



## مطالعه رفتار چرخه ای ستون‌های مشبک با بست‌های افقی و مایل و ارائه المان جایگزین

مصطفی بیابان نورد<sup>۱</sup>، فرهاد بهنام فر<sup>۲\*</sup>، حسن زیباسخن<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> مهندس محاسب، مهندسین مشاور، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۸ دی ۱۳۹۴  
بازنگری: ۲۸ دی ۱۳۹۵  
پذیرش: ۲ اسفند ۱۳۹۵  
ارائه آنلاین: ۷ اسفند ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

ستون مشبک  
بست افقی  
بست مورب  
سوپر المان  
اجزاء محدود

**چکیده:** ساخت ستون‌های مشبک یکی از روش‌هایی است که در هنگام نیاز به مقاطع بزرگتر برای حمل نیروهای وارده و عدم وجود مناسب از پروفیل ساختمانی آن استفاده می‌شود. در این روش دو پروفیل ساختمانی توسط بست‌های افقی یا مورب به یکدیگر متصل شده و تشکیل یک پروفیل واحد را می‌دهند. در این مقاله رفتار جانبی ستون‌های مشبک با بست افقی و مورب با استفاده از مدل‌سازی اجزاء محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد. سپس با بارگذاری در دو حالت یکطرفه و چرخه‌ای، پارامترهای رفتاری غیرخطی ستون شامل سختی جانبی در نواحی ارتجاعی و خمیری، برش تسلیم و سطح منحنی‌های هیستریزس محاسبه می‌گردد. افزایش بار محوری تا حدود ۲۰ درصد ظرفیت ستون سختی، مقاومت، و ظرفیت جذب انرژی را به میزان قابل ملاحظه کاهش می‌دهد و پس از آن نرخ افت این پارامترها کاهش می‌یابد. ستون‌های دارای بست مورب به دلیل یکپارچگی بیشتر ناشی از عملکرد خرابایی بست‌ها به خصوص در سربارهای محوری زیاد عملکرد بهتری نسبت به ستون مشبک دارای بست موازی از خود نشان می‌دهند. با توجه به نتایج بدست آمده از مدل‌های غیرخطی اجزاء محدود، یک سوپر المان که توانایی مدل کردن رفتار این نوع ستون‌ها را با عضو یکپارچه با رفتار مشابه دارا می‌باشد، معرفی می‌شود. این سوپر المان که با جایگزین کردن یک المان با تعداد درجات آزادی محدود به جای مدل اجزاء محدود با تعداد المان‌ها و درجات آزادی زیاد بدست می‌آید، سرعت انجام محاسبات را افزایش داده و قابلیت در نظر گرفتن تغییر شکل‌های برشی بست‌های افقی و مورب در مدل‌های کلی را ایجاد می‌کند.

### ۱- مقدمه

با توجه به استفاده گسترده از ستون‌های مشبک با بست در ایران و رفتار خاص این ستون‌ها به خصوص در مقابل بارهای لرزه‌ای نیاز به تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه می‌باشد. هر چند که رفتار ستون‌های مشبک با بست افقی در آیین‌نامه المان به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته و در آیین‌نامه آمریکا به بررسی رفتار ستون‌های مشبک با بست مورب پرداخته شده اما با توجه به استفاده کمتر از این نوع اعضا در این کشورها به دلیل بهره‌مندی از مقاطع بزرگ برای ستون‌ها و اهمیت کمتر زلزله در اغلب مناطق آن‌ها، در این زمینه نیاز به تحقیقات بیشتری در کشور وجود دارد.

تا کنون تحقیقات متعددی بر روی رفتار ستون‌های مشبک به خصوص ستون‌های مشبک با بست مورب انجام شده است که بیشتر آن‌ها در زمینه تعیین بار بحرانی این اعضا بوده است. ویلیامسون<sup>۱</sup> و مارگولین<sup>۲</sup> در سال ۱۹۶۶ اثرات تغییر شکل برشی در برج‌های با بست مورب را مورد بررسی

قرار دادند [۱]. در این ارزیابی اثرات تغییر شکل برشی و نیروی محوری مقایسه شده و خطاهای حاصل از عدم لحاظ کردن آن‌ها استخراج شده است. همچنین مطالعات تئوریک چندی توسط فانگ<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۱۹۷۰ بر روی رفتار اعضای سازه‌ای با بست مورب و افقی صورت گرفته که در این مطالعات پارامتر بدون بعدی جهت تعیین نرمی برشی اعضای سازه‌ای با بست مورب و افقی مورد بررسی قرار گرفته است [۲]. این پارامتر اثرات نیروی محوری، خروج از مرکزیت محلی اعضای قطری و سختی اتصالات بست‌ها به نیمرخ‌های اصلی را در بر می‌گیرد. سون سان<sup>۴</sup> و کراگراب<sup>۵</sup> در سال ۱۹۸۲ روشی کلی برای تعیین رابطه بار-تغییر مکان برای ستون‌های با بست مورب ارائه کردند. در این تحقیق نشان داده شد که وقتی ستون به بار تخریب می‌رسد، رفتاری شبیه به پوسته‌ها دارد و بنابراین نقص‌های موجود می‌تواند تا حدود ۵۰ درصد از ظرفیت بکاهد [۳]. جلسویک<sup>۶</sup> در سال ۱۹۹۰ برای محاسبه بار بحرانی ستون‌های مشبک از شبیه‌سازی جان پیوسته که فقط دارای سختی برشی بود، استفاده کرد و اثرات صفحات انتهایی در

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: farhad@cc.iut.ac.ir

3 Fung  
4 Svensson  
5 Kragerup  
6 Gjelsvik

1 Williamson  
2 Margolin

نشان داد که ظرفیت محوری ستون در حالت وجود لنگر ناشی از خروج از مرکزیت بار در دو انتهای ستون به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. علیرغم کارهای انجام شده در زمینه ستون‌های مشبک با بست افقی و مورب تا کنون المان جایگزین مناسبی برای در نظر گرفتن ساده رفتار واقعی آن‌ها شامل ناحیه غیر ارتجاعی این اعضا در تحلیل سازه‌های واقعی ارائه نشده است. هدف این مقاله ارائه سوپر المان جایگزینی است که با تعداد درجات آزادی کم رفتار ستون‌های مشبک دارای بست مورب و موازی را در ناحیه خطی و غیرخطی به خوبی مدل نماید.

## ۲- اثر تغییرشکل‌های برشی در رفتار ستون‌ها

تغییرشکل‌های عضو ناشی از نیروی برشی معمولاً در تحلیل و طراحی قاب‌های ساخته شده از اعضای با مقطع توپر در نظر گرفته نمی‌شود. این مسئله از آنجا ناشی می‌شود که تغییرشکل‌های برشی در چنین اعضای، به وسیله یک یا چندجان به هم پیوسته محدود می‌شود و اعوجاج بوجود آمده از برش نسبتاً کوچک است. در اعضای سازه‌ای با بست افقی یا مورب سهم تغییرشکل برشی نسبت به تغییرشکل کل سازه ممکن است قابل توجه و محسوس باشد. بست‌های مورب که شکل‌های مثلثی به وجود می‌آورند، دارای سختی و مقاومت بیشتری نسبت به بست افقی می‌باشند. با توجه به این مسئله، مدل‌سازی رفتار این ستون‌ها حول محور با مصالح بدون در نظر گرفتن اثر برش و به صورت خمشی دقت مناسبی دارا می‌باشد ولی حول محور بدون مصالح تغییرشکل‌های برشی دارای اثر قابل توجهی بوده و باید در نظر گرفته شود. از سوی دیگر، چگونگی رفتار این ستون‌ها در محدوده غیرارتجاعی تحت بار جانبی زلزله مورد سؤال است. به این منظور در ادامه به بررسی رفتار غیرخطی این ستون‌ها با استفاده از روش اجزاء محدود و مقایسه آن با مقادیر نظری بدون در نظر گرفتن اثر تغییرشکل برشی پرداخته می‌شود.

