

The Effect of Earthquake Frequency and Geometry of the Soil and Rock Slopes on the Seismic Response of Adjacent Structures

Karim Ghaedi

Department of Civil Engineering, Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran

Hadi Dashti

Department of Civil Engineering, Bushehr Branch, Islamic Azad University, Bushehr, Iran

hdashti1356@yahoo.com

DOI: 10.30495/CIVIL.2023.700010

Keywords:

Soil-Structure
Interaction,
Slope,
Earthquake,
Frequency

Abstract

The effect of topography on the seismic response of structures, owing to the construction of adjacent buildings, has been a challenging issue in recent decades. In this study, while considering the behavioral characteristics of the soil, the effect of topographic slope and height on the seismic response of the structures in their vicinity has been investigated. and the effect of earthquakes with different frequency content on the response of structures up and down the slope has been evaluated. Also, the effect of earthquakes with different frequency content on the response of the structures at the top and down the slope was evaluated. At the end, the effect of soil flexibility on the response of structures adjacent to the slope was investigated. Considering the soil-structure interaction in soft soils can increase the maximum displacement to about 100% of the initial value, but it reduces the maximum base shear to approximately 10% of the initial value. Consequently, the analysis with topographical interaction strongly affects the answers. The change of response with the change of the earthquake record is sometimes observed up to 40% in the results. Therefore, for correct interpretation, full dynamic analyses should be based and the maximum value alone cannot be relied upon in the analysis of soil topographies.



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license: (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

اثر فرکانس زلزله و هندسه شیروانی‌های خاکی و سنگی بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مجاور

کریم قایدی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

هادی دشتی*

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

hdashti1356@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۰۴ اسفند ۱۴۰۱

تاریخ دریافت: ۰۷ آبان ۱۴۰۱

چکیده

تأثیر توپوگرافی بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها با توجه به احداث بناهای مجاور آنها از موضوعات چالش برانگیز در دهه‌های اخیر بوده است. اثر وجود خاک و تحریک ورودی از پارامترهای حائز اهمیت در تحلیل شیروانی‌ها می‌باشد. در این مطالعه ضمن در نظر گرفتن خصوصیات رفتاری خاک به بررسی اثر شیب و ارتفاع توپوگرافی بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های موجود در مجاورت آنها پرداخته شده و اثر زلزله‌های با محتوای فرکانسی مختلف در پاسخ سازه‌های بالا و پایین شیب مورد ارزیابی قرار گرفته است. در انتها تأثیر انعطاف پذیری خاک در پاسخ سازه‌های مجاور شیروانی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه در خاک‌های نرم، می‌تواند جابجایی ماکزیمم را تا حدود ۱۰۰ درصد مقدار اولیه افزایش دهد ولی ماکزیمم برش پایه را تا حدود ۱۰ درصد مقدار اولیه کاهش دهد. در نتیجه تحلیل با اندرکنش توپوگرافی بر روی پاسخ‌ها به شدت تأثیر دارد. تغییر پاسخ با تغییر رکورد زلزله بعضاً تا ۴۰ درصد در نتایج مشاهده می‌گردد. لذا جهت بررسی صحیح، تحلیل‌های کامل دینامیکی می‌بایست مبنا قرار گرفته و مقدار ماکزیمم به تنهایی در تحلیل توپوگرافی‌های خاکی نمی‌تواند مورد استناد قرار گیرد.

کلید واژگان: اندرکنش خاک - سازه، شیروانی، زلزله، فرکانس

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر اهمیت این موضوع که نامنظمی‌های توپوگرافی می‌توانند نقش بسیار موثری در خصوصیات جنبشی زمین در هنگام زلزله ایفا کنند، بیشتر مشخص شده است. بسیاری از مشاهدات پس از وقوع زلزله‌های مخرب نشان می‌دهد که سازه‌های واقع بر سطوح توپوگرافی نامنظم، بیشتر از سازه‌های قرار گرفته بر سطوح صاف خسارت می‌بینند. از طرف دیگر محتوای فرکانس زلزله‌ها با توجه به ارتفاع شیروانی سبب بروز پاسخ‌های متفاوت در سطوح شیب‌دار و در نتیجه سازه‌های مجاور آن خواهد شد. همچنین وجود توپوگرافی‌های خاکی و نحوه انتخاب مدل رفتاری مناسب و اثر آن بر سازه‌ها سبب ظهور پاسخ‌های متفاوت، نسبت به توپوگرافی‌های سنگی می‌شود که این موضوع اهمیت اندرکنش خاک - سازه به همراه توپوگرافی را در پاسخ سازه‌ها بیشتر مشخص می‌نماید.

برای ارزیابی عددی اثرات توپوگرافی از روش‌های مختلفی نظیر المان محدود، المان مرزی، المان مجزا، المان طیفی و ترکیبی استفاده شده است [۱]، [۲] و مقادیر مختلفی در ارتباط با میزان تأثیر توپوگرافی روی بزرگ‌نمایی رکورد های زلزله به دست آمده است. بعضی از این بررسی‌ها نسبت ۱ تا ۹ برابر را به عنوان ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی پیشنهاد می‌دهند [۳].

برخی محققان به بررسی اثرات توپوگرافی بر روی پاسخ سطح آزاد زمین پرداخته‌اند [۴-۱۳]. کمالیان و همکاران در مطالعه خود به بررسی اثرات توپوگرافی بر پاسخ لرزه‌ای شیب‌ها و شیروانی‌های خاکی پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که این تأثیر در درجه اول تابع زاویه شیب است [۴]. عسکری و همکاران به بررسی اثر شیب سنگ بستر بر پایداری لرزه‌ای شیروانی‌ها بر اساس داده‌های لرزه‌خیزی ایران پرداختند [۵]. علی‌الهی و داراییان با استفاده از روش عددی اجزای مرزی جهت حل مساله انتشار امواج و ارزیابی پاسخ لرزه‌ای سطح زمین شیب‌دار در حضور حفرات زیر زمینی و تأثیر این عوارض بر تفرق امواج مهاجم قائم درون صفحه SV پرداختند، نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که وجود حفره‌های زیر زمینی می‌تواند مولفه افقی و قائم پاسخ لرزه‌ای زمین‌های شیب‌دار را در مقایسه با حالت بدون حفره، تحت تأثیر قرار دهد [۶]. ایثاری و تازی نژاد، اثرات شکل‌های مختلف توپوگرافی را بر روی امواج لرزه‌ای بررسی و ملاحظه نمودند که پاسخ‌های متفاوتی در فرکانس‌های مختلف بدلیل تغییر شکل توپوگرافی حاصل می‌گردد [۷]. مساوی و همکاران به بررسی

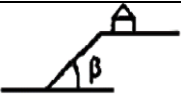

نقش برخی از پارامترهای کلیدی نظیر زاویه شیب و جنس خاک بر روی پاسخ لرزه‌ای هر نقطه‌ای از سطح آزاد زمین دارای هندسه شیروانی و بدون حضور سازه پرداختند [۸]. جین و همکاران در تحقیق خود به بررسی پاسخ‌های لرزه‌ای در محل حوضه رسوبی، با در نظر گرفتن اثرات توپوگرافی و خصوصیات غیر خطی خاک پرداختند. بر اساس نتایج این تحقیق وقتی سطح حوضه رسوبی دارای بالا آمدگی‌ها و فرورفتگی‌های پیاپی باشد، در مقایسه با سطوح هموار تر بزرگنمایی و تشدید لرزه‌ای آشکارتر است و شتاب حداکثر زمین افزایش می‌یابد [۹]. دوزگان و بوداک نیز به بررسی اثرات هندسه سطح و خصوصیات خاک محل بر امواج لرزه‌ای زمین در شرایط غیرخطی پرداختند [۱۰]. کمالیان و همکاران یک مطالعه پارامتری عددی وسیع روی رفتار لرزه‌ای تپه‌های همگن سنگی دو بعدی تحت انتشار قائم موج‌های برشی انجام دادند. نتایج تحقیق آنها نشان می‌دهد که پارامترهایی مانند طول موج، نسبت شکل، شکل تپه و درجه اهمیت پایین‌تر، نسبت پواسون تأثیر زیادی بر میزان تشدید لرزه‌ای ناشی از توپوگرافی دارند [۱۱]. طهماسبی و همکاران اثر انحنای دیواره بر پاسخ لرزه‌ای شیروانی‌های سنگی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد افزایش شعاع انحناء، سبب افزایش جابجایی و شتاب سطحی می‌گردد [۱۲]. بختیاری و همکاران اثر زاویه شیب‌های ناهمگن را با در نظر گرفتن ارتفاع شیب و فرکانس بار بر پاسخ لرزه‌ای سطح زمین را مورد بررسی قرار دادند. بر اساس مطالعات انجام شده مشخص گردید افزایش فرکانس و ارتفاع سبب افزایش تأثیر زاویه شیب بر پاسخ لرزه‌ای می‌گردد [۱۳].

