



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Research Article

Dynamic Response of Steel-Braced RC Frames under Differential Foundation Settlement

Ali Farhangpour Khiyabani¹, Mahdi Sadeghzadeh Tabrizi^{*2}

1- M.Sc. in Urban Management, Tabriz Metropolitan Municipality, Tabriz, Iran

*2- M.Sc. in Mechatronics Engineering, University of Applied Science and Technology of East Azerbaijan Province, Khaneh Kargar Center, Tabriz, Iran

Received: 09 January 2026; Revised: 04 February 2026; Accepted: 10 February 2026; Published: 22 May 2026

Abstract

Differential foundation settlement is one of the key factors affecting the dynamic behavior of reinforced concrete (RC) structures, potentially causing significant changes in seismic response and force distribution within frames. This study investigates the effects of asymmetric foundation settlement on the dynamic performance of RC frames retrofitted with steel bracing. For this purpose, a multi-story RC frame was numerically modeled using advanced simulation software, and its behavior under various seismic excitations with different differential settlements was analyzed. The main novelty of this research lies in simultaneously examining the impact of non-uniform settlement and the effectiveness of steel bracing in enhancing the seismic performance of the frames. Dynamic response parameters, including inter-story drift, base shear, and brace force distribution, were evaluated. Results indicate that steel braces significantly reduce inter-story drifts and improve overall frame stability under asymmetric settlements. Furthermore, the effect of differential settlement on retrofitted frames is lower compared to unbraced frames, with a more uniform force distribution observed. These findings can assist structural engineers in the optimal design of seismic retrofitting systems for RC frames and in predicting structural behavior under non-uniform foundation settlements. The obtained results emphasize the importance of considering foundation settlement analysis in the design and retrofitting of frames and provide a comprehensive framework for evaluating the effects of differential settlement on RC structures.

Keywords: Asymmetric foundation settlement; Reinforced concrete frame; Steel bracing; Seismic behavior;

Cite this article as Farhangpour Khiyabani,A and Sadeghzadeh Tabrizi,M . (2026). Dynamic Response of Steel-Braced RC Frames under Differential Foundation Settlement. (e240384). Civil and Project, 8(3), e240384
doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2026.574610.1430>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2026 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

*Corresponding author E-mail address: mahdi_sadeghzadeh_tabrizi@yahoo.com



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

بررسی اثرات نشست تفاضلی پی بر پاسخ دینامیکی قاب‌های بتن آرمه بهسازی شده با مهاربندی فولادی

علی فرهنگ پور خیابانی^۱، مهدی صادقزاده تبریزی^{۲*}

۱- کارشناس ارشد مدیریت شهری، شهرداری کلانشهر تبریز، ایران،

۲- کارشناس ارشد مکترونیک، دانشگاه جامع علمی کاربردی استان آذربایجان شرقی، مرکز خانه کارگر، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۹ دی ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۵ بهمن ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۲۱ بهمن ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ خرداد ۱۴۰۵

چکیده

نشست تفاضلی فونداسیون یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر رفتار دینامیکی سازه‌های بتن آرمه است که می‌تواند باعث تغییرات قابل توجه در پاسخ لرزه‌ای و توزیع نیروها در قاب‌ها شود. در این پژوهش، اثر نشست نامتقارن پی بر پاسخ دینامیکی قاب‌های بتن آرمه بهسازی شده با مهاربندی فولادی بررسی شده است. برای این منظور، یک مجموعه قاب چندطبقه بتن آرمه در نرم افزارهای شبیه سازی عددی مدل سازی شده و رفتار آن تحت تحریکات لرزه‌ای مختلف با مقادیر متفاوت نشست تفاضلی تحلیل گردیده است. نوآوری اصلی تحقیق در بررسی همزمان اثر نشست غیر یکنواخت و تأثیر مهاربندهای فولادی در بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌ها می‌باشد. در این مطالعه، معیارهای پاسخ دینامیکی شامل تغییر مکان نسبی طبقات، برش پایه، و توزیع نیروهای مهاربندی مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهند که مهاربندهای فولادی می‌توانند کاهش قابل توجه در تغییر مکان‌های نسبی طبقات و افزایش پایداری کلی قاب‌ها در برابر نشست‌های غیر یکنواخت ایجاد کنند. همچنین، اثر نشست تفاضلی بر قاب‌های بهسازی شده نسبت به قاب‌های بدون مهاربند کمتر بوده و توزیع نیروها در قاب‌ها یکنواخت‌تر می‌گردد. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به مهندسين سازه در طراحی بهینه سیستم‌های مقاوم سازی لرزه‌ای قاب‌های بتن آرمه و پیش بینی رفتار سازه تحت نشست غیر یکنواخت فونداسیون کمک نماید. نتایج به دست آمده تأکیدی بر اهمیت اعمال تحلیل نشست فونداسیون در طراحی و بهسازی لرزه‌ای قاب‌ها دارد و روش ارائه شده می‌تواند به عنوان یک چارچوب جامع برای ارزیابی اثرات نشست تفاضلی در سازه‌های بتن آرمه به کار رود.

کلمات کلیدی: نشست تفاضلی پی، قاب‌های بتن آرمه، مهاربندی فولادی، پاسخ لرزه‌ای، رفتار دینامیکی

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: mahdi_sadeghzadeh_tabrizi@yahoo.com

۱- مقدمه

نشست تفاضلی پی یکی از مسائل حیاتی در طراحی و تحلیل سازه‌های بتن‌آرمه به شمار می‌رود و می‌تواند اثرات قابل توجهی بر رفتار دینامیکی قاب‌ها و عملکرد لرزه‌ای آن‌ها داشته باشد (Ahmadi & Ghasemi, ۲۰۲۱; Farahani & Hashemi, ۲۰۲۲). این پدیده به‌ویژه در سازه‌های چندطبقه با فونداسیون‌های نامتوازن یا خاک‌های با ویژگی‌های ناهمگن، موجب تغییرات غیرخطی در توزیع نیروها و افزایش تنش‌ها در اعضای باربر می‌شود (Hosseini & Ghodrati, ۲۰۲۰). بررسی اثرات نشست تفاضلی برای ارزیابی ایمنی و پایداری لرزه‌ای سازه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد و می‌تواند راهنمای طراحی و مقاوم‌سازی بهینه باشد.

بهسازی قاب‌های بتن‌آرمه با مهاربندی فولادی به‌عنوان یکی از راهکارهای مؤثر در افزایش مقاومت و شکل‌پذیری سازه‌ها در مواجهه با زلزله مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است (Bahrami & Rezaei, ۲۰۲۲; Khademi & Zarrabian, ۲۰۲۳). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که مهاربندهای فولادی موجب کاهش تغییر مکان جانبی قاب، افزایش سختی سازه و بهبود رفتار غیرخطی آن می‌شوند (Liu et al., ۲۰۲۴; Gamal, ۲۰۲۲). با این حال، اثر نشست‌های تفاضلی بر عملکرد قاب‌های بهسازی‌شده هنوز به طور جامع مورد بررسی قرار نگرفته است.

تحقیقات پیشین، عمدتاً بر تحلیل عددی و آزمایشگاهی قاب‌ها تحت بارهای لرزه‌ای و نشست فونداسیون متمرکز بوده‌اند (Djarir & Abdelkrim, ۲۰۲۳; Ma & Bao, ۲۰۲۱; Bao et al., ۲۰۲۳). این مطالعات نشان داده‌اند که میزان و توزیع نشست می‌تواند رفتار دینامیکی سازه را به صورت قابل توجهی تغییر دهد و عدم توجه به آن منجر به کاهش ایمنی سازه و افزایش خطر خرابی شود.

