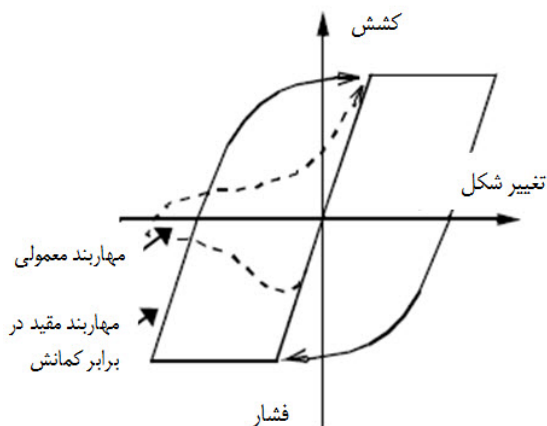


مدلسازی مهاربندهای مقید شده در برابر کمانش تحت اثر بارهای دینامیکی

هاشم شریعتمدار^{۱*}، حسین عباس زاده^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: خرداد ۱۳۸۸ پذیرش مقاله: آذر ۱۳۸۸	در این مقاله، روشی کاربردی و کارا جهت مدلسازی دقیق و همچنین تهیه یک مدل ساده از مهاربندهای مقاوم در برابر کمانش ارائه شده است. ابتدا اجزاء تشکیل دهنده مهاربندهای کمانش ناپذیر معرفی گردید. یک نمونه کامل آزمایشگاهی از این نوع مهاربند در نرم افزار اجزاء محدود ANSYS با در نظر گرفتن تمامی مواد مورد استفاده مدلسازی شد (مدل کامل). صحت اعتبار مدل کامل پس از مقایسه نتایج تحلیل دینامیکی غیر خطی با نتایج آزمایشگاهی نمونه واقعی تأیید گردید. مدل ساده مورد نظر که شامل فولاد هسته و فنر می باشد پیشنهاد، ساخته، تحلیل و مورد ارزیابی قرار گرفت. در ادامه روشی برای یافتن سختی فنر ارائه گردید. در نهایت مشخص شد که وجود فنر مانع از کمانش هسته شده و علاوه بر آن هر اندازه مش بندی المانهای محدود ریزتر باشد مقدار ثابت فنر کوچکتری به دست می آید. مقایسه رفتاری نشان می دهد که تطابق خوبی بین منحنی های هیستریزس آزمایشگاهی و تحلیلی (مدل کامل و ساده) وجود دارد بطوریکه اختلاف نتایج نرم افزاری با نتایج آزمایشگاهی کمتر از پنج درصد می باشد.
واژگان کلیدی: مهاربند کمانش ناپذیر مدلسازی هسته- فنر تحلیل دینامیکی غیرخطی مش بندی	

است [۱]. رفتار مهاربندهای متعارف و کمانش ناپذیر در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- مقایسه رفتار مهاربندهای متعارف و مهاربندهای مقید در

برابر کمانش [۱]

۱- مقدمه

رفتار نامطلوب عمده ای که در مهاربندها مشاهده می شود کمانش مهاربند فشاری می باشد، که این امر باعث کاهش شکل پذیری و ظرفیت استهلاک انرژی در سازه به دلیل اثر ثانوی تغییر شکل های غیرخطی هندسی می گردد. این موضوع در بارگذاری های تناوبی مانند زلزله با توجه به ماهیت کاهش بیشتر سختی تحت بارهای دینامیکی لرزه ای، از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. استفاده از مهاربندی که در فشار و کشش رفتار یکسانی داشته باشد و کمانش نکند، همیشه مطلوب طراحان سازه بوده

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: shariatmadar@ferdowsi.um.ac.ir

۱. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد
۲. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه فردوسی مشهد

در حقیقت این بهسازی، رفتارهای نامناسب زیر را اصلاح می‌کند:

- ۱- کاهش مقاومت
- ۲- کاهش سختی
- ۳- کاهش شکل پذیری

ایده استفاده از عضو فولادی تسلیم شونده برای جذب انرژی بیش از ۳۰ سال پیش مطرح شد [۲ و ۳]. رویکرد جدید این بود که عضو فشاری قبل از کمانش جاری شود. نکته مهم این است که تسلیم به شکل موضعی رخ ندهد و توزیع آن در سراسر عضو مناسب و یکنواخت باشد به طوری که انرژی مستهلک شده طی یک بارگذاری رفت و برگشتی مانند زلزله به حداکثر خود برسد. تحقیقاتی که در این باره صورت گرفت بر مبنای جلوگیری از کمانش مهاربند فشاری با استفاده از پوشش بتن در اطراف آن بود. در این نوع مهاربندها تحمل بار فشاری توسط هسته فولادی بوده و پوشش بتنی فقط از کمانش هسته فولادی که باعث توزیع جانبی فشار داخلی در پوشش بتنی می‌گردد، جلوگیری می‌کند.

برای اینکه نیروی فشاری محوری از جانب هسته فولادی به پوشش بتنی انتقال پیدا نکند، لایه ای نازک از ماده‌ای مخصوص در سطح مشترک فولاد و بتن قرار داده می‌شود. این لایه با جلوگیری از اصطکاک بین هسته و بتن، نیروی فشاری ناشی از تغییر شکل جانبی فولاد هسته را به صورت یک بار گسترده عرضی به بتن منتقل می‌کند. این نحوه انتقال نیرو بین اجزای باعث شده است که این نوع مهاربندها را مقید در برابر کمانش (Buckling Restrained Brace = BRB) را مهاربند نچسبیده (Unbonded Brace) نیز بنامند.

