

Evaluation of lateral force distribution of frame and shear wall considering soil-structure interaction and foundation flexibility

Iman Hakamian

M.Sc., School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

*Corresponding author's email address:
imanhakamian@alumni.iust.ac.ir

How to cite this article:

Iman Hakamian, Evaluation of lateral force distribution of frame and shear wall considering soil-structure interaction and foundation flexibility, *Journal of Engineering and Construction Management (JECM)*, 2024; 9(1):1-7.

Abstract

This study investigates the effect of foundation flexibility on the lateral force distribution of moment frames and shear walls. This distribution has been represented in terms of shear-moment ratio that are developed in columns, and normalized by the fix base shear and total first story moments, respectively. Four nonlinear moment resisting frames, in different heights including 5-story, 10-story, 15-story and 20-story, with nonlinear shear wall are considered, and nonlinear static analysis are performed in the fixed and flexible bases by Opensees. BNWF approach has been employed to account foundation flexibility due to soil structure interaction. Footings are modeled as beam column elements, and soil foundation interface is modeled by closely spaced, independent nonlinear spring elements. Based on the obtained results in this study, for all the investigated frames the normalized shears and moments in the first story in flexible condition are higher than the fixed base, meaning that the greatest effect due to foundation flexibility is related to forces corresponding to the first story. Foundation flexibility reduces the shear wall's stiffness and therefore, lower forces are carried out by the wall. As a result, the extra forces are developed in frames elements.

Keywords

Soil Structure Interaction, Foundation flexibility, Shear wall, Concrete moment resisting frame

بررسی توزیع نیروی جانبی بین قاب و دیواربرشی با در نظر گرفتن پی انعطاف پذیر و اندرکنش خاک و سازه

ایمان حکمیان

کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندس عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۲۶

ارجاع به مقاله:

ایمان حکمیان، بررسی توزیع نیروی جانبی بین قاب و دیواربرشی با در نظر گرفتن پی انعطاف پذیر و اندرکنش خاک و سازه، مهندسی و مدیریت ساخت، ۱۴۰۳؛ ۹ (۱): ۱-۷.

چکیده

در این مطالعه به بررسی توزیع نیروهای جانبی وارد به سازه شامل قاب خمشی و دیوار برشی بناشده بر روی پی انعطاف پذیر پرداخته شده است. امروزه آیین نامه های طراحی به دو دلیل نسبت به محاسبه اثرات غیرخطی اندرکنش خاک و سازه، راغب نیستند: (۱) باور نادرست که به حساب آوردن اندرکنش خاک و سازه موجب طراحی سازه در جهت محافظه کارانه می شود (۲) فقدان روش های مدل سازی غیرخطی قابل اطمینان. در حالیکه به حساب آوردن اندرکنش خاک و سازه بخصوص برای سازه های بناشده بر روی پی های انعطاف پذیر به دلیل تغییرات غیرقابل چشم پوشی در رفتار دینامیکی این سازه ها دارای اهمیت بسیار می باشد. در مطالعه انجام شده در این مقاله به منظور بررسی رفتار قاب خمشی و دیوار برشی بر روی پی انعطاف پذیر، چهار قاب خمشی دوبعدی همراه با دیوار برشی با تعداد طبقات ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ با رفتار غیرخطی مصالح و خاک زیر سازه در دو شرایط تکیه گاهی انعطاف پذیر و گیردار مدل سازی شده و تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار گرفته اند. سطح تماس خاک و پی توسط فنرهای همجوار و مستقل از هم با رفتار غیرخطی و با استفاده از روش وینکلر مدل شده است. نتایج نشان داده اند در اثر انعطاف پذیری پی و اندرکنش خاک و سازه دیوار برشی نسبت به قاب خمشی دوران کرده و بر مقدار نیروهای برشی و لنگر ایجاد شده در ستون های سازه افزوده می شود.

کلمات کلیدی

اندرکنش خاک و سازه، پی انعطاف پذیر، دیوار برشی، قاب خمشی بتنی

۱- مقدمه

در محاسبات نیروی اعمالی از طرف بارهای دینامیکی بر سازه، معمولاً تکیه گاه آن صلب و تغییر شکل ناپذیر فرض می شود و از انعطاف پذیری پی و خاک زیر پی صرف نظر می شود. ولی مشاهدات و تجربیات نشانگر این واقعیت است که عامل تغییر شکل ناپذیری خاک، علاوه بر تغییر خصوصیات حرکت آزاد زمین در سطح، به صورت

مفصل ممکن است به علت اندرکنش با سازه، تغییرات قابل ملاحظه ای در واکنش سازه در مقابل بارهای دینامیکی نیز ایجاد نماید. تاثیر پدیده اندرکنش بر روی واکنش سازه ممکن است در مقایسه با واکنش سازه واقع بر تکیه گاه صلب، بسته به خصوصیات سازه و خاک، به صورت کاهش و یا به صورت افزایش و تقویت کننده باشد. موارد اشاره شده در فوق نشانگر این واقعیت است که بررسی رفتار سازه در مقابل بارهای دینامیکی، با صرف نظر نمودن



