

بررسی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی دارای فیوزهای برشی با سوراخ‌های بیضی شکل

بابک محمدزاده^۱، نادر فنائی^{۲*}، سعید اصیل قره باغی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* تهران، صندوق پستی ۴۴۱۶-۱۵۸۷۵، fanaie@kntu.ac.ir

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی و بهبود عملکرد یک سیستم جذب و استهلاک انرژی در قاب‌های خمشی فولادی، با طول دهانه‌های کوتاه و تیرهای عمیق است. یکی از چالش‌های پیش رو برای طراحی سیستم قاب خمشی فولادی، وجود برخی محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای مانند شرایط حداقلی طول دهانه و عمق تیر است که طراحان، به منظور تشکیل مفاصل پلاستیک خمشی در دوسر تیر، ملزم به رعایت آن هستند. با تضعیف قسمتی از تیر در میانه آن، سازه و کار اتلاف انرژی، از خمشی به برشی تبدیل شده و عملاً این نقیصه برطرف می‌گردد. از جمله مطالعات صورت گرفته در مورد تضعیف میانه تیرها، ایجاد سوراخ‌های دایروی شکل در جان تیر می‌باشد. با تغییر شکل سوراخ‌ها از دایروی به بیضی شکل و تغییر در آرایش بیضی‌ها و زوایای محورهای بیضی نسبت به یکدیگر و با حفظ مساحت کسر شده از جان تیر، مطابق مدل‌های ساخته شده در نرم افزار Abaqus و مقایسه پاسخ آرایش‌های سوراخ مختلف بیضی شکل با حالت دایروی شکل، شکل‌پذیری بیشتری گزارش شده است. بدین صورت که در مدل‌هایی که از ترکیب سوراخ‌های بیضی قائم و افقی در آنها استفاده شده است، اتلاف انرژی بیشتری نسبت به سایر حالات بیضی شکل مشاهده شده و ۱۶ درصد اتلاف انرژی بیشتری نسبت به حالت دایروی محاسبه شده است.

واژگان کلیدی

قاب خمشی فولادی، فیوز برشی، سوراخ دایروی، سوراخ بیضی، اتلاف انرژی

Seismic performance evaluation of steel moment frames including shear fuse with elliptic holes

B. Mohammadzade, N. Fanaie, S.A. Gharebaghi

Abstract

The purpose of this study is to investigate and improve the performance of energy absorption and dissipation system in the steel moment frames with short span lengths and deep beams. One of the challenges for designing a steel moment frame system is the existence of some code limitations such as minimum span length and beam depth that designers are required to follow in order to form the plastic hinges at both beam ends. By weakening a part of the beam in its middle, the mechanism of energy dissipation is changed from bending to shear, and this defect is practically eliminated. One of the studies on weakening the middle of the beams is to make circular holes in the beam web. By changing the shape of holes from circular to elliptic and changing the arrangement of the elliptic holes and the angles of the elliptical axes relative to each other and by maintaining constant the hole area reduced from the beam web, according to the models built in Abaqus software and comparing the response of different hole arrangements with circular ones, more ductility has been reported. Thus, in the models in which a combination of vertical and horizontal elliptical holes is used, more energy dissipation has been observed compared to other elliptical cases and 16% more energy dissipation has been calculated compared to the circular case.

Keywords

Steel moment frame, Shear fuse, Circular hole, Elliptic hole, Energy dissipation

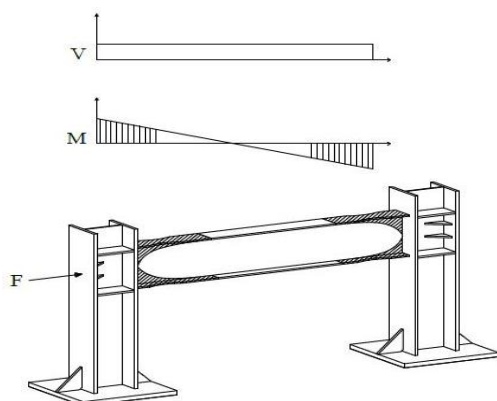
۱- مقدمه

تا کنون سازه‌های بلند مرتبه بسیاری با بکارگیری سیستم باربر جانبی قاب‌های خمشی در جهان طراحی و اجرا شده‌اند. پیش از دهه ۹۰ میلادی قاب‌های خمشی همواره جزء پرتعدادترین و ایمن ترین سازه‌های فولادی به حساب می‌آمدند. قاب‌های خمشی دارای اعضای بودند که به تصور طراحان وقت، قابلیت تحمل تغییرشکل‌های بسیار زیادی در برابر نیروهای برشی و لنگر خمشی داشتند تا اینکه با رخداد زلزله ۱۹۹۴ نورتریج^۱، این موضوع شدیداً مورد تردید واقع شد [۱]. در این زلزله شمار کثیری از قاب‌های خمشی، به صورت جدی مورد صدمه و آسیب قرار گرفتند و بسیاری از این صدمات و آسیب‌ها، گسیختگی‌های به وجود آمده در محل اتصال تیر به ستون قاب خمشی بود. صدمات و آسیب‌های سازه‌ای ناشی از زلزله کوبه^۲ در سال ۱۹۹۵، اهمیت بررسی مشکلات عدیده در قاب‌های خمشی را بیش از پیش روشن ساخت [۱].

