

EXTENDED ABSTRACT

Enhancing the Cyclic Behavior of a Mechanical Beam-To-Column Joint in Steel Moment-Resisting Frames with CFT Columns Using a Novel Spring-Guide Restoring System

Hamid Ghaderi ^a, Ahmad Maleki ^{a,*}, Mohammad Ali Lotfollahi-Yaghin ^b

^a Department of Civil Engineering, Mar.C., Islamic Azad University, Maragheh, Iran

^b Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 16 November 2025; **Reviewed:** 05 January 2026; **Accepted:** 06 January 2026

Keywords:

CFT column, Mechanical joint, Seismic fuse, Cyclic analysis.

1. Introduction

The concept of using Concrete-Filled Steel Tube (CFT) columns has been proposed to optimize the use of steel and concrete materials. The advantages of these elements have led to their widespread application in the construction industry. These types of columns are usually used in moment resisting frame systems with rigid connections, and play a significant role in lateral load resistance of the system. Despite providing sufficient strength for beams and columns, weakness in the connection area can disrupt the load path and could lead to overall collapse of the system. When the connection is well-designed, seismic fuses will concentrate at both ends of the beam (the main frame member). After a strong earthquake, the entire story beam needs repair or replacement, which incurs high costs. To address all these challenges, this study proposes using a mechanical joint equipped with a centering spring (Fig. 1).

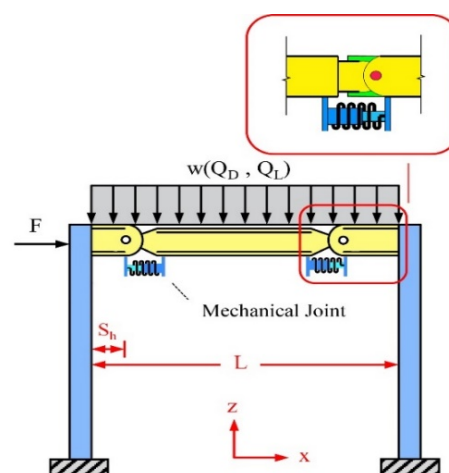


Fig. 1. Frame equipped with the proposed joint and a close view of it

* **Publisher:** Vice Chancellery for Research & Technology, University of Tabriz

<https://doi.org/10.22034/ceej.2026.70268.2472>

* **Orcid Code Corresponding Author:** 0000-0002-4649-4347

E-mail addresses: hamid.ghaderi@iau.ir (Hamid Ghaderi), ad.maleki@iau.ac.ir (Ahmad Maleki), lotfollahi@tabrizu.ac.ir (Mohammad Ali Lotfollahi-Yaghin).

2. Methodology

Nonlinear modeling was performed using ABAQUS software (2022). Since the goal is to evaluate the seismic performance of the proposed mechanical joint, a simple frame (one story and one span) was modeled in two states: a regular rigid connection (Model₀) and a connection equipped with the proposed mechanical joint (Model₁). Fig. 2 shows the beam-to-column connections in each model. It is evident that in both models, the beam and column elements and the gravitational and lateral loadings are identical. It is noteworthy that the columns are of CFT type and the beams have I-shaped cross-section.

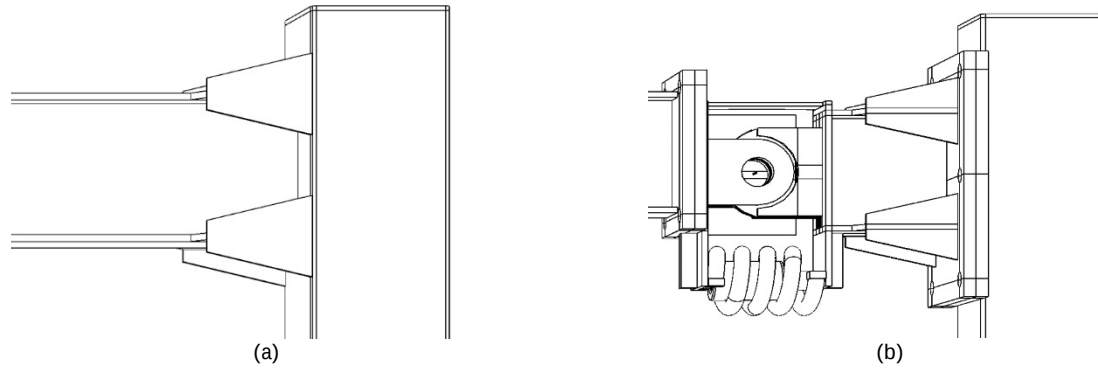


Fig. 2. Beam-to-column connection in the models: **a)** Regular rigid connection, **b)** Connection equipped with the proposed mechanical joint

3. Results and discussion

The introduced models were subjected to pushover and hysteretic analyses. In the hysteretic analysis, the SAC loading protocol was used. The resulting hysteresis curves for the models were obtained as shown in Fig. 3. This figure also depicts the stress distribution in the members at the loading step corresponding to material yield.

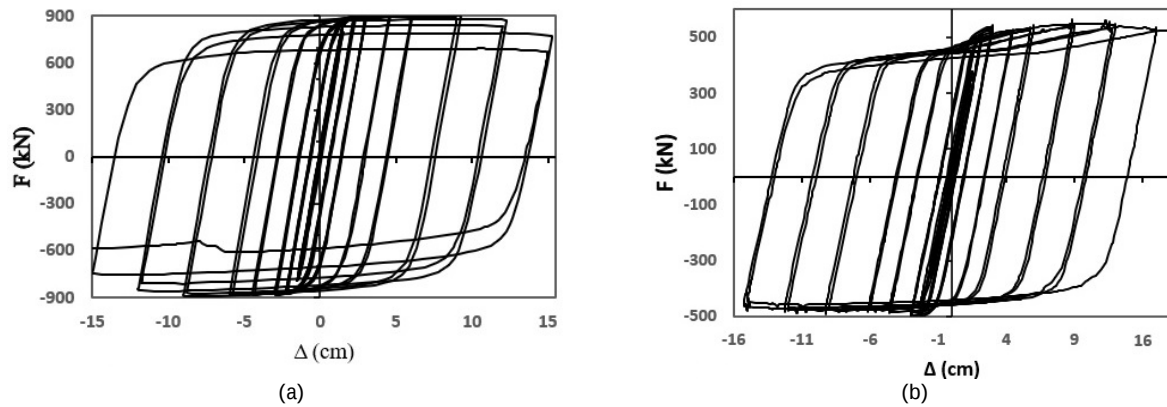


Fig. 3. Hysteresis curves of the studied models and the stress distribution in the elements at the moment of reaching yield stress in the materials: **a)** Model₀, **b)** Model₁

For the pushover analysis, incremental displacement was applied to the control point (roof center of mass) in each model. Finally, for each model, the capacity curve, representing the base shear variation relative to the control point displacement, was obtained (Fig. 4).

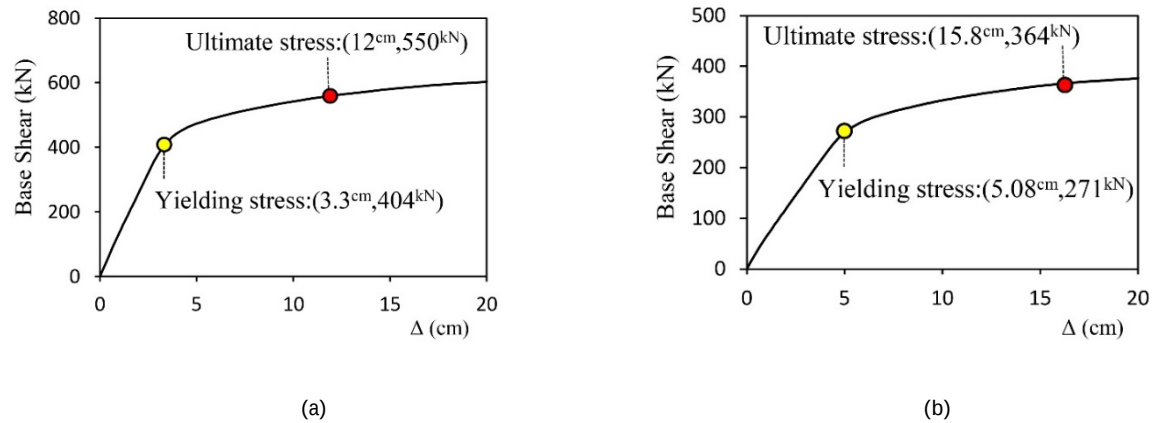


Fig. 4. Capacity curves obtained from the pushover analysis: **a)** Model₀, **b)** Model₁

4. Conclusions

According to the results, the hysteresis curves are broad and stable when using the proposed mechanical joint in the moment frame. A significant portion of the input energy to the frame is absorbed by the length change of the spring at the joint, and consequently dissipated as kinetic energy. During loading, this member does not experience damage or yielding. Although using the joints reduces the initial elastic stiffness of the frame, the stress level in the main members (including beam, column, and connection) significantly decreases. The spring acts as a conservative member in this structure, ensuring the return to the initial state (loading threshold) similar to zero-force members in trusses. Therefore, with proper design, it is expected that the entire system will be serviceable again after the loading process is completed.

ارتقای رفتار چرخه‌ای مفصل مکانیکی اتصال تیر به ستون در قاب‌های خمشی فولادی با ستون‌های CFT با استفاده از سیستم نوین بازگرداننده متشکل از فنر و هدایتگر

حمید قادری¹، احمد ملکی^{2*}، محمدعلی لطف‌اللهی یقین³

¹ دانشجوی دکتری گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران

² استادیار گروه مهندسی عمران، واحد مراغه، دانشگاه آزاد اسلامی، مراغه، ایران

³ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، ایران

دریافت: 1404/8/25، بازنگری: 1404/10/15، پذیرش: 1404/10/16، نشر آنلاین: 1404/10/16

چکیده

در هر سیستم سازه‌ای، گسیختگی اتصالات ترد و نامطلوب است. براین اساس، در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای، اتصالات اعضای نیرو- کنترل قلمداد می‌شوند و همواره سعی بر آن است تا با در نظر گرفتن خرابی‌های کنترل شده در سیستم و تعبیه فیوزهای لرزه‌بر، از ورود آن‌ها به محدوده رفتار غیرخطی ممانعت شود. در قاب‌های خمشی با ستون‌های پر شده با بتن (CFT)، معمولاً فیوزهای لرزه‌بر در دو انتهای تیرهای اصلی تعبیه می‌شوند، اما این راهکار خطر آسیب‌پذیری بالای اتصالات و دشواری تعمیر یا جایگزینی تیرها به عنوان اعضای اصلی باربر را به همراه دارد. در این راستا، استفاده از مفصل مکانیکی مجهز به سیستم بازگرداننده می‌تواند با تمرکز فیوزهای لرزه‌بر در نواحی دور از اتصالات، چالش‌های فوق را کاهش دهد. در مطالعه حاضر یک سیستم برگشت‌پذیر ویژه معرفی و جزئیات تحلیل و طراحی آن ارائه شده و عملکرد لرزه‌ای آن در قاب‌های خمشی با ستون‌های CFT ارزیابی گردیده است. فرآیند تحلیل با مدل‌سازی عددی سه اتصال شامل: اتصال خمشی سخت‌شده، اتصال مفصلی مکانیکی بدون سیستم بازگرداننده و اتصال مفصلی مکانیکی مجهز به فنر بازگرداننده، گایدر (Guider) و سخت‌کننده انجام شد. نتایج نشان داد سیستم پیشنهاد شده دارای منحنی‌های چرخه‌ای پهن و پایدار با ظرفیت بالای جذب و استهلاک انرژی است. همچنین استهلاک انرژی و تقاضای شکل‌پذیری ستون‌ها به ترتیب حدود 33% و 41/7% کاهش یافت این کاهش بیانگر آن است که سیستم بازگرداننده موجب محدود شدن تغییر شکل‌های پلاستیک سازه شده است.

کلیدواژه‌ها: ستون‌های پر شده با بتن (CFT)، مفصل مکانیکی دارای سیستم بازگرداننده، فیوز لرزه‌بر، تحلیل چرخه‌ای، شکل‌پذیری.

1- مقدمه

این نوع ستون معمولاً در سیستم‌های قاب خمشی استفاده می‌شود که در آن اتصالات نقش مهمی را در باربری جانبی ایفا می‌کنند (Azari و Mir Ghaderi، 2010). دلیل استفاده از ستون‌های CFT در این سیستم، جلوگیری از لهیدگی جان در اثر اعمال نیروی زیاد است که در فرآیند بازگشت به وضعیت اولیه توسط فنر ایجاد می‌شود. در این نوع ستون‌ها، ترکیب فولاد و بتن به‌طور هم‌زمان مزایای هر دو ماده را ارائه می‌دهد. فولاد توانایی تحمل بارهای فشاری و کششی بالا را فراهم می‌آورد، در حالی که بتن توان مقاومت در برابر تنش‌های فشاری

طرح استفاده از ستون‌های پر شده با بتن (CFT)، با هدف استفاده بهینه از مصالح فولادی و بتنی ارائه شده است (Inai و همکاران، 2004). از مزایای اصلی این المان‌ها می‌توان به تأخیر در کمانش‌های موضعی، افزایش سطوح شکل‌پذیری، مقاومت و بهبود قابلیت استهلاک انرژی اشاره کرد که موجب کاربرد گسترده آن‌ها در صنعت ساختمان‌سازی شده است (De Oliveira و همکاران، 2010).



