

عملکرد لرزه‌ای قاب مهاربندی زانویی با میراگر اصطکاکی و مقایسه آن با سیستم قاب زانویی

امیر غفوری نژاد^۱، مهدی علیرضایی^{۲*}، سید محمد میرحسینی^۳، احسان‌اله ضیغمی^۴

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ملایر، ملایر، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران

۴- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک، اراک، ایران

*ملایر، صندوق پستی ۶۱۶۶۸-۶۵۷۱۹، M.Alirezai@iau-malayer.ac.ir

چکیده

تجربیه‌های به‌دست‌آمده از زلزله‌های گذشته و عملکرد لرزه‌ای ضعیف بعضی از سازه‌ها در این مواقع، نیاز به استفاده از سیستم‌های نوین لرزه‌ای را نشان می‌دهد. این امر بررسی‌های پیش‌تر سیستم‌های لرزه‌ای جانبی سازه مانند میراگرهای اتلاف‌کننده انرژی برای بهبود عملکرد لرزه‌ای سیستم‌های موجود را ضروری می‌نماید. میراگرهای انرژی به‌صورت کلی به دو دسته میراگرهای مبتنی بر سرعت مانند میراگرهای ویسکوز و میراگرهای مبتنی بر تغییر مکان مانند میراگرهای تسلیمی و اصطکاکی تقسیم می‌شوند. میراگرهای اصطکاکی یکی از مؤثرترین وسایل مستهلک‌کننده انرژی در سازه هستند که در آن بدون ایجاد خرابی (تسلیم‌شدگی) و با مکانیزم ایجاد اصطکاک می‌تواند انرژی لرزه‌ای را مستهلک کند. در این مقاله سیستم جدیدی از ترکیب قاب مهاربندی زانویی (KBF) و میراگر اصطکاکی (KBFD) مورد مطالعه قرار گرفته است. میراگر مورد استفاده به‌صورت یک میراگر اصطکاکی خطی با شیار لوبیایی است. هدف از قراردادن میراگر اصطکاکی در این پیکربندی کمک به جلوگیری از کماتش خارج از صفحه مهاربند مجهز به میراگر و استفاده حداکثری از ظرفیت میراگر جهت بهبود عملکرد لرزه‌ای KBF می‌باشد. در این مقاله ابتدا صحت‌سنجی مدل المان محدود KBFD با استفاده از نتایج آزمایشگاهی صورت گرفته است. سپس با در نظر گرفتن شش نوع قاب KBFD که در آن نیروی پیش‌تندگی میراگر اصطکاکی به‌عنوان پارامتر متغیر در نظر گرفته شده، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این مطالعات شامل انجام تحلیل پاش‌آور جهت محاسبه پارامترهای لرزه‌ای سازه همچون ضریب شکل‌پذیری و ضریب رفتار سازه بود. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها نشان‌دهنده بهبود عملکرد لرزه‌ای KBFD نسبت به KBF است به‌صورتی که ضریب شکل‌پذیری و ضریب رفتار سازه افزایش یافته است. بر اساس نتایج حاصله با افزایش نیروی پیش‌تندگی، ضریب رفتار نیز افزایش و مابین ۷/۹ تا ۹ پیشنهاد می‌گردد. همچنین این قاب‌ها برای مطالعه بیشتر رفتار لرزه‌ای، تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای قرار گرفتند. نتایج حاصل از تحلیل قاب‌ها به‌صورت منحنی‌های هیستریزس، سختی اولیه و سکانتی، مقاومت قاب‌ها، شکل‌پذیری، ضریب رفتار، انرژی مستهلک‌شده و میرایی ویسکوز معادل چرخه‌ای گزارش شده است. نتایج به‌دست‌آمده بیانگر این حقیقت هستند که با عمل کردن میراگر اصطکاکی، کاهش نیاز لرزه‌ای بر روی مهاربند و ستون‌ها به‌خوبی صورت می‌گیرد. همچنین منحنی‌های هیستریزس به‌دست‌آمده، سطح بالایی از اتلاف انرژی زلزله ورودی و عملکرد مناسب لرزه‌ای قاب‌ها با پیکربندی پیشنهادی را نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی

تحلیل چرخه‌ای، عملکرد لرزه‌ای، میراگر اصطکاکی، قاب مهاربندی زانویی، پارامترهای لرزه‌ای

Seismic performance of the knee bracing frame with friction damper and its comparison with the knee frame system

A. Ghafouri-Nejad, M. Alirezai, S.M. Mirhosseini, E. Zeighami

Abstract

The experience of past earthquakes and the weak seismic performance of some structures have highlighted the need for modern seismic systems. Therefore, further examination of lateral seismic systems, such as energy dissipation dampers, is essential for improving the seismic performance of existing systems. Energy dampers can generally be divided into two categories: velocity-based dampers, such as viscous dampers, and displacement-based dampers, such as yielding and friction dampers. Friction dampers are one of the most effective energy dissipating devices in structures, capable of dissipating seismic energy through friction without causing damage (yielding). This paper studies a new system combining a knee-braced frame (KBF) with a friction damper (KBFD). The damper used is a linear friction damper with a slotted bolted connection. The goal of incorporating the friction damper in this configuration is to help prevent out-of-plane buckling of the brace equipped with the damper and to maximize the capacity of damper to improve the seismic performance of the KBF. In this paper, the finite element model of the KBFD was first validated using experimental results. Then, six types of KBFD frames, with varying pre-tension forces in the friction damper considered as a variable parameter, were studied. These studies included performing pushover analysis to calculate the seismic parameters of the structure, such as ductility and behavior factors. The results of these analyses indicate an improvement in the seismic performance of the KBFD compared to the KBF, with both the ductility and behavior factors increasing. Based on the results, with increasing pre-tension force, the behavior factor also increases and is suggested to range between 7.9 and 9.0. Additionally, these frames were subjected to cyclic loading to further study their seismic behavior. The results of the frame analyses were reported as hysteresis curves, initial and secant stiffness, frame resistance, ductility, behavior factor, dissipated energy, and equivalent viscous damping. The results demonstrate that the friction damper effectively reduces the seismic demand on the braces and columns. Furthermore, the obtained hysteresis curves show a high level of input earthquake energy dissipation and appropriate seismic performance of the frames with the proposed configuration.

Keywords

Cyclic Analysis, Seismic Performance, Friction Damper, Knee Brace Frame, Seismic Parameter

زمانی به دست می آید که از بالشتک‌های لنت ترمزی^۸ استفاده گردد [۱۱].

در سال ۱۹۸۹ **فیتزجرالد**^۹ نتایج کامل‌تری را در رابطه با میراگرهای اصطکاکی ارائه نمود [۱۲]. **چری**^{۱۰} و **فیلیترالت**^{۱۱} با مطالعه کارهای انجام‌شده بر روی میراگرهای اصطکاکی و مقایسه آن‌ها با سایر روش‌های مستهلک‌کننده انرژی به این نتیجه رسیدند که این میراگرها قابلیت استهلاک انرژی بالایی دارند [۱۳]. **مولولا**^{۱۲} و **بل**^{۱۳} در سال ۲۰۰۲ میراگر اصطکاکی جدیدی را بر روی مهاربند شورون قرار دادند که بر پایه حرکت دورانی عمل می‌کرد. مطالعات عددی و آزمایشگاهی دیگری نیز در مورد این نوع میراگر صورت گرفته که همگی به تأثیر آن در رفتار لرزه‌ای سازه‌ها اشاره می‌کنند [۱۴]. **تهرانی‌زاده** و **خالقیان** در سال ۲۰۰۷ نوعی میراگر اصطکاکی با استفاده از سوراخ‌های لوبیایی بلند و لنت ترمز بر روی مهاربند شورون ارائه کردند و مطالعات آزمایشگاهی بر روی چند نمونه انجام دادند [۱۵]. **ابوالمعالی** و **همکاران** در سال ۲۰۰۹ با انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی انواع اتصالات نیمه‌صلب نشان دادند که این اتصالات از توانایی اتلاف انرژی بالایی برخوردارند و با تغییر هندسه اتصالات می‌توان این توانایی را افزایش داد [۱۶].

میرطاهری و **همکاران** در سال ۲۰۱۱ با انجام پژوهش آزمایشگاهی و عددی بر روی میراگر اصطکاکی لوله‌ای به این نتیجه رسیدند که این میراگر دارای رفتار هیستریزس پایدار و قابلیت اتلاف انرژی بالایی می‌باشد [۱۷]. **کیم**^{۱۴} و **همکاران** در سال ۲۰۱۱ با مدل‌سازی میراگر اصطکاکی دورانی دریافتند که این میراگرها پاسخ سازه را کاهش داده و پایداری سازه را افزایش می‌دهند [۱۸]. **منیر** و **زینعلی** در سال ۲۰۱۳ با انجام آزمایش و مدل‌سازی میراگرهای اصطکاکی نشان دادند که این میراگرها تغییرمکان و برش‌های سازه را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهد [۱۹]. **قلی‌زاده** و **همکاران** در سال ۲۰۱۴ مطالعات عددی نوعی میراگر اصطکاکی دورانی را در قاب‌های زانویی ارائه کردند؛ در این سیستم تحت بارگذاری چرخه‌ای هیچ‌گونه کمانشی در عضو بادبندی قاب زانویی دارای میراگر اصطکاکی دورانی وجود ندارد؛ همچنین میزان اتلاف انرژی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد [۲۰]. **نیکوکلام** و **همکاران** در سال ۲۰۱۶ نوعی میراگر اصطکاکی

انتخاب سختی، مقاومت و شکل‌پذیری مناسب سازه‌ها، نقش اساسی در تحمل و طراحی سیستم‌های مقاوم در برابر نیروهای لرزه‌ای (SFRS)^۱ دارد [۱ و ۲]. برای تحمل نیروهای جانبی وارد بر سازه از سیستم‌های مهار جانبی استفاده می‌گردد. سیستم‌های قاب خمشی، قاب مهاربندی همگرا (CBF)^۲ و قاب مهاربندی واگرا (EBF)^۳ از جمله سیستم‌های مقاوم جانبی لرزه‌ای شناخته‌شده می‌باشند. یک جایگزین دیگر برای قاب‌های مهاربندی‌شده رایج ساختمانی، قاب‌های مهاربندی‌شده زانویی (KBF)^۴ است، که با تجهیز به یک عضو تسلیم‌شونده به‌خوبی انرژی لرزه را می‌تواند مستهلک کند [۳ و ۴].

