

# رفتار چرخه‌ای ستون‌های مرکب با بست افقی و منحنی‌های رفتاری آن‌ها

محمد علی جعفری صحنه سرایی\* بهرخ حسینی هاشمی

۱. استادیار-پژوهشگاه نیرو

۲. دانشیار، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله

Maa\_jaf@yahoo.com

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۲/۹/۱۱]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۱/۶/۱۸]

**چکیده** - در این مقاله، رفتار ستون‌های مرکب با بست افقی تحت اثر بارهای محوری ثابت و جانبی چرخه‌ای مورد بررسی قرار گرفته و منحنی‌های رفتاری آن‌ها نیز استخراج و ارائه شده‌اند. منحنی‌های رفتاری اعضای سازه‌ای، بیانگر رابطه نیرو-تغییر مکان اعضاء تحت بارهای چرخه‌ای در محل تشکیل مفاصل پلاستیک است. این منحنی‌ها دارای کاربردهای گسترده در تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی سازه‌ها به منظور انجام طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد و یا انجام مطالعات ارزیابی و بهسازی لرزه‌ای است. در حال حاضر منحنی‌های رفتاری برای ستون‌های مرکب با بست افقی در دستورالعمل‌های ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها، موجود نیست. با توجه به تفاوت‌های موجود در رفتار لرزه‌ای، حالات شکست و شکل‌پذیری میان ستون‌های مرکب و توپر، استفاده از منحنی‌های رفتاری ستون‌های توپر برای ستون‌های مرکب صحیح نیست. در پژوهش حاضر، منحنی‌های چرخه‌ای تحت بارهای جانبی برای ستون‌های مرکب با شرایط مختلف هندسی، با استفاده از تحلیل‌های اجزاء محدود غیرخطی، به دست آمده و با استفاده از آن‌ها، منحنی‌های رفتاری این ستون‌ها تهیه شده و بررسی شده است. در پایان بر اساس نتایج به دست آمده، یک منحنی رفتاری پیشنهادی برای ستون‌های مرکب با بست افقی برای استفاده در موارد کاربردی ارائه شده است.

**واژگان کلیدی** - ستون مرکب با بست افقی، منحنی رفتاری، رفتار چرخه‌ای، تحلیل استاتیکی غیرخطی، آسیب‌پذیری لرزه‌ای

## ۱- مقدمه

طراحی و بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها نیازمند دانش، ابزارها و پایه‌های علمی و فنی خاص خود است که باید به مرور زمان تولید یا تکمیل شود.

یکی از ابزارهای مورد نیاز در طراحی و بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌ها (به گونه ویژه در رویکرد طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد) منحنی‌های رفتاری اعضای مختلف سازه<sup>۱</sup> است. منحنی‌های رفتاری، منحنی‌های یک‌طرفه (مونوتونیک) نیرو- تغییر مکان اعضاء سازه‌ای است که به نوعی در بردارنده رفتار چرخه‌ای عضو نیز است. از این

اهمیت و لزوم کاهش خطرپذیری ساختمان‌ها و تأسیسات کشور در برابر بلایای طبیعی و بطور خاص در برابر زلزله بر کسی پوشیده نیست. در این راستا، مؤثرترین راهکار قابل اجرا در سطح کشور عبارت از طراحی و اجرای ایمن سازه‌ها و ساختمان‌ها و ارتقاء تراز ایمنی ساختمان‌های ساخته شده در گذشته است. این راهکار در قالب تدوین استانداردهای لازم برای طراحی لرزه‌ای ساختمان‌ها و بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود<sup>[۱]</sup> و اجرای مفاد آن‌ها در کشور، در حال انجام است؛ بدیهی است که انجام

منحنی‌ها در تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی<sup>۲</sup> (که یکی از ابزارهای تحلیلی مناسب به ویژه در طراحی بر اساس عملکرد است) و کنترل سطح عملکرد<sup>۳</sup> اعضا سازه‌ها تحت بارهای جانبی معادل زلزله، استفاده می‌شود. منحنی‌های رفتاری برای اعضای مختلف سازه‌ای با تلاش‌های مختلف به منظور انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی در برخی از دستورالعمل‌ها و استانداردها (به ویژه استانداردهای بهسازی لرزه‌ای) ارائه شده‌اند.

یکی از اعضای سازه‌ای بسیار مهم و پرکاربرد در ساختمان‌های کشور، ستون‌های مرکب با بست افقی است. در بسیاری از ساختمان‌های فولادی ساخته شده در گذشته، از این ستون‌ها استفاده شده است. بررسی و مطالعه خسارت‌ها ساختمان‌های دارای ستون‌های مرکب در زلزله‌های گذشته نشان دهنده ضعف‌های رفتاری قابل ملاحظه و شکست‌های زیاد در این ستون‌ها است. [۲ و ۳] از این رو، بیشتر ساختمان‌های دارای ستون‌های مرکب با بست افقی ساخته شده در گذشته نیازمند بهسازی لرزه‌ای خواهند بود. در این میان، منحنی‌های رفتاری به عنوان یکی از نیازمندی‌های انجام مطالعه آسیب‌پذیری و بهسازی لرزه‌ای، برای این ستون‌ها نیز مورد نیاز است. با توجه به عدم رواج استفاده از این ستون‌ها در سایر مناطق لرزه خیز دنیا، در مورد منحنی‌های رفتاری (و به طور کلی رفتار آن‌ها تحت اثر زلزله) مطالعات زیادی انجام نشده است. در حال حاضر، در مطالعات ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها، از منحنی‌های رفتاری ستون‌های با جان توپر برای ستون‌های مرکب نیز استفاده می‌شود که با توجه به تفاوت‌های رفتاری آن‌ها، خطاهای قابل ملاحظه‌ای را در پی خواهد داشت. بر این اساس، انجام مطالعات در مورد رفتار لرزه‌ای ستون‌های مرکب با بست افقی و به ویژه، تهیه منحنی‌های رفتاری آن‌ها، یک نیاز اساسی برای کشور است.

متأسفانه در مورد رفتار و حالات شکست ستون‌های مرکب تحت تاثیر بارهای دینامیکی و به ویژه بارهای لرزه‌ای، پژوهش‌های محدود و مختصری در دنیا انجام شده است؛ شاید یکی از علل این امر، رایج نبودن استفاده از این نوع ستون‌ها در سازه‌های ساختمانی در مناطق لرزه خیز جهان باشد. تعداد معدودی از مطالعات تحلیلی و آزمایشی در مورد رفتار لرزه‌ای ستون‌های مرکب انجام شده که به عنوان مهمترین نمونه‌ها می‌توان به مطالعه تحلیلی رفتار لرزه‌ای ستون‌های مرکب با بست افقی به وسیله حسینی هاشمی و همکاران با استفاده از تحلیل‌های خطی و غیرخطی استاتیکی [۵ و ۶]، مطالعه آزمایشی ستون‌های مرکب با بست چپ و راست تحت بار چرخه‌ای، به وسیله Kleiser و همکاران [۶]، انجام آزمایش چرخه‌ای روی ستون‌های مرکب با بست افقی تحت بار محوری ثابت و بار جانبی چرخه‌ای به وسیله Sahoo و Rai [۷]، اشاره نمود.

