی شکل سازه نشان داده شده است. جرم لرزه ای شامل هردو قاب شمالی- جنوبی برای طبقه همکف ۹۶۵۰۰۰، اولین طبقه ۱۰۶۰۰۰۰، طبقات دوم تا هشتم ۹۸۹۰۰۰ و نهمین طبقه ۱۰۷۰۰۰۰ کیلوگرم است. جرم لرزه ای کل سازه مربوط به طبقات بالای سطح زمین نیز ۹۰۰۰۰۰۰ کیلوگرم می باشد [۲۶].

#### ۱۰- بحث و بررسی نتایج

در این مطالعه، در مجموع ۱۴۰ تحلیل دینامیکی بر روی بخش حاکی مدلها و ۱۴۰ تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی بر روی بخش سازه ای مدلها (دو قاب ۲ بعدی ۳ و ۹ طبقه) انجام شده است. نصف تعداد تحلیل های انجام شده در هر بخش یعنی ۷۰ تحلیل مربوط به ماسه خالص و نصف مابقی مربوط به RSM می باشد.

نتایج حاصل از مدلسازی خاک یا لایه RSM زیر شالوده، به صورت تاریخچه زمانی شتاب در نقطه میانی زیر شالوده توسط QUAD4M محاسبه و ثبت شده است سپس بعنوان حرکت زلزله ورودی در پایه هر ساختمان جهت تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی توسط OPENSEES به سازه اعمال شده است.

#### ۱۰-۱- نتایج مربوط به مدلسازی خاک یا لایه RSM

##### زیر شالوده ساختمان

برای سنجش میزان کاهش سطح لرزش، نسبت شتاب ماکزیمم (PGA) رکوردها بعد از عبور از لایه RSM به



۲۱	۲۰	۹۵	۶۹	۴۴	۴
۱۵	۳۴	۳۰	۶۹	۱۸۲	۵
۲۶	۲۲	۶۵	۴۵	۱۰۳	۶
۳۷	۴۴	۳۵	۲۸	۱۲۴	۷
۲۹	۳۳	۴۶	۴۱	۷۸	میانگین
۴	۴	۳۰	۱۹	۴۶	۸
۹	۷	۶۷	۳۴	۴۵	۹
۱۵	۱۴	۲۴	۱۲	۱۵	۱۰
۳۵	۲۷	۱۷	۱۸	۱۰	۱۱
۷	۲۱	۹	۱۰	۱۷	۱۲
۲۱	۲۴	۳۳	۲۶	۴۵	۱۳
۲۱	۱۳	۹	۸	۲۴	۱۴
۱۶	۱۶	۲۷	۱۸	۲۹	میانگین

اما نکته مهم و جالب توجهی که در تمام طیفهای پاسخ ترسیم شده در شکل‌های (۱۰) تا (۱۴) قابل مشاهده می‌باشد این است که RSM همزمان با کاهش انرژی زلزله و کاهش ماکزیمم شتاب طیفی (سطح لرزش) باعث جابجایی محل شتاب ماکزیمم طیفی از پیوندهای کوتاه‌تر به پیوندهای طولانی‌تر در طیفهای پاسخ می‌شود. یک معیار مناسب که می‌تواند بیان کننده این مسئله باشد، پیوند غالب زلزله می‌باشد، که در این مقاله بصورت پیوند متناظر با ماکزیمم شتاب طیفی در طیف پاسخ شتاب زلزله تعریف می‌شود. با توجه به شکل‌های (۱۰ و ۱۱) پیوند غالب رکوردهای حاصل از ماسه خالص بطور تقریبی کمتر از ۰/۵ ثانیه می‌باشد در صورتیکه RSM موجب افزایش پیوند غالب رکوردها به بیش از یک ثانیه شده است. شکل‌های (۱۲، ۱۳ و ۱۴) نیز نشان دهنده افزایش پیوند غالب زلزله‌ها از حدود یک ثانیه به بیش از ۱/۵ ثانیه هستند. بر این اساس می‌توان گفت RSM علیرغم کاهش سطح لرزش زلزله (شتاب ماکزیمم طیفی) و پایین آوردن سطح طیف پاسخ نسبت به ماسه خالص، باعث شیفت پیوند غالب زلزله‌ها به پیوندهای طولانی‌تر میگردد این امر به نوبه خود می‌تواند موجب شود سازه‌هایی که پیوند اصلی آنها در محدوده پیوندهای طولانی‌تر قرار دارد با جایگزینی لایه

