

مدل سازی آزمایشگاهی اثر سوراخ نمودن فیوز سازه ای زانویی بر عملکرد آن تحت بار متناوب در قاب های فولادی دارای مهاربند زانویی

ایرج غلامی علم^۱، محمد صافی^{۲*}، احسان درویشان^۳، سید سعید بهشتی^۴

۱-دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

۲-استادیار گروه سازه و زلزله، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی

۳-استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

۴-عضو هیئت علمی پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی

چکیده

در یک قاب فولادی دارای مهاربند زانویی، مهاربند قطری اصلی به اعضای کوتاه زانویی متصل می شود. عضو زانویی بصورت قربانی عمل نموده و باعث کاهش تقاضای سازه اصلی در طی وقوع زلزله شده و پس از هر زلزله می توان آن را تعویض و جایگزین نمود. طراحی دقیق عضوهای زانویی جهت اطمینان از اینکه آنها بدون ایجاد تخریب و ناپایداری بتوانند انرژی ناشی از تغییر شکل های پلاستیک بزرگ را جذب کنند، ضروری است. برنامه ریزی انجام آزمایش های آزمایشگاهی به منظور بهینه سازی طراحی انجام شد، که نتایج آنها در این تحقیق ارائه گردیده است. برای انجام آزمایش ها نمونه ها به صورت افقی در داخل یک قاب عکس العمل کارگذاری گردید و بارگذاری توسط جک هیدرولیکی انجام شد. در تحقیق حاضر نوع جدیدی از عضو زانویی که از سوراخ نمودن یکنواخت و متقارن جان عضو زانویی ساخته شد، مورد بررسی و کنکاش قرار گرفت. برای طرح بهینه عضو زانویی یک برنامه آزمایشگاهی، شامل بررسی اثر بار متناوب (سیکلینگ) بر عضو زانویی که جان آن از طریق سوراخکاری تضعیف شده بود در دستور کار قرار گرفت. نتایج آن با نتایج عضو زانویی معمولی و مشابه همان مقطع مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. مدل سازی آزمایشگاهی انجام شده با یک مدل عددی شبیه سازی شده توسط نرم افزار ANSYS مقایسه و مورد راستی آزمایی قرار گرفت. با استفاده از مدل سازی های انجام شده، منحنی های لرزه ای (هیستریزیس) هماهنگ و پایداری برای هر دو عضو زانویی ترسیم گردید. این منحنی ها عملکرد مناسب عضو زانویی سوراخ شده در استهلاک انرژی را نشان دادند.

کلمات کلیدی: آزمایشگاهی، عضو زانویی، بارگذاری، متناوب، مهاربند، قاب.

سابقه مقاله:

شناسه دیجیتال:

10.22065/jsce.2018.127235.1521	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/jsce.2018.127235.1521	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۳۹۹/۰۴/۰۱	۱۳۹۷/۰۷/۱۰	۱۳۹۷/۰۵/۲۹	۱۳۹۷/۰۱/۲۷

*نویسنده مسئول: محمد صافی

پست الکترونیکی: m_safi@sbu.ac.ir

Experimental modeling for effect of knee fuse perforated web on performance of structural knee fuse subjected to cyclic loading in steel knee braced frames

Iraj Gholami Alam¹, Mohammad Safi^{2*}, Ehsan Darvishan³, Saeed Beheshti⁴

1- Ph.D. Candidate, Structural Engineering, Dept. of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

2- Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran,

3- Assistant Professor, Dept. of Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran,

4- Instructor, Dept. of Civil Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Usually in a knee steel braced frame the main diagonal braces are connected to short knee elements. The knee elements act sacrificially and reducing the demands on the main structure during an earthquake, and can be replaced after the earthquake. However, careful design of the knee elements is required to ensure that they are able to absorb energy through repeated large plastic deformation without suffering collapse or instability. A program of laboratory testing has been undertaken in order to optimize the design and useful results from experimental tests are presented in this paper. For testing, the knee elements were mounted horizontally in a reaction frame and loaded vertically by a hydraulic actuator. In this research one kind of new weakening symmetrical perforated knee element are studied. Extensive experimental program of experimental testing by applied cyclic loading behavior on perforated knee element fuse and compare that's result with a solid element fuse has been undertaken. ANSYS software was used for simulation and the numerical analyses in order to verified experimental tests for specimens. Results show that applied cyclic loading on both knee specimens produce sustain stable hysteresis loops and it is shown that excellent performance to absorb energy can be achieved using perforated knee elements.

ARTICLE INFO

Receive Date: 16 April 2018

Revise Date: 20 August 2018

Accept Date: 02 October 2018

Keywords:

Experimental

Knee element

Loading

Cyclic

Brace

Frame

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.127235.1521

*Corresponding author: Mohammad Safi.

Email address: m_safi@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

از جمله مهمترین مزایای سازه‌های فولادی دو مورد با اهمیت مشخصات مکانیکی بسیار بالای فولاد و تقسیم کارهای اجرایی سازه‌های فولادی به دو مرحله ساخت و نصب می‌باشند. در خصوص طراحی این سازه‌ها در برابر زلزله باید دو هدف اساسی را تأمین نماییم؛ یکی ایجاد سختی و مقاومت کافی در سازه برای کنترل تغییر مکان جانبی سازه جهت جلوگیری از تخریب اعضای سازه‌ای و غیرسازه‌ای تحت زلزله‌های متوسط یا کوچک و دیگری ایجاد شکل‌پذیری و قدرت جذب انرژی مناسب در سازه به خاطر ممانعت از فروریختن سازه در یک زلزله شدید. سازه‌های متداول فولادی شامل قاب خمشی (MRF)^۱، قاب با مهاربند هم محور (CBF)^۲، قاب با مهاربند برون محور (EBF)^۳ و قاب با مهاربند زانوئی (KBF)^۴ می‌باشند؛ که اجمالا در ادامه معرفی می‌شوند.

قاب مقاوم خمشی (MRF): مهم‌ترین خصوصیت آن، نحوه اتصال اعضا می‌باشد، به نحوی که اتصالات در قاب مقاوم خمشی دارای چنان سختی می‌باشند که زاویه میان اعضا تحت اثر بار، بدون تغییر باقی می‌ماند. قاب خمشی انعطاف‌پذیر بوده و از نظر سختی رفتار مناسبی ندارد بگونه‌ای که برای پاسخ‌گویی به نیازهای تغییر شکل نسبی مستلزم در نظر گرفتن مقاطع بزرگ و پرهزینه است.

