



University Of Qom



Numerical Evaluation of the Seismic Performance of a Concrete Staircase Isolated with Compression Struts

Seyed Mohammad Chavoshi¹, Ehsan Dehghani², Shakiba Kamali³

1. Master Degree Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: m.chavoshi@stu.qom.ac.ir
2. Corresponding author, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: dehghani@qom.ac.ir
3. Master Degree Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: s.kamali@stu.qom.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 28 Sep 2025
Revised 02 Dec 2025
Accepted 03 Dec 2025
Published 04 Dec 2025

Keywords:
Staircase,
Seismic Isolation,
Compression Strut,
Finite Element Analysis,
Seismic Behavior.

ABSTRACT

The reinforced concrete stair system, as a critical component of a safe egress path in buildings, has shown considerable vulnerability during past earthquakes. Despite the widespread use of seismic separation techniques, their effectiveness requires careful evaluation. The objective of this study is to numerically assess the performance and failure mechanisms of a commonly used separation method—namely, the use of compression struts in reinforced concrete moment-resisting frames. To this end, four finite element models were developed: a bare frame (baseline), a fully connected stair–frame system, and two separated configurations using compression struts (one with a continuous flight and another with the flights separated at the mid-landing). These models were subjected to nonlinear static analysis in ABAQUS. The results indicate that the commonly used configuration with continuous flights is ineffective in reducing stiffness and seismic interaction with the main structure. This model exhibits similar behavior to the fully connected stair system, with plastic hinges forming in the stair flights. In contrast, separating the flights at the mid-landing eliminates damage in the flights but concentrates it within the compression struts, which may still compromise the safety of the egress path. This study highlights the inherent limitations of the compression-strut separation method and emphasizes the necessity of complete flight separation at the mid-landing as a design requirement.

Cite this article: Chavoshi SM, Dehghani E, Kamali SH. Numerical Evaluation of the Seismic Performance of a Concrete Staircase Isolated with Compression Struts. *Civil Infrastructure Researches*. 2025; 11(2): 171-183. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.13975.1655>



Introduction

The staircase system, as one of the vital components of a building, plays a crucial role in providing a safe evacuation route for occupants and facilitating rescue operations after an earthquake. However, numerous reports from past seismic events, including the Wenchuan and Sarpol-e Zahab earthquakes, have highlighted the high vulnerability of these components. Staircase failure not only blocks the escape path but, due to unintended interaction with the main structural system, may also lead to unforeseen damages such as the short-column effect in adjacent columns and the attraction of significant seismic forces. These damages primarily stem from neglecting the three-dimensional behavior and considerable stiffness of stair systems in conventional design procedures, where sloped ramps behave similarly to diagonal braces.

To mitigate this detrimental interaction, seismic separation of stair systems from the main structure has been widely proposed, aiming to transform the staircase into a truly non-structural component. One of the common practical approaches to achieve this goal is the use of short concrete compression struts to support the gravity loads of intermediate landings. This method, which is relatively simple to implement, is intended to prevent the direct transfer of lateral forces between floors. Although several studies have investigated different separation strategies, a rigorous quantitative evaluation of the performance of the compression-strut method and an examination of its potential failure mechanisms—particularly with respect to varying construction details at the intermediate landing—remain necessary.

The novelty of this research lies in conducting a precise and quantitative assessment of the efficiency of the compression-strut separation method through advanced finite element modeling. In this regard, for the first time, the seismic performance of the system is directly compared in two key construction scenarios: continuous return ramps at the intermediate landing versus separated ramps. The behavior of these models

is evaluated against two limit cases—frames without stairs (representing the ideal baseline) and frames with fully connected stairs (representing the worst-case condition). This comparative approach not only clarifies the actual effectiveness of the separation method but also helps identify and analyze its hidden failure mechanisms.

Methodology

To mitigate the detrimental interaction between staircases and the main structure, various seismic separation techniques have been proposed, with the use of short concrete compression struts being one of the most common in practice. Despite its widespread application, comprehensive numerical investigations of this method—particularly under different construction details at intermediate landings—remain limited.

In this study, four three-dimensional finite element models of a reinforced concrete moment-resisting frame were developed in ABAQUS: (1) a bare frame (reference model), and (2) a staircase isolated with compression struts and separated ramps at the intermediate landing. Nonlinear static (pushover) analyses were carried out using advanced constitutive models for both concrete and reinforcement. The numerical model was validated against analytical stress–strain relationships as well as experimental beam test results.

Results

The analysis demonstrated that the compression strut isolation with integrated ramps was largely ineffective, as its stiffness and seismic response were nearly identical to the fully connected case, with plastic hinges forming in the ramps. In contrast, the separated-ramp configuration significantly reduced stiffness and interaction forces, yielding behavior closer to the bare frame model. Damage localization also shifted: while in connected and integrated cases ramps suffered major damage, in the separated-ramp case failure concentrated in the compression struts, which acted as sacrificial elements. Although this improved seismic behavior, the

vulnerability of struts raised concerns for maintaining the safety of egress routes.

Conclusion

The study highlights the ineffectiveness of compression strut isolation when ramps remain integrated and emphasizes that complete ramp separation at the intermediate landing is a critical design requirement. Even in the optimized separated configuration, the concentration of damage in struts suggests that these elements should be detailed as ductile fuses to ensure reliable seismic performance.

Funding Statement

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Declaration of Competing Interest

■ **No competing interests:** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors' Contributions

Seyed Mohammad Chavoshi:

Numerical modeling; Simulation development; Data analysis; Visualization; Writing – original draft; Writing – review & editing.

Ehsan Dehghani:

Scientific supervision; Guidance of research direction; Methodological oversight; Writing – review & editing.

Shakiba Kamali:

Numerical modeling; Model validation; Verification of analytical and numerical results; Writing – original draft; Writing – review & editing.

ارزیابی عددی عملکرد لرزه‌ای دستگاه پله بتنی جداسازی شده با ستونک فشاری

سیدمحمد چاوشی^۱، احسان دهقانی^۲، شکیبا کمالی^۳

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: m.chavoshi@stu.qom.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: dehghani@qom.ac.ir

۳. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: s.kamali@stu.qom.ac.ir

چکیده

دستگاه پله بتنی به عنوان جزء حیاتی مسیر خروج ایمن در ساختمان‌ها، در زلزله‌های گذشته آسیب‌پذیری قابل توجهی از خود نشان داده است. با وجود رواج روش‌های جداسازی لرزه‌ای، کارایی آن‌ها نیازمند ارزیابی دقیق است. هدف این پژوهش، ارزیابی عددی عملکرد و مکانیزم‌های خرابی یک روش متداول جداسازی، یعنی استفاده از ستونک‌های فشاری در قاب‌های خمشی بتن آرمه است. بدین منظور، چهار مدل اجزا محدود شامل قاب بدون پله (مینا)، قاب با پله کاملاً متصل و دو حالت جداسازی با ستونک فشاری (با رمپ یکپارچه و با رمپ جداشده در پاگرد میانی) در نرم‌افزار ABAQUS تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که جداسازی با ستونک فشاری در حالت اجرایی رایج (رمپ یکپارچه)، در کاهش سختی و اندرکنش لرزه‌ای با سازه اصلی ناکارآمد است. این مدل، با تشکیل مفاصل پلاستیک در رمپ‌ها، عملکردی مشابه حالت پله کاملاً متصل از خود نشان می‌دهد. در مقابل، جداسازی رمپ‌ها در پاگرد میانی، خرابی را از رمپ‌ها حذف می‌کند؛ اما آسیب را در ستونک‌های فشاری متمرکز می‌سازد که این امر همچنان می‌تواند ایمنی مسیر خروج را تهدید کند. این پژوهش محدودیت‌های ذاتی روش جداسازی با ستونک فشاری را برجسته کرده و بر لزوم جداسازی کامل رمپ‌ها در پاگرد میانی به عنوان یک الزام طراحی تأکید می‌نماید.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۱۳

کلیدواژه‌ها:

دستگاه پله،
جداسازی لرزه‌ای،
ستونک فشاری،
تحلیل اجزای محدود،
رفتار لرزه‌ای.

استناد: چاوشی سیدمحمد، دهقانی احسان، کمالی شکیبا. ارزیابی عددی عملکرد لرزه‌ای دستگاه پله بتنی جداسازی شده با ستونک فشاری.

پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی، ۱۴۰۴؛ ۱۱(۲): ۱۷۱-۱۸۳. <https://doi.org/10.22091/cer.2025.13975.1655>

۱- مقدمه

دستگاه پله به عنوان یکی از عناصر کلیدی ساختمان، نقشی تعیین‌کننده در تأمین مسیر ایمن برای خروج اضطراری ساکنان و همچنین تسهیل عملیات امدادرسانی پس از وقوع زلزله ایفا می‌کند. با این حال، مستندات حاصل از زلزله‌های گذشته، از جمله رخدادهای ونچوان و سرپل ذهاب، آسیب‌پذیری قابل توجه این عضو را آشکار ساخته‌اند. خرابی دستگاه پله نه تنها می‌تواند مسیر فرار را مسدود کند، بلکه در اثر اندرکنش نامطلوب با سازه اصلی، زمینه‌ساز بروز خسارات ثانویه‌ای همچون ایجاد پدیده ستون کوتاه در ستون‌های مجاور و انتقال نیروهای لرزه‌ای پیش‌بینی‌نشده نیز می‌شود. این آسیب‌پذیری عمدتاً ناشی از بی‌توجهی به رفتار سه‌بعدی و سختی بالای دستگاه پله در فرآیند طراحی متداول است؛ جایی که رمپ‌های شیب‌دار مشابه مهاربندهای قطری عمل می‌کنند. به‌منظور کاهش این اندرکنش‌های مخرب، راهکار جداسازی لرزه‌ای دستگاه پله از سازه اصلی به طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است تا این عضو به صورت یک جزء غیرسازه‌ای واقعی عمل کند. در میان روش‌های اجرایی موجود، استفاده از ستونک‌های فشاری کوتاه بتنی برای تحمل بارهای ثقلی پاگرد میانی، روشی متداول و نسبتاً ساده محسوب می‌شود که با هدف جلوگیری از انتقال مستقیم نیروهای جانبی بین طبقات طراحی شده است.

عملکرد نامطلوب دستگاه پله‌های بتنی در سازه‌ها طی زلزله‌های گذشته به یک چالش مهم در مهندسی زلزله تبدیل شده است. مشاهدات میدانی پس از رویدادهای لرزه‌ای شدید به طور مکرر نشان داده‌اند که دستگاه پله، که اغلب در فرآیند طراحی به عنوان یک عضو غیرسازه‌ای در نظر گرفته می‌شود، به دلیل سختی بالای خود اندرکنش مخربی با قاب اصلی سازه برقرار می‌کند. لی و همکاران^۱ در بررسی گسترده آسیب‌های زلزله ونچوان مستند کردند که

دستگاه پله با عمل کردن به مثابه یک مهاربند قطری ناخواسته، منجر به ایجاد پدیده ستون کوتاه، تمرکز تنش در اتصالات و خرابی‌های شدید برشی در اعضای مجاور قاب می‌شود [۱]. به طور مشابه، وتر و همکاران^۲ پس از زلزله سرپل ذهاب، ضعف در اجرای اتصالات و عدم پیش‌بینی رفتار مهاربندی پله را به عنوان یکی از دلایل اصلی جدا شدگی کامل این جزء از سازه، حتی در ساختمان‌هایی با آسیب سازه‌ای محدود، معرفی کردند [۲]. این مشاهدات میدانی بر ضرورت بازنگری در رویکردهای طراحی و در نظر گرفتن اثر واقعی پله در تحلیل‌های لرزه‌ای تأکید دارند.

در پاسخ به این آسیب‌ها و به‌منظور کاهش اندرکنش مخرب پله و سازه، پیوست ششم آیین‌نامه ۲۸۰۰ ایران راهکارهای اجرایی مشخصی را ارائه می‌دهد. یکی از این راهکارهای پیشنهادی، استفاده از ستونک‌های فشاری کوتاه برای تحمل بار پاگرد میانی و جداسازی آن از قاب اصلی است که هدف آن جلوگیری از بروز پدیده ستون کوتاه و توزیع بهتر نیروها است [۳]. در همین راستا، پژوهشگران به سمت تحلیل‌های عددی، به‌ویژه با استفاده از روش اجزا محدود (FEM)، روی آوردند تا رفتار پیچیده اندرکنش پله و سازه را با دقت بیشتری شبیه‌سازی کنند.

مطالعات اولیه مانند پژوهش فنگ و همکاران^۳ نشان داد که حضور پله در مدل‌سازی، سختی کلی سیستم را به طور قابل توجهی افزایش داده و باعث جذب نیروی بیشتری در طبقات می‌شود [۴]. جیانگ و همکاران^۴ نیز با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی مسیر پیشرونده خرابی را ردیابی کرده و نشان دادند که مفاصل پلاستیک ابتدا در خود دستگاه پله (دال‌های شیب‌دار) تشکیل شده و سپس به تیرها و ستون‌های مجاور منتقل می‌شوند [۵]. این یافته‌ها اهمیت جداسازی لرزه‌ای دستگاه پله را به عنوان یک راهکار مؤثر برای کاهش آسیب دوچندان کرد.

با اثبات لزوم جداسازی، تحقیقات عددی و آزمایشگاهی متعددی بر روی ارزیابی کارایی روش‌های

³ Feng⁴ Jiang¹ Li² Vetr

که استفاده از پله‌های پیش‌ساخته سبک با دال‌های توخالی، ضمن کاهش وزن قابل توجه، می‌تواند ظرفیت باربری و عملکرد سازه‌ای بهتری نسبت به پله‌های توپر سنتی داشته باشد.

این پژوهش‌ها ضمن تأیید کلی اثربخشی جداسازی، نشان می‌دهند که عملکرد هر روش به شدت به جزئیات طراحی و مکانیزم انتقال بار آن وابسته است. با این وجود، ارزیابی کمی دقیق و مقایسه‌ای بین حالت‌های اجرایی مختلف یک روش رایج مانند ستونک فشاری (به‌خصوص تفاوت بین پاگرد یکپارچه و جدا شده) همچنان به‌عنوان یک خلأ تحقیقاتی باقی مانده است که این مقاله قصد دارد با استفاده از مدل‌سازی دقیق اجزا محدود به آن بپردازد.

نوآوری اصلی این پژوهش در انجام یک ارزیابی کمی و دقیق از کارایی روش جداسازی با ستونک‌های فشاری از طریق مدل‌سازی پیشرفته اجزای محدود نهفته است. در این چهارچوب، برای نخستین بار عملکرد لرزه‌ای این سیستم در دو حالت اجرایی کلیدی - شامل رمپ‌های رفت و برگشت یکپارچه در پاگرد میانی و رمپ‌های جدا شده - به صورت مستقیم مورد مقایسه قرار می‌گیرد. به‌منظور دستیابی به نتایج قابل اتکا، رفتار این مدل‌ها در قیاس با دو مرجع حدی، یعنی قاب بدون پله (به عنوان حالت ایده‌آل) و قاب با پله کاملاً متصل (به عنوان حالت بحرانی)، سنجیده می‌شود. این رویکرد نه تنها امکان ارزیابی دقیق میزان اثربخشی روش جداسازی را فراهم می‌کند، بلکه به شناسایی و تحلیل مکانیزم‌های خرابی پنهان آن نیز می‌انجامد.

۲- مشخصات مدل‌های مورد بررسی

چهارچوب اصلی تحقیق بر پایه مقایسه چهار مدل سه‌بعدی بنا شده است تا تأثیر دستگاه پله دوطرفه و روش جداسازی با ستونک فشاری به دقت ارزیابی شود. قاب اصلی

مختلف تمرکز کرده‌اند. کنگ و همکاران^۵ با انجام مطالعات آزمایشگاهی و تحلیل عددی بر روی سیستم جداسازی با چهار ستونک فشاری نشان دادند که مد شکست غالب در محل اتصال دال به ستونک رخ می‌دهد و این سیستم همچنان سختی جانبی قابل توجهی به سازه اضافه می‌کند [۶]. ون و همکاران^۶ با مدل‌سازی اتصال کشویی در نرم‌افزار ABAQUS به کاهش مؤثر سختی جانبی دست یافتند، هرچند این روش منجر به افزایش نیرو در تیرهای متصل به پاگرد شد [۷]. ژانگ و همکاران^۷ نیز با شبیه‌سازی یک اتصال لغزنده نوین در ABAQUS موفق به حذف کامل اثر مهاربندی قطری شدند و نشان دادند که این رویکرد می‌تواند از پله در برابر آسیب‌های شدید محافظت کند [۸].

