



## بهبود شکل‌پذیری و رفتار چرخه‌ای مهاربند شکاف‌دار با استفاده از نبشی فولادی

سید مهدی زهرائی<sup>۱</sup>، عبدالله چراغی<sup>۲</sup>  
(تاریخ دریافت: ۹۳/۰۲/۱۴، تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۶/۱۴)

### چکیده

مهاربندهای همگرا یکی از متداول‌ترین سیستم‌های باربر جانبی سازه‌ها می‌باشند که به دلیل سهولت اجرا و هزینه کمتر نسبت به قاب‌های خمشی همواره مورد توجه بوده‌اند، ولی رفتار غیرشکل‌پذیر آنها پس از کمانش عضو فشاری سبب افت محسوس عملکرد آنها می‌گردد. لذا همواره محققین مختلف سعی در ارائه راهکارهایی جهت مقابله با این ضعف نموده‌اند. در این مقاله اثر کاربرد نبشی فولادی در مهاربند شیاردار قبل از صفحه‌اتصال کناری جهت جلوگیری از کمانش زود هنگام آن مورد مطالعه قرار گرفته است. جهت شناسایی رفتار عضو پیشنهادی، از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی توسط نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS استفاده گردید. نتایج حاکی از بهبود عملکرد چرخه‌ای و افزایش شکل‌پذیری مهاربند همگرا بوده که با توجه به سهولت اجرای آن می‌تواند به عنوان سیستم موثر در استهلاک انرژی زلزله بکار رود. مقایسه منحنی‌های هیستریزس نمونه پیشنهادی با مهاربند معمولی گویای رفتار متقارن و پایدارتر بوده و تا تغییر مکان حدود ۳ سانتیمتر نیز افت مقاومت و سختی در آن دیده نمی‌شود، لیکن مهاربند معمولی در تغییر مکان چرخه‌ای حدود ۱ سانتیمتر دچار کمانش شده است.

### کلمات کلیدی

مهاربند شکاف‌دار، نبشی فولادی، تحلیل استاتیکی غیرخطی، رفتار چرخه‌ای، شکل‌پذیری

## Improving Ductility and Cyclic Performance of Slit Brace Using Steel Angle

S. M. Zahrai, A. Cheraghi

### ABSTRACT

Concentrically braced frames are among the most common systems due to ease of implementation and low cost compared to the moment resisting frames, however non-ductile behavior after buckling of compression element is noticeable. So, various research projects have been conducted to deal with this shortcoming. In this paper, the effect of steel angle in slit brace is considered to prevent its buckling. Stresses and displacement of structures using nonlinear static analysis by finite element software "ABAQUS" are evaluated. Results indicate improved cyclic performance and ductility of CBF systems. In addition, comparing the hysteresis loop of the proposed sample with that of normal braces shows symmetric and stable rational behavior where strength and stiffness degradations are not observed in the displacement up to about 3 cm while the normal brace buckles in about 1 cm.

### KEYWORDS

Slit brace, Steel angles, Nonlinear static analysis, Cyclic behavior, Ductility

۱- استاد قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌های عمرانی دانشکده عمران، دانشگاه تهران، mzahrai@ut.ac.ir (نویسنده مسئول)

۳- دانشجوی دکترای عمران-سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک



که توسط محققین مختلف مورد ارزیابی واقع گردیده است. Tirca و همکارانش [۳] تحقیقات زیادی بر روی اصلاح رفتار مهاربند همگرا با استفاده از نوعی اتصالات مفصلی خاص انجام دادند. نتایج حاکی از بهبود عملکرد لرزه‌ای مهاربند با تکیه بر تمرکز مفاصل پلاستیک در اتصالات و الاستیک ماندن رفتار عضو اصلی مهاربند داشت. در بررسی دیگر، تحقیقات Malek [۴] منجر به ارائه گونه نوینی از میراگرهای هیستریزس به صورت حلقه فولادی با شکل‌پذیری مناسب گردید. علاوه بر این می‌توان به تحقیقات Behkam Rad [۵] در استفاده از المان شکل‌پذیر قوطی شکل اشاره نمود که نتایج آن حاکی از عملکرد موثر المان پیشنهادی در افزایش شکل‌پذیری رفتار مهاربند می‌باشد.

Kafi و همکارانش [۶] مطالعات عددی و آزمایشگاهی استفاده از المان لوله جهت افزایش شکل‌پذیری و بهبود عملکرد مهاربندهای همگرا را مورد ارزیابی قرار دادند که نتایج حاکی از تعویق در کمانش عضو فشاری و در نتیجه رفتار لرزه‌ای مناسب‌تر آن می‌باشد. در تحقیق دیگر Kalantari و Alizadeh مطالعات تحلیلی بر روی بهسازی رفتار دینامیکی مهاربند همگرا با استفاده از حلقه فولادی را بررسی کردند. آنها دریافتند که افزایش عرض و ضخامت حلقه سبب افزایش ظرفیت باربری و افزایش قطر حلقه سبب کاهش آن می‌گردد. همچنین تحقیقات نشان داد که استفاده از حلقه موجب کاهش سختی و برش پایه سازه و نیز افزایش جابجایی و زمان تناوب سیستم می‌گردد [۷]. مطالعات تکمیلی بر روی المان لوله به منظور دستیابی به المان قویتر و در دسترس، سبب ارائه گونه نوینی از فیوزها با استفاده از حلقه‌های متحدالمرکز لوله‌درلوله گردید. یافته‌ها حاکی از تاثیر زیاد ضخامت و نسبت قطر المان‌های تودرتو بر عملکرد اینگونه سیستم‌ها می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد رفتار شکل‌پذیر این المان سبب جذب قسمت عمده‌ای از انرژی وارد به سازه بوده و از ورود سایر اعضا به مرحله غیرالاستیک جلوگیری خواهد نمود [۸]. احمدی و همکارانش میراگر هیستریزس نوینی با استفاده از تعدادی صفحات دایره‌ای شکل دنداندار که

مهاربندهای همگرا از جمله متداول‌ترین سیستم‌های لرزه‌ای می‌باشند. سختی بسیار بالا و سهولت اجرا سبب استفاده گسترده از این گونه مهاربندها به عنوان سیستم اصلی باربر جانبی سازه‌ها گردیده است. همچنین تمرکز خرابی در تعداد کمی از اعضا پس از زلزله سبب کاهش هزینه‌های تعمیر و بازسازی در مقایسه با قاب‌های خمشی می‌گردد. از طرف دیگر ضعف عمده این نوع مهاربندها در عدم رفتار شکل‌پذیر آنها طی بارگذاری لرزه‌ای به واسطه کمانش زود هنگام عضو فشاری و زوال شدید سختی آنهاست که در تمامی انواع این نوع مهاربند از جمله مهاربند قطری، ضربدری و شورون به عنوان نقطه ضعف اصلی آنها شناخته می‌شود. به این دلیل همواره تحقیقات فراوانی بر روی رفتار لرزه‌ای و توسعه راهکارهای بهبود عملکرد این گونه مهاربندها انجام گردیده است.

