

نقش المان‌های با رفتار شکل‌پذیر در عملکرد لرزه‌ای قاب‌های دارای مهاربند همگرا

مرتضی نقی پور^{۱*}، سید رضا سلیم بهرامی^۲، مرضیه نعمتی^۳

۱. دانشیار، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۳. دانشجوی دکترا، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

n-naghi@nit.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۳/۱]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۲/۹/۹]

چکیده- در این پژوهش، سعی شده است تا نوع جدیدی از مستهلک کننده‌های انرژی معرفی شود. این مستهلک کننده متشکل از یک حلقه که موجب افزایش شکل‌پذیری و جذب انرژی زلزله شده، در سازه‌های مهاربندی قابل نصب است. همچنین در هنگام وقوع زلزله، عضو مستهلک کننده قسمت قابل توجهی از انرژی ورودی به سازه را با ورود به مرحله غیر خطی و تشکیل مفاصل خمیری خمشی، مستهلک کرده و بدین صورت از ورود دیگر اعضای سازه به مرحله غیر خطی و همچنین کماتش اعضای مهاربندی جلوگیری، یا آن را به تعویق می‌اندازد. برای افزایش ظرفیت باربری این عضو نیز، از یک قوطی که به وسیله صفحات اتصال به حلقه شکل‌پذیر متصل می‌شود، استفاده شده است. با افزایش قطر میزان شکل‌پذیری آن کاهش یافته و با افزایش ضخامت حلقه میزان شکل‌پذیری آن افزایش می‌یابد. تنش‌ها و تغییر شکل‌ها با استفاده از تحلیل غیر خطی به روش المان‌های محدود و تحت اثر بارهای رفت و برگشت، مطالعه شده است. منحنی‌های هیستریسیس به دست آمده حاکی از آن است که المان معرفی شده می‌تواند به عنوان یک عضو جاذب انرژی و همچنین یک فیوز برای کنترل کماتش یک بادبند عمل کند، ضمن آنکه شکل‌پذیری لازم را نیز تامین کند. همچنین عملکرد المان پیشنهادی در یک قاب دو بعدی با مهاربند همگرا تحت تحلیل استاتیکی غیرخطی بررسی شد که نتایج به دست آمده حاکی از کاهش برش پایه و افزایش شکل‌پذیری در سازه است.

واژگان کلیدی: مهاربند همگرا، حلقه‌های شکل‌پذیر، المان محدود، تحلیل استاتیکی غیرخطی.

۱- مقدمه

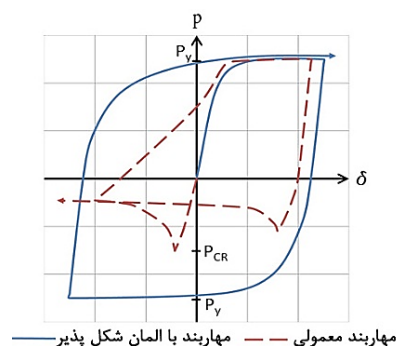
رفع نقطه ضعف مهاربندهای هم‌مرکز و تامین شکل‌پذیری مطلوب آن‌ها تحقیقات گسترده‌ای در دو دهه گذشته به وسیله پژوهشگران صورت گرفته است و روش‌های مختلفی برای افزایش شکل‌پذیری این مهاربندها به وسیله پژوهشگران مختلف پیشنهاد شده است. که هریک به گونه‌ای کوشیده‌اند که میزان شکل‌پذیری بادبندهای هم‌مرکز را بهبود بخشند.

یکی از این روش‌ها استفاده از فیوزها است. فیوزها به شکل‌های مختلف با عملکردهای متفاوت خمشی، برشی و یا پیچشی ساخته می‌شوند. البته بیشتر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه روی عملکرد خمشی استوار بوده است.

تأمین شکل‌پذیری سازه‌ها متأثر از رفتار غیرخطی اعضا و اتصالات آن در زمان وقوع زلزله است که تعمیر و بازسازی آن بعد از وقوع زلزله، تابع گستردگی المان‌های مقاوم درکل سازه خواهد بود. به همین دلیل تعمیر و بازسازی سازه‌های خمشی از هزینه قابل ملاحظه‌ای برخوردار است [۱].

در مقابل، قاب‌های فولادی مهاربندی شده هم‌مرکز از شکل‌پذیری مطلوب برخوردار نیستند ولی اعضای آسیب‌پذیر آن در مقابل زلزله محدود و در نتیجه بازسازی آنها بسیار کم هزینه‌تر از قاب‌های خمشی است. به منظور

نتایج به دست آمده نشان از عملکرد مناسب آن در کاهش برش پایه و همچنین کاهش ضریب رفتار سازه با وجود المان پیشنهادی در مهاربند همگرا است.



شکل (۱) مقایسه رفتار مهاربندهای معمولی با مهاربندهای دارای المان شکل‌پذیر در برابر کماتش

۲- معرفی المان پیشنهادی

المان مورد نظر مطابق شکل ۲ از یک حلقه به شعاع r طول L و ضخامت t و دو صفحه اتصال به ضخامت ۲ سانتی‌متر و به طول ۱۰ سانتی‌متر، که برای اتصال دو نیم قوطی به حلقه استفاده می‌شوند. در انتخاب نوع فولاد لوله باید از نوع فولاد نرم بهره برد. منظور از فولاد نرم، فولادی با تنش تسلیم کمتر از ۲۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و کرنش نهایی بیشتر از ۴۰ درصد است. با توجه به فولاد موجود در بازار، لوله مورد نظر از نوع CT20 که از نظر مشخصات کمی سخت‌تر از فولاد St37 است، انتخاب شد. مشخصات مکانیکی این لوله که با نام مانیسمن (بدون درز) مشهور است مطابق جدول ۱ است [۱].

به همین منظور حلقه‌ها، از نوع لوله مانیسمن (بدون درز) در نظر گرفته شده است.

جدول (۱) مشخصات مکانیکی اعضا [۶]

مدول الاستیسیته (kg/cm^2)	E_u	F_y (kg/cm^2)	F_u (kg/cm^2)	
حلقه	۲۱۰۰۰۰۰	۳۰۰۰	۴۸۰۰	
St37	۲۱۰۰۰۰۰	۲۴۰۰	۳۷۰۰	

از انواع مختلف المان‌های خمشی، المان زانویی و بادبندهای دارای المان زانویی است که بالندرا^۱ در طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۷ پژوهش‌های زیادی روی این المان انجام داد [۲].

از جمله روش‌های دیگر استفاده از المان‌های خمشی، استفاده از المانی با رفتار خمشی ساخته شده از صفحات مثلی شکل فولادی است که به وسیله تی سای^۲ و همکارانش در سال ۱۹۹۳ طراحی و مورد آزمایش قرار گرفت [۳].