در مقاله حاضر، سعی شده تا منحنی‌های رفتاری ستون‌های مرکب با بست افقی برای حالات مختلف آن‌ها از نظر ویژگی‌های هندسی و مقدار نیروی محوری، تهیه شده و مطالعه شود. تهیه منحنی‌های رفتاری نیازمند استخراج منحنی چرخه‌ای<sup>۴</sup> نیرو- تغییر مکان عضو سازه‌ای است. در این پژوهش، منحنی‌های چرخه‌ای با استفاده از انجام تحلیل اجزاء محدود غیرخطی (مضالح و هندسی) روی تعدادی از مدل‌های ستون مرکب به دست آمده‌اند. درستی نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها با نتایج آزمایش‌های انجام شده به وسیله نگارندگان روی نمونه‌های مشابه ستون، مقایسه و ارزیابی شده است. در پایان نیز یک منحنی رفتاری محافظه‌کارانه برای استفاده در تحلیل‌های ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها پیشنهاد شده که می‌تواند در دستورالعمل ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود، استفاده شود.

## ۲- منحنی‌های رفتاری اعضای سازه‌ای

در روش‌های مرسوم تحلیل استاتیکی غیرخطی رابطه کلی نیرو- تغییرمکان در محل مفصل پلاستیک (ناحیه بحرانی) اعضای سازه‌ای به صورت یک منحنی چندخطی بیان می‌شود که به آن، منحنی رفتاری عضو گفته می‌شود. یک خصوصیت مهم منحنی رفتاری این است که افت مقاومت حاصل از رفتار چرخه‌ای اعضای در آن لحاظ شده است. به عبارت دیگر، منحنی رفتاری در واقع یک معادل مونوتونیک از منحنی چرخه‌ای عضو است. منحنی‌های رفتاری با استفاده از منحنی‌های چرخه‌ای نیرو- تغییرمکان اعضای سازه‌ای (به دست آمده از آزمایش یا تحلیل) تهیه شده و به نوعی برابر پوش منحنی چرخه‌ای نیرو- تغییرمکان عضو است.

منحنی‌های رفتاری برای اعضای مختلف سازه‌ای تحت تلاش‌های مختلف به منظور انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی در پاره‌ای از دستورالعمل‌ها مانند FEMA273، FEMA356، ASCE-41 و دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود ارائه شده‌اند [۱، ۸ و ۱۴]. این منحنی‌ها به شکل منحنی‌های چندخطی ایده‌آل، ساده شده و برای کاربردهای عملی ارائه شده‌اند. منحنی‌های رفتاری ارائه شده در FEMA356 که در سایر دستورالعمل‌ها نیز استفاده شده‌اند، به سه نوع کلی (با رفتار متفاوت) تقسیم بندی شده‌اند [۸]. عضوی از سازه که رفتار نیرو- تغییرمکانش منطبق بر منحنی نوع ۱ باشد، شکل پذیر (یا کنترل شونده با تغییرشکل) نامیده می‌شود. به همین ترتیب، اعضای که رابطه نیرو- تغییرمکانشان مشابه منحنی‌های نوع ۲ و ۳ باشند به ترتیب نیمه شکل پذیر و غیرشکل پذیر (یا کنترل شونده با نیرو) نامیده می‌شوند. بنابراین نوع رفتار عضو علاوه بر خود عضو، به نوع تلاش و تغییر مکان مربوط به آن نیز بستگی دارد. به عنوان مثال در تیر ستون‌ها، منحنی رفتاری لنگر خمشی- دوران بسته به مقدار نیروی محوری آن، می‌تواند از هر سه نوع بوده و منحنی رفتاری نیروی محوری- تغییرمکان محوری آن تنها از نوع ۳ (غیر شکل

پذیر) است. برای هر عضو سازه‌ای با تلاش مشخص و تغییرمکان متناظرش، مقادیر مختصات مورد نیاز برای مشخص شدن منحنی رفتاری و شیب مورد نیاز خطوط در دستورالعمل‌های قبلی ارائه شده‌اند.

یک کاربرد مهم منحنی‌های رفتاری، امکان تعریف دقیق و کمی سطوح عملکرد (که به شکل معیارهای پذیرش در دستورالعمل‌ها گفته شده است) بر اساس آن است. بنابراین، روشن است که برای استفاده عملی از فلسفه طراحی بر اساس عملکرد، نیاز به دانستن منحنی رفتاری برای اعضای مختلف سازه‌ای و غیر سازه‌ای است. [۹ الی ۱۲] منحنی‌های رفتاری بسیاری از اعضای سازه‌ای در دستورالعمل‌های گوناگون ارائه شده است. با این وجود، هنوز برای بعضی از اعضای سازه‌ای این خلاء اطلاعاتی (نبود منحنی رفتاری) وجود دارد که ستون‌های مرکب با بست افقی (که در ایران بسیار رایج است)، یکی از این اعضا است که در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته‌اند.

## ۳- روش تهیه منحنی‌های رفتاری اعضای سازه‌ای

منحنی‌های رفتاری به نوعی برابر پوش منحنی‌های چرخه‌ای اعضای سازه‌ای و به عبارت دیگر، معادل مونوتونیک منحنی چرخه‌ای عضو است. از این رو برای تهیه منحنی رفتاری یک عضو سازه‌ای تحت تلاش مشخص و تغییرمکان متناظر با آن، باید از منحنی چرخه‌ای آن استفاده کرد. منحنی‌های چرخه‌ای اعضا را می‌توان با استفاده از آزمایش و یا روش‌های تحلیلی (عددی) به دست آورد. به دلیل وجود انواع عوامل و عدم قطعیت‌های موثر بر رفتار چرخه‌ای که قابل لحاظ در مدل‌های تحلیلی نیستند، استفاده از روش‌های آزمایشی بهتر است. در عین حال با توجه به هزینه‌های بالای آزمایش، استفاده از روش‌های تحلیلی دارای آسانی بیشتری است. روند تهیه منحنی رفتاری یک عضو تحت تلاش مشخص با استفاده از منحنی چرخه‌ای آن، در

دستورالعمل FEMA356 ارائه شده و در این پژوهش نیز به کار رفته است. [۸]

#### ۴- مدل تحلیلی اجزاء محدود ستون‌های مرکب با بست افقی

به منظور استخراج منحنی‌های چرخه‌ای ستون‌ها، نمونه‌های ستون به شکل طره‌ای در نظر گرفته شده و به روش اجزاء محدود تحلیل شدند. تحلیل مدل‌ها با در نظر گرفتن آثار غیرخطی مصالح (مدل پلاستیک) و غیرخطی هندسی (تغییرشکل‌ها و کرنش‌های بزرگ) و به وسیله نرم‌افزار ANSYS انجام شده است. به منظور ارزیابی درستی و اعتبار تحلیل‌های اجزاء محدود، نتایج حاصل از آن‌ها (شامل منحنی‌های چرخه‌ای و حالات شکست ستون‌ها) با نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده روی نمونه‌های مشابه مقایسه شده‌اند.

