

مدل سازی اجزای محدود آسیب لرزه‌ای رمپ پله فولادی با روش جداسازی ستونک فشاری

شکیبا کمالی^۱، احسان دهقانی^{۲*}، سید محمد چاوشی^۱

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشگاه قم، قم

۲- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه قم، قم

*قم، صندوق پستی ۳۷۱۶۱۴۶۶۱۱، Dehghani@qom.ac.ir

چکیده

پله‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای غیرسازه‌ای، نقشی حیاتی در تخلیه ایمن ساکنان هنگام وقوع زلزله ایفا می‌کنند. با این حال در طراحی‌های متداول، اغلب اندرکنش لرزه‌ای دستگاه پله با سازه اصلی نادیده گرفته شده و این امر می‌تواند منجر به عملکرد آن به‌عنوان یک مهاربند ناخواسته، باعث تمرکز تنش و آسیب‌پذیری شود که در نهایت، مسیر خروج اضطراری را مسدود می‌سازد. این پژوهش با هدف بررسی آسیب لرزه‌ای رمپ پله فولادی دوطرفه در سازه قاب خمشی بتن‌آرمه و ارزیابی کارایی دو روش متصل و جداسازی شده با ستونک فشاری برای حفظ عملکرد آن انجام شده است. بدین منظور، از روش تحلیل اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS استفاده شد. یک قاب خمشی بتن‌آرمه یک‌طبقه در سه حالت مختلف مدل‌سازی شد. رفتار لرزه‌ای مدل‌ها با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی (Pushover) تحت تغییر مکان جانبی ۱۰ سانتی‌متری در دو راستای اصلی، موازی (محور X) و عمود (محور Z) بر امتداد پله، ارزیابی شد. همچنین تحلیل تاریخچه زمانی تحت رکوردهای تغییر مکانی به‌دست‌آمده از تحلیل یک مدل کلی سازه بر روی قاب پله مدل‌سازی شده اعمال شده است. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که رفتار لرزه‌ای سیستم به اندرکنش پله و سازه، به‌ویژه در راستای موازی با شمشیری‌ها وابسته است. در مدل با پله متصل، حداکثر ۹٪ افزایش مقاومت و حداکثر ۸٪ افزایش سختی مشاهده شد. این مشارکت در باربری جانبی منجر به تمرکز تنش و تشکیل مفاصل پلاستیک در نواحی بحرانی پله، مانند محل شکست شمشیری‌ها و اتصالات شد؛ اما آسیب‌ها به‌گونه‌ای نبود که موجب اختلال در قابلیت بهره‌برداری دستگاه پله بشوند. با این حال روش جداسازی با ستونک فشاری آسیب‌های کم‌تری را متحمل شده است. این روش با جداکردن مؤثر دستگاه پله از حرکت جانبی قاب، از انتقال نیروهای مخرب به آن جلوگیری کرده و بخش‌های عمده دستگاه پله و عناصر جداساز را در محدوده رفتار الاستیک حفظ نمودند.

واژگان کلیدی

دستگاه پله فولادی، قاب خمشی بتن‌آرمه، آسیب لرزه‌ای، جداسازی لرزه‌ای، ستونک فشاری

Finite Element Modelling of Seismic Damage in a Steel Stair Ramp Using the Compression Post Separation Method

Sh. Kamali, E. Dehghani, S.M. Chavoshi

Abstract

Stairs, as critical non-structural components, play a vital role in the safe evacuation of occupants during seismic events. However, conventional design practices often neglect the seismic interaction between the stair assembly and the primary structure. This oversight can lead to the stair acting as an unintended brace, causing stress concentration and vulnerability, which ultimately may obstruct the emergency egress route. This study aims to investigate the seismic damage of a steel switchback ramp staircase within a reinforced concrete (RC) moment-resisting frame. It also evaluates the efficacy of two methods for preserving its functionality: a conventional "connected" method and a "separated" method utilizing a compression post. To this end, the Finite Element Method (FEM) was employed using ABAQUS software. A single-story RC moment-resisting frame was modeled in three different configurations. The seismic behavior of the models was evaluated using nonlinear static (Pushover) analysis under a 10 cm lateral displacement in two principal directions: parallel (X-axis) and perpendicular (Z-axis) to the stair's span. Furthermore, time-history analysis was conducted, applying displacement records derived from an analysis of the overall structural model to the modeled stair frame. The analysis results indicated that the system's seismic behavior is dependent on the stair-structure interaction, particularly in the direction parallel to the stair stringers. In the "connected" model, a maximum increase of 9% in strength and 8% in stiffness was observed. This participation in lateral load-bearing resulted in stress concentration and the formation of plastic hinges in critical regions of the stair, such as at the stringer breaks (landings) and connections. However, the damage was not severe enough to compromise the serviceability of the stair assembly. Conversely, the "separated" method utilizing a compression post sustained significantly less damage. This approach effectively decoupled the stair assembly from the frame's lateral movement, preventing the transfer of destructive forces and maintaining the primary stair components and isolation elements within the elastic range.

Keywords

Steel Staircase, Reinforced Concrete Moment-Resisting Frame, Seismic Damage, Seismic Isolation, Compression Post

۱- مقدمه

در طراحی‌های سازه‌ای متداول، دستگاه پله اغلب نادیده گرفته می‌شود و مهندسان طراح تنها به طراحی تقلی آن بسنده کرده و رفتار لرزه‌ای آن به درستی شبیه‌سازی نمی‌شود. این درحالی است که پله‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای غیرسازه‌ای، نقشی اساسی در تخلیه اضطراری و ایمن ساکنان هنگام زلزله ایفا می‌کنند. بی‌توجهی به عملکرد واقعی رمپ پله می‌تواند منجر به آسیب‌های جدی و اختلال در مسیرهای نجات شود. بررسی‌های میدانی پس از زلزله‌ها نشان داده‌اند که رمپ راه پله اغلب به‌عنوان خط اول دفاع عمل کرده و از اولین نقاط آسیب‌پذیر سازه محسوب می‌شود. این آسیب‌ها ایمنی ساکنان را به‌طور جدی تهدید می‌کند، زیرا نقش حیاتی راه پله در تخلیه افراد را از بین می‌برد.

یکی از ویژگی‌های نوآورانه این پژوهش، تمرکز ویژه بر رفتار لرزه‌ای رمپ پله فولادی دوطرفه در قاب خمشی بتن‌آرمه و ارزیابی روش جداسازی دستگاه پله با ستونک فشاری است؛ موضوعی که تاکنون در مطالعات داخلی کم‌تر به آن پرداخته شده است. هدف اصلی این تحقیق، بررسی دوام و پایداری دستگاه پله در حالت متصل به سازه و مقایسه آن با حالت جداسازی شده با ستونک فشاری است تا مؤثرترین راهکار برای بهبود عملکرد لرزه‌ای شناسایی شود. برای این منظور، با بهره‌گیری از روش اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS، رفتار رمپ پله فولادی در یک قاب خمشی بتن‌آرمه تحلیل شده است.

۲- تاریخچه تحقیقات

آسیب‌پذیری دستگاه پله فولادی در زلزله‌های گذشته، پژوهشگران را به سمت مطالعات آزمایشگاهی و عددی گسترده‌ای سوق داده است. این تحقیقات عمدتاً بر اندرکنش پله و سازه، رفتار اتصالات و ارائه راهکارهای بهسازی متمرکز بوده‌اند.

هاشمی و کیانی در بررسی خسارات زلزله سرپل ذهاب، مشاهده کردند که دستگاه‌های پله در ساختمان‌های فولادی دچار آسیب‌های تکرار شونده‌ای مانند شکست ستون‌های کوتاه شده‌اند. آن‌ها دریافتند که راه‌پله‌ها به دلیل عملکردی مشابه مهاربند، اندرکنش مخربی با ستون‌های مجاور داشته و در موارد متعدد به‌طور کامل از سازه اصلی جدا شده و فروریخته بودند [۱].

نوری‌فرد و همکاران نیز ضعف در جزئیات اجرایی، به‌ویژه کیفیت پایین جوشکاری تیر شمشیری به تیر پاگرد در سازه‌های فولادی را عامل اصلی شکست معرفی کردند [۲].