علاوه بر این، پژوهش‌های اخیر بر ارزیابی انواع نوین سیستم‌های جداسازی و پله‌های پیش‌ساخته متمرکز شده‌اند. احمد و همکاران^۸ نشان دادند که حضور پله در مدل‌سازی سه‌بعدی، سختی سازه را افزایش داده و پیروید طبیعی آن را کاهش می‌دهد، که این امر به‌ویژه در سازه‌های فاقد دیوار برشی منجر به بهبود عملکرد لرزه‌ای می‌شود [۹]. در راستای توسعه اتصالات نوین، بای و همکاران^۹ استفاده از اتصالات لاستیکی (RBS) را در پایین رمپ پله ارزیابی کردند و دریافتند که این اتصالات به طور مؤثری تغییرشکل‌های نسبی بین طبقات را جذب کرده و اثر مهاربندی دستگاه پله را کاهش می‌دهند [۱۰]. همزمان، با رواج سیستم‌های پیش‌ساخته، مطالعاتی بر روی اتصالات جایگزین و اجزای سبک متمرکز شده‌اند. ژانگ و همکاران یک اتصال مفصلی انعطاف‌پذیر با استفاده از مواد تزریقی انعطاف‌پذیر را برای پله‌های پیش‌ساخته بررسی کردند و نشان دادند که این روش، مد شکست را از گسیختگی ترد کششی به شکست خمشی شکل‌پذیر در جابجایی‌های بسیار بزرگتر تغییر می‌دهد [۱۱]. در همین حوزه، لیو و همکاران^{۱۰} [۱۲] و وانگ و همکاران^{۱۱} [۱۳] نشان دادند

^۹ Bai et al.

^{۱۰} Liu et al.

^{۱۱} Wang et al.

^۵ Cong et al.

^۶ Wen et al.

^۷ Zhang et al.

^۸ Ahmed et al.

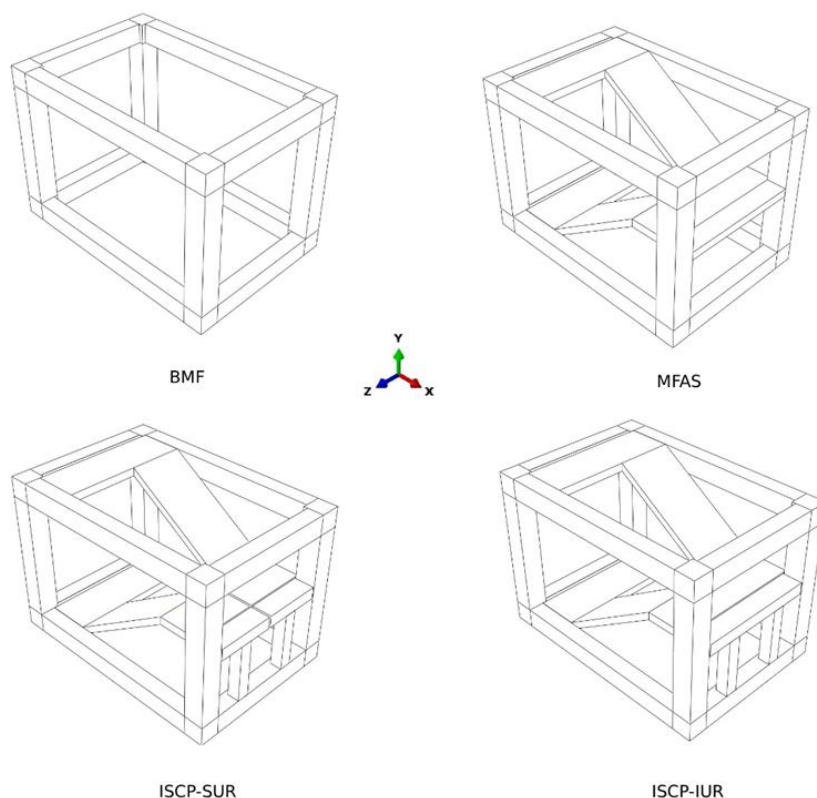
مدل جداسازی با ستونک فشاری و رمپ یکپارچه (ISCP-IUR): این مدل بیانگر یک روش اجرایی متداول است که در آن پاگرد میانی بر روی دو ستونک فشاری بتنی با مقطع 30×30 سانتی‌متر قرار دارد، اما رمپ‌های رفت و برگشت در ناحیه پاگرد به صورت یکپارچه به یکدیگر متصل هستند.

مدل جداسازی با ستونک فشاری و رمپ جدا شده (ISCP-SUR): این مدل مشابه حالت پیشین است، با این تفاوت که در پاگرد میانی یک درز به عرض ۵ سانتی‌متر در قسمت میانی دال میان طبقه تعبیه شده است که رمپ‌های رفت و برگشت را به طور کامل از یکدیگر جدا می‌سازد.

در تمامی مدل‌ها یکسان بوده و شامل یک قاب خمشی بتن آرمه یک طبقه با ابعاد پلان 5.9×4 متر و ارتفاع ۴.۱ متر است. مدل‌های ساخته شده در شکل ۱ ارائه شده اند. چهار مدل مورد بررسی عبارتند از:

مدل قاب بدون پله (BMF): این مدل به عنوان حالت مبنا و شاهد برای ارزیابی عملکرد سایر مدل‌ها در نظر گرفته شده است.

مدل با پله متصل (MFAS): در این مدل، دستگاه پله به دو طرفه به صورت متصل به قاب مدل‌سازی شده است تا حداکثر میزان اندرکنش سازه‌ای بازنمایی شود.



شکل ۱- مدل‌های ساخته شده در نرم افزار

تحلیل اجزای محدود (FEM) در محیط نرم‌افزار ABAQUS بهره‌گیری شده است. فرایند تحلیل به صورت استاتیکی غیرخطی (Pushover Analysis) انجام گرفته تا ضمن شناسایی مکانیزم‌های مختلف خرابی، مسیر انتقال بار تا رسیدن سازه به تغییر مکان هدف به طور کامل مورد ارزیابی قرار گیرد.

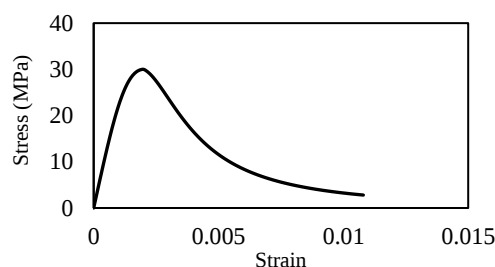
۳- روش تحلیل و مدل‌سازی

۳-۱- مدل‌سازی اجزا محدود و روش تحلیل

یکی از مهم ترین بخش‌ها در بررسی عددی رفتار اجزای سازه، شیوه مدل‌سازی عددی آن‌ها است [۱۴ و ۱۵]. در این پژوهش، به منظور ارزیابی دقیق رفتار غیرخطی دستگاه پله به دو طرفه و بررسی اندرکنش آن با سازه، از روش

۳-۲- مشخصات مصالح

رفتار غیرخطی مصالح به عنوان جزء کلیدی تحلیل با دقت در مدل‌ها لحاظ شده است. برای بتن، از مدل آسیب خمیری^{۱۲} با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال استفاده گردید تا رفتار آن در فشار و کشش، شامل نرم‌شوندگی پس از ترک‌خوردگی، شبیه‌سازی شود. این مدل رفتار بتن را در دو حالت کشش و فشار به صورت مجزا تعریف می‌کند. در کشش، بتن تا رسیدن به مقاومت نهایی رفتاری تقریباً خطی دارد و پس از آن با ترک‌خوردگی، دچار نرم‌شوندگی (کاهش مقاومت) می‌شود. در فشار نیز، پس از یک ناحیه خطی، وارد ناحیه پلاستیک شده و در نهایت با لهیدگی، مقاومت خود را از دست می‌دهد. شکل ۲، منحنی تنش کرنش بتن استفاده شده در این پژوهش را نمایش می‌دهد.



