

تأثیر طول و ممان اینرسی عضو زانویی بر رفتار قاب بتن مسلح

مهاربندی شده (کد B) 164-1F

دکتر فریدون رضایی^۱

*شکوفه جعفری رادنی^۲

۱- استادیار گروه عمران دانشگاه بوعلی سینا

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشگاه بوعلی سینا

* shokofehrad@yahoo.com

چکیده

امروزه برای دستیابی به یک سازه مقاوم و اقتصادی در مناطق زلزله خیز سعی می‌گردد تا ترکیب مطلوبی از خواص مقاومت، سختی و شکل پذیری را در سازه فراهم نمود. در سال‌های اخیر استفاده از مهاربند فلزی در سازه‌های بتن مسلح جهت مقاوم‌سازی ساختمان‌های ضعیف موجود و همچنین در طراحی لرزه ای ساختمان‌های جدید، مورد توجه قرار گرفته است. در میان انواع سیستم‌های مهاربندی، سیستم مهاربند زانویی به علت شکل ویژه و نوع رفتاری که از خود نشان می‌دهد، می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد. در مهاربند زانویی، عضو قطری تأمین‌کننده سختی سیستم است، در حالی که عضو زانویی با جاری شدن خود در زلزله‌های شدید، شکل‌پذیری لازم را فراهم می‌کند و مانع کماتش عضو قطری می‌شود؛ بدین طریق سختی و شکل‌پذیری تماماً برای سازه فراهم می‌گردد. در این مقاله رفتار قاب بتن مسلح مقاوم‌شده با مهاربند زانویی مورد تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار گرفته و تأثیر طول و ممان اینرسی عضو زانویی بر رفتار قاب ارزیابی شده است. نتایج حاکی از آن است که افزایش طول عضو زانویی، باعث کاهش سختی قاب شده و افزایش ممان اینرسی عضو زانویی، باعث افزایش سختی قاب می‌شود، اما نیروهای محوری ایجاد شده در مهاربند قطری را نیز افزایش می‌دهد.

واژه های کلیدی: مقاوم سازی، قاب بتنی، مهاربند زانویی، طول عضو زانویی، ممان اینرسی عضو زانویی

Effect of length and moment of inertia of knee element on behavior of braced RC frame (B code)

Abstract

Nowadays, in order to achieve a robust and economic structures in seismic regions are trying to combine desirable properties of strength, stiffness, ductility and tolerability large deformations in structures provided. In this regard, knee bracing system and the behavior of their shows, it is very important. The knee braces, a diagonal member stiffness of systems, while the knee element yields in severe earthquakes, provides the necessary ductility and prevent buckling of the diagonal member; way to structure provided both hardness and ductility. In this paper, the behavior of reinforced concrete frames strengthened with Knee braces have been nonlinear static analysis of the behavior frame Knee Length and moment of inertia member is evaluated. Results indicate that increasing the length of the knee element, reduces stiffness and increases the moment of inertia of the knee element, frame stiffness is increased.

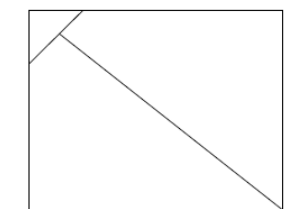
Key words: Strengthening, Concrete Frame, Knee Bracing, Length of knee element, Moment of inertia of knee element

مقدمه

مطالعات انجام گرفته بر روی سازه‌های بتن مسلح آسیب دیده در زلزله‌های اخیر، حاکی از آن است که این سازه‌ها علیرغم مقاومت و پایداری مناسبی که در برابر بارهای ثقلی دارند در زمان وقوع زلزله عملکرد مناسبی از خود نشان نداده‌اند و جان ساکنان را به خطر انداخته‌اند. بنابراین لازم است روش مناسبی برای تقویت سازه‌های مذکور در برابر بارهای جانبی اتخاذ شود. دو رویکرد عمده برای تقویت سازه‌های قابی و از جمله قاب‌های بتن مسلح در برابر بارهای جانبی، افزایش شکل‌پذیری و افزایش سختی جانبی سازه می‌باشد. به عنوان مثال مورد اول با تقویت موضعی اعضا و اتصالات و مورد دوم با اضافه کردن دیوارهای برشی بتنی و مهاربندهای هم‌محور فولادی محقق می‌گردد. بنابراین راهکاری که بتواند سختی مناسب جهت کنترل تغییرشکل‌ها در مرحله الاستیک و شکل‌پذیری کافی جهت استهلاک انرژی در مرحله پلاستیک را همزمان در خود جای دهد، بسیار حائز اهمیت خواهد بود. سیستم مهاربند زانویی یکی از این راهکارها می‌باشد. در این سیستم مهاربندی، عضو قطری تأمین‌کننده سختی سیستم است، در حالی که عضو زانویی با جاری شدن خود در زلزله‌های شدید، شکل‌پذیری لازم را فراهم می‌کند و مانع کمانش عضو قطری می‌شود؛ بدین طریق سختی و شکل‌پذیری تماماً برای سازه فراهم می‌گردد. بنابراین نقش کلیدی عضو زانویی در این سیستم مهاربندی، به خوبی آشکار می‌گردد. در این مقاله به بررسی تاثیر طول و ممان اینرسی عضو زانویی بر رفتار قاب بتن مسلح تقویت‌شده با مهاربند زانویی پرداخته می‌شود. بدین منظور قاب بتن مسلح مهاربندی‌شده تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار می‌گیرد و سختی و شکل‌پذیری قاب بتن مسلح با مقاطع و طول‌های متفاوت عضو زانویی، با هم مقایسه می‌شود.

معرفی مهاربند زانویی

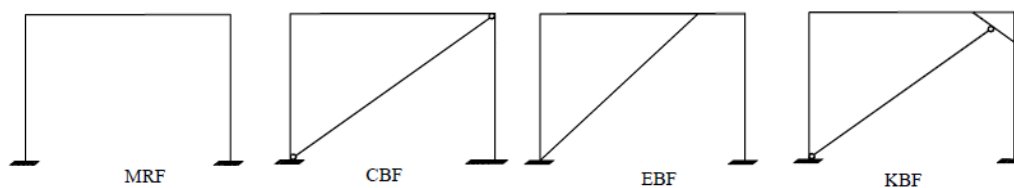
در سال ۱۹۸۶، یک مهندس طراح به نام Aristizabel-Ochoa سیستمی را تحت عنوان مهاربند زانویی قابل تعویض معرفی کرد. در این سیستم که طرح کلی آن در شکل (۱) نشان داده شده‌است، انتهای مهاربند به جای اتصال به محل تلاقی تیر و ستون به نقطه‌ای از یک عضو زانویی وصل می‌شود که بین تیر و ستون یا ستون و تکیه‌گاه قرار گرفته‌است. در طرح Ochoa فرض بر این بود که مهاربند فشاری کمانش کند و تنها مهاربند کششی بدون این‌که دچار تسلیم شود، وظیفه تأمین شکل‌پذیری و اتلاف انرژی را از طریق تسلیم عضو زانویی به عهده داشته باشد. این فرض با اینکه می‌توانست شکل‌پذیری زیادی را نسبت به مهاربندهای X ایجاد کند و از تجمع تغییرشکل‌ها در سیکل‌های متعدد جلوگیری کند، ولی با این حال بخاطر کمانش عضو فشاری با مشکل کاهش ناگهانی سختی و پدیده Pinching در حلقه‌های هیستریزس روبرو بود. پس از Ochoa محقق دیگری به نام Balendra پیشنهاد داد تا به منظور بهبود رفتار این سیستم فقط از یک مهاربند قطری استفاده گردد و آن مهاربند به گونه‌ای طرح شود که در اثر فشار وارده کمانش نکند [۱].