Li و همکاران (2022) به ارزیابی عملکرد لرزه‌ای مفصل‌های تیر-ستون با لولا و اجزای اتلاف انرژی قابل تعویض اضافی پرداخته‌اند. این تحقیق نشان می‌دهد که این نوع مفصل‌ها عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به اتصالات جوشی سنتی دارند.

در مطالعات Moghadam و Fanaie (2019) به منظور حذف پدیده تمرکز تنش در محل اتصال، اثر تضعیف تیر از طریق ایجاد سوراخ در بال آن مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس نتایج، سوراخ‌کاری می‌تواند پارامتر شاخص گسیختگی را در برخی نمونه‌ها تا 40 درصد کاهش دهد.

در مطالعات تجربی Wang و همکاران (2019) رفتار چرخه‌ای اتصالات تیر به ستون CFT با گاست پلیت¹ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل نشان می‌دهند که استفاده از صفحات ضخیم در اتصالات CFT ضمن دور کردن مفصل پلاستیک از بر ستون و کاهش تمرکز کرنش در محل اتصال به وجه ستون، رفتار چرخه‌ای را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد.

استفاده از اتصالات تعویض‌پذیر، تمرکز بر اجزای اصلی اتصال و ارائه جزئیات‌بندی‌های ویژه برای آن‌ها، از راهکارهای مطلوبی است که در ادبیات فنی تاکنون به‌وفور به آن پرداخته شده است. ایده‌ها هر یک به‌نحوی موجب تشکیل مفصل پلاستیک خمشی در موقعیتی خاص از تیر طبقه شده و به کاهش عدم قطعیت‌های مربوط به نیاز لرزه‌ای و خرابی ناحیه اتصال کمک می‌کند، که در نتیجه باعث بهبود رفتار ناحیه اتصال می‌شود. به‌هرحال، بعد از وقوع زلزله‌های نسبتاً قوی، سیستم ممکن است نیاز به تعمیر یا تعویض کلی المان‌های اصلی داشته باشد، که این خود چالش‌های هزینه‌بر و پیچیده‌ای به‌همراه دارد. بدون شک، ارائه طرح‌های جدید با هدف کاهش تمرکز تنش از محل اتصال و جذب انرژی بدون بروز خرابی در المان‌های اصلی، می‌تواند چالش‌های موجود را برطرف کند. در این زمینه، استفاده از مفاصل مکانیکی یکی از راهکارهای مطلوبی است که تاکنون مطرح شده است.

در مطالعات Latour و همکاران (2018) به منظور ارتقاء عملکرد لرزه‌ای اتصالات، طرح استفاده از مفصل مکانیکی پیشنهاد شده است. بررسی‌های انجام شده حاکی از مطلوبیت این مفصل در مقایسه با مفاصل سنتی بوده است. براساس نتایج این تحقیقات، کاربرد مفصل مکانیکی پیشنهادی در قاب‌های خمشی فولادی توصیه شده است.

با هدف کنترل آسیب‌پذیری اتصالات، در مطالعات Mahin و همکاران (2020) یک مفصل مکانیکی ابتکاری پیشنهاد شده است. در این مطالعات، ضمن بررسی سازوکار مفصل پیشنهادی، عوامل مؤثر بر رفتار آن نیز تعیین شده‌اند.

را افزایش داده و از بروز مشکلات ناشی از تغییر شکل‌های غیرالاستیک و لهیدگی جلوگیری می‌کند. زمانی که نیروی برگشتی ناشی از فنر به ستون اعمال می‌شود، این نیرو ممکن است به مقدار قابل توجهی افزایش یابد. در این شرایط، ستون‌های CFT به‌دلیل ظرفیت بالای تحمل بار و استحکام بالای ترکیب فولاد و بتن، قادرند نیروهای اعمال‌شده را به‌طور مؤثری جذب کرده و از انتقال این نیروهای زیاد به بخش‌های جانبی سازه جلوگیری کنند. بنابراین، این ستون‌ها به‌ویژه در ساختارهایی که تحت بارگذاری‌های چرخه‌ای-سیکلی یا نیروهای بازگشتی شدید قرار دارند، برای پیشگیری از خرابی‌های ناشی از لهیدگی جان و افزایش دوام و ایمنی سازه، گزینه‌ای مناسب و کارآمد هستند. در سیستم مذکور، ناحیه اتصال (شامل اتصال، ادوات اتصال و چشمه اتصال) از اهمیت زیادی برخوردار است (Beheshti Aval, 2012).

حتی اگر مقاومت کافی برای تیرها و ستون‌ها تأمین شود، ضعف در ناحیه اتصال می‌تواند منجر به عدم تکامل مسیر بار و در نتیجه فروریزش کلی سازه شود (Publication No. 360, 2013). در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای، برای تضمین عملکرد مطلوب ناحیه اتصال، ضوابط ویژه‌ای ارائه شده است (Building and Housing Standard No 2800, 2014; Research Center, 2016). یکی از این ضوابط، استفاده از تیر ضعیف و ستون قوی است، که بر اساس آن، با تعبیه فیوز لرزه‌ای در تیر طبقه و تأمین مقاومت کافی برای ستون‌ها، نیاز لرزه‌ای برای طراحی اتصال و چشمه اتصال مشخص می‌شود (Tariqi و Kafi, 2019). تاکنون، مطالعات بسیاری درخصوص رفتار چرخه‌ای اتصالات و روش‌های ارتقای آن انجام شده است.

Yu و همکاران (2025) در مقاله‌ای با عنوان به بررسی عملکرد لرزه‌ای مفصل‌های تیر-سقف با زاویه‌های قابل تعویض پرداخته‌اند. بر اساس نتایج، این نوع مفصل‌ها ظرفیت جذب انرژی بالایی دارند و رفتار هیستریزس پایداری را از خود نشان می‌دهند.

Peng و همکاران (2025) در مقاله‌ای با عنوان مطالعه آزمایشگاهی قاب فولادی قابل دمنوتاژ و قابل استفاده مجدد با اتصالات مفصلی، به بررسی این نوع اتصالات پرداخته‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که این نوع اتصالات قابل دمنوتاژ می‌توانند ظرفیت باربری بالایی فراهم کرده و آسیب‌های لرزه‌ای را به‌طور مؤثری کنترل کنند.

Xie و همکاران (2021) ویژگی‌های مکانیکی مفصل‌های تیر-ستون با اتصالات اتلاف انرژی قابل تعویض را بررسی کرده‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که این نوع اتصالات می‌توانند رفتار هیستریزس پایداری ارائه داده و بخش عمده‌ای از انرژی ورودی را مستهلک کنند.

در مطالعات Peng و همکاران (2020) یک اتصال با مفصل مکانیکی جدید تحلیل و طراحی شد. بر اساس نتایج، مفصل پیشنهادی از قابلیت جذب انرژی بالایی برخوردار بوده و ضمن کنترل آسیب‌ها می‌تواند باعث رفتار غیرخطی لرزه‌ای مطلوبی شود.

Soydan و همکاران (2024) در مطالعاتی به ارزیابی لرزه‌ای یک مفصل مکانیکی پرداختند. این مفصل مکانیکی برای استفاده در اتصالات تیر به ستون در سازه‌های بتنی پیش ساخته پیشنهاد شده و از ویژگی‌های مکانیکی خاصی برخوردار است. مفصل مذکور می‌تواند در برابر تغییرات زاویه‌ای و نیروهای خمشی زیاد مقاومت کند، بدون این‌که گسیختگی یا خرابی حادث شود. با استناد به نتایج، در جایگاه یک فیوز لرزه‌بر، مفصل مذکور با جذب و استهلاک انرژی ورودی زلزله، منجر به افزایش ضریب اطمینان سایر قسمت‌ها شده است.

در مطالعات Peng و همکاران (2020) برای کنترل آسیب در قاب‌های فولادی یک اتصال مجهز به مفصل مکانیکی جدید معرفی شده است. در این طرح، برای تحمل تلاش‌های برشی و خمشی

ادواتی در نظر گرفته می‌شود. ضمن این‌که، در این ساختار، فرآیند جذب انرژی از طریق تغییر شکل‌های غیرخطی محوری انجام می‌شود. در این مطالعات همچنین، برای پیش‌بینی رفتار اتصال معادلات تئوری ارائه شده است.

در مطالعات Li و همکاران، (2020) به معرفی مفصل پلاستیک مکانیکی اصطکاکی برای اتصالات تیر-ستون پرداخته است که انرژی لرزه‌ای را جذب و استهلاک می‌کند و از خرابی ترد جلوگیری می‌کند. نتایج آزمایش‌ها نشان دادند که این مفصل دارای ظرفیت جذب انرژی بالا و عملکرد هیستریزس مطلوبی است. این سیستم به‌عنوان فیوز لرزه‌ای عمل کرده و عملکرد لرزه‌ای و تاب‌آوری سازه‌ها را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. Gao و همکاران (2024) در مطالعاتی به معرفی اتصالی جدید پرداختند. این طرح نیز با هدف بهبود عملکرد لرزه‌ای و تاب‌آوری سازه‌ها در برابر زلزله ارائه شده است. بر اساس مشاهدات، مفصل فولادی تعبیه شده در ساختار اتصال، از ظرفیت باربری و جذب انرژی مطلوبی برخوردار است.

جدول 1- خلاصه ادبیات فنی درباره مفصل‌های مکانیکی و اتصالات لرزه‌ای

چالش یا مسئله تحقیق	خلاصه موضوع تحقیق	سال	نویسنده
نیاز به طراحی مفصل‌هایی با پایداری چرخه‌ای بالا و قابلیت تعویض آسان پس از زلزله	بررسی عملکرد لرزه‌ای مفصل‌های تیر-سقف با زاویه‌های قابل تعویض؛ نتایج نشان‌دهنده جذب انرژی بالا و رفتار هیستریزس پایدار است	2025	Yu و همکاران
بهبود ظرفیت باربری همراه با کاهش آسیب‌های لرزه‌ای و حفظ عملکرد پس از زلزله	مطالعه آزمایشگاهی قاب فولادی قابل دمونتاز و قابل استفاده مجدد با اتصالات مفصلی	2025	Peng و همکاران
افزایش ظرفیت باربری و جذب انرژی در برابر زلزله‌های شدید	معرفی اتصال جدید با مفصل فولادی برای افزایش تاب‌آوری لرزه‌ای سازه‌ها	2024	Gao و همکاران
مقاومت در برابر تغییر زاویه و نیروهای خمشی زیاد بدون گسیختگی	ارزیابی لرزه‌ای مفصل مکانیکی در سازه‌های بتنی پیش‌ساخته	2024	Soydan و همکاران
مقایسه با اتصالات جوشی سنتی و افزایش دوام اتصال در برابر چرخه‌های بارگذاری	ارزیابی عملکرد لرزه‌ای مفصل‌های تیر-ستون با لولا و اجزای اتلاف انرژی قابل تعویض	2022	Li و همکاران
اطمینان از پایداری رفتار هیستریزس و جذب انرژی در شرایط بارگذاری چرخه‌ای	مطالعه ویژگی‌های مکانیکی مفصل‌های تیر ستون با اتصالات اتلاف انرژی قابل تعویض	2021	Xie و همکاران
جلوگیری از خرابی ترد در اتصالات تیر-ستون و بهبود رفتار لرزه‌ای	معرفی مفصل مکانیکی مبتنی بر اصطکاک برای جذب و استهلاک انرژی	2020	Li و همکاران
ایجاد رفتار غیرخطی مطلوب و کنترل آسیب در قاب‌های فولادی	طراحی اتصال با مفصل مکانیکی جدید با جذب انرژی بالا	2020	Peng و همکاران
طراحی دستگاه جذب انرژی محوری و توسعه معادلات تئوری برای پیش‌بینی رفتار	معرفی اتصال فولادی مجهز به مفصل مکانیکی برای کنترل آسیب	2020	Peng و همکاران
کنترل تمرکز تنش و کاهش شاخص گسیختگی در محل اتصال تا 40%	بررسی اثر تضعیف تیر از طریق سوراخکاری برای کاهش تمرکز تنش در محل اتصال	2019	Moghadam و Fanaie
تعیین اثر ضریب اصطکاک بر رفتار خمشی و تقارن پاسخ سازه‌ای	بررسی میراگرهای اصطکاکی قابل بازیافت برای کاهش آسیب‌پذیری اتصالات	2018	Latour و همکاران

مطالعات تغییرشکل‌های ماندگار و تغییر زاویه مفاصل پس از بارگذاری‌های جانبی به‌طور کامل مورد توجه قرار نگرفته است.