تحقیقات صورت‌گرفته بر روی اصلاح رفتار مهاربندهای همگرا را می‌توان در ۲ قالب کلی طبقه‌بندی نمود. دسته اول ایده استفاده از مهاربندهای کمانش‌ناپذیر یا مقید شده در برابر کمانش می‌باشد. این گزینه از جمله مواردی بود که جهت اصلاح رفتار مهاربندها و تطبیق رفتار فشاری و کششی آنها توسعه یافته است. جهت ساخت یک مرکز تحقیقاتی در دانشگاه برکلی آزمایشاتی توسط Lopez و همکارانش [۱] بر روی رفتار مهاربندهای کمانش‌ناپذیر انجام گردید. آزمایشات نشان داد که عملاً صفحات اتصال باعث ایجاد یک دهانه صلب می‌شوند و باید دوران گره‌ها به علت صلبیت بالای صفحه اتصال را در تحلیل و طراحی لحاظ کرد. تحقیقات میلر و همکاران سبب ایجاد نسل جدیدی از اینگونه مهاربندها از ترکیب آلیاژهای هوشمند<sup>۱</sup> و مهاربندهای کمانش‌ناپذیر با قابلیت ترمیم و استهلاک انرژی بالا با عنوان مهاربند مرکزگرا<sup>۲</sup> گردید [۲].

دسته دوم که در این مقاله نیز بیشتر بر روی آن تمرکز گردیده، مبتنی بر ایده کاربرد فیوزها و تمرکز خسارت در آنها جهت جلوگیری از آسیب به سایر اعضای اصلی بوده

<sup>1</sup> SMA

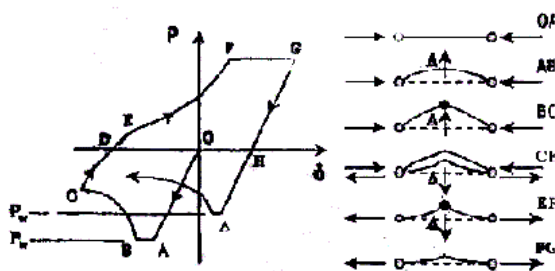
<sup>2</sup> SC-BRB



لازم به ذکر است که با توجه به بررسی تاثیر ایجاد شیار روی عضو مهاربند در تحقیقات معدود انجام شده لیکن استفاده از نبشی فولادی در ترکیب با مقطع کاهش یافته در جان مقطع ناودانی به عنوان عضو موثر در استهلاک انرژی و افزایش شکل پذیری مهاربند همگرا تاکنون بررسی نگردیده که توسط مولفین در این مقاله ارائه گردیده است. علاوه بر این مزیت سیستم پیشنهادی در عملکرد شکل پذیر، اجرای نسبتاً آسان، کم هزینه و با استفاده از مصالح در دسترس بوده که در ادامه ارزیابی می شود.

## ۲- دیدگاه کلی تحقیق

با بررسی انجام گرفته بر روی رفتار مهاربندهای همگرا ملاحظه می گردد که شکل پذیری و عملکرد لرزه ای آنها به شدت تحت تاثیر رفتار عضو فشاری بوده و کاهش شدید سختی و مقاومت پس از کمانش المان فشاری سبب افت محسوس عملکرد آن طی بارگذاری چرخه ای می گردد (شکل (۱)).



شکل (۱): نمودار رفتار مهاربند همگرا طی بارگذاری چرخه ای

[۱۳]

لذا اتخاذ راهکاری جهت جلوگیری از کمانش عضو و یا به تاخیر انداختن آن سبب بهبود شکل پذیری آن خواهد شد. در این مقاله با استفاده از ظرفیت خمشی نبشی فولادی به عنوان راهکاری اجرایی و در دسترس، سعی در اصلاح رفتار مهاربندهای همگرا گردیده است. ظرفیت خمشی نبشی که متأثر از عرض و ضخامت مقطع آن می باشد به گونه ای انتخاب شده که کمتر از ظرفیت کمانشی عضو فشاری باشد و عملاً احتمال وقوع کمانش در عضو اصلی منتفی گردد. تغییر زاویه نبشی تحت

حول محور لوله گذرنده از مرکز دوران می کنند ارائه نمودند. میله فولادی از یکسو به اعضای مهاربندی و از طرف دیگر به تیر بالایی قاب متصل بوده و روش کار آن بر پایه استهلاک انرژی بر مبنای استفاده از مکانیزم خمش و لهیدگی در صفحات فولادی می باشد. نتایج تحلیلی گویای عملکرد مناسب آنها و پایداری منحنی های هیستریزس بوده که حاکی از اتلاف انرژی مناسب این سیستم می باشد [۹].

همچنین Franco و همکارانش یک گونه میراگر هیستریزس دیگر بر مبنای استفاده از خواص پلاستیک فولاد ارائه نمودند. اساس کار میراگر پیشنهادی آنها بر مبنای کاهش قطر و ضخامت عضو مهاربند در قسمت میانی و اتلاف انرژی بر اثر وقوع پیچش در این قسمت می باشد. طراحی این میراگر به گونه ایست که در برابر خمش مقید گردیده و تنها اجازه پیچش به المان داده می شود. از مزایای این نوع مهاربند به مقاومت خستگی بالا و نیز عدم کمانش مهاربند در نواحی تسلیمی می توان اشاره کرد [۱۰]. ایده استفاده از ظرفیت خمشی اعضای فولادی سرد نورد شده U شکل توسط سوزوکی و همکاران ارزیابی گردید. نتایج مطالعه عددی و آزمایشگاهی گویای رفتار مناسب این نوع میراگرها و ظرفیت اتلاف انرژی بالا و تحمل تغییر شکل های بزرگ در این اعضا بود [۱۱].

ایده ایجاد شیار بر روی جداره مقاطع قوطی شکل به عنوان نوعی میراگر فلزی در سال ۲۰۱۰ توسط Benavent-Climent پیشنهاد گردید. در این تحقیق بر روی قسمتی از عضو مهاربند شیارهایی به منظور تغییر شکل و اتلاف انرژی طی بارگذاری لرزه ای ایجاد گردیده است. شکل، تعداد و ابعاد این شیارها از عوامل تاثیرگذار بر رفتار عضو بوده و در طراحی باید مورد توجه قرار گیرد. نتایج تحقیقات گویای رفتار مناسب و پایدار این سیستم تحت بارگذاری چرخه ای بوده که پتانسیل استهلاک انرژی بالای آن را نشان می دهد [۱۲].

تحقیقاتی از این دست جهت بهبود عملکرد لرزه ای این سیستم باربر جانبی همواره در حال توسعه بوده و ایده هایی نظیر روش ارائه شده در این مقاله رو به گسترش می باشد.

جهت طراحی اندازه و تعداد نبشی بر اساس جدول (۲) قابل محاسبه خواهد بود.

جدول (۲): نیروی مجاز برای مقاطع مختلف نبشی (L طول

نبشی بر حسب سانتیمتر)

نیروی مجاز (kN)	مقطع مهاربند
۰/۳L	UNP8
۰/۳۸L	UNP10
۰/۴۵L	UNP12
۰/۵۳L	UNP14
۰/۶L	UNP16
۰/۷L	UNP18
۰/۸L	UNP20

با توجه به اعداد جدول (۲) مشاهده می‌شود که ظرفیت خمشی نبشیهای موجود در بازار پایین بوده و قادر به تامین ظرفیت خمشی مورد نیاز نمی‌باشند. لذا دو راهکار می‌تواند در دستور کار قرار گیرد:

راه اول اینکه از مقاطع نورد شده با ضخامت بیشتر استفاده گردد که با توجه به عدم دسترسی گسترده به اینگونه مقاطع هزینه آن بالا خواهد بود.

