

## Geotechnical seismic isolation for low-to-medium-rise buildings using sand-rubber deformable layer

Mohammad Reza Mirjalili<sup>1\*</sup>, Hamed Tajammolian<sup>2</sup>

1,2- Assistant Professor, Civil engineering department, Yazd University, Yazd, Iran

### ABSTRACT

The high costs of base-isolation systems is one of the obstacles for their application in developing countries. In this research, a low-cost base-isolation system for low-to-medium-rise building has been proposed. For this purpose, a soil layer with plain sand or sand-rubber mixture is applied under building base. To provide lateral movement, a gap is created around the soil layer and filled with flexible materials. This gap let the layer have shear deformations and thus the amplitude of the structural response will be potentially decreased. To evaluate the performance of the proposed base-isolation system, several models have been developed in OpenSees software, with the aim to study the effective factors: the type of layer material, gap width and layer thickness. In these models, a 9-story structure of steel moment frame system including soil layer with the prescribed factors has been analysed by nonlinear time-history analysis procedure with appropriate ground motion records. To evaluate the performance of the proposed base-isolation system, the responses of peak story drift, peak story displacement, maximum axial force of the column and maximum rotation of the plastic hinge of the beam in different models have been compared. The results show that the proposed system, have been very effective in reducing the structural seismic responses. The base-isolation with sand-rubber mixture and layer thickness of 0.5 m and gap width of 10 cm, showed the best performance.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 30 March 2022

**Revise Date:** 22 June 2022

**Accept Date:** 14 July 2022

### Keywords:

Low-cost base-isolation  
Geotechnical seismic isolation  
Sand-rubber mixture  
Sand isolation  
Soil layer isolation

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.335079.2762>

\*Corresponding author: Mohammad Reza Mirjalili.  
Email address: mirjalili@yazd.ac.ir

## جداسازی لرزه‌ای-ژئوتکنیکی ساختمان‌های کوتاه و میان مرتبه با ایجاد لایه منعطف

### برشی از مصالح ماسه و لاستیک

محمدرضا میرجلیلی<sup>۱\*</sup>، حامد تجملیان<sup>۲</sup>

۱ و ۲- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

#### چکیده

هزینه زیاد اجرای سیستم‌های نوین جداسازی، مانع توسعه آن‌ها در کشورهای در حال توسعه شده است. از این رو در این پژوهش سعی شده است با ارائه یک ایده، راهکاری اقتصادی برای جداسازی ساختمان‌ها ارائه گردد. بدین منظور در زیر شالوده ساختمان، یک لایه با قابلیت تغییرشکل برشی با مصالح ماسه یا مخلوط ماسه-لاستیک اجرا می‌گردد. برای تأمین حرکت جانبی لایه مورد نظر، درز انقطاع پیرامون لایه خاک ایجاد شده و با مصالح انعطاف پذیر پر می‌گردد تا ضمن جلوگیری از مشکلات اجرایی، مانعی برای حرکت ایجاد نشود. وجود درز انقطاع در اطراف خاک زیر فونداسیون در عمقی مشخص باعث می‌شود که لایه مذکور قابلیت تغییرشکل‌های برشی را داشته و بدین ترتیب به دلیل سختی جانبی کم و میرایی نسبتاً مناسب، دامنه شتاب نوسان ورودی سازه به طور قابل توجهی کاهش یابد. برای بررسی عملکرد سیستم جداساز پیشنهادی، مدل‌های متعددی که عوامل مؤثر در سیستم جداساز شامل نوع مصالح لایه جداساز، عرض درز پیرامونی و ضخامت لایه را منظور کرده‌اند در محیط برنامه *OpenSees* ساخته شده‌اند. در این مدل‌ها یک سازه ۹ طبقه قاب خمشی فولادی به همراه لایه خاک زیر آن با شرایط مذکور تحت روش تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی با شتابنگاشت‌های مناسب تحلیل شده است. جهت ارزیابی عملکرد سیستم جداساز، پاسخ‌های حداکثر جابجایی نسبی طبقات، حداکثر جابجایی جانبی طبقات، حداکثر نیروی محوری ستون و حداکثر چرخش مفصل پلاستیک تیر در مدل‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد، سیستم جداساز پیشنهادی فارغ از نوع مصالح به کار رفته و اندازه درز پیرامونی و ضخامت لایه جداساز، در کاهش پاسخ‌های تعیین کننده سطح عملکرد سازه، نظیر جابجایی نسبی طبقات و چرخش مفاصل پلاستیک بسیار تأثیرگذار بوده است. بهترین عملکرد مربوط به سیستم جداساز با مصالح ترکیبی ماسه و خرده لاستیک با ضخامت لایه ۰/۵ متر و عرض درز پیرامونی برابر ۱۰ سانتی‌متر بوده است.

کلمات کلیدی: جداسازی لرزه‌ای-ژئوتکنیکی، جداساز ماسه‌ای، مخلوط ماسه و لاستیک، سیستم جداساز اقتصادی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2022.335079.2762	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.335079.2762	۱۴۰۲/۰۲/۳۱	۱۴۰۱/۰۴/۲۳	۱۴۰۱/۰۴/۲۳	۱۴۰۱/۰۴/۰۱	۱۴۰۱/۰۱/۱۰
محمدرضا میرجلیلی mirjalili@yazd.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با توسعه فناوری ساخت در بسیاری از کشورها، سیستم‌های جداساز لرزه‌ای ارتقاء یافته و روش‌ها و انواع مختلفی پیشنهاد و بررسی شده‌اند. جداسازهای لاستیکی طبیعی و یا مصنوعی با میرایی کم و زیاد، جداسازهای لاستیکی با هسته سربی، سیستم‌های جداکننده اصطکاکی، سیستم‌های آونگ اصطکاکی و ... را می‌توان از جمله مهم‌ترین انواع جداسازهای لرزه‌ای نام برد. با وجود اینکه این سیستم‌ها عملکرد بسیار خوبی از خود نشان داده‌اند اما مشکل اصلی این جداسازها هزینه ساخت، نگهداری و اجرای بالای آنها می‌باشد که این موضوع باعث شده است که در کشورهای جهان سوم استقبال زیادی از آنها نشود.

تعدادی از تحقیقات اخیر به پیدا کردن روش‌های جایگزین و اقتصادی برای جداسازی لرزه‌ای ساختمان متمرکز شده‌اند. از یک نظر می‌توان تلاش‌های صورت گرفته در این زمینه را به سه دسته تقسیم نمود. دسته اول جداسازهای ژئوسنتتیک بوده که مبنای آن‌ها بر اساس جذب انرژی لرزه‌ای از طریق لغزش بر روی لایه‌ای جایگزین شده از این مصالح در زیر فونداسیون می‌باشد که از ترکیب عملکرد پلیمرها و مصالح ژئوتکنیکی (نظیر خاک، سنگ و ...) بدست می‌آیند. از پژوهش‌های شاخص در این حوزه می‌توان به کارهای یگین<sup>۱</sup> و همکارانش اشاره داشت [۱ و ۲]. دسته دوم جداسازهای ژئوتکنیکی می‌باشند که در آنها مفهوم اندرکنش خاک و سازه و همچنین برخورداری خاک (بخصوص ماسه) از میرایی، ایده‌هایی از جداسازی سازه مطرح می‌شوند. ایده اصلی استفاده شده در این روش‌ها، اصلاح رفتار خاک از دیدگاه انتقال امواج برشی زلزله است. از این رو لایه ضحیمی از خاک با مصالح با سختی برشی کمتر جایگزین می‌شود. بدین ترتیب شدت امواج منتقل شده به پی کاهش پیدا کرده و رفتار سازه در زلزله بهبود می‌یابد. دسته سوم به نوعی جداسازهای ژئوتکنیکی بهبودیافته هستند که درصدی مصالح مستهلک کننده مانند لاستیک جهت افزایش میرایی لایه جداساز اضافه گردیده است. با توجه به این که به موضوع اخیر در این مقاله تمرکز بیشتری شده است، در ادامه به چند مورد از پژوهش‌های مرتبط با تفصیل بیشتری اشاره می‌شود.

علی‌عسگری در پژوهشی با استفاده همزمان از مخلوط خاک و خرده لاستیک بعنوان بستر خاک پی و همچنین ژئوسنتتیک‌ها بمنظور جداسازی پی سطحی، به بررسی میزان تأثیرگذاری مخلوط خاک و خرده لاستیک در افزایش عملکرد سیستم پرداخته است. وی با انجام شبیه سازی ضخامت مخلوط ماسه و لاستیک در بازه ۵ تا ۲۰ متر و مدل نمودن تنها پی سازه بر روی خاک (بدون در نظر گرفتن سازه)، توسط یک نرم افزار المان محدود، نشان داد که در سیستمی که از مخلوط خاک و خرده لاستیک با نسبت وزنی ۳۰ درصد لاستیک استفاده شده است، بیشترین درصد کاهش انرژی انتقال یافته به پی را داشته است. همچنین میزان کاهش در پاسخ شتاب افقی و قائم انتقال یافته به سطح خاک و پی، حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد گزارش شده است [۳]. محمودی طی تحقیقی به بررسی و تعیین رفتار سیکلی مصالح مخلوط خاک و لاستیک جهت استفاده در جداسازی پرداخته است. در این پژوهش با نتایج بدست آمده از مطالعات آزمایشگاهی انجام شده بر ماسه مخلوط شده با خرده‌های لاستیک فرسوده، مشاهده می‌شود که با افزودن لاستیک به ماسه، سختی و مدول برشی کاهش و میزان شکل پذیری و میرایی آن افزایش می‌یابد. همچنین می‌توان اشاره نمود که در آزمایش برش مستقیم، روند مقدار زاویه اصطکاک داخلی مخلوط در ابتدا افزایشی بوده و با افزودن مقدار ۲۰٪ لاستیک به ماسه و پس از آن روندی کاهشی دارد [۴]. سانگ<sup>۲</sup> با امکان‌سنجی پارامتری و عددی بر رویکرد جدید جداسازی لرزه‌ای که در آن از خرده‌های لاستیک بعنوان وسیله‌ای محافظتی برای سازه‌ها استفاده می‌شد نشان داد که ترکیب ماسه و خرده لاستیک می‌تواند یک سیستم ایزولاسیون لرزه‌ای ژئوتکنیکی مقرون بصره و پیشنهادی مبنی بر استفاده دوباره از توده‌های وسیع تایرهای فرسوده بخصوص در کشورهای توسعه یافته را فراهم کند [۵]. می‌توان گفت پژوهش فوق آغاز روشی نوین در جداسازی ژئوتکنیکی به شمار می‌رود. در مقاله‌ای دیگر که توسط سانگ و همکارانش ارائه شد به بررسی عددی این جداساز برای سازه‌های کوتاه تا میان مرتبه پرداخته شد. در این پژوهش در ادامه مقاله قبل مخلوط ماسه و خرده لاستیک را در زیر خاک فونداسیون در بین شمع جایگزین کرده و در ارتفاع‌های مختلف مقادیر پاسخ‌های لرزه‌ای سازه را برداشت کردند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مقادیر شتاب و جابجایی نسبی طبقات می‌تواند تا ۴۰ الی ۶۰ درصد کاهش یافته و جداساز پیشنهادی نقش مؤثری در رفتار مطلوب سازه و