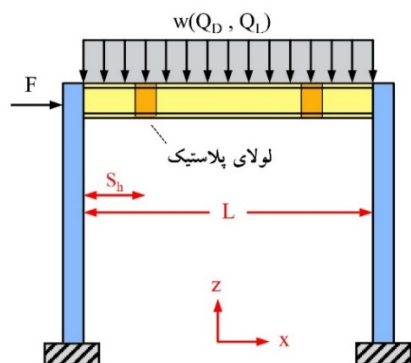
این طرح‌ها اگرچه بدیع هستند، اما چالش‌های پیچیده‌ای در ارتباط با عملکرد میراگرها به همراه دارند. علاوه بر این، در این

خصوص روند مدل سازی غیرخطی آن ها ارائه شده است. بخش چهارم، مربوط به تحلیل سازه است. در این بخش، ضمن تحلیل سازه و برداشت پاسخ ها، به تفسیر نتایج نیز پرداخته شده است. در نهایت در بخش پنجم، اهم نتایج حاصل از این مطالعه تشریح شده اند.

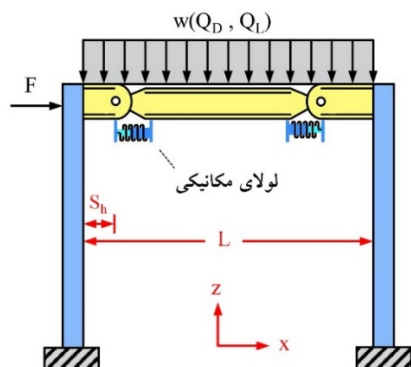
2- روش شناسی

در قاب خمشی فرضی مطابق شکل (1)، ضمن بارگذاری جانبی، مفاصل پلاستیک خمشی تیر در فاصله بین 0/5 تا 1 برابر ارتفاع مؤثر مقطع تیر (d_b) از بر ستون تشکیل خواهد شد ($0.5d_b \leq S_h \leq d_b$) (Building Iran's National Regulations, Part 10, 2013).

به منظور تضمین عدم خرابی در اتصال و ادوات مربوطه، با فرض تشکیل مفصل پلاستیک در موقعیت خاصی از تیر (S_h)، نیاز در محل اتصال تخمین زده شده و اتصال طرح خواهد شد. ملاحظه می شود که نیاز لرزه ای در محل اتصال وابسته به موقعیت دقیق مفصل پلاستیک است. حتی با تضمین تشکیل مفصل پلاستیک در موقعیت فرض شده و عدم خرابی اتصال، فیوز لرزه بر جزئی اصلی از سیستم باربر (جانبی - ثقلی) است که پس از زلزله نیازمند تعویض یا تعمیر خواهد بود و این یک چالش است.



شکل 1- بارگذاری جانبی و ثقلی یک قاب خمشی فرضی



شکل 2- بارگذاری جانبی یک قاب خمشی فرضی مجهز به لولای مکانیکی

برای رفع این معضلات، یک سیستم بازگرداننده به طرح اضافه شده است که از فنر لول برای بازگشت به وضعیت اولیه پس از اعمال جابه جایی استفاده می کند. این سیستم با بهره گیری از ویژگی های الاستیک فنر لول، قادر است نیروی بازگشتی لازم برای بازگرداندن سازه به وضعیت پیش از بارگذاری را تأمین کند. همچنین، در طراحی این مدل، به منظور جلوگیری از ایجاد مفصل پلاستیک در ناحیه اتصال تیر به ستون و کاهش آسیب های ناشی از تغییر شکل های غیرالاستیک، از سخت کننده ها (Stiffeners) استفاده شده است. این سخت کننده ها با افزایش مقاومت، مانع از تشکیل مفصل پلاستیک در ناحیه اتصال می شوند و این امکان را فراهم می آورند که مفصل پلاستیک به محل های طراحی شده و مناسب تری، مانند مفصل های مکانیکی، منتقل گردد. این روش به بهبود عملکرد لرزه ای سازه و افزایش پایداری آن در برابر نیروهای زلزله کمک می کند. سیستم فنر لول به عنوان یک مکانیزم بازگشت پذیر، توانایی کنترل تغییرات پلاستیک و ماندگار ناشی از بارگذاری های شدید را دارد. این مکانیزم در واقع با ایجاد یک نیروی بازگشتی، مانع از ایجاد تغییرات غیرالاستیک دائمی در نواحی بحرانی مانند مفاصل می شود و توانایی سیستم را در مقابله با تغییرات شکل و زاویه مفاصل افزایش می دهد. همچنین، استفاده از فنر لول در این سیستم می تواند به کاهش اثرات جانبی میراگرها، مانند افت کارایی در طول زمان و استهلاک، کمک کند. این سیستم بازگرداننده همچنین در طراحی های پیشرفته تر به عنوان یک راهکار برای بهبود عملکرد سازه های تحت بارگذاری های چرخه ای - سیکلی یا استاتیکی شدید عمل می کند، به ویژه در مواردی که بارگذاری های جانبی باعث تغییرات پایداری در سازه می شوند. به کارگیری فنر لول در این سیستم به طور مؤثری می تواند تغییرات ناشی از بارهای تکراری و مکرر را جذب کرده و سازه را به حالت اولیه خود بازگرداند، در نتیجه، از بروز خرابی های سازه ای و تغییرات دائمی جلوگیری می کند. باتوجه به توضیحات، سؤالات اصلی تحقیق به شرح ذیل است:

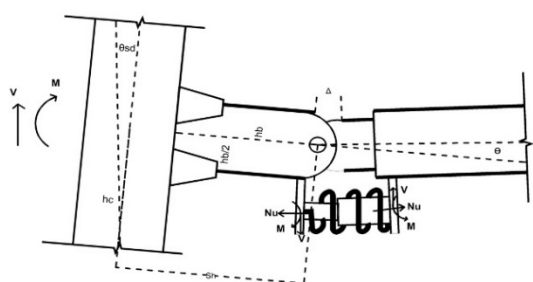
(الف) آیا سیستم پیشنهادی تحت ترکیب بارهای ثقلی و جانبی پایدار است؟

(ب) سیستم پیشنهادی تا چه اندازه بر میزان استهلاک انرژی در سیستم مؤثر است؟

(ج) فنر مکانیکی موجود در ساختار سیستم بازگرداننده، تا چه اندازه در بازگشت اتصال به موقعیت قبلی خود کارآمد است؟

(د) سیستم پیشنهادی چه تأثیری در شکل پذیری سازه دارد؟ مطالعه حاضر باهدف پاسخ به سؤالات فوق انجام شده و سلسله مراتب آن در پنج بخش مجزا ارائه شده است. در بخش دوم روش شناسی کار ارائه شده است. در این بخش، ضمن تشریح اجزای مفصل پیشنهادی، روند طراحی آن تشریح شده است. در بخش سوم، ابتدا مدل ها معرفی شده و سپس توضیحاتی در

در این طرح سختی فنر لول بسیار بالاست و برای کنترل ارتعاش خارج از صفحه آن میراگر اصطکاکی هاپیرالاستیک نیز در نظر گرفته شده است (سیستم گاید در شکل (3) را ببینید) بدین ترتیب، کمانش آن تحت بار ثقل منتفی است. باتوجه به شکل (4) هنگامی که قاب تحت بارگذاری جانبی قرار گیرد، تغییر زاویه چرخش لولا (θ) فنر را به عکس العمل وادار نموده و انرژی زیادی صرف تغییر شکل آن خواهد شد. میرایی ذاتی فنر یکی از عوامل استهلاک انرژی است اما در طول زمان بارگذاری فنر وارد محدوده غیرخطی نخواهد شد. نظر به سختی قابل ملاحظه آن، تلاش‌های داخلی در محل لولا تنها صرف فشردگی و کشیدگی فنر لول می‌شوند.

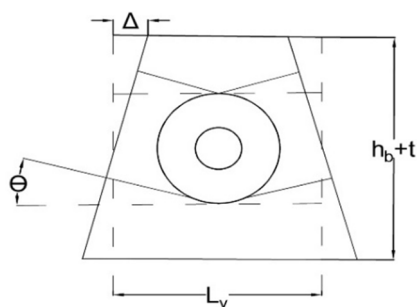


شکل 4- تغییر شکل در محل لولای مکانیکی مجهز به سیستم بازگرداننده

کرش محوری اعمال شده به فنر (ε) از رابطه (1) قابل محاسبه است. پارامترهای موجود در این رابطه در شکل (5) به وضوح مشخص شده‌اند. مقدار L_y در این رابطه خود از رابطه (2) قابل برداشت است. در این روابط، پارامترهای h_b و t به ترتیب معرف ارتفاع جان مقطع و ضخامت بال تیر است ($h_b = d_b + 2t$).

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{L_y} = \frac{\theta(h_b + t)}{2L_y} \quad (1)$$

$$L_y = 0.75(h_b + t) \quad (2)$$

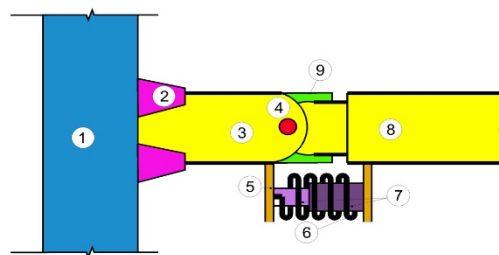


شکل 5- جابه‌جایی طره نسبت به محور عمود در محل لولا (Peng و همکاران، 2020)

در مطالعه حاضر، به منظور ارتقای عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی و حذف این چالش، طرح استفاده از مفصل مکانیکی مجهز به لولا و سیستم بازگرداننده پیشنهاد شده است (شکل (2)). همان‌گونه که در شکل (2) نیز ملاحظه می‌شود، در این طرح، خارج از ناحیه اتصال یک لولای مکانیکی همراه با سیستم بازگرداننده تعبیه می‌شود.

با این جزئیات‌بندی، تبدیل انرژی به حرکت دورانی مکانیکی در محل لولا عامل اتلاف انرژی است. البته مقدار ناچیزی از انرژی نیز از طریق اصطکاک مستهلاک می‌شود که در مطالعه حاضر از آن صرف‌نظر شده است. اینک بدیهی است که جذب انرژی از طریق تشکیل مفاصل پلاستیک در تیر منتفی است. بدین ترتیب، علاوه بر اینکه محاسبات مستقل از محل تشکیل مفصل پلاستیک است، بعد از رخداد یک زلزله، خدمت‌رسانی سیستم مستلزم تعویض یا تعمیر اعضای آن نخواهد بود.

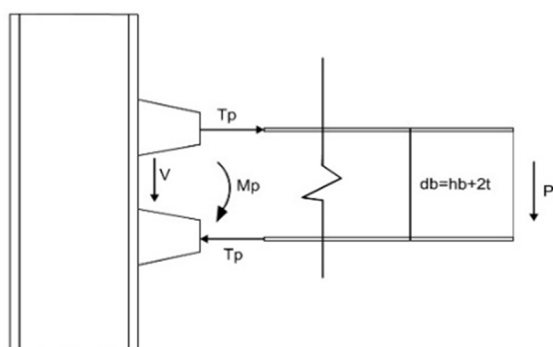
باتوجه به شکل (3)، اجزای تشکیل‌دهنده لولا مطابق جدول (2) معرفی شده است. لازم به ذکر است که در این شکل، فنر لول (قطعه شماره 6) جزئی از سیستم بازگرداننده و مستهلاک کننده انرژی است. این عضو مهم، پایستار بوده و شبیه اعضای صفر نیرویی در خرپاها عمل می‌کند. مطمئناً عدم وجود این فنر ناپایداری به همراه خواهد داشت.



شکل 3- لولای مکانیکی پیشنهادی

جدول 2- معرفی اجزای تشکیل‌دهنده لولا دارای سیستم بازگرداننده

شماره	عنوان قطعه
1	ستون CFT
2	سخت‌کننده
3	تیر طره برای مفصل مکانیکی دارای سیستم بازگرداننده
4	محور اتصال مفصل مکانیکی
5	سخت‌کننده اتصال و پایه اتصال فنر لول به مفصل مکانیکی
6	فنر لول
7	سیستم بازگرداننده
8	تیر اصلی طبقه
9	سخت‌کننده مانع کمانش خارج از صفحه مفصل مکانیکی



شکل 6- نیروهای طراحی سخت‌کننده‌ها
(Peng و همکاران، 2020)

باتوجه به شکل (4)، ضمن تغییر شکل جانبی مجموعه، رابطه (9) بین پارامترهای θ و θ_{sd} برقرار است. در آیین‌نامه‌های لرزه‌ای موجود، حداکثر مقدار برای پارامتر θ_{sd} دو درصد (رادیان) است.

$$\theta = (1 + \frac{2S_h}{L_h})\theta_{sd} \quad (9)$$

به‌هرصورت، در یک طرح محافظه‌کارانه، مقدار θ می‌تواند تا 3 درصد (رادیان) محدود شود. بر اساس توضیحات و روابط ارائه شده، اینک برای یک قاب خمشی، مفصل مکانیکی مجهز به فنر بازگرداننده به‌سادگی قابل طراحی است. در ادامه، ضمن مدل‌سازی اجزای محدود، به‌ارزیابی طرح پیشنهادی پرداخته شده و قابلیت‌های آن در ارتقاء عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی و استهلاک انرژی ورودی زلزله کنترل شده است.

