

An Investigation of the strength reduction factor considering soil-structure Interaction

Morvarid Hajian¹, Reza Attarnejad^{2*} 

1. Ph.D. candidate, School of civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Professor, School of civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Abstract

This study presented an evaluation of the response modification factor of structures considering soil-structure interaction (SSI). During an earthquake, the soil-structure interaction plays an important role in the response of the structure and affects the dynamic characteristics of the structure. In current structural design codes, due to the complexity of soil medium behavior, it is assumed that the structure is fixed at the base and the important effects of soil-structure interaction are disregarded. Thus, dynamic responses of structures will not be simulated properly. One of the major seismic parameter is the strength reduction factor, which represents the ratio of the elastic lateral yielding strength in system to the lateral yielding strength to maintain the displacement ductility ratio demand, less or equal to the target ductility ratio. Previous studies were often investigated the strength reduction factor of single degree of freedom (SDOF) systems, which cannot be an accurate estimation of real structures. The models were also based on the simple method of spring and dashpot simulations of soil-foundation system. Thus, there is a need to conduct new studies on steel multi degree of freedom structures (MDOF) resting on soil medium. In this regard, a wide variety of numerical analyses was considered to evaluate parameters affecting the strength reduction factor.

For this purpose, first, a brief review of the literature related to the response modification factor regarding soil-structure interaction was presented. Then, several numerical structures with different number of stories, natural fixed base periods and displacement ductility ratios were modeled in OpenSees software. The supporting soil was modeled as a continuous and two-dimensional continuum medium using 2D plane strain shell elements. The structures were 3storey, 5storey, 10storey and 15storey buildings, with periods between 0.1 and 3 s, subjected to 22 strong ground motions on NEHRP site classes D and E, on the basis of the ASCE7-16 (Soil type D, with shear wave velocity between 180 m/s and 360 m/s, and soil type E, with shear wave velocity lower than 180m/s). The displacement ductility ratios used in this research were assumed 2, 4 and 6. The results were demonstrated according to the natural fixed base periods of structures. It was observed that for flexible and fixed base systems, increasing the number of stories reduced the values of R_m . However, for soil-structure systems, the R_m become less sensitive to the number of stories. R_m was sensitive to aspect ratio (h/r) of structures. As h/r increases, R_m experienced higher values. On the other hand, strength reduction factor was mostly affected by displacement ductility ratios of the whole soil-structure system. Nevertheless, generally, soil-structure interaction reduced the values of R_m . The values of strength reduction factor were sensitive to soil shear velocity. As soil shear velocity decreased, the SSI effect was considerable and therefore R_m was decreased. Thus it can be concluded that the common seismic design approaches which does not considered soil-foundation flexibility, can result in higher strength reduction factor compared to the real situations. Using higher strength reduction factor leads to non-conservative dynamic structural outputs.

Review History

Received: Apr 22, 2024

Revised: Oct 05, 2024

Accepted: Nov 20, 2024

Keywords

Soil-structure interaction
response modification
factor
strength reduction factor
soil modeling
inelastic strength demand
ductility ratio

* Corresponding Author Email: attarnjd@ut.ac.ir - ORCID: 0000-0003-1955-2887



Copyright © 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی تأثیر اندرکنش خاک - سازه بر ضریب رفتار سازه‌ای

مروارید حاجیان^۱، رضا عطارنژاد^{۲*} 

۱. دانشجوی مقطع دکتری، دانشکده فنی، دانشکده عمران، دانشگاه تهران.

۲. استاد، دانشکده فنی، دانشکده عمران، دانشگاه تهران.

چکیده

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۳

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۳۰

کلمات کلیدی

اندرکنش خاک-سازه

ضریب اصلاح پاسخ

ضریب کاهش مقاومت

مدل سازی خاک

تقاضای مقاومتی غیرالاستیک

نسبت شکل پذیری

در این مطالعه به بررسی تأثیر اندرکنش خاک-سازه روی ضریب رفتار سازه‌ها پرداخته شده است. در سالیان گذشته، مطالعات گسترده‌ای روی چگونگی تغییرات پارامترهای دینامیکی سازه‌ها، با در نظر گرفتن انعطاف پذیری بستر انجام شده است. یکی از پارامترهای مهم طراحی لرزه‌ای، ضریب رفتار می‌باشد که تخمینی از تقاضای مقاومتی غیرالاستیک سازه است. در بیشتر پژوهش‌های صورت گرفته، از مدل‌های سازه‌ای یک درجه آزادی و مدل‌های ساده سازی شده برای محیط خاک، استفاده کردند. این روش‌ها قادر نخواهند بود تخمین درستی از رفتار سازه‌های واقعی ارائه دهند. در این مطالعه از چندین تحلیل تاریخچه زمانی غیر خطی و دوبعدی روی مدل‌های قاب فولادی به صورت ۳ طبقه، ۵ طبقه، ۱۰ طبقه و ۱۵ طبقه با دوره تناوب بین ۰٫۱ تا ۳ ثانیه و نسبت‌های شکل پذیری هدف ۲، ۴ و ۶، که روی محیط پیوسته خاک قرار داشتند، استفاده شده است. سازه‌ها در معرض ۲۲ شتاب نگاشت لرزه‌ای در حوزه دور قرار گرفتند. برای در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه، از خاک‌های کلاس D و E استفاده شد. با بررسی نتایج مشاهده شد که اندرکنش خاک-سازه، ضریب رفتار سازه‌ها را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر، استفاده از ضریب رفتار سازه‌ای تابعی از شکل پذیری سازه، دوره تناوب سازه، تعداد طبقات سازه و نوع خاک است. هرچه خاک نرم‌تر باشد، آثار اندرکنش خاک-سازه بیش‌تر خواهد بود، بدین ترتیب ضریب رفتار کوچک‌تر است. میزان این تغییرات در سازه‌ی کوتاه مرتبه بیش از سایرین است. در سازه ۳ طبقه با نرم‌تر شدن خاک (تغییر خاک به نوع E)، ضریب رفتار حدود ۷ درصد بیش‌تر کاهش یافته است اما در سازه ۱۰ طبقه، کاهش قابل ملاحظه‌ای بین دو نوع خاک دیده نمی‌شود. همچنین با افزایش تعداد طبقات از ساختمان کوتاه به متوسط، ضریب رفتار سازه‌ای بیش‌تر کاهش می‌یابد. مقدار درصد کاهش در مدل‌ها برای نسبت شکل پذیری ۲ حدوداً برابر با ۷، ۱۰، ۸ و ۸ درصد به ترتیب برای سازه‌های ۳ طبقه، ۵ طبقه، ۱۰ طبقه و ۱۵ طبقه می‌باشد. مشاهده می‌شود که در سازه‌های بلندمرتبه، نسبت شکل پذیری بیش‌تر از تعداد طبقات سازه بر ضریب رفتار تأثیر می‌گذارد.

۱- مقدمه

تحلیل‌های ساده شده برای تخمین پاسخ غیرالاستیک سازه حین زلزله‌های شدید استفاده شود. در آیین‌نامه‌های طراحی متداول، از کاهش مقاومت جانبی سازه در حالت الاستیک به کمک ضریبی به نام ضریب رفتار، برای محاسبه مقاومت جانبی غیرالاستیک سازه استفاده می‌شود. این ضریب به عنوان نسبت تقاضای مقاومت الاستیک به تقاضای مقاومت غیرالاستیک مطابق با رابطه‌ی (۱) تعریف می‌شود [1].

ضوابط طراحی لرزه‌ای بیشتر به سازه‌ها اجازه ایجاد تغییر شکل‌های غیرالاستیک را تحت زمین لرزه‌های شدید می‌دهد. رویکرد طراحی لرزه‌ای، عموماً براساس رفتار سازه‌ای الاستیک بوده و رفتار غیرالاستیک به طور غیرمستقیم و ضمنی در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی که استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی برای اهداف کاربردی عملی نیست، بنابراین ضروری است تا از

* رایانامه نویسنده مسئول: attamjd@ut.ac.ir - ORCID: 0000-0003-1955-2887

کپی‌رایت © ۲۰۲۵، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



$$R_{\mu} = \frac{F_y (\mu = 1)}{F_y (\mu = \mu_i)} \quad (1)$$

در این رابطه $F_y (\mu = 1)$ مقاومت برشی جانبی برای حفظ سازه در حالت الاستیک است و $F_y (\mu = \mu_i)$ مقاومت تسلیم جانبی برای حفظ تقاضای شکل‌پذیری تغییرمکانی موردنظر کم‌تر و یا مساوی با شکل‌پذیری تغییرمکانی بیشتر قابل تحمل μ_i می‌باشد [1].