<sup>1</sup> Yeigain

<sup>2</sup> Tsang

همچنین در مشکل ضایعات تیرهای فرسوده در کشورهای جهان سوم دارد [۶]. سیاوس<sup>۳</sup> و همکاران مقاله‌ای ارائه دادند که در آن به بررسی آزمایشگاهی در مورد رفتار لایه مخلوط ماسه و خرده لاستیک به عنوان جداساز پرداختند. در این تحقیق با انجام آزمایش‌های برش مستقیم اصلاح شده، برش ساده و آزمایش‌های دینامیکی که بر روی میز لرزان با چند مخلوط ماسه و خرده لاستیک با درصد‌های مختلف لاستیک انجام دادند، مشخصات اصطکاکی آن‌ها را در مجاورت با سطح‌های مختلف مثل بتن، پلی‌تن<sup>۴</sup>، چوب و فولاد ارائه دادند. از نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که مخلوط ماسه و خرده لاستیک هدف جداسازی را برآورده می‌کند [۷]. بطور کلی چندین تحقیق حول تعیین حدی برای درصد بهینه خرده لاستیک صورت پذیرفته است، اما در طی پژوهشی که توسط پیستولاس<sup>۵</sup> و همکارانش بر روی ضخامت‌های مختلف مخلوط ماسه و خرده لاستیک و تحت ورودی‌های لرزه‌ای مختلف انجام شده است، مقدار بهینه درصد خرده لاستیک برابر ۳۰ درصد وزنی مخلوط بیان شده و اشاره شده است که با تجاوز مقدار درصد خرده لاستیک از حد ۶۰ درصد، مقدار مقاومت برشی مخلوط کاهش پیدا می‌کند [۸]. این مقدار بهینه و نیز مشخصات مکانیکی آن که در تحقیقی دیگر از آن‌ها گزارش شده [۹]، مبنای مدلسازی رفتاری خاک و تحلیل‌های پژوهش حاضر قرار گرفته است.

در پژوهش‌های جدیدتر، روند فوق ادامه پیدا کرده‌اند. ایده مشترک تمام این تحقیقات، استفاده از یک لایه مخلوط خاک و لاستیک با ضخامت‌های مختلف می‌باشد. در ادامه به طور خلاصه اهم این تحقیقات ارائه می‌شود. برون<sup>۶</sup> و همکارانش با مدلسازی غیرخطی سیستم‌های جداساز متشکل از لایه مخلوط خاک و لاستیک مدعی شدند که به کارگیری یک لایه به ضخامت ۲ تا ۳ متر با درصد لاستیک ۱۵ تا ۲۵ درصد، بهینه‌ترین رفتار جداسازی را ایجاد می‌کند [۱۰]. پیستولاس و همکارانش بررسی عددی بر روی قابلیت جداسازی این روش بر روی سازه‌های مختلف انجام دادند و مدعی شدند که به نتایج رضایت بخشی رسیده‌اند [۱۱]. اخیراً مانوهار<sup>۷</sup> و همکارانش مشخصات رفتاری و مقاومتی مخلوط خاک و لاستیک مسلح را به طور دقیق تری بررسی کرده‌اند و به این نتیجه رسیدند که خصوصیات مقاومتی و جذب انرژی مخلوط خاک و لاستیک مسلح به الیاف ژئوسنتتیک دو برابر شده و شاخص تردشکنی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد [۱۲]. فخاریان و احمد در تحقیق خود اثر تحکیم ناهمسانگرد و درصد اختلاط لاستیک را بر روی مدول برشی و نسبت میرایی مخلوط خاک و لاستیک بررسی و آن را به عنوان پیشنهاد برای جداسازی ارائه کرده‌اند [۱۳]. دانیال<sup>۸</sup> و همکارانش سیستم لایه خاک مسلح به ژئوگرید جهت جداسازی سازه پیشنهاد دادند و مدعی شدند که به کارگیری این سیستم با ضخامت یک دهم عرض فونداسیون و دو لایه ژئوگرید مفیدترین نتایج را حاصل می‌کند [۱۴]. جستجو در تحقیقات مشابه نشان می‌دهد که این موضوع نظر بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده و در چند سال اخیر مقالات متعددی در جنبه‌های گوناگون جداسازی ژئوتکنیکی منتشر شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به مراجع [۱۵] تا [۲۱] مراجعه نمود.

## ۲- روش پیشنهادی برای جداسازی ژئوتکنیکی

در پژوهش‌های اشاره شده عمدتاً تمرکز اصلی بر روی رفتار دینامیکی و مکانیکی خاک یا مصالح مخلوط ماسه و لاستیک از منظر ژئوتکنیکی بوده و عملکرد لرزه‌ای سازه با جزئیات بررسی نشده است. نکته مهم در پیشنهادها فوق، نیاز به جایگزینی ضخامت نسبتاً زیادی از خاک زیر فونداسیون می‌باشد. این ضخامت باید در حدی باشد که بتواند امواج زلزله را مستهلک کند. از این رو یکی از ایرادات اصلی این قبیل پیشنهادها، هزینه بالای اصلاح و تعویض خاک زیر فونداسیون در وسعت و ضخامت قابل توجه بوده که عملاً آن را از حیث اجرایی بودن غیر قابل توجیه می‌کند.

<sup>3</sup> Tsiavos

<sup>4</sup> Polythene

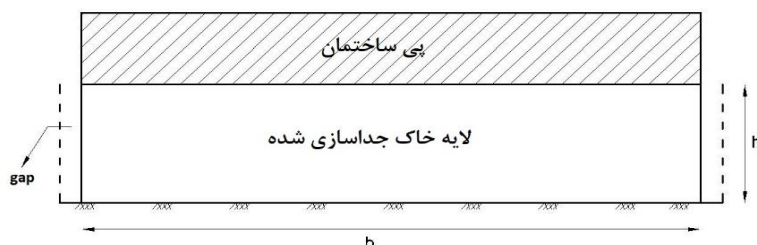
<sup>5</sup> Pistolas

<sup>6</sup> Brunet

<sup>7</sup> Manohar

<sup>8</sup> Dhanya

ایده اصلی این مقاله، کاهش ضخامت لایه جداساز ژئوتکنیکی از چند متر به کمتر از ۱ متر با ایجاد درز پیرامونی می باشد. در واقع وجود درز انقطاع در اطراف خاک زیر فونداسیون در عمقی مشخص باعث می شود که لایه مذکور قابلیت تغییر شکل های برشی را داشته و بدین ترتیب به دلیل سختی جانبی کم و میرایی نسبتا مناسب، دامنه شتاب نوسان ورودی سازه به طور قابل توجهی کاهش یابد. شکل مفهومی اولیه از جداساز پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: مقطعی از جداساز پیشنهادی.

همانطور که در شکل ۱ مشخص شده است، فاصله درز پیرامونی در لایه خاک جداسازی شده باعث می شود که لایه خاک حرکت جانبی آزاد داشته باشد. این درز توسط مصالح انعطاف پذیر پر می گردد تا ضمن جلوگیری از مشکلات اجرایی، مانعی برای حرکت ایجاد نشود. در این پژوهش سه عامل به عنوان اصلی تأثیرگذار در رفتار جداساز پیشنهادی منظور شده و اثر آنها بررسی شده است. این عوامل عبارتند از: ۱- نوع مصالح خاک جداسازی شده که ماسه ساده و مخلوط ماسه-لاستیک می باشد، ۲- عرض درز پیرامونی، ۳- ضخامت لایه خاک جداسازی شده. در ادامه روش مدلسازی و ارزیابی جداساز پیشنهادی تشریح شده است.

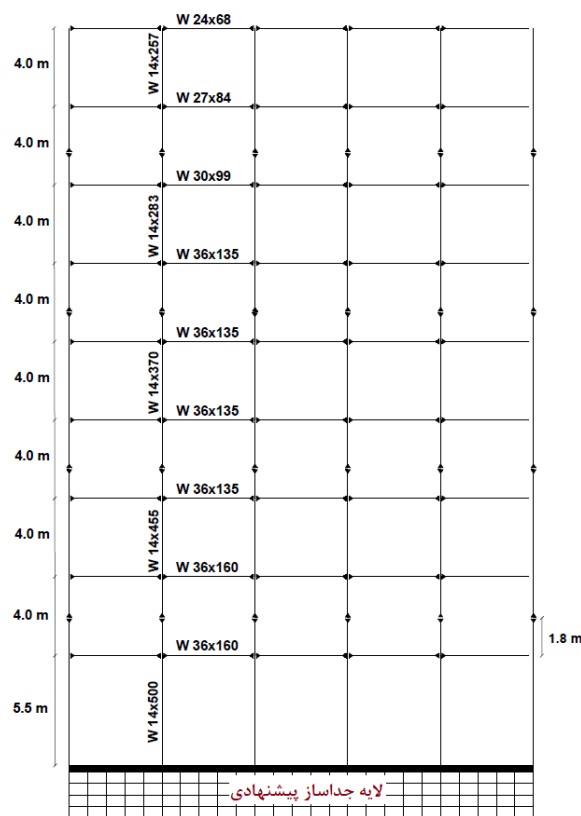
### ۳- جزئیات مدل سازی

برای تعریف مدل ها، علاوه بر مدل مرجع که دارای پایه بدون جداسازی شده می باشد، مدل های مقایسه ای با تغییر پارامترهای ارتفاع لایه جداساز ( $h$ )، اندازه درز پیرامونی ( $gap$ )، و نوع مصالح لایه جداساز مطابق جدول ۱ تعریف شده اند.

جدول ۱: نام گذاری مدل ها و معرفی پارامترها

۱ متر		۰/۵ متر		ضخامت جداساز
10 cm	5 cm	10 cm	5 cm	عرض درز پیرامونی
S2-10	S2-5	S1-10	S1-5	جداساز ماسه ای
R2-10	R2-5	R1-10	R1-5	جداساز RSM

با توجه به جدول ۱، از ۸ مدل برای منظور کردن سه پارامتر ۱- ضخامت لایه جداساز، ۲- عرض درز پیرامونی و ۳- نوع مصالح جداساز استفاده گردیده است. در شکل ۲ نمایی از قرارگیری سازه بر روی لایه جداساز پیشنهادی نشان داده شده است.