3- مشخصات قاب‌های مورد مطالعه و تشریح روند مدل‌سازی غیرخطی

برای مدل‌سازی غیرخطی از قاب دوبعدی مطابق شکل (7) استفاده شده است. این قاب معیار مقایسه بوده و لذا قاب مینا نامیده شده است (M_0). همان‌گونه که در شکل نیز ملاحظه می‌شود، ارتفاع قاب 3430 میلی‌متر و طول دهانه آن نیز 5880 میلی‌متر است. مقادیر بارهای مرده (Q_D) و زنده (Q_L) نیز به ترتیب 3 و 2 کیلو نیوتن بر متر در نظر گرفته شده‌اند.

در این قاب، برای تیرها از مقاطع فولادی آی- شکل با تنش تسلیم 370 مگاپاسکال استفاده شده است (شکل 7-الف)). ستون‌ها نیز دارای مقاطع جعبه‌ای هستند که با بتن مسلح پر شده است (شکل 7-ب)). تنش تسلیم میلگردها و مقاومت فشاری مشخصه بتن به ترتیب 400 و 25 مگاپاسکال لحاظ شده است. لازم به ذکر است، پوشش ستون از فولاد سخت (با تنش تسلیم 520 مگاپاسکال) انتخاب شده است.

مشخصات مکانیکی مصالح فولادی و بتنی به تفکیک و به‌طور کامل در جدول (3) ارائه شده است. بتن محصور با چگالی 2400

سختی المان فنر از رابطه (3) برداشت می‌شود (Hosseini Ali Abad و همکاران (2019)).

$$k = \frac{E_s d^4}{64nR^3} \quad (3)$$

در این رابطه، E_s مدول الاستیسیته مصالح فنر است. پارامترهای d ، R و n مربوط به مشخصات هندسی فنر بوده و به ترتیب معرف قطر حلقه‌ها، شعاع سطح مقطع و تعداد حلقه‌های است. سختی فنر به مراتب بیشتر از سختی اتصال است. بر این اساس، ضمن بارگذاری سیستم، سهم قابل توجهی از تلاش‌های داخلی را به‌خود اختصاص خواهد داد.

در شکل‌های (4) و (5)، پارامتر θ معرف میزان چرخش در محل مفصل است (بر حسب رادیان). هرگاه حالت تسلیم در فنر و ادوات آن مد نظر باشد، مقدار آن مطابق رابطه (4) خواهد بود.

$$\theta_y = \frac{2L_y f_y}{(h_b + t)E_s} \quad (4)$$

در رابطه اخیر، f_y معرف تنش تسلیم مصالح فنر است. سختی خمشی (K_e) و ظرفیت خمشی (M_u) در محل مفصل که پارامترهای اصلی طراحی نیز هستند، با استفاده از روابط (5) و (6) محاسبه می‌شود. نیروی محوری ایجاد شده در فنر (N_u)، از دیگر پارامترهای مهمی است که باید شرایط ارائه شده در رابطه (7) را برآورده نماید. باتوجه به دیگرام آزاد تیر (شکل 2)، نیاز برش در محل مفصل (V_u) نیز طبق رابطه (8) خواهد بود.

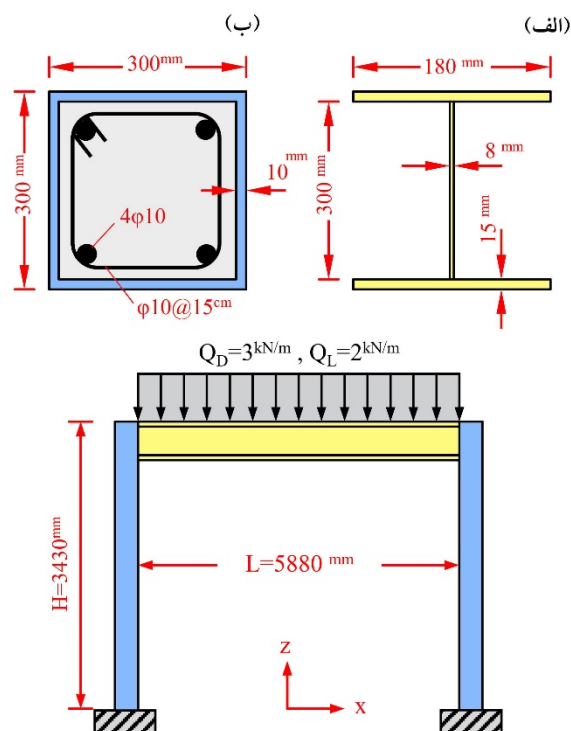
$$K_e = \frac{AE_s(h_b + t)^2}{2L_y} \quad (5)$$

$$M_u = b t f_u (h_b + t) \quad (6)$$

$$N_u \geq \frac{M_u}{(h_b + t)} \quad (7)$$

$$V_u = \frac{2M_u}{L_h} + \frac{wL_h}{2} \quad (8)$$

در این روابط، پارامترهای A ، f_u و b به ترتیب معرف سطح مقطع فنر لول، تنش نهایی مصالح فنر و طول فنر است. پارامترهای L_h و w نیز مربوط به تیر طبقه بوده به ترتیب فاصله بین دو مفصل ($L - 2S_h$) و شدت بارگسترده را نشان می‌دهند (شکل 2)). نیاز طراحی برای سخت‌کننده‌های متصل به ستون (قطعه شماره 2 در شکل 3)) مطابق شکل (6) محاسبه می‌شود. نسبت لنگر پلاستیک تیر به ارتفاع مقطع آن، زوج نیرویی است که به مجموعه سخت‌کننده‌ها وارد می‌شود ($T_p = M_p/d_b$). مطابق شکل مذکور، هر سخت‌کننده باید قادر به حمل نصف این مقدار در کشش باشد. بدیهی است که نیروهای برشی و محوری نیز از طریق محور لولا منتقل می‌شوند (Peng و همکاران، 2020).



شکل 7- هندسه و بارگذاری قاب خمشی مینا: الف) مشخصات هندسی مقطع تیر طبقه، ب) مشخصات هندسی و تسلیح مقطع ستون‌های مرکب

در شکل (8)، طول طره (از بر ستون تا ابتدای فنر) 600 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است، تمامی ادوات لولای مکانیکی دارای سیستم بازگرداننده نیز از جنس تیر (فولاد نرمه با تنش تسلیم 370 مگاپاسکال) هستند. با توجه به شکل (9)، مشخصات هندسی سایر قطعات به کار رفته در مفصل نیز مطابق جدول (5) است. در این طرح، سیستم در مواجهه با بارهای جانبی پایدار بوده و همواره مایل است به وضعیت اولیه خود (قبل از اعمال بار جانبی) برگردد. فنر مارپیچ در نظر گرفته شده، عامل اصلی این وضعیت است فنرهای مارپیچ در بارگذاری عمود بر محور خود ضعیف بوده و به سادگی دچار کمانش جانبی می‌شوند. به علاوه، در صورت عدم کنترل حالت پایستار، خود فنر عامل ایجاد حرکات رفتی- برگشتی خواهد بود. برای جبران این ضعف‌ها، مطابق شکل (9) از قطعه‌ای دیگر تحت عنوان "guide" استفاده شده است (قطعات 10 تا 14 در شکل (9)).

سیستم لولا مکانیکی، فنر مارپیچ، هدایت‌گر و ورق کمانش‌تاب (شکل (9)). به عنوان یک پکیج یکپارچه طراحی و در کارگاه تولید می‌شود. این اجزا به طور کامل در کارخانه مونتاژ شده و پس از آماده‌سازی، با استفاده از اتصالات فلنجی در محل اتصال

کیلوگرم بر مترمکعب و مدول الاستیسیته 23/5 گیگاپاسکال ضریب پواسون 0/2 تعریف و برای تعریف تنش و کرنش ناحیه پلاستیک از مدول آسیب بتن استفاده شد طبق جدول (4) زاویه انبساط² این زاویه نشان‌دهنده میزان تغییر شکل بتن در اثر تنش‌های محصور است. مقدار 30/5 درجه معمولاً به عنوان شاخصی از قابلیت بتن در حفظ استحکام تحت شرایط فشار داخلی و خارجی محسوب می‌شود. عدم تمرکز³ این پارامتر که مقدار 0/1 را نشان می‌دهد، به نحوه توزیع تنش‌ها و انحرافات در سیستم اشاره دارد که بر رفتار بتن تحت بارهای مختلف تأثیر می‌گذارد. نسبت فشار اولیه (f_{b0}/f_{c0}) این نسبت که مقدار 1/16 دارد، نشان‌دهنده میزان افزایش مقاومت بتن در برابر فشار است که با محصور کردن بتن، مقاومت آن به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. ثابت سیستم (K) مقدار 0/666 برای این پارامتر معمولاً نشان‌دهنده رفتار خاص بتن در برابر تغییرات بار و کشش‌های اعمالی است و می‌تواند بر تحلیل‌های ساختاری تأثیرگذار باشد. پارامتر ویسکوزیته⁴ مقدار 0/001 برای این پارامتر معمولاً نشان‌دهنده میزان مقاومت بتن به تغییر شکل در اثر تنش‌های خارجی است و بر عملکرد بتن در شرایط مختلف فشار و دما تأثیر دارد. لازم به ذکر است که در مدل M_0 اتصالات پای ستون و اتصالات تیر به ستون کاملاً صلب فرض شده‌اند. به منظور ارزیابی رفتار لرزه‌ای و سازوکار لولای مکانیکی دارای سیستم بازگرداننده پیشنهادی، از هندسه و اعضای مدل مینا استفاده شده است. برای نیل به این مقصود، با احتساب دو حالت مختلف برای لولای مکانیکی و تعبیه آن در مدل مینا، دو مدل جدید M_1 و M_2 تهیه شده است. مطابق شکل (8)، تنها تفاوت در این دو مدل، ناشی از وجود یا عدم وجود تمهیدات ویژه برای المان فنر است. بر خلاف مدل M_1 اتصال مکانیکی در مدل M_2 دارای فنر بازگرداننده است.

جدول 3- مشخصات مکانیکی مصالح مصرفی (تنش بر حسب مگاپاسکال است)

پارامترها	میلگرد	فولاد ستون	فولاد تیر	بتن ستون
تنش تسلیم	400	360	240	25
تنش نهایی	600	520	370	---
ضریب پواسن	0/3	0/3	0/3	0/2

جدول 4- مشخصات آسیب بتن مصرفی (محصور)

Viscosity Parameter	K	f_{b0}/f_{c0}	Eccentricity	Dilation Angle
0/001	0/666	1/16	0/1	30/5

اندرکنش آن با فولاد جلدی نیز به صورت اصطکاکی (با ضریب اصطکاک بالا) لحاظ شده است. بدیهی است که مصالح بتنی با شبکه میلگردهای مسلح کننده نیز اندرکنش خواهند داشت. در مدل سازی فولاد، امکان زوال سختی و مقاومت نیز فراهم شده است. متذکر می شود که برای معرفی منحنی های تنش- کرنش فولاد و بتن به ترتیب از روابط Rasmussen و Popovics (اصلاح شده برای بتن محصور شده) استفاده شده است (Dabagh و Ghavami, 2018; Beheshti Aval, 2012).

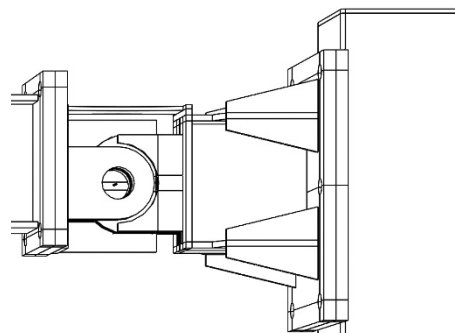
در پروسه مدل سازی، المان های تیر و ستون به صورت "Solid" و شبکه میلگردها نیز به صورت "Wire" در نظر گرفته شده است. در مدل های M_1 و M_2 ، اتصال طره به ستون و لولای اول و همچنین اتصال تیر اصلی به لولای دوم کاملاً صلب است. در محل لولاهای اندرکنش اجزا به صورت تماسی بوده و اصطکاک نیز با ضریب بسیار کوچکی در نظر گرفته شده است (ضریب اصطکاک 0/02).

لازم به ذکر است، المان ها از نوع C3D8R و مش ها به صورت مربعی (با بعد 8 سانتی متر) در نظر گرفته شده اند (Geometric and Element Library =Standard). برای مش بندی از (Family=3DStrees; Order=Linear)، برای مش بندی از مش های Hex (شش ضلعی) و استراکچری (ساختاری) برای مدل سازی استفاده شده است. این نوع مش ها به دلیل داشتن المان های منظم و چهار گوش، دقت بالاتری در تحلیل های تنش و کرنش در ساختارهای سه بعدی ارائه می دهند.

