

یادداشت تحقیقاتی:

مقایسه‌ی تاثیر نوع خاک و فونداسیون سطحی بر عملکرد قاب‌های خمشی فولادی ویژه کوتاه مرتبه با لحاظ اندرکنش خاک - سازه

حامد رحمن شکرگزار^{۱*}، مریم زارع آقبلاغ^۲، احمدعلی خدائی اردبیلی^۳

۱- استادیار دانشکده‌ی فنی و مهندسی، دانشگاه محقق اردبیلی

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - سازه، دانشگاه محقق اردبیلی

۳- دانشجوی دکتری مهندسی عمران، خاک و پی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

*h_rshokrgozar@uma.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۶/۰۹/۰۵]

تاریخ دریافت: [۹۵/۱۰/۰۹]

چکیده

در این پژوهش، تاثیر تغییر نوع خاک، فونداسیون و ضریب اطمینان طراحی بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان فولادی ارزیابی شده است. بدین منظور، ساختمان پنج طبقه از نوع قاب خمشی ویژه واقع بر دو نوع خاک متفاوت (II و IV) در نظر گرفته شده است. دو نوع فونداسیون سطحی برای این ساختمان با ضرایب اطمینان ۲، ۳ و ۴ در ظرفیت باربری طراحی شدند. به منظور ارزیابی عملکرد، مدل‌های اجزا محدود با لحاظ اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه توسط نرم افزار اپنسیس ساخته شده است. این مدل‌ها تحت تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی توسط هفت رکورد زلزله قرار گرفته و پاسخ‌های آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که در قاب‌های خمشی واقع بر خاک نوع IV، سازه با فونداسیون منفرد، ظرفیت و برش پایه کمتری نسبت به سازه با فونداسیون نواری و مدل دارای تکیه‌گاه صلب دارد و بیشینه تغییر مکان نسبی بین طبقات در مدل‌های با فونداسیون نواری بیشتر از مدل‌های با فونداسیون منفرد و مدل دارای تکیه‌گاه صلب است. بررسی اثر تغییر ضریب اطمینان طراحی فونداسیون‌ها نشان می‌دهد که ظرفیت سازه‌ای، بیشینه برش پایه و بیشینه تغییر مکان نسبی طبقات در سازه با فونداسیون منفرد، با افزایش ضریب اطمینان، افزایش می‌یابد، اما این کمیت در سازه با فونداسیون نواری تاثیر چندانی ندارد. در قاب‌های خمشی واقع بر خاک نوع II، ضریب اطمینان طراحی و نوع فونداسیون تاثیر چندانی بر ظرفیت سازه و پاسخ دینامیکی ندارد.

واژگان کلیدی: اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه، نوع خاک و فونداسیون، قاب خمشی فولادی ویژه کوتاه مرتبه، ضریب اطمینان.

۱- مقدمه

دینامیکی، پی‌های سطحی هستند. نوع فونداسیون و خاک زیر آن می-

تواند پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها را تحت تاثیر قرار دهد. ویژگی‌های زلزله و خاک محل، مسیر عبور امواج، اندرکنش خاک-فونداسیون-سازه از جمله عوامل

در ساختمان‌های با ارتفاع متوسط واقع در مناطق با لرزه‌خیزی شدید، مناسب‌ترین نوع فونداسیون برای تحمل بارهای استاتیکی و

تاثیرگذار است [1]. تغییر اندازه و نوع فونداسیون با ایجاد تغییر در جرم و سختی سیستم خاک - فونداسیون، می‌تواند نوع اندرکنش (سینماتیکی و اینرسی) را تحت تاثیر قرار دهد [2].

به تازگی پژوهشگران بسیاری تاثیر اندرکنش خاک - سازه را بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها بررسی کردند. رایچودهوری (۲۰۱۱)، پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌های دارای قاب خمشی فولادی کوتاه را با لحاظ اثر اندرکنش غیرخطی خاک - سازه ارزیابی نمود. برای این منظور از مدل تیر واقع بر بستر غیرخطی وینکلر^۱ استفاده نمود. نتایج بدست آمده نشان دادند که با لحاظ بستر غیرخطی، تقاضای نیرو و شکل‌پذیری به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد، بنابراین عملکرد فونداسیون تاثیر زیادی در پاسخ‌های بدست آمده دارد [3]. حکم آبادی و فتاحی (۲۰۱۵)، تاثیر نوع فونداسیون را بر پاسخ لرزه‌ای ساختمان‌ها با لحاظ اندرکنش خاک - سازه ارزیابی کردند. برای این منظور یک سازه‌ی ۱۵ طبقه با چهار نوع فونداسیون متفاوت از قبیل تکیه‌گاه صلب، فونداسیون سطحی، شمع، شمع - رادیه و شمع اصطکاکی واقع در خاک نرم به صورت سه بعدی مدلسازی شد. نتایج بدست آمده حاکی از آن بود که نوع فونداسیون یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار بر پاسخ

لرزه‌ای ساختمان‌ها با لحاظ اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه است، بنابراین به منظور اطمینان از طراحی ایمن و مقرون به صرفه، باید نوع فونداسیون با دقت بسیار بالایی انتخاب شود [1]. تحقیقی و اربابی (۲۰۱۵)، پاسخ ساختمان‌های فولادی را با لحاظ اندرکنش غیرخطی خاک - سازه بررسی کردند. در این پژوهش، ساختمان‌های فولادی در سه ارتفاع متفاوت و با دو نوع سیستم باربر جانبی قاب خمشی و مهاربندی در نظر گرفته شدند. برای مدلسازی سیستم خاک و فونداسیون در حالت خطی و غیرخطی از مدل BNWF استفاده شد. نتایج تحلیل‌ها نشان دادند که اندرکنش خاک - سازه موجب افزایش زمان تناوب و تغییر مکان افقی ساختمان‌ها در تمامی مدل‌ها می‌شود [4]. مکی و همکاران (۲۰۱۶)، اثر اندرکنش خاک - سازه و تغییر نوع خاک را بر رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های بتن‌آرمه ارزیابی کردند. هدف آن‌ها فرمول‌بندی روش تقریبی برای تحلیل اندرکنش خاک - سازه و بررسی اهمیت نسبی پارامترهای اصلی همچون نقطه‌ی عملکرد، پارامترهای خاک، نسبت سختی فونداسیون به خاک بود. نتایج بدست آمده نشان داد که پاسخ سازه نه تنها به مشخصات دینامیکی سازه و تحریکات لرزه‌ای بستگی دارد، بلکه به عوامل خارجی چون شرایط پای سازه نیز بستگی دارد [5]. قندیل و بهنام‌فر (۲۰۱۷)، تقاضای شکل‌پذیری

قاب‌های خمشی فولادی واقع بر خاک نرم دارای رفتار غیرخطی را با لحاظ اثر اندرکنش خاک - سازه ارزیابی نمودند. پاسخ‌های سازه‌ای مانند تغییر مکان نسبی طبقات، نیروهای برشی و تقاضای شکل‌پذیری طبقات با دو شرایط تکیه‌گاهی صلب و منعطف با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی حاصل شدند. نتایج حاکی از آن بود که اندرکنش خاک - سازه، منجر به افزایش تغییر مکان نسبی و تقاضای شکل‌پذیری در طبقات پایین‌تر می‌شود [6].

