

# Hysteretic Behavior of Beam-to-Column Connections Equipped with Buckling-Restrained Steel Dampers

Yashar Gholami, Behzad Shekastehband\* 

Department of Civil Engineering, Urmia University of Technology, Urmia, Iran.

**ABSTRACT:** The combination of damage-controlled systems consisting of steel dampers with connections in steel frames reduces the damage to the main structural elements during earthquakes. In this study, two types of buckling-restrained dampers in moment-resisting connections between beams and columns under cyclic loading are numerically investigated. These dampers are the Jointed Arc Plate Damper (JAPD) and the Tube-in-Tube Damper (JTTD). To validate the finite element modeling, the results of numerical analyses of T-stub dampers were compared with experimental results, showing very good agreement between numerical and experimental results. By conducting cyclic analyses up to 4% drift on twelve damper models for various parameters such as different damper-to-beam yield strength ratios of the damper to the beam and the cross-sectional area of the damper, seismic performance characteristics, including initial stiffness, moment resistance, ductility, and energy dissipation capacity, are compared. According to the analysis results, the JTTD damper performs better than the JAPD damper, with moment resistance and energy dissipation of the JTTD model being approximately 10% and 5% higher than those of the JAPD model, respectively. Increasing the damper-to-beam yield strength ratio from 0.6 to 1.00 results in approximately a 35% increase in moment resistance of the models. In these models, increasing the cross-sectional area of the damper by 40% leads to a roughly 50% increase in connection moment resistance. The theoretical relationships estimate over 85% of the corresponding finite element analysis values, but for estimating the elastic stiffness of the models, the theoretical value should be divided by 3.5. Increasing the damper-to-beam yield strength ratio from 0.6 to 1.00 has no significant effect on energy dissipation, while ductility increases by about 25%.

## Review History:

Received: Mar. 19, 2025  
Revised: May, 15, 2025  
Accepted: Jun. 25, 2025  
Available Online: Jul. 03, 2025

## Keywords:

Energy Dissipater  
Hysteretic Behavior  
Buckling-Restrained  
Plastic Deformation  
Ductility

## 1- Introduction

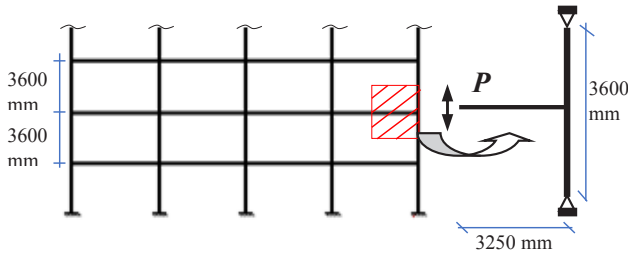
In the aftermath of the 1994 Northridge earthquake and 1995 Kobe earthquake, due to numerous unexpected failures of welded connections, it was recognized that fully welded moment connections exhibited inherent drawbacks. Numerous proposed solutions to the moment frame connection problem were attempted with the aim of moving the plastic hinge away from the face of the column. Solutions based on energy dissipation concepts that circumvented the need to develop the plastic moment of the beam were also proposed. To achieve more stringent seismic performance objectives, the design approach is to concentrate damage on disposable and easy-to-repair structural elements referred as structural fuses, while the main structure is designed to remain elastic or with minor inelastic deformations. ADAS and T-ADAS [1], and the honeycomb damper [2], are most commonly used passive energy dissipation devices that serve as non-structural reciprocating to absorb the input seismic energy and protect the structural elements. A number of other alternative hysteretic energy dissipation systems, such as providing the connection

scheme with seismic energy dissipation through connecting elements have also been proposed. These dampers can be strengthened through introducing buckling restrainers, which provide sufficient rigidity for steel dampers in order to avoid the early shear buckling. The main motivation is to create a device that can reach the full yield strength and to eliminate or significantly reduce plastic damage to the dampers. The current study examines the performance of two innovative types of buckling-restrained steel dampers employed as key energy-dissipating elements in beam-to-column connections.

## 2- Methodology

To explore the behavior of the beam-to-column connection with buckling-restrained steel dampers during an earthquake, the beam-column substructure, as shown in Fig. 1 (b), was extracted from the prototype structure in Fig. 1 (a). Twelve models are taken into consideration, which can be categorized into two groups of Jointed Arc Plate Damper (JAPD) and the Tube-in-Tube Damper (JTTD). Each connection is characterized by a different damper-to-beam yield strength

\*Corresponding author's email: b\_shekastehband@uut.ac.ir



**Fig. 1. Substructures for seismic cyclic loading extracted from a prototype steel frame structure.**

ratio and cross-section area of the dampers. Details of the joints are illustrated in Fig. 2.

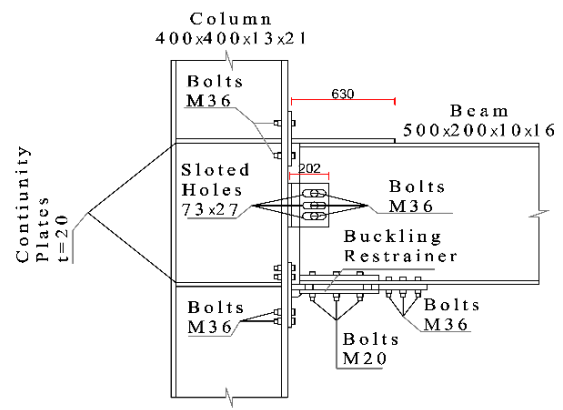
As beam and column are intended to remain elastic, the load path provided by all parts of the connectors, except the damper must remain elastic to ensure full development of the damper's plastic mechanisms. H-400×400×13×21 mm section and an H-500×200×10×16 mm section adopted for columns and beams, respectively. The distance between the column center and the loading point is 3250 mm, both the beam length and column height being 3600 mm. Furthermore, high strength bolts of Grade-10.9 M36 are adopted.

The quasi-static cyclic load in accordance with the SAC test protocol [3] is applied to the reference point, which was coupled to the loading surface of the beam tip.

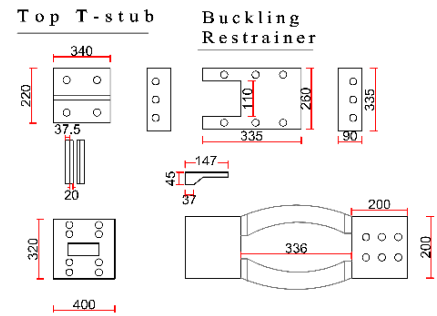
The displacement boundary conditions contained pin supports at both ends of column (i.e.  $U_1=U_2=U_3=0$ ). Lateral restraints were utilized to prevent any unexpected instability and lateral torsional buckling of the connection specimens.

The 8-node continuum solid elements with reduced integration, C3D8R, are used to model all parts (Fig. 3). The proper mesh density was obtained using the free element mesh technique. Further, a finer mesh was adopted in the connection zone. The interaction between welded components was modeled by the "tie" command. In order to achieve a balance between the accuracy and computational efficiency, a finer mesh of approximately 15 mm is used only in areas where local buckling or plastic hinges occur, i.e. at the T-stub type slit damper (TSD). A coarser mesh of approximately 25 mm is used for other parts of the beam and column. A minimal number of two elements through the thickness is used in order to improve the plastic strains and the global solution. Also, for the bolts, a fine mesh is used. Moreover, for the parts in contact, master-slave types, a finer mesh was used for the slave ones.

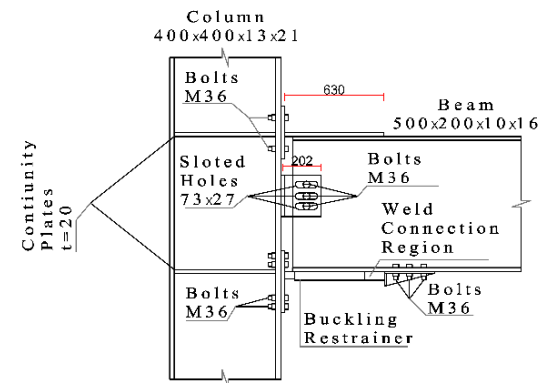
Surface-to-surface contact interactions with finite sliding are employed for all contacting surfaces between the connector and the column/beam, between the bolts and the connected elements, between the damper and buckling restrainer, as well as between the shaft and the nut of the bolts and the steel profiles. Contact interaction property is defined as Hard Contact. In the tangential direction, frictional contact between contacting pairs is defined with a coefficient of



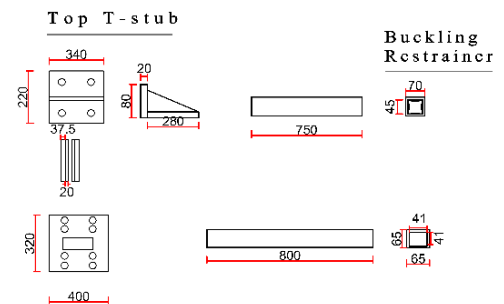
**JAPD**



**(a)**



**JTSD**



**(b)**

**Fig. 2. Details of the models: (a) JAPD; (b) JTSD.**

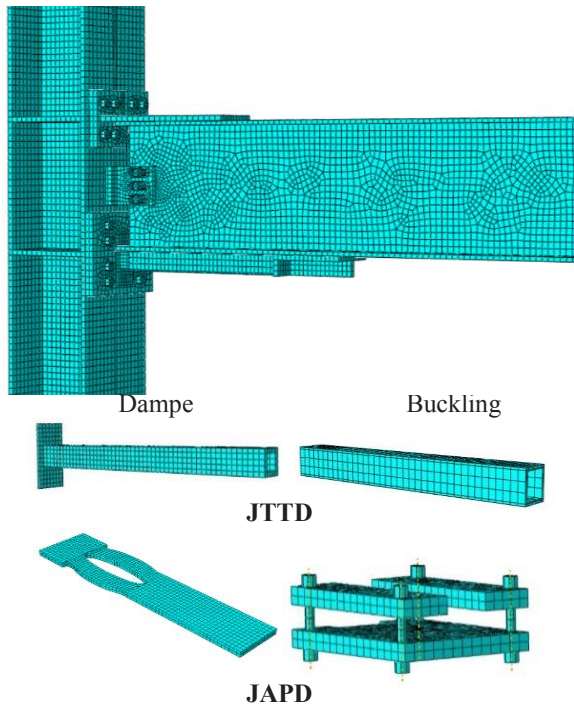


Fig. 3. Three-dimensional finite element model for the studied connections.

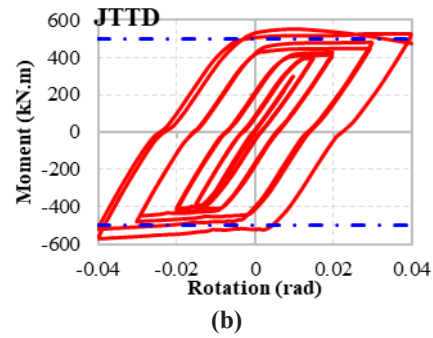
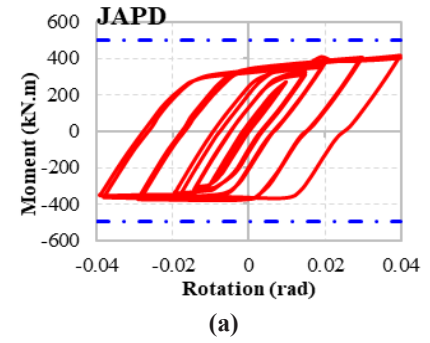


Fig. 4. Moment-rotation hysteretic curves of the models: (a) JAPD; (b) JTDD.

Table 1. Mechanical properties of steel material

| Model components | E (MPa) | $\sigma_y$ (MPa) | $\sigma_u$ (MPa) | $\epsilon_u$ (%) |
|------------------|---------|------------------|------------------|------------------|
| Beam             | 206.89  | 258.03           | 440.05           | 30.6             |
| Column           | 214.02  | 313.9            | 458.89           | 29.3             |

friction  $\mu = 0.3$ . The tangential contact condition is modeled using the Penalty Method, which involves compatibility of the kinematic conditions between displacement, velocity and acceleration. Table 1 lists the material properties of components. For the material nonlinearity, an elastoplastic constitutive law based upon the von Mises yield criterion combined with Prandtl-Reuss flow rule is adopted. Combined hardening – which considers both isotropic and kinematic hardenings – is selected to represent hardening behavior.

### 3- Results and Discussion

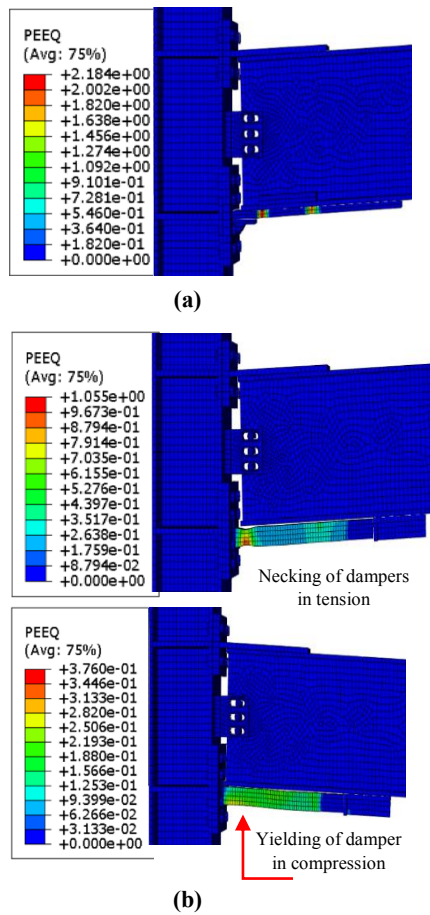
The hysteretic moment–rotation ( $M-\Theta$ ) curves of the models are shown in Fig. 4. The current approach is to ensure the satisfactory performance of such moment-resisting connections per AISC Seismic Provisions, accommodating an inter-story drift angle of at least 0.04 rad with providing a flexural resistance of at least 0.80Mpb of the connected

beam in SMFs. The moment and the inter-story drift angle indicated in Fig. 4 are calculated by the shear load at the tip of the beam multiplied by the length from the loading point to the column surface, and the displacement measured at the loading point divided by the beam length. The connections showed a satisfactory overall performance, characterized by stable and plump hysteresis loops under cyclic loading. JTDD model is found to have superior hysteretic performance over JAPD model with stable and repeatable behavior. Beams and columns with a plastic strain (PEEQ) of zero behaved in a purely elastic manner, as shown in Fig. 5.

