مقایسه رفتار قابهای مهاربندی شده زانویی با هم مرکز

فرامرز عالمی، کارشناس پژوهشکده مهندسی سازه پژوهشگاه
بهرخ حسینی هاشمی، استادیار پژوهشکده مهندسی سازه پژوهشگاه

۱- چکیده

مهاربندی یکی از سیستم های مقاوم کننده قابها در برابر نیروهای جانبی می‌باشد. مهاربندها به سه گروه عمده هم مرکز، خارج از مرکز و زانویی تقسیم می‌شوند. در این مقاله ضمن معرفی برخی از ویژگیهای سیستم مهاربندی زانویی و ارائه توصیه های طراحی این سیستم مهاربندی، رفتار قاب با مهاربند زانویی و مهاربند هم مرکز مقایسه شده است. علاوه بر آن، محدودیتی که در انتخاب ابعاد زانو نسبت به ابعاد تیر و ستون در طراحی این سیستم توصیه شده، ارزیابی گردیده است.

۲- مقدمه

سازه های قابی مقاوم در برابر زلزله به چند گروه عمده قابهای مقاوم خمشی، قابهای ساده با مهاربندی و یا دیوار برشی و قابهای خمشی با مهاربندی و یا دیوار برشی (سیستم دو گانه) تقسیم- می‌شوند. قابهای مهاربندی شده در سه گروه عمده هم مرکز *(CBF)*، خارج از مرکز *(EBF)* و زانویی *(KBF)* قرار می‌گیرند (شکل ۱).

شکل (۱): انواع مهاربندی

سیستم مهاربندی هم مرکز که از سالها پیش متداول بوده است نسبت به قاب مقاوم خمشی معادل، سختی بسیار بالاتری دارد؛ اما به دلیل شکل پذیری پایین، در زلزله های شدید عملکرد مناسبی از خود نشان نداده است. برای افزایش میزان شکل پذیری قابهای مهاربندی شده، پوپوف در سال ۱۹۷۸ سیستم مهاربندی خارج از مرکز را پیشنهاد نمود [۱] که به دلیل عملکرد مناسب به سرعت وارد اکثر آیین نامه های زلزله از جمله آیین نامه ۲۸۰۰ ایران (ویرایش دوم) گردید. البته مهاربند خارج از مرکز نیز نارسایی هایی دارد از جمله اینکه تیر پیوند *(Link Beam)* که عامل اصلی جذب انرژی در این سیستم می‌باشد قسمتی از تیر اصلی است و پس از زلزله تیر اصلی باید تعمیر و یا تعویض و سقف ترمیم شود؛ لذا، محققان در جستجوی روشی بودند که علاوه بر بالا بردن شکل پذیری قابهای مهاربندی شده، نقیصه مذکور را نیز برطرف نمایند که به عنوان یکی از روشها، سیستم مهاربندی زانویی پیشنهاد گردید.

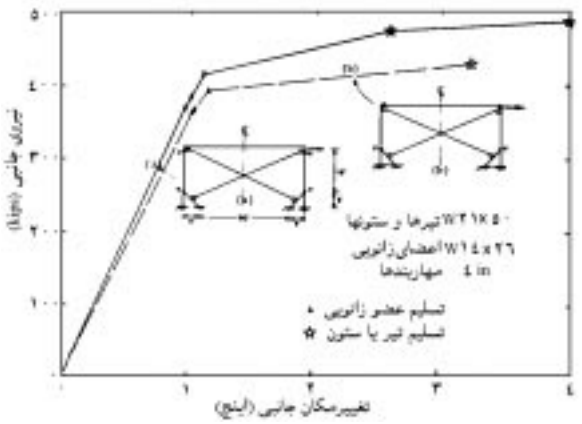
۳- مهاربندی زانویی

پیشنهاد اولیه مهاربندی زانویی *(Knee-Braced-Frame)* در سال ۱۹۸۶ توسط اچوآ [۲] ارائه شد و از سال ۱۹۹۰ به بعد توسط محققان دیگری از جمله بلندرا [۳،٤]، تحقیقات و آزمایشهایی بر روی این سیستم انجام پذیرفته است.

