

نقش قطعات زانویی در بهبود عملکرد قاب فولادی مهاربندی شده قطری و شورن در برابر بار جانبی

سید مهدی زهرائی^{۱*}؛ سعید بهرام مسجدباری^۲

چکیده

قاب‌های مهاربندی شده به عنوان سیستم باربر جانبی معمول در برابر زلزله شناخته شده‌اند. اگر در یک سیستم مهاربندی، طول محدودی از عضو فولادی دارای رفتار غیرارتجاعی شکل پذیر باشد، می‌توان رفتار لرزه‌ای کنترل شده‌ای را برای سازه فراهم نمود. یکی از سیستم‌هایی که این رفتار را ایجاد می‌کند، قاب‌های با مهاربندی زانویی است. در این مقاله با مدلسازی قاب‌های مهاربندی یک طبقه (قطری و شورن) در نرم‌افزار ANSYS، رفتار این سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از معیارهای سطح منحنی هیستریزیس و ضریب شکل‌پذیری، عملکرد قاب‌های مهاربندی زانویی قطری و شورن با یکدیگر مقایسه شده‌اند که مشخص گردید قاب با مهاربندی زانویی شورن با داشتن اعضای زانویی بیشتر، ظرفیت استهلاک انرژی بالاتری دارد. بر اساس نتایج این تحقیق، در دو قاب مشابه با داشتن ارتفاع و دهانه قاب و نیز مقاطع یکسان تیر و ستون، قاب CKBF1 دارای حداکثر تغییر مکان به میزان ۲۵ میلی‌متر بوده در حالیکه این مقدار برای قاب DKBF2 به ۱۵ میلی‌متر کاهش یافته است. همچنین ضریب شکل‌پذیری در نمونه CKBF1 نسبت به نمونه DKBF2 به مقدار ۶۰ درصد افزایش یافته است. مقایسه توزیع تنش فون میسز و تنش برشی المان زانویی نشان می‌دهد که هر چه قاب مورد بررسی از نظر هندسی متقارن‌تر باشد، استهلاک انرژی در عضو زانویی بهینه‌تر و با بهره‌گیری از ظرفیت بیشینه مقطع صورت می‌گیرد.

کلمات کلیدی: مهاربندی قطری، مهاربند شورن، المان زانویی، منحنی هیستریزیس، توزیع تنش، شکل‌پذیری.

Impact of Using Knee Elements to Improve Cyclic Performance of Chevron & Diagonal Braced Steel Frames

Seyed Mehdi Zahrai, Saeed Bahram Masjedbari

ABSTRACT

Braced frames have been known as frequently used earthquake resistant systems. If a limited length of a member in such a bracing system can undergo ductile behavior, the structure would sustain in a reliable performance, dissipating a large amount of seismic energy during earthquake. Knee Braced Frames, KBFs, are among the ductile systems having such mechanisms. In this paper, single-story single-bay steel Diagonal and Chevron Knee Braced Frames (DKBF & CKBF) with different configurations have been modeled using ANSYS software and their lateral behavior have been studied and compared. Comparing the hysteretic curves and ductility factors, better performance of CKBF compared with DKBF has been found due to its more knee elements and thus having higher damping. In two similar frame configurations, CKBF1 reaches to 25 mm displacement while DKBF2 displacement limits to 15 mm, such that following the same loading protocol, ductility factor of CKBF1 is 60% more than that of DKBF2. Comparing VonMises and shear stress contours for knee elements, shows the fact that the more symmetric the KBF, the more efficient the knee element in dissipating energy leading to using the whole section capacity.

KEYWORDS: Diagonal Bracing, Chevron Bracing, Knee element, Hysteretic curve, Stress Contour, Ductility

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۵/۲۲ تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۹/۱۰/۱۸

^{۱*} نویسنده مسئول و دانشیار قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌های عمرانی، دانشکده عمران، پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران
mzahrai@ut.ac.ir

^۲ کارشناس ارشد زلزله، پژوهشکده مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

تعویض این عضو می توان دوباره از سیستم استفاده نمود.

نکته مهم طراحی این سیستم، مشخص شدن نوع شکست (برشی یا خمشی) برای المان زانویی است. از معیارهای مهمی که حالت رفتاری المان زانویی را مشخص می نماید طول عضو زانویی است که با توجه به کارهای قبلی بالندرا [۶ و ۷] برای وقوع تسلیم خمشی، طول کل عضو زانویی از $4M_p/V_p$ بزرگتر در نظر گرفته می شود و برای وقوع تسلیم برشی طول عضو زانویی باید از $3/2M_p/V_p$ کوچکتر باشد که V_p و M_p به ترتیب ظرفیت برشی پلاستیک و ممان پلاستیک عضو زانویی هستند [۲ و ۳]. همچنین با توجه به نتایج کارهای زهرائی [۱ و ۲]، لطف-اللهی و مفید [۸ و ۹] و زهرائی و جلالی [۳] نیز می توان دریافت که حالت تسلیم برشی عملکرد مناسبتری نسبت به تسلیم خمشی دارد. در واقع با تسلیم زودتر فولاد در برش و پایداری بیشتر چرخه های هیستریزس برشی در شکل پذیری بالا، اتلاف انرژی افزایش می یابد.

از این رو در این مقاله برای مدلسازی قاب های با مهاربندی زانویی قطری و شورن، فرض شده است که حالت تسلیم عضو زانویی، برشی باشد و همچنین طول المان زانویی از مقدار توصیه شده آیین نامه ای بیشتر نشود. برای آشنایی بیشتر با روش طراحی عضو زانویی و ضوابط آئین نامه ای، به مراجع [۱ و ۲] رجوع شود.

به دلیل محدودیت های کمتر مهاربندی شورن در معماری و متمرکز بودن کارهای تحقیقاتی و آزمایشگاهی بر روی نمونه مهاربندی زانویی قطری، در این مقاله سعی شده است تا عملکرد مهاربندی زانویی در حالت شورن با حالت قطری مشابه در یک قاب فولادی یک طبقه یک دهانه مورد بررسی و مقایسه قرار گیرد.

۲- روش طراحی و ضوابط آیین نامه ای

قاب یک طبقه طوری بارگذاری جانبی می شود که نیروی برشی قسمت جاری شونده عضو زانویی به مقدار متناظر تسلیم برسد. اگر عضو زانویی بخوبی طراحی شود، ضمن استهلاک انرژی زلزله، شکل پذیری بالایی از خود نشان می دهد و سایر عناصر سازه نیز الاستیک باقی می ماندند. طول تیر پیوند یکی از عوامل مهم در طراحی این سیستم مهاربندی است. عملکرد بهتر تیرهای پیوند کوتاه نسبت به تیرهای پیوند بلند با آزمایش های متعدد به اثبات رسیده است [۱ و ۲].