جیانگ^۱ و همکاران با تحلیل‌های عددی نشان دادند که راه‌پله‌ها اولین بخش‌هایی از سازه هستند که در آن‌ها مفاصل پلاستیک شکل می‌گیرد و این امر ایمنی مسیرهای تخلیه را به‌طور جدی به خطر می‌اندازد [۳].

در حوزه مطالعات آزمایشگاهی، **بلک^۲ و همکاران** با انجام آزمون میز لرزه بر روی یک نمونه پله فولادی در مقیاس واقعی، چهار نوع اتصال مختلف را ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که اتصال کاملاً گیردار در دو انتها، رفتاری بسیار سخت و نامطلوب از نظر انتقال نیرو به سازه اصلی دارد، درحالی‌که اتصالات منعطف‌تر عملکرد بهتری از خود نشان دادند [۴].

هیگینز^۳ نیز با آزمون‌های شبه‌استاتیکی بر روی پله‌های پیش‌ساخته فولادی، دریافت که این پله‌ها از شکل‌پذیری مناسبی برخوردارند اما اتصالات آن‌ها تحت خستگی و تمرکز تنش موضعی قرار می‌گیرند [۵].

وانگ^۴ و همکاران در اولین آزمون میز لرزه بر روی یک ساختمان پنج طبقه با پله فولادی پیش‌ساخته، آسیب‌پذیری شدید اتصالات را تأیید کرده و نشان دادند که آسیب‌ها در دررفت‌های نسبی، بسیار کم‌تر از دررفت هدف طراحی رخ می‌دهد که این امر عملکرد پله به‌عنوان مسیر خروج را پیش از رسیدن سازه به سطح عملکرد لرزه‌ای طراحی شده، مختل می‌کند [۶].

تحقیقات عددی نیز این یافته‌ها را تأیید و تکمیل کرده‌اند. **کافی و همکاران** با استفاده از روش اجزای محدود، نشان دادند که المان‌های شمشیری پله فولادی، سختی جانبی سازه را افزایش می‌دهند اما به دلیل ضعف ذاتی، زودتر دچار گسیختگی شده و ظرفیت تغییرشکل کلی سازه را کاهش می‌دهند. آن‌ها همچنین پدیده ستون کوتاه ناشی از اتصال صلب پاگرد به ستون‌ها و تمرکز تنش در نواحی خمیدگی شمشیری‌ها را به‌عنوان نقاط بحرانی معرفی کردند [۷].

وانگ^۵ و هاتچینسون^۵ در یک مطالعه پارامتریک جامع، دریافتند که بارگذاری در راستای موازی با شمشیری‌ها شرایط بحرانی‌تری ایجاد کرده و پله‌های مستقیم نسبت به پله‌های قیچی‌وار، نیروی جانبی بسیار بیش‌تری به سازه منتقل می‌کنند [۸].

1 Jiang

2 Black

3 Higgins

4 Wang

5 Hutchinson

با توجه به آسیب‌پذیری پله‌های متصل، راهکارهای نوینی برای بهسازی ارائه شده است. **سروش و همکاران** در دو مطالعه مجزا، اتصالات سازگار با جابه‌جایی (Drift-compatible) را بررسی کردند. مدل‌سازی‌های المان محدود و آزمون‌های میز لرزه‌ای آن‌ها نشان داد که این نوع اتصالات با جذب بخش قابل توجهی از جابه‌جایی‌ها، شتاب‌های القایی را کاهش داده و از آسیب به دستگاه پله حتی در سطوح بالای بارگذاری جلوگیری می‌کنند [۹] و [۱۰].

کافی و همکاران سه راهکار عملی شامل اتصالات لغزنده لوبیایی، استفاده از دو ستونک و استفاده از چهار ستونک زیر تیر میان‌طبقه را برای کاهش اثرات منفی پله پیشنهاد دادند [۱۱]. در رویکردی متفاوت، **تورون^۱ و همکاران** ایده‌ای نوین را مطرح کردند که در آن، دستگاه پله فولادی با سیستم‌های مهاربندی واگرا و همگرا ادغام می‌شود تا به عضوی اصلی از سیستم برابر جانبی تبدیل شود. نتایج عددی آن‌ها نشان داد این رویکرد ضمن حذف تداخل‌های معماری، شکل‌پذیری سازه را بهبود بخشیده، آسیب به مسیر تخلیه را کاهش داده و موجب صرفه‌جویی در مصرف فولاد می‌شود [۱۲]. این تحقیقات در مجموع بر لزوم مدل‌سازی دقیق پله و اهمیت طراحی اتصالات برای کنترل اندرکنش آن با سازه اصلی تأکید دارند.

پژوهشگران دیگر نیز بر اهمیت جداسازی تأکید کرده‌اند. **ون^۲ و همکاران** با استفاده از تحلیل المان محدود، سه مدل قاب بتنی شامل (بدون پله، پله متصل، و پله با اتصال کشویی) را مقایسه کردند و نشان دادند که اتصال کشویی با کاهش سختی جانبی، از تمرکز تنش در محل اتصال جلوگیری می‌کند [۱۳]. **بای^۳ و همکاران** یک سامانه جداساز لاستیکی (RBS) را معرفی کردند که در بخش پایینی رمپ پله نصب می‌شود. تحلیل‌های عددی نشان داد که این اتصال توانست تغییر مکان نسبی بین طبقات را جذب کرده و مانع از تخریب شدید پله شود [۱۴].

در پژوهشی که توسط **قادری و همکاران** انجام پذیرفت، تأثیر دستگاه پله بتنی بر عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتن‌آرمه مورد تحلیل قرار گرفت در این راستا، با بهره‌گیری از نرم‌افزار SAP2000، تعداد ۱۲ مدل سازه‌ای شامل سه، شش و ده طبقه، مدل‌سازی شد. تمامی این مدل‌ها در دو حالت مجزا، شامل حالت دارای پله و حالت بدون پله، شبیه‌سازی شدند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در ترکیب بارهای لرزه‌ای، مقادیر لنگر خمشی در دال پله در طبقات پایین به مراتب بیشتر از طبقات فوقانی است. همچنین،

رفتار دال پله در نقش یک عنصر مهاربندگونه در برابر زلزله قابل توجه بود؛ به‌گونه‌ای که نیروهای محوری ایجادشده در دال‌های پله می‌توانند تأثیر چشمگیری بر پاسخ کلی سازه داشته باشند، تأثیری که در بسیاری از مدل‌سازی‌ها و تحلیل‌های متداول نادیده گرفته می‌شود [۱۵].

در تحقیقی دیگر **خیرالدین و رضایی** به‌طور خاص تأثیر مدل‌سازی پله جداسازی‌شده با آویز کششی را بر قاب بتنی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که حتی این مدل انعطاف‌پذیر نیز سختی کلی را افزایش داده و منجر به کاهش پیروید و دریافت طبقات می‌شود. همچنین، با وجود قرارگیری پله در مرکز، این نوع اتصال باعث ایجاد نامنظمی پیشگی قابل توجه در ساختمان شد [۱۶].

کانگ^۴ و همکاران نیز رفتار دستگاه پله بتن‌آرمه را که توسط چهار ستونک از سازه اصلی جدا شده بود به‌صورت آزمایشگاهی و عددی مطالعه کردند. نتایج نشان داد که این سیستم جداسازی، عملکرد لرزه‌ای مطلوبی با ضریب شکل‌پذیری حدود ۲/۹ ارائه می‌دهد [۱۷].

۳- روش تحقیق و مدل‌سازی

برای بررسی رفتار لرزه‌ای، یک دستگاه پله فولادی دوطرفه به‌همراه قاب خمشی بتنی پیرامون آن به‌صورت اجزای محدود در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شد. بارگذاری لرزه‌ای به‌صورت استاتیکی غیرخطی (Pushover) با اعمال تغییر مکان جانبی ۱۰ سانتی‌متری که این مقدار معادل تقریبی دریافت ۲/۷ درصدی برای ارتفاع کف تا کف ۳۶۰ سانتی‌متری قاب است؛ در دو راستای موازی (محور X) و عمود (محور Z) بر امتداد پله به بالای قاب اعمال شد. نحوه اعمال جابه‌جایی در شکل (۱) نمایش داده شده است.