با توجه به میانگین نسبت‌های شتاب در جدول (۴) بوضوح دیده می‌شود که با افزایش ضخامت RSM نسبت شتاب کوچکتر می‌گردد. بعبارت دیگر، با افزایش ضخامت، RSM در کاهش شتاب ماکزیمم و سطح لرزش عملکرد بهتری دارد. بعلاوه، با مقایسه میانگین نسبت‌های شتاب مدل ۱ با ۳ و مدل ۲ با ۴ در جدول (۴)، مشاهده می‌شود که با افزایش وزن روسازه کاهش سطح لرزش نیز افزایش می‌یابد.

در نهایت مقایسه میانگین نسبت‌های شتاب مربوط به رکوردهای پالسدار با رکوردهای بدون پالس نشان می‌دهد که کاهش سطح لرزش در رکوردهای بدون پالس بیشتر بوده و جداساز RSM عملکرد بهتری در رکوردهای بدون پالس دارد.

از آنجاییکه طیف پاسخ یک معیار مهم در طراحی سازه‌ها بوده و طراحی و آنالیز سازه‌ها اغلب بر اساس طیف پاسخ طراحی یا شتاب نگاشت‌های سازگار با آن انجام می‌شود، طیف پاسخ تمام شتاب نگاشت‌ها با استفاده از روش عددی درون یابی تابع تحریک محاسبه و رسم شده است. [۲۷].

بنابراین، جهت بررسی عملکرد RSM، معیار نسبت شتاب‌های طیفی (شبه شتاب) ماکزیمم (RSM به ماسه خالص) نیز کمک کننده خواهد بود. نسبت‌های شتاب محاسبه شده در جدول (۵) آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نتایج نسبت‌های شتاب طیفی ارائه شده در جدول (۵) همانند نسبت‌های شتاب جدول (۴) بوده و تأیید کننده نتایج قبلی می‌باشد.

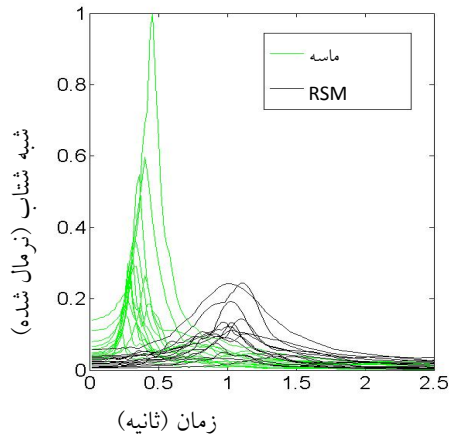
جدول (۵): نسبت ماکزیمم شتاب طیفی (RSM (PSA

به ماسه (%)

مدل	۱	۲	۳	۴	۵
سازه	SAC3		SAC9		
RSM زلزله	۵ متر	۱۰ متر	۵ متر	۱۰ متر	۱۵ متر
	۱	۲	۳	۴	۵
پالس‌دار	۳۲	۱۶	۲۲	۲۴	۳۹
	۱۹	۳۶	۴۷	۵۴	۵۱
	۳۹	۲۱	۳۰	۳۱	۱۴

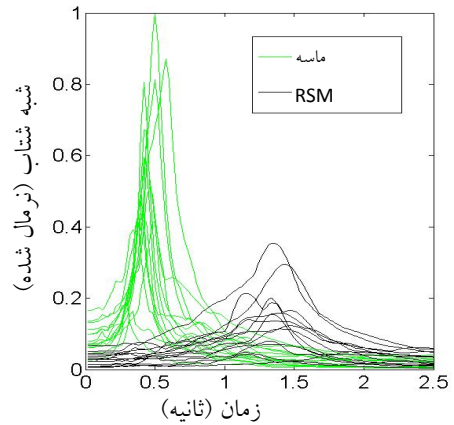
تقاضای لرزه‌ای می‌رود. در حالیکه اگر RSM می‌توانست بدون ایجاد شیفت در پریرود غالب زلزله سطح لرزش را کاهش دهد، عملکرد بهتری در کاهش سطح لرزش و تقاضای لرزه‌ای سازه‌ها داشت.

