



University Of Qom



## Evaluation of the Ductility of Steel Buildings under Non-uniform Settlement

Mojtaba Amirabadi<sup>1</sup>, Hamid Bayesteh<sup>2</sup> , Reza Rasti Ardakani<sup>3</sup>

1. Department of Civil, Water & Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: [mojtaba.amirabadi.1376@gmail.com](mailto:mojtaba.amirabadi.1376@gmail.com)
2. Corresponding author, Department of Civil, Water & Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: [h\\_bayesteh@sbu.ac.ir](mailto:h_bayesteh@sbu.ac.ir)
3. Department of Civil, Water & Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: [r\\_rasti@sbu.ac.ir](mailto:r_rasti@sbu.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**  
Received 30 Jun 2024  
Revised 14 Sep 2024  
Accepted 04 Oct 2024  
Published 17 Oct 2024

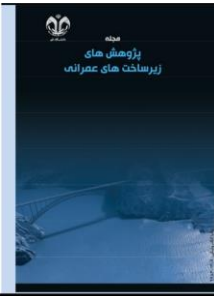
**Keywords:**  
Steel Frame,  
Non-uniform Settlement,  
Seismic Evaluation,  
Nonlinear Analysis.

### ABSTRACT

*Non-uniform settlements beyond allowable limits in structures, is one of the common items that reduces the seismic ductility of the structure. The aim of this study is to investigate the seismic performance of structures under non-uniform settlement and its effect on ductility of the structure. In this research, six models of steel moment frames with different heights and spans are considered. They have evaluated under seismic condition after applying non-uniform settlements in three cases of single column settlement, double column settlement, and real profile of settlement. The results show that non-uniform settlement reduces the ductility of the structure, however it has no effect on ultimate capacity beyond target displacement. Also, considering both direction of seismic motion, the stiffness of the structure can be reduced in one direction and the structure will become unsymmetric. This is more sensitive to number of stories and spans. Additionally, investigations indicate that the condition of the plastic hinges in the structure becomes generally more critical in the presence of settlement. The condition of the plastic hinges in single and double column settlement scenarios are more critical than the real settlement profile, which is attributed to the presence of rigid body rotation of the structure. Furthermore, the results show that in buildings under settlement, the response of the structure to the pushover analysis is completely different in forward and backward directions.*

**Cite this article:** Amirabadi M, Bayesteh H, Rasti Ardakani R. Evaluation of the Ductility of Steel Buildings under Non-uniform Settlement. Civil Infrastructure Researches. 2024; 10(2): 99-118. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.10947.1562>





## ارزیابی ظرفیت شکل‌پذیری ساختمان فولادی تحت نشست غیریکنواخت

مجتبی امیرآبادی<sup>۱</sup>، حمید بایسته<sup>۲</sup>، رضا راستی اردکانی<sup>۳</sup>

۱. دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: [mojtaba.amirabadi.1376@gmail.com](mailto:mojtaba.amirabadi.1376@gmail.com)

۲. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: [h\\_bayesteh@sbu.ac.ir](mailto:h_bayesteh@sbu.ac.ir)

۳. دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: [r\\_rasti@sbu.ac.ir](mailto:r_rasti@sbu.ac.ir)

### چکیده

نشست فراتر از حد مجاز در سازه‌ها، تحت اثر عوامل مختلف، یکی از مهمترین مواردی است که ظرفیت شکل‌پذیری سازه‌ها را تغییر می‌دهد. هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها تحت شرایط مختلف نشست غیریکنواخت و بررسی میزان اثرگذاری نشست بر شکل‌پذیری سازه می‌باشد. در این تحقیق، شش قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط با ارتفاع و دهانه‌های متفاوت طراحی شده و بعد از اعمال نشست‌های غیریکنواخت در سه حالت کلی نشست تک ستون، نشست دو ستون و پروفیل واقعی نشست، رفتار لرزه‌ای آنها با تحلیل غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که نشست غیریکنواخت ظرفیت شکل‌پذیری سازه را کاهش می‌دهد، اما ظرفیت نهایی سازه را تغییر نمی‌دهد. همچنین نشست غیریکنواخت، ممکن است با در نظرگیری اثر رفت‌وبرگشتی زلزله، در یک جهت باعث کاهش سختی سازه شود که با آنالیز حساسیت طبقات و دهانه‌ها، مشاهده شد که این اثر با کاهش تعداد دهانه و افزایش تعداد طبقات در سازه‌ها بیشتر می‌شود. بررسی‌های دیگر نشان می‌دهد که وضعیت مفاصل پلاستیک سازه به صورت کلی در حضور نشست بحرانی‌تر می‌شود که شرایط در قسمت‌های میانی سازه بدتر است. وضعیت مفاصل پلاستیک سازه تحت بارهای ثقلی و بارهای نشست در حالت‌های نشست یک و دو ستون، بحرانی‌تر از پروفیل واقعی نشست مورد مطالعه می‌شود که علت آن به وجود چرخش صلب سازه ارتباط داده می‌شود. همچنین نتایج نشان می‌دهد که در ساختمان‌های دارای نشست، پاسخ سازه به تحلیل پوش‌آور در راستای رفت‌وبرگشت می‌تواند کاملاً متفاوت است.

### اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۷/۲۶

### کلیدواژه‌ها:

قاب فولادی،  
نشست غیریکنواخت،  
ارزیابی لرزه‌ای،  
تحلیل غیرخطی.

استناد: امیرآبادی مجتبی، بایسته حمید، راستی اردکانی رضا. ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی تحت نشست غیریکنواخت. پژوهش‌های

زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۳؛ ۱۰(۲): ۹۹-۱۱۸. <https://doi.org/10.22091/cer.2024.10947.1562>



## ۱- مقدمه

است سبب ایجاد تغییر شکل‌های ماندگار در سازه شود که در نتیجه آن، عملکرد لرزه‌ای سازه از آنچه که پیش‌بینی می‌شود، تحت این پدیده بسیار متفاوت شود. از جمله تحقیقاتی که به بررسی اثرات نشست بر سازه پرداخته است، می‌توان به پژوهش عبدی‌زاده اشاره کرد. تمرکز اصلی این تحقیق به بررسی خرابی پیش‌رونده با روش مسیر بار جایگزین در ساختمان‌های دارای نشست تکیه‌گاهی معطوف می‌شود. در این پژوهش یک ساختمان شش طبقه تحت نشست تکیه‌گاهی، یک بار با سیستم قاب خمشی و بار دیگر با سیستم قاب مهاربندی همگرا به روش تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این تحقیق، آیین‌نامه UFC2005 برای خرابی پیش‌رونده مورد استفاده قرار گرفته است [۳]. طبق نتایج این پژوهش، در ساختمان با سیستم قاب خمشی در همه حالات نشست، سازه می‌تواند در برابر خرابی پیش‌رونده مقاومت نماید؛ اما در ساختمان با سیستم قاب مهاربندی همگرای ویژه در برخی از حالاتی که نشست به تکیه‌گاه‌های مختلف اعمال می‌شود، اعضا وارد ناحیه غیرخطی شده و خرابی در بادبندها مشاهده می‌شود ولی در مجموع هیچ خرابی کلی در سازه مشاهده نمی‌شود. در یک نتیجه‌گیری کلی از این پژوهش می‌توان گفت به ازای اعمال نشست‌های یک و دو برابر حالت مجاز آیین‌نامه به یک، دو و سه تکیه‌گاه (اعمال نشست متقارن و نامتقارن)، سیستم قاب خمشی متوسط نسبت به سیستم قاب مهاربندی همگرای ویژه در برابر خرابی مقاوم می‌باشد [۴].

در تحقیقی دیگر، میزان تأثیرگذاری نشست ناهمگون در ساختمان‌های بتنی بررسی شد. در این پژوهش، یک ساختمان پنج طبقه دوبعدی بتن مسلح با سیستم دوگانه قاب خمشی و دیوار برشی مدل‌سازی شده است. سازه‌های مورد بررسی تحت ۴۴ رکورد دور از گسل در آنالیز دینامیکی افزایش یافته قرار گرفته و منحنی شکنندگی آنها مقایسه شده است. نتایج بررسی نشان می‌دهد شدت زلزله در احتمال خرابی ۵۰ درصد در

سازه‌های زیادی هستند که به دلایل مختلف از جمله شرایط نامناسب خاک، ضعف در طراحی، گودبرداری مجاور و مواردی از این دست، با پدیده نشست مواجه شده‌اند که در اکثر موارد، این پدیده به صورت غیریکنواخت رخ می‌دهد. الشراوی<sup>۱</sup>، به بررسی اثرات پروفیل خاک و نوع پی و همچنین ارتفاع ساختمان بر نشست کلی و دیفرانسیل ساختمان پرداخته است. در این پژوهش، سه ساختمان با ارتفاع‌های مختلف روی چهار نوع خاک و با طراحی دو نوع پی، تحلیل و طراحی شدند. یکی از نتایج این پژوهش، افزایش نشست در اثر افزایش ارتفاع ساختمان است که مقدار آن در خاک ضعیف می‌تواند به دو برابر برسد. کاهش نشست و همچنین تنش‌های ایجاد شده در اثر استفاده از پی نواری از دیگر نتایج مهم این پژوهش است [۱].

میرنقی‌زاده و حاجی‌عزیزی، با یک مطالعه موردی، اثر حفاری‌های مجاور روی پدیده نشست را بررسی کرده‌اند. در این پژوهش، نشست‌های کف و تاج تونل موجود خط ۲ مترو تبریز ناشی از حفاری‌های جدید احتمالی با فواصل افقی مختلف از مترو و ابعاد مختلف حفاری، با نرم‌افزار المان محدود Plaxis مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش فاصله افقی مرکز حفاری از مرکز تاج تونل با در نظر گرفتن ابعاد مختلف حفاری، نشست تاج تونل که رو به پایین است، کاهش یافته؛ ولی نشست کف تونل که رو به بالا است، افزایش پیدا می‌کند. همچنین هرچه ابعاد حفاری بزرگتر شود، میزان کاهش نشست تاج تونل و میزان افزایش تغییر شکل کف تونل بیشتر خواهد شد [۲].

با وجود اهمیت موضوع پدیده نشست، مطالعات محدودی در زمینه اثر نشست بر سازه‌ها صورت گرفته است. این در حالی است که وقوع نشست در سازه ممکن

<sup>۱</sup>- Elsharawy

پژوهش، تحلیل و ارزیابی یک قاب چهار طبقه سه دهانه با در نظرگیری شرایط مختلف نشست در ستون‌ها، نشان داد که از نظر کمی، نشست ۱۰ میلیمتر می‌تواند قابلیت اطمینان عناصر تیر سازه را تا حدود ۱۴ درصد کاهش دهد. این مطالعه اهمیت ارزیابی سازه‌های موجود در برابر رویدادهایی مثل نشست که در پروژه‌ها پیش‌بینی نمی‌شوند را اثبات کرد؛ چراکه بسیاری از این رویدادها می‌توانند ایمنی سازه را کاهش دهند. علاوه بر این، روش ارائه شده در این پژوهش، می‌تواند به مهندسان در تعیین شاخص‌های ایمنی سازه‌ها در هنگام قرار گرفتن در معرض نشست‌های غیرمنتظره و تصمیم‌گیری در مورد نیاز به تقویت نهایی برای بازگرداندن ایمنی اولیه سازه کمک کند [۱۰].

