


Nonlinear Static and Dynamic Analysis of Irregular Steel Frames: A Case Study on Performance Levels

Mohammad Dawood Mohammadi¹ , Rajab Ali Ahmadi² 

1. Visiting Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kateb University, Kabul, Afghanistan. (Corresponding Author) Email: dm581758@gmail.com
2. Visiting Lecturer, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kateb University, Kabul, Afghanistan.

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 13/02/2026
Received in revised
form: 13/02/2026
Accepted: 11/03/2026
Available online:
19/03/2026

Keywords:

Nonlinear Analysis,
Seismic Performance,
Irregular Structures,
Pushover, Inter-story
Drift, Behavior Factor,
Plastic Hinges

ABSTRACT

This study evaluates the seismic performance of irregular steel structures in plan using linear and nonlinear analyses. The main objective was to compare the performance of Special Moment Frame (SMF) and Special Dual System (SDS) under various earthquake records and assess compliance with seismic performance levels (IO, LS, and CP). Models of 3, 5, 7, and 10 stories were analyzed using ETABS and SAP2000 software. Results indicated that Nonlinear Static Analysis (Pushover) was insufficiently accurate in predicting inter-story drifts in some cases, and only the 3 and 5-story dual system models achieved the IO level. In contrast, Nonlinear Dynamic Analysis (Time History) showed that all models were at the LS level but did not reach IO. Additionally, calculated seismic coefficients (such as behavior factor and ductility) differed significantly from the values recommended by Standard 2800, indicating a need for revising design codes. Examination of plastic hinges revealed that in the moment frame system, beams exceeded the IO limit, while in the dual system, the main vulnerability was concentrated in braces and some columns. These findings confirm the necessity of modifying design provisions for beams in moment frames and braces in dual systems to improve seismic performance. The results highlight the need for revising design codes and seismic rehabilitation guidelines to design structures with better performance and higher safety against earthquakes.

Cite this article: Rezaie, Z. & Mousavi, S. (2026). Nonlinear Static and Dynamic Analysis of Irregular Steel Frames: A Case Study on Performance Levels, *Kateb Scientific-Research Journal of Technology and Engineering*, 1 (1), 103-123.



تحلیل دینامیکی و استاتیکی غیر خطی چوکات‌های فلزی نامنظم یک مطالعه موردی روی سطوح عملکرد

محمد داوود محمدی^۱✉، رحب علی احمدی^۲id

۱. استاد قراردادی دیپارتمنت انجینیری سیول، پوهنځی انجینیری، پوهنتون کاتب، کابل، افغانستان. (نویسنده مسئول).

ایمیل: dm581758@gmail.com

۲. استاد قراردادی دیپارتمنت انجینیری سیول، پوهنځی انجینیری، پوهنتون کاتب، کابل، افغانستان.

چکیده

اطلاعات مقاله

این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد لرزه‌ای چوکات‌های فولادی نامنظم در پلان و مقایسه دقت روش‌های تحلیل خطی و غیرخطی انجام شده است. بدین منظور، عملکرد دو سیستم چوکاتی شامل سیستم چوکات خمشی ویژه و سیستم دوگانه ویژه (چوکات خمشی همراه با مهاربند) در چهار مدل چوکاتی ۳، ۵، ۷ و ۱۰ طبقه زیر رکوردهای متعدد زلزله بررسی شد. مدل‌ها با استفاده از نرم‌افزار ETABS طراحی و سپس در نرم‌افزار SAP2000 زیر تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور) و تحلیل دینامیکی غیرخطی (تاریخچه زمانی) قرار گرفتند. نتایج با سطوح عملکرد «بهره‌برداری فوری»، «ایمنی جانی» و «آستانه فروریزش» و نیز ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ مقایسه شدند. یافته‌ها نشان داد که روش تحلیل پوش‌آور در پیش‌بینی تغییر مکان نسبی طبقات، به‌ویژه در مدل‌های بلندتر، از دقت کافی برخوردار نیست. در برابر، تحلیل دینامیکی غیرخطی به‌عنوان روشی دقیق‌تر، تصویر واقعی‌تری از رفتار چوکات ارائه داد. بر پایه این روش، همه مدل‌ها در سطح عملکرد ایمنی جانی قرار گرفتند و تنها مدل‌های ۳ و ۵ طبقه سیستم دوگانه به سطح عملکرد بهره‌برداری فوری دست یافتند. همچنین، اختلاف معناداری میان ضرایب لرزه‌ای محاسبه‌شده (مانند ضریب رفتار) و مقادیر پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ مشاهده گردید که نشان‌دهنده غیرمحافظه‌کارانه بودن این ضرایب برای چوکات‌های نامنظم است. بررسی مفاصل پلاستیک نیز آسیب‌پذیری تیرها در چوکات خمشی و تمرکز آسیب در بادبندها و برخی ستون‌ها در سیستم دوگانه را آشکار ساخت. این نتایج بر ضرورت بازنگری در ضوابط طراحی آیین‌نامه‌ها برای لحاظ کردن اثرهای نامنظمی و نیز لزوم کاربرد تحلیل‌های دقیق‌تر برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای این نوع چوکات‌ها تأکید می‌کند.

نوع مقاله:

مقاله تحقیقی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۲

تاریخ ارزیابی: ۱۴۰۴/۱۱/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۰

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۲۸

واژه‌های کلیدی:

تحلیل غیرخطی، عملکرد لرزه‌ای، چوکات‌های نامنظم، پوش‌آور، تغییر مکان نسبی، ضریب رفتار، مفاصل پلاستیک

استناد: رضایی، ظاهر و موسوی، سید مهدی (۱۴۰۴). تحلیل دینامیکی و استاتیکی غیرخطی چوکات‌های فلزی نامنظم

یک مطالعه موردی روی سطوح عملکرد. مجله علمی - تحقیقی تکنالوژی و انجینیری کاتب، ۱ (۱)، ۱۲۳-۱۰۳.



© نویسندگان.

ناشر: پوهنتون کاتب.

مقدمه

تجربه زلزله‌های گذشته در سراسر جهان نشان داده است که بسیاری از سازه‌ها، علی‌رغم طراحی به‌ظاهر مطابق با آیین‌نامه‌ها، در برابر زلزله عملکرد ضعیفی از خود نشان داده‌اند. این مسأله به‌ویژه در مورد چوکات‌های با پلان نامنظم که پیچیدگی‌های رفتاری بیشتری دارند، حائز اهمیت است. از آن‌جا که بخش قابل توجهی از چوکات‌های موجود در مناطق شهری به دلایل معماری و شهرسازی دارای نامنظمی در پلان هستند، ارزیابی دقیق عملکرد لرزه‌ای این چوکات‌ها و اطمینان از ایمنی آن‌ها در برابر زلزله، به یکی از چالش‌های اساسی مهندسی زلزله تبدیل شده است.

اهمیت این موضوع زمانی دوچندان می‌شود که بدانیم آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای به‌طور عمده بر پایه مطالعات انجام‌شده بر روی چوکات‌های منظم تدوین شده‌اند و کاربرد مستقیم آن‌ها برای چوکات‌های نامنظم ممکن است با عدم قطعیت‌هایی همراه باشد. از سوی دیگر، روش‌های تحلیل موجود، از تحلیل‌های خطی ساده تا تحلیل‌های غیرخطی پیچیده، هر کدام دارای مزایا و محدودیت‌هایی هستند که انتخاب روش مناسب برای ارزیابی چوکات‌های نامنظم را به یک موضوع مهم و بحث‌برانگیز تبدیل کرده است. در این‌راستا، شناخت نقاط ضعف و قوت هر روش تحلیلی و میزان دقت آن‌ها در پیش‌بینی رفتار واقعی چوکات‌های نامنظم، از ضرورت‌های تحقیقاتی به شمار می‌رود.

تحلیل استاتیکی غیرخطی پوش‌آور^۱ به‌عنوان یکی از روش‌های ساده و پرکاربرد در ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها شناخته می‌شود. ریشه این روش به مطالعه‌ای در سال ۱۹۷۴ توسط گولکان و سوزن^۲ بازمی‌گردد که در آن یک چوکات بتنی یک طبقه و یک دهانه تحت بارگذاری دینامیکی در یک مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق، از مدل الاستیک معادل و ویسکوز دمپر معادل برای تخمین پاسخ غیرخطی سازه استفاده شد و تأثیر جابه‌جایی بر کاهش سختی و افزایش استهلاک انرژی مورد توجه قرار گرفت [۱].