RSM بجای ماسه خالص، در شرایط نامساعدتری نسبت به قبل قرار گیرند؛ بطوریکه با افزایش نیروی زلزله در آنها تقاضای لرزه‌ای آنها نیز افزایش یابد. این امر بر خلاف انتظاری است که از یک جداساز لرزه‌ای برای کاهش میزان



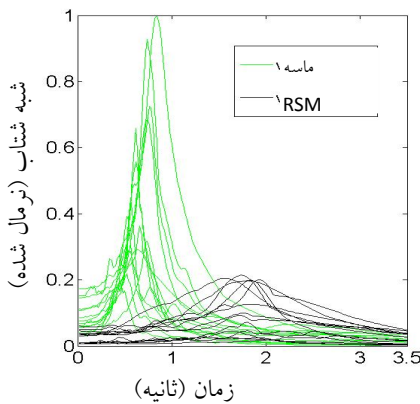
شکل (۱۱): طیف پاسخ شتاب (نرمال شده) زلزله‌های مربوط

به مدل ۲ (سازه ۳ طبقه و RSM ۱۰ متر)



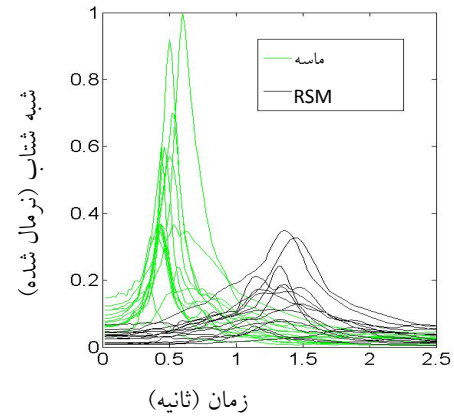
شکل (۱۰): طیف پاسخ شتاب (نرمال شده) زلزله‌های مربوط

به مدل ۱ (سازه ۳ طبقه و RSM ۵ متر)



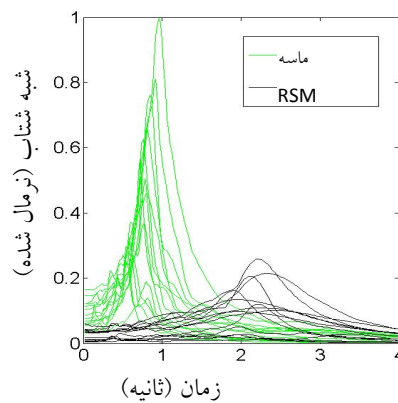
شکل (۱۳): طیف پاسخ شتاب (نرمال شده) زلزله‌های مربوط

به مدل ۴ (سازه ۹ طبقه و RSM ۱۰ متر)



شکل (۱۲): طیف پاسخ شتاب (نرمال شده) زلزله‌های مربوط

به مدل ۳ (سازه ۹ طبقه و RSM ۵ متر)



شکل (۱۴): طیف پاسخ شتاب (نرمال شده) زلزله‌های مربوط

به مدل ۵ (سازه ۹ طبقه و RSM ۱۵ متر)

پریودها یا فرکانس‌هایی است که RSM باعث افزایش انرژی و دامنه زلزله در آنها شده و پدیده تشدید را بوجود می‌آورد.

از آنجاییکه بر اساس مطالعات سامرویل [۲۸] خاصیت جهت‌داری رو به جلو نیز در زلزله‌های پالس‌دار، باعث شیفت پریود غالب زلزله، به پریودهای طولانی می‌شود، برای مثال از ۰/۲۵ ثانیه به ۰/۷۵ ثانیه، در این نوع زلزله‌ها این نزدیکی بیشتر بوده و امکان وقوع تشدید در آنها بیشتر است. پریود غالب رکوردهای پالس‌دار انتهایی جدول (شماره‌های ۴، ۵، ۶ و ۷) پریودهای غالب طولانی‌تری نسبت به بقیه رکوردها دارند (حدود ۰/۷۴ ثانیه) که به محدوده پریودهای تشدید شده توسط RSM نزدیکتر می‌باشند، لذا در آنها تشدید رخ داده است، در بقیه رکوردها ماکزیم دامنه زلزله یا پریود غالب دور از محدوده مورد نظر بوده (حدود ۰/۲۸) و احتمال وقوع پدیده تشدید کمتر می‌باشد.