چون با جاری شدن برشی جان اعضای زانویی، انرژی از طریق این قطعات مستهلک می شود و سایر اعضای سازه ای، الاستیک باقی می ماندند، این قطعات باید از فولاد نرم

مقاومت، سختی و شکل پذیری (توانایی تغییر شکل خمیری اعضای سازه برای اتلاف انرژی وارده) عوامل مهم در تعیین پاسخ لرزه ای سازه در برابر زلزله هستند. حالت ایده آل یک سازه، داشتن سه عامل فوق به طور همزمان و بهینه است. سیستم های مهاربندی همگرا^۱ که از سالها پیش متداول بوده اند نسبت به قاب مقاوم خمشی معادل، سختی بالاتر اما شکل پذیری پایین تری (به علت کماتش احتمالی بادبندها) دارند که درستی این مطلب در جابجایی بیش تر قاب های خمشی نسبت به قاب های مهاربندی است و به همین دلیل در زلزله های شدید عملکرد مناسبی ندارند. برای افزایش میزان شکل پذیری سازه های مهاربندی شده، پوپوف در سال ۱۹۷۸ سیستم مهاربندی واگرا^۲ را پیشنهاد نمود که به دلیل عملکرد مناسب، مورد استقبال قرار گرفت. اما این نوع مهاربند نیز نواقصی دارد از جمله اینکه عضو تیر پیوند^۳ که عامل اصلی جذب انرژی است، بخشی از تیر اصلی است و پس از زلزله، تیر اصلی باید تعمیر یا تعویض و سقف ترمیم گردد، بنابراین محققان در جستجوی روشی بوده اند که علاوه بر بالابردن شکل پذیری قاب های مهاربندی شده، این نقیص را نیز برطرف نمایند که به عنوان یکی از این روشها، سیستم مهاربند زانویی^۴ پیشنهاد گردید.

پیشنهاد اولیه مهاربند زانویی در سال ۱۹۸۶ به وسیله آچوا [۵] ارائه شد و از سال ۱۹۹۰ محققان دیگری مانند بالندرا [۶ و ۷]، تحقیقات و آزمایشاتی بر روی این سیستم انجام داده اند و قابلیت بالای شکل پذیری آن در استهلاک انرژی زلزله به اثبات رسیده است. همچنین در ایران نیز تحقیقات و آزمایش هایی بر روی این سیستم انجام شده است که از آن جمله می توان به تحقیقات آزمایشگاهی زهرائی [۱ و ۲] و همچنین کارهای تحلیلی- عددی مفید و لطف اللهی [۸ و ۹] و زهرائی و جلالی [۳] بر روی نمونه مهاربندی زانویی قطری اشاره نمود.

در این سیستم (به طور معمول به صورت همگرا) مهاربندها با عضوی واسطه معروف به عضو زانویی به تیر ستون متصل می شوند. ایده کلی آن است که طراحی به گونه ای انجام پذیرد تا در زلزله های شدید فقط عضو زانویی تسلیم شود و بقیه اعضا در حالت ارتجاعی باقی بمانند و یا تعداد مفاصل پلاستیک در تیرها و ستون ها و همچنین کماتش بادبندها کاهش قابل توجهی یابد. از مزایای این سیستم آن است که پس از وقوع زلزله های شدید و تغییر شکل عضو زانویی، فقط با

ساخته شوند. طبق AISC2002 حداکثر تنش تسلیم مشخصه فولاد تیرهای رابط نباید از 50 ksi یا 3500 کیلوگرم بر سانتیمتر مربع تجاوز کند [۱۰].

زاویه تغییرشکل برشی تیر پیوند یکی دیگر از عوامل مهم در طراحی سیستم زانوئی است. طبق AISC2002 برای تیرهای پیوند برشی این مقدار به $0/08$ و برای تیرهای پیوند خمشی به $0/02$ رادین محدود شده است [۱۰]. برای تیرهای پیوند برشی خمشی باید از درونیایی استفاده نمود. طبق IBC2000 این مقادیر به ترتیب به $0/09$ و $0/03$ رادین محدود شده است [۱۱].

از آنجاکه طراحی باید به گونه‌ای انجام شود که جان عضو زانوئی جاری شود و انرژی زلزله را مستهلک نماید و سایر اعضای سازه مثل تیر، ستون و مهاربند پس از زلزله، الاستیک باقی بمانند، هر مهاربند باید دارای مقاومت فشاری معادل با $1/5$ برابر نیروی محوری متناظر با مقاومت کنترل‌کننده عضو زانوئی باشد. مقاومت کنترل‌کننده تیر پیوند برابر با مقاومت برشی، یا مقاومت خمشی تقلیل‌یافته، هر کدام که منجر به نیروی کمتر در مهاربند شود، در نظر گرفته می‌شود. سخت‌کننده‌هایی با اتصال سراسری به جان باید در محل برخورد مهاربند به تیر در دو طرف جان، در نظر گرفته شود. این سخت‌کننده‌ها منتقل کننده نیروهای برشی و نیز مقید کننده جان تیر در برابر کمانش هستند. سخت‌کننده‌ها باید دارای حداقل عرض کلی برابر با $b_f - 2t_w$ باشند و ضخامت آن‌ها نباید از t_w یا $0/75$ میلی‌متر، هر کدام که بزرگتر باشد، کمتر شود که b_f عرض بال و t_w ضخامت جان تیر پیوند است [۱۰ و ۱۱].

همچنین برای جلوگیری از کمانش جان، در تیر پیوند باید سخت‌کننده‌های میانی جان با شرایط زیر طراحی شود:

برای تیرهای پیوند برشی، فاصله بین سخت‌کننده‌ها نباید از $30t_w - d/5$ برای زاویه تغییرشکل برشی تیر پیوند معادل با $0/08$ و از $52t_w - d/5$ برای زاویه تغییرشکل برشی تیر پیوند معادل با $0/02$ تجاوز کند. برای زوایای تغییرشکل برشی تیر پیوند بین $0/02$ و $0/08$ باید از درونیایی خطی استفاده نمود. در این روابط d ارتفاع مقطع تیر پیوند است.