در آیین‌نامه‌های ATC40 [7]، BSSC [8] و ASCE7-10 [9] تاثیر تغییر نوع و اندازه‌ی فونداسیون بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها مورد بررسی قرار نگرفته است. در این آیین‌نامه‌ها خاک زیر فونداسیون که به صورت بسیار ساده و با یک سری فنر و میراگر و روسازه به صورت یک نوسانگر یک درجه آزادی مدلسازی شده‌اند، استفاده شده است. همچنین رفتار خاک در این آیین‌نامه‌ها به صورت خطی معادل در نظر گرفته شده و از غیرخطی بودن خاک کاملاً چشم‌پوشی شده است.

در اغلب پژوهش‌های گذشته اثر فونداسیون سطحی روی پاسخ‌های سازه، با لحاظ اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه فقط روی یک نوع خاک انجام شده است و اثر تغییر نوع خاک و ضریب اطمینان طراحی بر رفتار سازه مورد توجه نبوده است. بنابراین هدف عمده‌ی این پژوهش، بررسی رفتار لرزه‌ای ساختمان‌های دارای سیستم سازه‌ای قاب خمشی ویژه با تغییر نوع خاک، نوع فونداسیون و ضریب اطمینان مورد استفاده در طراحی فونداسیون‌ها با لحاظ اندرکنش خاک - فونداسیون - سازه است. بنابراین قاب خمشی فولادی در حالت‌های مختلف مدلسازی شده است، در حالت اول فرض شده است که پای سازه روی بستر کاملاً صلب قرار دارد. در حالت دوم با فرض بستری انعطاف‌پذیر، فونداسیون‌ها یک بار به صورت منفرد و یک بار به صورت نواری با سه ضریب اطمینان متفاوت و لحاظ دو نوع خاک مدلسازی شده‌اند. برای ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه با شرایط تکیه‌گاهی متفاوت از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی افزایشی و دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی تحت هفت شتاب‌نگاشت زلزله‌ی حوزه‌ی دور استفاده شده است.

۲- جزئیات مدل انتخابی

در این پژوهش، به منظور بررسی تاثیر خاک و فونداسیون بر رفتار لرزه‌ای قاب خمشی فولادی، یک ساختمان با شکل‌پذیری ویژه واقع بر خاک نوع II و IV در نظر گرفته شده است. شکل (۱)، پلان و نمای این

1 Beam-on-Nonlinear-Winkler-Foundation Model (BNWF)

روش، از المان‌های غیرخطی و یک بعدی فنرها برای اتصال فونداسیون سازه به خاک اطراف (میدان نزدیک) استفاده می‌شود. این فنرها قادر به مدل‌سازی رفتار قائم، خمشی و جانبی هستند.

فونداسیون سطحی دو بعدی به صورت یک تیر ارتجاعی توسط المان‌های یک بعدی تیر-ستون با سه درجه آزادی در هر گره مدل می‌شود که توسط تعدادی فنر غیرخطی وینکلر نگهداری شده است. شکل (۲)، طرح کلی از مدل BNWF را برای فونداسیون‌های سطحی نشان داده است [14]. مشخصات سختی و میرایی این مدل بر مبنای روابط گازتاس محاسبه شده است [15].

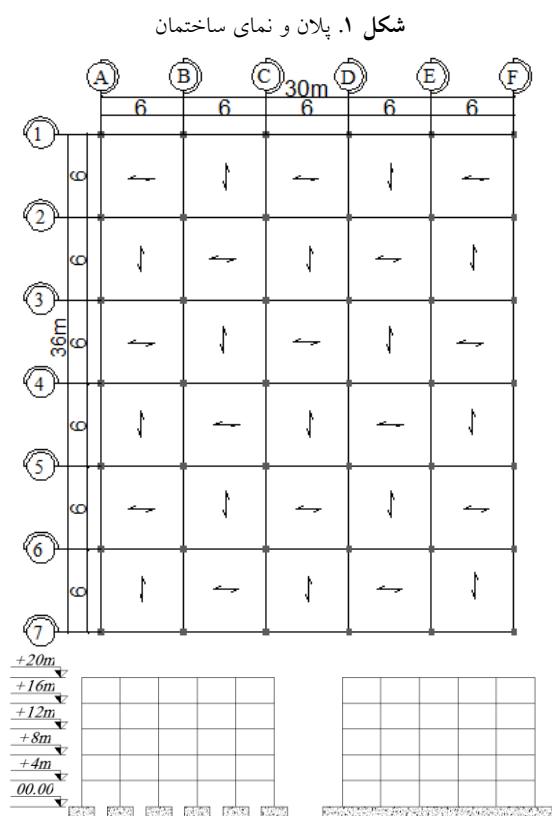


Fig. 1. Plan and section of building

شکل ۲. مدل BNWF برای فونداسیون‌های سطحی [14]

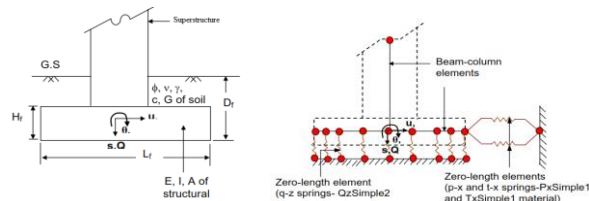


Fig. 2. Schematic diagram of BNWF model for shallow foundation [14]

ساختمان را نشان می‌دهد. مشخصات خاک نوع II و IV بکار رفته در اطراف فونداسیون مطابق جدول (۱) در نظر گرفته شده است.