در سال ۲۰۰۳ سانگ ون پی^۳ و همکاران روی صفحات لوزی شکل و با استفاده از فولاد شکل‌پذیر پژوهشی را انجام دادند [۴]. در این المان‌ها با توجه به خاصیت فولاد و جاری شدن یکنواخت آن، جهت انتخاب شکل مناسب این اعضا، استفاده می‌شود.

نوع جدیدی از المان‌های خمشی، المان حلقوی است که در این زمینه عباس نیا و همکاران پژوهش ارزشمندی را انجام داده‌اند [۱ و ۵].

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که عملکرد این المان سبب افزایش شکل‌پذیری در قاب‌های دارای مهاربند همگرا می‌شود، لیکن توان باربری المان حلقه محدود بوده و با افزایش قطر میزان شکل‌پذیری آن کاهش یافته و با افزایش ضخامت حلقه میزان شکل‌پذیری آن افزایش می‌یابد.

در این پژوهش به بررسی افزایش توان باربری حلقه با استفاده از المان‌های شکل‌پذیر پرداخته شده است، تا المان جدید مانند یک فیوز برای محدوده بارهای متنوع عمل کرده و از ورود دیگر اعضای سازه به مرحله غیرخطی جلوگیری نماید. رفتار مهاربندهای معمولی و دارای المان شکل‌پذیر قاب با مهاربند همگرا به صورت شماتیک در شکل ۱ به نمایش گذاشته شده است.

همچنین برای بررسی عملکرد المان پیشنهادی در قاب‌های ساختمانی، از تحلیل استاتیکی غیرخطی استفاده شده است.

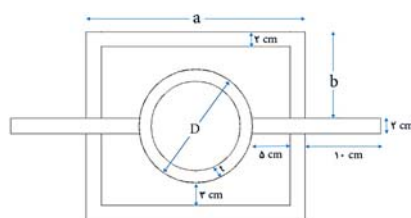
1. Balendra
2. Tsai
3. sung wen-pei

که شامل ۳ تیپ قطر با ابعاد ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی متر و ۵ تیپ ضخامت با ابعاد ۱، ۱/۲، ۱/۴، ۱/۶ و ۱/۸ مطابق جدول ۲ است.

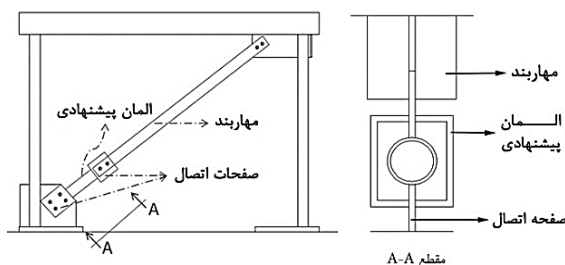
پس از بررسی رابطه میزان شکل پذیری با ابعاد هندسی المان مورد نظر، به مقایسه میزان اتلاف انرژی المان پیشنهادی متشکل از یک حلقه مانیسمان (بدون درز) با قطر ۲۲ سانتی متر و ضخامت ۱/۲ سانتی متر و طول ۱۰ سانتی متر به همراه دو نیم قوطی به ضخامت ۲ و طول ۱۰ سانتی متر با المان شامل یک حلقه مانیسمان (بدون درز) با قطر ۲۲ سانتی متر و ضخامت ۱/۲ سانتی متر و طول ۱۰ سانتی متر مطابق با کار تحلیلی کافی [۱]، پرداخته شده است.

جدول (۲) مشخصات نمونه های المان پیشنهادی

نام نمونه	D(cm)	t(cm)	a(cm)	b(cm)
DE*-15-1	15	1	29	11.5
DE-15-1.2	15	1.2	29	11.5
DE-15-1.4	15	1.4	29	11.5
DE-15-1.6	15	1.6	29	11.5
DE-15-1.8	15	1.8	29	11.5
DE-20-1	20	1	34	14
DE-20-1.2	20	1.2	34	14
DE-20-1.4	20	1.4	34	14
DE-20-1.6	20	1.6	34	14
DE-20-1.8	20	1.8	34	14
DE-25-1	25	1	39	16.5
DE-25-1.2	25	1.2	39	16.5
DE-25-1.4	25	1.4	39	16.5
DE-25-1.6	25	1.6	39	16.5
DE-25-1.8	25	1.8	39	16.5

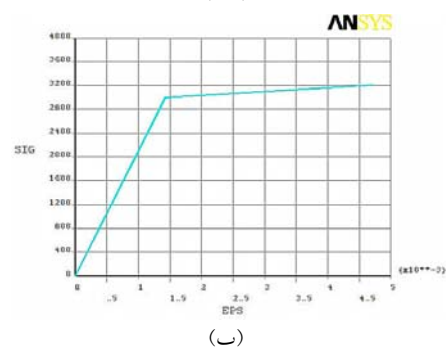
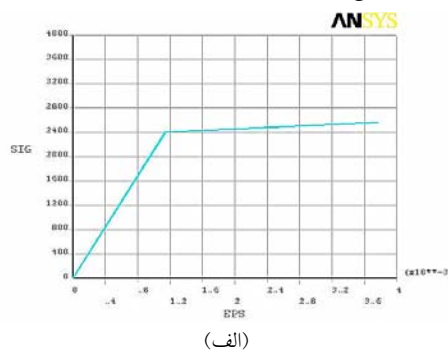


شکل (۳) المان پیشنهادی [۶]



شکل (۴) چگونگی قرارگیری المان پیشنهادی در قاب [۶]

همچنین از مدل تنش-کرنش دو خطی کینماتیک^۴ مطابق با شکل ۲ برای مدل سازی منحنی تنش-کرنش و چگونگی سخت شوندگی اعضا استفاده شده است.



شکل (۲) نمودار تنش-کرنش (الف) St37 (ب) حلقه در نرم افزار ANSYS

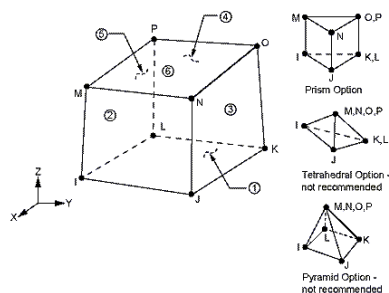
شکل ۴ چگونگی قرارگیری المان پیشنهادی در نقطه اتصال یک مهاربند قطری به صفحه اتصال گوشه را نمایش می دهد. به منظور نصب المان مورد نظر به انتهای مهاربند، لازم است که حلقه فولادی و دو نیم قوطی مطابق شکل ۳، به صفحات اتصال جوش داده تا امکان قرار گرفتن آن در انتهای مهاربند میسر شود. آزمایش های انجام شده روی المان پیشنهادی جوش شده با صفحات اتصال مختلف، شکل پذیری زیاد و عملکرد بسیار خوب آن ها را نشان داده است. صفحات متصل به المان می توانند با استفاده از جوش و یا پیچ به مهاربند و صفحه اتصال گوشه مطابق شکل ۴ نصب شوند.