گزینه دوم در کاهش ظرفیت محوری مقطع اصلی مهاربند و جبران بخشی از این ضعف به وسیله نبشی فولادی بوده که در این مقاله نیز مورد توجه قرار گرفته است. روش کار به این صورت است که در جان ناودانی شکافی ایجاد شده و بخشی از این کاهش در انتقال نیروی محوری توسط ظرفیت نبشی جبران گردیده است (شکل (۲)). روند طراحی نیز به گونه‌ایست که نهایتاً ظرفیت نیروی محوری در مقطع کاهش یافته و نبشی، از ظرفیت کمانش مقطع اصلی مهاربند کمتر بوده و خسارت در این ناحیه متمرکز گردد.

در این تحقیق ۷ مدل مهاربند قطری به شرح جدول (۳) مورد آزمایش قرار گرفت. در کلیه نمونه‌ها مقطع مهاربند از ترکیب ۲ پروفیل ناودانی نمره ۱۴ به عنوان مقطعی پرکاربرد و متداول در سازه به صورت قوطی شکل انتخاب

بارگذاری چرخه‌ای سبب اتلاف انرژی و تمرکز خسارت در این ناحیه شده و در صورت طراحی و اجرای مناسب، متضمن رفتار مناسب تر قاب خواهد بود.

جهت انتخاب صحیح نمره نبشی لازم است که در ابتدا ظرفیت کمانشی عضو مهاربند محاسبه و سپس ضخامت و عرض نبشی محاسبه گردد. با بررسی مقاطع دابل ناودانی که از متداولترین اعضای مورد استفاده در مهاربندها می‌باشند ظرفیت کمانشی این اعضا به طول L به شرح جدول (۱) محاسبه گردیده است. در نهایت با یافتن بار کمانشی مقطع ناودانی قادر به محاسبه اساس مقطع مورد نیاز نبشی مطابق روابط (۱) و (۲) خواهیم بود. در واقع ظرفیت خمشی پلاستیک نبشی باید کمتر از تفاوت بار کمانشی مهاربند و ظرفیت تسلیم آن در طول شیار انتخاب گردد تا نقش فیوز را اجرا نماید.


جدول (۱): محاسبه ممان اینرسی و بار کمانشی مقاطع

پرکاربرد در مهاربندهای همگرا

سایز مقطع	$I_x$ (cm <sup>4</sup> )	$I_y$ (cm <sup>4</sup> )	بار کمانش مقطع (kN)
2UNP8	۲۱۲	۳۱۶	$(۴/۳۹ \times ۱۰^۷)/L^۲$
2UNP10	۴۱۲	۴۸۰	$(۸/۵۳ \times ۱۰^۷)/L^۲$
2UNP12	۷۲۸	۷۷۵	$(۱۵/۰۷ \times ۱۰^۷)/L^۲$
2UNP14	۱۲۱۰	۱۰۸۵	$(۲۲/۴۷ \times ۱۰^۷)/L^۲$
2UNP16	۱۸۵۰	۱۵۷۵	$(۳۲/۶۱ \times ۱۰^۷)/L^۲$
2UNP18	۲۷۰۰	۲۲۹۸	$(۴۷/۵۸ \times ۱۰^۷)/L^۲$
2UNP20	۳۸۲۰	۳۰۰۹	$(۶۲/۳ \times ۱۰^۷)/L^۲$

$$F = \frac{\pi^2 EA}{\lambda^2}; \lambda = \frac{kL}{r} \rightarrow P < F \quad (1)$$

جائیکه k ضریب لاغری یا طول موثر و r شعاع ژیراسیون مقطع است.

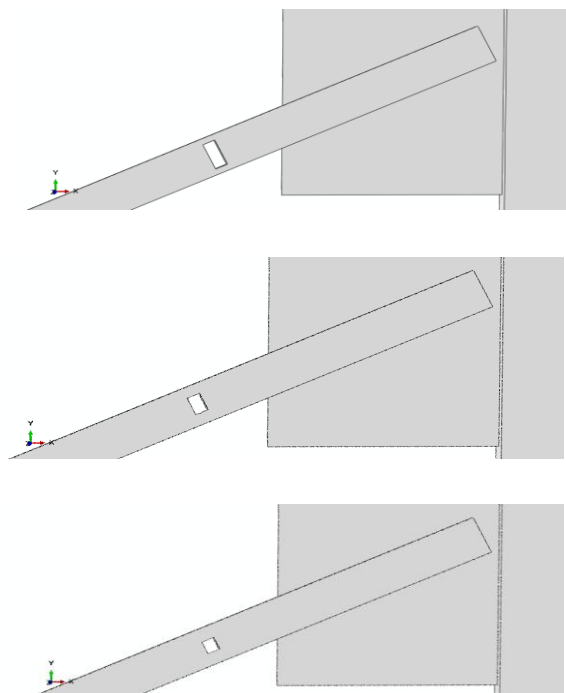


$$\rightarrow \sigma = \frac{M}{S} \quad (2)$$

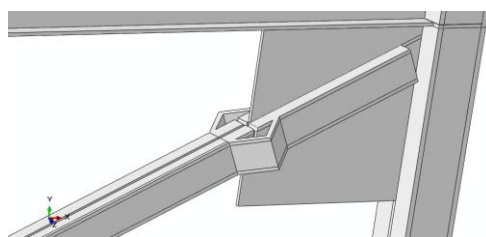
با استفاده از بار کمانشی مقاطع مطابق جدول (۱) و تصویر نیرو در جهت عمود بر بال نبشی، اساس مقطع مورد نیاز



بارگذاری چرخه‌ای از نبشی فولادی نمره ۱۰ و ۲۰ استفاده گردید.



شکل (۳): نمونه‌های دوم تا چهارم



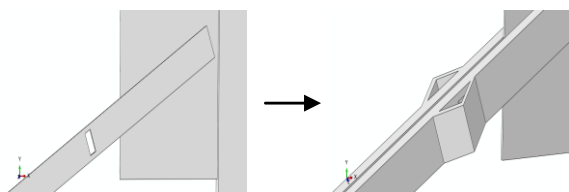
شکل (۴): نمونه پنجم

با افزودن نبشی فولادی به عنوان عضو مستهلک‌کننده انرژی جهت تمرکز تنش در آن و کاهش تنش در اعضای اصلی، انتظار بهبود رفتار چرخه‌ای قاب می‌رود. بدین منظور با استفاده از روش اجزای محدود به بررسی عملکرد چرخه‌ای نمونه‌ها پرداخته شد.