مهاربند زانویی از دو عضو زانویی و قطری (مهاربند) تشکیل شده- است. اتصال اعضای زانویی به تیر و ستون به صورت صلب و اتصال اعضای قطری به صورت مفصلی می‌باشد. ایده کلی این است که طراحی به گونه ای صورت پذیرد که در زلزله های شدید فقط عضو زانویی تسلیم گردد و بقیه اعضا در حالت ارتجاعی باقی بمانند و یا تعداد مفاصل خمیری در تیرها و ستونها و کمانش در مهاربندها کاهش قابل ملاحظه ای یابد. برخی از ویژگیهای این سیستم عبارتند از:

۱- درجه گیرداری اتصال تیر به ستون به دلیل اتصالات صلب زانو به تیر وستون در رفتار این سیستم تأثیر چندانی ندارد (شکل ۲) [۳].

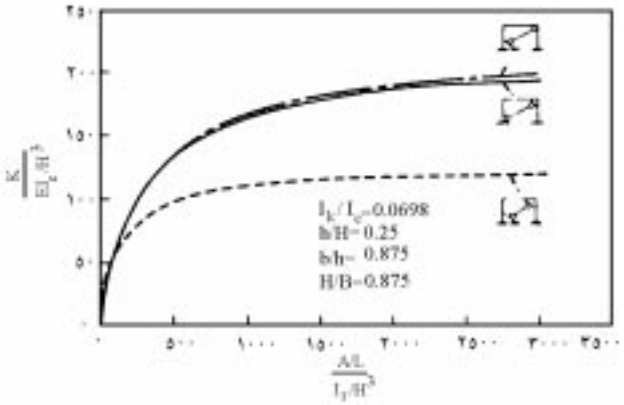
۲- اثر سطح مقطع مهاربند بر سختی قاب (شکل ۳) پس از حد معینی نسبتاً ناچیز می‌باشد [۳].



شکل (۲): اثر گیرداری اتصال تیر و ستون بر پاسخ غیرالاستیک قاب یک طبقه [۳]

قاب a با اتصالات صلب تیر به ستون، قاب b با اتصالات لولایی تیر به ستون

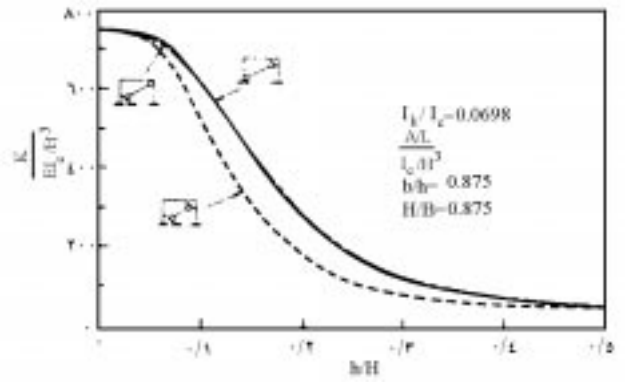
۳- تأثیرطول عضو زانویی در سختی قاب و مد تسلیم بسیار با اهمیت است. زانوی کوتاه در برش تسلیم می‌گردد؛ در حالی که، زانوی بلند در خمش تسلیم می‌شود. سختی ارتجاعی قاب با کاهش طول عضو زانویی، افزایش می‌یابد (شکل ٤). با افزایش $\frac{h}{H}$ (h،H و سایر مشخصات ابعادی در شکل (٥) آمده است) سختی قاب کاهش یافته و این سیستم مهاربندی (شکل ٤) کم‌اثر می‌گردد [۳]. شکل (٤) نشان می‌دهد که وقتی $\frac{h}{H} \geq 0.3$ باشد، سختی قاب به طور قابل ملاحظه ای افزایش می‌یابد [۳].



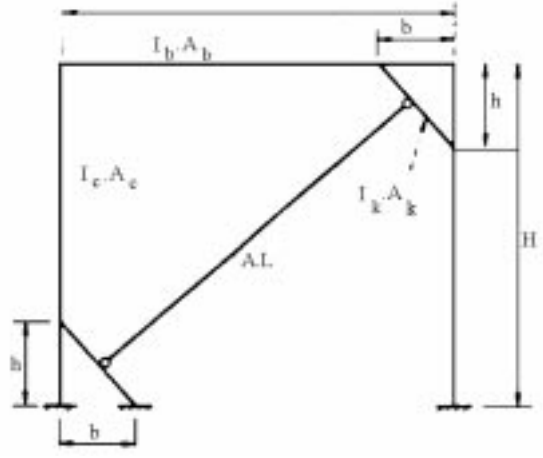
شکل (۳): اثر سطح مقطع اعضای قطری بر روی سختی قاب [۳]

٤- با افزایش ممان اینرسی زانو، سختی قاب زانویی (شکل ٦) افزایش می‌یابد [۳].