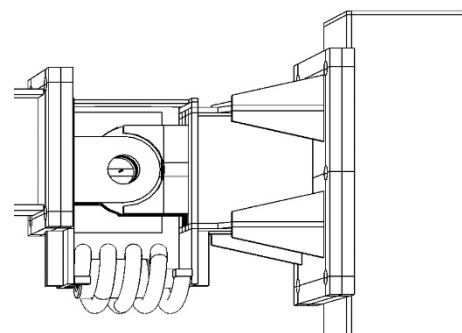
جدول 5- ابعاد و اندازه اجزای تشکیل دهنده مفصل

شماره	عنوان قطعه	اندازه (میلی متر)
1	فلنج اتصال به تیر	430×340×30
2	مفصل لولای طره	270×180×30
3	مفصل لولای ثابت	240×240×30
4	سخت کننده کمانش خارج از صفحه	330×250×20
5	ورق تسلیم شونده	320×80×10
6	سخت کننده کمانش تاب	160×80×10
7	تیر طره	330×330×15
8	سخت کننده اتصال تیر به ستون	225×180×15
9	فلنج اتصال به ستون	660×450×30
10	فنر لول	$190=d$ و $300=L$ و $20=t$
11	پایه فنر و گاید	180×150×15
12	هدایتگر مادگی گاید	$100=d1$ و $180=L$ و $85=d2$
13	هدایتگر نری گاید	$60=d1$ و $180=L$ و $40=d2$
14	پوشش الاستومتر	$85=d1$ و $180=L$ و $60=d2$

تیر به ستون به صورت استاندارد نصب می گردند. این روش تضمین کننده عملکرد مؤثر و یکپارچه سیستم در محل نصب است و قابلیت اجرا در شرایط عملی را به طور کامل فراهم می کند.



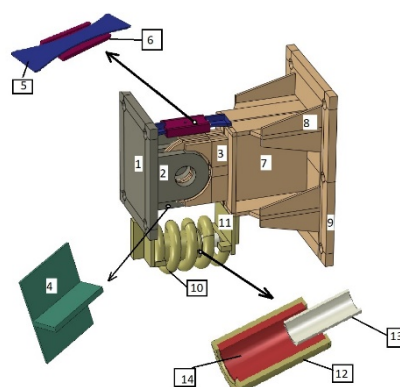
(الف)



(ب)

شکل 8- جزئیات اتصال در مدل های مجهز به مفصل مکانیکی

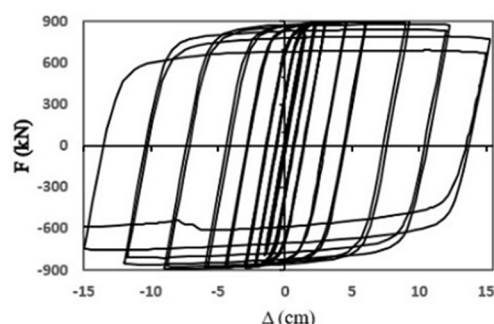
پیشنهادی: الف) مدل M_1 ، ب) مدل M_2



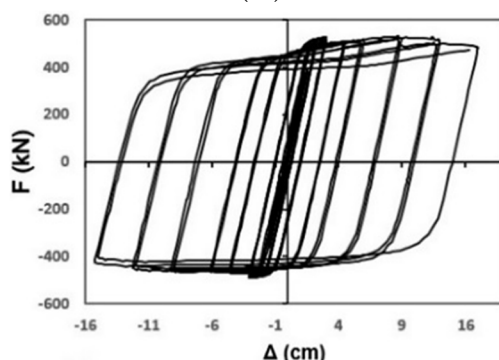
شکل 9- مشخصات هندسی مفصل مکانیکی

از نرم افزار المان محدود ABAQUS (2022) برای مدل سازی و تحلیل غیرخطی قاب ها استفاده شده است. در پروسه مدل سازی غیرخطی ستون ها، ضمن اتخاذ شرایط محصورشدگی برای بتن،

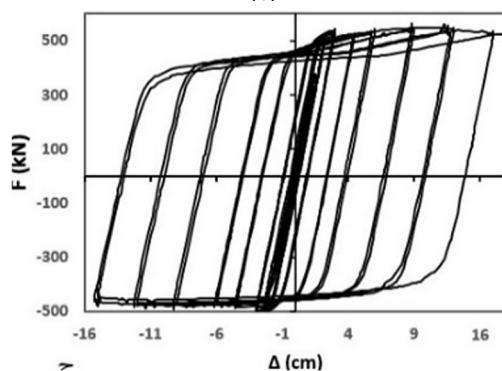
این جابه‌جایی‌ها نمایانگر تغییرات مکان سازه در نواحی بحرانی بودند که به ناحیه تسلیم وارد شده و باعث ایجاد تغییرات دائمی در سازه شدند. این رویکرد به‌طور مؤثری نحوه شبیه‌سازی ورود سازه به ناحیه تسلیم و تحلیل‌های مرتبط با آن را بهبود بخشیده و نتایج دقیق‌تری را در ارزیابی رفتار سازه در برابر بارگذاری‌های شدید فراهم می‌کند. در شکل (13)، نتایج تحلیل به‌صورت تغییرات برش پایه قاب (F) در مقابل جابه‌جایی نقطه کنترل (Δ) ارائه شده است (دوباره شکل (11) را ببینید). علت یکسان بودن نمودار در شرایط فشار و کشش در این مدل به ویژگی‌های خاص سازه و مکانیزم‌های موجود در آن بازمی‌گردد.



(الف)



(ب)



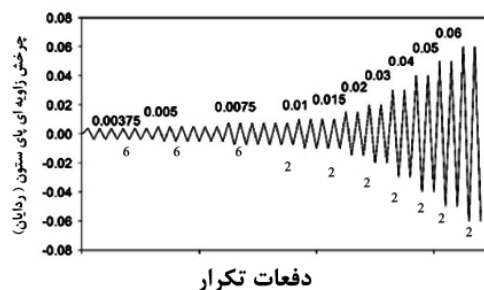
(ج)

شکل 13- منحنی حاصل از بارگذاری چرخه‌ای مدل‌های:

(الف) M_0 ، (ب) M_1 ، (ج) M_2

می‌شود (سیکل‌های بیشتر در دامنه‌های کوچک جهت پایش رفتار اولیه و سیکل‌های کمتر در دامنه‌های بزرگ جهت ارزیابی پایداری چرخه‌ای و نزدیک شدن به حالت‌های حدی). مقدار حداکثر دررفت/چرخش مطابق SAC برابر $\theta_{max}=0.06 \text{ rad}$ در نظر گرفته شد. جابه‌جایی متناظر با این مقدار در نقطه اعمال بار از رابطه $\Delta=\theta \times H$ محاسبه شد که با توجه به ارتفاع مؤثر ستون در مدل، مقدار $\Delta_{max} \approx 0.20 \text{ m}$ به‌دست آمد. بدین ترتیب، پاسخ چرخه‌ای اتصال تا سطح تغییرمکان حدی مطابق پروتکل مرجع SAC مورد ارزیابی قرار گرفت.

مقادیر جابه‌جایی تسلیم در این تحلیل، که به‌طور متناوب در نقاط مختلف بارگذاری مشاهده می‌شود، نشان‌دهنده تغییرات جابه‌جایی سازه در مراحل مختلف بارگذاری است. این جابه‌جایی‌ها در نواحی مختلف سازه ثبت شده و در نهایت با رسیدن به ناحیه تسلیم، تغییرات دائمی در سازه رخ می‌دهد. شکل (12) نتایج تحلیل چرخه‌ای مدل‌ها، شامل منحنی‌های هیستریزیس و کانتورهای تنش به شرح شکل‌های (13) تا (15) برداشت شده است. برای تحلیل رفتار سازه تحت بارگذاری‌های جابه‌جایی-زمان و بررسی نواحی تسلیم، تنش مایسز⁵ به‌عنوان معیاری برای شبیه‌سازی و ارزیابی ناحیه تسلیم استفاده شده است. برای محاسبه و مشاهده تنش مایسز در مدل، از قابلیت‌های موجود در ویژوالیزیشن⁶ نرم‌افزار Abaqus بهره گرفته شد. در ابتدا، پس از انجام تحلیل اجزاء محدود، نتایج تنش مایسز از طریق Contour Plot در محیط Abaqus/CAE استخراج و نمایش داده شد. در این فرآیند، پس از انتخاب Von Mises Stress در بخش Field Output، نقشه‌های توزیع تنش مایسز در سراسر مدل برای هر گام از بارگذاری به‌صورت گرافیکی رسم گردید. جابه‌جایی متناظر با نقطه تسلیم زمانی که تنش مایسز از حد تسلیم ماده عبور کرد، به‌طور دقیق از تغییرات displacement در مدل برداشت شد.



شکل 12- نمودار جابه‌جایی چرخه‌ای اعمال شده به سازه به روش SAC

در لحظه رخداد اولین تسلیم در مصالح فولادی، کانتورهای تنش در کل اعضا مطابق شکل (12) به تصویر کشیده است. در این گام از بارگذاری چرخه‌ای، نسبت به مدل مبنا (M_0)، در مدل‌های M_1 و M_2 تنش در مصالح بتنی، میلگردهای تسلیح و فولاد جلدی ستون به ترتیب 61 و 87 و 63 درصد کاهش یافته است.

نسبت به مدل مبنا، سطح تنش در تیر و اتصالات دیگر مدل‌ها (M_1 و M_2) حدود 88 درصد کاهش داشته است. با این حال، سطح تنش در اتصالات مکانیکی و ادوات آن (شامل لولاه‌ها، فنر و گایدر) تا 16 درصد افزایش یافته است. ارزیابی‌ها نشان می‌دهد که M_2 آخرین مدلی است که در آن تنش نظیر حد تسلیم تجربه می‌شود (اولین مدل M_0 است).

مقادیر کمی تنش در اعضا و مقایسه آن‌ها حاکی از آن است که مفصل مکانیکی دارای سیستم بازگرداننده پیشنهادی نقش بسیار مؤثری در کنترل تنش‌ها داشته شده است. بعلاوه، همان‌گونه که پیش‌بینی شده بود، فنر وارد محدوده غیرخطی نشده و تنها مانند یک عضو صفر نیرویی در خرابی در تأمین پایداری سیستم و بازگشت آن به حالت اولیه (آستانه بارگذاری جانبی) ایفای نقش کرده است.

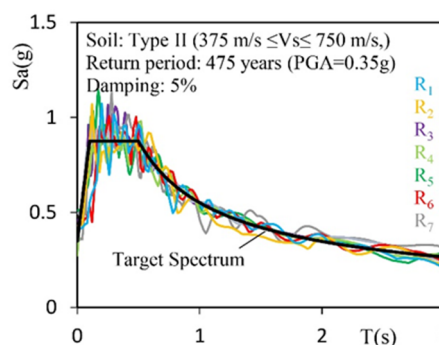
برای گام بارگذاری نظیر حصول به تنش حد نهایی در مصالح فولادی، مطابق شکل (16) نیز نتایج مشابهی اتخاذ شده است. در این گام از بارگذاری چرخه‌ای، نسبت به مدل مبنا (M_0)، در مدل‌های M_1 و M_2 تنش در مصالح بتنی، میلگردهای تسلیح و فولاد جلدی ستون به ترتیب 1 و 6 درصد، 17 و 34 درصد و در نهایت 24 و 19 درصد کاهش یافته است. نسبت به مدل مبنا، سطح تنش در تیر و اتصالات دیگر مدل‌ها به ترتیب 42 و 55 درصد کاهش داشته است. در اتصالات مکانیکی و ادوات آن (شامل لولاه‌ها، فنر و گایدر) این پارامتر 210 و 300 درصد افزایش یافته است. در این گام از تحلیل چرخه‌ای نیز، رفتار غیرخطی در فنر رویت نشد. اما تجربه سطوح بالای تنش در اتصالات مکانیکی نشان‌دهنده نقش مؤثر آن‌ها در جذب انرژی ورودی و بالتبع کاهش ایفای نقش دیگر اعضای قاب در این مقوله است. از این منظر می‌توان عملکرد مفاصل مکانیکی را معادل فیوزهای خرابی تعبیه شده در تیر ضمن کاهش عرض بال قلمداد کرد. متذکر می‌شود، باتوجه به تقارن، در شکل‌های (15) و (16) تنها به ارائه نیمی از قاب‌ها بسنده شده است.