## ۳- مشخصات ستون‌های مورد بررسی

ستون‌های مورد بررسی در این تحقیق از نوع ستون‌های مشبک با بست افقی و مورب با استفاده از مقاطع IPE120 تا IPE200 می‌باشد. مشخصات پروفیل‌های بکار رفته در جدول ۱ آورده شده است. لازم به ذکر است که در ستون‌های مشبک با بست مورب نیز از همین مقاطع استفاده می‌شود با این تفاوت که طول بست با زاویه ۳۰ درجه نسبت به افق تعیین می‌گردد. شکل ۱ مشخصات ستون‌ها با بست افقی و مورب مورد استفاده را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که در تمام ستون‌های مشبک با بست افقی فاصله بست‌ها ۵۰۰ میلی‌متر انتخاب شده و بست‌های ابتدایی ستون دارای بعد ۶۰۰ میلی‌متر و بست‌های انتهایی آن به بعد ۳۰۰ میلی‌متر در امتداد ستون می‌باشد. کلیه بست‌ها بر مبنای نیروی برشی نظیر کماتش مساوی  $P_y/2$  محاسبه گشته‌اند که  $P_y$  ظرفیت تسلیم ستون می‌باشد [۱۴ و ۱۵]. فاصله دو نیمرخ به گونه‌ای انتخاب شده است که شعاع ژیراسیون در هر دو جهت

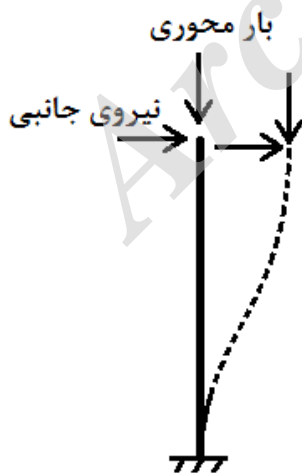
میزان بار بحرانی را مورد بررسی قرار داد [۴]. بنان و فولادی در سال ۲۰۰۳ یک المان جایگزین برای تعیین رفتار خطی ستون‌های مشبک با بست افقی ارائه کردند [۵]. در این تحقیق با استفاده از معادل‌سازی قسمت‌های مختلف یک ستون مشبک با بست افقی (شامل بست افقی، اعضای اصلی متصل شده، و ناحیه اتصال بست به ستون) با عناصر جایگزین و بررسی تحلیلی موضوع، یک المان معادل که دارای شش درجه آزادی در هر انتها بود، پیشنهاد کرده و ماتریس سختی ارتجاعی این المان را تعیین کردند که در آن اثرات بار محوری و تغییرشکل‌های برشی در نظر گرفته شده است. ساهو<sup>۱</sup> و ری<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۷ به بررسی ستون‌های مشبک با بست افقی تحت بارهای رفت و برگشتی پرداختند و نتیجه گرفتند که با استفاده از طراحی‌های معمول که تنها ۲ تا ۲/۵ درصد از بار محوری ستون به عنوان بار جانبی در نظر گرفته می‌شود، عضو مشبک به دلیل ناپایداری جانبی به ظرفیت خمشی مورد انتظار دست پیدا نمی‌کند. با اصلاح طراحی و شکل بست‌ها در نواحی مورد انتظار برای شکل‌گیری مفصل پلاستیک (کاهش فواصل بین بست‌ها در قسمت‌های انتهایی به نصف و طراحی بست‌ها برای تقاضای برشی ناشی از ظرفیت خمشی مقطع)، ظرفیت خمشی مقطع تا ظرفیت خمشی مورد انتظار افزایش داده شد [۶]. حسینی هاشمی و جعفری در سال ۲۰۰۹ به بررسی اثر پارامترهای فاصله دو پروفیل و تغییر ابعاد بست‌ها بر روی بار بحرانی الاستیک این ستون‌ها پرداختند و نتایج آزمایشگاهی را با روابط تئوری مورد مقایسه قرار دادند. این مقایسه نشان داد که بار بحرانی بدست آمده از روابط تحلیل موجود برای ستون‌های دارای بست افقی عموماً محافظه‌کارانه است [۷]. این محققین در سال ۲۰۱۲ به بررسی شکل‌پذیری این اعضا، تحت بارهای رفت و برگشتی، پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد که شکل‌پذیری موجود در این مقاطع به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از ستون‌های با جان توپر می‌باشد [۸]. کالوچیرتیس<sup>۳</sup> و گانتس<sup>۴</sup> در سال ۲۰۱۲ به بررسی آزمایشگاهی و عددی بار بحرانی ستون‌های مشبک دارای بست مورب با در نظر گرفتن اثر کاهش سختی برشی مقطع مرکب و اثر کماتش موضعی پرداختند. این محققین روشی تحلیلی برای محاسبه بار بحرانی این ستون‌ها با در نظر گرفتن اثرات مختلف پیشنهاد نموده‌اند [۹ و ۱۰]. حسینی هاشمی و پورصمد بناب در سال ۲۰۱۳ به صورت آزمایشگاهی و عددی به بررسی رفتار ستون‌های مشبک با بست مورب تحت بار رفت و برگشتی پرداختند. این تحقیق نشان داد که افزایش نیروی محوری فشاری ستون به میزان قابل توجهی شکل‌پذیری، مقاومت، و سختی این ستون‌ها را کاهش می‌دهد ولی تغییر فاصله بین دو پروفیل اثر اندکی روی مقاومت، سختی، و میزان جذب انرژی این ستون‌ها دارد [۱۱ و ۱۲]. کالوچیرتیس و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی عددی و آزمایشگاهی اثر خروج از مرکزیت بار محوری بر ظرفیت باربری ستون‌های مرکب با بست مورب پرداختند. این تحقیق

- 1 Sahoo
- 2 Rai
- 3 Kalochairetis
- 4 Gantes

#### ۴- مدل سازی اجزاء محدود با استفاده از نرم افزار ANSYS

##### ۴-۱- کلیات

برای مدل سازی ستون و بست ها با دقت خوب می توان از المان های پوسته ای استفاده نمود ولی برای مدل سازی جوش به دلیل وجود تنش های سه بعدی در ناحیه جوش باید از المان های سه بعدی استفاده شود. برای این منظور در مدل سازی های انجام شده از المان Shell143 برای ستون و بست ها و از المان Solid45 برای جوش استفاده شده است. المان Shell143 یک المان چهار گره ای و دارای ۶ درجه آزادی در هر گره بوده و مناسب برای مدل سازی غیرخطی پوسته های نازک تا نسبتاً ضخیم می باشد که قابلیت در نظر گرفتن پلاستیسیته، خزش، تنش سختی و تغییر شکل های بزرگ را داراست. المان Solid45 یک المان هشت گره ای و دارای سه درجه آزادی در هر گره در جهت های مختلف بوده و مناسب برای مدل سازی سازه های سه بعدی می باشد که تغییر شکل های پلاستیک و تغییر شکل های بزرگ را در نظر می گیرد. برای مدل سازی اجزاء محدود نمونه ها از ۷۵۰۰ المان استفاده شده که برای المان های سطحی از المان های مربعی و برای المان های حجمی از المان های شش وجهی استفاده شده است. شرایط تکیه گاهی پای ستون به صورت گیردار و بالای آن مقید شده در برابر دوان است که بالای ستون تحت نیروی محوری و جابجایی جانبی قرار دارد. در شکل ۲ شرایط تکیه گاهی دو انتهای ستون و نحوه اعمال بارگذاری نشان داده شده است. منحنی تنش- کرنش فولاد و جوش مورد استفاده مطابق شکل ۳ می باشد که رفتار آن در بارگذاری رفت و برگشتی به صورت سخت شدگی سینماتیکی در نظر گرفته شده است. با توجه به پیچیدگی ها و محدودیت های موجود در تحلیل با استفاده از روش اجزاء محدود در منحنی های تنش- کرنش مصالح از خرابی ناشی از گسترش ترک و شکست مصالح صرف نظر شده است.



شکل ۲: شرایط تکیه گاهی ستون و نحوه اعمال بارگذاری

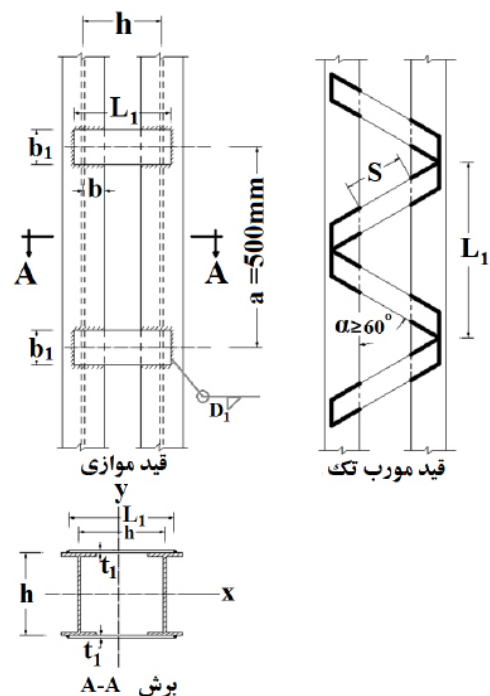
Fig. 2. Boundary condition and loading

حدوداً یکسان باشد. ارتفاع کلیه ستون ها ۳۰۰۰ میلی متر انتخاب شده است. به منظور بررسی اثر نسبت های مختلف بار محوری ستون، نمونه ها تحت سربارهای قائم به مقدار  $P/P_y = [0, 0/2, 0/4, 0/6, 0/8]$  مورد بررسی قرار گرفته اند که  $P$  نیروی محوری ستون می باشد.