تجارب زمین‌لرزه‌های گذشته، تلفات و زیان مالی، عملکرد لرزه‌ای ضعیف برخی از سازه‌ها، لزوم استفاده از سیستم‌های سازه‌ای جدید را نشان داده‌اند. بنابراین برای بهبود عملکرد لرزه‌ای و افزایش ایمنی سازه‌های فولادی، بررسی بیش‌تر سیستم‌های جدید سازه ضروری است [۵ و ۶]. استفاده از میراگرهای مستهلک‌کننده انرژی یکی از روش‌های مؤثر و قابل‌اجرا برای بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها است [۲ و ۷]. سیستم‌های مستهلک‌کننده عموماً به دو دسته مستهلک‌کننده‌های وابسته به سرعت حرکت همانند میراگرهای ویسکوز و مستهلک‌کننده‌های وابسته به تغییرمکان مانند میراگرهای اصطکاکی و فلزی تقسیم می‌شوند [۳ و ۸]. در واقع استفاده از میراگرهای اصطکاکی یک راه حل مناسب جهت حل مشکل عدم توازن بین سختی و شکل‌پذیری در قاب‌های معمولی می‌باشد [۹]. از طرفی دیگر میراگر اصطکاکی با عملکرد اصطکاک بین سطوح، انرژی لرزه‌ای را مستهلک می‌کند، لذا خراب‌شدگی ناشی از تسلیم‌شدگی در سازه است ایجاد نمی‌گردد.

کاربرد میراگرهای اصطکاکی در صنعت ساختمان در اواخر دهه ۱۹۷۰ آغاز شد؛ زمانی که **تایلر**^۵ استفاده از اتصالات کشویی اصطکاک (تفلون)^۶ را برای کاهش اثرات باد و زلزله پیشنهاد کرد [۱۰]. در سال ۱۹۸۰ **پال**^۷ و **همکاران** با انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی میراگر اصطکاکی با سطوح لغزش متفاوت، نشان دادند که بهترین رفتار تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی

^۸ Concentrically Braced Frame

^۹ FitzGerald

^{۱۰} Cherry

^{۱۱} Filiatrault

^{۱۲} Mualla

^{۱۳} Belev

^{۱۴} Kim

^۱ Seismic Force Resisting System

^۲ Concentrically Braced Frame

^۳ Eccentrically Braced Frame

^۴ Knee Braced Frame

^۵ Tyler

^۶ PTFE

^۷ Pall

با استفاده از اتصالات پیچی شیاردار برشی (SSBC)^۱ ارائه کردند که عمدتاً بر رفتار برشی اعضا در مکانیزم تسلیم و اتلاف انرژی سیستم سازه‌ای مؤثر است و مطالعات آزمایشگاهی بر روی چند نمونه انجام دادند [۲۱]. **طیاری و همکاران** به بررسی طراحی بهینه بر اساس آسیب در میراگرهای اصطکاکی در ساختمان‌های چندطبقه با مهاربند همگرا پرداختند که بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از تحقیق آن‌ها بازه ۴۰ تا ۵۵ درصدی برای اصطکاک سایشی به‌عنوان درصد بهینه معرفی گردیده است [۲۲]. **هاشمی و علیرضایی** به ارزیابی قاب‌های مهاربندی‌شده زانویی در بهبود رفتار لرزه‌ای قاب‌های فولادی پرداختند. در بررسی آن‌ها عضو زانویی با تغییرشکل برشی پلاستیک تأثیر به‌سزایی در مستهلک‌کردن انرژی زلزله دارد [۲۳]. **صادقی و همکاران** با در نظر گرفتن اثر پیش‌تندگی پیچ‌ها، روشی مؤلفه‌ای برای محاسبه سختی اولیه اتصالات صفحه انتهایی اصطکاکی توسعه دادند و صحت آن را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. نتایج نشان داد که این روش دقت محاسبات را به‌طور قابل‌توجهی بهبود می‌بخشد [۲۴].

در این مقاله با هدف بهبود عملکرد لرزه‌ای، سیستم سازه‌ای جدیدی که از ترکیب KBF و میراگر اصطکاکی ایجاد شده (KBFD)، مورد بررسی قرار گرفته است. در این سیستم مهاربندی ارائه‌شده برای تأمین سختی جانبی و مستهلک‌کردن انرژی زلزله از لینک زانویی به همراه میراگر استفاده می‌شود. در این پژوهش ابتدا با انجام صحت‌سنجی، مدل المان محدود با نتایج آزمایشگاهی منطبق گردید سپس با انجام تحلیل اجزای محدود، مطالعات پارامتریک بر روی شش مدل از سیستم ارائه‌شده در مقایسه با مدل پایه KBF، انجام شده است. در این مطالعات با انجام تحلیل‌های غیرخطی استاتیکی یکنوا (پوش‌آور) پارامترهای لرزه‌ای مانند شکل‌پذیری و ضریب رفتار سازه حاصل شده است. سپس با انجام تحلیل‌های چرخه‌ای غیرخطی مقادیری همچون استهلاک انرژی و میرایی هیستریزس در قاب‌های پیشنهادی با قاب زانویی مقایسه گردیده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- اتصال پیچی شیاردار اصطکاکی (LSB)

مطالعه علمی اصطکاک، گذشته طولانی دارد و به تحقیقات داوینچی^۲ و آمانتونز^۳ و کولمب^۴ برمی‌گردد. در نتیجه این

مطالعات، در لحظه شروع لغزش یا در طی لغزش می‌توان معادله (۱) را نوشت:

$$F = \mu \cdot N \quad (1)$$

که در آن (F) و (N) به‌ترتیب معرف نیروهای اصطکاکی و عمودی بوده و (μ) ضریب اصطکاک است [۳].

اتصالات پیچی شیاردار اصطکاکی (LSB)^۵ در ترکیب با قاب‌های مهاربندی معمولاً به‌صورت لغزشی خطی و لغزشی چرخشی می‌باشند و در قاب‌های خمشی از این اتصالات در اتصال تیر به ستون به‌صورت لغزشی چرخشی نیز استفاده می‌کنند (شکل (۱)). این اتصالات توانایی فراهم‌کردن تعداد زیادی از سیکل‌های اتلاف انرژی با خرابی کم و یا بدون خرابی سازه‌ها را دارند. در این اتصالات اصطکاک لازم برای ایجاد اتلاف انرژی، از طریق نیروی پیش‌تندگی پیچ‌ها تأمین می‌شود. یک اتصال پیچی لغزشی که به‌عنوان یک المان اتلاف‌کننده انرژی در یک سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد، بایستی توانایی اتلاف انرژی بالا در سیکل‌های جابه‌جایی تکرارشونده را بدون کاهش مقاومت و پایداری فراهم نماید. عوامل مهم که در کارایی اتصالات لغزشی پیچی تأثیر دارند عبارتند از:

۱. ثابت نگه‌داشتن فشار اتصال بین صفحات لغزش (استفاده از واشر فنری و تخت)
۲. ثابت نگه‌داشتن ضریب لغزش بین صفحات لغزش (انتخاب درست المان لغزش)
۳. اجتناب از شکست ترد اجزای اتصال زمانی که به آستانه لغزش می‌رسند (انتخاب مصالح مناسب برای پیچ‌ها) [۲۵].

با توجه به شکل (۱)، در اتصالات پیچی شیاردار اصطکاکی از آنجایی که دو سطح لغزش وجود دارد، نیروی لازم برای لغزش مطابق معادله (۲) برابر است با:

$$F_{slip} = 2n \cdot \mu \cdot N_b \quad (2)$$

که در آن (n) تعداد پیچ‌ها، (N_b) نیروی کشش در یک پیچ و (μ) ضریب اصطکاک است. با توجه به رابطه (۲) می‌توان دریافت که با تغییر تعداد پیچ‌ها و نیروی کشش در پیچ‌ها محدوده وسیعی از نیروهای لغزش را می‌توان در اختیار داشت [۲۶]. برای تولید نیروی اصطکاکی در این میراگر از دو عدد پیچ مناسب استفاده

⁵ Limited Slotted Bolt

¹ Shear Slotted Bolted Connection

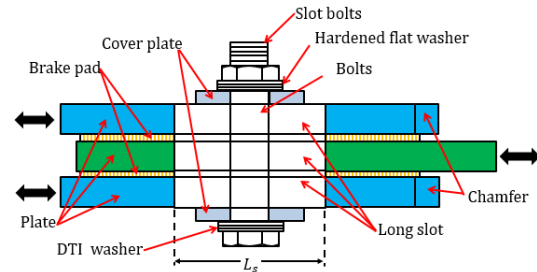
² da Vinci

³ Amantones

⁴ Coulomb

شده که نیروی عمود بر سطح مورد نیاز را در طول مدت لغزش فراهم می‌کند.

جزئیات قسمت‌های مختلف میراگر اصطکاکی و قطعات مختلف آن شامل کلیه ورق‌ها، واشر، پیچ و مهره، ورق‌های واسطه^۱ و ورق پوششی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- جزئیات میراگر اصطکاکی در این مطالعه

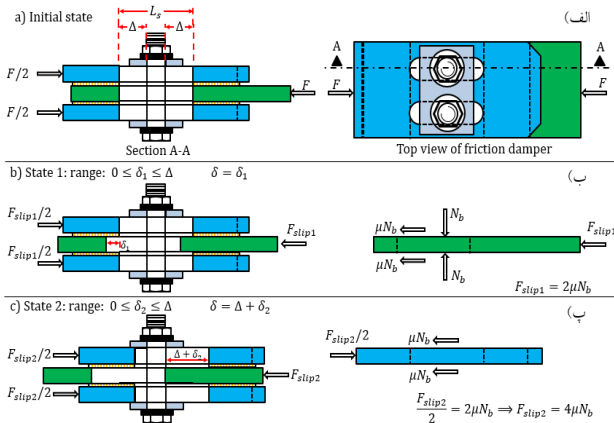
در شکل (۱)، کلیه ورق‌ها و عضو متحرک با شیار لوبیایی به طول ($L_s = 80 \text{ mm}$) و قطعات اتصالی لازم به منظور حرکت لغزشی و اعمال نیرو در میراگر اصطکاکی مشاهده می‌گردد. با توجه به مطالعات گذشته در رابطه با سطوح لغزش، استفاده از مصالح با مقاومت سایشی بالا توصیه شده است. به منظور بهبود عملکرد میراگر اصطکاکی ساخته شده، از لنت ترمز به عنوان مواد واسطه در سطوح لغزشی میراگر استفاده شده است. لنت ترمز ترکیبی از آزیست، کربن و درصدی فلز برنج و عناصر افزودنی دیگری است که توانایی سایشی بالایی را برای این مصالح فراهم می‌کند. این وسیله با قراردادن لنت‌های ترمز مابین سطوح لغزش و سپس سفت کردن پیچ‌های میراگر اصطکاکی برای تأمین نیروی پیش‌تندگی لازم، تکمیل می‌شود. یکی از مزیت‌های مهم این میراگر اصطکاکی سادگی نصب و مونتاژ آن در سازه است به طوری که می‌توان با اتصال مناسب، دو انتهای این میراگر اصطکاکی را در مکان مشخص به سازه نصب کرد.