### ۳- مصالح بکار رفته در تحلیل

فولاد بکار رفته از نوع ST37 بوده و منحنی تنش-کرنش آن به صورت دوخطی و مطابق شکل (۵) در نظر گرفته شده است. مصالح مورد استفاده به صورت غیرخطی مدل

گردید. جهت بررسی رفتار لرزه‌ای مهاربند معمولی در بارگذاری چرخه‌ای، در نمونه اول مهاربند از مقطع 2UNP14 بدون هیچگونه تغییر خاص، مدل‌سازی و مورد ارزیابی واقع گردید. در مدل‌های دوم تا چهارم (شکل (۳)) یک شکاف در جان مقطع مهاربند در ابعاد مختلف در نزدیکی محل اتصال به صفحه اتصال کناری جهت کاهش ظرفیت محوری مهاربند به کمتر از نیروی کماتش آن ایجاد گردید.



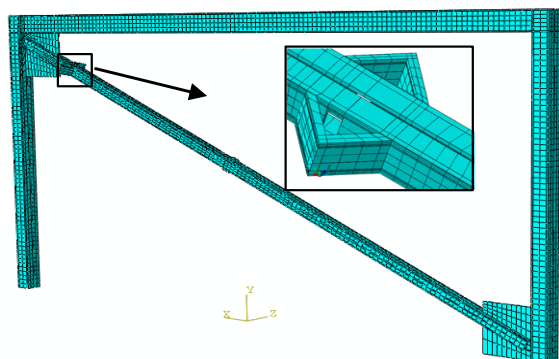
شکل (۲): ایده اصلی تحلیل

جدول (۳): نمونه‌های بکار رفته در تحلیل

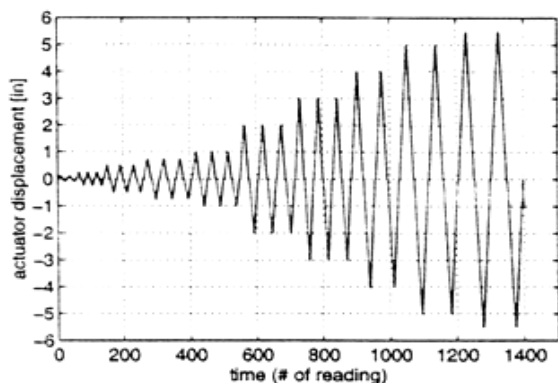
قاب مورد آزمایش	طول	ارتفاع	مقطع مهاربند	خصوصیات نمونه
نمونه ۱	۵	۳	2UNP14	معمولی
نمونه ۲	۵	۳	2UNP14	شکاف به طول ۱/۳ بعد جان مقطع ناودانی
نمونه ۳	۵	۳	2UNP14	شکاف به طول ۱/۲ بعد جان مقطع ناودانی
نمونه ۴	۵	۳	2UNP14	شکاف کامل در عرض جان مقطع ناودانی
نمونه ۵	۵	۳	2UNP14	برش کامل مقطع ناودانی + نبشی اتصال ۲۰
نمونه ۶	۵	۳	2UNP14	شکاف کامل در جان ناودانی + نبشی تقویت ۱۰
نمونه ۷	۵	۳	2UNP14	شکاف کامل در جان ناودانی + نبشی تقویت ۲۰

در مدل پنجم جهت بررسی عملکرد نبشی فولادی در بارگذاری چرخه‌ای، مقطع مهاربند کاملاً برش داده شد و با نبشی دابل اتصال آن برقرار گردید (شکل (۴)). نهایتاً در مدل‌های ششم و هفتم جهت تقویت نسبی در مقطع کاهش یافته و نیز جلوگیری از پارگی در جان مهاربند طی

گردد که بر طبق آن چرخه‌های بارگذاری روی نمونه‌های آزمایشگاهی بر مبنای  $0.125-0.5-1-2-3$  برابر تغییر مکان تسلیم در سه چرخه و بیشتر از آن تا تغییر مکان ماکزیمم در ۲ چرخه انجام می‌گردد (شکل (۷)) [۱۵].



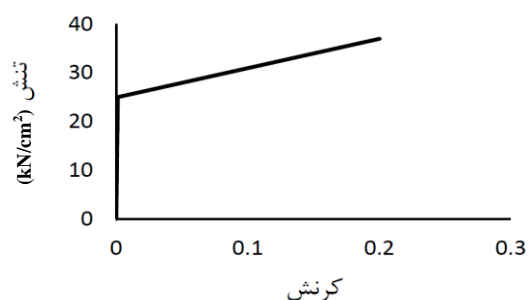
شکل (۶): قاب مدل‌سازی شده



شکل (۷): بارگذاری پیشنهادی ATC-24 [۱۴]

در مرحله بعد جهت بررسی رفتار چرخه‌های نبشی فولادی، ابتدا مدل‌سازی اجزای محدود آن انجام و پس از بارگذاری چرخه‌ای روی این عضو، منحنی هیستریزس آن ترسیم شد. همانطور که ملاحظه می‌گردد منحنی هیستریزس نبشی فولادی دارای عملکرد مناسب بوده و افت مقاومت محسوس در آن مشاهده نمی‌شود. به دلیل اینکه مدل‌سازی دقیق رفتار غیرخطی المان‌ها در برنامه‌های کامپیوتری مشکل است معمولاً سعی می‌گردد که از مدل دو یا چند خطی استفاده شود، لذا جهت معرفی رفتار نبشی به نرم‌افزار و جهت سهولت کار، منحنی دوخطی عملکرد آن به صورت پوش منحنی هیستریزس مطابق شکل (۸) استخراج گردید.

گردیده و گزینه سخت‌شوندگی ترکیبی<sup>۱</sup> فعال گردیده است که در واقع ترکیبی از گزینه‌های ایزوتروپیک و سینماتیک می‌باشد.



شکل (۸): منحنی تنش-کرنش فولاد

این سخت‌شوندگی با استفاده از داده‌هایی از نیمه اول چرخه نمودار تنش-کرنش در آزمایش کشش بدست می‌آید و در آن می‌توان بازه‌هایی<sup>۲</sup> برای تعریف مشخصات مصالح در نظر گرفت که هر بازه محدوده متفاوتی از کرنش‌ها را پوشش می‌دهد.

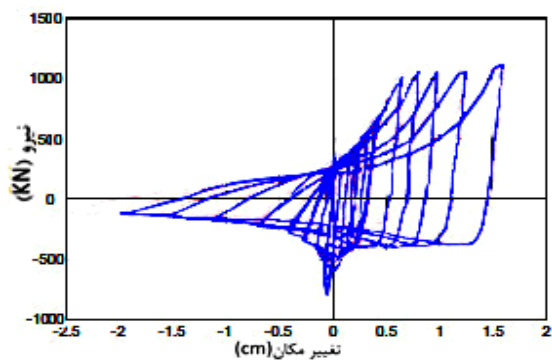
#### ۴- شرح روش اجزای محدود

در این قسمت با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS [۱۴] و انجام تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی بر روی مدل سه بعدی مطابق شکل (۶)، به بررسی رفتار مهاربند قطری اصلاح شده پرداخته شد. المان مورد استفاده از نوع SOLID بوده و تحلیل با لحاظ نمودن اثر تغییرشکل‌های بزرگ انجام گردید. به دلیل اینکه در اکثر استانداردهای معتبر دنیا از الگوی بارگذاری به شیوه افزایش تغییر مکان جهت ارزیابی رفتار سازه‌ها استفاده می‌شود، در این تحقیق نیز جهت انجام آنالیزهای استاتیکی غیرخطی از الگوی تغییر مکان افزایشنده در جهت محور x و در گامهای زمانی ۰/۱ ثانیه با لحاظ اثر تغییرشکل‌های بزرگ جهت کمانش اعضا استفاده گردید. همچنین سعی شد الگوی بارگذاری تقریباً مطابق با بارگذاری عملی به روش کنترل تغییر مکان بر طبق پیشنهاد ATC-24 انجام