جدول ۱: مشخصات پروفیل های بکار رفته

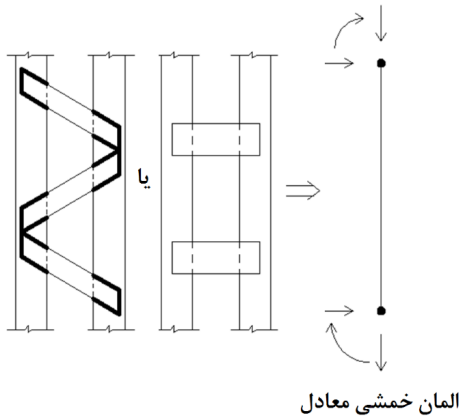
Table 1. Properties of sections

نیمرخ	ابعاد تسمه بست افقی ستون مشبک (مراجعه به شکل ۱)			
	ضخامت $t_1$ (mm)	پهنای $b_1$ (mm)	طول $L_1$ (mm)	$b$ (mm) $D_1$ (mm)
2IPE120	۴	۱۰۰	۱۴۰	۴۰ ۳
2IPE140	۶	۱۰۰	۱۶۰	۴۵ ۵
2IPE160	۶	۱۰۰	۱۸۰	۵۰ ۵
2IPE180	۶	۱۱۰	۲۰۰	۵۵ ۵
2IPE200	۶	۱۲۰	۲۲۰	۶۰ ۵



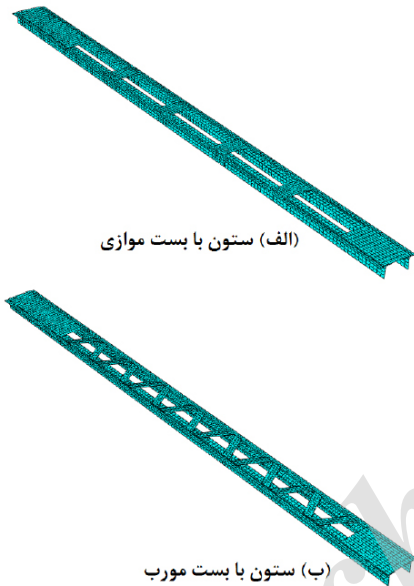
شکل ۱: مشخصات ستون ها با بست های افقی و مورب

Fig. 1. Battened and laced column details



شکل ۵: معادل سازی ستون مشبک با المان توپر

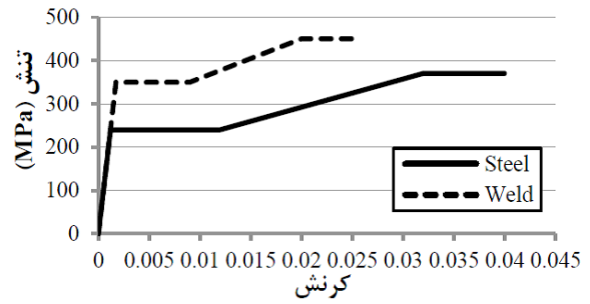
Fig. 5. Substituting latticed column with super-element



شکل ۶: نحوه المان بندی ستون های مورد بررسی

Fig. 6. Finite element mesh of the columns

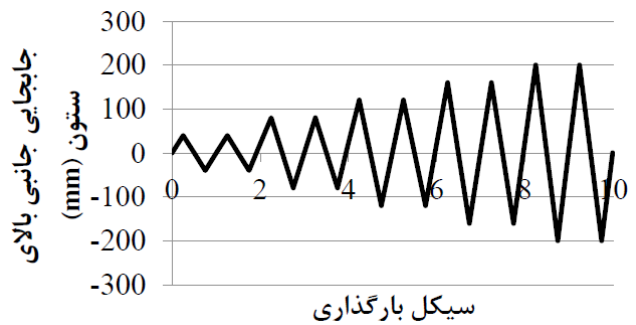
۴-۲- صحت سنجی نتایج تحلیل  
 به منظور بررسی صحت نتایج بدست آمده از تحلیل اجزاء محدود با استفاده از نرم افزار ANSYS، نتایج یک نمونه آزمایشگاهی ستون دارای بست موازی که توسط حسینی هاشمی و جعفری [۸] در سال ۲۰۱۲ در پژوهشگاه زلزله مورد آزمایش قرار گرفته، با نتایج تحلیل عددی در نرم افزار مقایسه می شود. نمونه P35E12-P1-1 از نمونه های آزمایشی این محققین برای این منظور انتخاب شده است که جزییات آن در شکل ۷ قابل مشاهده است [۸]. توضیحات مربوط به نحوه مدل سازی در قسمت قبل ارائه شد. نمونه به صورت ستون یک انتها گیردار و یک انتها آزاد و دارای بار ثقلی برابر ۱۵٪ ظرفیت تسلیم محوری تسلیم بوده و بارگذاری جانبی مطابق پروتکل ATC24 به صورت چرخه ای انجام شده است.



شکل ۳: منحنی تنش-کرنش فولاد و جوش مورد استفاده

Fig. 3. Stress-strain relation for steel and weld

با توجه به تقارن در ستون های مورد بررسی، نصف مقطع ستون مدل سازی شده است. تحلیل به صورت استاتیکی غیرخطی بوده و تغییر مکان نهایی برابر با ۲۰۰ mm (در حدود ۷ درصد ارتفاع ستون) به بالای ستون به صورت افقی به همراه سربارهای قائم با مقادیر مختلف، اعمال شده است. بارگذاری در یک حالت به صورت یک جهته و تا تغییر مکان نهایی انجام شده و در حالت دیگر به صورت دوره ای (رفت و برگشتی) انجام می شود و خمش حول محور بی مصالح انجام می گیرد. در حالت بارگذاری رفت و برگشتی از تاریخچه بارگذاری مطابق شکل ۴ استفاده شده است. هدف از بررسی ها، تعیین المان خمشی معادل برای ستون مشبک در نواحی خطی و غیرخطی است شکل ۵. برای این کار بررسی درجه آزادی جانبی کافی است چون رفتار غیرخطی ستون منحصر به بار زلزله است که واکنش غالب در آن ایجاد تغییر مکان افقی نسبی می باشد. سطح مقطع المان معادل طوری تعیین می شود که مقاومت کمانش یا تسلیم آن (هر کدام کوچکتر است)، مساوی ستون مشبک باشد. با توجه به این موارد، ستون مشبک به صورت یک سرگیردار و یک سر گیردار غلتکی تحلیل می گردد. نحوه المان بندی ستون در دو حالت در شکل ۶ نشان داده شده است.

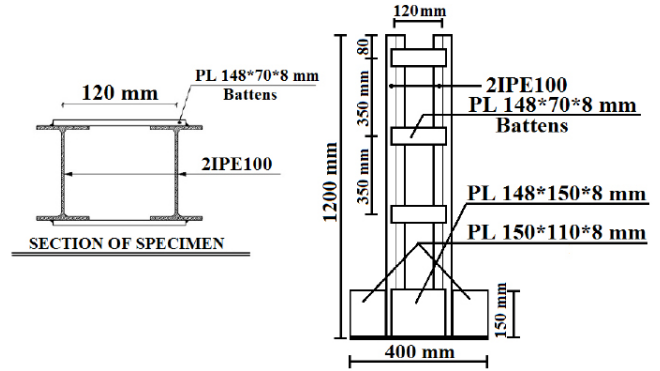


شکل ۴: تاریخچه بارگذاری

Fig. 4. Loading history

## ۵- بررسی نتایج تحلیل

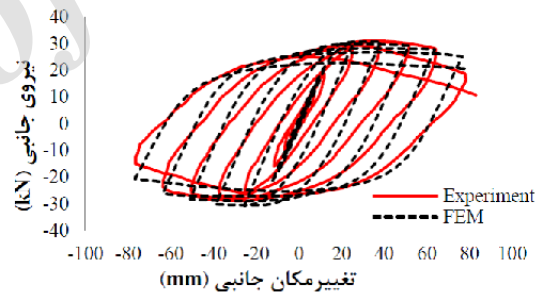
منحنی‌های نیرو-تغییرمکان جانبی حاصل از تحلیل‌های انجام شده در حالت بارگذاری یک‌جهته در شکل ۱۰ و در حالت بارگذاری رفت و برگشتی در شکل ۱۱ آورده شده است. در تحلیل‌های انجام شده، تغییرشکل‌های پلاستیک ایجاد شده در جوش‌های مورد استفاده برای اتصال بست به ستون، در جابجایی‌های حدود ۴۰ تا ۶۰ میلی‌متر (جابجایی جانبی نسبی حدود ۱/۳ تا ۲ درصد)، از مقدار حداکثر آن برای مصالح جوش تجاوز می‌نماید. این موضوع نشان دهنده ایجاد ترک خوردگی در این جوش‌ها و شروع افت مقاومت ستون و خرابی آن تحت بار جانبی می‌باشد. در نتایج آزمایشگاهی مراجع ۸ و ۱۲ نیز به صورت تقریباً مشابه در محدوده جابجایی نسبی حدود ۱/۵ تا ۲ درصد، افت مقاومت و شروع خرابی ستون مشاهده می‌شود. این موضوع با توجه به صرف نظر نمودن از شبیه‌سازی خرابی مصالح در مدل‌سازی انجام شده، در نمودارهای شکل‌های ۱۰ و ۱۱ قابل مشاهده نیست. البته با توجه به نسبی بودن نتایج، از نمودارهای شکل‌های ۱۰ و ۱۱ در ادامه با ذکر این محدودیت که تاجابجایی نسبی متوسط ۱/۷ درصد معتبرند استفاده می‌شود. با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که سختی اولیه ستون‌های مشبک در هر دو حالت بست افقی و بست مورب در اثر بار محوری به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۰ می‌توان دید که ستون‌های با بست مورب تحت بار یک‌جهته نسبت به ستون‌های با بست افقی دارای ظرفیت تسلیم بزرگتری می‌باشند که نشان دهنده عملکرد بهتر بست‌های مورب در ایجاد مقاومت جانبی ستون حول محور بدون مصالح است. سختی جانبی ارتجاعی ستون‌های با بست مورب بیشتر از ستون‌های با بست موازی است که نشان دهنده یک پارچگی بهتر و تغییرشکل کمتر این ستون‌ها نسبت به ستون‌های با بست موازی است که ناشی از عملکرد خرابی بست‌ها در ستون با بست مورب است. در ستون‌های با بست مورب و بدون بار محوری شکل منحنی از منحنی تنش-کرنش مصالح پیروی می‌کند و پله تسلیم در این حالت قابل مشاهده است که در این حالت رفتاری شبیه اعضای با جان پر از خود نشان می‌دهد. با افزایش بار محوری از صفر به ۲۰ درصد ظرفیت، در تمام ستون‌ها مقاومت جانبی به میزان قابل توجهی کاهش یافته و بعد از آن با نرخ کمتری کاهش می‌یابد. در اغلب حالت‌ها سختی ستون نیز بعد از این بار تقریباً ثابت باقی می‌ماند. تحت بارگذاری رفت و برگشتی، پوش منحنی نیرو-تغییرمکان جانبی رفتاری مشابه منحنی‌های تحت بار یک‌جهته از خود نشان می‌دهد. در این حالت با افزایش نمره پروفیل‌های ستون میزان جذب انرژی و سختی ستون افزایش می‌یابد. در شکل ۱۱ می‌توان دید که مساحت زیر منحنی پوش بارگذاری رفت و برگشتی (هیستریزس) در ستون‌های دارای بست مورب نسبت به ستون‌های دارای بست افقی در نسبت‌های بارگذاری یکسان بیشتر می‌باشد که این امر نشان دهنده ظرفیت جذب و اتلاف انرژی بیشتر ستون‌های با بست مورب نسبت به ستون‌های با بست افقی است. این اختلاف با افزایش بار محوری اعمال شده افزایش می‌یابد که دلیل عمده آن عملکرد خرابی