For a given connection type, the magnitude of ultimate strength increased with increasing  $\alpha$  parameter. The initial stiffness of the connections is not influenced by this parameter. The flexural strength value of the JTDD model is approximately 10% higher than that of the JAPD model, while the elastic stiffness values of the models are almost the same. The theoretical and numerical values of yield moment strength are close to each other; however, the theoretical elastic stiffness is much larger than the corresponding numerical values. The energy dissipation in the JTDD model is about 5% higher than in the JAPD model. In both models, the reduction in energy dissipation for an increase in  $\alpha$  value by 20% (from  $\alpha=1$  to  $\alpha=1.2$ ) is approximately 3%.

### 4- Conclusions

In this study, two buckling-restrained dampers consisting of Jointed Arc Plate Damper (JAPD) and Jointed Tube-in-



**Fig. 5. Plastic strain distribution along with deformed shapes of: (a) JAPD; (b) JTDD.**

Tube Damper (JTDD) have been numerically investigated under cyclic loading. Also, the effect of damper-to-beam yield strength and cross-section area of the damper was studied on the hysteretic behavior. Among the interesting results, the following are noted:

- For  $\alpha=1$  and  $\beta=1$ , JTDD damper unlike the JAPD damper, meets the requirements of AISC 341 for SMFs;
- By increasing the value of  $\alpha$  from 1.0 to 1.2, the flexural strength of JAPD and JTDD models increases by 17% and 14% respectively. However, the JAPD model still does not meet the requirements of AISC 341;
- The ratio of theoretical flexural strength to numerical one in JAPD and JTDD models is 96% and 87% respectively. The corresponding values in the elastic stiffness of the models are 3.40 and 3.45. It is suggested that a value of 3.50 be used in practice.
- As the value of  $\beta$  increases from 0.1 to 1.4, the JAPD model can be utilized for special moment-resisting frames while meeting the requirements of AISC 341-22.

## References

- [1] Terenzi, G., 2023. "Novel design procedure for steel hysteretic dampers in seismic retrofit of frame structures", *Engineering Structures*, 284, 115969.
- [2] Jafari, B., Shekastehband, B., 2024, "Cyclic Behavior of Hybrid Honeycomb- and- Flexural Yielding Dampers in Chevron CBFs", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 54(2), pp. 13-24 in Persian
- [3] AISC/ANSI 341-22, 2022, *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction, Chicago.





## رفتار چرخه‌ای اتصالات تیر به ستون مجهز به میراگرهای کمانش تاب

یاشار غلامی، بهزاد شکسته‌بند\* 

گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۴/۱۲

### کلمات کلیدی:

اتلاف گر انرژی

رفتار چرخه‌ای

میراگر کمانش تاب

تغییر شکل پلاستیک

شکل پذیری

**خلاصه:** ترکیب سیستم‌های کنترل خرابی متشکل از میراگرهای فولادی با اتصالات در قاب‌های فولادی باعث کاهش خرابی وارده به عناصر اصلی سازه در طی زمین‌لرزه می‌شوند. در این مطالعه، دو نوع میراگر کمانش تاب در اتصالات مقاوم خمشی تیر به ستون تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این میراگرها به صورت میراگر ورق قوسی مهار شده در زیر ورق (JAPD) و میراگر لوله در لوله (JTDD) می‌باشند. برای صحت‌سنجی مدل‌سازی عناصر محدود، نتایج تحلیل‌های عددی میراگرهای شکافدار T-stub با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده‌اند که انطباق بسیار خوبی بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. با انجام تحلیل چرخه‌ای تا دریافت ۴٪ بر روی دوازده مدل میراگر به ازای پارامترهای مختلف نظیر ضرایب مختلف مقاومت مصالح میراگر به تیر و مساحت سطح مقطع میراگر، مشخصه‌های عملکرد لرزه‌ای شامل سختی اولیه، مقاومت خمشی، شکل‌پذیری و اتلاف انرژی مقایسه شده است. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل، میراگر JTDD نسبت به میراگر JAPD دارای عملکرد بهتری می‌باشد، به گونه‌ای که مقاومت خمشی و اتلاف انرژی مدل JTDD به ترتیب در حدود ۱۰٪ و ۵٪ بیش از مقادیر متناظر مدل JAPD است. با افزایش ضریب مقاومت مصالح از ۶/۰ به ۱/۰، مقاومت خمشی مدلها در حدود ۳۵٪ افزایش می‌یابد. در این مدلها با افزایش سطح مقطع میراگر به میزان ۴۰٪، مقاومت خمشی اتصال در حدود ۵۰٪ افزایش پیدا می‌کند. روابط تئوری ارائه شده بیش از ۸۵٪ مقدار متناظر تحلیل عناصر محدود را تخمین می‌زنند، اما برای تخمین سختی الاستیک مدلها، باید مقدار مبتنی بر روابط تئوری را بر ۳/۵۰ تقسیم نمود. افزایش ضریب مقاومت مصالح از ۶/۰ به ۱/۰، تأثیر محسوسی بر اتلاف انرژی نداشته، در حالی که افزایش شکل‌پذیری در حدود ۲۵٪ می‌باشد.

### ۱- مقدمه

پس از زلزله‌های نورتریج در سال ۱۹۹۴ و کوبه در سال ۱۹۹۵، به دلیل خرابی‌های غیرمنتظره اتصالات جوشی در سازه‌های فولادی، مشخص شد که اتصالات خمشی کاملاً جوشی دارای اشکالات ذاتی هستند. راه‌حل‌های متعددی برای مشکل اتصالات قاب‌های خمشی با هدف دور کردن مفاصل پلاستیک از بر ستون‌ها پیشنهاد شدند. در این میان، راه‌حل‌های دیگری مبتنی بر مفاهیم اتلاف انرژی نیز پیشنهاد شدند که در آنها نیازی به ایجاد ممان خمشی پلاستیک در تیرها نمی‌باشد. برای این منظور از سیستم‌های کنترل آسیب<sup>۱</sup> در اتصالات استفاده می‌شود که در طراحی با استفاده از این سیستم‌ها، تمرکز اصلی آسیب بر روی عناصر سازه‌ای موسوم به فیوزهای سازه‌ای است که برای تعمیر به راحتی تعویض می‌شوند و اجزای اصلی سازه

به گونه‌ای طراحی می‌شوند که الاستیک باقی مانده و یا تغییر شکل‌های غیرالاستیک ایجاد شده در آنها جزئی باشد. سیستم‌های ADAS [۱] و TADAS [۳] و میراگرهای لانه‌زنبوری<sup>۲</sup> [۴]، متداول‌ترین سیستم‌های اتلاف انرژی هستند که برای جذب انرژی ورودی لرزه‌ای و محافظت از اعضای اصلی سازه‌ای عمل می‌کنند. از دیگر سیستم‌های اتلاف انرژی می‌توان به میراگرهای اصطکاکی<sup>۳</sup> [۵] تیرهای پیوند عمودی با عملکرد برشی [۶]، سیستم‌های گهواره‌ای<sup>۴</sup> [۷ و ۸] و سیستم‌های پس‌تنیده<sup>۵</sup> مرکزگرا<sup>۹</sup> [۹] اشاره داشت.

به عنوان یک جایگزین مناسبی، اتلاف انرژی لرزه‌ای از طریق عناصر اتصالات نیمه‌صلب در طی دو دهه اخیر مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است.

2. Honeycomb dampers
3. Friction damper
4. Rocking systems
5. Self-centering post-tensioned systems

### 1. Damage-control system

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: b\_shekastehband@uut.ac.ir

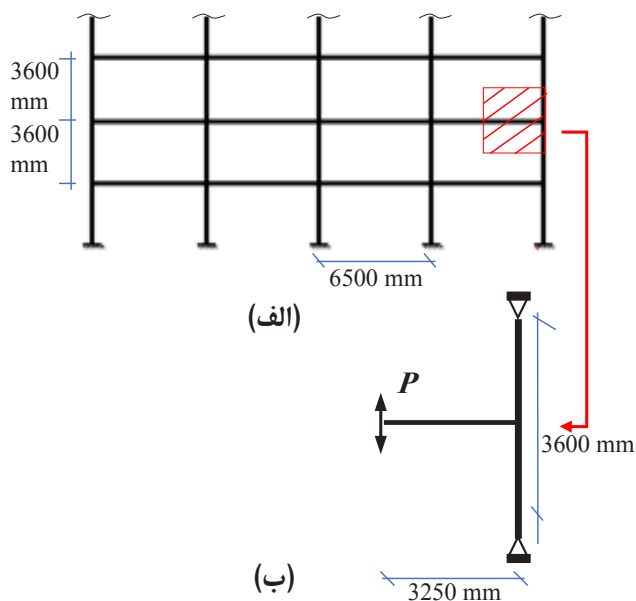


کاربرد میراگرهای شکافدار<sup>۱</sup> در این اتصالات به اوایل دهه ۲۰۰۰ میلادی بر می‌گردد. Oh و همکاران [۱۰] در بررسی رفتار لرزه‌ای اتصالات تیر به ستون مجهز به میراگرهای شکافدار، که به صورت عمودی به بال تحتانی تیر متصل بودند، سهم مناسب این سیستم‌ها را در کنترل آسیب نشان داد. این مفهوم توسط محققان دیگری مانند Köken و Koroğlu [۱۱] و Saffari و همکاران [۱۲]، مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاکی از ظرفیت بالای اتلاف انرژی این سیستم‌ها بود. گونه‌ای از این سیستم‌ها که به نام میراگر هیبریدی به عنوان ترکیبی از میراگر اصطکاکی و میراگر نوار فولادی شناخته می‌شوند، نیز ساخته شده‌اند. نتایج آزمایشگاهی در مورد رفتار چنین سیستم‌هایی را می‌توان در مطالعات Lee و همکاران [۱۳] مشاهده نمود. برخی از انواع دیگر میراگرهای شکافدار، از جمله میراگرهای جعبه‌ای شکل [۱۴]، و میراگرهای شکافدار بلوکی [۱۵] برای کاربرد به عنوان مهاربندهای زانویی یا مورب بین طبقات ساخته شده‌اند. از نظر مفهومی، یکی از مطالعات خوب در زمینه کاربرد میراگرهای شکافدار در اتصالات تیر به ستون تحت اثر بارهای لرزه‌ای، کار Bayat و Shekastehband [۱۶] است. در این مفهوم، تی‌استاب‌های مورد استفاده در اتصال تیر به ستون، دارای شیارهایی با اشکال مختلف هستند. بر اساس نتایج، هندسه شیارها نه تنها ظرفیت باربری بلکه رفتار مکانیکی مانند شکل‌پذیری و سختی را نیز تغییر داده است. بر اساس نتایج عددی و آزمایشگاهی، میراگرهای شکافدار قبل از ایجاد تسلیم کامل، دچار کمانش برشی/خمشی می‌شوند [۱۰ و ۱۶] همچنین، کرنش پلاستیکی تجمعی فراتر از کرنش گسیختگی مصالح لینک‌ها، از انتقال مناسب نیروهای لرزه‌ای به ستون‌ها جلوگیری کرده و می‌تواند پاسخ کل ساختمان را به خطر بیندازد. روش‌های پیشنهادی برای کاهش این مشکل، شامل افزایش ضخامت بال تی‌استاب‌ها و استفاده از فولاد پرمقاومت برای کاهش آسیب پلاستیک است [۱۶]. یکی از جالب‌ترین روش‌ها برای این منظور، استفاده از میراگرهای کمانش‌تاب<sup>۲</sup> (BRD) در اتصالات تیر به ستون می‌باشد. Oh و Park [۱۷] سیستم کنترل آسیب تی‌استاب با میراگر ورق فولادی کمانش‌تاب را ارائه کردند. Tagawa و همکاران [۱۸] میراگرهای میله‌ای کمانش‌تاب را، که در یک بلوک بین بال تحتانی تیر و ستون مهار شده‌اند، برای اتلاف انرژی در هنگام زلزله پیشنهاد نمودند. Peng و همکاران [۱۹] به بررسی استفاده از ورق‌های کمانش‌تاب قابل تعویض برای اتلاف انرژی در اتصالات تیر به ستون درختی پرداختند. کمانش بالقوه ورق‌ها توسط زبانه‌های برشی C شکل مهار می‌شود. ورق‌های عمودی و

1. Slit dampers
2. Buckling restrained dampers

افقی برای اتصال دادن تیرها مورد استفاده قرار می‌گیرند، که نقش عضوهای قابل تعویض اتلاف‌گر انرژی را دارند. نتایج نشان دادند که با افزایش میزان پهنای انتهای تیر، میزان مقاومت سازه افزایش پیدا کرده است. همچنین در نظر گرفتن سختی کم برای این اتصالات تأثیر بسزایی روی رفتار این اتصالات می‌گذارد و رفتار آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. Peng و همکاران [۲۰] رفتار اتصال تیر به ستون فولادی مقاوم در برابر زلزله با یک لولای مکانیکی<sup>۳</sup> و یک جفت ورق فولادی کمانش‌تاب برای کنترل آسیب لرزه‌ای سازه‌های فولادی را مورد بررسی قرار دادند. لولای مکانیکی برای تحمل نیروی برشی و ورق‌های فولادی کمانش‌تاب که به بال‌های تیر با پیچ متصل می‌شوند برای انتقال ممان خمشی مورد استفاده قرار می‌گیرند. اتلاف انرژی اتصال از طریق تغییرشکل محوری غیرالاستیک ورق‌های فولادی تامین می‌شود. Munkhunur و همکاران [۲۱] از مهاربندهای زانویی کمانش‌تاب برای پخش پلاستیسیته در انتهای تیر اتصالات خمشی صلب استفاده نمودند. پیکربندی مهاربند زانویی باریک مورد استفاده متشکل از یک میله هسته فولادی و لوله مهار کننده کمانش می‌باشد. از مزایای لوله‌های مهارکننده کمانش می‌توان به اجرای نسبتاً ساده برای سهولت ساخت و کاهش وزن در مقایسه با مهارکننده‌های کمانش‌تاب مهار شده در ملات اشاره کرد. شایان ذکر است که در سال‌های اخیر میراگرهای کمانش‌تاب دیگری نظیر میراگرهای هیبریدی [۲۲] و میراگرهای ترکیبی اصطکاکی [۲۳] توسعه داده شده‌اند که البته ضمن داشتن پیچیدگی‌های اجرایی، بیشتر مناسب مهاربندها هستند.