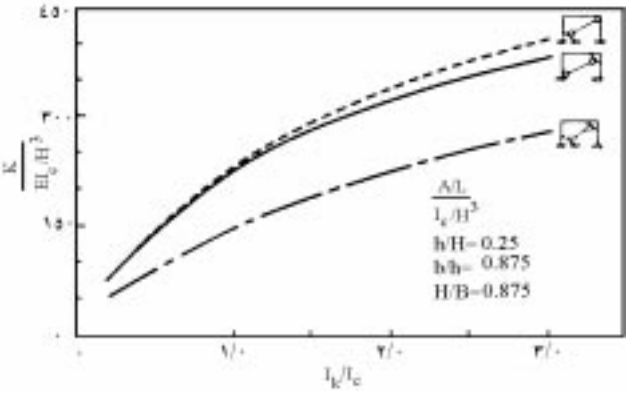
٥- در تمامی حالات مشاهده می‌شود سیستم تک زانویی عملکرد مناسبتری (سختی بیشتری) نسبت به سیستم دو زانویی دارد (اشکال ۳، ٤ و ٦).



شکل (٤): اثر طول زانو بر روی سختی قاب [۳]



شکل (٥): ابعاد قاب با مهاربندی زانویی [۳]



شکل (٦): اثر ممان اینرسی زانو بر روی سختی قاب [۳]

٤- توصیه های طراحی سیستم مهاربندی زانویی

الف) هنگامی که عضو زانویی در خمش تسلیم می شود [۳]:

۱- طول عضو زانویی از $\frac{4M_p}{V_p}$ و یا هر یک از دو قسمت عضو زانویی که طرفین مهاربند قرار می گیرند باید از $\frac{2M_p}{V_p}$ بزرگتر

باشد. M_P و V_P ظرفیت لنگر و برش پلاستیک مقطع زانو می‌باشد که از روابط (۱ و ۲) به دست می‌آیند:

$$M_P = ZF_y \quad , \quad V_P \cong V_P^* = t_w d \frac{F_y}{\sqrt{3}} \qquad (۱ \text{ و } ۲)$$

در این روابط F_y تنش حد تسلیم فولاد، t_w ضخامت جان (یا جانهای) عضو زانویی، d ارتفاع نیمرخ و Z اساس مقطع پلاستیک عضو زانویی می‌باشد. علاوه بر آن، مطابق آیین نامه *AISC* برای اینکه عضو بتواند تا مرحله تسلیم خمشی بارگذاری شود برای طول مهار نشدهٔ بین دو مفصل پلاستیک مهارشده (که برای عضو زانویی نقاط اتصال آن به تیر و ستون در نظر گرفته می‌شود) رابطه (۳) باید صدق نماید:

$$\frac{l_{cr}}{r_y} \le \frac{96500}{F_y} + 25 \qquad (۳)$$

که طول حداکثر عضو زانویی (سیستم *MKS*) $l_{max} = 65 r_y$ (برای فولاد نرمه) نتیجه می‌شود. r_y شعاع ژیراسیون عضو زانویی حول محور ضعیف است.

یک محدودیت دیگر، عدم کمانش عضو زانویی قبل از تسلیم خمشی است. با توجه به دو سر گیردار بودن عضو زانویی، بارکمانش آن معادل بارکمانش ستونهای دوسر گیردار می‌باشد؛ لذا حداکثر نیروی محوری زانو تا لحظه تسلیم خمشی برابر است با:

$$P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{l^2} \qquad (٤)$$

در رابطهٔ (٤)، I، E و L مربوط به عضو زانویی است.

۲- طراحی مهاربندها به صورت فشاری با کنترل کمانش صورت- می‌پذیرد. مهاربندها باید برای تحمل ۱/۵ برابر نیروی وارده طراحی شوند و در برابر این بار، دچار کمانش و یا تسلیم نگردند [۳]. لاغری مهاربند نیز نباید از $\frac{6025}{\sqrt{F_y}}$ که برای فولاد نرمه ۱۲۳ می‌گردد تجاوز نماید [۵].