شکل ۲- منحنی تنش-کرنش بتن [۱۵]

علاوه بر منحنی‌های تنش-کرنش در فشار و کشش، مدل CDP نیازمند تعریف پنج پارامتر پلاستیسیته است که مکانیزم‌های شکست و تغییر شکل‌های غیرالاستیک بتن را کنترل می‌کنند. این پارامترها که مقادیر آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است، عبارتند از:

۱. زاویه اتساع (ψ): این پارامتر که زاویه اصطکاک داخلی بتن را نمایندگی می‌کند، کنترل‌کننده میزان انبساط حجمی غیرالاستیک (اتساع) در حین تغییر شکل‌های برشی است. برای بتن معمولی مقدار آن اغلب بین ۳۰ تا ۴۰ درجه در نظر گرفته می‌شود.

۲. خروج از مرکزیت (e): این پارامتر نرخ نزدیک شدن تابع پتانسیل جریان پلاستیک به مجانب خود را تعیین می‌کند و گوشه‌های تیز تابع پتانسیل را در فضای تنش هموار می‌سازد (مقدار پیش‌فرض ۰/۱).

۳. نسبت مقاومت دو محوره به تک محوره (f_b/f_c): این نسبت بیانگر افزایش مقاومت بتن تحت تنش‌های فشاری دوجبهه نسبت به حالت تک‌محوره است که معمولاً مقدار ۱/۱۶ برای آن توصیه می‌شود.

۴. پارامتر شکل سطح تسلیم (Kc): این پارامتر شکل سطح تسلیم را در صفحه انحرافی (Deviatoric Plane) تعیین می‌کند و نسبت ممان دوم تنش در نصف‌النهار کششی به فشاری است (مقدار پیش‌فرض ۰/۶۶۷).

۵. پارامتر لزجت (μ): این پارامتر جهت بهبود همگرایی عددی در تحلیل‌های ضمنی (Implicit) و رفع مشکلات ناشی از نرم‌شوندگی مصالح استفاده می‌شود [۱۶].

جدول ۱- پارامترهای پیش‌فرض مدل آسیب خمیری بتن مورد استفاده [۱۴]

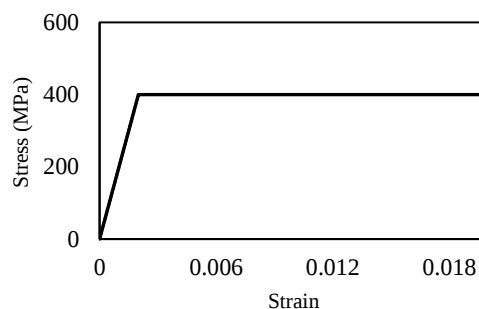
پارامتر	ψ	e	μ	f_c/f_b	K_c
مقدار	۳۵	۰/۱	۰/۰۱	۱/۱۶	۰/۶۶۷

شکل ۳، منحنی تنش کرنش آرماتورهای استفاده شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. برای آرماتورهای فولادی، یک مدل رفتاری الاستیک-پلاستیک ایده‌آل^{۱۳} با تنش تسلیم ۴۰۰ مگاپاسکال برای آرماتورهای طولی (رده S400) و ۳۴۰ مگاپاسکال برای آرماتورهای عرضی (رده S340) در نظر گرفته شد.

خلاصه‌ای از مشخصات مکانیکی مصالح در جدول ۲ آورده شده است.

¹³ Perfectly Elastic-Plastic¹² Concrete Damage plastic

(این المان، یک المان سه‌بعدی و هشت‌گره‌ای Hexahedral) از نوع خطی است که به‌منظور مدل‌سازی مواد جامد پیوسته کاربرد دارد. هر گره از این المان دارای سه درجه آزادی انتقالی است و برای مدل‌سازی اجسام حجیم مانند بتن مناسب می‌باشد و برای مدل‌سازی آرماتورها از المان‌های خطی تیر (B31) استفاده گردید. المان B31 یک تیر سه‌بعدی با دو گره است که قادر به مدل‌سازی رفتارهای خمشی، برشی و محوری می‌باشد. هر گره در این المان دارای سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی است که همین ویژگی آن را برای مدل‌سازی میلگردها کاملاً مناسب می‌سازد.



شکل ۳- منحنی تنش- کرنش میلگردهای S400

۳-۳- المان‌بندی، بارگذاری و شرایط مرزی

تمامی اجزای بتنی و فولادی مدل با استفاده از المان‌های سه‌بعدی هشت‌گره‌ای C3D8R مش‌بندی شدند

جدول ۲- مشخصات مکانیکی مصالح مورد استفاده در مدل‌سازی

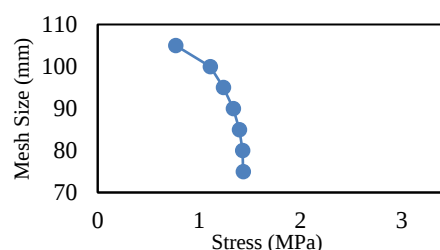
ماده	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پواسون	تنش تسلیم (MPa)
بتن	۲۷۶۹۲	۰/۱۵	۳۰
میلگردهای طولی	۲۰۰۰۰	۰/۳	۴۰۰
میلگردهای عرضی	۲۰۰۰۰	۰/۳	۳۴۰

۱۰ سانتی‌متر در تراز فوقانی قاب و در دو جهت متعامد X و Z اعمال شد. شرایط مرزی نیز به‌گونه‌ای تعریف گردید که پایه ستون‌ها به صورت مفصلی و با مقیدسازی کامل درجات آزادی انتقالی در نظر گرفته شوند. (برای تعریف دقیق‌تر تکیه‌گاه‌ها، سطح تحتانی هر چهار ستون در نرم‌افزار به‌صورت یک جسم صلب (Rigid Body) مدل‌سازی شد. سپس نقطه‌ای در مرکز این سطح به عنوان نقطه مرجع تعیین و تکیه‌گاه مفصلی به آن اختصاص داده شد. این روش ضمن فراهم کردن امکان دوران ستون‌ها و ایجاد رفتار مفصلی، از تمرکز نیرو در یک نقطه نیز جلوگیری می‌کند.

۳-۴- صحت‌سنجی مدل عددی

به‌منظور حصول اطمینان از دقت روش مدل‌سازی اجزا محدود، رویکرد تحلیلی مورد استفاده در این پژوهش به صورت دوگانه اعتبارسنجی شد. لازم به ذکر است که هدف از این بخش، صحت‌سنجی کل سیستم پله نبوده، بلکه اعتبارسنجی روش مدل‌سازی اجزای بتن آرمه (رفتار

به‌منظور اطمینان از استقلال نتایج نسبت به اندازه مش، تحلیل حساسیت مش انجام شد و به‌عنوان نمونه در شکل ۴ منحنی تحلیل حساسیت مش در قاب، ارائه شده است و براساس آن، اندازه بهینه المان برای قاب اصلی و اجزای دستگاه پله برابر با ۸۰ میلی‌متر تعیین گردید.

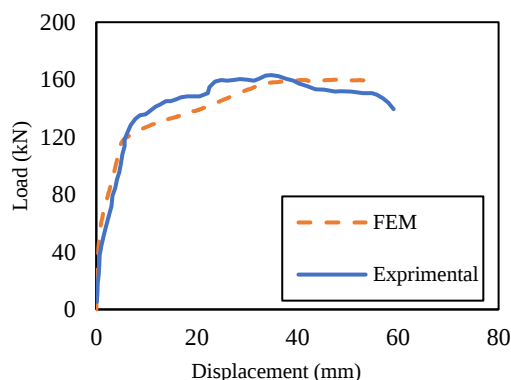


شکل ۴- منحنی تحلیل حساسیت مش

اندرکنش بین بتن و آرماتورها با فرض پیوستگی کامل و از طریق قید Embedded Region در بتن مدل شد.

فرآیند بارگذاری در دو مرحله صورت گرفت: در مرحله نخست بارهای ثقیلی ناشی از وزن اجزا اعمال گردید و در مرحله دوم یک تغییر مکان افقی کنترل‌شده به میزان

مقاومت نهایی بین نتایج آزمایشگاهی و مدل عددی وجود دارد. این تطابق، قابلیت اطمینان بالای مدل عددی در پیش‌بینی رفتار غیرخطی اعضای بتن آرمه را تأیید می‌کند.