لان لین<sup>۴</sup> و همکاران با هدف ارزیابی یک ساختمان اداری تحت نشست تفاضلی ۲۵ میلیمتر (حداکثر نشست مجاز در بعضی کدهای طراحی فعلی)، بر ایجاد تعامل بیشتر بین مهندسين سازه و ژئوتکنیک تأکید داشته است. برای رسیدن به اهداف موردنظر در این پژوهش، طراحی سازه موجود که مطابق با نسخه ۲۰۰۵ NBCC ساخته شده بود، مطابق مفاد آخرین نسخه ۲۰۱۰ NBCC اصلاح شد [۱۱ و ۱۲]. همچنین جهت تحلیل‌های غیرخطی از آیین‌نامه FEMA 356 و ASCE استفاده شده است [۶ و ۱۳]. براساس نتایج این تحقیق می‌توان گفت سازه تا حد ۲۵ میلیمتر نشست رفتار الاستیک دارد و فراتر از آن، تغییرشکل‌های غیرالاستیک ایجاد می‌شود. همچنین از نتایج این پژوهش دریافت می‌شود که به طور کلی، نشست باعث ایجاد لنگرهای خمشی قابل توجهی در تیرها می‌شود، در حالی که نیروهای برشی کوچکتر از لنگرهای خمشی است و این نشان می‌دهد نشست فونداسیون تأثیر بیشتری در ایجاد لنگرهای خمشی دارد [۱۴].

نشست اجباری اعمال شده و بستر غیریکنواخت (انتهای قاب و زیر دیوار برشی) نسبت به بستر یکنواخت افزایش یافته است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که احتمال خرابی در نشست زیر دیوار برشی بیشتر از انتهای قاب است. علاوه بر این، احتمال خرابی در بستر غیریکنواخت زیر دیوار برشی نسبت به بستر یکنواخت افزایش یافته است [۵].

کولیوند و همکاران در پژوهشی متفاوت، به تعیین نشست تفاضلی مجاز ساختمان‌های قاب خمشی بتنی بر مبنای سطح عملکرد پرداخته‌اند. در این پژوهش، چهار قاب خمشی ویژه با پلان‌های متفاوت به صورت سه‌بعدی، طراحی و سپس با اعمال نشست‌های مختلف به روش بار افزون در نرم‌افزار اجزای محدود غیرخطی SeismoStruct تحلیل شدند. پس از تحلیل سازه‌ها، براساس زاویه دوران تسلیم اعضای اصلی سازه و با در نظر گرفتن معیارهای پذیرش طبق آیین‌نامه FEMA356 و سطوح عملکرد ساختمان، مقادیری برای حد زاویه چرخش خمیری اعضای اصلی سازه تعیین شد و سپس نشست تفاضلی مجاز سازه مشخص گردید [۶]. مطابق بررسی‌های انجام شده در این تحقیق مشخص شد که نشست تفاضلی مجاز در سازه‌های بتنی مورد مطالعه، در محدوده ۴/۵۳ تا ۶/۲ سانتیمتر قرار می‌گیرد [۷].

در تحقیقی توسط باو<sup>۲</sup> و همکاران، به ارزیابی شکنندگی لرزه‌ای سازه‌ها تحت نشست تفاضلی پرداخته شد. مدل موجود در این پژوهش، مطابق با نشریه طراحی لرزه‌ای ساختمان‌های چین GB50011-2010 طراحی شده است [۸]. براساس نتایج این پژوهش می‌توان به طور خلاصه چنین بیان کرد که نشست تفاضلی پی می‌تواند باعث کاهش سطح ایمنی سازه شود [۹].

پریرا<sup>۳</sup> و همکاران، قابلیت اطمینان یک قاب بتن مسلح در معرض نشست را مورد ارزیابی قرار دادند. در این

<sup>۲</sup>- Bao

<sup>۳</sup>- Pereira

<sup>۴</sup>- Lin

است. به عبارت دیگر، اعضای سخت‌تر، نیروهای بیشتری را برای نشست تفاضلی ثابت در قاب‌ها ایجاد می‌کنند. علاوه بر این، نشست تفاضلی بیشتر بر نیروهای قسمت‌های پایینی سازه تأثیر می‌گذارد [۱۶].

در پژوهشی دیگر، هانا و چن<sup>۶</sup>، به ارزیابی ساختمان فولادی نه طبقه در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS تحت نشست ۵۰۰ میلیمتری در پای ستون‌های مختلف و در نظرگیری حالات مختلف اتصالات پرداخته‌اند. این پژوهش، علاوه بر بررسی میزان اثرگذاری نوع اتصالات در تغییر شکل سازه تحت نشست، نمودارهایی برای پیش‌بینی منحنی لنگر خمشی - نشست و منحنی دوران - نشست به عنوان راهنمای طراحی سازه‌های فولادی مشابه ارائه کرده است [۱۷].

محققان دیگری، اثر خاک‌های مختلف در پاسخ سازه‌ها تحت نشست‌های تفاضلی را مورد ارزیابی قرار دادند. در این تحقیق، مدل‌سازی خاک‌ها با استفاده از فنر در تکیه‌گاه‌های ساختمان انجام شده است. به‌طور خلاصه، براساس نتایج این تحقیق می‌توان گفت که خاک‌های مختلف می‌تواند پاسخ‌های متفاوتی در سازه تحت نشست، ایجاد کند. بنابراین بررسی شرایط ژئوتکنیکی مختلف نیز می‌تواند به عنوان شاخه‌ای دیگر از اثر پدیده نشست، مورد مطالعه قرار گیرد [۱۸].

در پژوهش‌هایی که به عنوان نمونه شرح داده شد، اغلب در آن‌ها جهت تعریف مفاصل پلاستیک در مدل‌سازی نشست از پیشنهاد‌های آیین‌نامه‌های لرزه‌ای نیز استفاده شده است؛ اما در این پژوهش به‌طور خاص، ابتدا نشست ساختمان بررسی شده و پس از آن تحت ارزیابی لرزه‌ای قرار گرفته است. در واقع در این پژوهش به این مسئله پرداخته می‌شود که نشست غیریکنواخت مفروض برای یک سازه چه تأثیری در پارامترهای لرزه‌ای آن دارد. همچنین اثر پارامترهای مختلف نظیر الگوی نشست، تعداد طبقات و عرض دهانه مورد بررسی قرار

در پژوهشی دیگر، به بررسی عملکرد لرزه‌ای ساختمان‌ها تحت نشست‌های تفاضلی مجاز مطرح شده در مقررات طراحی لرزه‌ای کانادا پرداخته شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که همه ساختمان‌هایی که الزامات طراحی لرزه‌ای کانادا را برآورده می‌کنند، می‌توانند نشست مجاز ۰/۷۵ اینچ (حدود ۲۰ میلیمتر) را که در آیین‌نامه بتن آمریکا تعیین شده است، تحمل کنند و خرابی ساختمان‌ها فقط در نشست‌های بیش از حد مجاز مانند ۵۰ میلیمتر (۲/۵ برابر حد مجاز) برای ساختمان‌های با دهانه‌های چهار متر و ۱۰۰ میلیمتر (۴ برابر حد مجاز) برای ساختمان‌های با دهانه‌های شش متر مشاهده می‌شود. همچنین از این پژوهش می‌توان نتیجه گرفت که ساختمان‌های با طول دهانه کمتر (چهار متر) نسبت به ساختمان‌های با طول دهانه بیشتر (هشت متر) در برابر نشست آسیب‌پذیرتر می‌باشند. از دیگر نتایج مهم این پژوهش می‌توان گفت با افزایش شکل‌پذیری، تأثیرات مخرب نشست کاهش می‌یابد. این پژوهش هرچند دامنه گسترده‌تری را نسبت به برخی پژوهش‌های مشابه شامل می‌شود اما محدودیت‌هایی نیز دارد؛ زیرا این پژوهش فقط مربوط به عملکرد ساختمان‌های قاب خمشی بتن مسلح تحت نشست تفاضلی چهار برابر حد مجاز تعیین شده در مقررات مختلف طراحی لرزه‌ای کانادا است و اندرکنش خاک و سازه در این مطالعه در نظر گرفته نشده است [۱۵].

لاهری<sup>۵</sup> و همکاران، تأثیر مشخصات اعضای سازه شامل ابعاد و ممان اینرسی تیرها و ستون‌ها در پاسخ سازه تحت نشست را با مدل‌سازی یک قاب پورتال بتنی تحت نشست ۱۰ میلیمتر مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج به‌دست آمده از این تحقیق می‌توان گفت که نیروهای ایجاد شده در قاب تحت نشست تفاضلی در اثر افزایش طول تیر و ارتفاع ستون کاهش می‌یابد. همچنین کاهش ممان اینرسی تیرها و ستون‌ها در کاهش این نیروها مؤثر

<sup>6</sup>- Hanna and Chen

<sup>5</sup>- Lahri

جهت انجام انواع تحلیل، از نشریه ۳۶۰، استفاده شده است [۲۰-۲۲]. مقادیر بارهای ثقلی مطابق جدول ۱، فرض شده است.

جدول ۱- مقادیر بارهای ثقلی وارد بر سازه‌ها

نوع بار	طبقات	بام
بار مرده ( $\text{Kg/m}^2$ )	۶۰۰	۵۰۰
بار زنده ( $\text{Kg/m}^2$ )	۲۰۰	۱۵۰
بار تیغه‌بندی ( $\text{Kg/m}^2$ )	۱۰۰	-
بار دیوارهای پیرامونی ( $\text{Kg/m}$ )	۵۰۰	۲۰۰
بار برف ( $\text{Kg/m}^2$ )	-	۵۰

جهت آنالیز حساسیت طبقات، از قاب‌های سه، چهار و پنج طبقه با دهانه‌های یکسان (شکل ۱- الف) و همچنین برای آنالیز حساسیت دهانه، از قاب‌های سه، چهار و پنج دهانه با طبقات برابر (شکل ۱- ب) مطابق نام‌گذاری جدول ۲ استفاده شده است. فولاد مصرفی از نوع ST37 با حداقل تنش تسلیم ( $F_y$ ) ۲۴۰۰ کیلوگرم بر مترمربع بوده و در تمام مدل‌ها، ارتفاع طبقات ۳/۳ و طول دهانه‌ها ۴/۵ متر در نظر گرفته شده است. قاب‌های مورد مطالعه، در منطقه‌ای با لرزه‌خیزی زیاد و کاربری مسکونی دارای خاک تپ‌سه فرض شده است.

جدول ۲- مشخصات و شماره مدل‌های آنالیز

شماره مدل	نوع بار
Model 1	قاب سه دهانه چهار طبقه
Model 2	قاب چهار دهانه چهار طبقه
Model 3	قاب پنج دهانه چهار طبقه
Model 4	قاب سه طبقه چهار دهانه
Model 5	قاب چهار طبقه چهار دهانه
Model 6	قاب پنج طبقه چهار دهانه

## ۲-۲- الگوهای نشست

جهت بررسی رفتار سازه‌ها تحت نشست غیریکنواخت، در مرحله اول نشست تک ستونی ۱۰ سانتیمتری در ستون‌های کناری یا میانی اعمال می‌شود. در مرحله دوم، نشست دو ستونی پنج و ۱۰ سانتیمتری در ستون‌های کناری و میانی در نظر گرفته می‌شود. در مرحله سوم، تمام ستون‌های سازه تحت یک پروفیل

می‌گیرد. برخی پارامترهای لرزه‌ای مهم نظیر سختی و الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک لرزه‌ای و دوران اعضا و همچنین شکل‌پذیری ساختمان تحت نشست نیز بررسی می‌شود. همچنین علاوه بر حالات فرضی نشست غیریکنواخت، از یک پروفیل واقعی نشست که در ساختمانی مسکونی در شهر تهران رخ داده است نیز استفاده می‌شود تا وضعیت عملکردی سازه هنگامی که تمام ستون‌ها با مقادیر مختلف دچار نشست می‌شود، مورد ارزیابی قرار گیرد. در بخش دوم این تحقیق، نحوه مدل‌سازی سازه‌ها کاملاً شرح داده می‌شود. در این بخش، فرضیاتی از قبیل هندسه سازه‌های مورد بررسی، الگوهای نشست و نحوه تحلیل بیان می‌شود. در بخش سوم پژوهش، خروجی‌های حاصل از تحلیل سازه‌ها ارائه شده و سپس نتایج قابل استنتاج از تحلیل‌ها تشریح می‌شود. در بخش آخر، نتایج به‌طور کلی بررسی و نتیجه‌گیری حاصل می‌شود.