9 (1), 2024

دوره ۹، شماره ۱

تابستان ۱۴۰۳

دوفصلنامه پژوهشی



از پدیده اندرکنش خاک و سازه، کاری ناتمام می باشد. لذا در چند سال اخیر مطالعه و تحقیق در این مورد بسیار گسترش پیدا کرده و نتایج چشمگیری نیز حاصل شده است، ولی هنوز با توجه به دخالت های پارامترهای بی شمار که اکثرا غیرخطی نیز میباشند، مسئله فوق به صورت کلاسیک در نیامده است. با این حال امروزه آیین نامه های طراحی نسبت به محاسبه اثرات غیرخطی اندرکنش خاک و سازه، راغب نیستند به دو دلیل: (۱) باور نادرست که به حساب آوردن اندرکنش خاک و سازه موجب طراحی سازه در جهت محافظه کارانه می شود (۲) فقدان روش های مدل سازی غیرخطی قابل اطمینان [۱]. در دهه های اخیر تعدادی مطالعات عددی و آزمایشگاهی به منظور درک اثر اندرکنش خاک و سازه بر روی رفتار لرزه ای سازه انجام شده است. چوپرا و یم [۲] پاسخ گهواره ای یک سیستم یک درجه آزادی و یک سیستم چند درجه آزادی بر روی یک مجموعه دوفنری و میراگر را ارزیابی کرده اند. محققانی همچون استوارت و همکارانش، گرتاس و میلوناکیس [۳، ۴] نشان داده اند که پاسخ سازه یک سیستم با یک درجه آزادی واقع بر روی یک پی سطحی را می توان با یک سیستم یک درجه آزادی معادل دارای تکیه گاه گیردار تخمین زد. در مطالعه انجام شده توسط فطرنجی و همکاران [۵-۷] مشخصات دینامیکی سازه های بتن مسلح با سیستم دو گانه مورد مطالعه قرار گرفت. در مطالعه توران و همکاران [۸] مدل یک درجه آزادی با پی مدفون در یک لایه خاک رس سخت توسط میز لرزه آزمایش شده و با نتایج تحلیل عددی بدست آمده و زمان تناوب سازه در حالت تکیه گاه گیردار مقایسه شده است. هاجینسون و همکارانش [۹] نشان داده اند در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه می تواند منجر به کاهش تقاضای نیرو و جابجایی نسبی طبقات در سازه شود. در مطالعه ای که توسط ماسیمو و ماگری [۱۰] انجام شده است دو مدل فیزیکی همراه با پی های سطحی بر روی ماسه توسط میز لرزه آزمایش شده و نتایج بدست آمده به منظور دست یابی به یک روش ساده با نتایج تحلیلی و عددی مقایسه شده است. پالوجی و همکارانش [۱۱] یک روش طراحی براساس تکرار را پیشنهاد داده اند که در آن معادلات در حالت گیردار برای محاسبه اثر اندرکنش خاک و سازه به صورت ضرایب کاهش سختی دورانی و افزایش میرایی سازه بر اساس دوران آن، اصلاح می شود. در این مطالعه به بررسی پاسخ سازه و چگونگی توزیع نیروهای جانبی آن بین قاب خمشی و دیوار برشی بنا شده بر روی پی انعطاف پذیر با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی سطح تماس خاک و پی پرداخته شده است.

در سیستم های ترکیبی قاب خمشی و دیوار برشی مقاومت در برابر بار جانبی توسط ترکیب دیوارهای برشی و قابهای صلب تامین می شود. هنگامی که یک سیستم ترکیبی قاب و دیوار برشی به صورت جانبی بارگذاری می شود حالت تغییر شکل های مجزا و متفاوت دیوارهای برشی و قاب ها می تواند در کم کردن تغییر شکل های جانبی برای ساختمان های حتی تا بیشتر از ۵۰ طبقه یا بیشتر کاملا موثر و اقتصادی باشد. پتانسیل مزیت های یک سازه ترکیبی قاب و دیوار، به شدت اندرکنش افقی که توسط سختی نسبی دیوارها و قاب ها و ارتفاع سازه تعیین می شود، بستگی دارد. در سازه بلندتر و سخت تر اندرکنش بیشتر خواهد بود. در این سیستم قاب به اصطلاح در یک مد برشی تغییر شکل می دهد و از آنجا که پاسخ غالب دیوار به صورت

خمشی مانند یک تیر طره می باشد سازگاری تغییر مکان های افقی، اندرکنشی را بین این دو به وجود می آورد. جابجایی جانبی خطی قاب خمشی با جابجایی سهمی دیوار برشی ترکیب شده در نتیجه سختی کل سیستم افزایش می یابد به این دلیل که دیوار در ترازهای بالا توسط قاب مهار می شود در حالی که در ترازهای پایین دیوار قاب را مهار می کند.

این رفتار بستگی به این دارد که پی دیوار توان مقاومت در برابر لنگر واژگونی را داشته باشد و چرخشی در آن ایجاد نشود. در واقعیت دیوارها بر روی پایه هایشان چرخش دارند و این چرخش به انعطاف پذیری پی وابسته است. در صورتی که پی سازه مقاومت کافی در برابر دوران ایجاد شده از سوی بارهای وارده را نداشته باشد دیگر توزیع نیروهای بین قاب و دیوار برشی همانند قبل نخواهد بود و در این مطالعه به چگونگی توزیع این نیروهای جانبی ایجاد شده بین قاب و دیوار پرداخته شده است.

در این مطالعه به منظور مدل سازی پی انعطاف پذیر و اندرکنش آن با خاک زیر پی، از رویکرد وینکلر استفاده شده است که در آن سطح تماس خاک و پی به صورت مجموعه فنرهای غیرخطی مستقل و همجوار یکدیگر مدل شده است. همچنین چهار قاب خمشی دویعدی به همراه دیوار برشی با رفتار مصالح غیرخطی در دو شرایط تکیه گاهی گیردار و انعطاف پذیر توسط نرم افزار اویپسیس مدل شده و نتایج پس از انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی به صورت منحنی پش آور کلی سازه و تغییر در برش و لنگر ایجاد شده در ستون های هر طبقه از قاب در هر دو حالت تکیه گاه گیردار و انعطاف پذیر ارائه شده است.