شکل ۷- نمودار نیرو- تغییرمکان مدل آزمایشگاهی و عددی

۴- نتایج تحلیل‌های عددی

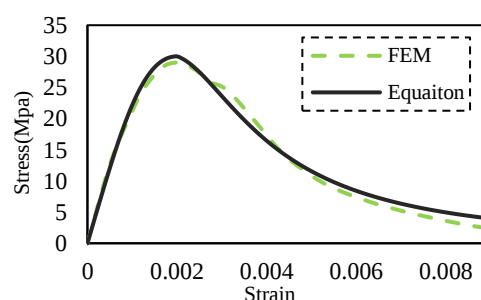
در این بخش، نتایج حاصل از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی بر روی چهار مدل کلیدی ارائه و تفسیر می‌شود. ارزیابی‌ها ابتدا بر اساس پاسخ کلی سازه (نمودارهای نیرو- تغییرمکان و پارامترهای سختی و مقاومت) و سپس با بررسی مکانیزم‌های خرابی موضعی (الگوهای آسیب و تشکیل مفاصل پلاستیک) صورت می‌گیرد.

۴-۱- ارزیابی پاسخ کلی سازه

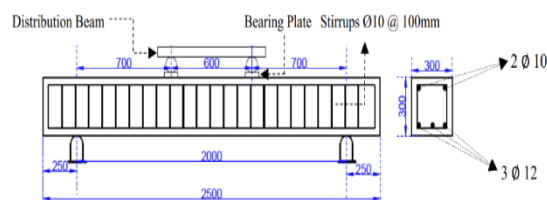
نمودارهای نیرو-تغییرمکان مدل‌ها تحت بارگذاری در راستای X در شکل ۸- الف و در راستای Z در شکل ۸- ب ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، منحنی مدل با پله متصل (MFAS) به دلیل سختی بالای دستگاه پله، بالاترین مقاومت و شیب را داراست. نکته قابل تأمل، نزدیکی بسیار زیاد منحنی مدل جداسازی‌شده با رمپ یکپارچه (ISCP-IUR) به مدل MFAS است. این هم‌پوشانی نشان می‌دهد که روش جداسازی با ستونک فشاری در صورت یکپارچه بودن پاگرد میانی، در کاهش سختی و اندرکنش لرزه‌ای سیستم کاملاً ناکارآمد است. در مقابل، مدل جداسازی‌شده با رمپ جدا (ISCP-SUR) با

خمشی) بوده است. از آنجایی که مکانیزم غالب شکست در رمپ‌ها و ستونک‌ها، رفتار خمشی بتن مسلح است، از یک نمونه تیر آزمایشگاهی معتبر استفاده شد تا نشان دهد که روش مدل‌سازی ما (شامل مدل CDP و اندرکنش‌ها) قادر به پیش‌بینی دقیق رفتار غیرخطی است. در گام نخست، رفتار مدل آسیب خمیری بتن با نتایج روابط تئوریک تنش-کرنش ترنفلدت^{۱۴} [۱۷] مقایسه گردید. در گام دوم، یک تیر بتن آرمه که به صورت آزمایشگاهی توسط وحیدی‌پور و همکاران [۱۸] تست شده بود، در نرم‌افزار شبیه‌سازی شد.

شکل ۵ مقایسه منحنی تنش-کرنش خروجی از نرم افزار را با منحنی حاصل از روابط ترنفلدت نمایش می‌دهد. شکل ۶ جزئیات تیر آزمایش شده توسط وحیدی‌پور و همکاران و شکل ۷ مقایسه منحنی نیرو- تغییرمکان حاصل از مدل‌سازی این تیر با نتایج آزمایشگاهی را نمایش می‌دهند.



شکل ۵- مقایسه منحنی تنش-کرنش حاصل از نرم افزار و روابط ترنفلدت

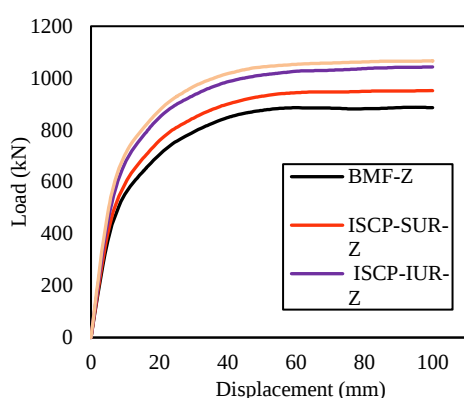


شکل ۶- جزئیات تیر آزمایش شده در مقاله وحیدی‌پور و همکاران

همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، تطابق بسیار خوبی در بخش الاستیک و همچنین در تخمین

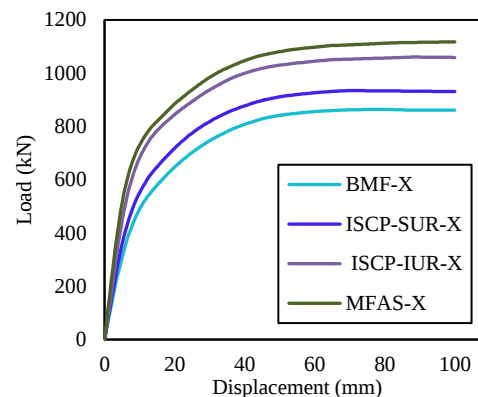
¹⁴ Thorenfeldt

بیشترین ظرفیت باربری و سختی را نشان می‌دهد و منحنی ISCP-IUR-Z با اندکی فاصله در پی آن قرار دارد، به‌طوری‌که عملکرد این مدل نیز عملاً مشابه حالت کاملاً متصل ارزیابی می‌شود.



(ب)

کاهش چشمگیر سختی، رفتاری بسیار نزدیک‌تر به مدل قاب بدون پله (BMF) از خود نشان می‌دهد که حاکی از بهبود قابل توجه عملکرد جداسازی است. در راستای Z نیز همان روند مشاهده می‌شود. مدل MFAS-Z همچنان



(الف)

شکل ۸- نمودار نیرو- تغییرمکان راستای (الف) X و (ب) Z

۵/۲۲٪ کمتر از مدل کاملاً متصل MFAS است، در حالی‌که در راستای Z این اختلاف حدود ۲/۱۶٪ می‌باشد. از سوی دیگر، سختی مدل ISCP-SUR در راستای X حدود ۱۲٪ کمتر از مدل ISCP-IUR بوده و در راستای Z نیز حدود ۹٪ کاهش نشان می‌دهد و به مقادیر مدل مبنا (BMF) نزدیک‌تر است. این نتایج به‌طور کمی تأیید می‌کند که جداسازی رمپ‌ها در پاگرد میانی، یک پارامتر طراحی حیاتی برای کاهش سختی ناخواسته ناشی از دستگاه پله است.

در مقابل، مدل ISCP-SUR-Z نسبت به ISCP-IUR-Z کاهش سختی محسوس‌تری دارد و به مدل BMF-Z نزدیک‌تر است. این امر مجدداً موید نقش تعیین‌کننده جداسازی رمپ‌ها در کاهش انتقال نیرو و محدود کردن اندرکنش لرزه‌ای ناخواسته دستگاه پله می‌باشد.