برای بارگذاری ثقلی این سازه از مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران استفاده شده است [10]. بار مرده و زنده طبقات و بام به ترتیب ۶/۴ و ۲/۴۵ کیلو نیوتن بر مترمربع در نظر گرفته شده است. برای تعیین نیروی زلزله، از آیین‌نامه‌ی زلزله‌ی ایران استفاده شده است و ضریب برش پایه برای سازه‌های واقع بر خاک نوع II و IV به ترتیب برابر با ۰/۸۱ و ۰/۱۲ است [11]. محل احداث پروژه در منطقه‌ای با خطر نسبی خیلی زیاد فرض شده است. طراحی این سازه‌ها طبق مبحث دهم مقررات ملی ساختمان صورت گرفته است [12]. فونداسیون هر یک از ساختمان‌ها یکبار به صورت منفرد و یکبار به صورت نواری و با فرض سه ضریب اطمینان متفاوت ۲، ۳ و ۴ طراحی شده است. ظرفیت باربری نهایی فونداسیون‌های واقع بر خاک نوع IV با استفاده از روابط میرهوف و فونداسیون‌های واقع بر خاک نوع II با استفاده از روابط مبتنی بر SPT محاسبه شده است [13]. مقدار تنش مجاز بدست آمده از رابطه‌ی SPT مستقل از ضریب اطمینان طراحی فونداسیون-ها است، بنابراین ابعاد و ظرفیت باربری مجاز فونداسیون‌های واقع بر خاک نوع II در هر سه ضریب اطمینان طراحی یکسان است. در حالی که در هنگام استفاده از رابطه‌ی میرهوف، تنش مجاز برابر q_{ult}/SF است که منجر به ایجاد ابعاد و ظرفیت‌های باربری مجاز متفاوت می‌شود. نتایج طراحی و تنش‌های مجاز به ترتیب در جدول‌های (۲ و ۳) ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات خاک نوع II و IV

Soil	V_s (m/s)	ν	ϕ	C (kPa)
II	560	0.3	42	0
IV	150	0.45	9	45

Table 1. Characteristics of soil types II and IV

۳- مدل‌سازی با نرم‌افزار OpenSees

نرم‌افزار المان محدود OpenSees برای مدل‌سازی قاب، فونداسیون و خاک با لحاظ فرضیات زیر در این مقاله بکار برده شده است.

مدلسازی تیرها و ستون‌ها: برای مدل‌سازی این اعضا از المان‌های غیرخطی تیر-ستون و مقاطع ایایی با مصالح STEEL01 استفاده شده است.

مدلسازی فونداسیون و مدل تیر متکی بر بستر غیرخطی وینکلر:

مدل تیر متکی بر بستر غیرخطی وینکلر، یکی از پرکاربردترین روش‌ها در مدل‌سازی اندرکنش خاک-فونداسیون-سازه محسوب می‌شود. در این

به عنوان نقطه‌ی کنترل در نظر گرفته شده است.

در شکل‌های (۳ و ۴)، منحنی برش پایه- تغییر مکان بام (منحنی ظرفیت) قاب‌های خمشی واقع بر خاک نوع II و IV برای هر سه شرایط تکیه‌گاهی با فونداسیون منفرد و نواری و در شکل‌های (۵ و ۶)، اثر تغییر ضریب اطمینان طراحی فونداسیون‌ها نشان داده شده است. مطابق شکل (۳)، در قاب‌های خمشی واقع بر خاک نوع IV و در هر سه ضریب اطمینان، سازه با فونداسیون منفرد دارای ظرفیت کمتری نسبت به سازه با فونداسیون نواری و تکیه‌گاه صلب است. این اختلاف ظرفیت، در سازه-هایی که فونداسیون آن‌ها با ضریب اطمینان کمتر (۲ یا ۳) طراحی شده‌اند، بسیار قابل ملاحظه‌تر می‌باشد، در نتیجه قاب‌های خمشی با فونداسیون منفرد رفتار نرم‌تری از خود نشان داده است. مطابق نمودار شکل (۴)، در قاب‌های خمشی واقع بر خاک II، تغییر نوع فونداسیون تأثیری بر ظرفیت سازه ندارد و این مدل‌ها مانند مدل‌های دارای تکیه‌گاه صلب رفتار می‌کنند.

مطابق شکل (۵)، در قاب‌های خمشی با فونداسیون منفرد و واقع بر خاک نوع IV، کاهش مقدار ضریب اطمینان طراحی فونداسیون منجر به کاهش ظرفیت سازه‌ای می‌شود. نتیجه فوق بیانگر این است که با کاهش ضریب اطمینان و کوچک‌تر شدن ابعاد فونداسیون، پلاستیک شدن رفتار خاک (غیرخطی شدن فنرهای وینکلر) تأثیر زیادی بر عملکرد سازه دارد. این تأثیر در فونداسیون‌های نواری بسیار کمتر حاصل شده است و اختلاف ظرفیت سازه‌ای در آن‌ها کمتر است. مطابق شکل (۶)، در سازه‌های واقع بر خاک نوع II، تغییر ضریب اطمینان تأثیری بر ظرفیت قاب‌های خمشی ویژه ندارد و این مدل‌ها مانند مدل‌های دارای تکیه‌گاه صلب رفتار می‌کنند. در حالت کلی، در صورت طراحی فونداسیون با ضریب اطمینان ۲، قاب خمشی ویژه واقع بر خاک نوع IV رفتار نرم‌تری نشان می‌دهد، بنابراین ظرفیت (مقاومت و حد تسلیم) کمتری نسبت به استفاده از ضرایب اطمینان بالاتر خواهد داشت. این امر در مورد خاک نوع II صادق نبوده و نوع فونداسیون و لحاظ خاک تأثیری بر ظرفیت قاب خمشی ویژه ندارد.

۲-۴- نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی

در این روش، تحلیل دینامیکی با اثر دادن جابه‌جایی زمین به صورت تابعی از زمان در تراز پایه و محاسبه‌ی پاسخ مدل ریاضی سازه که دربرگیرنده‌ی رفتار فرا ارتجاعی آن است، انجام می‌شود.

۲-۴-۱- انتخاب شتاب‌نگاشت‌ها

بر اساس ضوابط آیین‌نامه‌ها در انتخاب شتاب‌نگاشت‌های زلزله بر

جدول ۲. ابعاد فونداسیون‌های منفرد واقع بر خاک نوع II و IV

So.	SF	δ_a (m)	q_a (kN/m ²)	W. (m)	L. (m)	t. (m)
II	2	0.0035	1006.25	2.1	2.1	0.5
	3	0.0035	1006.25	2.1	2.1	0.5
	4	0.0035	1006.25	2.1	2.1	0.5
IV	2	0.0169	253.05	2.3	2.3	0.5
	3	0.0118	167.74	2.8	2.8	0.5
	4	0.0089	125.41	3.3	3.3	0.5

Table 2. Dimensions of footing foundations located on the soil types II and IV

جدول ۳. ابعاد فونداسیون‌های نواری واقع بر خاک نوع II و IV

So.	SF	δ_a (m)	q_a (kN/m ²)	W. (m)	L. (m)	t. (m)
II	2	0.002	1147.71	1.5	31.1	0.5
	3	0.002	1141.71	1.5	31.1	0.5
	4	0.002	1141.71	1.5	31.1	0.5
IV	2	0.01	206.34	1.5	31.5	0.5
	3	0.0075	136.04	2	32	0.5
	4	0.0059	101.59	2.5	32.5	0.5