شکل ۲: مدل سازه‌ای بر روی لایه جداساز و جزئیات مقاطع اعضای قاب سازه‌ای.

### ۳-۱- جزئیات مدلسازی سازه

هندسه مدل سازه‌ای به کار رفته در این پژوهش، از مدل ارائه شده در مرجع [۲۲] الهام گرفته شده است، با این تفاوت که طبقه زیرزمین حذف گردیده است. سازه فوق مجدداً در نرم افزار ETABS مدل‌سازی و طراحی گردیده و ضوابط آیین‌نامه‌های طراحی (مبحث دهم مقررات ملی ساختمان) برای آن کنترل شده است. سیستم باربر جانبی ساختمان قاب خمشی بوده و بمنظور اجتناب از کمانش دومحوری در ستون‌های انتهایی، اتصال تیر به آن ستون ساده می‌باشد. بنابراین چرخش در محل تلاقی تیرهای انتهایی به ستون کناری آزاد شده اند.

این سازه دارای ۹ طبقه فولادی با ۵ دهانه به اندازه ۹/۱۵ متر در هر دوراستا (پلان مربعی) می‌باشد. ارتفاع طبقه همکف ۵/۵ متر و ارتفاع طبقات بالایی برابر ۴ متر می‌باشد. محل تغییر مقطع ستون‌ها در ابتدای هر دو طبقه به فاصله ۱/۸ متری از تراز طبقه مورد نظر انجام می‌پذیرد و تیرها در هر طبقه دارای مقطع یکسانی هستند. جزئیات مقاطع تیر و ستون‌ها در شکل ۲ قابل مشاهده می‌باشد.

سقفها از نوع دال بتنی تخت بوده و دیافراگم صلب در نظر گرفته شده است. جرم لرزه‌ای طبقات براساس جرم قاب‌ها، دال طبقات، تأسیسات، پارتیشن‌ها، بام و تمام محتویات محاسبه شده و در ادامه آورده شده است. جرم لرزه‌ای طبقه اول برابر  $1101 \times 10^6$  kg و طبقه‌های دوم تا هشتم برابر  $9189 \times 10^5$  kg به ازاء هر طبقه و طبقه نهم برابر  $9100 \times 10^5$  kg می‌باشد. قاب نمایش داده شده در شکل ۲ نماینده یکی از دو قاب باربر جانبی در آن راستا است؛ لذا، جرم‌های ذکر شده نصف شده و در مدلسازی نرم‌افزار به سازه اعمال شده است.

سازه بصورت قاب دوبعدی با ۳ درجه آزادی (راستای افق و قائم و چرخش حول محور عمود بر صفحه) در نرم افزار OpenSees مدل شده است. جرم‌های طبقات در گره‌های محل اتصال تیر و ستون اعمال شده و این گره‌ها در راستای افقی به یکدیگر مقید شده‌اند تا فرضیات دیافراگم صلب برقرار باشد. مقاطع تیرها و ستون‌ها با دستور fiber در نرم‌افزار تعریف شده‌اند. دو مصالح فولادی با تنش

Fy فولاد در ستون‌ها برابر 345 MPa و در تیرها برابر 248 MPa در نظر گرفته شده است. برای تیرها و ستون‌ها مدول الاستیسیته فولاد برابر 200GPa تعریف شده‌اند که مشخصات ذکر شده با استفاده از دستور مصالح (Giuffre-Menegotto-Pinto) Steel02 اعمال شده است. این مصالح یک رفتار دوخطی و متقارن در کشش و فشار از فولاد را ایجاد می‌کند که انتقال از ناحیه خطی به غیرخطی بصورت منحنی بوده و شکستگی ندارد. تیر و ستون‌ها با استفاده از دستور المان dispBeamColumn معرفی و مقاطع از قبل تعریف شده به آن‌ها اختصاص می‌یابد. این دستور برای ایجاد المان تیر و ستون غیرخطی با اساس روابط جابجایی می‌باشد. استفاده از این المان سبب می‌شود تا بتوان از پلاستیسیته گسترده در طول المان استفاده نمود.

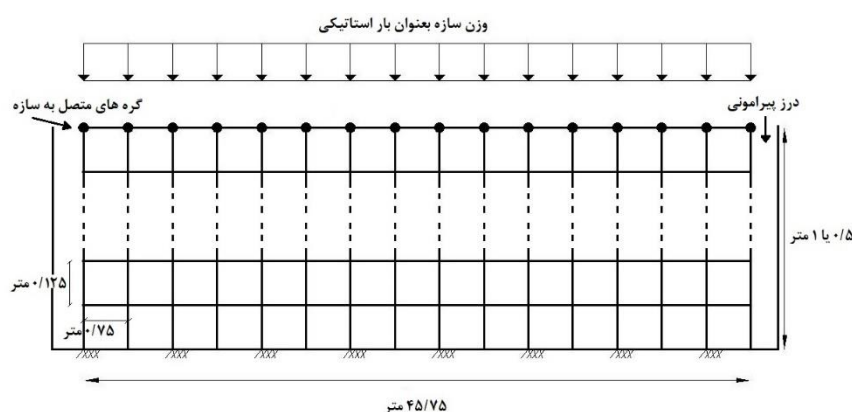
## ۲-۳- جزئیات مدل‌سازی لایه جداساز

در این بخش به معرفی پارامترهای استاتیکی و دینامیکی مصالح استفاده شده در لایه جداساز و سپس نحوه مدل‌سازی آن‌ها پرداخته می‌شود. در این مطالعه دو نوع مصالح بعنوان لایه جداساز در زیر ساختمان بررسی شده است: مصالح نوع اول ماسه و نوع دوم مخلوط ماسه و ۳۰٪ وزنی خرده لاستیک (RSM30%). خصوصیات مقاومت برشی، مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و ... توسط محققان زیادی مورد بررسی و پژوهش قرار گرفته است. در این پژوهش مشخصات مکانیکی و دینامیکی لایه‌های جداساز، از تحقیقات Pistolas و همکارانش [۹ و ۸] برداشت شده است. مقادیر این پارامترها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصات مکانیکی و دینامیکی ماسه و RSM30% [۹ و ۸]

$G_0$ [MPa]	$c$ [kPa]	$\phi$ [deg]	$\nu$	$\rho$ [kN/m <sup>3</sup> ]	
۹۷/۱۷	۲۰	۴۲/۳	۰/۴۳	۱۶/۱	ماسه ساده
۲۵/۳۹	۳۷	۲۵/۶	۰/۳۹	۱۲/۳	RSM30%

لایه جداساز بصورت یک مدل دوبعدی با دو درجه آزادی ایجاد شده است. پهنای لایه جداساز به اندازه پهنای ساختمان، ۴۵/۷۵ متر در نظر گرفته شده و ارتفاع آن برابر دو مقدار مختلف ۰/۵ و ۱/۰ متر می‌باشد، تا اثرات تغییر ارتفاع لایه جداساز در رفتار دینامیکی سازه بررسی شود. المان‌های لایه جداساز در نرم‌افزار OpenSees با المان کرنش مسطح<sup>۹</sup> ۴ نقطه‌ای quad مدل شده‌اند. مش‌بندی قسمت لایه جداساز باید براساس مفهوم ایجاد محیط مناسب برای انتشار موج برشی در یک حداکثر فرکانس باشد تا تعداد المان کافی در یک طول موج از موج برشی انتخابی قرار داشته باشد. ابعاد المان‌های quad در راستای افق برابر ۰/۷۵ متر و در راستای قائم برابر ۰/۱۲۵ متر در نظر گرفته شده تا علاوه بر ارضای مفهوم کافی بودن تعداد المان در یک طول موج [۲۴]، بتواند رفتار مناسب لایه جداساز را با تغییر در ارتفاع به خوبی نمایش داده شود. در شکل ۳ مقطعی از لایه جداساز آورده شده و ابعاد مش‌بندی بر روی آن مشخص گردیده است.



شکل ۳: ابعاد مش‌بندی مدل لایه جداساز.

<sup>۹</sup>Plane Strain

گره‌هایی که در یک تراز ارتفاعی قرار دارند، در جهت افق به یکدیگر مقید شده‌اند تا یک رفتار برش ساده را فراهم کنند. با استفاده از دستور quad می‌توان علاوه بر مدل کردن ساختار توزیع المان‌های خاک، وزن مخصوص خاک را به المان‌ها اختصاص داده و همچنین بار ناشی از وزن ساختمان را به بالایی‌ترین ردیف المان‌های لایه جداساز، بصورت تنش سطحی وارد نمود.

رفتار لایه جداساز ماسه‌ای و RSM، با استفاده از دستور مصالح PressureDependMultiYield به نرم‌افزار اعمال می‌شود. این دستور بمنظور معرفی و ایجاد یک مصالح الاستو-پلاستیک ژئوتکنیکی می‌باشد که مشخصات رفتاری مهم از خاک‌های حساس به فشار را تحت بارگذاری‌های عمومی شبیه‌سازی می‌کند. از مشخصات رفتاری این مصالح می‌توان در نظرگرفتن کرنش ناشی از در هم فرورفتن دانه‌های خاک، کرنش ناشی از افزایش حجم مدل در اثر برش اعمالی و روانگرایی که معمولاً تحت بارگذاری چرخه‌ای در ماسه و سیلت رایج است نام برد [۲۵]. در این مطالعه، از اثرات انقباض و همچنین بدلیل فرض زهکشی لایه جداساز قبل از اجراء، از روی دادن روانگرایی صرف‌نظر شده است.

در هنگام اعمال بار ثقلی، رفتار این مصالح بصورت الاستیک خطی می‌باشد، اما با بارگذاری دینامیکی متعاقب، پاسخ‌های تنش-کرنش بصورت الاستو-پلاستیک می‌باشند. به منظور به کار گرفتن این رفتار، از دستور updateMaterialStage پس از اعمال بار ثقلی (استاتیکی) استفاده شده است. در ابتدا چند گام اولیه تحت بار استاتیکی و بصورت الاستیک تحلیل شده و سپس با تغییر دادن مقدار این دستور از حالت صفر به ۲ رفتار الاستو-پلاستیک اعمال می‌شود. در این حالت نرم‌افزار مقادیر مقاومت برشی و مدول حجمی را با فشار محصورشدگی مؤثر که در آخرین مرحله از تحلیل استاتیکی به دست آمده محاسبه کرده و این مقدار برای ادامه تحلیل ثابت می‌ماند. در صورتی که مقدار این دستور برابر یک قرار داده شود، تمام مشخصات مورد نیاز برای تحلیل در هر مرحله محاسبه شده و برای مرحله بعد از آن استفاده می‌شود که می‌تواند زمان تحلیل را افزایش دهد. صفحات گسیختگی در این مطالعه از نوع مدل دراکر-پراگر می‌باشد.