#### ۴-۱- مدل مصالح مورد استفاده

مصالح مورد استفاده از جنس فولاد نرمه ساختمانی است؛ مدل مصالح در نظر گرفته شده در نرم افزار به شکل مدل پلاستیک با معیار تسلیم فون میزز و با در نظر گرفتن سخت شوندگی کرنشی از نوع کینماتیکی است. منحنی تنش-کرنش فولاد استفاده شده در تحلیل‌ها به شکل چندخطی بوده و با استفاده از داده‌های آزمایش نمونه‌های کششی [۲]. تقریب زده شده است. مشخصات مکانیکی فولاد مورد نظر در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات مکانیکی فولاد مورد استفاده در مدل‌های تحلیلی و آزمایشی

|                  | $\sigma_y$<br>(MPa) | $\sigma_u$<br>(MPa) | $E_s$<br>(GPa) |
|------------------|---------------------|---------------------|----------------|
| میانگین          | 314.8               | 458.2               | 196.7          |
| انحراف استاندارد | 9.66                | 14.0                | 13.2           |

#### ۴-۲- المان مورد استفاده و مش بندی

المان مورد استفاده در تحلیل‌های عددی، المان ۸ گرهی مکعبی SOLID45 در نرم افزار ANSYS است. المان یاد شده دارای قابلیت‌های تحلیل غیرخطی (پلاستیسیته مصالح و تغییرشکلها و کرنش‌های بزرگ) بوده و برای مدلسازی اجزاء مکعبی بدون قوس، مناسب است.

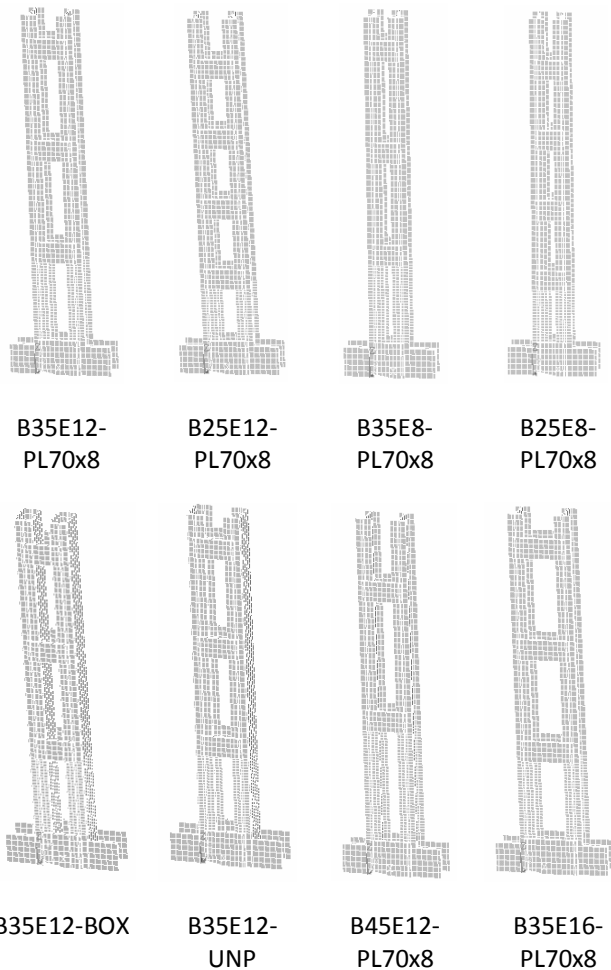
#### ۴-۳- مدل‌های تحلیلی ستون‌ها

با استفاده از المان و مصالح مذکور در بخش‌های قبل، مدل‌های ستون‌ها در نرم افزار ساخته شده است. انتهای پایین مدل‌ها به شکل گیردار و انتهای بالایی به شکل آزاد در نظر گرفته شده است. بست‌های افقی به شکل پیوسته به پروفیل‌های طولی مدل شده‌اند. نتایج آزمایش‌های انجام شده که در بخش ۶ ارائه شده است، صحت این فرض را در صورت رعایت ضوابط آئین نامه‌های موجود در طراحی بست‌ها تأیید می‌کند. بدیهی است که در صورت عدم وجود این شرایط و امکان وقوع شکست در بست‌ها یا اتصالات آن‌ها، پیوستگی پروفیل‌های طولی دچار خدشه شده و منحنی‌های رفتاری ارائه شده، قابل استفاده نخواهند بود که بررسی آن مطالعه جداگانه‌ای می‌خواهد. مدل‌ها، ایده‌آل بوده و آثار نقص هندسی و تنش‌های پسماند در آن‌ها لحاظ نشده است. چگونگی نامگذاری نمونه‌ها بدین صورت است که مشخصه هندسی مورد تاکید در نمونه (فاصله بست‌ها بر حسب سانتی‌متر بعد از حرف B، فاصله پروفیل‌ها بر حسب سانتی‌متر پس از حرف E و عرض و ضخامت بست‌ها بر حسب میلی‌متر پس از حرف PL)، در نامگذاری آن وجود دارد. همچنین عدد مشخص کننده مقدار نیروی محوری وارد بر ستون بعد از حرف P در نام هر نمونه مشخص شده است. فرم کلی مدل ستون در شکل (۱) و مدل‌های مختلف ستون‌های مورد بررسی در شکل (۲) ارائه شده است.

#### ۴-۴- بارگذاری

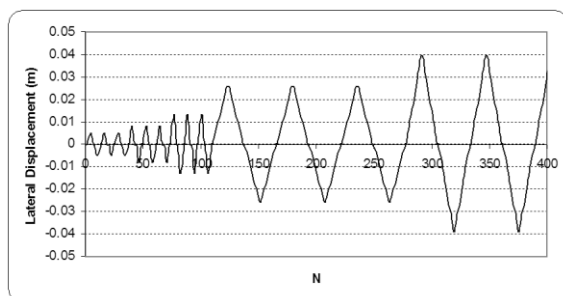
بارگذاری مدل‌های تحلیلی شامل بار محوری ثابت به همراه بار جانبی چرخه‌ای به شکل کنترل تغییرمکان (در واقع به شکل تغییرمکان جانبی چرخه‌ای) است؛ مقدار نیروی محوری برای هر مدل در سه سطح کم، مبه و سیله‌ی و زیاد بوده و مقادیر آن به ترتیب معادل حدود  $0.15 P_Y$ ،  $0.3 P_Y$  و  $0.4 P_Y$ ، که  $P_Y = AF_Y$  برابر نیروی محوری تسلیم ستون است. بار محوری یاد شده به شکل نقطه‌ای به گره‌های بالایی مدل اعمال می‌شود.