بیشتر مطالعات انجام شده در خصوص ضرایب کاهش مقاومت روی سازه‌های با بستر صلب بوده است و آثار خاک زیر سازه درنظر گرفته نشده است. در دهه‌های اخیر تأثیر اندرکنش خاک-سازه روی ضرایب کاهش مقاومت، برش پایه‌ی ساختمان و جابه‌جایی نهایی سازه موضوع بسیاری از پژوهش‌ها بوده است [5-2]. نتایج عموماً نشان دادند که اندرکنش خاک-سازه به دلیل انعطاف‌پذیری سیستم خاک-فونداسیون، موجب افزایش تغییرمکان‌های جانبی و کاهش تقاضا و برش پایه در سازه می‌شود. هرچه سرعت موج برشی بیش‌تر باشد، ظرفیت انعطاف‌پذیری سیستم بیش‌تر بوده و بنابراین پاسخ‌های لرزه‌ای سازه نسبت به حالت بستر صلب بزرگ‌تر خواهد بود [6-13].

بسیاری از پژوهشگران روی تغییرات حاصل در ضریب رفتار سازه‌ای نیز مطالعاتی انجام دادند [14-15]. میراندا^۱ (۱۹۹۷) نیز اثر شرایط محلی خاک را روی ضرایب کاهش مقاومت بررسی کرده است. در این پژوهش از ۱۲۴ رکورد زلزله که در سه گروه روی سنگ، خاک رسوبی و خاک بسیار نرم قرار داشتند، استفاده شده است. در نهایت ضرایب کاهش مقاومت برای هر گروه خاکی محاسبه شد [1]. براساس نتایج جامع روی ضرایب کاهش مقاومت سیستم‌های یک درجه آزادی تحت ۱۲۴ زلزله، میراندا (۱۹۹۳) روابط ساده‌ای را برای تخمین تئوری ضرایب کاهش مقاومت مناطق سنگ، خاک رسوبی و خاک نرم ارائه داد [16]. احمدی (۲۰۱۹) رابطه‌ی بین شکل‌پذیری - مقاومت - دوره تناوب برای سازه‌های با پی مدفون را بررسی کرده است. سازه فوقانی به صورت یک سازه یک درجه‌آزادی، خاک زیرین به صورت یک محیط نیمه بی‌نهایت با ضرایب سختی مدل مخروطی، و فونداسیون مدفون به صورت یک سری دیسک مجزا مدل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که طیف نسبت

شکل‌پذیری به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر آثار اندرکنش سینماتیکی و اینرسی می‌باشد. به علاوه در این تحقیق مشاهده شده است که اصل تغییرمکان برابر برای سیستم‌های با اندرکنش خاک - سازه ممکن است معتبر نباشد [17]. ودا و مانچالوار^۲ (۲۰۲۱) اندرکنش خاک-سازه را با توجه به انواع مختلف خاک در نرم‌افزار SAP2000 بررسی نمودند. مطابق با این نتایج مشاهده شده است که با افزایش ارتفاع ساختمان، ضریب اصلاح پاسخ کاهش می‌یابد [18]. اسر و همکاران^۳ (۲۰۱۱) ضرایب کاهش مقاومت سیستم‌های یک درجه با محدوده دوره تناوب ۰٫۱ تا ۳ ثانیه با رفتار الاستوپلاستیک را با استفاده از ۲۰ حرکت زمین‌لرزه که روی خاک نرم ثبت شده‌اند را با درنظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه بررسی کردند. در این تحقیق اثر اندرکنش خاک-سازه به کمک دوره‌ی تناوب معادل درنظر گرفته شده است. یافته‌ها نشان دادند که اندرکنش خاک - سازه ضرایب کاهش مقاومت برای خاک‌های نرم را کاهش می‌دهد و بنابراین استفاده از ضرایب کاهش مقاومت برای سیستم با بستر صلب موجب محاسبه‌ی نیروهای طراحی غیرمحافظه‌کارانه می‌شود [19]. گنجوی و هائو^۴ (۲۰۱۴) رابطه‌ی مقاومت - شکل‌پذیری ساختمان‌های برشی چند طبقه در معرض با ۳۰ زلزله واقعی روی خاک نرم و خاک رسوبی را بررسی کردند. این پژوهشگران یک رابطه برای تخمین ضریب کاهش مقاومت سیستم چند درجه آزادی با درنظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه ارائه نمودند. پژوهشگران در این تحقیق از مدل ساده مخروطی برای خاک و پی استفاده نمودند، بنابراین نتایج این پژوهش کاملاً دقیق نخواهد بود [20]. آیدمیر و اکیز^۵ (۲۰۱۳) ضریب کاهش شکل‌پذیری برای قاب‌های بتنی چند درجه آزادی با بستر انعطاف‌پذیر در معرض با ۶۴ زلزله را بررسی کردند. پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که ضریب کاهش شکل‌پذیری برای سیستم‌های قاب با بستر انعطاف‌پذیر، به ویژه برای خاک‌های نرم، کمتر از مقادیر پیشنهادی آیین‌نامه‌ای است [21]. لو و همکاران^۶ (۲۰۱۶) آثار اندرکنش خاک - سازه روی تقاضاهای مقاومتی و شکل‌پذیری ساختمان‌های برشی چند درجه آزادی را بررسی کردند. این پژوهشگران از مدل ساده

² Veda and Manchalwar

³ Eser et al.

⁴ Ganjavi and Hao

⁵ Aydemir and Ekiz

⁶ Lu et al.

¹ Miranda

اثر مودهای بالاتر استفاده می‌شود، که در پژوهش‌های پیشین وجود نداشته است. سپس با انجام تحلیل دینامیکی غیرخطی روی مدل‌ها، تقاضای سازه‌ای و ضریب رفتار در دو حالت بست صلب و بستر انعطاف‌پذیر به دست آمدند. در ادامه روش تحقیق، جزئیات مدل‌سازی و یافته‌های پژوهش آورده شده است.

۲- روش تحقیق

شکل (۱) روند محاسبه ضریب رفتار در این پژوهش را نشان می‌دهد. برای تعیین ضریب رفتار سازه‌ای، ابتدا تعدادی سازه فولادی چندطبقه با محدوده‌ی دوره تناوب بین ۰٫۱ تا ۳ ثانیه به کمک روش پوآور و طبق آیین‌نامه ۲۸۰۰ برای دستیابی به نسبت‌های شکل‌پذیری هدف ۴٫۲ و ۶ و استخراج مقاومت تسلیم جانبی سازه در حالت بستر صلب طرح می‌شوند. سپس این مدل‌ها با فرض مدل ساختمان برشی بر روی محیط خاک مدل‌شده در OpenSees با همان مقاومت تسلیم جانبی قرار گرفته و تحت تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی در دو حالت الاستیک و غیرالاستیک قرار می‌گیرند. سپس تقاضای الاستیک و غیرالاستیک و ضریب رفتار مطابق با رابطه‌ی (۱) در دو حالت بستر صلب و بستر انعطاف‌پذیر محاسبه می‌شود. مشخصات خاک، سازه‌ها و رکوردهای زلزله در بخش‌های زیر به تفکیک آورده شدند.

۲-۱- مطالعه‌ی عددی

تعدادی تحلیل دوبعدی و غیرخطی در نرم‌افزار OpenSees روی مدل‌های دوبعدی عددی با دوره تناوب و نسبت شکل‌پذیری‌های متفاوت انجام شده است. ابتدا تعدادی مدل قاب فولادی با فرض رفتار ساختمان برشی مطابق با شکل (۲) در حالت بستر صلب به کمک سعی و خطا برای رسیدن به نسبت‌های شکل‌پذیری هدف به کمک تحلیل استاتیکی غیرخطی پوش‌آور طراحی شدند. ارتفاع هر طبقه برابر با ۳ متر فرض می‌شود. سازه‌ها در سه حالت نسبت ابعادی $h/r = 1, 3, 5$ طرح می‌شوند. r شعاع معادل پی می‌باشد که طبق رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

مدل‌ها شامل سازه‌های متداول کوتاه تا متوسط ۳ طبقه، ۵ طبقه، ۱۰ طبقه و ۱۵ طبقه دارای ضریب شکل‌پذیری $(\mu = 2, 4, 6)$ با دوره‌ی تناوب بین ۰٫۱ تا ۳ ثانیه و بدون میرایی هستند. تأثیر اندرکنش خاک-سازه در سازه‌های بلندمرتبه عموماً در افزایش

مخروطی برای مدل کردن خاک و رکوردهای زلزله مصنوعی استفاده کردند. پژوهشگران به این نتیجه رسیدند که در سازه‌های معمول که شکل‌پذیری کم تا متوسط دارند، با افزایش نسبت سختی سازه به خاک تقاضای مقاومت سازه نسبت به سازه با بستر صلب کاهش می‌یابد. بنابراین در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه برای سازه‌های معمول موجب طراحی‌های اقتصادی می‌شود. این پژوهشگران دو ضریب کاهش ضریب اصلاح چند درجه آزادی R_M وابسته به اندرکنش و ضریب کاهش مقاومت R_F برای سازه‌های با بستر انعطاف‌پذیر پیشنهاد دادند. [22]. گارسیا و همکاران^۱ (۲۰۲۴) رابطه ساده‌ای برای تخمین ضریب اصلاح پاسخ سیستم‌های دو درجه آزادی غیرالاستیک پیشنهاد داده است [23]. ال-جانوس و ال-قوبل‌ظوری^۲ (۲۰۲۴) منحنی‌های ظرفیت و روند تشکیل مفاصل پلاستیک را به کمک نرم‌افزار SAP2000 بررسی کردند. پژوهشگران آثار اندرکنش خاک-سازه را به کمک فنر و میراگر و توابع امپدانس مدل‌سازی کردند. نتایج نشان داد که ضریب رفتار سازه در حالت اندرکنش خاک-سازه کاهش می‌یابد [24].