فازهای مختلف ترتیب بار-تغییرمکان میراگر اصطکاکی به صورت شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است. شکل (۲-الف) حالت راه‌اندازی اولیه را نشان می‌دهد که در آن پیچ‌ها در مرکز شیار قرار می‌گیرند. در این شکل (L_s) طول شیار لوبیایی بر روی صفحات میراگر و (Δ) فاصله آزاد مابین بدنه پیچ تا انتهای شیار لوبیایی می‌باشد. زمانی که نمونه بارگذاری می‌شود، ابتدا ورق میانی در حالت نشان داده شده در شکل (۲-ب) بدون هیچ‌گونه برخورد با پیچ‌ها جابه‌جا می‌شود. در این حالت تغییرمکان میراگر δ برابر با δ_1 و حداکثر تغییرمکان میراگر در این

حالت برابر با Δ می‌باشد. همچنین مطابق با نمودار آزاد ترسیم شده برای ورق میانی ارائه شده در همین شکل (۲-ب)، نیروی لغزشی برابر $F_{slip1} = 2\mu N_b$ می‌باشد. با افزایش تغییرمکان میراگر به میزانی بیش‌تر از Δ ، ورق میانی مطابق شکل (۲-پ) پس از برخورد با بدنه پیچ‌ها جابه‌جا می‌شود. در این حالت δ_2 مقداری است که پیچ جابه‌جا شده است و تغییرمکان کلی میراگر برابر $\delta = \Delta + \delta_2$ می‌باشد. با رسیدن پیچ به انتهای شیار، حداکثر جابه‌جایی ممکن میراگر 2Δ اتفاق می‌افتد. در این حالت مطابق با نمودار آزاد ترسیم شده برای ورق میانی ارائه شده در همین شکل (۲-پ)، نیروی لغزشی برابر $F_{slip2} = 4\mu N_b$ بوده که دو برابر F_{slip1} می‌باشد.

۲-۲- پارامترهای لرزه‌ای

آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای معیارهای مختلفی برای طراحی سیستم‌های سازه‌ای ارائه می‌دهد. در این معیارها نوع سیستم و جنبه‌های ویژه آن مدنظر خواهد بود، که نحوه رفتار سیستم را تعیین می‌کنند. در بیش‌تر آیین‌نامه‌ها از جمله آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ایران) [۲۷]، روش متعارف تعیین نیروهای جانبی مبتنی بر روش استاتیکی معادل مطابق معادله (۳) می‌باشد. در بیش‌تر آیین‌نامه‌ها، نیروی معادل استاتیکی مبنای طراحی بر اساس ضریب R است.



شکل ۲- ترتیب بار-تغییرمکان میراگر اصطکاکی و دیاگرام آزاد نیروهای داخلی میراگر اصطکاکی

$$V = C \cdot V \quad (۳)$$

$$C = \frac{ABI}{R}$$

در معادله (۳)، A) نسبت شتاب مبنای طرح، B) ضریب بازتاب، I) ضریب اهمیت و R) ضریب رفتار سازه است [۲۷].

^۱ Shims

و ضریب میرایی برابر یک در نظر گرفته شده است. همچنین برای دو پارامتر دیگر:

$$R_s = \frac{V_y}{V_s} \quad (6)$$

$$R_\mu = \frac{V_{eu}}{V_y} \quad (7)$$

که در روابط فوق (V_s) برش پایه متناظر با تشکیل اولین مفصل پلاستیک، (V_{eu}) نیروی برش پایه هنگامی که سازه فقط رفتار الاستیک داشته باشد و (V_y) نیروی برش پایه الاستیک منحنی دوخطی هستند. همچنین معادله (۵) بر اساس موارد گفته شده به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$R = R_s R_\mu \quad (8)$$

مطالعات زیادی بر روی ضریب شکل‌پذیری (R_μ) انجام شده است. در این میان می‌توان به پژوهش‌های **میراندا**^۴ و **برتر**^۵ (۱۹۹۴)، **کراوینکلر**^۶ (۱۹۹۲)، **یانگ**^۷ (۱۹۹۰) و **نیومارک**^۸ (۱۹۸۲) اشاره کرد که هر کدام از آن‌ها روابط مختلفی بر حسب دوره تناوب اصلی سازه، میرایی، نوع خاک و شکل‌پذیری سازه ارائه کرده‌اند. در این پژوهش از دو روش **یانگ** و **نیومارک** برای تعیین ضریب کاهش شکل‌پذیری معادله (۹) استفاده شده است. در این رابطه (μ) ضریب شکل‌پذیری سازه بوده که با توجه به شکل (۳)، مطابق معادله (۱۰) محاسبه می‌شود. که در آن (Δ_y) و (Δ_{max}) به ترتیب تغییر مکان تسلیم و تغییر مکان حداکثر جانبی سازه است.

$$T \leq 0.03 s \rightarrow R_\mu = 1$$

$$0.12 \leq T \leq 0.5 s \rightarrow R_\mu = \sqrt{2\mu - 1} \quad (9)$$

$$T \leq 1 s \rightarrow R_\mu = \mu$$

$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (10)$$

۳- صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی مدل المان محدود قاب KBF از نرم‌افزار آباکوس^۹ استفاده شده است. برای این منظور دو نمونه آزمایشگاهی میراگر اصطکاکی و یک نمونه قاب زانویی KBF لحاظ شده است. میراگر اصطکاکی توسط **غفوری‌نژاد** و **همکاران** [۴] و قاب زانویی KBF توسط **بالندرا**^{۱۰} و **همکاران** [۳۱] آزمایش شده که مشخصات مصالح به‌کاررفته در جدول (۱) آورده شده است. در این جدول (e) درصد تغییر طول می‌باشد و بارگذاری در

استاندارد ۲۸۰۰ نیز مثل برخی آیین‌نامه‌های لرزه‌ای معتبر دنیا مقادیر مختلفی را برای تعیین ضریب رفتار معرفی می‌کند. ATC19 و ATC34 از روش ساده‌ای به صورت ضرب سه پارامتر ارائه شده در معادله (۴) برای تعیین ضریب رفتار استفاده می‌کنند.

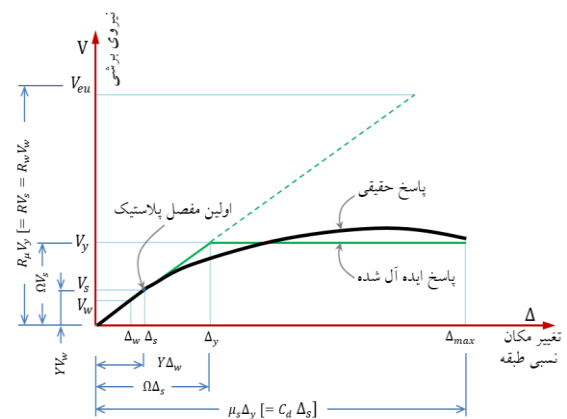
$$R = R_\mu \cdot R_s \cdot R_R \quad (4)$$

در این معادله، (R_μ) ضریب کاهش در اثر شکل‌پذیری، (R_s) ضریب مقاومت افزون و (R_R) ضریب نامعینی ساختمان است. شکل (۳)، منحنی نیرو-تغییر مکان به دست آمده از یک تحلیل استاتیکی غیرخطی به همراه نمودار دوخطی ایده آل را نشان می‌دهد.

تحقیقات محققین دانشگاه برکلی^۱ برای در نظر گرفتن آثار ناشی از کاربرد میراگر الحاقی در سیستم سازه‌ای نشان داده است که اجزای تشکیل‌دهنده ضریب رفتار از چهار ضریب تشکیل می‌شوند که در معادله (۵) ذکر شده است [۲۸].

$$R = R_s R_\mu R_R R_\xi \quad (5)$$

در رابطه فوق (R_s) ضریب اضافه‌مقاومت، (R_μ) ضریب ناشی از شکل‌پذیری، (R_R) ضریب نامعینی و (R_ξ) ضریب میرایی (مازاد بر ۵٪ میرایی ذاتی مصالح) می‌باشد.



شکل ۳- منحنی ظرفیت یک سازه‌ای و دو خطی کردن آن

بر اساس تحقیقات **ویتاکر**^۲ و **همکاران** به علت وجود سیستم KBF و سختی بالای مهاربند ضریب نامعینی برابر یک در نظر گرفته شده است [۲۹]. بر اساس تحقیقات **هانسون**^۳ و **همکاران** اطلاعات ارائه شده UBC-1994 برای میرایی ۵٪، ضریب میرایی برابر یک می‌باشد [۳۰]. در این پژوهش نیز مقادیر ضریب نامعینی

⁴ Miranda

⁵ Barter

⁶ Krawinkler

⁷ Yang

⁸ Newmark

⁹ ABAQUS

¹⁰ Balendra

¹ Berkeley

² Whittaker

³ Hunson

هر دو مورد آزمایشگاهی به صورت چرخه‌ای و تغییر مکان-کنترل بوده است.

۳-۱- میراگر اصطکاکی

جزئیات پیکربندی آزمایش میراگر اصطکاکی در شکل (۴-الف) و (۴-ب) و مدل اجزای محدود در شکل (۵-الف) نشان داده شده است. میراگر اصطکاکی از نوع خطی با سوراخ لویبایی می‌باشد که با اعمال نیروی پیش‌تندگی در پیچ‌ها، عملکرد اصطکاکی حاصل می‌گردد. دو نمونه آزمایشگاهی SP-3 و SP-4 برای صحت‌سنجی انتخاب شده‌اند که هر دو دارای مشخصات یکسان با نیروی پیش‌تندگی $N_b = 100 \text{ kN}$ و ضریب اصطکاک 0.2 ولی با دو نوع مختلف پروتکل بارگذاری مطابق شکل (۵-ب) می‌باشند [۴].

نتایج نمودارهای هیستریزس حاصل شده از تحلیل المان محدود هر دو نمونه SP-3 و SP-4 در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی

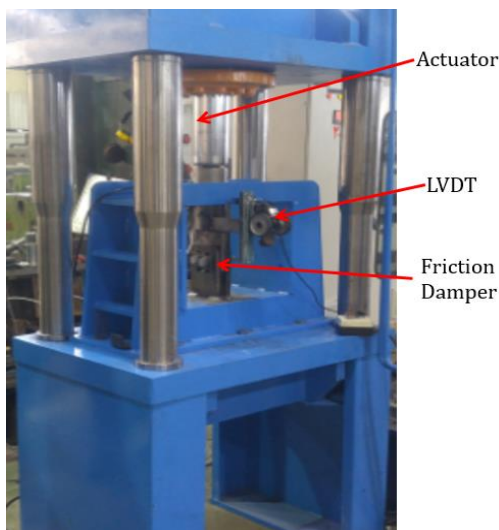
در شکل (۵-ج) آورده شده‌اند. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد نتایج عددی به دست آمده، تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشته که این صحت مدل‌سازی المان محدود میراگر را نشان می‌دهد.

۳-۲- قاب زانویی (KBF)

قاب زانویی در شکل (۶-الف) و مدل اجزای محدود در شکل (۶-ب) آورده شده است. برای مدل‌سازی از تعداد ۱۰۹۰۷ گره^۱ و همچنین ۵۴۳۰ المان سه‌بعدی هشت‌گره‌ای با انتگرال کاهش یافته و آرایش شش‌وجهی خطی^۲ استفاده شده است. رفتار ماده فولادی با استفاده از مدل سخت‌شوندگی سینماتیک^۳ توصیف شده است. نتایج بار-تغییر مکان حاصل از تحلیل المان محدود و نیز نتایج آزمایشگاهی در شکل (۶-ج) ارائه شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد نتایج عددی حاصله انطباق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارند.