سخت‌کننده‌های میانی باید به طور سراسری به جان متصل شوند. در تیرهای رابط به عمق کمتر از 635 میلی‌متر، سخت‌کننده فقط در یک طرف جان لازم می‌باشد. ضخامت سخت‌کننده‌هایی که در یک طرف جان قرار دارند، نباید کمتر از t_w یا 10 میلی‌متر، هر کدام که بزرگتر است، باشد و عرض آن نباید کمتر از $b_f/2 - t_w$ در نظر گرفته شود. در تیرهای رابط به عمق بزرگتر یا مساوی 635 میلی‌متر، سخت‌کننده‌های میانی مشابه در دو

طرف جان لازم است [۱۰].

۳- فرضیات مدل‌سازی در نرم افزار ANSYS

وجود رابطه غیرخطی تنش- کرنش برای مصالح از جمله فولاد سبب می‌شود که سختی سازه در طی فرایند بارگذاری تغییر کند و موجب بروز رفتار غیرخطی در سازه می‌شود که می‌تواند منجر به بوجود آمدن تغییرشکلهای بزرگ گردد در نتیجه علاوه بر تغییر سختی المان، در سختی کل سازه نیز تغییراتی ایجاد می‌شود. از آنجا که انتظار داریم در این قبیل سازه‌ها به طور معمول تمرکز رفتار غیر خطی در نواحی تیر پیوند برشی (المان زانوئی) رخ دهد و فلسفه طراحی لرزه‌ای آنها نیز بر همین اصل استوار است بنابراین تصمیم گرفته شد تا قسمت زانوئی و نواحی اطراف آن که احتمال وجود رفتار غیرخطی در آنها است با جزء صفحه‌ای^۵ مدل شوند و نواحی دیگر با جزء میله‌ای تیر مانند^۶ مدل‌سازی شوند. دو نکته مهم در این قسمت از مدل‌سازی مطرح می‌شود.

اول آنکه برخلاف نرم‌افزارهای معمول تحلیل سازه مانند SAP و ETABS که مفهوم اتصال گیردار و مفصلی برای برنامه تعریف شده در نرم افزار ANSYS چنین حالتی وجود ندارد. بنابراین باید اتصال گیردار و مفصلی در مدل‌سازی در نظر گرفته شود. در نتیجه، چون در محل اتصال بابدند به جزء زانوئی باید جزء صفحه‌ای زانوئی به جزء میله‌ای برای عضو بابدند متصل شود، گره‌های مشترک در این محدوده به یکدیگر متصل می‌شوند و با توجه به آنکه اجزای سازه‌ای دارای جابجایی و دوران در شش‌جهت هستند برای ایجاد اتصال مفصلی فقط دوران حول محور عمود بر صفحه، آزاد و بقیه جابجایی‌ها و دوران‌ها بسته می‌شوند [۴].

دومین مورد نحوه اتصال اجزای میله‌ای به اجزای صفحه‌ای است که اتصال این اجزاء به یکدیگر باید به گونه‌ای باشد که با رعایت پیوستگی اجزاء، ایجاد تمرکز تنش نکند زیرا المان‌های میله‌ای فقط به یک گره وصل می‌شوند. به این منظور در انتهای قسمت مش بندی شده توسط اجزای صفحه‌ای صفحات انتهایی صلب قرار داده شده و سپس اجزای میله‌ای به وسط این صفحات صلب متصل گردید.

اجزای میله‌ای و صفحه‌ای مورد استفاده در این مدل‌سازی‌ها به شرح زیر است:

جزء صفحه‌ای (SHELL 43): این جزء برای مدل کردن سازه‌های پوسته‌ای نه چندان ضخیم مناسب است و در هر گره شش درجه آزادی دارد، سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی. همچنین این جزء قابلیت در نظر گرفتن

جدول ۱: مشخصات نمونه ها برای مطالعه عددی

نمونه	ارتفاع (متر)	دهانه (متر)	ستون	تیر	بادبند	عضو زانوئی
DKBF1	۳	۳	IPB 140	IPE 180	2UNP 100	IPE 140
DKBF2	۳	۵	IPB 140	IPE 200	2UNP 140	IPE 140
DKBF1	۳	۵	IPB 140	IPE 180	2UNP 100	IPE 140
DKBF2	۳	۶	IPB 140	IPE 180	2UNP 100	IPE 140

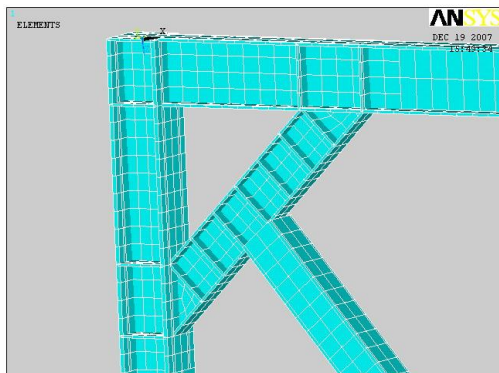
نکاتی که لازم است در مدل سازی رعایت شوند عبارتند از:
 ۱. راستای عضو بادبندی از محل گره اتصال تیر و ستون بگذرد.

۲. عضو بادبندی در صورت امکان به وسط المان زانوئی برخورد کند.

۳. طول عضو زانوئی در همه نمونه ها (از بر تحتانی تیر تا بر داخلی ستون) ۸۰۰ میلی متر باشد.

۴. نکته مهم تعبیه سخت کننده در جان عضو زانوئی در فواصل ۲۰۰ میلی متری و در محل اتصال بادبند است که به طور نمونه در شکل (۲) قابل دیده می شود. تعبیه سخت کننده در جان در واقع دو مزیت اصلی دارد، اول آنکه مشکل کماتش جان المان زانوئی را تا حد زیادی بر طرف می نماید و دوم آنکه روی افزایش ظرفیت باربری مهاربندی زانوئی و همچنین میزان ظرفیت تغییرشکل های نهایی برای تامین شکل پذیری لازم اثر مثبت می گذارد.

نمونه DKBF1 حالتی ایده آل و متقارن از مهاربندی قطری است زیرا مهاربند در میانه المان زانوئی برخورد می نماید و محل اتصال زانوئی به تیر و ستون نیز دارای فواصل یک اندازه از محل اتصال تیر به ستون (از محور ستون تا محل برخورد تیر و زانوئی ۷۰۰ میلی متر و همین طور از محور تیر تا محور محل برخورد ستون و زانوئی ۷۰۰ میلی متر) است.