قاب مهاربندی شده هم محور (CBF): این سیستم دارای سختی جانبی بسیار بالایی بوده و به علت اینکه نیروهای جانبی توسط اعضا به صورت محوری منتقل می‌شوند؛ سیستمی اقتصادی می‌باشند. در زلزله‌های شدید به علت کمانش مهاربندها باعث تسلیم تیرها و ستون‌ها می‌گردد. مهاربندی هم محور علی‌رغم سختی بالا و مناسب و نیز سهولت طراحی و اجرا دارای اشکالاتی است که از جمله مهم‌ترین آنها محدودیت معماری در مورد درب‌ها و پنجره‌ها و نیز شکل‌پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی کم آن به دلیل کمانش بادبندها می‌باشد.

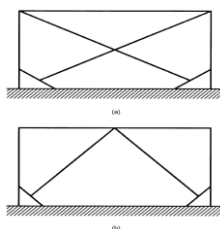
قاب مهاربندی شده برون محور (EBF): سیستم برون محور ترکیب کننده سختی مناسب که خصوصیت ویژه سیستم هم محور است و شکل‌پذیری بالا که خصوصیت ویژه سیستم قاب خمشی است؛ می‌باشد. در بادبندهای واگرا تیرهای پیوند کوتاه با قابلیت تغییر شکل‌های پلاستیک در خمش یا برش دارای ظرفیت استهلاک انرژی بالایی می‌باشند.

در این سیستم تیر پیوند در حالی که از وارد شدن نیروی بیش از حد به بادبند و کمانش آن جلوگیری می‌کند، خود با تغییر شکل‌های پلاستیک در مود خمشی یا برشی، مقدار زیادی انرژی وارد شده از زلزله را مستهلک می‌نماید. کنستانتین و همکارانش [۱] در سال ۲۰۱۷ با استفاده از مدل‌های عددی رفتار تیر پیوندی که در جان آن سوراخ بزرگی را در اشکال مختلف ایجاد می‌نمودند؛ مورد بررسی قرار دادند و یک ترکیب‌بندی جدید برای سوراخ نمودن جان تیر پیوند به‌عنوان فیوز سازه‌ای ارائه نمودند. اوکازاکی و همکارانش [۲] نیز مجموعه‌ای از ۲۳ آزمایش مختلف را برای بررسی و ارزیابی عملکرد تیرهای پیوند در قاب‌های مجهز به مهاربند واگرای مقاوم در برابر زلزله تحت اثر بارگذاری متناوب انجام دادند.

1 Moment Resisting Frame
2 Concentrically Braced Frame
3 Eccentrically Braced Frame
4 Knee Braced Frame

۲- سوابق تحقیقات انجام شده در خصوص قاب مهاربندی شده زانویی (KBF)

در سال ۲۰۱۵ رهگذر و همکارانش [۳] با بهینه‌سازی تمرکز تنش موقعیت مناسبی را برای سوراخ نمودن بال‌های تیر پیوند پیشنهاد کردند. بر اساس نتایج تحقیقات آنها ترکیب‌بندی سوراخ‌ها نقش مهمی را در عملکرد کنترل لرزه‌ای دارد. در سال ۲۰۱۶ رهگذر و همکارانش [۴] مطالعاتی بر روی قاب‌های خمشی ویژه مجهز به فیوزهای جاری‌شونده انجام دادند. آنها جان تیر را در محل اتصال تیر به ستون در اشکال مختلف سوراخ نموده و تحت بار متناوب قرار دادند. بر اساس مطالعات آنها ضریب اصلاحی مناسبی برای شکل سوراخ در جان تیر ارائه گردید. بر اساس تحقیقات بالندرا و همکارانش [۵] و [۶] در قاب‌های مهاربندی زانویی عضو قطری مهاربند به عضو زانویی کوچکی که به صورت مورب در طول اتصال تیر و ستون کشیده شده است متصل است. این عضو زانویی در زلزله‌های خفیف به صورت ارتجاعی طراحی شده و در زلزله‌های شدید پیش از آنکه اعضای اصلی سازه تسلیم شوند کمانش کرده و جاری می‌شود. در زلزله‌های معمولی انرژی که به وسیله اعضای زانویی مستهلک می‌گردد. باید قدرت حفظ سازه را در برابر صدمات جدی داشته باشد. بسیاری از صدمات ناشی از زلزله-های شدید به صورت گسترده‌ای به خود سازه وارد می‌گردند. با حضور عضو زانویی، سازه در برابر صدمات و آسیب‌های جدی حفظ می‌شود. بعد از یک زلزله معمولی هر کدام از این عناصر زانویی قابلیت جایگزین شدن را در محل سابق خود دارا می‌باشند. مهاربند‌های زانویی را می‌توان به روش‌های مختلف در یک قاب بکارگیری نمود. دو نمونه از این گونه جانمایی‌های ممکن در شکل ۱ نشان داده شده است. ویلیامز و همکارانش از جمله بورهالا [۷] نشان دادند که سیستم مهاربند X در کنترل دررفت جانبی موثرتر است (مشابه اهمیتشان در ساختمانهای بلند)، طوری که در سیستم مهاربند K نیروهای برشی سراسری کمتر هستند. بورهالا همچنین نشان داد که جهت افزایش مفید در سختی الاستیک، مقاومت و استهلاک انرژی، طول مناسب برای عضو زانویی باید بین ۰/۲ تا ۰/۳۵ برابر ارتفاع قاب انتخاب شود و ممان دوم سطح اعضای زانویی باید ۰/۳ برابر مقدار آن در ستون‌ها باشد. کیم و سئو [۸] در سال ۲۰۰۳ یک مدل تحلیلی را جهت ارزیابی عملکرد لرزه‌ای سیستم مهاربند زانویی ارائه نمودند. آنها اتصالات و اعضای خمشی مثل تیرها و ستون‌ها را صرفاً برای بارهای ثقلی و مهاربند زانویی را در برابر بارهای جانبی باد و زلزله طرح کردند. در سال ۲۰۱۶ نوبهار و همکارانش [۹] برای درک بهتر رفتار اعضای زانویی، مدل‌سازی چهار قاب فولادی سه، پنج، هفت و نه طبقه که به عضو زانویی مجهز بودند را انجام داده و آنها را تحت تحلیل استاتیکی غیر خطی قرار دادند. این تحلیل جهت ارزیابی صحت مدل‌سازی و بدست آوردن مقادیر ضریب رفتار، ضریب اضافه مقاومت در مدل‌ها، و شکل‌پذیری بر پایه دوره تناوب آنها انجام شد.