Table 3. Dimensions of Strip foundations located on the soil types II and IV

مدلسازی فنرهای غیرخطی وینکلر: هر فنر وینکلر مستقل از سایر

فنرها بوده و به صورت المان‌های یک بعدی با طول صفر در نظر گرفته می‌شوند. در مدل BNWF، فنرهای قائم $q-z$ برای بیان مقاومت قائم و دورانی فونداسیون سطحی بکار می‌روند، در حالی که فنرهای $p-x$ و $t-x$ به ترتیب بیانگر نیروی مقاوم خاک در برابر جداره‌ی فونداسیون و مقاومت اصطکاکی مرتبط با لغزش فونداسیون است. این المان‌ها نسخه‌ی اصلاح شده‌ی مدل‌های مصالح TzSimple1، PySimple1، QzSimple1 هستند که توسط بولانگر و همکارانش (۱۹۹۹) برای شمع بیان شدند [16] این اصلاحات بر مبنای نتایج چندین آزمایش روی پی‌های سطحی است.

۴- یافته‌ها

برای ارزیابی ظرفیت و رفتار لرزه‌ای قاب خمشی ویژه پنج طبقه دارای فونداسیون‌های متفاوت و ضرایب اطمینان ۲، ۳، ۴ واقع بر خاک نوع II و IV با قاب خمشی دارای تکیه‌گاه صلب، از دو نوع تحلیل استاتیکی غیرخطی و تحلیل دینامیکی تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی استفاده گردیده است. نتایج هر یک از این تحلیل‌ها در این بخش به طور جداگانه ارائه می‌شود.

۴-۱- نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی

در تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی الگوی بار جانبی مطابق الگوی آیین-نامه‌ی طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله [11] انتخاب شده و تغییر مکان بام

اساس پارامترهای زلزله، سه پارامتر اصلی که عبارت‌اند از بزرگای، فاصله تا گسل و خاک منطقه را باید ملاک انتخاب قرار داد.

شکل ۳. منحنی برش پایه- تغییر مکان بام قاب‌های خمشی واقع بر خاک نوع IV

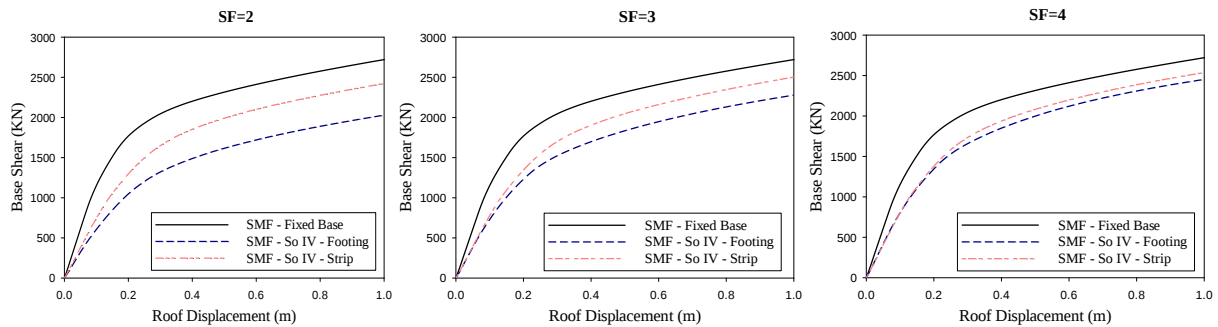


Fig. 3. Base shear-roof displacement curves of MRFs located on the soil type IV

شکل ۴. منحنی برش پایه- تغییر مکان بام قاب‌های خمشی واقع بر خاک نوع II

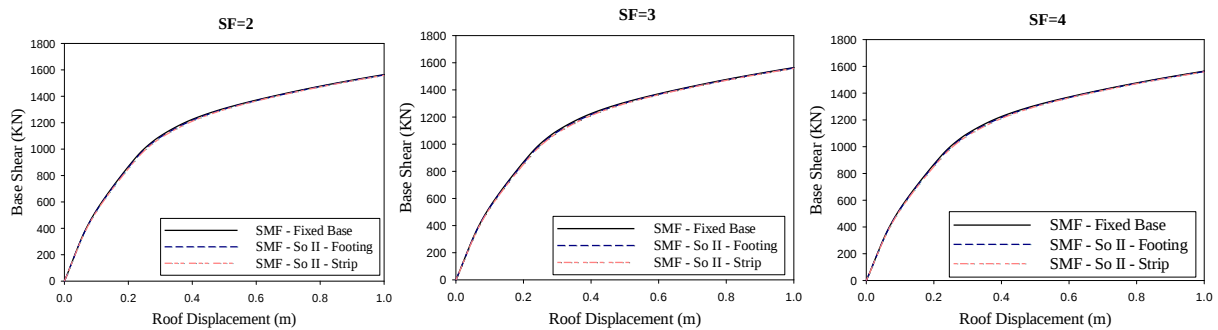


Fig. 4. Base shear-roof displacement curves of MRFs located on the soil type II

شکل ۵. منحنی برش پایه- تغییر مکان بام قاب‌های خمشی با ضریب اطمینان مختلف واقع بر خاک نوع IV

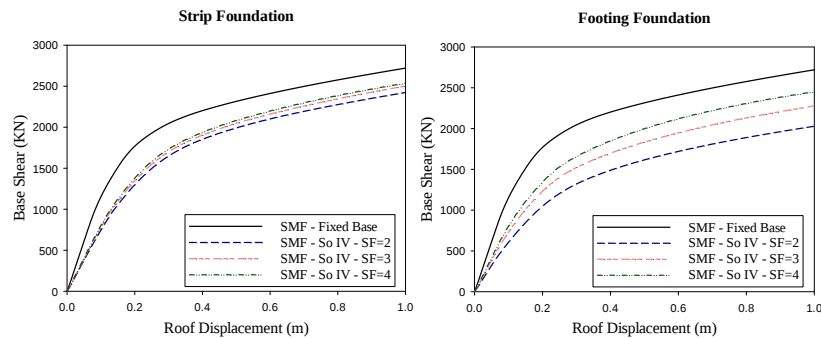


Fig. 5. Base shear-roof displacement curves of MRFs with various safety factor located on the soil type IV

شکل ۶. منحنی برش پایه- تغییر مکان بام قاب‌های خمشی با ضریب اطمینان مختلف واقع بر خاک نوع II