شکل (۲): گوشه قاب متشکل از اجزای صفحه ای

پلاستیسیته، نرمش، سخت شدگی تنش، تغییرشکل های بزرگ و کرنش های بزرگ را دارد [۱۲].

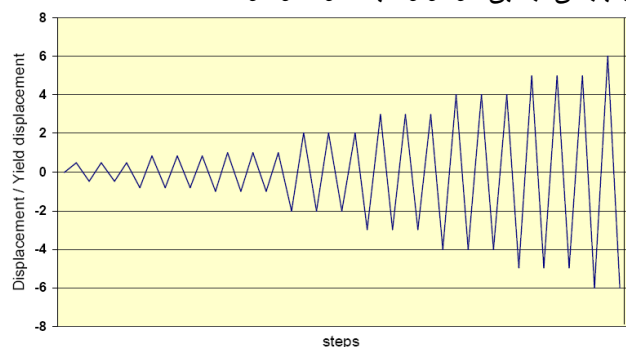
جزء میله ای (BEAM24): جزء تک محوری است که توانایی تحمل فشار، کشش، خمش و پیچش را دارد. در هر گره سه درجه آزادی دارد: دو درجه آزادی انتقالی و یک درجه آزادی دورانی [۱۲].

برای کل مدل، مصالح غیرخطی هستند، هر چند که وقوع تسلیم در نواحی دور از عضو زانوئی ممکن نیست. مدل پلاستیسیته بر اساس معیار فون میسز و قانون سیلان مربوطه است. فرضیات ایده آل سازی مشخصات مصالح نیز عبارتند از:

$$F_u = 3700 \text{ kg/cm}^2; F_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$$

$$E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2; \nu = 0.3$$

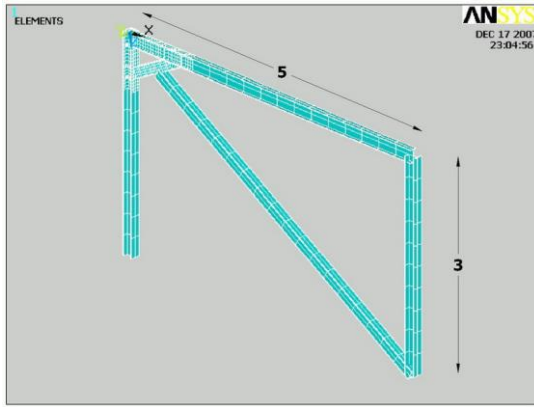
که F_u و F_y به ترتیب تنش های تسلیم و نهایی، E مدول الاستیسیته و ν ضریب پواسن فولاد است. برای بارگذاری نمونه ها از بارگذاری چرخه ای مطابق با پیشنهاد ضوابط لرزه ای AISC (1997) [۱۳] استفاده شده است که به صورت جابجائی جانبی در تراز طبقه در نظر گرفته شده است.



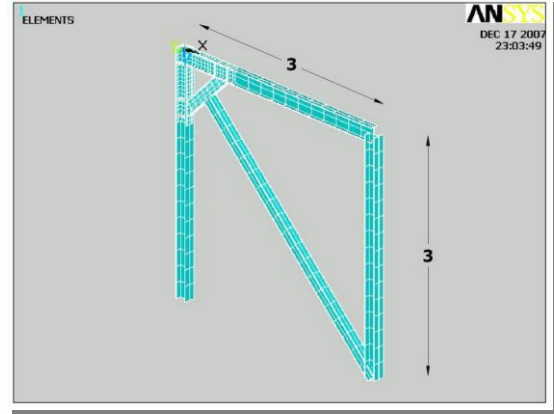
شکل (۱): بارگذاری چرخه ای مطابق با پیشنهاد ضوابط لرزه ای AISC (1997)

ع- مدل سازی قاب های یک طبقه

به طور معمول طراحی قاب یک طبقه یک دهانه بر اساس بارهای واقعی مقاطع کوچکی را برای اعضا سازه ای نتیجه می دهد بنابراین تصمیم گرفته شد که با پیش فرض نمودن مشخصات مهاربندی زانوئی، سایر اعضا متناسب با ظرفیت برشی تیر پیوند طراحی شوند در نتیجه یک قاب یک طبقه در نرم افزار ANSYS تحت بارگذاری جانبی قرار داده شد که نیروی برشی قسمت جاری شونده عضو زانوئی به مقدار متناظر تسلیم برسد. سپس طراحی مهاربند، تیر و ستون ها طوری که رفتاری الاستیک از خود نشان دهند دنبال شده است، که نتایج طراحی در جدول ۱ آورده شده است:

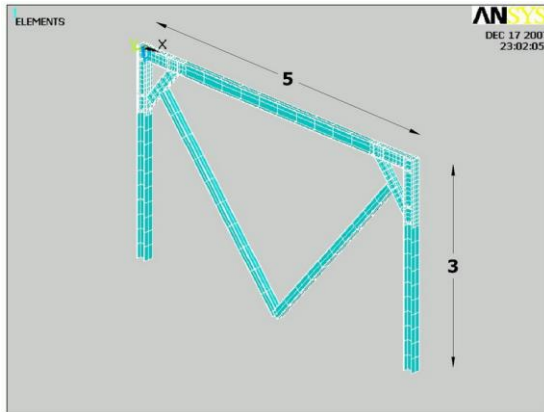


شکل (۴): نمای کلی قاب DKBF2



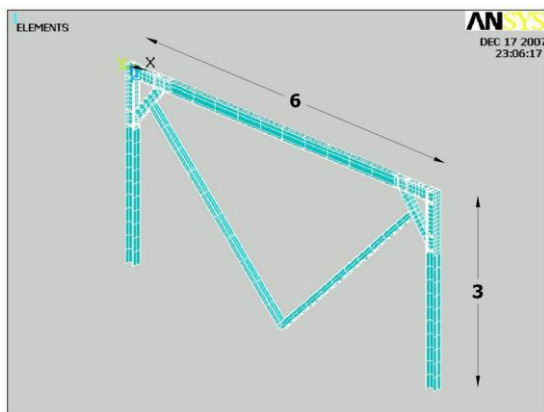
شکل (۳): نمای کلی قاب DKBF1

در نمونه CKBF1 نیز سعی شده است تا مهاربند در میانه المان زانوئی متصل شود، به همین دلیل فواصل اتصال زانوئی به تیر و ستون اندازه های یکسانی ندارند (از محور ستون تا محور محل برخورد تیر و زانوئی ۶۴۰ میلی‌متر و از محور تیر تا محور محل برخورد ستون و زانوئی ۸۱۰ میلی‌متر).