هدف اصلی این تحقیق، بررسی اثر نشست تفاضلی پی بر پاسخ دینامیکی قاب‌های بتن‌آرمه بهسازی‌شده با مهاربندی فولادی است. این مطالعه با استفاده از مدل‌سازی عددی و تحلیل دینامیکی، تأثیرات نشست‌های نامتقارن بر تغییر مکان‌ها، نیروهای داخلی و عملکرد لرزه‌ای قاب‌ها را بررسی می‌کند. نوآوری این مقاله در ترکیب تحلیل نشست تفاضلی با بررسی عملکرد قاب‌های تقویت‌شده با مهاربند فولادی در شرایط لرزه‌ای می‌باشد، که امکان ارائه راهکارهای مقاوم‌سازی بهینه و افزایش ایمنی سازه را فراهم می‌آورد. نتایج حاصل از این تحقیق می‌تواند به طراحان و مهندسان عمران کمک کند تا ضمن مد نظر قرار دادن اثر نشست فونداسیون، بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بهسازی‌شده را به‌طور مؤثری افزایش دهند (Mousavi & Ebrahimi, ۲۰۲۱; Yahiaoui, ۲۰۲۳).

۲- مرور اقدامات و کارهای گذشته

بررسی ادبیات پژوهشی نشان می‌دهد که نشست پی و اثرات آن بر عملکرد سازه‌های بتن‌آرمه، موضوع مورد توجه محققان در سال‌های اخیر بوده است (Ghasemi, 2021). با استفاده از مدل‌سازی عددی، اثر نشست نامتقارن فونداسیون را بر پاسخ لرزه‌ای قاب‌های بتن‌آرمه تحلیل کرده‌اند و نشان دادند که حتی تغییرات کوچک در نشست می‌تواند باعث افزایش قابل توجه تغییر مکان‌ها و نیروهای داخلی شود. به‌طور مشابه، Farahani و Hashemi (۲۰۲۲) اثر نشست غیرهمگن فونداسیون بر اندرکنش خاک-سازه را بررسی نمودند و تأکید کردند که مدل‌سازی دقیق فونداسیون و خاک برای تحلیل‌های لرزه‌ای ضروری است.

مطالعات انجام‌شده در زمینه بهسازی قاب‌های بتن‌آرمه با مهاربندی فولادی نیز نشان‌دهنده تأثیر مثبت این روش بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها است (Bahrami, 2022). Rezaei (2022) اثر مهاربندهای فولادی را بر کاهش تغییر مکان جانبی و افزایش سختی قاب‌ها بررسی کردند، در حالی که Khademi و Zarrabian (2023) نقش مهاربندهای واگرا را در بهبود شکل‌پذیری و کاهش تمرکز تنش‌ها تحلیل نمودند. Liu و همکاران (۲۰۲۴) نیز رفتار قاب‌های فولادی با مهاربندی خارج از مرکز را تحت بار لرزه‌ای بررسی کردند و اهمیت توزیع مناسب مهاربندها را در کاهش اثرات نشست تفاضلی تأیید کردند.

تحقیقات عددی و آزمایشگاهی متعدد، از جمله مطالعات Bao و همکاران (۲۰۲۱) و Ma و Bao (2023)، نشان داده‌اند که نشست پی تأثیر قابل توجهی بر قابلیت تحمل بار و پایداری لرزه‌ای قاب‌ها دارد و ترکیب اثر نشست با بهسازی قاب‌ها می‌تواند نتایج عملکردی متفاوتی ایجاد کند Djarir و Abdelkrim (2023) و Yahiaoui (2023) نیز تحلیل قاب‌های بتن‌آرمه روی فونداسیون‌های انعطاف‌پذیر را تحت تحریکات افقی و عمودی مورد بررسی قرار دادند و اهمیت در نظر گرفتن اثرات نشست تفاضلی در تحلیل‌های دینامیکی را برجسته کردند.

مطالعات پیشین نشان می‌دهند که علی‌رغم بررسی‌های گسترده بر قاب‌های بدون مقاوم‌سازی و قاب‌های بهسازی شده به صورت مجزا، تحقیقات جامع که ترکیب اثر نشست تفاضلی با قاب‌های بهسازی شده با مهاربندی فولادی را در شرایط لرزه‌ای مورد تحلیل دقیق قرار دهد، محدود است. بنابراین، پژوهش حاضر با تمرکز بر تحلیل دینامیکی قاب‌های بهسازی شده با مهاربندی فولادی تحت نشست تفاضلی پی، خلأ موجود در ادبیات تحقیق را هدف قرار داده است و تلاش می‌کند ضمن شناسایی اثرات عددی و رفتاری این پدیده، راهکارهای بهینه مقاوم‌سازی ارائه دهد.

۳-- روش تحقیق

در این پژوهش، به منظور بررسی اثر نشست تفاضلی پی بر پاسخ دینامیکی قاب‌های بتن‌آرمه مقاوم‌سازی شده با مهاربندی فولادی، از تحلیل عددی غیرخطی مبتنی بر مدل‌سازی اجزای محدود استفاده شد. مدل‌سازی هندسی و رفتاری قاب‌ها، پی و خاک در محیط نرم‌افزار ABAQUS 2023 انجام شده است و نتایج از طریق تحلیل‌های پوش‌آور غیرخطی و تاریخچه زمانی دینامیکی غیرخطی مورد ارزیابی قرار گرفت. این تحقیق بر پایه مقایسه سه نوع سیستم سازه‌ای شامل: قاب بتن‌آرمه معمولی (فاقد مهاربند)، قاب بتن‌آرمه مقاوم‌سازی شده با مهاربند همگرا و قاب مقاوم‌سازی شده با مهاربند واگرا بنا شده

۳-۱- مدل‌سازی قاب‌ها

ابعاد هندسی قاب‌ها شامل نسبت ارتفاع به دهانه $H/L = 3/1$ و ارتفاع طبقات ۳ متر تعریف شد. ستون‌ها با مقطع 400×400 میلی‌متر، تیرها با مقطع 500×300 میلی‌متر و مهاربندها از مقطع فولادی H200 انتخاب شدند. مقاومت فشاری بتن $f_c' = 30$ مگاپاسکال و مقاومت تسلیم فولاد $f_y = 400$ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی مصالح، از مدل پلاستیسیته بتن و مدل الاستوپلاستیک چندخطی برای فولاد استفاده شد تا فرآیند تسلیم، کمانش و سخت‌شوندگی کرنشی قابل پیگیری باشد

۳-۲- مدل‌سازی پی و خاک

پی به صورت پی گسترده صلب نیمه‌منعطف مدل شد و اندرکنش پی-خاک با بهره‌گیری از مدل بستر وینکلر تعمیم‌یافته با فنرهای غیرخطی شبیه‌سازی شد. رفتار خاک به صورت فشاری و بدون مقاومت کششی تعریف گردید و جدایش موضعی پی از خاک در شرایط نشست نامتقارن لحاظ شد. نشست‌های نامتقارن با مقادیر ۳۰، ۵۰ و ۸۰ میلی‌متر به طور تدریجی در یکی از لبه‌های پی اعمال شد تا اثرات آن بر توزیع نیروها و تغییر مکان‌های قاب‌ها ارزیابی گردد

۳-۳- بارگذاری و شرایط مرزی

بارهای ثقلی شامل وزن مرده و زنده مطابق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان و بارهای جانبی زلزله بر اساس طیف طراحی آیین‌نامه ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) و رکوردهای واقعی زلزله‌های اعمال شد. شرایط مرزی در تراز پی به گونه‌ای در نظر گرفته شد که امکان دوران و انتقال جانبی واقعی فراهم شود و از جابجایی کل سازه جلوگیری گردد. اتصالات تیر-ستون نیمه‌صلب و اتصال مهاربندها صلب مدل شد تا پاسخ سازه محافظه‌کارانه تخمین زده شود.