جدول ۱- تست مصالح میراگر اصطکاکی [۴] و المان زانویی [۳۱]

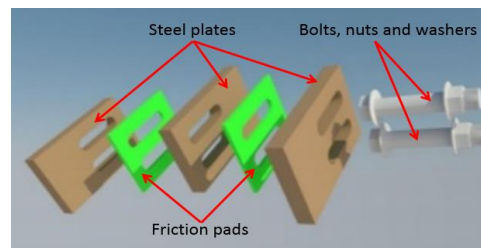
| Specimen | Component | Type | F_y (MPa) | F_u (MPa) | F_y/F_u | e (%) |
|-----------------|--|------|----------------|----------------|-----------|----------|
| Friction Damper | Outer and Middle Plate in Friction Damper Bolt | ST37 | 295 | 415 | 0.71 | 28 |
| | | M8.8 | 985 | 1150 | 0.86 | 16 |
| KBF | Knee Elements | | 337 | 617 | 0.55 | 20 |



(ج)



(الف)



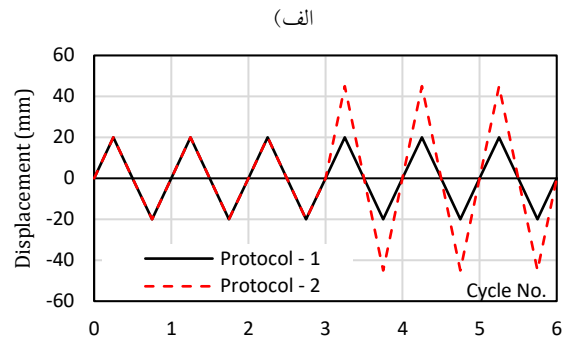
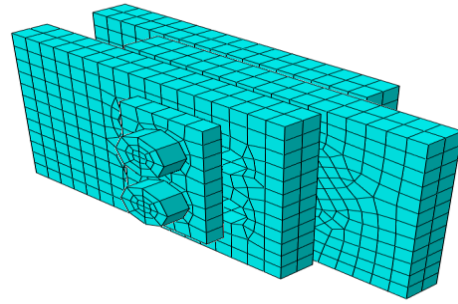
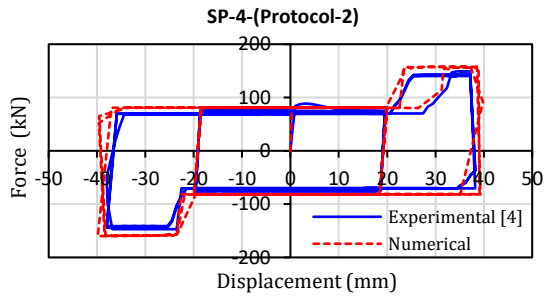
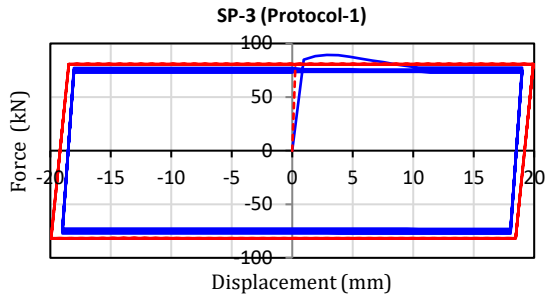
(ب)

شکل ۴- نمونه آزمایشگاهی میراگر اصطکاکی با لنت ترمز: الف) نمونه ساخته شده، ب) جزئیات دمپر در نمای سه‌بعدی، ج) پیکربندی آزمایشگاهی در بارگذاری سیکلی میراگر اصطکاکی [۴]

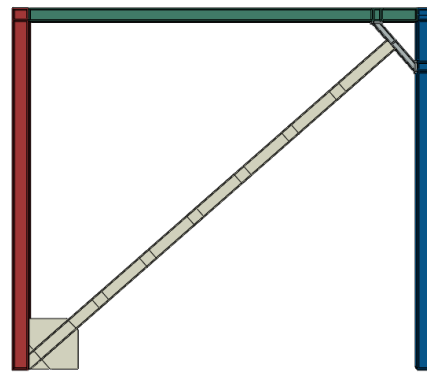
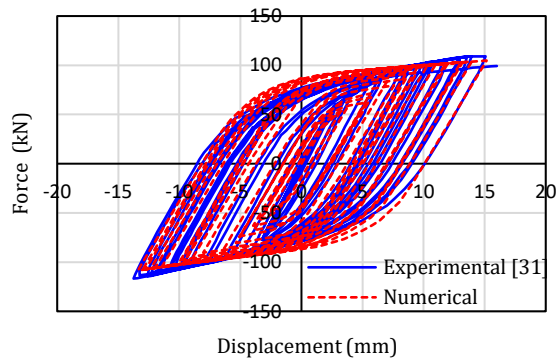
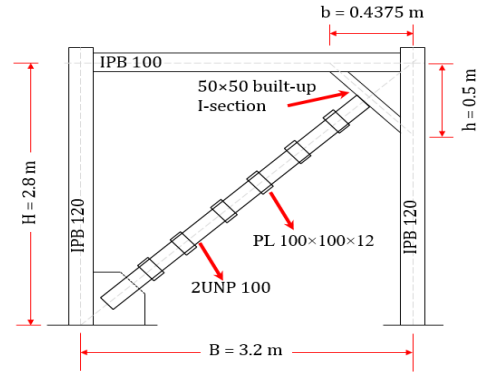
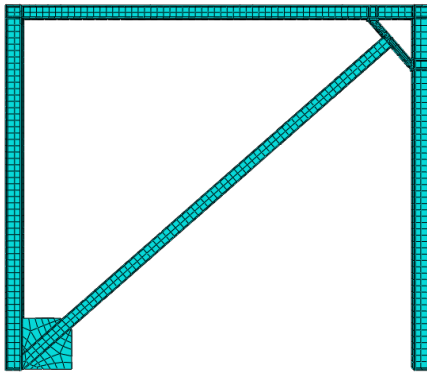
¹ Node

² Linear Hex

³ Kinematic Hardening



شکل ۵- نمونه آزمایشگاهی میراگر اصطکاکی با لنت ترمز: الف) مدل اجزای محدود، ب) نمودار پروتکل‌های بارگذاری، ج) نمودار هیستریزس میراگرهای اصطکاکی [۴]



شکل ۶- نمونه آزمایشگاهی بالندرا: الف) پیکربندی قاب مهاربند زانویی، ب) مدل اجزای محدود، ج) نمودار آزمایشگاهی هیستریزس قاب KBF [۳۱]

۴- معرفی و هندسه قاب‌های مورد مطالعه

در این مطالعه برای مقایسه قاب‌های KBF و KBFD میراگر اصطکاکی، از یک قاب مهاربندی شده زانویی با ابعاد و مقاطع نشان داده شده مطابق شکل (۷) استفاده شده است. نسبت مناسب ارتفاع قاب به طول محل اتصال عضو زانویی به ستون بنابر نتایج آزمایش‌های هانگ^۱ و همکاران ۰/۱۵ تا ۰/۳ به دست آمده است [۳۲]. مقادیر b و h نشان داده شده در این شکل به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که نسبت $\frac{b}{B} = \frac{h}{H} = 0.3$ در نظر گرفته شده است، تا قبل از تسلیم خمشی، تسلیم برشی بتواند روی دهد. مقدار طول میراگر و نحوه محاسبه آن در شکل (۷) نشان داده شده است. مشخصات تعداد هفت قاب KBF و KBFD در نظر گرفته شده برای مطالعه در جدول (۲) آورده شده است. نام‌گذاری قاب‌ها به صورت KBFD-X است که در آن X از ۴۰ تا ۱۴۰ نشان‌دهنده شش نوع میراگر از ضعیف به قوی (نیروی پیش‌تندگی پیچ‌ها) می‌باشد.

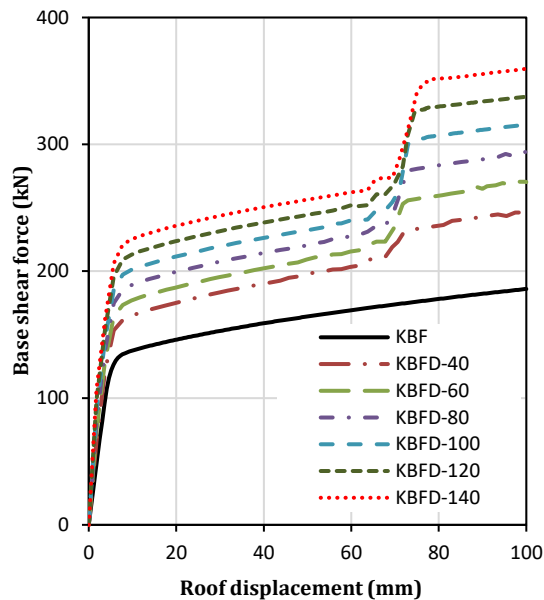
جدول ۲ - مشخصات قاب‌های تحلیلی KBFD در حالت مختلف

| Frame | b (mm) | h (mm) | $\frac{b}{B} = \frac{h}{H}$ | L_d (mm) | L_s (mm) | N_b (kN) |
|----------|-------------|-------------|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| KBF | 1080 | 900 | 0.3 | | | |
| KBFD-40 | 1080 | 900 | 0.3 | 373.7 | 120 | 40 |
| KBFD-60 | 1080 | 900 | 0.3 | 373.7 | 120 | 60 |
| KBFD-80 | 1080 | 900 | 0.3 | 373.7 | 120 | 80 |
| KBFD-100 | 1080 | 900 | 0.3 | 373.7 | 120 | 100 |
| KBFD-120 | 1080 | 900 | 0.3 | 373.7 | 120 | 120 |
| KBFD-140 | 1080 | 900 | 0.3 | 373.7 | 120 | 140 |

۵- مطالعات عددی

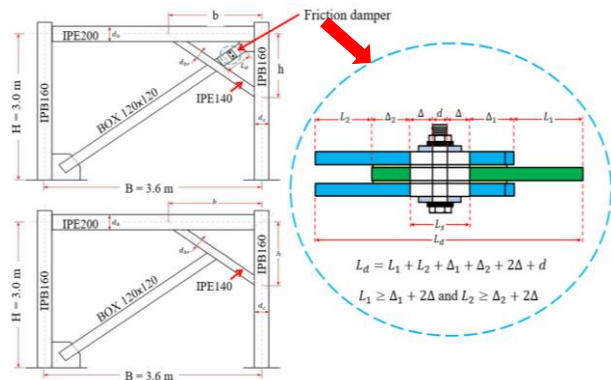
۵-۱- تحلیل قاب‌ها تحت بارگذاری یکنواخت افزایشی (پوش‌آور)

در شکل (۸)، نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی به صورت نمودارهای نیرو-تغییرمکان برای قاب‌های KBF و KBFD نشان داده شده است. بر اساس این نتایج، افزایش نیروی پیش‌تندگی پیچ‌ها موجب افزایش نیروی برش پایه در قاب‌های پیشنهادی شده است که میزان سختی اولیه قاب‌ها با افزایش نیروی پیش‌تندگی پیچ‌ها نیز رابطه مستقیم دارد. همچنین، با افزایش تغییرمکان قاب‌ها، نمودار پوش‌آور به صورت دوسطحی مشاهده می‌شود. در این وضعیت، ورق میانی میراگر پس از برخورد با بدنه پیچ‌ها جابه‌جا می‌شود و نیروی لغزشی برابر با $F_{slip2} = 4\mu N_b$ است که دو برابر F_{slip1} می‌باشد. این امر سبب افزایش نیروی برش پایه در قاب‌ها می‌گردد.