### ۳-۳- جزئیات مدل‌سازی درز پیرامونی

در دوطرف خاک مدل شده درز یا فضای خالی محدود در نظرگرفته شده تا لایه جداساز بتواند رفتار برشی مورد نظر را انجام دهد و از انتقال تحریکات زلزله به بالا جلوگیری کند. در عمل این درز با استفاده از مواد انعطاف‌پذیر پر می‌شود تا ماسه تحت سربار و وزن خود محصوریت داشته باشد، اما درعین حال ممانعت جانبی برای حرکت برشی خاک تحت زلزله ایجاد نکند. پارامتر مقایسه‌ای در خصوص درزهای پیرامونی، عرض درز می‌باشد. این درز برای فراهم کردن فضایی به منظور حرکت برشی لایه خاک ایجاد شده است، که با تغییر در پارامتر اندازه درز در دو مقدار ۵ و ۱۰ سانتی‌متر به بررسی و مشاهده میزان تأثیرگذاری این پارامتر در رفتار دینامیکی مدل پرداخته می‌شود.

در اطراف لایه جداساز، در تراز هر المان quad، یک رفتار فنر مانند با استفاده از دستور Elastic-Perfectly Plastic Gap (ElasticPPGap) و با المان به طول صفر (zeroLength) مدل شده که نماینده درز پیرامونی می‌باشد و به لایه جداساز اجازه رفتار برشی می‌دهد. رفتار فنر بدین صورت است که در ابتدا به اندازه درز تعیین شده هیچ ممانعتی برای حرکت وجود ندارد و پس از آن به سختی بی‌نهایت (بسیار زیاد) میل می‌کند تا حرکت لایه جداساز محدود شود (مشابه کلید برشی)؛ لذا، برای دستیابی به این رفتار، مقادیر سختی و حد گسیختگی به عنوان پارامترهای ورودی این دستور در نرم‌افزار اعداد بزرگ وارد می‌شود. همچنین پارامتر ورودی اندازه درز پیرامونی دو مقدار متغیر ۵ و ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است تا تأثیرگذاری این پارامتر بر رفتار دینامیکی لایه جداساز و سازه مشاهده شود.

### ۳-۴- روش تحلیل و انتخاب شتابنگاشت‌ها

برای ارزیابی رفتار لایه جداساز و سازه روی آن از روش تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی استفاده شده است. بدین منظور از شتاب‌نگاشت‌های پیشنهادی [۲۶] FEMAP695 (ATC-63) استفاده شده است. این شتاب‌نگاشت‌ها با توجه به دوره تناوب سازه شاهد (پایه‌های گیردار بدون جداساز) بر اساس روش آیین‌نامه ASCE7-05 نرمال و مقیاس شده‌اند. در جدول ۳ مشخصات شتاب‌نگاشت‌ها و



ضرایب مقیاس ارائه شده است. لازم به ذکر است که این ضرایب مقیاس در تمامی مدل‌ها حفظ شده تا مقایسه معناداری بتوان بین نتایج داشت. برای هر مدل تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی با شتابنگاشت‌های معرفی شده انجام شده و میانگین پاسخ‌های این تحلیل‌ها به عنوان نتیجه نهایی در نظر گرفته شده است.

جدول ۳۰: شتابنگاشت‌های استفاده شده در تحلیل مدل‌ها

ردیف	نام زمین لرزه	نام ایستگاه	بزرگی (ریشتر)	سال وقوع	PGAmx (g)	ضریب مقیاس
۱	Northridge	Beverly Hills - Mulhol	۶/۷	۱۹۹۴	۰/۵۲	۲/۱۹
۲	Northridge	Canyon Country-WLC	۶/۷	۱۹۹۴	۰/۴۸	۱/۸۷
۳	Imperial Valley	El Centro Array #11	۶/۵	۱۹۷۹	۰/۳۸	۲/۵
۴	Kobe, Japan	Shin-Osaka	۶/۹	۱۹۹۵	۰/۳۴	۴/۲۶
۵	Landers	Coolwater	۷/۳	۱۹۹۲	۰/۴۲	۲/۱۶
۶	Loma Perietta	Gilroy Array #3	۶/۹	۱۹۸۹	۰/۵۶	۱/۶۴
۷	San Fernando	LA - Hollywood Stor	۶/۶	۱۹۷۱	۰/۲۱	۴/۲۱

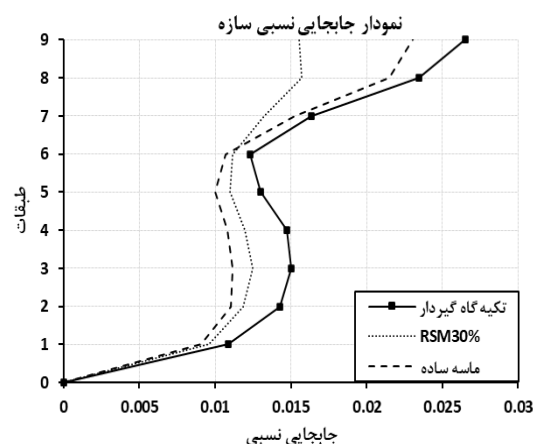
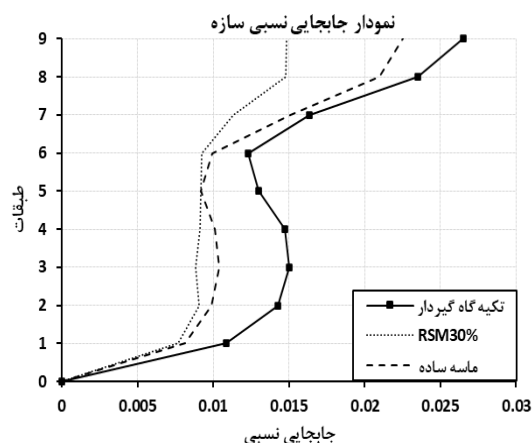
#### ۴- ارزیابی نتایج تحلیل

برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سازه جداسازی شده و سیستم جداساز، پاسخ‌های جابجایی نسبی طبقات، جابجایی جانبی طبقات، نیروی محوری ستون‌های کناری سازه و میزان چرخش مفصل پلاستیک در تیرهای دهانه کناری که عمدتاً می‌توانند دیدگاه مناسبی نسبت به رفتار سازه در اختیار بگذارند، نسبت به پاسخ‌های متناظر سازه مرجع مقایسه شده‌اند. این مقایسه با منظور نمودن اثر پارامترهای جنس لایه جداساز، ضخامت لایه و عرض درز پیرامونی مطابق نام‌گذاری جدول ۱ لحاظ شده است.

با توجه به اینکه نشان دادن نمودارهای مقایسه‌ای برای تمام پاسخ‌های مورد ارزیابی قابل ارائه در این مقاله نمی‌باشد، در ادامه نمودارهای پاسخ حداکثر جابجایی نسبی طبقات و حداکثر چرخش مفصل پلاستیک ارائه و نتایج مقایسه‌ای سایر پاسخ‌ها در جداول ۴ تا ۷ ارائه شده است.

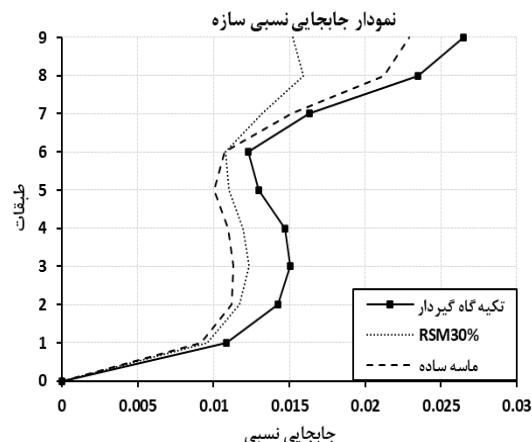
#### ۴-۱- اثر نوع مصالح لایه جداساز

برای ارزیابی اثر نوع مصالح در عملکرد جداساز، دو نوع مصالح شامل ماسه ساده و ماسه مخلوط با ۳۰ درصد خرده لاستیک در نظر گرفته شده است تا به نحوی تأثیر عامل خرده لاستیک در افزایش میرایی و بهبود مشخصات مصالح جداساز ارزیابی گردد. نتایج پاسخ حداکثر جابجایی نسبی طبقات در شکل ۴ نشان داده شده است.



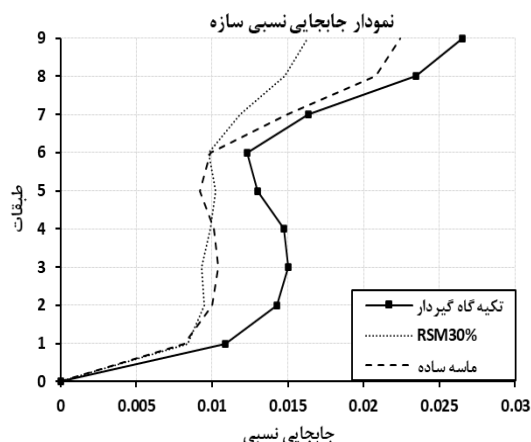
الف) عرض درز پیرامونی ۵ سانتیمتر، ضخامت لایه جداساز ۰,۵ متر

مدل‌های R1-5 و S1-5



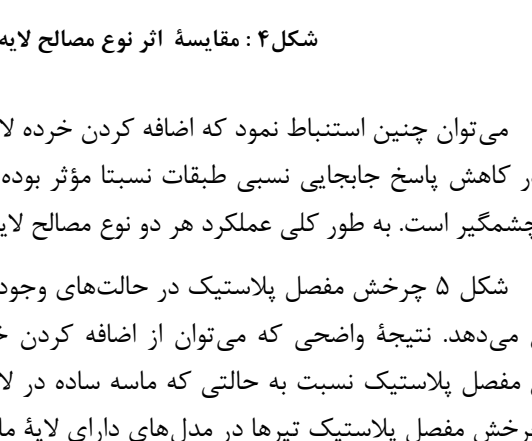
ب) عرض درز پیرامونی ۱۰ سانتیمتر، ضخامت لایه جداساز ۰,۵ متر

مدل‌های R1-10 و S1-10



ج) عرض درز پیرامونی ۵ سانتیمتر، ضخامت لایه جداساز ۱ متر

مدل‌های R2-5 و S2-5



د) عرض درز پیرامونی ۱۰ سانتیمتر، ضخامت لایه جداساز ۱ متر

مدل‌های R2-5 و S2-5

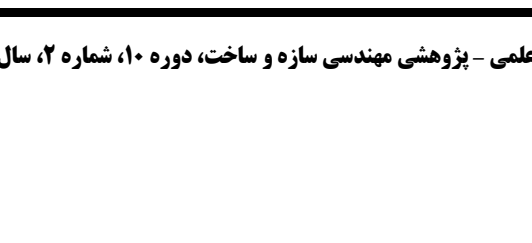
شکل ۴: مقایسه اثر نوع مصالح لایه جداساز در پاسخ حداکثر جابجایی نسبی طبقات.