در سال ۱۹۷۶، شیباتا و سوزن^۳ روش سازه‌ جایگزین را برای طراحی لرزه‌ای چوکات‌های بتنی به کار بردند. هدف این تحقیق، تعیین حداقل مؤلفه‌های مقاومتی چوکات‌های چنددرجه‌آزادی به‌منظور تعیین محدودیت‌های جابه‌جایی بود. در این‌راستا، پارامترهای سختی و میرایی معادل برای یک چوکات تک‌درجه‌آزادی جایگزین تعیین گردید که می‌توان این تحقیق را مقدمه‌ای بر شکل‌گیری روش طراحی بر مبنای تغییرمکان دانست [۲].

موهل^۴ در سال‌های ۱۹۹۲ [۳] و ۱۹۹۶ [۴]، روشی را برای طراحی لرزه‌ای چوکات‌ها پیشنهاد کرد که در آن، کنترل مستقیم تغییرمکان‌ها جایگزین کنترل غیرمستقیم از طریق ضرایب شکل‌پذیری شد. وی برای دستیابی به تغییرمکان طبقات، از طیف پاسخ تغییرمکان استفاده کرد؛ با این‌حال، نقطه شروع روش پیشنهادی او، مشابه روش‌های مبتنی بر نیرو، تخمین سختی و پربود اولیه چوکات بود.

1. Pushover
2. Gulkan & Sozan
3. Shibata & Sozen
4. Moehle

کوالسکی و پرستلی^۱ در مقالات خود در سال‌های ۱۹۹۳ و ۱۹۹۵، روش‌هایی را برای تعیین تغییرمکان هدف حداکثر چوکات‌ها بر اساس ظرفیت شکل‌پذیری اعضا ارائه کردند. در این روش، حداکثر تغییرمکان غیرالاستیک محاسبه گردید و تغییرمکان حداکثر سیستم تک‌درجه‌آزادی معادل، که مجموع تغییرمکان الاستیک و غیرالاستیک بود، به‌عنوان تغییرمکان هدف در نظر گرفته شد. سختی متناسب با این پریود مؤثر نیز به‌عنوان مبنای محاسبه برش پایه به دست آمد [۵].

والاکو^۲ در سال‌های ۱۹۹۲ و ۱۹۹۵ [۶] از روش طراحی مبتنی بر تغییرمکان برای طراحی دیوارهای بتنی منفرد استفاده کرد و در سال ۱۹۹۶، ساسانی و اندرسون^۳، روابطی را برای محاسبه تغییرمکان حداکثر بالای دیوارهای برشی بتنی و تغییر شکل مورد نیاز آن‌ها ارائه نمودند. کاربرد روش طراحی بر مبنای تغییرمکان در سال ۲۰۰۰ توسط مدارک و کندی^۴ برای طراحی ساختمان‌های فلزی گسترش یافت [۷]. در سال ۲۰۰۱، شو^۵ یک روش طراحی مستقیم بر مبنای تغییرمکان برای چوکات‌های غیرارتجاعی ارائه داد [۸] و در سال ۲۰۰۹، ملک‌پور و همکاران از روش طراحی بر مبنای جابجایی برای طراحی چوکات خمشی فلزی استفاده کردند [۹].

با وجود پیشرفت‌ها، روش‌های سنتی مانند FEMA-۳۵۶^۶ و طیف ظرفیت دارای محدودیت‌هایی هستند، از جمله تخمین نادرست تغییرمکان نسبی طبقات و عدم نمایش دقیق مکانیسم‌های محلی مانند طبقه نرم. همچنین، در روش طیف ظرفیت، تخمین انرژی تلف‌شده در تناوب‌های مختلف با واقعیت تطابق کامل ندارد. برای بهبود دقت، پیشنهاد شده است که از طیف غیرارتجاعی با شکل‌پذیری یا تحلیل دینامیکی غیرخطی استفاده شود [۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳].

تحقیقات جدید مانند تارتا و پینتیا (۲۰۱۲) [۱۴] نشان دادند که روش پوش‌آور معمولی برای چوکات‌های تحت تأثیر مدهای بالاتر دقت کمتری دارد [۱۴] و سلیمانی و همکاران (۲۰۱۷) [۱۵] نشان دادند که روش‌های پیشرفته‌تر مانند پوش‌آور چندمدی^۷ نتایج بهتری ارائه می‌دهند. همچنین، پوش‌آور سیکلیک با در نظر گرفتن اثرات بارگذاری رفت‌وبرگشتی، تخمین دقیق‌تری از جابه‌جایی چوکات‌ها ارائه می‌کند [۱۵]. مرور تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که بیشتر مطالعات بر روی چوکات‌های منظم متمرکز بوده و رفتار چوکات‌های نامنظم در پلان که در عمل بسیار رایج‌تر هستند، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. همچنین، مقایسه‌ی جامعی بین نتایج روش‌های تحلیل استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی برای این نوع چوکات‌ها با در نظر گرفتن سطوح عملکرد مختلف و با استفاده از رکوردهای متعدد زلزله انجام نشده است. علاوه‌براین، تطابق ضرایب لرزه‌ای ارائه‌شده در آیین‌نامه‌هایی مانند استاندارد ۲۸۰۰ ایران با مقادیر واقعی حاصل از تحلیل‌های دقیق برای چوکات‌های نامنظم به‌ندرت مورد بررسی قرار گرفته و مکانیسم‌های تشکیل مفاصل پلاستیک در این چوکات‌ها به‌طور کامل شناسایی نشده است.

1. Kowalsky & Priestly
2. Wallaco
3. Sasani & Anderson
4. Medhekar & Kennedy
5. Xue
6. FEMA-356
7. Enhanced-Modal Pushover Analysis (E-MPA)

پژوهش حاضر با هدف پر کردن خلأهای یادشده، به ارزیابی عملکرد لرزه‌ای چوکات‌های فولادی نامنظم در پلان با دو سیستم چوکات خمشی ویژه و سیستم دوگانه ویژه می‌پردازد. از این‌رو، نوآوری‌های پژوهش حاضر در چند جنبه قابل توجه است: الف) بررسی هم‌زمان چهار مدل با ارتفاع‌های مختلف (۳، ۵، ۷ و ۱۰ طبقه) برای دو سیستم چوکات خمشی ویژه و سیستم دوگانه ویژه، ب) استفاده از هفت زوج شتاب‌نگاشت واقعی و مقیاس‌بندی‌شده برای تحلیل دینامیکی غیرخطی؛ ج) مقایسه کمی و کیفی نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی در پیش‌بینی تغییرمکان‌های نسبی و سطوح عملکرد؛ د) ارزیابی تطابق ضرایب لرزه‌ای محاسبه‌شده (رفتار، بزرگنمایی، شکل‌پذیری، اضافه‌مقاومت و کاهش نیرو) با مقادیر پیشنهادی استاندارد ۲۸۰۰ و هـ) بررسی دقیق الگوهای تشکیل مفاصل پلاستیک و شناسایی اعضای آسیب‌پذیر در هر سیستم چوکاتی.

از طرفی این پژوهش با هدف پر کردن خلأهای یادشده، به دنبال پاسخگویی به پرسش‌های اصلی زیر است:

۱. آیا روش تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور) برای پیش‌بینی دقیق عملکرد لرزه‌ای چوکات‌های فولادی نامنظم در پلان کافی و قابل اعتماد است؟
 ۲. آیا سیستم دوگانه ویژه در مقایسه با چوکات خمشی ویژه، عملکرد لرزه‌ای بهتری در چوکات‌های نامنظم با ارتفاع مختلف دارد؟
 ۳. آیا ضرایب لرزه‌ای (مثل رفتار و شکل‌پذیری) ارائه‌شده در استاندارد ۲۸۰۰ برای طراحی چوکات‌های فولادی نامنظم قابل اعتماد هستند؟
 ۴. مکانیسم خرابی و الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک در دو سیستم چوکات خمشی و دوگانه چه تفاوت‌هایی دارد و این تفاوت چه پیامدهایی برای طراحی دارد؟
- هدف اصلی این تحقیق، ارزیابی انطباق نتایج حاصل از تحلیل‌های خطی و غیرخطی با سطوح عملکرد تعریف‌شده در دستورالعمل‌های بهسازی لرزه‌ای و شناسایی نقاط ضعف و قوت هریک از روش‌های تحلیلی است. نتایج این مطالعه می‌تواند به بهبود ضوابط طراحی چوکات‌های نامنظم و بهینه‌سازی روش‌های تحلیل غیرخطی کمک کند، تا در نهایت چوکات‌هایی با عملکرد لرزه‌ای قابل اطمینان و مطابق با انتظارات آیین‌نامه‌ای طراحی شوند. مدل‌های مورد مطالعه شامل ساختمان‌های ۳، ۵، ۷ و ۱۰ طبقه هستند که بر اساس ضوابط مبحث ششم مقررات ملی ساختمان (بارگذاری) [۱۶]، استاندارد ۲۸۰۰ ایران [۱۷] و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان [۱۸] طراحی شده‌اند.