شکل ۸- نمودار نیرو-تغییرمکان قاب KBF و قاب‌های KBFD

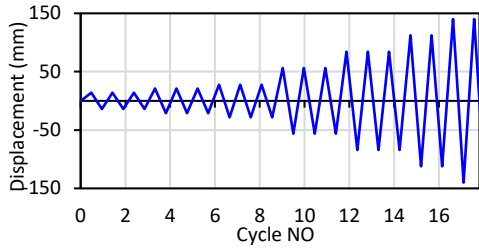
همان‌طور که گفته شد پس از تحلیل استاتیکی غیرخطی پوش‌آور نمودار برش پایه-تغییرمکان تمام مدل‌ها استخراج شده و به روش یانگ دوخطی شده و در نهایت مقادیر ضریب رفتار به دو روش یانگ و نیومارک به دست آمده است. در شکل (۹) نمونه‌ای از نمودار دوخطی شده مجهز به المان منحنی شکل نشان داده شده است.



شکل ۷- پیکربندی قاب‌های در نظر گرفته شده

¹ Huang

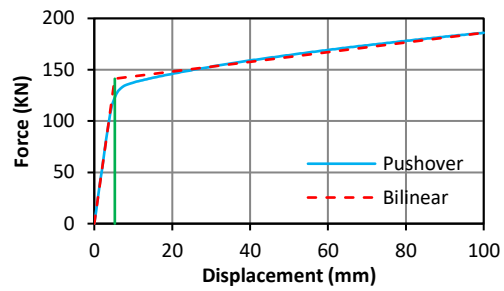
شده است. نمودار تنش-کرنش برای مدل‌سازی به صورت پنج‌خطی با در نظر گرفتن آثار سخت‌شوندگی کرنشی لحاظ شده است.



شکل ۱۰- چرخه‌های بارگذاری شده بر نمونه‌ها بر اساس الگوی پیشنهادی ATC-24

پس از تحلیل قاب‌ها در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس، پاسخ سازه‌ای آن‌ها مشخص گردیده است، که در ادامه گزارش داده خواهد شد. در شکل (۱۱) نمودارهای هیستریزس قاب‌ها (نیروی برشی پایه در برابر تغییر مکان جانبی قاب)، تحت اثر بارهای چرخه‌ای ارائه شده است. همان‌طور که از این شکل‌ها ملاحظه می‌گردد منحنی‌های هیستریزس همه قاب‌های KBFD چاق، تقریباً متقارن و بدون مشاهده اثر پینچینگ هستند که نشان‌دهنده ظرفیت بالای استهلاک انرژی این قاب‌ها و متعاقباً عملکرد لرزه‌ای مناسب آن‌ها است.

در جدول (۴) خلاصه‌ای از نتایج حاصل شده از تحلیل قاب‌ها گزارش شده است. در این جدول (F_{slip1}) و (F_{slip2}) نیروی لغزشی به ترتیب قبل و بعد از برخورد صفحه میانی با پیچ‌های میراگر بوده و (V_1) و (V_2) نیروی برش پایه قاب به ترتیب قبل و بعد از برخورد صفحه میانی با پیچ‌ها است. در شکل (۱۰) نمودار مربوط به قاب KBFD-140 و مقادیر V_1 و V_2 نشان داده شده است. همچنین (K_{sec}) و (K) به ترتیب سختی سکانتی و سختی الاستیک اولیه قاب‌ها و (E_{FD}) و (E_D) نیز به ترتیب انرژی اصطکاکی ناشی از لغزش در میراگر و انرژی مستهلک شده در کل قاب می‌باشد. انرژی اصطکاکی ناشی از لغزش در میراگر از مجموع حاصل ضرب نیروی لغزشی در تغییر مکان میراگر حاصل شده است. در حالی که انرژی مستهلک شده در کل قاب از محاسبه مساحت محصور شده در حلقه‌های هیستریزس به دست آمده است. مطابق جدول (۴) ملاحظه می‌گردد F_{slip2} همواره دو برابر F_{slip1} می‌باشد که با توجه به ماهیت میراگر قابل انتظار است. همچنین در همین جدول مشاهده می‌شود که پارامترهای K_{sec} ، K ، E_D ، V_1 و V_2 با ثابت نگه داشتن نسبت $\frac{b}{H} = \frac{h}{B}$ و با انتخاب میراگر قوی‌تر روند افزایشی خواهند داشت.



شکل ۹- نمودار دوخطی شده قاب KBF به روش یانگ

نتایج حاصل از این تحقیق که بررسی تأثیر میراگر اصطکاکی بر ضریب رفتار، ضریب ناشی از شکل‌پذیری، ضریب اضافه‌مقاومت و نسبت شکل‌پذیری قاب‌های KBFD می‌باشد، در جدول (۳) قرار داده شده است. همان‌طور که در این جدول ملاحظه می‌گردد ضریب رفتار قاب KBF برابر با $7/6$ و ضریب رفتار قاب KBFD مابین $7/9$ تا 9 محاسبه شده است. آنچه مشاهده می‌گردد: اولاً وجود میراگر اصطکاکی باعث افزایش شکل‌پذیری و ضریب رفتار شده است؛ ثانیاً با افزایش نیروی پیش‌تنیدگی پیچ‌ها در میراگر اصطکاکی، شکل‌پذیری و ضریب رفتار سازه نیز افزایش یافته است.

جدول ۳- نتایج حاصل از تحلیل پوش‌آور قاب‌ها

| Frame | Δ_y (mm) | μ | R_S | R_{μ} | R |
|----------|--------------------|-------|-------|-----------|-----|
| KBF | 6.97 | 14.35 | 1.45 | 5.26 | 7.6 |
| KBFD-40 | 6.58 | 15.19 | 1.46 | 5.42 | 7.9 |
| KBFD-60 | 6.33 | 15.80 | 1.50 | 5.53 | 8.3 |
| KBFD-80 | 6.14 | 16.29 | 1.52 | 5.62 | 8.5 |
| KBFD-100 | 5.88 | 16.99 | 1.53 | 5.74 | 8.8 |
| KBFD-120 | 5.76 | 17.37 | 1.53 | 5.81 | 8.9 |
| KBFD-140 | 5.51 | 18.16 | 1.52 | 5.94 | 9.0 |

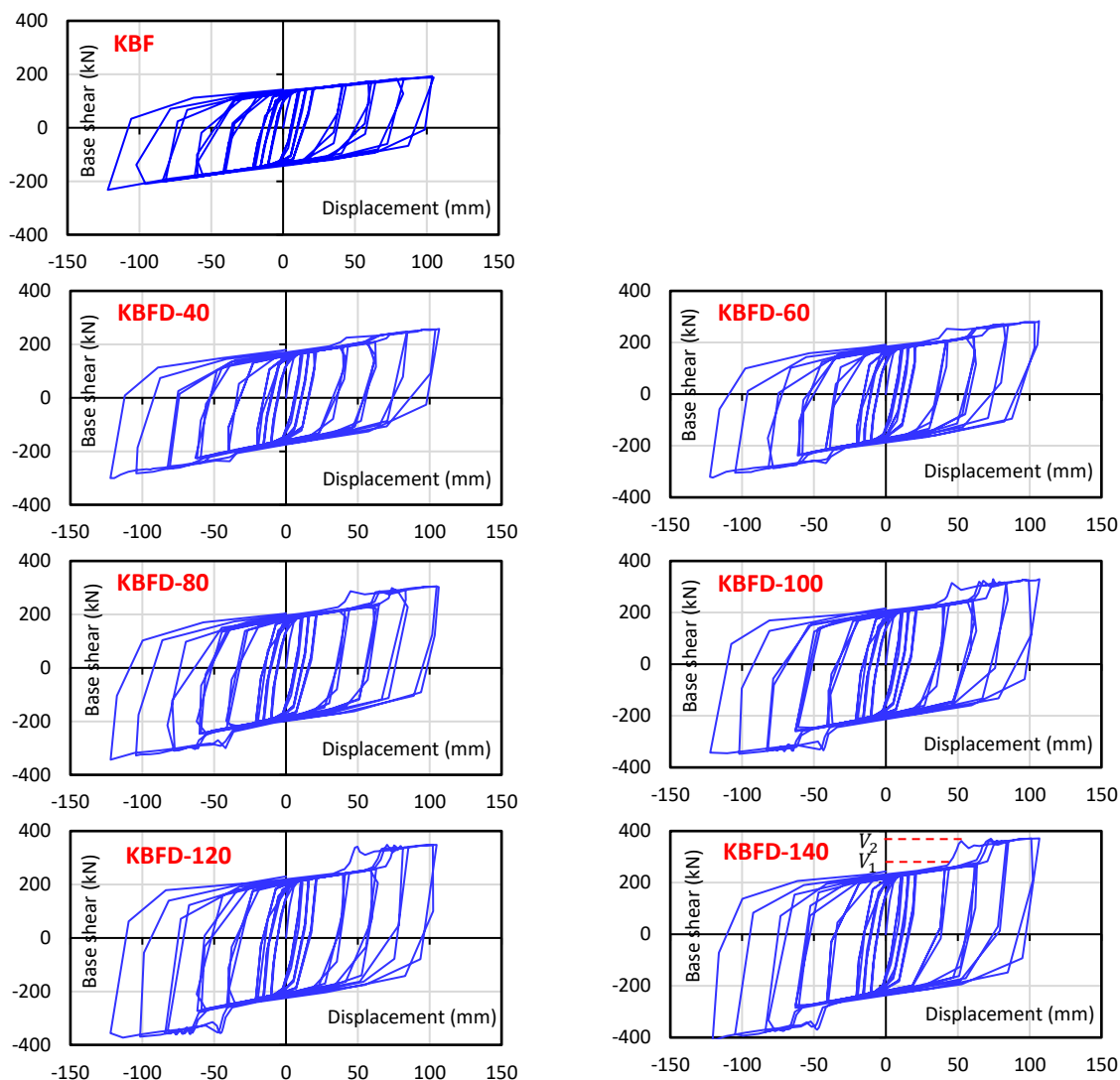
۵-۲- بررسی رفتار هیستریزس قاب‌های KBF و KBFD

مطالعات پارامتریک قاب‌های مورد نظر تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی چرخه‌ای و از نوع کنترل‌شونده به وسیله تغییر مکان قرار گرفتند. بارگذاری به وسیله تغییر مکان در جهت افقی در تراز تیر بالایی به نمونه اعمال می‌شود؛ همان‌گونه که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود میزان جابه‌جایی نهایی اعمال شده بر نمونه‌ها (با ارتفاع ۳ متر) تقریباً $2/3$ برابر میزان نسبت دریافت نسبی مجاز 2% است.