استفاده از این نوع مهاربندها در دهه ۱۹۸۰ میلادی در ژاپن شروع شد. در دهه ۱۹۹۰ محققان ایالات متحده آمریکا روی مهاربند نچسبیده تحقیقات گسترده‌ای را شروع کردند که منجر به استفاده از این نوع مهاربند در ساختمان‌های مختلفی جهت بهسازی لرزه‌ای شد. این

تحقیقات در کشورهای دیگر دنیا از جمله هند و تایوان نیز در حال پیگیری است.

تحلیل پایداری مهاربندهای کمانش ناپذیر توسط Cameron Black و همکاران در سال ۲۰۰۲ به طور کامل مورد بررسی قرار گرفت [۴]. Black و همکاران نشان دادند که در شروع کمانش پلاستیک به سبب فشار تک محوری؛ تنش برشی و کرنش برشی به مدول برشی مماسی G_r بستگی دارند [۵]. در سال ۲۰۰۲ برای ساخت یک مرکز تحقیقاتی در دانشگاه برکلی، آزمایش‌هایی بر روی مهاربندهای کمانش ناپذیر توسط Lopez و همکاران انجام شد [۶]. نتایج حاصل از آزمایشات نشان داد که عملاً صفحات اتصال باعث ایجاد یک دهانه صلب می‌شوند و باید چرخش گره‌ها به علت صلبیت بالای صفحه اتصال را در تحلیل و طراحی لحاظ کرد.

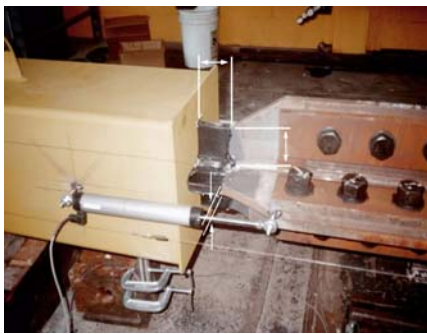
یک کار تحقیقاتی - آزمایشگاهی مشترک بین مرکز ملی تحقیقات مهندسی زلزله در تایوان (NCREE) و یک گروه از محققان در دانشگاه میشیگان آمریکا در سال ۲۰۰۴ صورت گرفت [۵]. هدف اصلی در مطالعات ارائه یک روش مناسب در به دست آوردن برش پایه بود.

در سال ۲۰۰۵، Choi و Kim روشی را برای طراحی قاب‌های دارای مهاربند کمانش‌ناپذیر با استفاده از طیف انرژی هیسترسیز ارائه کردند [۷]. در این روش فرض شده است که تیرها و ستون‌ها تحت بارهای ثقلی در حالت الاستیک باقی می‌مانند و استهلاک انرژی و خسارات ناشی از آن فقط در مهاربند کمانش‌ناپذیر اتفاق می‌افتد.

معمولاً برای هر تکنولوژی جدیدی که در عرصه اجرا مورد استفاده قرار می‌گیرد، علاوه بر مطالعات نظری پژوهش‌های آزمایشگاهی نیز اجتناب ناپذیر و الزامی می‌باشد. در آیین نامه AISC2005 پیشنهاد شده است که دو سری از آزمایش‌ها بر روی مهاربندها باید صورت پذیرد [۸]. سری اول آزمایش‌ها بر روی مهاربندهای تنها انجام می‌شود، به طوری که رفتار محوری آنها مورد مشاهده دقیق قرار گیرد و پارامترهای مورد نیاز در

۲-۲- هسته فلزی محصور نشده

به منظور اتصال مهاربند به اسکلت ساختمان، به ناچار باید قسمتی از مهاربند محصور نشده باشد. برای این که کمانش در قسمت محصور نشده اتفاق نیفتد باید سطح مقطع بیشتری نسبت به قسمت محصور شده داشته باشد. تغییر مقطع نباید به شکل ناگهانی باشد. زیرا این کار موجب تمرکز تنش در ناحیه تغییر مقطع خواهد شد. به این منظور از یک ناحیه انتقالی استفاده می‌شود. در طول ناحیه انتقالی مطابق شکل ۳ سطح مقطع به صورت ملایم بزرگ می‌شود.



شکل ۳، نمایش قسمت محصور نشده هسته فولادی [۴]

۲-۳- ماده نجسب

مکانیزم نجسبیده بودن BRB به وسیله این ماده فراهم می‌گردد. ماده نجسب، اصطکاک بین فولاد هسته و بتن محصور کننده را از بین می‌برد و یا به حداقل می‌رساند. با توجه به این نکته ماده نجسب فقط تغییر شکل جانبی فولاد هسته را به بتن محصور کننده انتقال می‌دهد و مانع از انتقال نیروی محوری به بتن محصور کننده می‌شود. محققان مختلف ماده های نجسب متفاوتی را در آزمایشات خود به کار برده‌اند. ماده لاستیک مانند [۱۲ و ۱۳]، پلی اتیلن [۱۴]، روغن سیلیکون [۱۵] و ماستیک [۱۶ و ۱۷] از جمله ماده‌هایی هستند که به عنوان ماده نجسب مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

بین فولاد هسته و بتن محصور کننده باید یک فاصله مناسب وجود داشته باشد. این فاصله نباید آنقدر زیاد

طراحی آنها حاصل شود. همچنین با این سری از آزمایش‌ها، شکل ایده‌آل مهاربند به دست می‌آید.

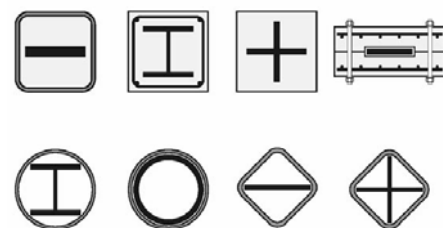
در سال ۲۰۰۶ یک برنامه تحقیقاتی توسط Fahnestock و همکاران به منظور ارزیابی مقررات آیین نامه AISC2005 در رابطه با مهاربندهای کمانش ناپذیر برنامه ریزی شد [۹]. در سال ۱۳۸۸، شمشادیان، وفائی و زهرائی اثر زلزله های حوزه نزدیک را روی سازه‌های با مهار بندهای کمانش ناپذیر مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که اینگونه سیستم‌ها عملکرد مطلوبی در استهلاک انرژی از خود نشان می‌دهند [۱۰].