## ۲- فرضیات مدل‌سازی

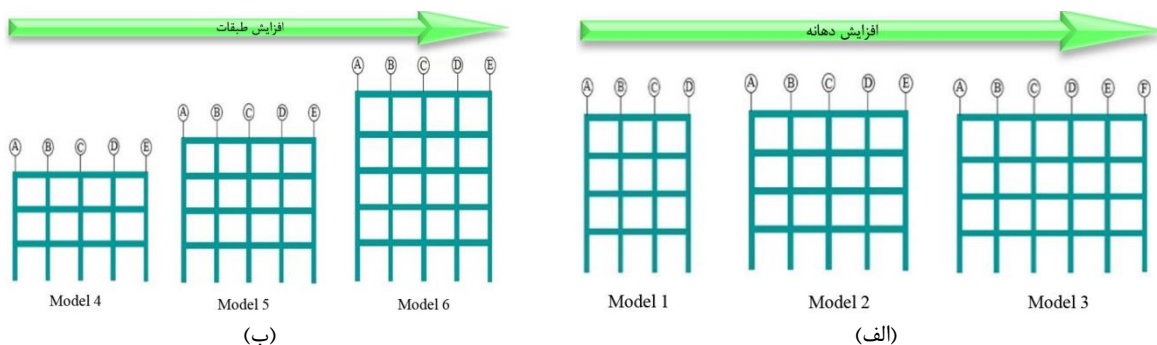
در این پژوهش به جهت بررسی اثر پدیده نشست بر رفتار ساختمان‌ها، با استفاده از نرم‌افزار SAP2000، چند قاب خمشی فولادی با شرایط مختلف طراحی و سپس نشست‌های مختلف به آنها اعمال می‌شود و رفتار آنها در برابر زلزله مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرد.

### ۲-۱- هندسه مدل‌ها

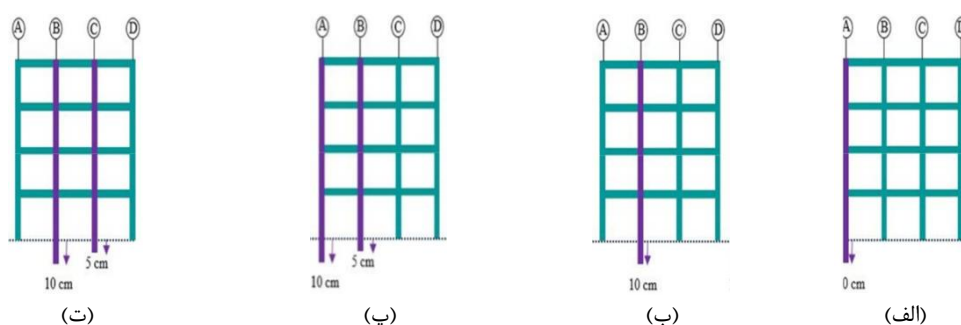
در این تحقیق، شش قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط مطابق مبحث دهم مقررات ملی ساختمان طراحی و بعد از اعمال نشست‌های غیریکنواخت مختلف، رفتار آنها در برابر زلزله بررسی می‌شود [۱۹]. برای تیرها از مقاطع I شکل تیورورق و برای ستون‌ها از مقاطع BOX در طراحی استفاده شده و با توجه به سیستم باربری جانبی سازه‌ها، اتصالات تیر و ستون گیردار در نظر گرفته شده است. جهت بارگذاری از مبحث ششم مقررات ملی ساختمان و آیین‌نامه استاندارد ۲۸۰۰ و

می‌گیرد. به عنوان نمونه در شکل ۲ و ۳، الگوهای نشست برای مدل ۱ نشان داده شده است.

واقعی نشست که در ساختمانی مسکونی در شهر تهران به دلیل احداث بنا روی خاک نرم ایجاد شده است، قرار



شکل ۱- هندسه قاب های مورد مطالعه در آنالیز حساسیت (الف) دهانه و (ب) طبقات



شکل ۲- انواع نشست در مدل ۱، (الف) نشست ستون گوشه، (ب) نشست ستون میانی، (پ) نشست دهانه گوشه و (ت) نشست دهانه میانی

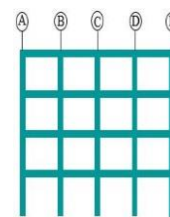
۲-۳- نوع تحلیل [۲۲]. در جدول ۳، خلاصه کل حالت‌های بررسی تحقیق آورده شده است.

۳-۲- نوع تحلیل

جهت بررسی نتایج نظیر الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک، ظرفیت و سختی سازه‌ها از تحلیل پوش‌آور استفاده می‌شود.

جدول ۳- خلاصه کل حالت‌های بررسی تحقیق

مدل‌های آنالیز	پارامترهای مورد بررسی
قاب سه دهانه چهار طبقه	حساسیت تعداد دهانه
قاب چهار دهانه چهار طبقه	
قاب پنج دهانه چهار طبقه	
قاب سه طبقه چهار دهانه	حساسیت تعداد دهانه
قاب چهار طبقه چهار دهانه	
قاب پنج طبقه چهار دهانه	
نشست ستون گوشه	حساسیت انواع نشست
نشست ستون میانی	
نشست دهانه گوشه	
نشست دهانه میانی	
نشست با پروفیل واقعی	



شکل ۳- پروفیل واقعی نشست در مدل ۱

توزیع بار جانبی مطابق نشریه، باید متناسب با دو نوع توزیع زیر به سازه اعمال شود:

جهت انجام این نوع تحلیل، تغییرمکان هدف سازه‌ها مطابق ضوابط نشریه ۳۶۰ تعیین می‌شود [۲۲]. نقطه کنترل سازه‌ها، گوشه طبقه بام در نظر گرفته شده است. اثرات بار ثقلی نیز با ترکیب بار بیان شده در بند ۳-۲-۸ نشریه ۳۶۰، در الگوهای بارهای جانبی لحاظ می‌شود

اعضا پس از رسیدن به تغییرمکان هدف با دهانه‌ها و طبقات مختلف تحت حالت‌های متفاوت نشست پرداخته می‌شود.

در مرحله اول، الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک و دوران اعضای سازه‌ها، تحت نشست یک و دو ستون تفسیر و تحلیل می‌شود. در خصوص وضعیت مفاصل پلاستیک و دوران اعضا تحت نشست با پروفیل واقعی، در قسمت بعد به طور مفصل توضیح داده خواهد شد. در شکل ۴، الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک در مدل ۱ تحت نشست یک و دو ستون به همراه حالت بدون نشست نشان داده شده است که در این شکل‌ها حالت الف، وضعیت مفاصل پلاستیک سازه بدون نشست و سایر حالت‌ها وضعیت مفاصل پلاستیک سازه تحت نشست در قسمت‌های مختلف سازه را نشان می‌دهد که ستون‌های نشست داده شده در هر حالت با علامت در شکل‌ها مشخص شده است. ذکر این نکته ضروری است، نتایجی که در ادامه برای مدل ۱ گرفته می‌شود، برای سایر مدل‌ها نیز صادق است و از نمایش وضعیت مفاصل پلاستیک سایر مدل‌ها خودداری شده است.

با مقایسه و ارزیابی شکل ۴، نتایج زیر حاصل می‌شود:

۱- در هر دو حالت نشست یک و دو ستونی، مفاصل پلاستیک جدیدی نسبت به حالت بدون نشست در سازه ایجاد می‌شود. در عین حال، سطوح عملکردی بعضی از مفاصل تغییر می‌کند که این موضوع با تغییر در رنگ مفاصل کاملاً قابل مشاهده است. در مجموع می‌توان گفت که پدیده نشست وضعیت مفاصل پلاستیک سازه را نسبت به حالت بدون نشست، بحرانی‌تر می‌کند. این نتیجه در شکل ۵، برای یک حالت از نشست یک و دو ستون به عنوان نمونه نشان داده شده است که حالت‌های الف و ج، وضعیت مفاصل پلاستیک سازه بدون نشست و حالت‌های ب و د وضعیت

۱- توزیع متناسب با شکل مود اول ارتعاش در جهت مورد نظر

۲- توزیع یکنواخت

البته در صورتی که ساختمان براساس یکی از ویرایش‌های استاندارد ۲۸۰۰ طراحی شده باشد، توزیع دوم ضرورتی ندارد [۲۱]. بنابراین در این تحقیق با توجه به طراحی ساختمان‌ها براساس استاندارد ۲۸۰۰، از توزیع نوع اول استفاده می‌گردد. در نهایت، باتوجه به اینکه سازه‌های مورد مطالعه فولادی می‌باشند، جهت تعریف مشخصات مفاصل پلاستیک برای در نظرگیری رفتار غیرخطی سازه‌ها و همچنین معیارهای پذیرش، از جدول ۳-۵ نشریه ۳۶۰، استفاده می‌گردد [۲۲].

۲-۴- روند تحلیل

تحلیل سازه‌ها به این صورت است که ابتدا نشست‌های غیریکنواخت به صورت بار غیرخطی به سازه‌ها اعمال می‌شوند و تحلیل صورت می‌گیرد. سپس جهت ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها، بار پوش (مطابق مراجع گفته شده)، به سازه‌ها اعمال و نتایج حاصل از تحلیل‌ها استخراج می‌شود.

۳- بحث و بررسی نتایج

در این پژوهش، شش مدل به صورت قاب خمشی فولادی با شکل‌پذیری متوسط طبق مشخصات گفته شده، طراحی شده، سپس نشست‌های مختلف به آنها اعمال گردیده و عملکرد سازه‌ها تحت نشست مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت.