شکل ۷: جزئیات نمونه آزمایشگاهی P35E12-P1-1 [۸]

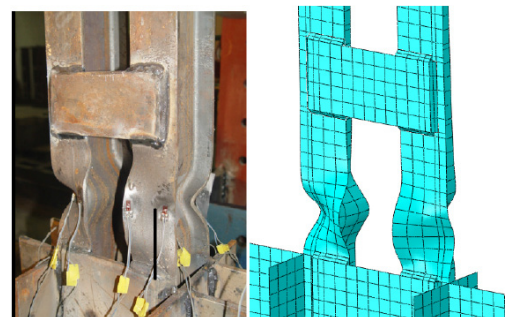
Fig. 7. P35E12-P1-1 specimen details

شکل ۸ مقایسه نتایج مدل اجزاء محدود و نتایج آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که نتایج دو حالت تطابق بسیار خوبی از خود نشان می‌دهد. افت ایجاد شده در نمودار بار تغییرمکان نمونه ناشی از کماتش بال و جان مقطع در پای ستون است. در شکل ۹ نحوه تغییرشکل ستون دارای بست موازی در انتهای بارگذاری در نرم‌افزار و آزمایشگاه نشان داده شده است. این مقایسه نشان می‌دهد که شبیه‌سازی انجام شده به خوبی افت مقاومت ناشی از کماتش را در نظر گرفته است.



شکل ۸: مقایسه نتایج بار-تغییرمکان نمونه شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار و نمونه آزمایشگاهی

Fig. 8. Comparison of load-displacement results of experimental and FE models

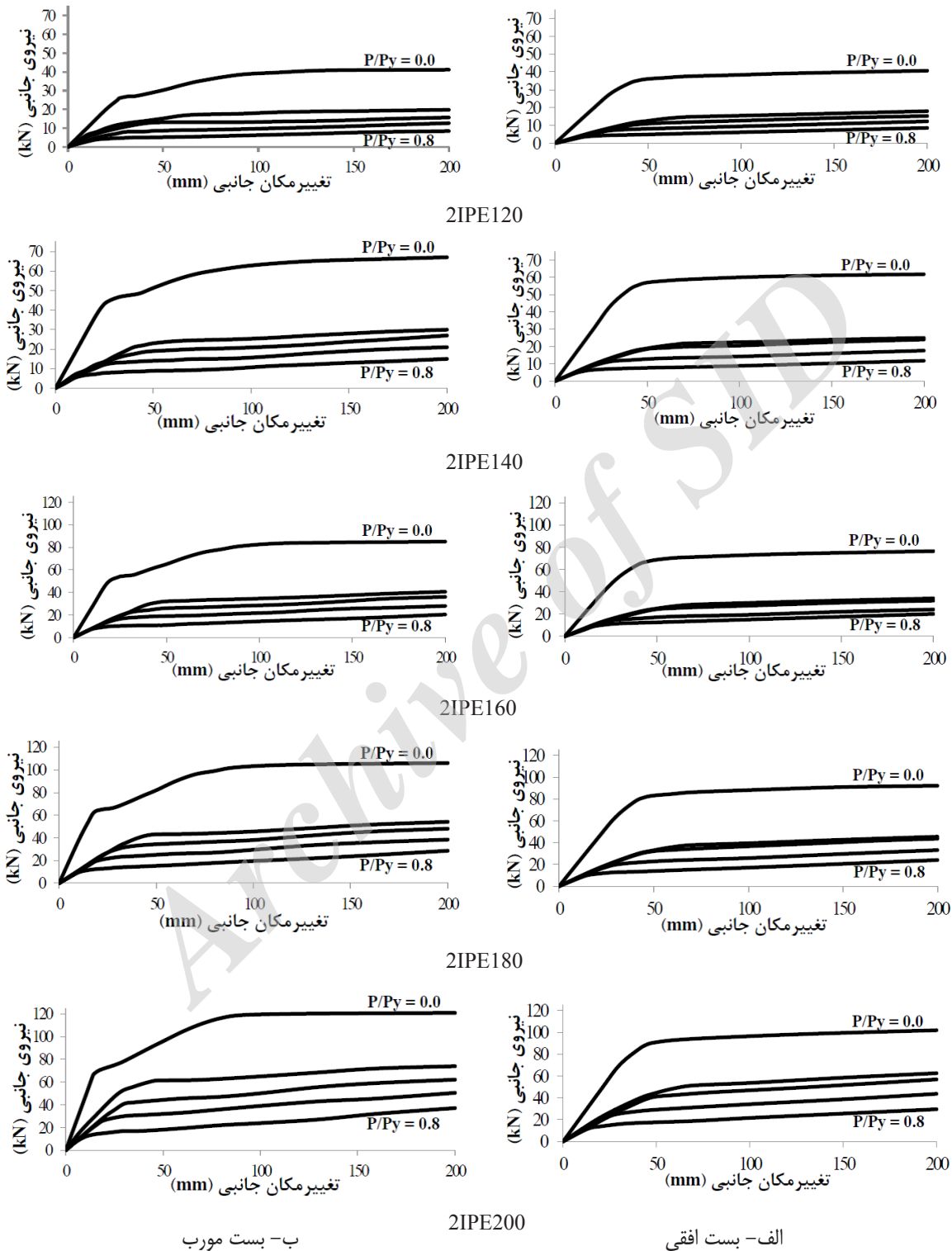


شکل ۹: تغییرشکل ایجاد شده پس از اتمام بارگذاری در نمونه شبیه‌سازیشده در مقایسه با نمونه آزمایشگاهی [۸]