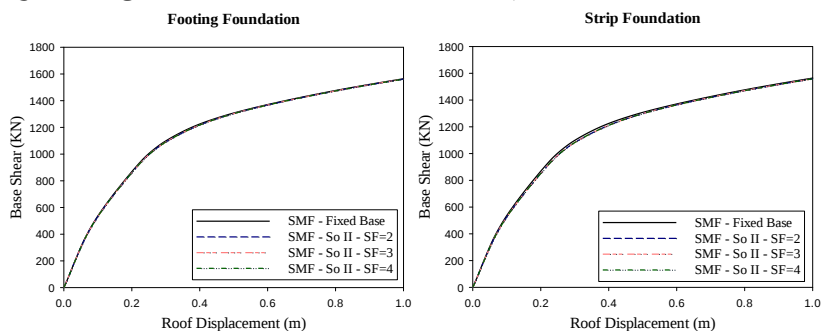


Fig. 6. Base shear-roof displacement curves of MRFs with various safety factor located on the soil type II

جدول ۴. مشخصات شتاب‌نگاشت‌ها

R	Vs	Magnitude	Year	Earthquake
(Km)	(Km/h)			
87.37	813.48	6.61	1971	San Fernando
30.70	667.13	6.61	1971	San Fernando
61.75	669.48	6.61	1971	San Fernando
38.22	680.37	6.02	1986	N. Palm Springs
32.11	740.05	5.99	1987	Whittier Narrows-01
54.97	735.44	6.93	1989	Loma Prieta
37.92	1100	6.52	2003	San Simeon, CA

Table 4. Details of selected ground motions

در این پژوهش از شتاب‌نگاشت‌های زلزله‌ی حوزه‌ی دور که فاصله‌ی ایستگاه ثبت از مرکز زلزله بیش از ۱۰ کیلومتر است و همچنین روی سنگ بستر به ثبت رسیده‌اند، استفاده شده است. تمامی زوج شتاب‌نگاشت‌ها با استفاده از روش استاندارد ۲۸۰۰ زلزله‌ی ایران [11] مقیاس شده است. جزئیات مربوط به شتاب‌نگاشت‌ها در جدول (۴) ارائه شده است. برای انجام تحلیل‌های دینامیکی از روش انتگرال‌گیری نیومارک استفاده شده است، اثر ساختگاه نیز برای تمامی شتاب‌نگاشت‌های زلزله در خاک نوع II و IV توسط نرم‌افزار NERA [17] بررسی شده است.

شکل ۷. نمودار برش پایه بیشینه در برابر ارتفاع قاب خمشی فولادی واقع بر خاک نوع IV

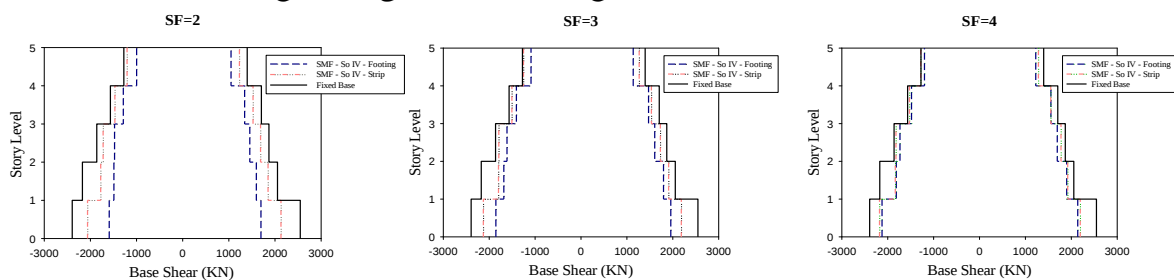


Fig. 7. The maximum base shear against the height of MRF located on the soil type IV

شکل ۸. نمودار برش پایه بیشینه در برابر ارتفاع قاب خمشی فولادی واقع بر خاک نوع II

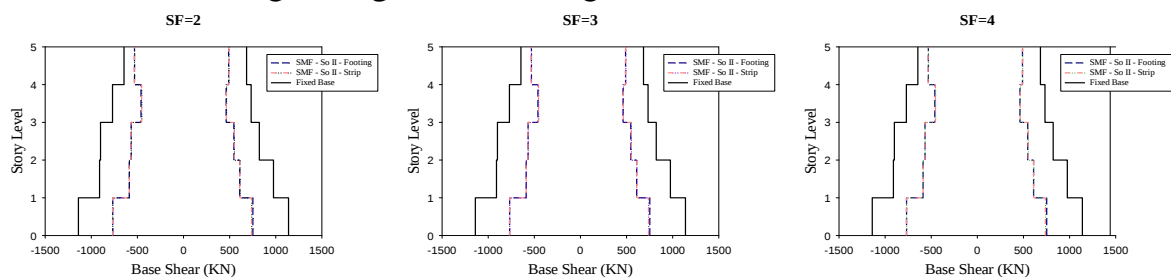


Fig. 8. The maximum base shear against the height of MRF located on the soil type II

شکل ۹. نمودار تغییر مکان نسبی بیشینه در برابر ارتفاع قاب خمشی فولادی واقع بر خاک نوع IV

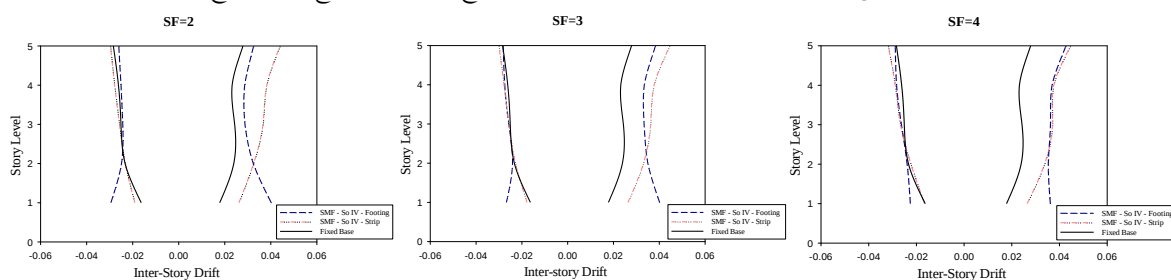


Fig. 9. The maximum inter-story drift against the height of MRF located on the soil type IV

شکل ۱۰. نمودار تغییر مکان نسبی بیشینه در برابر ارتفاع قاب خمشی فولادی واقع بر خاک نوع II