۳-۱- الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک و دوران اعضا

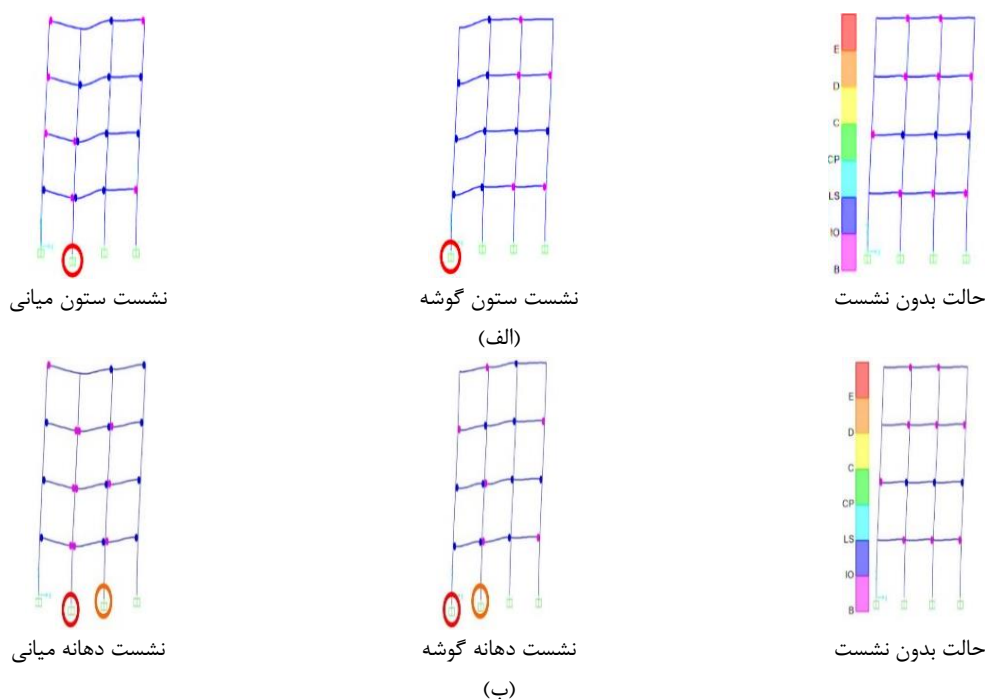
یکی از نتایج مهم در تحلیل غیرخطی سازه‌ها، وضعیت مفاصل پلاستیک بعد از رسیدن به تغییرمکان هدف و دوران اعضا می‌باشد. در همین راستا، پس از تحلیل سازه‌ها به صورت پوش‌آور، به تفسیر و تحلیل الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک سازه‌ها و همچنین دوران



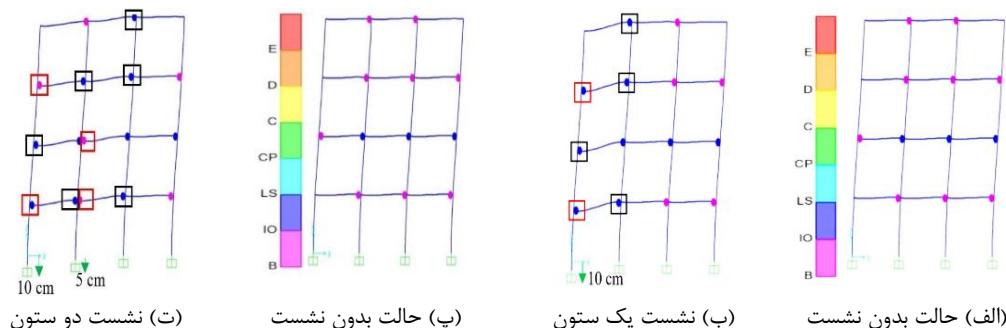
اول تا بام بسیار بحرانی‌تر است، اما اثر نشست بر دهانه‌های مجاور به تدریج کاهش می‌یابد که این موضوع با ایجاد مفاصل پلاستیک جدید یا تغییر سطوح عملکردی قابل ملاحظه است. این نتیجه در شکل ۸، برای یک حالت از نشست یک و دو ستون به عنوان نمونه نشان داده شده است که همانند قسمت‌های قبل وضعیت مفاصل پلاستیک سازه در حالت بدون نشست و دارای نشست با علامت از هم متمایز شده است.

مفاصل پلاستیک سازه تحت نشست ستون‌های مشخص شده در شکل را نشان می‌دهد. به عبارتی دیگر، اعضای سازه تحت نشست دچار دوران بیشتری خواهند شد که در شکل ۶، دوران سه تیر از مدل ۱ که مقایسه آنها قبل و بعد از نشست محسوس‌تر است، آورده شده است. سه تیر انتخابی برای مقایسه دوران در شکل ۷ نشان داده شده است.

۲- در هر دو حالت نشست یک و دو ستونی، وضعیت مفاصل پلاستیک در دهانه تحت نشست از طبقه



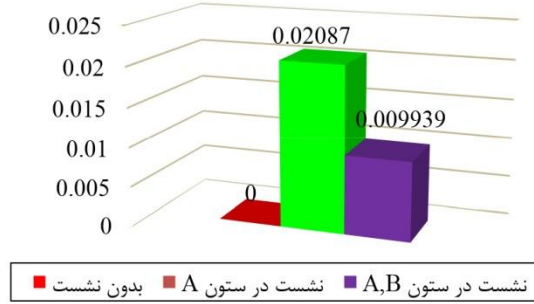
شکل ۴- الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک مدل ۱ تحت نشست (الف) یک و (ب) دو ستون



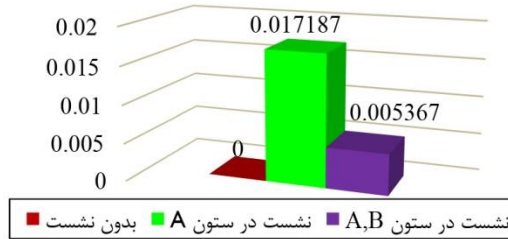
شکل ۵- بحرانی‌تر شدن وضعیت مفاصل پلاستیک مدل ۱ در اثر نشست



(ب)



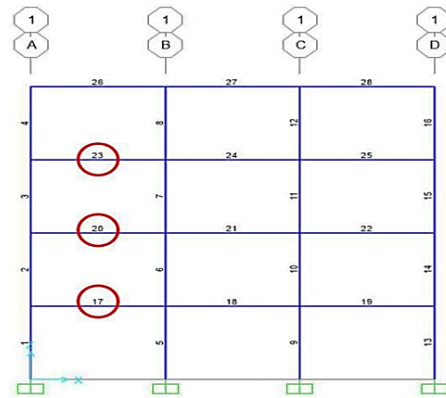
(الف)



(پ)

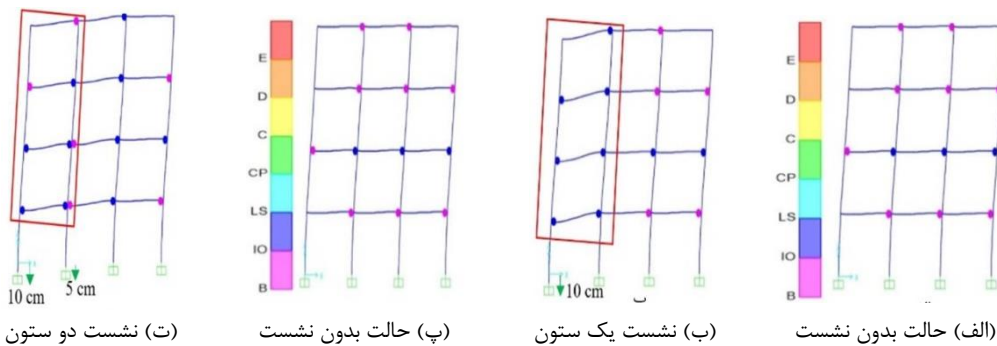
شکل ۶- مقایسه دوران سه عضو مدل ۱ در حالت با و بدون نشست (الف) تیر ۱۷، (ب) تیر ۲۰ و (پ) تیر ۲۳

است. این موضوع نیز با ایجاد مفاصل پلاستیک جدید یا تغییر سطوح عملکردی قابل استنتاج است. این نتیجه در شکل ۹، برای یک حالت از نشست یک و دو ستون به عنوان نمونه نشان داده شده است. دقت شود در شکل‌های مذکور، دور مفاصل پلاستیک بحرانی در مقایسه با دو حالت نشست ستون‌های گوشه و میانی، خط کشیده شده است که طبیعتاً حالتی که تعداد مفاصل بحرانی بیشتری دارد، در مجموع بحرانی‌تر است.

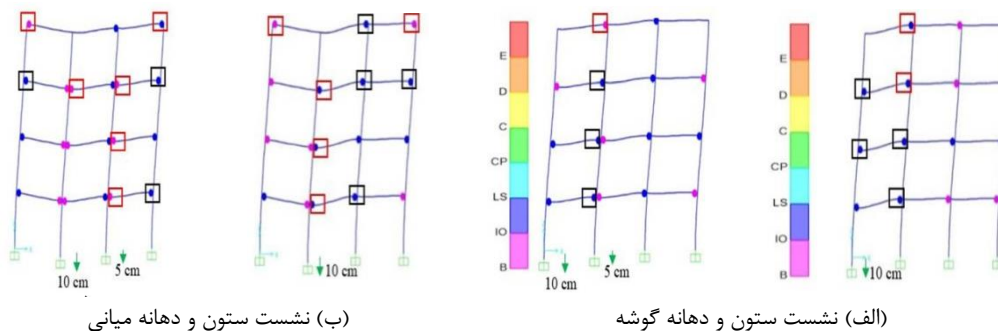


شکل ۷- اعضای انتخابی برای مقایسه دوران

۳- وضعیت مفاصل پلاستیک تحت نشست ستون‌های وسط، بحرانی‌تر از ستون‌های گوشه



شکل ۸- بحرانی‌تر شدن وضعیت مفاصل پلاستیک مدل ۱ در تمام طبقات دهانه تحت نشست



شکل ۹- بحرانی‌تر شدن وضعیت مفاصل پلاستیک مدل ۱ در اثر نشست‌های میانی

(الف) نشست ستون و دهانه گوشه

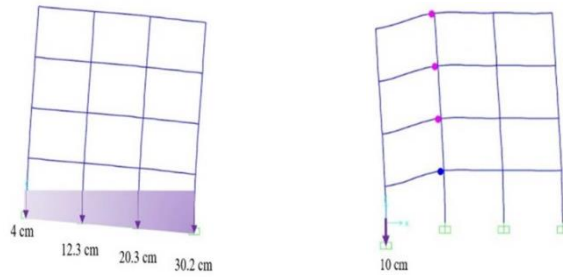
شکل ۹- بحرانی‌تر شدن وضعیت مفاصل پلاستیک مدل ۱ در اثر نشست‌های میانی

خطی باقی می‌ماند. به بیان دیگر، وضعیت مفاصل پلاستیک سازه تحت نشست تک ستون، بحرانی‌تر از پروفیل واقعی نشست است. علت این نتیجه مهم، به حرکت کلی سازه تحت نشست مربوط می‌شود؛ در واقع وقتی سازه تحت نشست یک ستون قرار می‌گیرد، یک بخش از سازه دچار تغییر مکان زیاد می‌شود و همه تغییر مکان اعمال شده در بخش محدودی از سازه متمرکز می‌شود اما زمانی که سازه تحت پروفیل واقعی مورد نظر دچار نشست می‌شود، کل سازه به یک سمت متمایل شده و در نتیجه، مقداری از نشست ایجاد شده به صورت چرخش صلب خواهد بود که از تمرکز تنش می‌کاهد. از این بررسی، می‌توان یک نتیجه مهم کلی گرفت که اگر نشست باعث حرکت موضعی بخشی از سازه شود، مفاصل پلاستیک بیشتری در اعضا تشکیل می‌شود یعنی دوران اعضا بیشتر خواهد بود و در مقابل اگر نشست باعث حرکت کلی سازه در یک راستا شود، دوران صلب سازه موجب ایجاد مفاصل پلاستیک کمتری در اعضا می‌شود یعنی دوران اعضا کمتر خواهد بود و حتی ممکن است سازه وارد ناحیه غیرخطی نشود. لازم به ذکر است، این استدلال در پدیده نشست یکنواخت نیز قابل ارائه است. در شکل ۱۱، وضعیت تمرکز نشست در این دو حالت را به صورت شماتیک می‌توان مشاهده کرد.