همچنین در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی رفتار دینامیکی سیستم جداسازی، از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی با استفاده از رکوردهای سه زلزله ال سترو، منجیل و طبس استفاده شده است. برای انجام این تحلیل، پس از هم‌پایه‌سازی هر سه شتاب‌نگاشت، رکورد هر زلزله به یک مدل سازه شش طبقه منظم (مشکل از قاب‌هایی با ابعاد قاب موجود در مقاله) در نرم‌افزار ETABS اعمال شد؛ سپس تغییر مکان نسبی طبقه بام نسبت به طبقه زیرین استخراج و این رکورد تغییر مکان به‌عنوان ورودی به مدل‌های اجزای محدود در ABAQUS اعمال شد.

⁴ Cong

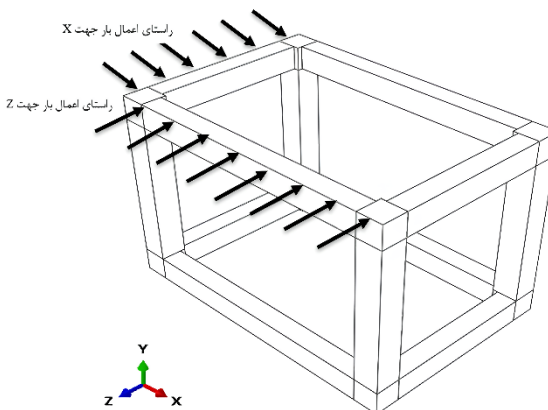
¹ Turon

² Wen

³ Bai



همچنین وزن ثقلی تمامی اجزا در تحلیل و وزن دال‌های پرکننده بین شمشیری‌ها نیز پس از محاسبه، بر روی شمشیری‌ها اعمال شد.



شکل ۱- نحوه اعمال جابه‌جایی در تحلیل

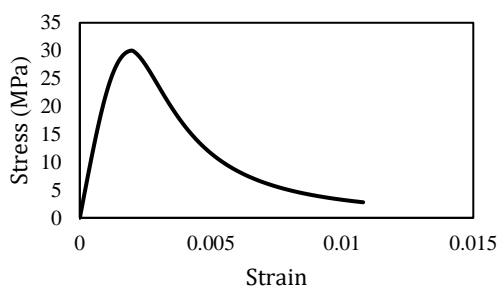
در این پژوهش، برای مدل‌سازی اجزای بتنی نظیر تیرها و ستون‌ها و همچنین قطعات فولادی مانند تیر فولادی، شمشیری‌ها، صفحات، نبشی‌ها، ناودانی‌ها و ستونک فشاری از المان SOLID استفاده شده است. نوع المان استفاده شده برای این اجزا، از نوع C3D8R (المان سه‌بعدی و هشت‌گره‌ی خطی با انتگرال‌گیری کامل) در نظر گرفته شده است. این المان دارای هشت گره با سه درجه آزادی انتقالی در هر گره است. به‌منظور مدل‌سازی میلگردهای طولی و عرضی (خاموت‌ها) نیز از المان BEAM و نوع B31 بهره گرفته شده است. این المان، یک تیر سه‌بعدی با دو گره می‌باشد که شامل قابلیت مدل‌سازی رفتارهای خمشی، برشی و محوری است. تعریف دقیق شرایط تکیه‌گاهی و نحوه اتصال اجزا در تحلیل اجزای محدود، نقشی اساسی در صحت نتایج دارد. در این پژوهش، شرایط مرزی و اتصالات به شرح زیر در نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شدند:

به‌منظور شبیه‌سازی یک اتصال مفصلی در پای ستون‌ها، سطح زیرین هر چهار ستون بتنی به‌صورت یک جسم صلب (Rigid Body) تعریف شد. سپس، یک نقطه مرجع در مرکز این سطح صلب ایجاد شد و تمامی درجات آزادی انتقالی آن مقید شد. این روش ضمن فراهم‌نمودن امکان دوران آزادانه ستون، از تمرکز تنش در یک گره واحد جلوگیری می‌کند.

برای شبیه‌سازی اندرکنش کامل و پیوسته میان میلگردها و بتن اطراف، از قید ناحیه مدفون (Embedded Region) استفاده شد. این قید، درجات آزادی انتقالی میلگردها را به المان‌های بتنی میزبان وابسته می‌سازد. همچنین، تمامی اتصالات بین قطعات فولادی به یکدیگر (معادل جوشکاری و روی خطوط جوشکاری)

و نیز اتصال اجزای فولادی دستگاه پله به قاب بتنی (در مدل‌های متصل) از طریق قید اتصال گره به سطح (Tie) مدل‌سازی شد تا انتقال نیرو به‌صورت کامل صورت پذیرد. از مدل‌سازی جوش در جهت ساده‌سازی صرف‌نظر شده است. به‌منظور شبیه‌سازی دقیق رفتار لرزه‌ای رمپ پله فولادی و قاب بتن آرمه پیرامون آن، رفتار غیرخطی مصالح بتن و فولاد با استفاده از مدل‌های رفتاری معتبر تعریف شد تا پاسخ سازه به بارهای لرزه‌ای به‌شکل واقع‌بینانه ارزیابی شود.

برای مدل‌سازی رفتار بتن، از مدل پلاستیسیته آسیب‌دیده بتن (Concrete Damaged Plasticity) موجود در نرم‌افزار ABAQUS بهره گرفته شد. این مدل قادر است رفتار غیرخطی بتن، شامل ترک‌خوردگی کششی و خردشدگی فشاری را به‌خوبی شبیه‌سازی کند. نمودار تنش-کرنش بتن در شکل (۲) و پارامترهای استفاده‌شده برای تنظیم مدل آسیب خمیری در نرم‌افزار در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۲- منحنی تنش-کرنش بتن [۱۸]

جدول ۱- مشخصات مدل آسیب خمیری بتن [۱۹]

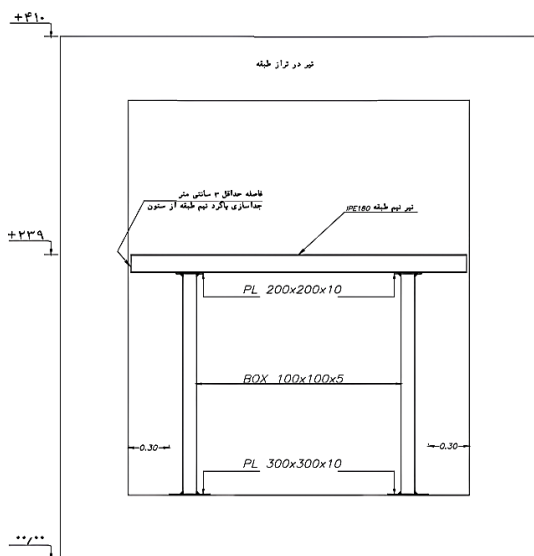
مقدار	پارامتر
35	زاویه اتساع (Angle Dilatation)
0.1	خروج از مرکزیت (Eccentricity)
1.16	نسبت مقاومت دو محوره به تک محوره (f_{b0}/f_{c0})
0.667	ضریب K
0.001	پارامتر ویسکوزیته (Viscosity Parameter)

رفتار مصالح فولادی به‌کاررفته در اجزای مختلف، شامل میلگردهای قاب بتن آرمه و قطعات دستگاه پله، به‌صورت غیرخطی و الاستوپلاستیک مدل‌سازی شد. برای میلگردهای فولادی، از مدل الاستیک-پلاستیک ایده‌آل (Ideal Elastic-Plastic) استفاده شد. این مدل، ناحیه سخت‌شوندگی کرنشی را نادیده گرفته و پس از رسیدن تنش به حد تسلیم، کرنش بدون افزایش تنش ادامه می‌یابد.

مدل قاب مرجع (RCF-NS): شامل قاب خمشی بتنی یک طبقه بدون دستگاه پله برای ارزیابی به عنوان مدل مینا است. در جدول (۳) مشخصات هندسی قاب نمایش داده شده است.