پژوهشگران دیگری نیز به بررسی اثرات توپوگرافی بر سازه‌ها و نیز تأثیر محتوای زلزله‌ها بر پاسخ لرزه‌ای پرداختند. اثر توپوگرافی بر عملکرد قاب‌های خمشی فولادی با تحلیل غیرخطی و در نظر گرفتن انعطاف‌پذیری خاک، افزایش تغییر مکان‌های جانبی قاب را به همراه داشته است [۱۴]. پاسخ لرزه‌ای سازه‌ای به ارتفاع ۶۰ متر بالای تپه در یک مطالعه مورد بررسی قرار گرفته و به تأثیرات توپوگرافی و اندرکنش خاک - سازه پرداخته شده است [۱۵]. عملکرد لرزه‌ای توپوگرافی شیب بر روی ساختمانهای میان مرتبه در پایین و بالای تپه نشان می‌دهد که در شرایط اندرکنش خاک - سازه با توپوگرافی نسبت به حالت بدون توپوگرافی ماکزیمم جابجایی جانبی در ساختمانهای ۱۰ و ۱۵ طبقه به ترتیب ۷۱ درصد و ۲۹ درصد افزایش یافته است [۱۶]. اثر توپوگرافی بر رفتار لرزه‌ای لوله‌های مدفون نشان دهنده افزایش کرنش در لوله‌ها می‌باشد [۱۷]. خالصی و همکاران، به

پی سد خاکی در دو ناحیه ابتدایی و انتهایی آن در بالادست و پایین دست بیشتر از سایر نقاط آن، مستعد روانگرایی می‌باشد [۲۴]. محمدی و همکاران، اثر شیب شیروانی بر جابه جایی نسبی طبقات قاب های خمشی فولادی در ساختمان های باخاک نرم تحت اثر ۱۲ رکورد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد در حالت کلی، شیب بررسی شده سبب افزایش جابجایی نسبی هر سه تیب قاب می‌شود ولی با بررسی جزئی تر میزان درصد رشد، ملاحظه شد که، میزان افزایش جابجایی نسبی میانگین برای تمامی رکوردها در سازه ۶ طبقه بیش تر از ۹ طبقه و در ۹ طبقه بیش تر از ۱۲ طبقه بوده است [۲۵].

در آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله ایران (استاندارد ۲۸۰۰) [۲۶] نیز اثرات بزرگ‌نمایی توپوگرافی بصورت افزایش در نیروی طراحی لرزه‌ای در بررسی پایداری شیب‌ها و طراحی سازه‌های واقع بر شیب‌ها یا نزدیک آنها در نظر گرفته می‌شود که این مساله باید از طریق ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی (ST) برای شیب‌های با ارتفاع بیش از ۳۰ متر و با زاویه میانگین بیش از ۱۵ درجه انجام گیرد. حداقل مقادیر ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی در این آیین‌نامه در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول ۱ مقادیر ضریب بزرگ‌نمایی توپوگرافی در آیین‌نامه ۲۸۰۰ [۲۶]

شکل شیب	میانگی ن زاویه شیب	ST
	> 15	1.20 ≥ 1
	۱۵ تا ۳۰	1.20 ≥ 1
	> 30	1.40 ≥ 1

با وجود همه این تحقیقات بررسی‌های کمتری در ارتباط با اثر توپوگرافی‌ها با لحاظ اندرکنش خاک- سازه و تحلیل بر اساس محتوای فرکانسی زلزله‌ها مختلف برای سازه‌های بالا و پایین شیروانی انجام گرفته است. لذا در این مطالعه ضمن در نظر گرفتن خصوصیات رفتاری خاک به بررسی اثر شیب و ارتفاع توپوگرافی بر

مقایسه اثر اندرکنش خاک- سازه بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های بلند در زمین‌های دره‌ای و صاف پرداختند. سازه واقع بر دره را به روش اجزا محدود و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی و تحلیل کردند و جابجایی نسبی طبقات سازه را بدست آوردند. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان پی برد که در زمین‌های دارای توپوگرافی دره، تاثیر اندرکنش خاک- سازه نسبت به زمین‌های صاف کاهش می‌یابد [۱۸]. اذان و همکاران، به بررسی اثر شعاع انحناء شیروانی‌های خاکی ماسه‌ای محدب در پلان در ظرفیت باربری پی‌های واقع بر آن‌ها پرداختند. نتایج حاکی از این مطلب است که با افزایش شعاع انحناء شیروانی‌های خاکی محدب ظرفیت باربری نیز افزایش می‌یابد، که این نتایج به صورت نمودارهای کاربردی برای استفاده مهندسان نشان داده شده است [۱۹]. آسیماکی و همکاران در مقاله خود اثر توپوگرافی بر انتشار امواج را با در نظرگیری اثر اندرکنش خاک - سازه در راس یک سخره تحت زلزله ۱۹۹۹ آن ارزیابی کردند و پی بردند که این موارد اثرات قابل توجهی بر انتشار و پراکندگی امواج لرزه‌ای و در نهایت پاسخ سازه واقع بر رأس سخره دارند [۲۰]. عرفانی و همکاران تأثیر حضور سازه بر توپوگرافی پرداختند و نتیجه گرفتند که علاوه بر تغییر پاسخ های توپوگرافی موقعیت پاسخ‌های حداکثر نیز تغییر می‌کند [۲۱]. یکی از موارد حائز اهمیت در تحلیل شیروانی‌ها بررسی آنها در شرایط یک یا دو بعدی است. نتایج محققان در این خصوص حکایت از تفاوت قابل توجه پاسخ‌ها در این شرایط دارد [۲۲]، [۲۳].

نسبت پرید بین سازه و ساختمانگاه تأثیر بسزایی در ایجاد تشدید هنگام زلزله دارد که این مسئله با عنوان تأثیر تشدید ساختمانگاه مشهور است. تشدید ناشی از آبرفت در بعضی مناطق شتاب سنگ کف را چندین برابر افزایش می‌دهد. علاوه بر بزرگ‌نمایی مقدار شتاب در سطح زمین، بستر آبرفتی، در محتوای فرکانسی امواج زلزله عبوری نیز تاثیر گذاشته و فرکانس غالب در سطح زمین با فرکانس غالب در سنگ کف متفاوت می‌گردد. این امر برای مهندسین محاسب حائز اهمیت است که محدوده احتمالی تشدید سازه مورد طراحی را شناسایی کرده و در حد امکان از این امر پرهیز و یا تمهیدات لازم را پیش بینی می‌نمایند. اقتصادی و همکاران، به بررسی پایداری لرزه‌ای شیروانی سد خاکی تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک پرداختند. در این ارزیابی با مدل سازی عددی دو بعدی یک سد خاکی مستقر بر بستر شنی ماسه دار، به کمک نرم افزار و با بهره‌گیری از روش اجزای محدود و اعمال امواج مهاجم قائم SV و P، پایداری آن تحت اثر زلزله های حوزه نزدیک، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که

پاسخ لرزه‌های سازه‌ای موجود در مجاورت آنها پرداخته شده و اثر زلزله‌های با محتوای فرکانسی مختلف در پاسخ سازه‌های بالا و پایین شیب مورد ارزیابی قرار گرفته است. در انتها تأثیر انعطاف پذیری خاک در پاسخ سازه‌های مجاور شیروانی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- شبیه‌سازی عددی

به منظور شناخت رفتار توپوگرافی و بررسی آن، نیاز به تعریف محدوده ای خاکی می‌باشد که این محدوده خاکی، مدل مبنا نامیده می‌شود. ساخت مدل مبنا مستلزم صرف زمان زیادی است که در صورت عدم انتخاب صحیح ابعاد مدل مبنا، احتمال خطا در نتایج تحلیل به وجود خواهد آمد.