شکل (۵): نمای کلی قاب CKBF1

نمونه CKBF2 حالتی از تقارن هندسی کامل برای مهاربندی شورون است زیرا مهاربند در میانه المان زانوئی برخورد می‌نماید و محل اتصال زانوئی به تیر و ستون دارای فواصل یک اندازه است.



شکل (۶): نمای کلی قاب CKBF2

نمونه DKBF2 در شکل هندسی تقارن است و با توجه به فرض اتصال مهاربند در میانه المان زانوئی، فواصل اتصال زانوئی به تیر و ستون دارای اندازه‌های یکسان نیست (از محور ستون تا محل برخورد تیر و زانوئی ۹۵۰ میلی‌متر و از محور تیر تا محل برخورد محورهای ستون و زانوئی ۵۰۰ میلی‌متر)

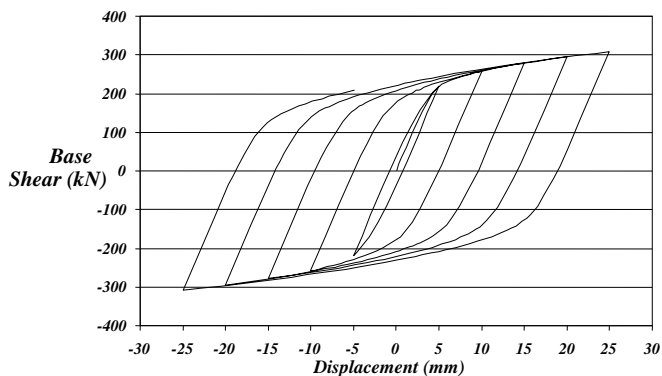
با توجه به محل تقاطع بادبند به زانوئی در نمونه DKBF2 و هندسه قاب و نحوه قرارگیری زانوئی و بادبند به نظر می‌رسد که بادبند به طور کامل به زانوئی متصل نشده است که برای توضیح این موضوع باید گفت که عضو مهاربندی از نوع میله‌ای و عضو زانوئی از نوع صفحه‌ای است که در واقع محل اتصال المان میله‌ای و صفحه‌ای در واقع یک نقطه بوده و عدم اتصالی که در اشکال گرافیکی مربوط به نمودار هم‌تنش فون میسز و تنش برشی دیده می‌شود مربوط به گرافیک نرم‌افزار ANSYS و بیرون کشیدن المان‌های میله‌ای است.

نکته با اهمیت دیگر در مورد نمونه DKBF2 آن است که با توجه به شکل هندسی نامتقارن این نمونه، چگونگی قرارگیری زانوئی و محل اتصال بادبند به زانوئی اثر زیادی در عملکرد و استهلاک انرژی سیستم دارد بطوریکه در نمونه‌ای مشابه با فرض وجود المان‌های تیر، ستون، بادبند و زانوئی یکسان تفاوت مدل در آن بوده که محل اتصال بادبند به زانوئی از وسط المان زانوئی عبور نکرده که به همین دلیل عضو زانوئی به دو بخش کوتاه و بلند تقسیم گردیده که بخش کوتاه تحت بارگذاری مشابه حالت قبلی به سرعت به تسلیم رسیده و منحنی هیستریزیس مربوطه نمایانگر عدم کارایی سیستم در این حالت است. بنابراین مناسب‌ترین حالت برای قاب DKBF2 آن است که المان بادبند در میانه عضو زانوئی به آن متصل شود و راستای عضو مهاربند نیز از محل گره تیر ستون بگذرد.

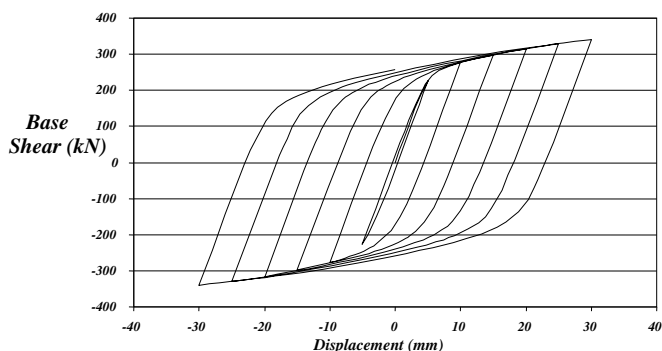
۵- مقایسه منحنی چرخه‌ای قاب‌های مورد بررسی

با اعمال بارگذاری چرخه‌ای که به آن اشاره شد، منحنی هیستریزیس کل قاب که از تحلیل سازه به دست آمده است، در ادامه نشان داده شده است:

گفتنی است که در این پژوهش، هدف اصلی مقایسه رفتار جانبی قاب‌های مهاربندی زانوئی قطری و شورن در محدوده معمول بارگذاری چرخه‌ای مطابق شکل (۱) و مقایسه رفتار غیرارتجاعی نمونه‌ها در اثر تسلیم اعضای زانوئی است و بنابراین کاهش مقاومت و سختی برای مدل‌سازی گسیختگی نمونه‌ها مورد نظر نبوده است. در نتیجه در کارهای آزمایشگاهی، با اعمال چرخه‌هایی با تغییرشکل‌های جانبی بزرگتر افت سختی و مقاومت در مسیر گسیختگی نمونه‌ها اتفاق می‌افتد.