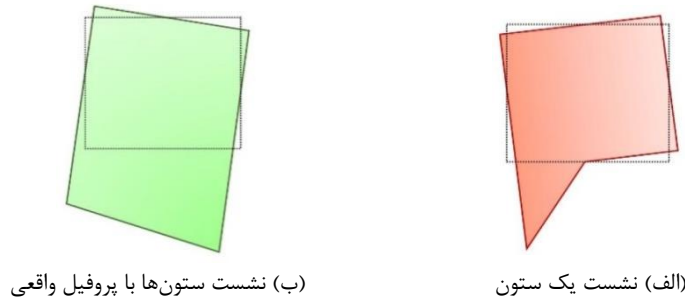
در ادامه بررسی، بار لرزه‌ای به صورت پوش به سازه اعمال می‌شود و این بار رفتار لرزه‌ای سازه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

در ادامه، به تحلیل و ارزیابی الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک در سازه‌های تحت پروفیل واقعی نشست غیریکنواخت می‌پردازیم. در این حالت از نشست، تمام ستون‌های سازه با یک پروفیل مشخص تحت نشست غیریکنواخت قرار می‌گیرند. در واقعیت نیز احتمال رخداد این حالت محتمل‌تر از سایر حالات است؛ چراکه وقتی سازه‌ای متحمل پدیده نشست می‌شود، معمولاً تمام ستون‌های آن دچار نشست خواهند شد. پروفیل نشست انتخابی جهت تحلیل و بررسی، از یک ساختمان واقعی که دچار پدیده نشست غیریکنواخت بوده، شبیه‌سازی شده است. لازم به ذکر است این مرحله، فقط برای مدل ۱ انجام می‌شود؛ زیرا هدف از انجام این حالت، آنالیز حساسیت دهانه و طبقات نیست و نتایج مهم دیگری که در ادامه گفته می‌شود، مدنظر است. در بررسی اول، ابتدا تغییر شکل سازه تحت بارهای ثقلی و نشست قبل از اعمال بار لرزه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۱۰، الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک مدل ۱ در دو حالت پروفیل واقعی نشست و نشست یک ستون قبل از اعمال بار لرزه‌ای جهت ارزیابی و مقایسه، نشان داده شده است.

با مقایسه و ارزیابی الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک در دو حالت نشست یک ستون و نشست ستون‌ها با پروفیل واقعی تحت بارهای ثقلی و نشست، می‌توان گفت که در نشست تک ستون، سازه وارد ناحیه غیرخطی می‌شود و تعدادی مفصل پلاستیک، در اعضای سازه تشکیل می‌گردد، اما در نشست سازه با پروفیل واقعی مورد نظر، سازه وارد ناحیه غیرخطی نشده و در ناحیه



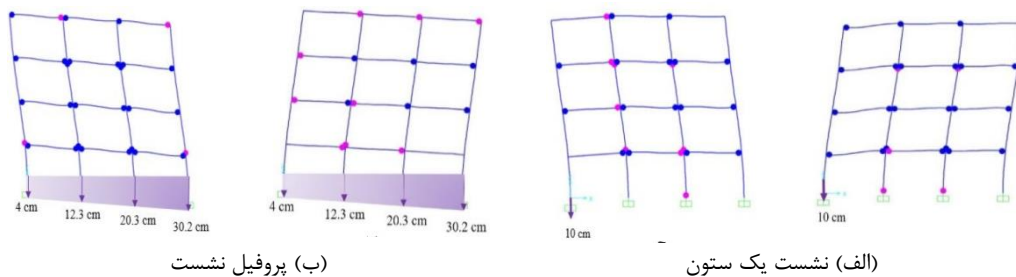
شکل ۱۰- الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک مدل ۱ تحت بارهای ثقلی و نشست (قبل از ورود بار لرزه‌ای)



شکل ۱۱- تغییرشکل شماتیک سازه در اثر نشست

مرحله با اعمال بار لرزه‌ای، الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک از جهت بار زلزله که به صورت پوش به سازه اعمال شده است، پیروی می‌کند و ممکن است در یک جهت وضعیت مفاصل پلاستیک تحت نشست تک ستون و در جهتی دیگری تحت پروفیل واقعی نشست بحرانی شود. به طور خلاصه، می‌توان از این قسمت نتیجه گرفت که قبل از رخداد زلزله، اگر نشست باعث حرکت موضعی بخشی از سازه شود، مفاصل پلاستیک بحرانی‌تری در سازه ایجاد می‌شود اما بعد از رخداد زلزله، وضعیت مفاصل پلاستیک سازه تابع جهت زلزله است و نمی‌توان نتیجه‌ای کلی ارائه داد.

در شکل ۱۲، الگوی تشکیل مفصل پلاستیک مدل ۱ در تغییرمکان ۵۰ سانتیمتر بام، برای دو حالت نشست یک ستون و نشست تمام ستون‌ها با پروفیل موردنظر با اعمال بار پوش در دو جهت مثبت و منفی محور X، نشان داده شده است. علت این کار در نظریه رفتار رفت‌وبرگشتی نیروی زلزله و قضاوت صحیح از رفتار لرزه‌ای سازه می‌باشد. با ارزیابی و مقایسه شکل ۱۲ می‌توان به این نتیجه رسید که رفتار و تغییرشکل سازه با اعمال بار لرزه‌ای، بسیار متفاوت می‌شود. همان‌طور که در مرحله اول در این قسمت مشاهده گردید، قبل از ورود بار لرزه‌ای وضعیت مفاصل پلاستیک سازه تحت نشست تک ستون، بحرانی‌تر از پروفیل واقعی نشست شد؛ اما در این

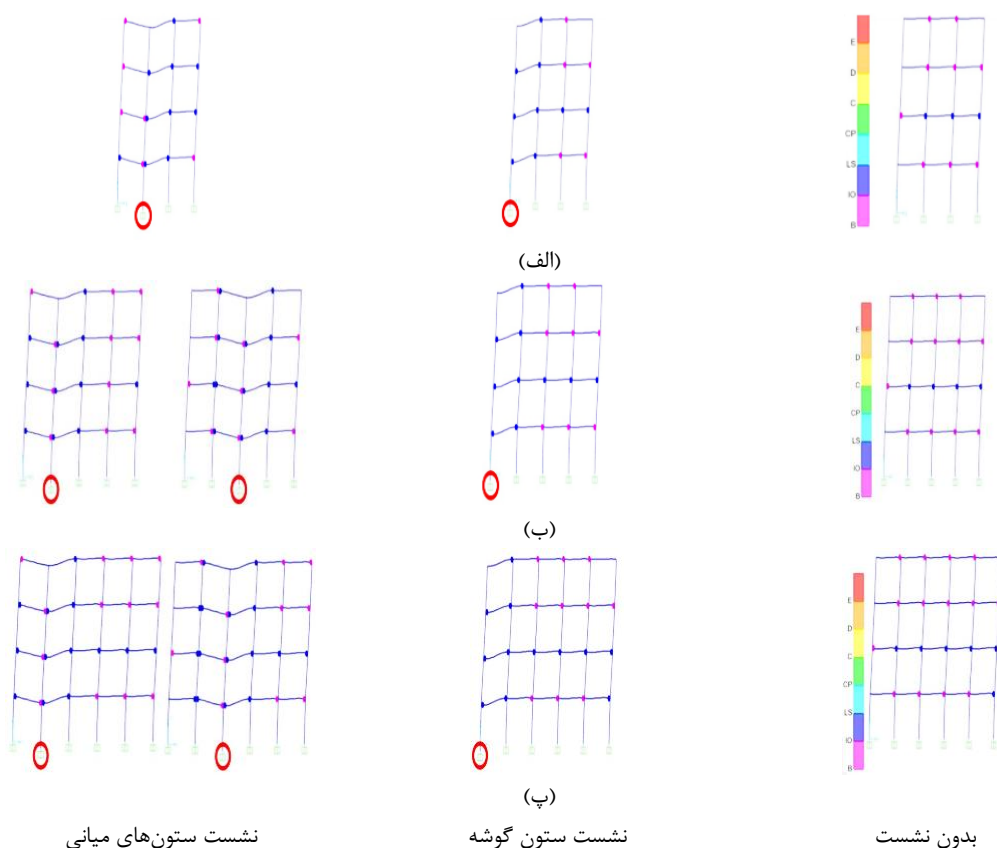


شکل ۱۲- الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک مدل ۱ با اعمال بار پوش در دو جهت مختلف مثبت و منفی بار پوش (علاوه بر بارهای ثقلی و نشست)

۱- با تغییر تعداد دهانه و تعداد طبقات، الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک تغییر محسوسی نمی‌کند و پدیده نشست تأثیر نسبتاً کمی در وضعیت مفاصل پلاستیک با تغییر تعداد دهانه و تعداد طبقات دارد. این نتیجه در نشست دو ستون و پروفیل واقعی نشست نیز صادق است.

۲- تمام نتایج گرفته شده در بخش‌های قبل که از اثر نشست بر مفاصل پلاستیک حاصل شد، با تغییر تعداد دهانه و تعداد طبقات سازه نیز حاکم است.

در مرحله دوم از بررسی الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک، به آنالیز حساسیت دهانه و طبقات در سازه‌های تحت نشست غیریکنواخت پرداخته می‌شود. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴، الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک با تغییر دهانه و طبقات تحت نشست یک ستون نشان داده شده است که وضعیت مفاصل پلاستیک سازه در حالت بدون نشست و دارای نشست با مشخص کردن علامت روی ستون نشست داده شده، از هم متمایز شده است. با مقایسه و ارزیابی شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نتایج زیر قابل استنتاج است:



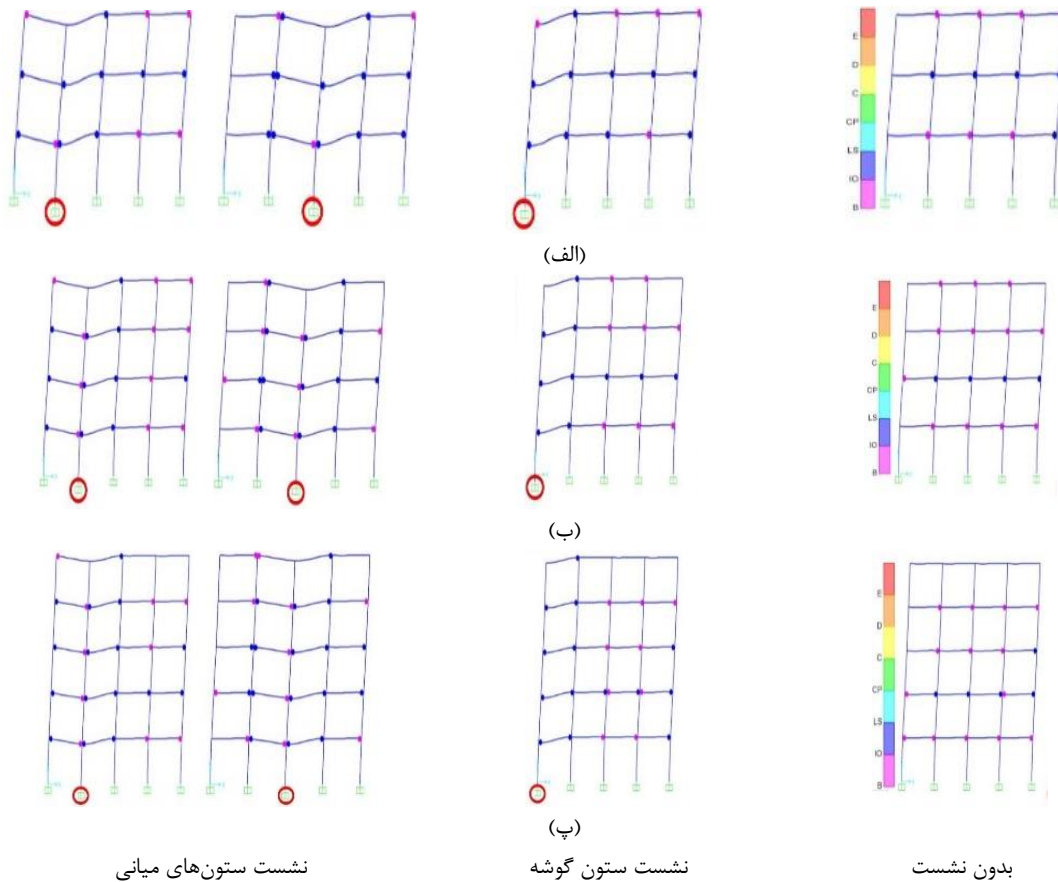
شکل ۱۳- الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک سازه (الف) سه، (ب) چهار و (پ) پنج دهانه