سازه مورد بررسی در مدل‌ها یک سازه فولادی با سیستم باربری قاب خمشی می‌باشد که ابعاد و مشخصات هندسی و مکانیکی آن بر اساس مطالعه کریشناماروتی و آیتا [۲۷] انتخاب شده‌اند. مدول الاستیسته فولاد $2/20 \times 10^8$ کیلو نیوتن بر متر مربع، نسبت میرایی ۵ درصد و مقطع تیرها از نوع باکس مربعی با ابعاد ۴۵ سانتی‌متر می‌باشند. همچنین ستون‌ها نیز دارای مقاطع باکس با ابعاد ۴۵ در ۶۰ سانتی‌متر می‌باشند. طول دهانه و ارتفاع طبقات نیز به ترتیب برابر ۳ و ۴ متر در نظر گرفته شده است. این سازه قاب خمشی پنج طبقه فولادی مطابق شکل ۱-الف در بالا و پایین شیروانی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

رفتار خاک در ۱۸ حالت اول به صورت الاستیک در نرم‌افزار تعریف شد. وزن مخصوص خاک برابر ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، ضریب پواسون برابر ۰/۳۳ و مدول الاستیسته برابر $133/3 \times 10^4$ کیلو نیوتن بر متر مربع می‌باشد. همچنین برای شبیه‌سازی رفتار غیر خطی خاک نیز از مدل دراکر - پراگر کاملاً پلاستیک - الاستیک خطی (مدل دو خطی) استفاده شده است. برای جلوگیری از تأثیرات مرزها بر امواج، در مرزهای کناری از المان‌های مقید در بی نهایت استفاده شده است (شکل ۱-ب).

فاصله سازه از شیب به گونه‌ای است که اثرات توپوگرافی در پاسخ سازه مشهود باشد. ارتفاع شیروانی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ متر با شیب‌های مختلف (۳۰، ۶۰ و ۹۰) در نظر گرفته می‌شود. در ابتدا رکورد افقی شتاب زلزله طبس نیز به عنوان تحریک ورودی به زیر مدل وارد شده است. در شکل ۱ سازه و خاک مدل شده در نرم‌افزار آباکوس نشان

داده شده است. مسأله مورد بررسی در حوزه زمان و با استفاده از برنامه آباکوس که نرم‌افزاری مبتنی بر اجزاء محدود است، مدل‌سازی شده است. نرم‌افزار آباکوس امکان مدل‌سازی جداگانه اجزای یک مدل و سپس سرهم بندی و مونتاژ اجزاء برای تشکیل مدل را فراهم آورده است.

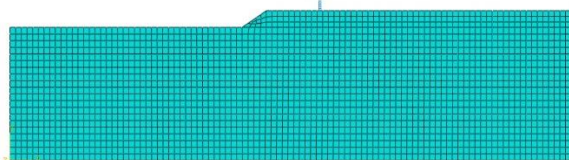
در این پژوهش مطابق جدول (۲) با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه، ۲۳ حالت مورد بررسی قرار می‌گیرد. که در ۱۸ حالت اثر هندسه شیروانی (ارتفاع و زاویه) بر پاسخ سازه‌های واقع بر بالا و پایین شیروانی تحت اثر زلزله طبس مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در حالت‌های ۱۹ و ۲۰ به ارزیابی پاسخ بحرانی ترین حالت ۱۸ گانه در برابر محتوای فرکانسی زلزله‌های متفاوت (طبس، بم و منجیل) پرداخته می‌شود. در شرایط ۲۱ و ۲۲ تأثیر رفتارهای خطی و مدل رفتاری خاک بر پاسخ سازه‌های واقع بر شیب مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در نهایت اثرات اندرکنش خاک - سازه با تحلیل شیروانی خاکی و سنگی در شرایط لرزه‌ای بر پاسخ سازه‌های مجاور در حالت ۲۳ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.



الف



ب

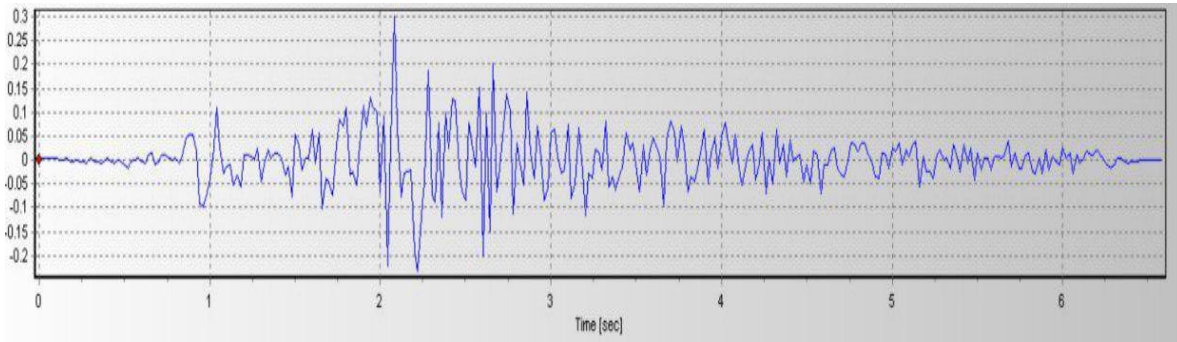


ج

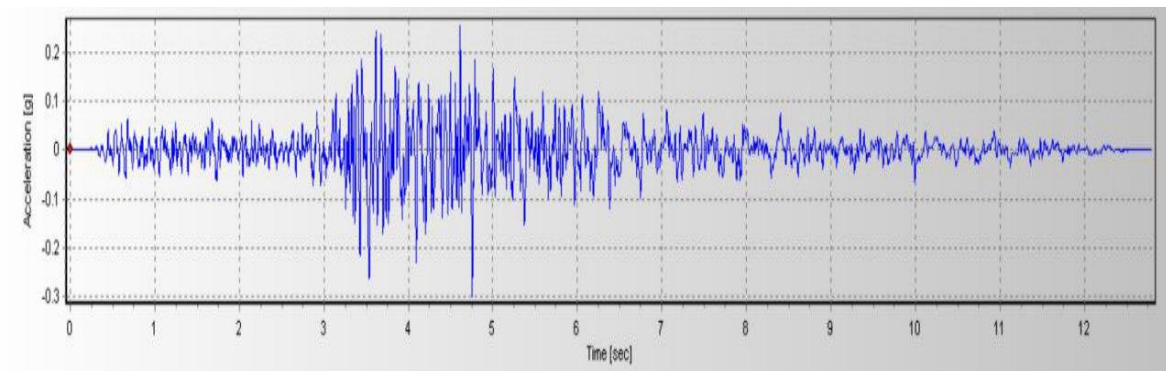
شکل ۱ - الف) سازه مدل شده در نرم‌افزار آباکوس (ب) ناحیه خاک مدل شده در نرم‌افزار آباکوس (ج) مش بندی خاک - سازه در نرم‌افزار

در این پژوهش از روش تحلیل دینامیکی ضمنی استفاده گردیده است. با این روش همگرایی و پاسخ نهایی با تعداد گامهای کمتری حاصل خواهد شد.

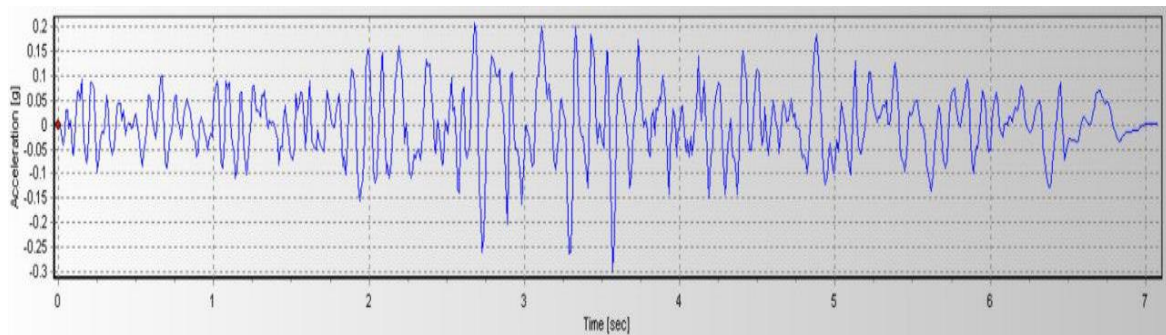
به منظور اعمال موج زلزله از تاریخچه شتاب زلزله‌های حوزه دور شهرهای منجیل، بم و طبس استفاده شد و در قسمت پایین مدل اعمال گردید (شکل ۲).