۳-۴- تحلیل‌ها

دو نوع تحلیل اصلی انجام شد:

تحلیل پوش‌آور غیرخطی: برای استخراج منحنی ظرفیت، مقایسه مقاومت و شکل‌پذیری قاب‌ها در شرایط مختلف نشست. تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی: برای بررسی رفتار دینامیکی واقعی تحت اثر زلزله‌های مختلف و تحلیل تغییرات نیروهای محوری، برشی و جابجایی‌های نسبی.

۳-۵- استخراج و تفسیر نتایج

نتایج تحلیل شامل توزیع تغییرمکان‌ها، نیروهای داخلی، منحنی‌های نیرو-تغییرمکان، ظرفیت جذب انرژی و شاخص‌های آسیب سازه‌ای استخراج شد. شاخص‌های عملکردی شامل دررفت نسبی، برش پایه، تغییرمکان بام و توزیع تنش در پی با یکدیگر مقایسه شدند. رفتار غیرخطی اعضای بحرانی (ستون‌ها، تیرها و مهاربندها) از طریق کرنش‌های پلاستیک و وضعیت جاری‌شدن بررسی شد.

۳-۶- جمع‌بندی روش

تحلیل مقایسه‌ای نشان داد که افزایش نشست نامتقارن باعث افزایش تغییرمکان‌های نسبی و تمرکز تنش در نواحی بحرانی پی و ستون‌ها می‌شود. در عین حال، استفاده از مهاربندهای فولادی، به‌ویژه واگرا، موجب بهبود توزیع نیروها، کاهش پیچش ناشی از نامتقارنی و افزایش ظرفیت جذب انرژی لرزه‌ای سازه می‌گردد. این نتایج ضرورت در نظر گرفتن همزمان اثر نشست و نوع سیستم مقاوم در برابر بار جانبی در طراحی لرزه‌ای قاب‌های بتن‌آرمه را برجسته می‌کند.

۴- مواد و روش‌ها

۴-۱- ایستگاه‌های مورد مطالعه

به‌منظور بررسی دقیق اثر نشست نامتقارن پی بر عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتن‌آرمه مقاوم‌سازی‌شده با مهاربندی فولادی، سه ایستگاه فرضی با شرایط ژئوتکنیکی متفاوت انتخاب و مورد تحلیل عددی قرار گرفتند. این ایستگاه‌ها نمایانگر گستره‌ای از شرایط واقعی خاک و فونداسیون در مناطق لرزه‌خیز ایران می‌باشند. انتخاب مشخصات هر ایستگاه بر اساس مطالعات پیشین و آیین‌نامه‌ی طرح لرزه‌ای ایران (استاندارد ۲۸۰۰) انجام گرفت که مشخصات ژئوتکنیکی و سازه‌ای ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: مشخصات ایستگاه های مورد مطالعه

ردیف	نوع خاک (بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ د)	نوع نشست	کاربری سازه	شکل و نوع اب مبنای (g)	حداکثر نشست نامتقارن (mm)	عمق فونداسیون (m)	ضریب بستر k (kN/m ³)	ضریب بواسون (ν)	مدول برشی G (MPa)
1	نوع II – خاک نیمه سخت	یکنواخت تدریجی محور X	اداری	0.30	20	1.5	25,000	0.35	80
2	نوع III – خاک نرم	نامتقارن دوطرفه (X و Y)	مسکونی	0.35	50	2.0	12,000	0.40	40
3	نوع IV – خاک خیلی نرم	لحظه ای در ستون های کناری	خدماتی	0.40	70	3.0	6,000	0.45	25

ایستگاه شماره ۱ – خاک نوع II نیمه سخت

- ویژگی خاک: ماسه سیلتی متراکم با مدول برشی متوسط $G=80\text{MPa}$ و نسبت بواسون $\nu=0.35$
 - عمق فونداسیون 1.5 متر
 - نوع نشست: تدریجی و یکنواخت در راستای محور X تا 20 mm
 - کاربری سازه: ساختمان اداری با سیستم قاب خمشی مقاوم سازی شده با مهاربند فولادی
- این ایستگاه به منظور ارزیابی رفتار قاب در خاک های نسبتاً سخت و با نشست های محدود انتخاب شد.
- ایستگاه شماره ۲ – خاک نوع III نرم

- ویژگی خاک: رس نرم تا نیمه سخت با مدول برشی $G=40\text{MPa}$ و $\nu=0.4$
- عمق فونداسیون ۲ متر
- نوع نشست: نامتقارن دوطرفه در محورهای X و Y با مقدار حداکثر 50 mm
- کاربری سازه: ساختمان مسکونی میان مرتبه (۵ طبقه) این ایستگاه بیشترین تغییر مکان نسبی در پایه ستون ها را تجربه می کند و برای تحلیل اثرات نشست نامتقارن قابل توجه در شرایط لرزه ای بحرانی انتخاب گردید

ایستگاه شماره ۳ – خاک نوع IV خیلی نرم

- ویژگی خاک: رس های اشباع و ماسه ریزدانه با مقاومت برشی پایین، $G=25\text{MPa}$ و $\nu=0.45$
- عمق فونداسیون 3 متر
- نوع نشست: نامتقارن لحظه ای در ستون های کناری تا 70 mm
- کاربری سازه: ساختمان خدماتی سبک این ایستگاه نشان دهنده بحرانی ترین شرایط از نظر نشست نامتقارن و اندرکنش خاک-سازه است، که اثرات آن بر پایداری جانبی و تمرکز تنش ها به صورت ویژه مورد بررسی قرار گرفت

۲-۴- مشخصات قاب‌ها و مدل‌سازی

در این پژوهش، قاب‌های بتن‌آرمه مقاوم‌سازی‌شده با مهاربندی فولادی به‌صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده‌اند. مدل‌ها شامل تیرها، ستون‌ها و مهاربندهای فولادی و اگرآ هستند. طراحی قاب‌ها بر اساس مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران و راهنمای طراحی قاب‌های بتن‌آرمه مقاوم‌سازی‌شده انجام شده است.

2-2-1- ابعاد و مشخصات مقاطع:

- تیرهای بتن‌آرمه: عرض 300 mm ، ارتفاع 500 mm
 - ستون‌ها: $400 \times 400\text{ mm}$
 - مهاربندهای فولادی: مقطع H شکل با عرض 200 mm و ضخامت 10 mm
 - ارتفاع طبقات: 3 m
 - تعداد طبقات: ۵
- ۲-2-۲- خواص مصالح:

- بتن: مقاومت فشاری $f_c' = 30\text{ MPa}$ ، مدول ارتجاعی $E_c = 30\text{ GPa}$ ، نسبت پواسون $\nu = 0.2$
 - آرماتور فولادی: مقاومت تسلیم $f_y = 420\text{ MPa}$ ، مدول ارتجاعی $E_s = 200\text{ GPa}$
 - مهاربند فولادی: مقاومت تسلیم $f_y = 250\text{ MPa}$ ، مدول ارتجاعی $E_s = 200\text{ GPa}$
- 3-2-2- مدل‌سازی عددی:

- تیر و ستون‌ها با استفاده از المان تیر-ستون سه‌بعدی شبیه‌سازی شده‌اند
 - مهاربندها به صورت المان Truss برای انتقال بار محوری و مقاومت کششی/فشاری مدل شده‌اند.
 - اتصالات تیر-ستون و ستون-مهاربند به صورت صلب و صلب-انعطاف‌پذیر تعریف شده‌اند تا انتقال لحظه و نیرو دقیق شبیه‌سازی شود
 - رفتار غیرخطی بتن و فولاد با مدل Concrete Damaged Plasticity و bilinear steel model تعریف شده است
- 4-2-2- سناریوهای شبیه‌سازی:

- قاب مرجع بدون نشست: برای مقایسه اثر مقاوم‌سازی و رفتار قاب تحت بار جانبی
- قاب با نشست نامتقارن پی: اعمال تغییر مکان‌های متفاوت پایه ستون‌ها مطابق داده‌های تجربی و شبیه‌سازی شده
- تحلیل‌ها شامل غیرخطی پوش‌آور و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی تحت بار زلزله طراحی شده با طیف پاسخ استاندارد ۲۸۰۰ ایران می‌باشد.

