



University Of Qom



Seismic Analysis of Soil-Concrete Structure System in Time Domain by Numerical Modeling of Earthquake Wave Propagation

Hosna Kianfar¹, Hamid Mohammadnezhad²

1. M.Sc. Student, Faculty of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: h.kianfar@mail.sbu.ac.ir
2. Corresponding author, Assistant Professor, Faculty of Civil, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: h_mohammadnezhad@sbu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 27 Sep 2023

Revised 20 Mar 2024

Accepted 02 Apr 2024

Keywords:

Reinforced Concrete Frame, Soil-Structure Interaction, Radiation Damping, Seismic Wave Propagation, Domain Reduction Method.

ABSTRACT

The behavior of a structure changes when it interacts with underlying soil, which acts as a flexible base, as compared to a rigid base condition. Given the importance of performance-based design, the direct method for soil-structure interaction (SSI) problem is essential for accurate characterization of the non-linear behavior of the soil and the structure. Using direct method in FE modeling of SSI problem poses several challenges. These include accurately representing the semi-infinite soil domain, accounting the inertia effects, radiation damping, and wave propagation, and properly applying earthquake ground motions at the boundaries, which coincide with the energy-absorbing boundaries. This article presents a precise and practical approach to tackle these difficulties, which is well-suited for implementation in FE software such as ABAQUS. This approach utilizes the combination of the domain reduction method (DRM) and Lysmer energy-absorbing boundaries. The accuracy of the model is assessed by some validations and compared by traditional Winckler's approaches; results showed the superior accuracy of the proposed approach. In addition, this method is used to demonstrate its efficiency in solving typical engineering issues. Furthermore, to demonstrate the capabilities of this method in solving engineering problems, seismic analyses of three types of concrete structures (low, mid, and high-rise) under various seismic scenarios are investigated. Seismic frequency content, soil type, and other parameters are examined. The analysis results demonstrate the substantial impact of mentioned characteristics on the structural reaction. In particular, the research findings suggest that low-rise structures show greater responses in comparison to other structures in this study.

Cite this article: Kianfar H, Mohammadnezhad H. Seismic Analysis of Soil-Concrete Structure System in Time Domain by Numerical Modeling of Earthquake Wave Propagation. Civil Infrastructure Researches. 2024; Article in Press. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.9904.1513>





تحلیل لرزه‌ای سیستم خاک - ساختمان بتن مسلح در فضای زمانی با مدل‌سازی عددی انتشار موج لرزه‌ای

حسنی کیان‌فر^۱، حمید محمدنژاد^۲

۱. دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: h.kianfar@mail.sbu.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: h_mohammadnezhad@sbu.ac.ir

چکیده

اندرکنش بین سازه، پی و خاک زیرین آن (بستر انعطاف‌پذیر) رفتار سازه را نسبت به حالت بستر صلب تغییر می‌دهد. روش مستقیم در تحلیل مسئله اندرکنش خاک-سازه به دلیل امکان مدل‌سازی رفتار غیرخطی سازه و خاک و رفتار واقعی سازه بخصوص در رویکرد طراحی براساس عملکرد از اهمیت بالایی برخوردار است. مدل‌سازی اجزای محدود مسئله اندرکنش خاک-سازه به روش مستقیم چالش‌هایی مانند مدل‌سازی صحیح محیط نیم‌بینهایت خاک با در نظر گرفتن اثرات اینرسی، میرایی تشعشعی، انتشار موج و اعمال مناسب و صحیح شتاب‌نگاشت زلزله به مدل در مرزهای بریده‌شده ناحیه دور همزمان با مرز جاذب انرژی را با خود به همراه دارد. در این مقاله، روش مستقیم با دقت بالا و در عین حال کاربردی برای رفع چالش‌های مذکور جهت اعمال در نرم‌افزارهای اجزای محدود معرفی می‌شود. این روش، براساس ترکیب روش کاهش دامنه با مرزهای جاذب لایزمر می‌باشد که پس از اعمال در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس راستی‌آزمایی می‌گردد. اختلاف پاسخ‌های حاصل از تحلیل به روش اندرکنشی پیشنهادی در این مقاله، با نتایج روش‌های اندرکنشی مرسوم وینکلر نشان داد که تحلیل اندرکنشی پیشنهادی از دقت بیشتری برخوردار است. در ادامه، برای نشان دادن قابلیت‌های این روش در حل مسائل متداول مهندسی، رفتار لرزه‌ای سه نوع سازه بتنی کوتاه، میان و بلندمرتبه تحت زلزله‌های مختلف تحلیل و پارامترهای محتوای فرکانسی زلزله، نوع خاک، حوزه زلزله به تفصیل بررسی گردید. نتایج تحلیل نشان داد که پارامترهایی نظیر محتوای فرکانسی، نوع خاک و حوزه زلزله بر میزان و روند پاسخ‌های تحلیل تأثیرگذار است. برای مثال، در این تحقیق به صورت کلی، پاسخ‌های سازه کوتاه‌مرتبه و زلزله‌های حوزه نزدیک بیشتر از سایر حالت‌ها به‌دست آمد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۴

کلیدواژه‌ها:

قاب بتن مسلح، اندرکنش خاک و سازه، میرایی تشعشعی، انتشار موج لرزه‌ای، روش کاهش دامنه.

استناد: کیان‌فر حسنی، محمدنژاد حمید. تحلیل لرزه‌ای سیستم خاک- ساختمان بتن مسلح در فضای زمانی با مدل‌سازی عددی انتشار موج

لرزه‌ای. پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۳؛ آماده به انتشار. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.9904.1513>



۱- مقدمه

روش اجزای محدود برای ارزیابی لرزه‌ای ساختمان با در نظر گرفتن توپوگرافی سطحی و بی‌نظمی‌های زمین‌شناسی استفاده کردند [۶].

به طور کلی، گسسته‌سازی محیط نیم‌بینهایت خاک با تعداد محدودی از المان‌ها میسر نیست و لازم است مدل با تعریف شرایط مرزی مناسب محدود گردد. در مدل‌سازی به روش مستقیم، روش‌های استاندارد عددی (از قبیل اجزای محدود و تفاضل محدود) به کار گرفته می‌شوند تا دامنه مسأله در زمان و فضا گسسته گردد. لازم به ذکر است که امکان مدل‌سازی دامنه نیم‌بینهایت با استفاده از روش اجزای محدود به صورت مستقیم میسر نیست و تنها امکان جداسازی زیردامنه ناحیه نزدیک، که شامل خصوصیات غیرهمگن و یا غیرخطی دامنه می‌شوند، فراهم است. بنابراین اثر خصوصیات دامنه جدا شده در ناحیه دورتر با استفاده از به کارگیری شرایط مرزی مناسب در مرزهای محیط انتخاب شده به درستی لحاظ می‌گردد [۷]. شرایط مرزی باید در برگیرنده خصوصیات رفتاری محیط نیم‌بینهایت خاک باشد و امکان تبادل امواج ورودی و خروجی را دارا باشد تا انرژی امواج عبوری را از داخل و خارج ناحیه تحریک به شکل مناسب در نظر گیرد [۸].

با وجود تمام موارد ذکر شده، اعمال همزمان نیروی زلزله و شرایط مرزی به مرزهای دور محیط نیم‌بینهایت خاک یکی از چالش‌های جدی است که مسائل اندرکنشی اجزای محدودی به روش مستقیم با آن مواجه‌اند. همچنین از رویکردهای مشترک در مسائل اندرکنش خاک-سازه محاسبه همزمان جنبش ایجاد شده زمین در مجاورت گسل، انتشار تحریک لرزه‌ای در مسیر انتشار و اعمال زلزله به سازه در ساختگاه است که همگی در مدل واحد در نظر گرفته می‌شوند. این ساختار در بسیاری از موارد از کاربرد مناسبی برخوردار است؛ اما در شرایطی که محل گسل از ساختگاه مورد مطالعه فاصله زیادی داشته باشد حجم مسأله بسیار افزایش یافته و از تأثیر روش‌های مذکور می‌کاهد. روش پیشنهادی باید امکان شبیه‌سازی

تقریباً تمامی سازه‌های عمرانی دارای فونداسیون و المان‌های تکیه‌گاهی هستند که یا بر خاک قرار گرفته‌اند یا در آن مدفون هستند. بنابراین اندرکنش خاک-سازه یکی از مهمترین موضوعات در زمینه مطالعات مهندسی عمران محسوب می‌شود که توجه گسترده‌ای را در دهه‌های اخیر در سراسر جهان به خود معطوف کرده است. تحقیقات در زمینه اندرکنش خاک-سازه نشان می‌دهد که پاسخ دینامیکی سازه مستقر بر بستر انعطاف‌پذیر خاک با پاسخ همان سازه بر بستر صلب، تفاوت چشم‌گیری دارد [۱-۳]. بنابراین، بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مستقر بر خاک نیازمند تحلیل دینامیکی دو یا سه‌بعدی سیستم خاک-فونداسیون-سازه می‌باشد.