شکل ۱: قاب‌های مهاربندی شده با اعضای زانویی در اشکال

(a) سیستم مهاربند x. (b) سیستم مهاربند k.

۳- مقایسه عملکرد قاب‌های دارای مهاربند زانویی با قاب‌های خمشی و هم مرکز تحت اثر زلزله

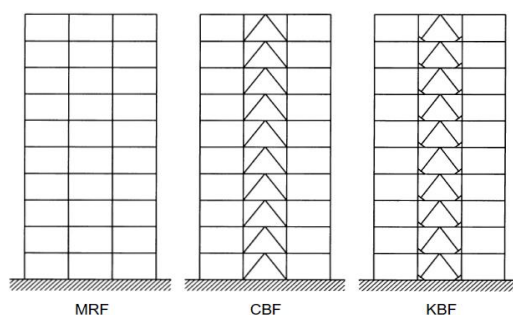
مقایسه‌ای بین یک قاب خمشی (MRF)، ۱۰ طبقه دارای سه دهانه با یک قاب با مهاربند هم‌مرکز (CBF) که دهانه مرکزی آن مهاربندی شده است و یک قاب دارای مهاربند زانویی (KBF) در دهانه مرکزی آن که تحت اثر داده‌های زلزله El Centro قرار گرفته در شکل ۲

نشان داده شده است. تحلیل‌ها با استفاده از برنامه المان محدود توزیع خسارات برای هر سه قاب تحت اثر حداکثر شتاب زمین در محدوده $0.35g$ تا $0.7g$ انجام شده است.

در $0.35g$ تحت اثر خمش، تیرهای طبقات پایین‌تر در قاب خمشی مفصل شده‌اند. در قاب CBF مفصل شدن رخ نداده اما مهاربندها در ارتفاع دچار کمانش شده‌اند و لذا این نوع قاب توانسته تغییر شکل‌ها را کنترل نماید.

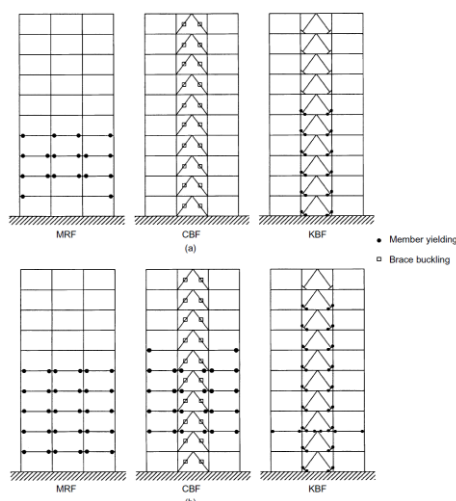
در قاب‌های KBF جاری شدن اعضای زانویی در ۶ طبقه پایین اتفاق افتاده اما اعضای سازه اصلی جاری نشده‌اند. در هر دو قاب خمشی (MRF) و CBF تیرها به شدت جاری شده‌اند در حالی که در قاب KBF فقط تعداد محدودی از تیرها جاری شده‌اند و تقریباً همه اعضای زانویی در استهلاک انرژی مشارکت نموده‌اند.

این مطالعات نشان دهنده پتانسیل ذاتی مهاربند زانویی در استهلاک انرژی و حفظ سازه اصلی است. در این سطح از زلزله استهلاک انرژی در عضو زانویی باعث می‌شود که سایر اعضای سازه ای دچار آسیب نشوند.



شکل ۲: قاب‌های ده طبقه مهاربندی شده با مهاربند زانویی (KBF)، هم مرکز (CBF) و قاب خمشی (MRF)

تحلیل‌های انجام شده با استفاده از برنامه المان محدود توزیع خسارات برای هر سه قاب که تحت حداکثر مقدار شتاب زمین در رنج $0.35g$ تا $0.7g$ قرار گرفته‌اند در شکل ۳ نشان داده شده است [۷].



شکل ۳: تخریب سازه ای در قاب‌های MRF، CBF و KBF تحت اثر زلزله El Centro [۷]

PGA=0.7 (b) PGA=0.35 (a)

۴- طراحی و انتخاب عضو زانویی

طراحی اعضای زانویی برای یک قاب مهاربندی زانویی دارای اهمیت ویژه‌ای است. بگونه‌ای که اعضای زانویی باید بتوانند چرخه‌های هیستریزس پایداری را بر روی چند زوج چرخه با شکل‌پذیری بالا ایجاد نمایند. المان زانویی در زلزله‌های خفیف به صورت خطی طراحی شده و در زلزله‌های شدید، پیش از اینکه سایر اعضای اصلی سازه تسلیم شوند کمانش می‌کند. در زلزله‌های معمولی، انرژی که توسط اعضای زانویی مستهلک می‌گردد باید توانایی حفظ سازه در برابر صدمات جدی را داشته باشد. برای اعضای زانویی دو نوع رفتار قابل پیش‌بینی است. این اعضا را می‌توان به نحوی مورد استفاده قرار داد که ابتدا در برش وارد مرحله‌ی غیرارتجاعی شده و انرژی ورودی به سازه را تلف نمایند و یا اولین مفاصل پلاستیک به صورت خمشی در آنها تشکیل گردد. عامل کنترل‌کننده در تعیین نوع رفتار این اعضا طول آنها می‌باشد. با افزایش طول زانویی رفتار آنها از حالت اعضای که در برش جاری می‌شوند به اعضای که در خمش تسلیم می‌گردند، تبدیل می‌شوند. در پیکربندی اجزای یک قاب، عضو زانویی به گونه‌ای طراحی می‌شود که در زلزله‌های متوسط (تغییر مکان‌های جانبی کم) وارد ناحیه غیرارتجاعی شده و اتلاف انرژی ورودی را انجام دهد. ضوابط مورد استفاده برای طراحی در آئین نامه AISC 360-05 ارائه شده است. طراحی بر اساس ظرفیت تأمین‌کننده هدف جاری شدن فیوزهای زانویی می‌باشد. برای نیل به این هدف و به منظور بهینه‌سازی طراحی، یک برنامه آزمایشگاهی در دستور کار قرار گرفته است. برای انجام مطالعات مذکور نمونه‌ای از عضو زانویی به طول ۴۵ سانتی‌متر از مقاطع استاندارد گرم نورد شده، در دو حالت معمولی و سوراخ شده آماده‌سازی شد. انتخاب مقطع درست به گونه‌ای است که جاری شدن عضو در برش در مقاطع بلندتر نسبت به خمش ارجحیت داشته باشد، این کار موجب استهلاک انرژی بیشتری شده و باعث می‌شود که تغییر شکل‌های بزرگ در مفاصل خمشی عضو در نقاط اتصال ایجاد شده و متعاقب آن باعث رفع مشکلات بیشتر و خطر تخریب اعضای مجاور می‌شود. مطلوبیت عضو زانویی در این است که زودتر جاری شده و سازه اصلی را محافظت نمایند از طرفی شرایط آن باید به گونه‌ای باشد که شکل‌پذیری مناسب آن حفظ شده و بتواند در برابر چرخه‌های متعدد بارگذاری با دامنه بزرگ تاب‌آور باشد.