جدول (۶): میزان شیفت پریود ایجاد شده توسط RSM نسبت به ماسه خالص (ثانیه)

مدل	۱	۲	۳	۴	۵
سازه	SAC3		SAC9		
RSM زلزله	۵ متر	۱۰ متر	۵ متر	۱۰ متر	۱۵ متر
تشدید	۱	۰/۷	۰/۹۸	۰/۹۲	۱/۸
	۲	۰/۶۴	۰/۹۲	۰/۹۲	۱/۴۴
	۳	۰/۷۸	۰/۷۶	۰/۶۶	۱/۳۸
	۴	۰/۶۶	۰/۹	۰/۸۲	۰/۷۲
	۵	۰/۷۶	۱/۰۶	۰/۹	۱/۱۲
	۶	۰/۸۲	۰/۷۴	۰/۷۲	۱/۱۸
	۷	۰/۷۶	۱/۰۸	۱/۰۴	۱/۳
میانگین	۰/۷۳	۰/۹۲	۰/۸۵	۱/۰۹	۱/۳۶
تشدید	۸	۰/۶۸	۰/۹۲	۰/۸۸	۱/۳
	۹	۰/۷	۰/۹۲	۰/۸۸	۰/۷۴
	۱۰	۰/۹۶	۱/۴۲	۱/۳۲	۱/۷۸
	۱۱	۰/۶۶	۰/۸۲	۰/۷۸	۱/۰۸
	۱۲	۰/۶	۰/۸	۰/۷۶	۱/۱۲
	۱۳	۰/۷۴	۰/۸۴	۰/۸	۱/۳۶
	۱۴	۰/۶	۰/۸۲	۰/۸۴	۱/۱۸
میانگین	۰/۷۱	۰/۹۳	۰/۸۹	۱/۱۵	۱/۳۹

بر اساس مطالعات تیسانگ و همکاران لایه RSM فرکانس غالب (یا پریود غالب) زلزله را تغییر داده و انرژی لرزه‌ای را بویژه در مولفه‌های فرکانسی بالا (پریودهای کوتاه) می‌کاهد [۹]. این امر با نتایج بدست آمده در این مطالعه کاملاً سازگار می‌باشد، اما در مقابل این موضوع نباید از نظر دور بماند که لایه RSM انرژی لرزه‌ای مولفه‌های فرکانسی کوتاه (پریودهای طولانی) را افزایش می‌دهد. این موضوع می‌تواند عملکرد مناسب جداساز لرزه‌ای RSM را در محدوده پریودهای طولانی مختل نماید، به هر حال RSM در محدوده پریودهای کوتاه می‌تواند وظیفه یک جداساز را در کاهش سطح لرزش و تقاضای لرزه‌ای بخوبی انجام دهد.

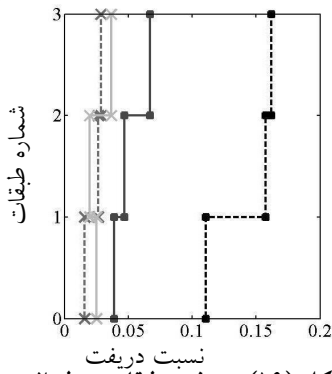
از آنجاییکه پریود اصلی سازه‌های فولادی در مقایسه با سازه‌های بتنی مشابه طولانی‌تر است، دو روسازه ۳ و ۹ طبقه فولادی بترتیب با پریودهای اصلی ۰/۹۶ و ۲/۸ ثانیه در بخش سازه‌ای مورد تحلیل قرار