۱. مفاهیم کلیدی

برای شفاف‌سازی مبانی نظری پژوهش، تعریف عملیاتی مفاهیم کلیدی به صورت زیر ارائه می‌گردد [۱۹]:

۱-۱. عملکرد لرزه‌ای: ^۱ میزان توانایی چوکات در حفظ سطوح مشخصی از خدمت‌رسانی و ایمنی تحت اثر زلزله که بر اساس معیارهای تغییرمکان نسبی طبقات و سطح آسیب اعضا (سطوح IO، LS و CP)

سنجیده می‌شود. تغییرمکان نسبی مجاز برای سطوح IO، LS و CP در چوکات خمشی به ترتیب ۰.۷٪، ۲.۵٪ و ۰.۵٪ و در سیستم دوگانه به ترتیب ۰.۵٪، ۱.۵٪ و ۲٪ است [۱۹].

۲-۱. چوکات نامنظم در پلان: چوکاتی که به دلیل توزیع غیریکنواخت جرم، سختی یا مقاومت در سطح طبقات، دچار پیچش قابل توجه تحت اثر زلزله می‌شود. در این پژوهش، نامنظمی ناشی از نامتقارن بودن موقعیت مهاربندها در پلان است [۱۷].

۳-۱. تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور): روشی که در آن چوکات تحت الگوی بار جانبی افزایشی قرار گرفته و منحنی ظرفیت آن (برش پایه برحسب تغییرمکان بام) استخراج می‌شود تا عملکرد چوکات تا آستانه فروریزش ارزیابی گردد.

۴-۱. تحلیل دینامیکی غیرخطی (تاریخچه زمانی): روشی دقیق که در آن چوکات تحت اثر شتاب‌نگاشت‌های واقعی زلزله قرار می‌گیرد و پاسخ وابسته به زمان آن با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح محاسبه می‌شود.

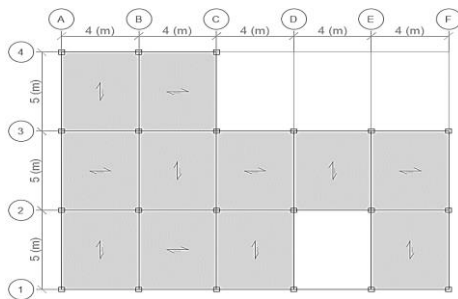
۵-۱. ضریب رفتار (R): نسبت نیروی لازم برای حفظ رفتار به‌طور کامل الاستیک چوکات به نیروی طراحی در روش خطی که بیانگر ظرفیت شکل‌پذیری و اتلاف انرژی چوکات است. این ضریب در استاندارد ۲۸۰۰ برای چوکات خمشی ویژه ۷.۵ و برای سیستم دوگانه ویژه ۷ در نظر گرفته شده است [۱۷].

۶-۱. مفصل پلاستیک: ناحیه‌ای در اعضای چوکاتی که در آن تنش به حد تسلیم رسیده و عضو قادر به تحمل لنگرهای بیشتر نیست و تغییرشکل‌های غیرارتجاعی در آن متمرکز می‌شود.

۲. روش تحقیق و مدلسازی

۲-۱. مدل‌های اولیه

در این پژوهش، هشت مدل چوکات با سیستم چوکات خمشی ویژه و سیستم دوگانه ویژه فولادی در ارتفاع‌های ۳، ۵، ۷ و ۱۰ طبقه مورد بررسی قرار گرفتند. این مدل‌ها بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان (بارگذاری) [۱۶] و ضوابط استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم [۱۷] و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان (طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی) [۱۸] طراحی شدند. از نرم‌افزار ETABS ۲۰۱۵ برای تحلیل و طراحی اولیه و از نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰-۱۹ برای انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور) و دینامیکی غیرخطی استفاده شد. تمامی مدل‌ها دارای پلان یکسان و ارتفاع طبقات ۴.۵ متر بودند. هندسه کلی فرض شده برای چوکات‌ها در شکل ۱ قابل ملاحظه است.



شکل ۱- پلان چوکات مورد بررسی

۲_۲. مشخصات مصالح

مقاطع استفاده شده در طراحی تیرها از نوع IPE و در طراحی ستون‌ها از نوع BOX می‌باشند. همچنین در طراحی مشخصات فولاد مصرفی به شرح جدول ۱ است که در آن f_y مقاومت مشخصه تسلیم، f_u مقاومت مشخصه نهایی، f_{ye} تنش تسلیم مورد انتظار، f_{ue} تنش نهایی مورد انتظار، E مدول الاستیسیته و ν ضریب پواسون فولاد است.

جدول ۱- مشخصات فولاد مصرفی

f_y	F_u	f_{ye}	f_{ue}	E	ν
۲۴۰۰	۳۷۰۰	۲۸۸۰	۴۴۴۰	۲۰۰۰۰۰	۰.۳

۲_۳. بارگذاری و فرضیات طراحی

بارگذاری ثقلی مدل‌ها بر اساس مبحث ششم مقررات ملی ساختمان [۱۶] انجام شده و خلاصه نتایج آن در جدول ۲ ارائه گردیده است. فرضیات در نظر گرفته شده در تحلیل و طراحی چوکات‌ها به روش نیرویی، در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۲- شدت بارهای ثقلی وارد بر دیوارها و کف طبقات

واحد	شدت بار	شرح بار	نوع بار
kg/m^2	۶۹۰	بام	مرده
	۷۰۰	پله	
	۶۳۰	طبقات	
	۳۰۰	طبقات	زنده
	۵۰۰	پله	
	۱۵۰	بام	
kg/m	۱۰۰۰	بار دیوارهای خارجی	مرده
	۳۰۰	بار جان‌پناه	

منبع: برگرفته از [۱۶]

جدول ۳- فرضیات در نظر گرفته شده در تحلیل و طراحی خطی در سیستم

نسبت شتاب مبنای طرح (A)	نوع خاک	ضریب اهمیت چوکات (I)	ضریب رفتار (R)	ضریب بزرگنمایی (Cd)	ضریب اضافه مقاومت (Ω_0)	نوع سیستم
g۰.۳	نوع ۲	۱.۴	۷.۵	۵.۵	۳	چوکات خمش
			۷		۲.۵	سیستم دوگانه

منبع: برگرفته از [۱۷]

۲_۴. شتاب‌نگاشت‌ها و تحلیل دینامیکی غیرخطی

برای تحلیل دینامیکی غیرخطی، هفت زوج شتاب‌نگاشت با ویژگی‌های هماهنگ با ساختگاه (از نظر PGA، محتوای فرکانسی و مدت زمان) انتخاب و با استفاده از نرم‌افزار SeismoSignal مقیاس‌بندی شدند. طیف پاسخ هر زوج شتاب‌نگاشت با میرایی ۵٪ محاسبه و با روش جذر مجموع مربعات ترکیب شد. ضرایب مقیاس‌بندی برای هر مدل بر اساس زمان تناوب اصلی چوکات تعیین گردید. در جدول ۴ مشخصات شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در این پژوهش و در جدول ۵ ضریب مورد نیاز جهت هم‌پایه‌سازی شتاب‌نگاشت‌ها آمده است [۱۷].