برای مشخصات مصالح اعضای تسلیم‌شونده و اعضای قاب از فولاد ST37 با مدول الاستیسیته 210 Gpa، نسبت پواسون $0/3$ ، تنش جاری شدن 240 Mpa و تنش نهایی 370 Mpa استفاده

جدول ۴- نتایج حاصل از تحلیل قاب‌ها

| Frame | F_{slip1} | F_{slip2} | V_1 | V_2 | K_{sec} | K | E_{FD} | E_D |
|----------|-------------|-------------|--------|--------|-----------|--------|----------|--------|
| | (kN) | (kN) | (kN) | (kN) | (kN/m) | (kN/m) | (kN.m) | (kN.m) |
| KBF | - | - | 232.35 | 232.35 | 1876.3 | 26856 | - | 404.22 |
| KBFD-40 | 32 | 64 | 179.23 | 300.2 | 2439.0 | 34944 | 116.77 | 500.60 |
| KBFD-60 | 48 | 96 | 191.12 | 323.4 | 2648.2 | 38276 | 173.17 | 538.47 |
| KBFD-80 | 64 | 128 | 204.18 | 343.4 | 2839.7 | 41610 | 228.81 | 584.22 |
| KBFD-100 | 80 | 160 | 216.11 | 347.3 | 2955.2 | 44943 | 283.43 | 619.09 |
| KBFD-120 | 96 | 192 | 228.11 | 372.70 | 3177.7 | 48271 | 336.44 | 657.09 |
| KBFD-140 | 112 | 224 | 239.79 | 411.98 | 3445.5 | 51585 | 388.34 | 701.69 |



شکل ۱۱- نمودار هیستریزیس قاب‌های KBF و KBFD

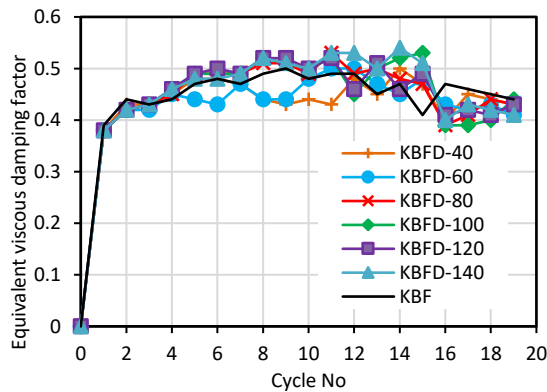
محصول شده می‌باشد و انرژی کرنشی الاستیک نیز با توجه به همین شکل به صورت معادله (۱۱) محاسبه می‌گردد:

$$E_{Si} = \frac{1}{8} (F_1 - F_2) \times (\Delta_1 - \Delta_2) \quad (11)$$

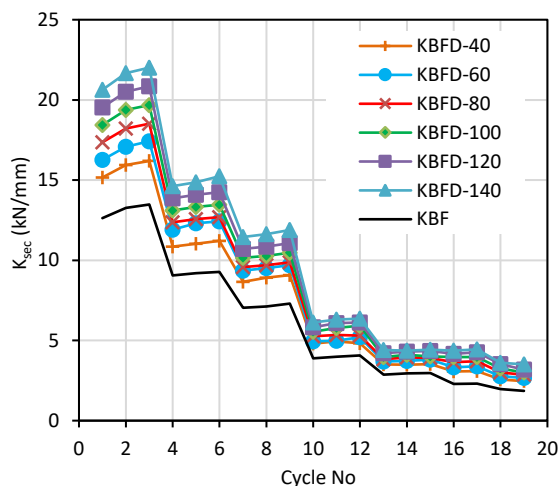
در ادامه ضریب میرایی ویسکوز معادل قاب‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل (۱۲) در حلقه هیستریزیس قاب در سیکل نام، انرژی مستهلک شده E_{Di} برابر با مساحت

همچنین در هر قاب انرژی مستهلک‌شده در طی بارگذاری چرخه‌ای به صورت مجموع مساحت‌های حلقه‌های منحنی‌های هیستریزس محاسبه شده است. در شکل (۱۵) مقایسه مقاومت نهایی، سختی الاستیک، سختی سکانتی و انرژی مستهلک‌شده قاب‌های مورد مطالعه ترسیم شده است. همان‌طور که از این شکل ملاحظه می‌گردد با افزایش (خطی) نیروی پیش‌تنیدگی در پیچ‌های میراگر اصطکاکی، مقاومت نهایی، سختی الاستیک، سختی سکانتی و انرژی مستهلک‌شده در قاب‌ها به صورت خطی افزایش یافته است.

با توجه به شکل (۱۵) و جدول (۴) حداکثر مقاومت نهایی KBFD-140 در مقایسه با KBF حدود ۷۷٪ افزایش یافته است. استفاده از میراگر اصطکاکی در قاب KBF باعث افزایش سختی سکانتی، سختی اولیه، مقاومت نهایی و اتلاف انرژی قاب می‌شود.



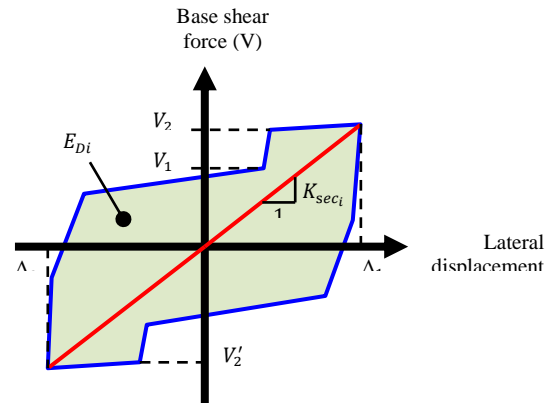
شکل ۱۳- ضریب میرایی ویسکوز معادل قاب‌ها



شکل ۱۴- سختی سکانتی قاب‌ها در هر سیکل از بارگذاری

در این صورت ضریب میرایی ویسکوز معادل قاب در این حلقه از نمودار هیستریزس با استفاده از معادله (۱۲) قابل محاسبه می‌باشد:

$$\xi_i = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{E_{Di}}{E_{Si}} \right) \quad (12)$$



شکل ۱۲- یک حلقه از منحنی هیستریزس سیستم [۴]

برای تمامی قاب‌ها و هر سیکل از بارگذاری ضریب میرایی ویسکوز معادل قاب‌ها محاسبه گردیده که در شکل (۱۳) گزارش شده است. همان‌طور که از این شکل ملاحظه می‌شود به صورت تقریبی در همه قاب‌ها از سیکل پنجم به بعد میرایی معادل ویسکوز قاب‌ها می‌تواند برابر ۰/۵ در نظر گرفته شود. از مقایسه نتایج مقادیر میزان میرایی معادل که در مطالعات گذشته به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت، سیستم پیشنهادی در این پژوهش قابلیت مناسبی در میزان جذب انرژی دارد.

علاوه بر ضریب میرایی ویسکوز معادل، سختی سکانتی قاب‌ها در هر سیکل از بارگذاری محاسبه شده است. سختی سکانتی قاب در سیکل نام با توجه به شکل (۱۲) به صورت معادله (۱۳) محاسبه می‌گردد:

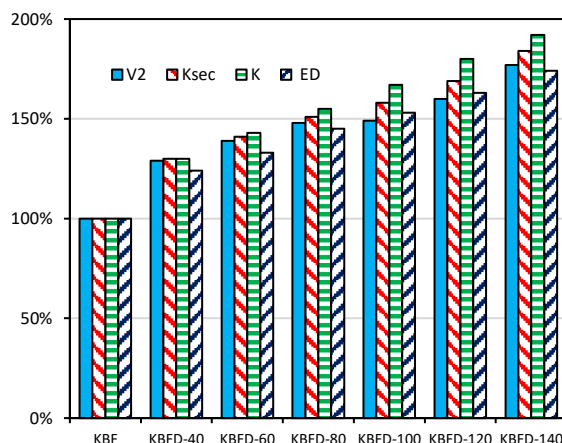
$$K_{sec_i} = \frac{\Delta V}{\Delta L} = \frac{V_2 - V_2'}{\Delta_1 - \Delta_2} \quad (13)$$

در شکل (۱۴) سختی سکانتی قاب در هر سیکل گزارش شده است. همان‌طور که از این شکل ملاحظه می‌شود، با در نظر گرفتن یک نوع قاب با نسبت ثابت $\frac{b}{B} = \frac{h}{H}$ با قوی‌تر شدن میراگر، سختی سکانتی قاب‌ها نیز افزایش یافته است. از این رو قاب KBFD-140 چه در سیکل‌های پایین بارگذاری و چه سیکل‌های بالای بارگذاری نسبت به بقیه قاب‌ها بیش‌ترین میزان سختی مماسی را دارد.

زانویی، تسلیم شده‌اند. بنابراین در مدل KBFD تنش و تغییرشکل در جان^۳ و بال‌های^۴ المان زانویی کاهش یافته و تنش به‌طور یکنواخت در لینک زانویی توزیع شده است.

در شکل (۱۷) توزیع تنش‌های فون‌میسز در همه مدل‌ها در انتهای تحلیل آورده شده است. از آنجا که تحلیل‌های چرخه‌ای تغییرمکان کنترل بودند لذا در یک تغییرمکان یکسان توزیع تنش‌ها در عضو زانویی نمونه‌های KBF و KBFD تقریباً یکسان بوده است؛ پس می‌توان نتیجه گرفت که میراگر اصطکاکی عملکردی موازی با عضو زانویی دارد؛ و عملکرد اصطکاکی در تغییر مکان‌های کوچک نیز فعال می‌گردد.

میراگر اصطکاکی می‌تواند در زلزله‌های متوسط و همچنین در زلزله‌های قوی بدون خراب‌شدگی در استهلاک انرژی لرزه‌ای نقش داشته باشد؛ برخلاف عضو زانویی که در زلزله‌های قوی با مکانیزم تسلیم عمل می‌کند.



شکل ۱۵- نسبت افزایش مقاومت نهایی، سختی الاستیک، سختی اسکاتی و اتلاف انرژی مدل‌های KBFD نسبت به KBF

در شکل (۱۶)، توزیع میدان‌های تنش فون‌میسز^۱ و نیز کرنش‌های پلاستیک معادل^۲ (PEEQ) برای سطح نیروی یکسان و معادل با مقاومت سیستم KBF، برابر با 186.0 kN گزارش شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌گردد که در سیستم KBF، توزیع پلاستیسیته عمدتاً در جان قسمت بالایی عضو زانویی اتفاق افتاده است که نشان‌دهنده ایجاد مفصل پلاستیک از نوع برشی می‌باشد. ولی در مدل‌های KBFD به‌صورت چشم‌گیری این توزیع تنش پلاستیک در عضو زانویی کاهش یافته است. به‌گونه‌ای که در مدل KBFD-40 و KBFD-60 می‌توان قدری آثار پلاستیک را در عضو زانویی مشاهده نمود؛ درحالی‌که با افزایش نیروی پیش‌تیدگی پیچ‌ها در میراگر این آثار ملاحظه نمی‌گردد.