۳- استفاده از مقاطع قوطی شکل توخالی، یکی از روشها برای کنترل کمانش جانبی- پیچشی زانو می‌باشد زیرا به دلیل سختی پیچشی بالا، این مقاطع نیاز به کنترل کمانش جانبی- پیچشی ندارند.

٤- نسبت عرض به ضخامت در زانوهای قوطی شکل برای کنترل کمانش موضعی قبل از تسلیم خمشی مطابق *BS5950* باید کوچکتر از ۲۳ باشد (آیین نامه *AISC* عدد $\frac{1590}{\sqrt{F_y}}$ را ارائه می‌کند که برای فولاد نرمه محدودیت مربوطه ۳۲ می‌باشد). البته برای عضو زانویی در تغییر شکلهای پلاستیک خیلی شدید، محدودیت مذکور برای کنترل کمانش موضعی بال فشاری، بویژه وقتی تنشها در محدوده غیر خطی می‌باشند، کافی نبوده و مقدار مزبور یعنی ۱۱/۵ پیشنهاد گردیده- است [۳].

۵- توصیه می‌گردد که اساس مقطع پلاستیک عضو زانویی حداقل ۵۰ درصد کوچکتر از ستون و یا تیر (هر کدام که بزرگتر باشند) با دارا بودن ظرفیت لنگر پلاستیک مقطع کوچکتر از $\frac{PLSinA}{8}$ اختیار گردد. P ظرفیت تسلیم مهاربند، L طول عضو زانویی و A زاویه‌ای است که مهاربند با عضو زانویی می‌سازد. انتخاب این مقادیر تضمین می‌نماید که ابتدا عضو زانویی تسلیم گردد و مهاربندها در حالت الاستیک باقی بمانند. علاوه بر آن، هیچ گونه خرابی دائمی در تیرها و ستونها (بخصوص نزدیک به تقاطع تیر و ستون با عضو زانویی) در خلال شکل گیری مفاصل پلاستیک در عضو زانویی رخ ندهد.

ب) وقتی عضو زانویی در برش تسلیم می گردد [٤]:

۱- طول عضو زانویی از $\frac{3.2\ M_P}{V_P}$ (و یا هر یک از دو قسمت عضو زانویی که طرفین مهاربند قرار می‌گیرند باید از $\frac{1.6\ M_P}{V_P}$) کوچکتر باشد.

۲- در این حالت مقطع عضو زانویی می‌تواند قوطی شکل انتخاب نشود و مناسبتر است از مقاطع I شکل به صورت جفت (مانند مقاطع ستون) استفاده گردد.

۳- سایر ضوابط طراحی اعضای زانویی مشابه ضوابط طراحی تیرهای پیوند برشی در سیستم *EBF* می‌باشد.

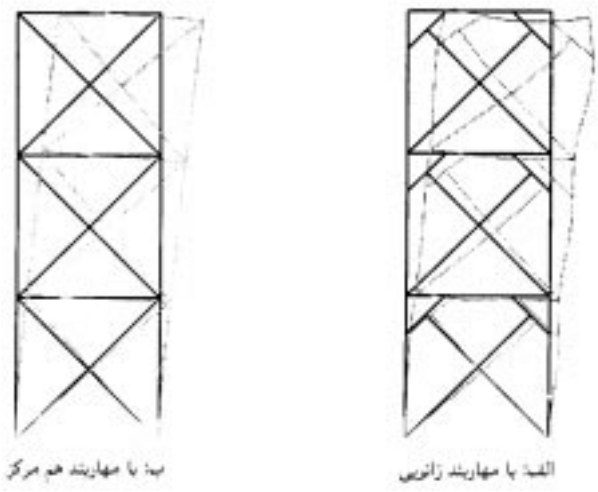
نکته مهم در طراحی قابهای با مهاربندی زانویی این است که شکل پذیری قاب *KBF* به عدد ۵ تا ٦ باید محدود گردد تا قاب بتواند مقاومت و پایداری کلی خود را حفظ نماید [٤]. این نتیجه که از آزمایشها به دست آمده برای هر دو سیستم مهاربند زانویی با تسلیم خمشی و برشی زانو باید رعایت گردد.