الف



ب



ج

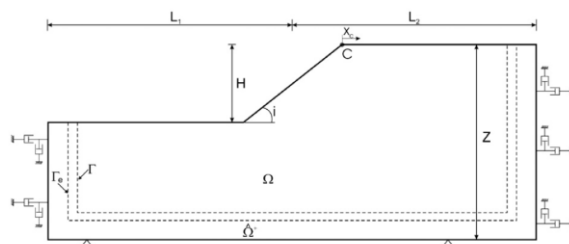
شکل ۲- تاریخچه شتاب زلزله‌های حوزه دور اعمال شده الف: طبس ب: بم ج: منجیل (پایگاه دریافت اطلاعات زلزله و شتاب نگاشت PEER، ۲۰۱۸)

جدول ۲- پارامترهای مورد بررسی

حالت	علائم اختصاری	محل قرارگیری سازه	ارتفاع شیروانی (متر)	زاویه شیب شیروانی (درجه)	شتابنگاشت
۱	T-H:25-i:30-Tabas	بالای شیب	۲۵	۳۰	طیس
۲	T-H:25-i:60-Tabas			۶۰	
۳	T-H:25-i:90-Tabas			۹۰	
۴	B-H:25-i:30-Tabas	پایین شیب		۳۰	
۵	B-H:25-i:60-Tabas			۶۰	
۶	B-H:25-i:90-Tabas			۹۰	
۷	T-H:50-i:30-Tabas	بالای شیب	۵۰	۳۰	
۸	T-H:50-i:60-Tabas			۶۰	
۹	T-H:50-i:90-Tabas			۹۰	
۱۰	B-H:50-i:30-Tabas	پایین شیب		۳۰	
۱۱	B-H:50-i:60-Tabas			۶۰	
۱۲	B-H:50-i:90-Tabas			۹۰	
۱۳	T-H:75-i:30-Tabas	بالای شیب	۷۵	۳۰	
۱۴	T-H:75-i:60-Tabas			۶۰	
۱۵	T-H:75-i:90-Tabas			۹۰	
۱۶	B-H:75-i:30-Tabas	پایین شیب		۳۰	
۱۷	B-H:75-i:60-Tabas			۶۰	
۱۸	B-H:75-i:90-Tabas			۹۰	
پس از مشخص شدن حالت بحرانی، بحرانی‌ترین حالت با دو زلزله دیگر مقایسه می‌گردد.					
۱۹	-----	بحرانی‌ترین حالت			بم
۲۰	-----				منجیل
۲۱	-----	در یکی از مدل‌های تحلیل شده، خصوصیات پلاستیک برای خاک در دو حالت دراگر - پراگر و موهر - کولمب تعریف و نتایج با حالت الاستیک همان مدل مقایسه می‌شود.			
۲۲	-----				
۲۳	-----	یک مدل انتخاب و خاک آن صلب و سنگی در نظر گرفته شود و با حالت خاکی مقایسه می‌شود.			

۲-۲- اعتبار سنجی

در ابتدا به منظور اطمینان از صحت مدلسازی عددی توپوگرافی زمین، از مطالعه تریپ و همکاران استفاده شده است [۳]. در این مطالعه اثرات توپوگرافی شیب بر حرکت زمین در حضور لایه‌های خاک عمیق مورد بررسی قرار گرفت. برای بررسی اندرکنش بین دامنه توپوگرافی و دامنه لایه خاک از یک مدل دو بعدی اجزاء محدود استفاده گردید. خاک مورد بررسی بر روی سنگ بستر صلب با انتشار امواج قائم ارزیابی شد. مدل انتخاب شده دارای شیب ۹۰ درجه با بار هارمونیک سینوسی با دامنه g $0/10$ شبیه‌سازی شده است. پارامترهای هندسی شیب مورد بررسی در شکل (۳) نشان داده شده است. مقادیر $L1$ و $L2$ برابر ۵۰۰ متر می‌باشند. همچنین مقدار H برابر ۵۰ متر در نظر گرفته شده است. مشخصات خاک در جدول (۳) ارائه شده است. مطابق با این جدول مدول الاستیسیته خاک برابر ۱۳۳۳ مگاپاسکال، جرم مخصوص ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب، ضریب پواسون برابر $0/333$ ، ضریب فشار افقی خاک برابر ۱ و ضریب میرایی ۵ درصد می‌باشد.



شکل ۳. شکل هندسی مدل اجزاء محدود مورد بررسی در مطالعه تریپ و همکاران [۳].

مشخصات خاک و شیب مطابق پژوهش اشاره شده در نظر گرفته شده است. برای صحت سنجی شرایط مرزی موجود در این مطالعه، نسبت شتاب افقی حداکثر ایجاد شده در تاج شیب به شتاب افقی میدان دور برای این مدل با مدل این محققان مقایسه شد.

جدول ۳- مشخصات خاک مورد بررسی در مطالعه تریپ و همکاران [۳].

مدول الاستیسیته	E	MPa	۱۳۳۳
جرم مخصوص	ρ	Mg/m ³	۲
ضریب پواسون	ν	-	$0/333$
ضریب فشار افقی	k_0	-	۱
ضریب میرایی	ξ	%	۵

همچنین مشخصات مدل انتخاب شده جهت صحت سنجی در جدول (۴) ارائه شده است. در این جدول λ طول موج تحریک و H ارتفاع شیب می‌باشد.

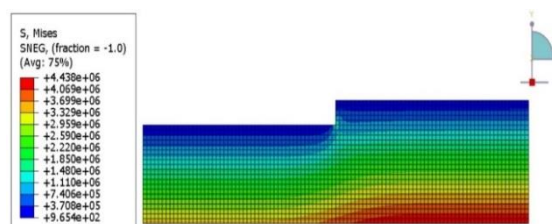
جدول ۴- مشخصات مدل انتخاب شده جهت صحت سنجی [۳].

ضخامت لایه خاک (m)	زاویه شیب (درجه)	نوع بارگذاری	H/λ
۲۵۰	۹۰	سینوسی	$0/05, 0/01$
			$0/15, 0/10$
			$0/30, 0/20$
			$1, 0/50$

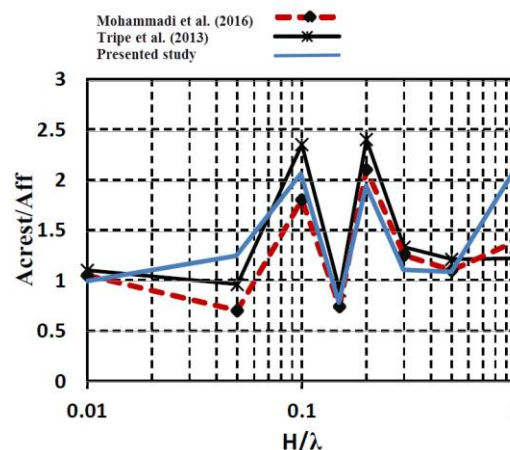
مدل اشاره شده در فوق با استفاده از روش اجزاء محدود مورد استفاده در مطالعه حاضر شبیه‌سازی شد شکل (۴). نمودار H/λ (نسبت ارتفاع به طول موج تحریک) در برابر ضریب بزرگنمایی (نسبت شتاب افقی حداکثر ایجاد شده در تاج شیب به شتاب افقی میدان دور) در شکل (۵) نشان داده شده است. همان طور که ملاحظه می‌گردد شیب تغییرات نمودار H/λ در برابر ضریب بزرگنمایی در محدوده تغییرات متناظر با مطالعات محمدی و همکاران [۲۵] و تریپ و همکاران [۳] می‌باشد، بطوریکه به عنوان مثال در نقاطی که نسبت H/λ برابر $0/15$ ، $0/30$ و $0/5$ می‌باشد، ضریب بزرگنمایی بدست آمده از مدل اجزاء محدود ساخته شده با روش بکار رفته در مطالعه حاضر، به ترتیب به مقدار $1/26$ ، $3/5$ و $3/6$ درصد نسبت مقادیر متناظر با مطالعه تریپ و همکاران [۳] اختلاف دارد. از این رو و با توجه تغییرات و مقادیر اشاره شده ملاحظه می‌گردد که روش و مدل‌های رفتاری بکار رفته در مطالعه حاضر که با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS انجام شده است از دقت نسبتاً مناسبی برخوردار می‌باشد.