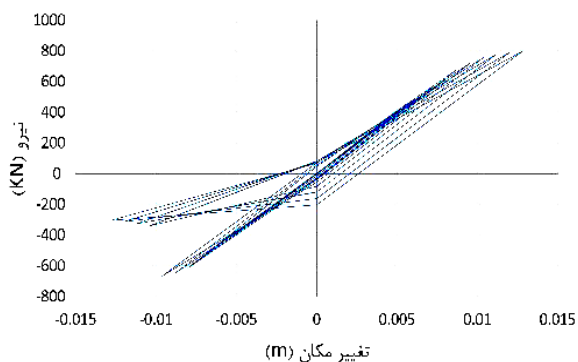
<sup>۱</sup> Combined hardening

<sup>۲</sup> Backstress



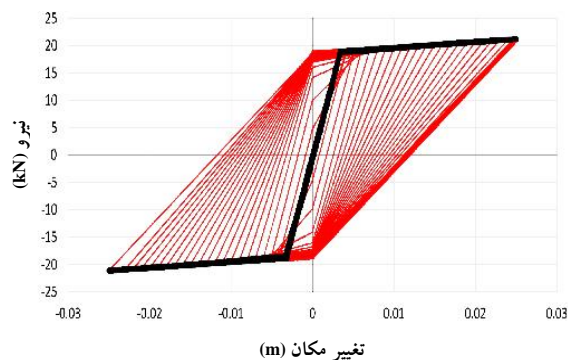


شکل (۱۰): منحنی هیستریزس نمونه عددی



شکل (۱۱): منحنی هیستریزس نمونه ۱ (معمولی)

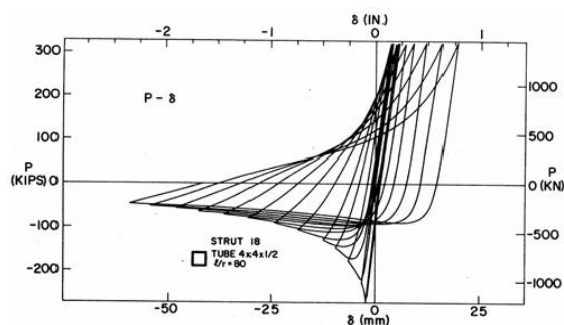
نامطلوب و غیرشکل‌پذیر مهاربند هم‌محور داشته و افت مقاومت و کاهش محسوس سختی قاب پس از کماتش عضو فشاری قابل مشاهده می‌باشد. کماتش مهاربند در برش پایه حدود ۶۵۰ کیلونیوتن سبب ناپایداری منحنی هیستریزس و افت شدید عملکرد سازه گردیده است که تطابق خوبی با بار کماتشی محاسباتی مقطع داشته و موید صحت نتایج تحلیل می‌باشد و همانطور که اشاره شد اندک تفاوت موجود نیز ناشی از عواملی نظیر جزئیات مدل‌سازی و شرایط بارگذاری می‌باشد. عدم تقارن در رفتار کششی و فشاری مهاربند سبب بروز کماتش زود هنگام گشته و عملاً بخش عمده‌ای از ظرفیت مقطع بدون استفاده مانده است. همچنین منحنی هیستریزس نمونه دوم (شکل (۱۲)) یعنی نمونه با ایجاد برشی به طول ۱/۳ جان در مقطع ناودانی نیز تقریباً رفتاری مشابه با نمونه اول داشته، لیکن اندکی نامنظمی در رفتار کششی آن مشاهده شده و نیز مقداری کاهش در برش پایه قاب به دلیل کاهش سختی المان ایجاد گردیده است.



شکل (۸): منحنی هیستریزس و مدل دوخطی عملکرد نبشی بکار رفته در تحلیل

### ۵- سنجش صحت مدل عددی

جهت بررسی صحت نتایج و اطمینان از تطبیق مشخصات و پارامترهای بکار رفته در مدل عددی با شرایط واقعی، در ابتدا یک مدل واقعی ساخته شده در آزمایشگاه تحت بارگذاری چرخه‌ای به شرح مرجع [۱۶]، توسط نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی و نتایج بدست آمده از نرم‌افزار با نتایج حاصل از مطالعه آزمایشگاهی (شکل (۹)) مقایسه گردید. ارزیابی منحنیهای هیستریزس بدست آمده از تحلیل عددی (شکل (۱۰)) و بررسی آزمایشگاهی گویای تطبیق مناسب نتایج بوده و مختصر تفاوت موجود نیز حاصل از شرایط بارگذاری و نیز جزئیات مدل‌سازی از جمله عدم مدل‌سازی جوش اتصال و نظایر آن می‌باشد.

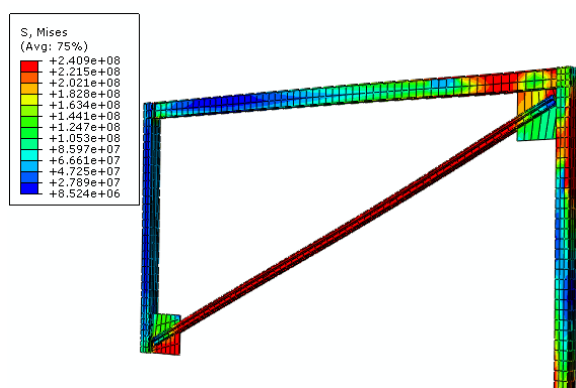


شکل (۹): منحنی هیستریزس نمونه آزمایشگاهی [۱۵]

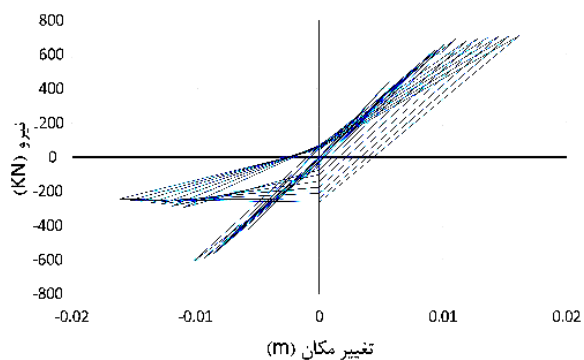
### ۶- بررسی نتایج تحلیل

همانطور که از ابتدا نیز قابل تصور بود، بررسی نمودار هیستریزس نمونه اول (شکل (۱۱)) حاکی از رفتار

هیستریزیس مناسب‌تری (شکل (۱۵)) بدست آمد، اما تمرکز شدید تنش در ناحیه کاهش یافته سبب بروز تغییرشکل زیاد و آسیب در این قسمت گردید و عملاً رفتار لرزه‌ای مورد انتظار برآورده نگردید. افزایش چشمگیر تنش در ناحیه کاهش یافته سبب گسیختگی مقطع گردیده و تمرکز تنش مخصوصاً در ناحیه گوشه‌های شکاف ایجاد شده (شکل (۱۶)) موجب شکل‌پذیری نامناسب رفتار آن گردیده است. در این نمونه نیز کماتش مهاربند در تغییر مکان ۱/۲۵ سانتیمتر در اثر نیروی ۴۴۰ کیلونیوتن سبب زوال شدید سختی و افت محسوس مقاومت گردیده است.