در ابتدای این پژوهش، ۱۵ مدل از اتصال پیشنهادی ساخته شده است. تفاوت این مدل ها در ابعاد هندسی حلقه های فولادی شکل پذیر به کار رفته در مدل ها است

۱-۲- مدل‌سازی و مطالعه عملکرد المان

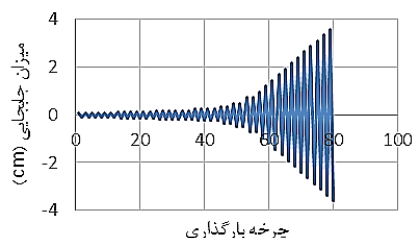
پیشنهادی

به منظور بررسی عملکرد المان شکل‌پذیر، تحت اثر بارهای رفت و برگشت زلزله، ابتدا حلقه به تنهایی و سپس مدل پیشنهادی با مشخصات گفته شده و به صورت سه بعدی در نرم افزار ANSYS [۷] مدل شدند. در نرم افزار ANSYS از المان solid185 که یک المان سه بعدی است، برای مدل‌سازی استفاده شده است. این المان دارای ۸ گره بوده که هر گره دارای سه درجه آزادی انتقالی شامل ux و uy و uz است و قادر است تمام تنش‌ها، نیروهای داخلی، بارگذاری داخل و خارج صفحه را در تحلیل‌های غیرخطی نشان دهد. شکل ۵ هندسه المان solid185 را نشان می‌دهد.



شکل (۵) هندسه المان solid185 [۷]

بارگذاری اعمالی براساس آیین‌نامه ATC40 [۸] است و این بارگذاری از مقادیر کم جابه‌جایی (۵/۰ میلی‌متر) شروع می‌شود. نمودار این بارگذاری رفت و برگشتی در شکل ۵ نشان داده شده است. [۶]



شکل (۶) چرخه بارگذاری در آیین‌نامه ATC40 [۸]

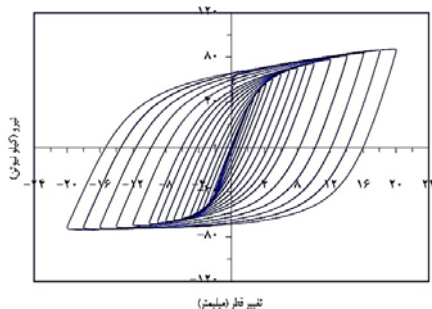
۲-۲- نتایج و منحنی هیستریزیس حلقه

برای صحت سنجی مدل المان پیشنهادی در این پژوهش، ابتدا یک حلقه فولادی با توجه به مشخصات مکانیکی ذکر شده در جدول ۱، با قطر ۲۲، ضخامت ۱/۲ و طول ۱۰

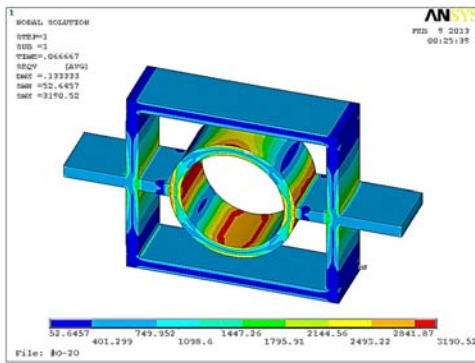
سانتی‌متر در نرم افزار ANSYS مدل‌سازی شد. المان حلقه را تحت بارگذاری آیین‌نامه ATC40 مطابق شکل ۶ قرار گرفته است.

همچنین از نتایج آزمایشگاهی برای صحت سنجی حلقه مورد نظر استفاده شده است [۹]. در روش آزمایشگاهی، لوله مانیسمان (بدون درز) تهیه شده، ۱۰ سانتی‌متر جدا شده و به صفحات فولادی به ابعاد ۱۶×۱۶×۱/۲ سانتی‌متر جوش داده شد. بارگذاری حلقه‌ها به صورت چرخه‌ای و از تغییر مکان‌های کم شروع و تا تغییر مکان شکست ۲ سانتی‌متر ادامه داشته است. این مرحله از آزمایش‌ها، در مدت چهار آزمایش و برای بررسی میزان شکل‌پذیری، ظرفیت باربری و کمینه تغییر قطر حلقه انجام شده است. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که تأثیر نوع عملکرد حلقه فولادی در انتهای یک مهاربند جوش بر نتایج کم است. در ادامه و در مدت دو آزمایش در مقیاس کامل، عملکرد حلقه فولادی در انتهای یک مهاربند قطری بررسی شده است. نتایج نشان داده است که حلقه فولادی دارای شکل‌پذیری زیاد و عملکرد بسیار خوب به عنوان کنترل کننده کمانش مهاربند بوده است [۹].

همان‌گونه که مشاهده می‌شود منحنی هیستریزیس نیرو-تغییر قطر قائم حلقه فولادی به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی مطابق شکل ۷ دارای حلقه‌های پهن بوده که نشان دهنده میزان قابلیت جذب انرژی به وسیله حلقه است. منحنی هیستریزیس نیرو-تغییر قطر قائم حلقه فولادی حاصل از بررسی تئوری حلقه فولادی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS مطابق شکل ۸ نشان دهنده وجود شکل‌پذیری مناسب در این حلقه است.

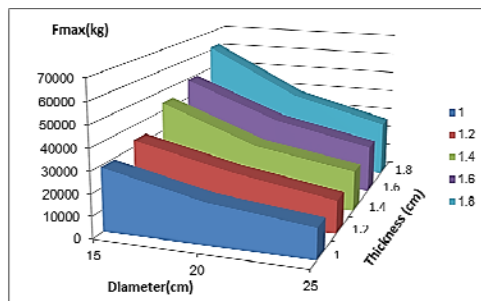


شکل (۷) منحنی هیستریزیس نیرو - تغییر قطر قائم حلقه فولادی (آزمایشگاهی) [۹]

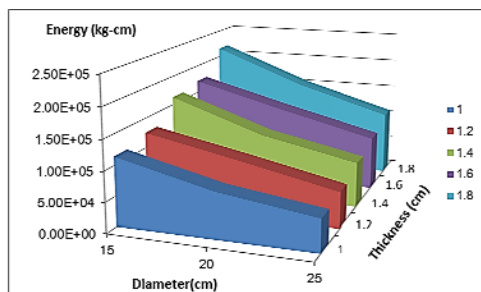


شکل (۱۰) توزیع تنش فون میزس در المان پیشنهادی

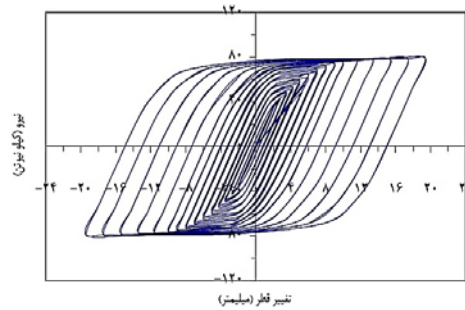
نتایج به دست آمده از مدل سازی ۱۵ المان با ابعاد هندسی گفته شده مطابق شکل های ۱۱ و ۱۲ نشان می دهد که با کوچکتر شدن قطر حلقه و افزایش ضخامت حلقه میزان نیرو و استهلاک انرژی هم افزایش می یابد. برای رسیدن به رابطه ای مناسب بین نیرو قابل تحمل به وسیله ی المان پیشنهادی و استهلاک انرژی آن با نسبت ضخامت به قطر حلقه، از رگرسیون درجه دو مطابق شکل ۱۳ و شکل ۱۴ استفاده شده است.