Fig. 9. Deformation of Experimental and FE model after loading

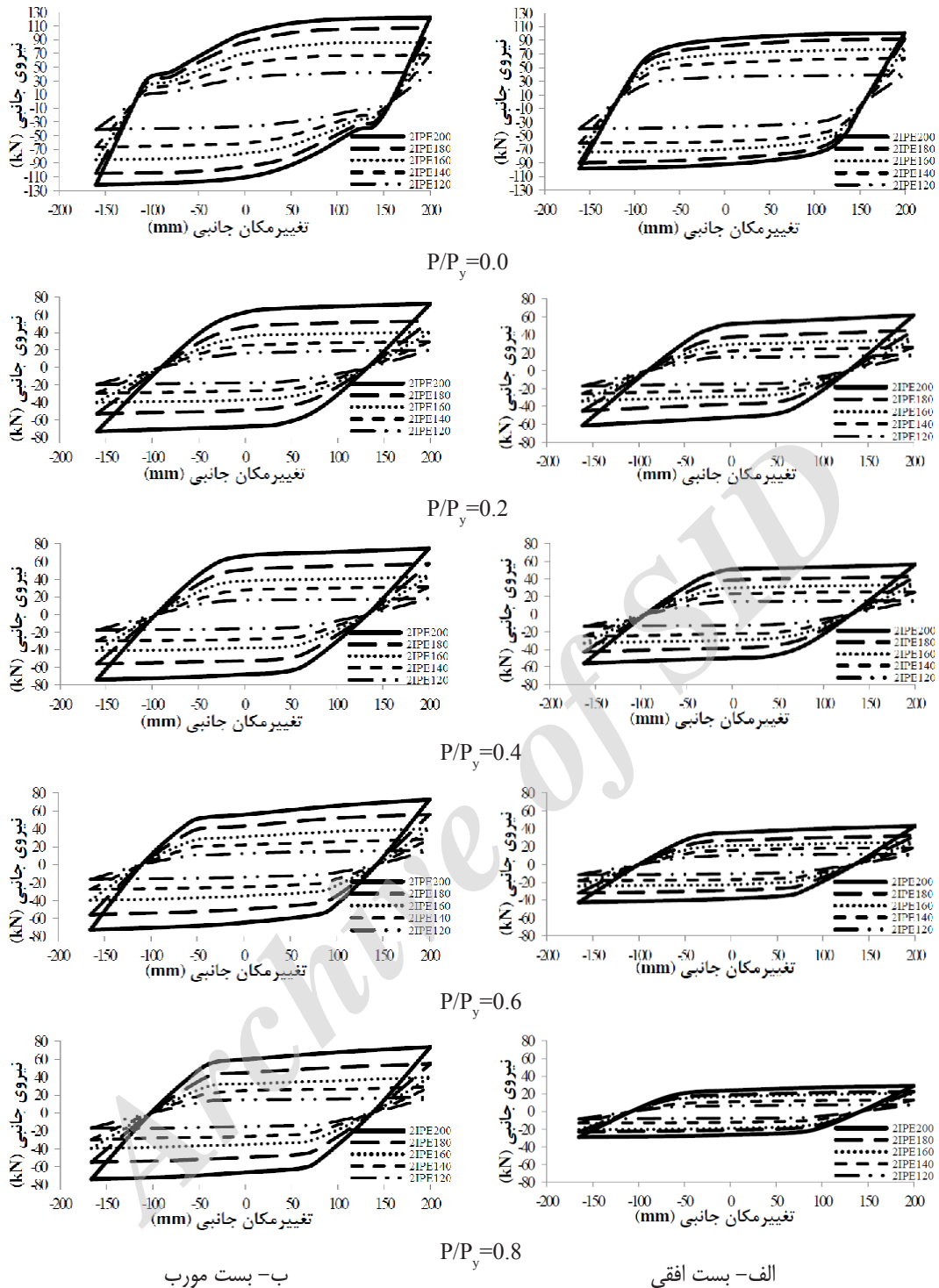
مورب نسبت به ستون‌های دارای بست موازی در نسبت سربارهای محوری زیاد می‌شود.

بست‌های مورب است که یکپارچگی بیشتر مقطع را به دنبال دارد. این موضوع موجب عملکرد بهتر و جذب انرژی بیشتر در ستون‌های دارای بست



شکل ۱۰: منحنی‌های نیرو-تغییر مکان جانبی ستون مشبک تحت بار یک جهته

Fig. 10. Monotonic load-displacement curves of latticed columns



شکل ۱۱: پوش منحنی نیرو-تغییر مکان جانبی ستون مشبک تحت بارگذاری رفت و برگشتی

Fig. 11. Cyclic load-displacement curves of latticed columns

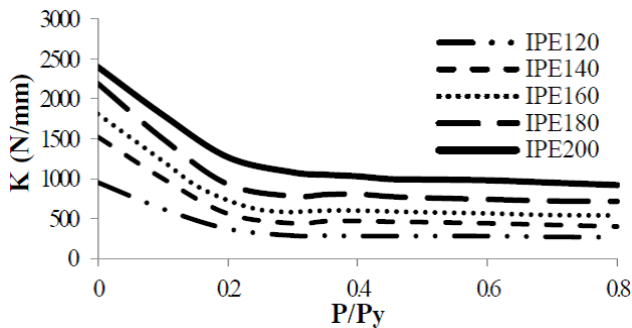
$$k = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ماتریس سختی اولیه ستون بدون در نظر گرفتن اثر تغییر شکل‌های برشی (K) به صورت تئوری از دو قسمت ماتریس سختی الاستیک (k) مطابق رابطه ۱ و سختی هندسی ( $k_G$ ) مطابق رابطه ۲ تشکیل شده، که به صورت رابطه ۳ می‌باشد. در روابط ۱ و ۲ سطر و ستون‌های فرد مربوط به تغییر مکان جانبی دو انتها و بقیه مربوط به چرخش دو انتها می‌باشد.

جدول ۲: مقایسه سختی جانبی حاصل از مدل اجزاء محدود و روابط تئوری، ستون مشبک 2IPE120 با بست افقی

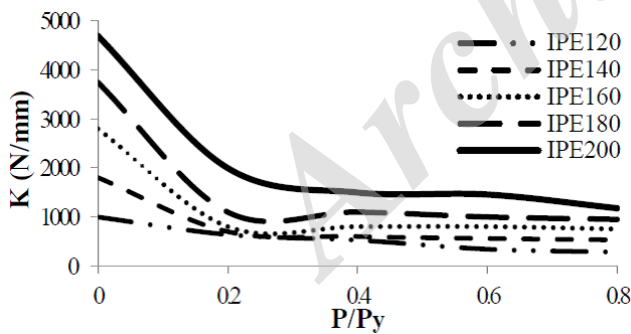
Table 2. Comparison between theory initial stiffness of the columns and initial stiffness of nonlinear FE model, 2IPE120 battened column

P/P <sub>y</sub>	K تئوری (N/mm)	K اجزاء محدود (N/mm)
۰	۸۹۴	۹۸۳
۰/۲	۸۴۳	۶۴۰
۰/۴	۷۹۳	۵۲۵
۰/۶	۷۴۲	۳۴۰
۰/۸	۶۹۲	۲۸۰



شکل ۱۲: منحنی های سختی جانبی ارتجاعی ستون مشبک با بست افقی، حاصل از تحلیل اجزاء محدود

Fig. 12. Lateral stiffness of battened columns, based on FE analysis



شکل ۱۳: منحنی های سختی جانبی ارتجاعی ستون مشبک با بست مورب، حاصل از تحلیل اجزاء محدود

Fig. 13. Lateral stiffness of laced columns, based on FE analysis

### ۶- تعیین پارامترهای سوپر المان خمشی معادل با ستون مشبک

استفاده از مدل اجزاء محدود با تعداد المان های زیاد در تحلیل سازه های دارای ستون های مشبک زمان محاسبات را به مقدار خیلی زیادی افزایش

$$k_G = \frac{P}{30L} \begin{bmatrix} 36 & 3L & -36 & 3L \\ 3L & 4L^2 & -3L & -L^2 \\ -36 & -3L & 36 & -3L \\ 3L & -L^2 & -3L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$K = k + k_G \quad (3)$$

در مدل مورد نظر با توجه به شرایط مرزی فرض شده، سختی جانبی به صورت  $K = \frac{12EI}{L^3} + \frac{36P}{30L}$  خواهد بود. در روابط فوق،  $L$  طول ستون،  $EI$  صلیبیت خمشی مقطع ستون حول محور عمود بر صفحه بست ها و  $P$  نیروی محوری ستون است که در فشار منفی فرض می شود. به منظور مقایسه رفتار بدست آمده از مدل اجزاء محدود ستون های مورد بررسی با روابط تئوری که بدون در نظر گرفتن اثر تغییرشکل های برشی است رابطه ۳ مقادیر سختی ارتجاعی جانبی  $K$  برای ستون مشبک 2IPE120 با بست افقی در جدول ۲ مقایسه شده است. لازم به یادآوری است که تغییرشکل برشی ستون در صفحه موازی بست ها ناشی از تغییرشکل های بست ها می باشد. مقادیر عددی مطابق زیر است:

$$K = \frac{12EI}{L^3} + \frac{36P}{30L}$$

$$E = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$$

$$L = 3000 \text{ mm}$$

$$I_y = 2[I_{y0} + Ad^2] = 2[272000 + 1320 \times 60^2] = 10^7 \text{ mm}^4$$

$$P = \alpha P_y$$

$$\alpha = [0, 0/2, 0/4, 0/6, 0/8]$$

$$P_y = AF_y$$

$$F_y = \text{تنش تسلیم} = 240 \text{ MPa}$$

$$A = \text{سطح مقطع ستون} = 1320 \text{ mm}^2$$

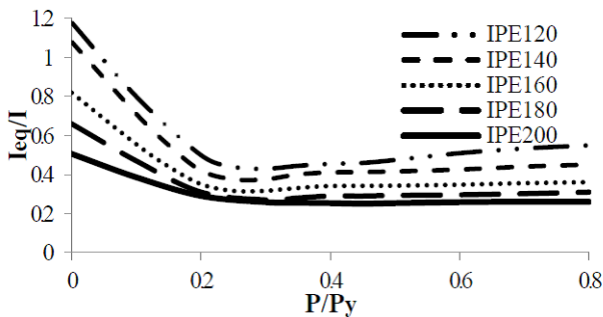
عامل عمده تفاوت در سختی تئوری و مدل، مربوط به تاثیر تغییرشکل های برشی است که در روابط تئوری در نظر گرفته نشده است. در شکل های ۱۲ و ۱۳ منحنی سختی اولیه ناشی از مدل اجزاء محدود برای ستون با بست افقی و مورب برای نسبت های مختلف بار محوری ستون نشان داده شده است.