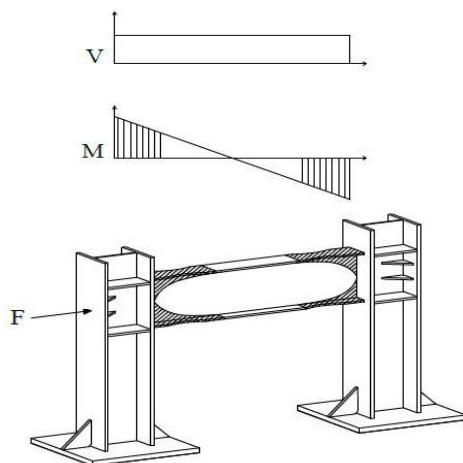
پس از آن نظریات متعددی پیرامون نحوه بهینه‌سازی اتصال تیر به ستون در قاب‌های خمشی مطرح گردید. در اکثر این مطالعات، تضعیف قسمت خاصی از تیر مورد بحث و بررسی قرار گرفته است [۲]. مطالعات انجام شده، منجر به پدیدآوری اتصالات جدیدی شد که شکل پذیری و جذب انرژی بالایی داشتند، اما همچنان ارضای شرایط حداقلی نسبت طول دهانه به عمق تیر، به عنوان محدودیت بزرگی برای این سیستم به شمار می‌آمد. دلیل اصلی تاکید آیین نامه‌های ساختمانی بر رعایت نسبت حداقلی طول دهانه به عمق تیر، تشکیل مفاصل پلاستیک با طول کافی، به منظور استهلاک مطلوب‌تر انرژی می‌باشد. بر اساس ANSI/AISC 358-10 [۳] نسبت طول دهانه به عمق تیر برای قاب‌های خمشی ویژه نبایست کمتر از عدد ۷ و برای قاب‌های خمشی متوسط نباید از عدد ۵ کمتر باشد. در سازه‌هایی با ارتفاع بالا و فاصله بین ستون‌های کم، تیرهای طراحی شده عمدتاً ناقض این شرایط بوده و در عمل نسبت‌های به مراتب کمتری برای این اعداد حاصل می‌گردد [۴]. شکل (۱) منطق محدودیت حداقلی طول دهانه به عمق تیر، با بار و مقاطع یکسان را نمایش می‌دهد. تنها تفاوت میان این دو قاب، اختلاف میان نسبت‌های طول دهانه به عمق تیر است. در قاب "الف" که ناحیه رنگی نمایانگر مفاصل پلاستیک خمشی در دو سر تیر می‌باشد، نسبت طول دهانه به عمق تیر ارضا کننده شرایط حداقلی آیین نامه بوده و قاب "ب" ناقض این شرایط می‌باشد.

در این قاب‌ها، مفصل پلاستیک خمشی بین نواحی $M = SF_y$ و $M_0 = ZF_y$ شکل گرفته است [۵]. واضح است که

در قاب "الف" که ارضاء کننده شرایط آیین نامه‌ای است، طول مفصل پلاستیک و متعاقباً انرژی تلف شده بیشتری نسبت به قاب "ب" وجود دارد.



الف) نسبت طول دهانه به عمق تیر برابر ۷



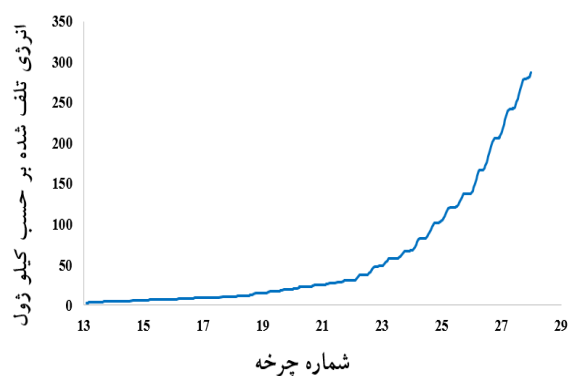
ب) نسبت طول دهانه به عمق تیر برابر ۴

شکل ۱- مفاصل پلاستیک و نمودار لنگر خمشی در طول تیر [۵]

در یک قاب خمشی می‌توان با تضعیف عمده تیر در وسط دهانه آن، سازو کار استهلاک انرژی را از خمشی به برشی تبدیل کرد و در این تحقیق برای بهبود عملکرد لرزه‌ای قاب‌های خمشی با فیوز برشی سوراخ‌دار، شکل سوراخ‌ها از دایروی به مدل‌های مختلف بیضی شکل تغییر داده شده و با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود Abaqus مطالعات عددی انجام شده و مزیت سوراخ‌های بیضی نسبت به سوراخ‌های دایروی در قاب‌های دارای فیوز برشی به صورت کمی بررسی شده است.

