

بررسی رفتار لرزه‌ای اتصال مهاربند به ستون جعبه‌ای ساخته شده از ورق در سیستم‌های مهاربندی شده همگرا

سید علی رضوی طباطبایی^{۱*}، مسعود هاشمی^۲

^{۱*} استادیار، گروه سازه، دانشکده فنی و مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران، arazavi@usc.ac.ir

^۲ دانشجوی، گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ، تهران، ایران

چکیده

با توجه به استقبال طراحان ساختمان‌های فولادی از ستون‌های جعبه‌ای ساخته شده از ورق و همچنین رفتار لرزه‌ای بسیار مناسب سیستم‌های مهاربندی شده همگرا، لزوم مطالعه در خصوص رفتار اتصال مهاربندها به این ستون‌ها در برابر نیروهای زلزله و ارائه روابط طراحی و جزئیات اجرایی برای آن، لازم و ضروری است. با توجه به این که در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان و آیین‌نامه فولاد آمریکا (AISC 360)، برای این اتصالات به طور خاص روابطی ارائه نشده است، نتایج این پژوهش می‌تواند به تدقیق روند طراحی اتصال ورق گاست به ستون جعبه‌ای بیانجامد. به همین منظور در این پژوهش به بررسی رفتار وجه ستون جعبه‌ای در اتصال با ورق گاست مهاربند هم‌محور تحت نیروهای رفت و برگشتی در غیاب تدابیر اضافی برای انتقال مناسب بار و پیشنهاد جزئیات مناسب برای اتصالات مهاربندی‌ها به ستون‌های جعبه‌ای پرداخته شده است. بدین منظور تعدادی قابهای مهاربندی شده همگرا با لحاظ نمودن تیب اتصالات بدون ورق سخت کننده، با ورق سخت کننده افقی و با ورق سخت کننده قائم مورد تحلیل قرار گرفته است و پارامترهای نظیر سختی کل مهاربند و تغییر مکان حداکثر مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد استفاده از سخت کننده قائم در ستون‌های قوطی شکل منجر به بهبود مشخصات لرزه‌ای قابهای مهاربندی همگرا می‌شود.

واژگان کلیدی: ستون‌های جعبه‌ای، سیستم مهاربندی شده همگرای ویژه، ورق گاست، رفتار لرزه‌ای

۱- مقدمه و طرح موضوع

با بررسی اجمالی خسارت‌های وارد بر سازه در زلزله‌های گذشته، مشخص می‌شود که سازه‌های فولادی به جهت شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی، عملکرد مطلوبی نسبت به سازه‌ها دارند. سیستم مهاربندی همگرای فولادی به علت سختی زیاد و سهولت در اجرا، یکی از محبوب‌ترین و قدیمی‌ترین سیستم‌های فلزی می‌باشد که مهندسان سازه از آن در طراحی لرزه‌ای سازه‌ها استفاده می‌کنند.

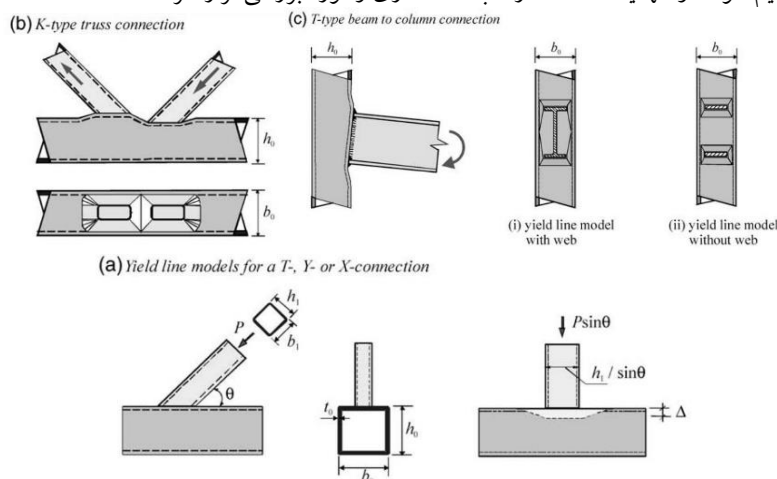
قاب‌های مهاربندی شده همگرای ویژه به قاب‌هایی گفته می‌شود که در آن‌ها از مهاربند انتظار می‌رود تحت اثر بار جانبی زلزله طرح، تغییر شکل‌های فراارتجاعی قابل ملاحظه‌ای تحمل نماید و در آن‌ها کاهش مقاومت چندان رخ ندهد. این نوع مهاربندها در حکم فیوزهای سازه‌ای هستند که بعد از کمانش، رفتار غیرارتجاعی خوبی از خود نشان می‌دهند و با افزایش شکل‌پذیری سازه، انرژی زلزله را به خوبی مستهلک می‌کنند. کاربرد ستون‌های قوطی شکل در قاب‌های مهاربندی شده همگرا به دلیل وجود نیروهای محوری قابل توجه در ستون‌های این قاب، روزبه‌روز بیشتر می‌شود، اما تاکنون کلیه روابط ارائه شده برای طراحی توسط آیین‌نامه‌ها و همچنین تست‌های آزمایشگاهی انجام