۵- مشخصات کلی مدل‌سازی و اطلاعات مورد نیاز

در مدل‌سازی انجام شده به بررسی اثر نیروی متناوب بر یکی از عضوهای عمل‌کننده بعنوان فیوز سازه‌ای به نام عضو زانویی پرداخته شد، تا بتوان با استفاده از نتایج آن درک درست و مشخصی از حالت واقعی طرح اعضای زانویی را بدست آورده و در عمل مورد استفاده قرار گیرند. در خصوص اطلاعاتی که برای طراحی مدل مورد نیاز هستند، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

الف- اطلاعات مربوط به عضو زانویی

ب- اطلاعات مربوط به نوع و چگونگی اعمال بار

ج- اطلاعات مربوط به پارامترهای اصلی و اساسی طراحی

د- اطلاعات مربوط به چگونگی بهره‌برداری و جایگزینی پس از تخریب ناشی از بار اعمال شده

به جهت آنکه نتایج بدست آمده از این تحقیق بایستی بر اساس اطلاعات بدست آمده از آزمایش بر روی مدل فیزیکی باشد، طرح آن بسیار دارای اهمیت می‌باشد. در ساخت مدل فیزیکی سعی گردیده تا تأثیر متغیرهایی که به‌طور غیر مستقیم بر روی میزان تغییر مکان تأثیر می‌گذارد و نتایج را از حالت کلی خارج می‌سازند، حذف گردد. لذا در طراحی مدل نکات زیر نیز مورد توجه قرار گرفته است:

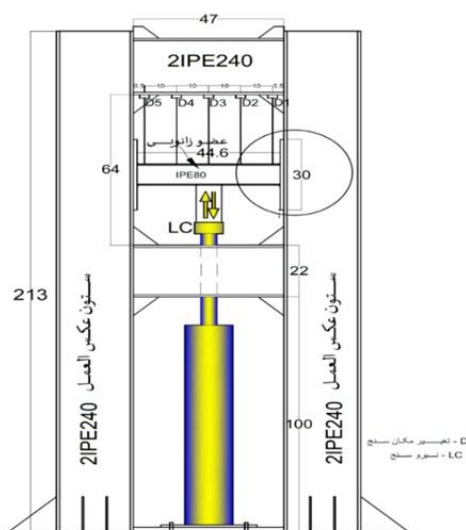
- اگر چه مدل از روی مورد خاصی در طبیعت ساخته نشده است ولی به‌صورتی انتخاب شده است که به کارهای عملی نزدیک باشد. این مورد شامل شکل پروفیل مقطع نمونه انتخابی برای انجام آزمایش و موقعیت و مشخصات نیروی اعمالی به عضو مورد آزمایش می‌باشد.

- مدل بر اساس اعمال نیرو از طریق مهاربند قطری به نمونه مورد آزمایش طراحی گردیده تا حداکثر تغییر مکان در آن قابل اندازه گیری باشد. مهاربند قطری در آزمایش به صورت صلب و به گونه ای لحاظ شده که نیروی اعمال شده توسط آن صرفاً از طریق جک هیدرولیکی به عضو زانویی وارد شود.

۶- مشخصات قاب فولادی مورد استفاده جهت انجام آزمایش ها

بر اساس توافق انجام شده بین دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن و دانشگاه شهید بهشتی قاب فولادی آزمایشگاهی مورد استفاده در آزمایشگاه سازه پردیس فنی و مهندسی دانشگاه شهید بهشتی جهت انجام آزمایش ها مورد استفاده قرار گرفت. بخش های مختلف قاب فولادی مورد استفاده شامل موارد زیر می باشد:

الف- قاب عکس العمل متشکل از ستون های دابل 2IPE240 در طرفین به عنوان ستون های عکس العمل و تیر دابل 2IPE240 در قسمت بالایی قاب و تیر دابل 2IPE220 در قسمت میانی قاب که به کمک سخت کننده های مثلی مطابق شکل ۴ به یکدیگر متصل شده و در کف بر روی یک ورق به ابعاد $1250 \times 500 \times 10$ نصب شده اند. این ورق نیز از زیر توسط یک ورق سخت کننده به ابعاد $800 \times 400 \times 25$ تقویت و از طریق پیچ های مناسب در کف قوی آزمایشگاه مهار و نصب شده است.



شکل ۴: مقطع عرضی قاب عکس العمل فولادی مورد استفاده جهت انجام آزمایش ها

ب- جک هیدرولیکی تلسکوپی با ظرفیت اعمال نیروی فشاری ۶۰ تن و نیروی کششی ۳۰ تن.

ج- تابلوی فرمان الکتریکی (PLC) °، که توسط مدار الکتریکی طراحی شده برای آن، اعمال نیرو بصورت متناوب کنترل شده و بر اساس پروتکل بارگذاری SAC Steel [۱۰] بصورت کششی و فشاری امکان پذیر شده است.

د- صفحات فولادی تکیه گاهی به ابعاد $210 \times 200 \times 12$ که هرکدام به عنوان یک تکیه گاه برای عضو مورد آزمایش به ستون های عکس العمل جوش شده اند.