در این مقاله به بررسی آثار اندرکنش خاک-سازه بر ضریب رفتار سازه‌ای به کمک مدل‌های چند طبقه پرداخته می‌شود. بدین منظور از مدل‌سازی قاب‌های فولادی ۳ طبقه، ۵ طبقه، ۱۰ طبقه و ۱۵ طبقه در نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است. در این مدل‌ها محیط خاک زیر پی به صورت محیط پیوسته و دوبعدی با المان مدل شده است. همان‌طور که گفته شد، در بیشتر مطالعات انجام‌شده، مدل‌های سازه‌ای به صورت یک‌درجه آزادی بوده و محیط خاک به کمک مدل‌های فنر جایگزین شدند. مدل‌های یک‌درجه آزادی نمی‌توانند رفتار سیستم‌های واقعی را به درستی نشان دهند. بنابراین یکی از وجوه نوآوری این پژوهش استفاده از سازه‌های چندطبقه بوده است. همچنین مدل‌سازی خاک به کمک تعدادی فنر مستقل از هم، لزوماً معرف رفتار واقعی محیط خاک نمی‌باشد. خاک دارای رفتار برشی است که این رفتار در مدل‌سازی با فنر دیده نمی‌شود. همچنین محیط خاک یک محیط پیوسته است که تنها وجود یک فنر، پیوستگی و انتقال نیرو در زیر پی را شبیه‌سازی نمی‌کند. بنابراین به منظور نوآوری، در این تحقیق از مدل‌سازی کامل محیط خاک به صورت المان‌های دوبعدی shell و سازه‌های چندطبقه برای اعمال

¹ Garcia et. al.

² El Janous and El Ghoulbzouri

متوسط استفاده می‌شود. پس از طرح اولیه در حالت بستر صلب، سازه‌ها در برنامه‌ی Opensees به کمک المان تیر-ستون غیرخطی و محیط خاک به صورت المان اجزای محدود plane strain مدل می‌شوند. عمق محیط خاک مطابق با شکل ۳، برابر با ۳۰ متر و عرض آن برابر با ۷ برابر بعد فونداسیون است.

$$r = \sqrt{\frac{BL}{\pi}} \quad (2)$$

۲-۲- مشخصات خاک

مادامی که سرعت موج برشی کم‌تر از ۶۰۰ m/s باشد، آثار اندرکنش خاک-سازه روی سیستم‌های سازه‌ای قابل توجه خواهد بود. بدین ترتیب، در این پژوهش از دو نوع خاک D و E (خاک نوع III و IV طبق آیین‌نامه ۲۸۰۰) با سرعت موج برشی کم‌تر از ۶۰۰ m/s شامل خاک چسبنده و خاک غیر چسبنده، مطابق با ASCE 7-22 [25] استفاده شده است که مشخصات هر یک در جدول (۱) آورده شده است. برای اعمال شرایط مرزی در محیط خاک، از مرزهای جاذب ویسکوز لایسمر مطابق با روابط ۲ و ۳ استفاده می‌شود. روابط ۳ و ۴ به ترتیب مقادیر میرایی در جهت عمود بر وجه (t_n) و در جهت مماسی (t_s) را نشان می‌دهند [26].

$$t_n = \rho C_p A \quad (3)$$

$$t_s = \rho C_s A \quad (4)$$

در روابط فوق ρ چگالی خاک، A سطح مقطع محیط خاک، C_p سرعت موج فشاری و C_s سرعت موج برشی هستند.

شکل ۳. هندسی محیط خاک مدل شده

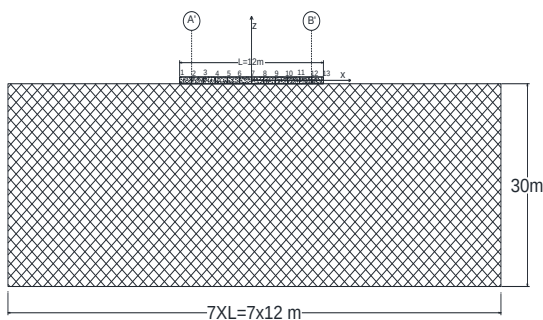


Fig. 3. The geometrical configuration of the modeled soil environment

شکل ۱. روند تعیین ضریب رفتار سازه‌ای

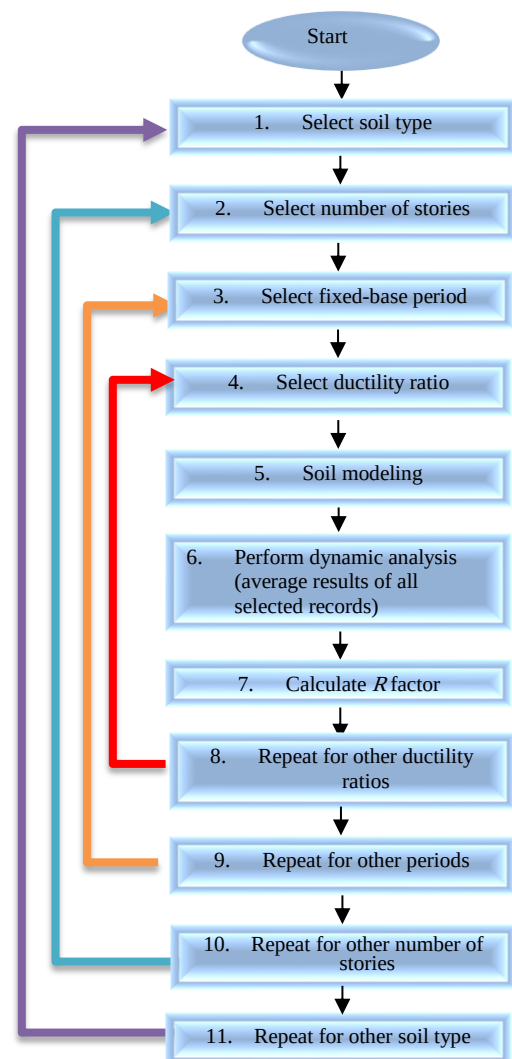


Fig. 1. The flowchart of evaluating the strength reduction factor

شکل ۲. نمونه‌ی مدل سازه‌ای

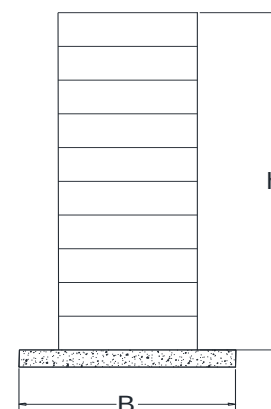


Fig. 2. Structural models

تغییر مکان‌های جانبی به علت حرکت گهواره‌ای پی و آثار $P-\Delta$ نمایان می‌شود. بدین علت در این پژوهش از سازه‌های کوتاه تا

جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی خاک

Soil Type (ASCE 7-22)	Soil Type (Standard No. 2800)	Shear Wave Velocity (m/s)	Poisson's Ratio	Soil Density (kg/m ³)	C' (kg/m ²)	f' (Degree)
D	III	200	0.4	1800	0	30
E	IV	150	0.45	1700	5	25

Table 1. Geotechnical characteristics of Soil Types

جدول ۲. مشخصات ۱۱ زلزله روی خاک D ایستگاه ثبت آنها

No.	Earthquake Name	Year	Magnitude	Recording Station Name	Vs (m/s)	PGA(g)
1	Imperial Valley	1979	6.53	"Parachute Test Site"	348.69	0.11267
2	Imperial Valley	1979	6.53	"El Centro Array #13"	249.92	0.11796
3	Whittier Narrows-01	1987	5.99	"Downey - Co Maint Bldg"	271.9	0.20451
4	Whittier Narrows-01	1987	5.99	"LA - 116th St School"	301	0.27251
5	Landers	1992	7.28	"Yermo Fire Station"	353.63	0.24452
6	Loma Prieta	1989	6.93	"Palo Alto - 1900 Embarc."	209.87	0.12694
7	Loma Prieta	1989	6.93	"Dumbarton Bridge West End FF"	238.06	0.13837
8	Loma Prieta	1989	6.93	"Richmond City Hall"	259.9	0.12563
9	Northridge-01	1994	6.69	"Lakewood - Del Amo Blvd"	267.37	0.13327
10	Northridge-01	1994	6.69	"Downey - Birchdale"	245.06	0.14268
11	Morgan Hill	1984	6.19	"APEEL 1E - Hayward"	219.8	0.0409

Table 2. Characteristics of 11 earthquakes on soil D and their recording stations