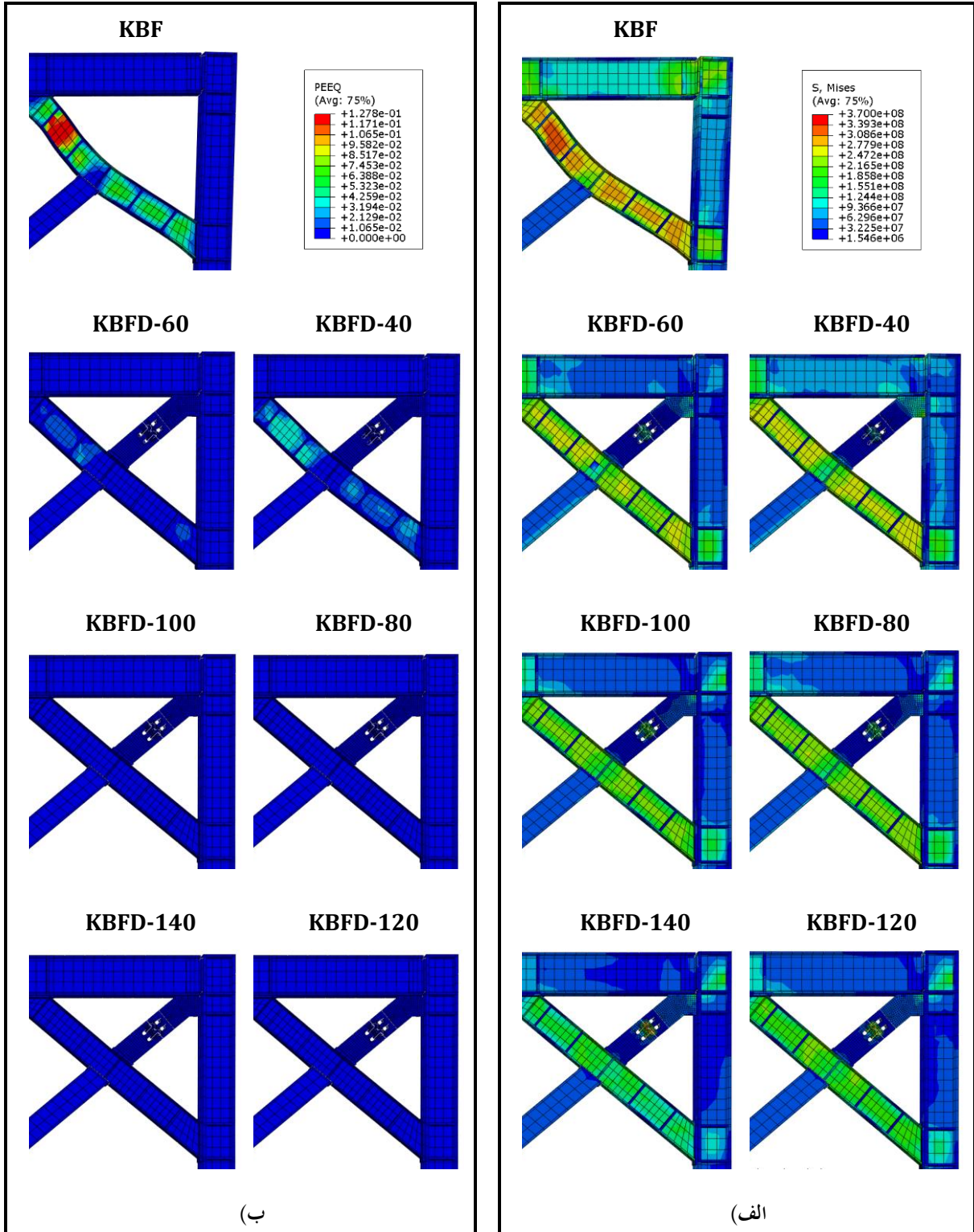
در شکل (۱۷) همچنین نمودار توزیع تنش‌های پلاستیک در انتهای بارگذاری تغییرمکان اعمالی در تحلیل چرخه‌ای آورده شده است. همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌گردد، هیچ‌گونه کمانش محلی و تسلیم‌شدگی در اعضای تیر و ستون رخ نداده است. درحالی‌که عضو زانویی همه مدل‌ها وارد منطقه پلاستیک شده است، و بیش‌تر ناحیه جان در KBF تسلیم شدند ولی هیچ تسلیم‌شدگی در بال‌ها صورت نگرفته است. همچنین در مدل‌های KBFD، بخش عمده‌ای از جان و همچنین بال‌های در طول لینک

³ Web

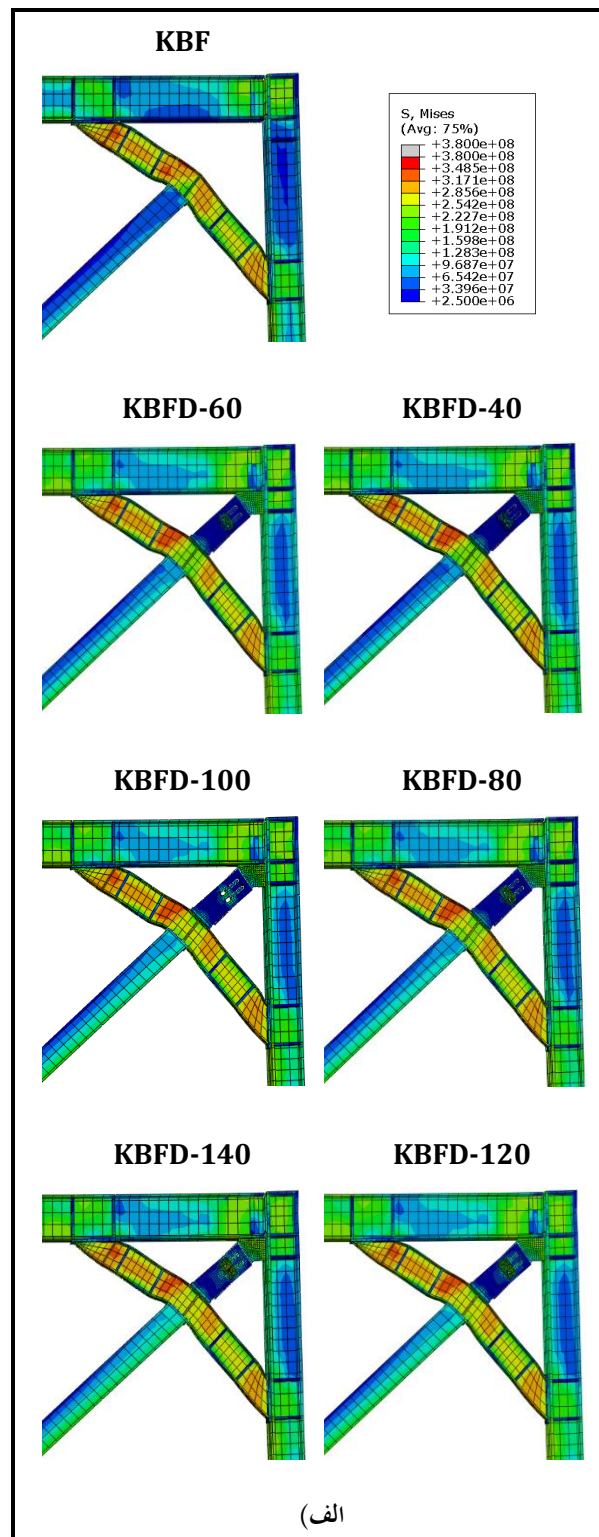
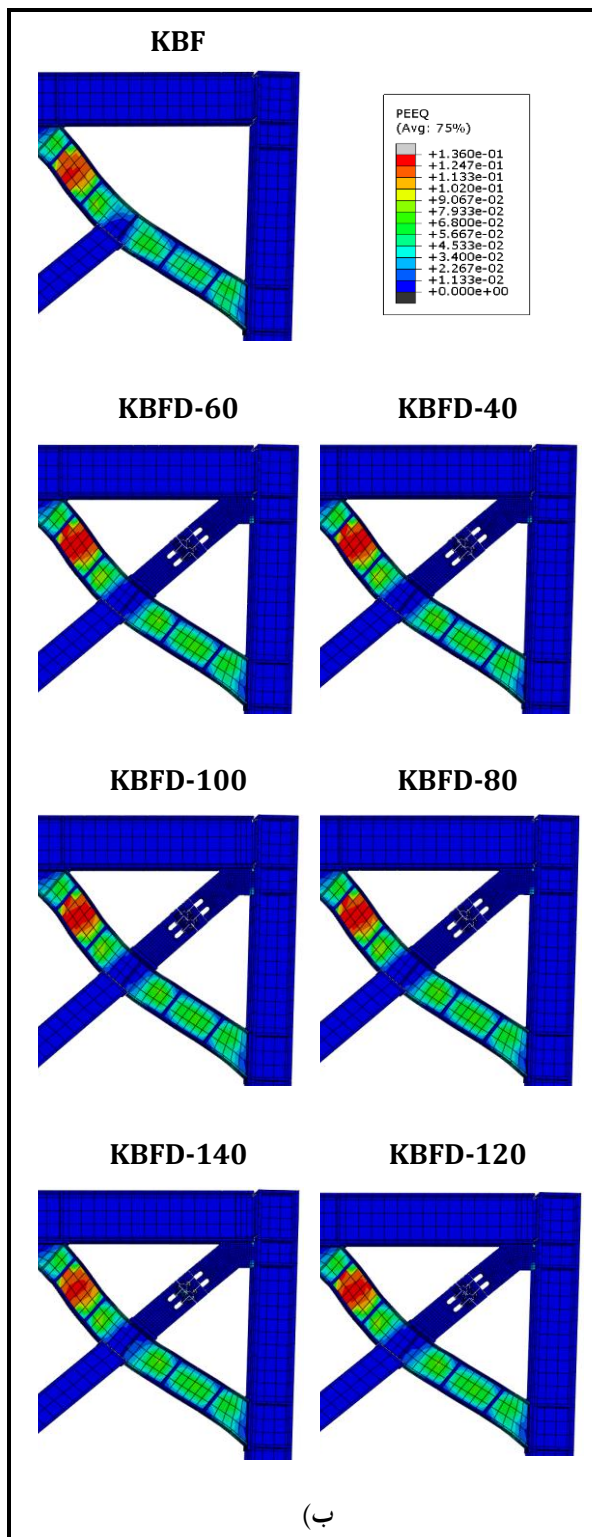
⁴ Flange

¹ Von Mises

² Equivalent Plastic Strain



شکل ۱۶- توزیع میدان‌ها در سطح معادل با مقاومت سیستم KBF: (الف) توزیع تنش‌های فون‌میسز، (ب) توزیع کرنش‌های پلاستیک معادل (PEEQ)



شکل ۱۷- توزیع میدان‌ها در انتهای بارگذاری تغییرمکانی: الف) توزیع تنش‌های فون‌میسز، ب) توزیع کرنش‌های پلاستیک معادل (PEEQ)

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، عملکرد لرزه‌ای سیستم مهاربندی زانویی مجهز به میراگر اصطکاکی خطی با سوراخ لوبیایی (KBFD) با مهاربند زانویی (KBF) مقایسه شده است. میراگر اصطکاکی یک دستگاه مستهلک‌کننده انرژی لرزه‌ای است که با ایجاد اصطکاک بین سطوح عمل می‌کند و بدون ایجاد خرابی در سازه، انرژی لرزه‌ای را جذب و مستهلک می‌نماید. میراگر اصطکاکی به دلیل عدم نیاز به مصالح و تکنولوژی خاص، هزینه ساخت نسبتاً پایین و رفتار هیستریزس مناسب، به عنوان یکی از بهترین راهکارها برای بهبود رفتار لرزه‌ای سازه‌ها شناخته می‌شود. به کارگیری این نوع میراگر، یکی از مؤثرترین روش‌های استهلاک انرژی لرزه‌ای وارد بر سازه‌ها است. این میراگر بر اساس اصول میراگر کولمب یا ترمز اصطکاکی طراحی شده است و انرژی جنبشی را از طریق اصطکاک به حرارت تبدیل می‌کند، بدین ترتیب عملکرد لرزه‌ای سازه را بهبود می‌بخشد.