۳- نتایج تحلیل و مقایسه

در این بخش خروجی‌های حاصل از تحلیل اجزاء محدود حالت‌های ۲۳ گانه، شامل برش پایه و جابجایی افقی بام می‌باشند، ارائه شده است و مقادیر حداکثر هر پارامتر در نمودارها برای شیب‌ها و ارتفاع‌های مختلف در سازه بالا و پایین شیب با یکدیگر بطور نسبی مقایسه و نتیجه‌گیری خواهد شد.

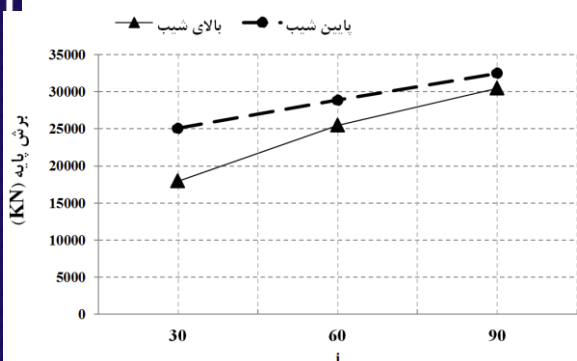


شکل ۴- مدل اجزاء محدود مورد بررسی در صحت‌سنجی

شکل ۵- نمودار H/λ (نسبت ارتفاع به طول موج تحریک) در برابر ضریب بزرگنمایی

شیب ۲۵، ۵۰ و ۷۵ متر پرداخته شده است. همان طور که ملاحظه می‌گردد هنگامی که ارتفاع شیب برابر ۲۵ و ۵۰ متر می‌باشد، در بیشتر حالت‌های مورد بررسی نیروی برشی سازه‌هایی که در پایین شیب قرار گرفته‌اند، از مقادیر متناظرشان در بالای شیب بیشتر شده است. به عنوان مثال در حالت‌های با ارتفاع شیب ۵۰ متر، بیشینه نیروی برشی متناظر با سازه‌های قرار گرفته در پایین شیب به ترتیب به میزان ۱/۶۷، ۱/۷۰ و ۳/۷۰ برابر نسبت به مقادیر متناظرشان در سازه‌هایی که در بالای شیب قرار گرفته‌اند، بیشتر شده است. همچنین در حالت‌های با ارتفاع شیب ۲۵ متر نیز، بیشینه نیروی برشی متناظر با سازه‌های قرار گرفته در پایین شیب به ترتیب به میزان ۳۹، ۱۳ و ۶ درصد نسبت به مقادیر متناظرشان در سازه‌هایی که در بالای شیب قرار گرفته‌اند، بیشتر شده است.

اما در مدل‌های اجزاء محدودی که ارتفاع شیب ۷۵ متر می‌باشد، هنگامی که سازه در بالای شیب قرار گرفته است، نیروی برشی پایه سازه‌های مورد بررسی به ازای هر سه زاویه شیب در نظر گرفته شده بیشتر از مقادیر متناظرش در حالت‌هایی است که سازه در پایین شیب قرار گرفته است. بطوریکه در حالت‌های با ارتفاع شیب ۷۵ متر، بیشینه نیروی برشی متناظر با سازه‌های قرار گرفته در بالای شیب به ترتیب به میزان ۲۵، ۱۱/۵۴ و ۹/۶۵ درصد نسبت به مقادیر متناظرشان در سازه‌هایی که در بالای شیب قرار گرفته‌اند، بیشتر شده است. این موضوع به خوبی تأثیر مقادیر زاویه‌های بالای سطح شیب دار در افزایش پاسخ به سازه واقع بر بالای آنها را نشان می‌دهد.



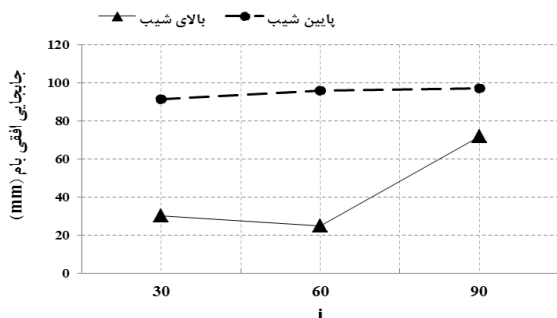
شکل ۶- مقایسه بیشینه برش پایه سازه با هدف بررسی اثر موقعیت سازه (ارتفاع شیب ۲۵ متر)

۳-۱- بررسی اثر موقعیت سازه

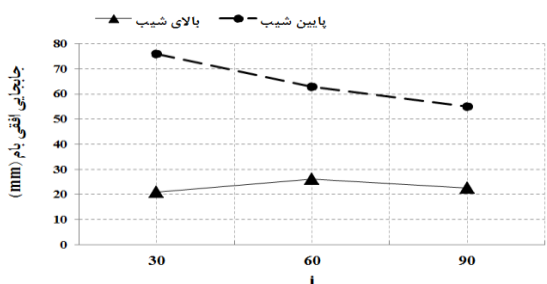
موقعیت قرارگیری سازه نسبت به شیروانی خاکی یکی از پارامترهایی می‌باشد که در تحلیل مدل‌های مورد بررسی در مطالعه حاضر، مورد بررسی قرار گرفته است، به عبارتی در ۹ مدل شیروانی خاک - سازه، موقعیت سازه در بالای شیب و در ۹ مدل دیگر، سازه در پایین شیب، مورد بررسی قرار گرفت.

در شکل‌های (۶) تا (۸) به مقایسه برش پایه سازه‌های مورد بررسی با هدف بررسی اثرگذاری موقعیت سازه نسبت به شیروانی برای سه ارتفاع

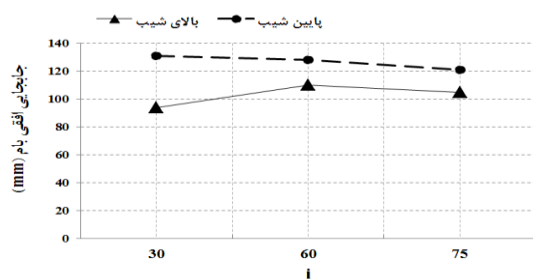
باشد. به گونه ای که این تناسب بصورت مستقیم بین ماکزیمم برش و جابجایی برقرار نمی باشد.