تغییرمکان چرخه‌ای اعمال شده بر گره‌های بالایی مدل‌ها نیز مطابق با الگوی ارائه شده در ATC24 (به شکل پله‌ای با دامنه افزایشی) است [۱۳]. مقادیر افزایش دامنه تغییرمکان مدل‌ها برابر با مقدار تغییرمکان تسلیم آن‌ها است که با استفاده از تحلیل مونوتونیک مدل‌ها محاسبه شده؛ و نمونه‌ای از تاریخچه تغییرمکان جانبی اعمال شده بر یکی از مدل‌های ستون در شکل (۳) نشان داده شده است.



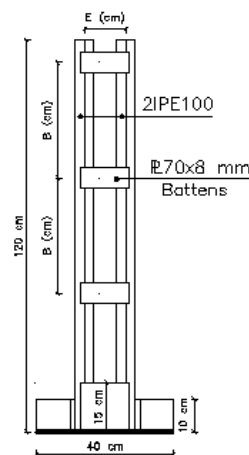
شکل ۲: مدل‌های مختلف اجزاء محدود در نظر گرفته شده برای تحلیل ستون‌ها

پارامتر  $N$  در شکل یاد شده، مرحله بارگذاری اعمالی در مدل تحلیلی است.



شکل ۳: بخشی از تاریخچه تغییرمکان جانبی اعمال شده بر نمونه

B35E12-PL70x8-P1



شکل ۱: شکل کلی مدل ستون مرکب مورد استفاده برای تحلیل ستون‌ها

## ۵- بررسی نتایج تحلیل اجزاء محدود ستون‌ها

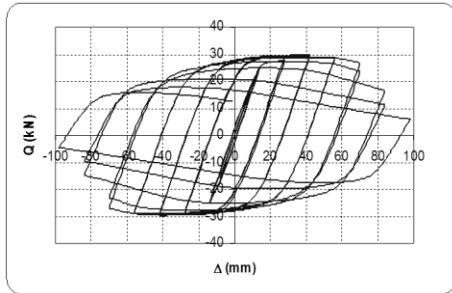
نتایج حاصل از تحلیل هر مدل شامل منحنی‌های چرخه‌ای نیرو- تغییر مکان جانبی و منحنی رفتاری متناظر با آن و نتایج تصویری شامل حالت شکست و توزیع کرنش‌های پلاستیک است.

### ۵-۱- منحنی‌های چرخه‌ای تحلیلی ستون‌های مرکب

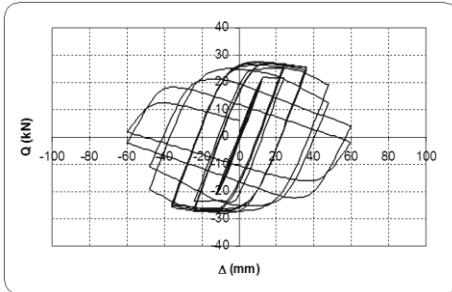
منحنی‌های چرخه‌ای نیروی جانبی  $Q$  بر حسب تغییر مکان  $\Delta$ ، حاصل از تحلیل اجزاء محدود برای کلیه مدل‌های ستون مرکب تهیه شده و نمونه‌ای از آنها در شکل شماره (۴) ارائه شده، افت مقاومت جانبی<sup>۵</sup> در تغییر مکان‌های زیاد در منحنی‌ها قابل مشاهده است. با افزایش نیروی محوری، مقدار افت مقاومت جانبی افزایش یافته و از تغییر مکان کوچکتری نیز شروع می‌شود. همچنین فرم لوزی شکل منحنی‌ها (ناشی از رفتار نرم شونده<sup>۶</sup> پس از رسیدن به بیشینه مقاومت جانبی) به ویژه در نیروهای محوری زیاد قابل مشاهده است، وجود این حالت به دلیل مود شکست حاکم بر مدل‌ها، که به شکل کمانش (موضعی و کلی) است. در بیشتر مدل‌های تحلیلی افت سختی جانبی قابل ملاحظه‌ای، بجز در آخرین چرخه‌های بارگذاری به وجود نمی‌آید. بیشینه افت سختی جانبی در آخرین چرخه نمونه B35E8-PL70x8-P4 مشاهده شد که حدوداً برابر ۷۰ درصد (نسبت به سختی اولیه نمونه) است.

با افزایش نیروی محوری ستون از مقاومت و سختی و شکل پذیری آن کاسته می‌شود و همچنین سطح اشغال شده به وسیله منحنیها نیز به گونه چشم‌گیری کاهش پیدا می‌کند که نشانه‌ای از کاهش قابلیت جذب انرژی است. این موضوع در کلیه نمونه‌های تحلیلی قابل مشاهده است.

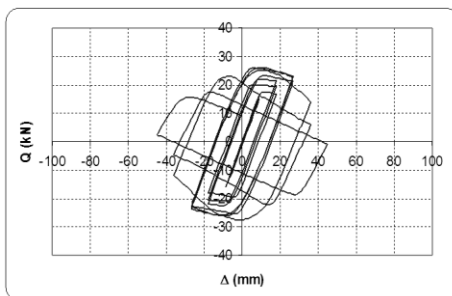
5 - Lateral Strength Degradation  
6 - Softening Behavior



B25E12-PL70x8-P1 (a)



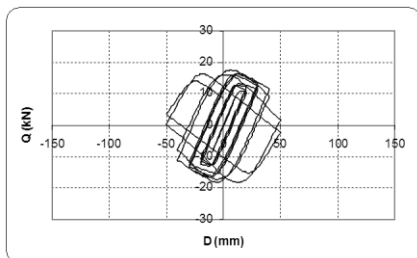
B25E12-PL70x8-P3 (b)



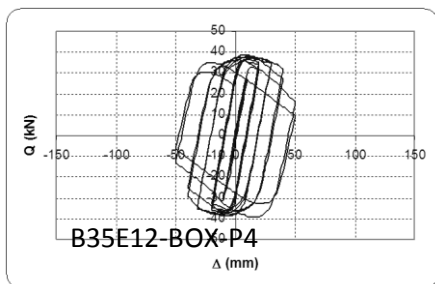
B25E12-PL70x8-P4 (c)

شکل ۴: نمونه منحنی‌های چرخه‌ای تحلیلی نیرو-تغییر مکان ستون مرکب

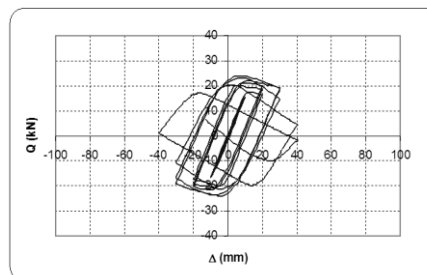
در ادامه، نمونه‌های دیگری از منحنی‌های چرخه‌ای نمونه‌های ستون نیز، برای حالت نیروی محوری مبه وسیله در شکل (۵) ارائه شده‌اند.