شکل (۹): منحنی چرخه‌ای رفتار نمونه CKBF1

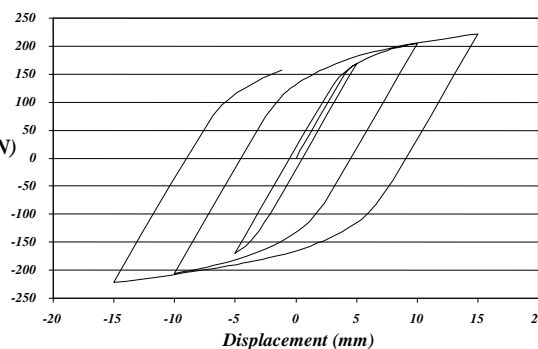


شکل (۱۰): منحنی چرخه‌ای رفتار نمونه CKBF2

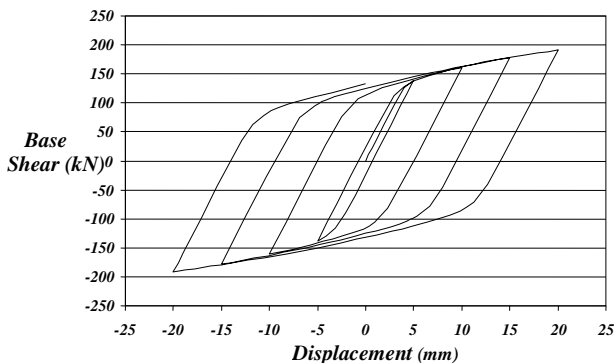
از مقایسه دو منحنی فوق نیز برای قاب‌های مهاربندی زانوئی شورن می‌توان بیان کرد که به دلیل سطح بیشتر منحنی چرخه‌ای نمونه CKBF2 نسبت به نمونه CKBF1، نمونه زانوئی متقارن CKBF2 استهلاک انرژی بیشتری نسبت به نمونه CKBF1 دارد.

همچنین با مقایسه نمودارهای گفته شده می‌توان دید که برای نمونه‌های با هندسه مشابه DKBF2 و CKBF1 «تشابه به لحاظ ابعاد دهانه و ارتفاع قاب» در حالت شورن نسبت به حالت قطری میزان جابجایی حداکثر (Δ_{max}) و میزان برش پایه حداکثر (V_{max}) افزایش قابل توجهی می‌یابد. همچنین در حالت مهاربندی قطری با افزایش نسبت دهانه به ارتفاع (B/H) و با کاهش زاویه مهاربند از ۴۵ درجه، از میزان استهلاک انرژی سیستم «ضریب شکل‌پذیری و سطح داخلی منحنی چرخه‌ای» کاسته می‌شود. در حالت مهاربندی شورن با افزایش نسبت دهانه به ارتفاع (B/H) و نزدیکتر شدن زاویه مهاربندها به ۴۵ درجه میزان استهلاک انرژی سیستم افزایش می‌یابد. در حالت کلی هر چه زاویه مهاربندی به ۴۵ درجه نزدیکتر باشد، استهلاک انرژی بیشتر می‌شود.

از آنجا که یکی از معیارهای سنجش میزان استهلاک انرژی ناشی از زلزله، ضریب شکل‌پذیری " $\mu = (\Delta_{max} / \Delta_y)$ " یعنی

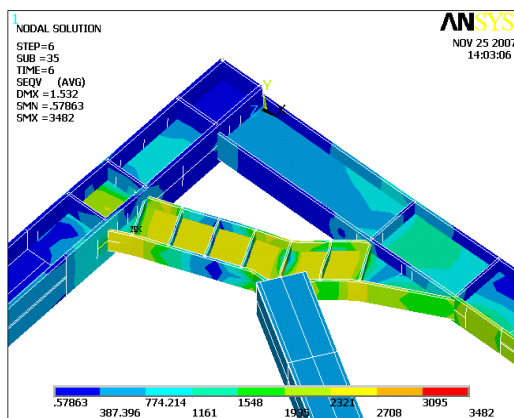


شکل (۷): منحنی چرخه‌ای رفتار نمونه DKBF1

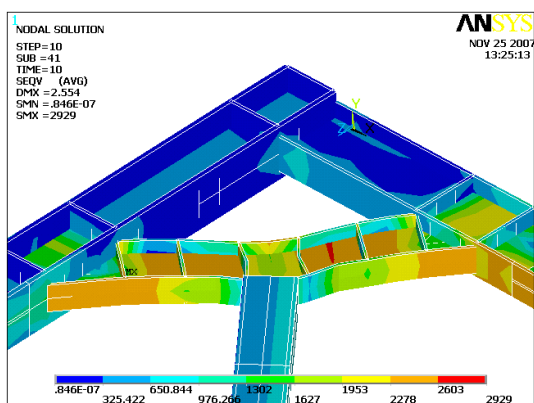


شکل (۸): منحنی چرخه‌ای رفتار نمونه DKBF2

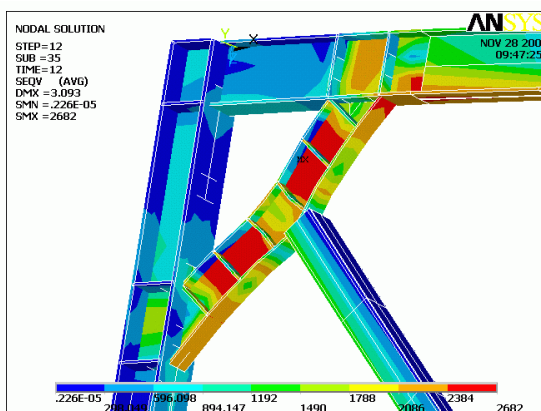
با دیدن دو منحنی فوق برای قاب‌های مهاربندی زانوئی قطری می‌توان گفت که به دلیل سطح بیشتر منحنی چرخه‌ای نمونه DKBF1 نسبت به نمونه DKBF2، نمونه متقارن DKBF1 استهلاک انرژی بیشتری نسبت به نمونه DKBF2 دارد.



شکل (۱۲): توزیع تنش فون میسز نمونه DKBF2



شکل (۱۳): توزیع تنش فون میسز نمونه CKBF1



شکل (۱۴): توزیع تنش فون میسز نمونه CKBF2

همچنین در نمونه‌های با شکل هندسی متقارن (DKBF1 و DKBF2) و وقوع تنش در المان زانوئی متقارن است و کارکرد المان نسبت به شکل هندسی نامتقارن (CKBF1 و CKBF2) بهینه‌تر است.

نکته دیگر از مقایسه توزیع‌های تنش فون میسز نتیجه آن است که میزان تنش در اعضای تیر، ستون و بادبند در حد کمتری از تنش مجاز عضو مربوطه است و فرض اساسی در زمینه عملکرد ارتجاعی اعضای اصلی سازه (تیر و ستون و بادبند) در این روش مورد قبول است.

نسبت تغییرمکان حداکثر به تغییرمکان تسلیم می‌باشد. بنابراین در جدول (۲)، مقادیر μ برای هر یک از نمونه‌ها محاسبه شده است.