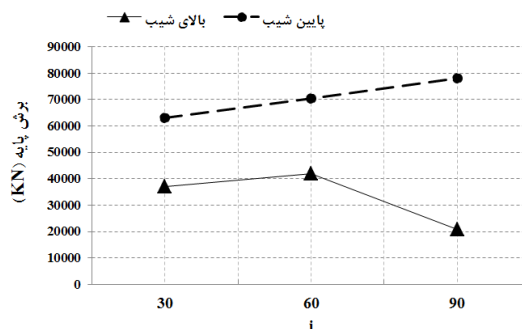
شکل ۹- مقایسه بیشینه جابجایی افقی بام سازه با هدف بررسی اثر موقعیت سازه و زاویه شیب (ارتفاع شیب ۲۵ متر)



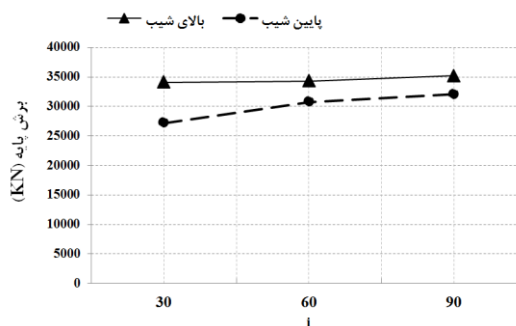
شکل ۱۰- مقایسه بیشینه جابجایی افقی بام سازه با هدف بررسی اثر موقعیت سازه و زاویه شیب (ارتفاع شیب ۵۰ متر)



شکل ۱۱- مقایسه بیشینه جابجایی افقی بام سازه با هدف بررسی اثر موقعیت سازه و زاویه شیب (ارتفاع شیب ۷۵ متر)



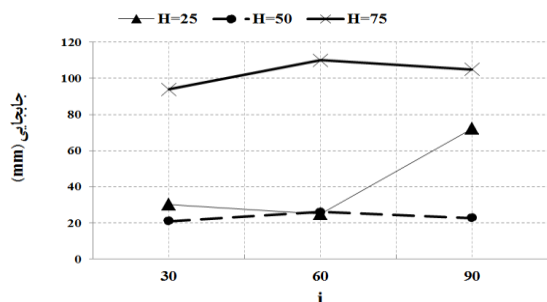
شکل ۷- مقایسه بیشینه برش پایه سازه با هدف بررسی اثر موقعیت سازه (ارتفاع شیب ۵۰ متر)



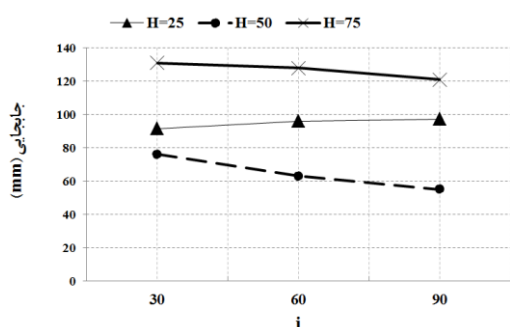
شکل ۸- مقایسه بیشینه برش پایه سازه با هدف بررسی اثر موقعیت سازه (ارتفاع شیب ۷۵ متر)

در شکل‌های (۹) تا (۱۱) به مقایسه بیشینه جابجایی افقی بام سازه با هدف بررسی اثر موقعیت سازه پرداخته شده است. همان طور که ملاحظه می‌گردد در هر سه ارتفاع شیب ۲۵، ۵۰ و ۷۵ متر میزان جابجایی افقی بام سازه در حالت‌هایی که سازه در پایین شیب قرار گرفته است، بیشتر از مقادیر متناظر با حالت‌هایی است که سازه در بالای شیب واقع شده است. بطوریکه به عنوان مثال هنگامی که ارتفاع شیب برابر ۲۵ متر می‌باشد، بیشینه جابجایی افقی بام در سازه‌های قرار گرفته در پایین شیب با زوایای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه به ترتیب به میزان ۳/۰۲، ۳/۸۴، ۱/۳۴ برابر نسبت به مقادیر متناظر با سازه‌های قرار گرفته در بالای شیب بیشتر شده است. همچنین هنگامی که ارتفاع شیب برابر ۵۰ متر می‌باشد، بیشینه جابجایی افقی بام در سازه‌های قرار گرفته در پایین شیب با زوایای ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه به ترتیب به میزان ۳/۶۱، ۲/۴۱، ۲/۴۲ برابر نسبت به مقادیر متناظر با سازه‌های قرار گرفته در بالای شیب بیشتر شده است. این موضوع در مورد سازه‌های قرار گرفته پیرامون شیب با ارتفاع ۷۵ متر نیز ملاحظه می‌گردد. علت این موضوع با توجه به بحث تحلیل دینامیکی و اثرات سایر پارامترهای غیر از ماکزیمم مقادیر در پاسخ سازه‌ها قابل تفسیر می

۳-۲- بررسی اثر زاویه شیب



شکل ۱۲-مقایسه بیشینه جابجایی افقی بام سازه با هدف بررسی اثر ارتفاع شیب (موقعیت سازه در بالای شیب)



شکل ۱۳-مقایسه بیشینه جابجایی افقی بام سازه با هدف بررسی اثر ارتفاع شیب (موقعیت سازه در پایین شیب)

۳-۴- بررسی اثر شتاب ورودی نیروی زلزله ساختگاه (شتابنگاشت زلزله)

پس از بررسی پارامترهای موقعیت سازه در بالا و پایین شیب، ارتفاع شیب و زاویه شیب در این بخش به بررسی اثرگذاری شتاب ورودی نیروی زلزله به ساختگاه پرداخته شده است. برای این منظور با توجه به مقادیر پاسخ سازه بحرانی‌ترین حالت انتخاب گردید (B-H:50-i:30-Tabas) و تحت دو رکورد زلزله‌های بم و منجیل نیز (غیر از رکورد زلزله طیس که قبلاً تحلیل شده بود)، مجدداً تحلیل شد. در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) به ترتیب به مقایسه مقادیر بیشینه برش پایه و جابجایی ایجاد شده در سازه با هدف ارزیابی نوع رکورد زلزله پرداخته شده است. همان طور که ملاحظه می‌گردد تغییر در شتاب ورودی زلزله سبب شده است که بیشینه نیروی برشی پایه متناظر با زلزله‌های بم و منجیل به ترتیب به میزان ۴۴ و ۵۶ درصد کاهش می‌یابد. از این رو می‌توان به این نتیجه دست یافت که زلزله با توان، قدرت و بزرگی بیشتر می‌تواند منجر به ایجاد نیروهای برشی به مراتب بیشتری شود. از سوی دیگر دلیل این اختلاف

در این بخش به بررسی اثر زاویه شیب بر پاسخ سازه قرار گرفته در مجاورت شیب پرداخته شده است. نتایج حاصل از تحلیل مدل‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که با افزایش زاویه شیب، نیروی برشی پایه در بیشتر مدل‌های مورد بررسی افزایش یافته است (شکل‌های ۶ تا ۸). به عبارتی با افزایش شیب بدنه تپه، شتاب‌های سطحی بیشتری در رأس تپه ایجاد می‌گردد که موجب بیشتر شدن نیروی برشی پایه می‌شود. همچنین افزایش شیب در ساختگاه توپوگرافی سبب تمرکز امواج در رأس تپه شده و بدین ترتیب شتاب‌های سطحی بزرگتری بدست آید که در نتیجه این شتاب‌های سطحی بزرگتر، برش پایه نیز بزرگتر می‌شود.

از سوی دیگر با توجه به شکل‌های (۹) تا (۱۱) ملاحظه می‌گردد که در ساختمان‌هایی که در پایین شیب قرار دارند، بیشینه جابجایی افقی بام سازه، با افزایش زاویه شیب شیروانی در بیشتر حالت‌های مورد بررسی در حال کاهش می‌باشد، این درحالیست که در سازه‌های قرار گرفته در بالای شیب ترتیب منظمی در نتایج حاصل مشاهده نمی‌گردد و بیشینه جابجایی افقی بدست آمده در مواردی با افزایش زاویه شیب کاهش و در مواردی افزایش می‌یابد. به عبارتی با توجه به این که پارامترهای زیادی از جمله فرکانس تحریک ورودی نقش تأثیرگذاری بر پاسخ سازه دارند، ملاحظه می‌شود که برای برخی از رکورد ها تأثیرات توپوگرافی کم تر و برای برخی دیگر بیشتر است. دلیل این موضوع دور یا نزدیک بودن فرکانس تحریک از فرکانس سیستم و تأثیرات اندرکنش اینرسی دار و جنبشی می‌باشد.

۳-۳- بررسی اثر ارتفاع شیب

در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) به مقایسه بیشینه جابجایی افقی ایجاد شده در سازه‌ها با هدف بررسی اثر ارتفاع شیب بر نتایج حاصله پرداخته شده است. همان طور که مشاهده می‌شود در حالتی که سازه در بالا و پایین شیب قرار گرفته است، با افزایش ارتفاع شیب، جابجایی افقی بام سازه به ازای تمامی زوایای شیب مورد بررسی افزایش یافته است. در این بخش و در مورد جابجایی افقی نیز بدلیل افزایش تنش موثر خاک که باعث افزایش شتاب شده است، جابجایی نیز افزایش می‌یابد، زیرا جابجایی و شتاب رابطه مستقیمی با یکدیگر دارند.