می‌توان چنین استنباط نمود که اضافه کردن خرده لاستیک به ماسه نسبت به حالتی که ماسه ساده در لایه جداساز استفاده شده باشد، در کاهش پاسخ جابجایی نسبی طبقات نسبتاً مؤثر بوده است. هر چند این تأثیر در طبقات میانی و پایین کم بوده ولی در طبقات بالایی چشمگیر است. به طور کلی عملکرد هر دو نوع مصالح لایه جداساز نسبت به سازه مرجع تا حد زیادی قابل قبول می‌باشد.

شکل ۵ چرخش مفصل پلاستیک در حالت‌های وجود تکیه‌گاه گیردار، لایه ماسه و لایه مخلوط ماسه و خرده لاستیک در زیر پی را نشان می‌دهد. نتیجه واضحی که می‌توان از اضافه کردن خرده لاستیک به ماسه گرفت، تأثیر چشم‌گیری است که در کاهش پاسخ چرخش مفصل پلاستیک نسبت به حالتی که ماسه ساده در لایه جداساز استفاده شده باشد بدست می‌آید، و در تمامی حالت‌ها و طبقات پاسخ چرخش مفصل پلاستیک تیرها در مدل‌های دارای لایه ماسه و خرده لاستیک بهتر از لایه ماسه ساده رفتار نموده‌اند. در عین حال اثر چشم‌گیر آن بیشتر متوجه طبقات فوقانی بوده است. مصالح جداساز در پاسخ‌های جابجایی جانبی طبقات و نیروی محوری ستون‌ها تأثیر چندانی ندارد.

الف) عرض درز پیرامونی ۵ سانتیمتر، ضخامت لایه جداساز ۰,۵ متر

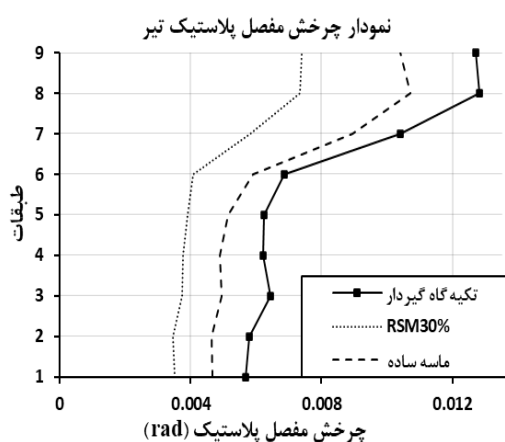
مدل‌های R1-5 و S1-5



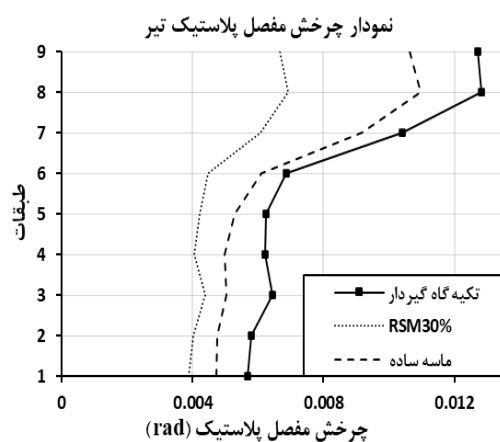
ب) عرض درز پیرامونی ۱۰ سانتیمتر، ضخامت لایه جداساز ۰,۵ متر

مدل‌های R1-10 و S1-10





د) عرض درز پیرامونی ۱۰ سانتیمتر، ضخامت لایه جداساز ۱ متر  
مدل های R2-5 و S2-5

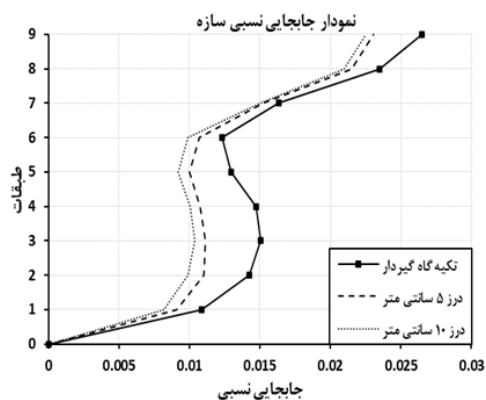


ج) عرض درز پیرامونی ۵ سانتیمتر، ضخامت لایه جداساز ۱ متر  
مدل های R2-5 و S2-5

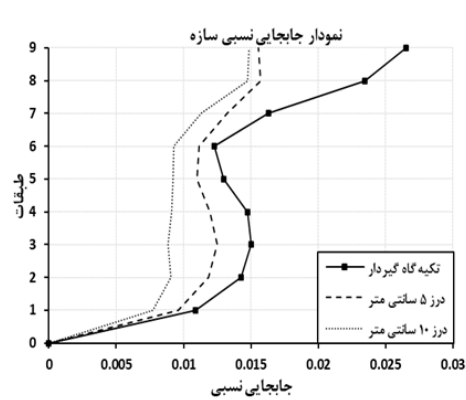
شکل ۵: مقایسه اثر نوع مصالح لایه جداساز در پاسخ حداکثر چرخش مفصل پلاستیک.

#### ۴-۲- اثر اندازه عرض درز پیرامونی

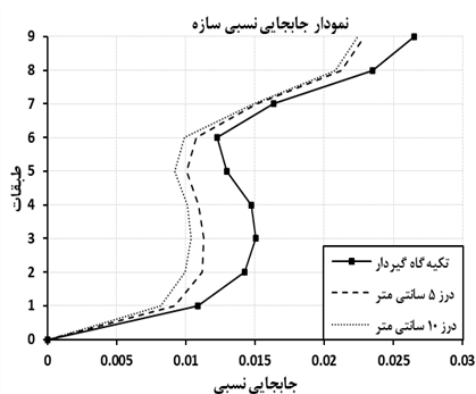
در شکل ۶ مقایسه پاسخ حداکثر جابجایی نسبی طبقات برای بررسی اثر اندازه عرض درز پیرامونی نشان داده شده است. همانطور که در نمودارها مشاهده می شود اثر اندازه عرض درز پیرامونی، در کاهش پاسخ جابجایی نسبی طبقات تأثیرگذار و مهم بوده است. این تأثیر برای حالت هایی که نوع مصالح RSM است نسبت به زمانی که نوع مصالح ماسه ساده باشد بیشتر است.



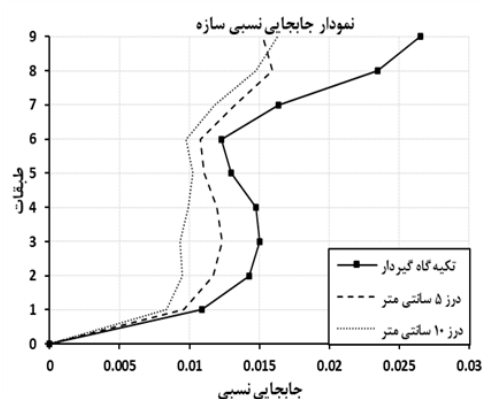
ب) مصالح لایه جداساز ماسه ساده، ضخامت لایه جداساز ۰.۵ متر  
مدل های S1-10 و S1-5



الف) مصالح لایه جداساز RSM، ضخامت لایه جداساز ۰.۵ متر  
مدل های R1-10 و R1-5

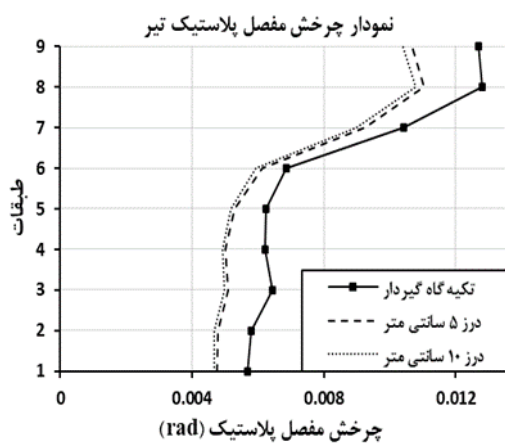


د) مصالح لایه جداساز ماسه ساده، ضخامت لایه جداساز ۱ متر  
مدل های S2-10 و S2-5

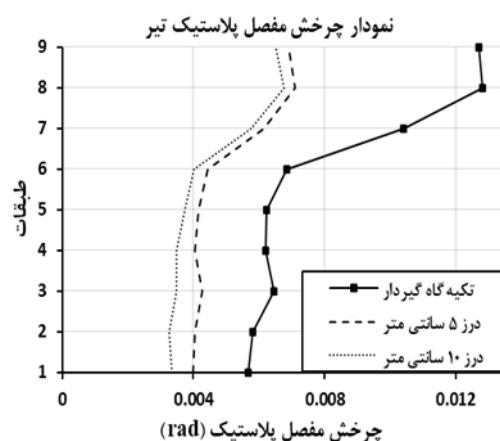


ج) مصالح لایه جداساز RSM، ضخامت لایه جداساز ۱ متر  
مدل های R2-10 و R2-5

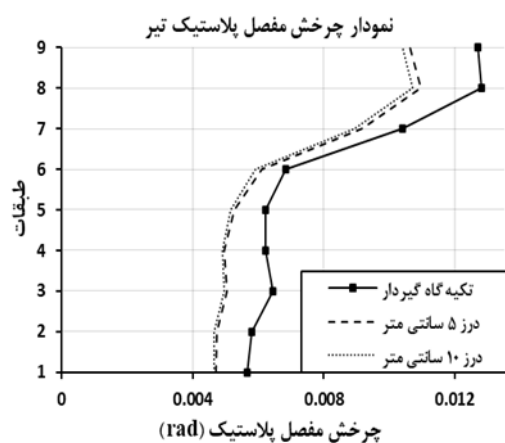
شکل ۶: مقایسه اثر اندازه عرض درز پیرامونی در پاسخ حداکثر جابجایی نسبی طبقات.