شکل ۱: طرح اولیه مهاربند زانویی

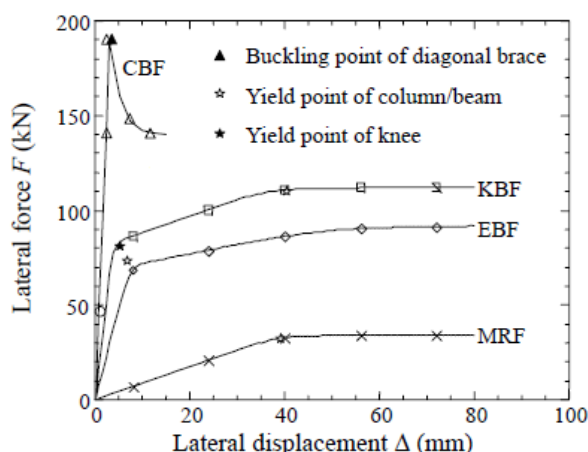
مقایسه سیستم مهاربند زانویی با سایر سیستم‌های باربر جانبی

شکل (۲) سیستم‌های مقاوم جانبی رایج در قاب‌های ساختمانی را نشان می‌دهد. که شامل قاب خمشی، مهاربند هم‌محور، مهاربند برون محور و مهاربند زانویی می‌باشد. در شکل (۳) منحنی پاسخ این سیستم‌ها با یکدیگر مقایسه شده‌است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، هرچند قاب خمشی دارای شکل‌پذیری مناسبی می‌باشد اما برای کنترل تغییرشکل‌ها نیاز به مقاطع بزرگی دارد که این امر طرح را تا حدی غیراقتصادی می‌کند. مهاربند هم‌محور (CBF) نسبت به قاب خمشی دارای سختی بسیار بالایی می‌باشد اما به دلیل کمانش مهاربندهای فشاری قادر به برآوردن الزامات شکل‌پذیری نخواهد بود. به منظور غلبه بر مشکلات ذکر شده در مورد قاب خمشی و مهاربند هم‌محور، رودر و پوپوف در سال ۱۹۷۸ یک سیستم سازه‌ای جدید را تحت عنوان مهاربند برون محور (EBF) معرفی نمودند. این سیستم سختی مناسب و شکل‌پذیری کافی را از طریق نصب مهاربند با خروج از مرکزیت و تشکیل یک تیر پیوند برشی، فراهم می‌کند. بواسطه تسلیم این تیر پیوند برشی در زلزله‌های شدید، مهاربند از کمانش مصون می‌ماند اما با توجه به اینکه تیر پیوند قسمتی از تیر اصلی قاب می‌باشد، تعویض و تقویت آن هزینه زیادی را تحمیل خواهد کرد [۲].



شکل ۲: سیستم‌های مقاوم جانبی رایج در قاب‌های ساختمانی [۲]

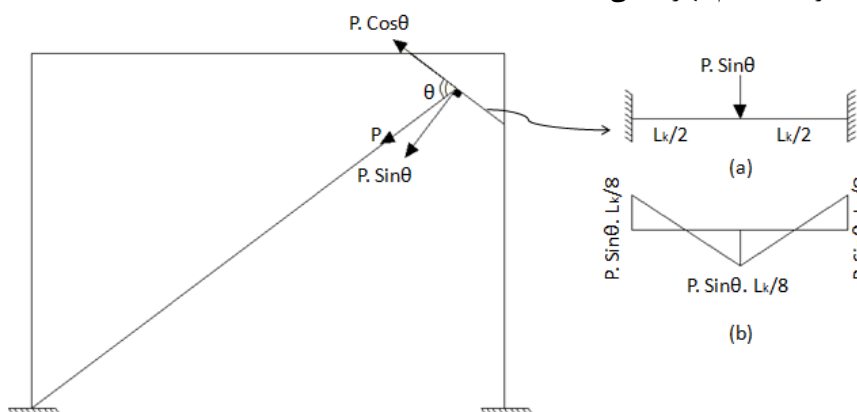
سیستم مهاربند زانویی (KBF) تمام ویژگی‌های مطلوب سیستم‌های فوق را دارا می‌باشد و از طرفی نقیصه‌های ذکر شده در مورد آن‌ها را نیز برطرف می‌نماید. سیستم مهاربند زانویی از یک عضو سازه‌ای غیر اصلی (عضو زانویی) به عنوان فیوز استفاده می‌کند تا با تسلیم این عضو در زمان وقوع زلزله سایر اعضا الاستیک باقی بمانند و پس از زلزله با توجه به اینکه سایر اعضا الاستیک باقی مانده‌اند، تنها تعویض این عضو کاربری مجدد سازه را به همراه خواهد داشت.



شکل ۳: مقایسه منحنی ظرفیت طرفیت سیستم‌های مقاوم جانبی متداول [۲]

طراحی سیستم مهاربند زانویی

سیستم مهاربند زانویی باید به گونه‌ای طراحی شود که تحت بارگذاری جانبی ابتدا عضو زانویی تسلیم شود و مهاربندهای قطری الاستیک باقی بمانند. هم‌چنین برای داشتن ظرفیت جذب انرژی بالا، عضو زانویی باید در مد خمشی تسلیم شود [۳]. با توجه به اینکه اتصال عضو زانویی به تیر و اتصال عضو زانویی به ستون به صورت گیردار در نظر گرفته می‌شود، می‌توان در طراحی آن از روابط مربوط به یک تیر دو سر گیردار استفاده کرد. در شکل ۴ مدل ساده شده‌ی عضو زانویی به صورت تیر دو سر گیردار و ماکزیمم لنگرهای خمشی وارده به این عضو نشان داده شده‌است. در این شکل، L_k طول عضو زانویی، θ زاویه بین مهاربند قطری و عضو زانویی و P ظرفیت تسلیم مهاربند می‌باشد.