در جدول (۵) مقادیر نیروی برشی، جابجایی افقی و شتاب سازه‌های متناظر با حالت‌های رفتار خطی و غیر خطی (دراگر - پراگر و موهر - کولمب) با یکدیگر مقایسه شده است. همان طور که ملاحظه می‌گردد هنگامی که رفتار خاک به صورت غیر خطی در نظر گرفته شده است، جابجایی افقی خاک در حالت استفاده از مدل دراگر - پراگر هیچ تغییر نکرده است، این در حالیست که جابجایی افقی خاک در حالت استفاده از مدل موهر - کولمب به مقدار ۵/۲۶ درصد نسبت به حالت خطی افزایش یافته است.

جدول ۵- نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها با هدف بررسی اثر نوع رفتار خاک

نوع رفتار	حداکثر جابجایی افقی بام (mm)
خطی	۷۶
غیر خطی (دراگر - پراگر)	۷۶
غیر خطی (موهر - کولمب)	۸۰

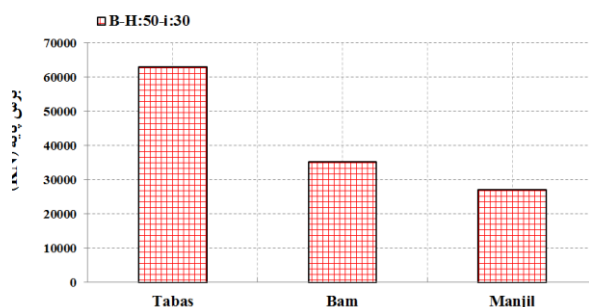
۳-۶- بررسی اثر اندرکنش خاک - سازه

در انتها مدل خاک - سازه مورد بررسی در حالت دهم به صورت صلب (سنگی) شبیه‌سازی شد و رفتار آن با حالت خاکی مقایسه گردید. در این حالت سازه در پایین شیب قرار گرفته و ارتفاع شیروانی و زاویه شیب آن به ترتیب برابر ۵۰ متر و ۳۰ درجه می‌باشد. همچنین مدل تحت رکوردهای حاصل از زلزله طبس قرار گرفته است. مطابق با این نمودارها بیشینه جابجایی افقی بام برابر ۳۵ میلی‌متر، بیشینه شتاب ایجاد شده در سازه برابر ۰/۲۳۱ متر بر مجذورثانیه و بیشینه برش پایه برابر ۷۴۳۰۰ کیلو نیوتن شده است.

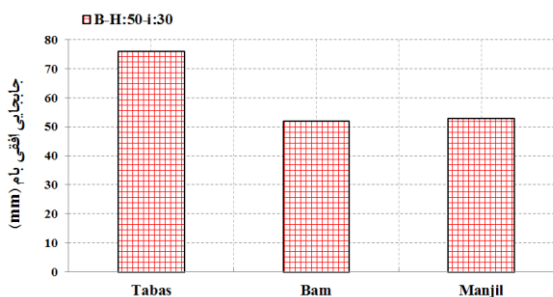
در جدول (۶) مقادیر نیروی برشی، جابجایی افقی و شتاب سازه‌های متناظر با حالت‌های خاک و سنگ بستر با یکدیگر مقایسه شده است. همان طور که ملاحظه می‌گردد برش پایه سازه در حالت سنگی به میزان ۱۷ درصد از مقدار متناظرش در حالت خاکی بیشتری شده است. از سوی دیگر جابجایی افقی و شتاب ایجاد شده متناظر با حالت خاک صلب (سنگی) به ترتیب به ترتیب به میزان ۵۳/۹۴ و ۲۴ درصد نسبت به حالت خاکی کاهش یافته است. در حالت اول با توجه به نرمی محیط خاک و در نتیجه نرمی سیستم کلی خاک سازه بررسی شده که منجر به انعطاف پذیری سیستم می‌شود، پس جابجایی افقی در آن نسبت به حالت دوم

نیز مقادیر انرژی زلزله‌ها و محتوای فرکانسی آنها می‌باشد که با یکدیگر متفاوت هستند.

همچنین مقادیر جابجایی بام ایجاد شده در سازه‌هایی که در معرض زلزله‌های بم و منجیل قرار گرفته‌اند به ترتیب به میزان ۴۶ و ۳۰ درصد از مقادیر متناظر با زلزله طبس کمتر شده‌اند.



شکل ۱۴- مقایسه بیشینه برش پایه سازه با هدف بررسی اثر شتاب ورودی به سازه



شکل ۱۵- مقایسه بیشینه جابجایی افقی سازه با هدف بررسی اثر شتاب ورودی به سازه

۳-۵- بررسی اثر نوع رفتار خاک (خطی و غیر خطی)

در این قسمت مدل خاک - سازه مورد بررسی در حالت دهم که رفتار خاک آن به صورت خطی بررسی شد، مجدداً شبیه‌سازی گردید و رفتار آن در حالت غیرخطی (پلاستیک) ارزیابی گردید. همان طور که اشاره شد، برای شبیه‌سازی رفتار خاک در حالت غیر خطی از مدل‌های دراگر - پراگر و موهر - کولمب استفاده گردید. در این حالت سازه در پایین شیب قرار گرفته و ارتفاع شیروانی و زاویه شیب آن به ترتیب برابر ۵۰ متر و ۳۰ درجه می‌باشد. همچنین مدل تحت رکوردهای حاصل از زلزله طبس قرار گرفته است.

۴- استفاده از مدل های واقعی تر جهت رفتارسنجی خاک و پیش بینی رفتار غیرخطی در این تحقیق تا حدود ۵ درصد نتایج را با تغییر روبرو می کند.

۵- در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه در خاک های نرم، می تواند جابجایی ماکزیمم را تا حدود ۱۰۰ درصد مقدار اولیه افزایش دهد ولی ماکزیمم برش پایه را تا حدود ۱۰ درصد مقدار اولیه کاهش می دهد. در نتیجه تحلیل با اندرکنش توپوگرافی بر روی پاسخ ها به شدت تأثیر دارد. لذا با توجه به اثر تداخل امواج در توپوگرافی ها و از طرفی تأثیر اندرکنش خاک - سازه، جهت بررسی صحیح، تحلیل های کامل دینامیکی می بایست مبنا قرار گرفته و مقدار ماکزیمم به تنهایی در تحلیل توپوگرافی های خاکی نمی تواند مورد استناد قرار گیرد.

۵- منابع

- [1] Assimaki D, Gazetas G. Soil and topographic amplification on canyon banks and the 1999 Athens earthquake. *Earthquake engineering*. 2004;8 (1):1-43.
- [2] Bouckovalas GD, Papadimitriou AG. Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2005; 25(7-10):547-558.
- [3] Tripe R, Kontoe S, Wong KTC. Slope topography effects on ground motion in the presence of deep soil layers. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2013; 50 ;72-84.

[۴] کمالیان، محسن؛ گلدسته، محمد حسن؛ صفائیان آملی، روزبه؛ رحمانی، ایرج. برآورد ضرایب ظرفیت باربری لرزه‌یی پی نواری مجاور شیروانی با روش خطوط مشخصه‌ی تنش. نشریه مهندسی عمران شریف، دوره‌ی ۲ - ۲۹، شماره ۳، ۱۳۹۲، ۹۰ - ۸۱.

[۵] عسکری، فرج الله؛ میرابوطالبی، مسعود؛ اورنگ، فرزانه. اثر شیب سنگ بستر بر پایداری لرزه ای شیروانی‌ها بر اساس داده‌های رزه خیزی ایران. نشریه مهندسی عمران و نقشه برداری، دوره ۴۵، شماره ۲، ۱۳۹۰، ۲۰۱-۱۹۱.

[۶] علی الهی، حمید؛ دارابیان، بهرام. بررسی پاسخ لرزه‌ای عوارض توپوگرافی سطوح شیبدار واقع بر حفرات زیر زمینی با استفاده از روش عددی اجزای مرزی. هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل، ایران، ۱۳۹۳.