برای ارزیابی کمی این رفتار، پارامترهای کلیدی سازه‌ای در جدول ۳ خلاصه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که سختی سکانت مدل ISCP-IUR در راستای X تنها

جدول ۳- پارامترهای سازه‌ای در هر دو راستا

مدل	سختی الاستیک (kN/mm)	مقاومت نهایی (kN)	سختی سکانت (kN/cm)
BMF-X	66.11	863.69	86.12
MFAS-X	113.67	1117.45	111.74
ISCP-IUR-X	88.4	1060.56	105.91
ISCP-SUR-X	75.87	934.85	93.19
BMF-Z	83.53	887.5	88.6
MFAS-Z	109.26	1066.32	106.63
ISCP-IUR-Z	98.69	1043.23	104.32
ISCP-SUR-Z	89.4	951.98	95.19

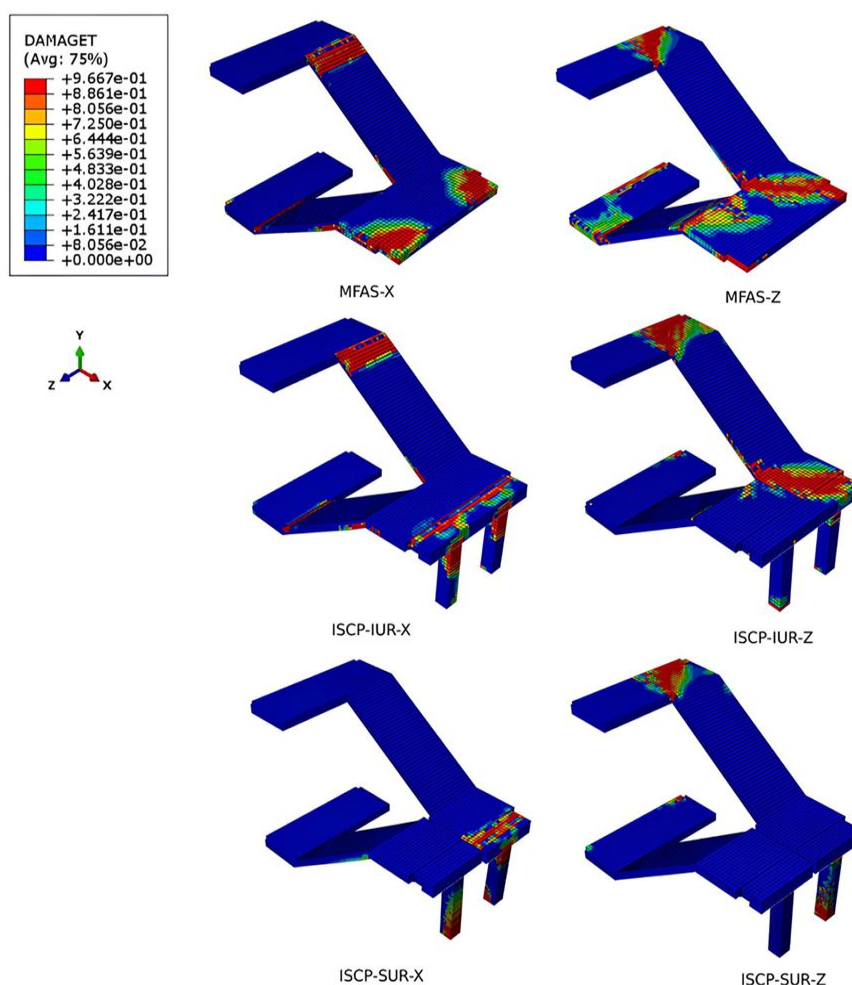
بررسی نتایج عددی و کانتورهای آسیب کششی، درک روشنی از تفاوت مکانیزم‌های خرابی دستگاه پله در دو راستای طولی و عرضی ارائه می‌دهد. در راستای طولی،

۴-۲- مکانیزم‌های خرابی و آسیب موضعی

شکل ۹ کانتور آسیب کششی دستگاه پله تمامی مدل‌ها و در هر دو راستای بارگذاری را نمایش می‌دهد. با

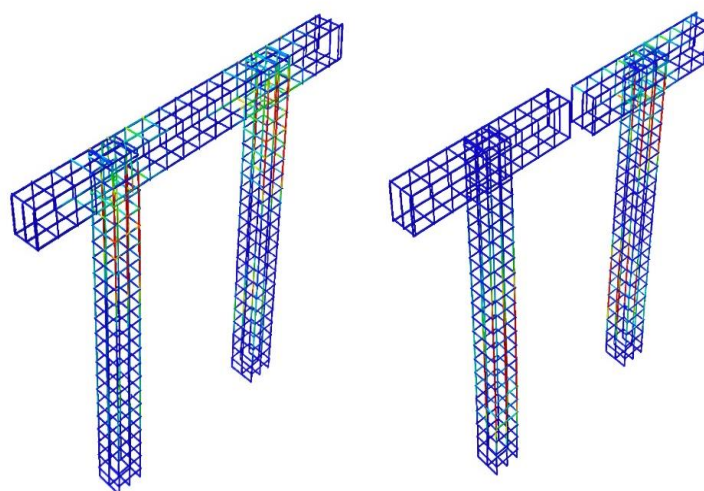
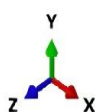
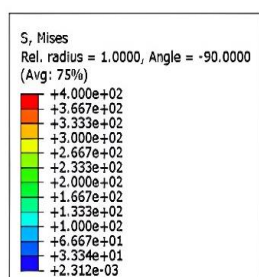
با کمی‌سازی میزان آسیب‌های ایجادشده در دستگاه پله مدل‌های مختلف، مشاهده می‌شود که دستگاه پله در مدل MFAS، در راستای X، ۸۸٪ و در راستای Z، ۱۱٪ درصد از المان‌های دستگاه پله به حد نهایی آسیب‌کشی رسیده‌اند. در مدل ISCP-IUR مشاهده می‌شود که در راستای X، ۷۶٪ درصد و در راستای Z، ۶۵٪ درصد از المان‌های دستگاه پله به حد نهایی آسیب‌کشی رسیده‌اند. در مقابل مشاهده شد که در مدل ISCP-SUR، در راستای X، تنها ۰/۷۲٪ و در راستای Z، ۱/۵۴٪ درصد از المان‌های دستگاه پله به حد نهایی آسیب‌کشی رسیده‌اند. از نتایج مشخص می‌گردد که دستگاه پله در مدل ISCP-SUR، متحمل کمترین خرابی نسبت به سایر مدل‌ها در هر دو راستا شده است.

خرابی ناشی از عملکرد محوری رمپ‌ها به‌عنوان اعضای مهاربند بوده و بیشترین آسیب در محل اتصال رمپ‌ها به پاگردها و نیم‌طبقه متمرکز می‌شود، در حالی که در راستای عرضی، خرابی غالب به دلیل خمش خارج از صفحه در دال‌ها ظاهر شده و ترک‌های قطری گسترده در پاگردها و نیم‌طبقه شکل می‌گیرد. این الگو در مدل متصل به‌وضوح مشاهده شده و شدت آسیب در اجزای اصلی پله به‌ویژه رمپ‌ها و دال‌ها بالاست. در مدل جداسازی با رمپ یکپارچه نیز رفتار مشابهی تکرار می‌شود، با این تفاوت که ستونک‌ها نیز دچار خرابی می‌شوند که نشانگر انتقال ناقص نیرو است. در مقابل، در مدل جداسازی با رمپ جداشده، رمپ‌ها و دال‌ها از آسیب‌های شدید مصون مانده و تمامی خرابی‌ها به ستونک‌های فشاری و تیرهای تکیه‌گاهی منتقل می‌شود؛ به‌گونه‌ای که این اعضا به نقاط ضعف هدفمند سیستم تبدیل شده و بار اصلی خرابی را بر عهده می‌گیرند.



شکل ۹- کانتورهای آسیب کششی بتن دستگاه پله در مدل‌های مختلف

شکل ۱۱ کرنش پلاستیک ایجاد شده در ستونک‌های فشاری را نمایش می‌دهد. بررسی الگوی مفاصل پلاستیک و کرنش پلاستیک نیز این نتایج را تقویت می‌کند. در مدل متصل، مفاصل پلاستیک در محل اتصال رمپ‌ها به پاگردها تشکیل شده و کرنش پلاستیک در آرماتورها به مقادیر بسیار بالا رسیده که بیانگر شدت خرابی است. در مدل جداسازی یکپارچه، مفاصل پلاستیک علاوه بر رمپ‌ها در ستونک‌ها نیز شکل گرفته و کرنش ستونک‌ها تا ۲۴ برابر کرنش تسلیم افزایش یافته است. در حالی که در مدل جداسازی با رمپ جدا شده، هیچ مفصل پلاستیکی در رمپ‌ها و دال‌ها ایجاد نشده و تمامی مفاصل پلاستیک تنها در ستونک‌های فشاری تشکیل می‌شوند. مقدار کرنش‌های پلاستیک در این ستونک‌ها در بیشترین حالت، ۱۳/۵۵ برابر بزرگتر از کرنش حد پلاستیک آرماتور است. کرنش‌های بسیار بالای این ستونک‌ها مؤید عملکرد آن‌ها به عنوان فیوز لرزه‌ای و مستهلک‌کننده انرژی سیستم است.