برای در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه در تحلیل‌ها از دو روش متداول زیرسازه و مستقیم استفاده می‌شود. برای تحلیل در فضای فرکانسی می‌توان از روش زیرسازه استفاده کرد که در آن امکان مدل‌سازی محیط نیم‌بینهایت خاک فراهم است؛ اما به دلیل محدودیت‌هایی که در به کارگیری این روش وجود دارد، از قبیل اجبار به انتخاب محیط‌هایی با هندسه ساده و رفتار مصالح همگن و استفاده از اصل جمع آثار قوا، استفاده از آن تنها در مسائل خطی امکان‌پذیر بوده و بررسی رفتار غیرخطی سازه‌ها همانند ترک خوردگی بتن در آن در فرمول‌بندی مرسوم روش میسر نیست. به منظور بررسی رفتار غیرخطی مصالح، هندسه‌های نامنظم ساختگاه و محیط‌های با مشخصات رفتاری غیرهمگن، از روش مستقیم استفاده می‌شود که در آن امکان مدل‌سازی و تحلیل کل سیستم خاک-سازه فراهم است [۴].

روش اجزای محدود در شبیه‌سازی دامنه‌های با هندسه پیچیده‌تر از خود انعطاف بیشتری نشان می‌دهد، به‌گونه‌ای که آن را می‌توان ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی لرزه‌ای به خصوص در دامنه بزرگ ناهمگون با در نظر گرفتن اثرات توپوگرافی برشمرد [۵]. محققان از

اندرکنش خاک-سازه است. از آنجاکه امکان اعمال این روش در نرم افزارهای اجزای محدود به خودی خود میسر نیست، با استفاده از کدهای توسعه داده شده در نرم افزار متلب، این رویکرد به نرم افزار تجاری اجزای محدود آباکوس اضافه گردید و از آن برای تحلیل لرزه‌ای سیستم خاک-ساختمان بتن مسلح استفاده شد. در این مسیر، پس از چندین مرحله راستی‌آزمایی، نتایج تحلیل با نتایج حاصل از روش مرسوم اندرکنش خاک-سازه مرسوم به روش وینکلر مقایسه گردید. در پژوهش پیش رو، همچنین پس از اطمینان از عملکرد روش به کار گرفته شده، قابلیت‌های روش کاهش دامنه در تحلیل مسائل متداول مهندسی بررسی گردید؛ به طوری که دو نوع سازه یک درجه آزادی و قاب بتن‌آرمه کوتاه، میان و بلندمرتبه تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک با محتوای فرکانسی کم، متوسط و زیاد تحلیل و نتایج پاسخ سازه ارزیابی شد.

۲- مبانی نظری

۲-۱- روش کاهش دامنه

براساس شکل ۱، گام اول این روش که منبع لرزه‌ای و مسیر انتشار را شبیه‌سازی می‌کند، تنها محیط نیمه‌بینهایت خاک را شامل می‌شود. پاسخ‌های این مرحله به صورت مسئله سطح آزاد و از روش‌های گوناگون تحلیلی و عددی قابل محاسبه است. در گام دوم، اما اثرات ساختگاهی محلی در نظر گرفته می‌شود و ورودی آن شامل نیروهای معادل محلی رابطه (۱) است که از نتایج تحلیل مرحله اول به دست می‌آید:

$$\mathbf{P}_{eff} = \begin{Bmatrix} \mathbf{P}_i^{eff} \\ \mathbf{P}_b^{eff} \\ \mathbf{P}_e^{eff} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ -\mathbf{M}_{be}^{\Omega_{ext}} \ddot{u}_e^0 - \mathbf{K}_{be}^{\Omega_{ext}} u_e^0 \\ \mathbf{M}_{eb}^{\Omega_{ext}} \ddot{u}_b^0 + \mathbf{K}_{eb}^{\Omega_{ext}} u_b^0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

در این مرحله با داشتن نیروهای وارد بر لایه DRM و اعمال شرایط مرزی مناسب، پاسخ‌های سازه مدل اصلی پس از تحلیل به دست می‌آید.

صحیح انتشار موج زلزله در محیط خاک از مرزها تا ساختگاه را نیز علاوه بر رفع چالش‌های بیان شده فراهم آورد.

بنابراین روشی جایگزین که در آن الزامی بر لحاظ کردن کامل، دقیق و همزمان هندسه و مشخصات مصالح محیط موجود ما بین گسل تا ساختگاه وجود ندارد، توسط بیلک^۱ و همکاران ارائه شد. این روش با نام روش کاهش دامنه (DRM)^۲ یک روند دو مرحله‌ای است که از آن برای تحلیل هر نوع سازه استفاده می‌شود. در این روش اثرات گسل، مسیر انتشار موج و اثرات ساختگاه به درستی در نظر گرفته می‌شود و چالش اعمال همزمان شتاب‌نگاشت زلزله در مرزها با شرایط مرزی جاذب برطرف می‌گردد [۸] و [۹]. با توجه به کارایی و قابلیت‌های بالای روش کاهش دامنه، مورد استقبال محققان بسیاری قرار گرفت که از آن در مسائل بزرگ‌مقیاس گسل تا ساختگاه با امکان در نظرگیری صحیح انتشار امواج در محیط خاک استفاده گردید. محمدنژاد و همکاران با کمک روش کاهش دامنه به بررسی پاسخ لرزه‌ای سیستم سد-فونداسیون-سیال سد کوینا پرداختند [۱۰]. مراد و صباح^۳، نتایج حاصل از تحلیل غیرخطی پوش‌آور و تحلیل غیرخطی تاریخچه زمانی را در تحلیل ساختمان بتن‌آرمه در بونفرو ایتالیا مورد مقایسه قرار دادند و برای در نظرگرفتن اثرات اندرکنش خاک-سازه از روش کاهش دامنه بهره جستند [۱۱]. ژنگ و تاسیراوقلو^۴، با ترکیب شرط مرزی PML و روش DRM برای در نظرگرفتن انتشار موج در محیط نیمه‌بینهایت خاک حین اعمال امواج مایل SV به بررسی پاسخ لرزه‌ای ساختمان فولادی ۲۰ طبقه پرداختند [۱۲].

هدف مقاله حاضر، تشریح مبانی روش کاهش دامنه به عنوان یک روش مستقیم در فضای زمانی برای مسائل

^۱- Bielak

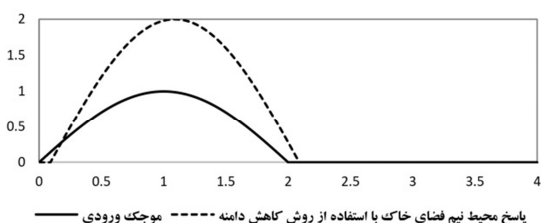
^۲- Domain Reduction Method

^۳- Mourad and Sabah

^۴- Zhang and Taciroglu

نتایج حاصل از مدل پیشنهادی با پاسخ روابط تحلیلی مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

فضای مستطیلی محدودی با ابعاد ۱۸۰ در ۶۰ متر با استفاده از المان‌های CPE4R در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس مدل‌سازی شده است. خصوصیات مصالح همگن منطبق با خصوصیات خاک نوع ۲ به کار برده در مدل می‌باشد. جهت شبیه‌سازی انتشار موج برشی خالص در سیستم، موجکی به شکل شتاب افقی در کف مدل اعمال شده است. تاریخچه زمانی موجک ورودی و پاسخ در سطح آزاد محیط نیم‌فضای الاستیک در شکل ۳ نشان داده شده است.