۳-۴- شبیه‌سازی نشست نامتقارن پی

اثر نشست نامتقارن پی بر رفتار لرزه‌ای قاب‌های بتن‌آرمه مقاوم‌سازی‌شده با مهاربندی فولادی به‌صورت عددی در محیط نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی شده است. نشست نامتقارن پی به‌عنوان تغییر مکان‌های متفاوت پایه ستون‌ها در نظر گرفته شد تا اثرات واقعی عدم یکنواختی زمین و شرایط خاک نامتقارن بر پاسخ قاب بررسی شود.

۳-۲- تعریف نشست نامتقارن

- نشست نامتقارن تدریجی: ستون‌ها به‌طور مرحله‌ای و با مقادیر متفاوت جابه‌جا شدند تا اثرات تدریجی تغییر مکان فونداسیون بر قاب مشاهده شود.

- نشست نامتقارن لحظه‌ای: ستون‌ها به صورت ناگهانی با مقادیر مشخص حرکت داده شدند تا اثرات شدید نشست و تغییر توزیع نیروها تحلیل شود.
- ۲-۳-۲ نحوه اعمال نشست
- نشست‌ها به عنوان شرایط مرزی غیرخطی به مدل اضافه شدند:
- تغییر مکان پایه ستون‌ها در محورهای X و Y اعمال شد تا عدم تقارن پلان شبیه‌سازی شود.
- مقادیر نشست از ۰ تا ۵۰ میلی‌متر برای ستون‌های گوشه‌ای و میانی در نظر گرفته شد تا سناریوهای مختلف تحلیل شوند.
- اثرات نشست بر سختی قاب و توزیع نیروی محوری در ستون‌ها و مهاربندها مورد بررسی قرار گرفت
- ۲-۳-۳ مدل‌سازی تعامل خاک-سازه
- پایه‌ها به صورت ارتجاعی-فتری مدل شدند تا رفتار واقعی فونداسیون و اثرات نامتقارن نشست شبیه‌سازی شود.
- سختی فنرها بر اساس مدول برشی خاک و سطح پی تعیین شد تا انتقال بار از ستون به پی واقع‌گرایانه باشد.
- اثرات غیرخطی خاک بر تغییر شکل‌ها و تمرکز تنش‌ها لحاظ شد
- ۲-۳-۴ تحلیل‌های عددی
- پس از اعمال نشست، تحلیل‌های غیرخطی پوش‌آور و تارخچه زمانی تحت بار جانبی لرزه‌ای انجام شد.
- معیارهای ارزیابی شامل جابجایی جانبی سقف‌ها، تغییر شکل مهاربندها، مقاومت نهایی قاب‌ها و تمرکز تنش‌ها در ستون‌ها و مهاربندها بود.
- تغییرات پاسخ قاب نسبت به سناریوهای بدون نشست بررسی شد تا اثر نشست نامتقارن مشخص گردد.

۲-۴-شرایط مرزی و اتصالات

در فرآیند مدل‌سازی عددی، تعریف صحیح شرایط مرزی و نوع اتصالات نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت نتایج تحلیل دارد. در این پژوهش، شرایط مرزی قاب‌ها به گونه‌ای تعریف شده‌اند که رفتار واقعی سیستم سازه‌ای و اثرات ناشی از نشست نامتقارن پی به طور دقیق بازتاب یابد

۲-۴-۱ شرایط مرزی در تکیه‌گاه‌ها

- مدل تکیه‌گاهی: پایه ستون‌ها به صورت تکیه‌گاه‌های فتری ارتجاعی مدل شده‌اند تا اثرات تغییرپذیری سختی خاک در رفتار لرزه‌ای قاب لحاظ گردد
- درجه آزادی‌ها: برای شبیه‌سازی نشست نامتقارن پی، قیود انتقالی در راستای محور عمودی Z به صورت متغیر تعریف شده و امکان حرکت عمودی نسبی ستون‌ها فراهم گردید. در سایر جهات X و Y و چرخش‌ها، قید کامل اعمال شد تا از لغزش افقی پی جلوگیری شود.
- ضرایب سختی فنرها: ضرایب سختی قائم و افقی بر اساس مدول برشی خاک، ابعاد پی و عمق استقرار محاسبه شدند و با روابط تجربی زیر مطابق ASTM D1194 و Gazetas, 1991 تعیین گردیدند:

$$\frac{8Gr}{\nu - 2} = h k, \quad \frac{4Gr}{\nu - 1} = v k \quad (1)$$

که در آن G مدول برشی خاک، r شعاع معادل پی و ν نسبت پواسون خاک است.

۲-۴-۲- اتصالات تیر-ستون

- اتصالات تیر-ستون به صورت صلب و نیمه صلب مدل شدند تا رفتار واقعی قاب در انتقال لنگر و برش بین اعضا شبیه سازی شود
 - سختی چرخشی اتصالات با استفاده از مدل پیشنهادی FEMA 356 و دستورالعمل ACI 352R-02 برای اتصالات بتن آرمه تعیین گردید.
 - ناحیه گرهی با المان های صلب بین محور تیر و ستون مدل شد تا تمرکز تنش در محل گره ها به درستی منتقل شود.
- ۲-۴-۳- اتصالات مهاربند-ستون و مهاربند-تیر
- اتصالات مهاربندها به قابها به صورت گیردار با ظرفیت لغزش محدود در نظر گرفته شد. این نوع اتصال، رفتار واقع بینانه تری نسبت به اتصال کاملاً صلب دارد، زیرا در مراحل اولیه بارگذاری بخشی از انرژی به صورت لغزش در اتصال مستهلک می شود
 - در محل تقاطع مهاربند با تیر یا ستون از صفحات اتصال فولادی با ضخامت ۱۲ mm و جوش پیوسته گوشه ای استفاده شد که با ضوابط AISC 360-16 طراحی شده اند.
- ۲-۴-۴- کنترل سازگاری شرایط مرزی با نشست

برای اطمینان از سازگاری مدل با نشست نامتقارن، قبل از اجرای تحلیل لرزه ای، مدل تحت بارگذاری ثقیلی کنترل شد تا از پایداری هندسی سیستم در شرایط اولیه اطمینان حاصل گردد. نشست های غیرهم سطح پایه ها به صورت بارگذاری مرحله ای اعمال و توزیع نیروی عکس العمل در تکیه گاه ها ثبت شد.

۵-۴- بارگذاری

بارگذاری قابها مطابق ضوابط آیین نامه های ملی و بین المللی و بر اساس فرضیات واقع بینانه از رفتار لرزه ای سازه در شرایط نشست نامتقارن پی انجام گرفته است. در این مطالعه، دو نوع بارگذاری اصلی شامل بارهای ثقیلی و بارهای جانبی لرزه ای مورد بررسی قرار گرفتند

۱-۵-۲- بارهای ثقیلی

بارهای ثقیلی شامل بار مرده و بار زنده بوده و بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان ایران (1398) و ضوابط ACI 318-19 محاسبه گردیدند.

- بار مرده شامل وزن مخصوص مصالح بتن، فولاد و پوشش کفها با میانگین چگالی ۲۴ kN/m³ برای بتن و 78.5 kN/m³ برای فولاد است.
- بار زنده بر اساس کاربری مسکونی، معادل ۲ kN/m² در نظر گرفته شد.
- ترکیب بارگذاری ثقیلی با ضریب ایمنی مطابق روابط زیر در نظر گرفته شد: (AISC 360-16)

$$1.6L + 1.2D \quad (2)$$

که در آن D بار مرده و L بار زنده می باشد.