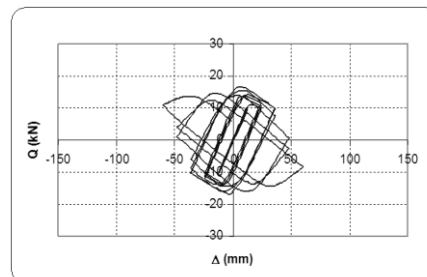
B25E8-PL70x8-P4



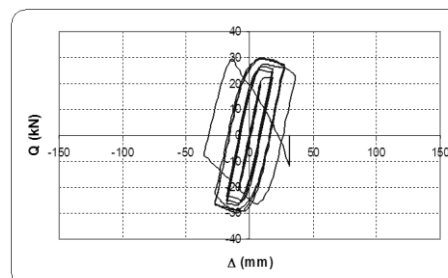
B35E12-BOX-P4



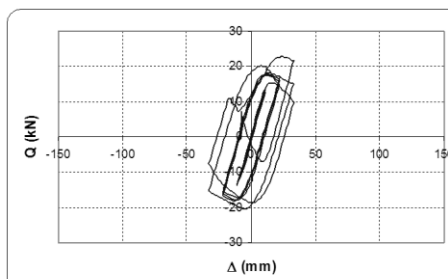
B35E12-PL70x8-P4



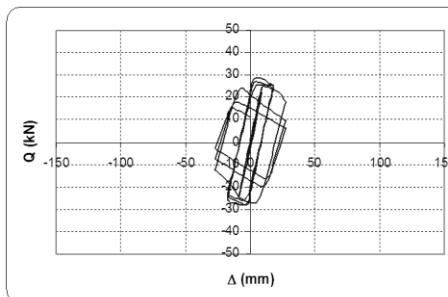
B35E8-PL70x8-P4



B35E16-PL70x8-P4



B45E12-PL70x8-P4

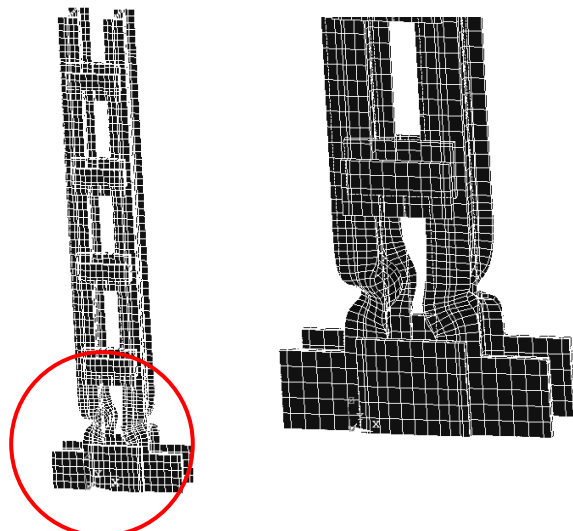


B35E12-UNP-P4

شکل ۵: منحنی‌های چرخه‌ای تحلیلی نیرو- تغییر مکان ستون مرکب تحت نیروی محوری زیاد

## ۵-۲- حالت‌های خرابی ستون‌های مرکب در مدل‌های تحلیلی

در مدل‌های تحلیلی مورد بررسی، حالت‌های شکستی از قبیل کمانش کلی ستونک<sup>۷</sup> (تک پروفیل میان بست‌های افقی) پایینی و کمانش موضعی<sup>۸</sup> در بال و جان آن یا ترکیبی از این دو مشاهده می‌شود. نمونه‌ای از کمانش موضعی بال و جان ستونک در یکی از مدل‌ها در شکل (۶) ارائه شده است. با افزایش نیروی محوری ستون، حالت شکست آن تغییر نمی‌کند و تنها شروع خرابی در تغییر مکان‌های کمتری پیدا می‌شود.



شکل ۶: کمانش موضعی بال و جان مدل ستون مرکب؛ نمونه

B25E12-PL70x8-P1

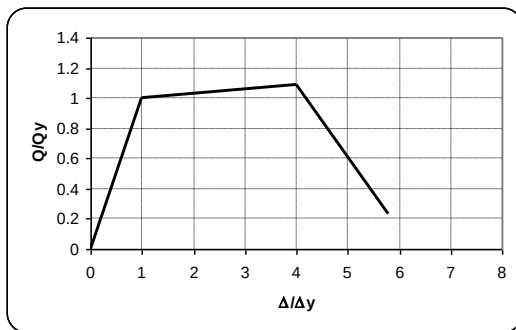
7 - Global Buckling of Chords

8 - Local Buckling

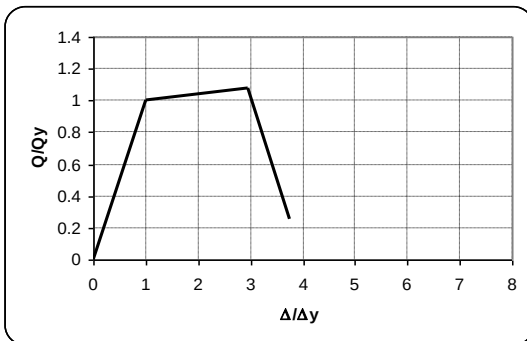


## ۳-۵- منحنی‌های رفتاری تحلیلی ستون‌های مرکب

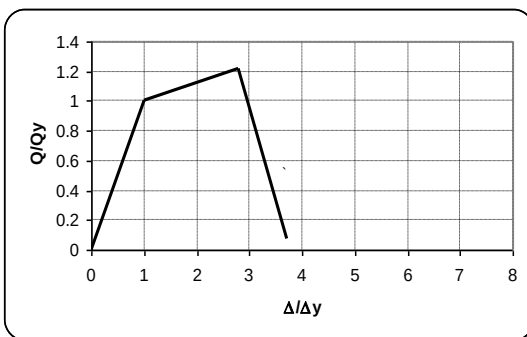
با استفاده از منحنی‌های چرخه‌ای تحلیلی، منحنی‌های رفتاری ستون‌ها به روش شرح داده شده در دستورالعمل FEMA356 تهیه شدند. نمونه‌ای از یک منحنی چرخه‌ای تحلیلی و منحنی رفتاری متناظر با آن به همراه منحنی رفتاری نهایی هموار شده آن، در شکل (۷) ارائه شده‌اند. منحنی‌های رفتاری تحلیلی به مقادیر نیرو و تغییرمکان جانبی مربوط به حد تسلیم نمونه همپایه (نرمال) شده‌اند.