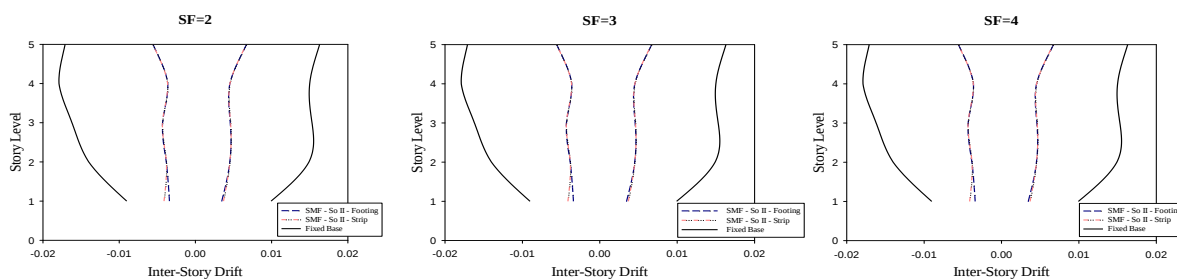


Fig. 10. The maximum inter-story drift against the height of MRF located on the soil type II

پایه‌ی طبقات، در مدل‌های واقع بر خاک نوع IV و II نشان داده شده است. مطابق شکل (۱۱)، در قاب خمشی فولادی واقع بر خاک نوع IV بیشینه برش پایه در مدل‌های با فونداسیون منفرد در ضرایب اطمینان ۲، ۳ و ۴ به میزان $33/5$ و $23/2$ و 16 درصد نسبت به بیشینه برش پایه‌ی مدل دارای تکیه‌گاه صلب کاهش یافته است، در صورتیکه در مدل‌های با فونداسیون‌های نواری درصد کاهش بیشینه برش پایه برابر با $16/4$ ، $14/2$ و $13/8$ درصد است. با مقایسه‌ی این نتایج مشخص می‌شود که تاثیر روند تغییرات ضریب اطمینان در مدل‌های با فونداسیون منفرد بیشتر از مدل‌های با فونداسیون نواری بوده و برش پایه‌ی بیشینه در مدل با فونداسیون منفرد با ضریب اطمینان طراحی ۲، دارای درصد کاهش بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد. مطابق شکل (۱۲)، در قاب خمشی فولادی واقع بر خاک نوع II و با فونداسیون منفرد، بیشینه برش پایه به میزان 34 درصد و در فونداسیون‌های نواری به میزان 35 درصد نسبت مدل دارای تکیه‌گاه صلب کاهش یافته است. بنابراین تغییر ضریب اطمینان در مدل‌های واقع بر خاک نوع II تاثیری در روند تغییرات برش پایه طبقات ندارد.

در شکل (۱۳)، بیشینه تغییر مکان نسبی بین طبقات در مدل‌های با فونداسیون منفرد و نواری واقع بر خاک نوع IV نشان داده شده است و مقدار این پارامتر در مدل با هر دو نوع فونداسیون سطحی بیشتر از مدل دارای تکیه‌گاه صلب است. افزایش این کمیت در مدل‌های با فونداسیون منفرد در ضریب اطمینان ۲، ۳ و ۴ نسبت به مدل دارای تکیه‌گاه صلب به ترتیب برابر با 44 ، $43/8$ و $53/2$ درصد و در مدل‌های با فونداسیون‌های نواری، در هر سه ضریب اطمینان تقریباً برابر با 60 درصد است.

بیشینه تغییر مکان نسبی طبقات در مدل با تکیه‌گاه صلب مطابق شکل (۱۴)، بیشتر از مدل‌های با فونداسیون منفرد و نواری واقع بر خاک نوع II است، ولی تغییر ضریب اطمینان طراحی تاثیری در روند نتایج بدست آمده ندارد. در این حالت در مدل‌های با فونداسیون منفرد و نواری درصد کاهش بیشینه تغییر مکان نسبی نسبت به مدل‌های با تکیه‌گاه صلب 59 درصد است.

با استفاده از این نرم‌افزار، پاسخ دینامیکی خاک با حل معادلات دیفرانسیل حرکت امواج در لایه‌های افقی خاک توسط روش غیرخطی بدست آمده است. پاسخ این اثر در مدل‌های مفروض به صورت جابجایی لایه‌ی زیر پی به عنوان پارامتر ورودی برای تحلیل دینامیکی در نظر گرفته شده است. نتایج تحلیل‌های دینامیکی در قالب نمودارهای بیشینه برش پایه-ی طبقات و بیشینه تغییر مکان جانبی نسبی بین طبقات استخراج شده‌اند، به منظور ارزیابی و مقایسه‌ی نتایج از میانگین نتایج حاصل از هفت شتاب-نگاشت زلزله انتخابی استفاده شده است.

در شکل‌های (۷ و ۸)، تاثیر تغییر نوع فونداسیون بر بیشینه برش پایه، در مدل‌های دارای ضرایب اطمینان ۲، ۳ و ۴ واقع بر خاک نوع IV و II نشان داده شده است. با مقایسه‌ی نتایج شکل (۷) مشخص می‌شود که در تمامی ضرایب اطمینان فرض شده، بیشینه برش پایه در مدل با فونداسیون منفرد کمتر از مدل با فونداسیون نواری و تکیه‌گاه صلب است. مطابق شکل (۸)، بیشینه برش پایه در مدل‌های دارای فونداسیون منفرد و نواری نسبت به مدل دارای تکیه‌گاه صلب کمتر است. این روند کاهشی با نرخ کاهش تقریباً یکسان در هر دو نوع فونداسیون مشاهده می‌شود. بنابراین در مدل‌های واقع بر خاک نوع II تغییر نوع فونداسیون تاثیر کمی در روند تغییرات برش پایه دارد. در شکل (۹)، تغییرات بیشینه تغییر مکان جانبی نسبی طبقات مدل‌های مختلف واقع بر خاک نوع IV نشان داده شده است. مطابق این شکل در تمامی ضرایب اطمینان‌ها، بیشینه تغییر مکان نسبی طبقات در مدل‌های با فونداسیون نواری بیشتر از مدل‌های با فونداسیون منفرد و تکیه‌گاه صلب است. شکل (۱۰) نیز تغییرات این پارامتر را در مدل‌های مختلف واقع بر خاک نوع II نمایش داده است. در این حالت، بیشینه تغییر مکان نسبی در مدل‌های با فونداسیون منفرد و نواری کمتر از مدل با تکیه‌گاه صلب است. با مقایسه‌ی این نتایج مشخص می‌شود که در مدل‌های واقع بر خاک نوع II تغییر نوع فونداسیون تاثیری در روند تغییرات بیشینه تغییر مکان نسبی ندارد. در شکل‌های (۱۱ و ۱۲)، تاثیر تغییر ضریب اطمینان بر بیشینه برش

شکل ۱۱. نمودار برش پایه بیشینه در برابر ارتفاع قاب خمشی فولادی با ضرایب اطمینان مختلف واقع بر خاک نوع IV