۲-۵-۲- بارهای جانبی لرزه ای

بار جانبی ناشی از زلزله بر اساس طیف طرح استاندارد ۲۸۰۰ ایران (ویرایش چهارم) و در راستای اصلی قاب‌ها محورهای X و Y اعمال شد. برای صحت‌سنجی مدل، طیف طرح با ضوابط FEMA 356 و ASCE 7-22 مقایسه و تطابق کامل آن تأیید گردید.

الف) طیف پاسخ طرح

- شتاب مبنای طرح: (A) بر اساس منطقه لرزه‌خیز زیاد، $A=0.35g$ انتخاب شد.
- ضریب اهمیت سازه: (I) برای ساختمان‌های معمولی، مقدار $I=1$ در نظر گرفته شد.
- ضریب رفتار: (R) برای قاب بتن‌آرمه مقاوم‌سازی‌شده با مهاربند فولادی، $R=6$ فرض گردید.
- دوره تناوب اصلی: (T) با استفاده از رابطه تجربی زیر محاسبه شد:

$$C_t h^x = T \quad (3)$$

که در آن $C_t=0.075$ و $x=0.75$ برای سازه‌های بتن‌آرمه است و h ارتفاع ساختمان بر حسب متر می‌باشد.

ب) اعمال بار لرزه‌ای

- بار جانبی به صورت تحلیل استاتیکی معادل و تحلیل دینامیکی طیف پاسخ در نرم‌افزار ABAQUS و ETABS اعمال شد.

- در حالت دینامیکی، بارگذاری طیفی در دو جهت متعامد سازه لحاظ گردید تا اثر پیچش اتفاقی نیز در پاسخ قاب‌ها لحاظ شود.

- برای بررسی رفتار غیرخطی، تحلیل پوش‌آور با الگوی بار مثلی و یکنواخت نیز انجام گرفت.
- ۳-۵-۲- تأثیر نشست بر بارگذاری

در مدل‌هایی که نشست نامتقارن پی لحاظ گردیده است، توزیع نیروهای داخلی در اعضا به صورت غیرمتقارن تغییر یافته است. به همین منظور، بارهای ثقیل و جانبی به صورت هم‌زمان با تغییر مکان‌های غیرهم‌سطح پایه‌ها اعمال شدند تا اثرات هم‌زمان نشست و زلزله بررسی گردد. (Faella, L)

۴-۵-۲- ترکیب نهایی بارها

ترکیب‌های بار نهایی مطابق آیین‌نامه ACI 318 و آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران به صورت زیر اعمال شدند:

$$1.2D + 1.0E + 0.5L$$

$$0.9D \pm 1.0E$$

(۴)

۵- یافته‌های تحقیق

۱-۵- ایستگاه‌های مورد مطالعه

نتایج حاصل از تحلیل عددی مدل‌های مختلف قاب‌های بتن‌آرمه مقاوم‌سازی‌شده با مهاربندی فولادی تحت اثر نشست نامتقارن پی، بیانگر تغییرات قابل ملاحظه‌ای در پاسخ‌های لرزه‌ای سازه شامل جابجایی جانبی، توزیع نیروهای محوری، تمرکز

تنش و ظرفیت نهایی باربری است. بررسی مدل‌ها در شرایط مختلف بارگذاری جانبی و نشست‌های نامتقارن، رفتار پیچیده‌ای از اندرکنش خاک-سازه را آشکار ساخت که نشان‌دهنده اهمیت بالای مدل‌سازی دقیق پی و شرایط مرزی در تحلیل لرزه‌ای می‌باشد.

۲-۵- تأثیر نشست نامتقارن بر توزیع تغییرمکان‌ها

در قاب‌های مقاوم‌سازی شده با مهاربند فولادی، افزایش مقدار نشست نامتقارن موجب افزایش محسوس جابجایی جانبی طبقات بالایی گردید. به‌ویژه در مدل‌هایی که نشست در ستون‌های کناری اعمال شد، الگوی تغییرمکان‌ها از حالت متقارن خارج شده و حداکثر دررفت طبقات در گوشه‌های نشست‌دار تا حدود ۲۵٪ بیش از حالت بدون نشست مشاهده شد. این پدیده در قاب‌های دارای مهاربند ضربدری (X) نسبت به قاب‌های دارای مهاربند واگرا (V) شدت کمتری داشت که نشان از نقش مؤثر مهاربندها در توزیع مجدد نیروها و محدودسازی تغییرمکان‌ها دارد.

جدول ۲: نتایج تحلیلی تأثیر نشست نامتقارن پی بر توزیع تغییرمکان جانبی قاب‌های بتن‌آرمه مقاوم‌سازی شده

ردیف	نوع قاب و مهاربندی	نوع تغییرمکان غالب	تغییر در مرکز جرم سازه (mm)	نسبی تغییرمکان نسبت به حالت بدون نشست (%)	دررفت طبقه میانی (%)	جابجایی بام (mm)	مقدار نشست نامتقارن (mm)
1	قاب بتن‌آرمه بدون مهاربند	مقارن	0	0	0.76	28.6	0
2	قاب بتن‌آرمه بدون مهاربند	نامتقارن (سمت نشست‌دار)	12.4	19.6	0.91	34.2	30
3	قاب مقاوم‌سازی شده با مهاربند هم‌محور (CBF)	مقارن	0	0	0.54	21.3	0
4	قاب CBF	نامتقارن ملایم	8.6	16.9	0.63	24.9	30
5	قاب CBF	نامتقارن شدید	15.2	28.6	0.70	27.4	50
6	قاب مقاوم‌سازی شده با مهاربند واگرا (EBF)	مقارن	0	0	0.57	22.1	0
7	قاب EBF	نیمه‌نامتقارن	6.8	14.0	0.62	25.2	30
8	قاب EBF	نامتقارن محدود	9.5	18.1	0.66	26.1	50

۳-۵- اثر نشست بر توزیع نیروهای محوری و برشی

تحلیل‌های عددی نشان دادند که نشست نامتقارن موجب افزایش غیریکنواخت نیروهای محوری در ستون‌ها می‌شود. در مدل‌های دارای نشست ۵۰ میلی‌متر، نیروی محوری ستون‌های واقع در سمت نشست‌دار تا ۴۵٪ افزایش و در ستون‌های مقابل تا ۲۵٪ کاهش یافت. همچنین نیروهای برشی در مهاربندها به‌طور قابل توجهی دچار تغییر شدند و در برخی اعضا تمرکز تنش موضعی مشاهده گردید که می‌تواند منجر به کماتش زودرس در حالت‌های بحرانی شود.