جدول ۳. مشخصات ۱۱ زلزله روی خاک E ایستگاه ثبت آنها

No.	Earthquake Name	Year	Magnitude	Recording Station Name	Vs (m/s)	PGA(g)
1	Imperial Valley	1979	6.53	"Westmorland Fire Sta"	193.67	0.07605
2	Imperial Valley	1979	6.53	"El Centro Array #11"	196.25	0.36681
3	Loma Prieta	1989	6.93	"APEEL 2 - Redwood City"	133.11	0.27441
4	Loma Prieta	1989	6.93	"Foster City - APEEL 1"	116.35	0.12694
5	Loma Prieta	1989	6.93	"Larkspur Ferry Terminal (FF)"	169.72	0.12563
6	Northridge-01"	1994	6.69	"Carson - Water St"	160.58	0.09145
7	Morgan Hill"	1984	6.19	"Foster City - APEEL 1"	116.35	0.04295
8	Loma Prieta	1989	6.93	"Foster City - Menhaden Court"	126.4	0.10977
9	Chi-Chi_ Taiwan-03	1999	6.2	"CHY047"	169.52	0.05419
10	Chi-Chi_ Taiwan	1999	7.62	"CHY076"	169.84	0.07001
11	Loma Prieta	1989	6.93	"Treasure Island"	155.11	0.10026

Table 3. Characteristics of 11 earthquakes on soil E and their recording station

شکل ۵. طیف مقیاس شده‌ی رکوردهای زلزله در خاک IV ۲۸۰۰

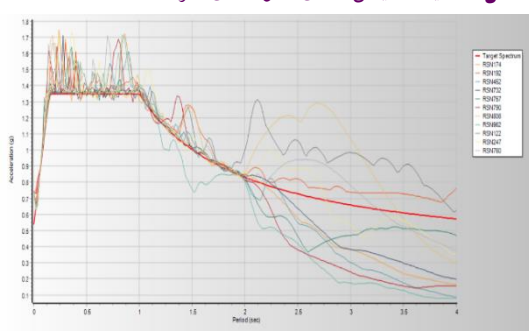


Fig. 5. Scaled Spectrum of earthquake records on soil Type IV according to Standard No. 2800

شکل ۴. طیف مقیاس شده‌ی رکوردهای زلزله در خاک III ۲۸۰۰

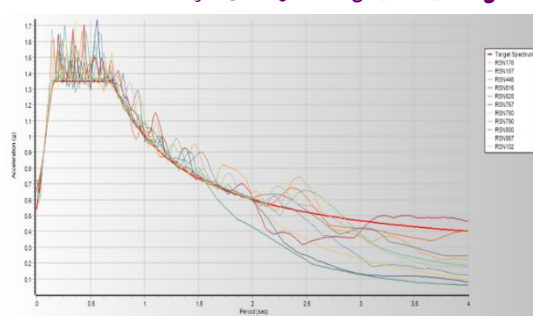


Fig. 4. Scaled Spectrum of earthquake records on soil Type III according to Standard No. 2800

شتاب‌نگاشت، براساس طیف آیین‌نامه ۲۸۰۰ برای خاک‌های نوع III و IV، به کمک نرم‌افزار SeismoMatch مقیاس می‌شوند. طیف‌های مقیاس شده رکوردهای ثبت شده روی خاک D و خاک E به ترتیب در اشکال (۴ و ۵) نشان داده شده‌اند.

۲-۳- رکوردهای زلزله

زلزله‌ها شامل ۲۲ زوج شتاب‌نگاشت دور از گسل روی خاک‌های نوع D و E (استاندارد ASCE7-22) [25] مطابق با دستورالعمل FEMA P-695 [27] انتخاب شدند، که مشخصات آنها در جداول (۲ و ۳) آورده شده است. رکوردهای هر گروه

۲-۴- درستی آزمایشی روش مدل سازی

در این بخش به ارزیابی روش مدل سازی در نرم افزار OpenSees پرداخته می شود. در این راستا از نمونه ی آزمایشگاهی طباطبایی فر استفاده می شود. نمونه آزمایشی مورد استفاده در پژوهش طباطبایی فر، یک سازه ی فولادی ۱۵ طبقه با ارتفاع ۱۰۵ متر، طول ۰،۴ متر و عرض ۰،۴ متر می باشد. وزن این سازه ۱۰۶ کیلوگرم و متشکل از پانزده ورق فولادی به ابعاد 400×400 میلی متر، چهار ورق فولادی $1500 \times 400 \times 20$ میلی متر به عنوان ستون و یک صفحه فولادی به ابعاد $500 \times 500 \times 10$ میلی متر به عنوان صفحه ی فونداسیون می باشد [9]. سازه تحت زلزله (El-Centro, 1940 قرار داشته است. مدول برشی خاک نرم برابر با ۱۷۷۶ kPa می باشد [9].

در این مقاله، مدل پژوهش طباطبایی فر به صورت عددی در OpenSees تحت تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی قرار گرفت و جابه جایی های جانبی طبقات محاسبه شدند. در شکل (۶) نتایج این بررسی به همراه نتایج پژوهش طباطبایی فر نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، مقادیر جابه جایی جانبی بیشینه سازه در هر دو حالت بسیار به هم نزدیک بوده است. بنابراین این روش تقریب خوبی از محیط خاک و تأثیر آن بر پاسخ لرزه ای سازه می باشد. همچنین دوره تناوب مدل تجربی برابر با ۰،۴۷ ثانیه بوده است که نزدیک به دوره تناوب ۰،۵ ثانیه در مدل سازی پیشنهادی می باشد.

شکل ۶. جابه جایی جانبی بیشینه در مدل سازی پیشنهادی و مدل تجربی طباطبایی فر

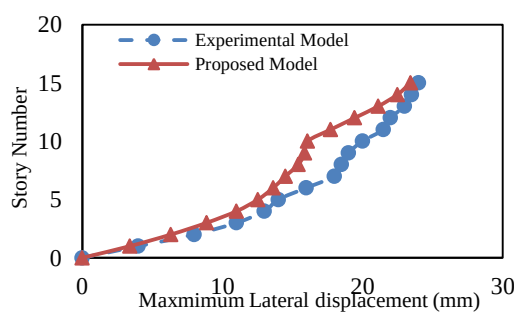


Fig. 6. Maximum lateral displacement of proposed and experimental methods

۳- نتایج و بحث

همان طور که گفته شد، برای بررسی تأثیر اندرکنش خاک-سازه

بر ضریب رفتار سازه ای از انجام چندین تحلیل دینامیکی تاریخیچه زمانی غیرخطی روی سازه های ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با دوره تناوب بین ۰،۱ تا ۳ ثانیه استفاده شد. نتایج تحلیل های دینامیکی به صورت میانگینی از تمام رکوردهای زلزله در نظر گرفته شدند. بدین صورت که ضریب رفتار در هر مدل و برای هر رکورد زلزله طبق رابطه ی (۱) محاسبه و سپس میانگین نتایج حاصل از رکوردها نمایش داده می شوند. در ادامه به بررسی پارامترهای مؤثر و نحوه ی تغییرات ضریب رفتار با لحاظ نمودن اندرکنش خاک-سازه پرداخته می شود.

۳-۱- مقایسه ضریب رفتار در حالت بستر صلب با حالت بستر انعطاف پذیر

در نمودارهای شکل (۷)، نتایج حاصل از تحلیل روی سازه های با بستر صلب و بستر انعطاف پذیر (در نظر گرفتن آثار اندرکنش خاک-سازه) نمایش داده شدند. با مشاهده نمودارها می توان نتیجه گرفت که به طور کلی اندرکنش خاک-سازه ضریب رفتار را کاهش می دهد. هرچه خاک نرم تر باشد، ضریب رفتار نیز کم تر خواهد بود. این بدین معناست که مطابق با رابطه ی (۱) تقاضای برشی در حالت SSI نسبت به بستر صلب کاهش می یابد. به عبارت دیگر، برای فراتر نرفتن از شکل پذیری هدف نیاز به کاهش کمتری در تقاضای الاستیک وجود دارد. در این حالت چنانچه از مقادیر آیین نامه ای که بر مبنای بستر صلب پیشنهاد شدند، استفاده شود، مقاومت برشی غیرالاستیک کم تری تخمین زده می شود و ممکن است و سازه قادر به تأمین شکل پذیری هدف نباشد.

در نسبت های شکل پذیری بالا، کاهش ضریب رفتار نسبت به بستر صلب، قابل ملاحظه تر است و در سازه هایی با نسبت شکل پذیری کم ($\mu = 2$) دامنه ی تغییرات ضریب رفتار وابستگی کمی به تعداد طبقات و دوره تناوب سازه دارد.