تجزیه و تحلیل خواهد شد. لازم به ذکر است، منحنی ظرفیت سازه‌ها تا تغییرمکان ۸۰ سانتیمتر در طبقه بام، ترسیم می‌شود تا قسمت غیرخطی سازه بهتر درک شود و نمودارهای کامل‌تری از رفتار سازه‌ها به دست آید. این در حالی است که تغییرمکان هدف سازه‌ها طبق ضوابط، کمتر از این مقدار است. همانند بررسی الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک، پیش از آنالیز حساسیت دهانه و تعداد طبقات در نشست، به تحلیل و ارزیابی کلی منحنی‌های

### ۳-۲- تحلیل پارامترهای حاصل از منحنی‌های ظرفیت

از نتایج مهم دیگر در تحلیل غیرخطی سازه‌ها که قابل تفسیر و تحلیل است، منحنی برش پایه- تغییرمکان (منحنی ظرفیت) سازه‌هاست. از منحنی ظرفیت، علاوه بر ارزیابی ظرفیت کلی سازه، می‌توان پارامترهای دیگری نظیر سختی را نیز بررسی کرد. در ادامه، منحنی‌های ظرفیت هر یک از سازه‌ها در حالت‌های مختلف نشست

ظرفیت در سازه‌های تحت نشست غیریکنواخت پرداخته می‌شود.



نشست ستون‌های میانی

نشست ستون گوشه

بدون نشست

شکل ۱۴- الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک سازه (الف) سه، (ب) چهار و (پ) پنج طبقه

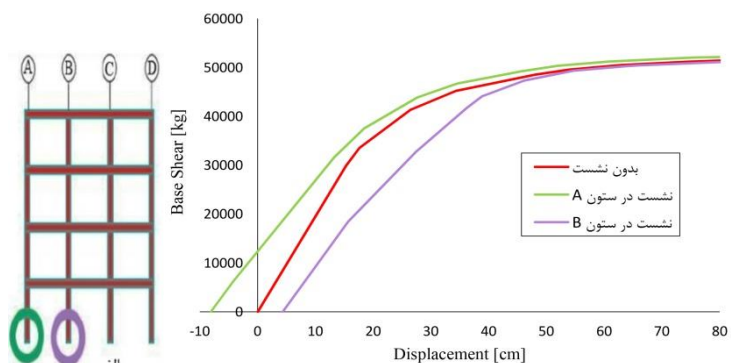
۱- در هر سه حالت نشست، ظرفیت نهایی سازه تغییر نمی‌کند. به بیان دیگر، نشست تأثیری در ظرفیت نهایی سازه ندارد. در شکل ۱۶- الف، این نتیجه برای حالت نشست یک ستون مدل ۱ به عنوان نمونه نشان داده شده است.

۲- با اعمال نشست، ممکن است سختی سازه کاهش یابد؛ این نتیجه با کاهش شیب منحنی‌های ظرفیت در سازه تحت نشست نسبت به حالت بدون نشست قابل استنتاج است. در شکل ۱۶- ب، این نتیجه برای حالت نشست یک ستون مدل ۱ به عنوان نمونه، نشان داده شده است. لازم به ذکر است با در نظرگیری اثر رفت‌وبرگشتی زلزله در بعضی حالات نشست، ممکن است سختی سازه در یک جهت، با سختی اولیه برابر شود ولی

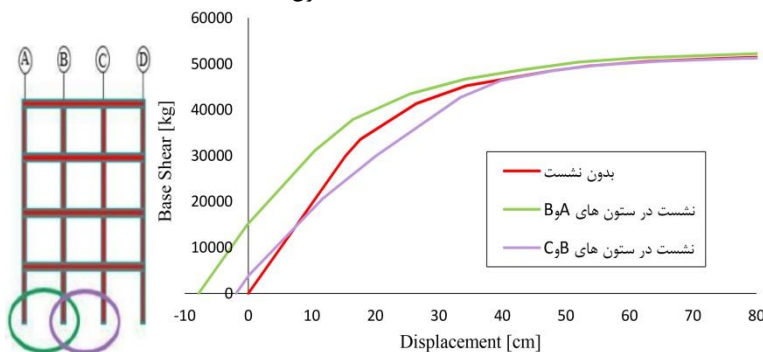
در شکل ۱۵، منحنی‌های ظرفیت در مدل ۱ تحت نشست‌های مختلف به همراه حالت بدون نشست نشان داده شده است که حالت‌های الف تا ج به ترتیب منحنی‌های ظرفیت سازه تحت نشست تک ستون، دو ستون و پروفیل موردنظر را نشان می‌دهد. منحنی‌های قرمز رنگ، منحنی ظرفیت سازه در حالت بدون نشست و سایر منحنی‌ها، منحنی ظرفیت سازه‌ها در حالت‌های مختلف نشست را نشان می‌دهد که رنگ هر کدام متناسب با رنگ دوایر کشیده شده در پای ستون‌های سازه است. لازم به ذکر است، همانند بخش قبل، منحنی‌های ظرفیت فقط برای مدل ۱ بررسی می‌گردد و نتایج گرفته شده، برای سایر مدل‌ها نیز صادق است. با ارزیابی و مقایسه نمودارهای شکل ۱۵، نتایج زیر قابل ارائه است:

شکل ۱۷، نمودارهای ظرفیت مدل ۱ تحت نشست تک ستون با در نظرگیری اثر رفت‌وبرگشتی زلزله آورده شده است.

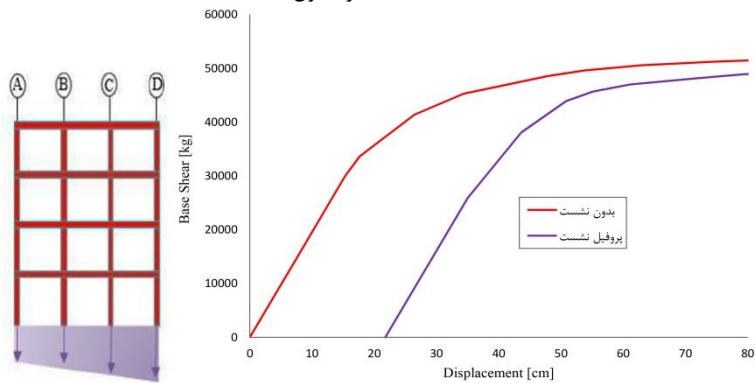
از آنجا که همواره حالت بحرانی سازه در زلزله باید در نظر گرفته شود، می‌توان گفت که ممکن است سختی سازه در اثر نشست کاهش یابد.



(الف) نشست یک ستون

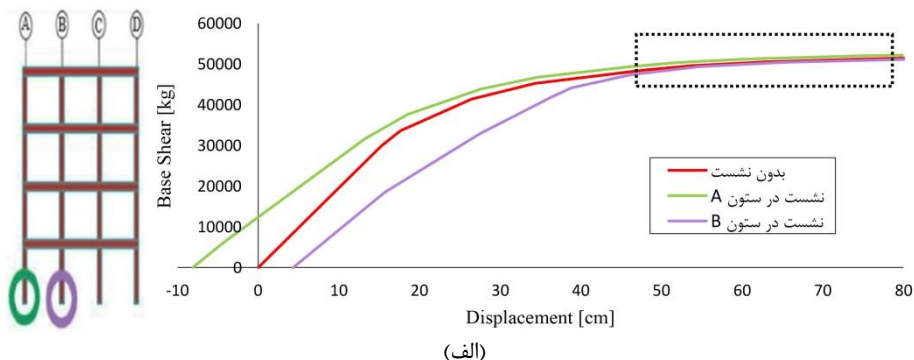


(ب) نشست دو ستون



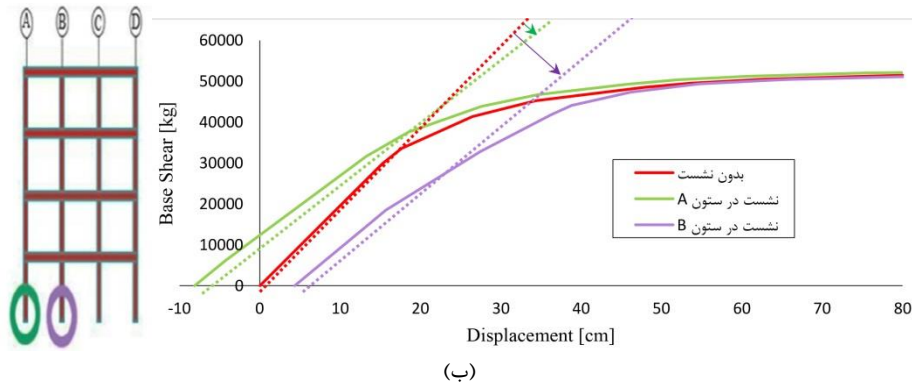
(پ) پروفیل نشست

شکل ۱۵- منحنی‌های ظرفیت مدل ۱

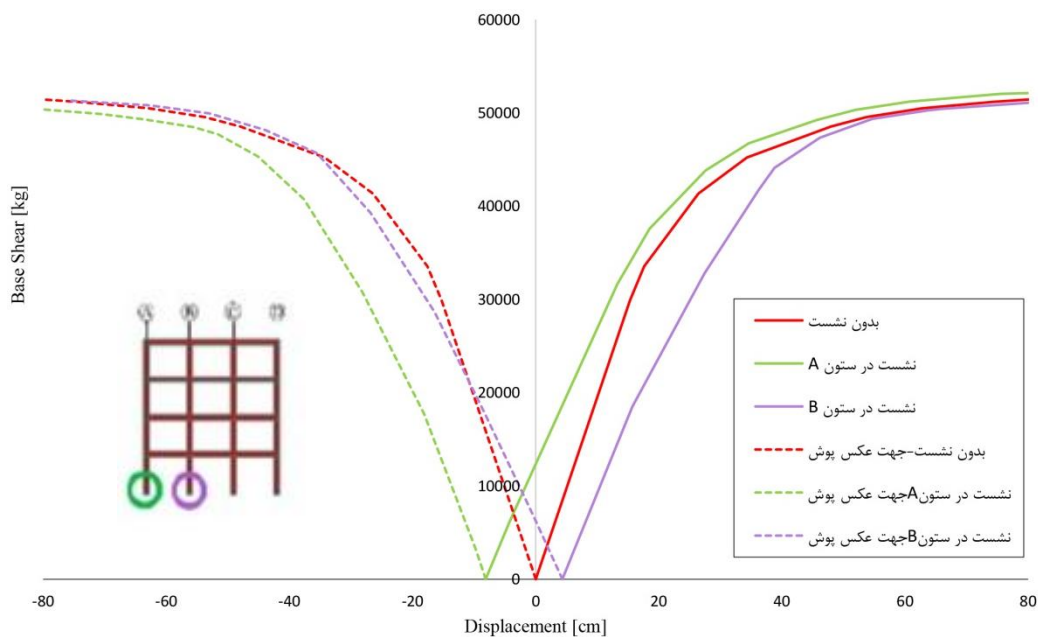


(الف)