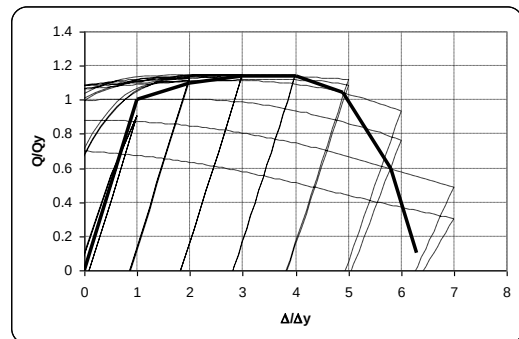
B25E12-PL70x8-P1



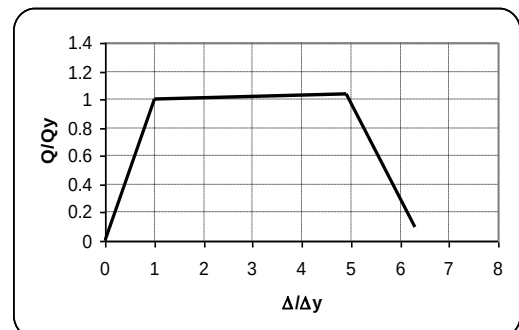
B25E12-PL70x8-P3



B25E12-PL70x8-P4



الف- منحنی چرخه‌ای و منحنی رفتاری متناظر با آن



ب- منحنی رفتاری نهایی نمونه ستون (هموار شده)

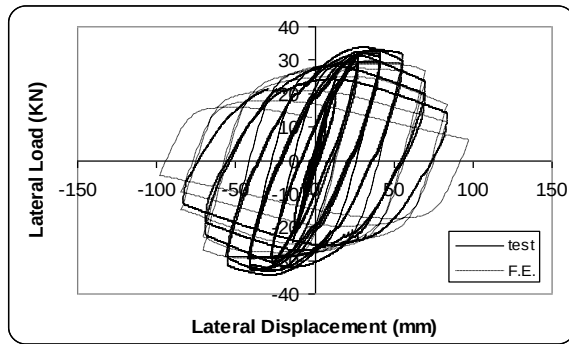
شکل ۷: نمونه‌ای از منحنی رفتاری تحلیلی ستون؛ نمونه B35E12-PL70x8-P1

به همین ترتیب، منحنی‌های رفتاری تحلیلی نهایی برای تمام مدل‌های ستون مرکب تهیه شده و نمونه‌ای از آن‌ها در شکل (۸) ارائه شده است، همان‌گونه که در شکل یاد شده

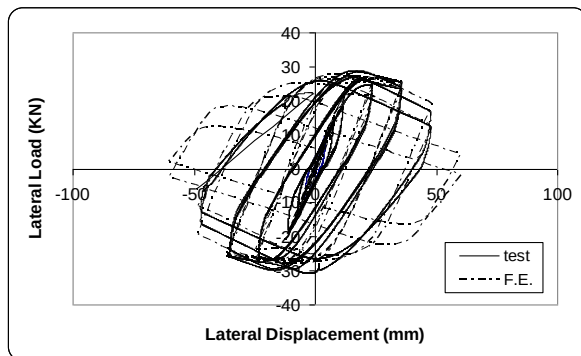
شکل ۸: نمونه منحنی‌های رفتاری تحلیلی مدل‌های ستون مرکب

دید می‌شود، منحنی‌های رفتاری تحلیلی از نوع نیمه شکل پذیر (تپ ۲ طبق دستورالعمل FEMA356) و بدون مقاومت باقیمانده است. تنها در یک نمونه (نمونه با مقطع ناودانی برای اعضای طولی) تحت نیروی محوری زیاد،

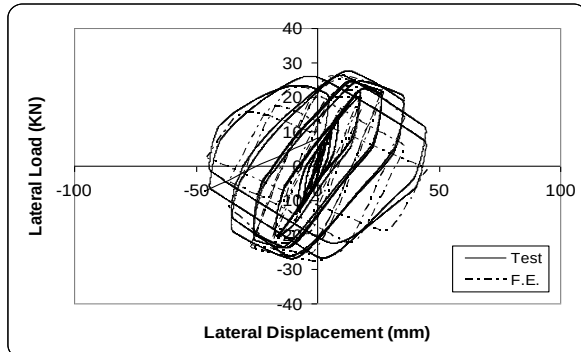




B25E12-PL70x8-P1



B25E12-PL70x8-P3



B25E12-PL70x8-P4

شکل ۹: مقایسه منحنی های چرخه ای تحلیلی و آزمایشی ستون

مقدار تغییر مکان متناظر با شروع افت مقاومت جانبی تحلیلی در بعضی نمونه ها هماهنگ بر آزمایش و در بعضی دیگر بیشتر از آزمایش است. این موضوع سبب شکل پذیرتر شدن برخی از مدل های تحلیلی نسبت به نمونه های آزمایشی خواهد شد. تقریباً در تمام نمونه ها، منحنی های تحلیلی دارای سختی جانبی بزرگتری نسبت به منحنی های

منحنی رفتاری از نوع غیر شکل پذیر با رفتار کنترل شونده با نیرو (تیپ ۳) به دست آمده است. این موضوع همان گونه که در بخش قبل اشاره شد، نشان دهنده رفتار نامطلوب ستون با مقطع ناودانی نسبت به نمونه های مشابه با مقاطع قوطی و I است.

شیب قسمت سخت شونده منحنی های رفتاری تحلیلی، بین ۱ الی ۲۴ درصد است. نکته قابل توجه این است که در بیشتر مدل ها، شیب قسمت سخت شونده با افزایش نیروی محوری افزایش پیدا می کند. تنها در نمونه با مقطع ناودانی، شیب مذکور منفی شده و در واقع رفتار ستون بلا فاصله پس از حد خطی به شکل نرم شونده است. بر این اساس می توان گفت که نمونه دارای مقطع ناودانی ضعیف ترین رفتار لرزه ای را نسبت به سایر نمونه های مورد بررسی، دارد.