کاهش ضریب رفتار در نسبت شکل پذیری ۲، حدود ۷، ۱۰، ۸ و ۸ درصد به ترتیب برای سازه های ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه می باشد. بدین ترتیب در سطح شکل پذیری هدف کم، سازه های کوتاه تا متوسط، تغییرات بیش تری نسبت به سازه های متوسط تا بلند را تجربه می کنند. در نسبت شکل پذیری ۴، کاهش ضریب رفتار در سازه های ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب برابر با ۱۲، ۲۴، ۲۰ و ۱۵

درصد و در نسبت شکل‌پذیری ۶، به ترتیب برابر با ۱۹، ۱۶، ۱۱ و ۱۸ درصد است. بدین ترتیب در سازه‌های کوتاه و با سطح شکل‌پذیری کم، با افزایش تعداد طبقات، کاهش ضریب رفتار بیش‌تر است و باید اثر اندرکنش خاک-سازه در این نوع سازه‌ها لحاظ شود.

شکل ۷. ضریب رفتار در حالت بستر صلب و بستر انعطاف‌پذیر برای سازه‌های ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه روی خاک نوع D

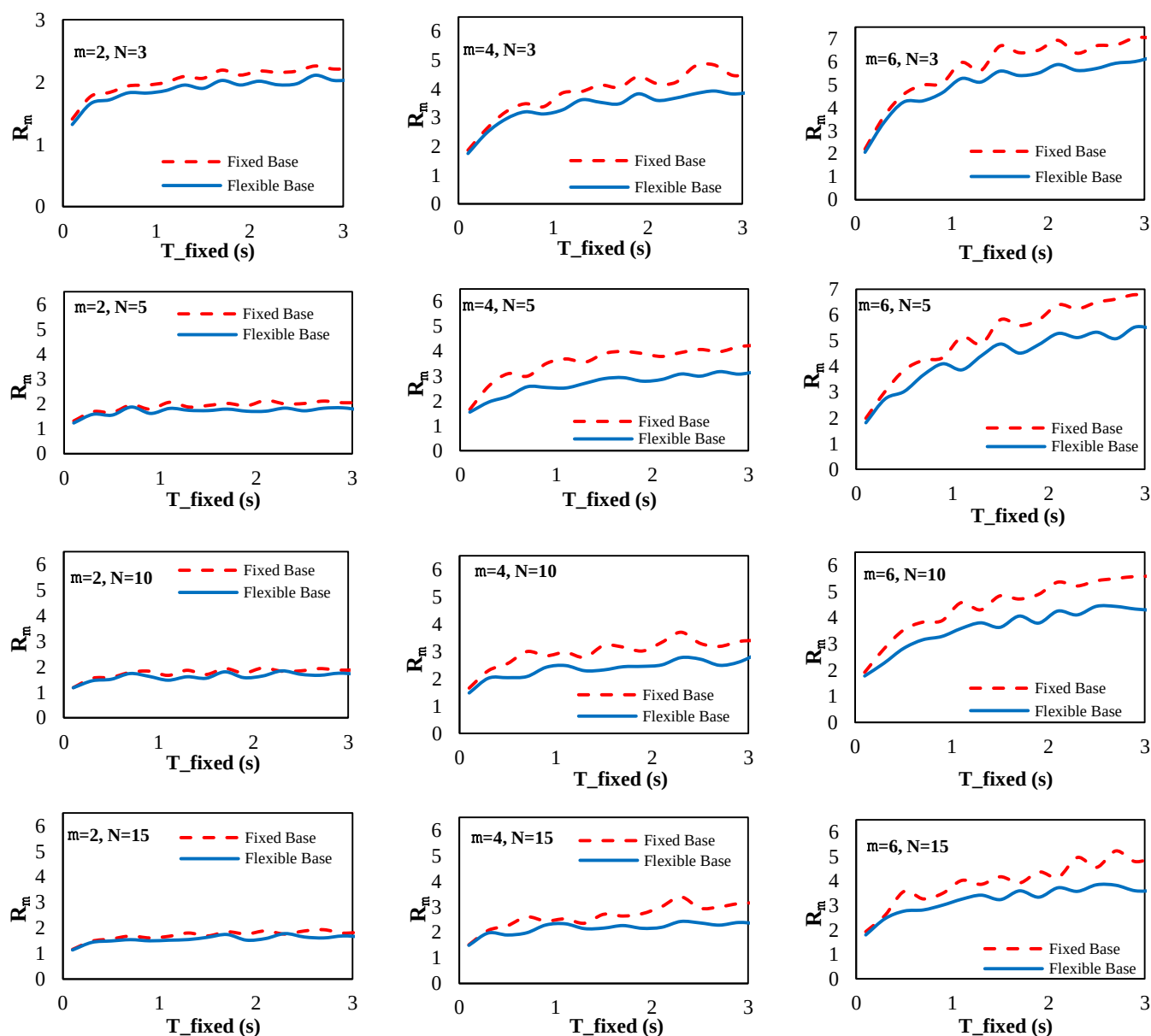


Fig. 7. Strength reduction factor of fixed-base case and flexible-base case for 3, 5, 10 and 15 story structures on soil type D

شکل‌پذیری هدف سازه، ضریب رفتار افزایش می‌یابد. بدین معنی که هرچه نیاز به شکل‌پذیری بیش‌تری در سازه وجود داشته باشد، نسبت تقاضای الاستیک به تقاضای غیرالاستیک آن افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، همان‌طور که گفته شد هرچه نسبت شکل‌پذیری بالاتر باشد، تغییرات مقدار ضریب رفتار بیش‌تر است و در نسبت‌های شکل‌پذیری کم ($\mu=2$) دامنه تغییرات ضریب رفتار کم

۲-۳- تأثیر شکل‌پذیری هدف

در اشکال (۸ و ۹) چگونگی تغییرات متوسط ضریب رفتار R_{μ} نسبت به شکل‌پذیری‌های هدف نشان داده شده است. اشکال (۸ و ۹) به ترتیب، متوسط نتایج تحلیل‌های دینامیکی بر روی خاک نوع D و خاک نوع E را نشان می‌دهد. مطابق با این اشکال مشاهده می‌شود که فارغ از تعداد طبقات سازه، با افزایش نسبت

کاهش در نسبت‌های شکل‌پذیری بالاتر قابل ملاحظه‌تر است. بدین صورت اندرکنش خاک-سازه تقاضای مقاومتی در سازه‌های سخت‌تر (تعداد طبقات پایین) را بیش‌تر تحت تأثیر قرار می‌دهد و قادر است تا ۲۰ درصد نیز ضریب رفتار را کاهش دهد. بنابراین چنانچه سازه طبق آیین‌نامه ۲۸۰۰ طرح شود، شکل‌پذیری کمتری را تجربه خواهد کرد و آسیب‌پذیرتر خواهد بود.

شکل ۹. تأثیر نسبت شکل‌پذیری بر ضریب رفتار سازه‌ای برای سازه‌های ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه بر روی خاک نوع E

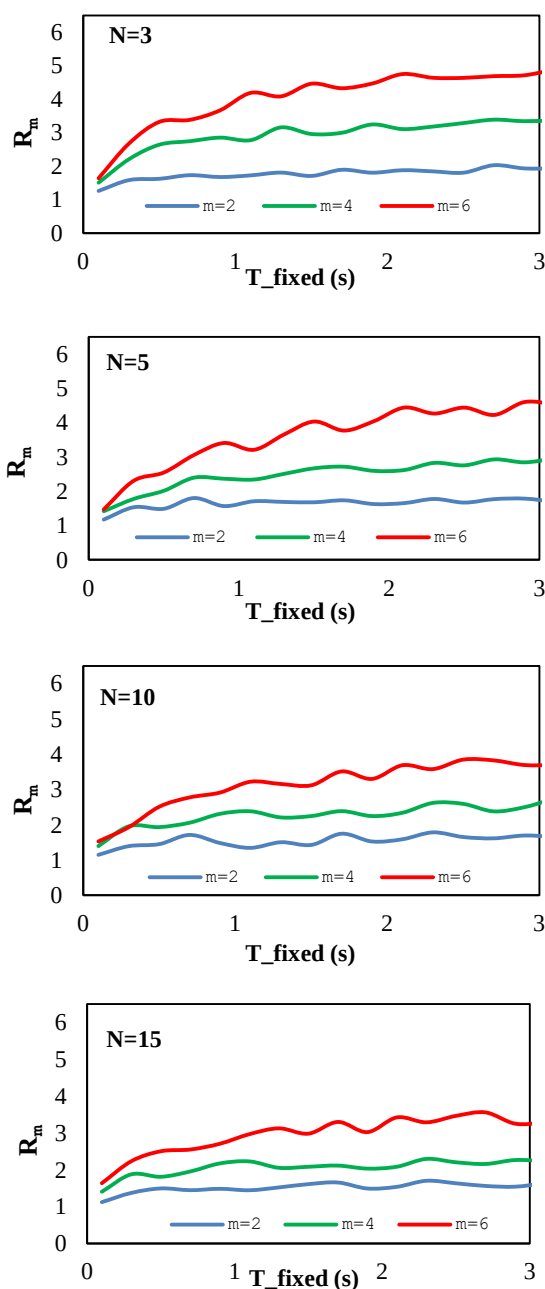


Fig. 9. The effect of ductility demand ratio on Strength reduction factor for 3, 5, 10 and 15 story structures on soil type E

است. همچنین با بررسی نمودارها مشاهده می‌شود که به طور کلی با افزایش دوره تناوب حالت بستر صلب، ضریب رفتار در پیوندهای کم افزایش یافته است و در دوره تناوب‌های بالاتر با شیب ملایم و یا نزدیک به صفر تغییر می‌کند.