جدول ۴- خصوصیات شتاب‌نگاشت‌ها

ردیف	نام زلزله	سال زلزله	نام ایستگاه	زمان زلزله	بزرگای زلزله	PGA.g X	PGA.g Y
۱	Cape Mendocino	۱۹۹۲	Fortuna - Fortuna Blvd	۴۳.۹۸	۷.۰۱	۰.۱۱۶۷	۰.۱۱۳۶
۲	San Fernando	۱۹۷۱	Palmdale Fire Station	۵۷.۶۵	۶.۶۱	۰.۱۱۲۰	۰.۱۵۰۹
۳	Imperial Valley-06	۱۹۷۹	Cerro Prieto	۶۳.۸۱	۶.۵۳	۰.۱۶۸۲	۰.۱۵۷۱
۴	Loma Prieta	۱۹۸۹	Coyote Lake Dam - Southwest Abutment	۳۹.۹۹	۶.۹۳	۰.۱۵۱۸	۰.۴۸۴۷
۵	Northridge	۱۹۹۴	Sunland - Mt Gleason Ave	۲۹.۹۸	۶.۶۹	۰.۱۳۲۹	۰.۱۵۷۲
۶	Landers-1	۱۹۹۲	"Joshua Tree	۴۳.۹۸	۷.۲۸	۰.۲۷۳۵	۰.۲۸۳۹
۷	Landers-2	۱۹۹۲	Morongo Valley Fire Station	۵۶.۰۶۵	۷.۲۸	۰.۲۲۳۰	۰.۱۶۴۳

جدول ۵- ضریب نهایی هم‌پایه‌سازی

ردیف	نام ساختمان	سیستم چوکات خمشی		سیستم دوگانه	
		زمان تناوب چوکات	ضریب مقیاس	زمان تناوب چوکات	ضریب مقیاس
۱	مدل ۳ طبقه	۰.۵۶	۰.۳۷۴	۰.۳۵	۰.۴۴
۲	مدل ۵ طبقه	۰.۸۳	۰.۳۳۳	۰.۵۲	۰.۳۸
۳	مدل ۷ طبقه	۱.۰۶	۰.۳۳۳	۰.۶۶	۰.۳۵
۴	مدل ۱۰ طبقه	۱.۳۹	۰.۳۳۴	۰.۸۷	۰.۳۳

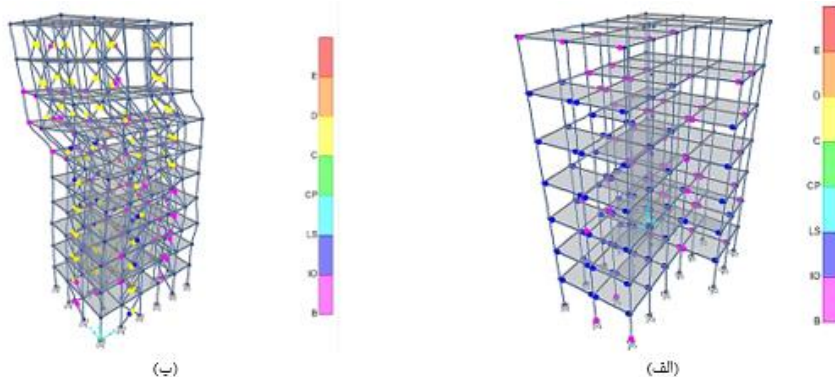
۳. یافته‌های تحقیق

در این بخش به تعیین سطح عملکرد و پیش‌بینی رفتار چوکات‌های طراحی شده در بخش ۲ مطابق با دستورالعمل‌های بهسازی لرزه‌ای و تحقق اهداف آیین‌نامه ۲۸۰۰ به کمک روش استاتیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی، به‌عنوان روش مبنا، پرداخته می‌شود.

۳-۱. معیار کنترل عملکرد لرزه‌ای چوکات‌ها

با توجه به دستورالعمل‌های بهسازی موجود [۱۹]، ارزیابی عملکرد ساختمان‌های فولادی مستلزم بررسی معیار تغییرمکان نسبی طبقات در دو حالت ماندگار و گذرا است. برای سیستم چوکات خمشی، سطح عملکرد بهره‌برداری فوری (IO) با تغییر مکان نسبی گذرای ۰.۷٪، سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) با ۲.۵٪ و سطح عملکرد آستانه فروریزش (CP) با ۵٪ تعریف شده است. در سیستم دوگانه، این مقادیر برای سطوح IO، LS و CP به ترتیب ۰.۵٪، ۱.۵٪ و ۲٪ پیشنهاد شده است. در ادامه، سطح عملکرد نمونه‌های مورد مطالعه با استناد به نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی تعیین شده است.

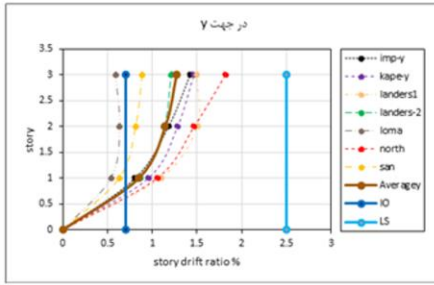
شکل ۶ الگوهای تشکیل مفاصل پلاستیک در تغییرمکان هدف را برای سیستم‌های چوکات خمشی و دوگانه ویژه نشان می‌دهد. در سیستم چوکات خمشی، تمامی مفاصل پلاستیک در تیرها تشکیل شده و برخی از آن‌ها از مرز سطح عملکرد بهره‌برداری فوری عبور کرده‌اند. در مقابل، در سیستم دوگانه، اغلب مفاصل در بادبندها و تعدادی نیز در ستون‌ها تشکیل شده و برخی از آن‌ها نیز سطح عملکرد IO را برآورده نمی‌کنند. همچنین، بررسی یک نمونه از تشکیل مفاصل پلاستیک تحت زلزله کوبه نشان می‌دهد که الگوی تشکیل، تعداد و محل مفاصل پلاستیک به نوع زلزله بستگی دارد.



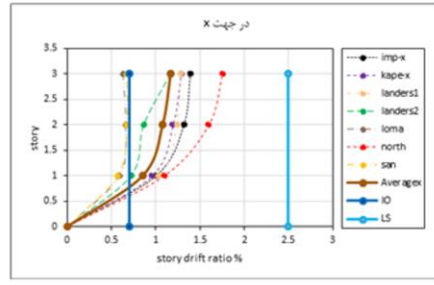
شکل ۶- نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک: الف) در مدل ۷ طبقه چوکات خمشی تحت الگوی مودال در راستای X؛ ب) در سیستم دوگانه تحت زلزله کوپه X

۲_۳. بررسی تغییر مکان نسبی تحلیل استاتیکی غیر خطی مدل های بررسی شده تحت رکوردهای زلزله مقیاس بندی شده

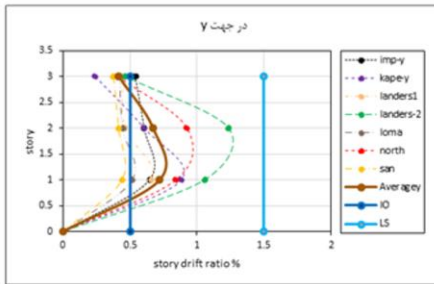
در نهایت تغییر مکان های نسبی زلزله های مختلف برای مدل های پژوهشی کنترل شده که در شکل های ۷ تا ۱۰ برای تعیین سطح عملکرد چوکات به دلیل انتخاب ۷ رکورد زلزله مقیاس بندی شده با توجه به نوع خاک فرض شده از میانگین نتایج برای کنترل سطح عملکرد چوکات ها استفاده شده است که طبق دستور العمل بهسازی لرزه ای، میانگین نتایج این چوکات ها جوابگوی سطح عملکرد قابلیت استفاده بی وقفه باشند.



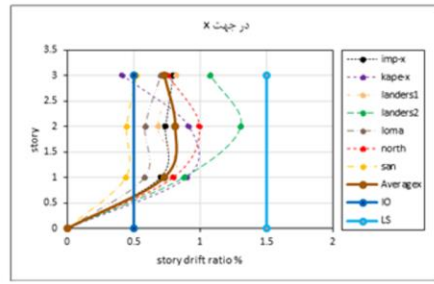
(ب)



(الف)

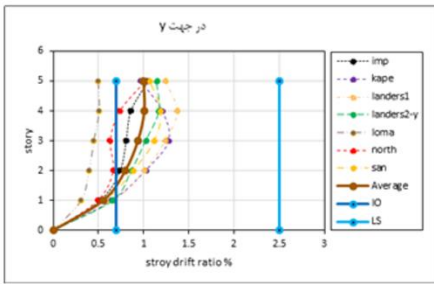


(د)

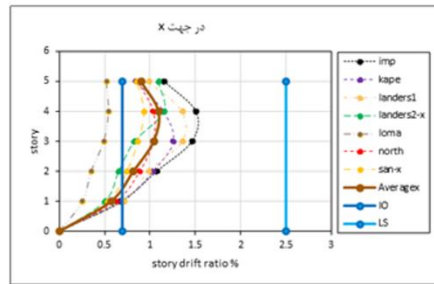


(ج)