شکل (۱۱) نمودار نیروی قابل تحمل به وسیله ی المان پیشنهادی



شکل (۱۲) نمودار میزان استهلاک انرژی به وسیله ی المان پیشنهادی

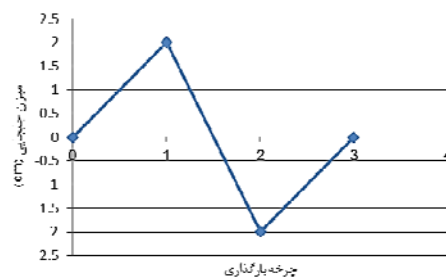


شکل (۸) منحنی هیسترسیس نیرو-تغییر قطر قائم حلقه (تحلیلی)

مطابق با شکل های ۶ و ۷، شاهد انطباق بسیار خوب پوش منحنی هیسترسیس نیرو-تغییر قطر قائم تحلیلی حلقه و منحنی متناظر آزمایشگاهی آن هستیم که بیانگر قابلیت بالای نرم افزار ANSYS به عنوان نرم افزار اجزای محدود برای تحلیل غیرالاستیک حلقه است.

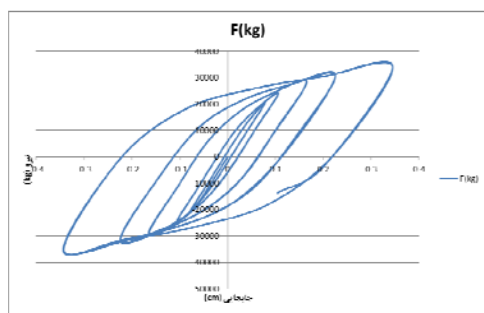
۳-۲- نتایج و منحنی هیسترسیس المان پیشنهادی

المان پیشنهادی با ابعاد گفته شده، تحت یک سیکل بارگذاری مطابق شکل ۹ قرار گرفته اند و منحنی نیرو-تغییر قطر قائم حلقه و میزان اتلاف انرژی به عنوان خروجی تحلیل در نظر گرفته شده است.

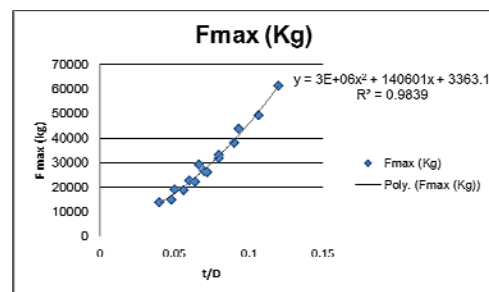


شکل (۹) تاریخچه بارگذاری برای المان پیشنهادی

توزیع تنش فون میزس در المان پیشنهادی تحت بارگذاری یک سیکل مطابق شکل ۹، در شکل ۱۰ به نمایش گذاشته شده است. همان گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می شود تنش های محیطی داخل حلقه بزرگتر از تنش های محیطی خارج آن بوده و بدین سان انتظار می رود شکست از داخل شروع و به محیط خارجی برسد. در ضمن به دلیل اینکه تحمل فلزات در فشار کمتر از کشش است، بنابراین شکست هنگامی رخ می دهد که حلقه تحت فشار قرار دارد و سطح داخلی بیشترین تنش فشاری را تحمل می کند.



شکل (۱۶) منحنی هیستریزس المان پیشنهادی

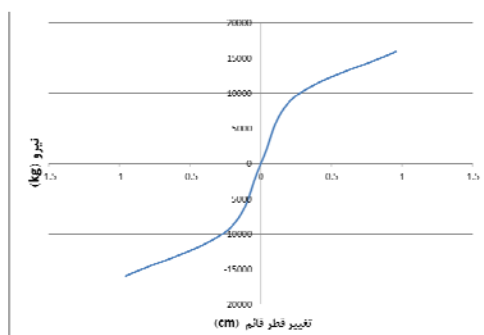


شکل (۱۳) رابطه بین نیروی قابل تحمل به وسیله‌ی المان پیشنهادی به نسبت ضخامت به قطر آن

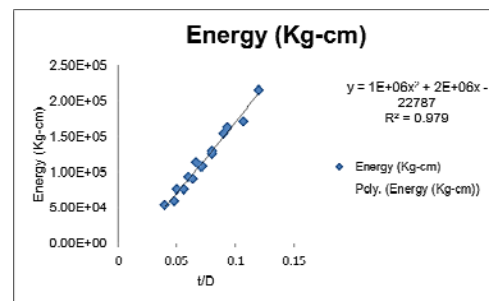
۳- مقایسه المان پیشنهادی با المان دارای حلقه تک

در این قسمت به مقایسه المان پیشنهادی با المان دارای حلقه تک پرداخته شده است. به همین منظور المان پیشنهادی را از یک حلقه مانیسما (بدون درز) با قطر ۲۲ سانتی‌متر و ضخامت ۱/۲ سانتی‌متر و طول ۱۰ سانتی‌متر به همراه دو نیم قوطی به ضخامت ۲ و طول ۱۰ سانتی‌متر با المان متشکل از یک حلقه مانیسما (بدون درز) با قطر ۲۲ سانتی‌متر و ضخامت ۱/۲ سانتی‌متر و طول ۱۰ سانتی‌متر به مقایسه شده است.

هر دو المان را تحت بارگذاری آیین نامه ATC40 مطابق شکل ۶ قرار گرفته و منحنی نیرو - تغییر قطر قائم حلقه و میزان استهلاک انرژی به عنوان خروجی های تحلیلی نرم‌افزار ANSYS در نظر گرفته شده است. منحنی نیرو- تغییر قطر قائم حلقه و منحنی هیستریزس المان پیشنهادی به ترتیب در شکل های ۱۶ و ۱۷ نشان داده شده است.