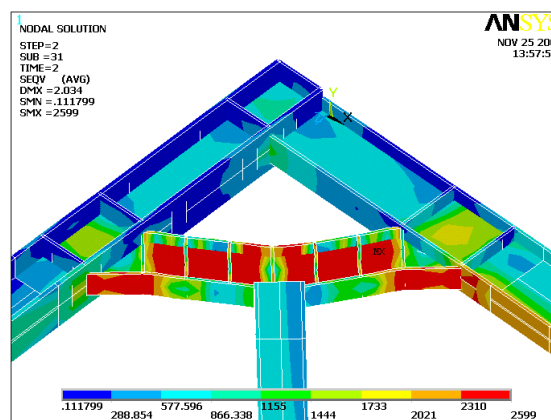
لازم به توضیح است که برای محاسبه ضریب μ از پوش منحنی چرخه‌ای نمونه‌ها استفاده شده است که برابری مناسبی با منحنی ظرفیت بدست آمده از تحلیل بار افزون دارد. همانطور که از جدول (۲) نیز می‌توان نتیجه گرفت مهاربندی زانویی شورن ضریب شکل‌پذیری بالاتری دارد. به عنوان نتیجه‌ای کلی می‌توان بیان نمود که تقارن هندسی قاب سبب بهبود رفتار و افزایش میزان استهلاك انرژی می‌شود [۱۱].

جدول (۲): مقایسه ضریب شکل‌پذیری قاب‌های مورد بررسی

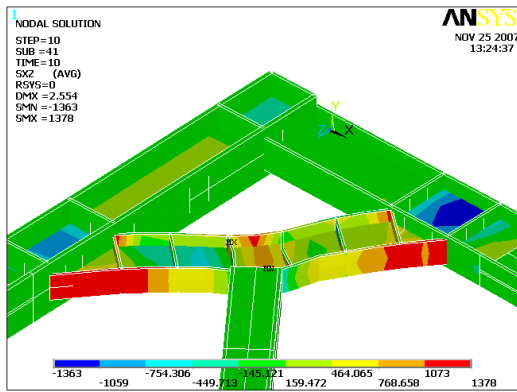
نمونه مورد بررسی	Δ_{max} (mm)	Δ_y (mm)	μ
DKBF1	۲۰/۰۰	۳/۸۲	۵/۲۴
DKBF2	۱۵/۲۲	۳/۹۸	۳/۸۲
CKBF1	۲۵/۰۰	۴/۰۵	۶/۱۷
CKBF2	۳۰/۰۰	۴/۱۲	۷/۲۸

۶- مقایسه توزیع تنش فون میسز قاب‌های مورد بررسی

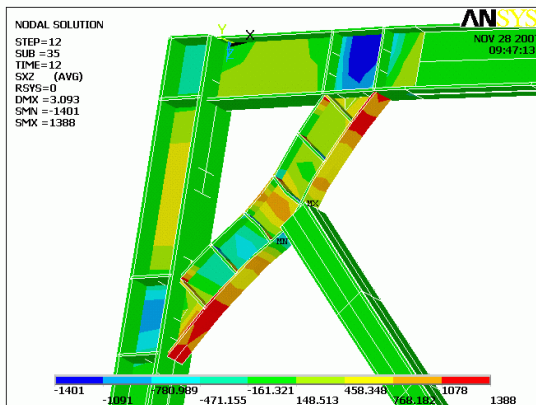
با اعمال بارگذاری چرخه‌ای که در قبل به آن اشاره شد، توزیع تنش فون میسز در محدوده اتصال عضو زانوئی به تیر و ستون به صورت شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ است. نقاطی که بیش از سایر نواحی عضو زانوئی تنش‌های بیشینه دارند در جان و بال عضو زانوئی و در محل برخورد با تیر و ستون رخ داده است. بنابراین برای تقویت موضعی عضو زانوئی و تیر و ستون در محل برخورد با عضو زانوئی از سخت‌کننده‌هایی استفاده شده است.



شکل (۱۱): توزیع تنش فون میسز نمونه DKBF1



شکل (۱۷): توزیع تنش برشی نمونه CKBF1



شکل (۱۸): توزیع تنش برشی نمونه CKBF2

۸- نتیجه گیری

قابهای با مهاربند زانوئی از نظر عملکرد مشابه قابهای برون محور معمولی EBF هستند و مزیت‌های آنها را (شکل پذیری و سختی مطلوب) دارند ولی عضوی که به عنوان فیوز سازه در نظر گرفته می‌شود (عضو زانوئی)، بخشی از قاب اصلی نیست و بنابراین تعویض یا تعمیر آن پس از زلزله‌های شدید به راحتی انجام‌پذیر است. از آنجا که مهاربندی شورن محدودیتهای معماری کمتر و در مسایل اجرایی مقبولیت بیشتری دارد، در این پژوهش مهاربند زانوئی در حالات هندسی قطری و شورون مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج به شرح ذیل مرور می‌شوند:

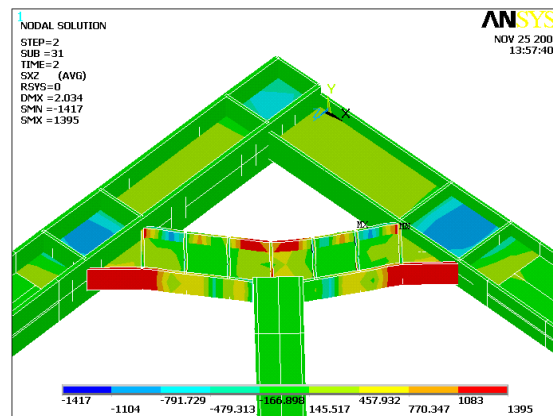
طبق نتایج مربوط به توزیع تنش فون میسز چهارنمونه مورد مطالعه، نقاطی که بیش از سایر نواحی عضو زانوئی تنش‌های بیشینه دارند در جان عضو زانوئی و نیز در بال آن در محل برخورد با تیر و ستون رخ داده است.

در نمونه‌های با تقارن هندسی، وقوع تنش در عضوزانوئی نیز متقارن است. یعنی کارکرد متقارن بهینه و مناسب‌تر، نسبت به حالات هندسی نامتقارن می‌باشد.