شده برای قاب‌های مهاربندی شده، بر اساس ستون‌های H شکل بوده و ستون‌های قوطی شکل به‌طور مستقیم در آیین‌نامه‌های طراحی مطرح نشده‌اند. در این پژوهش سعی شده است به این موضوع پرداخته شود. همچنین بررسی رفتار وجه ستون قوطی در اتصال با ورق گاست مهاربند هم‌محور تحت نیروهای رفت و برگشتی و پیشنهاد جزئیات مناسب برای اتصالات مهاربندها به ستون‌های قوطی از اهداف این پژوهش است.

۲- مرور تحقیقات گذشته

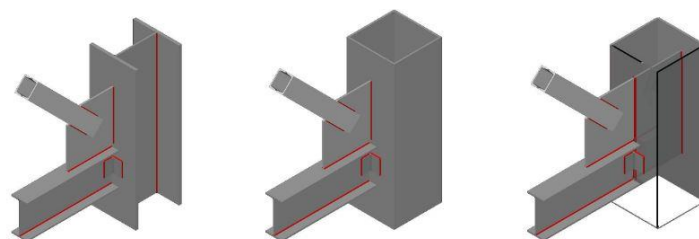
تحقیقات بر روی اتصالات مهاربندی در گذشته صورت گرفته است و در کمیته AISC نیز مطالعاتی برای ارزیابی کارایی اتصالات ورق گاست در قاب‌های مهاربندی شده انجام شده است. در این میان مطالعات آنالیزی توسط ریچارد (Richard., 1986) و مطالعات آزمایشگاهی توسط چاکرابارتی و همکاران (Chakrabarti et al., 1983) و گراس و همکاران (Gross et al., 1988) از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. در تمامی این پژوهش‌ها، رفتار ورق اتصال گاست مورد بررسی قرار گرفته‌اند ولی در زمینه رفتار ورق ستون متصل به ورق گاست (Gusset Plate) بحث نشده است.

در سال ۲۰۰۲ کوزتسکی و همکاران (Kosteski et al., 2002)، مطالعات آزمایشگاهی و آنالیزی بر روی رفتار ورق‌های طولی ستون‌های توخالی در اتصال با ورق انجام دادند. آن‌ها اتصال ورق با زاویه‌های مختلف بر روی وجه ستون قوطی شکل را مورد بررسی قرار داده و تغییرشکل وجه ستون را جهت محاسبه نیروی بحرانی (تسلیم) ورق از منحنی‌های تغییرشکل-نیرو اندازه‌گیری نمودند. البته در این تحقیقات صرفاً المان خرابایی غیرتسلیم شونده و تنها یک اتصال در قاب، مدل‌سازی و مورد بررسی قرار گرفت.