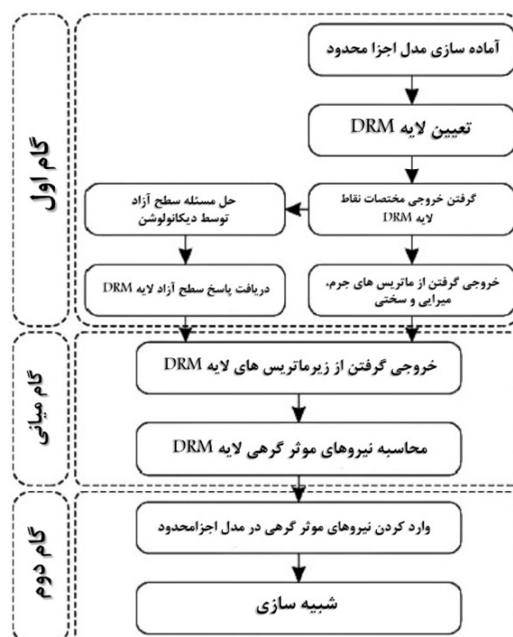


شکل ۳- موجک ورودی و پاسخ انتشار قائم آن در نیم‌فضای الاستیک به وسیله روش کاهش دامنه

بنابر تئوری انتشار موج یک‌بعدی، پاسخ سطح آزاد زمین باید دوبرابر تحریک ورودی و دارای اختلاف زمانی معین متناسب با فاصله و سرعت موج منتشر شده باشد. با توجه به انطباق نتایج مدل‌سازی عددی با روابط تحلیلی، می‌توان از اعمال صحیح روش کاهش دامنه در نرم‌افزار آباکوس و توانایی آن در مدل‌سازی انتشار موج و میرایی تشعشعی اطمینان پیدا کرد.

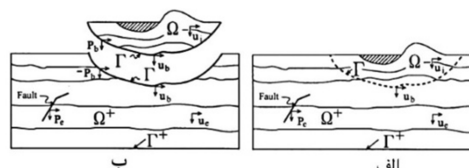
۳-۲- راستی‌آزمایی شرایط سطح آزاد انتشار یک‌بعدی شتاب‌نگاشت موج زلزله

جهت بررسی راستی اعمال روش کاهش دامنه و کد توسعه داده شده برای دیکانولوشن، در این بخش شتاب‌نگاشت سطح آزاد به وسیله کد دیکانولوشن تحلیل و مقادیر پاسخ در نقاط مختلف لایه به کمک روش کاهش دامنه به دست می‌آید. سپس مدل عددی با ابعاد مسأله قبلی برای شبیه‌سازی انتشار موج مربوط به شتاب‌نگاشت سطح آزاد در آباکوس ساخته شد و پس از تحلیل



شکل ۱- مراحل روش کاهش دامنه

توضیحات بیشتر در ارتباط با مبانی روش کاهش دامنه به تفصیل در [۲] و [۱۳] تشریح می‌گردد. در شکل ۲، نمای کلی مسئله نمایش داده شده است.



شکل ۲- نمای کلی مسئله

۳- راستی‌آزمایی

به منظور راستی‌آزمایی، قابلیت روش پیشنهادی و اطمینان از درستی نتایج، ابتدا انتشار موج در محیط نیمه‌بینهایت خاک با روابط تحلیلی و عددی موجود بررسی شد و در ادامه به منظور اطمینان از مدل‌سازی سازه‌ای، راستی‌آزمایی برای سازه یک درجه آزادی صورت گرفت.

۳-۱- راستی‌آزمایی حالت انتشار یک‌بعدی موج به شکل موجک در نیم‌فضای نامحدود با استفاده از روابط تحلیلی

صحت اعمال روش کاهش دامنه در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس در این بخش مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. بدین منظور، موج S در نیم‌فضای الاستیک منتشر شده و

پاسخ حاصل از نرم‌افزار ساینموسینگنال تطابق خوب و قابل قبولی دارند.

۴- مدل‌سازی عددی

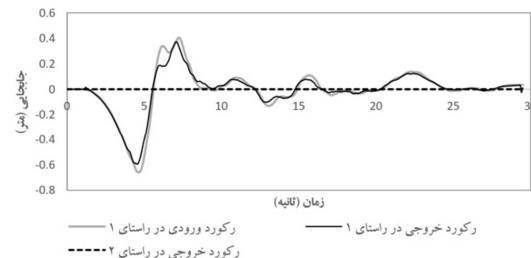
در پژوهش حاضر به وسیله کدهای توسعه داده شده و استفاده از روش کاهش دامنه و اعمال آن در نرم‌افزار آباکوس به مدل‌سازی اثرات اندرکنش خاک-سازه در سازه‌های بتن آرمه با در نظر گرفتن اثرات انتشار امواج و میرایی تشعشعی پرداخته شده است. در ادامه، ابتدا جزییات مدل‌سازی عددی بیان شده است. مدل‌های به کار گرفته شده در مقاله حاضر شامل سه قاب ۴، ۸ و ۱۲ طبقه بتن آرمه و سیستم یک درجه آزادی با دوره تناوب معادل این قاب‌ها می‌باشد که بر روی دو نوع خاک II و III مطابق با استاندارد ۲۸۰۰ شبیه‌سازی شده‌اند [۱۴]. همچنین مدل اندرکنشی در نرم‌افزار آباکوس به صورت دینامیکی ضمنی^۵ مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه به شرح خصوصیات قاب‌ها، خاک و شتاب‌نگاشت‌های انتخابی پرداخته شده است.

۴-۱- مشخصات مصالح

۴-۱-۱- مشخصات محیط خاک

جهت بررسی اثر خاک بر پاسخ‌های سیستم خاک-سازه در تحلیل اندرکنشی دو نوع خاک II و III مطابق استاندارد ۲۸۰۰ در نظر گرفته شد [۱۴]. خصوصیات خاک پژوهش حاضر از مطالعات ژئوتکنیکی واقعی استخراج شده است [۱۵]. سرعت موج برشی، ضریب کشسانی، مدول برشی، چگالی و ضریب پوآسون خاک نوع II به ترتیب ۶۰۰ متر بر ثانیه، ۱۶۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع، ۶۵۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع، ۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۲۸ و برای خاک نوع III، برابر ۳۲۰ متر بر ثانیه، ۵۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع،

دینامیکی مقادیر پاسخ در نقطه کنترل در سطح آزاد زمین در شرایط میدان آزاد استخراج و تاریخچه زمانی جابه‌جایی از مدل عددی با تاریخچه زمانی جابه‌جایی شتاب‌نگاشت سطح آزاد در یک نمودار مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین مقادیر جابه‌جایی در نقطه کنترل در راستای عمودی استخراج و بررسی شد که بنابراین با توجه به شرایط موج ورودی این جابه‌جایی برابر صفر می‌شود. نتایج یکی از تحلیل‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی بین پاسخ‌ها وجود دارد که نشان از راستی و دقت روش پیشنهادی و اعمال آن در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس دارد.



شکل ۴- تاریخچه جابه‌جایی زلزله Cape Mendocino

ایستگاه Bunker Hill FAA خاک نوع ۳

۳-۳- راستی‌آزمایی مدل‌سازی سیستم یک درجه آزادی

سه سیستم یک درجه آزادی با دوره تناوب‌های ۰/۴۲، ۱/۱۸ و ۱/۷ ثانیه در این مقاله مورد بررسی قرار گرفتند. در ابتدا سیستم یک درجه آزادی بدون حضور خاک تحت بارگذاری شتاب‌نگاشت‌های زلزله قرار گرفت و مقدار شتاب حداکثر در نقطه اعمال جرم متمرکز به عنوان خروجی در نظر گرفته شد؛ سپس با طیف پاسخ سیستم یک درجه آزادی با دوره تناوب منطبق بر دوره تناوب هر سازه، مقایسه گردید. مطابق با آنچه از نتایج تحلیل به دست آمد، مقدار حداکثر این اختلاف پاسخ‌ها ۷/۸۲ درصد می‌باشد و به‌طور کلی، درصد اختلاف پاسخ‌ها نشان داد که نتایج مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس و طیف

⁵- Dynamic Implicit

موج و مقدار فرکانس وارد شده بر محیط قرار دارد. در حین تحلیل و به هنگام انتشار موج داخل مدل، امکان دارد تحت شرایط ناخواسته در مدل آشفتگی عددی ایجاد شود. برای فراهم کردن دقت لازم برای مدل‌سازی انتشار موج در محیط پیوسته خاک، نیاز است تا ابعاد نواحی یا المان‌های ایجاد شده در مدل به قدر کافی کوچک باشد. از رابطه (۲) و (۳) می‌توان برای تخمین حداکثر اندازه المان‌های موجود در محیط پیوسته بهره برد.