۲- مدل سازی

۲-۱- مشخصات مدل قاب و دیوار

چهار قاب خمشی با سه دهانه ۶ متری و یک دیوار برشی با طول ۶ متر با طبقات مختلف ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ به طوری که هر طبقه دارای ارتفاع ۳/۲ متر می باشد، بر روی یک پی انعطاف پذیر متصل به فنرهای غیرخطی مدل شده است. مقاطع مورد استفاده با استفاده از آیین نامه بتن آمریکا و رعایت ضوابط آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) طراحی شده اند. جدول ۱ تا ۴ نشان دهنده ابعاد مقاطع استفاده شده در نرم افزار می باشد.

جدول ۱ ابعاد مقاطع به کار رفته در سازه ۵ طبقه (به متر)

ضخامت دیوار	ρ	مقطع ستون	ρ	مقطع تیر	طبقه
۰/۳	۰/۰۲۱	۰/۶×۰/۶	۰/۰۲۷	۰/۳×۰/۴	۱ تا ۵

جدول ۲ ابعاد مقاطع به کار رفته در سازه ۱۰ طبقه (به متر)

ضخامت دیوار	ρ	مقطع ستون	ρ	مقطع تیر	طبقه
۰/۴۵	۰/۰۲۱	۰/۷×۰/۷	۰/۰۲۷	۰/۴×۰/۴	۱ تا ۳
۰/۴۵	۰/۰۲۱	۰/۶×۰/۶	۰/۰۱۸	۰/۴×۰/۳۵	۴ تا ۷
۰/۳	۰/۰۲	×۰/۵۵	۰/۰۲۳	۰/۴×۰/۳	۸ تا ۱۰



9 (1) , 2024

دوره ۹، شماره ۱

تابستان ۱۴۰۳

دوفصلنامه پژوهشی

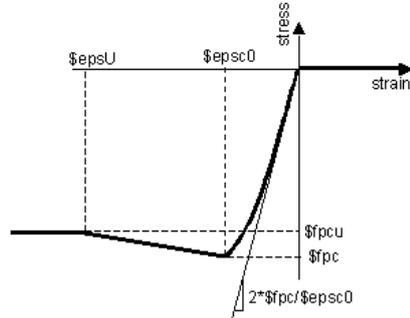
جدول ۳ ابعاد مقاطع به کار رفته در سازه ۱۵ طبقه (به متر)

ضخامت دیوار	ρ	مقطع ستون	ρ	مقطع تیر	طبقه
۰/۶	۰/۰۲۴	$\times 0/95$	۰/۰۰۷	$\times 0/5$	۵ تا ۱
۰/۵	۰/۰۲۳	$\times 0/85$	۰/۰۰۹	$0/6 \times 0/5$	۱۰ تا ۶
۰/۳	۰/۰۲۲	$0/7 \times 0/7$	۰/۰۱	$0/5 \times 0/5$	۱۱ تا ۱۵

جدول ۴ ابعاد مقاطع به کار رفته در سازه ۲۰ طبقه (به متر)

ضخامت دیوار	ρ	مقطع ستون	ρ	مقطع تیر	طبقه
۰/۹	۰/۰۲۲	1×1	۰/۰۱	$0/7 \times 0/5$	۵ تا ۱
۰/۹	۰/۰۲	$0/9 \times 0/9$	۰/۰۱۱	$0/65 \times 0/5$	۱۰ تا ۶
۰/۸	۰/۰۲۳	$0/8 \times 0/8$	۰/۰۱۱	$0/6 \times 0/5$	۱۱ تا ۱۵
۰/۶	۰/۰۲۲	$0/7 \times 0/7$	۰/۰۱۲	$0/5 \times 0/5$	۱۶ تا ۲۰

برای مصالح فولادی به کار رفته به عنوان میلگرد از فولاد (۰۲) که برای ساخت مصالح فولادی گیوفر و منگتو و پینتو با سخت شوندگی ایزوتروپیک به کار می‌رود، استفاده شده است [۱۳].



شکل ۳ نمودار رفتار مصالح بتن ۰۱

در جدول ۵ مشخصات استفاده شده در مصالح بتنی به کار رفته در مدل به طور خلاصه نشان داده شده است.

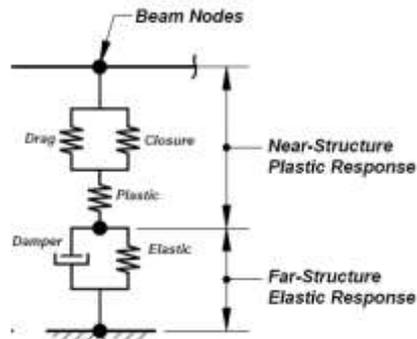
جدول ۵ مشخصات مصالح بتنی استفاده شده (مگاپاسکال)

کرنش نهایی	مقاومت نهایی	کرنش بیشینه	مقاومت بیشینه	بتن
۰/۰۱۵	۴/۹	۰/۰۰۳	۲۴/۵	محصور
۰/۰۰۵	۴/۵	۰/۰۰۲۵	۲۲/۵	نامحصور

عناوین استفاده شده در جدول فوق همان نمادهای به کار رفته در شکل ۳ می‌باشند.