۲- مطالعات صورت گرفته پیرامون مسأله

مطالعات گسترده‌ای پیرامون موضوع ذکر شده و ساز و کارهای جدید برای قاب‌های خمشی انجام گرفته که عمده آن‌ها بر



شکل ۶- اتلاف انرژی تجمعی قاب آزمایشگاهی

۵- تغییر در شکل سوراخ‌ها و نحوه قرار گیری آن‌ها

به منظور بررسی تأثیر تغییر دادن شکل سوراخ‌های تیر پیوند از دایروی به بیضی، اقدام به مدلسازی قاب‌هایی شد که در آنها تغییر در شکل سوراخ‌ها از دایروی به بیضی شکل به صورتی انجام می‌پذیرد که مساحت سوراخ‌ها در هر دو حالت دایروی و بیضی شکل، یکسان باشد. در مدل با سوراخ‌های دایروی از سوراخ‌هایی با قطر ۵۵ میلی‌متر و با فاصله قطری مرکز تا مرکز ۱۲۷ میلی‌متر استفاده شده است. با کاهش ۲۰ درصدی شعاع سوراخ‌های دایروی، اندازه قطرهای کوچک و بزرگ بیضی، محاسبه شده است.

با توجه به توضیحات فوق، آرایش‌های ۸ گانه سوراخ‌های بیضی شکل به صورت زیر خواهد بود.

آرایش اول: تغییر سوراخ‌ها از حالت دایره به بیضی به صورت تماماً قائم.

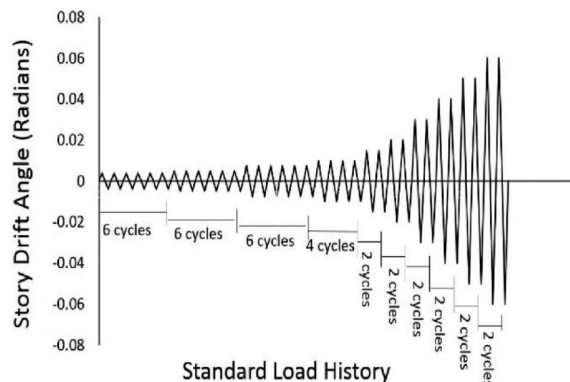
آرایش دوم: تغییر سوراخ‌ها از حالت دایره به بیضی به صورت تماماً افقی.

آرایش سوم: تغییر سوراخ‌ها از حالت دایره به بیضی بصورت ترکیبی قائم و افقی به طوریکه در محور با سوراخ‌های جفت، بیضی‌ها به صورت قائم و در محور با سوراخ‌های تک، بیضی‌ها بصورت افقی باشند.

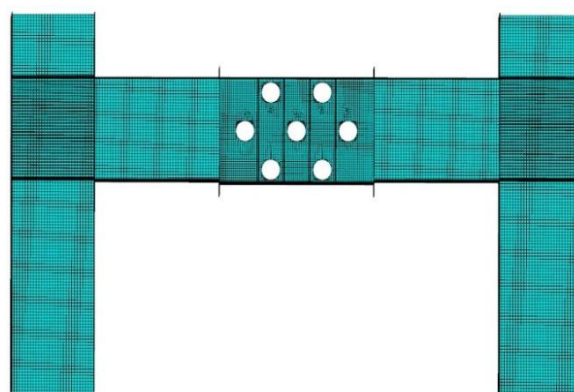
آرایش چهارم: تغییر سوراخ‌ها از حالت دایره به بیضی بصورت ترکیبی قائم و افقی به طوریکه در محور با سوراخ‌های جفت، بیضی‌ها به صورت افقی و در محور با سوراخ‌های تک، بیضی‌ها به صورت قائم باشند.

آرایش پنجم: تغییر سوراخ‌ها از حالت دایره به بیضی به صورت ۴۵ درجه ترکیبی با حالت قائم.