مدل پله متصل (RCF-SC-DR): شامل قاب خمشی بتنی به همراه دستگاه پله فولادی که به طور مستقیم و یکپارچه به ستون‌های مجاور متصل شده است. در این مدل تیر میان طبقه از دو سمت به ورق‌های انتظار مدفون در بتن با استفاده از نبشی متصل شده است. این ورق‌ها نیز خود با استفاده از دو ناودانی مدفون در بتن مهار شده‌اند. جدول (۴) مشخصات مقاطع دستگاه پله مدل‌سازی شده را نمایش می‌دهد.

مدل پله جداسازی شده (DSS-CP): در این مدل، مجموعه دستگاه پله در تراز میان طبقه به کمک دو ستونک فشاری که بر روی ورق‌های انتظار مدفون در تیر طبقه تحتانی قرار گرفته‌اند، از قاب خمشی جدا شده است. یک درز جداسازی به عرض سه سانتی‌متر نیز در تراز میان طبقه لحاظ شد. در شکل (۵) جزئیات مدل جداسازی شده با ستونک و در جدول (۵) مشخصات هندسی ستونک نمایش داده شده است. تمامی مدل‌ها در شکل (۶) به تصویر کشیده شده‌اند.

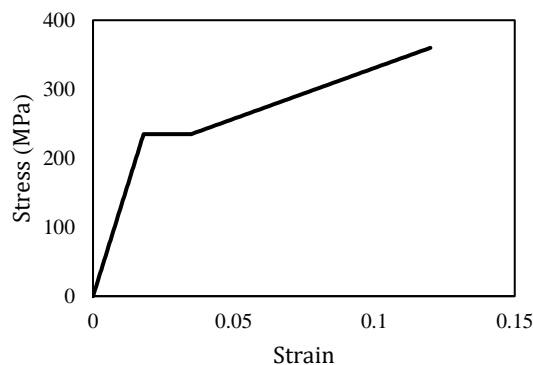


شکل ۵- جزئیات دستگاه پله جداسازی شده با ستونک فشاری

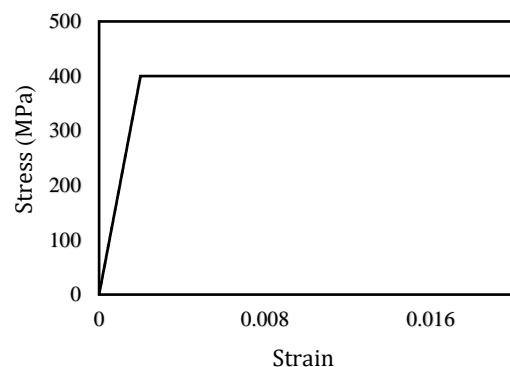
جدول ۳- مشخصات هندسی قاب بتن آرمه

تعداد	طول (cm)	ابعاد مقطع (cm)	عضو سازه‌ای
4	590	50x40	تیرهای قاب (راستای X)
4	400	50x40	تیرهای قاب (راستای Z)
4	410	50x50	ستون‌های قاب

برای اعضای فولادی دستگاه پله (شمشیری‌ها، تیر میان طبقه، اتصالات و ...) از فولاد ساختمانی St37 با رفتار الاستوپلاستیک و در نظر گرفتن ناحیه سخت‌شوندگی کرنشی استفاده شد. در شکل (۳) نمودار تنش-کرنش فولاد St37 و در شکل (۴) نمودار تنش-کرنش فولاد S400 ارائه شده است. مشخصات مکانیکی انواع مصالح به کار رفته در مدل‌سازی در جدول (۲) خلاصه شده است.



شکل ۳- نمودار تنش-کرنش مصالح فولادی St37 در مدل‌سازی



شکل ۴- نمودار تنش-کرنش مصالح فولادی S400 در مدل‌سازی

جدول ۲- مشخصات مکانیکی مصالح

نام مصالح	کاربرد	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	تنش تسلیم (MPa)
بتن	قاب خمشی (تیر و ستون)	27.7	0.15	30 (فشاری)
فولاد St37	اجزای اصلی پله	200	0.3	235
فولاد S400	آرماتورهای طولی	200	0.3	400
فولاد S340	آرماتورهای عرضی (خاموت‌ها)	200	0.3	340

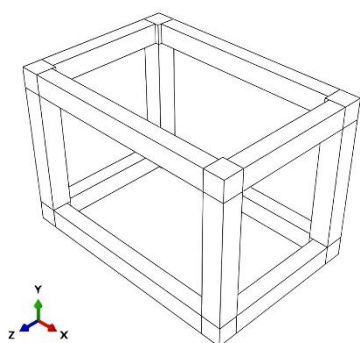
سه مدل اصلی برای این پژوهش تعریف شدند:

جدول ۴- مشخصات مقاطع دستگاه پله

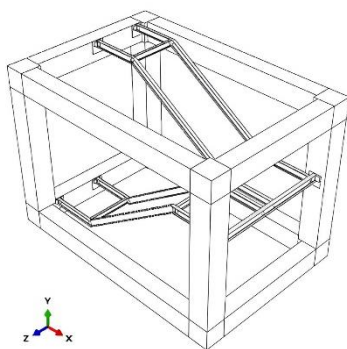
مقطع مورد استفاده	جزء دستگاه پله
IPE 160	شمشیری های رفت و برگشت
IPE 180	تیر میان طبقه
PL 100x100	ورق فولادی اتصالات
UNP 80	ناودانی مدفون در بتن
L100x100x10	
L120x120x12	نشی های اتصالات
L120x60x6	

جدول ۵ - مشخصات هندسی ستونک جداساز

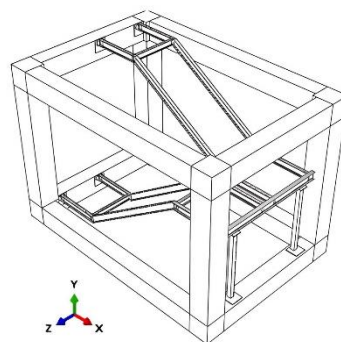
مقطع	جزء
BOX 100x100x5	ستونک فشاری
PL 200x200x10	ورق اتصال بالا (متصل به تیر میان طبقه)
PL 300x300x10	ورق اتصال پایین (نشسته بر تیر قاب)



RCF-NS

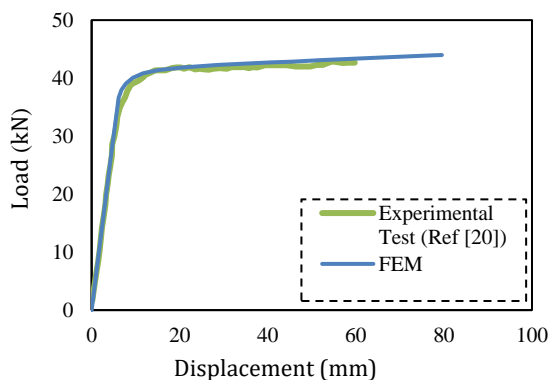


RCF-SC-DR



DSS-CP

شکل ۶- مدل های ساخته شده در نرم افزار



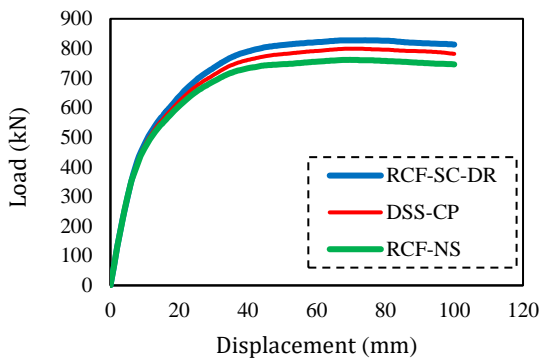
شکل ۷- مقایسه منحنی نیرو- تغییر مکان تیر فولادی، خروجی از نرم افزار با نمونه آزمایشگاهی

۳-۱- اعتبارسنجی مدل سازی عددی

به منظور اطمینان از اعتبار روش مدل سازی، نتایج عددی با داده های آزمایشگاهی موجود در مقالات معتبر مقایسه شد. ابتدا یک تیر فولادی بر اساس پژوهش هان^۱ و همکاران [۲۰] و سپس یک تیر بتن آرمه بر اساس تحقیق بن سعود^۲ و همکاران [۲۱] در نرم افزار ABAQUS مدل سازی شد. منحنی حاصل از تیر فولادی در شکل (۷) و منحنی حاصل از مدل سازی تیر بتن آرمه در شکل (۸) آورده شده است. در هر دو مورد، منحنی های نیرو-تغییر مکان حاصل از تحلیل عددی، تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که این امر صحت و دقت رویکرد مدل سازی به کاررفته برای شبیه سازی رفتار غیرخطی اجزای فولادی و بتنی را تأیید می کند.