شکل ۱۶- (الف) عدم تغییر ظرفیت نهایی سازه و (ب) کاهش سختی سازه در اثر نشست



شکل ۱۶- ادامه



شکل ۱۷- در نظرگیری اثر رفت و برگشتی زلزله

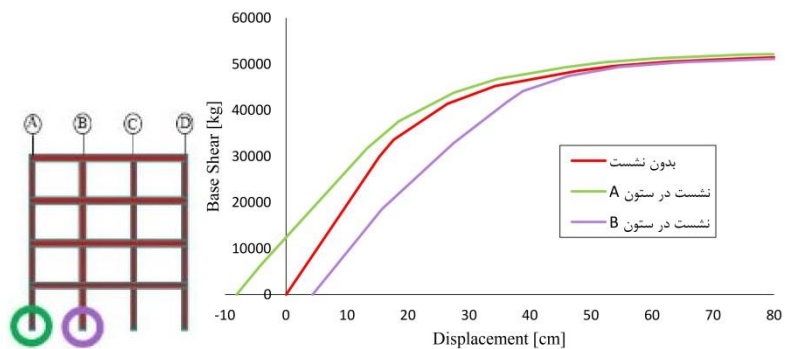
۱- با افزایش دهانه، اثر منفی نشست در سختی سازه کمتر می‌شود. به بیان دیگر، پدیده نشست در سازه‌های عریض، اثرگذاری کمتری دارد. این نتیجه در نشست دو ستون و پروفیل واقعی نشست نیز صادق است. در شکل ۱۹، با ادغام منحنی‌های ظرفیت سازه‌های دارای دهانه مختلف در یک نمودار تحت پدیده نشست، این نتیجه مهم به خوبی مشخص شده است.

۲- تمام نتایج گرفته شده در قسمت‌های قبل که از تغییر منحنی ظرفیت سازه با اعمال نشست حاصل شد، با تغییر تعداد دهانه نیز حاکم است.

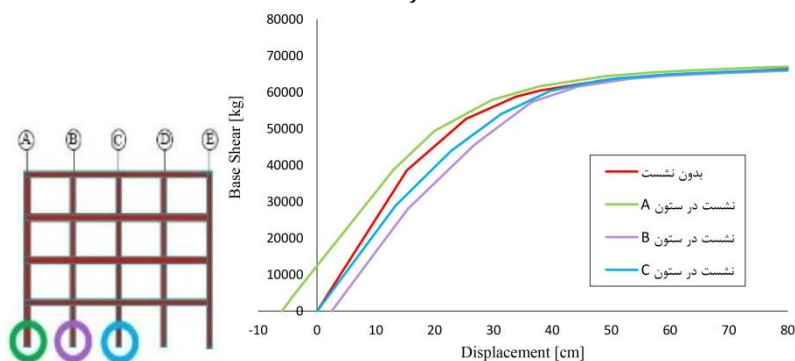
در مرحله دوم از بررسی منحنی‌های ظرفیت، ابتدا به آنالیز حساسیت دهانه و سپس به آنالیز حساسیت طبقات در سازه‌های تحت نشست غیریکنواخت می‌پردازیم.

در شکل ۱۸، منحنی‌های ظرفیت سازه با تغییر دهانه در انواع نشست یک ستون نشان داده شده است. همانند قبل، منحنی‌های قرمز، منحنی ظرفیت سازه در حالت بدون نشست و سایر منحنی‌ها، منحنی ظرفیت سازه‌ها در حالت‌های مختلف نشست را نشان می‌دهد که رنگ هر کدام متناسب با رنگ دوایر رسم شده در پای ستون‌ها است. با تحلیل شکل ۱۸، می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

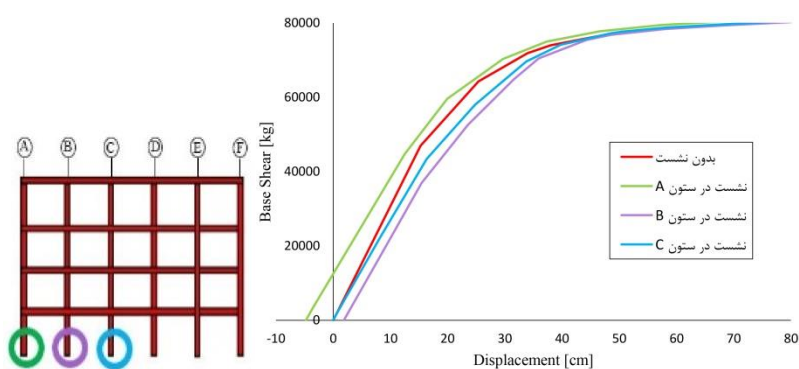




(الف) سازه سه دهانه

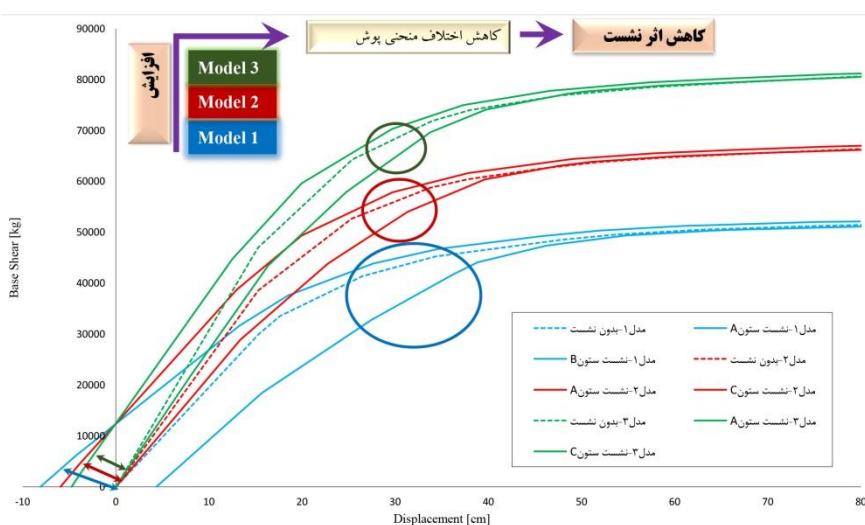


(ب) سازه چهار دهانه



(پ) سازه پنج دهانه

شکل ۱۸- منحنی ظرفیت سازه‌ها در اثر نشست یک ستون



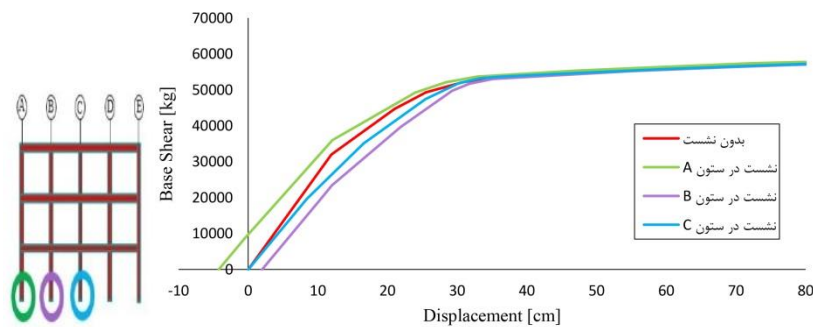
شکل ۱۹- کاهش اثر نشست با افزایش تعداد دهانه

می‌شود. به بیان دیگر، اثرگذاری پدیده نشست در سازه‌های مرتفع، بیشتر است. این نتیجه در نشست دو ستون و پروفیل واقعی نشست نیز صادق است. در شکل ۲۱، با ادغام منحنی‌های ظرفیت سازه‌های دارای طبقات مختلف در یک نمودار تحت پدیده نشست، این نتیجه مهم به خوبی به تصویر کشیده شده است.

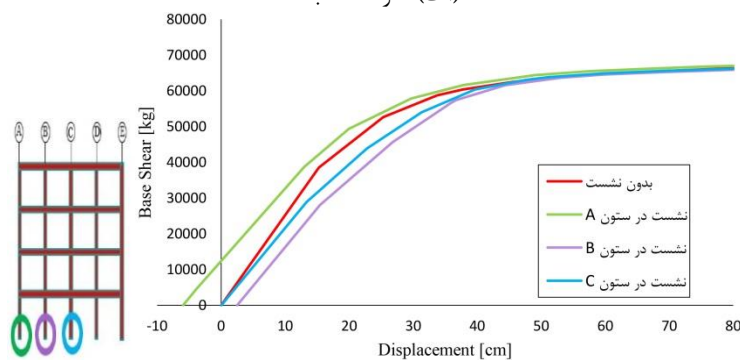
۲- تمام نتایج گرفته شده در قسمت‌های قبل که از تغییر منحنی ظرفیت سازه با اعمال نشست حاصل شد، با تغییر تعداد دهانه نیز حاکم است.

در ادامه بررسی منحنی‌های ظرفیت، به آنالیز حساسیت طبقات در سازه‌های تحت نشست می‌پردازیم. در شکل ۲۰، منحنی‌های ظرفیت سازه با تغییر طبقات در انواع نشست یک ستون نشان داده شده است. منحنی‌های قرمز رنگ، منحنی ظرفیت سازه در حالت بدون نشست و سایر منحنی‌ها، منحنی ظرفیت سازه‌ها در حالت‌های مختلف نشست را نشان می‌دهد که رنگ هر کدام متناسب با رنگ دوایر کشیده شده در پای ستون‌های سازه است. با مقایسه و تحلیل شکل ۲۰ نتایج زیر حاصل می‌شود:

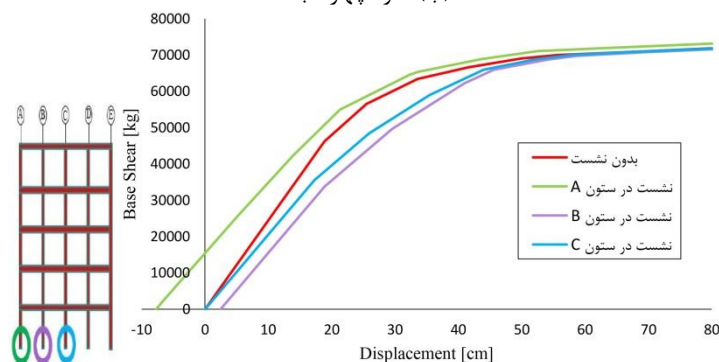
۱- برخلاف آنالیز حساسیت دهانه، با افزایش تعداد طبقات، اثر منفی نشست در سختی سازه بیشتر