ه- قطعه صلب نصب شده در جلوی جک هیدرولیکی تلسکوپی جهت انتقال نیروی قطری مهاربند به عضو مورد آزمایش.

و- عضو (نمونه) مورد آزمایش که جهت انجام آزمایش و اعمال بارگذاری به هر دو صفحه تکیه گاهی معرفی شده در بند (د) جوش شده و پس از هر بار آزمایش قابل تعویض با نمونه جدید می باشد.

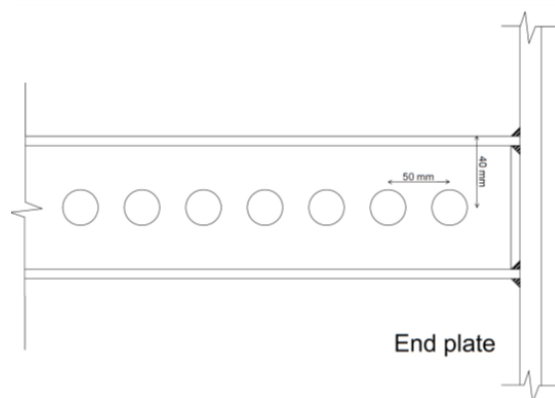
ز- تغییر مکان سنجها که به تعداد ۵ دستگاه و در فواصل مشخص شده بر روی شکل جهت اندازه گیری تغییر مکان با دقت 0.1 میلی-متر در نقاط مختلف عضو زانویی در قاب فولادی نصب شده اند.

ح- نیروسنج که نیروهای فشاری و کششی اعمال شده به عضو مورد آزمایش را ثبت می کند.

ط- سیستم پایش که وظیفه نمایش چگونگی اعمال نیرو بصورت متناوب (سیکلیک) کنترل شده و بر اساس پروتکل بارگذاری متناوب بصورت کششی و فشاری را بر عهده دارد.

۷- انتخاب نمونه های مورد بررسی و انجام آزمایش

نمونه های مورد بررسی شامل عضو زانویی با پروفیل IPE80 در دو حالت معمولی و سوراخ شده می باشند. مشخصات و موقعیت سوراخ های ایجاد شده در جان نمونه در شکل ۵ نشان داده شده است. در این خصوص سوراخ هایی به قطر 20 میلی متر و در فواصل 5 سانتی متری بصورت کاملاً متقارن در جان نمونه ایجاد شد تا حالت تقارن هندسی کامل در نمونه برقرار گردد.



شکل ۵: مشخصات و موقعیت سوراخ های ایجاد شده در جان نمونه

سوراخ نمودن جان عضو زانویی با پروفیل IPE80 همان گونه که در شکل ۶ مشاهده می شود، با دقت و حساسیت زیاد توسط دریل های صنعتی مجهز به ورنیه انجام شد. همان گونه که در این شکل دیده می شود جهت جلوگیری از تمرکز تنش در لبه های سوراخ ها، با نصب سرمته های مخصوص بر روی دریل صنعتی لبه همه سوراخ ها پخ زده شدند.



شکل ۶: پخ زدن لبه سوراخ‌ها به منظور جلوگیری از تمرکز تنش در لبه‌های سوراخ‌ها

از آنجایی که وجود نیروی محوری کششی در عضو زانویی باعث کاهش ظرفیت برشی آن می‌شود، لذا زاویه بین المان زانویی و مهاربند قطری به صورت قائمه در نظر گرفته شد تا مهاربند قطری باعث تولید نیروی محوری در عضو زانویی نشود. برای آزمایش عضوهای زانویی، آنها را بصورت افقی در داخل قاب عکس العمل کار گذاشته و تغییر مکان‌ها توسط جک هیدرولیکی مجهز به تابلو فرمان الکترونیکی (PLC) به صورت رفت و برگشتی بر آنها اعمال گردید. بررسی اثر بارگذاری متناوب حول محور قوی هر دو نمونه در دستور کار قرار گرفت. تصویر مقطع عرضی قاب فولادی آزمایشگاهی مورد استفاده جهت انجام آزمایش‌ها قبل از اعمال بارگذاری بر روی هر دو نمونه معمولی و سوراخ شده در شکل ۷ نشان داده شده‌اند.



ب) نمونه معمولی



الف) نمونه سوراخ شده

شکل ۷: مقطع عرضی قاب فولادی آزمایشگاهی مورد استفاده جهت انجام آزمایش‌ها شامل نمونه‌های مورد بررسی

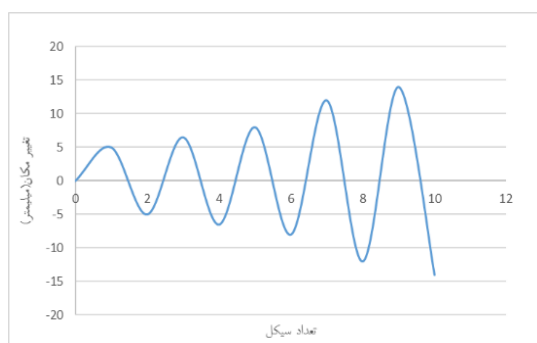
نیرو و جابجایی در محل اعمال نیرو و محل نصب تغییر مکان سنج‌ها اندازه گیری شدند. نیرو توسط نیروسنج که از یک طرف به عضو مورد آزمایش و از طرف دیگر به نوک جک هیدرولیکی متصل شده است، اندازه گیری شد.

برای انجام آزمایش‌ها از بارگذاری متناوب (چرخه ای) استفاده شد به این صورت که تغییر مکانهای مثبت و منفی با نرخ آرام توسط جک به نمونه‌ها اعمال شدند، در این حالت مقادیر تغییر مکانها به آرامی و به صورتی پایدار افزایش داده شدند تا به مقادیر تغییر مکانهای مورد نظر برای شکل پذیری مناسب رسیدند.