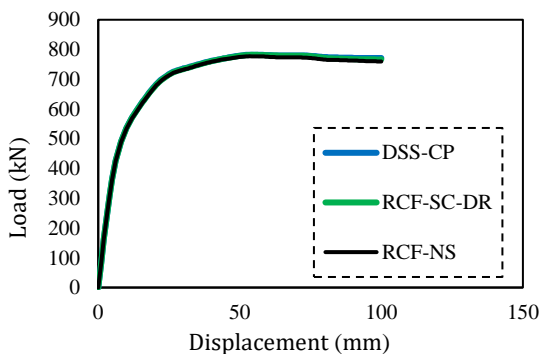
¹ Han

² Ben Saoud

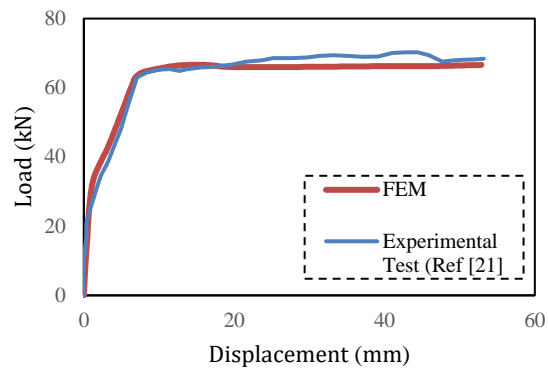


شکل ۹- نمودار نیرو-تغییر مکان در راستای X

در شکل (۱۰) نمودارهای نیرو-تغییر مکان راستای Z قابل مشاهده است؛ در این راستا (عمود بر امتداد پله)، رفتار تمامی مدل‌ها تقریباً یکسان است. مقاومت نهایی و سختی در مدل‌های مختلف (متصل، جداسازی شده و قاب مرجع) تفاوتی کم‌تر از ۱٪ با یکدیگر دارند. این نتایج به وضوح نشان می‌دهد که سختی و مقاومت دستگاه پله عمدتاً در راستای طولی آن مؤثر است و در راستای عرضی، تأثیر قابل توجهی بر پاسخ کلی سازه ندارد. در جدول (۶) پارامترهای لرزه‌ای تمامی مدل‌ها در هر دو راستا آورده شده است.



شکل ۱۰- نمودار نیرو-تغییر مکان راستای Z



شکل ۸- مقایسه منحنی نیرو-تغییر مکان تیر بتن آرمه نرم‌افزاری و نمونه آزمایشگاهی

۴- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از تحلیل مدل‌ها به صورت کمی و کیفی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تحلیل‌ها در دو بخش اصلی ارائه می‌شوند: ابتدا نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی که شامل نمودارهای کلی نیرو-تغییر مکان و بررسی کانتورهای توزیع تنش و کرنش در اجزای مختلف سازه به صورت مقایسه‌ای بررسی شده و در ادامه نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی انجام شده بر روی مدل‌ها بررسی می‌شوند.

۴-۱- تحلیل و تفسیر نمودارهای نیرو-تغییر مکان

شکل (۹) نمودارهای نیرو-تغییر مکان در راستای X را نمایش می‌دهد. در این شکل‌ها محور افقی تغییر مکان یکی از گره‌های فوقانی قاب بوده و محور قائم جمع عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی پایین قاب است. نمودارهای پاسخ کلی مدل‌ها اولین معیار برای درک رفتار لرزه‌ای آن‌ها است. در راستای X (موازی با امتداد پله)، اندرکنش پله و سازه کاملاً مشهود است. مدل پله متصل (RCF-SC-DR-X) که سخت‌ترین حالت محسوب می‌شود، مقاومت نهایی را ۸۷٪ و سختی سکانت را حدود ۸۳٪ نسبت به قاب مرجع افزایش داده است. این افزایش بیانگر مشارکت ناخواسته پله در باربری جانبی است. در مقابل، مدل جداسازی شده با ستونک فشاری (DSS-CP-X)، افزایش مقاومت و افزایش سختی سکانت را به ۴۹٪ محدود کرده است. نزدیکی رفتار این مدل به قاب مرجع، موفقیت روش جداسازی در به حداقل رساندن اندرکنش ناخواسته را نشان می‌دهد.

جدول ۶- مقایسه جامع پارامترهای لرزه‌ای مدل‌ها نسبت به قاب مرجع (RCF-NS)

راستای بارگذاری	مدل	مقاومت نهایی (kN)	درصد اختلاف با قاب مرجع	سختی الاستیک (kN/mm)	درصد اختلاف با قاب مرجع	سختی سکانت (kN/mm)	درصد اختلاف با قاب مرجع
راستای X	قاب مرجع (RCF-NS)	761.5	-	64	-	7.62	-
	پله متصل (RCF-SC-DR)	827.5	8.7 %	65.7	2.7 %	8.28	8.7 %
	پله جداسازی شده با ستونک فشاری (DSS-CP)	799	4.9 %	64.8	1.2 %	7.99	4.9 %
راستای Z	قاب مرجع (RCF-NS)	777.4	-	81.5	-	7.77	-
	پله متصل (RCF-SC-DR)	782	0.6 %	81.8	0.3 %	7.82	0.6 %
	پله جداسازی شده با ستونک فشاری (DSS-CP)	782.4	0.6 %	81.8	0.3 %	7.82	0.6 %

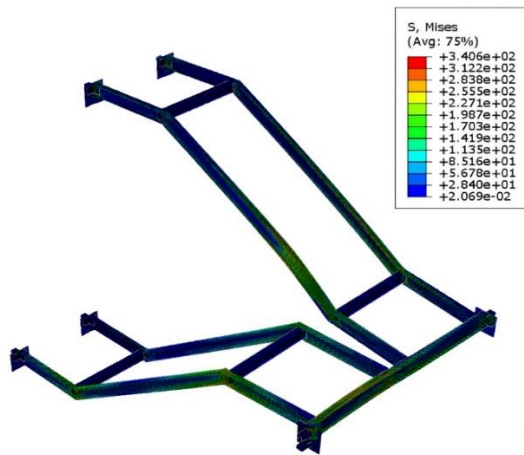
۴-۲- بررسی کانتورهای تنش، کرنش و آسیب

برای درک عمیق‌تر مکانیزم‌های خرابی، نتایج حاصل از کانتورهای اجزای محدود در مدل‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در تمامی مدل‌ها و در هر دو راستای بارگذاری X و Z، الگوی خرابی قاب اصلی مشابه بود. آرماتورهای طولی تیرها و ستون‌ها در محل گره‌های اتصال به تنش تسلیم ۴۰۰ مگاپاسکال رسیدند و مفاصل پلاستیک در این نواحی تشکیل شد. این امر نشان می‌دهد که قاب خمشی در تمام حالت‌ها به‌عنوان سیستم اصلی باربر جانبی عمل کرده و رفتار مورد انتظار خود را به نمایش گذاشته است.

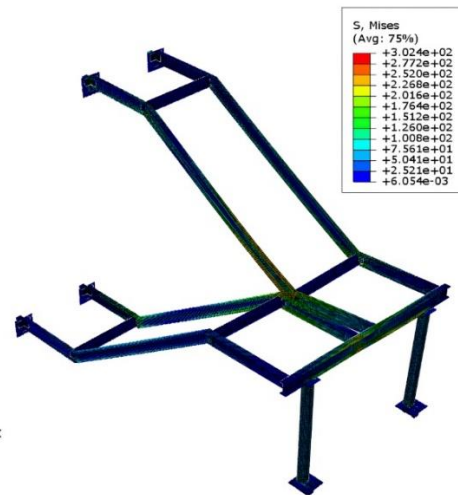
مطابق با تسلیم آرماتورها، بتن در نواحی اتصال تیر به ستون در تمامی مدل‌ها دچار آسیب کششی گسترده (با پارامتر آسیب نزدیک به ۰/۹۶) شد که بیانگر ترک‌خوردگی شدید است. از نظر کرنش فشاری، در راستای X، مقادیر حداکثری در بالای ستون‌ها و در نواحی فشاری تیرها مشاهده شد که در مدل‌های مختلف بین ۰/۰۲۶ تا ۰/۰۳۶ متغیر بود. این مقادیر نزدیک به کرنش نهایی بتن (۰/۰۰۳) بوده و نشان‌دهنده تمرکز بالای تنش فشاری در این نواحی است. در راستای Z، کرنش‌های فشاری به‌طور کلی کم‌تر بودند و از حدود ۰/۰۰۲۲ تجاوز نکردند.