گرفته‌اند. با توجه به اینکه RSM پریود غالب زلزله‌ها را به محدوده پریودهای اصلی این دو سازه نزدیک می‌کند، پیش‌بینی می‌شود که تاثیر منفی در کاهش تقاضای لرزه‌ای این سازه‌ها داشته باشد. میزان شیفت پریود ایجاد شده توسط RSM نسبت به ماسه خالص برای تمامی رکوردهای خروجی ثبت شده توسط QUAD4M در جدول (۶) ارائه شده است. این مقادیر بصورت تفاضل میان پریود غالب ۷۰ رکورد خروجی که از لایه RSM عبور کرده‌اند با ۷۰ رکورد متناظر که از لایه ماسه خالص رد شده‌اند، محاسبه شده‌اند. با توجه به این جدول، مقادیر میانگین نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت RSM و افزایش وزن روسازه‌ها بر میزان شیفت پریود غالب افزوده می‌شود. همچنین میزان شیفت پریود در اغلب رکوردهای پالس‌دار بیش از رکوردهای بدون پالس است. اما میزان اختلاف قابل توجه نیست بطوریکه بزرگترین میزان اختلاف برابر ۶ صدم ثانیه می‌باشد.

افزایش نسبت شتابی که در جداول (۴ و ۵) در چند رکورد پالس‌دار دیده می‌شود و قبلاً به آن اشاره شد نیز بعلت نزدیکی پریود غالب رکوردهای پالس‌دار به محدوده

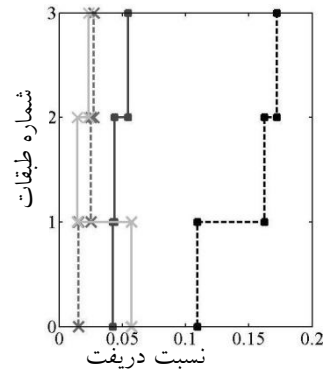






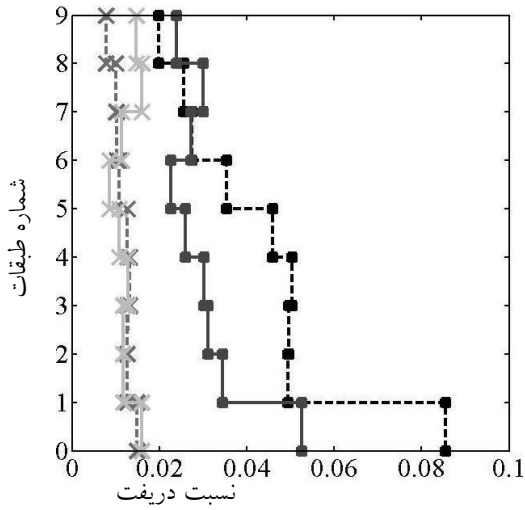
شکل (۱۴): دریفت طبقات مدل ۲

(سازه ۳ طبقه و RSM ۱۰ متر)



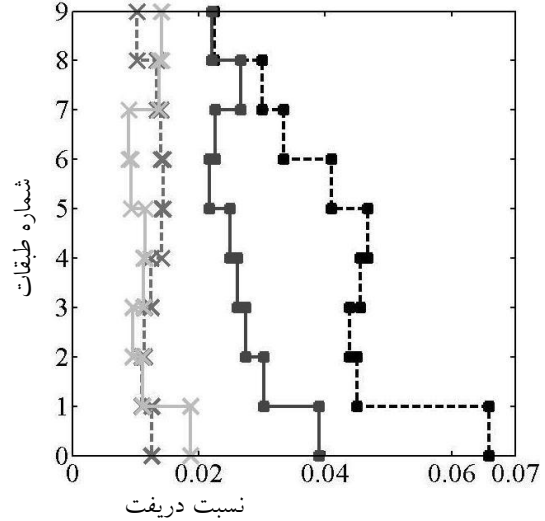
شکل (۱۵): دریفت طبقات مدل ۱

(سازه ۳ طبقه و RSM ۵ متر)