۲- مبانی پایه‌ای

همان گونه که در مقدمه ذکر شد مهاربند نجسبیده مطابق شکل از چندین قسمت مختلف به شرح زیر تشکیل می‌شود:

۲-۱- هسته فلزی محصور شده

این قسمت عضو اصلی مهاربند محسوب می‌شود که بار محوری را تحمل می‌کند. از آنجایی که ایده اساسی مهاربندهای BRB، تسلیم در فشار می‌باشد؛ بهتر است نوع فولاد هسته از جنس فولاد نرمه و با مقاومت پایین تر باشد تا در بارگذاری‌های رفت و برگشتی تسلیم در فولاد اتفاق بیفتد و عمل استهلاک انرژی به خوبی صورت گیرد. اشکال مختلف مقطع هسته فولادی در شکل ۲ نمایش داده شده است [۱۱].



شکل ۲، اشکال مختلف هسته فولادی و محفظه محصور کننده [۱۱]

BRB (Chevron) شود در حالی که یکی از مزیت‌های BRB حذف این نیروی نامتعادل کننده می‌باشد.

۴-۲- ناحیه اتصال

معمولا اتصال BRB به وسیله اتصال پیچی صورت می‌پذیرد، ولی می‌توان از اتصالات جوشی و پرچی نیز استفاده نمود. مزیت استفاده از اتصال پیچی این است که نصب و تعویض BRB راحت تر صورت می‌گیرد [۱۵].

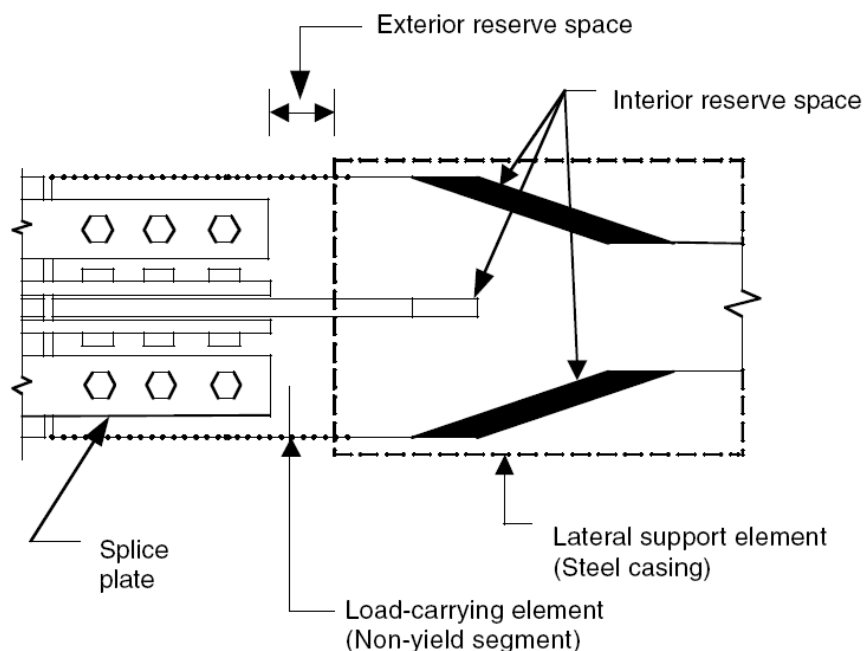
۵-۲- غلاف محصور کننده

همانگونه که در شکل ۲ دیده می‌شود، اشکال مختلفی از غلاف محصورکننده مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۱]. گونه رایج غلاف محصورکننده مطابق شکل ۵، شامل یک غلاف فولادی مربع شکل - که داخل آن از بتن پر شده است - می‌باشد [۴]. بر طبق گزارش پژوهشگاه ملی تایوان زلزله به غیر از بتن مواد دیگری همچون چوب و ماسه نیز به عنوان ماده پرکننده استفاده شده‌اند [۱۸].

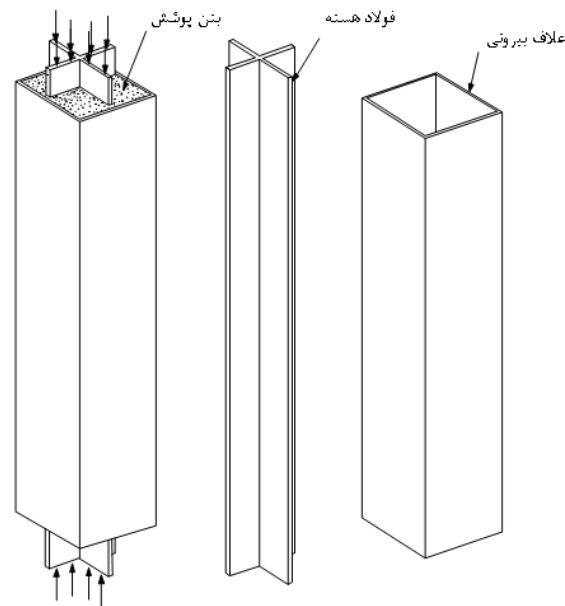
باشد که به فولاد هسته اجازه کمانش در مودهای بالاتر را بدهد. به عبارت دیگر فاصله بین هسته و بتن باید از دامنه برآمدگی ناشی از کمانش کوچکتر باشد.

از سوی دیگر این فاصله نباید آن قدر کوچک باشد که فولاد هسته بر اثر انبساط ناشی از اثر پواسون به بتن محصورکننده بچسبد و بین هسته و بتن اصطکاک به وجود بیاید که این امر موجب انتقال نیروی محوری از هسته به بتن محصور کننده خواهد شد و به تبع آن مکانیزم پیش بینی شده از بین خواهد رفت.