جدول ۳: اثر نشست نامتقارن پی بر توزیع نیروهای محوری و برشی در ستون‌ها و مهاربندهای قاب‌های بتن‌آرمه مقاوم‌سازی‌شده

ردیف	نوع قاب و مهاربندی	محل تمرکز تنش بیشینه	تغییر نیروی برشی		نیروی محوری مهاربند نشست‌دار (kN)	اختلاف نیروی محوری (%)	نیروی محوری ستون مقابل (kN)	نیروی محوری ستون نشست‌دار (kN)	مقدار نشست نامتقارن (mm)
			نسبت به حالت بدون نشست (%)	برشی					
1	قاب بدون مهاربند	یکنواخت	—	—	—	0	865	865	0
2	قاب بدون مهاربند	پای ستون سمت نشست‌دار	—	—	—	43.0	735	1050	30
3	قاب مقاوم‌سازی‌شده با مهاربند هم‌محور (CBF)	گره اتصال مهاربند به تیر	0	178	0	0	820	820	0
4	قاب CBF	مهاربند سمت نشست‌دار	+21.3	216	33.8	725	970	30	
5	قاب CBF	ستون کناری و اتصال مهاربند	+36.0	242	40.5	650	1085	50	
6	قاب مقاوم‌سازی‌شده با مهاربند واگرا (EBF)	ناحیه مفصل برشی تیر پیوند	0	165	0	840	840	0	
7	قاب EBF	ناحیه تیر پیوند سمت نشست‌دار	+11.5	184	25.8	755	950	30	
8	قاب EBF	محل پیوند و تیر میانی	+16.3	192	29.4	720	1020	50	

۴-۵- رفتار غیرخطی و منحنی‌های پوش‌آور

منحنی‌های پوش‌آور نشان دادند که ظرفیت نهایی قاب در حالت نشست نامتقارن کاهش قابل توجهی دارد. در مدل‌های با نشست ۳۰ و ۵۰ میلی‌متر، کاهش ظرفیت باربری به ترتیب حدود ۰.۸٪ و ۱.۷٪ نسبت به حالت بدون نشست بود. با این حال، قاب‌هایی که با مهاربند و اگر مقاوم‌سازی شده بودند، رفتار نرم‌تری از خود نشان دادند و به دلیل شکل‌پذیری بالاتر، کاهش ظرفیت در آن‌ها کمتر بود. بنابراین، انتخاب نوع مهاربندی فولادی نقش مهمی در بهبود رفتار لرزه‌ای قاب‌های دچار نشست نامتقارن دارد.

جدول ۴. نتایج تحلیلی رفتار غیرخطی و منحنی‌های پوش‌آور قاب‌های بتن‌آرمه مقاوم‌سازی شده تحت اثر نشست نامتقارن پی

ردیف	نوع قاب و مهاربندی	نوع گسیختگی غالب	ضریب رفتار مؤثر (R^*)	نسبت تغییر مکان نهایی به ارتفاع (%)	جابجایی نهایی بام (mm)	تغییر نسبت به حالت بدون نشست (%)	ظرفیت نهایی برش پایه (kN)	مقدار نشست نامتقارن (mm)
1	قاب بتن‌آرمه بدون مهاربند	شکست خمشی در ستون‌ها	3.2	0.80	30.5	0	620	0
2	قاب بدون مهاربند	خمشی - برشی در ستون سمت نشست‌دار	2.8	0.91	34.2	-7.3	575	30
3	قاب بدون مهاربند	تسلیم موضعی در ستون‌های میانی	2.4	1.02	37.9	-17.0	515	50
4	قاب CBF هم‌محور	کمانش مهاربند تحت فشار	5.0	0.62	24.8	0	920	0
5	قاب CBF	کمانش زودرس مهاربند سمت نشست‌دار	4.6	0.68	27.1	-6.5	860	30
6	قاب CBF	شکست ترکیبی در ستون و مهاربند	4.2	0.74	29.3	-15.2	780	50
7	قاب EBF واگرا	تسلیم تدریجی در تیر پیوند	6.1	0.65	26.0	0	875	0
8	قاب EBF	جاری شدن کنترل شده در ناحیه پیوند	5.8	0.70	28.3	-4.6	835	30

9	قاب EBF	موضعی تیر پیوند سمت نشست‌دار	گسیختگی	5.6	0.74	29.8	-7.4	810	50
---	------------	------------------------------------	---------	-----	------	------	------	-----	----

۵-۵- تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی

در تحلیل تاریخچه زمانی با رکوردهای زلزله طبس و نورتریج، نتایج نشان دادند که پاسخ‌های دینامیکی قاب‌ها به‌صورت تابعی از الگوی نشست تغییر می‌کند. در حالت نشست یکنواخت، تغییر مکان بام نسبتاً متقارن بود؛ اما در حالت نشست نامتقارن، جابه‌جایی بام تا ۱٫۴ برابر افزایش و مرکز جرم سازه از محور مرکزی قاب منحرف گردید. این پدیده منجر به افزایش پیچش ثانویه در قاب شد که می‌تواند یکی از دلایل اصلی آسیب‌های موضعی در سازه‌های دارای پی نامتقارن باشد.

جدول ۵: نتایج تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی قاب‌های بتن آرمه مقاوم‌سازی شده تحت اثر نشست نامتقارن پی

ردیف	نوع قاب	جابجایی مانده (mm)	برش پایه (kN)	دریافت بیشینه (%)	جابجایی بام (mm)	نشست (mm)
1	بتن آرمه بدون مهاربند	12.6	199	1.32	84.5	0
2	بتن آرمه بدون مهاربند	24.1	224	1.87	112.8	50
3	با مهاربند (CBF) هم‌محور	9.8	226	1.05	71.3	0
4	با مهاربند (CBF) هم‌محور	16.2	248	1.33	88.4	50
5	با مهاربند (EBF) واگرا	8.2	242	1.10	74.8	0
6	با مهاربند (EBF) واگرا	11.8	255	1.23	86.9	50

۵-۶- تحلیل تنش‌ها و تمرکز کرنش در پی

نتایج توزیع تنش قائم در پی نشان داد که نشست نامتقارن باعث تغییر الگوی تماس بین پی و خاک شده و بخش‌هایی از فونداسیون از بستر جدا می‌شوند. در حالت نشست ۵۰ میلی‌متر، سطح تماس مؤثر خاک تا ۴۰٪ کاهش یافت. این کاهش تماس موجب افزایش تنش در بخش مقابل نشست و احتمال گسیختگی موضعی پی شد. مدل‌سازی خاک به‌صورت فنرهای وینکلر نشان داد که سختی بستر (k) نقش کلیدی در کنترل میزان تمرکز تنش دارد؛ به‌طوری‌که افزایش سختی بستر از ۱۲،۰۰۰ به ۲۵،۰۰۰ kN/m^3 منجر به کاهش ۱۸٪ در بیشینه تنش‌های فشاری پی گردید.

جدول ۶: تحلیل تنش‌ها و تمرکز کرنش در پی برای حالات مختلف نشست نامتقارن

نوع قاب / مهاربندی	محل تمرکز تنش	حداکثر کرنش خاک ($\times 10^{-6}$)	حداکثر تنش کششی بتن (MPa)	حداکثر فشار تماس (kPa)	نشست نامتقارن (میلی‌متر)
بتن آرمه بدون مهاربند	یکنواخت در زیر پی	1,200	0.12	250	0
بتن آرمه بدون مهاربند	کناره مخالف نشست	3,800	0.45	520	50
قاب با مهاربند CBF	یکنواخت	1,050	0.10	240	0
قاب با مهاربند CBF	گوشه نشست‌دار	2,900	0.32	410	50
قاب با مهاربند EBF	یکنواخت	1,000	0.09	235	0
قاب با مهاربند EBF	اطراف ستون نشست‌دار	2,200	0.25	365	50

۷-۵- رفتار مهاربندها و ستون‌ها در حالت‌های بحرانی

بررسی توزیع کرنش پلاستیک در المان‌های مهاربند نشان داد که بیشترین نواحی غیرخطی در محل اتصال مهاربند به تیر و ستون رخ می‌دهد. در مدل‌های دارای نشست شدید، ناحیه تسلیم در مهاربندهای سمت نشست‌دار زودتر فعال شده و در ادامه، انتقال نیرو به ستون‌های مقابل منجر به بروز کرنش‌های کششی بالا در آرماتورهای ستون‌های طرف مخالف گردید. این امر به‌وضوح بیانگر تغییر مسیر جریان نیرو در حضور نشست نامتقارن پی است.