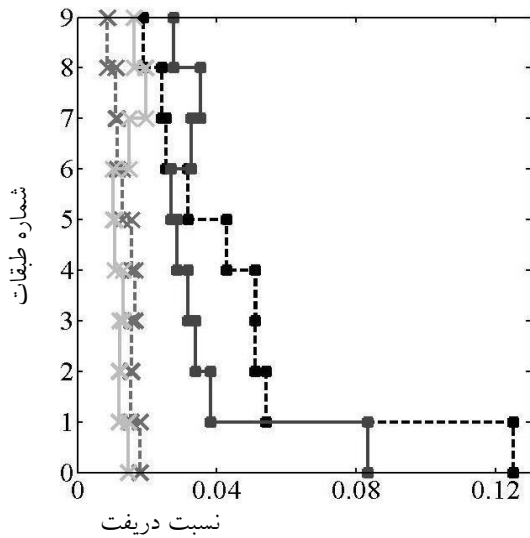
شکل (۱۸): دریفت طبقات مدل ۴

(سازه ۹ طبقه و RSM ۱۰ متر)



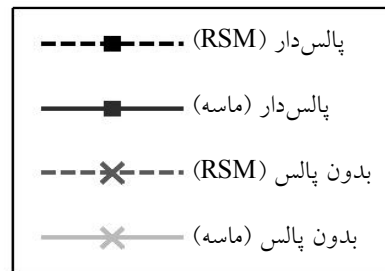
شکل (۱۷): دریفت طبقات مدل ۳

(سازه ۹ طبقه و RSM ۵ متر)



شکل (۱۹): دریفت طبقات مدل ۵

(سازه ۹ طبقه و RSM ۱۵ متر)



در مجموع نتایج بدست آمده موید نکات زیر می‌باشند. با افزایش ضخامت، RSM در کاهش شتاب ماکزیمم و سطح لرزش عملکرد بهتری دارد. بعلاوه، با افزایش وزن روسازه کاهش سطح لرزش نیز افزایش می‌یابد. همچنین مقایسه نتایج نشان می‌دهد که کاهش سطح لرزش در رکوردهای بدون پالس بیشتر بوده و جداساز RSM عملکرد بهتری در رکوردهای بدون پالس دارد.

نکته مهم دیگر این است RSM علی‌رغم کاهش سطح لرزش زلزله و پایین آوردن سطح طیف پاسخ نسبت به ماسه خالص، باعث شیفت پریود غالب زلزله‌ها به پریودهای طولانی‌تر می‌گردد این امر به نوبه خود می‌تواند موجب شود سازه‌هایی که پریود اصلی آنها در محدوده پریودهای طولانی‌تر قرار دارد با جایگزینی لایه RSM بجای ماسه خالص، در شرایط نامساعدتری نسبت به قبل قرار گیرند؛ بطوریکه با افزایش نیروی زلزله در آنها تقاضای لرزه‌ای آنها نیز افزایش یابد.

از آنجاییکه خاصیت جهت‌داری رو به جلو نیز در زلزله‌های پالس‌دار، باعث شیفت پریود غالب زلزله، به پریودهای طولانی می‌شود، باید به این نکته توجه داشت که امکان وقوع تشدید در این نوع زلزله‌ها بیشتر است.

به هر حال RSM در محدوده پریودهای کوتاه می‌تواند وظیفه یک جداساز را در کاهش سطح لرزش و تقاضای لرزه‌ای بخوبی انجام دهد.

نکته اساسی دیگری که با دقت در نمودارهای دریافت سازه‌ها می‌توان به آن پی برد این است که پس از عبور رکوردها از لایه RSM، مدهای پایین‌تر که دارای پریودهای طولانی‌تری هستند در رفتار سازه غالب‌تر می‌شوند، در نتیجه RSM باعث تغییر توزیع تقاضای لرزه‌ای (دریافت) در میان طبقات سازه می‌گردد.

بطور کلی می‌توان گفت، عملکرد RSM علاوه بر سایر عوامل مانند مشخصات لایه RSM و مشخصات روسازه، به ویژگی‌های زلزله نیز بستگی دارد و ممکن است بر اثر مجموعه عوامل فوق در مواردی عملکرد مناسب خود را