اگر مقطع انتقالی در BRB وجود داشته باشد مطابق شکل ۴ یک فضای خالی داخلی به منظور انبساط و انقباض هسته باید در نظر گرفته شود [۱۵]. اگر این فضای خالی کوچک باشد و یا وجود نداشته باشد در هنگام کشیدگی هسته باعث برخورد فولاد هسته به بتن می‌شود و از ظرفیت باربری و تغییرشکل BRB در حالت کشش می‌کاهد که این مسئله در طراحی بر مبنای ظرفیت امر نامطلوبی می‌باشد. این حالت همچنین می‌تواند باعث ایجاد نیروی نامتعادل کننده در مهاربندهای شورون



شکل ۴- نمایش فضای خالی داخلی به منظور رفتار مطلوب مهاربند در کشیدگی و فشردگی فولاد هسته [۱۵]



شکل ۵- گونه رایج مهاربند نجسبیده [۴]

۳- مدلسازی نمونه واقعی و بررسی صحت آن

یک سری آزمایش‌های محوری تحت بارگذاری‌های متفاوت بر روی مهاربند‌های کمانش‌ناپذیر با مشخصات متفاوت در دانشگاه برکلی انجام پذیرفت [۴]. برای بررسی صحت مدلسازی نمونه واقعی از یکی از این نمونه‌ها استفاده شده است. در شکل ۶ تاریخچه بارگذاری اعمالی بر اساس بارگذاری Near-field در آیین نامه SAC ارائه شده است. مهاربند مورد آزمایش دارای هسته با مقطع مستطیلی است. همچنین مقدار تنش تسلیم در فولاد

هسته برابر $\frac{4185}{cm^2} kg$ و در فولاد محصورکننده برابر

$\frac{3172}{cm^2} kg$ می‌باشد. مقطع هسته برابر

$15/3 \times 1/9 cm$ و مقطع فولاد محصورکننده به شکل قوطی با ابعاد $25 \times 25 \times 0/6 cm$ ساخته شده‌اند. بتن

محصورکننده نیز با تنش فشاری نهایی $\frac{210}{cm^2} kg$

می‌باشد [۴].

۳-۱- شرح المان‌ها و مدلسازی

برای مدلسازی این نمونه از نرم افزار ANSYS9.0 استفاده شده است. در این نرم افزار از سه نوع المان برای مدل کردن سه نوع ماده به کار رفته در مهاربند کمانش‌ناپذیر استفاده شده است. توضیحات تئوریک مربوط به هر المان در بخش معرفی نرم افزار آمده است. در اینجا به جزئیات مدلسازی پرداخته می‌شود. گفتنی است، واحدهای مدلسازی بر حسب کیلوگرم و سانتیمتر می‌باشند.

برای مدلسازی فولاد از المان SHELL 181 که المانی دو بعدی می‌باشد، استفاده شده است. این المان توانایی مدلسازی کرنش‌های غیرخطی بزرگ و دوران‌های بزرگ و خواص غیرخطی مواد و خزش را دارا می‌باشد. مقدار

مدول الاستیسیته فولاد برابر $\frac{2 \times 10^6}{cm^2} kg$ و مقدار

تنش تسلیم برای هسته برابر $\frac{4185}{cm^2} kg$ و برای فولاد

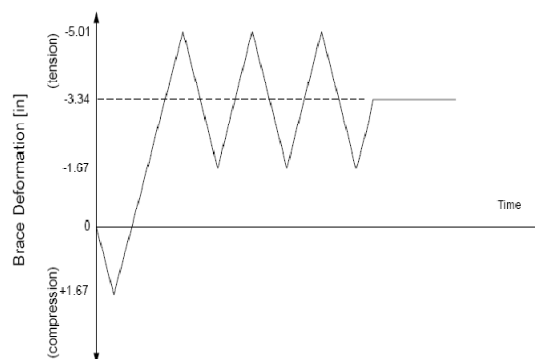
محصورکننده $\frac{3172}{cm^2} kg$ می‌باشد.

با توجه به اینکه در مهاربندهای کماتش‌ناپذیر مقدار اصطکاک تقریباً برابر صفر در نظر گرفته می‌شود (۰/۰۰۱)، مقدار سختی لغزشی عدد بسیار کوچکی لحاظ می‌شود. همچنین مقدار سختی عمودی عدد بزرگ $1000 \frac{kg}{cm}$ وارد می‌شود تا نیروی جانبی به طور کامل به بتن پیرامونی انتقال یابد.

در شکل ۷ منحنی‌های حاصل از کار آزمایشگاهی و نرم‌افزار ANSYS با هم نشان داده شده‌اند.

همان گونه که در شکل مشاهده می‌شود حلقه‌های منحنی هیستریزس رفتاری در دو حالت نرم افزاری و آزمایشگاهی بسیار به هم نزدیک بوده و دارای تطابق خوبی می‌باشد. انحنای بیشتر حلقه‌های حاصل از کار آزمایشگاهی در ناحیه شروع تسلیم ناشی از سرعت کم بارگذاری در حالت واقعی نسبت به حالت نرم افزاری می‌باشد. نکته جالب توجه این است که سختی مهاربند کماتش‌ناپذیر در هر دو حالت آزمایشگاهی و نرم افزاری در سیکل‌های گوناگون بسیار به هم نزدیک و تقریباً با هم برابرند.