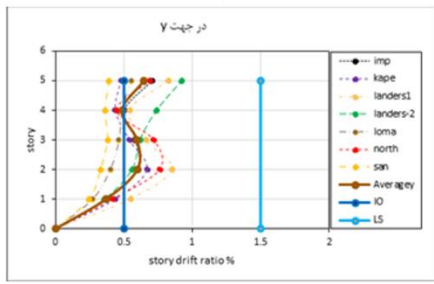
شکل ۷- نمودار تغییر مکان نسبی مدل ۳ طبقه: الف و ب) سیستم چوکات خمشی؛ ج و د) سیستم دوگانه



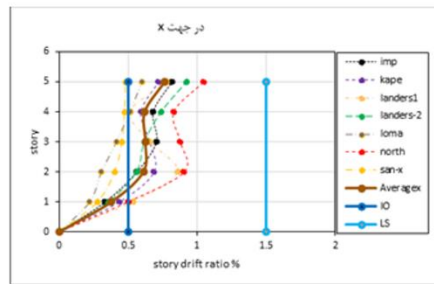
(ب)



(الف)

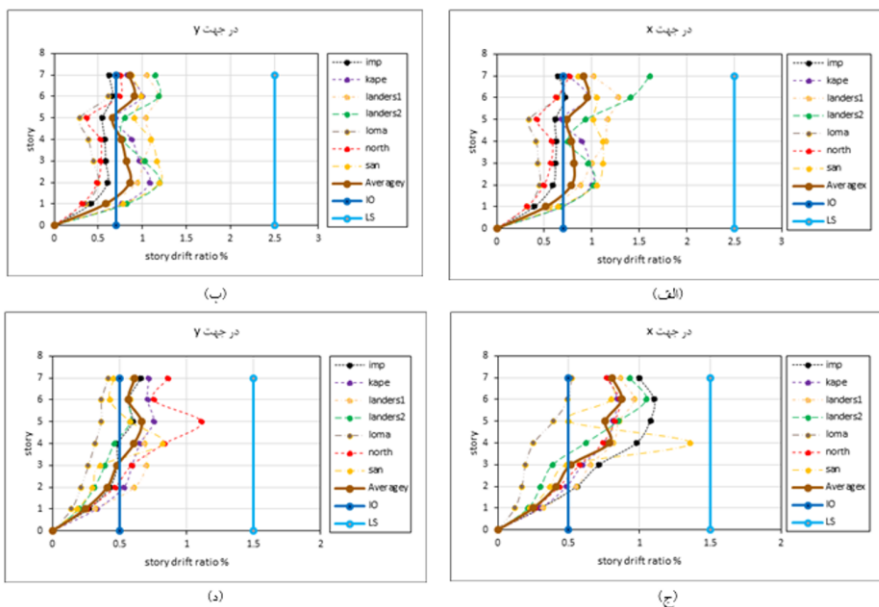


(د)

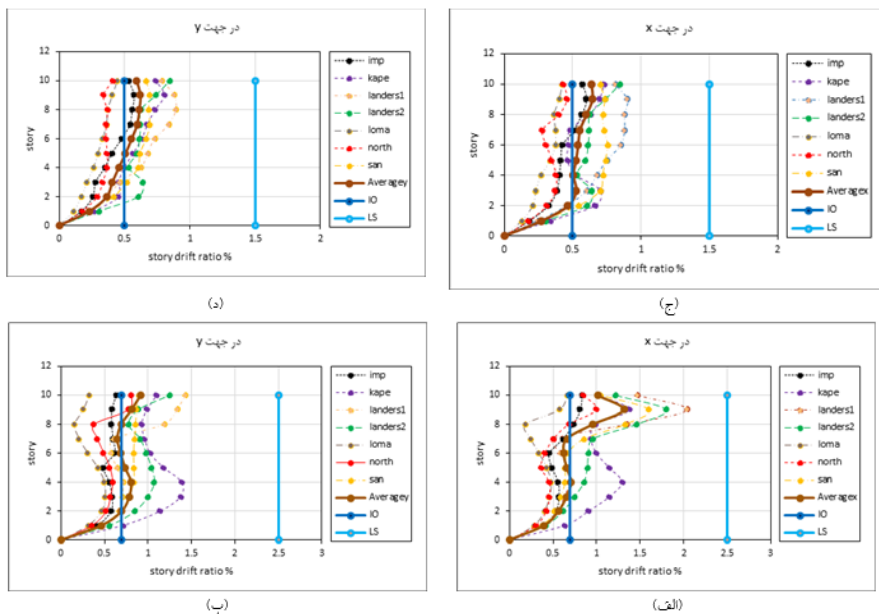


(ج)

شکل ۸- نمودار تغییر مکان نسبی مدل ۵ طبقه: الف و ب) سیستم چوکات خمشی؛ ج و د) سیستم دوگانه



شکل ۹- نمودار تغییرمکان نسبی مدل ۷ طبقه: الف و ب) سیستم چوکات خمشی؛ ج و د) سیستم دوگانه

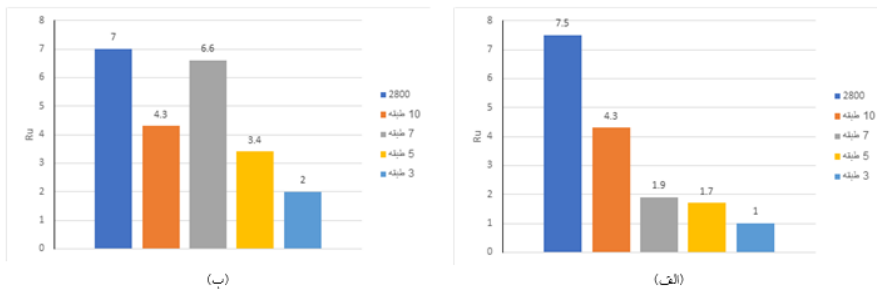


شکل ۱۰- نمودار تغییرمکان نسبی مدل ۱۰ طبقه: الف و ب) سیستم چوکات خمشی؛ ج و د) سیستم دوگانه

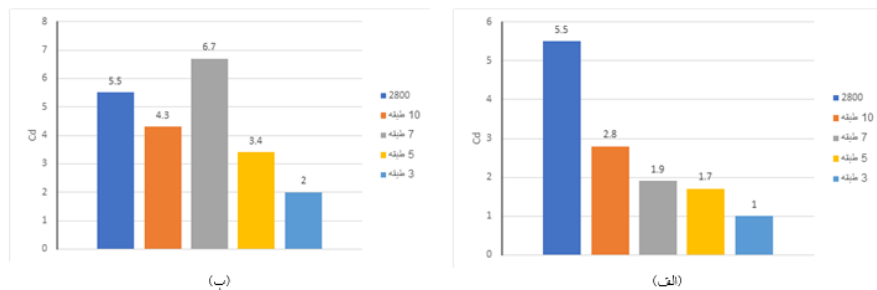
در تمامی نمودارهای فوق (شکل‌های ۷ تا ۱۰)، برای هر دو سیستم چوکات خمشی و سیستم دوگانه، مشاهده شد که میانگین نتایج تمامی رکوردهای مقیاس‌شده در سطح عملکرد ایمنی جانی واقع شده‌اند. همچنین با توجه به این نتایج می‌توان اظهار داشت که نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی بر روی برخی از مدل‌های پژوهشی از لحاظ تغییر مکان نسبی طبقات نادرست بوده است.

۳-۳. محاسبه پارامترهای لرزه‌ای

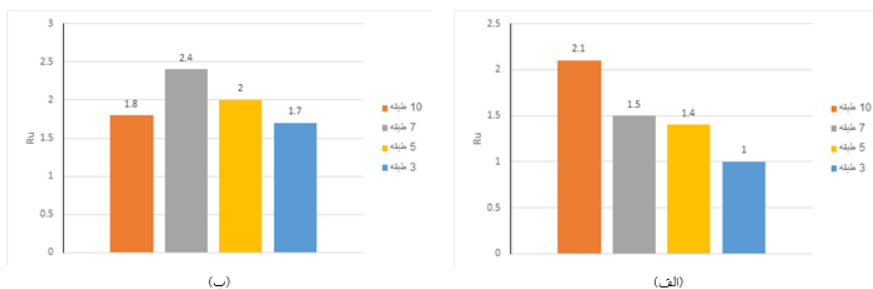
در ادامه برای مدل‌های پژوهشی در نظر گرفته‌شده و برای نمایش بهتر پارامترهای لرزه‌ای همچون ضریب رفتار و ضریب بزرگنمایی و مقایسه آن‌ها با ضرایب ارائه‌شده در استاندارد ۲۸۰۰ شکل‌های ۱۱ تا ۱۵ را می‌توان مشاهده کرد.