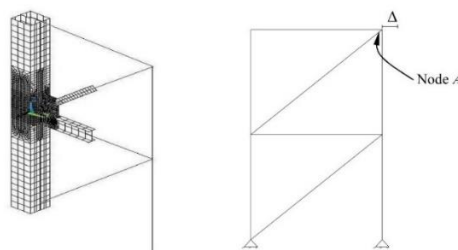


شکل (۱): نمونه‌های مدل المان محدود مطالعه شده توسط کوزتسکی و همکاران

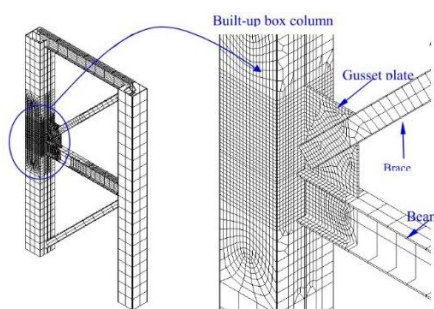
در سال ۲۰۰۹ علیپور با انجام مطالعات عددی و انجام آنالیز بر روی سه تیپ اتصال در یک قاب شامل: ۱- اتصال ورق گاست به ستون H شکل، ۲- اتصال ورق گاست به ستون قوطی شکل بدون سخت‌کننده و ۳- اتصال گاست به ستون قوطی شکل با تعبیه ورق سخت‌کننده در راستای طول ستون، به مقایسه این اتصالات و بررسی رفتار وجه ستون در مقابل نیروی کششی مهاربند پرداخت. در پژوهش ایشان فقط مهاربند کششی مدل‌سازی شده و از مهاربند فشاری بحث نشده است. همچنین بارگذاری با تغییر مکان به‌صورت بار افزون در قاب انجام شده و رفتار چرخه‌ای (رفت و برگشتی) لحاظ نشده است.



شکل (۲): سه تیپ اتصال مطالعه شده توسط علیپور



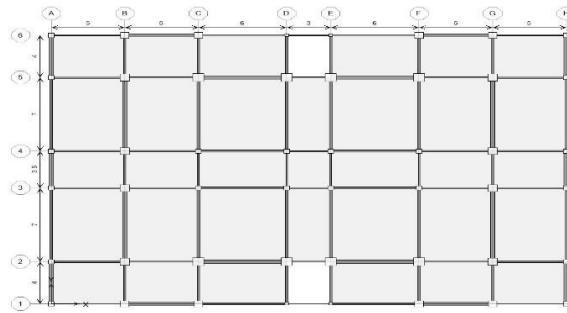
شکل (۳): مدل آنالیز محدود انجام شده توسط علیپور



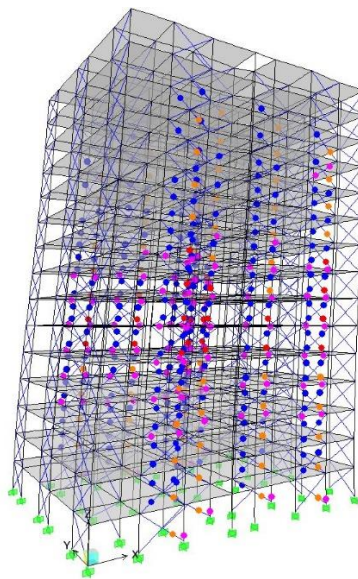
شکل (۴): جزئیات قاب مدل شده برای آنالیز محدود توسط علیپور

۳- تشریح سازه‌های مورد بررسی

در این پژوهش یک ساختمان پانزده طبقه فولادی با ستون‌های قوطی‌شکل و سیستم مهاربند همگرای ویژه فولادی با طول دهانه‌های مهاربندی ۳/۵، ۴، ۵، ۶ و ۷ متر تعریف شده است. مدل‌سازی این سازه در نرم‌افزار ETABS و بارگذاری آن مطابق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان و استاندارد ۲۸۰۰ ویرایش چهارم، صورت گرفته است. اتصالات مهاربندها به ستون‌ها و تیرها مطابق الزامات طرح لرزه‌ای مبحث دهم مقررات ملی ساختمان طراحی و نقشه‌های مرتبط و مناسب با آن‌ها، تهیه شده است. جهت کنترل ظرفیت ساختمان و تعیین نیروهای ظرفیتی اعضا، بر روی این سازه تحلیل استاتیکی غیرخطی (Nonlinear Static Analysis) به روش بارافزون (Pushover) نیز انجام شده است. از نتایج تحلیل غیرخطی نظیر تغییر مکان واقعی و نیروهای محوری ستون‌ها در قاب‌های مهاربندی شده در آنالیز المان محدود استفاده شده است.