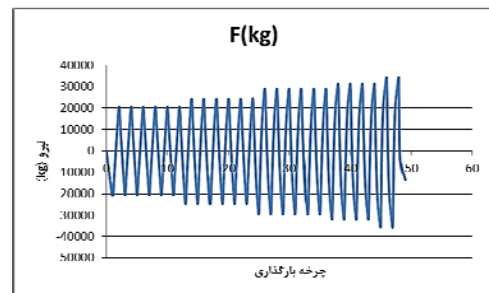


شکل (۱۷) منحنی نیرو- تغییر قطر قائم حلقه المان



شکل (۱۴) رابطه بین میزان استهلاک انرژی المان پیشنهادی به نسبت ضخامت به قطر آن

شکل ۱۵ عملکرد یکسان مدل در کشش و فشار را نشان می‌دهد، که این نکته قابلیت اعتماد به مدل پیشنهادی را بیانگر است. مطابق شکل ۱۶ منحنی هیستریزس یک المان نمونه پیشنهادی با قطر حلقه ۱۵ سانتی‌متر و ضخامت ۸/۱ سانتی‌متر رسم شده است. منحنی هیستریزس المان نمونه بسیار پهن و منظم است که نشان دهنده جذب انرژی خوب مدل است.



شکل (۱۵) پاسخ نیرو به جابه‌جایی

$$E_p = 17964.74 \quad \text{Kg - Cm} \quad (2)$$

نسبت انرژی در آخرین چرخه بارگذاری (پلاستیک) به آخرین چرخه الاستیک می‌شود:

$$\frac{E_p}{E_E} = \frac{17964.74}{188.13} = 95.5 \quad (3)$$

مجموع انرژی ۲۳ چرخه بارگذاری:

$$\sum_{i=1}^{23} E_i = 3353.42 \quad \text{Kg - Cm} \quad (4)$$

مجموع انرژی ۵۸ چرخه بارگذاری:

$$\sum_{i=1}^{58} E_i = 123550.83 \quad \text{Kg - Cm} \quad (5)$$

متوسط انرژی هر چرخه بارگذاری در ناحیه پلاستیک:

$$\bar{E}_p = \frac{\sum_{i=1}^{58} E_i - \sum_{i=1}^{23} E_i}{58 - 23} = \frac{123.6 - 3.4}{35} \times 10^3 = 3434.212 \quad (6)$$

متوسط انرژی هر چرخه بارگذاری در ناحیه الاستیک:

$$\bar{E}_E = \frac{\sum_{i=1}^{23} E_i}{23} = \frac{3353.42}{23} = 145.80 \quad (7)$$

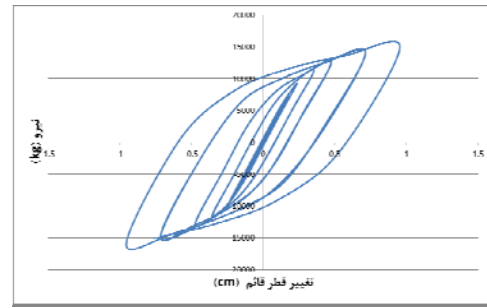
نسبت متوسط انرژی پلاستیک به متوسط انرژی الاستیک هر چرخه بارگذاری:

$$\frac{\bar{E}_p}{\bar{E}_E} = \frac{3434.212}{145.80} = 23.55 \quad (8)$$

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود انرژی در آخرین چرخه بارگذاری ۹۵/۵ برابر انرژی در آخرین چرخه الاستیک و متوسط انرژی هر چرخه بارگذاری ۲۳/۵۵ برابر متوسط انرژی هر چرخه بارگذاری در ناحیه الاستیک است. این مقایسه بیانگر قابلیت بالای حلقه در جذب انرژی زلزله و استهلاک آن است. نسبت انرژی پلاستیک مدل پیشنهادی به مدل حلقه تنها با قطر ۲۲ سانتی‌متر در آخرین چرخه برابر است با:

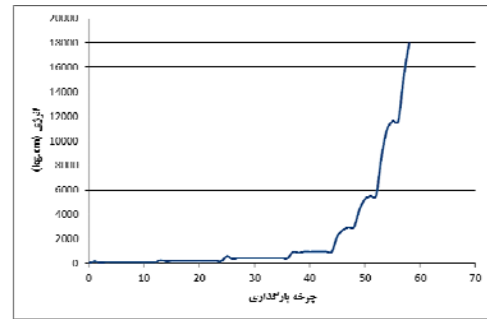
$$\frac{(E_p)_{with-box}}{(E_E)_{without-box}} = \frac{17964.74}{6558.47} = 2.73 \quad (9)$$

مقایسه نتایج به دست آمده از المان پیشنهادی با نتایج به دست آمده از کار آزمایشگاهی [۱] نشان می‌دهد، که مقدار جذب انرژی در المان پیشنهادی ۲/۷۳ برابر شده است که حاکی از افزایش شکل‌پذیری این المان است.

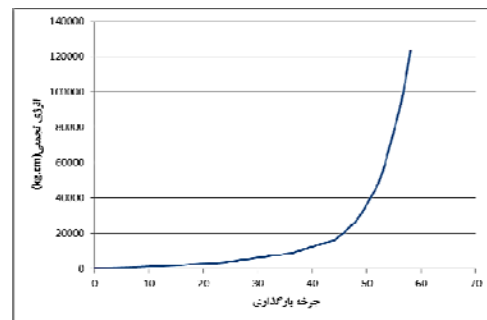


شکل (۱۸) منحنی هیستریزس المان پیشنهادی

همان‌گونه که از شکل ۱۶ مشخص است اولین مفصل پلاستیک حلقه در بار ۹/۴۳ تن و در محل اتصال حلقه به صفحه اتصال تشکیل شده است. در شکل ۱۹ منحنی انرژی- چرخه بارگذاری برای مدل پیشنهادی و در شکل ۲۰ منحنی تغییرات انرژی-تجمعی-چرخه‌های بارگذاری نشان داده شده است.



شکل (۱۹) منحنی انرژی- چرخه بارگذاری

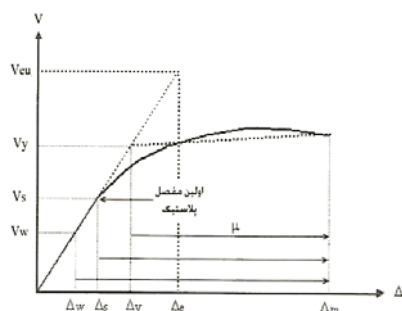


شکل (۲۰) منحنی تغییرات انرژی-تجمعی- چرخه‌های بارگذاری

با توجه به شکل‌های ۱۹ و ۲۰ نتایج زیر به دست می‌آید: انرژی در آخرین چرخه الاستیک:

$$E_E = 188.13 \quad \text{Kg-Cm} \quad (1)$$

انرژی در آخرین چرخه بارگذاری (پلاستیک):



شکل (۲۲) منحنی پاسخ سازه در برابر نیروی زلزله [۱۱]

۵-۱- روش یوانگ

یوانگ، با استفاده از منحنی ظرفیت ایده‌آل شده، مطابق شکل ۲۲ نشان داد که ضریب رفتار سازه R متشکل از پارامترهای زیر است [۱۲]:

(۱) ضریب کاهش نیرو در اثر شکل‌پذیری R_{μ} :

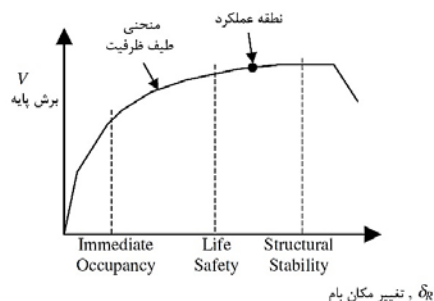
این ضریب عبارت از خارج قسمت نیروی نهایی وارد شده به سازه V_{eu} در صورتی که رفتار سازه الاستیک باقی بماند به نیروی متناظر با حد تسلیم عمومی سازه در هنگام تشکیل سازوکار خرابی V_y مطابق رابطه ۱۱ تعریف می‌شود [۱۲]:

$$R_{\mu} = \frac{V_{eu}}{V_y} \quad (11)$$

این ضریب که به منظور در نظر گرفتن عواملی از قبیل شکل‌پذیری تسلیم سازه‌ای و همچنین قابلیت جذب و استهلاک انرژی در ساختمان لحاظ می‌شود، نه تنها به مشخصات سیستم بلکه به مشخصات حرکات زمین (تاریخچه زمانی شتاب زمین) نیز بستگی دارد. برای یک لرزش زمین، R_{μ} تابعی از پریود نوسان سازه، نوع رفتار هیستریزس، حد تغییر شکل خطی سازه و ضریب شکل‌پذیری است. پژوهش‌های زیادی بر روی این ضریب به وسیله‌ی نیومارک و هال، میراندا و برترو، ریدل و هیدالگو و کروز و ناسار و کراوینکلر انجام شده که هر کدام از آنها روابط مختلفی را بر حسب دوره تناوب اصلی سازه، میرایی، نوع خاک و شکل‌پذیری سازه ارائه داده‌اند که در این پژوهش از رابطه نیومارک-هال برای تعیین ضریب R_{μ} استفاده شده است که به صورت رابطه ۱۲ تعریف می‌شود [۱۳]:

۴- روش تحلیل استاتیکی غیرخطی

اساس کلی این روش بدین صورت است که یک مدل ریاضی غیرخطی از سازه تحت یک الگوی بار جانبی قرار گرفته و این بار جانبی با آهنگ ثابتی افزایش پیدا می‌کند تا زمانی که سازه به یک تغییر مکان هدف از پیش تعیین شده برسد. این تغییر مکان هدف در یک نقطه کنترلی اندازه‌گیری می‌شود. در طول فرآیند افزایش صعودی بار جانبی، مقاومت و سختی اجزاء سازه در هر گام با توجه به منحنی رفتاری غیرخطی که از پیش برای آن‌ها تعریف شده اصلاح می‌شود [۱۰]. مهمترین نتیجه حاصل از تحلیل استاتیکی غیرخطی، منحنی تغییرات برش پایه در مقابل تغییر مکان بام است که به منحنی ظرفیت سازه مطابق شکل ۲۱ مشهور است. که هر نقطه روی این منحنی بیان‌کننده یک حالت خسارت خاص برای سازه است [۱۰].



شکل (۲۱) منحنی ظرفیت ساختمان [۱۰]

۵- تعیین ضریب رفتار

با توجه به شکل ۲۲ که منحنی ظرفیت یک سازه را نشان می‌دهد، چنانچه سازه ای بخواهد تحت یک زلزله بزرگ به گونه ای خطی رفتار کند، باید برای برش پایه ای بسیار بزرگ، نظیر V_{eu} ، طراحی شود که به هیچ عنوان برای سازه‌های معمول، اقتصادی نخواهد بود. از این رو، می‌توان از مزیت اتلاف انرژی ذاتی مانند شکل‌پذیری و همین‌طور اضافه مقاومتی که در آن وجود دارد، استفاده کرد و به این ترتیب، برش طراحی سازه را به ازای رفتار خطی V_{eu} با ضریبی تحت عنوان ضریب پاسخ یا ضریب رفتار سازه R به مقدار V_w مطابق با رابطه ۱۰ کاهش داد [۱۱]:

$$V_w = \frac{V_{eu}}{R} \quad (10)$$

گرفته است.

مطابق دستورالعمل بهسازی، برای سازه هایی که دارای زمان تناوب اصلی کوچکتر از ۱ ثانیه است و کمینه ۰/۷۵ جرم سازه در مود ارتعاش اول در جهت مورد نظر مشارکت می کند، می توان از توزیع زیر استفاده نمود.

$$F_i = \frac{W_i h_i^k}{\sum W_i h_i^k} V \quad (16)$$

که در آن F_i نیروی جانبی وارد بر طبقه ی i -ام، W_i وزن طبقه ی i -ام، h_i ارتفاع طبقه ی i -ام از تراز پایه، طبق تعریف استاندارد ۲۸۰۰ ایران است و مقدار k برابر است با:

$$K = 0.5T + 0.75 \quad (17)$$

برای زمان تناوب اصلی کوچکتر از ۰/۵ ثانیه مقدار k برابر با یک و برای زمان تناوب اصلی بزرگتر از ۲/۵ ثانیه مقدار k برابر ۲ انتخاب می شود [۱۵].

در الگوی بارگذاری جانبی ذکر شده، تحلیل استاتیکی غیرخطی تا زمانی ادامه پیدا می کند که تغییر مکان جانبی طبقات مطابق استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش سوم) ایران که به شرح زیر است، به مقدار مجاز برسد.

(۱) برای قاب با دوره اصلی کمتر از ۰/۷ ثانیه،

$$\bar{\Delta}_m < 0.025 H$$

(۲) برای قاب با دوره اصلی بیشتر از ۰/۷ ثانیه،

$$\bar{\Delta}_m < 0.02 H$$

در رابطه بالا (H) ارتفاع طبقات و ($\bar{\Delta}_m$) ماکزیم تغییرمکان نسبی طبقات در تحلیل استاتیکی غیرخطی است، سپس در ادامه با داشتن منحنی ظرفیت مشابه شکل ۲۱ که از انجام تحلیل استاتیکی غیرخطی حاصل شده، می توان کلیه پاسخ های لرزه ای سازه ی مورد نظر به این پژوهش را از آن استخراج نمود.