شکل ۴: طرح مهاربند زانویی: (a) مدل عضو زانویی به صورت تیر دو سر گیردار (b) دیاگرام لنگر خمشی عضو زانویی

با توجه به توضیحات فوق، موارد زیر در طراحی مهاربند زانویی باید مد نظر قرار داده شود:

- ۱- به منظور داشتن ظرفیت جذب انرژی بالا، عضو زانویی به گونه‌ای طراحی شود که تسلیم خمشی آن بر تسلیم برشی مقدم باشد. بدین منظور نیاز است که طول المان زانویی (L_k) رابطه زیر را ارضا نماید:

$$L_k \geq \frac{4 M_p}{V_p} \quad (1)$$

در رابطه (۱) M_p لنگر پلاستیک مقطع عضو زانویی و V_p ظرفیت برشی پلاستیک عضو زانویی می‌باشد. که از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$M_p = Z \cdot F_y \quad (2)$$

$$V_p = t_w \cdot d \cdot F_y / \sqrt{3} \quad (3)$$

در رابطه (۲) Z اساس مقطع پلاستیک عضو زانویی و F_y تنش تسلیم فولاد مصرفی می‌باشد. همچنین در رابطه (۳) t_w ضخامت جان یا جان‌های مقطع عضو زانویی و d ارتفاع مقطع عضو زانویی می‌باشد.

۲- طراحی مهاربند قطری به صورت فشاری و با کنترل کمانش صورت پذیرد. با توجه به اینکه در مهاربند زانویی، می‌بایست تغییرشکل‌های پلاستیک در عضو زانویی محدود شود و مهاربندها باید الاستیک باقی بمانند پس از مهاربندها انتظار رفتار غیرارتجاعی نمی‌رود. در واقع مهاربندهای قطری در سیستم مهاربند زانویی کنترل‌شونده توسط نیرو می‌باشند و باید نیروهای محوری آن‌ها کنترل شود تا از حد کرانه پایین مقاومت اعضا فراتر نرود. کنترل نیروهای محوری در مهاربندهای قطری بر اساس نیروهای فشاری و کششی به ترتیب با روابط زیر صورت می‌گیرد [۴]:

$$P_{buckling} = 1.7 F_{as} A \quad (4)$$

$$P_{yielding} = F_y A \quad (5)$$

در رابطه (۴) F_{as} تنش مجاز فشاری مهاربند قطری و A سطح مقطع مهاربند قطری می‌باشد.
۳- به منظور اطمینان از اینکه در زمان وقوع زلزله ابتدا عضو زانویی تسلیم می‌شود و از پلاستیک شدن مهاربند قطری جلوگیری می‌کند، باید رابطه زیر ارضا شود:

$$M_p < P \cdot \sin\theta \cdot L_k / 8 \quad (6)$$

در صورت برقراری رابطه (۶) عضو زانویی قبل از رسیدن مهاربند به حد تسلیم، وارد محدوده پلاستیک می‌شود و نقش خود را به عنوان فیوز شکل‌پذیر ایفا می‌کند.

سختی الاستیک مهاربند زانویی

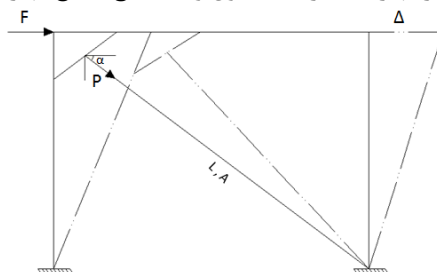
چنانچه مطابق شکل (۵) نیروی جانبی F ، به یک قاب یک طبقه مهاربندی شده با مهاربند زانویی وارد شود سبب انتقال نیروی محوری P به مهاربند قطری می‌گردد.

$$P = F / \cos\alpha \quad (7)$$

این نیرو سبب ایجاد تغییر طولی در مهاربند می‌شود.

$$d_b = P \cdot L / E \cdot A \quad (8)$$

در رابطه (۸) d_b تغییر طول ایجاد شده در مهاربند قطری، L طول و A سطح مقطع مهاربند قطری می‌باشد.



شکل ۵: تغییرشکل شماتیک مهاربند زانویی در مرحله الاستیک

نیروی P هم‌چنین سبب ایجاد خیز در عضو زانویی دو سر گیردار می‌گردد.

$$d_k = P \cdot L_k^3 / 192 E \cdot I_k \quad (9)$$

در رابطه (۹) d_k خیز ایجاد شده در عضو زانویی، L_k طول و I_k ممان اینرسی مقطع عضو زانویی می‌باشد. اگر Δ تغییرمکان جانبی قاب باشد، داریم:

$$\Delta \cdot \cos \alpha = d_b + d_k \quad (10)$$

با جایگذاری روابط (۷)، (۸) و (۹) در رابطه (۱۰) داریم:

$$\Delta = \frac{F}{\cos^2 \alpha} \left(\frac{L}{E \cdot A} + \frac{L_k^3}{192 E \cdot I_k} \right) \quad (11)$$

با توجه به رابطه $\Delta = F/K$ که در آن K سختی الاستیک قاب است، می توان نوشت:

$$K = \frac{\cos^2 \alpha}{\left(\frac{L}{E \cdot A} + \frac{L_k^3}{192 E \cdot I_k} \right)} \quad (12)$$

در رابطه (۱۲) α زاویه مهاربند قطری با افق (شکل ۵) و K سختی الاستیک مهاربند زانویی می باشد. البته رابطه (۱۲) سختی الاستیک قاب را شامل نمی شود و فقط سختی مهاربند را که تامین کننده بخش عمده ای از سختی جانبی است، شامل می شود. هر چند محاسبه سختی الاستیک قاب (تیر و ستون) براحتی با تحلیل الاستیک میسر است.

همانطور که در رابطه (۱۲) دیده می شود، بالندرا و همکاران [۱] نیز در مقاله ای بیان کرده اند که سختی جانبی الاستیک قاب، K می تواند به صورت تابعی از مشخصات هندسی قاب و ویژگی های اعضا به صورت زیر بیان گردد:

$$K = f(I_c, A_c, I_b, A_b, I_k, A_k, A, b, h, B, H, E) \quad (13)$$

در این رابطه، E مدول الاستیسیته فولاد، A, A_c, A_b و A_k به ترتیب سطح مقطع مهاربند، ستون، تیر و المان زانویی می باشد. I_c, I_b و I_k نیز به ترتیب ممان اینرسی ستون، تیر و المان زانویی می باشد. از طریق آنالیز ابعادی، رابطه فوق می تواند به شکل بی بعد زیر تبدیل شود:

$$\frac{K}{EI_c/H^3} = f\left\{ \frac{I_b}{I_c}, \frac{I_k}{I_c}, \frac{A_b/B}{I_c/H^3}, \frac{A_c/H}{I_c/H^3}, \frac{A_k/L_k}{I_c/H^3}, \frac{A/L}{I_c/H^3}, \frac{b}{h}, \frac{h}{H}, \frac{H}{B} \right\} \quad (14)$$

در این رابطه L طول مهاربند و L_k طول المان زانویی است. با رسم نمودار $\frac{K}{EI_c/H^3}$ در مقابل هر یک از پارامترهای بدون بعد، در