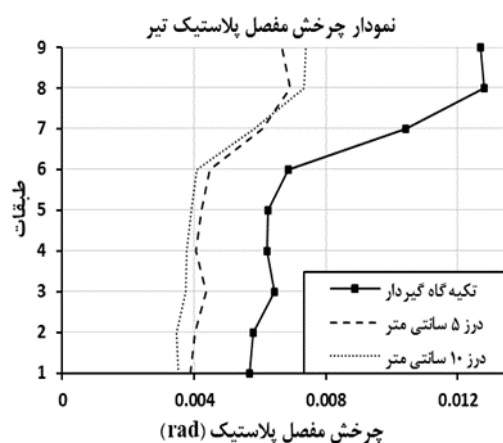
ب) مصالح لایه جداساز ماسه ساده، ضخامت لایه جداساز ۰.۵ متر  
مدل های S1-10 و S1-5



الف) مصالح لایه جداساز RSM، ضخامت لایه جداساز ۰.۵ متر  
مدل های R1-10 و R1-5



د) مصالح لایه جداساز ماسه ساده، ضخامت لایه جداساز ۱ متر  
مدل های S2-10 و S2-5

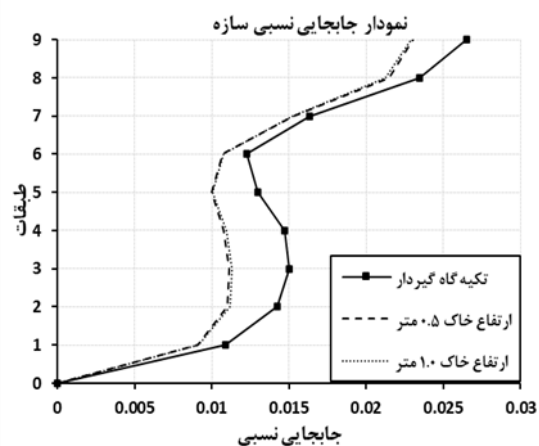


ج) مصالح لایه جداساز RSM، ضخامت لایه جداساز ۱ متر  
مدل های R2-10 و R2-5

شکل ۷: مقایسه اثر اندازه عرض درز پیرامونی در پاسخ حداکثر چرخش مفصل پلاستیک.

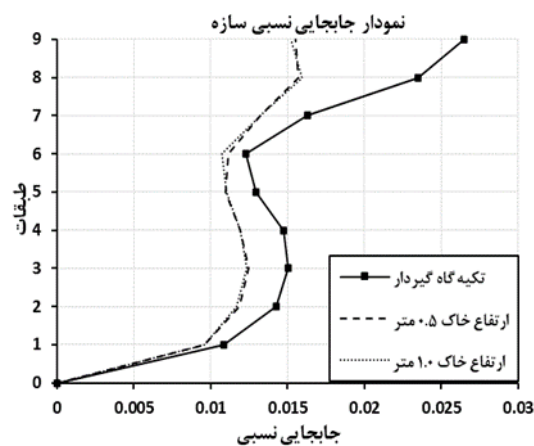
## ۳-۴- اثر ضخامت لایه جداساز

در شکل ۸ مقایسه پاسخ جابجایی نسبی طبقات برای بررسی اثر ضخامت لایه جداساز نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تغییر در اندازه ضخامت لایه جداساز در پاسخ جابجایی نسبی طبقات در هر دو حالت جداساز با مصالح RSM و مصالح ماسه ساده تأثیر چندانی نداشته است.



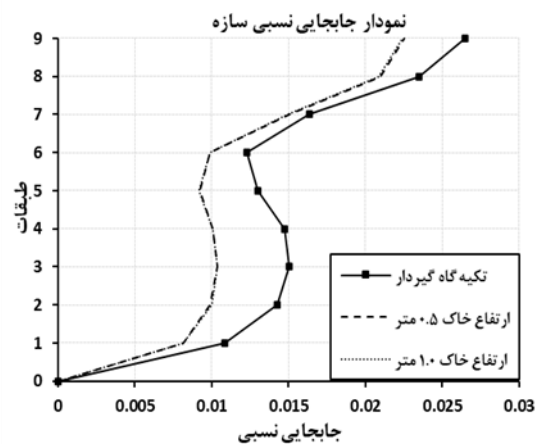
الف) مصالح لایه جداساز RSM، عرض درز پیرامونی ۵ سانتی‌متر

مدل‌های S1-5 و S2-5



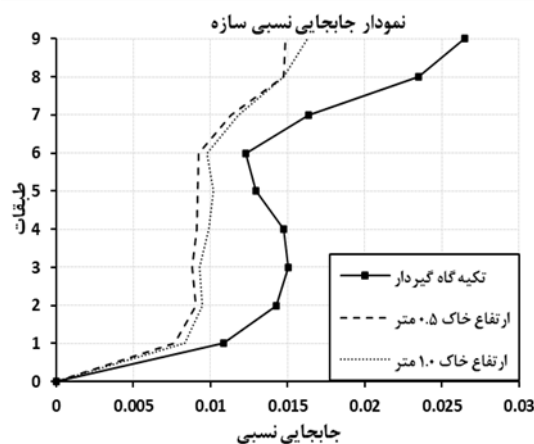
ب) مصالح لایه جداساز ساده، عرض درز پیرامونی ۵ سانتی‌متر

مدل‌های R1-5 و R2-5



ج) مصالح لایه جداساز ساده، عرض درز پیرامونی ۱۰ سانتی‌متر

مدل‌های S1-10 و S2-10

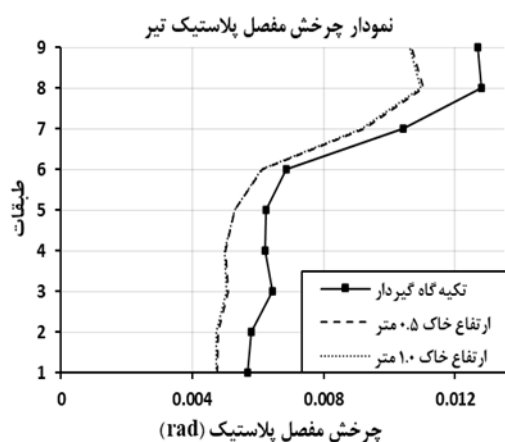


د) مصالح لایه جداساز RSM، عرض درز پیرامونی ۱۰ سانتی‌متر

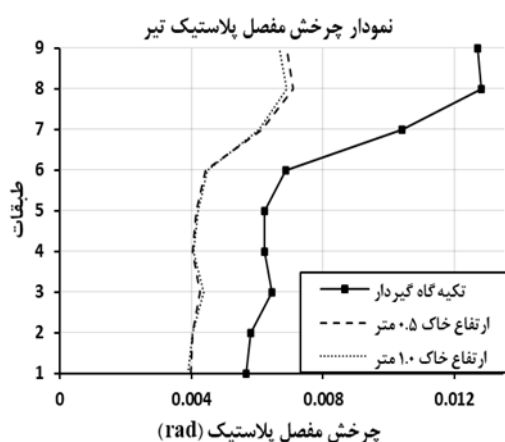
مدل‌های R1-10 و R2-10

شکل ۸: مقایسه اثر ضخامت لایه جداساز در پاسخ حداکثر جابجایی نسبی طبقات.

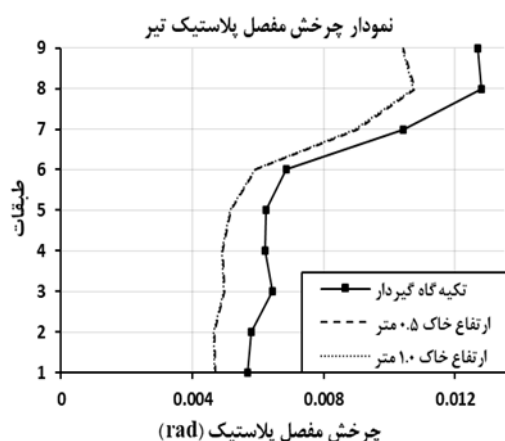
در شکل ۹ مقایسه پاسخ حداکثر چرخش مفصل پلاستیک تیرها برای بررسی اثر ضخامت لایه جداساز نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تغییر در اندازه ارتفاع لایه جداساز در پاسخ چرخش مفصل پلاستیک تیرها در هر دو حالت جداساز با نوع مصالح RSM و نوع مصالح ماسه ساده تأثیر چندانی نداشته است.



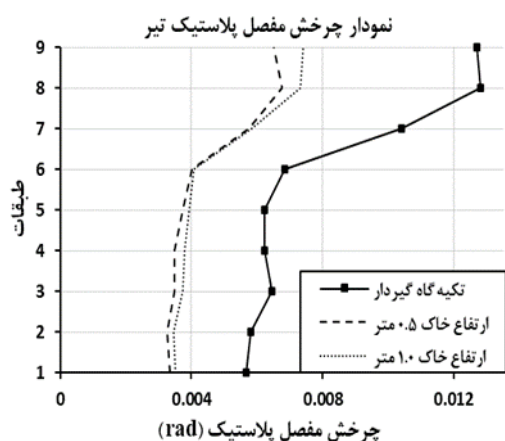
ب) مصالح لایه جداساز ماسه ساده، عرض درز پیرامونی ۵ سانتی متر  
مدل های S1-5 و S2-5



الف) مصالح لایه جداساز RSM، عرض درز پیرامونی ۵ سانتی متر  
مدل های R1-5 و R2-5



د) مصالح لایه جداساز ماسه ساده، عرض درز پیرامونی ۱۰ سانتی متر  
مدل های S1-10 و S2-10



ج) مصالح لایه جداساز RSM، عرض درز پیرامونی ۱۰ سانتی متر  
مدل های R1-10 و R2-10

شکل ۹: مقایسه اثر ضخامت لایه جداساز در پاسخ حداکثر چرخش مفصل پلاستیک تیرها.

#### ۴-۴- بررسی عملکرد سیستم جداساز پیشنهادی در کاهش نیازهای لرزه ای سازه

در این قسمت جهت ارزیابی عملکرد سیستم لایه جداساز پیشنهادی، مقدار درصد کاهش پاسخ های حداکثر رخ داده در سازه دارای لایه جداساز نسبت به پاسخ های متناظر در سازه بدون لایه جداساز استخراج و در جداول ۴ تا ۸ ارائه شده است.

در جدول ۴ حداکثر میزان کاهش پاسخ جابجایی نسبی طبقات که در تمامی حالت ها در طبقه بام رخ داده است، ارائه شده است. می توان مشاهده نمود که بطور مشخص جداساز RSM بهتر از جداساز ماسه ساده عمل کرده و درصدهای کاهش برای حداکثر این پاسخ، بطور قابل ملاحظه ای بیشتر می باشد. اما از طرفی ضخامت لایه جداساز و عرض درز پیرامونی نیز خیلی تأثیرگذار نبوده است. لذا مهم ترین پارامتر در کاهش حداکثر پاسخ جابجایی نسبی طبقات، نوع مصالح می باشد.