در شکل (۱۱) کانتور تنش شمشیری‌های دستگاه پله مشاهده می‌شود. با بررسی تنش و کرنش‌های پلاستیک در شمشیری‌های دستگاه پله به‌وضوح تفاوت عملکرد مدل‌ها مشاهده می‌شود. در مدل پله متصل (RCF-SC-DR-X)، شمشیری‌ها تحت تنش تا ۲۷۰ مگاپاسکال قرار گرفتند و کرنش پلاستیک در محل شکستگی آن‌ها به مقدار ۰/۰۴۱ رسید که ۳۵ برابر کرنش تسلیم فولاد St37 است و تغییرشکل دائمی را نشان می‌دهد. اما با این حال این مقدار کرنش، همچنان با کرنش نهایی فولاد St37 که برابر با ۰/۲۵ است فاصله بسیار زیادی دارد. شکل (۱۲) کانتور کرنش پلاستیک در این مدل را نمایش می‌دهد.

در مدل جداسازی شده (DSS-CP-X)، حداکثر تنش در شمشیری‌ها ۲۴۱ مگاپاسکال بود و کرنش پلاستیک حداکثر به ۰/۰۲۷ محدود شد. این کاهش ۳۴٪ در کرنش پلاستیک بیانگر موفقیت روش جداسازی در حفاظت از شمشیری‌ها است. در راستای Z، شمشیری‌ها در تمامی مدل‌ها تقریباً بدون تنش و در محدوده الاستیک باقی ماندند. شکل (۱۳) کانتور کرنش پلاستیک در مدل جداسازی شده را نمایش می‌دهد.



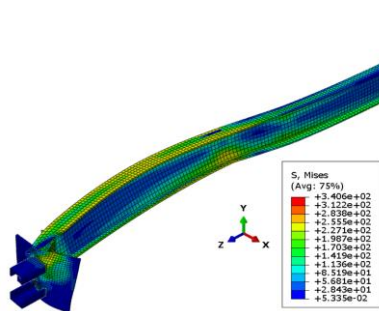
RCF-SC-DR



DSS-CP

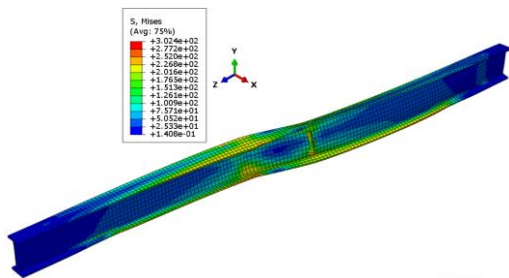
شکل ۱۱- کانتور تنش مجموعه دستگاہ پله فولادی مدل برحسب MPa

دارد. این مقایسه عددی، موفقیت روش جداسازی در حفاظت از این عضو کلیدی را اثبات می‌کند. در شکل (۱۵) کانتور تنش تیر میان طبقه مدل جداسازی شده نمایش داده شده است. در راستای Z، تیر میان طبقه در تمامی مدل‌ها تنش ناچیزی را تجربه کرد.



شکل ۱۴- کانتور تنش تیر میان طبقه فولادی در مدل RCF-SC-DR-X

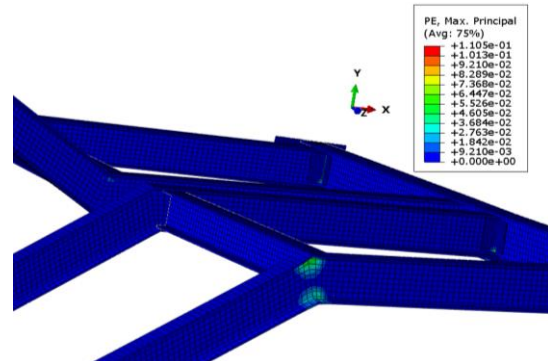
برحسب MPa



شکل ۱۵- کانتور تنش تیر میان طبقه فولادی با پنج برابر بزرگ‌نمایی

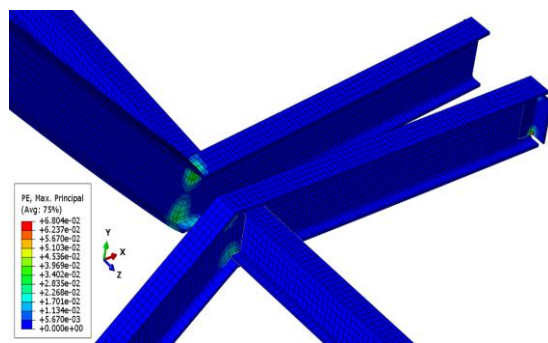
در مدل DSS-CP-X برحسب MPa

در مدل پله متصل (RCF-SC-DR-X) نبشی‌های اتصال شمشری‌ها به قاب و همچنین اتصالات تیر میان طبقه به ستون‌ها در نواحی متعددی به تنش تسلیم ۲۳۵ مگاپاسکال رسیدند.



شکل ۱۲- کانتور کرنش پلاستیک اصلی کششی دستگاہ پله در مدل

RCF-SC-DR-X



شکل ۱۳- کانتور کرنش پلاستیک اصلی کششی دستگاہ پله در مدل

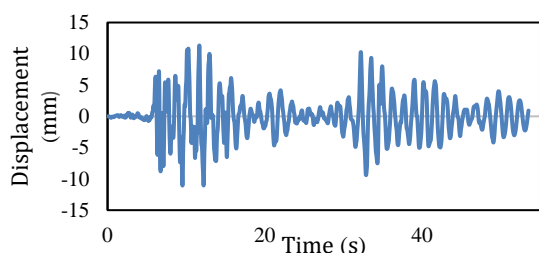
DSS-CP-X

شکل (۱۴) کانتور تنش را در تیر میان طبقه مدل متصل نمایش می‌دهد. در مدل پله متصل (RCF-SC-DR-X)، تیر میان طبقه به دلیل درگیری در باربری جانبی، در نقاط متعددی به تنش تسلیم ۲۳۵ مگاپاسکال رسید و دچار تسلیم شد. اما در مدل جداسازی شده (DSS-CP-X)، این تیر از حرکت قاب مصون ماند و حداکثر تنش در آن ۲۱۳ مگاپاسکال بود که کاملاً در محدوده الاستیک قرار

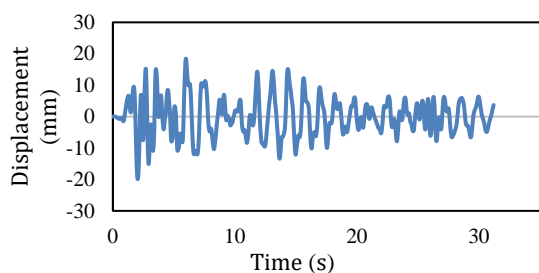
۳-۴- تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی

در این پژوهش، با بهره‌گیری از رکوردهای سه زلزله منجیل السترو و طیس، تحلیل دینامیکی از نوع تاریخچه زمانی بر روی مدل‌ها انجام شده است. شکل‌های (۱۹) الی (۲۱) به ترتیب رکوردهای تغییر مکان-زمان استخراج شده حاصل از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی را نشان می‌دهند.