آنچه که واضح است در حالت کششی مقاومت مهاربندها با هم تفاوت چندانی ندارند. مقاومت حداکثر کششی در نمونه آزمایشگاهی حدوداً ۴ درصد بیشتر از مدل نرم‌افزاری است. اما مقاومت فشاری حداکثر نمونه آزمایشگاهی حدود ۱۰ درصد از مقاومت فشاری حداکثر مدل نرم افزاری بیشتر است. این تفاوت ناشی از در نظر نگرفتن اصطکاک بین فولاد هسته و بتن مجاور آن می‌باشد. در نمونه واقعی اثر اصطکاک ماده نجسب-هر چند کوچک- وجود دارد. این اصطکاک باعث اندرکنش بین فولاد هسته و بتن محصورکننده در حالت فشاری می‌شود و در نهایت افزایش مقاومت فشاری را در پی خواهد داشت که این امر در نمودارها مشخص است. همچنین نتایج تغییرمکان‌های حاصل از نرم‌افزار اختلاف حدود ۳ درصدی با نتایج آزمایشگاهی دارد.



شکل ۶- تاریخچه بارگذاری حوزه نزدیک آیین‌نامه SAC [۴]

برای مدلسازی حالت الاستوپلاستیک فولاد از مدل دوخطی استفاده شده است. از آنجایی که اطلاعاتی از مقدار شیب ناحیه پلاستیک در منحنی الاستوپلاستیک در دسترس نیست، برابر ۰/۵ درصد مدول الاستیسیته در نظر گرفته می‌شود.

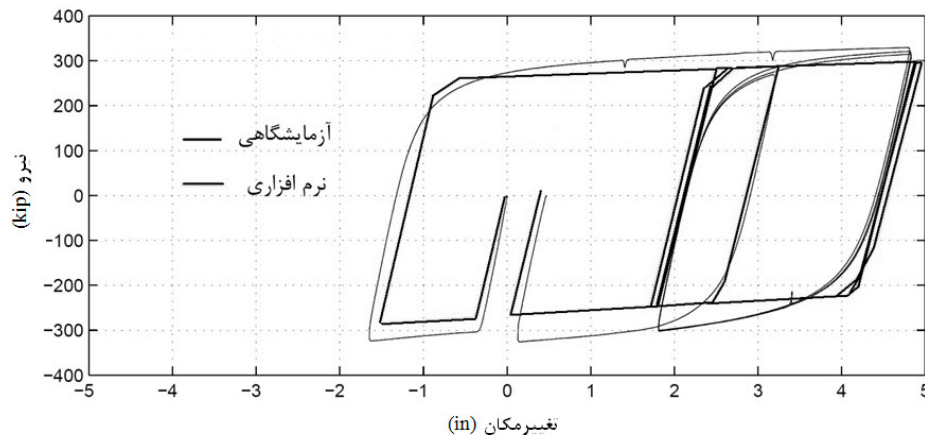
جهت مدلسازی بتن از المان ۳ بعدی SOLID 65 استفاده می‌شود. این المان خاصیت مدلسازی ترک و خردشدگی در بتن و همچنین قرار دادن فولاد در بتن را دارا می‌باشد. اما در این نمونه از بتن غیر مسلح استفاده شده است. همچنین مقدار مدول الاستیسیته بتن برابر

$$\frac{kg}{cm^2} \times 10^5 \times 2/5$$

در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر

است که در مدلسازی بتن فقط مقدار مدول الاستیسیته وارد می‌شود و از تعریف حالات غیرخطی بتن صرف‌نظر می‌شود. به عبارت دیگر بتن در حالت الاستیک مدل می‌شود. این فرض تا قبل از ترک خوردگی بتن معتبر است. بنابراین بعد از انجام تحلیل مقادیر تنش‌ها در بتن محاسبه می‌گردد، تا صحت فرض مذکور بررسی گردد.

برای مدل‌سازی ماده نجسب از المان CONTA178 استفاده شده است. این المان تماس و اصطکاک بین دو گره از المان‌های روبروی هم را برقرار می‌سازد. این المان قابلیت مدلسازی در فضای سه بعدی را نیز داراست. با تعریف سختی عمودی و همچنین سختی لغزشی می‌توان خواص تماسی دو سطح را نسبت به یکدیگر تعریف نمود.