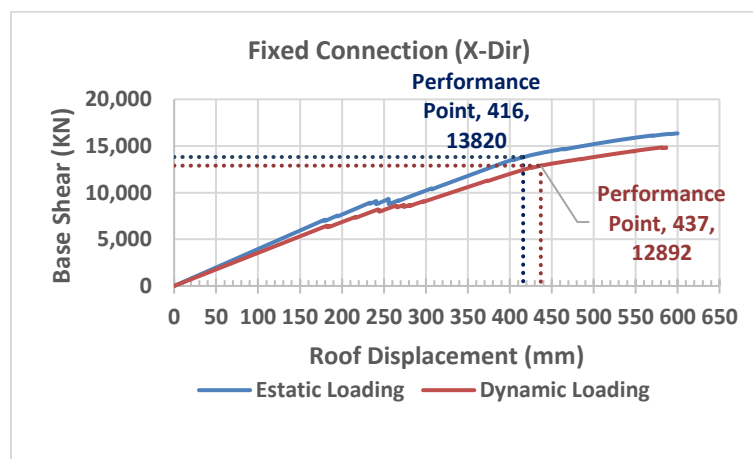


شکل (۵): پلان ساختمان مدل شده در نرم‌افزار Etabs

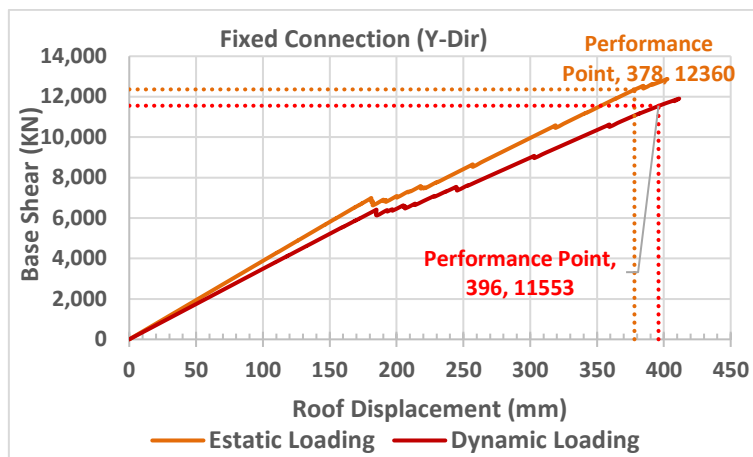


شکل (۶): مدل‌سازی و تشکیل مفاصل پلاستیک در سازه حاصل از تحلیل بار افزون

پس از تحلیل استاتیکی غیرخطی سازه، نقاط عملکرد سازه در حالت‌های بارگذاری استاتیکی و دینامیکی محاسبه شد. نمودارهای تغییرات برش پایه ساختمان در حالت اتصال صلب برای تیرهای دهانه مهاربندی بر مبنای تغییر مکان مرکز جرم بام و همچنین نقاط عملکردی مربوط به هر حالت در شکل‌های (۷) و (۸) محاسبه و استخراج شده است.

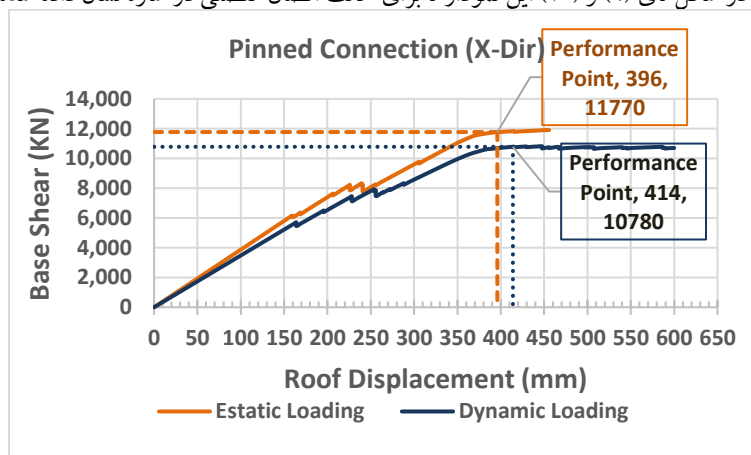


شکل (۷): نمودار تغییرات برش پایه نسبت به تغییر مکان مرکز جرم بام در جهت طولی ساختمان در حالت اتصالات صلب