(الف) سازه سه طبقه

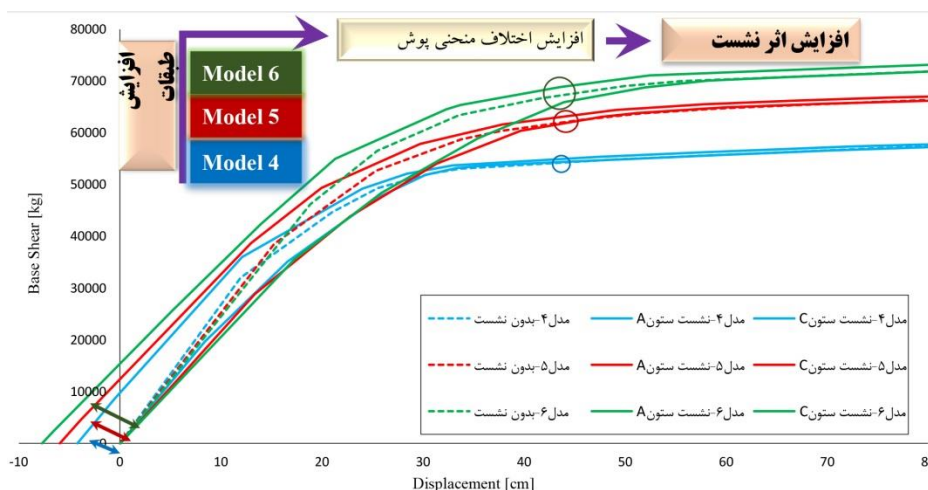


(ب) سازه چهار طبقه



(پ) سازه پنج طبقه

شکل ۲۰- منحنی ظرفیت سازه‌ها در اثر نشست یک ستون



شکل ۲۱- افزایش اثر نشست با افزایش تعداد طبقات

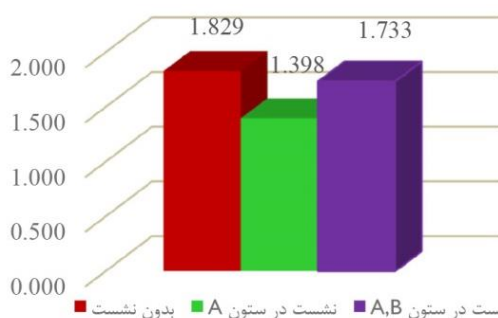
۳-۳- شکل‌پذیری

با انجام فرآیند دوخطی کردن منحنی‌های ظرفیت، پارامترهای مهم برش تسلیم و جابه‌جایی متناظر با آن ( $V_y$  و  $\Delta_y$ ) و برش سازه هنگامی که فقط رفتار الاستیک داشته باشد و جابه‌جایی متناظر با آن ( $V_E$  و  $\Delta_E$ ) به دست می‌آید.

پس از دوخطی کردن منحنی ظرفیت، نسبت شکل‌پذیری که آن را با  $\mu$  نشان می‌دهند از فرمول زیر قابل محاسبه است:

$$\mu = \frac{\Delta_E}{\Delta_y} \quad (1)$$

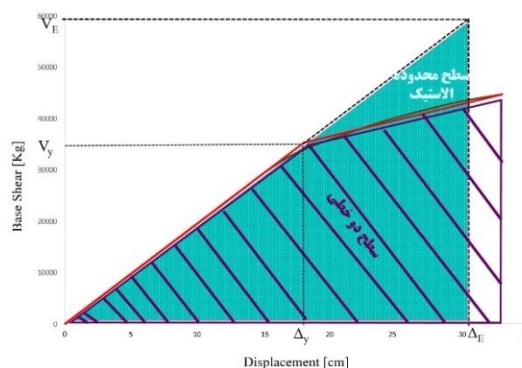
نتایج مقایسه نسبت شکل‌پذیری در حالت بدون نشست و تحت نشست یک و دو ستون برای سازه مدل ۱، به صورت شکل ۲۳ قابل ارائه است.



شکل ۲۳- نسبت شکل‌پذیری مدل ۱ در حالت بدون نشست و تحت نشست یک و دو ستون

همانطور که از نتایج قابل استنتاج است، شکل‌پذیری سازه تحت نشست کاهش یافته است.

یکی دیگر از پارامترهای مهم ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها، شکل‌پذیری آنها هنگام زلزله است. در این پژوهش نیز به تحلیل و مقایسه شکل‌پذیری سازه در حالت با و بدون نشست پرداخته شده است. به طور کلی، برای بررسی ظرفیت شکل‌پذیری سازه، ابتدا منحنی ظرفیت مربوط به سازه باید دوخطی شود. برای این کار، روش‌های مختلفی از قبیل روش پریستلی و پائولی، روش انرژی معادل، روش یانگ وجود دارد که در این مقاله از روش یانگ استفاده شده است. طبق این روش، منحنی دوخطی ظرفیت، باید طوری رسم شود که سطح زیر نمودار دوخطی با سطح زیر نمودار محدوده الاستیک برابر شود. در شکل ۲۲، نحوه دوخطی کردن منحنی ظرفیت سازه مدل ۱ در حالت بدون نشست به عنوان نمونه آورده شده است.



شکل ۲۲- دوخطی کردن منحنی ظرفیت مدل ۱ در حالت بدون نشست به روش یانگ

## ۴- نتیجه گیری

حالت‌های نشست یک و دو ستون بحرانی‌تر از پروفیل واقعی نشست مورد مطالعه است که علت آن، به حرکت کلی سازه تحت نشست مربوط می‌شود، اما بعد از اعمال بار زلزله، مشاهده می‌شود که وضعیت مفاصل پلاستیک سازه تابع جهت زلزله است.

۵- با تغییر تعداد دهانه و تعداد طبقات، الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک تغییر محسوسی نمی‌کند و پدیده نشست تأثیر نسبتاً کمی در وضعیت مفاصل پلاستیک با تغییر تعداد دهانه و تعداد طبقات دارد.

۶- ظرفیت شکل‌پذیری سازه در اثر نشست کاهش می‌یابد.

۷- با اعمال نشست در حالت‌های مختلف، ظرفیت نهایی سازه تغییر نمی‌کند، یعنی نشست تأثیری در ظرفیت نهایی سازه ندارد.

۸- نشست غیریکنواخت، ممکن است با در نظرگیری اثر رفت‌وبرگشتی زلزله، در یک جهت باعث کاهش سختی سازه شود.

۹- با افزایش دهانه، اثر منفی نشست در کاهش سختی سازه کمتر می‌شود. به بیان دیگر، پدیده نشست در سازه‌های عریض، اثرگذاری کمتری دارد (در محدوده مطالعه این پژوهش).

۱۰- با افزایش تعداد طبقات، اثر منفی نشست در کاهش سختی سازه بیشتر می‌شود. به بیان دیگر، اثرگذاری پدیده نشست در سازه‌های بلندتر در محدوده مطالعه این پژوهش، بیشتر است.

براساس مطالعات انجام شده در این تحقیق به طور کلی می‌توان گفت که نشست غیریکنواخت در پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها آثار نامطلوبی ایجاد می‌کند. تغییر پارامترهایی از قبیل الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک و دوران اعضا، ظرفیت شکل‌پذیری و سختی سازه از جمله تأثیرات منفی این پدیده بر سازه‌ها می‌باشد. به طور خلاصه، نتایج حاصل از ارزیابی و تفسیر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مورد بررسی در برابر حالات مختلف نشست غیریکنواخت در بازه سازه‌های مورد مطالعه در این پژوهش، به شرح زیر می‌باشد:

۱- نشست غیریکنواخت وضعیت مفاصل پلاستیک سازه را نسبت به حالت بدون نشست، بحرانی‌تر می‌کند که این موضوع با ایجاد مفاصل پلاستیک جدید یا تغییر سطوح عملکردی مفاصل پلاستیک، نمایان می‌شود.

۲- وضعیت مفاصل پلاستیک در دهانه تحت نشست از طبقه اول تا بام، بسیار بحرانی‌تر است؛ اما اثر نشست بر دهانه‌های مجاور به تدریج کاهش می‌یابد.

۳- وضعیت مفاصل پلاستیک تحت نشست ستون‌های مرکزی بحرانی‌تر از نشست ستون‌های گوشه است؛ زیرا نشست ستون‌های مرکزی، اعضای بیشتری از سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۴- وضعیت مفاصل پلاستیک سازه تحت بارهای ثقلی و بارهای نشست (قبل از ورد بار لرزه‌ای) در

## References

- [1] Elsharawy M. The Effect of 3D Interference of Shallow Foundation on Settlement and Its Impacts on Building Structures. *Civil Engineering and Architecture*. 2024; 12(3A): 2074-2090. doi: 10.13189/cea.2024.121311
- [2] Mirnaghizadeh MH, Hajiazizi M. Numerical Study of Tabriz Urban Railway Line 2 Tunnel Settlement. *Civil Infrastructure Researches*. 2018; 3(2): 25-32. doi: 10.22091/cer.2017.1475.1059. [In Persian]
- [3] U.S. Army Corps of Engineers. Design of Buildings to Resist Progressive Collapse (UFC 4-023-03). 2005.

- [4] Abdizadeh kalkhoran E, Shakri K, Raman Shokrgozar H, Gholizad A. Investigation of prograssive collapse in steel moment and bracing frames due to support settlement. MSc Thesis, Faculty of Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, 2016. [In Persian]
- [5] Mehrpour M, Memarpour M. Evaluation of Seismic Capacity of Reinforced Concrete Buildings with Dual System affected by Unequal Settelment in foundation. MSc Thesis, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, 2019. [In Persian]
- [6] American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia. Federal Emergency Management Agency (FEMA-356). Washington, D.C, 2000.
- [7] Kulivand Salooki A, Bagherieh A. An analysis on allowable differential settlement of concrete buildings. MSc Thesis, Faculty of Engineering, Malayer University, 2016. [In Persian]
- [8] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, Code for seismic design of building (Chinese Standard GB 50011), 2010.
- [9] Bao C, Ma X, Lim KS, Chen G, Xu F, Tan F, Abd Hamid NH. Seismic fragility analysis of steel moment-resisting frame structure with differential settlement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2021 Feb 1;141:106526. doi: **10.1016/j.soildyn.2020.106526**
- [10] Pereira WM, Moraes MH, Beck AT, Araújo DL, Sarmento AP, Sousa MA. Reliability analysis of reinforced concrete frames subjected to post-construction settlements. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 2023 Jan 16; 16(5): e16503. doi: **10.1590/S1983-41952023000500003**
- [11] National Research Council of Canada. National Building Code of Canada, Ottawa, 2005.
- [12] National Research Council of Canada. National Building Code of Canada, Ottawa, 2010.
- [13] American Society of Civil Engineers. Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-05), 2006.
- [14] Lin L, Hanna A, Sinha A, Tirca L. Structural response to differential settlement of its foundations. *Journal of Civil Engineering Research*. 2015; 5(3): 59-66. doi: **10.5923/j.jce.20150503.02**
- [15] Esteban Desbrousses R. Enhancing Building Resistance to Differential Settlement with Canadian Seismic Design Provisions, MSc Thesis, The Department of Building, Civil and Environmental Engineer-ing, Concordia University, 2020.
- [16] Lahri A, Garg V. Effect of differential settlement on frame forces-A parametric study. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2015; 4(9):453-464. doi: **10.15623/IJRET.2015.0409083**
- [17] Hanna A, Chen W. Response of multistory steel structure subjected to differential settlements of its foundation. *International Journal of Structural Integrity*. 2022 Jul 25; 13(4):594-610. doi: **10.1108/IJSI-08-2021-0083**
- [18] Sarkar R, Dutta SC, Saw R, Singh JP. Effect of differential settlement on seismic response of building structures. *InProceedings of the Institution of Civil Engineers-Municipal Engineer*. 2020 Sep; 173(3): 136-145. doi: **10.1680/jmuen.18.00032**
- [21] Standing Committee for Revision of Building Regulations Against Earthquakes. Regulations for the design of buildings against earthquakes-2800 standard. Fourth edition, Road, Housing and Urban Development Research Center. 2014. [In Persian]
- [22] Deputy for Strategic Supervision of Technical System Affairs. Guidelines for Seismic Improvement of Existing Buildings, Publication No. 360, First edition, 2013. [In Persian]