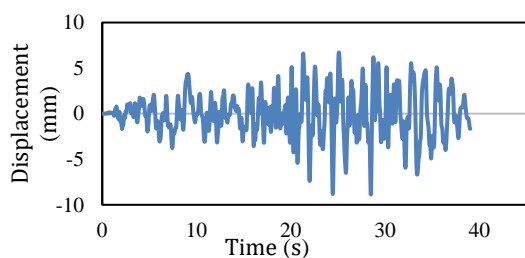
شکل (۲۲)، منحنی هیستریزس حاصل از تحلیل دینامیکی تحت رکورد زلزله السترو را برای دو مدل متصل و جداسازی شده نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، در مدل متصل بیشینه برش پایه برابر با ۱۰۰۳ کیلونیوتن و در مدل جداسازی شده ۹۸۳ کیلونیوتن به دست آمده است. در شکل (۲۳)، منحنی هیستریزس مربوط به رکورد زلزله منجیل ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که بیشینه برش پایه در مدل متصل ۶۷۲ کیلونیوتن و در مدل دارای ستونک فشاری ۶۷۸ کیلونیوتن بوده است. همچنین شکل (۲۴)، منحنی هیستریزس حاصل از تحلیل تحت رکورد زلزله طیس را نشان می‌دهد. در این حالت، بیشینه برش پایه در مدل متصل ۵۲۵ کیلونیوتن و در مدل دارای ستونک فشاری ۵۱۲ کیلونیوتن به دست آمده است.



شکل ۱۹- رکورد زلزله منجیل

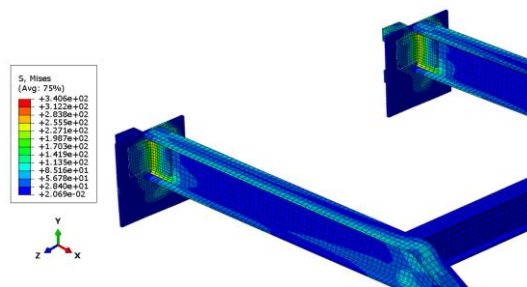


شکل ۲۰- رکورد زلزله السترو

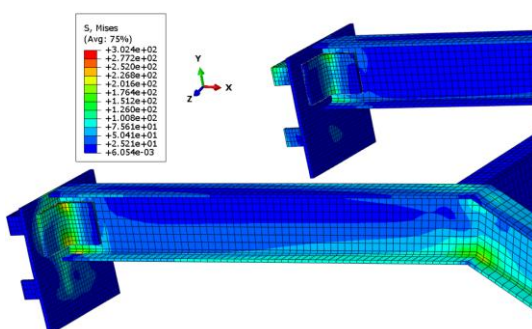


شکل ۲۱- رکورد زلزله طیس

در مقابل، در مدل جداسازی شده (DSS-CP-X)، این اتصالات در محدوده الاستیک باقی ماندند. شکل (۱۶) کانتور تنش اتصالات را در مدل متصل و شکل (۱۷) کانتور تنش اتصالات در مدل جداسازی شده را نمایش می‌دهند.

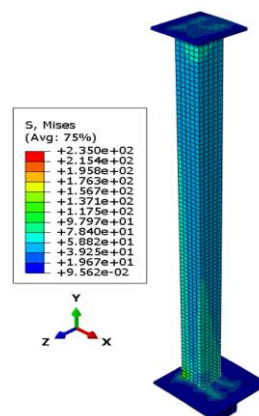


شکل ۱۶- کانتور تنش اتصالات شمشیری‌های ریمپ صعود به قاب خمشی در مدل RCF-SC-DR-X برحسب MPa



شکل ۱۷- کانتور تنش اتصالات شمشیری‌های تراز فوقانی به قاب خمشی در مدل DSS-CP-X برحسب MPa

شکل (۱۸) کانتور تنش ستونک فشاری را نشان می‌دهد. المان‌های جداسازی یعنی ستونک‌های فشاری، تحت تنش بسیار پایینی در حدود ۱۰۰ مگاپاسکال قرار گرفتند و فاصله زیادی تا حد تسلیم داشتند. این یافته نشان می‌دهد که سیستم جداسازی به درستی عمل کرده و بدون اینکه خود دچار آسیب شود، از انتقال نیروهای مخرب جلوگیری نموده است.



شکل ۱۸- کانتور تنش ستونک فشاری در مدل DSS-CP-X برحسب MPa

جدول ۷- انرژی مستهلک شده در مدل‌ها

میزان انرژی مستهلک شده (ژول)	زلزله	مدل
33763.96	السترو	RCF-SC-DR
35477.16		DSS-CP
2577.47	طبس	RCF-SC-DR
2321.65		DSS-CP
10097.51	منجیل	RCF-SC-DR
9434.0528		DSS-CP

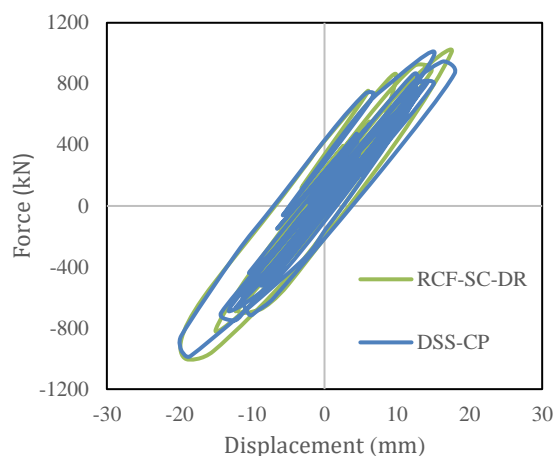
۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

این پژوهش به بررسی عددی رفتار لرزه‌ای رمپ پله فولادی دوطرفه در یک قاب خمشی بتن‌آرمه یک طبقه و ارزیابی کارایی روش جداسازی با ستونک فشاری نسبت به پله جداسازی نشده فولادی پرداخت. تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی و دینامیکی منجر به نتایج کمی مشخصی شد که در ادامه به صورت جمع‌بندی ارائه می‌گردد:

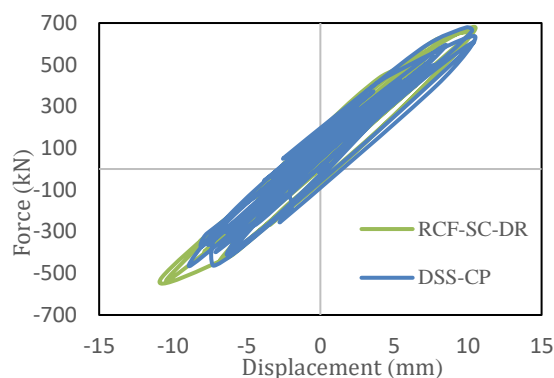
۱- اتصال مستقیم دستگاه پله به قاب اصلی، آن را به یک مهاربند ناخواسته تبدیل می‌کند که ضمن افزایش مقاومت نهایی و سختی سکانس سازه تا ۹٪ و ۸٪ در راستای موازی پله، منجر به تمرکز تنش و آسیب‌های دائمی در پله می‌شود. کرنش پلاستیک در شمشیری‌های مدل متصل (RCF-SC-DR) به ۳۵ برابر کرنش تسلیم فولاد رسید که نشان‌دهنده تغییر شکل‌های غیرالاستیک و دائمی است؛ هرچند مقدار این کرنش‌ها تا حد نهایی کرنش فولاد فاصله زیادی داشت و به گونه‌ای نبود که قابلیت بهره‌برداری آنی از پله را مختل نماید.

۲- روش جداسازی با ستونک فشاری (DSS-CP) عملکردی موفق در حفاظت لرزه‌ای دستگاه پله داشت. این روش مشارکت ناخواسته پله در باربری جانبی را به حداقل رساند، به طوری که افزایش مقاومت و سختی سکانس قاب تنها حدود ۵٪ بود. در این مدل، المان‌های کلیدی مانند تیر میان طبقه به حداکثر تنش ۲۱۳ مگاپاسکال و خود ستونک‌های فشاری به حداکثر تنش ۱۰۰ مگاپاسکال رسیدند که کاملاً در محدوده الاستیک باقی ماندند.