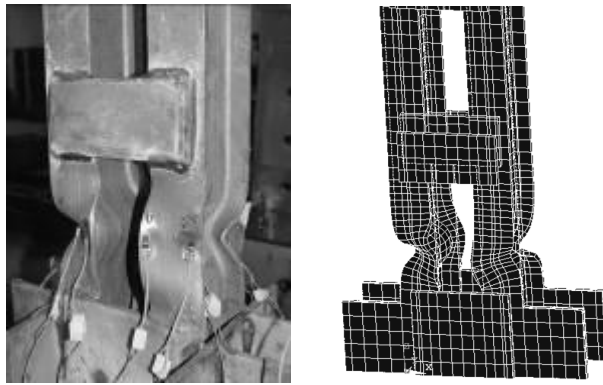
## ۶- مقایسه و ارزیابی نتایج تحلیل اجزاء محدود ستون ها با آزمایش

به منظور ارزیابی اعتبار نتایج تحلیل اجزاء محدود، نتایج حاصل از تحلیل مدل های ستون با نتایج حاصل از آزمایش برخی از نمونه های مشابه آن ها که در مرجع [۲] ارائه شده، مقایسه شده اند.

شکل (۹) نمونه هایی از منحنی های چرخه ای تحلیلی نمونه های ستون مرکب را در کنار منحنی های چرخه ای آزمایشی متناظر نشان می دهد. در یک نگاه کلی، منحنی ها از نظر شکل ظاهری شباهت خوبی با یکدیگر دارند.

در این مطالعه چگونگی تأثیر پارامترهای مختلف مدلسازی (برای نمونه چگونگی مدلسازی مشخصات مصالح) بر پاسخ مدل های تحلیلی بررسی نشده است.

تقریباً در تمام نمونه ها، منحنی های تحلیلی دارای مقاومت جانبی بیشینه کوچکتری نسبت به منحنی های آزمایشی است این موضوع، باعث ایجاد شیب بیشتری در قسمت سخت شونده منحنی رفتاری نمونه های آزمایشی نسبت به مدل های تحلیلی خواهد شد.



شکل ۱۰: کمانش موضعی بال و جان ستون مرکب در تحلیل و آزمایش  
نمونه B25E12-PL70x8-P1؛

میشود که ظرفیت شکل پذیری ستون‌های مرکب به ویژه در نیروهای محوری مبه وسیله‌ی و زیاد در حدود ۲ است که حاکی از شکل پذیری کم و رفتار لرزه ای نامناسب این ستون‌ها (نسبت به ستون‌های با جان توپر) است.

جدول ۲: مقایسه ظرفیت شکل پذیری نمونه‌ها در مدل‌های تحلیلی و آزمایشی

| SPECIMEN             | تحلیل | آزمایش |
|----------------------|-------|--------|
| (1) B35E12-PL70x8-P1 | 4.9   | 3.94   |
| (2) B35E12-PL70x8-P3 | 2.9   | 2.93   |
| (3) B35E12-PL70x8-P4 | 2.0   | 1.93   |
| (4) B25E12-PL70x8-P1 | 4.0   | 2.92   |
| (5) B25E12-PL70x8-P3 | 2.94  | 1.92   |
| (6) B25E12-PL70x8-P4 | 2.78  | 2.92   |
| (7) B35E8-PL70x8-P1  | 4.0   | 2.98   |
| (8) B35E8-PL70x8-P3  | 2.0   | 1.95   |
| (9) B35E8-PL70x8-P4  | 2.0   | 1.94   |
| (10) B25E8-PL70x8-P1 | 4.0   | 2.98   |
| (11) B25E8-PL70x8-P3 | 3.0   | 1.96   |
| (12) B25E8-PL70x8-P4 | 3.0   | 1.95   |

## ۷- منحنی رفتاری پیشنهادی برای ستون‌های مرکب با بست افقی

منحنی‌های رفتاری ستون‌های با جان توپر در مراجع و استانداردهای مختلف (بیشتر مربوط به بهسازی لرزه‌ای)

آزمایشی است. در منحنی‌های چرخه‌ای مربوط به نمونه‌های آزمایشی، افت سختی بیشتری در چرخه‌های با دامنه تغییر مکان بالا، نسبت به منحنی‌های تحلیلی دیده می‌شود. حالت‌های انحنای و شکست موجود در قسمت‌های باربرداری منحنی‌های چرخه‌ای آزمایشی در منحنی‌های تحلیلی دیده نمی‌شوند و به طور کلی، منحنی‌های چرخه‌ای تحلیلی (به ویژه در قسمت‌های مربوط به باربرداری) هموارتر از منحنی‌های آزمایشی است. مقدار افت مقاومت تحلیلی و آزمایشی در چرخه‌های بالا، در بیشتر حالات تطابق مناسبی با یکدیگر دارند. به طور کلی اختلاف مقاومت میان منحنی‌های چرخه‌ای تحلیلی و آزمایشی، در نمونه‌های تحت نیروی محوری زیاد، بیشتر است.

در نمونه‌های آزمایشی، کمانش موضعی در بال و جان ستونک‌های واقع در انتهای پایینی ستون (و در برخی کمانش کلی ستونک) به وقوع پیوست. همچنین در هیچیک از نمونه‌های آزمایشی وقوع شکست در بست‌های افقی و یا اتصالات آنها دیده نشد. [۲] در مدل‌های تحلیلی متناظر با نمونه‌های آزمایشی نیز، حالات شکست مشابهی (کمانش موضعی در ستونک‌های پایینی) مشاهده شد. نمونه‌ای از حالات شکست تحلیلی و آزمایشی در شکل (۱۰) برای مقایسه در کنار یکدیگر نشان داده شده است. در هر دو شکل یاد شده، حالت کمانش موضعی در بال و جان نمونه‌ها قابل مشاهده است. با توجه به نبود مشاهده شکست در بست‌ها و اتصالات آنها در نمونه‌های آزمایشی، فرض پیوستگی بست‌ها با ستون‌ها در مدل‌های تحلیلی صحیح است.

مقایسه میان ظرفیت شکل پذیری نمونه‌های تحلیلی و نمونه‌های آزمایشی متناظر با آنها در جدول (۲) ارائه شده است. همانطور که در جدول زیر قابل مشاهده است، ظرفیت شکل پذیری نمونه‌ها تحلیلی در حدود یک واحد بیشتر از نمونه‌های آزمایشی است. همچنین مشاهده

|  |                           |                          |
|--|---------------------------|--------------------------|
|  | پروفیل های<br>(استاندارد) |                          |
|  | کنترل شونده با نیرو       | $0.4 \leq \frac{P}{P_y}$ |

شکل ۱۱: منحنی رفتاری پیشنهادی برای ستون های مرکب با بست افقی تحت خمش

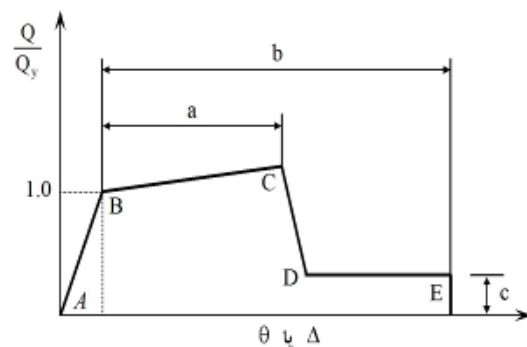
شیب قسمت سخت شدگی کرنشی در شکل یاد شده (خط BC) در نمونه های مختلف یکسان نبوده و بستگی به نیروی محوری ستون دارد. به طور کلی با افزایش نیروی محوری، شیب مذکور نیز افزایش پیدا می کند. بر این اساس مقدار شیب یاد شده به ترتیب برابر ۳ و ۵ و ۱۰ درصد شیب اولیه (خط AB) برای ستون های تحت نیروی محوری کم، مبه و سیله ی و زیاد پیشنهاد می شود.