۲-۲- مشخصات خاک و پی

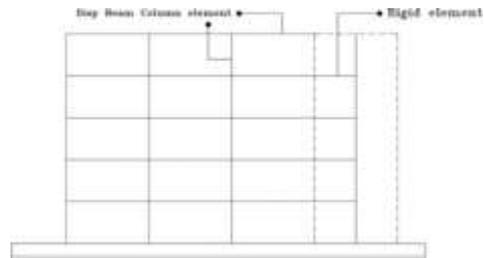
در این مطالعه سطح تماس خاک و پی با استفاده از رویکرد وینکلر مدل شده است. به طوری که سطح تماس با فنرهای غیرخطی مستقل و همجوار شبیه‌سازی شده است. هر فنر شامل المان‌های مختلفی می‌باشد، مانند فنرهای درگ و کلوزر، میراگر، فنر پلاستیک حوزه نزدیک و فنر الاستیک ناحیه دور که در شکل ۴ نشان داده شده است [14].



شکل ۴ شمای کلی یک المان فنر

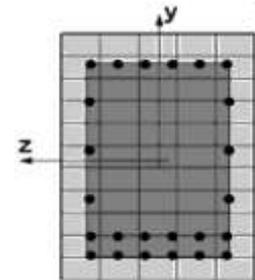
مجموع این المان‌ها با یکدیگر تعیین کننده ویژگی‌های برجسته سطح تماس خاک و پی می‌باشند. از جمله تغییرشکل‌های دائمی و گذرا، جداسازی بین پی و خاک اطراف آن، میرایی تشعشی و چرخه‌ای خاک، زوال سختی و میرایی و... فنرهای قائم (المان‌های q-z) (زبه منظور ثبت حرکت گهواره‌ای، جداسازی و نشست پی در طول شالوده توزیع شده‌اند. در حالی که فنرهای افقی (المان‌های t-x و p-x) به ترتیب به منظور ثبت لغزش و مقاومت مقاوم شالوده به کار

المان‌های تیر و ستون و دیوار استفاده شده در نرم‌افزار از نوع المان برمبنای جابجایی و با پلاستیسیته گسترده همراه با شش نقطه انتگرال‌گیری بر اساس قانون گوس-لوباتو مدل شده‌اند. تیرهای موجود در ناحیه‌ای که داخل دیوار برشی محسوب می‌شود به صورت المان‌های صلب در نظر گرفته شده‌اند و تغییر مکان و دوران آن‌ها کاملاً مقید به تغییر مکان و دوران گره‌های متناظر در المان دیوار می‌باشد که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.



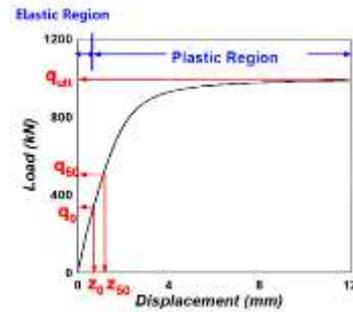
شکل ۱ مدل مربوط به سازه ۵ طبقه ایجاد شده در نرم‌افزار

مقاطع معرفی شده از نوع فایبر می‌باشند، که نرم‌افزار با تقسیم کردن مقطع به المان‌های کوچک‌تر دقت در تحلیل مقطع را افزایش می‌دهد. مصالح استفاده شده برای بتن محصور شده که شامل ناحیه است که در مرکز در شکل ۲ نشان داده شده است و قسمتی از بتن می‌باشد که توسط خاموت‌های تعبیه شده داخل بتن به صورت محصور شده رفتار می‌کند، از نوع بتن (۰۱) با مقاومت کششی صفر می‌باشد. همچنین برای بتن نامحصور نیز از همین نوع مصالح استفاده شده است [۱۲].



شکل ۲ مقطع فایبر شامل بتن محصور شده (ناحیه داخلی) و بتن نامحصور (ناحیه خارجی)

می‌روند [۱۵]. روابط ساختاری استفاده شده برای مکانیزم فرمهای مذکور توسط منحنی‌های غیرخطی نشان داده می‌شوند که توسط بولنگر بر اساس مطالعات اولیه بولنگر و همکارانش ایجاد شده است [۱۶] و پس از آن توسط ری‌چادوری [۱۷] به منظور مدل‌سازی مناسب رفتار پی‌های سطحی، تنظیم و اعتبارسنجی شده است. هر مدل فنر شامل یک قسمت ارتجاعی اولیه می‌باشد که پس از آن به صورت منحنی غیرارتجاعی ادامه می‌یابد، شکل ۵.



شکل ۵ منحنی مشخصه رفتار فنرهای بکار رفته

در ناحیه الاستیک منحنی بار q به طور خطی با جابجایی z توسط سختی الاستیک اولیه k_{in} مرتبط است.

$$q = k_{in}z \quad (1)$$

ناحیه الاستیک با مرتبط کردن q_{ult} به نقطه تسلیم q_0 توسط پارامتر C_r تعریف می‌شود.

$$q_0 = C_r q_{ult} \quad (2)$$

ناحیه پس از تسلیم منحنی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$q = q_{ult} - (q_{ult} - q_0) \left[\frac{cz_{50}}{cz_{50} + |z - z_{0p}|} \right]^n \quad (3)$$