با مقایسه سازه‌های چندطبقه برای هر دو نوع خاک نرم، می‌توان دریافت که با افزایش تعداد طبقات، ضریب رفتار کاهش می‌یابد. این

شکل ۸. تأثیر نسبت شکل‌پذیری بر ضریب رفتار سازه‌ای برای سازه‌های ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه بر روی خاک نوع D

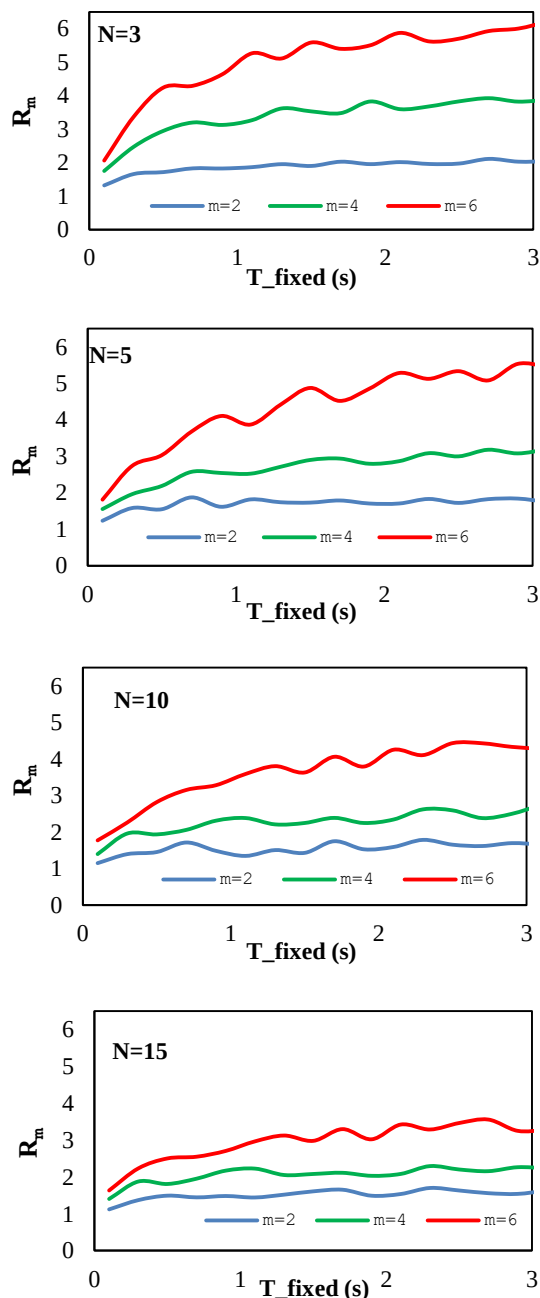


Fig. 8. The effect of ductility demand ratio on Strength reduction factor for 3, 5, 10 and 15 story structures on soil type D

۳-۳- تأثیر نوع خاک

در شکل (۱۰) نتایج ضرب رفتار برای هر دو نوع خاک به همراه مقایسه با حالت ثابت نشان داده شده است. با مقایسه نتایج دو خاک D و E مشاهده می‌شود که هرچه خاک نرم‌تر باشد، به عبارت دیگر سرعت موج برشی آن کم‌تر باشد، آثار اندرکنش خاک-سازه بیش‌تر خواهد بود. این امر برای سازه‌های ۳ و ۵ طبقه بیش‌تر است. نسبت کاهش مجدد ضریب رفتار در این دو تیپ سازه، برای شکل پذیری هدف ۲ برابر با ۵ درصد، شکل پذیری

هدف ۴، برابر با ۱۰ درصد و شکل‌پذیری هدف ۶، برابر با ۱۸ درصد می‌باشد. به عبارت دیگر از آنجایی که ضریب رفتار پیشنهادی در آیین‌نامه‌های طراحی بر مبنای بستر صلب هستند، در صورت استفاده از این ضرایب، تقاضای مقاومتی محاسبه شده کم‌تر از واقعیت خواهد بود و نتایج طراحی غیرمحافظه‌کارانه می‌شود. بنابراین زمانی که آثار اندرکنش خاک-سازه قابل ملاحظه باشد، باید خاک به صورت کامل مدل و نتایج سیستم نهایی استخراج شود.

شکل ۱۰. تأثیر سرعت موج برشی بر ضریب رفتار سازه‌ای در سازه‌های ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه

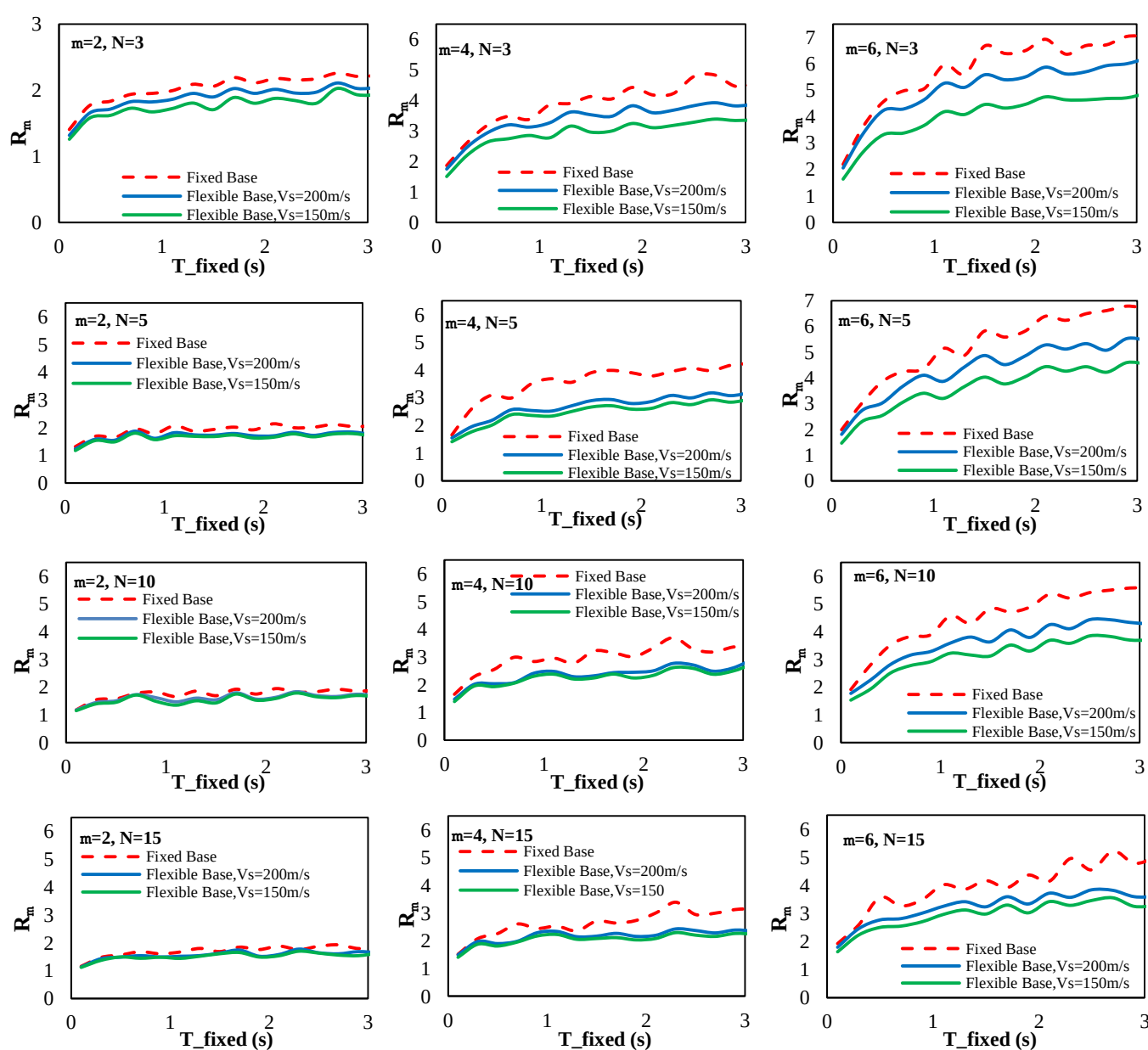


Fig. 10. The effect of soil shear velocity on Strength reduction factor for 3, 5, 10 and 15 story structures on soil type II

۳-۴- تأثیر نسبت ابعادی (h/r)

ابعادی در سازه ۱۰ طبقه، ضریب رفتار حدود ۱۰ درصد افزایش یافته است. لیکن این افزایش در سازه‌ی ۳ طبقه حدود ۶ درصد می‌باشد. بنابراین هر چه تعداد طبقات سازه بالاتر باشد و سازه لاغرتر شود، ضریب رفتار برخلاف نتایج قبل، افزایش خواهد یافت.