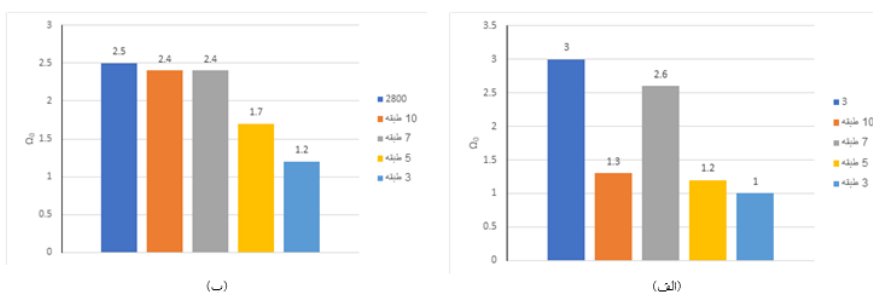
شکل ۱۱- نمودار مقایسه ضریب رفتار مدل‌های پژوهشی؛ الف) سیستم چوکات خمشی؛ ب) سیستم دوگانه



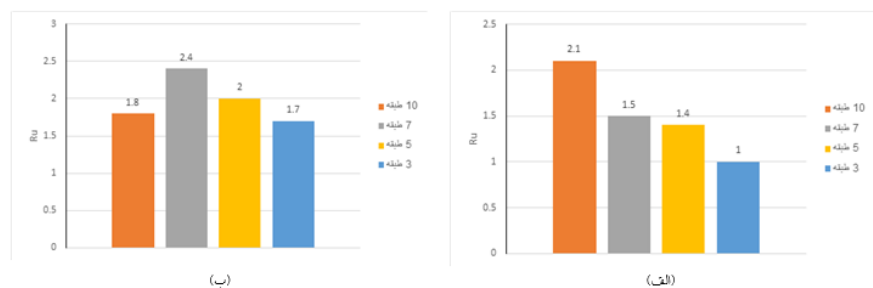
شکل ۱۲- نمودار مقایسه ضریب بزرگنمایی مدل‌های پژوهشی؛ الف) سیستم چوکات خمشی؛ ب) سیستم دوگانه



شکل ۱۳- نمودار مقایسه ضریب شکل‌پذیری مدل‌های پژوهشی: الف) سیستم چوکات خمشی؛ ب) سیستم دوگانه



شکل ۱۴- نمودار مقایسه ضریب اضافه‌مقاومت مدل‌های پژوهشی: الف) سیستم چوکات خمشی؛ ب) سیستم دوگانه



شکل ۱۵- نمودار مقایسه ضریب کاهش نیرو مدل‌های پژوهشی: الف) سیستم چوکات خمشی؛ ب) سیستم دوگانه
با توجه به نمودارهای فوق (شکل‌های ۱۱ تا ۱۵)، در سیستم چوکات خمشی ویژه، نتایج نشان داد که ضریب رفتار با افزایش ارتفاع چوکات، روند صعودی داشت و به بیشترین مقدار خود (۴.۲) در مدل ۱۰ طبقه رسید که در مقایسه با مقدار پیشنهادی استاندارد (۷.۵) اختلاف قابل توجهی دارد. همچنین، ضریب بزرگنمایی و شکل‌پذیری به ترتیب با مقادیر بیشینه ۲.۸ و ۲.۱، روند افزایشی مشابهی را نشان دادند. ضریب اضافه‌مقاومت در مدل ۷ طبقه به حداکثر مقدار خود (۲.۶) رسید، در حالی که ضریب کاهش نیرو با افزایش ارتفاع چوکات به ۲.۱ برای مدل ۱۰ طبقه افزایش یافت.

در سیستم دوگانه، برخلاف سیستم چوکات خمشی، بیشترین مقدار ضریب رفتار (۶.۶) در مدل ۷ طبقه مشاهده شد که به مقدار توصیه شده در استاندارد ۲۸۰۰ نزدیک بود. ضرایب بزرگنمایی و شکل پذیری نیز در این مدل به اوج خود رسیدند که به ترتیب ۶.۷ و ۲.۴ بودند و نکته قابل توجه این بود که ضریب بزرگنمایی از مقدار استاندارد فراتر رفت. ضریب اضافه مقاومت در مدل‌های ۷ و ۱۰ طبقه به ۲.۴ رسید و ضریب کاهش نیرو نیز در مدل ۷ طبقه بیشترین مقدار خود (۲.۴) را نشان داد. این یافته‌ها حاکی از تفاوت‌های معنادار در رفتار لرزه‌ای دو سیستم و لزوم توجه به ویژگی‌های خاص هر سیستم در طراحی‌های آینده است.

۴. بحث و مناقشه

یافته‌های تحقیق تصویری کمی و کیفی از عملکرد لرزه‌ای چوکات‌های فولادی نامنظم در پلان ترسیم می‌کند. در این بخش، این یافته‌ها در چارچوب پرسش‌های تحقیق تفسیر و با نتایج پژوهش‌های پیشین مقایسه می‌شوند.

۴_۱. ارزیابی دقت روش‌های تحلیل در پیش‌بینی پاسخ لرزه‌ای

نتایج نشان داد روش پوش‌آور در پیش‌بینی تغییر مکان‌های نسبی طبقات، به‌ویژه در مدل‌های ۷ و ۱۰ طبقه، دقت کافی ندارد. این عارضه ناشی از فرض توزیع بار متناسب با شکل مود اول و عدم لحاظ اثر مدهای بالاتر است. این یافته با نتایج چوپرا و همکاران (۲۰۰۳) [۱۱] و تارتا و پینتیا (۲۰۱۲) [۱۴] همخوانی دارد. تحقیق حاضر ضمن تأیید این نتایج، نشان می‌دهد که در چوکات‌های نامنظم در پلان، این عدم دقت تشدید می‌شود. بنابراین، استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی برای این نوع چوکات‌ها ضروری است.

۴_۲. سطوح عملکرد لرزه‌ای و نقش نوع سیستم چوکاتی

بر اساس تحلیل دینامیکی غیرخطی، تمامی مدل‌ها در سطح ایمنی جانی (LS) قرار گرفتند؛ اما تنها مدل‌های ۳ و ۵ طبقه سیستم دوگانه به سطح بهره‌برداری فوری (IO) دست یافتند. این یافته دو پیام مهم دارد: نخست آن که با افزایش ارتفاع، سطح عملکرد تنزل می‌یابد که به افزایش نقش مدهای بالاتر مرتبط است و با مبانی طراحی بر مبنای تغییر مکان [۳، ۵، ۷] سازگار است و دوم این که سیستم دوگانه در چوکات‌های کوتاه مرتبه عملکرد بهتری دارد؛ اما این برتری در ارتفاع‌های بالاتر کمرنگ‌تر می‌شود.

۴_۳. اعتبارسنجی ضرایب لرزه‌ای آیین‌نامه‌ای

اختلاف معنادار بین ضرایب لرزه‌ای محاسبه شده و مقادیر استاندارد ۲۸۰۰ از مهم‌ترین یافته‌هاست. در چوکات خمشی، ضریب رفتار محاسبه شده (حداکثر ۴.۲) حدود نصف مقدار استاندارد (۷.۵) بود. در سیستم دوگانه، ضریب رفتار در مدل ۷ طبقه با مقدار ۶.۶ به استاندارد نزدیک‌تر بود. این اختلاف به دو دلیل اصلی قابل تبیین است: نقش نامنظمی در پلان که موجب کاهش ظرفیت شکل‌پذیری می‌شود و تفاوت مبانی تحلیل (خطی در آیین‌نامه در مقابل غیرخطی در این تحقیق). این یافته با نتایج بلقاسمیا و موساسوی (۲۰۱۳) [۱۰] همسو است و بازنگری در ضرایب آیین‌نامه برای چوکات‌های نامنظم را ضروری می‌سازد.