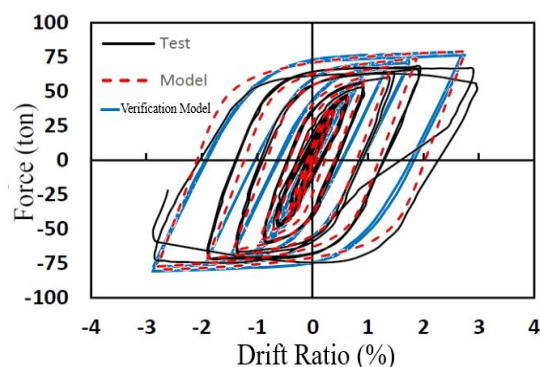
هیستریزیس نیروی برشی-دریفت نسبی قاب آزمایشگاهی [۱۰] و مدل Abaqus در کنار یکدیگر مقایسه شده که نشان دهنده دقت بالای مدل‌سازی انجام شده است. در نهایت شکل (۶) میزان انرژی تلف شده تجمعی قاب آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- پروتکل بارگذاری آزمایش [۱۰]



شکل ۴- مش بندی مدل اجزاء محدود با سوراخ‌های دایروی



شکل ۵- نمودارهای هیستریزیس مدل‌های آزمایشگاهی و Abaqus

آرایش ششم: تغییر سوراخ‌ها از حالت دایره به بیضی بصورت ۴۵ درجه ترکیبی با حالت قائم خلاف جهت آرایش پنجم.

آرایش هفتم: تغییر سوراخ‌ها از حالت دایره به بیضی بصورت ۴۵ درجه ترکیبی با حالت افقی.

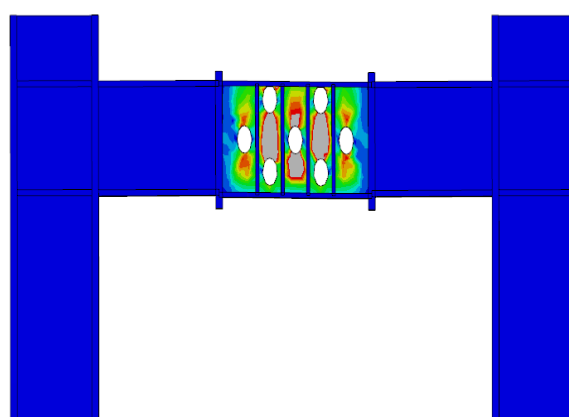
آرایش هشتم: تغییر سوراخ‌ها از حالت دایره به بیضی بصورت ۴۵ درجه ترکیبی با حالت افقی خلاف جهت آرایش هفتم.

با توجه به معرفی آرایش‌ها، پس از مدل‌سازی قاب

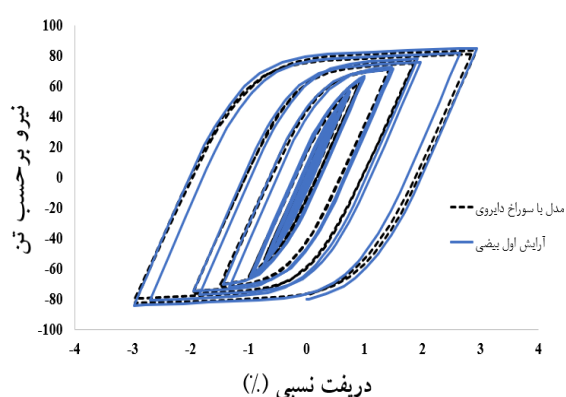
آزمایشگاهی با تغییرات فوق در نرم افزار، نتایج حاصل به تفکیک آرایش‌ها ارائه شده و انرژی تلف شده هر یک از مدل‌ها، با قاب با سوراخ‌های دایروی شکل مقایسه شده است. کانتورهای کرنش پلاستیک معادل برای آرایش‌های اول تا هشتم به ترتیب در شکل‌های (۷)، (۹)، (۱۱)، (۱۳)، (۱۵)، (۱۷)، (۱۹) و (۲۱) آورده شده است.

همچنین منحنی‌های هیستریزس نیروی برشی-دریفت نسبی برای آرایش‌های اول تا هشتم به ترتیب در شکل‌های (۸)، (۱۰)، (۱۲)، (۱۴)، (۱۶)، (۱۸)، (۲۰) و (۲۲) ارائه شده است.