با وجود تحقیقاتی که در مورد میراگرها در اتصالات تیر به ستون انجام شده است، مطالعات در مورد طراحی و عملکرد میراگرهای کمانش‌تاب اتصال تیر به ستون کافی نیست. نوآوری اصلی این تحقیق در تحلیل مقایسه‌ای دو پیکربندی هندسی متمایز از میراگرهای کمانش‌تاب، به‌ویژه میراگر لوله در لوله (JTDD) و ورق قوسی مهار شده در زیر ورق (JAPD) که به‌طور خاص بر روی اتصالات تیر به ستون اعمال می‌شوند، نهفته است. پژوهش حاضر درک جامعی از چگونگی تأثیر این اشکال نوآورانه بر رفتار هیستریزس، اتلاف انرژی و عملکرد کلی اتصال تحت شرایط بارگذاری زلزله ارائه می‌دهد. پیکربندی‌های لوله در لوله و ورق قوسی مزایای مکانیکی منحصر به فردی را ارائه می‌دهند که در زمینه میراگرهای کمانش‌تاب به‌طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار نگرفته‌اند. این تحقیق با مقایسه نظام‌مند این دو طراحی، خلأ موجود در ادبیات علمی را پر کرده و به دانش بنیادی لازم برای



شکل ۱. (الف) یک سازه قابی نمونه؛ (ب) - زیرسازه مورد استفاده برای بارگذاری چرخه‌ای لرزه‌ای.

Fig. 1. (a) A representative frame structure; (b) The substructure utilized for cyclic seismic loading

دهنده مورد استفاده متفاوت هستند. انتظار می‌رود که میراگرهای پیشنهادی برخی از عیوب سایر میراگرها نظیر میراگر ورق فولادی کماتش‌تاب از جمله، آسیب‌پذیری ناشی از تمرکز تنش، خستگی مصالح، ظرفیت محدود اتلاف انرژی و قیود طراحی را نداشته باشند. شایان ذکر است که میراگرهای ورق فولادی به صورت  $I$  شکل بوده و همین موضوع، پتانسیل آسیب ناشی از تمرکز تنش و خستگی مصالح را در آنها افزایش می‌دهد. از سوی دیگر دارای محدودیت اتلاف انرژی هستند.

در مدل JTDD، یک انتهای میراگر به یک ورق فلنچی جوش داده شده که خود ورق فلنچی با پیچ و مهره به بال ستون متصل می‌شود و انتهای دیگر میراگر به وسیله یک ورق تقویت شده با لچکی به تیر متصل می‌گردد. در مدل JAPD، یک سوراخ بیضی شکل در وسط ورق میراگر ایجاد شده و دو قسمت قوسی در طرفین آن به وجود آمده است. اتصال ورق این مدل‌ها بر اساس آیین‌نامه AISC 341-22 [۲۴] طراحی شده‌اند. از آنجایی که تیر و ستون الاستیک باقی می‌مانند، مسیر بار تأمین شده توسط تمام اجزای اتصال‌دهنده‌ها به جز میراگرها باید الاستیک باقی بماند تا از ایجاد مکانیزم پلاستیک در میراگرها اطمینان حاصل شود. برای ستون و تیر به ترتیب از مقاطع  $H-400 \times 400 \times 13 \times 21$  و  $H-500 \times 200 \times 10 \times 18$  میلی‌متر،

بهینه‌سازی کاربردهای BRD کمک می‌کند. کاربرد این نوع میراگر به‌ویژه در اتصالات تیر به ستون نوآورانه است، چرا که بیشتر تحقیقات موجود عمدتاً بر روی کاربرد میراگرها در مهاربندها متمرکز شده‌اند. رویکرد هدفمند حاضر امکان درک بهتری از چگونگی ادغام مؤثر این میراگر در اتصالات اجزای اصلی سازه‌ای را فراهم می‌آورد. از سوی دیگر، میراگرهای پیشنهادی مزایای عملی در زمینه نصب و نگهداری نسبت به برخی سیستم‌های کماتش‌تاب نظیر سیستم‌های کماتش‌تاب هیبریدی که اغلب شامل اجزای پیچیده و اتصالات متنوع هستند، ارائه می‌دهد. ساده‌سازی فرآیند مونتاژ می‌تواند منجر به کاهش زمان و هزینه‌های ساخت شود. در این مقاله، برای ایجاد اطمینان بیشتر از کاربرد BRD ها در اتصالات تیر به ستون، یک مطالعه مقایسه‌ای از تأثیر شکل و ابعاد هندسی این میراگرها و همچنین خصوصیات مکانیکی آنها بر روی رفتار اتصالات تیر به ستون با BRD ها انجام می‌شود. بنابراین، اهداف اصلی تحقیق به شرح زیر می‌باشد:

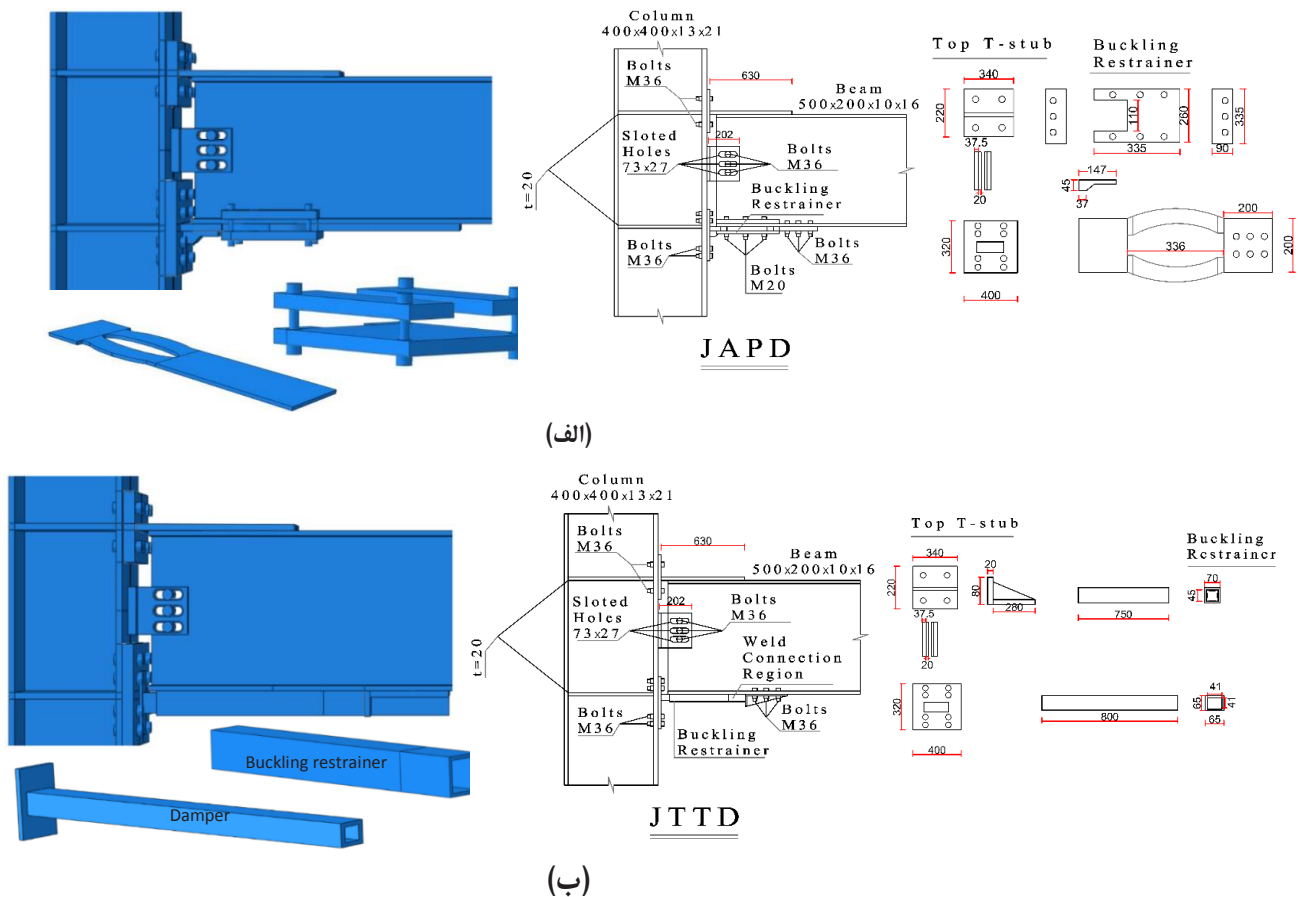
- پتانسیل استفاده از BRD ها در اتصالات قاب خمشی ویژه به عنوان منبع اصلی اتلاف انرژی و با هدف تأمین الزامات AISC 341-22 [۲۴];

- بررسی تأثیر پارامترهای مهم شامل ضریب مقاومت فولاد مورد استفاده در میراگر نسبت به تیر و مساحت سطح مقطع میراگرها برای تعیین تأثیر هر یک از این متغیرها در عملکرد سازه‌ای اتصالات تیر به ستون و انتخاب بهینه‌ترین آنها مؤثر بر رفتار سازه.

## ۲- روش مطالعه

### ۲-۱- مدل‌های مورد مطالعه

برای بررسی رفتار اتصال تیر به ستون فولادی با BRD های مختلف در طول زلزله، زیرسازه تیر-ستون مطابق شکل ۱ (ب) که از یک سازه قاب فولادی نمونه در شکل ۱ (الف) بیرون کشیده شده است، در نظر گرفته می‌شود. همان‌گونه که در مقدمه اشاره گردید، مدل‌های در نظر گرفته شده را می‌توان به دو گروه از اتصالات دسته بندی کرد که عبارتند از: اتصال با میراگر ورق قوسی مهار شده در زیر ورق (JAPD) و اتصال با میراگر لوله در لوله (JTDD). جزئیات اتصالات در شکل ۲ نشان داده شده است. مطابق شکل، برای هر مدل، تیر با استفاده از یک اتصال دهنده تی‌استاب به ستون در بال فوقانی متصل می‌شود و به یک اتصال‌دهنده BRD بین بال تحتانی تیر و بال ستون مجهز شده است. برای تأمین مقاومت برشی مناسب اتصالات، در مدل‌ها از ورق برشی استفاده شده و مدل‌ها در نوع اتصال



شکل ۲. اتصالات تیر به ستون با میراگرهای کمانش تاب: الف- JAPD؛ ب- JTDD.

Fig. 2. Beam-to-column connections with buckling-restrained dampers: (a) JAPD; (b) JTDD

مسئله کلیدی است. میراگر باید به گونه ای طراحی شود که مکانیزم خرابی قاب از طریق ایجاد یک لولای پلاستیکی در وسط میراگر محقق شود. برای این منظور لازم است نسبت بهینه مقاومت میراگر به تیر بدست آید که مقاومت مورد نیاز را برآورده کرده و در عین حال، تیر و ستون را در محدوده الاستیک نگه دارد. مقاومت تسلیم میراگر، مقاومت تسلیم اتصال و حداکثر مقاومت اتصال را می توان به ترتیب با معادلات (۱)، (۲) و (۳) بیان داشت [۱۷]:

$$P_y^d = F_y^d A^d = \alpha \left( \frac{M_y^b}{h} \right) \quad (1)$$

$$M_y^j = F_y^d A^d h = \alpha M_y^b \quad (2)$$

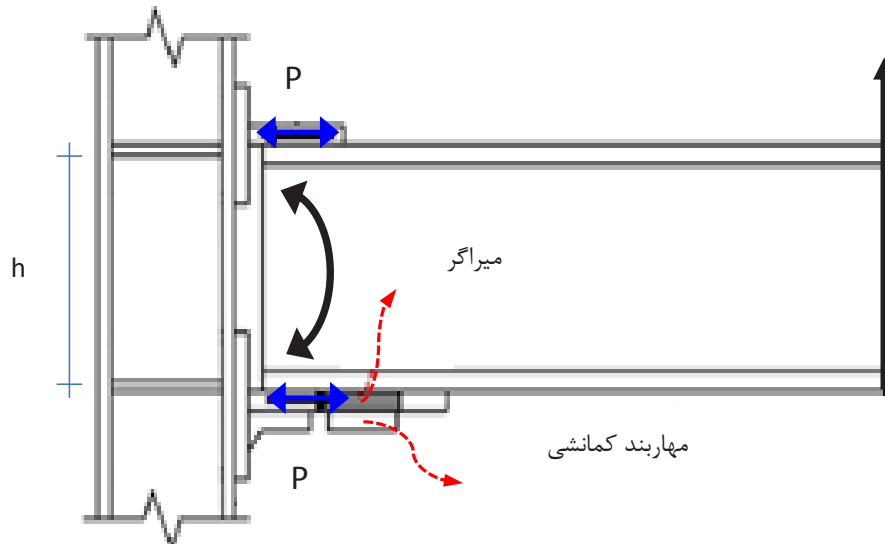
استفاده شده است. این تیر و ستون الزامات آیین نامه ۳۴۱-۲۲ AISC [۲۴] از جمله الزام تیر ضعیف- ستون قوی را تأمین می کنند. فاصله بین مرکز ستون تا نقطه بارگذاری در روی تیر،  $l_b = 3250 \text{ mm}$  و ارتفاع ستون،  $H_c = 3600 \text{ mm}$  است. در مدل JAPD، یک ورق نقش کمانش گیر<sup>۱</sup> را دارد که در زیر ورق قوسی قرار می گیرد؛ حال آنکه در مدل JTDD، یک لوله بر روی میراگر لوله ای قرار گرفته و مانع کمانش می گردد.