حالی که سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته می شود، دریافته می شود که سختی به پارامترهای $\frac{A_b/B}{I_c/H^3}$ و $\frac{I_b}{I_c}$ حساس نیست. عدم حساسیت به دو پارامتر اول مورد انتظار است زیرا تغییر شکل محوری المان خمشی معمولاً در مقایسه با تغییر شکل خمشی کم است. با توجه به این که ویژگی مهم مهاربند زانویی پیشنهادی توسط Balendra این است که مهاربند باید به گونه ای طراحی شود که از کمانش مهاربند حول محور ضعیف تر خارج از صفحه جلوگیری شود، پس در نتیجه یک مهاربند نسبتاً سنگین مورد نیاز است. بنابراین سختی جانبی مهاربند زانویی چندین برابر بیشتر از قاب بدون مهاربندی متناظرش خواهد بود و از این رو اکثر سختی جانبی توسط مهاربند تامین می شود و سهم تیر ناچیز می باشد و بنابراین عدم حساسیت به پارامتر I_b/I_c قابل توجیه است. اگر تیر دارای صلبیت محوری باشد، رابطه ی اخیر به شکل ساده شده ی زیر در می آید [۱]:

$$\frac{K}{EI_c/H^3} = f\left\{ \frac{I_k}{I_c}, \frac{A/L}{I_c/H^3}, \frac{b}{h}, \frac{h}{H}, \frac{H}{B} \right\} \quad (15)$$

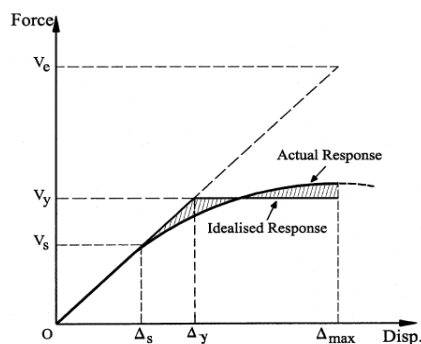
در سال ۱۳۷۵ مفید و خسروی رفتار مهاربند زانویی را در قاب های بتن آرمه بررسی کرده و ضمن مناسب دانستن این روش بیان نمودند که با وارد کردن اثر مدول الاستیسیته بتن (E_c) در رابطه پیشنهادی بالندرا می توان تاثیر رفتار اعضای بتنی را در عملکرد قاب وارد کرد و رابطه بالندرا را به صورت زیر تصحیح نمودند [۶]:

$$\frac{K}{E_s I_c / H^3} = f\left\{ \frac{I_k}{I_c}, \frac{E_s A / L}{E_c I_c / H^3}, \frac{b}{h}, \frac{h}{H}, \frac{H E_s}{B E_c} \right\} \quad (16)$$

مفهوم شکل پذیری

شکل پذیری عامل مهمی در طراحی لرزه ای سازه ها می باشد. در آزمایش بارافزون، شکل پذیری (μ) به صورت نسبت ظرفیت تغییر مکان بارافزون (Δ_{max}) به تغییر مکان متناظر با نقطه تسلیم در منحنی پاسخ الاستوپلاستیک ایده آل شده (Δ_y) اندازه گیری می شود.

$$\mu = \Delta_{max} / \Delta_y \quad (17)$$

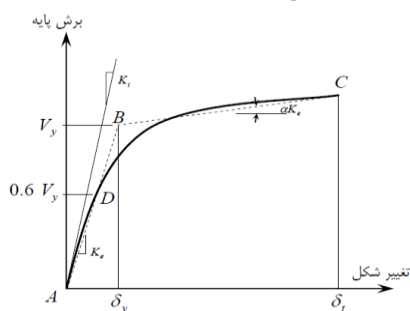


شکل ۵: پارامترهای مورد استفاده در محاسبه شکل پذیری با توجه به منحنی ظرفیت [۵]

به منظور محاسبه پارامتر Δ_y لازم است که منحنی ظرفیت سازه با یک منحنی دوخطی ایده آل سازی شود. در این مقاله برای دوخطی کردن نمودار پوش آور (منحنی ظرفیت) مطابق با نشریه شماره ۳۶۰ معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور با عنوان دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود، ۲ اصل زیر رعایت شده‌است:

۱- سطح زیر منحنی ظرفیت و نمایش دوخطی آن با هم برابر باشد.

۲- مختصات نقطه تقاطع اولین خط رسم شده و منحنی ظرفیت، بر روی محور مختصات قائم $0.6V_y$ باشد. (شکل ۷)

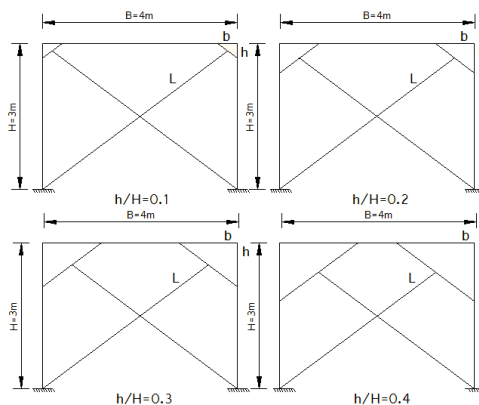


شکل ۷: منحنی پوش آور و نمایش دوخطی آن [۴]

در شکل ۷ V_y برش پایه متناظر با نقطه تسلیم در منحنی دوخطی ایده آل شده، Δ_y تغییر مکان متناظر با نقطه تسلیم در منحنی دوخطی ایده آل شده، در ناحیه الاستیک و αK_e شیب خط در ناحیه غیر الاستیک می‌باشد. ممکن است مواردی وجود داشته باشد که سختی ابتدایی K_i و سختی K_e با هم برابر باشد.

مشخصات قاب‌های تحت مطالعه

در این مقاله به منظور بررسی تاثیر طول و ممان اینرسی عضو زانویی بر رفتار قاب بتن مسلح، یک قاب بتن مسلح یک طبقه و یک دهانه به ارتفاع ۳ متر و عرض ۴ متر، در نرم افزار SAP2000 V14 تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی قرار گرفته‌است. شکل ۸ قاب‌هایی را که برای بررسی تاثیر طول عضو زانویی بر رفتار قاب، انتخاب شده‌اند نشان می‌دهد. هم‌چنین برای بررسی تاثیر ممان اینرسی عضو زانویی بر رفتار قاب، از مقاطع با ممان اینرسی‌های مختلف استفاده شده‌است که به ویژگی‌های آن در ادامه اشاره خواهد شد.



شکل ۸: قاب‌های تحت مطالعه با طول‌های متفاوت عضو زانویی

در تمامی قاب‌های تحت مطالعه، از مقاطع یکسانی برای تیر و ستون و مهاربند قطری استفاده شده‌است. مقطع تیر بتن مسلح مستطیلی و به ابعاد $30 \times 30 \text{ Cm}^2$ ، مقطع ستون بتن آرمه مستطیلی و به ابعاد $30 \times 30 \text{ Cm}^2$ و با $8\Phi 12$ و مقطع مهاربند قطری 2UNP120 با سطح مقطع 34.08 Cm^2 می‌باشد.

فرضیات مدل‌سازی

- ۱- طراحی قاب بتن مسلح با فرض قاب خمشی با شکل‌پذیری متوسط و با آیین‌نامه ACI318-2005 و طراحی اعضای فولادی بر اساس آیین‌نامه UBC97ASD انجام گرفته‌است.
- ۲- وزن قاب بر مبنای تمام بار مرده و ۲۰٪ بار زنده، محاسبه شده‌است.
- ۳- اثرات ترک خوردگی در اعضای بتن مسلح با اعمال ضرایب کاهش در ممان اینرسی آن‌ها لحاظ شده‌است.
- ۴- اثرات $P-\Delta$ در تحلیل در نظر گرفته شده‌است.
- ۵- اتصال عضو زانویی به قاب بتنی، گیردار و اتصال مهاربند قطری به عضو زانویی مفصلی در نظر گرفته شده‌است.
- ۶- فولاد مصرفی ST37 با تنش تسلیم 2400 Kg/Cm^2 و بتن مصرفی با مقاومت مشخصه 210 Kg/Cm^2 می‌باشد.