- نتایج آرایش اول

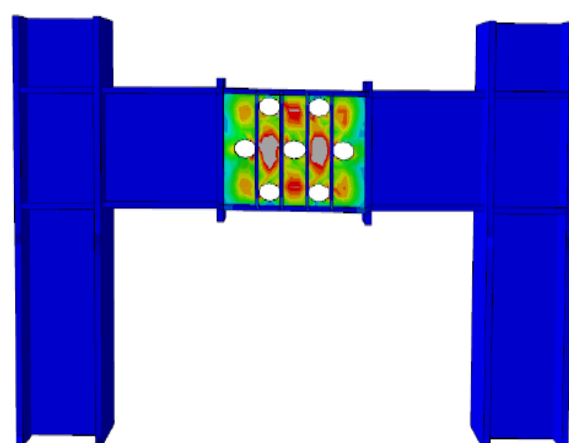


شکل ۷- کانتور کرنش پلاستیک معادل (آرایش اول)

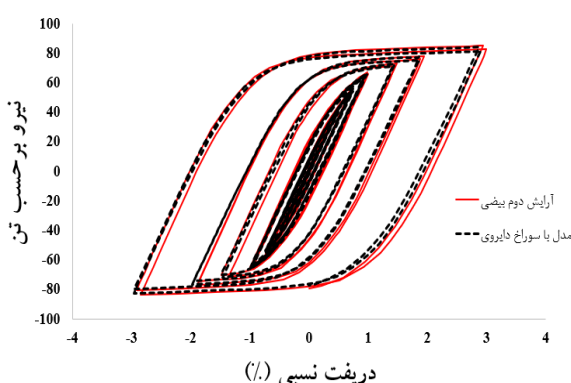


شکل ۸- منحنی‌های هیستریزس نیروی برشی-دریفت نسبی قاب آزمایشگاهی و قاب مدل‌سازی شده (آرایش اول)

- نتایج آرایش دوم

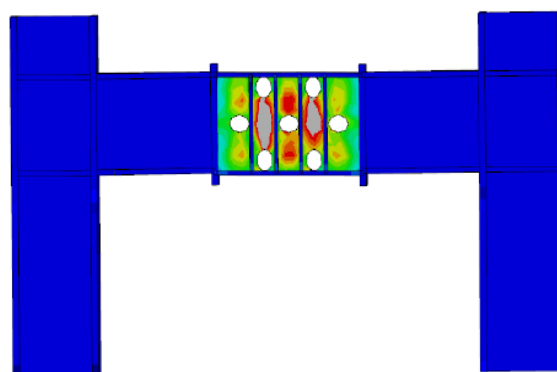
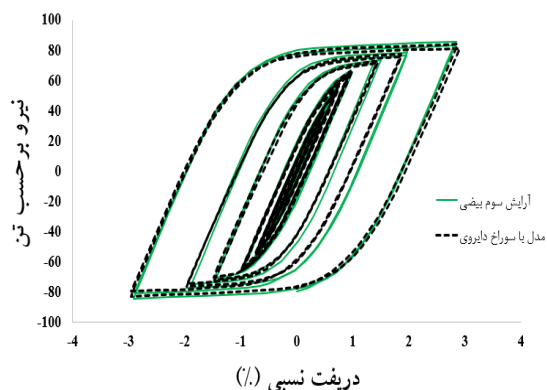


شکل ۹- کانتور کرنش پلاستیک معادل (آرایش دوم)



شکل ۱۰- منحنی‌های هیستریزس نیروی برشی-دریفت نسبی قاب آزمایشگاهی و قاب مدل‌سازی شده (آرایش دوم)

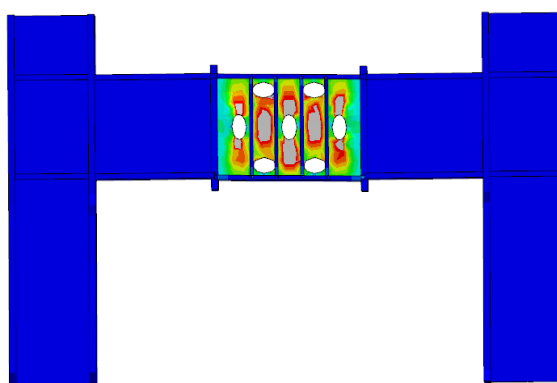
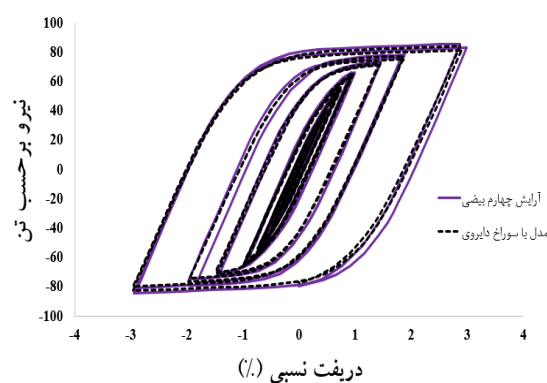
- نتایج آرایش سوم



شکل ۱۱- کانتور کرنش پلاستیک معادل (آرایش سوم)

شکل ۱۲- منحنی‌های هیستریزیس نیروی برشی-دریخت نسبی قاب آزمایشگاهی و قاب مدل‌سازی شده (آرایش سوم)