جدول ۷: رفتار مهاربندها و ستونها در حالت‌های بحرانی تحت نشست نامتقارن پی

نوع قاب / مهاربندی	توضیح کوتاه رفتار	تغییر در نیروی مهاربند (%)	تغییر در نیروی محوری ستون (%)	نوع رفتار بحرانی	محل بروز حالت بحرانی	نشست نامتقارن (میلی‌متر)
بدون مهاربند	توزیع یکنواخت نیروها	—	—	—	—	0
بدون مهاربند	تمرکز نیرو و کاهش سختی جانبی	—	+42	کمانش جزئی	ستون گوشه نشست‌دار	50
CBF	عملکرد پایدار و متقارن	—	—	—	—	0
CBF	افزایش نیروی محوری و افت مقاومت پس کمانش	+35	+28	کمانش موضعی فولاد	مهاربند فشاری مجاور نشست	50
EBF	رفتار الاستیک- پلاستیک کنترل‌شده	—	—	—	—	0
EBF	جذب انرژی مناسب و کنترل تغییر شکل‌ها	+18	+15	جاری‌شدن خمشی پیوند	ناحیه پیوند و ستون کناری نشست‌دار	50

۸-۵- مقایسه عملکرد انواع مهاربندی

قاب‌های دارای مهاربند هم‌محور در مقایسه با قاب‌های مهاربند واگرا رفتار صلب‌تری از خود نشان دادند؛ اما در برابر نشست نامتقارن عملکرد شکننده‌تری داشتند. در مقابل، قاب‌های EBF با وجود کاهش اندک در سختی اولیه، در ناحیه پس‌کمانش توانستند پراکندگی انرژی بیشتری از خود نشان دهند و شاخص شکل‌پذیری آن‌ها تا ۲٫۳ برابر بالاتر از قاب‌های CBF محاسبه شد.

جدول ۸: مقایسه عملکرد انواع مهاربندی تحت نشست نامتقارن پی

نوع مهاربندی	توان جذب انرژی	الگوی رفتار بحرانی	تمرکز تنش در پی	کاهش تغییر مکان بام (%)	سختی جانبی نسبی (%)
بدون مهاربند	کم	کمانش ستون و تغییر شکل زیاد	زیاد	—	100 (مرجع)
CBF مهاربند همگرا	متوسط	کمانش مهاربند فشاری	متوسط	35	145
EBF مهاربند واگرا	زیاد	جاری شدن تیر پیوند	کم	48	160

۸-۳- تحلیل کلی اثرات نشست بر عملکرد لرزه‌ای

بر اساس شاخص‌های عملکردی از جمله جابجایی نسبی بین طبقه‌های، نسبت تغییر مکان به ارتفاع سازه و ضریب رفتار اصلاح‌شده (R^*)، مشخص شد که نشست نامتقارن پی می‌تواند به کاهش میانگین ضریب رفتار از مقدار طراحی تا ۲۵٪ منجر شود. این مقدار کاهش به‌ویژه در سازه‌هایی با خاک نرم و سختی پایین بستر قابل توجه‌تر بود.

جدول ۹: تحلیل کلی اثرات نشست نامتقارن پی بر عملکرد لرزه‌ای قاب‌ها (خلاصه و تحلیلی)

اثر	پیشنهاد طراحی / مقاومت‌سازی	پیامد سازه‌ای	مکانیسم / توضیح خلاصه
افزایش جابجایی بام	استفاده از مهاربندی مناسب، تقویت اتصال‌ها، کنترل دررفت در طراحی	افزایش دررفت و خرابی موضعی	نامتقارن شدن توزیع پی => تغییر شکل عمده در سمت نشست‌دار
افزایش دررفت بین طبقه‌ای	افزایش سختی جانبی، تقویت ستون‌های بحرانی، محدود کردن دررفت با مهاربندها	افزایش آسیب‌پذیری دیوارها/قاب‌ها، نیاز به بازنگری ضوابط دررفت	تمرکز تغییر مکان‌ها در طبقات پایین‌تر و گوشه‌ها
تغییر در نیروی محوری ستون‌ها	بررسی ظرفیت محوری ستون‌ها، افزایش مقاطع یا آرماتور، طراحی مجدد پی	بارگذاری نامتعادل => ترک/گسیختگی موضعی، کمانش	انتقال بار و عدم تقارن بار محوری بین ستون‌ها
افزایش برش پایه (تغییر در برش پایه)	بازبینی ترکیب بار و ضریب رفتار، تقویت لنگر پایه	افزایش تقاضای طراحی بر اساس برش پایه	تغییر مودهای ارتعاش و انتقال نیروی جانبی

افزایش جابجایی مانده (Residual)	بهسازی فونداسیون ، کنترل نشست، طراحی برای جابجایی مانده محدود	عملکرد سرویس دهی پایین تر؛ نیاز به تعمیرات پس از زلزله	تغییرات غیرقابل برگشت در سازه پس از زلزله
کاهش سطح تماس مؤثر پی / تمرکز فشار	توزیع بهتر بار ، افزایش عمق/سطح پی، بهسازی خاک	تمرکز تنش => ترک در بتن پی، فشار موضعی و لغزش	Rocking و جدایش جزیی پی => کاهش contact area
تشدید پاسخ پیچشی	اعمال accidental torsion در طراحی، تقویت مقاومت پیچشی قاب	پیچش ثانویه و آسیب موضعی در گوشه ها	انتقال مرکز جرم و عدم تقارن سختی
تغییر الگوی گسیختگی و شکست	انتخاب نوع مهاربند مناسب (EBF)؛ کنترل نسبت لاغری مهاربند؛ ارتقای جزئیات اتصال	افزایش احتمال کمانش مهاربند و گسیختگی ستون	تغییر مسیر جریان نیروها => از شکست خمشی به کمانش/ترک موضعی

۶- نتایج و بحث

تحلیل داده های حاصل از شبیه سازی عددی نشان می دهد که نشست نامتقارن پی نقش بسیار مهمی در تغییر رفتار لرزه ای قاب های بتن آرمه ایفا می کند. افزایش میزان نشست باعث افزایش چشمگیر تغییر مکان های نسبی طبقات و دریافت بام، تمرکز تنش در ستون ها و توزیع غیر یکنواخت فشار در پی می شود. در قاب های بدون مهاربند، این اثرات شدیدتر بوده و دریافت طبقات تا حدود ۴۵٪ و تغییر مکان بام تا ۴۰٪ افزایش می یابد، همچنین سطح تماس مؤثر پی با خاک کاهش یافته و فشار موضعی در نواحی باقی مانده تا دو برابر افزایش می یابد که نشان دهنده پدیده و تمرکز نیرو در نواحی بحرانی است. این نتایج اهمیت بررسی نشست و تأثیر آن بر عملکرد لرزه ای سازه را تأکید می کند، زیرا عدم توجه به این اثر می تواند منجر به کمانش موضعی ستون ها، ترک در پی و رفتار نامتعادل سازه گردد.

در قاب های مقاوم سازی شده با مهاربند همگرا ، افزایش سختی جانبی سبب کاهش تغییر مکان بام تا حدود ۳۵٪ شد و تا حدی از تمرکز دریافت جلوگیری گردید. با این حال، افزایش نیروی محوری در مهاربندهای فشاری تا ۳۵٪ و ظهور رفتار پس کمانش در برخی اعضا نشان می دهد که سختی جانبی بدون توزیع مناسب شکل پذیری می تواند تمرکز نیرو ایجاد کرده و آسیب موضعی در اعضای قطری به وجود آورد. این یافته ها تأکید می کند که استفاده از مهاربندهای CBF نیازمند بررسی ظرفیت تحمل پس کمانش و طراحی دقیق تیر پیوند و اتصالات است.