در این بخش، نسبت دریافت طبقات، که بصورت جابجایی بین دو طبقه مجاور به ارتفاع طبقه تعریف می‌شود، بعنوان معیار سنجش تقاضای لرزه‌ای سازه‌ها بکار گرفته شده است. بر این اساس دریافت‌های ایجاد شده در طبقات مختلف برای هر کدام از سازه‌ها محاسبه شده‌اند. نمودار میانگین ماکزیمم دریافت‌های طبقات، مربوط به رکوردهای پالس‌دار و بدون پالس به تفکیک برای RSM و ماسه برای هر ۵ مدل در شکل‌های (۱۵) تا (۱۹) رسم شده است. با دقت در این شکل‌ها، می‌توان مشاهده کرد که بطور کلی میزان تقاضای لرزه‌ای (دریافت طبقات) ایجاد شده در سازه‌ها در اثر جایگزین کردن RSM به جای ماسه خالص افزایش یافته است. با توجه به نتایج بخش قبلی، همانطور که انتظار می‌رفت RSM با شیفت پریود غالب زلزله، به پریودهای طولانی با وجود کاهش شتاب ماکزیمم میزان تقاضای لرزه‌ای را افزایش داده است. میزان این افزایش تقاضا در رکوردهای پالس‌دار قابل توجه می‌باشد در حالیکه در رکوردهای بدون پالس مقدار تغییرات ایجاد شده توسط RSM در میزان دریافت به نسبت کمتر است که بار دیگر موید عملکرد بمراتب بهتر آن در رکوردهای بدون پالس می‌باشد. در سازه ۳ طبقه بیشترین افزایش تقاضا مربوط به طبقه میانی است.

در سازه ۹ طبقه نیز، افزایش تقاضا در طبقات میانی و کاهش تقاضا در طبقات فوقانی مشاهده می‌شود. بعلاوه در نمودارهای مربوط به سازه ۹ طبقه بیشترین تقاضا در اثر رکوردهای پالس‌دار حاصل از RSM در طبقه اول اتفاق افتاده است. نکته اساسی که با دقت در نمودارهای دریافت سازه‌ها می‌توان به آن پی برد این است که پس از عبور رکوردها از لایه RSM، مدهای پایین‌تر که دارای پریودهای طولانی‌تری هستند در رفتار سازه غالب‌تر شده‌اند، در نتیجه RSM باعث تغییر توزیع تقاضای لرزه‌ای (دریافت) در میان طبقات سازه شده است.



- seismic isolation by scrap tire-soil mixtures, Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego, California, paper No: 2.07.
- 13-Kramer, S.L., 1996, Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice-Hall: Upper Saddle River, NJ.
- 14-Feng, Z.Y., Sutter, K.G., 2000, Dynamic Properties of Granulated Rubber/Sand Mixtures. Geotechnical Testing Journal; 23(3):338-344.
- 15-Lee, J.H., Salgado, R., Bernal, A., Lovell, C.W., 1999, Shredded Tires and Rubber-Sand as Light Weight Backfill, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE); 125(2):132-141.
- 16-Hudson, M., Idriss, I.M., Beikae, M., 1994, User's Manual for QUAD4M: A Computer Program to Evaluate the Seismic Response of Soil Structures using Finite Element Procedures and Incorporating a compliant Base, University of California, Davis, U.S.A.
- 17-Vucetic, M., Dobry, R., 1991, Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response, Journal of Geotechnical Engineering (ASCE); 117(1):89-107.
- 18-Gioncu, V., Mazzolani, F.M., 2003, Challenges in Design of Steel Structures Subjected to Exceptional Earthquakes, In: Mazzolani, F.M., Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, A.A. Balekma, p.89.
- 19-Stewart, J.P., Chiou, S.J., Bray J.D., Graves R.W., Somerville P.G., Abrahamson N.A., 2001, Ground Motion Evaluation Procedures for Performance-Based Design, Report No 2001/09, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.
- 20-Somerville P.G., Smith, N.F., Abrahamson N.A., 1996, Accounting for Near-Fault Rupture Directivity Effects in the Development of Design Ground Motions, Proceedings of the 11-th World Conference on Earthquake Engineering, Elsevier, paper N0.711.
- 21-Kalkan, E., Kunnath, S.K., 2006, Effects of Fling Step and Forward Directivity on Seismic Response of Buildings, Earthquake Spectra, 22(2):367-390.
- 22-Yaghmaei-Sabegh, S., 2010, Detection of pulse-like ground motions based on continues wavelet transform, Journal of Seismology, 14(4): 715-726.
- 23-Agrawal, A.K., He, W.L., 2002, A Closed Form Approximation of Near Fault Ground Motion Pulses for Flexible Structures, 15<sup>th</sup> ASCE Mechanics Conference, Columbia University, New York, NY.
- 24-OPENSEES: Open Sysytem for Eartquake Engineering Simulation, Ver 2, Pacific