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{10} \quad (2)$$

$$\lambda = CT \quad (3)$$

که در آنها، Δl بزرگترین اندازه المان، λ طول موج، C مقدار سرعت موج طولی یا عرضی در محیط و T برابر دوره تناوب موج می‌باشد [۱۸].

بنابراین با توجه به معیار ذکر شده، بعد مش در محیط خاک برابر با ۲ متر و در سازه و فونداسیون ۰/۵ متر در نظر گرفته شد. مدل خاک در نرم‌افزار آباکوس از نوع المان‌های CPE4R شبیه‌سازی گردید. المان‌های اجزای سازه‌ای در نرم‌افزار آباکوس در این پژوهش از نوع المان تیر^۷ تعریف شده است.

۳-۲-۴- مشخصات فونداسیون و قاب بتنی

فونداسیون دارای ۲۰ متر عرض و یک متر عمق می‌باشد. میزان بار مرده و زنده اعمالی که سازه در این تحقیق براساس آن طراحی شده است، به ترتیب برابر با ۸۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع می‌باشد.

برای تحلیل دوبعدی سازه‌ها، قاب میانی از مدل‌های ارائه شده دارای سه دهانه به طول ۶ متر و ارتفاع طبقات ۳/۵ متر استفاده شده است. قاب‌های خمشی براساس ACI318 (ACI 2014) و ASCE 7-16(ASCE2016) طراحی شده‌اند که مشخصات و جزئیات آنها در مرجع [۱۹] قابل دسترسی است.

۱۸۰۰ کیلوگرم بر مترمربع، ۱۷۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ۰/۳۹ می‌باشد.

۴-۱-۴- مشخصات قاب‌های بتن آرمه

در ارتباط با مشخصات قاب‌های بتنی، از مشخصات سازه موجود در مقاله تحقیقی و محمدی بهره برده شده است [۱۶]. ضریب کشسانی فونداسیون ۳۰/۱ گیگاپاسکال، مدول برشی آن ۱۲/۵ گیگاپاسکال و وزن مخصوص آن ۲۴ کیلونیوتون بر مترمکعب است.

۴-۲-۴- مشخصات هندسی و شرایط مرزی

۴-۲-۴-۱- مشخصات هندسی محیط خاک

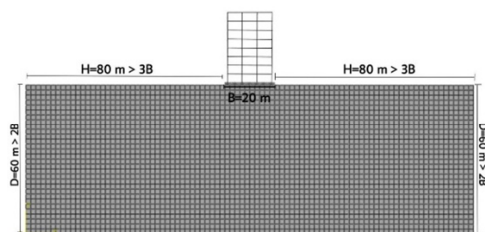
نسبت ابعاد محیط خاک براساس معیار تعیین شده در پژوهشی که توسط کابتامو^۶ و همکاران صورت گرفته انتخاب شده است که به صورت زیر می‌باشد:

(الف) عمق خاک (D) باید از دوبرابر عرض کلی دهانه سازه ($2B$) بیشتر باشد.

(ب) فاصله لبه خارجی سازه از لبه فونداسیون (H) باید از سه برابر عرض کلی دهانه سازه ($3B$) بیشتر باشد.

(پ) عرض نهایی خاک باید از هفت برابر عرض کلی دهانه سازه ($7B$) بیشتر باشد [۱۷].

بنابراین با توجه به موارد مذکور، خاک با عمق ۶۰، عرض ۱۸۰ و ابعاد مش ۲ متر در نظر گرفته شد. در شکل ۵، خلاصه‌ای از شروط ذکر شده مشاهده می‌شود.



شکل ۵- شروط ابعاد محیط خاک

۴-۲-۴-۲- مش‌بندی و ابعاد المان‌ها

شرایط انتشار موج تحت تأثیر عواملی چون سرعت

⁷- Beam Element

⁶- Kabtamu

۴-۲-۴- شرایط مرزی

در تحلیل‌های دینامیکی مسائل اندرکنش خاک-سازه، با در نظر گرفتن اثرات اینرسی در محیط نیمه‌بینهایت خاک، موج لرزه‌ای در محیط منتشر می‌شود. در استفاده از روش عددی لازم است محیط خاک در فاصله مناسبی بریده و با مرزهای مصنوعی مناسب جایگزین شود. این مرزهای مصنوعی باید قابلیت جذب مناسب امواج برگشتی حاصل از برخورد موج لرزه‌ای به سازه و سطح آزاد را داشته باشد. این امواج با زوایا و فرکانس‌های مختلف به مرزها برخورد می‌کنند. در ادبیات فنی، مرزهای مختلفی توسط محققین پیشنهاد شده است که برای دستیابی به دقت کافی و مدل‌سازی صحیح انتشار موج، لازم است از مرزهای پیچیده‌تر استفاده کرد. از جمله قابلیت‌های بارز روش پیشنهادی در این مقاله، رفع این چالش با استفاده از مرزهای ساده‌تر و مرسوم موجود در نرم‌افزارهای تجاری مانند شرط مرزی لایزمر می‌باشد. در روش کاهش دامنه با توجه به فرمول‌بندی و تئوری حاکم بر آن و تفکیک مسأله سطح

آزاد در گام اول تحلیل، عملاً امواج برگشتی از سازه نسبت به مسأله اصلی بسیار کم می‌باشد به گونه‌ای که با استفاده از شرایط مرزی مانند لایزمر می‌توان به دقت بالایی دست یافت.

با استفاده از شرایط مرزی لایزمر، امکان اعمال نیروی زلزله در ناحیه دور مرزهای محیط خاک در روش کاهش دامنه فراهم است. بنابراین با مدل‌سازی فنر و میراگر در مرزهای کناری و پایین محیط خاک انتخابی، چالش اعمال همزمان نیروهای لرزه‌ای و مرز جاذب برطرف شد [۶].

۴-۳- مشخصات شتاب‌نگاشت‌های زلزله

در این پژوهش به منظور بررسی اثرات حوزه زلزله (دور و نزدیک) و محتوای فرکانسی شتاب‌نگاشت زلزله، شش شتاب‌نگاشت زلزله مربوط به سه زلزله مختلف که خصوصیات آنها در جدول ۱ آمده است استفاده شده است.

جدول ۱- مشخصات شتاب‌نگاشت‌ها

نام شتاب‌نگاشت	نام ایستگاه	بزرگا	شتاب حداکثر (g)	حوزه شتاب‌نگاشت
Cape Mendocino	South Bay Union School	۷/۰۱	۰/۱۵	دور
Cape Mendocino	Bunker Hill FAA	۷/۰۱	۰/۱۸	نزدیک
San Fernando	Gormon - Oso Pump Plant	۶/۶۱	۰/۰۸	دور
San Fernando	Pacoima Dam (upper left abut	۶/۶۱	۱/۰۶	نزدیک
Tabas	Ferdows	۷/۳۵	۰/۰۹	دور
Tabas	Kashmar	۷/۳۵	۰/۳۲	نزدیک

محتوای فرکانسی در این مطالعه با نسبت PGA/PGV در نظر گرفته شده است. به این ترتیب، یک زلزله دارای محتوای فرکانسی بالاست، اگر مقدار آن بیشتر از ۱/۲ باشد؛ متوسط است، اگر بین ۰/۸ و ۱/۲ باشد و دارای محتوای فرکانسی پایین است، اگر مقدار آن کمتر از ۰/۸ باشد [۸]. در شکل ۶، تاریخچه زمانی یکی از شتاب‌نگاشت‌های زلزله برای نمونه آورده شده است. لازم

به ذکر است برای آنکه صرفاً اثر محتوای فرکانسی در تحلیل‌ها مورد بررسی قرار گیرد، تمامی شتاب‌نگاشت‌ها به ۰/۳g مقیاس شده‌اند.