برای صحت‌سنجی مدل المان محدود، نتایج المان محدود با نتایج آزمایشگاهی یک قاب KBF و نیز نتایج آزمایشگاهی مربوط به دو میراگر اصطکاکی مقایسه و صحت نتایج مدل المان محدود تأیید گردیده است.

برای ارزیابی و مقایسه با استفاده از نرم‌افزار المان محدود تعداد شش قاب KBFD به همراه یک قاب KBF درای مقاطع مشابه در نظر گرفته شده‌اند. میزان نیروی پیش‌تندگی میراگر اصطکاکی به عنوان یک پارامتر متغیر، در قاب‌های KBFD مورد بررسی قرار گرفته است. بر روی این مدل‌ها دو نوع تحلیل انجام گرفته است: تحلیل استاتیکی یکنوا (پوش‌آور) و تحلیل چرخه‌ای. با استفاده از تحلیل یکنوا پارامترهای لرزه‌ای سازه همچون سختی اولیه، شکل‌پذیری و ضریب رفتار سازه محاسبه شده است. نتایج حاصله نشان داد که استفاده از میراگر اصطکاکی باعث افزایش پارامترهای لرزه‌ای همچون شکل‌پذیری و ضریب رفتار KBFD نسبت به KBF می‌شود به طوری که این افزایش در KBFD متناسب با نیروی پیش‌تندگی در میراگر اصطکاکی است. لذا بر اساس نتایج به دست آمده ضریب رفتار KBFD مابین ۷/۹ تا ۹ پیشنهاد می‌گردد. همچنین برای بررسی بیش‌تر عملکرد لرزه‌ای و بررسی رفتار هیستریزس مدل‌ها، تحلیل‌های چرخه‌ای بر روی مدل‌ها انجام پذیرفته است. با انجام این تحلیل‌های چرخه‌ای ملاحظه شد با افزایش طول لینک زانویی مقدار انرژی مستهلک‌شده، سختی الاستیک، سختی سکانتی و نیز مقاومت در قاب‌ها کاهش یافته است ولی با انتخاب میراگر قوی‌تر و ثابت نگه داشتن طول لینک

زانویی، این پارامترها روند افزایشی داشته‌اند. علاوه بر این میرایی ویسکوز معادل و نیز سختی مماسی قاب‌ها در هر سیکل برای پیکربندی قاب‌های پیشنهادی استخراج و گزارش شده‌اند؛ همچنین برای مدل عددی پیکربندی پیشنهادی ضریب میرایی ویسکوز در حدود ۵۰٪ می‌باشد.

با توجه به نتایج به دست آمده، ترکیب KBF به همراه میراگر اصطکاکی در پیکربندی پیشنهادی تأثیر معناداری در عملکرد قاب دارد. سختی الاستیک (اولیه)، سختی سکانتی، جذب انرژی، مقاومت نهایی در پیکربندی پیشنهادی با افزایش نیروی پیش‌تندگی در پیچ‌ها افزایش یافته به نحوی که مقاومت نهایی، جذب انرژی، سختی الاستیک و سختی سکانتی KBFD-140 در مقایسه با KBF به ترتیب حدود ۷۷٪، ۷۴٪، ۹۲٪ و ۸۴٪ افزایش یافته است.

- [14] Mualla, I.H., and Belev, B. (2002), "Performance of steel frames with a new friction damper device under earthquake excitation", *Engineering Structures*, 24(3), pp. 365-371.
- [15] Hemati, S., Tehranizadeh, M., and Khaleghian, F. (2011), "Performance Assessment of a New Friction Damper for Seismic Protection of Steel Moment-Resisting Frames", 8th International Conference of Structures Dynamic, EUROLYN.
- [16] Abolmaali, A., Kukreti, A., Motahari, A., and Ghassemieh, M. (2009), "Energy dissipation characteristics of semi-rigid connections", *Journal of Constructional Steel Research*, 65(5), pp. 1187-1197.
- [17] Mirtaheri, M., Zandi, A.P., Samadi, S.S., and Samani, H.R. (2011), "Numerical and experimental study of hysteretic behavior of cylindrical friction dampers", *Engineering Structures*, 33(12), pp. 3647-3656.
- [18] Kim, J., Choi, H., and Min, K.W. (2011), "Use of rotational friction dampers to enhance seismic and progressive collapse resisting capacity of structures", *The structural Design of Tall and Special Buildings*, 20(4), pp. 515-537.
- [19] Monir, H.S., and Zeinali, K. (2013), "A modified friction damper for diagonal bracing of structures", *Journal of Constructional Steel Research*, 87, pp. 17-30.
- [20] Gholizad, A., and Kamrani Moghaddam, P. (2014), "Friction damper dynamic performance in seismically excited knee braced steel frames", *International Journal of Civil Engineering*, 12(1), pp. 32-40.
- [21] Nikoukalam, M.T., Mirghaderi, S.R., and Dolatshahi, K.M. (2017), "Shear slotted bolted connection. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 26(3), p.e 1313.
- [22] Taiyari, F., Mazzolani, F.M., and Bagheri, S. (2019), "Damage-based optimal design of friction dampers in multistory chevron braced steel frames", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119, pp. 11-20.
- [23] Hashemi, B.H., and Alirezaei, M. (2018), "On the Evaluation of the use of EKBS to improve seismic performance of steel frames", *International Journal of Steel Structures*, 18(1), pp. 25-37.
- [۲۴] صادقی، ع.، سهرابی، م.ر.، و کاظمی، م. (۱۴۰۳) "توسعه روش مبتنی بر مؤلفه برای اتصالات صفحه انتهایی اصطکاکی"، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد. دوره ۱۸، شماره ۴۳، ص ۳۴-۴۵.
- [25] Bhaskararao, A.V., and Jangid, R.S. (2006), "Harmonic response of adjacent structures connected with a friction damper", *Journal of Sound and Vibration*, 292(3-5), pp. 710-725.
- [۲۶] عسگری، ه.، زهرانی، م.، وجدیان، م.، و میرحسینی، م. (۱۴۰۲). "بررسی عددی میراگر دوسطحی با ورق روسری در اتصال خمشی تیر به ستون"، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد. دوره ۱۷، شماره ۴۱، ص ۵-۲۶.
- [1] Mahmoudi, M., Montazeri, S., and Abad, M.J.S. (2018), "Seismic performance of steel X-knee-braced frames equipped with shape memory alloy bars", *Journal of Constructional Steel Research*, 147, pp. 171-186.
- [۲] خانی، ا.م.، و زهرانی، م. (۱۴۰۳) "افزودن بهینه المان اینترتر به میراگرهای جرمی تنظیم‌شده به منظور کنترل لرزه‌ای سازه‌های فولادی به وسیله الگوریتم ازدحام ذرات"، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد. دوره ۱۸، شماره ۴۳، ص ۱۷-۳۳.
- [3] Soong, T.T., and Dargush, G.F. (1997), "Passive energy dissipation systems in structural engineering", (*No Title*).
- [4] Ghafouri-Nejad, A., Alirezaei, M., Mirhosseini, S.M. and Zeighami, E. (2021), "Parametric study on seismic response of the knee braced frame with friction damper", In *Structures*, Vol. 32, pp. 2073-2087, Elsevier.
- [5] Hosseini Hashemi, B., and Alirezaei, M. (2016), "Eccentrically knee bracing: Improvement in seismic design and behavior of steel frames", *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 18(3), pp. 149-156.
- [۶] خانی، ا.م.، طاهری، م.، و ایپکیچی، س. (۱۴۰۳)، "بررسی امکان‌سنجی استفاده از روش زمان دوام در ارزیابی قاب‌های خمشی فولادی مجهز به میراگر جرمی تنظیم‌شده"، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد. دوره ۱۸، شماره ۴۳، ص ۵۸-۷۵.
- [7] Cheraghi, A., and Zahrai, S.M., (2016), "Innovative multi-level control with concentric pipes along brace to reduce seismic response of steel frames", *Journal of Constructional Steel Research*, 127, pp. 120-135.
- [8] Prepared by the Building Seismic Safty Council For Federal Emergency Management Agency, FEMA 273-Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Washington DC, US, 1997.
- [9] Bayat, M., and Zahrai, S. (2016), "Impact of friction dampers on improving seismic performance of rigid and semi-rigid steel frames", *Structeres Steel*, vol. 12, no. 19 pp. 67-74.
- [10] Tyler, R.G. (1977), "Damping in building structures by means of PTFE sliding joints", *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 10(3), pp. 139-142.
- [11] Pall, A.S., Marsh, C., and Fazio, P. (1980), "Friction joints for seismic control of large panel structures", *Journal of Prestressed Concrete Institute*, 25(6), pp. 38-61.
- [12] Fitzgerald, T.F., Anagnos, T., Goodson, M., and Zsutty, T. (1989), "Slotted bolted connections in aseismic design for concentrically braced connections", *Earthquake Spectra*, 5(2), pp. 383-391.
- [13] Cherry, S., and Filiatrault, A. (1993), "Seismic response control of buildings using friction dampers", *Earthquake Spectra*, 9(3), pp. 447-466.



[۲۷] آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله-استاندارد ۲۸۰۰، (۱۳۹۳)، ویرایش چهارم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، وزارت مسکن و شهرسازی.

[28] Rojahn, C., Whittaker, A.S., Hart, G.C., and Bertero, V.V. (1995), "Structural response modification factors", Vol. 19. The Council.

[29] Whittaker, A.S., Uang, C.M., and Bertero, V.V. (1987), "Earthquake simulation tests and associated studies of a 0.3-scale model of a six-story eccentrically braced steel structure", Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California.

[30] Code, U.B., (1997), "Earthquake regulations for seismic isolated structures", In International Conference of Building Officials, Whitter (CA, USA).

[31] Balendra, T., Lim, E.L., and Lee, S.L. (1994), "Ductile knee braced frames with shear yielding knee for seismic resistant structures", Engineering Structures, 16(4), pp. 263-269.

[32] Huang, Z., Qing-song, L., and Long-zhu, C. (2005), "Elastoplastic analysis of knee bracing frame", Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 6, pp. 784-789.