به طوریکه z_{50} مقدار جابجایی است، هنگامی که ۵۰ درصد بار نهایی بسیج شده باشد. z_0 مقدار جابجایی در نقطه تسلیم، C و n پارامترهای ساختاری هستند که شکل منحنی در قسمت پس از تسلیم را کنترل می‌کنند. مولفه گپ فنر، یک ترکیب موازی با فنر انتهایی و کششی می‌باشد. مولفه انتهایی یک فنر الاستیک با رفتار دوخطی است که در فشار نسبتاً صلب و در کشش بسیار انعطاف‌پذیر می‌باشد. اگرچه موارد گفته شده برای $P-X$ و $T-X$ نیز کاملاً مشابه است، ضرایب ثابت که شکل کلی منحنی را کنترل می‌کنند (C_r, n, C) متفاوت می‌باشند. از معادلات (۱) تا (۳) می‌توان دریافت که شکل منحنی‌های رفتاری فنرها که به طور اساسی رفتار اندرکنش خاک و سازه را کنترل می‌کنند به طور کامل به دو متغیر فیزیکی مرتبط با ویژگی‌های خاک، ظرفیت (q_{ult}) و سختی ارتجاعی اولیه (k_{in}) وابسته می‌باشد. ظرفیت و سختی ارتجاعی هر فنر از تقسیم ظرفیت و سختی کل شالوده به سطح متناسب مرتبط با هر فنر بدست می‌آید. ظرفیت شالوده با استفاده از معادله ظرفیت باربری ترازقی [۱۸] به همراه ضرایب شکل، عمق و شیب مایهوف [۱۹] به صورت نشان داده شده در معادلات (۴) تا (۷) به دست می‌آید.

$$q_{ult} = cN_c F_{cs} F_{cd} F_{ci} + \gamma D_f N_q F_{qs} F_{qd} F_{qi} + 0.5 \gamma B N_\gamma F_{\gamma s} F_{\gamma d} F_{\gamma i} \quad (4)$$

به طوریکه، q_{ult} ظرفیت باربری نهایی بر واحد سطح پی، c چسبندگی، γ وزن مخصوص خاک، D_f عمق مدفون شده، B عرض پی، N_c N_q N_γ ضرایب ظرفیت باربری می‌باشند:

$$N_q = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) e^{\pi \tan \phi} \quad (5)$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi \quad (6)$$

$$N_\gamma = (N_q - 1) \tan(1.4\phi) \quad (7)$$

برای مصالح $p-x$ ظرفیت نهایی بار جانبی به صورت نیروی مقاوم که بر قسمت جلویی شالوده مدفون وارد می‌شود، تعریف می‌شود. برای خاکریز همگن در تماس با پی نیروی مقاوم به صورت توزیع خطی فشار پشت پی و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$t_{ult} = W_g \tan \delta + A_b c \quad (8)$$

به طوریکه، t_{ult} مقاومت اصطکاکی بر واحد سطح پی می‌باشد، W_g وزن سازه روی پی، δ زاویه اصطکاک بین خاک و پی که معمولاً از یک سوم ϕ تا دو سوم ϕ متغیر است. A_b مساحت زیر پی در تماس با خاک است.

$$k_v = \frac{GL}{1-\theta} \left[0.73 + 1.54 \left(\frac{B}{L} \right)^{0.75} \right] \quad (9)$$

$$k_h = \frac{GL}{2-\theta} \left[2 + 2.5 \left(\frac{B}{L} \right)^{0.85} \right] \quad (10)$$

به طوریکه k_v و k_h به ترتیب سختی ارتجاعی اولیه قائم و جانبی پی می‌باشند. G مدول برشی خاک، v ضریب پواسون خاک و B و L به ترتیب عرض و طول شالوده می‌باشند. سختی k_p که رابطه بین بار و جابجایی را پس از نقطه تسلیم و در قسمت غیرخطی منحنی نشان می‌دهد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$k_p = n(q_{ult} - q_0) \left[\frac{(cz_{50})^n}{(cz_{50} - z_0 + z)^{n+1}} \right] \quad (11)$$

معادله (۱۱) در واقع همان معادله (۳) با ترکیب متفاوت می‌باشد. شکل و سختی قسمت غیرخطی منحنی تابعی از متغیرهای n و c می‌باشند که از آزمایشات متعدد پی‌های سطحی بر روی انواع خاک‌های مختلف بدست آمده‌اند. در نهایت از معادلات فوق آشکار می‌باشد که پاسخ فنرها کاملاً به متغیرهای خاک همانند چسبندگی (c)، زاویه اصطکاک (ϕ)، وزن مخصوص (γ)، مدول برشی (G) و ضریب پواسون (v) وابسته می‌باشند. این مقادیر در این مطالعه به صورت $c=70$ KN/m²، $\phi=0$ ، $\gamma=16.67$ KN/m³، $G=5.23$ Mpa و $v=0.3$ می‌باشد. المان‌های پی به صورت المان‌های تیر ستون و با رفتار خطی مدل شده و در جدول ۶ ابعاد پی به صورت متر نشان داده شده است.

جدول ۶ ابعاد پی

عمق مدفون	ضخامت	عرض	طول	ساختمان
۰/۷	۰/۷	۲/۵	۳۰	طبقه ۵
۳/۲	۰/۹	۵	۳۰	طبقه ۱۰
۶/۴	۱/۲	۶	۳۰	طبقه ۱۵
۱۲	۱/۵	۸	۳۶	طبقه ۲۰

۳- نتایج و تفسیر

۳-۱- نتایج مربوط به تحلیل مقادیر ویژه

به منظور مشخص شدن تاثیر انعطاف پذیری پی و اندرکنش خاک و سازه بر روی مقادیر ویژه سازه‌ها تحلیل مقادیر ویژه توسط نرم افزار انجام شده و نتایج آن در جدول (۷) نشان داده شده است. در این جدول زمان تناوب ساختمان‌ها در دو شرایط تکیه‌گاهی گیردار و انعطاف‌پذیر و همچنین نسبت افزایش زمان تناوب (\dot{T}/T) نشان داده شده است.