۵- بحث و بررسی نتایج

در بحث بررسی ساختمان بتن‌آرمه، دریافت نسبی طبقات ساختمان، که برابر با اختلاف جابه‌جایی طبقه

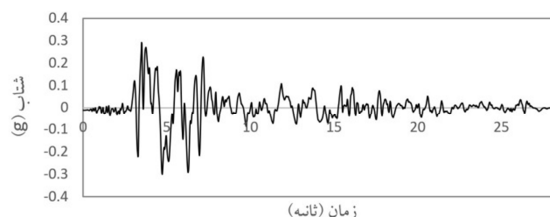
۵-۱- نتایج تحلیل سازه یک درجه آزادی

همانطور که پیش‌تر عنوان شد، سه سازه یک درجه آزادی با دوره تناوب معادل با دوره تناوب سازه‌های کوتاه، میان و بلندمرتبه اتخاذ شده در پژوهش حاضر جهت ارزیابی پاسخ‌ها به کار گرفته شده است که برای اشاره به آنها در ادامه به ترتیب از اصطلاح سازه کوتاه، متوسط و بلند استفاده شده است.

۵-۱-۱- مقایسه نتایج روش پیشنهادی روش وینکلر

در این بخش، کارایی روش اندرکنشی پیشنهادی با روش‌های اندرکنشی مرسوم مورد مقایسه قرار می‌گیرد. توضیحات مربوط به مبانی روش مرسوم وینکلر در تحقیقات پژوهشگران آورده شده است [۲۰]. در جدول ۲، نتایج قدرمطلق حداکثر شتاب سازه یک درجه آزادی به دو روش کاهش دامنه و روش مرسوم اندرکنشی وینکلر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

بالایی نسبت به طبقه پایین تقسیم بر ارتفاع طبقه می‌باشد، یکی از معیارهای مناسب برای مطالعه پاسخ سازه است.



شکل ۶- تاریخچه زمانی شتاب زلزله Cape Mendocino

ایستگاه Bunker Hill FAA

همچنین در این پژوهش در سازه یک درجه آزادی مقادیر قدرمطلق شتاب حداکثر با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت تا به تأثیر متغیرهای مختلف پی برده شود. در ادامه، اثر پارامترهای متعدد شامل محتوای فرکانسی، حوزه دور یا نزدیک زلزله و نوع خاک بر پاسخ سازه‌های یک درجه آزادی با سه دوره تناوب مختلف و سپس سه قاب بتن آرمه با ۴، ۸ و ۱۲ طبقه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۲- قدرمطلق شتاب حداکثر سیستم یک درجه آزادی برحسب متر بر مجذور ثانیه

شتاب‌نگاشت			خاک نوع II			خاک نوع III		
تناوب سازه			کم	متوسط	زیاد	کم	متوسط	زیاد
DRM- زلزله حوزه نزدیک			۸/۹۰	۳/۱۶	۲/۸۰	۸/۷۵	۴/۰۱	۲/۷۰
DRM- زلزله حوزه دور			۸/۲۲	۳/۶۳	۲/۴۷	۸/۱۴	۴/۶۶	۲/۵۲
وینکلر- زلزله حوزه نزدیک			۶/۹	۵/۷۵	۴/۵۶	۶/۸۵	۵/۶۷	۴/۵
وینکلر- زلزله حوزه دور			۵/۵۸	۳/۰۳	۲/۴۶	۵/۵۳	۲/۹۷	۲/۲۴
درصد اختلاف دو مدل اندرکنشی- زلزله حوزه نزدیک			۲۲/۴	-۸۱/۸	-۶۳	۷,۲۱	-۴۱/۵	-۱۱۷/۷
درصد اختلاف دو مدل اندرکنشی- زلزله حوزه دور			۳۲/۲	۱۶/۵	۰/۵۸	۳۲/۱	۳۶/۴	۱۰

در بندهای پیش رو، تأثیر عوامل مختلف از قبیل نوع خاک حوزه زلزله و محتوای فرکانسی شتاب‌نگاشت‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۵-۱-۲- تأثیر حوزه زلزله (دور/نزدیک)

در مدل با هر دو نوع خاک نوع ۲ و ۳، در دو سازه کوتاه و بلند مقادیر شتاب حداکثر تحت شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک بیشتر از شتاب‌نگاشت حوزه دور به دست آمده است و در سازه متوسط روندی خلاف آن برقرار

از آنجاکه در مدل پیشنهادی اثرات لختی، انتشار موج و میرایی تشعشعی به خوبی در نظر گرفته شده است، این روش نتایج دقیق‌تری را نسبت به روش مرسوم وینکلر نشان داده است. همچنین مقادیر به دست آمده از روش کاهش دامنه به شرایط مدل بستگی داشته و می‌تواند کمتر یا بیشتر از مدل تقریبی مرسوم وینکلر به دست آید. بنابراین بهتر است در مطالعات مهندسی از روش‌های دقیق و کاربردی بهره جست.

به سازه با کمترین دوره تناوب و کمترین شتاب حداکثر مربوط به سازه با بیشترین دوره تناوب است.

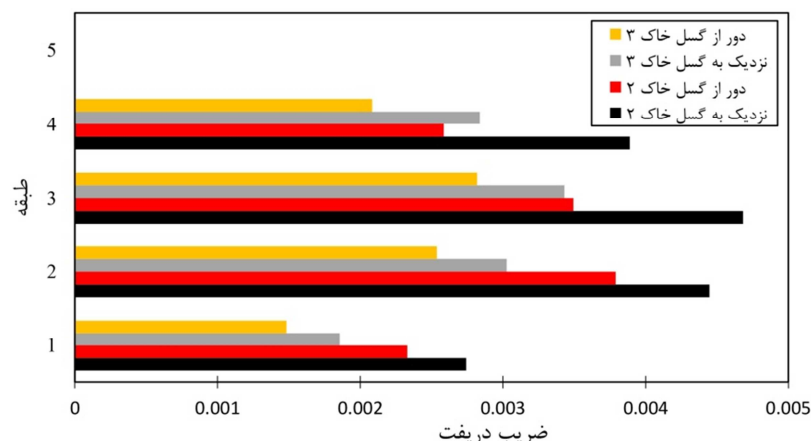
۵-۲- نتایج تحلیل قاب بتن آرمه

یکی از اهداف پژوهش حاضر، مقایسه و بررسی پاسخ قاب‌های کوتاه، میان و بلندمرتبه تحت انتشار امواج با محتوای فرکانسی متفاوت از حوزه‌های دور و نزدیک در دو نوع خاک است. در ارتباط با بررسی پاسخ قاب بتن آرمه، متغیر دررفت نسبی طبقات از متداول‌ترین معیارها برای ارزیابی است. در ادامه، تأثیر پارامترهای مختلف بر پاسخ سازه‌های مذکور مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۵-۲-۱- قاب کوتاه مرتبه

۵-۲-۱-۱- تأثیر حوزه زلزله (دور/نزدیک)

نتایج دررفت نسبی قاب کوتاه مرتبه در خاک‌های نوع ۲ و ۳، تحت شتاب‌نگاشت حوزه دور و نزدیک با صرف نظر از محتوای فرکانسی در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به نتایج، پاسخ در سازه کوتاه مرتبه تحت شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک بیشتر از شتاب‌نگاشت حوزه دور می‌باشد و بیشترین دررفت نسبی طبقات در دو طبقه میانی رخ داده است.



شکل ۷- ضریب دررفت نسبی طبقات قاب کوتاه مرتبه صرف نظر از محتوای فرکانسی

نتایج نشان می‌دهد که مقادیر دررفت نسبی طبقات سازه کوتاه مرتبه تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک در

است. همچنین با افزایش دوره تناوب سازه، مقادیر شتاب حداکثر به دست آمده کاهش می‌یابد.

۵-۱-۳- تأثیر نوع خاک

در دو حالت سازه کوتاه و بلند، بین پاسخ‌ها در حالتی که خاک از نوع ۲ و ۳ باشد، تفاوت محسوس مشاهده نمی‌شود و به عبارتی می‌توان گفت که نوع خاک در این حالت تأثیر خاصی ندارد و تنها در سازه متوسط، شتاب حداکثر سیستم با خاک نوع ۳، بیشتر از حالتی است که خاک مدل از نوع ۲ باشد. در این بخش نیز مشابه بخش قبل با افزایش دوره تناوب سازه شتاب کاهش می‌یابد.