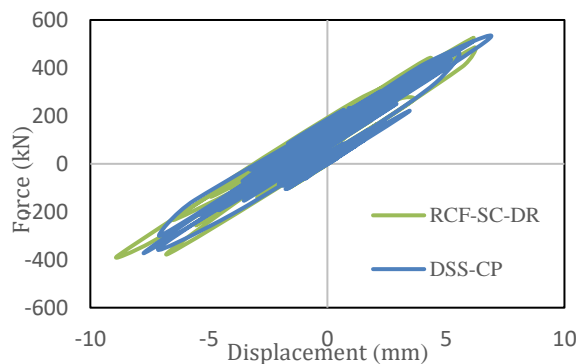
۳- رفتار لرزه‌ای دستگاه پله به جهت اعمال بار وابسته است. تمامی آسیب‌های بحرانی، تنش‌های فراتر از حد تسلیم و کرنش‌های پلاستیک قابل توجه، منحصراً در راستای بارگذاری موازی با امتداد پله (محور X) رخ داد. در راستای عمود بر پله (محور Z)، تفاوت در مقاومت نهایی و سختی تمامی مدل‌ها (مدل متصل، مدل جداسازی شده و قاب مرجع) کم‌تر از ۱٪ بود و



شکل ۲۲- منحنی هیستریزس زلزله الاسترو



شکل ۲۳- منحنی هیستریزس زلزله منجیل



شکل ۲۴- منحنی هیستریزس زلزله طبس

با محاسبه سطح محصور بین منحنی‌های هیستریزس هر مدل، نتایج ارائه شده در جدول (۷) نشان می‌دهد که در تحلیل مبتنی بر رکورد زلزله الاسترو، مدل دارای ستونک فشاری در حدود ۵٪ استهلاک انرژی بیشتری نسبت به مدل متصل داشته است. در مقابل، در رکوردهای زلزله منجیل و طبس، مدل متصل به ترتیب حدود ۷٪ و ۱۱٪ اتلاف انرژی بیشتری نسبت به مدل جداسازی شده با ستونک فشاری از خود نشان داده است.

دستگاه پله در این راستا رفتاری کاملاً الاستیک و بدون آسیب از خود نشان داد.

۴- به‌طور خلاصه، می‌توان نتیجه گرفت که دستگاه پله فولادی حتی در حالت جداسازی نشده (متصل)، تغییر چندانی در رفتار کلی سازه ایجاد نمی‌نماید و همچنین آسیب‌های ایجاد شده در آن به‌گونه‌ای نبوده است که موجب اختلال در قابلیت بهره‌برداری دستگاه پله شود؛ هرچند در روش جداسازی با ستونک فشاری، آسیب وارده به دستگاه پله کم‌تر است. در مجموع می‌توان گفت هدف از جداسازی دستگاه پله فولادی، به‌حداقل رساندن آسیب خود دستگاه پله است، زیرا رفتار کلی قاب خمشی بتنی تأثیر چندانی نمی‌پذیرد.

۵- از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی انجام شده نیز نتایجی مشابه و هم‌سو با تحلیل استاتیکی غیرخطی حاصل شد. به‌منظور بررسی بیشتر رفتار و پایایی دستگاه پله فولادی، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی مواردی همچون بررسی دستگاه پله فولادی و اثرات آن در سازه‌های چندین طبقه، جداسازی دستگاه پله با آویز کششی، جداسازی با اتصالات لغزشی و دستگاه پله‌های سه و چهارطرفه مورد مطالعه قرار گیرند.

- [13] Wen, M., Tian, H., Wang, W., Chen, B., and Fu, H. (2022), "Research on seismic performance of frame structure with beam staircases", *Buildings*, 12(8), p.1106.
- [14] Bai, L., Liang, X., Xin, L., Liu, M., Yu, Z., and Chu, Y. (2023), "Investigation on the Seismic Performance of RC Frame Buildings with Rubber Isolation Bearing Installed in Staircases", *Buildings*, 13(3), p.616.
- [15] Ghaderi Garakani, M., Mahjoubi, S. and Maleki, S. (2017), "Effects of Modeling Staircases on Seismic Responses of Concrete Frames", In *Advanced Engineering Forum*. 23, pp.72-87.
- [۱۶] خیرالدین، ع.، و رضایی، م. (۱۴۰۰)، "تأثیر مدل‌سازی پله با آویز کششی بر رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی بتن"، سومین کنفرانس ملی پژوهش‌های نوین در مهندسی و علوم کاربردی. بروجرد.
- [17] Cong, S., Zhang, Z., Zheng, Q., and Xu, Z. (2021), "Seismic behavior of reinforced concrete frame staircase with separated slab stairs", In *Structures*, 34, pp.4284-4296.
- [18] Thorenfeldt, E. (1987), "Mechanical properties of high-strength concrete and applications in design", In *Symposium Proceedings, Utilization of High-Strength Concrete, Norway*.
- [19] Wahid, N., Stratford, T., and Bisby, L. (2019), "Calibration of concrete damage plasticity model parameters for high temperature modelling of reinforced concrete flat slabs in fire", *Applications of Structural Fire Engineering*, Singapore.
- [20] Han, Y., Li, N., and Zhang, G. (2023), "Study on flexural behavior of corroded i-shaped steel beams strengthened with hybrid CFRP/GFRP sheets", *Materials*, 16(14), p.5080.
- [21] Ben Saoud, M., Orafi, M., Gundogay, A., Yaman, S., Eren, V., and Tekeli Kabas, H. (2024), "An Experimental Study on Repairing of Reinforced Concrete Beams Having Damaged Longitudinal Bars", *Applied Sciences*, 14(23), p.11310.
- [1] Hosseini Hashemi, B., and Keykhosro Kiany, B. (2018), "Performance of Steel Structures and Associated Lessons to be Learned from November 12, 2017, Sarpol-e Zahab-Ezgeleh Earthquake (MW 7.3)", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 20(3), pp.33-46.
- [۲] نوری‌فرد، آ.، تابش‌پور، م.، و مهدی‌زاده سراج، ف. (۱۳۹۴)، "خسارات لرزه‌ای ناشی از نادیده‌گرفتن راه‌پله در طراحی و اجرای ساختمان‌ها"، پژوهشنامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۸ (۴)، ص ۵۵.
- [3] Jiang, H.J., Gao, H.Y., and Wang, B. (2012), "Seismic damage analyses of staircases in RC frame structures", *Advanced Materials Research*, 446, pp.2326-2330.
- [4] Black, C., Aiken, I., Smith, K., Belvin, R., and Peachey, A. (2017), "Seismically-resilient stair systems for buildings", In the *Proceedings of the Structural Engineers Association Annual Convention*. Paper. (22).
- [5] Higgins, C. (2009), "Prefabricated steel stair performance under combined seismic and gravity loads", *Journal of Structural Engineering*, 135(2), pp.122-129.
- [6] Jiang, H.J., Gao, H.Y., and Wang, B. (2012), "Seismic damage analyses of staircases in RC frame structures", *Advanced Materials Research*, 446, pp.2326-2330.
- [۷] کافی، م.ع.، رادفر، ا. (۱۳۹۲)، "ارائه روش‌های پیشنهادی جهت بهسازی المان‌های دستگانه پله تحت ترکیب بارهای ثقلی و جانبی"، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران. زاهدان.
- [8] Wang, X., and Hutchinson, T.C. (2018), "Computational assessment of the seismic behavior of steel stairs", *Engineering Structures*, 166, pp.376-386.
- [9] Sorosh, S., Hutchinson, T.C., Ryan, K.L., Smith, K., Belvin, R., and Black, C. (2024), "High-fidelity finite element modeling of the seismic response of prefabricated steel stairs", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 53(8), pp.2491-2510.
- [10] Sorosh, S., Hutchinson, T.C., Ryan, K.L., Smith, K.W., Kovac, A., Zabet, S., and Pei, S. (2025), "Experimental Characterization of a Full-Scale Stair System Detailed to Achieve Seismic Resiliency", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.
- [۱۱] کافی، م.ع.، خیرالدین، ع.، و رادفر، ا. (۱۳۹۲)، "بررسی عملکرد المان‌های پله به روش اجزای محدود تحت ترکیب بار لرزه‌ای و ثقلی"، چهارمین کنفرانس ملی زلزله و سازه. کرمان.
- [12] Montalbán Turón, C., and Vargas Alzate, Y.F. (2023), "Special braced stairs versus typical braced frames. New architectural-structural-seismic approach to stair design", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 32(5-6), p.e1997.