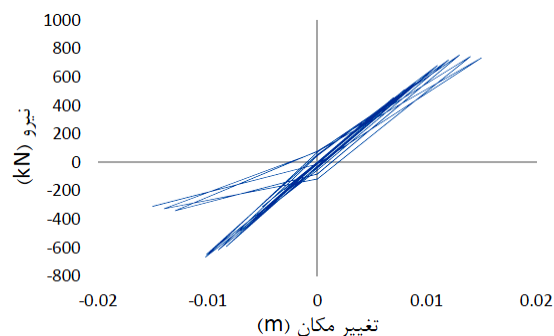


شکل (۱۳): توزیع تنش فون‌میسز در نمونه اول (معمولی)



شکل (۱۴): منحنی هیستریزیس نمونه ۳ (شکافدار به بعد ۱/۲)

اتصال نبشی فولادی به عنوان رابط دو سر مهاربند جهت انتقال نیرو در نمونه پنجم موجب کاهش شدید سختی مهاربند و در نتیجه کاهش حدود ۶۵ درصدی در جذب نیرو و برش پایه قاب گردید (شکل (۱۷)). تمرکز تنش‌ها در نمونه پنجم عمدتاً در نواحی نبشی اتصال بوده و این



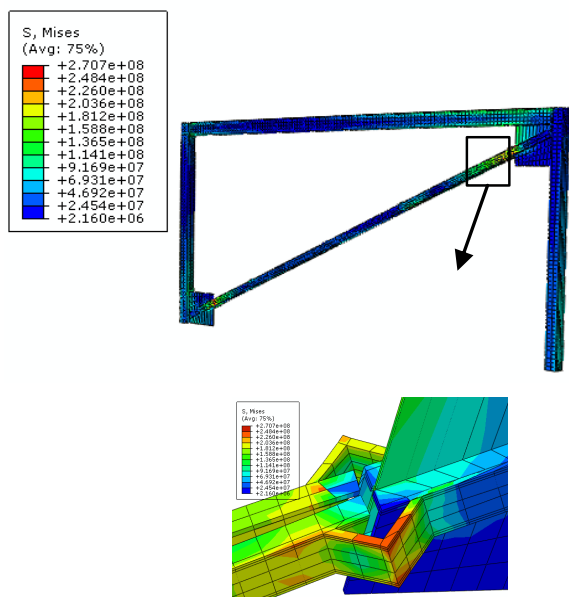
شکل (۱۵): منحنی هیستریزیس نمونه ۲ (شکافدار به بعد ۱/۳)

به نظر می‌رسد سوراخ ایجاد شده در مقایسه با سطح مقطع کل عضو ناچیز بوده ولی تا حدودی رفتار عضو را تحت تاثیر قرار داده است. علاوه بر این کاهش سطح مقطع در این نواحی سبب افزایش ناگهانی تنش و نیز نامنظمی در مسیر انتقال نیرو گردیده و باید از وجود چنین حفراتی اجتناب نمود زیرا از طرفی سطح مقطع کاهش یافته آنقدر بزرگ نیست که سبب کاهش محسوس سختی و رفتار شکل‌پذیرتر مقطع شود و نه آنقدر کوچک است که از تاثیر آن طی بارگذاری چرخه‌ای و باز و بسته شدن مکرر آن صرف‌نظر گردد. گاه طی فرآیند جوشکاری و برشکاری المان مهاربند و در اثر خطای ساخت چنین حفراتی به وجود می‌آید که باید با قضاوت مهندسی به نحو مناسب با اتصال ورق و یا پرکردن با جوش تعمیر گردد.

نحوه توزیع تنش‌های فون‌میسز در نمونه اول (شکل (۱۳)) حاکی از تمرکز این تنش‌ها در طول مهاربند و نیز محل اتصال به ستون داشته و احتمال وقوع خرابی و خسارت در این نقاط را افزایش می‌دهد. تمرکز شدید تنش در گوشه‌های قاب امکان کماتش صفحه اتصال کناری و نیز وقوع آسیب در اتصالات را بسیار محتمل می‌نماید و باید در طراحی این اعضا مدنظر قرار گیرد.

بررسی منحنی هیستریزیس نمونه سوم یعنی نمونه با ایجاد شکاف در ۱/۲ جان مقطع (شکل (۱۴)) گویای کاهش سختی عضو و برش پایه وارد به قاب می‌باشد. کماتش مهاربند در تغییر مکان حدود ۱ سانتیمتر تحت نیروی ۶۰۰ کیلونیوتن سبب افت سختی و عدم پایداری منحنی هیستریزیس آن گردیده است. همچنین اگرچه تحلیل نمونه چهارم تا تغییر مکان‌های بیشتر پیش رفت و منحنی



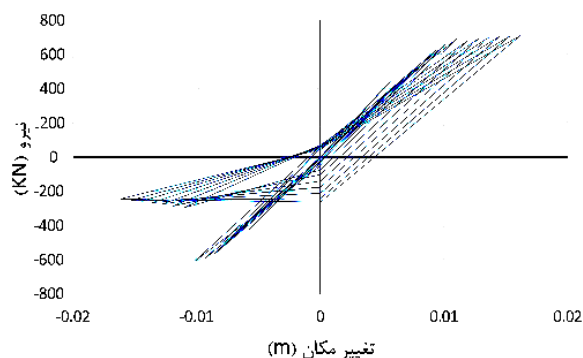


شکل (۱۸): توزیع تنش فون میسز در نمونه پنجم (برش کامل مقطع + نبشی ۲۰)

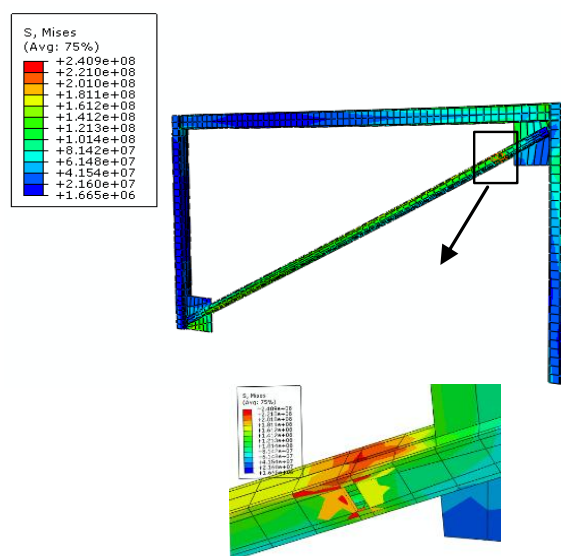
لیکن همانطور که انتظار می‌رفت نرمی بیش از حد نبشی اتصال و عدم ظرفیت خمشی مناسب، سبب بروز تغییرشکل‌های زیاد و رفتار غیرشکل‌پذیر قاب بوده و تغییرشکلهای بیش از حد سبب قطع تحلیل و عدم همگرایی نتایج گردید. لذا لزوم بکارگیری این المان به عنوان عضو کمکی در انتقال بخشی از نیرو در ترکیب با ظرفیت عضو اصلی منطقی بوده و بکارگیری آن به عنوان عضو تک در توزیع نیرو بین دو قسمت از المان مهاربند توصیه نمی‌گردد.