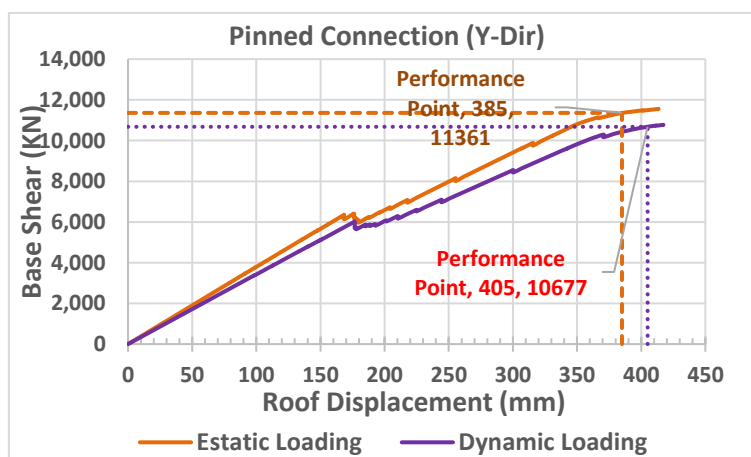


شکل (۸): نمودار تغییرات برش پایه نسبت به تغییر مکان مرکز جرم بام در جهت عرضی ساختمان در حالت اتصالات صلب

مدل سازه با اتصال مفصلی تیرهای دهانه مهاربندی نیز تهیه و تحلیل گردیده است تا ظرفیت و نقطه عملکرد آن در مقایسه با تیرهای با اتصال صلب مشخص گردد. در شکل های (۹) و (۱۰) این نمودارها برای حالت اتصال مفصلی در سازه نشان داده شده است.



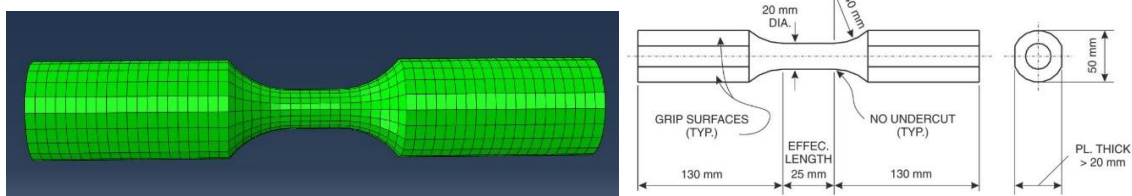
شکل (۹): نمودار تغییرات برش پایه نسبت به تغییر مکان مرکز جرم بام در جهت طولی ساختمان در حالت اتصالات مفصلی



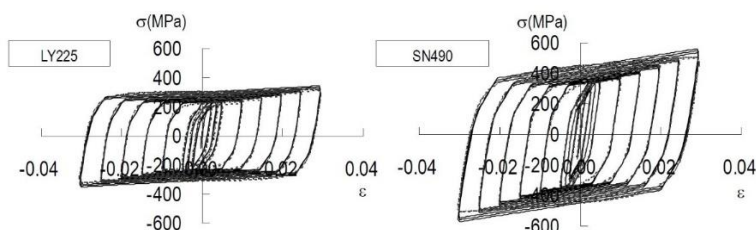
شکل (۱۰): نمودار تغییرات برش پایه نسبت به تغییر مکان مرکز جرم بام در جهت عرضی ساختمان در حالت اتصالات مفصلی