۵- مقایسه چند قاب طراحی شده با سیستم های مهاربندی زانویی و هم مرکز

ابتدا دو قاب سه طبقه با مهاربندهای زانویی و هم مرکز (شکل ۷) با دهانه های مساوی و تحت بارهای مساوی (با فرض ضریب رفتار R برابر، البته مطابق آزمایشها و تحلیلهای انجام شده [۳ و ٤] شکل پذیری مهاربندی زانویی بسیار بالاتر از مهاربندی هم مرکز می باشد و نتیجتاً R مهاربندی زانویی از هم مرکز بیشتر و نیروی اعمالی به مهاربندی زانویی کمتر است) طراحی و مورد تحلیل خطی قرار داده شدند که مقادیر نیروهای اعضا و تغییر مکان جانبی طبقات در سیکل نهایی تحلیل در جدول (۱) ارائه گردیده است. طراحی قاب زانویی بر اساس تسلیم خمشی زانو و مطابق توصیه های طراحی قسمت قبل انجام شده است. سپس دو قاب شش طبقه با مهاربندهای زانویی و هم مرکز (شکل ۸) نیز با دهانه های مساوی و تحت بارهای مساوی (معادل نصف بار اعمالی به قابهای سه طبقه برای بررسی توصیه های طراحی زانو تحت نیروهای متفاوت) طراحی و مورد تحلیل قرار گرفتند که نتایج نیرویی و تغییر مکان جانبی طبقه ای در سیکل نهایی در جدول (۲) درج- شده است. در این حالت نیز طراحی بر اساس روابط مربوط به روش تسلیم خمشی زانو انجام گردیده است. اتصالات تیر به ستون در تمامی قابهای تحلیل شده، لولایی بوده و اتصالات زانو به تیر و ستون صلب می باشد.

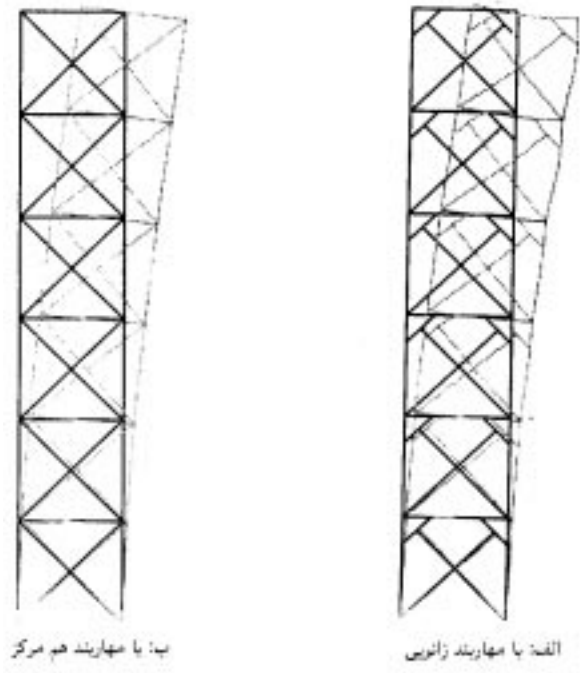
نمودارهای لنگرخمشی و نیروی برشی مربوط به قابهای سه طبقه و شش طبقه با مهاربند زانویی (تحت اثر نیروهای جانبی) در شکلهای (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. مشاهده می شود که تحت اثر نیروهای جانبی، بیشترین خمش و برش جذب اعضای زانویی (عضوهایی که جهت تسلیم خمشی و یا برشی از قبل طراحی شده اند) گردیده است.

نکته بسیار مهم این است که با توجه به توصیه های طراحی اعضای زانویی، مقاطع انتخاب شده برای اعضای زانویی، کوچکتر از مقاطعی