بارگذاری استاتیکی

بار مرده اعمالی به تیر ۴ متری قاب، 600 Kg/m و بار زنده 200 Kg/m در نظر گرفته شده‌است. با فرض فرارگیری قاب بر روی خاک نوع ۲ و منطقه با خطر نسبی زیاد و اهمیت متوسط، پارامترهای مورد نیاز در محاسبه ضریب برش پایه مطابق جدول ۱ از آیین‌نامه ۲۸۰۰، قابل استخراج می‌باشد.

جدول ۱: پارامترهای مورد نیاز در محاسبه ضریب برش پایه C

A	I	R	$T=0.07H^{3/4}$	T_0	T_s	S	B	$C=ABI/R$
0.3	1	7	0.16 s	0.1	0.5	1.5	2.5	0.107

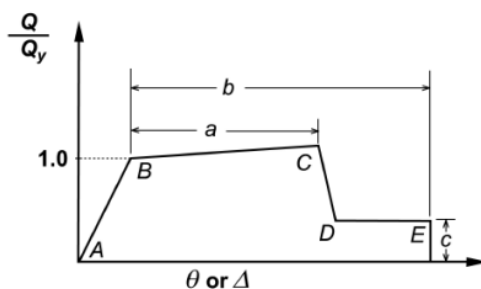
تحلیل استاتیکی غیرخطی

در روش استاتیکی غیرخطی، بار جانبی تحت اثر یک الگوی خاص مرحله به مرحله افزایش می‌یابد و تغییرمکان جانبی یک نقطه کنترلی در تراز بام با استفاده از نمودار برش پایه- تغییر مکان جانبی، ارزیابی می‌شود. در این روش نمو بار تا رسیدن تغییرمکان نقطه کنترل به تغییرمکان هدف و یا ناپایدار شدن سازه، ادامه می‌یابد. به طور کلی اساس تحلیل ماتریسی، رابطه $[F]=[K][\Delta]$ است. در این رابطه ماتریس F نمایانگر بارهای اعمالی به سازه، ماتریس K نمایانگر سختی سازه و ماتریس Δ نمایانگر تغییرمکان‌های سازه است.

در تحلیل استاتیکی خطی ابتدا ماتریس بار اعمالی با توجه به بارگذاری سازه و ماتریس سختی با توجه به هندسه سازه به دست آورده می‌شوند، سپس با استفاده از رابطه $F=K\Delta$ ، ماتریس تغییرمکان سازه محاسبه می‌شود و در نهایت با توجه به تغییرمکان‌های محاسبه شده، نیروهای اعضای سازه محاسبه می‌شوند. اما در تحلیل استاتیکی غیرخطی با توجه به اینکه بارگذاری اعمالی به سازه به صورت مرحله‌ای و نموی است، در هر مرحله بار اعمالی به سازه افزوده می‌شود، سختی جدید با توجه به مفاصل تشکیل شده در سازه اصلاح می‌گردد و تغییرمکان‌های سازه در هر مرحله محاسبه می‌شود. بنابراین تحلیل استاتیکی غیرخطی که به آن تحلیل بارافزون نیز اطلاق می‌گردد، تحلیلی غیرخطی بوده و از چندین تحلیل جدا تشکیل شده‌است که این امر منجر به افزایش زمان محاسبات کامپیوتری نسبت به تحلیل استاتیکی خطی می‌گردد.

مفاصل پلاستیک المان‌های لرزه‌بر

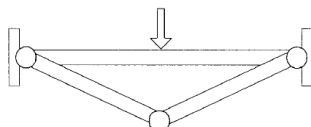
در نرم افزار SAP2000 کاربر می‌تواند برای هر درجه آزادی نیرویی (نیروی محوری و نیروی برشی) و هر درجه آزادی خمشی (لنگر خمشی و پیچشی) به ترتیب نمودار رفتار نیرو- تغییرمکان پلاستیک و لنگر- دوران پلاستیک را مطابق شکل ۹ تعریف کند. با استفاده از این نمودارها، می‌توان رفتار عضو تحت نیروهای وارده را در نقطه تسلیم و ناحیه پس از تسلیم (ناحیه پلاستیک) مدل کرد.



شکل ۹: مدل چندخطی رفتار اعضا در روش‌های غیرخطی [۴]

پس از تعریف این نمودارهای رفتاری تحت عنوان مفصل پلاستیک، می‌توان این مفاصل را در هر موقعیتی در طول المان قاب نسبت داد. اما با توجه به رفتار نسبتاً شناخته شده قاب‌های ساختمانی، موقعیت مفاصل پلاستیک در سازه یعنی موقعیت‌هایی که بیشترین امکان وقوع رفتار غیرخطی دارند، از پیش مشخص است.

در این مقاله، به منظور بیان مدل رفتاری تیرها و ستون‌های بتنی به ترتیب از مفاصل خمشی M_3 و مفصل اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی PM_3 استفاده شده است. هم‌چنین با توجه به این‌که، طول عضو زانویی در تمام قاب‌های تحت مطالعه رابطه (۱) را ارضا می‌نمایند و تسلیم خمشی آن‌ها بر تسلیم برشی مقدم است، برای عضو زانویی نیز از مفصل خمشی M_3 استفاده شده است. مطابق شکل ۱۰ مفاصل عضو زانویی دو سر گیردار در ابتدا، انتها و وسط طول اختصاص یافته است.



شکل ۱۰: موقعیت مفاصل پلاستیک در طول عضو زانویی

همانطور که پیشتر اشاره شد، مهاربندهای قطری در مهاربند زانویی کنترل‌شونده توسط نیرو می‌باشند و می‌توان برای آنها مفصل Force- Controlled تعریف کرد و اختصاص دادن مفصل پلاستیک به این اعضا مجاز نمی‌باشد زیرا به آن‌ها اجازه تغییر طول پلاستیک می‌دهد که موجب افزایش میرایی موثر سازه در روند آنالیز غیرخطی می‌گردد، که این امر خلاف واقع است.