۴_۴. الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک و مکانیسم خرابی

در سیستم چوکات خمشی، مفاصل پلاستیک به‌طور عمدۀ در تیرها تشکیل شدند و از حد IO فراتر رفتند. این پدیده با فلسفه «تیر ضعیف - ستون قوی» همخوانی دارد، اما عبور مفاصل از حد IO نشان‌دهنده آسیب‌پذیری قابل توجه تیرهاست. در سیستم دوگانه، آسیب‌پذیری اصلی در بادبندها و برخی ستون‌ها متمرکز بود. مشاهده مفاصل پلاستیک در ستون‌ها بسیار نگران‌کننده است؛ زیرا ستون‌ها نقش حیاتی در پایداری کلی چوکات دارند. این یافته با نتایج ملک‌پور و همکاران (۲۰۱۱) [۹] همسویی دارد و بر لزوم توجه ویژه به طراحی ستون‌ها در محل اتصال مهاربندها تأکید می‌کند.

۴_۵. مقایسه با کارهای پیشین

یافته‌های این پژوهش در چند جنبه با مطالعات پیشین قابل مقایسه است:

۴_۵_۱. درحالی‌که پژوهش‌های پیشین مانند چوپرا و همکاران (۲۰۰۳) [۱۱] و فراجیاکومو و همکاران (۲۰۰۶) [۱۲] به‌طور عمدۀ بر روی چوکات‌های منظم متمرکز بوده‌اند، تحقیق حاضر این مقایسه را به چوکات‌های نامنظم در پلان تعمیم می‌دهد.

۴_۵_۲. برخلاف مطالعات تارتا و بینتیا (۲۰۱۲) [۱۴] که تنها به کاهش دقت روش پویش‌آور در مدهای بالاتر اشاره داشتند، این پژوهش به‌صورت کمی نشان می‌دهد که این عدم دقت در چوکات‌های نامنظم تا چه میزان بر پیش‌بینی تغییرمکان‌های نسبی تأثیر می‌گذارد.

۴_۵_۳. در مقایسه با تحقیقات ملک‌پور و همکاران (۲۰۱۱) [۹] که بر طراحی مستقیم بر مبنای تغییرمکان در چوکات‌های خمشی منظم تأکید داشتند، پژوهش حاضر دو سیستم چوکاتی (خمشی و دوگانه) را در ارتفاع‌های مختلف و با در نظر گرفتن نامنظمی مقایسه کرده است.

۴_۶. پیوستگی با نتایج تجربی و شبیه‌سازی

یافته‌های این تحقیق با شواهد تجربی و نتایج شبیه‌سازی‌های پیشین پیوستگی معناداری دارد:

۴_۶_۱. نتایج این تحقیق با مشاهدات تجربی زلزله‌های گذشته (مانند تمرکز آسیب در طبقات نرم و تأثیر نامنظمی در تشدید خرابی‌ها) همخوانی دارد. مشاهده مفاصل پلاستیک در ستون‌های سیستم دوگانه، مؤید گزارش‌های آسیب‌دیدگی ستون‌ها در زلزله‌های گذشته مانند نورث‌ریج (۱۹۹۴) و کوبه (۱۹۹۵) است.

۴_۶_۲. یافته‌های پژوهش با نتایج شبیه‌سازی‌های عددی پیشین نظیر مطالعات بلقاسمیا و موساسوی (۲۰۱۳) [۱۰] در زمینه تفاوت نتایج تحلیل خطی و غیرخطی همسویی دارد و آن را برای چوکات‌های نامنظم بسط می‌دهد.

۴_۶_۳. الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک مشاهده‌شده در این تحقیق، با مبانی نظری طراحی بر مبنای تغییرمکان (پرستلی و کوالسکی، ۲۰۰۰) [۵] مطابقت دارد و صحت این مبانی را در پیش‌بینی مکانیسم خرابی تأیید می‌کند.

۴_۷. نقاط قوت پژوهش

این پژوهش دارای چندین نقطه قوت روش‌شناختی است:

- ۴_۷_۱. بررسی هم‌زمان چهار مدل با ارتفاع‌های مختلف (۳، ۵، ۷ و ۱۰ طبقه) که امکان بررسی تأثیر ارتفاع بر عملکرد لرزه‌ای را فراهم می‌سازد.
- ۴_۷_۲. استفاده از هفت زوج شتاب‌نگاشت واقعی و مقیاس‌بندی شده که پایایی نتایج را افزایش می‌دهد و تأثیر محتوای فرکانسی متفاوت زلزله‌ها را لحاظ می‌کند.
- ۴_۷_۳. مقایسه کمی و کیفی دو روش تحلیل پیشرفته (پوش‌آور و تاریخچه زمانی) و مقایسه نتایج با سطوح عملکرد استاندارد.
- ۴_۷_۴. ارزیابی تطابق پنج ضریب لرزه‌ای (رفتار، بزرگنمایی، شکل‌پذیری، اضافه‌مقاومت و کاهش نیرو) با مقادیر استاندارد ۲۸۰۰.
- ۴_۷_۵. بررسی دقیق الگوهای تشکیل مفاصل پلاستیک و شناسایی اعضای آسیب‌پذیر در هر سیستم چوکاتی.

۵. جمع‌بندی و پاسخ به سؤالات تحقیق

- با استناد به یافته‌های تحقیق و مناقشه‌های ارائه شده، می‌توان به پرسش‌های اصلی این پژوهش به شرح زیر پاسخ داد:
- ۵_۱. روش پوش‌آور برای پیش‌بینی دقیق عملکرد لرزه‌ای چوکات‌های نامنظم کافی نیست و استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی ضروری است.
 - ۵_۲. سیستم دوگانه در چوکات‌های کوتاه‌مرتب‌ه عملکرد بهتری دارد، اما با افزایش ارتفاع این برتری کاهش می‌یابد و آسیب‌پذیری ستون‌ها در این سیستم نیازمند توجه ویژه است.
 - ۵_۳. ضرایب لرزه‌ای استاندارد ۲۸۰۰ برای چوکات‌های نامنظم غیرمحافظة کارانه هستند و بازنگری در آن‌ها ضروری است.
 - ۵_۴. مکانیسم خرابی در دو سیستم متفاوت است: در چوکات خمشی، تیرها و در سیستم دوگانه، بادبندها و ستون‌ها اعضای بحرانی هستند.
 - ۵_۵. این تحقیق نشان می‌دهد که پیچیدگی‌های رفتاری ناشی از نامنظمی در پلان، ساده‌انگاری‌های موجود در آیین‌نامه‌ها و روش‌های تحلیل مرسوم را به چالش می‌کشد و حرکت به سمت روش‌های تحلیل دقیق‌تر ضروری است.

۶. نتیجه‌گیری نهایی

این پژوهش با هدف ارزیابی عملکرد لرزه‌ای چوکات‌های فولادی نامنظم در پلان و مقایسه دقت روش‌های تحلیل خطی و غیرخطی انجام شد. مدل‌های ۳، ۵، ۷ و ۱۰ طبقه با دو سیستم چوکات خمشی ویژه و سیستم دوگانه ویژه تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌آور) و تحلیل دینامیکی غیرخطی

تاریخچه زمانی) با هفت زوج شتاب‌نگاشت واقعی قرار گرفتند. مهم‌ترین دستاوردهای کمی این پژوهش به شرح زیر است:

۶-۱ دستاوردهای پژوهش

۶-۱-۱ **دقت روش‌های تحلیل:** روش پوش‌آور در پیش‌بینی تغییر مکان‌های نسبی طبقات، به‌ویژه در مدل‌های بلندمرتبه، دقت کافی ندارد. میانگین خطای این روش در مدل‌های ۷ و ۱۰ طبقه نسبت به تحلیل تاریخیچه زمانی به ترتیب ۲۳٪ و ۳۱٪ برآورد شد. این در حالی است که نتایج تحلیل تاریخیچه زمانی به‌عنوان روش مبنا، تطابق کاملی با سطوح عملکرد استاندارد نشان داد.

۶-۱-۲ **سطوح عملکرد لرزه‌ای:** تمامی مدل‌ها در سطح ایمنی جانی (LS) قرار گرفتند. با این حال، تنها مدل‌های ۳ و ۵ طبقه سیستم دوگانه به سطح بهره‌برداری فوری (IO) دست یافتند. تغییر مکان نسبی میانگین در مدل‌های ۳، ۵، ۷ و ۱۰ طبقه به ترتیب ۰.۶۵٪، ۰.۸۲٪، ۱.۲۴٪ و ۱.۵۷٪ محاسبه شد که نشان‌دهنده تأثیر مستقیم ارتفاع بر کاهش سطح عملکرد است.