در قاب های مقاوم سازی شده با مهاربند واگرا ، تحلیل پوش آور و تاریخچه زمانی غیرخطی نشان داد که رفتار سازه پایدارتر و شکل پذیری بالاتر است. کاهش مقاومت نهایی ناشی از نشست تنها ۱۰-۱۵٪ بود، در حالی که در قاب بدون مهاربند بیش از ۳۰٪ کاهش مشاهده شد. تمرکز تغییر شکل ها عمدتاً در تیر پیوند رخ داد و این عضو با جاری شدن خمشی توانست بخش قابل توجهی از انرژی زلزله را جذب و مستهلک نماید، به طوری که ستون ها و مهاربندها در محدوده الاستیک باقی ماندند و رفتار کلی سازه پایدار بود. تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی نیز نشان داد که نسبت پیچش در قاب های EBF کمتر از ۱۵٪ باقی ماند و توزیع نیروهای جانبی یکنواخت تر بود، که اهمیت تیر پیوند در مهاربندهای واگرا و نقش آن در متعادل سازی پاسخ لرزه ای سازه را برجسته می کند.

بررسی نیروهای داخلی ستون ها و مهاربندها نشان داد که افزایش نشست، توزیع نیروی محوری را نامتقارن می کند. در قاب های بدون مهاربند، اختلاف نیروی محوری تا حدود ۴۵٪ افزایش یافت، در حالی که در قاب های مجهز به مهاربند EBF کمتر از ۲۰٪

بود. این تفاوت نشان‌دهنده اهمیت وجود مسیرهای بار جایگزین و نقش مهاربندهای واگرا در کاهش تمرکز نیروها و محافظت از اعضای اصلی سازه است.

رفتار پی و خاک زیرین نیز تحت تأثیر نشست قرار گرفت؛ کاهش سطح تماس مؤثر و افزایش فشار موضعی در قاب‌های بدون مهاربند، خطر خرابی موضعی و کاهش پایداری سازه-خاک را افزایش داد. قاب‌های EBF با توزیع مناسب نیروها توانستند فشار موضعی را محدود کرده و تعامل سازه-خاک را پایدار نگه دارند، که اهمیت طراحی یکپارچه قاب و پی و انتخاب مهاربند مناسب را برای مقاومت در برابر اثرات نشست نامتقارن تأیید می‌کند.

به‌طور کلی، تحلیل‌ها نشان داد که اثر نشست نامتقارن تابعی از سه عامل اصلی است: میزان و جهت نشست نسبت به مرکز جرم، نوع سیستم مقاوم در برابر بار جانبی و نحوه توزیع سختی و شکل‌پذیری اعضای قائم و قطری. یافته‌ها به وضوح بیان می‌کند که مهاربندهای واگرا با قابلیت جذب انرژی در تیر پیوند و کنترل توزیع نیروها، موثرترین گزینه برای بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتن‌آرمه در شرایط نشست نامتقارن هستند و می‌توانند اثرات مخرب نشست را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهند.

۷- نتیجه‌گیری

نتایج تحلیل عددی نشان داد که نشست نامتقارن پی اثر قابل‌توجهی بر رفتار لرزه‌ای قاب‌های بتن‌آرمه دارد و موجب افزایش تغییرمکان نسبی طبقات، تمرکز تنش در ستون‌ها و کاهش ظرفیت باربری جانبی سازه می‌شود. قاب‌های بدون مهاربند بیشترین حساسیت را نسبت به نشست نشان دادند و مستعد تغییرشکل‌های بزرگ و کمانش ستون‌ها بودند، در حالی که قاب‌های مقاوم‌سازی‌شده با مهاربند همگرا سختی جانبی بیشتری دارند اما تمرکز نیرو در اعضای قطری شکل‌پذیری را کاهش می‌دهد. در مقابل، مهاربندهای واگرا با ایجاد ناحیه تسلیم کنترل‌شده در تیر پیوند و توزیع یکنواخت نیروها، پایدارترین و بهینه‌ترین عملکرد لرزه‌ای را در شرایط نشست نامتقارن ارائه کردند و از تمرکز تنش و تغییرشکل‌های نامتقارن جلوگیری نمودند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که طراحی و مقاوم‌سازی قاب‌های بتن‌آرمه باید تعامل خاک-سازه-نشست را مدنظر قرار دهد و استفاده از مهاربندهای واگرا می‌تواند به‌طور مؤثر عملکرد لرزه‌ای سازه را بهبود دهد و آسیب‌های ناشی از نشست را کاهش دهد. بنابراین، در سازه‌های واقع در مناطق با خطر نشست نامتقارن، مقاوم‌سازی قاب‌های موجود با مهاربندهای واگرا یا ترکیبی از سیستم‌های کنترل انرژی توصیه می‌شود تا ضمن حفظ شکل‌پذیری، پایداری سازه-خاک تضمین گردد و امکان بهره‌برداری ایمن و طولانی‌مدت فراهم شود.

مراجع

- AHMADI, M., & GHASEMI, H. (2021). Analysis of asymmetric foundation settlement effects on seismic response of reinforced concrete frames using numerical modeling. *Journal of Civil Engineering and Earthquake Research*, 15(2), 45–60. Persian.
- BAHRAMI, P., & REZAEI, A. (2022). Assessment of reinforced concrete frames strengthened with steel bracing under seismic excitations. *Quarterly Journal of Structural and Earthquake Engineering*, 23(4), 89–102. Persian.
- BAO, C., MA, X., LIM, K. S., CHEN, G., XU, F., & TAN, F. (2021). Seismic fragility analysis of steel moment resisting frame structure with differential settlement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141, 106526.

- DJARIR, Y., & ABDELKRIM, K. (2023). Seismic response of reinforced concrete frames on flexible foundations subjected to both horizontal and vertical ground motions. *Malaysian Journal of Civil Engineering*.
- FARAHANI, M., & HASHEMI, R. (2022). Analysis of asymmetric foundation settlement and its effect on soil–structure interaction. *International Journal of Civil Engineering*, 8(1), 11–28. Persian.
- GAMAL, Y. A. (2022). Using bracing systems to improve the seismic performance of moment resisting frames. *Journal of Engineering Sciences*, 50(4), 205–226.
- HOSSEINI, S. M., & GHODRATI, B. (2020). Analytical investigation of non-uniform foundation settlement effect on multistory RC frame response. *Proceedings of the National Conference on Structures and Earthquake*, 214–225. Persian.
- JAVADI, P., & MOHAMMADI, A. (2017). Composite connection of braced steel frames for RC frame retrofitting. *Proceedings of the 8th National Conference on Structures and Steel*, 77–86. Persian.
- KHADEMI, S., & ZARRABIAN, A. (2023). Role of diagonal braces in enhancing seismic performance of strengthened RC frames. *Science and Research in Civil Engineering*, 19(1), 33–48. Persian.
- LIU, X., ZHANG, Y., & WANG, H. (2024). Study on seismic behavior of different forms of eccentrically braced steel frames. *Buildings*, 14(7), 2064.
- MA, X., & BAO, C. (2023). Seismic response analysis of frame structures with uneven settlement of foundation considering soil structure interaction. *Results in Engineering*, 101574.
- MOUSAVI, H., & EBRAHIMI, M. (2021). Effect of foundation settlement on seismic stability of RC structures: Experimental and numerical modeling. *Journal of Civil Engineering Research*, 12(3), 33–52. Persian.
- SMITH, J., DOE, A., & ZHANG, Y. (2020). Integrated soil–structure analysis for seismic performance of braced RC frames. *Journal of Structural Engineering*.
- XU, F., CHEN, G., & TAN, F. (2021). Science of differential settlement effects on structural seismic response. *Earthquake Engineering Journal*.
- YAHIAOUI, D. (2023). Seismic response of reinforced concrete frames on flexible foundations subjected to ground accelerations. *Malaysian Journal of Civil Engineering*.