بعنوان یک جداساز لرزه‌ای از دست دهد. بهر حال، وجود مسائل و مشکلات در هر طرح نوین امری منطقی است و هر طرح و ایده تئوری برای تبدیل شدن به یک فناوری عملی نیاز به تحقیقات جامع و کاملی دارد. این موضوع ضرورت تحقیقات نظری و آزمایشگاهی بیشتر ژئوتکنیکی، سازه‌ای و لرزه‌شناسی را در زمینه جداساز لرزه‌ای مخلوط لاستیک و خاک آشکارتر می‌سازد.

#### مراجع

- 1- Mayes, R.L., 2001, Design of Structures with Seismic Isolation, IN: Naeim F., The seismic design handbook, Springer, pp.723.
- 2- Zhou, F.L., 2001, Seismic Isolation of Civil Buildings in the People's Republic of China, Progress in Structural Engineering and Materials; 3(3):268-276.
- 3- Taylor, A.W., Igusa, T. (eds), 2004, Primer on Seismic Isolation, American Society of Civil Engineers (ASCE), Virginia, U.S.A.
- 4- Buckle, I.G., Mayes, R.L., 1990, Seismic Isolation: History, Application, and Performance -a World view, Earthquake Spectra; 6(2):161-201.
- 5- Naeim, F., Kelly, J.M., 1999, Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice. Wiley: New York, U.S.A.
- 6- Robinson, W.H., 2000, Seismic isolation of civil buildings in New Zealand, Progress in Structural Engineering and Materials; 2(3):328-334.
- 7- Tsang, H.H., 2008, Seismic Isolation By Rubber-Soil Mixtures for Developing Countries, Earthquake Engineering and Structural Dynamic; Vol. 37:283-303.
- 8- Tsang, H.H., Y.K.Lam, J., Yaghmaei-Sabegh, S., Lo, S.H., 2009, Protecting Underground Tunnel by Rubber-Soil Mixtures, ASCE Conference Proceedings, Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment, USA; pp. 1-11, (doi 10.1061/41050(357)39).
- 9- Xu, X., Lo, S.H., Tsang, H.H., Sheikh, M.N., 2009, Earthquake Protection by Rubber-Soil Mixtures: Numerical Study, NZSEE Conference Proceedings, paper number:60.
- 10-Edil, T.B., Bosscher, P.J., 1994, Engineering Properties of Tire Chips and Soil Mixtures, Geotechnical Testing Journal; 17(4):453-464.
- 11-Masad, E., Taha, R, Ho, C., Papagiannakis, T., 1996, Engineering Properties of Tire/Soil Mixtures as a lightweight fill material, Geotechnical Testing Journal; 19(3):297-304.
- 12-Tsang, H.H., Y.K.Lam, J., Yaghmaei-Sabegh, S., Sheikh, M.N., Indraratna, B., 2010, geotechnical

## *Archive of SID*

- Earthquake Engineering Research Center,  
University of California, Berkeley.  
<<http://opensees.berkeley.edu/>>
- 25-Lysmer, T., Kuhlemeyer, R.L., 1969, Finite Dynamic Model for Infinite Media, Journal of Engineering Mechanics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineerings, EM4:859-877.
- 26-Ohtori, Y., Christenson, R.e., Spencer, B.F., Dyke, S.G., 2000, Benchmark Control Problems for Seismically Excited Ninlinear Buildings, 2nd World Conference on Structural Control, Pasadena, U.S.A., Availablbe from: <http://sstl.cce.illinois.edu/benchmarks>.
- 27-Chopra, A.K., 2001, Dynamics of Structures, Prentice-Hall: Upper Saddle River, NJ.
- 28-Somerville P.G., Engineering Characteristics of Near Fault Ground Motion, 1997, Proceeding of SMIP97 Seminar on Utilization of Strong-Motion Data, pp.9-28.