همانطور که مشاهده می‌شود (شکل (۱۹) و (۲۰)) افزودن نبشی فولادی در ترکیب با مقطع کاهش یافته در نمونه‌های ششم و هفتم سبب بهبود عملکرد مهاربند هم‌محور گردیده است. بررسی منحنیهای هیستریزس موید رفتار شکل‌پذیرتر مهاربند اصلاح شده و اتلاف انرژی بیشتر آن می‌باشد. اگرچه رفتار نمونه ۶ تحت بارگذاری چرخه‌ای دارای منحنی متقارن است اما ضعف خمشی و انعطاف‌پذیری زیاد نبشی نمره ۱۰ سبب کاهش سختی بالا و عدم جذب انرژی کافی گردیده است. اما در نمونه ۷ علاوه بر منحنی پایدار و متقارن تا تغییر مکان حدود ۳ سانتیمتر نیز افت عملکردی مشاهده نمی‌گردد. چرخه‌های هیستریزس

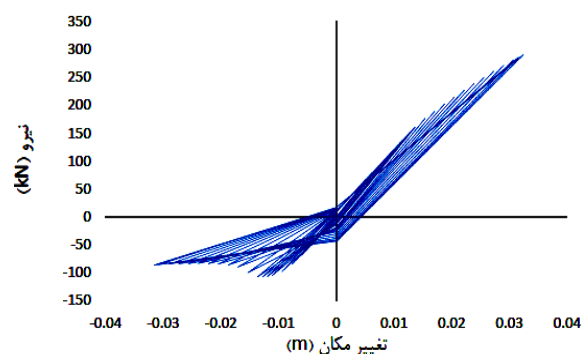
امر سبب کاهش شدید تنش در سایر اعضای اصلی گردیده است (شکل (۱۸)).



شکل (۱۵): منحنی هیستریزس نمونه ۴ (شکافدار کامل)

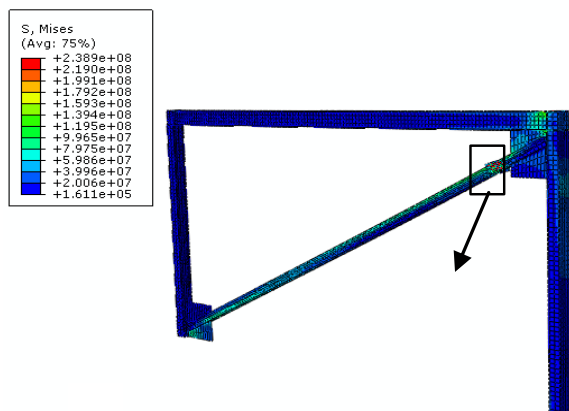


شکل (۱۶): توزیع تنش فون میسز در نمونه چهارم (شکاف کامل در جان مقطع)



شکل (۱۷): منحنی هیستریزس نمونه ۵ (برش کامل مقطع + نبشی ۲۰)

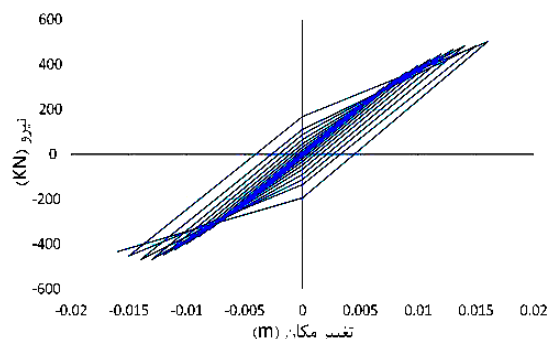
سبب کاهش محسوس تنش در سایر اعضای اصلی گردیده است. همچنین کاهش سختی مهاربند سبب کاهش نیروی برش پایه و در نتیجه کاهش نیرو در سایر اعضای اصلی خواهد بود و در صورت طراحی و اجرای مناسب اتصال پیشنهادی، افزایش شکل پذیری قاب از اثرات مثبت آن می باشد.



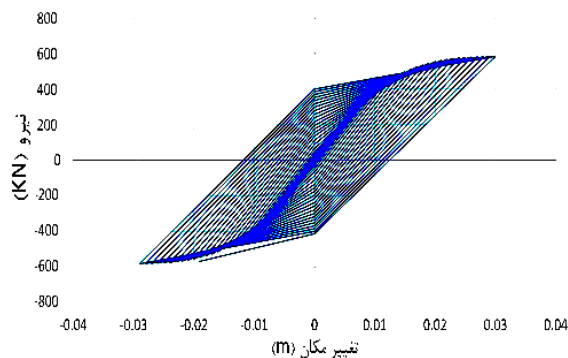
شکل (۲۱): توزیع تنش فون میسز در نمونه هفتم (شکافدار کامل + نبشی ۲۰)

کلیه نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی اعم از حداکثر برش پایه قاب، بار کمانشی و تغییر مکان اعمالی در جدول (۴) قابل مشاهده می باشد. با بررسی نتایج و نمودارهای ارائه شده به نظر می رسد در اتصال پیشنهادی، نمونه ای رفتار مناسب تر و شکل پذیرتر داشته که اولاً سطح مقطع کاهش یافته دارای ابعاد مناسب بوده و ثانیاً نبشی تقویت از صلبیت قابل قبول برخوردار بوده است. همچنین با توجه به محدودیت های اجرایی و آیین نامه ای در استفاده از حداکثر بعد جوش متناسب با ضخامت ورق کمتر، پیشنهاد می گردد طراحی نبشی بر اساس حداکثر بعد جوش مجاز و ضخامت جان مقطع مهاربند محاسبه گردد.

چاق تر گویای اتلاف انرژی بیشتر مقطع تقویت شده و عملکرد مطلوب تر آن می باشد. همچنین پایداری چرخه ها و عدم افت محسوس عملکرد فشاری متضمن رفتار شکل پذیرتر تحت زلزله های شدیدتر خواهد بود.