۶- تحلیل استاتیکی غیرخطی قاب دارای

المان پیشنهادی

به منظور شناخت بهتر رفتار المان پیشنهادی در سازه، در این قسمت به مقایسه عملکرد لرزه ای این سیستم با سیستم مهاربندی همگرا معمولی (CBF) پرداخته شده است.

$$T \leq 0.03 s \rightarrow R_\mu = 1$$

$$0.12 \leq T \leq 0.5 s \rightarrow R_\mu = \sqrt{2\mu - 1}$$

$$T \leq 1 s \rightarrow R_\mu = \mu \quad (12)$$

(۲) ضریب اضافه مقاومت R_s :

مقدار این ضریب، با در نظر گرفتن اینکه مقاومت جانبی واقعی یک سازه عملاً بیشتر از مقاومت جانبی طراحی آن است، مطابق با رابطه ۱۳ و ۱۴، تعریف می شود [۱۴].

$$R_{s0} = \frac{V_y}{V_s} \quad (13)$$

$$R_s = R_{s0} f_1 f_2 f_3 \quad (14)$$

f_1 نسبت تنش واقعی به تنش تسلیم اسمی است که مقدار آن در حدود ۱/۰۵ توصیه می شود. f_2 اثر سرعت بارگذاری در افزایش تنش تسلیم است که مقدار آن در حدود ۱/۱۰ قابل توصیه است. f_3 بیانگر تاثیر اجزای غیر سازه ای است [۱۴].

(۳) ضریب تنش مجاز (γ):

چنانچه در طراحی، از روش تنش مجاز به جای روش بار نهایی یا ضرایب بار و مقاومت (LRFD) استفاده می شود، علاوه بر دو پارامتر فوق، پارامتر دیگری نیز که بیان کننده نسبت تنش ها در این دو روش طراحی است ($\gamma = V_s/V_w$)، در تعریف R اعمال می شود. به این ترتیب، خواهیم داشت:

$$R = \frac{V_{eu}}{V_w} = R_\mu R_s \gamma \quad (15)$$

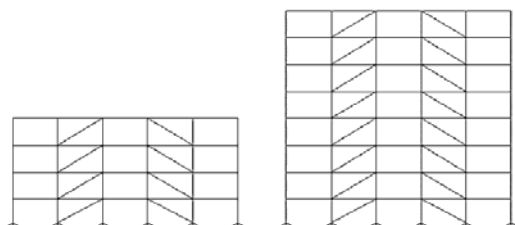
۵-۲- توزیع بار در ارتفاع

برای بارگذاری جانبی در تحلیل استاتیکی غیرخطی مستلزم انتخاب یکی از سه نوع بارگذاری مندرج در دستورالعمل بهسازی است. با توجه به آنکه، توزیع بار جانبی بر مدل سازه باید تا حد امکان شبیه به آنچه که هنگام زلزله رخ می دهد، باشد و حالت های بحرانی تغییر شکل و نیروهای داخلی را در اعضا ایجاد نماید [۱۴ و ۱۵].

۵-۲-۱- توزیع نوع اول دستورالعمل بهسازی

برای این پژوهش از سه توزیع بار جانبی پیشنهادی دستورالعمل بهسازی لرزه ای ساختمان های موجود ایران (نشریه شماره ۳۶۰)، توزیع نوع اول آن مورد انتخاب قرار

نرم‌افزار SAP [۱۸] با نتایج حاصل از آنالیز مودال نرم‌افزار OpenSEES برای سازه چهار طبقه صورت گرفته است که نتایج به دست آمده در جدول ۳ به نمایش گذاشته شده که صحت مدل‌سازی را تایید می‌کند. لازم به ذکر است تغییر مکان هدف در ساختمان ۴ طبقه، ۸ سانتی‌متر و برای ساختمان ۸ طبقه، ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است.



شکل (۲۳) چگونگی آرایش مهاربند در قاب

جدول (۳) مقایسه مدهای ارتعاشی بین دو نرم‌افزار SAP و

OpenSEES

	نرم‌افزار OpenSEES	نرم‌افزار SAP
T ₁	۰/۳۰۴۵۷۱۲	۰/۳۰۴۵۷۰۹
T ₂	۰/۱۰۱۱۶۹۸	۰/۱۰۱۱۷
T ₃	۰/۰۵۹۲۰۷۴	۰/۰۵۹۲۰۶۸

۶-۲- نتایج تحلیل

منحنی برش پایه - تغییر مکان سازه‌های مهاربندی شده همگرا ۴ و ۸ طبقه به ترتیب مطابق اشکال ۲۳ و ۲۴ به نمایش گذاشته شده است.

همان‌گونه که پیداست، نتایج به دست آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی در نرم‌افزار OpenSEES حاکی از کاهش برش پایه در قاب دو بعدی مهاربندی شده است. در جدول ۴ بیشینه برش پایه در قاب مهاربندی شده معمولی و دارای المان شکل‌پذیر در طبقات مختلف به نمایش گذاشته شده است. مشاهده می‌شود که میزان برش پایه در قاب با مهاربند شامل حلقه‌های تسلیم شونده حدود ۵۰ تا ۸۰ درصد برش پایه با مهاربند معمولی است. مقدار کم برش پایه به دست آمده برای قاب با مهاربند دارای المان شکل‌پذیر، سبب کاهش در هزینه ساخت سازه در مقایسه با قاب با مهاربند معمولی می‌شود.

با توجه به سختی بالای سیستم مهاربندی همگرا معمولی (CBF) و مقایسه آن با سیستم مهاربندی دارای المان پیشنهادی می‌تواند سبب درک بهتر خصوصیات و ویژگی‌های آن شود. بدین منظور تعدادی قاب با مهاربند همگرا، با شرایط بارگذاری و ابعاد یکسان طراحی می‌شوند و در مرحله بعد با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی به مقایسه ضریب رفتار آن‌ها پرداخته شده است.

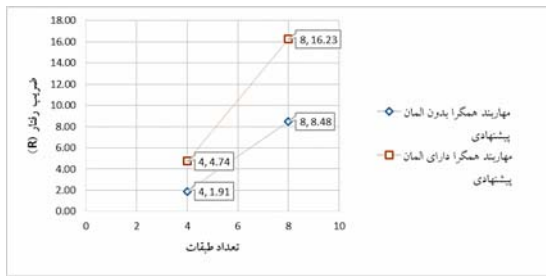
۶-۱- معرفی و تحلیل مدل‌های مورد مطالعه

در این مطالعه ۲ مدل مهاربند دارای المان شکل‌پذیر و همچنین ۲ مدل مهاربند معمولی با تعداد طبقات ۴ و ۸ و تعداد دهانه ۵ و ارتفاع طبقات ۳ متر و طول دهانه ۵ متر انتخاب شده است. پای ستون مفصلی و آرایش مهاربندها به صورت قطری مطابق شکل ۲۳ در نظر گرفته شده است. بارگذاری قاب دو بعدی مورد نظر مطابق مبحث ششم مقررات ملی ساختمانی ایران، ویرایش سوم انجام شده که لازم به ذکر است، مقدار بار مرده و زنده به صورت خطی برابر ۲۴۰۰ و ۸۰۰ کیلوگرم بر متر در نظر گرفته شده است.