بارگذاری ثقلی و جانبی در تحلیل استاتیکی غیرخطی

روش کار در تحلیل استاتیکی غیرخطی بدین ترتیب است که ابتدا بارهای ثقلی به سازه اعمال می‌گردد، سپس بارهای جانبی به مجموعه بارها اضافه می‌شود. علت این امر آن است که در تحلیل‌های غیرخطی اصل جمع آثار قوا به طور کلی معتبر نیست. لذا برای هر ترکیب بارگذاری لازم است تحلیل سازه از ابتدا و به طور کامل انجام شود. بنابراین بارهای ثقلی باید هم‌زمان با بارهای جانبی به سازه اعمال شوند. در این مقاله برای ترکیب بارگذاری ثقلی و جانبی از رابطه (۱۸) استفاده شده است. این رابطه زمانی که بارهای ثقلی و جانبی در یک جهت باشند به گونه‌ای که آثار یکدیگر را تشدید نمایند، استفاده می‌شود. در این رابطه Q_D بار مرده و Q_L بار زنده موثر می‌باشد.

$$Q_G = 1.1 (Q_D + Q_L) \quad (18)$$

برای توزیع بار جانبی هم از توزیع متناسب با توزیع بار در روش استاتیکی خطی یا توزیع مثلثی وارونه استفاده شده است. زیرا توزیع بار به صورت مثلثی وارونه برآورد بهتری را از ماکزیمم تغییرمکان در مقایسه با توزیع یکنواخت و چند مدی، ارائه می‌دهد. [۵]

بررسی تاثیر طول عضو زانویی بر سختی و شکل‌پذیری قاب

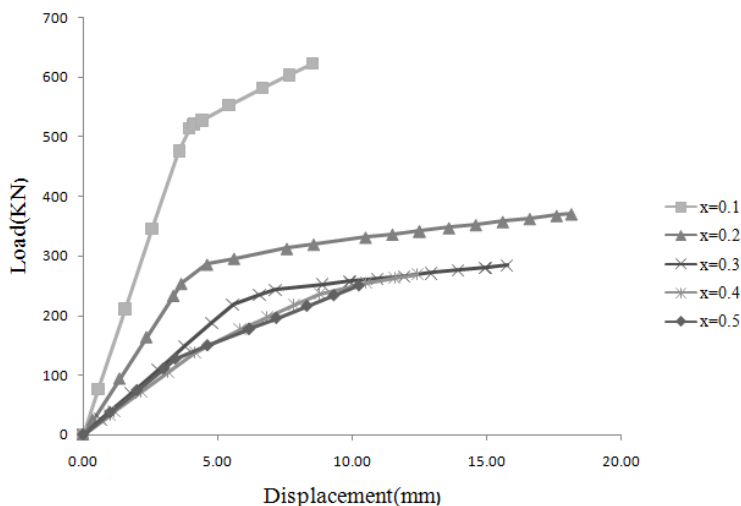
همانطور که پیشتر در شکل ۸ مشاهده شد، طول‌های مختلف عضو زانویی با نسبت h/H مشخص می‌شود. پارامترهای h, b, H, B در شکل ۸ نشان داده شده است. سیستم مهاربند زانویی در صورت برقراری رابطه (۱۹) و موازی بودن عضو زانویی و مهاربند قطری با قطر اصلی قاب بتن آرمه، بیشترین مقاومت لرزه‌ای خود را خواهد داشت [۲].

$$x = \frac{h}{H} = \frac{b}{B} \quad (19)$$

در این مقاله برای تغییر طول عضو زانویی از تغییر در نسبت h/H با نسبت‌های $x = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ استفاده شده است در حالیکه همواره زاویه عضو زانویی با قاب یعنی نسبت b/h ثابت نگه داشته شده است. پارامتر $x = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ به ترتیب معادل طول عضو زانویی $L_k = 500, 1000, 1500, 2000, 2500 \text{ mm}$ می‌باشد و با توجه به این‌که در تمامی

این مدل‌ها از مقطع BOX80 برای عضو زانویی استفاده شده‌است، همواره رابطه (۱) ارضا می‌شود و عضو زانویی همواره در خمش تسلیم می‌شود.

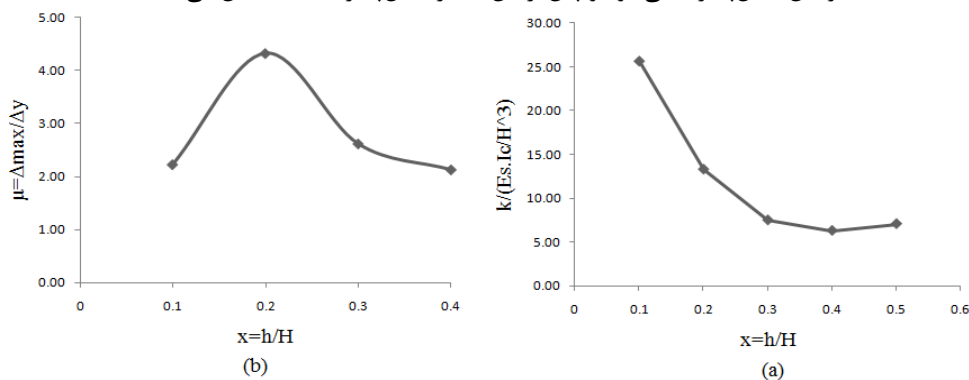
در شکل ۱۱ منحنی بار- تغییرمکان مهاربند زانویی با طول‌های مختلف عضو زانویی (پارامتر x در رابطه ۱۹)، نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، افزایش طول عضو زانویی باعث کاهش ظرفیت باربری نهایی قاب می‌شود، بطوریکه مهاربند با $x=0.1$ بالاترین ظرفیت باربری را دارد. هم‌چنین افزایش پارامتر x بیش از ۰.۳ ظرفیت باربری قاب را چندان تغییر نمی‌دهد و پس از آن، ظرفیت باربری به سمت مقدار ثابتی میل می‌کند.



شکل ۱۱: منحنی بار- تغییرمکان مهاربند زانویی با طول‌های مختلف عضو زانویی

شکل ۱۲ (a) تاثیر تغییر در طول عضو زانویی را بر سختی الاستیک قاب نشان می‌دهد، همانطور که در این شکل دیده می‌شود و پیشتر نیز در شکل ۱۱ مشاهده شد، با افزایش طول عضو زانویی سختی قاب کاهش می‌یابد و پس از مقدار $x=0.3$ سختی نیز مشابه ظرفیت باربری به سمت مقدار ثابتی میل می‌کند.

شکل ۱۲ (b) نیز تاثیر تغییر در طول عضو زانویی را بر شکل‌پذیری قاب نشان می‌دهد. با توجه به این شکل افزایش طول عضو زانویی تا $x=0.2$ باعث افزایش شکل‌پذیری می‌شود و پس از این مقدار شکل‌پذیری قاب کاهش می‌یابد.



شکل ۱۲: تاثیر طول عضو زانویی بر (a) سختی و (b) شکل‌پذیری قاب

بررسی تاثیر ممان اینرسی عضو زانویی بر سختی و شکل‌پذیری قاب

به منظور تغییر در ممان اینرسی عضو زانویی، از مقاطع قوطی شکل با ابعاد متفاوت مطابق جدول ۲ برای عضو زانویی استفاده شده‌است. در تمامی این مدل‌ها از پارامتر $x=0.2$ که معادل با طول عضو زانویی $L_k=1000mm$ می‌باشد استفاده شده‌است. بنابراین با توجه به جدول ۲، رابطه (۱) برای تمامی مقاطع قوطی شکل ارضا می‌شود و در نتیجه مد حاکم بر تسلیم عضو زانویی، مد خمشی است. مقادیر M_p و V_p در جدول ۲ به ترتیب از روابط (۲) و (۳) به دست آمده‌اند.