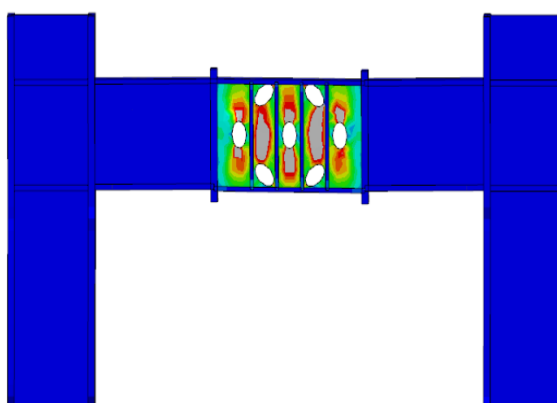
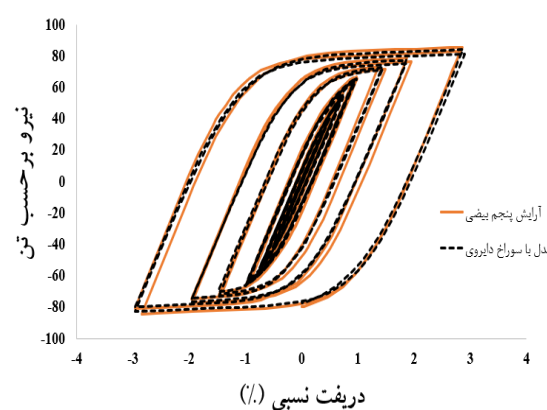
- نتایج آرایش چهارم



شکل ۱۳- کانتور کرنش پلاستیک معادل (آرایش چهارم)

شکل ۱۴- منحنی‌های هیستریزیس نیروی برشی-دریخت نسبی قاب آزمایشگاهی و قاب مدل‌سازی شده (آرایش چهارم)

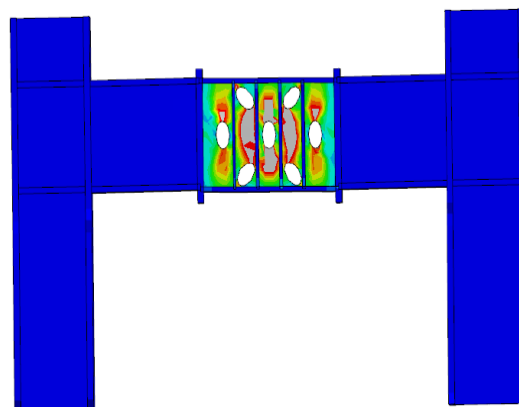
- نتایج آرایش پنجم



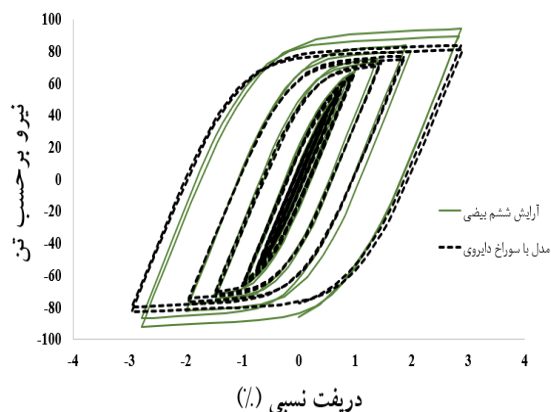
شکل ۱۵- کانتور کرنش پلاستیک معادل (آرایش پنجم)

شکل ۱۶- منحنی هیستریزیس نیروی برشی-دریخت نسبی قاب آزمایشگاهی و مدل‌سازی شده (آرایش پنجم)

- نتایج آرایش ششم

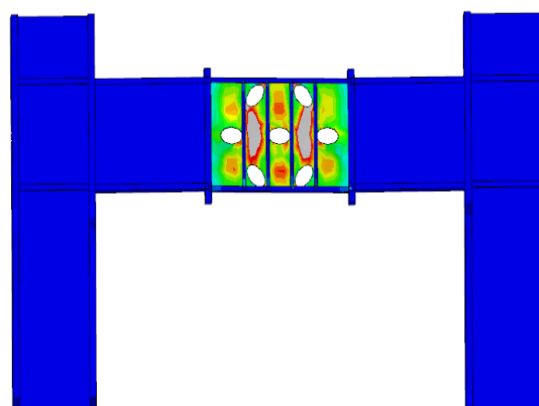


شکل ۱۷- کانتور کرنش پلاستیک معادل (آرایش ششم)