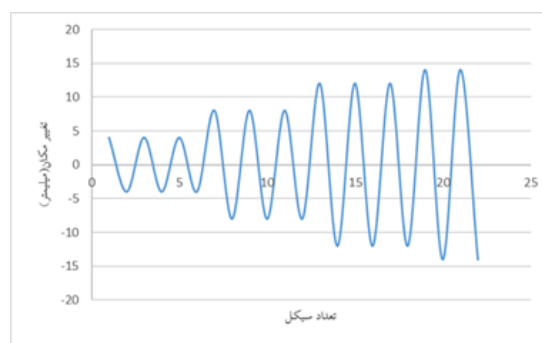
با استفاده از تغییر مکان سنج‌ها علاوه بر وسط بال و جان نمونه تغییر مکان‌ها در فاصله $1/5$ برابر عمق مقطع از تکیه‌گاه نیز اندازه‌گیری شدند. بنابراین در آزمایش‌های متعدد یک روش تقریبی مورد استفاده قرار گرفت به گونه‌ای که در آن عضو زانویی تحت بارگذاری SAC قرار گرفته و رفتار سازه تحت زلزله در آن شبیه‌سازی گردید.

۸- بررسی نتایج مدل آزمایشگاهی

برای بررسی اثر بار متناوب حول محور قوی عضو زانویی با پروفیل IPE80 در دو حالت معمولی و سوراخ شده پس از انجام کنترل‌های لازم و اطمینان از نصب درست تجهیزات اندازه‌گیری شامل نیروسنج و تغییر مکان-سنج‌ها، بارگذاری متناوب بر اساس پیشنهاد AISC Seismic provisions 1997 و بر اساس پروتکل SAC مطابق شکل ۸ با تکرار سه گام در هر سیکل برای نمونه سوراخ شده و با تکرار دو گام در هر سیکل برای نمونه معمولی اعمال و نتایج آزمایش استخراج گردید.



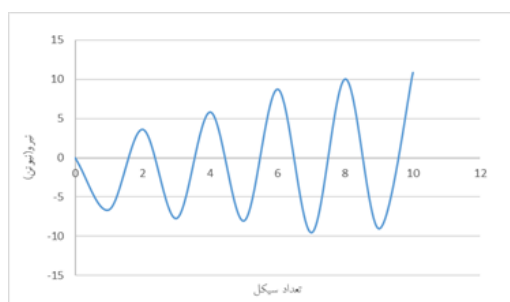
ب) نمونه معمولی



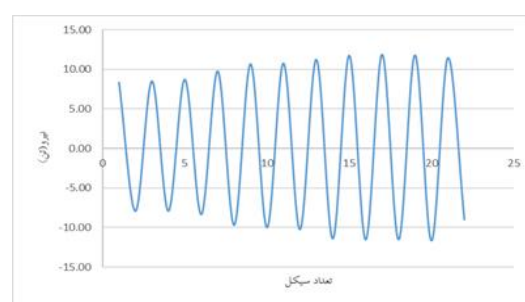
الف) نمونه سوراخ شده

شکل ۸: چرخه‌های بارگذاری شده بر نمونه‌ها بر اساس الگوی پیشنهادی SAC

در شکل ۹ مقادیر نیروی برشی ثبت شده در گام‌های زمانی مربوط به اعمال تغییر مکان برای هر دو نمونه سوراخ شده و معمولی نشان داده شده است.



ب) نمونه معمولی



الف) نمونه سوراخ شده

شکل ۹: نیروی برشی ثبت شده توسط نیروسنج در هر دو نمونه سوراخ شده و معمولی

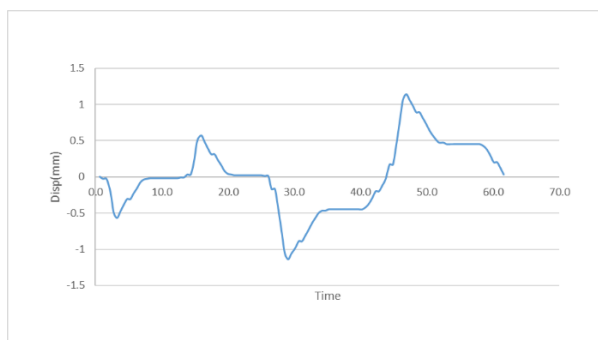
تغییر شکل‌های اولیه ایجاد شده در نمونه‌های مورد بررسی در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها و در فاصله بین محل اتصال عضو قطری به زانویی و تکیه‌گاه در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.



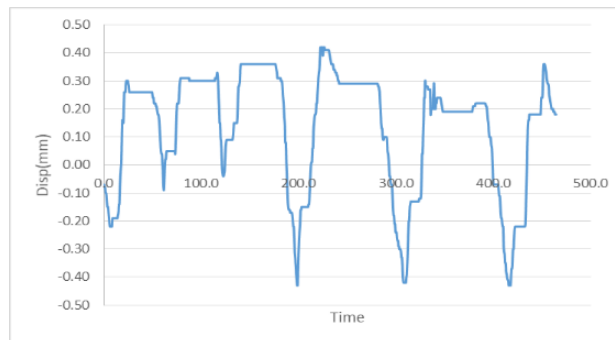
شکل ۱۰: شروع تغییر شکل در جان عضو زانویی و در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها در هر دو نمونه



شکل ۱۱: توسعه تغییر شکل و تخریب در جان عضو زانویی در فاصله بین محل اتصال عضو قطری به زانویی و تکیه‌گاه در هر دو نمونه انجام هر آزمایش تا زمان شروع گسیختگی و ایجاد شکاف در لبه سوراخ‌های جان عضو زانویی ادامه یافت. میزان تغییر مکان ایجاد شده در جان عضو زانویی و تغییرات آن برای هر کدام از نمونه‌ها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در بررسی عضو زانویی بعد از انجام آزمایش مشخص شد که تحت اثر نیروهای کششی و فشاری تسلیم موضعی در جان عضو زانویی به وجود آمد و تغییر شکل‌های ماندگار و تخریب در آن رخ داد. لذا بخشی از جان مقطع از طریق جاری شدن در استهلاک انرژی مشارکت نموده است.