هم‌چنین با توجه به جدول ۳، رابطه (۶) برای تمامی مقاطع قوطی شکل ارضا می‌شود و در نتیجه در همه موارد ابتدا عضو زانویی تسلیم می‌شود و مهاربند قطری الاستیک باقی می‌ماند. مقادیر $P_{buckling}$ و $P_{yielding}$ در جدول ۳، به ترتیب از روابط (۴) و (۵) به دست آمده‌اند.

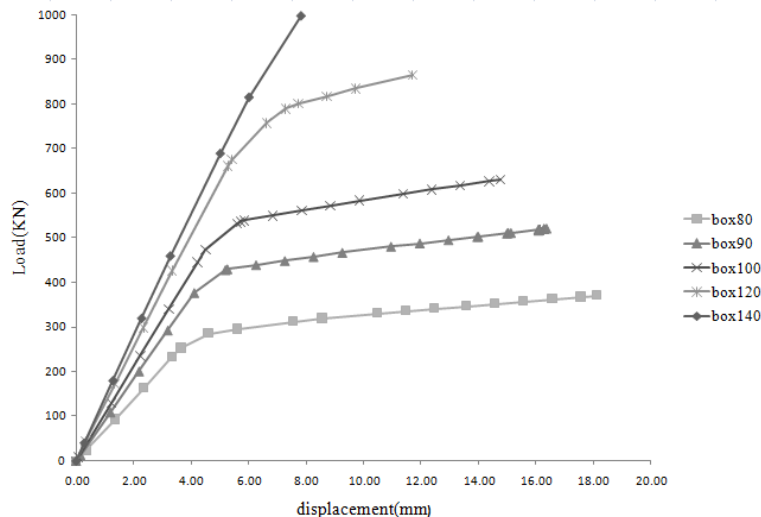
جدول ۲: مشخصات عضو زانویی

	$I_k(\text{mm}^4)$	$Z(\text{mm}^3)$	$M_p(\text{KN.m})$	$V_p(\text{KN})$	$4M_p/V_p(\text{mm})$
BOX80	201.5 e4	62.46 e3	14.69	173.8	338.1
BOX90	346.7 e4	96.50 e3	22.69	244.4	371.4
BOX100	492.0 e4	122 e3	28.69	271.6	422.6
BOX120	894.7 e4	182 e3	42.81	325.9	525.4
BOX140	1473 e4	254 e3	59.74	380.2	628.5

جدول ۳: مشخصات مهاربند قطری

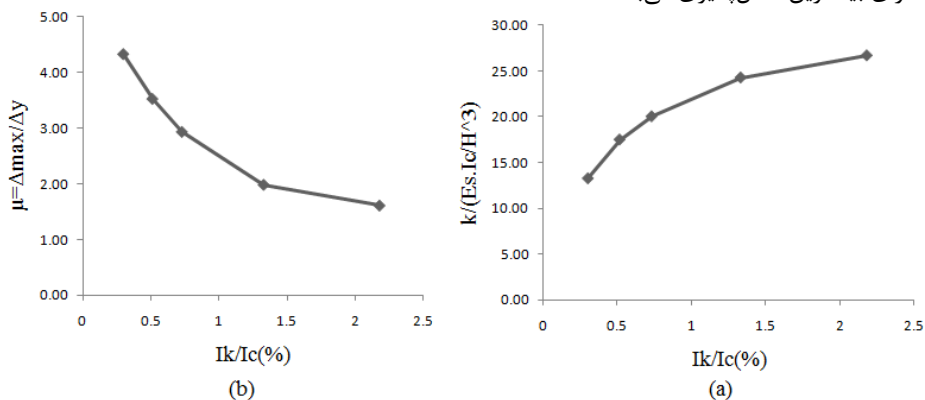
	$I(\text{mm}^4)$	$A(\text{cm}^2)$	$P_{\text{yielding}}(\text{KN})$	$P_{\text{buckling}}(\text{KN})$
2UNP120	715.5 e4	34.08 e2	801.56	518.37

در شکل ۱۳ منحنی بار- تغییر مکان مهاربند زانویی با ممان اینرسی‌های مختلف عضو زانویی، نشان داده شده‌است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش ممان اینرسی عضو زانویی، ظرفیت باربری نهایی قاب افزایش می‌یابد بطوری‌که مهاربند زانویی با مقطع BOX140 بالاترین ظرفیت باربری را دارد.



شکل ۱۳: منحنی بار- تغییر مکان مهاربند زانویی با ممان اینرسی‌های مختلف عضو زانویی

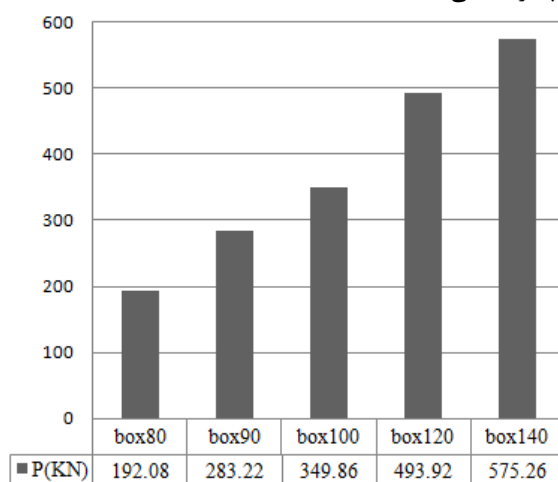
شکل ۱۴ (a) تاثیر تغییر در ممان اینرسی عضو زانویی بر سختی قاب را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود و پیشتر هم در شکل ۱۳ دیده شد، با افزایش ممان اینرسی عضو زانویی (افزایش نسبت I_k/I_c) سختی قاب افزایش می‌یابد. شکل ۱۴ (b) نیز تاثیر تغییر در ممان اینرسی عضو زانویی بر شکل‌پذیری قاب را نشان می‌دهد. این شکل نمایان‌گر کاهش در شکل‌پذیری قاب با افزایش ممان اینرسی عضو زانویی می‌باشد و همانطور که در شکل ۱۳ نیز مشاهده شد عضو زانویی با مقطع BOX80 دارای بیشترین شکل‌پذیری می‌باشد.