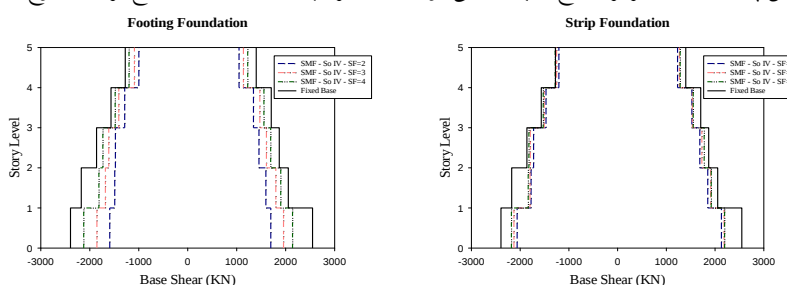


Fig. 11. The maximum base shear against the height of MRF with various S.F. located on the soil type IV

شکل ۱۲. نمودار برش پایه بیشینه در برابر ارتفاع قاب خمشی فولادی با ضرایب اطمینان مختلف واقع بر خاک نوع II

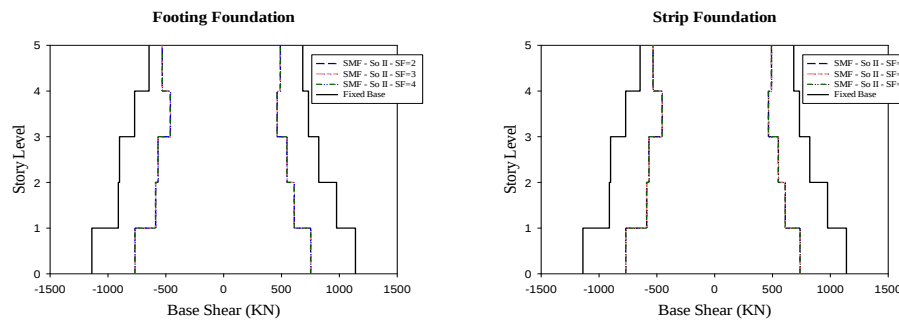


Fig. 12. The maximum base shear against the height of MRF with various S.F. located on the soil type II

شکل ۱۳. نمودار تغییر مکان نسبی بیشینه در برابر ارتفاع قاب خمشی فولادی با ضرایب اطمینان مختلف واقع بر خاک نوع IV

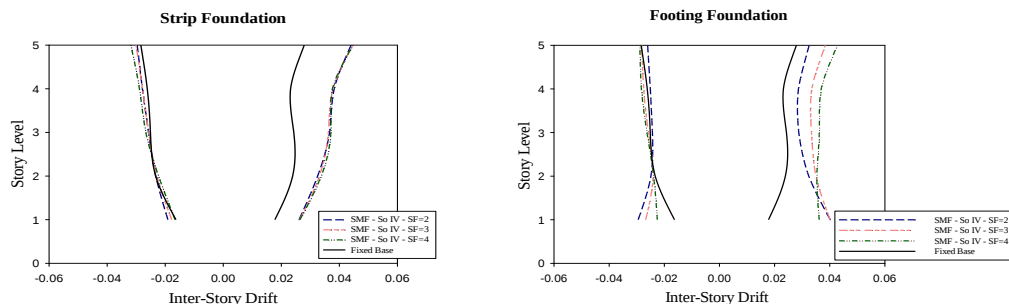


Fig. 13. The maximum inter-story drift against the height of MRF with various S.F. located on the soil type IV

شکل ۱۴. نمودار تغییر مکان نسبی بیشینه در برابر ارتفاع قاب خمشی فولادی با ضرایب اطمینان مختلف واقع بر خاک نوع II

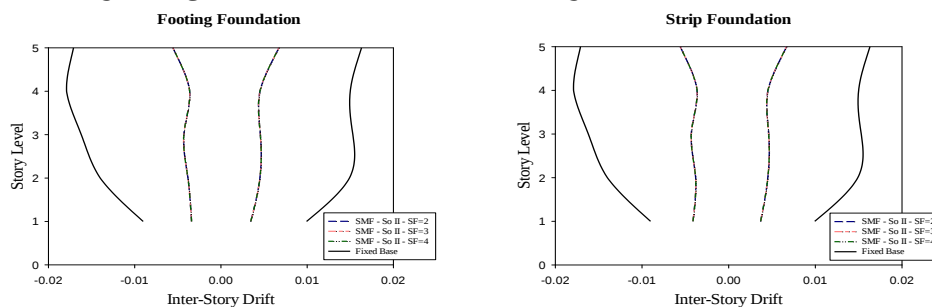


Fig. 14. The maximum inter-story drift against the height of MRF with various S.F. located on the soil type II

وینکله مدل شدند. برای مقایسه‌ی اثر مدلسازی فونداسیون (از نظر ابعاد و نوع فونداسیون) تحلیل استاتیکی غیرخطی افزایشی و تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه‌ی زمانی تحت هفت شتاب‌نگاشت حوزه‌ی دور صورت گرفت. نتایج بدست آمده از تحلیل و مقایسه‌ی مدل‌ها نشان می‌دهد که آثار اندرکنش خاک-سازه و وجود خاک نوع IV در زیر فونداسیون تأثیر بسزایی بر ظرفیت و پاسخ غیرخطی قاب خمشی ویژه دارد و لحاظ نکردن آن موجب نتایج غیرواقعی می‌شود. در حالت کلی، در مدل‌های واقع بر خاک نوع IV، استفاده از فونداسیون منفرد با ضریب اطمینان ۲ باعث کاهش ظرفیت قاب خمشی ویژه نسبت به مدل‌های با ضریب اطمینان بالاتر، فونداسیون نواری و تکیه‌گاه صلب می‌شود. همچنین در کلیه مدل‌های واقع بر خاک نوع IV، لحاظ اثر اندرکنش خاک-سازه باعث

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، میزان تأثیر نوع خاک، نوع فونداسیون سطحی و ضریب اطمینان طراحی فونداسیون بر رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-فونداسیون-سازه مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، ساختمان پنج طبقه با سیستم قاب خمشی فولادی ویژه و پلان مستطیلی شکل در نظر گرفته شد. برای طراحی فونداسیون این ساختمان دو نوع فونداسیون منفرد و نواری و دو نوع خاک (II و IV) لحاظ شد. همچنین برای بررسی اثر ضریب اطمینان در تخمین ظرفیت باربری و پاسخ‌های دینامیکی، کلیه‌ی فونداسیون‌ها با سه ضریب ۲، ۳، ۴ طراحی شدند. برای مدلسازی این سازه‌ها از نرم‌افزار اجزای محدود OpenSees استفاده شد و فونداسیون و خاک اطراف آن به صورت فنرهای غیرخطی