سختی جانبی در اثر اعمال نیروی محوری تا نسبت ۰/۲ به سرعت کاهش یافته و پس از آن با سرعت بسیار کمتری کاهش می‌یابد. حال با استفاده از رابطه ۳ می‌توان ممان اینرسی المان معادل را برای نیروهای محوری مختلف حول محور عمود بر بست ها به صورت رابطه ۴ محاسبه نمود:

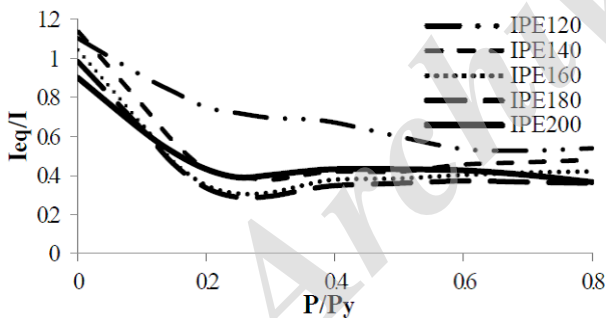
$$I_{eq} = \frac{L^3 K}{12E} \quad (4)$$

ممان اینرسی معادل در حالات مختلف در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است.



شکل ۱۵: مقادیر نسبت ممان اینرسی معادل به ممان اینرسی هندسی ستون مشبک با بست افقی

Fig. 15. Ratio of equivalent moment of inertia to batten moment of inertia

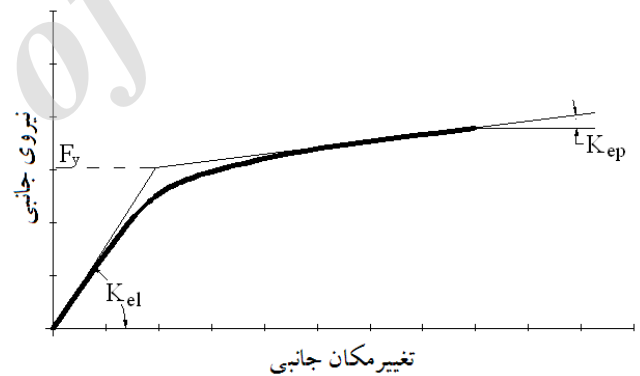


شکل ۱۶: مقادیر نسبت ممان اینرسی معادل به ممان اینرسی هندسی ستون مشبک با بست مورب

Fig. 16. Ratio of equivalent moment of inertia to laced columns moment of inertia

برای ساده‌سازی روال تعیین مقادیر سختی جانبی و ممان اینرسی معادل می‌توان از توابع چند جمله‌ای که تطابق خوبی با منحنی‌های تحلیلی دارند، استفاده کرد. ضرایب این چند جمله‌ای‌ها را می‌توان با برازش منحنی‌های مربوطه بدست آورد. برای محاسبه سختی ارتجاعی ستون می‌توان از رابطه خطی دو ضابطه‌ای به صورت زیر استفاده نمود:

می‌دهد و علاوه بر این استفاده از این نوع تحلیل در سازه‌های بزرگ تقریباً غیرممکن است. از طرفی همان‌طور که در قسمت قبل مشاهده شد، در نظر نگرفتن اثر تغییرشکل‌های برشی ناشی از وجود جان مشبک و بست‌ها و در نظر گرفتن این اعضا به صورت اعضا و ستون‌های با جان پر، باعث ایجاد خطاهای قابل توجه در محاسبات می‌شود. از این رو به منظور در نظر گرفتن خصوصیت‌های رفتاری ستون‌های مشبک ناشی از تغییرشکل‌های برشی بست‌ها، می‌توان با استفاده از نتایج مدل‌سازی اجزاء محدود، المانی را در مدل‌سازی‌ها مورد استفاده قرار داد که این خصوصیت‌ها را به صورت ساده شده در نظر بگیرد. همچنین با توجه به نتایج تحلیل غیرخطی می‌توان این خصوصیات را به صورت ساده شده در قالب روابط برازش جبری در آورد و به سادگی بکار برد. به این ترتیب هر ستون مشبک یک زیرسازه خواهد بود که با یک سوپر المان جایگزین شده و این امر منجر به کاهش قابل توجه زمان محاسبات می‌شود. همچنین با استفاده از این روش می‌توان با استفاده از معادلات جبری ساده و با دقت مناسب در زمان اندکی به پارامترهای ضروری مدل‌سازی این گروه از ستون‌ها دست یافت. المان معادل با ستون مشبک، عضوی با منحنی نیرو-تغییرمکان جانبی مطابق شکل ۱۴ دانسته می‌شود.



شکل ۱۴: منحنی دوخطی جایگزین منحنی نیرو-تغییرمکان جانبی

Fig. 14. substitute bi-linear curve

این منحنی با سه پارامتر  $k_{el}$ ،  $F_y$  و  $k_{ep}$  شناخته می‌شود که در آن  $k_{el}$  و  $k_{ep}$  سختی‌های جانبی ارتجاعی و غیرارتجاعی و  $F_y$  نیروی جانبی حد تسلیم ستون است. این مقادیر را می‌توان از منحنی‌های شکل ۱۰ استخراج نمود. برای سادگی، می‌توان رفتار غیرارتجاعی المان معادل را متمرکز در دو انتهای آن فرض نمود. در این صورت  $k_{ep}$  می‌تواند به عنوان مشخصه فنر غیرخطی دو انتهای ستون فرض گردد.

#### ۶-۱- سختی ارتجاعی و ممان اینرسی سوپر المان

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ منحنی سختی اولیه حاصل از مدل اجزاء محدود به ترتیب برای ستون‌های با بست افقی و مورب برای نسبت‌های مختلف بار محوری ستون نشان داده شده است. در این شکل‌ها مشاهده می‌شود که

جدول ۵: برازش چند جمله‌ای برای ممان اینرسی معادل به ممان اینرسی ستون مشبک با بست افقی

Table 5. Fitted polynomial for the equivalent moment of inertia to the inertia moment of the battened column

پروفیل	a	b	c	d	e
IPE120	۱۵/۷۸	-۳۱/۹۲	۲۲/۹۶	-۶/۷۶	۱/۱۶
IPE140	۱۴/۸۷	-۳۰/۲۰	۲۱/۷۶	-۶/۴۳	۱/۰۶
IPE160	۱۰/۶۰	-۲۱/۵۷	۱۵/۶۱	-۴/۶۴	۰/۸۱
IPE180	۷/۹۴	-۱۶/۱۱	۱۱/۶۸	-۳/۵۱	۰/۶۵
IPE200	۲/۶۳	-۶/۱۴	۵/۲۳	-۱/۸۷	۰/۵۰

جدول ۶: برازش چند جمله‌ای برای ممان اینرسی معادل به ممان اینرسی ستون مشبک با بست مورب

Table 6. Fitted polynomial for the equivalent moment of inertia to the inertia moment of the laced column

پروفیل	a	b	c	d	e
IPE120	۱۰/۶۸	-۱۷/۵۴	۹/۷۲	-۲/۶۰	۱/۰۰۹
IPE140	۱۴/۷۱	-۳۰/۷۶	۲۲/۸۶	-۶/۹۴	۱/۱۳۱
IPE160	۱۸/۴۹	-۳۷/۳۳	۲۶/۳۱	-۷/۴۰	۱/۰۴۱
IPE180	۱۶/۷۷	-۳۹/۳۳	۲۴/۴۹	-۶/۹۳	۰/۹۸۵
IPE200	۱۱/۸۸	-۲۴/۶۷	۱۷/۵۳	-۴/۹۸	۰/۸۹۹

۶-۲- سختی غیر سوپر المان ارتجاعی

در شکل‌های ۱۷ و ۱۸ نسبت سختی غیر ارتجاعی به سختی ارتجاعی ستون با بست افقی و مورب بر اساس شکل ۱۰ آورده شده است. به منظور سادگی محاسبات سختی غیر ارتجاعی سوپر المان می‌توان از چند جمله‌ای درجه چهار رابطه ۶ ضرایب نشان داده شده در جدول‌های ۱۱ و ۱۲ استفاده نمود. در این صورت در این رابطه  $\gamma$  نسبت سختی غیرارتجاعی به سختی ارتجاعی سوپر المان و  $X$  نسبت نیروی محوری ستون به ظرفیت آن، خواهد بود. این ضرایب با استفاده از برازش منحنی‌های شکل‌های ۱۷ و ۱۸ بدست آورده شده است.