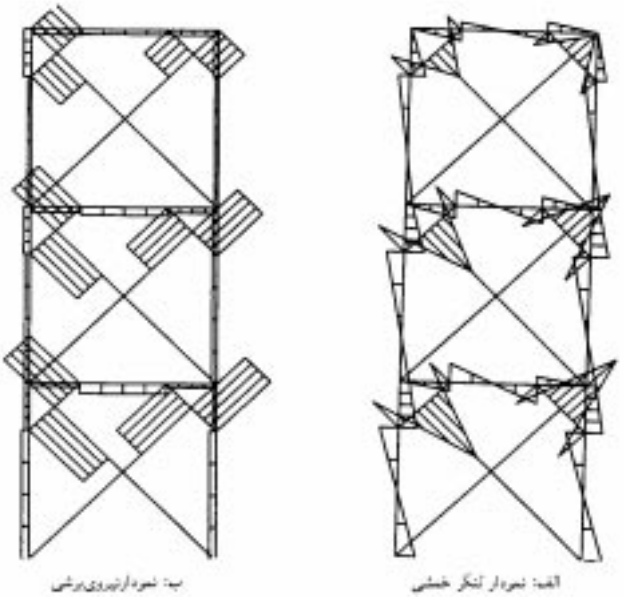


شکل (۷): قابهای سه طبقه

به دست آمده است که از روش طراحی معمول سازه های فولادی (روش تنش مجاز) به دست می‌آید. این تغییر در مقطع زانو، اثرهایی بر روی رفتار قاب مهاربندی شده دارد. نتایج جدول (۳) نشان می دهد که با کاهش مقطع زانو، سختی قاب مهاربندی شده زانویی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می یابد. در جدول مذکور در ردیف اول، سختی قاب مهاربندی شده هم مرکز، در ردیف دوم، سختی قاب زانویی با رعایت توصیه های طراحی زانو و در ردیف سوم، سختی قاب زانویی با روش معمول طراحی سازه های فولادی (روش تنش مجاز) و بدون رعایت توصیه های طراحی زانو



شکل (۸): قابهای شش طبقه



شکل (۹): قابهای سه طبقه با مهاربند زانویی

جدول (۱): پاسخ تحلیل قابهای سه طبقه با مهاربند زانویی و با مهاربند هم مرکز

		طبقه اول			طبقه دوم			طبقه سوم		
		P (ton)	M (ton.m)	V (ton)	P (ton)	M (ton.m)	V (ton)	P (ton)	M (ton.m)	V (ton)
ستون	CBF	۵٤/۰	۰/٦	۰/۲	۲۸/۰	۰/۱	۰/۰	۸/۰	۰/۰	۰/۰
	KBF	۵۵/۰	۲/۲	۱/۸	۲۹/۰	۱/۵	۱/۱	۹/۰	۱/۳	۱/۱
تیر	CBF	۰/۲	۱/۷	۲/۳	۲/۲	۱/۷	۲/۳	۵/٦	۱/۷	۲/۳
	KBF	۱۲/۰	۰/۷	۱/۵	۱۲/۵	۱/۰	۱/۸	۱۱/۹	۰/٦	۱/٤
	KBF	۱/۵	۱/٤	۲/۸	۳/۷	۱/۰	۲/۳	۷/۱	۰/۷	۱/۷
مهاربندی	CBF	۲۰/۰	۰/۰	۰/۰	۱۷/۰	۰/۰	۰/۰	۱۱/۰	۰/۰	۰/۰
	KBF	۱۷/٤	۰/۰	۰/۰	۱۵/۱	۰/۰	۰/۰	۸/۸	۰/۰	۰/۰
زانویی	KBF	۱۱/٦	۲/٦	۸/۹	۹/۷	۲/۲	۷/۲	٦/۱	۱/۳	٤/٦
تغییرمکان	CBF	۳/٤ میلیمتر			۱۰/۳ میلیمتر			۱۸/۷ میلیمتر		
	KBF	۵/٦ میلیمتر			۱۵/٦ میلیمتر			۲۹/٦ میلیمتر		

جدول (۲): پاسخ تحلیل قابهای شش طبقه با مهاربند زانویی و با مهاربند هم مرکز

		طبقه اول			طبقه سوم			طبقه پنجم		
		P (ton)	M (ton.m)	V (ton)	P (ton)	M (ton.m)	V (ton)	P (ton)	M (ton.m)	V (ton)
ستون	CBF	۱۱۲/۰	۲/۰	۰/۷	۵۹/۰	۰/٦	۰/۳	۱۸/۰	۰/۱	۰/۱
	KBF	۱۱۳/۰	۳/۹	۲/٤	٦۰/۰	۱/۵	۱/۳	۱۹/۰	۱/۰	۰/۸
تیر	CBF	۱/۷	۲/۰	۳/۰	۰/۲	۱/۸	۲/۷	۱/٦	۱/۷	۲/٤
	KBF	۱۱/۰	۰/٤	۱/۰	۱۰/۰	۰/٦	۱/٤	۷/۰	۰/٦	۱/٦
	KBF	۰/۵	۱/۹	۳/٦	۰/۷	۱/۲	۲/۵	۲/۳	۰/٦	۱/۸
مهاربندی	CBF	۱۹/۵	۰/۰	۰/۰	۱۷/۱	۰/۰	۰/۰	۱۰/۸	۰/۰	۰/۰
	KBF	۱٦/٦	۰/۰	۰/۰	۱۵/٦	۰/۰	۰/۰	۹/۷	۰/۰	۰/۰