## ۲-۲- روابط تئوری

مطابق شکل ۳، ممان خمشی ایجاد شده در انتهای تیر منجر به نیروهای محوری فشاری و کششی می شود که بر روی بال های فوقانی و تحتانی تیر اعمال می شود. میراگر به کار رفته در امتداد بال تحتانی تیر در برابر نیروهای فشاری و کششی مقاومت می کند. بنابراین، طراحی سطح مقطع میراگر یک

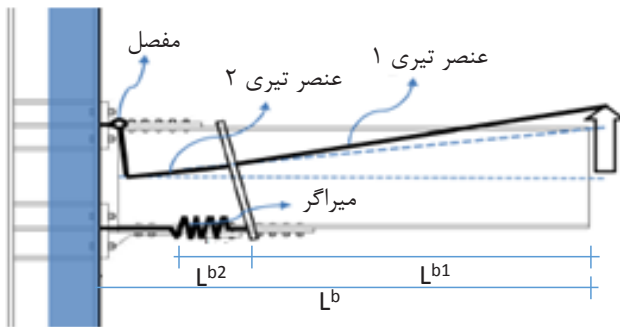
### 1. Buckling-restrainer





شکل ۳. اتصال تیر به ستون با تی‌استاب و میراگر کمانش تاب.

Fig. 3. Beam-to-column connection with a T-stub and buckling-restrained damper



شکل ۴. سختی اتصال تیر به ستون با تی‌استاب و میراگر کمانش تاب به صورت مجموعه سری از سه جزء.

Fig. 4. The stiffness of the beam-to-column connection with a T-stub and a buckling-restrained damper represented as a series assembly of three components

$$M_{\max}^j = \min \left( F_u^d A^d h, \frac{L}{L_2} M_p^b \right) \quad (3)$$

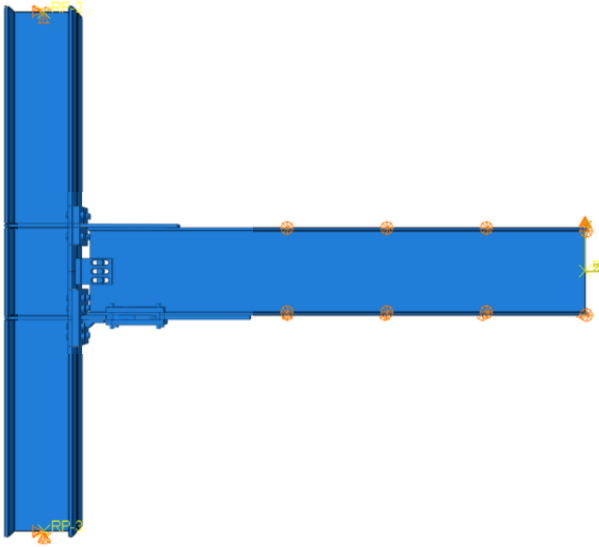
که در آن،  $\alpha$  نسبت مقاومت طراحی هدف میراگر به تیر می‌باشد.  $F_y^d$  و  $A^d$ ، به ترتیب مقاومت تسلیم و مقاومت نهایی میراگر می‌باشد. سطح مقطع میراگر و  $M_p^b$  و  $M_y^j$ ، به ترتیب ممان تسلیم اتصال و ممان پلاستیک تیر می‌باشد. حداکثر مقدار  $\alpha$  که منجر به ایجاد لولای پلاستیک در میراگر بدون تسلیم تیر می‌شود، از رابطه (۴) به دست می‌آید [۲۵]:

$$\alpha_{\max} = \left( \frac{M_p^b}{M_y^j} \right) \left( \frac{F_y^d}{F_u^d} \right) \quad (4)$$

ابعاد مقطع میراگرهای مورد مطالعه بر مبنای رابطه (۳) تعیین گردیدند. همان‌طوری که در شکل ۴ نشان داده شده است، سختی الاستیک اتصال به صورت یک مجموعه سری از سختی الاستیک سه جزء، یعنی عنصر تیری ۱ با طول  $L^{b1}$ ، که از نقطه بارگذاری تیر تا نقطه شروع میراگر می‌باشد، بال فوقانی تیر با طول موثر  $L^{b2}$  و اتصال متشکل از تی‌استاب فوقانی و میراگر توصیف می‌شود [۱۷]:

$$K^{(-1)} = (K^{b1})^{(-1)} + (K^{b2})^{(-1)} + (K^c)^{(-1)} \quad (5)$$

ممان اینرسی تیر ( $I^{b1}$ ) و سطح مقطع جان تیر ( $A^w$ )، به ترتیب در صلبیت خمشی و صلبیت برشی عنصر ۱ مشارکت دارند. صلبیت خمشی و صلبیت برشی عنصر ۲، به ترتیب توسط ممان اینرسی بال فوقانی ( $I^{b2}$ ) و



شکل ۶. اعمال شرایط تکیه‌گاهی مفصلی بر دو انتهای ستون از طریق رفرنس پوینت‌ها، اعمال بارگذاری چرخه‌ای بر رفرنس پوینت در انتهای تیر و اعمال قید جانبی بر بال‌های فوقانی و تحتانی تیر برای ممانعت از کمانش پیچشی-جانبی.

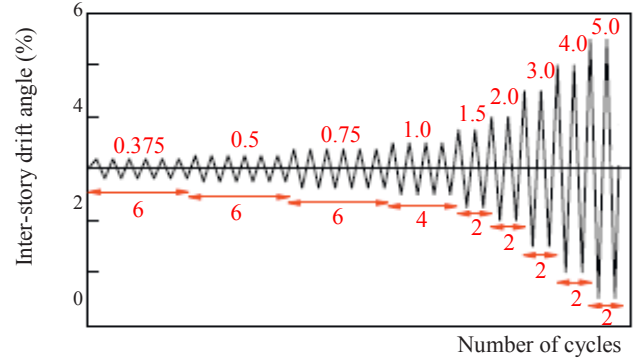
Fig. 6. Application of pinned support conditions at both ends of the column via reference points, implementation of cyclic loading at the reference point at the end of the beam, and application of lateral constraints on the upper and lower flanges of the beam to prevent lateral-torsional buckling

### ۲-۳- مدل‌سازی عناصر محدود و صحت‌سنجی

برای انجام تحلیل عناصر محدود از نرم‌افزار Abaqus/Standard 6.14 [۲۶] استفاده می‌شود. بارگذاری کنترل شده تغییرمکانی (شکل ۵) مطابق با پروتکل بارگذاری SAC [۲۴]، به نقطه مرجع در انتهای تیر، که با سطح بارگذاری انتهای تیر کوپل شده است، اعمال می‌شود. شرایط مرزی تغییرمکانی شامل تکیه‌گاه مفصلی در هر دو انتهای ستون ( $U1 = U2 = 0$ ) می‌باشد. برای جلوگیری از هرگونه ناپایداری غیرمنتظره و کمانش پیچشی-جانبی، بال فوقانی و تحتانی تیر به طور جانبی مهار شده است (شکل ۶).

برای مدل‌سازی تمام اجزاء از عناصر جامد پیوسته هشت گرهی سه‌بعدی با انتگرال‌گیری کاهش یافته، C3D8R، استفاده شده است (شکل ۷). اندرکنش بین اجزای جوش شده با استفاده از دستور "tie" مدل‌سازی شده و اندازه شبکه عناصر محدود بر مبنای تحلیل حساسیت انتخاب شده است.

#### 1. Reduced integration



شکل ۵. پروتکل بارگذاری چرخه‌ای اعمال شده بر میراگرهای مورد بررسی در این مقاله [۲۴].

Fig. 5. The cyclic loading protocol applied to the dampers examined in this study [24].

نصف سطح مقطع جان ( $A^w/2$ ) تأمین می‌شوند. صلبیت اتصال به صورت همبسته‌ای از سختی خارج از صفحه بال تی استاب ( $K^{ts}$ ) و سختی محوری میراگر ( $K^d$ ) در نظر گرفته می‌شود. صلبیت اجزا از طریق روابط (۶) تا (۸) تعیین می‌شود [۱۷]:

$$(K^{b1})^{(-1)} = \frac{(L^{b1})^3}{3E^b I^{b1}} + \frac{L^{b1}}{A^w G^b} \quad (6)$$

$$(K^{b2})^{(-1)} = L^{b2} \frac{(L^{b1})^2 + L^{b1} L^{b2} + (L^{b2})^2}{3E^b I^{b2}} + \frac{2L^{b2}}{A^w G^b} \quad (7)$$

$$(K^c)^{(-1)} = \left( \frac{L^t}{192E^t I^t} + \frac{L^d}{E^d A^d} \right) \left( \frac{h}{L^b} \right)^2 \quad (8)$$

که در آن،  $E^b$ ،  $E^t$  و  $E^d$  به ترتیب مدول الاستیسیته تیر، تی‌استاب و میراگر می‌باشد و  $G^b$  مدول برشی تیر،  $A^w$  سطح مقطع جان تیر،  $I^{b1}$  ممان اینرسی مقطع تیر،  $I^{b2}$  ممان اینرسی بال فوقانی تیر،  $I^t$  ممان اینرسی تی‌استاب در اتصال دهنده فوقانی در راستای خارج از صفحه و  $E^d A^d/L^d$  سختی محوری میراگر است.

است. این اندرکنش تماسی در جهت نرمال به صورت "تماس سخت" و در جهت مماسی، تماس اصطکاکی بین زوج‌های تماس با ضریب اصطکاک  $\mu = 0.3$  تعریف شده است [۲۷]. با توجه به عدم گسیختگی پیچ‌ها در طی تحلیل عناصر محدود، برای شبیه‌سازی اتصالات اجزای اتصال میراگر به تیر از اندرکنش "tie" استفاده شده است.

خصوصیات مصالح اجزای مدل‌ها در جدول ۱ داده شده است. پیچ‌های مورد استفاده دارای تنش تسلیم ۸۰۰ MPa و تنش نهایی ۱۰۰۰ MPa هستند. مقدار نیروی پیش‌تنیدگی اعمال شده به این پیچ‌ها برابر ۵۶۰ kN است. مشخصات مکانیکی تی‌استاپ‌ها و کمانش‌گیرها همانند تیر فرض می‌گردد. برای رفتار غیرخطی مصالح، قانون مشخصه الاستوپلاستیک بر مبنای معیار تسلیم von Mises و قاعده جریان Prandtl-Reuss اتخاذ گردیده است. برای بیان رفتار سخت‌شدگی، از سخت‌شدگی ترکیبی، که هر دو سخت‌شدگی ایزوتروپیک و سینماتیک را در نظر می‌گیرد، استفاده شده است. بر اساس معیار تسلیم von Mises، با فرض سخت‌شدگی ترکیبی، تنش تسلیم به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۸].

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2}(S_{ij} - \alpha_{ij})(S_{ij} - \alpha_{ij})} \quad (9)$$

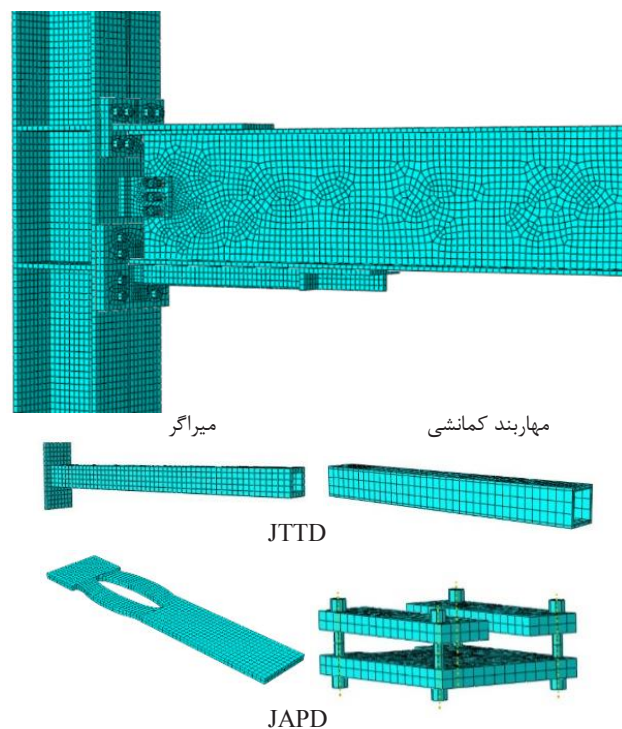
که در آن،  $S_{ij}$  تنش‌های انحراف‌دار و  $\alpha_{ij}$  مولفه‌های تنش برگشت می‌باشد که موقعیت سطح تسلیم را توصیف می‌نمایند. تنش تسلیم  $\bar{\sigma}$  تابعی از کرنش پلاستیک موثر  $\bar{e}^P$  (PEEQ) است که سخت‌شدگی مصالح را تعریف می‌کند:

$$\bar{e}^P = \int \sqrt{\frac{2}{3}} de^P \quad (10)$$

که در آن،  $de^P$  نمو کرنش پلاستیک است.

برای صحت‌سنجی مدل‌سازی عناصر محدود، از تحلیل آزمایش‌های بارگذاری چرخه‌ای بر روی اتصالات تیر به ستون با میراگرهای شکاف‌دار از نوع تی‌استاب، استفاده شده است. برای این منظور، دو نمونه آزمایشگاهی (4NR و 6R1) از کارهای تجربی Park و Oh [۲۵] مدل‌سازی شده و نتایج تحلیل عناصر محدود با نتایج آزمایشگاهی مقایسه

5. Hard contact



شکل ۷. مش‌بندی مدل‌های اتصال تیر به ستون با میراگرهای کمانش‌تاب.

Fig. 7. Meshing of beam-to-column connection models with buckling-restrained dampers

برای دستیابی به توازن بین دقت و کارایی محاسباتی، از شبکه ظریف‌تر<sup>۱</sup> با اندازه تقریبی ۱۵mm در میراگرها و بولت‌ها که مستعد کمانش موضعی و لولاهای پلاستیک می‌باشند، استفاده شده و برای سایر اجزا از شبکه عناصر محدود نسبتاً درشت با اندازه تقریبی ۲۵mm استفاده شده است. برای بهبود تخمین کرنش‌های پلاستیک و همچنین پاسخ کلی مدل‌ها، در راستای ضخامت اجزا از حداقل تعداد دو عنصر محدود استفاده شده است. برای اجزای در تماس<sup>۲</sup>، اجزای با شبکه عناصر محدود درشت به عنوان سطح اصلی<sup>۳</sup> و اجزای با شبکه عناصر نظریف شده به عنوان سطح پیرو<sup>۴</sup> در نظر گرفته شده‌اند.