۴- صحت‌سنجی مشخصات رفتاری

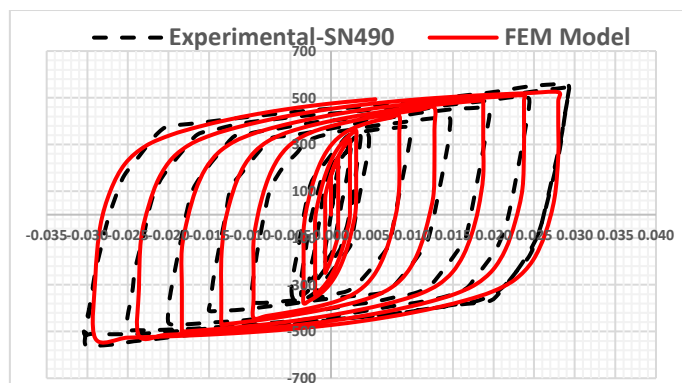
برای تعریف مشخصات مصالح فولادی در نرم‌افزار آباکوس و صحت‌سنجی نتایج آن، ابتدا یک کوپان با ابعاد و مشخصات مندرج در شکل (۱۱) در نرم‌افزار آباکوس مدل و با روش سعی و خطا، داده‌های مورد نیاز برای مشخصات مصالح و نمودار تنش-کرنش مورد نظر استخراج شد. شکل (۱۲) نمودار تنش-کرنش مصالح فولادی هدف را نشان می‌دهد و شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نمودار به‌دست‌آمده از نتایج تحلیل المان محدود را نشان می‌دهد که انطباق قابل قبولی با نمودار هدف دارد.



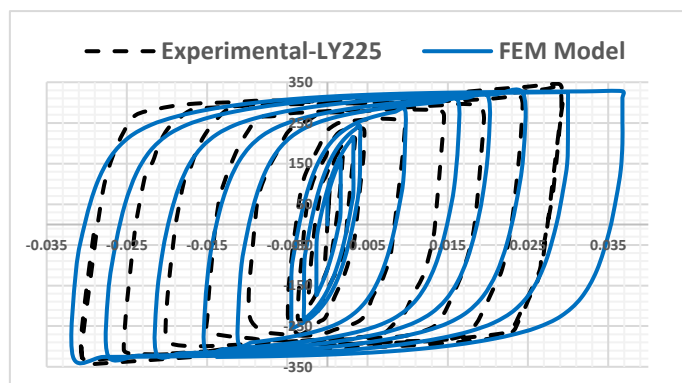
شکل (۱۱): ابعاد و مشخصات کوپان مدل شده در آباکوس



شکل (۱۲): نمودار تنش-کرنش هدف برای صحت‌سنجی مصالح فولادی



شکل (۱۳): نمودار تنش-کرنش به‌دست‌آمده از تحلیل اجزای محدود برای مصالح SN490



شکل (۱۴): نمودار تنش- کرنش به دست آمده از تحلیل اجزای محدود برای مصالح LY225

۵- تحلیل اجزای محدود نمونه و نتایج

از میان قاب‌های مهاربندی شده موجود، تعداد ۵ قاب با توجه به اندازه مقطع تیرها، ستون‌ها و مهاربندها، جهت مدل‌سازی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس (Abaqus) انتخاب شد. مشخصات این قاب‌ها و نمونه‌های تعریف شده در نرم‌افزار، در جدول‌های (۱) و (۲) نشان داده شده‌اند.

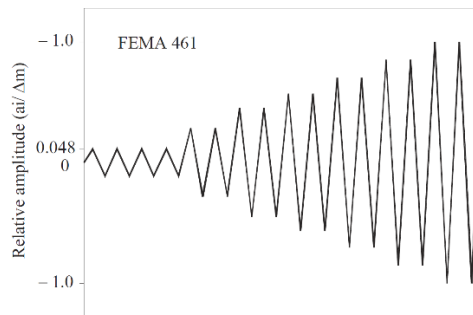
جدول (۱): نمونه‌های تعیین شده برای مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس

Specimen	Column Section		Beam Section				Brace Section	Frame Span	Brace Angel
	Flang Width	Flange Thick	Flang Width	Flange Thick	Web Height	Web Thick			
1	650	35	300	20	500	10	2UNP160	5000	35°
2	750	40	300	20	500	10	2UNP200	6000	30°
3	500	25	300	20	500	10	2UNP120	4000	41°
4	500	25	300	20	500	10	2UNP120	3500	45°
5	750	40	300	20	500	10	2UNP200	7000	27°

جدول (۲): نمونه‌های تعریف شده با لحاظ کردن نقص طراحی برای مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس

No.	Specimen	Column Section		Beam Section				Brace Section	Frame Span	Brace Angel
		Flang Width	Flange Thick	Flang Width	Flange Thick	Web Height	Web Thick			
1	1-HD	650	35	300	20	500	10	2UNP160	5000	35°
2	1-MD	650	30	300	20	500	10	2UNP160	5000	35°
3	1-OD	650	20	300	20	500	10	2UNP160	5000	35°
4	2-HD	750	40	300	20	500	10	2UNP200	6000	30°
5	2-MD	750	30	300	20	500	10	2UNP200	6000	30°
6	2-OD	750	20	300	20	500	10	2UNP200	6000	30°
7	3-HD	500	25	300	20	500	10	2UNP120	4000	41°
8	3-MD	500	20	300	20	500	10	2UNP120	4000	41°
9	3-OD	500	12	300	20	500	10	2UNP120	4000	41°
10	4-HD	500	25	300	20	500	10	2UNP120	3500	45°
11	4-MD	500	20	300	20	500	10	2UNP120	3500	45°
12	4-OD	500	12	300	20	500	10	2UNP120	3500	45°
13	5-HD	750	40	300	20	500	10	2UNP200	7000	27°
14	5-MD	750	30	300	20	500	10	2UNP200	7000	27°
15	5-OD	750	20	300	20	500	10	2UNP200	7000	27°

برای بارگذاری قاب‌های در نظر گرفته شده، از الگوی بارگذاری FEMA 461-2007 استفاده شده است. این الگوی بارگذاری برای سازه‌های حساس به تغییر مکان قابل استفاده می‌باشد که در شکل (۱۵) نشان داده شده است. همچنین در شکل (۱۶) نمای کلی از قاب تحلیل شده در نرم‌افزار آباکوس قابل مشاهده است.



شکل (۱۵): الگوی بارگذاری FEMA



شکل (۱۶): نمای کلی از قاب تحلیل شده در نرم افزار آباکوس

- در همه مدل‌ها با استفاده از ورق سخت‌کننده در محل اتصال ورق گاست به ستون، چه به صورت عمودی و چه به صورت افقی، مقدار سختی قاب‌ها افزایش و تغییر مکان پسماند قاب‌ها کاهش می‌یابد.
- مقدار افزایش سختی برای مدل‌هایی که در آن‌ها ورق سخت‌کننده عمودی در محل اتصال گاست‌ها به ستون استفاده شده است، نسبت به حالت استفاده از ورق سخت‌کننده افقی، بیش‌تر است.
- مقدار کاهش تغییر مکان پسماند قاب برای مدل‌هایی که در آن‌ها ورق سخت‌کننده عمودی در محل اتصال گاست‌ها به ستون استفاده شده است، نسبت به حالت استفاده از ورق سخت‌کننده افقی، کم‌تر است.
- استفاده از ورق سخت‌کننده در محل اتصال ستون قوطی‌شکل، به علت افزایش سختی محل اتصال گاست و کاهش تغییر شکل وجه ستون، باعث عملکرد بهتر قاب شده و تغییر مکان پسماند قاب را کاهش می‌دهد.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با تمرکز بر اتصال ورق گاست به ستون‌های جعبه‌ای به بررسی رفتار قاب مهاربندی همگرای ویژه به صورت اجزای محدود پرداخته شد. با توجه به بررسی‌های به عمل آمده و نتایج حاصل از رفتار و عملکرد قاب‌های بررسی شده، مشخص گردید استفاده از سخت‌کننده‌های قائم منجر به بهبود رفتار لرزه‌ای گره اتصال و همچنین رفتار ستون محل تلاقی مهاربندی می‌گردد.

۷- مراجع

آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش چهارم، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی
مقررات ملی ساختمان ایران مبحث دهم طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی. (۱۳۹۲)، وزارت راه و شهرسازی معاونت مسکن و ساختمان.
(ویرایش چهارم)

AIJ. Preliminary reconnaissance report of the 2011 Toho-ku-Chiho Taiheiyo-Oki earthquake. Architectural Institute of Japan: Tokyo, 2011: 105–111 (in Japanese).

Azadeh Alipour, Gusset plate connections in Concentrically Braced Steel Structures, Graduate Student Researcher, University of California Irvine, USA (2009)

Ou JP Li H (2011). The regional engineering damage and reconstruction strategy in Wenchuan earthquake of China. Journal of Earthquake and Tsunami; 05(02): 189–216.

Xie LL (2009). The lessons of 2008 Wenchuan earthquakes. Proceedings of the symposium on earthquakes and earthquake disaster reduction commemorating the first anniversary of the Wenchuan earthquake, Chengdu, China.