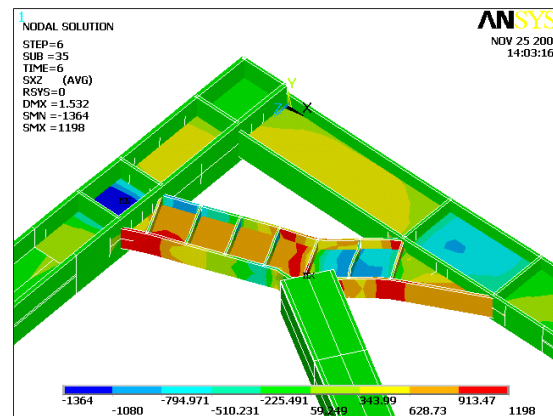
با دقت در اشکال مربوط به کانتور تنش فون میسز معلوم می‌شود که بیش‌تر تنش‌های بیشینه در بال عضو زانوئی و در قسمت‌های متصل به تیر و ستون رخ داده است [۱۱].

۷- مقایسه توزیع تنش برشی قاب‌های مورد بررسی

همانطور که از نتایج کارهای قبلی نیز انتظار می‌رفت به کار بردن سخت‌کننده در جان المان زانوئی، ظرفیت برشی و میزان شکل‌پذیری مقطع را به مقدار قابل توجهی افزایش داده است، به‌طوری‌که تنش برشی در جان عضو زانوئی نسبت به بال آن کمتر است (اشکال ۱۵ تا ۱۸). همچنین به کار بردن سخت‌کننده در جان تیر و ستون و در محل اتصال عضو زانوئی نیز باعث افزایش ظرفیت برشی در این قسمت از تیر و ستون شده است به طوری‌که تنش برشی این بخش از تیر و ستون کم‌ترین تنش در این اعضا است.



شکل (۱۵): توزیع تنش برشی نمونه DKBF1



شکل (۱۶): توزیع تنش برشی نمونه DKBF2

در مورد تنش‌های اعمالی به تیر و ستون، فرض طراحی آن ست که در اعضای اصلی، تنش تسلیم به وجود نیاید که توزیع تنش فون میسز و تنش برشی نمونه‌های مورد بررسی این موضوع را تایید می‌نمایند.

فرض اساسی در زمینه عملکرد ارتجاعی المان‌های اصلی سازه (تیر و ستون و بادبند) در این روش تأیید می‌شود. با افزایش تقارن هندسی قاب، عملکرد چرخه‌ای آن نیز بهتر می‌شود، به‌طوریکه نمونه DKBF1 ضریب شکل‌پذیری بزرگتری نسبت به نمونه DKBF2 دارد « $5/2 > 3/8$ »، همچنین نمونه CKBF2 با تقارن بیشتر نسبت به نمونه CKBF1، ضریب شکل‌پذیری بزرگتری دارد « $7/3 > 6/2$ ».

۹- تقدیر و تشکر

این تحقیق با حمایت پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران در قالب پروژه تحقیقاتی ۸۱۰۸۰۲۰/۱/۰۳ انجام شده که به این وسیله تقدیر می‌شود؛ اما کلیه نتایج و نظرهای ارائه شده مربوط به مولفان است.

با توجه به توزیع تنش برشی، به کار بردن سخت‌کننده در جان عضو زانوئی ظرفیت برشی مقطع را به میزان قابل توجهی افزایش داده است. همچنین به کار بردن سخت‌کننده در جان تیر و ستون و در محل اتصال عضو زانوئی نیز باعث افزایش ظرفیت برشی و شکل‌پذیری در این بخش از تیر و ستون شده که در نتیجه کم‌ترین تنش برشی در این اعضا به وجود آمده است.

نمونه‌های CKBF1 و CKBF2 توزیع تنش مشابهی دارند که نشان‌دهنده عملکرد بهینه عضو زانوئی در حالت هندسی شورن نسبت به حالت قطری است. البته همان‌گونه که انتظار می‌رود در حالت CKBF2 که هندسه شکل متقارن است عملکرد بهتری نسبت به حالت CKBF1 رخ داده است.

نکته دیگر که از مقایسه توزیع‌های تنش موثر فون میسز نتیجه می‌شود آن است که میزان تنش در اعضای تیر و ستون و بادبند در حد کمتری از تنش مجاز عضو مربوطه است و

۱۰- مراجع

- [۱] زهرائی، سید مهدی (۱۳۸۴)، «بررسی عددی و آزمایشگاهی کاربرد پانل برشی برای کنترل غیر فعال ساختمان‌های کاربرد پانل فولادی موجود» گزارش پروژه تحقیقاتی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- [۲] زهرائی، سید مهدی (۱۳۸۸)، «رفتار تیر پیوند قائم برشی در ساختمان‌های فولادی»، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- [۳] زهرائی، سید مهدی و جلالی، میثم (۱۳۸۶)، «مطالعه تحلیلی رفتار لرزه‌ای قابهای مهاربندی شده زانوئی»، نشریه سازه و فولاد، انجمن سازه‌های فولادی ایران، سال سوم زمستان ۸۶.
- [۴] بهرام مسجدبری، سعید (۱۳۸۶)، «بررسی کاربرد و مقایسه عضو زانوئی در مهاربندی قطری و شورن در ساختمان‌های فولادی متعارف» پایان نامه کارشناسی ارشد، پژوهشکده زلزله مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- [۵] Aristizabal-ochoa JD. (1986). "Disposable knee bracing: Improvement in seismic design of steel frames." ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol 112, No.7, pp. 1544-52.
- [۶] Balendra, T, Sam, M.T, & Liaw, C.Y. "Diagonal Brace with Ductile knee Anchor for a seismic steel frame" Earthquake Engineering & structural Dynamics: 1990: 19:847-858.
- [۷] Balendra, T, Lim, E.L., & Liaw, C.Y., Lee SL "Large-Scale seismic Testing of Knee-Brace-Frame" Journal of structural Engineering: 1997: 123:11-19.
- [۸] Lotfollahi M., Mofid M., "On the characteristics of new ductile knee bracing systems", Journal of Constructional Steel Research, 2006: 62:271-281.
- [۹] Lotfollahi M., Mofid M., "On the design of new ductile knee bracing", Journal of Constructional Steel Research, 2006: 62:282-294.
- [۱۰] American Institute of Steel Construction (2002), AISC 2002, "Load and Resistance Factor Design", Manual of Steel Construction.
- [۱۱] International building code (2003), IBC2003, Whittier, California.
- [۱۲] ANSYS, Software and User Manual, revision 10, 2005.
- [۱۳] American Institute of Steel in Construction, Seismic Provisions for structural steel building: (AISC-1997).

۱۱- واژه های لاتین

Concentrically Braced Frame, CBF
Eccentrically Braced Frame, EBF
Link Beam
Knee-Braced-Frame, KBF
SHELL ELEMENT
BEAM ELEMENT