یعنی زمین صلب، افزایش می یابد. به عبارتی با توجه به اصول اولیه مباحث درسی اندرکنش خاک - سازه با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه و با فرض نرم بودن خاک زیر سازه میرایی سیستم افزایش پیدا می کند، که این افزایش میرایی باعث کاهش شتاب می شود و همچنین چون شتاب و برش پایه باهم رابطه مستقیمی دارند پس در نهایت برش پایه نیز کاهش می یابد.

جدول ۶- نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها با هدف بررسی اثر اندرکنش خاک - سازه

نوع خاک	حداکثر برش پایه (KN)	حداکثر جابجایی افقی بام (mm)
خاک نرم	۶۳۰۰۰	۷۶
صلب (سنگی)	۷۴۳۰۰	۳۵

۴- نتیجه گیری

در مطالعه حاضر به بررسی تأثیر شکل هندسه شیروانی بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مجاور آن پرداخته شده است. برای این منظور مطالعه به صورت پارامتریک انجام شد و متغیرهایی نظیر موقعیت قرارگیری ساختمان نسبت به شیروانی (بالا و پایین شیروانی)، زاویه شیب (۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به افق)، ارتفاع شیروانی خاکی (۲۵، ۵۰ و ۷۵ متر)، شتاب‌نگاشت زلزله (طیس، بم و منجیل)، نوع رفتار خاک (خطی و غیرخطی) مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت تأثیر توپوگرافی های خاکی و سنگی در پاسخ سازه تحلیل گردید. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح زیر می باشد:

۱- در تمامی زوایای شیب، سازه پایین شیب، جابجایی و نیروی برشی ماکزیمم بیشتری را نسبت به سازه بالا تجربه می نماید.

۲- با افزایش ارتفاع شیروانی جابجایی ماکزیمم طبقه بام برای تمامی سازه های بالا و پایین شیب افزایش می یابد.

۳- بیشترین پاسخ حداکثر جابجایی و تنش برشی مربوط به زلزله طیس می باشد و میزان پاسخ های ماکزیمم در زلزله منجیل و بم انطباق بیشتری با یکدیگر دارند. این موضوع به خوبی تأثیر محتوای فرکانسی زلزله بر پاسخ ها را که بعضاً تا ۴۰ درصد تفاوت را مشاهده می نماییم.

- [7] ایثاری، محسن؛ تازی نژاد رضا. ارزیابی اثرات توپوگرافی بر تفرق امواج لرزه‌های با استفاده از روش المان مرزی. نشریه مهندسی عمران فردوسی، سال سی ام، شماره ۲، ۱۳۹۶، ۱۰۸-۹۳.
- [8] Messaoudi A, Laouami N, Mezouer, N. Topographic effects on the seismic response of slopes. The 15th World Conference on Earthquake Engineering. 2012.
- [9] Jin DD, Chen GX, Dong FF. Seismic response of a real basin site considering topography effect and nonlinear characteristic of soil. International Efforts in Lifeline Earthquake. 2013.
- [10] Duzgun OA, Budak A. Effects of surface shape and geotechnical conditions on the ground motion. Journal of Civil Engineering. 2015; 19;1336-1346.
- [11] Kamalian M, Sohrabi-Bidar A, Razmkhah A, Taghavi A, Rahmani I. Considerations on seismic microzonation in areas with two-dimensional hills. Journal of Earth System Science. 2008; 117(2); 783-796.
- [12] طهماسبی، صادق؛ ازهری، امین؛ مهدوی، شرع اصفهانی. بررسی اثر انحنای دیواره بر پاسخ لرزه‌ای شیروانی‌های سنگی. نشریه روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن. دوره ۱۱، شماره ۲۸، ۱۴۰۰، ۸۴-۷۱.
- [13] بختیاری، عامل سخی، مسعود، سهرابی بیدار، عبدالله. بررسی اثرات زاویه بر پاسخ لرزه‌ای شیپ‌های دارای لایه‌بندی افقی در اثر انتشار امواج SV. فصلنامه علوم و مهندسی زلزله. دوره ۷، شماره ۲، ۱۳۹۹، ۸۹-۷۹.
- [14] شاکری، آ، توکلی، ح. بررسی تغییر مکان نسبی قاب‌های فولادی تحت تاثیر اندرکنش خاک-توپوگرافی-سازه. هشتمین کنگره ملی مهندسی عمران، بابل، ایران، ۱۳۹۳.
- [15] Mayoral JM, De la Rosa D, Tepalcapa S. Topographic effects during the September 19, 2017 Mexico city earthquake. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2019; 1(125);1-23
- [16] Shabani MJ, Shamsi M, Ghanbari A. Slope topography effect on the seismic response of mid-rise buildings considering topography-soil-structure interaction. Earthquakes Struct. 2021; 20(2); 187-200.
- [17] Elyasi J, Bastami M, Kamalian M, Derakhshandi M. Influence of the topographic effect on the seismic response of buried pipelines. Geoenvironmental Disasters. 2021;8(1);1-4.
- [۱۸] خصالی، ر، اسماعیل آبادی، ر، مهران نیا، ن. مقایسه اثر اندرکنش خاک و سازه در زمین‌های دره‌ای و صاف روی دو نوع خاک در سازه‌های بلند. همایش بین‌المللی معماری، عمران و شهرسازی در هزاره سوم، تهران، ایران، ۱۳۹۴.
- [۱۹] اذان، د، جهان‌اندیش، م، قهرمانی، ا. بررسی اثر شعاع انحنای شیروانی‌های خاکی ماسه‌یی محدب در پلان در ظرفیت باربری پی‌های واقع بر آن. نشریه مهندسی عمران شریف، دوره‌ی ۲ - ۳۱، شماره‌ی ۲/۲، ۱۳۹۴، ۵۵ - ۴۷.
- [20] Assimaki D, Kausel E. Modified topographic amplification factors for a single-faced slope due to kinematic soil-structure interaction. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2007; 133(11).
- [۲۱] عرفانی عمید؛ قنبری علی؛ معصومی علی. بررسی پارامتریک تأثیر حضور سازه بر رفتار لرزه‌ای توپوگرافی شیپ با در نظرگیری اثرات اندرکنش خاک-سازه در خاک‌های با سختی متوسط. نشریه زمین شناسی مهندسی، ویژه نامه دومین همایش لرزه خیزی البرز، ۱۳۹۵، ۱۲۴-۱۰۵.
- [۲۲] شارق، آرش؛ عاملسختی مسعود؛ سهرابی بیدار عبدالله. بررسی بزرگ‌نمایی امواج زلزله ناشی از تپه دوزنقه ای شکل در حالت یک بعدی و دوبعدی در حوزه زمان. نشریه زمین شناسی مهندسی، جلد هشتم، شماره 4 زمستان، ۱۳۹۳، ۲۴۱۳-۲۳۸۹.
- [۲۳] نریمان‌نژاد ساسان؛ جعفری ندوشن علیرضا؛ معصومی علی؛ سهرابی بیدار عبدالله؛ قنبری علی. بررسی اثر شکل هندسی حوضه رسوبی و فرکانس موج تحریک بر پاسخ لرزه ای سطح زمین. نشریه زمین شناسی مهندسی، جلد دوازدهم، شماره 2 تابستان، ۱۳۹۳، ۳۷۲-۳۴۵.
- [۲۴] اقتصادی مجرد، ا، رحمانی، ک، پیروتی، ص. بررسی پایداری لرزه‌ای شیروانی سد خاکی تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک. سومین کنفرانس سالانه بین‌المللی عمران، معماری، شهرسازی، شیراز، ایران، ۱۳۹۶.
- [۲۵] محمدی، جعفر؛ نوری، غلامرضا؛ قنبری، علی. اثر شیپ شیروانی بر جابجایی نسبی طبقات قاب‌های خمشی فولادی در ساختمان‌های با

خاک نرم. نشریه زمین‌شناسی مهندسی، جلد یازدهم، شماره 1، ۱۳۹۶،
۱۱۵-۱۳۴.

[۲۶] آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش
۴، کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله،
تهران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۴.

[27] Krishnamoorthy A, Anita S. Soil-structure interaction analysis of a FPS-isolated structure using finite element model. Structures. 2016; (5); 44-57.