ISCP-IUR-X

ISCP-SUR-X

شکل ۱۰- کانتور تنش فون میس ستونک‌های فشاری و تیر میان طبقه

نیم طبقه به ستون‌ها در مدل متصل، تیر تکیه‌گاه پاگرد طبقه تحتانی در همان مدل، و همچنین پایه ستونک‌ها در مدل جداسازی با رمپ جدا شده تحت بارگذاری عرضی، کرنش از حد نهایی فراتر رفته و خطر خردشدگی موضعی

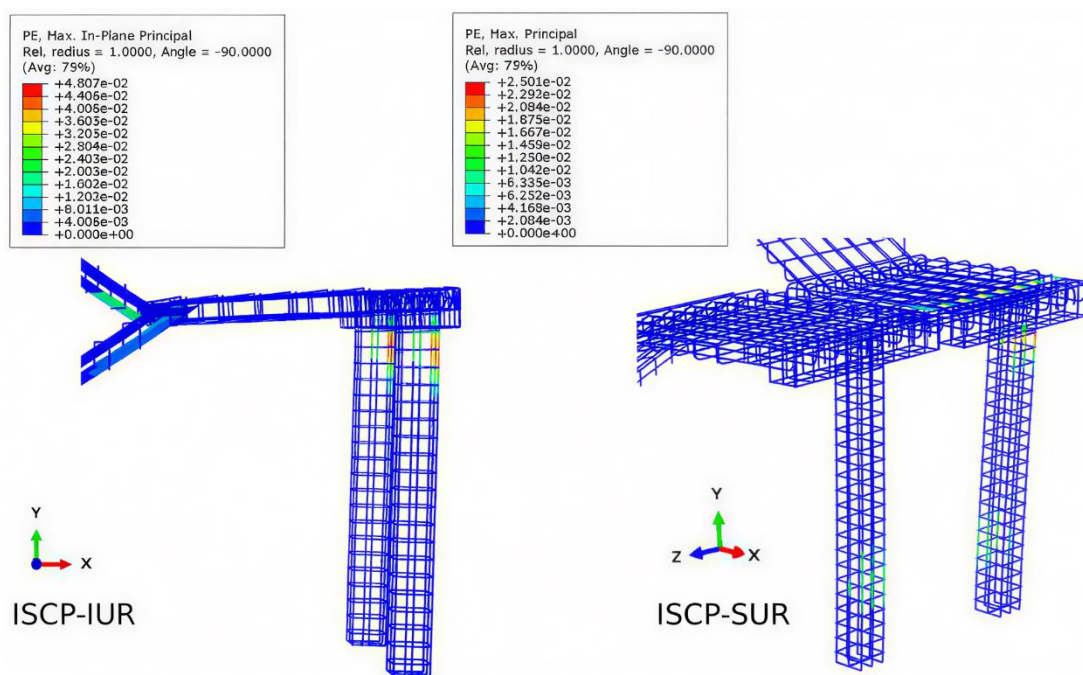
تحلیل تنش‌ها در آرماتورها نیز همین روند را تأیید می‌کند. در حالی که قاب اصلی در تمامی مدل‌ها تقریباً رفتاری مشابه داشته و تسلیم آرماتورها عمدتاً در محل اتصال تیر به ستون رخ می‌دهد، تفاوت اصلی در آرماتورهای دستگاه پله مشاهده می‌شود. در مدل متصل، آرماتورهای طولی رمپ‌ها در محل اتصال به پاگرد و همچنین آرماتورهای دال‌های پاگرد تحت بارگذاری عرضی به حد تسلیم می‌رسند.

شکل ۱۰ کانتور تنش آرماتور ستونک‌های فشاری را در راستای بارگذاری X نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که در مدل جداسازی و رمپ یکپارچه، علاوه بر رمپ‌ها، ستونک‌های فشاری نیز وارد ناحیه تسلیم می‌شوند. اما در مدل جداسازی با رمپ جدا شده، هیچ یک از آرماتورهای رمپ و دال‌ها دچار تسلیم نشده و تنها آرماتورهای ستونک‌ها دچار تسلیم گشته اند.

از سوی دیگر، بررسی کرنش‌های فشاری بتن نشان می‌دهد که در اغلب مدل‌ها مقادیر کرنش کمتر از حد نهایی باقی مانده و خرابی فشاری مکانیزم غالب به شمار نمی‌آید. با این وجود، در برخی نواحی خاص از جمله اتصال دال

ترک‌خوردگی ناشی از پیچش در برخی نواحی زیرین و جانبی تیر مشاهده گردید. این امر بیانگر آن است که شرایط مرزی و نحوه قرارگیری ستونک‌ها در این مدل موجب افزایش تقاضای پیچشی تیر شده است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که در مدل ISCP-SUR تیر زیرین باید با در نظر گرفتن اثر پیچش طراحی شده و الزامات آیین‌نامه‌ای مربوطه در این زمینه به‌طور کامل ارضا گردد.

بتن مشاهده شده است. بررسی تیر واقع در تراز تحتانی که ستونک‌های فشاری بر روی آن قرار دارند نشان داد که در مدل ISCP-IUR هرچند تیر تحت اثر پیچش قرار گرفته است، اما شدت این پیچش در حدی نبوده که منجر به ایجاد ترک‌خوردگی گردد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در این مدل ظرفیت پیچشی تیر به‌طور نسبی تأمین شده است. در مقابل، در مدل ISCP-SUR شواهد روشنی از



شکل ۱۱- کانتور کرنش پلاستیک ستونک‌های فشاری و تیر میان‌طبقه

حدود ۲/۱۶٪ کمتر از مدل کاملاً متصل بود. این اندرکنش شدید باعث آسیب گسترده به دستگاه پله شد، به طوری که ۷/۷۶٪ از المان‌های دستگاه پله آن در راستای X و ۵/۶۵ درصد از المان‌های دستگاه پله آن در راستای Z به حد نهایی آسیب کششی رسیدند. همچنین مفاصل پلاستیک علاوه بر ستونک‌ها، در نقاط حساس رمپ‌ها نیز تشکیل شدند که عملکرد ایمن پله به عنوان مسیر خروج را به شدت به خطر می‌اندازد.

جداسازی رمپ‌ها از یکدیگر در پاگرد میانی (مدل ISCP-SUR) یک پارامتر طراحی کلیدی و الزامی است که عملکرد سیستم را به شکل قابل توجهی بهبود می‌بخشد.

۵- بحث و بررسی نتایج

در این بخش، یافته‌های حاصل از نتایج ارائه‌شده، مورد تفسیر کمی و کیفی قرار گرفته و با پژوهش‌های پیشین مقایسه می‌شود.

نتایج به‌وضوح نشان داد که جداسازی دستگاه پله با ستونک فشاری در صورتی که رمپ‌های رفت و برگشت در پاگرد میانی به صورت یکپارچه اجرا شوند (مدل ISCP-IUR)، یک روش عملاً ناکارآمد است. این مدل سختی و مقاومت بسیار بالایی، نزدیک به حالت پله کاملاً متصل (MFAS)، از خود نشان داد. به طور مشخص، سختی سکانت این مدل در راستای X تنها ۵/۲٪ و در راستای Z

موردی بر روی یک قاب خمشی بتن آرمه با ابعاد تیر و ستون مشخص و هندسه یک‌طبقه انجام شده است. ۲) نتایج ارائه شده مختص دستگاه پله دوطرفه بوده و تعمیم مستقیم آن به سایر هندسه‌ها مانند پله‌های سه‌طرفه یا چهارطرفه نیازمند بررسی‌های بیشتر است.

۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی دقیق عملکرد لرزه‌ای یک روش متداول جداسازی دستگاه پله بتنی دوطرفه با استفاده از ستونک‌های فشاری انجام شد. بر اساس نتایج تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی، نتایج کلیدی زیر حاصل گردید:

(الف) استفاده از ستونک فشاری بدون جدا کردن رمپ‌ها در پاگرد میانی (حالت اجرایی متداول)، تأثیر ناچیزی در کاهش سختی دارد. در این حالت سیستم همچنان مانند یک مهاربند عمل کرده و رمپ‌ها دچار آسیب جدی می‌شوند.

(ب) تعبیه درز انقطاع در پاگرد میانی یک الزام طراحی است. این عمل باعث حذف سختی مزاحم پله شده و رفتار سازه را به قاب استاندارد (بدون پله) نزدیک می‌گرداند.