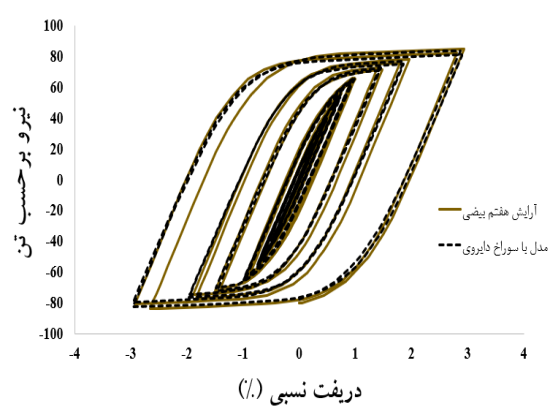


شکل ۱۸- منحنی هیستریزیس نیروی برشی - دررفت نسبی قاب آزمایشگاهی و مدل سازی شده (آرایش ششم)

- نتایج آرایش هفتم

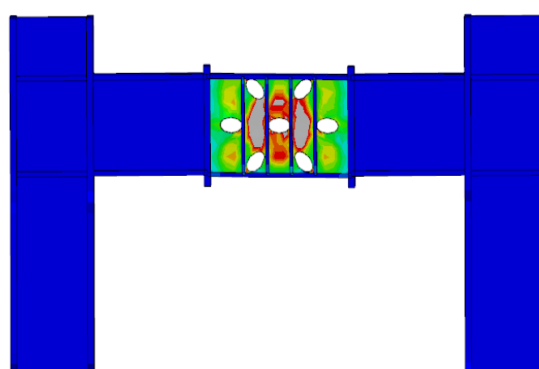


شکل ۱۹- کانتور کرنش پلاستیک معادل (آرایش هفتم)

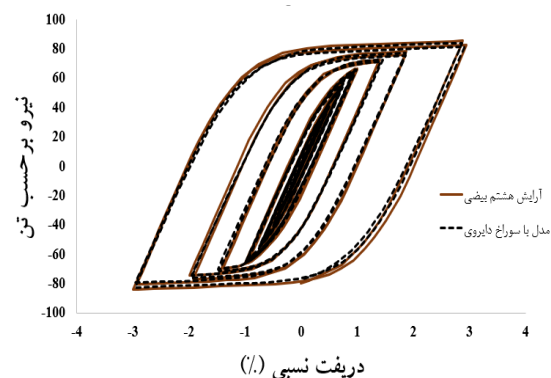


شکل ۲۰- منحنی هیستریزیس نیروی برشی - دررفت نسبی قاب آزمایشگاهی و مدل سازی شده (آرایش هفتم)

- نتایج آرایش هشتم

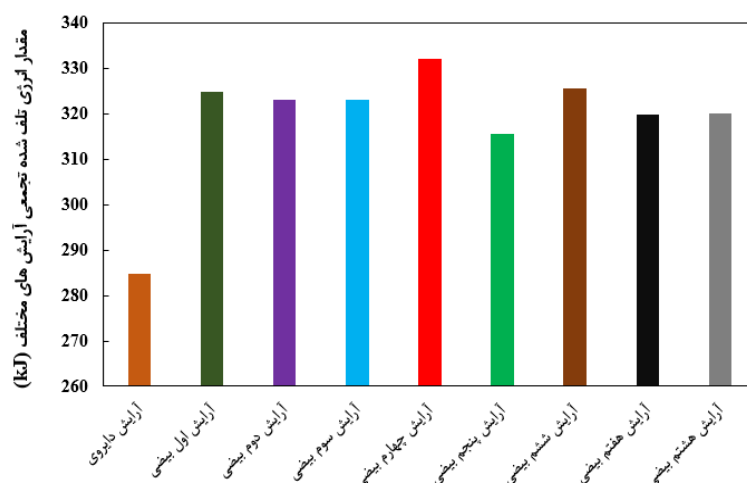


شکل ۲۱- کانتور کرنش پلاستیک معادل (آرایش هشتم)



شکل ۲۲- منحنی هیستریزیس نیروی برشی - دررفت نسبی قاب آزمایشگاهی و مدل سازی شده (آرایش هشتم)

آرایش‌های هشت‌گانه بیضوی شکل و همچنین میزان انرژی تلف شده تجمعی مدل با سوراخ‌های دایروی ارائه شده است. با توجه به مقادیر این نمودار مشاهده می‌شود آرایش چهارم شرایط بهینه‌تری نسبت به سایر آرایش‌ها داشته و همچنین تغییر در شکل سوراخ‌ها از دایروی به بیضی، در همه حالات باعث افزایش اتلاف انرژی و همچنین افزایش شکل‌پذیری کلی قاب شده است.