در این تحقیق اقدامات دقیقی برای بررسی موضوع Degradation of Stiffness and Strength در اتصالات قاب تحت زلزله‌های واقعی، انجام شده است. به‌ویژه، مدل‌های معرفی شده در این تحقیق تحت تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی قرار گرفته‌اند و برای تضمین هرچه بیشتر دقت و هماهنگی نتایج با لرزه‌خیزی ساخته‌گاه، از نگاشت‌های مصنوعی منطبق بر طیف طرح آیین‌نامه

در این مدل، که شامل یک قاب با لولا مکانیکی و سیستم بازگرداننده فنر لول است، بارگذاری‌های فشاری و کششی به‌طور متناوب و متقابل در بخش‌های مختلف قاب توزیع می‌شوند. هنگامی که یکی از طرفین قاب تحت بار فشاری قرار می‌گیرد (ورق بالاسری تیر که با سخت‌کننده‌های کمانش مقاوم شده است)، طرف دیگر قاب تحت بار کششی قرار می‌گیرد و بالعکس، مکانیزم لولا مکانیکی، که به‌عنوان یک نقطه مفصلی در سازه عمل می‌کند، اجازه می‌دهد که تغییرات در یک بخش از قاب به‌صورت چرخه‌ای - سیکلی و همزمان در بخش‌های دیگر اعمال شود. این ویژگی موجب می‌شود که سیستم قادر باشد با تغییرات بار به‌طور مداوم پاسخ دهد و بارها را بین فشار و کشش جابه‌جا کند. علاوه بر این، سیستم بازگرداننده فنر لول باعث می‌شود که قاب به‌طور خودکار به وضعیت اولیه خود بازگردد و از ایجاد تغییرات دائمی در شکل سازه جلوگیری کند. در نتیجه، این فرآیند به‌صورت مکرر تکرار می‌شود و سبب می‌شود که نمودار فشار و کشش در شرایط مختلف بارگذاری، مشابه و همسان باقی بماند. مطابق شکل (13)، در مدل مبنا (M_0) مقاومت جانبی نهایی قاب نسبت به مدل‌های M_1 و M_2 به ترتیب 50 و 55 درصد بیشتر است. در این مدل، سختی جانبی اولیه (شیب مماس بر منحنی هیستریزیس در سیکل اول) نسبت به مدل‌های M_1 و M_2 نیز به ترتیب 56 و 55/7 درصد بیشتر است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نسبت به مدل مبنا (M_0)، مقاومت پای ستون‌ها در مدل‌های M_1 و M_2 به ترتیب 33 و 27 درصد کاهش یافته است (مقایسه شکل‌های (13)، (15) و (16)). در خصوص سختی جانبی، نسبت به مدل مبنا میزان کاهش در این مدل‌ها به ترتیب 44 و 45/3 درصد بوده است. به‌هرحال، میزان جذب انرژی در ستون‌های مدل مبنا نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر از 50 درصد است (59 درصد نسبت به M_1 و 54 درصد نسبت به M_2). بر اساس مشاهدات، ضمن تعبیه مفاصل مکانیکی دارای سیستم بازگرداننده در قاب خمشی، خرابی در ستون‌ها به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است. در منحنی‌های چرخه‌ای، پایداری سیستم‌ها در برابر بارگذاری جانبی کاملاً مشهود است.

ضمن بارگذاری چرخه‌ای، مقاومت ایجاد شده در محل تشکیل مفصل پلاستیک اتصال در مدل M_0 نسبت به مدل‌های M_1 و M_2 به ترتیب 30 و 25 درصد بیشتر است. این درحالی است که سختی اتصال نیز در مدل (M_0) نسبت به دیگر مدل‌ها تقریباً 10 درصد بیشتر بوده است. میزان جذب انرژی در محل تشکیل مفصل پلاستیک در مدل مبنا (M_0) نسبت به مدل‌های M_1 و M_2 به ترتیب 58 و 55 درصد بیشتر محاسبه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد، ضمن تعبیه سیستم بازگرداننده، بخش اعظم انرژی ضمن تبدیل به حرکت مکانیکی صرف تغییر طول فنر شده و بدین ترتیب، اعضای اصلی قاب در فرآیند جذب و استهلاک انرژی مشارکت قابل توجهی ندارند.

استفاده شده است. این نگاشت‌ها به روش اصلاح نگاشت‌های طبیعی در فضای موجک تولید شده‌اند تا مشخصات دقیقی از زلزله‌ها برای سازه‌های مختلف به دست آید. تمامی این تحلیل‌ها با استفاده از نرم‌افزار OpenSees انجام شده است. با توجه به این که نرم‌افزار OpenSees ابزار قدرتمندی برای مدل‌سازی سازه‌ها و انجام تحلیل‌های دینامیکی تاریخچه زمانی است که امکان شبیه‌سازی رفتار پیچیده سازه‌ها تحت بارگذاری‌های دینامیکی و ارزیابی پاسخ‌های مختلف سیستم را با دقت بالا فراهم می‌کند. در این فرآیند، از 7 شتاب‌نگاشت طبیعی که مشخصات دور از گسل داشتند و متناسب با شرایط خاکی ساختگاه (خاک نوع C با سرعت موج برشی در محدوده 360 تا 760 متر بر ثانیه) انتخاب شده‌اند، استفاده گردید. این شتاب‌نگاشت‌ها از پایگاه داده‌های وبسایت PEER برداشت شده و مؤلفه‌های اصلی آن‌ها در جدول (7) مقاله معرفی شده است. مطابق شکل (14)، طیف شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی تولید شده، انطباق قابل قبولی با طیف طرح ساختگاه دارد.



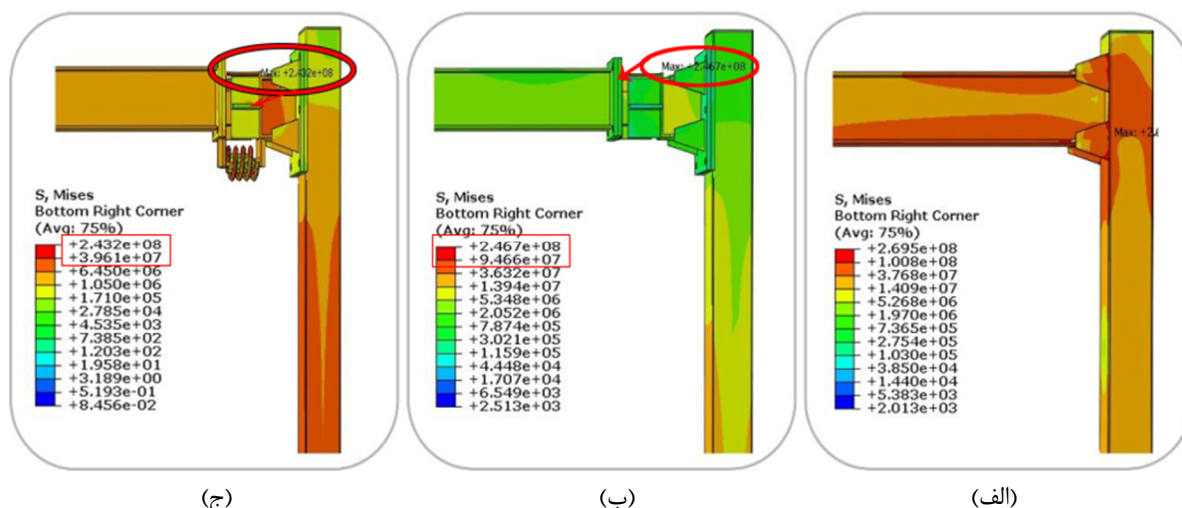
شکل 14- مقایسه طیف شتاب‌نگاشت‌های مصنوعی با طیف طراح ساخت

با وجود اعمال شرط مرزی گیردار کامل در پای ستون، مفصل مکانیکی در نظر گرفته شده می‌تواند با ایجاد رفتار غیرالاستیک

کنترل شده، بخش قابل توجهی از انرژی ورودی ناشی از زلزله را مستهلک کرده و در نتیجه، تقاضای تغییر شکل و تنش در اعضای اصلی قاب را کاهش دهد. با این حال، از آنجا که ناحیه مفصل مکانیکی عمداً به عنوان ناحیه شکل‌پذیر سازه‌ای طراحی شده است، انتظار می‌رود به دلیل تجمع تغییر شکل‌های پلاستیک و تمرکز کرنش، مقادیر تنش در این ناحیه به مقادیر بیشینه نزدیک شود. از سوی دیگر، در مدل‌سازی تحت بارگذاری سیکلی اعمال شده در سر ستون، به علت محدودیت جابه‌جایی ناشی از گیرداری پای ستون، گرادین‌های تنش و کرنش در نواحی مجاور تکیه‌گاه افزایش یافته و تمرکز تنش در ناحیه گیردار قابل توجه می‌گردد. مطابق نتایج ارائه شده در شکل‌های (15) و (16) (نقاط بیشینه تنش در محل مفصل مکانیکی)، مقادیر تنش در ناحیه مفصل نسبت به پای ستون بیشتر بوده و به ترتیب در سطح مرتبط با تسلیم حدود 60% و در سطح مرتبط با تنش نهایی حدود 80% افزایش نشان می‌دهد. این روند در تانسور تنش نمایش داده شده در این اشکال نیز قابل مشاهده است. علت اصلی این تفاوت، غیرخطی شدن موضعی و متمرکز شدن مکانیزم اتلاف انرژی در ناحیه مفصل مکانیکی است که منجر به افزایش محسوس تنش‌ها در این ناحیه می‌شود. منحنی‌های پوش‌آور استاتیکی شکل (17)، ظرفیت باربری سازه به‌طور گام‌به‌گام تحت بارگذاری‌های جانبی افزایش می‌یابد تا به نقطه هدف برسد. پس از رسیدن به این نقطه، که به معنی حد باربری طراحی شده برای سازه است، دیگر تغییرات غیرالاستیک و خرابی سازه به‌طور کامل در نظر گرفته نمی‌شود. این رویکرد به این دلیل اتخاذ شده است که در روش پوش‌آور، نقطه هدف برای تحلیل رفتار سازه کافی است تا اطمینان حاصل شود سازه به‌طور کامل از بارهای وارد شده، بدون وارد آمدن خرابی غیرقابل جبران، عبور می‌کند. بنابراین، پس از رسیدن به نقطه هدف، تحلیل‌ها به‌طور عمده از ادامه ارزیابی خرابی نهایی یا کاهش ظرفیت باربری در اثر رفتار غیرالاستیک جلوگیری می‌کنند.

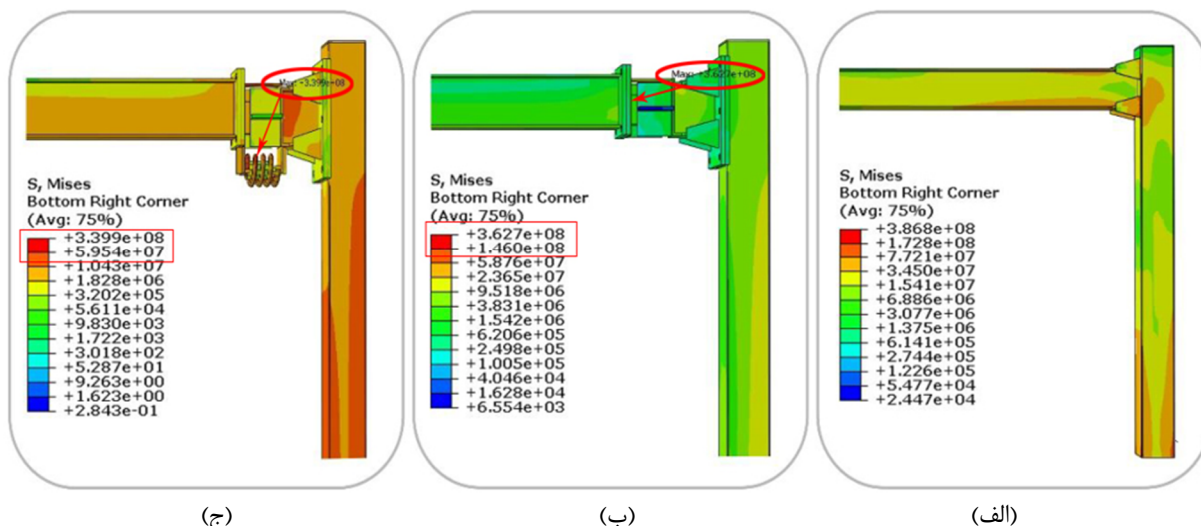
جدول 7- مؤلفه اصلی زلزله‌های اورجینال انتخاب شده برای تولید نگاشت‌های مصنوعی

ردیف	زمین لرزه و سال	ایستگاه	بزرگا	فاصله از گسل (km)	شباب بیشینه (g)
1	کیپ مندوسینو (آمریکا)، 1992	یورکا	7/01	44/6	0/18
2	کیپ مندوسینو (آمریکا)، 1992	فورتونا	7/01	23/6	0/12
3	لندرز (آمریکا)، 1992	بارستو	7/28	36/1	0/14
4	نورت ریچ (آمریکا)، 1994	لیک هیوز- کمپ مِند	6/69	32/3	0/1
5	نورت ریچ (آمریکا)، 1994	هالیوود	6/69	25/7	0/25
6	نورت ریچ (آمریکا)، 1994	بیگ توجونگا، جنگل ملی انجلس	6/69	24	0/25
7	سن فرناندو (آمریکا)، 1971	پاسادنا	6/61	31/7	0/11



شکل 15- کانتور تنش در اعضای قاب زمانی که تنش مصالح فولادی برای اولین بار به مقدار نظیر حد تسلیم رسیده است:

(الف) M_0 ، (ب) M_1 ، (ج) M_2



شکل 16- کانتور تنش در اعضای قاب زمانی که تنش مصالح فولادی برای اولین بار به مقدار نظیر حد نهایی رسیده است:

(الف) M_0 ، (ب) M_1 ، (ج) M_2

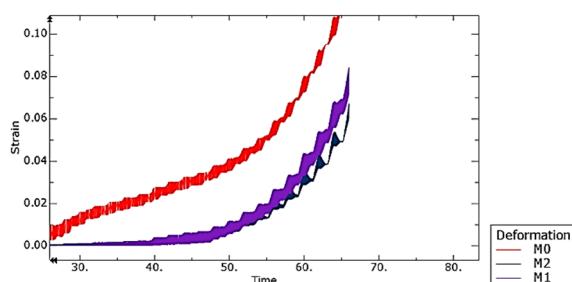
به عبارت دیگر، در این روش تا رسیدن به نقطه هدف سازه هنوز در مرحله الاستیک و یا شکل پذیری کنترل شده قرار دارد و وارد ناحیه خرابی که منجر به کاهش ظرفیت باربری نهایی می شود، نشده است. از این رو، کاهش ظرفیت باربری واقعی لرزه ای پس از رسیدن به نقطه هدف در منحنی های پوش آور لحاظ نشده است، چرا که سازه در آن مرحله همچنان به طور مطلوب عمل می کند و خرابی جدی یا کاهش ظرفیت باربری در نظر گرفته نمی شود.