۶-۳- نیروی جانبی حد تسلیم

در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ منحنی‌های نیروی جانبی حد تسلیم ستون‌های مشبک با استفاده از شکل ۱۰ ترسیم شده است. نیروی جانبی حد تسلیم با استفاده از رابطه ۶ و ضرایب چند جمله‌ای درجه چهار از جدول‌های ۹ و ۱۰ قابل محاسبه می‌باشد. در این حالت در رابطه ۶  $\gamma$  نیروی جانبی حد تسلیم ستون بر حسب کیلونیوتن و  $X$  نسبت نیروی محوری ستون به ظرفیت آن

$$y = ax + b \quad (۵)$$

که در این رابطه  $\gamma$  سختی جانبی ستون بر حسب نیوتن بر میلی‌متر و  $X$  نسبت نیروی محوری ستون به ظرفیت آن، است. در جدول‌های ۳ و ۴ ضرایب این چند جمله‌ای بر اساس شکل‌های ۱۲ و ۱۳ بدست آورده شده است. ممان اینرسی سوپر المان نیز از رابطه درجه چهار زیر به صورت ساده قابل محاسبه است:

$$y = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e \quad (۶)$$

جدول ۳: برازش چند جمله‌ای برای سختی ارتجاعی ستون مشبک با بست افقی

Table 3. Fitted polynomial for elastic stiffness of the battened column

پروفیل	$0 \leq P/P_y \leq 0/2$		$0/2 \leq P/P_y \leq 0/8$	
	a	b	a	b
IPE120	-۶۴۳۱/۵	۹۳۵	-۱۴۶/۸	۳۸۰/۷
IPE140	-۴۷۸۶/۵	۱۴۹۷/۳	-۱۹۸	۵۷۹/۶
IPE160	-۵۴۷۴	۱۷۹۶/۵	-۲۵۲/۳	۷۵۲/۲
IPE180	-۶۲۱۶/۵	۲۱۵۶	-۳۰۵	۹۷۳/۷
IPE200	-۵۵۶۰	۲۳۷۱	-۵۵۰	۱۳۶۹

جدول ۴: برازش چند جمله‌ای برای سختی ارتجاعی ستون مشبک با بست مورب

Table 4. Fitted polynomial for elastic stiffness of the laced column

پروفیل	$0 \leq P/P_y \leq 0/2$		$0/2 \leq P/P_y \leq 0/8$	
	a	b	a	b
IPE120	-۱۷۹۵/۵	۹۸۳/۵	-۵۷۱/۸	۷۳۸/۳
IPE140	-۵۷۸۳	۱۷۷۵/۷	-۱۸۴	۶۵۵/۹
IPE160	-۸۹۷۸/۵	۲۵۶۶/۱	-۸۵/۵	۷۸۷/۵
IPE180	-۱۲۵۰۰	۳۶۰۳/۵	-۲۴۶/۳	۱۱۵۲/۷
IPE200	-۱۳۱۶۷	۴۷۸۳/۸	-۱۰۹۷/۳	۲۳۶۹/۸

که در این رابطه  $\gamma$  نسبت ممان اینرسی معادل به ممان اینرسی ستون مرکب، و  $X$  نسبت نیروی محوری ستون به ظرفیت آن، است. جدول‌های ۵ و ۶ ضرایب چند جمله‌ای مورد نظر برای منحنی‌های بدست آمده از شکل‌های ۱۵ و ۱۶ را نشان می‌دهد.

جدول ۹: برازش چند جمله‌ای برای نیروی جانبی حد تسلیم ستون مشبک با بست افقی

Table 9. Fitted polynomial for yielding force of the battened column

پروفیل	a	b	c	d	e
IPE120	۶۶۱/۲	-۱۲۸۸/۲	۸۵۷/۸	-۲۳۹/۸	۳۴/۶
IPE140	۹۸۳/۲	-۱۸۷۱/۲	۱۲۲۶/۲	-۳۴۸/۱	۵۵/۴
IPE160	۱۱۸۰/۷	-۲۲۰۱	۱۴۱۳/۴	-۳۹۷/۲	۶۶/۴
IPE180	۱۴۲۴	-۲۶۸۱	۱۷۳۲/۲	-۴۹۰/۴	۸۴/۱
IPE200	۱۰۴۴/۵	-۱۹۶۹/۹	۱۲۸۳/۱	-۳۹۸/۸	۹۲/۵

جدول ۱۰: برازش چند جمله‌ای برای نیروی جانبی حد تسلیم ستون مشبک با بست مورب

Table 10. Fitted polynomial for yielding force of the laced column

پروفیل	a	b	c	d	e
IPE120	۵۰۴/۴	-۱۰۲۴/۵	۷۲۳/۱	-۲۱۹/۷	۳۵
IPE140	۶۷۷/۱	-۱۳۳۳/۳	۹۲۲/۹	-۲۸۶/۷	۵۰
IPE160	۸۶۹/۷	-۱۷۴۷/۲	۱۲۵۴	-۴۱۳/۷	۷۵
IPE180	۶۵۷/۳	-۱۳۱۶/۶	۹۴۴/۶	-۳۳۵/۹	۸۰
IPE200	۲۲۲/۵	-۶۳۶/۴	۶۴۱/۸	-۳۳۶/۸	۱۰۶/۵

گفت که سطح بدون بعد منحنی‌های هیستریزس ستون‌های مشبک ارتباط چندانی با نوع پروفیل ندارد.

جدول‌های ۱۲ و ۱۳ ضرایب چند جمله‌ای خطی رابطه ۵ برای محاسبه نسبت سطح منحنی‌های هیستریزس ستون‌های مشبک به سطح این منحنی در حالت بدون بار محوری را نشان می‌دهد. این ضرایب بر اساس برازش داده‌های جدول ۱۱ بدست آورده شده است. در این حالت در رابطه ۵،  $Y$  نسبت سطح زیر منحنی هیستریزس ستون به سطح زیر منحنی در حالت بدون نیروی محوری، و  $X$  نسبت نیروی محوری ستون به ظرفیت آن است.

جدول ۷: نسبت سختی غیرارتجاعی به سختی ارتجاعی ستون مشبک با بست افقی

Table 7. Ratio of inelastic to elastic stiffness for battened column

پروفیل	a	b	c	d	e
IPE120	-۱۸۵/۶۸	۳۷۴/۶۸	-۲۶۳/۷۰	۷۴/۸۴	۳/۷۰
IPE140	۱۷۷/۳۴	-۳۰۳/۰۲	۱۳۸/۲۸	-۰/۷۵	۳/۷۰
IPE160	۲۴۴/۷۴	-۳۵۸/۸۵	۱۵۸/۱۴	-۲/۸۲	۳/۷۰
IPE180	۱۵۰	-۲۴۷/۹۲	۹۹/۵۰	۱۰/۳۲	۲/۶۵
IPE200	۱۵۰/۲۶	-۲۴۸/۴۴	۹۹/۸۶	۱۰/۲۱	۲/۶۶

جدول ۸: نسبت سختی غیرارتجاعی به سختی ارتجاعی ستون مشبک با بست مورب

Table 6. Ratio of inelastic to elastic stiffness for laced column

پروفیل	a	b	c	d	e
IPE120	-۲۷۴/۴۸	۴۴۲/۹۲	-۲۵۵/۱۵	۴۱/۳۱	۳/۸۴
IPE140	۱۷۹/۴۳	-۲۹۱/۹۸	۱۲۰/۷۰	۱/۰۵	۶/۰۵
IPE160	۱۰۰	-۱۲۳/۹۶	۲/۵۰	۳۳/۶۶	۲/۴۳
IPE180	۱۶۰/۶۸	-۲۴۸/۸۵	۱۰۱/۸۲	۲/۰۰	۴/۲۳
IPE200	۱۲۸/۹۱	-۱۹۶/۱۵	۸۳/۵۹	۰/۴۵	۱/۹۰

#### ۶-۴- ظرفیت اتلاف انرژی

سطح زیر منحنی نیرو-تغییرمکان معیاری برای تعیین ظرفیت اتلاف انرژی سازه‌ها است. سازه‌های دارای ظرفیت جذب انرژی بیشتر در مقابل بارهای لرزه‌ای مقادیر بیشتری از انرژی زلزله را مستهلک می‌کنند و عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهند. در جدول ۱۱ نسبت سطح زیر منحنی‌های پوش هیستریزس در هر نسبت نیروی محوری نسبت به حالت  $P/P_y = 0$  آورده شده است. همان‌گونه که در این جدول مشاهده می‌شود، سطح زیر منحنی‌ها تا نسبت بار محوری  $P/P_y = 0/2$  به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و بعد با افزایش نسبت بار محوری تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند. این مسئله نشان می‌دهد که عمده کاهش ظرفیت اتلاف انرژی در این ستون‌ها به علت نیروی محوری در همان اوایل افزایش نسبت نیروی محوری به وقوع می‌پیوندد. هم‌چنین با توجه به نتایج جدول ۱۱ می‌توان

جدول ۱۳: برازش چند جمله‌ای برای سطح زیر منحنی هیستریزس ستون مشبک با بست مورب در هر حالت نسبت به  $P/P_y = 0$

Table 13. Fitted polynomial for hysteresis curve area of the laced column for different axial load to column without axial load ( $P/P_y=0$ )