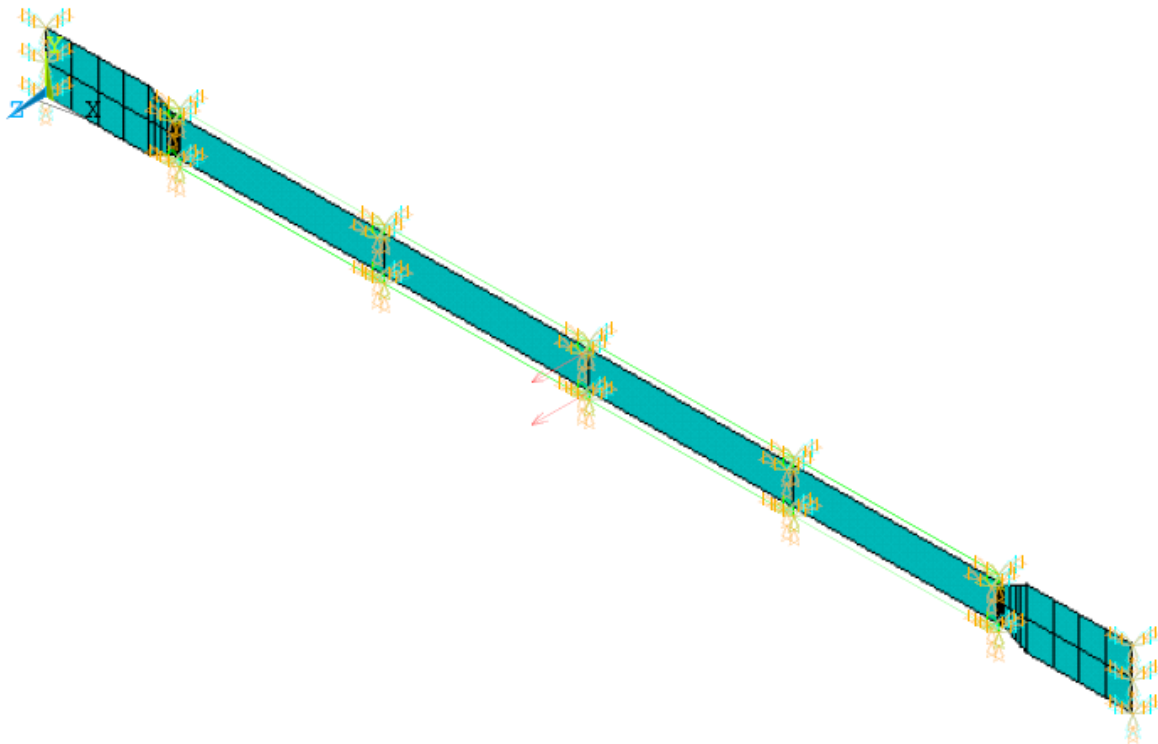


شکل ۷- مقایسه نتایج نیرو- تغییرمکان محوری مهاربند در دو حالت آزمایشگاهی و مدلسازی

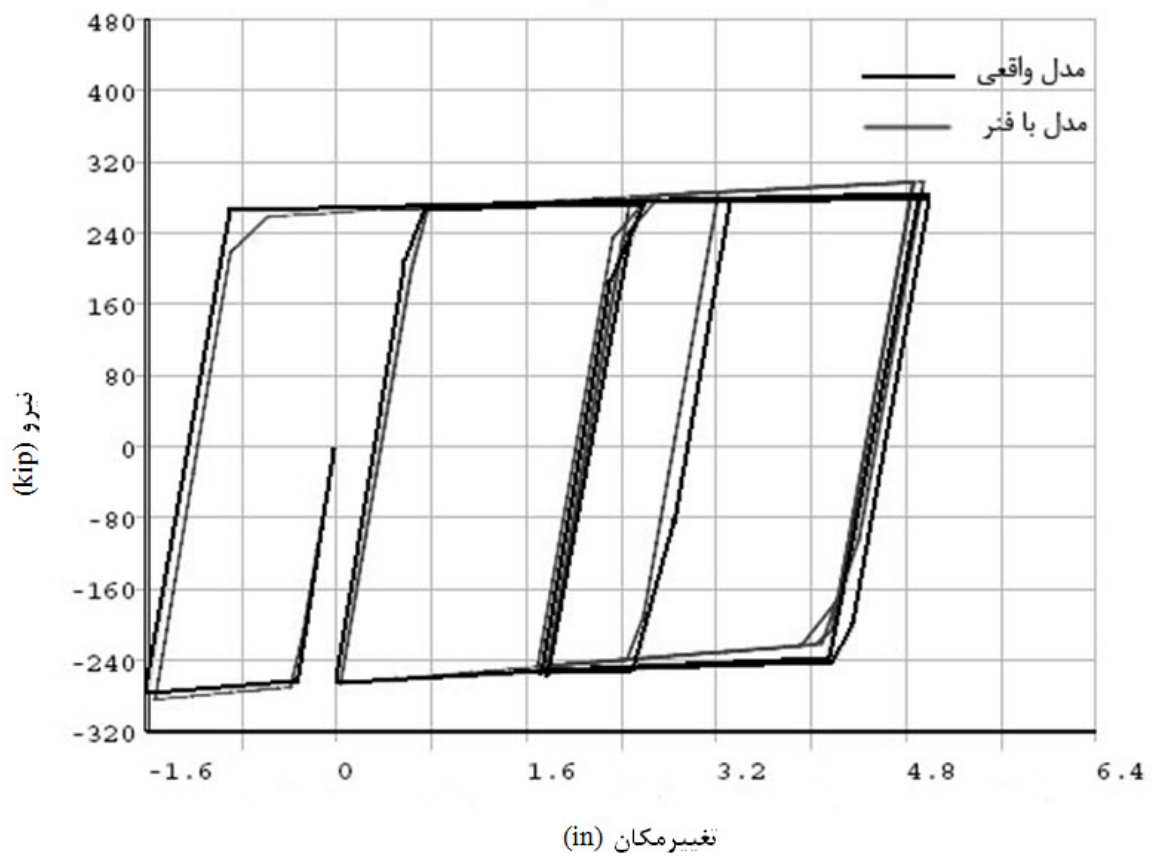
۴- ارائه مدل ساده هسته-فنر

با توجه به این که مدلسازی واقعی و کامل ارائه شده برای مهاربند کمانش ناپذیر کمی مشکل و زمان بر می‌باشد و تحلیل قاب‌هایی با مهاربندهای مقید در برابر کمانش با استفاده از مدل شرح داده شده در بخش قبلی، به دلیل تعداد زیاد المان‌ها و وجود المان‌های ۳ بعدی، از نظر اقتصادی و صرف زمان زیاد، توجیه پذیر نمی‌باشد؛ از این رو یک مدل ساده تر برای مدلسازی مهاربندهای کمانش ناپذیر پیشنهاد گردید که در زیر شرح داده می‌شود. مدل مورد استفاده در این بخش که در ادامه این مقاله از آن استفاده می‌شود برای هسته مستطیلی ارائه شده است. واضح است که انجام مراحل زیر برای دیگر اشکال متفاوت مقطع هسته قابل تسری می‌باشد. در این مدل ساده، هسته فولادی با استفاده از المان SHELL181 ساخته می‌شود. در ادامه به جای مدلسازی ماده نچسب و بتن و فولاد محصورکننده از المان فنر غیر خطی COMBIN39 استفاده می‌شود. این المان قابلیت پذیرش تغییرشکل‌های بزرگ را داراست؛ در نتیجه امکان بررسی کمانش هسته فولادی را برقرار می‌سازد. لازم به ذکر است که در این مورد فنر با خاصیت خطی مدل می‌شود. در این نوع از مدلسازی در هرگره از هسته فولادی محصور شده یک فنر در جهت خارج از صفحه قرار داده می‌شود.