ضمن تحلیل بار افزون روی مدل ها، منحنی های ظرفیت (تغییرات برش پایه در مقابل جابه جایی نقطه کنترل) مطابق شکل (16) برداشت شده اند. سختی ارتجاعی اولیه (شیب مماس بر منحنی بار افزون در ابتدای تحلیل) در مدل مینا $\left(\frac{N}{mm^2}\right)$ 91 و سختی ارتجاعی مدل های M_1 و M_2 به ترتیب تقریباً 51 و 52

با ملاحظه می شود که وجود مفاصل مکانیکی با سیستم بازگرداننده سختی ارتجاعی اولیه را تا 56 درصد کاهش داده است. در ادامه، ضمن بررسی دقیق پروسه تحلیل بار افزون، جابه جایی نظیر حصول به رخداد اولین تسلیم و شکست در مصالح فولادی در مدل ها مشخص شده است. مطابق شکل (17)، در هر مدل مقاومت جانبی و جابه جایی نقطه کنترل نظیر رخداد تنش تسلیم در مصالح فولادی برداشت شده است. برای این حالت حدی، مقدار مقاومت جانبی در مدل های M_0 ، M_1 و M_2 به ترتیب 404، 269 و 262 کیلونیوتن و مقادیر جابه جایی جانبی نقطه کنترل نیز به ترتیب 3/3، 5/05 و 4/84 سانتی متر محاسبه شده است (در شکل (17) نقطه A را ببینید).

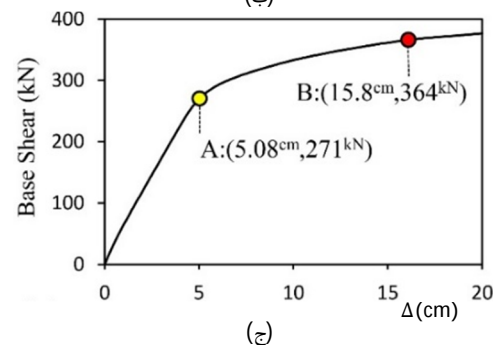
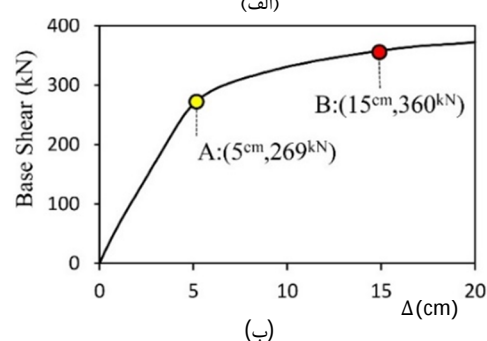
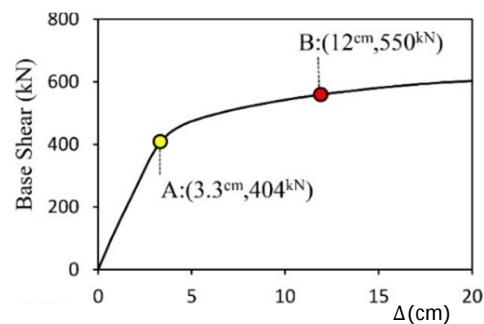
با توجه به نمودار هیستریزیس شکل (13) که نشان‌دهنده ورود اتصال به ناحیه غیرالاستیک است، می‌توان نتیجه گرفت که سیستم مفصل مکانیکی همراه با فنر بازگرداننده در این ناحیه به‌طور مؤثری به جذب انرژی، افزایش شکل‌پذیری و بازگشت سازه به وضعیت اولیه کمک کرده و عملکرد لرزه‌ای سازه را بهبود می‌بخشد. این سیستم، با جلوگیری از آسیب به دیگر بخش‌های سازه، باعث پایداری بیشتر در برابر نیروهای زلزله می‌شود.

جهت بررسی شکل‌پذیری مطابق شکل (18)، منحنی تغییرات کرنش در پای ستون‌ها برحسب زمان بارگذاری چرخه‌ای برای سه مدل M_0 ، M_1 و M_2 ارائه شده است. همان‌گونه که در نمودار مشاهده می‌شود، روند افزایش کرنش در مدل مبنا (M_0) که یک قاب خمشی ساده بدون هرگونه سیستم کنترلی است، شدیدتر از دو مدل دیگر بوده و این مدل بالاترین مقادیر کرنش تجمعی را در طول بارگذاری تجربه کرده است. این امر نشان‌دهنده تمرکز تغییرشکل‌ها در پای ستون‌ها، تشکیل سریع ناحیه پلاستیک و کاهش ظرفیت الاستیک سازه در برابر بارگذاری رفت‌و برگشتی است.



شکل 18- منحنی تغییر شکل مدل‌های M_0 ، M_1 ، M_2

در مدل M_1 که در آن مفصل مکانیکی در محل اتصال تیر به ستون تعبیه شده است، مقادیر کرنش نسبت به مدل مبنا کاهش قابل‌توجهی نشان می‌دهد. وجود مفصل مکانیکی باعث شده است که بخشی از انرژی ورودی در محل مفصل مستهلک گردد و از تمرکز کرنش در پای ستون جلوگیری شود. با این حال، با تداوم سیکل‌های بارگذاری، روند افزایشی کرنش در این مدل همچنان محسوس است، هرچند نرخ رشد آن کمتر از مدل مبنا است. در مدل M_2 که علاوه بر مفصل مکانیکی، مجهز به سیستم بازگرداننده فنر مارپیچ است، کمترین مقدار کرنش در پای ستون‌ها مشاهده می‌شود. منحنی این مدل نسبت به سایر مدل‌ها شیب ملایم‌تر و رفتار پایداری دارد که نشان‌دهنده نقش مؤثر سیستم بازگرداننده در جذب و ذخیره بخشی از انرژی ورودی و بازگرداندن قاب به حالت اولیه پس از هر سیکل بارگذاری است. در نتیجه، تغییر شکل‌های پلاستیک در پای ستون‌ها به حداقل رسیده و رفتار سازه عمدتاً در محدوده الاستیک باقی‌مانده است. به‌طور کلی، مقایسه



شکل 17- منحنی ظرفیت مدل‌ها: الف) M_0 ، ب) M_1 ، ج) M_2

در این فقره نیز ملاحظه می‌شود که ضمن استفاده از مفصل مکانیکی مجهز به فنر بازگرداننده، نسبت به مدل مبنا برش پایه در قاب 36 درصد کاهش و تغییر مکان هدف 51 افزایش یافته است. برای حالت حدی رخداد تنش حد نهایی در مصالح فولادی، مقدار مقاومت جانبی در مدل‌های M_0 ، M_1 و M_2 به ترتیب 550، 370 و 380 کیلو نیوتن و مقادیر جابه‌جایی جانبی نقطه کنترل نیز به ترتیب 12، 15 و 15/8 سانتی‌متر محاسبه شده است (شکل 17) (نقطه B).

بررسی مقادیر کمی برداشت شده نشان می‌دهد، ضمن استفاده از مفصل مکانیکی مجهز به فنر بازگرداننده، نسبت به مدل مبنا برش پایه در قاب 31 درصد کاهش و تغییر مکان هدف 66 درصد افزایش یافته است. بر اساس نتایج، انتظار می‌رود که استفاده از مفصل مکانیکی دارای سیستم بازگرداننده پیشنهادی تأثیر قابل‌توجهی بر بعد اقتصادی طرح داشته باشد. لازم به ذکر است که نتایج هر دو تحلیل پوش‌آور و چرخه‌ای قرابت نزدیکی داشته و پوشش دهنده یکدیگرند.

مودهای ارتعاشی قاب ندارد. این به این دلیل است که مفاصل مکانیکی عمدتاً به رفتار غیرالاستیک و شکل‌پذیری سازه مربوط می‌شوند و تأثیر مستقیم بر جرم و ارتعاشات مودهای سازه ندارند. در این تحقیق، ضریب مشارکت جرم تنها در مودهای ارتعاشی اولیه که در آن‌ها سازه در حال ارتعاش به صورت خطی است، مهم است و در این حالت، مفاصل مکانیکی تأثیری بر این پارامتر نداشته‌اند.

(2) ضمن استفاده از مفاصل مکانیکی دارای سیستم بازگرداننده، سختی در قاب 33 درصد کاهش می‌یابد. استفاده از مفاصل مکانیکی مجهز به سیستم بازگرداننده باعث کاهش سختی قاب به میزان 33 درصد شده است. این کاهش سختی به دلیل حضور فنرهای بازگرداننده در مفصل مکانیکی است که انرژی ناشی از بارگذاری‌های جانبی (مانند نیروهای زلزله) را جذب کرده و از ایجاد تغییر شکل‌های شدید در اعضای اصلی قاب جلوگیری می‌کند. فنرهای بازگرداننده باعث می‌شوند که قاب از حالت سختی خطی خارج شده و رفتار غیرخطی پیدا کند، که موجب کاهش پاسخ‌های سازه به نیروهای خارجی می‌شود.

(3) بر اساس معیار بیشینه تنش فون میزس (von Mises) و در مقایسه با حالت اتصال صلب، نتایج تحلیل چرخه‌ای نشان می‌دهد به کارگیری مفصل مکانیکی مجهز به سیستم بازگرداننده (فنر- هدايتگر) سبب می‌شود مکانیزم پاسخ غیرخطی و تمرکز تغییر شکل‌های بزرگ به صورت هدفمند در ناحیه مفصل فعال گردد. به بیان دیگر، سیستم پیشنهادی با هدایت مسیر تغییر شکل و فراهم کردن نیروی بازگرداننده، از توسعه پاسخ غیرخطی و تمرکز تنش در اعضای اصلی قاب جلوگیری کرده و بدین ترتیب تقاضای تنش در تیر، ستون و اجزای اتصال کاهش می‌یابد. در این چارچوب، مقایسه مقادیر بیشینه تنش فون میزس در مدل اتصال صلب و مدل مجهز به سیستم بازگرداننده نشان می‌دهد که بیشینه تنش فون میزس در تیرها تا 87٪، در ستون‌ها تا 72٪ و در اجزای اتصال تا 39٪ کاهش یافته است. لازم به تأکید است که این درصدها از طریق استخراج بیشینه تنش فون میزس در نواحی بحرانی تعریف شده در مجاورت اتصال (شامل نواحی مستعد تمرکز تنش در اطراف اتصال تیر به ستون و اجزای رابط) و سپس مقایسه مقادیر پیک در اوج سیکل‌های بارگذاری چرخه‌ای، بین دو مدل (اتصال صلب و اتصال مجهز به سیستم بازگرداننده) به دست آمده‌اند. همچنین، برای اطمینان از قابلیت مقایسه، استخراج مقادیر در شرایط بارگذاری متناظر (سطح تغییر مکان و ترتیب سیکل‌ها) و در مرحله‌ای انجام شده است که پاسخ چرخه‌ای به بیشینه مقدار خود نزدیک می‌شود. کاهش مشاهده شده در مقادیر تنش فون میزس در اعضای اصلی قاب بیانگر آن است که سیستم پیشنهادی می‌تواند با کاهش تمرکز تنش و محدود کردن نواحی مستعد آسیب در تیر و ستون، احتمال آسیب تجمعی ناشی از

سه منحنی نشان می‌دهد که استفاده از مفصل مکانیکی، به‌ویژه در ترکیب با سیستم بازگرداننده، موجب کاهش قابل توجه کرنش‌های تجمعی، بهبود پایداری چرخه‌ای و افزایش دوام سازه در برابر بارگذاری‌های متناوب شده است. به عبارت دیگر، مدل M_2 با ارائه رفتار الاستیک‌تر و کرنش‌های کمتر، بهترین عملکرد را در میان مدل‌های مورد بررسی دارد.

5- بحث و نتیجه‌گیری

مطالعه تحلیلی حاضر به ارتقای چرخه‌ای- سیکلی یک مفصل مکانیکی دارای سیستم بازگرداننده ویژه و ارائه جزئیات طراحی آن پرداخته است. در پیکره‌بندی مفصل مذکور از فنر با سختی بالا استفاده شده که از قابلیت بالای جذب انرژی برخوردار است (سیستم بازگرداننده مورد نظر به صورت یک پکیج آماده در کارخانه طراحی و تولید خواهد شد، که تمامی اجزاء آن شامل فنر مارپیچ و مکانیزم‌های هدایتگر به صورت استاندارد و پیش‌ساخته آماده شده و این سیستم به عنوان یک واحد کامل و فلنجی در محل اتصال تیر به ستون نصب خواهد شد، که فرآیند نصب را ساده و سریع می‌کند. از آنجایی که این سیستم به طور کامل در محیط کنترل شده کارخانه تولید خواهد شد، مشکلات اجرایی در محل نصب به حداقل رسیده و نصب آن کاملاً مشابه سایر اتصالات فلنجی معمولی خواهد بود. این رویکرد به طور چشمگیری از پیچیدگی‌های نصب خواهد کاست و تضمین می‌شود که عملکرد بهینه سیستم در محل اتصال حاصل شود). سازوکار مفصل مذکور به گونه‌ای است که بخش اعظم انرژی ورودی به قاب، در محل مفصل مکانیکی صرف تغییر طول فنر شده و بالتبع به صورت انرژی جنبشی مستهلک می‌شود.