شکل (۱۹): منحنی هیستریزس نمونه ۶ (شکافدار کامل + نبشی ۱۰)



شکل (۲۰): منحنی هیستریزس نمونه ۷ (شکافدار کامل + نبشی ۲۰)

همانطور که در شکل (۲۱) ملاحظه می شود، تمرکز تنش ها در نمونه ۷ بیشتر روی نبشی تقویتی متمرکز گردیده است. رفتار مناسب چرخه ای نبشی تقویت به عنوان عضو مستهلک کننده انرژی سبب رفتار مناسب مقطع گردیده است. تغییر شکل و باز و بسته شدن نبشی، سبب استهلاک انرژی و بهبود شکل پذیری عملکرد قاب شده و در صورت آسیب و یا پارگی جوش اتصال آن در زلزله های شدید امکان استهلاک انرژی توسط مقطع کاهش یافته به عنوان عضو کمکی وجود داشته که این عملکرد ثانویه متضمن رفتار لرزه ای مناسب مقطع می باشد. علاوه بر این تمرکز تنش های فون میسز در ناحیه کاهش یافته و نبشی تقویت

## جدول (۴): نتایج بارگذاری چرخه‌ای نمونه‌ها در تحلیل

## استاتیکی غیرخطی

شماره نمونه	تغییر مکان نهایی (cm)	بار کمانش مقطع (kN)	برش پایه حداکثر قاب (kN)
نمونه ۱ (معمولی)	۱/۲۸	۶۵۰	۸۰۰
نمونه ۲ (شکافدار به بعد ۱/۳)	۱/۵	۶۳۹	۷۸۰
نمونه ۳ (شکافدار به بعد ۱/۲)	۱/۵۳	۵۹۰	۶۹۰
نمونه ۴ (شکافدار کامل)	۲/۵۲	۴۴۰	۵۲۰
نمونه ۵ (برش کامل مقطع + نبشی ۲۰)	۳/۲۳	۱۰۷	۲۸۰
نمونه ۶ (شکافدار کامل + نبشی ۱۰)	۱/۶۳	۴۷۰	۵۳۰
نمونه ۷ (شکافدار کامل + نبشی ۲۰)	۲/۹۵	۵۶۰	۵۸۰

به علت شکل‌پذیری مناسب رفتار نبشی فولادی و انعطاف‌پذیری بالای آن می‌توان قسمت عمده‌ای از جذب انرژی سازه را از این اعضا انتظار داشت. با عنایت به اینکه در طراحی این سیستم، ظرفیت خمشی نبشی فولادی کمتر از بار کمانشی مهاربند انتخاب می‌گردد، در صورت طراحی مناسب می‌توان از عدم کمانش مهاربند اطمینان حاصل نمود.

در پایان لازم به ذکر است که با توجه به نتایج مناسب بدست آمده در تحلیل عددی، ساخت مدل و انجام کار آزمایشگاهی جهت بررسی صحت نتایج باید در مرحله بعدی تحقیق در دستور کار قرار گیرد.

## ۸- مراجع

[1] Lopez, W.A., Gwie, D.S., Saunders, C.M. and Lauck, T.W. (2002), "Lessons Learned from Large Scale Tests of Unbonded Braced Frame Subassemblages", Proceedings 71st Annual Convention, Structural Engineers Association of California, Sacramento, California.

[2] Miller, D.J. Fahnestock, A. and Eatherton, M.R. (2012), "Development and Experimental Validation of a Nickel-Titanium Shape Memory Alloy Self-Centering Buckling-Restrained Brace", Engineering Structures, Vol. 40, pp. 288-298.

[3] Tirca, L. Danila, N. and Caprarelli, C. (2014), "Numerical Modelling of Dissipative Pin Devices for Brace-Column Connections", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 94, PP. 137-149.

[۴] مالک، ش.، پابسونگ، پ. و لوح قلم، ا. (۱۳۸۵)، "معرفی یک سیستم میراگر غیرفعال نوین و مقایسه آن با میراگر TADAS"، اولین همایش مقاوم سازی لرزه‌ای.

[۵] بهکام راد، ک. (۱۳۸۵)، "مطالعه امکان‌سنجی استفاده از المان خمشی جهت افزایش جذب انرژی و شکل‌پذیری بادبندهای هم‌محور"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته عمران گرایش سازه، دانشگاه علم و صنعت، ایران.

[۶] کافی، م.ع.، عباس‌نیا، ر. و محمدحسینی، آ. (۱۳۸۸)، "بررسی بهبود رفتار لرزه‌ای مهاربندهای هم‌محور با استفاده از المان نوین شکل‌پذیر"، اولین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت زیرساختها، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران، ایران.

[۷] کلانتری، ا. و علیزاده، ف. (۱۳۸۹)، "بررسی رفتار دینامیکی قاب مهاربندی شده فولادی هم‌گرا با عضو شکل‌پذیر رینگ

لازم به ذکر است که نقش تعیین‌کننده عملکرد نبشی فولادی به عنوان عضو شکل‌پذیر و تقریباً بدون افت محسوس مقاومت طی بارگذاری چرخه‌ای، سبب جذب نیرو و نیز جلوگیری از تمرکز تنش در مقطع کاهش یافته بوده و متضمن عملکرد لرزه‌ای مناسب‌تر مهاربند می‌باشد.

## ۷- نتیجه‌گیری

نتایج تحلیل را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

کاربرد عضو پیشنهادی در کنترل ارتعاشات لرزه‌ای سازه‌ها موجب می‌گردد تا تغییرشکل‌های غیرارتجاعی در آنها متمرکز شده و خسارات وارده به سازه اصلی به شدت کاهش یابد. کانتور تنش فون میسز نمونه‌ها، بیانگر آن است که عمده تغییرشکل‌های غیرالاستیک در نبشی متمرکز گردیده و تغییرشکل خمشی آن حاکم بر رفتار می‌باشد. منحنی هیستریزس نمونه پیشنهادی (نمونه ۷) تا اواخر تحلیل و تا تغییر مکان حدود ۳ سانتیمتر پایدار بوده و باریک‌شدگی در آن دیده نمی‌شود در حالی که مهاربند معمولی در تغییر مکان حدود ۱ سانتیمتر دچار کمانش و افت محسوس عملکرد چرخه‌ای گردیده است.



فولادی، مجله مهندسی سازه های آبی، سال سوم، شماره ۵، صفحات ۲۶-۱۷.

[۸] مزگانی، آ. (۱۳۸۸)، "بررسی رفتار اعضای حلقوی متحدالمرکز شکل پذیر در مهاربندهای هم محور"، پایان نامه کارشناسی ارشد، رشته عمران گرایش سازه، دانشگاه علم و صنعت، ایران.

[9] Ahmady Jazany, R., Shademan Heidari, P. and Kayhani, H. (2010), "Using Circular Jagged Plates as Hysteretic Metallic Damper", 14<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, Republic of Macedonia.

[10] Franco, J.M., Cahis, X., Gracia, L. and Lopez, F. (2010), "Experimental Testing of a New Anti-Seismic Dissipater Energy Device Based on the Plasticity of Metals", Journal of Engineering Structures, Vol. 32, PP. 2672-2682.

[11] Suzuki, K., Watanabe, A. and Saeki, E. (2005), "Development of U-shaped Steel Damper for Seismic Isolation System", Nippon Steel Technical Report, No. 92.

[12] Benavent-Climent, A. (2010), "Development of a New Tube-in-Tube Hysteretic Damper for Seismic Protection of Building Structures", 14<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, Republic of Macedonia.

[۱۳] سروش نیا، س. و بهشتیان، ن. (۱۳۹۲)، "آموزش کاربردی ABAQUS"، تهران، نگارنده دانش، چاپ سوم.

[14] ABAQUS Finite Element Analysis Program. Version 6.10.0. User's Manual. 2010.

[15] Applied Technology Council. (1992), "Guidelines for Seismic Testing of Components of Steel Structures", Report of ATC-24.

[16] Black, G.R. Wenger, B.A. and Popov, E.P. (1980), "Inelastic Buckling of Steel Strut under Cyclic Load Reversals", Tech. Rep. UCB/EERC-80-40, EERC, Berkeley, CA.