همچنین در گره‌های موجود بر روی اضلاع بالایی و پایینی هسته مستطیلی یک فنر در جهت عرضی صفحه مستطیلی قرار داده می‌شود. مدل ساخته شده با تقسیم المان هسته به ۴ بخش در راستای طولی و ۱ بخش در راستای عرضی در شکل ۸ نشان داده شده است. این المان شامل ۲۰ فنر در دو جهت می‌باشد. باید به این نکته اشاره کرد که تعداد قطعات مش بندی شده و به تبع آن تعداد فنرهای مورد استفاده، تأثیر مستقیم در یافتن مقدار سختی فنر دارد. برای یافتن مقدار سختی فنر، مدل ساخته شده با فنر تحت بارگذاری near-field آیین‌نامه SAC قرار داده می‌شود. با تغییر مقدار سختی فنر می‌توان به یک سختی حداقل دست یافت که بدون وقوع کمانش، منحنی‌های هیستریزس مشابه مدل واقعی حاصل شود. لیکن هرچه مقدار سختی از این عدد بیشتر هم باشد، باز همان منحنی‌های هیستریزس مشاهده می‌شود. در شکل ۹ نمودار نیرو-تغییرمکان محوری حاصل از مدل ساده شده به همراه مدل نمونه واقعی نشان شده است. انطباق بسیار خوب و قابل قبولی در سختی اولیه و ثانویه و همچنین سطح مقاومت در دو مدل دیده می‌شود. همچنین مقدار تغییرمکان‌های نهایی نیز بسیار نزدیک به هم می‌باشند.



شکل ۸- مدل اجزاء محدود هسته فولادی و فنرهای جانبی



شکل ۹- مقایسه نتایج نیرو- تغییر مکان محوری مهاربند در دو حالت مدل نمونه واقعی و مدل با فنر

ناشی از این بارگذاری در هر دو حالت مدل واقعی و مدل با فنر باید یکسان باشد تا انرژی لازم برای کمانش در هر دو حالت یکسان شود. با این اوصاف؛ برای مدل ساخته شده با ۴ قسمت مش‌بندی که دارای ۲۰ فنر می‌باشد، مقدار سختی محوری فنرها $10000 \frac{kg}{cm}$ به دست می‌آید. برای یافتن سختی معادل دیگر مدل‌ها با انواع مختلف مش‌بندی نیز می‌توان از روش بالا استفاده نمود. برای مدلی با تقسیم بندی طول هسته به ۸ قسمت و ارتفاع هسته به ۱ قسمت که دارای ۳۶ فنر می‌باشد، سختی محوری فنرها برابر $5000 \frac{kg}{cm}$ به دست آمد. همچنین برای هسته فولادی با تقسیم بندی هسته به ۱۶ قسمت در طول و ۱ قسمت در ارتفاع هسته، مقدار سختی محوری فنرها $2500 \frac{kg}{cm}$ حاصل شده است. با توجه به روند اعداد فوق می‌توان نتیجه گرفت که مقدار ثابت فنر ضربدر تعداد فنرها - با توجه به سری و موازی بودن فنرها - برای یک مقطع مشخص از مهاربند کمانش‌ناپذیر عدد ثابتی می‌باشد.

۵- نتیجه گیری

مدلسازی مهاربندهای کمانش‌ناپذیر به صورت واقعی - کامل علاوه بر وقت گیر بودن، زمان تحلیل و حجم اطلاعات خروجی را زیاد می‌کند. به منظور جلوگیری از معایب فوق مدل ساده فولاد هسته-فنر در این مقاله ارائه شده است. با توجه به انجام تحلیل غیرخطی دینامیکی بر روی مدل واقعی-کامل و مدل ساده شده می‌توان نتیجه گرفت:

۱- مدل تحلیلی کامل برای مهاربند کمانش‌ناپذیر ارائه گردید، مدلسازی فوق تطابق بسیار خوبی با نمونه آزمایشگاهی دارد.

اگر مقدار تقسیمات فولاد هسته آنقدر ریز باشد که بار کمانشی هسته بزرگتر از نیروی تسلیم هسته باشد، می‌توان در بعضی گره‌ها از قرار دادن فنر صرف‌نظر کرد. نیروی کمانش یک هسته با مقطع مستطیل شکل در جهت ضعیف آن به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E_i b t^3}{12 L^2} \quad (1)$$

که در این رابطه E_i ، t ، b و L به ترتیب مدول الاستیسیته فولاد هسته، ارتفاع مقطع، عرض مقطع و طول یک المان می‌باشند. مقدار نیروی تسلیم هسته فولادی نیز با تنش تسلیم σ_y از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_y = b t \cdot \sigma_y \quad (2)$$

با بزرگتر قرار دادن رابطه ۱ نسبت به رابطه ۲ می‌توان حداقل طول مش‌بندی را که تمام گره‌های آن نیاز به فنر دارد را محاسبه کرد:

$$L \leq \frac{\pi t}{\sqrt{\frac{12 \sigma_y}{E_i}}} \quad (3)$$

واضح است که چنانچه در هسته فولادی ابعاد مش‌بندی کوچکتر از L به دست آمده از رابطه ۳ باشد، فنرها باید به گونه‌ای در گره‌ها قرار داده شوند که فاصله آنها از یکدیگر از L بیشتر نشود. بنابر این پیشنهاد می‌شود که در صورت امکان ابعاد المان‌ها در مدلسازی معادل مقدار به دست آمده از رابطه ۳ انتخاب شود.