(پ) در حالت جداسازی کامل، تقریباً هیچ‌گونه خرابی در رمپ‌ها و دال‌های پله رخ نمی‌دهد که این امر ایمنی مسیر خروج اضطراری را تضمین می‌کند.

(ت) در سیستم دارای رمپ جدا شده، آسیب‌ها از رمپ به ستونک‌های فشاری منتقل می‌شود. این ستونک‌ها به عنوان فیوز لرزه‌ای عمل کرده و انرژی را مستهلک می‌کنند؛ لذا طراحی آن‌ها باید با شکل‌پذیری بالا انجام شود تا از شکست ترد جلوگیری گردد.

(ث) تحلیل‌ها نشان داد که تیر تراز تحتانی که ستونک‌ها بر روی آن قرار می‌گیرند، در مدل با رمپ جدا شده (ISCP-SUR) تحت تقاضای

این اقدام با حذف مؤثر اثر مهاربندی قطری، سختی سکانت سازه را در راستای X حدود ۱۶/۶٪ و در راستای Z حدود ۱۰/۷۲ درصد نسبت به حالت دستگاه پله متصل کاهش داد و آن را به رفتار قاب بدون پله (BMF) نزدیک کرد. این بهبود در کاهش آسیب کاملاً مشهود بود؛ در این مدل میزان آسیب نهایی کششی در دستگاه پله به تنها ۰/۷۲٪ در راستای X و ۱/۵۴٪ در راستای Z محدود گردید. همچنین، از تشکیل هرگونه مفصل پلاستیک در رمپ‌ها و دال‌های دستگاه پله جلوگیری شد.

با وجود بهبود چشمگیر عملکرد، روش جداسازی با ستونک فشاری و رمپ جدا شده، دستگاه پله را به یک جزء کاملاً غیرسازه‌ای تبدیل نمی‌کند. در این حالت، آسیب و تغییر شکل‌های غیرخطی از رمپ‌ها به ستونک‌های فشاری منتقل شده و در آن‌ها متمرکز می‌شود. کرنش پلاستیک در آرماتورهای این ستونک‌ها به مقادیر بالایی تا ۱۳/۵۵ برابر کرنش تسلیم رسید که نشان می‌دهد این اعضا به عنوان فیوزهای لرزه‌ای عمل کرده و انرژی را مستهلک می‌کنند. هرچند این رفتار از رمپ‌ها محافظت می‌کند، اما خرابی ستونک‌ها می‌تواند پایداری پاگرد تراز میانی را تهدید نماید.

یافته‌های مربوط به سختی بالای مدل یکپارچه، با نتایج فنگ و همکاران و جیانگ و همکاران مبنی بر افزایش سختی و جذب نیرو در پله‌های بتنی هم‌خوانی دارد [۴] و [۵]. همچنین، عدم کارایی ستونک فشاری در صورت عدم جداسازی رمپ، تاییدکننده‌ی مشاهدات کنگ و همکاران است که گزارش داده بودند سیستم‌های ستونک فشاری می‌توانند همچنان سختی جانبی قابل‌توجهی ایجاد کنند [۶]. از سوی دیگر، حذف کامل آسیب در رمپ‌های مدل ISCP-SUR، مشابهت زیادی با نتایج ژانگ و همکاران [۸] در استفاده از اتصالات لغزنده دارد، با این تفاوت که در اینجا انرژی توسط خرابی کنترل‌شده ستونک‌ها (به جای اصطکاک) مستهلک می‌شود.

در تفسیر نتایج این مطالعه باید محدودیت‌های هندسی مدل را مدنظر قرار داد: ۱) این پژوهش به صورت

پیشگی قابل توجهی قرار می گیرد که باید در طراحی آن لحاظ گردد. چهارطرفه) بر کارایی این روش جداسازی مورد بررسی قرار گیرد. همچنین ارزیابی آزمایشگاهی مدل های جداسازی شده جهت درک دقیق تر مکانیزم های خرابی هندسه های مختلف پله (مانند پله های سه طرفه و ستونک ها ضروری به نظر می رسد.

References

- [1] Li B, Mosalam KM. Seismic performance of reinforced-concrete stairways during the 2008 Wenchuan earthquake. *J Perform Constr Facil.* 2013; 27(6): 721-730. doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000382
- [2] Vetr MG, Saeidian M, Naserpour A. The main reasons for great damages of reinforced concrete buildings on 12 November 2017, Sarpol-e Zahab earthquake. *J Seismol Earthq Eng.* 2018; 20(3): 73-92.
- [3] Building and Housing Research Center. Appendix 6 to Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings, Standard No. 2800: Seismic Design and Construction of Architectural Nonstructural Elements. Tehran: Ministry of Roads and Urban Development; 2019.
- [4] Feng Y, Wu X, Xiong Y, Li C, Yang W. Seismic performance analysis and design suggestion for frame buildings with cast-in-place staircases. *Earthq Eng Eng Vib.* 2013; 12(2): 209-219. doi:10.1007/s11803-013-0164-2
- [5] Jiang HJ, Gao HY, Wang B. Seismic damage analyses of staircases in RC frame structures. *Adv Mater Res.* 2012; 446: 2326-2330. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.446-449.2326
- [6] Cong S, Zhang Z, Zheng Q, Xu Z. Seismic behavior of reinforced concrete frame staircase with separated slab stairs. *Structures.* 2021; 34: 4284-4296. doi: 10.1016/j.istruc.2021.10.026
- [7] Wen M, Tian H, Wang W, Chen B, Fu H. Research on seismic performance of frame structure with beam staircases. *Buildings.* 2022; 12(8): 1106. doi: 10.3390/buildings12081106
- [8] Zhang C, Huang Z, Zhou Y, Wang G, Yu T, Huang W. Seismic performance of novel low-damage stair system: precast reinforced concrete stair isolated with a sliding joint. *Eng Struct.* 2024; 298: 117061 doi: 10.32604/cmes.2020.09054
- [9] Ahmed OH, Hazem A-R, Shawky AA. Seismic performance of staircases in the 3D analysis of RC building. *Civil Eng J.* 2022; 7: 114-123. doi: 10.28991/cej-sp2021-07-08
- [10] Bai L, Liang X, Xin L, Liu M, Yu Z, Chu Y. Investigation on the seismic performance of RC frame buildings with rubber isolation bearing installed in staircases. *Buildings.* 2023; 13(3): 616. doi: 10.3390/buildings13030616
- [11] Zhang S, Huo W, Liu K, Yao Y, Sun Q. Experimental study on the new type of connecting nodes of prefabricated stairs using flexible grouting material. *J Phys Conf Ser.* 2023; 2553(1): 012021. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.368-373.865
- [12] Liu J, Bao Y, Qin K. Experimental and finite element analysis on the structural performance of lightweight hollow slab prefabricated staircases. *Buildings.* 2025; 15(2): 245. doi: 10.3390/buildings15020245
- [13] Wang Y, Sheng D, Wang Y. Research on the performance of lightweight prefabricated concrete stairs with a special-shaped hollow landing slab. *Buildings.* 2024; 14(5): 1314. doi: 10.3390/buildings14051314
- [14] Fathali MA, Hosseini Vaez SR, Dehghani E. Modeling the behavior of link beams to evaluate their performance in accordance with FEMA 356 and calculating target displacements for performance levels. *Civil Infrastructure Research.* 2018; 4(2): 47-60. doi:10.22091/cer.2018.3193.1118 [In Persian]
- [15] Akrami V, Adili Aryaz, Shakeri K, Shahbazi N. Cyclic behavior investigation of an I-beam to circular column moment connection with channel link. *Civil Infrastructure Research.* 2023; 9(2): 141-161. doi: 10.22091/cer.2023.9497.1485
- [16] Dassault Systèmes. Abaqus Analysis User's Guide. Providence (RI): Simulia; 2014.
- [17] Thorenfeldt E, Tomaszewicz A, Jenson JJ. Mechanical properties of high-strength concrete and applications in design. In: *Proceedings of the Symposium on Utilization of High-Strength Concrete.* Tapir; 1987.
- [18] Vahidpour M, Kheyroddin A, Kioumars M. Experimental investigation on flexural capacity of reinforced concrete beams strengthened with 3D-fiberglass, CFRP and GFRP. *Int J Concr Struct Mater.* 2022; 16(1): 18. doi: 10.1186/s40069-022-00508-w