- [6] Ghandil M., Behnamfar F. 2017 Ductility demands of MRF structures on soft soils considering soil-structure interaction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **92**, 203-214.
- [7] ATC-40. 1996 Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, California Department of Transportation.
- [8] BSSC. 2009 NEHRP Recommended Seismic Provisions for New and Other Structures, Federal Emergency Management Agency.
- [9] ASCE7-10. 2010 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures American Society of Civil Engineers.
- [10] Central Research and Building House. 2013 Iranian National Building Code, part 6, loads on building, (In Persian).
- [11] Building and Housing Research Center. 2015 Iranian Code of Practice for Seismic Resistance Design of Buildings: Standard No. 2800 (4rd edition), (In Persian).
- [12] Central Research and Building House. 2013 Iranian National Building Code, part 10, steel structures design, (In Persian).
- [13] Bowles J.E. 1996 Foundation analysis and design, 5th Edition, McGraw-Hill, 1-1169. [17] OpenSees-Open System for Earthquake Engineering Simulation. Pacific Earthquake Engineering Research Center. PEER. Richmond (CA, USA). <http://opensees.berkeley.edu/>.
- [14] Raychowdhury P. 2008 Nonlinear Winkler-based shallow foundation model for performance assessment of seismically loaded structures, Ph.D. dissertation. San Diego: University of California.
- [15] Gazetas G. 1991 Formulas and Charts for Impedances of Surface and Embedded Foundations. *Geotechnical Engineering*, **117**(9), 1363-1381.
- [16] Boulanger R.W., Curras C.J., Kutter B.L., Wilson D.W. & Abghari A. 1999 Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses. *ASCE J Geotech Geoenviron Eng*, **125**(9), 750-759.
- [17] Bardet J., Tobita T. 2001 NERA, a computer program for Nonlinear Earthquake site Response Analyses of layered soil deposits. University of Southern California.

کاهش برش پایه و افزایش تغییر مکان نسبی طبقات می شود، بطوریکه برش پایه در مدل های با فونداسیون منفرد و ضریب اطمینان ۲ دارای بیشترین درصد کاهش و تغییر مکان نسبی طبقات در مدل های با فونداسیون نواری و ضریب اطمینان ۴ دارای بیشترین درصد افزایش است. همچنین تأثیر تغییر ضریب اطمینان در مدل های با فونداسیون منفرد بیشتر از مدل با فونداسیون نواری است. در مدل های واقع بر خاک نوع II لحاظ اثر اندرکنش خاک-سازه باعث کاهش برش پایه و کاهش تغییر مکان نسبی طبقات می شود و تغییر نوع فونداسیون و ضریب اطمینان تأثیر چندانی بر ظرفیت، بیشینه برش پایه و تغییر مکان نسبی طبقات آن ها ندارد.

References

۶- مراجع

- [1] Hokmabadi A.S., Fatahi B. 2015 Influence of Foundation Type on Seismic Performance of Buildings Considering Soil-Structure Interaction. *Structural Stability and Dynamics*, **16**(8), 15500431-155004329.
- [2] Data T.K. 2010 Seismic Analysis of Structure. *Structural Stability and Dynamics*, Singapore, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 1- 451.
- [3] Raychowdhury P. 2011 Seismic response of low-rise steel moment-resisting frame (SMRF) buildings incorporating nonlinear soil-structure interaction (SSI). *Engineering Structures*, **33**(3), 958-967.
- [4] Tahghighi H., Arbabi M. 2015 Investigation of steel structures response including nonlinear soil-structure interaction. 10th International Congress on Civil Engineering, Iran, Tabriz university, 1-8, (In Persian).
- [5] Mekki M., Elachachi S.M., Breyse D. & Zoutat M. 2016 Seismic behavior of R.C. structures including soil-structure interaction and soil variability effects. *Engineering Structures*, **126**, 15-26.

Comparison the effect of soil and shallow foundation types on the seismic performance of low-rise special steel moment frames considering soil–structure interaction

H. Rahman Shokrgozar^{1*}, M. Zare Aghblagh², A.A. Khodaie Ardabili³

1- Assistant Prof., Structural Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili

2- M.Sc. Student of Structural Engineering, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili

3- Phd Student, Faculty of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology

*h_rshokrgozar@uma.ac.ir

Abstract:

Shallow foundation is one of the most common types of foundations used in mid-rise buildings in high seismic zones. The effects of soil-foundation-structure interactions are generally not significant in the structure with rigid bases, while the nonlinear behavior of soil and soil-structure interaction phenomenon cause various changes in the seismic response of structures with flexible bases. When a structure supported on shallow foundations is subjected to inertial loading due to earthquake ground motion, the foundation may undergo sliding, settling and rocking movements. If the capacity of the foundation is mobilized, the soil-foundation interface will dissipate significant amounts of vibrational energy, resulting in a reduction in structural force demand. This energy dissipation and force demand reduction may enhance the overall performance of the structure, if the settlement or bearing failure potential is considered. In this paper, the effect of soil and shallow foundation types, and variation of safety factor are studied to assess the seismic response of steel buildings. For this purpose, five stories special steel moment frames with two different soil types (II and IV) have been considered. The footing and strip shallow foundations have been designed for these buildings with safety factors of 2, 3 and 4. The finite element models are developed using OpenSees software. The structural members such as beams and columns are modeled by nonlinear beam-column elements and fiber sections. The soil-foundation interface is modeled using Beam-on-Nonlinear-Winkler foundation. In this procedure, an array of vertical q-z springs is used to capture vertical and rotational resistance of the foundation, while two springs, namely p-x and t-x, are placed horizontally to capture the passive and sliding resistance of the foundation, respectively. The constitutive relations for the q-z, p-x, and t-x springs are represented by nonlinear backbone curves that have been constructed from the pile-calibrated backbone curves developed by Boulanger. The independent p-x and t-x springs are connected to identical end nodes with zero distance between them. The seismic performance of these special steel moment frames with various foundation and soil type are evaluated using nonlinear static pushover and nonlinear dynamic time history analyses through seven far-fault ground motions. The numerical results for each case of soil-foundation-structure systems and rigid base conditions are then presented and compared in terms of maximum base shear and maximum inter-story drifts. These results are shown that in the soil type IV, the steel moment frames with the footing foundations have lower structural capacity and maximum base shears than structures with the strip foundations or rigid bases, but the maximum inter-story drifts in the strip foundation bases are higher than others. It is also observed that by enhancing the safety factor, the structural capacity, the maximum base shear and the maximum inter-story drifts in the models with the footing foundations are increased, but changing in the safety factors do not influence in the structural response of models with the strip foundation. On the other hand, the safety factor and foundation types have not any effect on the structural capacity and the seismic responses of the structures that located on the soil type II.

Keywords: Soil-foundation-structure interaction, Soil and foundation types, Low-rise Special steel moment frame, Safety factor.