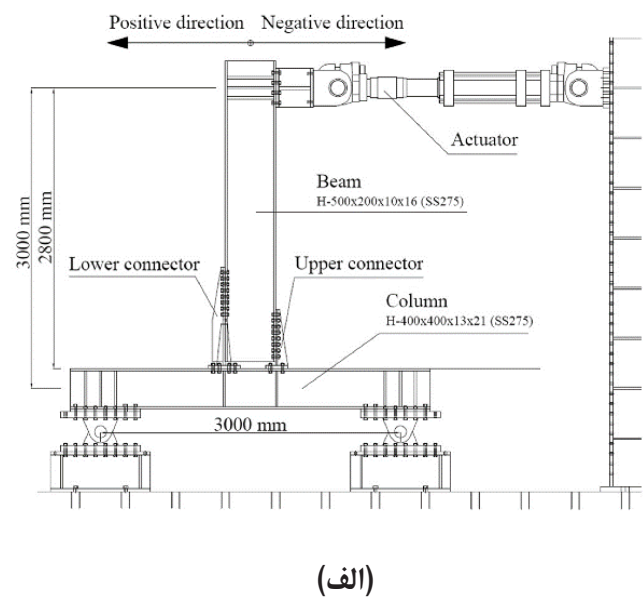
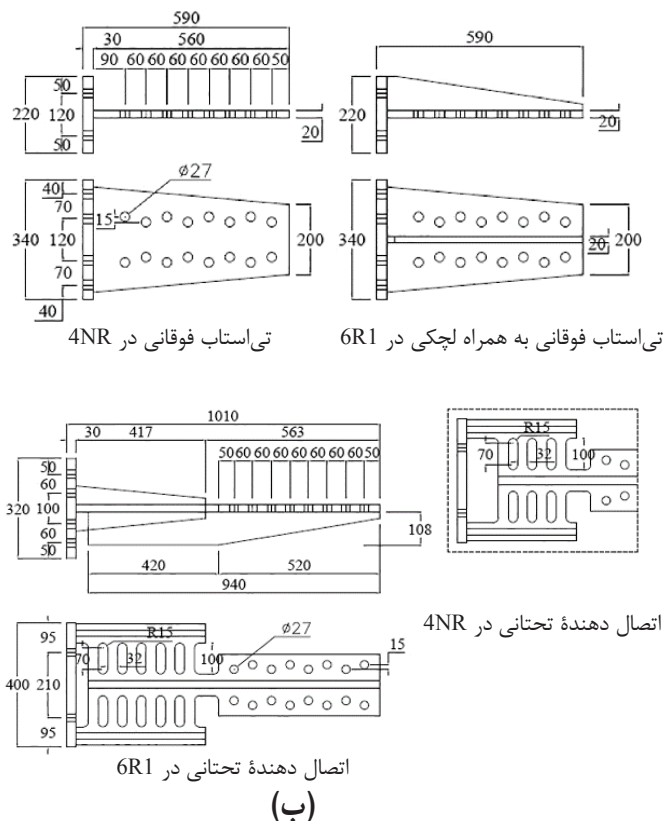
برای تمام سطوح تماس بین اتصال دهنده و ستون/تیر، بین بولت‌ها و عناصر متصل، بین میراگر و مهار کننده کمانش و بین ساقه پیچ/کله پیچ/مه‌ره و صفحات تماس از اندرکنش تماسی سطح به سطح استفاده شده

1. Finer mesh
2. Contact
3. Master surface
4. Slave surface

جدول ۱. مشخصات مکانیکی فولاد مصرفی [۲۵].

Table 1. Mechanical properties of the steel used [25]

| اجزای مدل‌ها | مدول یانگ<br>(GPa) | تنش تسلیم $\sigma_y$<br>(MPa) | تنش نهایی $\sigma_u$<br>(MPa) | کرنش گسیختگی<br>(%) |
|--------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| تیر          | ۲۰۶/۸۹             | ۲۵۸/۰۳                        | ۴۴۰/۰۵                        | ۳۰/۶                |
| ستون         | ۲۱۴/۰۲             | ۳۱۳/۹                         | ۴۵۸/۸۹                        | ۲۹/۳                |



شکل ۸. الف- Setup آزمایشگاهی؛ ب- جزئیات تی‌استاب‌های فوقانی و تحتانی [۲۵].

Fig. 8. (a) Test setup; (b) Details of the upper and lower T-stubs

به ترتیب دارای مقطع  $H-500 \times 200 \times 10 \times 16$  به طول 2800 mm و مقطع  $H-400 \times 400 \times 13 \times 21$  به طول 3000 mm هستند. جزئیات تی‌استاب‌های فوقانی و تحتانی در شکل ۸ (ب) نشان داده شده است. خواص مصالح اجزای مختلف مطابق جدول ۱ و بارگذاری کنترل شده تغییرمکانی مطابق شکل ۵ می‌باشد. شبکه عناصر محدود یکی از نمونه‌ها در شکل ۹ نشان داده شده است.

گردیده است. ابعاد، پروتکل بارگذاری و مشخصه‌های مصالح مدل‌های عناصر محدود با مدل‌های آزمایشگاهی یکسان می‌باشد. مطابق شکل ۸ (الف)، اتصالات تیر به ستون با میراگر در مدل‌های 4NR و 6R1 با استفاده از دو تی‌استاب در بالا و پایین تیر محقق شده است. بر روی تی‌استاب تحتانی، میراگر شکاف‌دار افقی تعبیه شده و کمانش خارج از صفحه آن توسط ورق لچکی قائم مهار شده است. تیر و ستون این مدل‌ها،

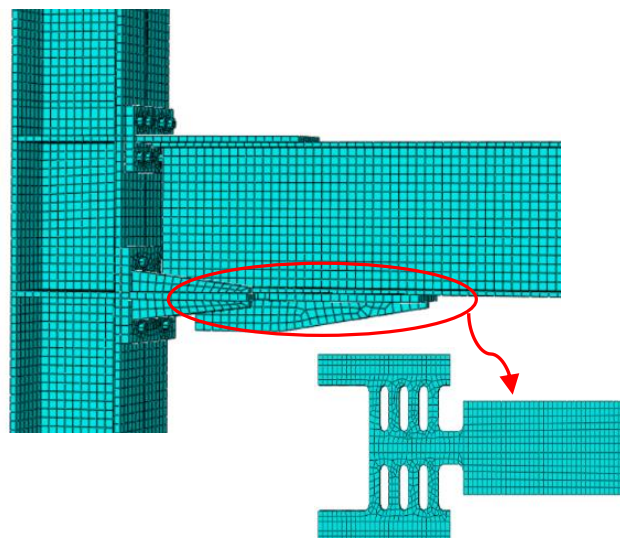
684.41 به دست آمده است. مقادیر متناظر آزمایشگاهی 461.78 kN.m و 706.69 kN.m در جهت مثبت و 443.69 kN.m و 704.67 kN.m در جهت منفی است. میانگین درصد قدرمطلق خطا بین مقادیر ماکزیمم برای مدل‌های 4NR و 6R1 به ترتیب برابر ۷٪ و ۳/۶۵٪ است. با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰، یک تطابق بسیار خوب بین نتایج عددی و آزمایشگاهی وجود دارد. بنابراین، مدل عناصر محدود به اندازه کافی قابل اعتماد بوده و می‌تواند در شبیه‌سازی عددی مدل‌های اتصال تحت اثر بارگذاری لرزه‌ای در این مطالعه مورد استفاده قرار گیرد.

### ۳- تحلیل‌های انجام یافته

در تحلیل‌های انجام یافته، نسبت‌های مختلف ضریب مقاومت میراگر به تیر،  $\alpha = 0.6, 0.8, 1.0, 1.2$  و نسبت‌های مختلف افزایش سطح مقطع میراگر  $\beta = 1.0, 1.4$  در نظر گرفته می‌شوند.

#### ۳-۱- منحنی‌های هیستریزیس و تغییر شکل مدل‌ها

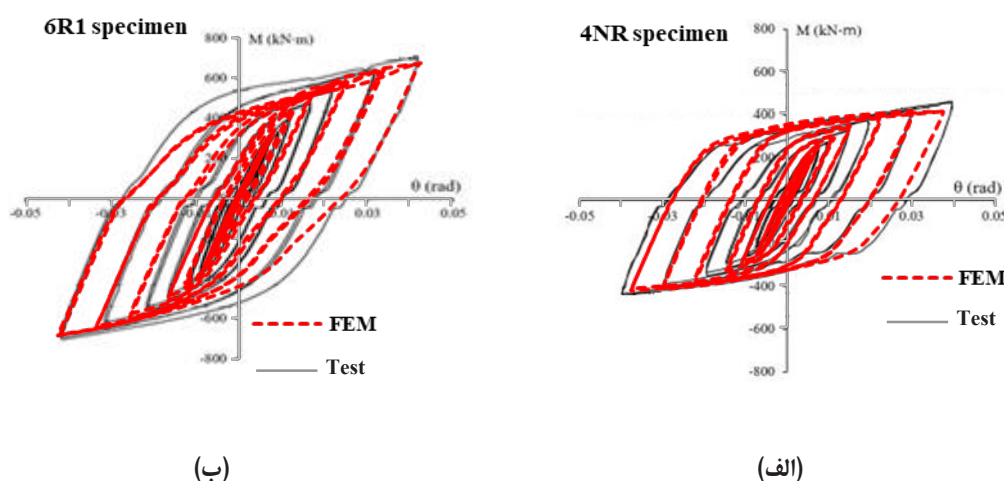
منحنی‌های هیستریزیس ممان-دوران (M- $\theta$ ) برای مدل‌های اتصالات BRD تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای تا دوران ۰/۰۴ رادیان و با فرض مشخصات مکانیکی میراگرها همانند تیر ( $\alpha = 1.0$ ) و سطح مقطع 2500mm<sup>2</sup> برای میراگرها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. ممان خمشی از حاصل ضرب نیروی برشی در انتهای تیر در طول نقطه بارگذاری نسبت به نقطه مرکزی ستون محاسبه می‌شود. دوران به صورت نسبت تغییر مکان انتهایی تیر بر طول



شکل ۹. مش‌بندی مدل صحت‌سنجی شده 4NR.

Fig. 9. Meshing of the validated 4NR model

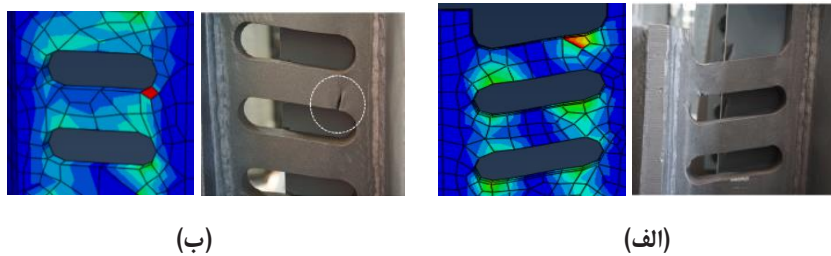
در شکل ۱۰، مقایسه‌ای از منحنی‌های پاسخ هیستریزیس ممان-دوران مدل‌های عددی و آزمایشگاهی نشان داده شده است. شکل ۱۱، مقایسه پیکربندی‌های تغییر شکل یافته مدل‌های عددی با مدل‌های آزمایشگاهی را در حالت نهایی نشان می‌دهد. در تحلیل عناصر محدود برای مدل‌های 4NR و 6R1، در جهت مثبت، به ترتیب مقادیر 412.47 kN.m و 428.68 kN.m و در جهت منفی، به ترتیب مقادیر 428.68 kN.m و 412.47 kN.m



شکل ۱۰. مقایسه منحنی‌های هیستریزیس مدل عددی و مدل آزمایشگاهی: الف) 4NR؛ ب) 6R1.

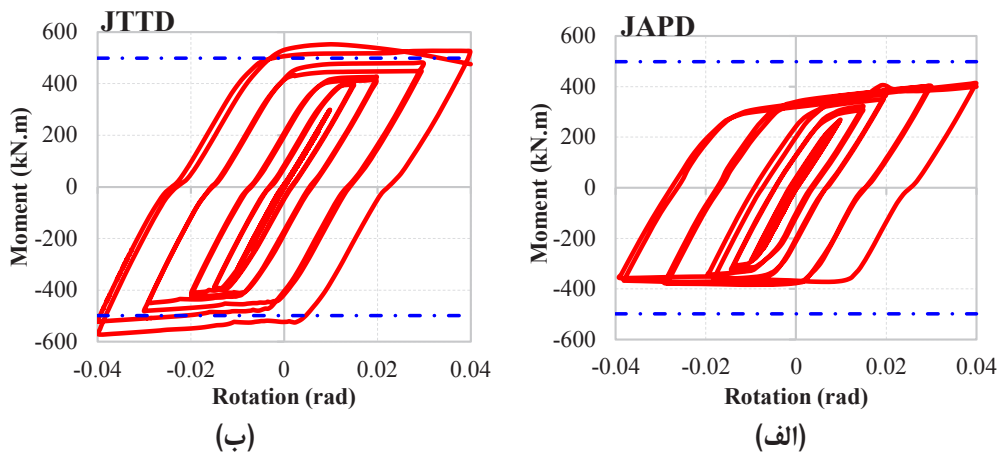
Fig. 10. Comparison of hysteresis curves between the numerical model and the experimental model: (a) 4NR; (b) 6R1





شکل ۱۱. مقایسه پیکربندی‌های تغییرشکل یافته مدل عددی و مدل آزمایشگاهی: الف 4NR؛ ب- 6R1.

Fig. 11. Comparison of the deformed configurations of the numerical model and the experimental model: (a) 4NR; (b) 6R1



شکل ۱۲. منحنی‌های هیستریزیس مدل‌های اتصال مورد مطالعه: الف- JAPD؛ ب- JTDD.