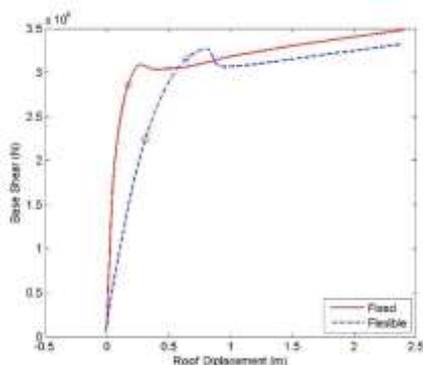
جدول ۷ نتایج مربوط به تحلیل مقادیر ویژه

ساختمان	زمان تناوب به گیردار	زمان تناوب انعطاف‌پذیر	زمان تناوب انعطاف‌پذیر به گیردار
طبقه ۵	۰/۲۹	۰/۸۵	۲/۹۳
طبقه ۱۰	۰/۸	۱/۴۰	۱/۷۵
طبقه ۱۵	۱/۱۳	۱/۴۴	۱/۲۷
طبقه ۲۰	۱/۵۸	۱/۹۱	۱/۲۱

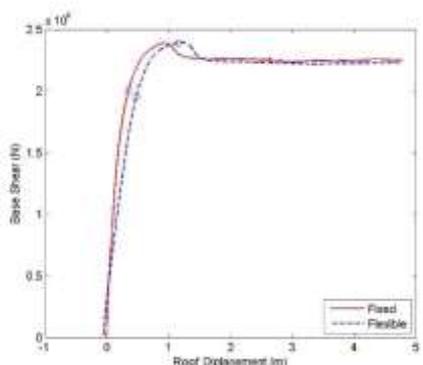
همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش زمان تناوب ساختمان تاثیر انعطاف‌پذیری پی بر افزایش زمان تناوب اصلی ساختمان کم‌تر می‌شود.

۳-۲- نتایج مربوط به تحلیل استاتیکی غیرخطی

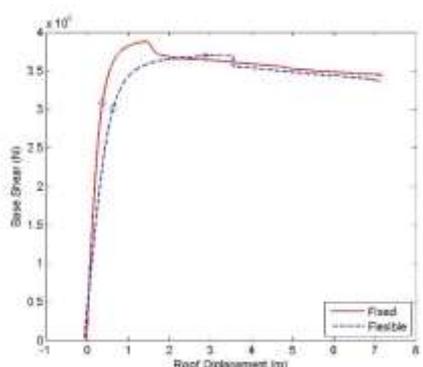
در این بخش نتایج مربوط به منحنی‌های پوش‌آور سازه‌ها در دو شرایط تکیه‌گاهی گیردار و انعطاف‌پذیر نشان داده شده است. این منحنی‌ها پس از اعمال بار ثقلی مرده با ضریب ۰/۹ به سازه و سپس انجام تحلیل پوش‌آور با الگوی بار جانبی ناشی از تحلیل طیفی سازه برای مود اول سازه به دست آمده‌اند (شکل ۶ تا ۹). با توجه به اشکال نشان داده شده، پس از انعطاف‌پذیری پی شیب منحنی پوش‌آور با توجه به کم شدن سختی سازه کاهش یافته است [۲۰]. لازم به ذکر می‌باشد که باتوجه به انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی پس از اعمال بار مرده به سازه منحنی‌های نشان داده شده از برش پایه صفر شروع نشده‌اند و این موضوع به دلیل بوجود آمدن برش در سازه پس از اعمال بار مرده می‌باشد. نقاط توخالی نشان داده شده بر روی منحنی‌ها مربوط به تشکیل اولین مفصل پلاستیک در سازه می‌باشد. با انعطاف‌پذیر شدن پی سازه اولین مفصل پلاستیک در جابجایی بیشتری از بام و برش پایه کم‌تری شکل می‌گیرد. که این موضوع با افزایش ارتفاع ساختمان کم‌تر به چشم می‌خورد. نقطه توخالی بعدی مربوط به محل تسلیم خاک زیر پی می‌باشد. در این مطالعه همانطور که قابل مشاهده می‌باشد خاک پس از سازه به نقطه تسلیم می‌رسد. از آنجایی که با انعطاف‌پذیری پی، سختی دیوار نسبت به حالت گیردار کم‌تر می‌شود، دیوار برشی دوران می‌کند و لنگر و برش بیشتری نسبت به حالت تکیه‌گاه گیردار به قاب منتقل می‌شود.



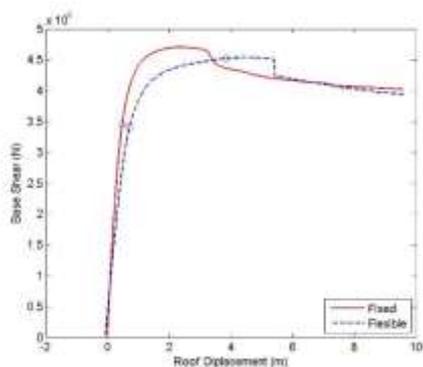
شکل ۶ منحنی پوش‌آور مربوط به ساختمان ۵ طبقه