جدول ۴: حداکثر میزان کاهش پاسخ جابجایی نسبی طبقات (%)

عرض درز لایه جداساز برابر ۱۰cm		عرض درز لایه جداساز برابر ۵cm		
ضخامت لایه جداساز ۱m	ضخامت لایه جداساز ۰/۵m	ضخامت لایه جداساز ۱m	ضخامت لایه جداساز ۰/۵m	
۳۸/۴۸	۴۳/۹۴	۳۹/۸۲	۴۰/۷۶	جداساز RSM
۱۵/۳۴	۱۴/۹۵	۱۳/۵۳	۱۳/۰۰	جداساز ماسه ساده

مشابه پاسخ جابجایی جانبی نسبی طبقات می توان مشاهده نمود که پارامتر نوع مصالح نسبت به سایر عوامل مؤثرتر بوده است. پارامتر عرض درز پیرامونی تنها در حالت هایی که نوع مصالح جداساز RSM بوده تأثیر داشته و در جداساز با مصالح ماسه ساده خیلی نقش مؤثری ایفا نکرده است. تغییر در ضخامت لایه جداساز عامل مؤثری نبوده است. در این حالت هم مشابه قبل مهمترین عامل در تغییر نتایج، نوع مصالح بوده است.

جدول در جدول ۵ حداکثر میزان کاهش پاسخ جابجایی جانبی طبقات که در تمامی حالت ها در طبقه بام رخ داده، ارائه شده است. مشابه پاسخ جابجایی جانبی نسبی طبقات می توان مشاهده نمود که پارامتر نوع مصالح نسبت به سایر عوامل مؤثرتر بوده است. پارامتر عرض درز پیرامونی تنها در حالت هایی که نوع مصالح جداساز RSM بوده تأثیر داشته و در جداساز با مصالح ماسه ساده خیلی نقش مؤثری ایفا نکرده است. تغییر در ضخامت لایه جداساز عامل مؤثری نبوده است. در این حالت هم مشابه قبل مهمترین عامل در تغییر نتایج، نوع مصالح بوده است.

جدول ۵: حداکثر میزان کاهش پاسخ جابجایی جانبی طبقات (%)

عرض درز لایه جداساز برابر ۱۰cm		عرض درز لایه جداساز برابر ۵cm		
ضخامت لایه جداساز ۰/۵m	ضخامت لایه جداساز ۱m	ضخامت لایه جداساز ۰/۵m	ضخامت لایه جداساز ۱m	
۳۶/۸۲	۳۹/۹۸	۲۷/۳۶	۲۷/۶۲	جداساز RSM
۱۷/۸۴	۱۷/۴۶	۱۶/۲۲	۱۵/۷۲	جداساز ماسه ساده

در جدول ۶ حداکثر میزان کاهش پاسخ نیروی محوری ستون های سازه که در تمامی حالت ها در پایین ترین طبقه رخ داده، ارائه شده است. با دقت در نتایج مشهود است که پارامترهای ضخامت لایه و نوع مصالح جداساز تأثیر زیادی در کاهش این پاسخ نداشته اند. اما افزایش اندازه عرض درز پیرامونی تنها در جداساز های RSM سبب کاهش پاسخ نیروی محوری ستون ها در طبقه پایینی شده است. بطور کلی در مقایسه با سایر پاسخ های بدست آمده، نیروی محوری ستون های سازه کمترین تأثیر پذیری را داشته اند.

جدول ۶: حداکثر میزان کاهش پاسخ نیروی محوری ستون های سازه (%)

عرض درز لایه جداساز برابر ۱۰cm		عرض درز لایه جداساز برابر ۵cm		
ضخامت لایه جداساز ۰/۵m	ضخامت لایه جداساز ۱m	ضخامت لایه جداساز ۰/۵m	ضخامت لایه جداساز ۱m	
۱۴/۵۶	۱۸/۴	۵/۳۷	۹/۴۶	جداساز RSM
۹/۷۴	۱۰/۰۸	۷/۸۴	۸/۵۹	جداساز ماسه ساده

مشاهده می شود که مهم ترین عامل در کاهش حداکثر این پاسخ نوع مصالح بوده که جداساز RSM بهتر از جداساز ماسه ساده عمل کرده است. عوامل ضخامت لایه جداساز و عرض درز پیرامونی تأثیر زیادی در نتایج نداشته اند. لذا مهم ترین پارامتر در کاهش حداکثر پاسخ چرخش مفصل پلاستیک تیرها، نوع مصالح می باشد.

جدول در جدول ۷ حداکثر میزان کاهش پاسخ چرخش مفصل پلاستیک تیرهای سازه که در تمامی حالت ها در طبقه بام رخ داده است ارائه شده است. مشاهده می شود که مهم ترین عامل در کاهش حداکثر این پاسخ نوع مصالح بوده که جداساز RSM بهتر از جداساز ماسه ساده عمل کرده است. عوامل ضخامت لایه جداساز و عرض درز پیرامونی تأثیر زیادی در نتایج نداشته اند. لذا مهم ترین پارامتر در کاهش حداکثر پاسخ چرخش مفصل پلاستیک تیرها، نوع مصالح می باشد.

جدول ۷: حداکثر میزان کاهش پاسخ چرخش مفصل پلاستیک تیرهای سازه (%)

عرض درز لایه جِداساز برابر ۱۰cm		عرض درز لایه جِداساز برابر ۵cm		
ضخامت لایه جِداساز ۱m	ضخامت لایه جِداساز ۰/۵m	ضخامت لایه جِداساز ۱m	ضخامت لایه جِداساز ۰/۵m	
۴۲/۲۷	۴۷/۲۶	۴۶/۰۸	۴۴/۵۷	جِداساز RSM
۱۶/۳۲	۱۵/۸۳	۱۴/۴۷	۱۳/۷۷	جِداساز ماسه ساده

در نهایت با در نظر گیری جمیع پاسخها و جوانب، می توان استنباط نمود که از میان سه پارامتر مورد بررسی، به ترتیب پارامترهای نوع مصالح، اندازه عرض درز پیرامونی و ضخامت لایه تأثیرگذار بوده اند. البته ذکر این نکته لازم است که تغییر مقدار پارامتر عرض درز پیرامونی هر چند ممکن است در نتایج تأثیر چشمگیری نداشته باشد، ولی وجود آن به عنوان شرط لازم برای رفتار جِداساز حیاتی است و عامل اصلی می باشد.

اشاره به این موضوع مهم است که در تحقیق اخیر، اثر گذاری سیستم پیشنهادی بر روی یک سازه میان مرتبه (۹ طبقه) با سیستم قاب خمشی بررسی شده است و هدف اصلی شناخت پتانسیل کلی روش پیشنهادی در کاهش نیازهای لرزه ای ساختمان های کوتاه و میان مرتبه بوده است. مطمئناً برای رسیدن به نتایج واضح تر لازم است که اثرات مختلف از جمله اثر ارتفاع سازه در عملکرد سیستم جِداساز پیشنهادی به طور جزئی تر بررسی گردد. البته این اقدام برای سیستم های مرسوم جِداساز لرزه ای مختلف انجام شده است. به عنوان مثال می توان به تحقیق حسینی و همکاران در رابطه با اثر ارتفاع سازه در دقت روش های تحلیل استاتیکی غیر خطی در سازه های فولادی همراه با جِداسازهای لاستیکی با هسته سربی اشاره نمود [۲۷]. با ایجاد تناظر بین نسبت سختی جِداساز و سازه در سیستم های جِداساز مختلف می توان نتایج به دست آمده را به طور مشابه برای سیستم پیشنهادی تعمیم داد.

#### ۴-۵- بررسی رفتار داخلی سیستم جِداساز

با توجه به تغییر ماهیت خاک و اضافه نمودن لاستیک به آن و همچنین ایجاد درز پیرامونی در لایه خاک مذکور، کنترل گسیختگی خاک و میزان باربری آن در سیستم پیشنهادی مهم می باشد. بدین منظور لازم است که اولاً تنش های نرمال و برشی ایجاد شده در لایه خاک با مدلسازی صحیح، محاسبه گردد. ضمناً تنش گسیختگی خاک با توجه به اثر اندرکنشی تنش های نرمال و برشی و با معیارهای گسیختگی معتبر تعیین گردد و با تنش های موجود مقایسه شود.

در مدل مورد بررسی در این پژوهش، تنش نرمال متوسط ناشی از بارهای ثقیلی برابر ۱/۱ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع می باشد و تنش نرمال حداکثر در حضور نیروهای لرزه ای ناشی از شتابنگاشت های به کار برده شده در تحلیل، ۱/۸ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع است. مقدار تنش برشی حداکثر که در میان ضخامت لایه خاک رخ داده است با در نظر گیری نیروهای جانبی وارد بر سیستم جِداساز برای مدل دارای مصالح ماسه و ضخامت ۱ متر عرض درز پیرامونی ۱۰ سانتیمتر، برابر ۰/۸ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع به دست آمده است. بر اساس معیار موهر کولمب، تنش گسیختگی برشی خاک با توجه به تنش فشاری موجود، برای مصالح ماسه برابر ۱/۶ و برای مصالح مخلوط ماسه و خاک ۰/۸۷ کیلوگرم بر سانتی متر مربع می باشد که بیشتر از تنش های وارده بوده و قابل قبول است. در صورت جواب ندادن مقاومت خاک لایه جِداساز، باید کرنش های برشی و متعاقب آن تنش های برشی را کاهش داد. بدین منظور لازم است که ضخامت لایه خاک کاهش یابد. البته به عنوان راهکاری دیگر می توان اندازه درز پیرامونی را کاهش داد که البته ممکن است در بازدهی سیستم جِداساز در کاهش نیازهای لرزه ای سازه تأثیر منفی بگذارد. همچنین می توان از لایه های ژئوگرید برای تقویت باربری لایه خاک استفاده نمود.