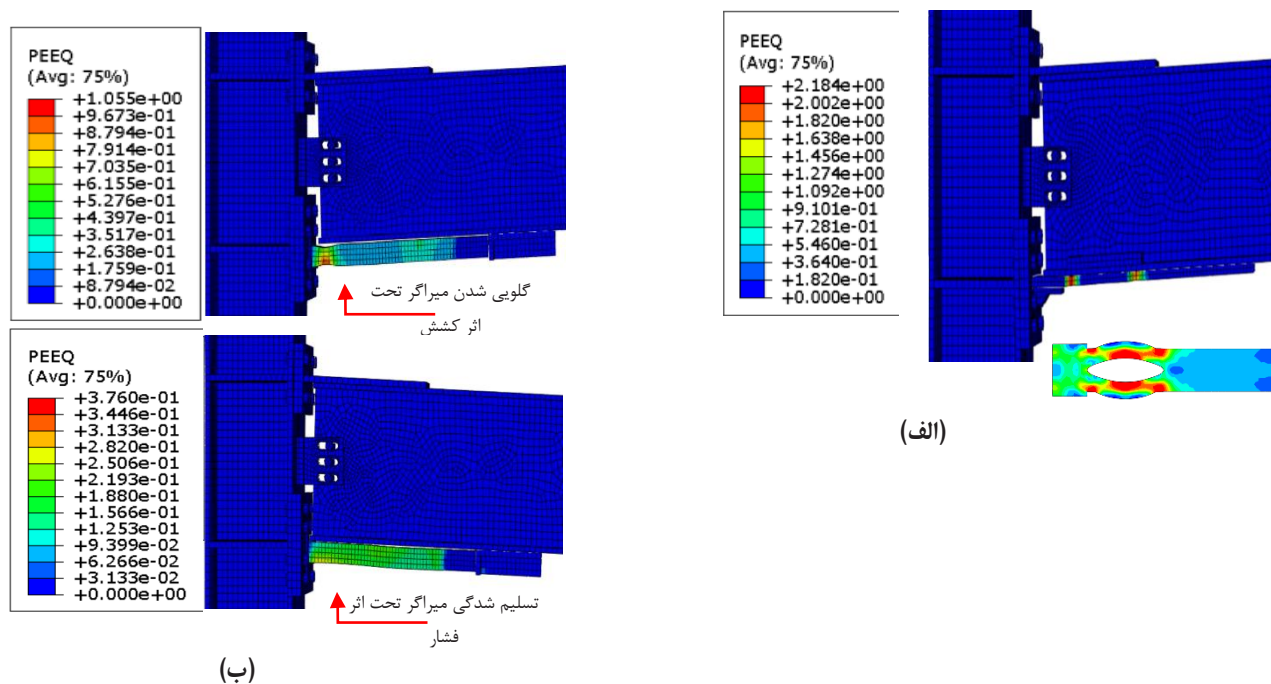
Fig. 12. Hysteretic curves of the studied connection models: (a) JAPD; (b) JTDD.

مهارکننده میراگر، کمانش خارج از صفحه را مقید کرده است، اما به دلیل کمانش درون صفحه‌ای میراگر در دورانی بیش از  $0.3^\circ$  رادیان، در نیم‌چرخه فشاری، منحنی هیستریزیس زوال مقاومت را به نمایش می‌گذارد (شکل ۱۳ ب)).

در مدل JAPD، به دلیل تغییرشکل‌های غیرالاستیک در غیاب مهارکننده‌های کمانش درون صفحه‌ای (شکل ۱۳ الف))، پاسخ چرخه‌ای با حلقه‌های هیستریزیس چاق‌تر که تحت اثر نیروی فشاری مقاومت کمتری دارند، مشخص می‌شوند. در هر کدام از این مدل‌ها، در اجزای اصلی (تیر و ستون)، تغییرشکل پلاستیک ایجاد نشده است ( $PEEQ = 0$ ) و در تی‌استاب‌ها، عمل اهرمی<sup>۱</sup> اتفاق نیفتاده است (شکل ۱۳ الف) و (ب)). همان‌طوری که در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود، مدل اتصال JAPD

تیر تعریف می‌شود. رویکرد کنونی، اطمینان از عملکرد رضایت‌بخش چنین اتصالات مقاوم خمشی برای استفاده در قاب‌های خمشی ویژه (SMF) به ازای مقررات لرزه‌ای AISC 341-22 [۲۴] است که به ازای آن، اتصال باید بتواند  $0.8M_p$  تیر متصل را در دوران  $0.4^\circ$  رادیان بدون اینکه متحمل زوال مقاومت شود، از خود نشان دهد. در این مطالعه،  $0.8M_p = 498 \text{ kN}$  است. منحنی‌های هیستریزیس مدل‌ها تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای پایدار بوده و به شکل متوازی‌الاضلاع است. بر خلاف منحنی هیستریزیس مدل JTDD، که تحت اثر بارگذاری تغییرمکانی مثبت و منفی، حالت تقارن دارد، منحنی هیستریزیس مدل JAPD متقارن نبوده و حلقه‌ها در راستای مثبت دارای مقاومت بیشتری هستند. در مدل JTDD، مهارکننده میراگر باعث می‌شود که میراگر در هر دو راستای کششی و فشاری بدون کمانش دچار تسلیم شود (شکل ۱۳ الف))؛ حال آنکه در مدل JAPD، علی‌رغم اینکه

1. Prying action



شکل ۱۳. پیکربندی‌های تغییرشکل یافته مدل‌های اتصال مورد مطالعه به همراه کرنش‌های پلاستیک PEEQ: الف- JAPD؛ ب- JTDD.

Fig. 13. Deformed configurations of the studied connection models along with plastic strains (PEEQ): (a) JAPD; (b) JTDD.

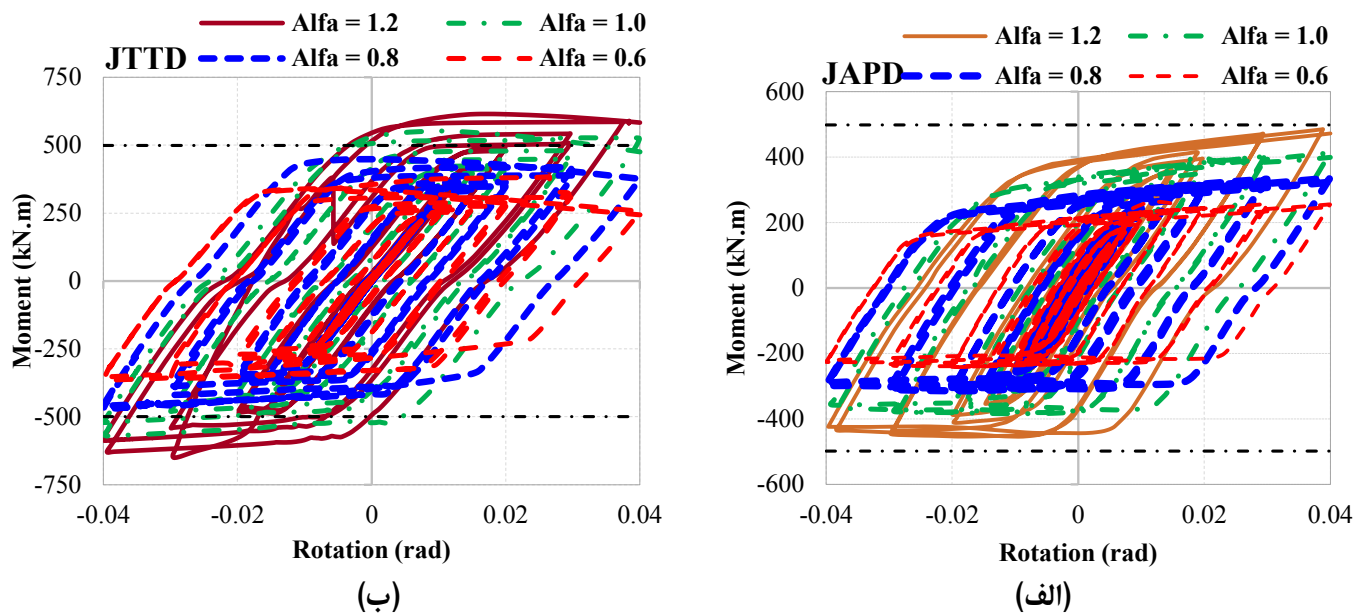
برعکس مدل اتصال JTDD، الزامات AISC 341-22 را برای استفاده در قاب‌های خمشی ویژه را تأمین نمی‌کند. در چرخه آخر بارگذاری مدل اتصال JTDD (دوران ۰/۰۴ رادیان)، اندکی افت مقاومت مشاهده می‌شود. در مدل JTDD، زوال مقاومت در راستای مثبت به دلیل گلوبی شدن لوله تحت اثر کشش در دررفت‌های بالا می‌باشد (شکل ۱۲ ب)).

در شکل‌های ۱۴ و ۱۵، مقایسه‌ای از منحنی‌های هیستریزیس ممان-دوران مدل‌های اتصال JAPD و JTDD، به ترتیب به ازای  $\alpha$ های مختلف و  $\beta$ های مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل‌های ۱۳ (الف) و (ب)، با افزایش مقدار  $\alpha$ ، مقدار مقاومت افزایش یافته؛ اما مقدار شیب حلقه‌های هیستریزیس تغییر نمی‌کند. به همین دلیل، با افزایش مقدار  $\alpha$ ، منحنی‌های هیستریزیس نسبتاً لاغرتر می‌شوند. علی‌رغم افزایش مقاومت مدل JAPD ناشی از افزایش  $\alpha$ ، این مدل به ازای  $\alpha = 1.2$  نیز، الزامات AISC 341-22 را برای استفاده در SMF‌ها تأمین نمی‌کند. مطابق شکل، در مدل JAPD، به ازای تغییرات  $\alpha$  زوال مقاومت اتفاق نمی‌افتد. حال آنکه در مدل JTDD، به ازای  $\alpha$  کوچک ( $\alpha = 0.6$ )، زوال مقاومت مشهود می‌باشد.

سطح مقطع میراگر در مدل JAPD با ضریب  $\beta = 1.4$  ضمن لاغر شدن حلقه‌های هیستریزیس، الزامات حداقل مقاومت AISC 341-22 را برای استفاده در SMF‌ها تأمین می‌کند. همچنین با کاهش سطح مقطع میراگر در مدل JTDD با ضریب  $\beta = 0.9$ ، منحنی هیستریزیس، الزامات AISC 341-22 را تأمین می‌کند. در این حالت، مقدار تنش در اعضای اصلی سازه کاهش می‌یابد و اتصال JTDD حداکثر میزان تنش و کرنش وارده به سیستم را جذب کرده است.

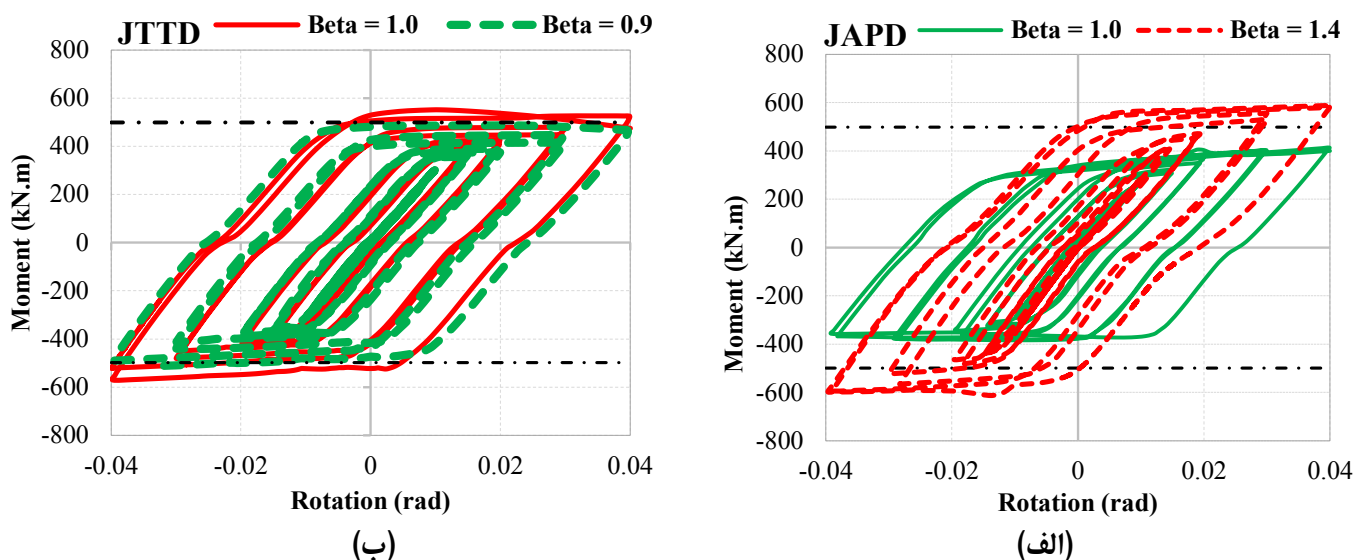
کانتورهای تنش von Mises در شکل ۱۶ برای حالت  $\alpha = 1.2$  برای هر دو مدل نشان داده شده است. در میراگر JAPD، با افزایش  $\alpha$ ، مقدار تنش von Mises و کرنش پلاستیک PEEQ در اعضای اصلی افزایش یافته است. به ازای  $\alpha = 1.0$ ، خرابی محدود به میراگر است. شایان ذکر است که در مدل JAPD، داخل میراگر به شکل یک بیضی خالی شده است. دلیل انتخاب ابعاد داده شده در شکل ۲ (الف) این است که با کاهش قطر کوچک بیضی، میزان تنش در اعضای اصلی سازه به طور قابل توجهی افزایش یافته و باعث ایجاد خرابی در اعضای اصلی سازه می‌شود (شکل ۱۷). در حقیقت، با کاهش قطر کوچک بیضی، مقاومت اتصال در برابر

همان‌گونه که در شکل ۱۵ (الف) نشان داده شده است، با افزایش



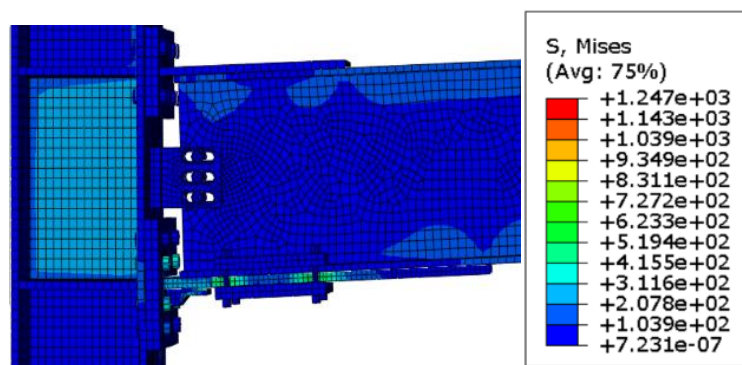
شکل ۱۴. تأثیر نسبت مقاومت میراگر به تیر بر منحنی‌های هیستریزیس مدل‌های اتصال مورد مطالعه: الف- JAPD؛ ب- JTTD.