برای یافتن عدد یگانه برای سختی فنرها، یک بارگذاری عرضی در جهت ضعیف مهاربند بر روی آن انجام می‌شود. در آزمایش‌های گوناگون در دسترس کمانش در ناحیه محصور شده گزارش نشده است و خرابی‌ها در صورت وجود در نواحی اتصال با دوران‌های خیلی زیاد رخ داده است. از آنجایی که کمانش عضو محوری مهاربند به صورت یک تغییر مکان خارج از صفحه بروز می‌نماید، لذا یک بارگذاری عرضی در جهتی که احتمال کمانش می‌رود بر روی هسته فولادی انجام می‌شود. تغییر مکان عرضی

فشاری هسته شود، در آن صورت قرار دادن فنر در تمامی گره‌ها الزامی نمی باشد.

۴- رابطه‌ای اولیه جهت انتخاب ابعاد المان‌ها در مدل ساده هسته-فنر توصیه گردید.

۵- عدد ثابت فنر با اندازه مش‌بندی هسته فولادی نسبت عکس دارد. یعنی اگر مقدار تقسیمات هسته ۲ برابر شود، مقدار ثابت فنر نصف می‌شود.

۲- ایجاد فنر در هر دو جهت عرضی مقطع مانع از کمانش فولاد هسته می‌شود و تسلیم فشاری در هسته فولادی همانند نمونه واقعی رخ می‌دهد.

۳- در طول فولاد هسته در تمام نقاط مش‌بندی باید از فنر در هر دو جهت استفاده نمود. عدم به کارگیری فنر در فقط ۱ گره نیز موجب کمانش هسته فولادی خواهد شد. در صورتی که هسته آنقدر ریز مش‌بندی شود که بار کمانشی متناسب با طول هر المان بیشتر از نیروی تسلیم

مراجع

- Clark, P., Aiken, I., Kasai, K., Ko, E. and Kimura, I., (1999), "Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices ", Proc. 69th Annual Convention of SEAOC, Sacramento, CA.
- Kelly, J. M., Skinner, R. I., and Heine, A. J., (1972), "Mechanism of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures ", Bull. N.Z. Nat. Soc. Earthquake Eng. 5(3):63-88.
- Skinner, R. I., Kelly, M. J., and Heine A. J., (1975), "Hysteretic dampers for earthquake-resistant structures ", Earthquake Engng and Struct. Dyn. 3:287-96.
- Black, C. J., Markis, N., and Aiken, I., (2002), "Component testing, stability analysis and characterization of Buckling-Restrained Unbonded Braces ", Technical Rep. No. PEER Report 2002/8, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California at Berkeley, Berkeley, Calif.
- Markis, N., (2002), "Plastic torsional buckling of a cruciform column ", J. Engrg. Mech. ASCE. Inreview.
- Lopez, W. A., Gwie, D. S., Saunders, C. M., Lauck, T.W., (2002), "Lessons learned from large-scale tests of unbonded braced frame subassemblages ", Proceedings 71st Annual Convention, Structural Engineers Association of California, Sacramento, California.
- Choi, H., Kim, J., (2006), "Energy-based seismic design of buckling-restrained braced frames using hysteretic energy spectrum ", Engineering Structures, 28(2006), 304-311.
- AISC, (2005), "Seismic provisions for structural steel buildings ", Chicago.
- Fahnestock, L. A., Sause, R., and Ricles, J. M., (2006), "Seismic response and performance of buckling-restrained braced frames ", Journal of Structural Engineering, ASCE, September 2007, pp. 1195-1204.
- شمشادیان، م.، ا.، وفایی، د.، زهرایی، س.، م.، " اثرات Forward Directivity و Fling Step در ارزیابی پارامترهای کنترل قاب های مهاربندی شده ی کمانش ناپذیر"، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، ۱۴ تا ۱۶ اردیبهشت ۱۳۸۹، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.
- Kimura, K., Takeda, Y., Yoshida, K., Furuya, N., and Takemoto, Y., (1976), "An experimental study on braces encased in steel tube and mortar ", Annual Meeting of the Architectural Institute of Japan (in Japanese).
- Uang, C., M., and Nakashima, M., (2003), "Steel buckling-restrained braced frames ", In Earthquake Engineering: Recent Advances and Applications, Chapter 16, Y.Bozorgnia and V.V. Bertero, eds, CRC Press, Publication Pending.

13. Iwata, M., Kato, T., Wada, A., (2000), "Buckling-restrained braces as hysteretic dampers", In Proceedings of Third International Conference on Behavior Steel Structures in Seismic Areas (STESSA 2000), Montreal, Canada, 33-38. Rotterdam; and Brookfield, Vt.: A.A. Balkema.
14. Staker, R., and Reaveley, L.D., (2002), "Selected study on unbonded braces ", Proceedings, Seminar on Response Modification Technologies for Performance-Based Seismic Design, ATC-17-2, ATC and MCEER, pp.339-349.
15. Tremblay, R., Degrange, G., and Blouin, J., (1999), "Seismic rehabilitation of a four-story building with a stiffened bracing system ", Proc. 8th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, pp.549-554.
16. Chen, C.C., Chen, S.Y., and Liaw, J.J., (2001a), "Application of low yield strength steel on controlled plastification ductile concentrically braced frames ", Canadian Journal of Civil Engineering, 28, 823-836.
17. Watanabe, A., Hitomoi, Y., Saeki, E., Wada, A., Fujimoto, M., (1988), "Properties of braced encased in buckling-restraining concrete and steel tube ", In Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol. IV, 719-24. Tokyo: 9WCEE Organizing Committee, Japan Association for Earthquake Disaster Prevention.
18. Chen, C.C., (1999), "Recent Advances of seismic Design of Steel Building in Taiwan ", International Training Programs for Seismic Design of Building Structures Hosted by National Center for Research on Earthquake Engineering Sponsored by Department of International Programs, National Science Council.