۵-۱-۴- تأثیر محتوای فرکانسی

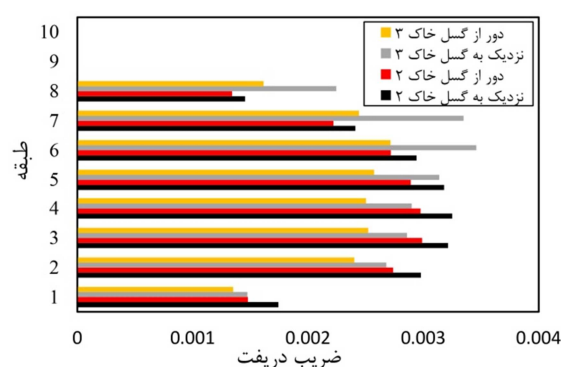
برای بررسی اثر محتوای فرکانسی بر پاسخ سیستم یک درجه آزادی، نتایج شتاب‌ها در هریک از حالات انتشار شتاب‌نگاشت‌های با محتوای فرکانسی کم، متوسط و زیاد در جدول ۲ ارائه شده است.

با افزایش محتوای فرکانسی زلزله، شتاب سازه یک درجه آزادی کاهش پیدا می‌کند. به جز در سازه متوسط، در خاک نوع ۳ شتاب‌نگاشت حوزه دور که در آن پاسخ شتاب‌نگاشت با محتوای متوسط کمتر از شتاب‌نگاشت با محتوای بالاست. همچنین بیشترین شتاب حداکثر متعلق

۵-۲-۱-۲- تأثیر نوع خاک

۵-۲-۱- تأثیر حوزه زلزله (دور/نزدیک)

نتایج اعمال شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک و دور در دو نوع خاک ۲ و ۳ برای قاب میان‌مرتبه با صرف‌نظر از محتوای فرکانسی در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق نتایج به‌دست آمده، پاسخ سازه تحت شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک در هر دو نوع خاک بیشتر از پاسخ تحت شتاب‌نگاشت حوزه دور است. همچنین می‌توان گفت که دریافت نسبی طبقات در طبقات میانی از طبقات تحتانی و فوقانی بیشتر به‌دست آمده است.



شکل ۹- ضریب دریافت نسبی طبقات قاب میان‌مرتبه صرف‌نظر از محتوای فرکانسی

۵-۲-۲- تأثیر نوع خاک

همانطور که از نتایج مشخص است، پاسخ سازه تحت شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک در هر دو نوع خاک بیشتر از پاسخ سازه تحت اعمال شتاب‌نگاشت حوزه دور است. همچنین می‌توان گفت که دریافت نسبی طبقات در طبقات میانی از طبقات زیرین و بالایی بیشتر به‌دست آمده است.

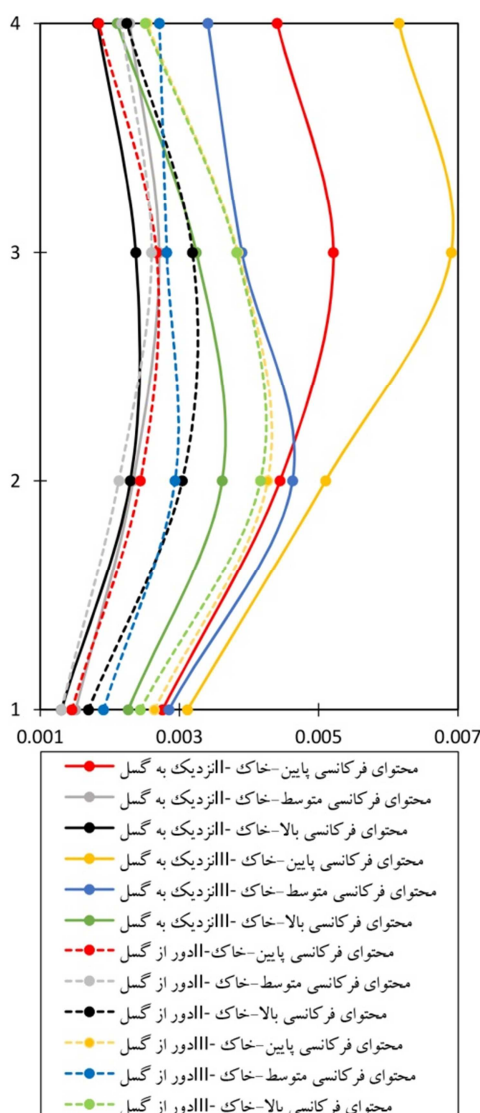
۵-۲-۳- تأثیر محتوای فرکانسی

در شکل ۱۰، دریافت نسبی طبقات در خاک‌های مختلف تحت شتاب‌نگاشت‌های حوزه دور و نزدیک با محتوای فرکانسی مختلف نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که تحت شتاب‌نگاشت‌های حوزه نزدیک، بیشترین دریافت مربوط به شتاب‌نگاشت با محتوای فرکانسی پایین و کمترین آن مربوط به شتاب‌نگاشت با محتوای فرکانسی متوسط است. در شتاب‌نگاشت‌های

خاک نوع ۳ بیشتر از خاک نوع ۲ به‌دست آمده است و همچنین بیشترین پاسخ‌ها در این حالت مربوط به طبقات میانی است.

۵-۲-۳- تأثیر محتوای فرکانسی

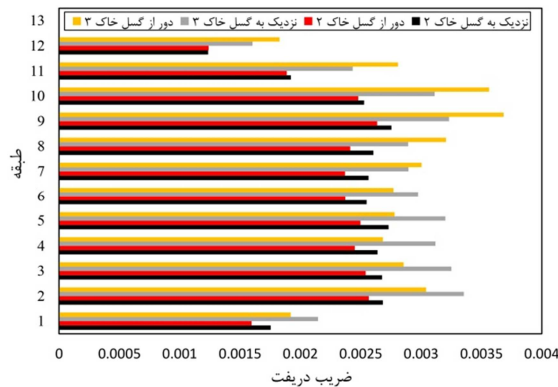
شکل ۸، پاسخ سازه تحت زلزله حوزه نزدیک و دور در خاک نوع ۲ و ۳ را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که دریافت نسبی طبقات تحت شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک با محتوای فرکانسی کم، بیشترین و تحت شتاب‌نگاشت با محتوای فرکانسی بالا، کمترین مقدار را دارند. کمترین مقدار دریافت نسبی مربوط به زلزله حوزه دور با محتوای فرکانسی متوسط می‌باشد.



شکل ۸- ضریب دریافت نسبی قاب کوتاه‌مرتبه برحسب طبقات

۵-۲-۳- قاب میان‌مرتبه

سخت باشد با استفاده از نتایج شکل ۱۱ می توان گفت که دریفت نسبی طبقات تحت شتابنگاشت حوزه نزدیک مقدار بیشتری دارد، اما در خاک نوع ۳ (خاک نرم تر) در طبقات بالا خلاف آن برقرار است.



شکل ۱۱- ضریب دریفت نسبی طبقات قاب بلندمرتبه
صرف نظر از محتوای فرکانسی

۲-۳-۲-۵- تأثیر نوع خاک

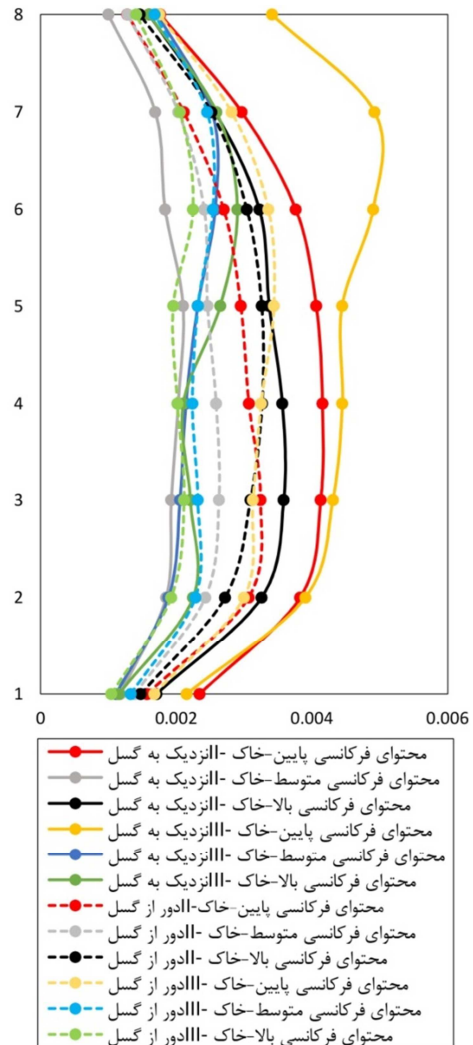
از بررسی شکل ۱۱ می توان نتیجه گرفت که اگر سازه بر خاک نرم تر (خاک نوع ۳) قرار گیرد طبقات دریفت نسبی بیشتری را نسبت به خاک سخت (خاک نوع ۲) تجربه می کنند.