ب) نمونه معمولی

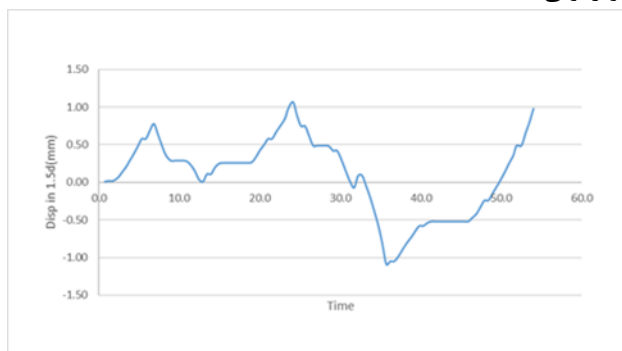


الف) نمونه سوراخ شده

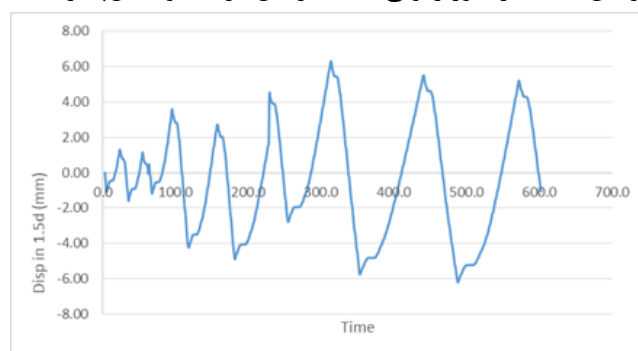
شکل ۱۲: تغییر مکان‌های ایجاد شده در جان عضو زانویی تحت اثر بارهای متناوب در هر دو نمونه

کمانش موضعی اندکی که در جان عضو زانویی رخ داد؛ ناشی از عدم قراردادن سخت کننده جان بدلیل محدودیت‌های آزمایشگاهی ناشی از افزایش ظرفیت باربری عضو مورد آزمایش بود. همچنین تغییر مکان عضو زانویی در فاصله ۱/۵ برابر عمق مقطع از محل اتصال تکیه‌گاهی برای هر دو نمونه استخراج و نتایج حاصل از آنها در شکل ۱۳ نشان داده شده است. نتایج بارگذاری متناوب نشان داد که مهاربند زانویی

سوراخ شده توانست تا حدود حداکثر ۷۵٪ تغییر شکل‌های عضو زانویی معمولی را تحمل نماید. همچنین سوراخ کردن جان عضو زانویی با افزایش تقاضا در فیوز زانویی باعث افزایش دررفت و شکل پذیری بیشتر عضو زانویی شد.



ب) نمونه معمولی



الف) نمونه سوراخ شده

شکل ۱۳: تغییر مکان عضو زانویی در فاصله ۱/۵ برابر عمق مقطع از محل اتصال تکیه گاهی

در بررسی ظاهری عضو زانویی بعد از انجام آزمایش همان گونه که در شکل ۱۴ ملاحظه می‌شود؛ تحت اثر نیروهای کششی و فشاری تسلیم موضعی در جان عضو زانویی به وجود آمد و تغییر شکل‌های ماندگار در آن ایجاد شد. در پایان مدت آزمایش، پس از تجربه یک دوره تغییر مکان بالا تخریب عضو زانویی حادث شده و تاب‌آوری خود را از دست داد.



ب) نمونه معمولی



الف) نمونه سوراخ شده

شکل ۱۴: تخریب عضو زانویی تحت اثر بارگذاری متناوب

در انجام آزمایش‌ها اعمال نیروها به صورت کششی و فشاری توسط جک هیدرولیکی انجام شد. اثر نیروی عکس‌العمل و تغییر شکل‌های ایجاد شده در نزدیکی تکیه‌گاه در پایان آزمایش در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



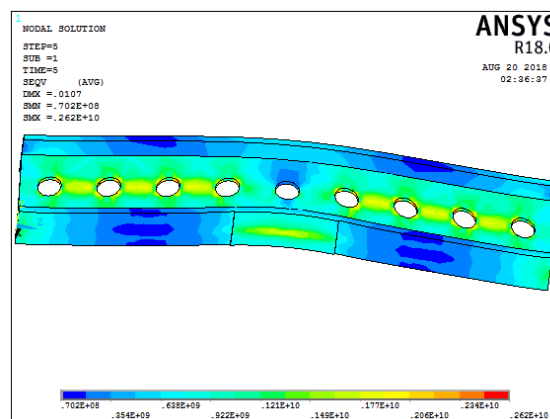
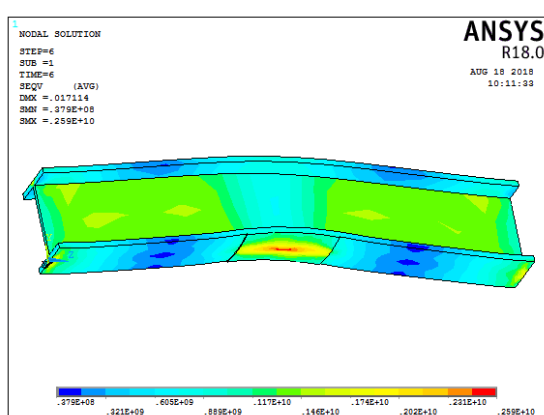
الف) نمونه سوراخ شده

شکل ۱۵: تغییر شکل‌های ایجاد شده در نزدیکی تکیه‌گاه تحت اثر بارگذاری متناوب در انتهای آزمایش

ب) نمونه معمولی

۹- مدل عددی

نتایج بدست از انجام آزمایش‌ها با یک مدل عددی شبیه‌سازی شده توسط نرم افزار ANSYS 18 مورد مقایسه، ارزیابی و راستی آزمایی قرار گرفت. برای بررسی عددی اثر بار متناوب بر عضو زانویی دو مدل تحلیلی که مشخصات هندسی آنها مشابه مدل آزمایشگاهی بود؛ توسط نرم‌افزار ایجاد گردید. برای مدل‌سازی عددی در این تحقیق از معیار گسیختگی فون میس^۶ استفاده شد. این معیار برای فولاد در حالت بارگذاری متناوب انتخاب مناسبی است. المان انتخابی از نوع المان سه بعدی و ۲۰ گره‌ای Solid 186 انتخاب شد و شرایط تکیه‌گاهی مشابه شرایط آزمایش تأمین گردید. نتایج تحلیل شامل توزیع تنش‌های فون میس و منحنی‌های لرزه‌ای (هیستریزیس) بود. مطابق شکل ۱۶ نمای تنش‌های فون میس برای مدل‌های عددی بدست آمد.