پروفیل	$0 \leq P/P_y \leq 0/2$		$0/2 \leq P/P_y \leq 0/8$	
	a	b	a	b
IPE120				
IPE140				
IPE160	-۳۷۱	۱۰۰	-۵	۴۶/۷
IPE180				
IPE200				

در المان پیشنهاد شده توسط بنان و فولادی [۵] ماتریس سختی ستون مشبک برای ستون‌های با بست موازی بر اساس روابط تحلیلی ساده شده و برازش نتایج سختی جانبی برای تعدادی نمونه در حالت‌های مختلف، بدست آمده که با توجه به اینکه ناشی از برازش و ساده‌سازی‌های تحلیلی هستند با مقداری خطا (کمتر از ۵ درصد) اثر تغییرشکل‌های برشی ستون مشبک را با المان جایگزین در ناحیه خطی، در نظر می‌گیرند؛ ولی در تحقیق حاضر ماتریس سختی المان پیشنهادی بر اساس رفتار خطی و غیر خطی ستون‌های مشبک در مدل‌های اجزاء محدود محاسبه شده که از دقت بالاتری برخوردار است و می‌تواند تاثیر تغییرشکل‌های برشی را هم در ناحیه خطی و هم در ناحیه غیر خطی در نظر بگیرد. این موضوع از آنجا اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که در ستون‌های مشبک تحت تاثیر نیروهای جانبی مانند زلزله تغییرشکل‌های برشی پلاستیک ایجاد شده در بست‌ها، اثر بیشتری در رفتار جانبی ستون از خود نشان می‌دهد. علاوه بر این، در این تحقیق ماتریس سختی ستون‌های با بست مورب در حالت خطی و غیر خطی نیز محاسبه شده است. از المان پیشنهادی در این مقاله می‌توان در تحلیل‌های خطی و غیرخطی سازه‌های دارای ستون مشبک برای کاهش حجم محاسبات و در نظر گرفتن اثر تغییرشکل‌های برشی الاستیک و پلاستیک بست‌ها بهره برد.

#### ۷- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی رفتار ستون‌های مشبک دارای بست‌های افقی و مورب تحت بار محوری و بار جانبی پرداخته شد. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که افزایش بار محوری تا حدود ۲۰ درصد ظرفیت ستون موجب کاهش قابل ملاحظه سختی جانبی، مقاومت و ظرفیت جذب انرژی ستون مشبک خواهد شد و در بارهای بیش از ۲۰ درصد نرخ تغییرات این پارامترها کاهش می‌یابد. این بررسی نشان داد که با افزایش بار محوری ستون‌های دارای بست مورب بدلیل عملکرد خرابی بست‌ها، نسبت به ستون‌های دارای بست موازی، ظرفیت جذب انرژی بهتری از خود نشان

جدول ۱۱: نسبت سطح زیر منحنی هیستریزس در هر حالت نسبت به حالت بدون نیروی محوری

Table 11. Ratio of hysteresis curve area for different axial load to column without axial load ( $P/P_y=0$ )

نوع بست	نوع ستون	$P/P_y$				
		۰	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۸
بست جانبی	IPE120	۱۰۰٪	۳۵/۳٪	۳۳/۸٪	۳۴/۱٪	۳۱/۳٪
	IPE140	۱۰۰٪	۳۶/۴٪	۳۵/۳٪	۳۶/۱٪	۳۵/۰٪
	IPE160	۱۰۰٪	۳۸/۷٪	۳۹/۶٪	۳۹/۱٪	۳۴/۹٪
	IPE180	۱۰۰٪	۴۲/۷٪	۴۲/۸٪	۴۵/۵٪	۳۹/۶٪
	IPE200	۱۰۰٪	۴۲/۹٪	۴۱/۹٪	۴۳/۵٪	۴۱/۵٪
بست مورب	IPE120	۱۰۰٪	۴۱/۴٪	۴۰/۶٪	۳۹/۶٪	۳۶/۷٪
	IPE140	۱۰۰٪	۴۲/۷٪	۴۲/۵٪	۴۲/۰٪	۴۰/۹٪
	IPE160	۱۰۰٪	۴۵/۳٪	۴۷/۳٪	۴۵/۳٪	۴۰/۹٪
	IPE180	۱۰۰٪	۵۱/۰٪	۵۱/۰٪	۵۲/۷٪	۴۶/۳٪
	IPE200	۱۰۰٪	۵۰/۰٪	۴۹/۸٪	۵۰/۱٪	۴۸/۸٪

جدول ۱۲: برازش چند جمله‌ای برای سطح زیر منحنی هیستریزس ستون مشبک با بست افقی در هر حالت نسبت به  $P/P_y = 0$

Table 12. Fitted polynomial for hysteresis curve area of the battened column for different axial load to column without axial load ( $P/P_y=0$ )

پروفیل	$0 \leq P/P_y \leq 0/2$		$0/2 \leq P/P_y \leq 0/8$	
	a	b	a	b
IPE120				
IPE140				
IPE160	-۳۰۴/۵	۱۰۰	-۴/۵	۴۰
IPE180				
IPE200				

- [6] D.R. Sahoo, D.C. Rai, Built-up battened columns under lateral cyclic loading, *Thin-Walled Structures*, 45(5) (2007) 552-562.
- [7] B. Hosseini Hashemi, M.A. Jafari, Experimental evaluation of elastic critical load in batten columns, *Journal of Constructional Steel Research*, 65(1) (2009) 125-131.
- [8] B. Hosseini Hashemi, M.A. Jafari, Experimental evaluation of cyclic behavior of batten columns, *Journal of Constructional Steel Research*, 78 (2012) 88-96.
- [9] K.E. Kalochairetis, C.J. Gantes, Numerical and analytical investigation of collapse loads of laced built-up columns, *Computers and Structures*, 89(11) (2011) 1166-1176.
- [10] C.J. Gantes, K.E. Kalochairetis, Axially and transversely loaded Timoshenko and laced built-up columns with arbitrary supports”, *Journal of Constructional Steel Research*, 77 (2012) 95-106.
- [11] A. Poursamad Bonab, B. Hosseini Hashemi, Analytical investigation of cyclic behavior of laced built-up columns, *Journal of Constructional Steel Research*, 73 (2012) 128-138.
- [12] B. Hosseini Hashemi, A. Poursamad Bonab, Experimental investigation of the behavior of laced columns under constant axial load and cyclic lateral load, *Engineering Structures*, 57 (2013) 536-543.
- [13] K.E. Kalochairetis, C.J. Gantes, X.A. Lignos, Experimental and numerical investigation of eccentrically loaded laced built-up steel columns, *Journal of Constructional Steel Research*, 101 (2014) 66-81.
- [14] S. Tahouni, *Steel structures design*, Dehkhoda Publications, (1996) (In Persian).
- [15] INBC, Iranian National Building Code (INBC), Part 10: Steel Structures, Ministry of Housing and Urban Development, Tehran, Iran, 2014 (In Persian).

می‌دهند. در ادامه بر اساس تحلیل‌های عددی انجام شده، منحنی‌ها و روابط کاربردی برای تعیین مشخصات المان محوری-خمشی توپر معادل با یک ستون مشبک با بست افقی یا مورب در نواحی خطی و غیرخطی ارائه شده است. با استفاده از این روابط، یک ستون مشبک که در صورت مدل‌سازی با اجزاء محدود چندین درجه آزادی خواهد داشت، به یک المان معادل که حداکثر در هر انتها ۶ درجه آزادی دارد، تبدیل می‌گردد. این امر به کاهش بسیار قابل توجه زمان محاسبات خواهد انجامید. مطابق روش زیرسازه، پس از تحلیل سازه و تعیین تغییرشکل‌های دو انتهای المان معادل، با اعمال این تغییرشکل‌ها بر یک مدل دقیق سه بعدی از ستون مشبک، می‌توان تنش و تغییرشکل را در هر نقطه از آن تعیین نمود. بنابراین روش ارائه شده می‌تواند به نحو موثری در طراحی دقیق ستون‌های مشبک با ابعاد متداول به کار گرفته شود.

### مراجع

- [1] R.A. Williamson, M.N. Margolin, Shear effects in design of guyed towers, *Journal of the Structural Division*, 92(5) (1996) 213-233.
- [2] J.L. Fung, C. Glauster, B.G. Johnston, Behavior of Laced and Battened Structural Members, *Journal of the Structural Division*, 96(7) (1970) 1377-1401.
- [3] S.E. Svensson, J. Kragerup, Collapse loads of laced columns, *Journal of the Structural Division*, 109(4) (1982) 1367-1384.
- [4] A. Gjelsvik, Buckling of built-up columns with or without stay plates, *Journal of Engineering Mechanics*, 121(10) (1990) 1142-1159.
- [5] M.R. Banan, A. Fouladi, A super - element based on finite element method for latticed columns computational aspect and numerical results, *Journal of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal)*, 22(1) (2003) 57-73 (In Persian).

Please cite this article using:

M. Biabannavard, F. Behnamfar, H. Zibasokhan, Cyclic Behavior of Battened and Latticed Columns and Proposing a Substitute Super-Element. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(1) (2018) 97-110.

DOI: 10.22060/ceej.2017.11306.5003

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



Archive of SID