شکل ۷ منحنی پوش‌آور مربوط به ساختمان ۱۰ طبقه

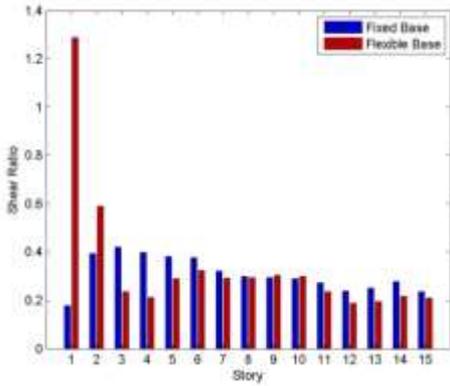


شکل ۸ منحنی پوش‌آور مربوط به ساختمان ۱۵ طبقه

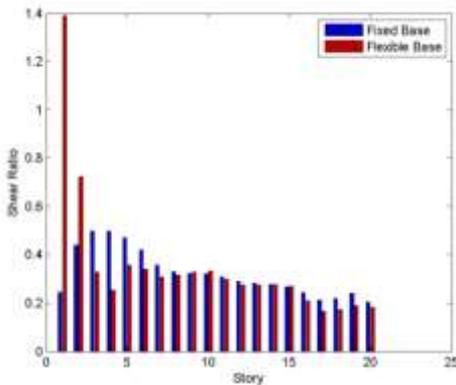


شکل ۹ منحنی پوش‌آور مربوط به ساختمان ۲۰ طبقه

از طرف دیگر با کاهش سختی کل سازه دوران‌های ایجاد شده در ستون‌ها و در نتیجه در تیرهای قاب بیشتر می‌شود. بنابراین در شرایط



شکل ۱۲ نسب برش قاب در ساختمان ۱۵ طبقه



شکل ۱۳ نسب برش قاب در ساختمان ۲۰ طبقه

۴- نتیجه‌گیری

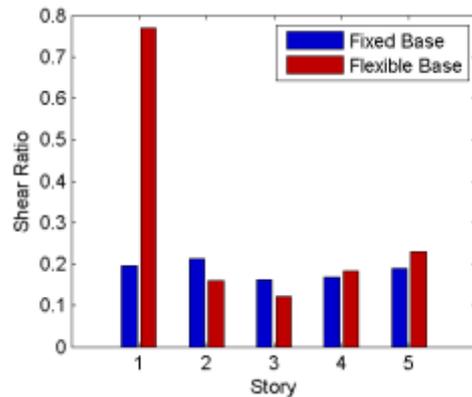
اندرکنش خاک و سازه امری جدایی ناپذیر از طراحی ساختمان‌ها و رفتار دینامیکی سازه بسیار متأثر از آن می‌باشد. در این مطالعه سعی شد تا علاوه بر تاثیر کلی اثر اندرکنش خاک و سازه و اثر انعطاف‌پذیری پی، بر روی سازه‌ها با ارتفاع متفاوت به تاثیر این امر بر نحوه توزیع بار جانبی بین قاب خمشی و دیوار برشی پرداخته شود. برای این منظور چهار قاب خمشی به همراه دیوار برشی با رفتار غیرخطی، در دو شرایط تکیه‌گاهی گیردار و انعطاف‌پذیر، تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار گرفته‌اند و نتایج به صورت زیر بدست آمده است:

۱. سختی کل سازه در اثر انعطاف‌پذیری پی کاهش می‌یابد.
۲. اولین مفصل پلاستیک در حالت انعطاف‌پذیر در برش پایه کم‌تر و جابجایی بام بیشتری نسبت به حالت گیردار اتفاق می‌افتد که این امر در ساختمان ۵ طبقه کاملاً مشهود می‌باشد.
۳. با افزایش ارتفاع، رفتار سازه در دو حالت گیردار و انعطاف‌پذیر مشابه شده و محل تشکیل اولین مفصل پلاستیک و برش پایه نظیر آن نیز به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شود.
۴. بیشترین تاثیر انعطاف‌پذیری پی در طبقه اول سازه مشاهده می‌شود. به طوری‌که در حالت انعطاف‌پذیر نسبت برش در قاب نسبت به حالت گیردار در ساختمان ۵ طبقه به بیش از ۳/۵ برابر، در ساختمان ۱۰ طبقه به بیش از ۴ برابر، در ساختمان ۱۵ طبقه به بیش از ۶ و در ساختمان ۲۰ طبقه به بیش از ۵ برابر می‌رسد.

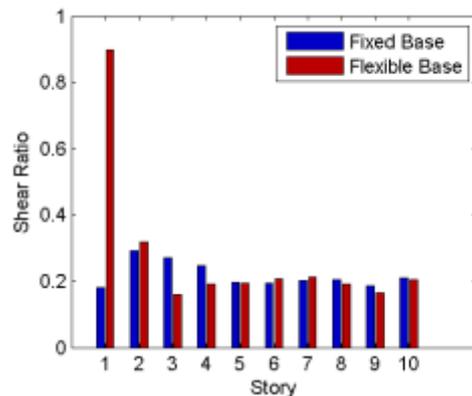
تکیه‌گاهی انعطاف‌پذیر، نیروها و دوران‌های ایجاد شده در تیر و ستون‌های قاب بیشتر از مقدار متناظر در حالت تکیه‌گاه گیردار می‌باشد. در شکل‌های ۱۰ تا ۱۳ نسبت برش ایجاد شده در قاب به برش پایه کل سازه نشان داده شده است. این نسبت به صورت زیر تعریف شده است.

$$\text{نسبت برش} = \frac{\text{مجموع برش ستونهای قاب}}{\text{برش پایه کل}} \quad (۱۲)$$

لازم به ذکر است که مقادیر نشان داده شده در شکل‌ها مربوط به جابجایی نسبی بام ۰/۰۲ می‌باشد. با توجه به اشکال نشان داده شده، پس از انعطاف‌پذیری پی نسبت برش‌های ایجاد شده در قاب در طبقه اول افزایش چشم‌گیری نسبت به حالت گیردار داشته است. در واقع همانطور که ذکر شد با انعطاف‌پذیر شدن پی سختی دیوار برشی کاهش می‌یابد و قاب خمشی سهم بیشتری از برش پایه را به خود اختصاص می‌دهد این افزایش برش در طبقه اول که دیوار برشی در حالت گیردار بیشترین سهم برش را به خود اختصاص می‌دهد، اتفاق افتاده است.