در شکل (۱۱) اثر نسبت ابعادی (h/r) بر ضریب رفتار نشان داده شده است. نسبت ابعادی برابر با ارتفاع مؤثر سازه به شعاع معادل پی طبق رابطه‌ی ۲ است. مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت

شکل ۱۱. تأثیر نسبت ابعادی بر ضریب رفتار در سازه‌های ۳ و ۱۰ طبقه

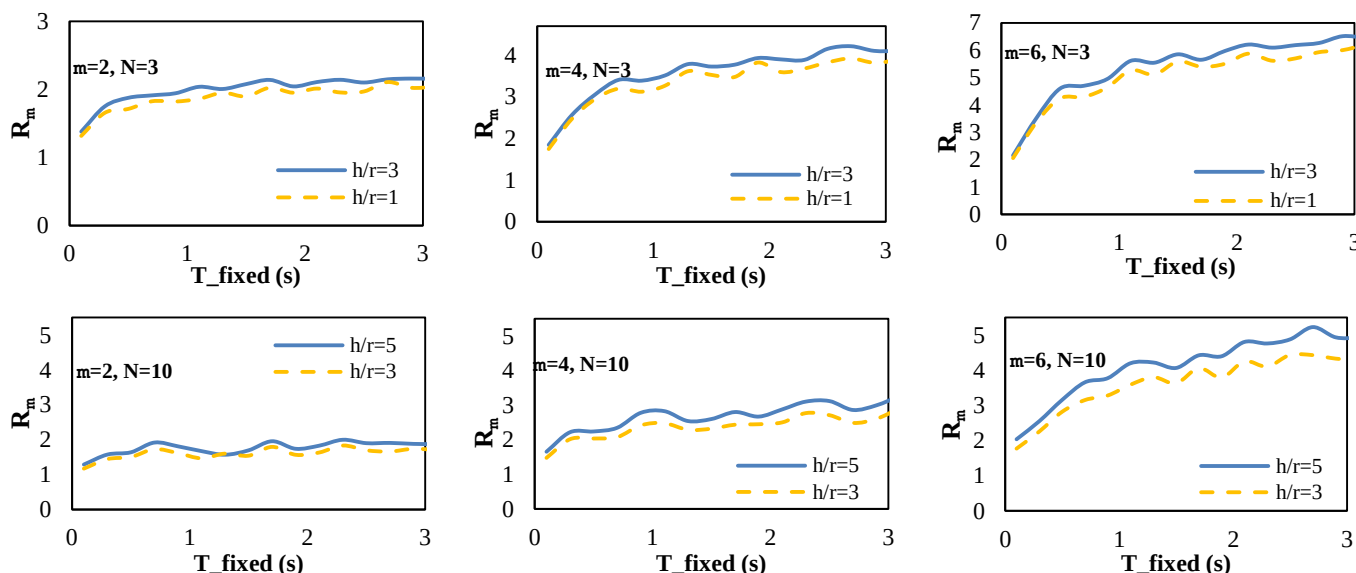


Fig. 11. The effect of aspect ratio on Strength reduction factor for 3 and 10 story structures

خاک محاسبه و با یکدیگر مقایسه شدند. تحلیل‌های تاریخیچه زمانی روی ۲۲ زلزله ثبت شده روی خاک‌های D و E در نرم‌افزار OpenSees انجام شدند. سازه‌های به صورت دوبعدی و خاک به صورت المان‌های کرنش مسطح مدل شدند. یافته‌های این مطالعه را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

- به طور کلی اندرکنش خاک-سازه ضریب رفتار سازه‌ای را کاهش می‌دهد. به عبارت دیگر تقاضای مقاومتی سازه مستقر بر محیط خاک متفاوت با سازه با بستر صلب است. در این حالت برای فراتر رفتن از یک شکل‌پذیری معین، نیاز به کاهش کم‌تری در برش پایه الاستیک وجود دارد. بدین ترتیب استفاده از ضرایب رفتار آیین‌نامه‌ای در طراحی سازه‌ها، به ویژه سازه‌هایی که تحت تأثیر اندرکنش خاک-سازه هستند، غیرمحافظة کارانه خواهد بود و شکل‌پذیری هدف تأمین نخواهد شد. در صورت استفاده از ضرایب آیین‌نامه‌ای، تقاضای مقاومتی محاسبه شده کم‌تر از واقعیت خواهد بود و نتایج طراحی غیرمحافظة کارانه می‌شود. بنابراین زمانی که آثار اندرکنش خاک-سازه قابل ملاحظه باشد، باید خاک به صورت کامل مدل و نتایج سیستم نهایی استخراج شود.

۴- درستی آزمایی

در این بخش، از نتایج مطالعات گنجوی و هائو برای بررسی اعتبار نتایج به دست آمده استفاده می‌شود. گنجوی و هائو در سال ۲۰۱۲ تغییرات ضریب رفتار را روی سیستم‌های چند درجه‌آزادی و سیستم‌های معادل یک درجه‌آزادی در مدل‌های ساختمان برشی تحت حرکات زمین زلزله بررسی کردند. المان خاک - پی بر اساس مدل مخروطی به صورت خطی مدل‌سازی شده است [28]. در شکل (۱۲)، نتایج پژوهش گنجوی و هائو به همراه نتایج این مطالعه برای چهار حالت سازه‌ای نشان داده شده است. مطابق با این نمودارها مشاهده می‌شود که نتایج این پژوهش انتخاب خوبی با نتایج موجود در ادبیات فنی دارد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی تغییرات ایجاد شده در مقادیر ضریب رفتار سیستم سازه-خاک پرداخته شد. به کمک مطالعات عددی صورت گرفته روی سازه‌های چند طبقه با دامنه دوره تناوب ۰,۱ تا ۳ ثانیه و نسبت‌های شکل‌پذیری ۲، ۴ و ۶، ضرایب رفتار سازه‌ای هم در حالت بستر صلب و هم با در نظر گرفتن محیط

شکل ۱۲. مقایسه نتایج این پژوهش با ادبیات فنی

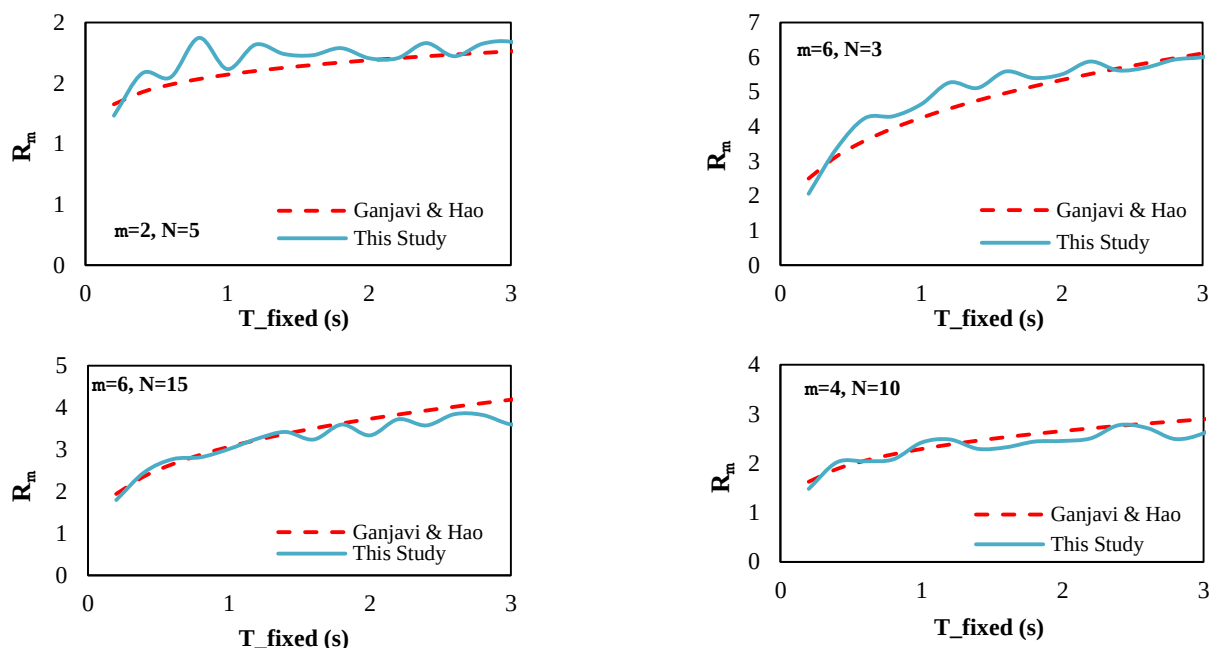


Fig. 12. The comparison of the results of this research with literature

ضریب رفتار را در سازه‌های سخت و کوتاه حدود ۲۰ درصد کاهش دهد. در این حالت چنانچه به شکل‌پذیری بالایی نیاز باشد، سازه آسیب‌پذیر خواهد بود.