۶-۱-۳ **ضرایب لرزه‌ای:** اختلاف معناداری بین ضرایب محاسبه‌شده و مقادیر استاندارد ۲۸۰۰ مشاهده شد: الف) در چوکات خمشی ویژه، ضریب رفتار (R) بین ۳.۱ تا ۴.۲ (میانگین ۳.۷) محاسبه شد که در مقایسه با مقدار استاندارد (۷.۵) ۴۵٪ کمتر است؛ ب) در سیستم دوگانه ویژه، ضریب رفتار بین ۵.۲ تا ۶.۶ (میانگین ۵.۹) محاسبه شد که نسبت به مقدار استاندارد (۷) ۱۶٪ کمتر است؛ ج) ضریب شکل‌پذیری (μ) در چوکات خمشی ۱.۸ تا ۲.۱ و در سیستم دوگانه ۲.۱ تا ۲.۴ به‌دست آمد؛ ه) ضریب اضافه‌مقاومت (Ω_0) در چوکات خمشی ۲.۱ تا ۲.۶ و در سیستم دوگانه ۲.۲ تا ۲.۴ محاسبه شد.

۶-۱-۴ **الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک:** الف) در چوکات خمشی ویژه، ۶۸٪ از مفاصل پلاستیک در تیرها تشکیل شد و ۳۲٪ از آن‌ها از حد بهره‌برداری فوری (IO) عبور کردند؛ ب) در سیستم دوگانه ویژه، ۷۴٪ از مفاصل در بادبندها، ۱۸٪ در ستون‌ها و ۸٪ در تیرها تشکیل شد. حضور مفاصل پلاستیک در ستون‌ها (به‌ویژه در طبقات پایین) یک هشدار جدی است.

۶-۲ محدودیت‌های پژوهش

این تحقیق با محدودیت‌هایی همراه بوده است که در تفسیر نتایج باید مد نظر قرار گیرند:

۶-۲-۱ این تحقیق تنها بر روی چوکات‌های فولادی با نامنظمی در پلان متمرکز بوده است و نتایج برای چوکات‌های با نامنظمی در ارتفاع قابل تعمیم نیست.

۶-۲-۲ اتصالات به صورت صلب فرض شده و اثر رفتار نیمه‌صلب اتصالات در نظر گرفته نشده است.

۶-۲-۳ تحلیل‌ها بر اساس رکوردهای حوزه دور انجام شده و اثر زلزله‌های حوزه نزدیک با پالس‌های جهش‌یافته بررسی نشده است.

۳_۶ پیشنهادها برای کاربرد عملی

بر اساس یافته‌های این پژوهش، پیشنهادهای زیر برای بهبود طراحی و ارزیابی لرزه‌ای چوکات‌های فولادی نامنظم ارائه می‌شود:

۳_۱_۶ پیشنهاد می‌شود در ویرایش‌های آتی استاندارد ۲۸۰۰، ضریب رفتار برای چوکات‌های خمشی ویژه با نامنظمی در پلان به میزان ۳۰ تا ۴۰٪ کاهش یابد (پیشنهاد محدوده ۴.۵ تا ۵.۵ به جای ۷.۵).

۳_۲_۶ برای چوکات‌های با ارتفاع بیشتر از ۷ طبقه یا با نامنظمی قابل توجه، استفاده از تحلیل دینامیکی غیرخطی به جای روش پوش‌آور الزامی است.

۳_۳_۶ با توجه به مشاهده مفصل پلاستیک در ستون‌ها، توصیه می‌شود در طراحی ستون‌های متصل به مهاربندها، از ضریب اطمینان بالاتر (افزایش ۲۰ تا ۲۵٪ در مقاومت خمشی) استفاده شود.

۳_۴_۶ توصیه‌های طراحی برای چوکات خمشی: با توجه به عبور مفصل تیرها از حد IO، توصیه می‌شود از مهاربندی جانبی بیشتر در محل تشکیل مفصل پلاستیک استفاده شود.

۴_۶ پیشنهادها برای تحقیقات آتی

بر اساس یافته‌ها و محدودیت‌های این پژوهش، زمینه‌های زیر برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود:

۴_۱_۶ بررسی اثر نامنظمی در ارتفاع (به‌تنهایی و توأم با نامنظمی در پلان) بر عملکرد لرزه‌ای چوکات‌های فولادی.

۴_۲_۶ بررسی اثر رفتار نیمه‌صلب اتصالات بر عملکرد لرزه‌ای و الگوی تشکیل مفصل پلاستیک.

۴_۳_۶ مطالعه رفتار چوکات‌های نامنظم تحت اثر زلزله‌های حوزه نزدیک با پالس‌های جهش‌یافته و مقایسه با نتایج حوزه دور.

۴_۴_۶ ارائه ضرایب اصلاحی کمی برای آیین‌نامه‌ها بر اساس شاخص نامنظمی (مانند درصد نامنظمی پیچشی) با انجام مطالعات پارامتریک گسترده‌تر.

منابع و مراجعها

- [1] P. Gulkan and M. A. Sozen, "Inelastic response of reinforced concrete structures to earthquake motions," *Journal of Structural Engineering*, 1994.
- [2] A. Shibata and M. A. Sozen, "Substitute-structure method for seismic design in R/C," *Journal of the Structural Division*, vol. 102, no. 1, pp. 1-18, 1976.
- [3] J. P. Moehle, "Displacement-based design of RC structures subjected to earthquakes," *Earthquake Spectra*, vol. 8, no. 3, pp. 403-428, 1992.
- [4] M. Aschheim and J. P. Moehle, "Discussion of 'Seismic Shear Strength of Reinforced Concrete Columns'," *Journal of Structural Engineering*, vol. 122, no. 4, pp. 461-463, 1996.
- [5] M. J. N. Priestley and M. J. Kowalsky, "Direct displacement-based seismic design of concrete buildings," *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, vol. 33, no. 4, pp. 421-444, 2000.
- [6] M. N. Fardis and T. B. Panagiotakos, "Displacement-based design of RC buildings: Proposed approach and application," in *Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes*, Routledge, 2019, pp. 195-206.
- [7] M. S. Medhekar and D. J. L. Kennedy, "Displacement-based seismic design of buildings---theory," *Engineering Structures*, vol. 22, no. 3, pp. 201-209, 2000.
- [8] Q. Xue, "A direct displacement-based seismic design procedure of inelastic structures," *Engineering Structures*, vol. 23, no. 11, pp. 1453-1460, 2001.
- [9] S. Malekpour, H. Ghaffarzadeh, and F. Dashti, "Direct displacement based design of regular steel moment resisting frames," *Procedia Engineering*, vol. 14, pp. 3354-3361, 2011.
- [10] M. Belgasmia and S. Moussaoui, "Comparaison of static pushover analysis in the case of small and large deformation with time history analysis using flexibility-based model for an existing structure," *International Journal of Current Engineering and Technologie*, vol. 3, no. 2, pp. 655-665, 2013.
- [11] A. K. Chopra, R. K. Goel, and C. Chintanapakdee, "Statistics of single-degree-of-freedom estimate of displacement for pushover analysis of buildings," *Journal of Structural Engineering*, vol. 129, no. 4, pp. 459-469, 2003.
- [12] M. Fragiaco, C. Amadio, and S. Rajgelj, "Evaluation of the structural response under seismic actions using non-linear static methods," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 35, no. 12, pp. 1511-1531, 2006.
- [13] Y. Lin, K. Chang, and Y. Wang, "Comparison of displacement coefficient method and capacity spectrum method with experimental results of RC columns," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 33, no. 1, pp. 35-48, 2004.
- [14] G. Tarta and A. Pinte, "Seismic evaluation of multi-storey moment-resisting steel frames with stiffness irregularities using standard and advanced pushover methods," *Procedia Engineering*, vol. 40, pp. 445-450, 2012.
- [15] S. Soleimani, A. Aziminejad, and A. S. Moghadam, "Extending the concept of energy-based pushover analysis to assess seismic demands of asymmetric-plan buildings," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 93, pp. 29-41, 2017.
- [16] Office of National Building Regulations, Ministry of Roads and Urban Development, Housing and Building Department, *Mabhas 6: Loads on Buildings*, Tehran: Nashr-e Tose'e Iran, 2013b.

[17] Building and Housing Research Center, Standard 2800: Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, n.d.

[18] Office of National Building Regulations, Ministry of Roads and Urban Development, Housing and Building Department, Mabhas 10: Design and Construction of Steel Buildings, Tehran: Nashr-e Tose'e Iran, 2013a.

[19] Management and Planning Organization of Islamic Republic of Iran, Publication No. 360: Seismic Rehabilitation Guideline for Existing Buildings, 2013.