شکل ۱۰ نسب برش قاب در ساختمان ۵ طبقه



شکل ۱۱ نسب برش قاب در ساختمان ۱۰ طبقه

۵- تعارض منافع

نویسندگان هیچ گونه تضاد منافی ندارند.

۶- حمایت مالی

این تحقیق از هیچگونه حمایت مالی ای برخوردار نبوده است.

۷- مراجع

- far and near-field ground motions," *Earthquakes and Structures*, vol. 25, no. 2, pp. 99-112, 2023.
- [13] F. C. Filippou, E. P. Popov, and V. V. Bertero, "Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints," 1983.
- [14] M. Shayanfar, M.M. Memarpour, M.A. Barkhordari, I. Hakamian", Comparison of static and dynamic analysis in earthquake lateral force distribution in reinforced concrete structures considering soil-structure interaction," presented at the second national conference on structural engineering in Iran, 2014. [Online]. Available: <https://civilica.com/doc/535781>. (In Persian)
- [15] M. Memarpour, M. Shayanfar, and M. Kimiaei, "A new BNWF model for cyclic pile-soil interaction analysis of single offshore piles," in 13th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, 2011: Centre for Infrastructure Engineering and Safety, pp. 135-140 .
- [16] R. W. Boulanger, C. J. Curras, B. L. Kutter, D. W. Wilson, and A. Abghari, "Seismic soil-pile-structure interaction experiments and analyses," *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 125, no. 9, pp. 750-759, 1999.
- [17] P. Raychowdhury, Nonlinear Winkler-based shallow foundation model for performance assessment of seismically loaded structures. University of California, San Diego, 2008.
- [18] K. Terzaghi, *Theoretical soil mechanics*. ۱۹۴۳ .
- [19] G. G. Meyerhof, "Some recent research on the bearing capacity of foundations," *Canadian geotechnical journal*, vol. 1, no. 1, pp. 16-26, 1963.
- [20] S. Soltanieh, M. Memarpour, and F. Kilanehi, "Performance assessment of bridge-soil-foundation system with irregular configuration considering ground motion directionality effects," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 118, pp. 19-34, 2019.
- [1] P. Raychowdhury and P. Singh, "Effect of nonlinear soil-structure interaction on seismic response of low-rise SMRF buildings," *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, vol. 11, pp. 541-551, 2012.
- [2] A. K. Chopra and S. C.-S. Yim, "Simplified earthquake analysis of structures with foundation uplift," *Journal of Structural Engineering*, vol. 111, no. 4, pp. 906-930, 1985.
- [3] G. Gazetas and G. Mylonakis, "Soil-structure interaction effects on elastic and inelastic structures," 2001.
- [4] J. P. Stewart, S. Kim, J. Bielak, R. Dobry, and M. S. Power, "Revisions to soil-structure interaction procedures in NEHRP design provisions," *Earthquake Spectra*, vol. 19, no. 3, pp. 677-696, 2003.
- [5] M. Katrangi, M. M. Memarpour, and M. Yakhchalian, "Investigating the Seismic Behaviour of the RC Wall-Framed System Considering Soil-Structure Interaction," *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 65-81, 2020.
- [6] M. Katrangi, M. M. Memarpour, and M. Yakhchalian", Investigating the seismic behavior of the dual shear wall-bending frame system considering the interaction between the soil and the structure," *Earthquake Science and Engineering Quarterly*, vol. 7, no. 4, pp. 65-81, 2020. (In Persian)
- [7] M. Katrangi, M. M. Memarpour, and M. Yakhchalian, "Assessment of the seismic performance and the base shear contribution ratios of the RC wall-frame dual system considering soil-structure interaction," *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 26, no. 10, pp. 5290-5317, 2022.
- [8] A. Turan, S. D. Hinchberger, and M. H. El Naggar, "Seismic soil-structure interaction in buildings on stiff clay with embedded basement stories," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 50, no. 8, pp. 858-873, 2013.
- [9] T. C. Hutchinson, P. Raychowdhury, and B. Chang, "Nonlinear structure and foundation response during seismic loading: dual lateral load resisting systems," in *Proceedings of the 8th US National Conference on Earthquake Engineering*, 2006, no. 320 .
- [10] M. R. Massimino and M. Maugeri, "Physical modelling of shaking table tests on dynamic soil-foundation interaction and numerical and analytical simulation," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 49, pp. 1-18, 2013.
- [11] R. Paolucci, R. Figini, and L. Petrini, "Introducing dynamic nonlinear soil-foundation-structure interaction effects in displacement-based seismic design," *Earthquake spectra*, vol. 29, no. 2, pp. 475-496, 2013.
- [12] I. Hakamian, K. Taghikhani, N. Manouchehri, and M. M. Memarpour, "Soil-structure interaction effects on collapse probability of the RC buildings subjected to

COPYRIGHTS

©2024 by the authors. Published by **Journal of Engineering & Construction Management (JECM)**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



9 (1) , 2024

دوره ۹، شماره ۱

تابستان ۱۴۰۳

دوفصلنامه پژوهشی