- با کاهش سرعت موج برشی در خاک، آثار اندرکنش خاک-سازه قابل توجه‌تر می‌شود و ضریب رفتار کم‌تر می‌شود. بنابراین هرچه خاک نرم‌تر باشد، به گونه‌ای که اختلاف سختی سازه و خاک بیش‌تر شود، ضریب رفتار کم‌تر خواهد بود. این امر برای سازه‌های ۳ و ۵ طبقه بیش‌تر می‌باشد. نسبت کاهش مجدد ضریب رفتار در این دو تیپ سازه، برای شکل‌پذیری هدف ۲ برابر با ۵ درصد، شکل‌پذیری هدف ۴، برابر با ۱۰ درصد و شکل‌پذیری هدف ۶، برابر با ۱۸ درصد می‌باشد.
- با فرض ثابت بودن تعداد طبقات، هرچه نسبت ابعادی بزرگ‌تر شود، ضریب رفتار نیز افزایش می‌یابد. این افزایش در سازه ۱۰ طبقه، حدود ۱۰ درصد و در سازه‌ی ۳ طبقه حدود ۶ درصد می‌باشد. پس هرچه نسبت شکل‌پذیری بالاتر باشد، مقدار افزایش ضریب رفتار نیز بیش‌تر خواهد بود. هرچه لاغری سازه افزایش یابد، ضریب رفتار برخلاف نتایج قبل، افزایش خواهد یافت. در سازه‌های لاغر و بلندمرتبه تأثیر اندرکنش سینماتیکی در افزایش تغییر مکان جانبی قابل ملاحظه‌تر از کاهش برش پایه می‌باشد.

- با افزایش نسبت شکل‌پذیری هم در سازه با بستر صلب و هم در بستر انعطاف‌پذیر ضریب رفتار نیز افزایش می‌یابد. تأثیر اندرکنش خاک-سازه در نسبت شکل‌پذیری‌های بالاتر، بیش‌تر است.
- کاهش ضریب رفتار در نسبت شکل‌پذیری ۲، حدود ۷، ۱۰، ۸ و ۸ درصد به ترتیب برای سازه‌های ۳ طبقه، ۵ طبقه، ۱۰ طبقه و ۱۵ طبقه می‌باشد. بدین ترتیب در سطح شکل‌پذیری هدف کم، سازه‌های کوتاه تا متوسط، تغییرات بیش‌تری نسبت به سازه‌های متوسط تا بلند را تجربه می‌کنند.
- در نسبت شکل‌پذیری ۴، کاهش ضریب رفتار در سازه‌های ۳ طبقه، ۵ طبقه، ۱۰ طبقه و ۱۵ طبقه به ترتیب برابر با ۲۴، ۲۰ و ۱۵ درصد و در نسبت شکل‌پذیری، به ترتیب برابر با ۱۱، ۱۶، ۱۹ و ۱۸ درصد می‌باشد. بدین ترتیب، تأثیر کاهش تقاضا در سازه‌های کوتاه تا متوسط با سطح شکل‌پذیری کم قابل ملاحظه می‌باشد و باید اثر اندرکنش خاک-سازه در این نوع سازه‌ها لحاظ شود.
- هرچه تعداد طبقات سازه بالاتر رود، ضریب رفتار کم‌تر می‌شود. این موضوع هم در سازه با بستر صلب و هم سازه با بستر انعطاف‌پذیر صادق است اما میزان کاهش آن در حالت بستر انعطاف‌پذیر بیش‌تر است. اندرکنش خاک-سازه می‌تواند

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می کنند که هیچ نوع تعارض منافع وجود ندارد.

References

- [1] Miranda, E., 1997, January. Strength reduction factors in performance-based design. In *Proceedings of EERC-CUREe Symposium, Berkeley, CA*.
- [2] Ali, T., Eldin, M.N. and Haider, W., 2023. The effect of soil-structure interaction on the seismic response of structures using machine learning, finite element modeling and ASCE 7-16 methods. *Sensors*, 23(4), p.2047.
- [3] Shi, Y., Wang, D., Qin, H., Chen, X., Han, J. and Zhang, Z., 2023. Strength reduction factor spectra for SDOF systems with structural fuses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 169, p.107895.
- [4] Requena-Garcia-Cruz, M.V., Bento, R., Durand-Neyra, P. and Morales-Esteban, A., 2022, April. Analysis of the soil structure-interaction effects on the seismic vulnerability of mid-rise RC buildings in Lisbon. In *Structures*, 38, pp. 599-617.
- [5] Maharjan, S. and Bahadur, K., 2021, March. Study of Soil-Structure Interaction Effects on Seismic Analysis. In *Proceedings of 9th IOE Graduate Conference*, 12.
- [6] Waqas, M., 2018. *Identification of an Efficient Method for Practicing Designers to Incorporate Soil-Structure Interaction Effects*. Doctoral dissertation, CAPITAL UNIVERSITY.
- [7] Tahghighi, H. and Rabiee, M., 2015. Nonlinear soil-structure interaction effects on building frames: a discussion on the seismic codes. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 17(2), pp.141-151..
- [8] Kanwal, F., 2017. *Evaluation of Response Modification Factor in Consideration of Soil-Structure Interaction*. Master Thesis.
- [9] Tabatabaiefar, S.H.R., 2012. *Determining seismic response of mid-rise building frames considering dynamic soil-structure interaction*. University of Technology Sydney (Australia).
- [10] Karimzada, N.A., 2015. *Performance-Based Seismic Design of reinforced concrete frame buildings: A direct displacement-based approach*. Master's thesis, İzmir Institute of Technology.
- [11] Folic, R., 2015. Performance Based Seismic Design of Concrete Buildings Structures - Bases. International conference, *Contemporary achievements in civil engineering* 24. April. Subotica, SERBIA, pp. 207-215.
- [12] Tabatabaiefar, H.R. and Massumi, A., 2010. A simplified method to determine seismic responses of reinforced concrete moment resisting building frames under influence of soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(11), pp.1259-1267.
- [13] Nguyen, H.D. and Shin, M., 2021. Effects of soil-structure interaction on seismic performance of a low-rise R/C moment frame considering material uncertainties. *Journal of Building Engineering*, 44, p.102713.
- [14] Ghannad, M.A. and Jahankhah, H., 2007. Site-dependent strength reduction factors for soil-structure systems. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(2), pp.99-110.
- [15] Avilés, J. and Pérez-Rocha, L.E., 2003. Soil-structure interaction in yielding systems. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 32(11), pp.1749-1771.
- [16] Miranda, E., 1997, January. Strength reduction factors in performance-based design. In *Proceedings of EERC-CUREe Symposium, Berkeley, CA*.
- [17] Miranda, E., 1993. Site-dependent strength-reduction factors. *Journal of structural engineering*, 119(12), pp.3503-3519.
- [18] Ahmadi, E., 2019. Concurrent effects of inertial and kinematic soil-structure interactions on strength-ductility-period relationship. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 117, pp.174-189.
- [19] Veda, A.V. and Manchalwar, A., 2021, July. Response reduction factor based on geometric variation with soil structure interaction. In *AIP Conference Proceedings*, 2358(1).
- [20] Eser, M., Aydemir, C. and Ekiz, I., 2011. Effects of soil structure interaction on strength reduction factors. *Procedia Engineering*, 14, pp.1696-1704.
- [21] Ganjavi, B. and Hao, H., 2014. Strength reduction factor for MDOF soil-structure systems. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(3), pp.161-180.
- [22] Aydemir, M.E. and Ekiz, I., 2013. Soil-structure interaction effects on seismic behaviour of multistorey structures. *European journal of environmental and civil engineering*, 17(8), pp.635-653.
- [23] Lu, Y., Hajirasouliha, I. and Marshall, A.M., 2016. Performance-based seismic design of flexible-base multi-storey buildings considering soil-structure interaction. *Engineering Structures*, 108, pp.90-103.
- [24] GARCIA, M.F., Bazan, J.L. and Fernandez-Davila, V.I., 2024. Parametric Evaluation of the Response Modification Factor R Considering Bidirectional Ground Motions. Available at SSRN 4770563.
- [25] El Janous, S.O.U.M.A.Y.A. and El Ghoulbzouri, A.,

2024. Seismic Vulnerability of Irregular Reinforced Concrete Buildings Considering the Soil-structure Interaction. *International Journal of Engineering*, 37(1), pp.104-114.
- [26] ASCE7-16. 2022. *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers.
- [27] Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L., 1969. Finite dynamic model for infinite media. *Journal of the engineering mechanics division*, 95(4), pp.859-877.
- [28] FEMA, 2009, *Quantification of Building Seismic Performance Factors*, FEMA P-695, prepared by Applied Technology Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- [29] Ganjavi, B. and Hao, H., 2014. Strength reduction factor for MDOF soil-structure systems. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(3), pp.161-180.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Hajian, M. and Attarnejad, R., 2025. An Investigation of the strength reduction factor considering soil-structure Interaction. *Modares Civil Engineering journal*, 25(2), pp.53-66.

DOI: 10.22034/25.2.53