شایان ذکر است که با توجه به شکل پذیری بیشتر مدل های تحلیلی ستون ها نسبت به نمونه های آزمایشی متناظر، منحنی رفتاری پیشنهادی در شکل ۱۰ دارای شکل پذیری کمتری نسبت به منحنی های حاصل از تحلیل (شکل ۸) است. شرط اصلی استفاده از منحنی شکل ۱۰ این است که ستون مرکب با استفاده از پروفیل های استاندارد نورد شده ساخته شده و بست های آن نیز هماهنگ با الزامات هندسی ارائه شده در آئین نامه های طراحی سازه های فولادی باشند.

## ۸- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، منحنی های چرخه ای و رفتاری ستون های مرکب با بست افقی برای حالات مختلف آن ها از نظر ویژگی های هندسی و مقدار نیروی محوری تهیه شده و مورد مطالعه قرار گرفته اند. تهیه منحنی های رفتاری نیازمند استخراج منحنی چرخه ای نیرو- تغییر مکان عضو سازه ای است. در این پژوهش، منحنی های چرخه ای با استفاده از انجام تحلیل اجزاء محدود غیرخطی روی تعدادی از مدل های ستون مرکب با شرایط مختلف هندسی از نظر ابعاد و فواصل میان پروفیل های طولی و بست های افقی، به دست

مانند FEMA273، FEMA356 و دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود ارائه شده اند. با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش (منحنی های رفتاری) واضح است که منحنی های رفتاری ستون های مرکب با بست افقی دارای تفاوت های بارزی با منحنی های ستون های با جان توپر دارند بنابراین استفاده از منحنی های رفتاری ارائه شده در دستورالعمل های یاد شده برای تحلیل ساختمان های دارای ستون های مرکب، سبب بروز خطاهای قابل ملاحظه ای خواهد شد. بر این اساس، با استفاده از منحنی های رفتاری حاصل از این پژوهش و به شکل محافظه کارانه، منحنی رفتاری به صورت شکل (۱۱) برای ستون های مرکب با بست افقی پیشنهاد می شود.



| نسبت<br>مقاومت<br>پسماند | تغییر شکل خمیری |                                                   | محدوده نیروی محوری           |
|--------------------------|-----------------|---------------------------------------------------|------------------------------|
|                          | c               | a                                                 |                              |
| 0                        | -               | 1Δ <sub>y</sub> (پروفیل<br>ناودانی)               | $\frac{P}{P_y} \leq 0.15$    |
|                          |                 | 2Δ <sub>y</sub> (سایر<br>پروفیل های<br>استاندارد) |                              |
| 0                        | -               | کنترل شونده با<br>نیرو (پروفیل<br>ناودانی)        | $0.15 < \frac{P}{P_y} < 0.4$ |
|                          |                 | 1Δ <sub>y</sub> (سایر)                            |                              |

مهندسی زلزله (SEE5)، مقاله شماره SC1265، تهران، ایران.

۵. حسینی هاشمی، بهرخ و حسینی، محمود و قاسمی حمزه کلایی، عباس، (۱۳۸۲)، "مطالعه رفتار لرزه‌ای ستون‌های مشبک با بست افقی با استفاده از تحلیل‌های خطی و غیرخطی استاتیکی"، پژوهشنامه زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، شماره اول بهار، ۲-۱۵

6. Kleiser, M. & Uang, C.M. (1999), "Steel latticed members under cyclic axial and flexural actions", j. of Struct. Engng. (ASCE), 125(4), 393-400
7. Sahoo, D. & Rai, D.C. (2004), "Battened built-up beam-columns under Cyclic loads", 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, paper no.67
8. FEMA 356, (2000), prestandard and commentary for seismic rehabilitation of buildings, prepared by American Society of Civil Engineers (ASCE) for Federal Emergency Management Agency, Washington.D.C., (FEMA publication
9. Gioncu V. & Mazzolani M. (2002), "Ductility of Seismic Resistant Steel Structures", Spon Press, newyork
10. Kim K. D. & Engelhardt M. D. (2000), "Beam-Column Element for Nonlinear Seismic Analysis of Steel Frames", j. of struct. Engng. (ASCE), 126, 8,916-925
11. Lew, H. S. (1997), "Evaluation of seismic performance parameters", Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes, Fajfar & Krawinkler, Balkema, Rotterdam, 151-157
12. SEAOC, Vision 2000 (1995), "Performance Based Seismic Engineering of Buildings", San Francisco.
13. ATC-24, (1992), Guidelines for Cyclic Seismic testing of components of Steel Structures, Applied Technology Council, Redwood city, California.
14. ASCE/SEI-41, (2007), Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers.

آمده‌اند. درستی نتایج به دست آمده از تحلیل‌ها با نتایج آزمایش‌های انجام شده به وسیله‌ی نگارندگان روی نمونه‌های مشابه ستون، مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. برخلاف ستون‌های با جان توپر، منحنی‌های رفتاری ستون‌های مرکب با بست افقی در بیشتر حالات از نوع نیمه شکل پذیر و فاقد مقاومت باقیمانده است، در نهایت نیز یک منحنی رفتاری محافظه کارانه برای کاربرد در تحلیل‌های ارزیابی آسیب‌پذیری ساختمان‌ها پیشنهاد شده که می‌تواند در دستورالعمل ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود، استفاده شود.

## ۹- مراجع

۱. "دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود"، (۱۳۸۵) نشریه شماره ۳۶۰، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور؛ دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله
2. Hosseini Hashemi B. & jafari S. M. (2012), "Experimental Evaluation of Cyclic Behavior of Batten Column", Journal of Constructional Steel Research, 78, 88-96
3. Hosseini Hashemi B. & jafari S. M. (2003), "Performance of batten columns in steel buildings during the Bam earthquake of 26 December 2003", JSEE: Special issue on Bam earthquake, 101-109
۴. حسینی هاشمی، بهرخ. و جعفری، محمدعلی. (۱۳۸۶)، "بررسی تحلیلی مقاومت، سختی و شکل پذیری ستون‌های مشبک با بست افقی تحت بار جانبی چرخه‌ای"، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس بین‌المللی زلزله‌شناسی و