شکل ۱۴: تاثیر ممان اینرسی عضو زانویی بر (a) سختی (b) شکل‌پذیری

بررسی تاثیر ممان اینرسی عضو زانویی بر نیروی ایجاد شده در مهاربند قطری

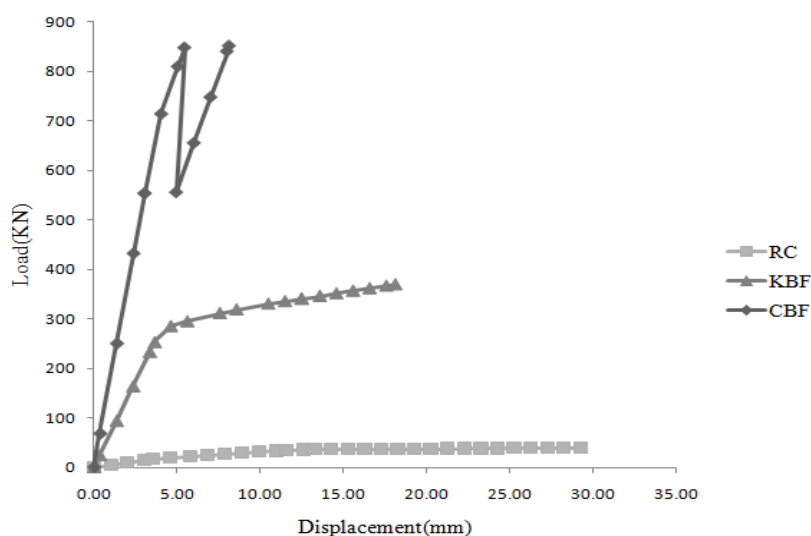
شکل ۱۵ تاثیر تغییر در ممان اینرسی عضو زانویی بر نیروی محوری ایجاد شده در مهاربند قطری با مقطع 2UNP120 را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، با افزایش ممان اینرسی عضو زانویی نیروی محوری ایجاد شده در مهاربند قطری افزایش می‌یابد و عضو زانویی با مقطع BOX140 بالاترین نیروی محوری را در مهاربند قطری ایجاد می‌کند. با توجه به جدول ۳ این نیرو از ظرفیت بار کمانشی مهاربند قطری نیز بیشتر است و به همین علت در سیستم مهاربند زانویی با مقطع BOX140، کمانش مهاربند فشاری رخ داده است و در منحنی بار- تغییر مکان مربوطه (شکل ۱۳) نیز همین مسئله کمانش مهاربند فشاری، سبب شده‌است که سیستم مذکور شکل‌پذیری کمی داشته باشد.



شکل ۱۵: تاثیر مقطع عضو زانویی بر نیروی محوری مهاربند قطری

مقایسه منحنی ظرفیت قاب بتن مسلح تقویت شده با مهاربند زانویی و ضربدری

با توجه به این که میتوان مهاربند ضربدری را یک مهاربند زانویی با $x=0$ در نظر گرفت، بنابراین در این مقاله منحنی ظرفیت مهاربند ضربدری با مهاربند زانویی نیز مقایسه شده‌است. شکل ۱۶ منحنی ظرفیت قاب خمشی بتن مسلح، قاب بتنی با مهاربند زانویی و قاب بتنی با مهاربند ضربدری را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، قاب خمشی بتن مسلح با وجود شکل‌پذیری بالا، ظرفیت باربری و سختی بسیار کمی دارد. قاب بتنی با مهاربند ضربدری نیز علیرغم داشتن سختی و ظرفیت باربری بالا، با مشکل عدم شکل‌پذیری و افت ناگهانی مقاومت به دلیل کمانش مهاربند فشاری مواجه است. اما قاب بتنی با مهاربند زانویی هم سختی و مقاومت مناسبی دارد و هم به اندازه کافی شکل‌پذیر است. بنابراین این مهاربند در طراحی بر اساس شکل‌پذیری بسیار مناسبتر از مهاربند ضربدری می‌باشد.



شکل ۱۶: منحنی بار- تغییر مکان قاب بتن آرمه، قاب با مهاربند زانویی و قاب با مهاربند هم‌محور ضربدری

نتایج

از آن جایی که رفتار سیستم مهاربند زانویی بر اساس انهدام عضو زانویی قبل از کمانش مهاربند قطری استوار است، لذا طول و ممان اینرسی عضو زانویی تاثیر قابل توجهی بر رفتار قاب دارد. لذا در این مقاله، تاثیر تغییر در طول و ممان اینرسی عضو زانویی بر رفتار قاب خمشی بتن مسلح مقاوم شده با مهاربند زانویی مورد بررسی قرار گرفت. اهم نتایج حاصله عبارتند از:

۱- طول عضو زانویی بر نحوه شکست آن تاثیر قابل توجهی دارد بطوری که یک عضو زانویی کوتاه در برش و یک عضو زانویی بلند در خمش، تسلیم می شود. بمنظور داشتن جذب انرژی بالا، بهتر است عضو زانویی به گونه ای طراحی شود که شکست خمشی بر شکست برشی تقدم داشته باشد.

۲- افزایش طول عضو زانویی باعث کاهش ظرفیت باربری نهایی قاب می شود، بطوریکه مهاربند با $x=0.1$ بالاترین ظرفیت باربری را دارد. همچنین افزایش پارامتر x بیش از 0.3 ظرفیت باربری قاب را چندان تغییر نمی دهد و پس از آن، ظرفیت باربری به سمت مقدار ثابتی میل می کند.

۳- با افزایش طول عضو زانویی سختی قاب کاهش می یابد و پس از مقدار $x=0.3$ سختی نیز مشابه ظرفیت باربری به سمت مقدار ثابتی میل می کند.

۴- افزایش طول عضو زانویی تا $x=0.2$ باعث افزایش شکل پذیری می شود و پس از این مقدار شکل پذیری قاب کاهش می یابد.

۵- با افزایش ممان اینرسی عضو زانویی، ظرفیت باربری نهایی قاب افزایش می یابد بطوری که مهاربند زانویی با مقطع BOX140 بالاترین ظرفیت باربری را دارد.

۶- با افزایش ممان اینرسی عضو زانویی (افزایش نسبت I_k/I_c) سختی قاب افزایش می یابد، اما افزایش ممان اینرسی عضو زانویی نیروی محوری ایجاد شده در مهاربند قطری را نیز افزایش می دهد و عضو زانویی با مقطع BOX140 بالاترین نیروی محوری را در مهاربند قطری ایجاد می کند که این امر می تواند منجر به کمانش مهاربند قطری شود.

۷- کاهش در شکل پذیری قاب با افزایش ممان اینرسی عضو زانویی مشاهده شده است.

۸- قاب بتنی با مهاربند زانویی هم سختی و مقاومت مناسبی دارد و هم به اندازه کافی شکل پذیر است. بنابراین این مهاربند در طراحی بر اساس شکل پذیری بسیار مناسبتر از مهاربند ضربدری می باشد.

مراجع

[۱] Balendra, Thambirajah, "Diagonal brace with ductile knee anchor for seismic steel frame", Earthquake engineering and structural dynamics, Vol 19, 847- 858, 1990.

[۲] Huang Zhen, "Elastoplastic analysis of knee bracing frame", Journal of Zhejiang University, Vol 6, 784- 789, 2004.

[۳] William, M.S., "Seismic behavior of knee braced frames" Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol 152, 147- 155, 2002.

[۴] نشریه شماره ۳۶۰ "بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود"، معاونت امور فنی دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، ۱۳۸۵.

[۵] M. Maheri, R. Akbari, "Seismic behaviour factor, R, for steel X-braced and knee-braced RC buildings" Engineering Structures, Vol 25, 1505- 1513, 2003.

[۶] خسروی، پیمان؛ مفید، مسعود؛ " بررسی رفتار و قابلیت های نوعی بادبند فلزی با خروج از مرکزیت دوگانه " پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۵.