#### ۵- جمع بندی

در این پژوهش سیستم جِداساز لرزه ای-ژئوتکنیکی با استفاده از یک لایه با مصالح ماسه و مخلوط ماسه-لاستیک که قابلیت تغییر شکل برشی دارد، پیشنهاد شده است. برای بررسی عملکرد و اثر گذاری عوامل سیستم جِداساز پیشنهادی، مدل های مختلفی که



پارامترهای نوع مصالح، عرض درز پیرامونی و ضخامت لایه جداساز را لحاظ کرده‌اند، تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی شده و پاسخ‌های مختلفی با هم مقایسه شدند. با ارزیابی نتایج این مقایسه‌ها می‌توان به نتیجه‌گیری زیر اشاره کرد:

۱- سیستم جداساز پیشنهادی فارغ از نوع مصالح به کار رفته و اندازه درز پیرامونی و ضخامت لایه جداساز، در کاهش پاسخ‌های تعیین کننده سطح عملکرد سازه، نظیر جابجایی نسبی طبقات و چرخش مفاصل پلاستیک بسیار تأثیرگذار بوده است. به طوری که در بدترین حالت حدود ۱۶ درصد و در بهترین حالت حدود ۴۰ درصد باعث کاهش پاسخ جابجایی جانبی طبقات شده است. درصدهای کاهش متناظر برای پاسخ جابجایی نسبی طبقات به ترتیب حداقل ۱۳ و حداکثر ۴۴ درصد بوده است. برای پاسخ چرخش مفاصل پلاستیک تیرها در بدترین وضعیت ۱۴ درصد و در بهترین وضعیت ۴۷ درصد کاهش پاسخ مشاهده گردیده است. این مقادیر در مقایسه با سایر سیستم‌های جداسازی که با هزینه‌های بالا و تکنولوژی پیشرفته تولید و به کار برده می‌شوند بسیار مناسب می‌باشد.

۲- در میان حالت‌های مختلفی که برای مقایسه و ارزیابی تأثیرگذاری سیستم پیشنهادی در نظر گرفته شده‌اند، بهترین عملکرد مربوط به سیستم جداساز با مصالح ترکیبی ماسه و خرده لاستیک با ضخامت لایه ۰/۵ متر و عرض درز پیرامونی برابر ۱۰ سانتی‌متر بوده است. در مقابل سیستم جداساز با مصالح ماسه ساده و ضخامت ۰/۵ متر و عرض درز پیرامونی برابر ۵ سانتی‌متر کمترین درصد کاهش را نتیجه داده است.

۳- پارامتر نوع مصالح سیستم جداساز بیشترین تأثیرگذاری را نسبت به دو پارامتر دیگر در پاسخ سازه دارد. البته این تأثیرگذاری در پاسخ‌های جابجایی جانبی طبقات و همچنین نیروی محوری ستون‌ها چشم‌گیر نبوده است. درعین حال جابجایی نسبی طبقات و همچنین پاسخ چرخش مفاصل پلاستیک در تیرها در تمامی طبقات کاملاً مشهود و قابل توجه می‌باشد. از این نظر در ساختمان‌هایی که دارای طبقات زیاد می‌باشند و همچنین در مواردی که رفتار عملکرد سازه به پاسخ چرخش مفاصل پلاستیک وابسته است توصیه می‌شود که از مصالح ترکیبی ماسه و خرده لاستیک استفاده گردد.

۴- پارامتر عرض درز پیرامونی به طور کلی خیلی تأثیرگذار نبوده است، البته این بدان معنی نیست که عدم وجود درز با وجود آن تفاوتی نمی‌کند، بلکه در صورت عدم وجود درز پیرامونی به طور کلی سیستم جداساز عملکرد خود را از دست می‌دهد. موضوع بحث بر روی اندازه عرض درز پیرامونی می‌باشد که به نظر می‌رسد که با گذشتن از حدی، افزایش اندازه درز در پاسخ سازه تأثیری نخواهد داشت. لازم به ذکر است که اندازه عرض درز در جداسازهای مخلوط ماسه و خرده لاستیک از حساسیت بیشتری برخوردار می‌باشد، که دلیل آن احتمالاً این است که استهلاک انرژی و میرایی در مصالح ماسه و خرده لاستیک نسبت به مصالح ماسه ساده به تغییر شکل برشی لایه جداساز وابسته‌تر است.

۵- پارامتر ضخامت لایه جداساز به طور کلی در تمامی پاسخ‌ها تأثیر کمی داشته است. البته در تعیین ضخامت باید به موضوع کنترل کرنش برشی ایجاد شده در لایه جداساز دقت نمود. چنانچه این مهم مد نظر قرار نگیرد ممکن است کرنش‌های برشی افزایش یابند، به طوری که هرچه ضخامت لایه جداساز بیشتر باشد کرنش‌های برشی افزایش می‌یابند، و ممکن است که تنش برشی قابل تحمل خاک از حد مجاز خود بیشتر شده و منجر به گسیختگی آن گردد.

۶- به طور کلی بیشترین تأثیر استفاده از سیستم جداساز پیشنهادی بر روی پاسخ چرخش مفاصل پلاستیک و جابجایی نسبی طبقات می‌باشد. پاسخ‌های نیرویی نظیر نیروی محوری ستون‌ها و لنگر خمشی تیرها از سیستم جداساز چندان متأثر نمی‌باشد.

مطالعات انجام شده در این مقاله به عنوان یک ایده نوآورانه و اولیه مطرح شده است. در این مجال صرفاً به بررسی پارامترهای محدود بر روی سازه فولادی با سیستم قاب خمشی پرداخته شده است. بنابراین لازم است جهت توسعه این سیستم پیشنهادی برای سایر سازه‌ها موارد بیشتری مدنظر قرار گیرد و در کنار این مطالعات نظری، پژوهش‌های آزمایشگاهی نیز برای صحت سنجی نتایج به دست آمده انجام شود.

## مراجع

- [1] Yegian, M. K. and Kadakal, U. (2004). Foundation isolation for seismic protection using a smooth synthetic liner. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130 (11), 1121-1130.
- [2] Yegian M. K. and Catan M. (2004). Soil isolation for seismic protection using a smooth synthetic liner. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, , 130 (11), 1131-1139.
- [3] AliAsgari, R (1392). *Seismic isolation of foundations using Geosynthetics and soil-rubber mixture*. Master of science thesis, Islamic Azad University (Tehran central), Civil engineering department. [In Persian].
- [4] Mahmoodi, M (1390). *Cyclic mechanical properties of sand/granulated rubber mixture for using in seismic isolation purposes*. Master of science thesis, Tarbiat Modares University, Engineering department. [In Persian].
- [5] Tsang H. H. (2008). Seismic isolation by rubber–soil mixtures for developing countries. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 37 (2), 283-303.
- [6] Tsang H. H., Lo S. H., Xu X., Neaz Sheikh M. (2012). Seismic isolation for low-to-medium-rise buildings using granulated rubber–soil mixtures: numerical study, *Earthquake engineering & structural dynamics*, 41(14), 2009-2024.
- [7] Tsiavos A., Alexander N. A., Diambra A., Ibraim E., Vardanega P. J., Gonzalez-Buelga A., Sextos A. (2019). A sand-rubber deformable granular layer as a low-cost seismic isolation strategy in developing countries: Experimental investigation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125, 105731.
- [8] Pistolas G. A., Anastasiadis A., Pitolakis K. (2014). Mechanical shear strength properties of sand/granulated rubber mixtures”, in *Proceedings of 7th Greel geotechnical conference*, Hellenic Society Of Soil Mechanics And Geotechnical Engineering, Athens, Greece.
- [9] Pistolas G. A., Anastasiadis A., Pitolakis K. (2014). Cyclic undrained mechanical properties of sand/granulated rubber mixture”, in *Proceedings of 7th Greel geotechnical conference*, Hellenic Society Of Soil Mechanics And Geotechnical Engineering, Athens, Greece.
- [10] Brunet S., Carlos J, Kausel E. (2016). Non-linear modeling of seismic isolation systems made of recycled tire-rubber, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 85, 134-145
- [11] Pistolas, G.A., Pitolakis, K. & Anastasiadis, A. (2020). A numerical investigation on the seismic isolation potential of rubber/soil mixtures. *Earthq. Eng. Eng. Vib.* 19, 683–704
- [12] Manohar D.R., Anbazhagan P. (2021). Shear strength characteristics of geosynthetic reinforced rubber-sand mixtures, *Geotextiles and Geomembranes*, 49(4).
- [13] Fakharian K., Ahmad A. (2021). Effect of anisotropic consolidation and rubber content on dynamic parameters of granulated rubber-sand mixtures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141
- [14] Dhanya J.S., Boominathan A., Banerjee S. (2020). Response of low-rise building with geotechnical seismic isolation system, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 136
- [15] Hernandez E., Palermo A., Granello G., Chiaro G., Banasiak L. (2020). Eco-rubber seismic-isolation foundation systems, a sustainable solution for the New Zealand context, *Struct. Eng. Int.*, 30 (2), 192-200
- [16] Pitolakis D., Anastasiadis A., Vratsikidis A., Kapouniaris A., Massimino M.R., Abate G., Corsico S. (2021). Large-scale field testing of geotechnical seismic isolation of structures using gravel-rubber mixtures, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 50, 2712-2731.
- [17] Tsang H.H., Tran D.P., Hung W.Y., Pitolakis K., Gad E.F. (2021). Performance of geotechnical seismic isolation system using rubber-soil mixtures in centrifuge testing, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 50 (5), 1271-1289
- [18] Tasalloti A., Chiaro G., Murali A., Banasiak L. (2021). Physical and mechanical properties of granulated rubber mixed with granular soils – a literature review, *Sustainability*, 13 (8), 4309
- [19] Banasiak, L.J., Chiaro, G., Palermo, A., Granello, G. (2021). Environmental implications of the recycling of end-of-life tires in seismic-isolation foundation systems. In: *Advances in Sustainable Construction and Resource Management, Lect. Notes Civ. Eng.*, 144, 43–52.
- [20] Chiaro, G., Palermo, A., Granello, G., Tasalloti, A., Banasiak, L.J. (2021). Reuse of waste tires to develop eco-rubber seismic-isolation foundation systems. In: *Advances in Sustainable Construction and Resource Management, Lect. Notes Civ. Eng.*, 144, 159–169.
- [21] Chiaro G., Tasalloti A., Chew K., Vinod J.S., Allulakshmi K. (2022). Macro- and micro-scale engineering response of rigid-soft gravel-rubber inclusions: insights from detailed laboratory and DEM numerical investigations *Lect. Notes Civ. Eng.*, 196, 11-27
- [22] Chopra A. K., Goel R. K. (2002). A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 31(3), 561-582.
- [23] OpenSees Open system for earthquake engineering simulation.
- [24] Kuhlemeyer R. L., Lysmer J. (1973). Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 99(5), 421-427.
- [25] Mazzoni S., McKenna F., Scott M. H., Fenves G. L., Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSEES) User Command-Language Manual, Berkeley, University of California

- [26] Applied Technology Council (2009). *Quantification of building seismic performance factors (ATC-63) Report*: US Department of Homeland Security, Federal Emergency Management Agency: Washington, D.C.
- [27] Hosseini P, Hosseini M, Omranizadeh (2019). The Effect of Height of Structure on the Accuracy of Nonlinear Static Analysis Methods in Steel Structures with Lead Rubber Bearing (LRB) Base Isolators. *Civil and Environmental Researches*, 5(1), 35-49