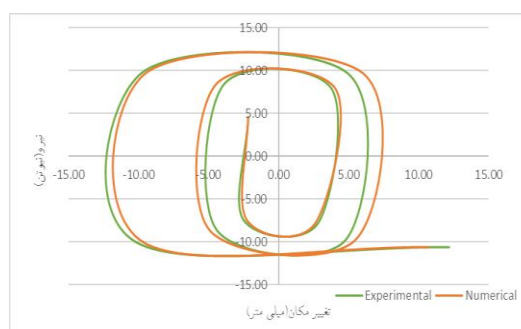
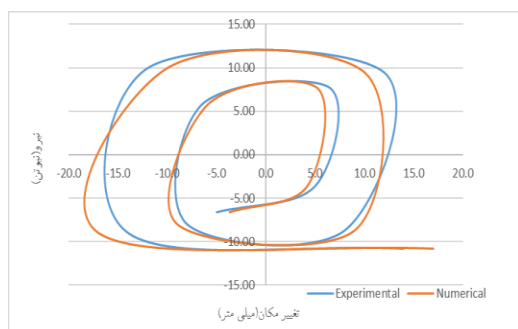


ب) نمونه معمولی

الف) نمونه سوراخ شده

شکل ۱۶: توزیع تنش‌های فون میس برای نمونه‌های تحلیلی عضو زانویی معمولی و سوراخ شده در گام‌های ۶ و ۵ بارگذاری متناوب

جهت مقایسه و ارزیابی نتایج آزمایش‌ها، منحنی‌های لرزه‌ای^۷ (هیستریزیس) منتج از مدل‌سازی عددی و مدل‌سازی آزمایشگاهی در شکل ۱۷ برای هر دو نمونه ترسیم گردیدند. منحنی‌های ترسیم شده، به خوبی تطابق مناسب بین نتایج مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و عددی را نشان دادند.



ب) نمونه معمولی

الف) نمونه سوراخ شده

شکل ۱۷: مقایسه منحنی لرزه‌ای حاصل از نمونه‌های تحلیلی و آزمایشگاهی عضو زانویی معمولی و سوراخ شده

6 Von-Misses
7 Hysteresis loop

۱۰- نتیجه گیری

- سوراخ نمودن اعضای زانویی با تسریع در جاری شدن آن در یک بارگذاری متناوب مثل زلزله حائز اهمیت می باشد؛ اما نتایج بدست آمده از آزمایشها نشان داده که این کار با تخریب بیشتر و پیش از موعد عضو موجب غیر ایمن شدن و کاهش تاب آوری آن می شود.
- نتایج بارگذاری متناوب نشان می دهد که مهاربند زانویی سوراخ شده می تواند تا حدود حداکثر ۷۵٪ تغییر شکل های عضو زانویی معمولی را تحمل نماید.
- سوراخ کردن جان عضو زانویی با افزایش تقاضا در فیوز زانویی باعث افزایش دررفت و شکل پذیری بیشتر عضو زانویی می شود.
- اعمال بار متناوب بر نمونه های عضو زانویی در مدل سازی آزمایشگاهی به خوبی توانسته منحنی های لرزهای (هیستریزیس) هماهنگ و پایداری را ایجاد کند که بیانگر عملکرد مناسب عضو زانویی سوراخ شده در استهلاک انرژی می باشد.
- بررسی نمودارها نشان می دهد که بخش زیادی از جان مقطع از طریق جاری شدن در استهلاک انرژی مشارکت می نماید.
- از اتصالات مناسبی به منظور جوش دادن مناسب عضو زانویی به صفحه انتهایی در تمام آزمایشها استفاده می شود تا به راحتی بتوانیم اعضای زانویی تخریب شده را تعویض نماییم.
- آزمایشهای آزمایشگاهی بزرگ مقیاس، یک نقش کلیدی را در خصوص کارهای تکمیلی آتی مربوط به مهاربندهای زانویی ایفا می کنند.

سپاسگزاری

- نویسندگان این مقاله از همکاری و همفکری مسئولین و کارکنان آزمایشگاه سازه پردیس فنی و مهندسی دانشگاه شهید بهشتی و دانشکده مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن کمال سپاسگزاری را دارند.

مراجع

- [1] Konstantinos D. T., Christopher P., and Chun Kit Lau. (2017). Elliptically-based Beam Web Openings Under Monotonic and Cyclic Loading. *International Journal of Steel Structures*, Vol.17(2), pp. 677-694.
- [2] Okazaki, T. Engelhardt, M.D. (2007). "Cyclic loading behavior of EBF links constructed of ASTM A992 steel", Elsevier, *J. Constr. Steel Res.*, Vol. 63 pp. 751 –765.
- [3] Atashzaban A, Hajirasouliha I, Ahmady Jazany R, Izadinia M. (2015). Optimum drilled flange moment resisting connections for seismic regions. *J Constr Steel Res*, Vol. 112, pp. 325–338. DOI: jcsr.2015.05.013
- [4] Rahgozar N., Abdolreza S. Moghadam and Armin Aziminejad. (2016). Quantification of seismic performance factors for self-centering controlled rocking special concentrically braced frame. *Struct. Design Tall Spec. Build.* Published online in Wiley OnlineLibrary (wileyonlinelibrary.com/journal/tal). DOI: 10.1002/tal.1279

- [5] Balendra, T. Lim, E.L. and Lee, S.L. (1994). "Ductile knee braced frames with shear yielding knee for seismic resistant structures", Butterworth-Heinemann, *J. of Structural. Eng.*, vol. 16, Number 4, pp. 263-269.
- [6] Balendra, T. Fellow, ASCE, Lim, E.L. and Liaw. C.Y. (1997). "Large-Scale Seismic Testing of knee-braced-frames" *J. of Structural. Eng.*, vol. 123, pp. 11-19.
- [7] Williams, M. S. Blakeborough, A. Clément, D. and Bourahla, N. (2002). "Seismic behavior of knee braced frames", Williams et al., *Structures & Buildings*, vol. 152, Issue 2, pp. 147 –155
- [8] Jinko Kim, Youngill Seo, (2003). "Seismic design of steel structures with buckling-restrained knee braces", *J. of Constr. Steel Res.* vol. 59, pp. 1477 –1497.
- [9] Nobahar, E. Farahi, M. Mofid, M. (2016) "Quantification of seismic performance factors of the buildings consisting of disposable knee bracing frames", Elsevier, *Journal of Constructional Steel Research* vol. 124 pp.132–141
- [10] SAC (1997). "Protocol for fabrication, inspection, testing and documentation of beam-column connection test and other experimental specimens." SAC Rep. SAC/BD-97/02, SAC Joint Venture, Sacramento, Calif.