Fig. 14. Effect of the damper-to-beam strength ratio on the hysteresis curves of the studied connection models: (a) JAPD; (b) JTTD.

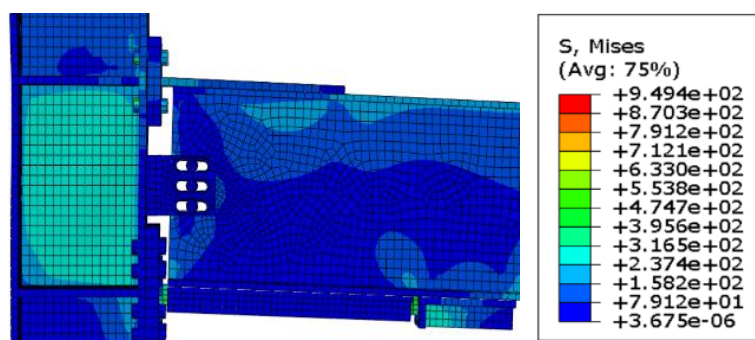


شکل ۱۵. تأثیر تغییر سطح مقطع میراگر بر منحنی‌های هیستریزیس مدل‌های اتصال مورد مطالعه: الف- JAPD؛ ب- JTTD.

Fig. 15. Effect of changing the cross-section of the damper on the hysteresis curves of the studied connection models: (a) JAPD; (b) JTTD



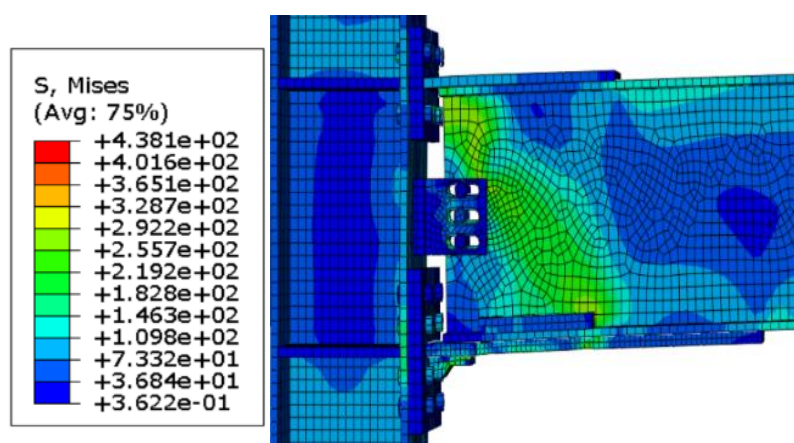
(الف)



(ب)

شکل ۱۶. کانتورهای تنش von Mises مدل‌های اتصال مورد مطالعه به ازای  $\alpha = 1.2$ : الف- JAPD؛ ب- JTDD.

Fig. 16. Contours of von Mises stress for the studied connection models at  $\alpha = 1.2$ : (a) JAPD; (b) JTDD



شکل ۱۷. شکل جذب نیرو در اعضای اصلی سازه و عدم عملکرد صحیح میراگر در مدل اتصال JAPD به ازای کاهش قطر کوچک بیضی در میراگر

Fig. 17. Force distribution in the main structural members and the inadequate performance of the damper in the JAPD connection model due to a reduction in the minor diameter of the oval shape in the damper

جدول ۲. مقاومت نهایی مدل‌های اتصال مورد مطالعه

Table 2. Ultimate strength of the studied connection models

| مدل *        | ممان خمشی مقاوم<br>عددی، $M_y^j$ (kN.m) | نسبت ممان خمشی<br>عددی | ممان خمشی مقاوم<br>تئوری، $M_y^j$ (kN.m) | نسبت ممان خمشی<br>تئوری به عددی |
|--------------|-----------------------------------------|------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|
| JAPD-1.2-1   | ۳۸۷/۵                                   | ۱/۱۷                   | ۳۸۷/۱                                    | ۱/۰۰                            |
| JAPD-1-1     | ۳۳۱/۳                                   | ۱/۰۰                   | ۳۲۲/۵                                    | ۰/۹۷                            |
| JAPD-0.8-1   | ۲۶۸/۳                                   | ۰/۸۱                   | ۲۵۸/۰                                    | ۰/۹۶                            |
| JAPD-0.6-1   | ۲۱۲/۰                                   | ۰/۶۴                   | ۱۹۳/۵                                    | ۰/۹۱                            |
| JAPD-1-1.4   | ۴۷۰/۳                                   | ۱/۴۸                   | ۴۵۱/۵                                    | ۰/۹۶                            |
| JAPD-0.8-1.4 | ۳۷۸/۶                                   | ۱/۱۷                   | ۳۶۱/۲                                    | ۰/۹۵                            |
| JTTD-1.2-1   | ۴۱۵/۶                                   | ۱/۱۴                   | ۳۸۷/۱                                    | ۰/۹۳                            |
| JTTD-1-1     | ۳۶۴/۶                                   | ۱/۰۰                   | ۳۲۲/۵                                    | ۰/۸۸                            |
| JTTD-0.8-1   | ۲۹۶/۸                                   | ۰/۸۳                   | ۲۵۸/۰                                    | ۰/۸۷                            |
| JTTD-0.6-1   | ۲۳۷/۰                                   | ۰/۶۵                   | ۱۹۳/۵                                    | ۰/۸۲                            |
| JTTD-1-0.9   | ۳۳۴/۷                                   | ۰/۹۰                   | ۲۹۰/۳                                    | ۰/۸۷                            |
| JTTD-0.8-0.9 | ۲۶۶/۵                                   | ۰/۷۳                   | ۲۳۲/۲                                    | ۰/۸۷                            |

\* مدل‌ها با نام JAPD- $\alpha$ - $\beta$  یا JTTD- $\alpha$ - $\beta$  نام‌گذاری می‌شوند که دلالت بر نسبت مقاومت مصالح میراگر به مصالح تیر دارد و بیانگر نسبت افزایش سطح مقطع میراگر است.

تغییر شکل افزایش یافته و میراگر وظیفه خود را مبنی بر اتلاف انرژی از طریق باز و بسته شدن اقطار بیضی به درستی انجام نمی‌دهد.

### ۳-۲- سختی الاستیک و مقاومت مدل‌ها

مقادیر مقاومت تسلیم و سختی الاستیک مدل‌های مختلف به ترتیب در جداول ۲ و ۳ داده شده است. با مقایسه مقادیر داده شده در این جداول می‌توان دریافت که مقدار مقاومت خمشی مدل JTTD در مقایسه با مدل JAPD در حدود ۱۰٪ بیشتر است، حال آنکه مقادیر سختی الاستیک مدل‌ها تقریباً باهم برابرند. سختی الاستیک از میانگین نسبت نیروهای الاستیک به جابجایی‌های متناظر در اولین سیکل بدست می‌آید. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار  $\alpha$ ، سختی الاستیک دچار تغییر نمی‌شود؛ اما با افزایش ضریب  $\beta$ ، سختی الاستیک افزایش می‌یابد. در مدل JAPD، به ازای  $\beta = 1.4$ ، سختی مدل نسبت به حالت  $\beta = 1.0$  به اندازه ۶٪ افزایش یافته و در مدل JTTD، با کاهش مقدار  $\beta$  از ۱/۰ به ۰/۹، سختی مدل به اندازه ۲٪ کاهش یافته است. مطابق جدول ۲، با تغییر مقدار  $\alpha$ ، از ۱/۰ تا ۰/۶، مقاومت تسلیم مدل‌های JAPD و JTTD، به ترتیب به اندازه ۳۶٪ و ۳۵٪ کاهش می‌یابد.

در این جداول، همچنین مقادیر تئوری سختی الاستیک و مقاومت به دست آمده از روابط (۱) تا (۸)، نیز آورده شده است. همان‌طوری که ملاحظه می‌شود، مقادیر تئوری و عددی مقاومت تسلیم به هم نزدیک می‌باشند؛ اما سختی الاستیک به دست آمده از معادله (۸) بسیار بزرگ‌تر از مقادیر متناظر عددی است. با توجه به جداول ۳ و ۴، میانگین نسبت مقدار تئوری سختی الاستیک و مقاومت تسلیم به مقدار عددی متناظر در مدل JAPD، به ترتیب برابر ۳/۴۰ و ۰/۹۶ می‌باشد. مقادیر متناظر در مدل JTTD، برابر ۳/۴۵ و ۰/۸۷ هستند. مقاومت تسلیم به دست آمده از رابطه تئوری محافظه‌کارانه و بسیار نزدیک به مقادیر عددی می‌باشند. سختی الاستیک به دست آمده از رابطه تئوری باید به عدد ۳/۵ تقسیم نمود تا تخمینی از مقدار متناظر عددی به دست آید.

### ۳-۳- اتلاف انرژی و شکل‌پذیری مدل‌ها

انرژی حاصل از زلزله به صورت تغییر شکل‌های ماندگار در اعضای سازه ذخیره می‌شود. این انرژی، تحت عنوان انرژی هیسترزیس نامیده می‌شود که با وجود میراگر، به خوبی مستهلک شده و از ایجاد خرابی در اعضای اصلی سازه جلوگیری می‌شود. مقادیر دررفت تسلیم، دررفت نهایی، شکل‌پذیری



جدول ۳. سختی الاستیک مدل‌های اتصال مورد مطالعه

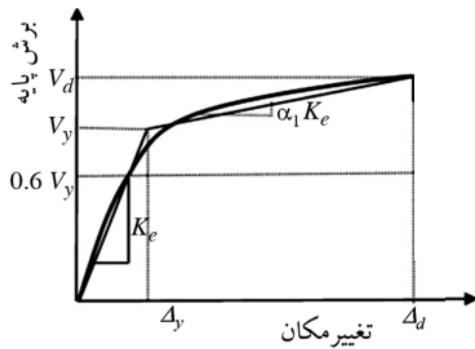
Table 3. Elastic stiffness of the studied connection models.

| مدل          | سختی الاستیک عددی،<br>(kN.m/rad) $K$ | نسبت سختی<br>الاستیک عددی | سختی الاستیک تئوری،<br>(kN.m/rad) $K$ | سختی الاستیک<br>تئوری به عددی، |
|--------------|--------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| JAPD-1.2-1   | ۳۶۱۱۰/۳                              | ۱/۰۰                      | ۱۲۵۱۲۷                                | ۳/۴۷                           |
| JAPD-1-1     | ۳۶۲۱۴/۷                              | ۱/۰۰                      | ۱۲۵۱۲۷                                | ۳/۴۶                           |
| JAPD-0.8-1   | ۳۶۴۷۰/۷                              | ۱/۰۱                      | ۱۲۵۱۲۷                                | ۳/۴۳                           |
| JAPD-0.6-1   | ۳۶۴۷۰/۷                              | ۱/۰۱                      | ۱۲۵۱۲۷                                | ۳/۴۳                           |
| JAPD-1-1.4   | ۳۸۴۰۹/۶                              | ۱/۰۶                      | ۱۲۵۱۲۷                                | ۳/۲۶                           |
| JAPD-0.8-1.4 | ۳۸۴۰۹/۶                              | ۱/۰۶                      | ۱۲۵۱۲۷                                | ۳/۲۶                           |
| JTTD-1.2-1   | ۳۶۷۲۸/۱                              | ۱/۰۰                      | ۱۲۵۱۲۷                                | ۳/۴۱                           |
| JTTD-1-1     | ۳۶۶۵۴/۸                              | ۱/۰۰                      | ۱۲۵۱۲۷                                | ۳/۴۱                           |
| JTTD-0.8-1   | ۳۶۳۰۵/۴                              | ۰/۹۹                      | ۱۲۵۱۲۷                                | ۳/۴۵                           |
| JTTD-0.6-1   | ۳۶۱۱۷/۴                              | ۰/۹۹                      | ۱۲۵۱۲۷                                | ۳/۴۶                           |
| JTTD-1-0.9   | ۳۶۰۷۶/۴                              | ۰/۹۸                      | ۱۲۵۱۲۷                                | ۳/۴۷                           |
| JTTD-0.8-0.9 | ۳۵۸۱۹/۸                              | ۰/۹۸                      | ۱۲۵۱۲۷                                | ۳/۴۹                           |

جدول ۴. اتلاف انرژی و شکل پذیری مدل‌های اتصال مورد مطالعه

Table 4. Energy dissipation and ductility of the studied connection models.

| مدل            | اتلاف انرژی، $E_d E_d$<br>(kJ) | نسبت اتلاف انرژی | دریافت تسلیم | شکل پذیری، $\mu$ | نسبت شکل پذیری |
|----------------|--------------------------------|------------------|--------------|------------------|----------------|
| JAPD-1.2-1     | ۱۳۵۱۴۶                         | ۰/۹۷             | ۱۰۸/۱        | ۱/۱۱             | ۰/۹۲           |
| JAPD-1-1       | ۱۳۹۱۶۰                         | ۱/۰۰             | ۹۹/۰         | ۱/۲۱             | ۱/۰۰           |
| JAPD-0.8-1*    | ۱۴۰۵۵۲                         | ۱/۰۱             | ۸۸/۵         | ۱/۳۶             | ۱/۱۲           |
| JAPD-0.6-1     | ۱۳۶۱۳۱                         | ۰/۹۸             | ۷۳/۱         | ۱/۶۴             | ۱/۳۶           |
| JAPD-1-1.4     | ۱۴۹۹۹۱                         | ۱/۰۸             | ۵۴/۹         | ۲/۱۸             | ۲/۲۸           |
| JAPD-0.8-1.4*  | ۱۵۸۴۰۶                         | ۱/۱۴             | ۴۳/۶         | ۲/۷۵             | ۲/۰۹           |
| JTTD-1.2-1     | ۱۳۸۹۰۳                         | ۰/۹۷             | ۴۲/۴         | ۲/۸۳             | ۰/۹۳           |
| JTTD-1-1       | ۱۴۳۴۱۴                         | ۱/۰۰             | ۳۹/۶         | ۳/۰۳             | ۱/۰۰           |
| JTTD-0.8-1**   | ۱۴۷۴۵۰                         | ۱/۰۳             | ۳۲/۶         | ۳/۶۸             | ۱/۳۱           |
| JTTD-0.6-1     | ۱۴۱۹۸۵                         | ۰/۹۹             | ۲۸/۲         | ۴/۲۵             | ۱/۴۰           |
| JTTD-1-0.9     | ۱۳۷۵۱۲                         | ۰/۹۶             | ۳۶/۶         | ۳/۲۸             | ۱/۰۸           |
| JTTD-0.8-0.9** | ۱۴۴۳۸۶                         | ۱/۰۱             | ۲۹/۳         | ۴/۱۰             | ۱/۱۲           |



شکل ۱۸. تعیین دررفت تسلیم بر اساس روش ACSE 41 [۲۹]

Fig. 18. Determination of yield drift based on the ACSE 41 method [29].