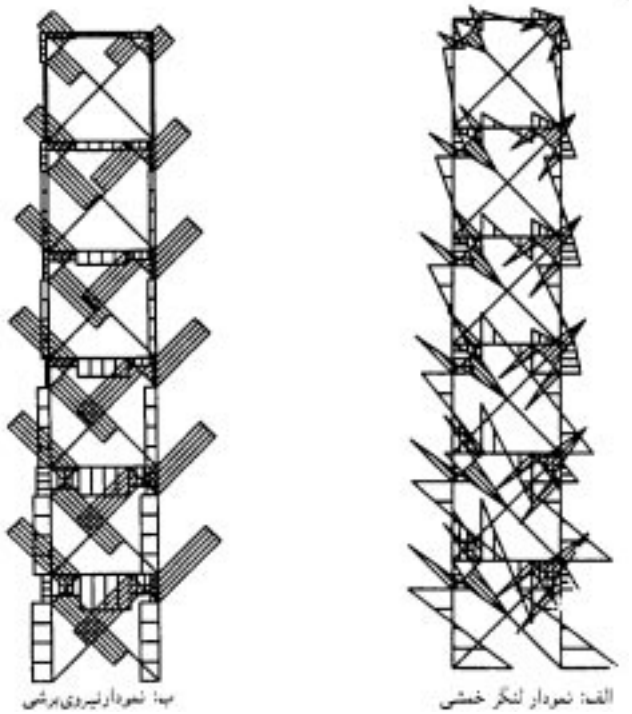
زانویی	KBF	۱۳/۱	۲/۳	۷/۹	۱۰/۲	۲/۲	۷/٦	٦/۸	۱/٤	٤/٥
تغییرمکان	CBF	۳/۸ میلیمتر			۲۱/٥ میلیمتر			٤۹/۳ میلیمتر		
	KBF	٤/۷ میلیمتر			۲٤/۲ میلیمتر			٥۳/۱ میلیمتر		

برای قابهای سه طبقه و شش طبقه درج شده است. مشاهده می گردد که در قاب شش طبقه تحلیل شده که رعایت توصیه های طراحی زانو تغییرات چندانی در مقطع زانو ایجاد نکرده است، سختی قاب حدود ۹۳ درصد قاب هم مرکز بوده است؛ در حالی که، در قاب سه طبقه زانویی که تغییرات زیادی در مقطع زانو وجود داشته است سختی قاب حدود ٦۳ درصد قاب هم مرکز می باشد که حاکی از تأثیر زیاد مشخصات مقطع عضو زانویی بر سختی قاب مهاربندی شده است .

برخی از نکاتی راکه از نتایج مندرج در جدولهای (۱) و (۲) می توان دریافت عبارتند از:

۱- نیروی محوری ستونها در هر دو نوع قاب مهاربندی شده هم مرکز و زانویی معادل می‌باشد؛ در حالی که لنگر اعمالی به ستونها در قاب زانویی بیشتر است. البته طول کمانشی ستونها در قاب زانویی کمتر از قاب هم مرکز می‌باشد که نتیجتاً مقاطع تقریباً معادلی به دست آمده است.

۲- مقاطع تیرها در تمامی طبقات قاب هم مرکز یکسان است؛ در حالی که، در قاب زانویی به دلیل اعمال لنگر نیروهای



الف: نمودار لنگر خمشی ب: نمودار نیروی برشی

شکل (۱۰): قابهای شش طبقه با مهاربند زانویی

جدول (۳): سختی قابهای مهاربندی شده هم مرکز، زانویی با اعمال توصیه های طراحی زانویی، بدون اعمال توصیه های طراحی زانویی

	قاب سه طبقه	قاب شش طبقه
	سختی نسبی	سختی نسبی
CBF	۱	۱
KBF با روش تنش مجاز	۰/٦۳	۰/۹۳
KBF بدون رعایت توصیه های طراحی زانو	۰/۹۲	۱

جانبی درمحل اتصال صلب زانو به تیر و ستون نمی‌تواند در تمامی طبقات یکسان باقی بماند. در مقایسهٔ مقاطع تیرهای دو قاب هم مرکز و زانویی می‌توان گفت که درطبقات بالای قاب زانویی به دلیل طول دهانه کمتر تیر و اعمال لنگر کم زانو بر تیر، مقاطع تیرهای قابهای زانویی در طبقات بالا کمتر از مقاطع تیرهای قاب هم مرکز است. در طبقات پایین نظر به ازدیاد لنگر اعمالی از طرف زانو بر تیر، مقاطع تیرهای قابهای زانویی در این طبقات بیش از مقاطع تیرهای قاب هم مرکز می گردد.