۳-۳-۲-۵- تأثیر محتوای فرکانسی

در شکل ۱۲، دریفت نسبی طبقات تحت زلزله های حوزه دور و نزدیک با محتوای فرکانسی مختلف در دو نوع خاک آورده شده است. نتایج نشان می دهد که تأثیر محتوای فرکانسی در پاسخ های سازه در قاب بلندمرتبه روند مشخصی را نشان می دهد. در خاک نوع ۳، با افزایش محتوای فرکانسی، دریفت نسبی طبقات کاهش پیدا می کند؛ اما در خاک نوع ۲، بیشترین پاسخ، مربوط به شتابنگاشت با محتوای فرکانسی پایین و کمترین آن مربوط به شتابنگاشت با محتوای فرکانسی متوسط است. همچنین میان پاسخ های زلزله با محتوای کم و دو زلزله دیگر اختلاف زیادی وجود دارد.

۳-۵- بررسی پدیده تشدید

حوزه دور، دریفت نسبی تحت شتابنگاشت با محتوای فرکانسی پایین بیشتر از پاسخ تحت شتابنگاشت با محتوای فرکانسی متوسط است و روند مشخصی در مورد چگونگی تأثیر محتوای فرکانسی بر پاسخ سازه مشاهده نمی شود.



شکل ۱۰- ضریب دریفت نسبی قاب میان مرتبه برحسب طبقات

۳-۲-۵- قاب بلندمرتبه

۱-۳-۲-۵- تأثیر حوزه زلزله (دور/نزدیک)

شکل ۱۱، پاسخ سازه تحت شتابنگاشت اعمالی مربوط به زلزله حوزه دور و نزدیک را در دو نوع خاک برای قاب بلندمرتبه با صرف نظر از محتوای فرکانسی نشان می دهد. اگر خاکی که سازه بر آن قرار دارد نوع ۲ یا

دیده می‌شود که به صورت کلی، پاسخ‌ها برای سازه کوتاه‌مرتبه نسبت به دو سازه دیگر بیشتر می‌باشد که با توجه به دوره تناوب‌های ذکر شده، احتمالاً به علت پدیده تشدید ناشی از نزدیک بودن پریود این سازه به متوسط پریود شتاب‌نگاشت‌های اعمالی و خاک‌ها می‌باشد. در خصوص سایر حالت‌ها روند و نتیجه‌گیری کلی مشاهده نمی‌شود.

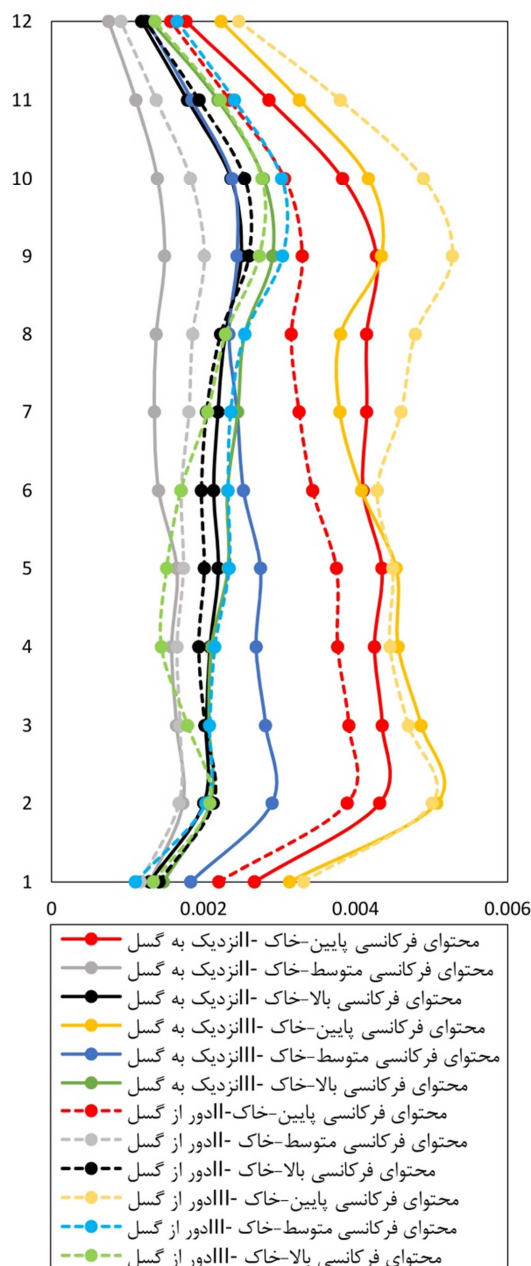
۶- نتیجه‌گیری

به طور خلاصه، مقاله حاضر به هدف تشریح مبانی تئوری روش کاهش دامنه (DRM) به عنوان یک روش مستقیم در فضای زمانی برای مسائل اندرکنش خاک-سازه و طراحی متداول مهندسی ارائه شده است و به‌کارگیری آن در تحلیل لرزه‌ای سیستم خاک-ساختمان بتن مسلح و بررسی پارامترهای مؤثر بر پاسخ آنها می‌باشد. پس از معرفی و تشریح مبانی و قابلیت‌های روش کاهش دامنه، این روش در نرم‌افزار اجزای محدود اعمال و راستی‌آزمایی شده و سپس رفتار لرزه‌ای دو نوع سازه یک درجه آزادی و قاب بتن‌آرمه کوتاه، میان و بلندمرتبه تحت زلزله‌های حوزه دور و نزدیک با محتواهای فرکانسی کم، متوسط و زیاد بررسی شد و نتایج دریافت نسبی طبقات آن مورد مقایسه قرار گرفت. در ادامه، مختصری از نتایج تحلیل‌های صورت گرفته تشریح شده است.

نتایج راستی‌آزمایی در این پژوهش نشان داد که روش کاهش دامنه، روشی کارآمد و مناسب برای استفاده در تحلیل اندرکنش خاک-سازه با در نظر گرفتن انتشار موج و میرایی تشعشعی می‌باشد و از آنجاکه این روش مستقیم و در دامنه زمان است، می‌توان از آن در تحلیل‌های غیرخطی و عملکردی سازه‌ها به‌خوبی بهره برد.

در سازه یک درجه آزادی، در سیستم با دوره تناوب پایین و بالا شتاب حداکثر حاصل از تحلیل سیستم اندرکنشی خاک-سازه تحت شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک بیشتر از شتاب‌نگاشت حوزه دور بوده است. با این حال در

یکی از موارد مهم در تحلیل‌های مهندسی، بررسی امکان بروز پدیده تشدید است. دوره تناوب خاک‌های نوع دو و سه به ترتیب ۰/۴ و ۰/۷۵ است.



شکل ۱۲- ضریب دریافت نسبی قاب بلندمرتبه برحسب طبقات دوره تناوب زلزله‌های حوزه دور با محتواهای فرکانسی بالا، متوسط و کم به ترتیب ۰/۳۲، ۰/۲۴ و ۰/۱۸ و برای زلزله‌های حوزه نزدیک با محتواهای فرکانسی بالا، متوسط و پایین به ترتیب ۰/۲، ۰/۳۸ و ۰/۳۴ می‌باشد. در بند ۳-۳ به مقادیر دوره تناوب سازه‌های کوتاه، میان و بلندمرتبه اشاره شده است. با بررسی نتایج تحلیل‌های انجام شده

به دست آمد، ولی میان دو شتاب‌نگاشت با محتوای فرکانسی متوسط و بالا روند ثابتی در تمام قاب‌ها مشاهده نشد.