شکل ۲۳- مقدار انرژی تلف شده تجمعی آرایش‌های مختلف

مطالعه عددی اجزاء محدود با استفاده از نرم افزار Abaqus نشان دهنده این موضوع بود که قاب‌های دارای فیوزهای برشی با سوراخ‌های بیضی شکل، عملکرد بهتری نسبت به فیوزهای دایروی شکل داشتند. با توجه به اطلاعات مندرج در شکل (۲۲)، آرایش چهارم بیضی شکل بهترین عملکرد را در میان آرایش‌های هشت‌گانه را داشته و نسبت به حالت دایروی، افزایش جذب انرژی ۱۶ درصدی را داشته است. آرایش‌های پنجم، هفتم و هشتم علی‌رغم اینکه نسبت به مدل با سوراخ دایروی عملکرد بهتری داشتند ولی نسبت به سایر آرایش‌ها ضعیف‌تر عمل کرده و بترتیب با ۱۰/۸، ۱۲/۳ و ۱۲/۴ درصد، کمترین نرخ افزایش جذب انرژی را داشته‌اند. آرایش‌های اول، دوم، سوم و ششم نیز افزایش جذب انرژی بترتیب ۱۴، ۱۳/۴، ۱۳/۴ و ۱۴/۳ درصدی نسبت به حالت دایروی را از خود نشان داده‌اند. شایان ذکر است که اگر اتصال تیر پیوند میانی به تیرهای کناری با استفاده از صفحات انتهایی و به صورت پیچی باشد، تیر پیوند قابل تعویض بوده و پس از زلزله، تیر پیوند می‌تواند با یک تیر سالم جایگزین گردد.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، سعی گردید عملکرد لرزه‌ای یک سیستم باربر جانبی جدید بهبود یابد. بدین صورت که با تضعیف میانه تیر به صورت الگوی بهینه ذکر شده، اتلاف انرژی از طریق لنگر خمشی به اتلاف انرژی از طریق نیروی برشی تبدیل می‌شود. همانطور که ذکر شد، طرح و اجرای قاب‌های خمشی با نسبت طول دهانه به عمق تیر کمتر از عدد ۷ مجاز نمی‌باشد، چون در این دسته از سازه‌های قاب خمشی ویژه که ساز و کار اتلاف انرژی در آن‌ها تشکیل مفصل پلاستیک خمشی در دو انتهای تیر می‌باشد، به دلیل گرا دیان شدید لنگر خمشی در طول تیر، مفصل پلاستیک خمشی با طول کافی شکل نمی‌گیرد. لذا با تغییر ساز و کار استهلاک انرژی از لنگر خمشی به نیروی برشی، ضمن برطرف کردن اشکال فوق، خرابی را از مجاورت ستون که مهمترین المان سازه‌ای است، دور می‌کند.

در این تحقیق، به منظور بهبود و ارتقاء عملکرد قاب‌های خمشی با فیوزهای برشی دارای سوراخ‌های دایروی شکل، از سوراخ‌های بیضوی شکل با آرایش‌های مختلف استفاده شد.

- [1] Gupta, A. and Krawinkler, H. (1999), "Seismic demands for the performance evaluation of steel moment resisting frame structures", Stanford University.
- [2] Mansour, N., Christopoulos, C. and Tremblay, R. (2011), "Experimental validation of replaceable shear links for eccentrically braced steel frames", Journal of Structural Engineering, Vol. 137, pp. 1141-1152.
- [3] ANSI, A., (2010), AISC 358-10 prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications. American Institute of Steel Construction Inc., Chicago.
- [4] Popov, E.P., Kasai, K. and Engelhardt, M.D. (1987), "Advances in design of eccentrically braced frames", Earthquake spectra, Vol. 3, pp. 43-55.
- [5] Nikoukalam, M. and Dolatshahi, K.M. (2015), "Development of structural shear fuse in moment resisting frames", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 114, pp. 349-361.
- [6] Nikoukalam, M.T., Mirghaderi, S.R. and Dolatshahi, K.M. (2017), "Shear slotted bolted connection", The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 26, pp. 1-17.
- [7] Ölmez, H.D. and Topkaya, C. (2011), "A numerical study on special truss moment frames with Vierendeel openings", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 67, pp. 667-677.
- [8] Guan, B., Su, M. and Lian, M. (2020), "Seismic behaviour of combined steel framed-tube substructure with replaceable shear links", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 167, pp. 59-68.
- [9] Dolatshahi, K.M., Gharavi, A. and Mirghaderi, S.R. (2018), "Experimental investigation of slitted web steel moment resisting frame", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 145, pp. 438-448.
- [۱۰] میرقادر، س.ر. و محمودی، س.ب. (۱۳۹۶)، "ارزیابی عددی و آزمایشگاهی رفتار قاب های خمشی فولادی با استفاده از فیوزبرشی حفره دار"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.
- [11] Abaqus, (2019), Users manual. Providence, RI, USA: HKS Inc.

پی نوشت

- ¹ Northridge
- ² Kobe
- ³ Shear slotted bolted connection
- ⁴ Reduced beam connection
- ⁵ Shell