۳- نیروی مهاربندها در هر دو سیستم تقریباً مساوی می‌باشد که مهاربندها در قاب زانویی با توجه به طراحی برای ۱/۵ برابر نیروی طراحی، مقاطعی کمی بزرگتر از مهاربندها در قاب هم مرکز دارند. البته طول مهاربندها در سیستم زانویی کوتاهتر بوده، لذا لاغری کوچکتر و در نتیجه تنش مجاز طراحی بزرگتری نسبت به قاب هم مرکز دارند.

٤- با توجه به شکل پذیری بسیار بالاتر سیستم *KBF* نسبت‌به سیستم *CBF* مطابق نتایج آزمایشها و تحلیلها [٤ و ۳]، ضریب رفتار سیستم *KBF* قطعاً بزرگتر از *CBF* است؛ بنابراین، نیروی طرح قاب زانویی کوچکتر از قاب هم مرکز می‌باشد؛ لذا، مقاطع به دست آمده برای قاب زانویی که در حالت ضریب

رفتار برابر، تقریباً با قاب هم مرکز برابر است با کاهش نیروهای طراحی کوچکتر خواهد شد.

٦- نتیجه گیری

۱- بررسیهای انجام شده برروی سیستم مهاربند زانویی حاکی از سختی نزدیک وشکل پذیری بالای این سیستم مهاربندی [۳ و ٤] در مقایسه با سیستم مهاربندی هم مرکز می‌باشد.

۲- رعایت توصیه های طراحی زانو درسیستم زانویی در حالتی که مقطع عضو زانویی چندان تغییری نسبت به حالت طراحی به روش تنش مجاز نمی‌کند تغییر چندانی در سختی قاب زانویی نسبت به قاب هم مرکز معادل ایجاد نمی‌نماید؛ اما، وقتی میان مشخصات مقطع عضو زانویی که با رعایت‌توصیه ها، طراحی شده، با مقطع طرح شده به روش تنش مجاز تفاوت زیاد است سختی قاب زانویی تفاوت نسبتاً زیادی با سختی قاب هم مرکز معادل دارد که حاکی از تأثیر شدید مشخصات مقطع عضو زانویی بر سختی قاب زانویی می‌باشد.

۳- در مقایسه انجام شده در این مقاله حتی با فرض ضریب رفتار (R) برابر، وزن کل مصالح مصرفی در دو سیستم زانویی و هم مرکز نزدیک به هم‌بوده است؛ درحالی که، سیستم زانویی مطابق آزمایشها و تحلیلها شکل پذیری بالاتر و عملکرد مناسبتری در برابر نیروهای لرزه ای دارد. علاوه بر آن، چنانچه R واقعی سیستم زانویی (که قطعاً بزرگتر از R سیستم هم مرکز است) دربه دست آوردن نیروی طرح اعمال شود مقاطعی کوچکتر از سیستم هم مرکز مورد نیاز خواهد بود.

۷- مراجع

1-Popov, E.P., and Charles, W. R., "Eccentrically Braced Steel Frames for Earthquake", J. of Structural Division, Vol.104 No. st3, (1978).

2-Aristizabal-Ochoa, " Disposable Knee Bracing Improvement in Seismic Design of Steel Frames", J. of Structural Engineering, Vol.112, No.7,(1988).

3-Balendra, T., Sam, M.T., and Liaw, C.Y., " Diagonal brace with Ductile knee Anchor for A Seismic Steel Frame", Earthquake Engineering and Structral Dynamics, Vol. 19, pp.847-858, (1990).

4-Balendra, T., Sam, M.T., and Liaw, C.y., " Large Scale Seismic Testing of Knee-Brace- Frame ". J. of Structural Engineering, Vol.123, No.1,(1997).

۵-" آیین نامه طرح ساختمانها در برابر زلزله"، ویرایش دوم، ۱۳۷٦.