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله، دو مدل اتصال تیر به ستون مجهز به میراگرهای کمانش تاب در مقدار ضریب مقاومت مصالح ( $\alpha$ ) مختلف و سطح مقطع‌های مختلف مدلسازی و بررسی گردید. مدل میراگر JAPD متشکل از ورق قوسی مهار شده در زیر ورق و مدل میراگر JTDD به صورت لوله در لوله است. تمامی اعضای زیرقاب‌های موردنظر به وسیله عناصر محدود سه‌بعدی و با تعریف تماس بین آن‌ها، مدلسازی شده است. برای میراگرها، سطح مقطع مبنای  $2500 \text{ mm}^2$  در نظر گرفته شده است. به بیان دقیق، دامنه نتایج به پیکربندی‌های مورد بررسی در تحلیل محدود می‌گردد. با این وجود، این احتمال وجود دارد که نتایج به دست آمده از قابلیت کاربرد عام‌تری برخوردار باشند. نتایج حاصل از این پژوهش عبارت‌اند از:

- میراگر JTDD به ازای  $\alpha = 1$  و  $\beta = 1$  بر خلاف میراگر JAPD الزامات آیین‌نامه AISC 341 برای قاب‌های خمشی ویژه را تأمین می‌کند؛
- افزایش میزان  $\alpha$  در اتلاف‌گرهای انرژی باعث افزایش میزان خمشی قابل تحمل در میراگرها و همچنین سبب بوجود آمدن تقارن بهتری در منحنی‌های هیستریزس می‌شود؛
- با افزایش مقدار  $\alpha$  از  $1/0$  به  $1/2$ ، مقاومت خمشی مدل‌های JAPD و JTDD به ترتیب  $17\%$  و  $14\%$  افزایش می‌یابد. با این حال، مدل JAPD همچنان الزامات AISC 341 را برآورده نمی‌سازد؛
- سختی الاستیک مدل‌های میراگر مستقل از مقدار  $\alpha$  می‌باشد، حال آنکه با افزایش مقدار  $\beta$  به اندازه  $40\%$ ، سختی الاستیک به اندازه  $6\%$  افزایش

و اتلاف انرژی مدل‌های مختلف در جدول ۴ داده شده است. برای یافتن دررفت تسلیم نیز مطابق منحنی شکل ۱۸ عمل می‌شود که در آن، یک مقدار برای  $V_y$  (مقاومت تسلیم) طوری فرض شده که سختی الاستیک منحنی دو خطی ( $K_e$ )، منحنی ظرفیت سازه را در  $0.6V_y$  قطع کند و همچنین سطح زیر منحنی دو خطی و منحنی ظرفیت با هم برابر باشند. دررفت متناظر با آن به عنوان دررفت تسلیم و دررفت  $4\%$  به عنوان دررفت نهایی در نظر گرفته می‌شوند. بعد از دررفت  $4\%$ ، معمولاً در عناصر تیری تسلیم‌شدگی شروع می‌گردد. شکل‌پذیری از طریق رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (11)$$

با مقایسه مقادیر اتلاف انرژی هر دو مدل در جدول ۴ می‌توان دریافت که اتلاف انرژی مدل JTDD در حدود  $5\%$  بیش از مدل JAPD است. در هر دو مدل JAPD و JTDD، به ازای  $\alpha = 0.8$  بیشترین مقدار اتلاف انرژی اتفاق می‌افتد؛ حال آنکه با افزایش مقدار  $\alpha$ ، مقدار اتلاف انرژی کاهش یافته که ناشی از عدم کامل شدن رفتار پلاستیک اتصال است. در هر دو مدل موردنظر، کاهش اتلاف انرژی ناشی از افزایش  $\alpha$  به مقدار  $20\%$  (از  $\alpha = 1$  به  $\alpha = 1.2$ )، برابر  $3\%$  است. همچنین به ازای  $\alpha = 0.6$ ، مقدار اتلاف انرژی نسبت به مقدار متناظر با  $\alpha = 0.8$  به اندازه حدود  $4\%$  کمتر می‌باشد که دلیل این موضوع به کاهش بیشتر مقاومت خمشی برمی‌گردد. مطابق جدول ۴، با افزایش مقدار  $\beta$ ، مقدار اتلاف انرژی افزایش می‌یابد که متناظر با افزایش مقاومت خمشی است. در مدل JAPD، افزایش  $\beta$  به مقدار  $40\%$  در حالات  $\alpha = 1$  و  $\alpha = 0.8$ ، به ترتیب منجر به افزایش اتلاف انرژی در حدود  $8\%$  و  $14\%$  می‌شود؛ در حالی که در مدل JTDD، حداکثر کاهش اتلاف انرژی ناشی از کاهش  $\beta$  به مقدار  $10\%$ ، برابر  $4\%$  است.

همان‌گونه که در جدول ۴ داده شده است، با کاهش نسبت  $\alpha$  از  $1/0$  به  $1/6$ ، شکل‌پذیری مدل‌ها بیش از  $30\%$  افزایش می‌یابد. در مدل JAPD، با افزایش نسبت  $\beta$  به اندازه  $40\%$ ، در حالات  $\alpha = 1$  و  $\alpha = 0.8$  شکل‌پذیری به ترتیب به اندازه  $128\%$  و  $109\%$  افزایش می‌یابد. در مدل JTDD، با کاهش نسبت  $\beta$  به اندازه  $10\%$  در حالات  $\alpha = 1$  و  $\alpha = 0.8$ ، شکل‌پذیری مدل به ترتیب به اندازه  $8\%$  و  $12\%$  افزایش می‌یابد.

Steel Research, 120 (2016) 176–187.

می‌یابد؛

- [7] M.R. Eatherton, X. Ma, H. Krawinkler, D. Mar, S. Billington, J.F. Hajjar, G.G. Deierlein, Design Concepts for Controlled Rocking of Self-Centering Steel-Braced Frames, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 140 (2014) 04014082.
- [8] F. Wang, T.Y. Yang, Y. Cui, Energy-based seismic design and assessment of ductile linked rocking steel frame, *Journal of Building Engineering*, 73, (2023) 106753.
- [9] P.M. Clayton, J.W. Berman, L.N. Lowes, Seismic performance of self-centering steel plate shear walls with beam-only-connected web plates, *Journal of Constructional Steel Research*, 106 (2015) 198-208.
- [10] S.H. Oh, Y.J. Kim, H.S. Ryu, Seismic performance of steel structures with slit dampers, *Engineering structures*, 31(9) (2009) 1997-2008.
- [11] A. Köken, M.A. Köroğlu, Experimental study on beam-to-column connections of steel frame structures with steel slit dampers, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 29 (2) (2013) 04014066.
- [12] H. Saffari, A.A. Hedayat, M. Poorsadeghi Nejad, Post-Northridge connections with slit dampers to enhance strength and ductility, *Journal of Constructional Steel Research*, 80 (2013) 138–152.
- [13] C.H. Lee, Y.K. Ju, J.K. Min, S.H. Lho, S.D. Kim, Non-uniform steel strip dampers subjected to cyclic loadings, *Engineering Structures*, 99 (2015) 192–204.
- [14] J. Lee, J. Kim, Development of box-shaped steel slit dampers for seismic retrofit of building structures, *Engineering Structures*, 150 (2017) 934–946.
- [15] A.H. Amiri, P.E. Najafabadi, H.E. Estekanchi, Experimental and analytical study of block slit damper, *Journal of Constructional Steel Research*, 141 (2018) 167–178.
- [16] K. Bayat, B. Shekastehband, Seismic performance of beam to column connections with T-shaped slit dampers, *Thin-Walled Structures*, 141 (2019) 28-46.
- [17] H.Y. Park, S.H. Oh, Design range of the damper of a T-stub damage-controlled system, *Journal of Constructional Steel Research*, 162 (2019) 105719.
- نسبت مقاومت خمشی تئوری به مقاومت خمشی عددی مدل‌های JAPD و JTDD به ترتیب برابر ۹۶٪ و ۸۷٪ است. مقادیر متناظر در سختی الاستیک مدل‌ها، برابر ۳/۴۰ و ۳/۴۵ می‌باشد که پیشنهاد می‌شود در عمل، مقدار ۳/۵۰ مورد استفاده قرار گیرد؛
- افزایش مقدار  $\alpha$  از ۰/۸ به ۱/۰ باعث کاهش جزئی در حدود ۳٪ در میزان استهلاک انرژی در میراگرها می‌گردد که می‌تواند به دلیل عدم کامل شدن رفتار پلاستیک اتلاف‌گرهای انرژی در این ضریب باشد؛
- با افزایش مقدار  $\beta$  از ۱/۰ به ۱/۴، مدل JAPD با تأمین الزامات AISC 341 می‌تواند برای قاب‌های خمشی ویژه مورد استفاده قرار گیرد. با کاهش مقدار  $\beta$  به اندازه ۱۰٪، مدل JTDD قابلیت کاربرد برای قاب‌های خمشی ویژه را از دست می‌دهد؛
- با افزایش مقدار  $\beta$  از ۱/۰ به ۱/۴، اتلاف انرژی مدل JAPD حداکثر به مقدار ۱۴٪ افزایش می‌یابد.

## منابع

- [1] A.S. Whittaker, V.V. Bertero, C.L. Thompson, L.J. Alonso, Seismic testing of steel plate energy dissipation devices, *Earthquake Spectra*, 7 (4) (1991) 563–604.
- [2] M.R. Khoshkalam, M.H. Mortezaagholi, S.M. Zahrai, Proposed Modification for ADAS Damper to Eliminate Axial Force and Improve Seismic Performance, *Journal of Earthquake Engineering*, 26 (2022) 5130–5152.
- [3] G. Terenzi, Novel design procedure for steel hysteretic dampers in seismic retrofit of frame structures, *Engineering Structures*, 284 (2023) 115969.
- [4] B. Jafari, B. Shekastehband, Cyclic Behavior of Hybrid Honeycomb- and- Flexural Yielding Dampers in Chevron CBFs, *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 54(2) (2024) 13-24 in Persian.
- [5] E.S. Baraftabi, M.H.A Elizei, R. Esmailabadi, Numerical and experimental investigation of a new model of friction damper in diagonal brace under cyclic loading, *Structures*, 61 (2024) 105830.
- [6] F. Wang, M. Su, M. Hong, Y. Guo, S. Li, Cyclic behaviour of Y-shaped eccentrically braced frames fabricated with high-strength steel composite, *Journal of Constructional*

- 108464.
- [23] Y. Lu, Y. Liu, Y. Wang, J. Liu, X. Huang, Development of a novel buckling-restrained damper with additional friction energy dissipation: Component tests and structural verification, *Engineering Structures*, 274 (2023) 115188.
- [24] AISC 341-22, "Seismic provisions for structural steel buildings", Chicago, IL, USA: American Institute of Steel Construction, 2022.
- [25] H.Y. Park, S.H. Oh, Structural performance of beam system with T-stub type slit damper, *Engineering Structures*, 205 (2020) 109858.
- [26] Abaqus. Abaqus user manual (version 6.14), 2020.
- [27] Code No. 10. National Building Regulations, Steel Structures, Part 10, 2019.
- [28] M. Kojic, K.J. Bathe, *Inelastic Analysis of Solids and Structures*, Springer, London, 2005.
- [29] ASCE 41-23, *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*, ASCE Standard No. ASCE/SEI 41-23, American Society of Civil Engineers (ASCE), U.S., 2023.
- [18] H. Tagawa, Y. Nagoya, X. Chen, Bolted beam-to-column connection with buckling-restrained round steel bar dampers, *Journal of Constructional Steel Research*, 169 (2020) 106036.
- [19] H. Peng, J. Ou, S. Mahin, Design and numerical analysis of a damage-controllable mechanical hinge beam-to-column connection, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 133 (2020) 106149.
- [20] C. Peng, J. Pan, F. Hu, Z. Wang, Experimental investigation on earthquake-resilient steel beam-to-column joints with replaceable buckling-restrained fuses, *Journal of Constructional Steel Research*, 196 (2022) 107413.
- [21] T. Munkhunur, H. Tagawa, X. Chen, Steel rigid beam-to-column connections strengthened by buckling-restrained knee braces using round steel core bar dampers, *Engineering Structures*, 250 (2022) 113431.
- [22] Z. Zhai, Y. Liu, O. Mercan, S. Zou, F. Zhou, A hybrid buckling-restrained brace for enhancing the seismic performance of steel moment resisting frames, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 178 (2024)

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Y. Gholamia, B. Shekastehband, *Hysteretic Behavior of Beam-to-Column Connections Equipped with Buckling-Restrained Steel Dampers*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 57(5) (2025) 871-892.

DOI: [10.22060/ceej.2025.24011.8246](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.24011.8246)