با این تدبیر، ضمن بارگذاری چرخه‌ای، سایر اعضای اصلی قاب (تیرها، ستون‌ها و اتصالات تیر به ستون) در فرآیند جذب و استهلاک انرژی مشارکت قابل توجهی نداشته و لذا سالم می‌مانند. ضمن استفاده از مفصل مکانیکی دارای سیستم بازگرداننده پیشنهادی، فیوز لرزه بر عضو اصلی قاب نبوده و پس از تجربه زلزله نسبتاً قوی و پس‌لرزه‌های احتمالی مستلزم تعویض یا تعمیر نخواهد بود. از این رو، روش پیشنهادی بهبود جنبه اقتصادی طرح را به دنبال خواهد داشت و هزینه‌های تعمیر و بازیابی کاربری را نیز به حداقل خواهد رساند. در محدوده مدل‌های مورد بررسی و فرضیات اتخاذ شده، اهم نتایج حاصل از این مطالعه به شرح ذیل است.

(1) وجود مفاصل مکانیکی با یا بدون سیستم بازگرداننده بر ضریب مشارکت جرم مودی قاب بی‌تأثیر است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهند که وجود مفاصل مکانیکی (چه با سیستم بازگرداننده و چه بدون آن) هیچ تأثیری بر ضریب مشارکت جرم

برای آن می‌تواند زمینه‌ای مناسب برای تحقیقات جدید باشد (Mohsenian و همکاران، (2023)، Kovacic و Zoller (2015).

6- فهرست

CFT	ستون فولادی پر شده با بتن
d_b	ارتفاع مؤثر مقطع تیر
S_h	فاصله مفصل پلاستیک از بر ستون
h_b	ارتفاع جان مقطع
ε	کرنش در مفصل
L_y	طول لولای مکانیکی
K	سختی فنر
E_s	مدول الاستیسیته فنر لول
d	قطر مقطع فنر لول
R	شعاع حلقه‌های فنر
n	تعداد حلقه‌ها
θ_y	چرخش لولا
K_e	سختی خمشی محل لولا
M_u	ظرفیت خمشی
N_u	نیروی محوری ایجاد شده در فنر
V_u	نیاز برشی محل مفصل
f_u	تنش نهایی مصالح فنر
b	طول فنر
A	سطح مقطع فنر

6- مراجع

- Azari M, Mir Ghaderi S-R, "Steel structures design", Arkan Danesh Publishing, 2010, 3, ISBN, 978-600-5442-56-4.
- ABAQUS Version 2022, ABAQUS User's Manual, SIMULIA World Headquarters, 2022, Rising Sun Mills 166 Valley Street, Providence (RI 02909-2499, USA).
- Beheshti Aval, S-B, "Seismic rehabilitation of existing buildings: theory and application, vol. 1: seismic performance evaluation", K.N. Toosi University of Technology Press, Tehran, Iran, 2012.
- Building and Housing Research Center, 2016, Standard No. 2800: Earthquake-resistant design of buildings (4th ed.). Ministry of Roads and Urban Development
- Dabagh H, Ghavami MS, "Development of the popovics stress-strain relationship for confined concrete. Concrete Research, 2018, 11 (1), 97-108. <https://doi.org/10.22124/jcr.2018.6451.1162>
- De Oliveira WLA, De Nardin S, De Cresce El Debs ALH, El Debs LK, "Evaluation of passive confinement in CFT columns", Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66 (4), 487-495. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.11.004>
- Fanaie N, Sadeghi Moghadam H, "Experimental study of rigid connection of drilled beam to CFT column with external stiffeners: Effect of beam flange drilling on stress concentration and ductility improvement", Journal of Constructional Steel Research, 2019, 153,

بارگذاری رفت و برگشتی و نیز احتمال بروز مکانیزم‌های نامطلوب (نظیر تمرکز تغییر شکل در اعضای اصلی به جای ناحیه هدف) را کاهش دهد. در نتیجه، انتظار می‌رود قاب خمشی مجهز به مفصل مکانیکی بازگرداننده، از منظر پایداری چرخه‌ای، کنترل آسیب و تاب‌آوری سازه‌ای، عملکرد مناسب‌تری نسبت به اتصال صلب از خود نشان دهد.

(4) فنر موجود در پیکره‌بندی مفصل به‌سان عضو صفر نیرویی خرابا عمل می‌نماید. ضمن تأمین پایداری مجموعه، تنش در مصالح آن هرگز به مقدار نظیر حد تسلیم نمی‌رسد. فنر بازگرداننده در سیستم مفصل مکانیکی عملکرد مشابه عضو صفر نیرویی خرابا دارد، به این معنی که این فنر از ایجاد نیروی داخلی زیاد در سایر اجزای سازه جلوگیری کرده و پایداری کلی مجموعه را تأمین می‌کند. در نتیجه تنش در مصالح اصلی سازه (مانند تیر و ستون) هرگز به حد تسلیم نمی‌رسد. این ویژگی، پایداری سازه را در برابر بارهای دینامیکی و نیروهای جانبی افزایش می‌دهد و از آسیب‌دیدگی سازه در طول چرخه‌های بارگذاری مکرر جلوگیری می‌کند.

(5) به‌کارگیری مفصل مکانیکی، به‌ویژه همراه با سیستم بازگرداننده فنر مارپیچ، باعث کاهش محسوس کرنش‌های تجمعی و بهبود رفتار چرخه‌ای قاب و عملکرد لرزه‌ای بهینه‌تری شده است. استفاده از مفصل مکانیکی همراه با سیستم بازگرداننده فنر مارپیچ تأثیر بسزایی در کاهش کرنش‌های تجمعی و بهبود رفتار چرخه‌ای سازه داشته است. فنر مارپیچ با جذب و دفع انرژی وارد شده به سازه در هنگام بارگذاری‌های دینامیکی، باعث کاهش کرنش‌های تجمعی و بهبود عملکرد چرخه‌ای قاب می‌شود. این ویژگی‌ها موجب بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه شده و اجازه می‌دهند که سازه به‌طور مؤثری نیروهای زلزله را جذب کرده و از ایجاد خرابی‌های جدی جلوگیری کند. در نتیجه، سازه دارای پایداری و ایمنی بیشتری در برابر زلزله‌های شدید می‌باشد.

نتایج این مطالعه از بارگذاری‌های چرخه‌ای و بار افزون مدل‌های ساده (یک‌طبقه و یک دهانه) استخراج شده است. به‌هرحال، ارزیابی کارایی مفصل مکانیکی دارای سیستم بازگرداننده پیشنهادی در کنترل پاسخ‌های نیرویی و تغییر مکانی قاب‌ها با هندسه‌های پیچیده‌تر تحت نگاشت‌های واقعی زلزله، می‌تواند موضوعی مناسب برای مطالعات آتی باشد. براساس مشاهدات، رویکرد پیشنهادی ضمن تأمین پایداری در سیستم، بعد اقتصادی طرح را نیز در حد قابل قبولی بهبود می‌بخشد. به‌نظر می‌رسد که مفصل مکانیکی دارای سیستم بازگرداننده پیشنهادی تأثیر قابل توجهی بر ضریب رفتار سیستم داشته باشد. به‌هرحال تخمین ضریب رفتار سیستم مجهز به مفصل مکانیکی دارای سیستم بازگرداننده و تحلیل خسارت و ارزیابی هزینه چرخه عمر

- Peng H, Ou J, Schellenberg A, McKenna F, Mahin S, "Seismic behavior of steel moment frames with mechanical hinge beam-to-column connections", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2020, 20 (06), 2040005. <https://doi.org/10.1142/S0219455420400052>
- Plan and Budget Organization of the Islamic Republic of Iran (PBO). Publication No. 360: Guideline for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings (1st revision). Tehran, Iran: Plan and Budget Organization, 2013.
- Rahimzadeh A, Ghassemieh M, "Cyclic behavior of steel moment frame connections under various loading protocols and a developed loading protocol", *Sharif Journal of Civil Engineering*, 2015, 31, 2 (3.2), 93-102. <https://doi.org/20.1001.1.26764768.1394.312.32.12.1>
- Road, Housing and Urban Development Research Center (BHRC). Standard No. 2800: Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings (4th ed.). Tehran, Iran, 2014.
- Soydan C, Özkaynak H, Sürmeli M, Şenol E, Saruhan H, Yüksel E, "A mechanical plastic hinge for beam-to-column connections of precast concrete structures", *Research Square* (preprint), 2024. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4531445/v1>
- Saeidzadeh M, Chenaghloou MR, Akbari Hamed A, "Evaluation of the structural behavior of a novel self-centering beam-column connection with friction damper in comparison to existing connections", *Journal of Civil and Environmental Engineering* (University of Tabriz), (1402 [2023]). 53 (112) [Fall 1402], 215-224. <https://doi.org/10.22034/jcee.2022.52238.2162>
- Sadeghi-Moqaddam H, Fanaei N, "Effect of beam perforation on improving the performance of rigid steel beam-to-CFT column connections with external stiffeners", In: *Proceedings of the 4th National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management*, Tehran, Iran, 2016.
- Wang P Wang Z, Pan J, Zheng Y, Liu D, "Cyclic behavior of steel beam to cft column connections with gusset plates", *Advances in Civil Engineering*, 2019, Article ID 3798671. <https://doi.org/10.1155/2019/3798671>
- Wahl AM, *Mechanical Springs* (2nd ed.). McGraw-Hill. ISBN: 978-0070677050, 1963.
- Xie L, Wu J, Zhang J, Liu C, "Experimental study of mechanical properties of beam-column joint of a replaceable energy-dissipation connector-precast concrete frame", *Journal of Building Engineering*, 2021, 43, 102588. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102588>
- Yu J, Peng J, Wang Y-H, Luo W-W, "Study on seismic performance of steel frame beam-slab-column joint based on angle unilateral connection", *Engineering Structures*, 2025, 330119888. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.119888>
- 209-221. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.10.016>
- Gao X, Lin S, Liu R, Chen X, "The hysteresis behavior of steel beam-column joint with the load bearing-energy dissipation connection for converter station building", *Buildings*, 2024, 14 (8), 2424. <https://doi.org/10.3390/buildings14082424>
- GB 50011-2010, Code for seismic design of buildings. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China; 2010 (China).
- Hosseini Ali Abad SMR, Farahani Alavi M, Sheikh Lari V, Yavari AR, "Modal vibration analysis of coil spring and leaf spring using ABAQUS software", *Journal of Approach at Oil and Gas Management*, 2020, 1 (3), 1-13. (In Persian). JR_OILSC-1-3_001 DOI: N/A
- Inai E, Mukai A, Kai M, Tokinoya T, Fukumoto KM, "Behavior of concrete-filled steel tube beam columns", *Journal of Structural Engineering*, 2004, 130 (2), 189-202. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:2 ascelibrary.org](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:2 ascelibrary.org)
- Iran's National Building Regulations, Part 10: Design and Execution of Steel Buildings (4th ed.). Tehran, Iran, 2013.
- Kafi MA, Tariqi P, "Evaluation of using strong column-weak beam requirements in prequalified welded connections in intermediate steel moment frames", *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2019, 5 (4), 195-206. <https://doi.org/10.22065/jsce.2017.89781.1240>
- Li Y, Huang B, "Evaluation on seismic performance of beam-column joints of fabricated steel structure with replaceable energy-dissipating elements", *Sustainability*, 2022, 14 (6), 3350. <https://doi.org/10.3390/su14063350>
- Li X, Wang Q, Ma G, "Mechanical properties of a novel plastic hinge seismic fuse based on frictional energy dissipation to avoid brittle failures in beam to column moment resistant joints", *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2020, 45 (5), 3695-3706. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04214>
- Latour M, D'Aniello M, Zimbru M, Rizzano G, Piluso V, Landolfo R, "Removable friction dampers for low-damage steel beam-to-column joints. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 115, 66-81. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.08.002>
- Mohsenian V, Beheshti Aval SB, Darbanian R, "Tunnel form as an ideal system for rc constructions under multiple earthquakes", *Journal of Civil and Environmental Engineering* (University of Tabriz), 2018, 47 (89), 61-74. JR_CEEJ-47-89_006. DOI: N/A
- Peng L, Yang L, Ban H, "Experimental study on demountable and reusable steel frame with bolted-pinned joints", *Engineering Structures*, 2025, 345, 121591. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.121591>
- Peng H, Ou J, Mahin S, "Design and numerical analysis of a damage-controllable mechanical hinge beam-to-column connection", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 133, 106149. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106149>