به طور کلی، در اغلب تحلیل‌های صورت گرفته نتایج حاصل از تحلیل تحت انتشار شتاب‌نگاشت حوزه نزدیک بیشتر از شتاب‌نگاشت حوزه دور می‌باشد؛ که البته این حالت شامل استثنائاتی هم بود. به جز در قاب میان‌مرتبه که در طبقات فوقانی دریافت نسبی طبقات در مدل با خاک نوع ۲ بیشتر از حالتی که مدل شامل خاک نوع ۳ می‌باشد به دست آمد، در سایر حالات این پارامتر در خاک نوع ۳ منجر به مقادیر بیشتری شد. به صورت کلی، پاسخ‌ها برای سازه کوتاه‌مرتبه نسبت به دو سازه دیگر، بیشتر می‌باشد که با توجه به دوره تناوب‌های ذکر شده، احتمالاً به علت پدیده تشدید ناشی از نزدیک بودن پیوند این سازه به متوسط پیوند شتاب‌نگاشت‌های اعمالی و خاک‌ها می‌باشد. بنابر بررسی پاسخ هردو مدل‌های قاب بتن‌آرمه و سیستم یک درجه آزادی، پاسخ حاصل از انتشار شتاب‌نگاشت با محتوای فرکانسی پایین بیشتر از دو شتاب‌نگاشت دیگر به دست آمده است. در تحلیل قاب‌ها تحت شرایط مختلف دریافت نسبی طبقات در طبقات میانی بیشتر از سایر طبقات به دست آمد.

سازه میان‌مرتبه خلاف این روند مشاهده شد. شتاب حداکثر در سیستم با سازه یک درجه آزادی با دوره تناوب متوسط، واقع بر خاک نوع ۳ بیشتر از خاک نوع ۲ به دست آمده است و در ارتباط با سایر سازه‌ها یا مقدار نتایج این دو خاک برابر بوده یا در خاک نوع ۲ کمی بیشتر به دست آمده است. نتایج حاصل از شتاب حداکثر سیستم یک درجه آزادی نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین میزان، متعلق به زلزله‌های با محتوای کم و زیاد بوده است که تنها در سازه با دوره تناوب متوسط واقع بر خاک نوع ۳ و تحت شتاب‌نگاشت حوزه دور با محتوای متوسط، کمترین شتاب حداکثر را ایجاد کرده است.

در قاب‌های بتن آرمه مورد بررسی در مقاله حاضر، نتایج تحلیل نشان می‌دهد دریافت نسبی طبقات تحت زلزله حوزه نزدیک بیشتر از زلزله حوزه دور به دست می‌آید. تنها در طبقات پایین سازه بلندمرتبه واقع بر خاک نوع ۳ خلاف این روند مشاهده شده است. در تمامی قاب‌ها دریافت نسبی طبقات در مدل با خاک نوع ۳ بیشتر از خاک نوع ۲ است؛ اما در قاب میان‌مرتبه هرچه از طبقات پایینی به سمت بالا حرکت کنیم، خلاف این روند مشاهده می‌شود. تحت انتشار زلزله حوزه نزدیک، دریافت نسبی طبقات در تمام قاب‌ها تحت شتاب‌نگاشت با محتوای فرکانسی پایین بیشتر از دو شتاب‌نگاشت دیگر

References

- [1] Chopra AK, Gutierrez JA. Earthquake response analysis of multistorey buildings including foundation interaction. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 1974; 3(1): 65-77. doi: **10.1002/eqe.4290030106**
- [2] Bielak J. Modal analysis for building-soil interaction. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. 1976 Oct; 102(5): 771-786. doi: **10.1061/JMCEA3.0002160**
- [3] Iguchi M. Dynamic interaction of soil-structure with elastic rectangular foundation. In Proc. 5th Japan Earthq. Eng. Symp. 1978; 457-464. doi: **10.3130/aijs.63.69_3**
- [4] Asli SJ, Saffari H, Zahedi MJ, Saadatinezhad M. Comparing the performance of substructure and direct methods to estimate the effect of SSI on seismic response of mid-rise structures. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2019; 15(1), 81-94. doi: **10.1080/19386362.2019.1597560**
- [5] Fares R, Cruz DC, Foerster E, Lopez-Caballero F, Gatti F. Coupling spectral and Finite Element methods for 3D physic-based seismic analysis from fault to structure: Application to the Cadarache site in France. *Nuclear Engineering and Design*. 2022 Oct 1; 397: 111954. doi: **10.1016/j.nucengdes.2022.111954**
- [6] Derghoum R, Derghoum I. Nonlinear finite element analysis for seismic site amplification assessment of urban slopes showing surface geology and topography irregularities. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2023 Mar 1; 166: 107729. doi: **10.1016/j.soildyn.2022.107729**

- [7] Ghaemian M, Noorzad A, Mohammadnezhad H. Assessment of foundation mass and earthquake input mechanism effect on dam-reservoir-foundation system response. *International Journal of Civil Engineering*. 2019 Apr 3; 17: 473-480. doi: **10.1007/s40999-018-0325-9**
- [8] Shaaban M, Abouelsaad MN, El Bagalaty S, El Madawy ME. Seismic analysis of RC high-rise buildings rested on cellular raft. *Buildings*. 2022 Nov 8; 12(11): 1924. doi: **10.3390/buildings12111924**
- [9] Cremonini MG, Christiano P, Bielak J. Implementation of effective seismic input for soil-structure interaction systems. *Earthquake engineering & structural dynamics*. 1988 May; 16(4): 615-625. doi: **10.1002/eqe.4290160411**
- [10] Mohammadnezhad H, Zafarani H, Ghaemian M. Domain reduction method for seismic analysis of dam-foundation-fault system. *Scientia Iranica*. 2019 Feb 1; 26(1): 145-156. doi: **10.24200/SCI.2018.20696**
- [11] Mourad B, Sabah M. Comparison between static nonlinear and time history analysis using flexibility-based model for an existing structure and effect of taking into account soil using Domain Reduction Method for a single media. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2015 Mar; 19: 651-663. doi: **10.1007/s12205-015-0351-y**
- [12] Zhang W, Taciroglu E. 3D time-domain nonlinear analysis of soil-structure systems subjected to obliquely incident SV waves in layered soil media. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2021 Jul; 50(8): 2156-2173. doi: **10.1002/eqe.3443**
- [13] Daneshyar A, Mohammadnezhad H, Ghaemian M. Effect of seismic wave propagation in massed medium on rate-dependent anisotropic damage growth in concrete gravity dams. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2021 Apr; 15: 346-363. doi: **10.1007/s11709-021-0694-z**
- [14] Iranian code of practice for seismic resistance design of buildings: Standard no.2800, 4rd edition, Building and Housing Research Center, 2015. [In Persian]
- [15] Massumi A, Tabatabaiefar HR. Effects of Soil-Structure Interaction on Seismic Behaviour of Ductile Reinforced Concrete Moment Resisting Frames'. In *Proceedings of World Housing Congress on Affordable Quality Housing (WHC2007)* 2007 Jan.
- [16] Karapetrou ST, Fotopoulou SD, Pitilakis KD. Seismic vulnerability assessment of high-rise non-ductile RC buildings considering soil-structure interaction effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2015 Jun 1; 73: 42-57. doi: **10.1016/j.soildyn.2015.02.016**
- [17] Kabtamu HG, Peng G, Chen D. Dynamic analysis of soil structure interaction effect on multi story RC frame. *Open Journal of Civil Engineering*. 2018 Oct 9; 8(4): 426-446. doi: **10.4236/ojce.2018.84030**
- [18] Kuhlemeyer RL, Lysmer J. Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*. 1973 May; 99(5): 421-427. doi: **10.1061/JSFEAQ.000188**
- [19] Tahghighi H, Mohammadi A. Numerical evaluation of soil-structure interaction effects on the seismic performance and vulnerability of reinforced concrete buildings. *International Journal of Geomechanics*. 2020 Jun 1; 20(6): 04020072. doi: **10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001651**
- [20] Gazetas G. Foundation vibrations. In *Foundation engineering handbook*, Boston, MA: Springer US. 1991; 553-593. doi: **10.1007/978-1-4757-5271-7_15**