برای این منظور ابتدا قاب را در نرم‌افزار ETABS [۱۶] مدل کرده و پس از طراحی با آیین نامه ۲۸۰۰ ویرایش سوم و همچنین آیین نامه طراحی ساختمان‌های فولادی ایران (مبحث ۱۰)، مقاطع اعضا محاسبه شده است.

برای تحلیل استاتیکی غیرخطی از قابلیت نرم‌افزار OpenSEES [۱۷] استفاده شده است.

به همین منظور از المان‌های غیرخطی برای مدل‌سازی المان تیر و ستون استفاده شده است. پس برای تعریف مصالح از Steel02 [۱۷] در نرم‌افزار OpenSEES استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی المان پیشنهادی در انتهای مهاربند، از دستور Zero-Length [۱۷] با توجه به نیروی مهاربند، نسبت ضخامت به قطر حلقه و منحنی‌های هیستریزیسی به دست آمده از نتایج نرم‌افزار ANSYS مطابق اشکال ۱۲ و ۱۳ انتخاب نموده و در برنامه تعریف شده است. برای صحت سنجی مدل‌سازی در نرم‌افزار OpenSEES، مقایسه‌ای بین مدهای ارتعاشی حاصل از آنالیز مودال در



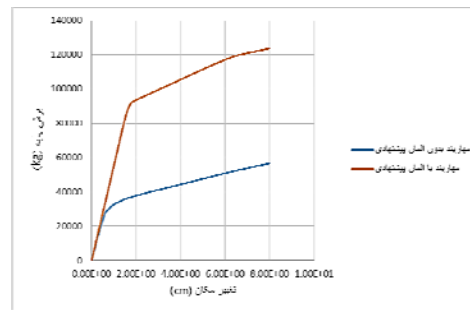
شکل (۲۶) نمودار ضریب رفتار

پارامترهای ضریب رفتار بر اساس روش حالات حدی در جدول ۵ به نمایش گذاشته شده است. شکل ۲۶ نیز مقایسه‌ای میان مقادیر ضریب رفتار را در هر سیستم مهاربندی نشان می‌دهد. همان‌گونه که از نتایج پیداست سیستم سازه‌ای مهاربندی با المان پیشنهادی دارای بیشترین ضریب رفتار نسبت به سیستم سازه‌ای مهاربندی بدون المان پیشنهادی است. این افزایش برای قاب‌های کوتاه‌تر بیشتر است. ولی با افزایش ارتفاع قاب‌ها، مقادیر ضریب رفتار دو سیستم به هم نزدیک می‌شود.

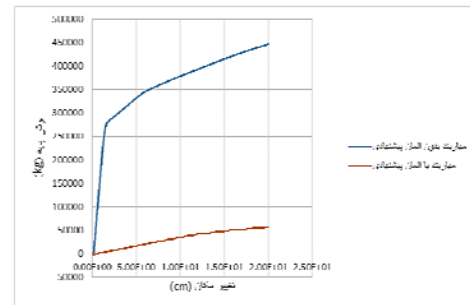
۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی بر آن بود که افزایش شکل‌پذیری مهاربندها با استفاده از عضو انجام شود که ضمن دارا بودن کارایی و قابلیت مناسب، امکان تهیه و نصب آن در انتهای انواع مهاربندها مقدور باشد. مطالعات صورت گرفته نشان داد که قوطی و لوله‌های مانیسما به علت تولید انبوه آن به سادگی قابل دسترس بوده و همچنین به علت جزئیات ساده آن برای قرارگیری داخل مهاربند، اجرایی و ارزان است. لازم به ذکر است که چگونگی انتخاب حلقه‌های فولادی به لحاظ ابعاد هندسی نیز از اهمیت بالایی برخوردار است، به گونه‌ای که اگر حلقه قوی انتخاب شود میزان استهلاک انرژی کم و مفصل پلاستیک در حلقه تشکیل نخواهد شد و منحنی هیستریزس کاملاً مقارنی به دست نخواهد آمد. از طرفی با کوچکتر شدن قطر حلقه فولادی و افزایش ضخامت آن، میزان نیروی قابل تحمل و میزان استهلاک انرژی افزایش می‌یابد.

همچنین افزایش ظرفیت المان حلقوی شکل پذیر با استفاده از المان پیشنهادی امکان پذیر است و به علت



شکل (۲۴) منحنی برش پایه - تغییر مکان سازه ۴ طبقه



شکل (۲۵) منحنی برش پایه - تغییر مکان سازه ۸ طبقه

جدول (۴) مقایسه برش پایه حاصل از تحلیل استاتیکی معادل برای

مدل‌های مورد مطالعه

تعداد طبقات	قاب	بیشینه برش پایه (تن)
۴	مهاربند همگرا بدون المان پیشنهادی	۱۲۳/۵۴
	مهاربند همگرا دارای المان پیشنهادی	۵۶/۵۲
۸	مهاربند همگرا بدون المان پیشنهادی	۴۴۵/۸۸
	مهاربند همگرا دارای المان پیشنهادی	۵۷/۲۲

جدول (۵) پارامترهای ضریب رفتار بر حسب حالات حدی ($\gamma=1$)

تعداد طبقات	قاب	R_{μ}	R_s	R
۴	مهاربند همگرا بدون المان پیشنهادی	۵/۱۸	۰/۳۷	۱/۹۱
	مهاربند همگرا دارای المان پیشنهادی	۵/۶۵	۰/۸۴	۴/۷۴
۸	مهاربند همگرا بدون المان پیشنهادی	۴/۳۵	۱/۹۵	۸/۴۸
	مهاربند همگرا دارای المان پیشنهادی	۱/۱۷	۱۳/۹۳	۱۶/۲۳

[۶] سلیم بهرامی، س. ر.، تقی پور، م. و نعمتی، م.، ۱۳۹۲، "بررسی عملکرد المان شکل‌پذیر در مهاربندهای سازه‌های فولادی"، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران.

[7] ANSYS. User's Manual. Version 10.0. Houston: Swanson Analysis Systems Inc. 2006.

[8] ATC40. Guidelines for Seismic Testing of Components of Steel Structures, Washington (DC), 1992

[۹] عباس نیا، ر.، کافی، م.ع. و محمد حسینی، آ.، ۱۳۸۸، "بررسی بهبود رفتار لرزه‌ای مهاربندهای هم‌محور با استفاده از المان نوین شکل‌پذیر"، اولین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت زیر ساخت‌ها.

[10] Naeim, F. (2000), "The seismic design handbook, chapter 15, Performance Based Seismic Engineering", Van Nostrand.

[11] Balendra, T., Huang, X. (2003), "Overstrength and ductility factors for steel frames designed according to BS 5950", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.129(8), pp. 1019-1035.

[12] Uang, C.M. (1991), "Establishing R (or R_w) and Cd Factors for building seismic provisions", Journal of Structural Engineering, ASCE, 117(1), pp. 19-28.

[13] Newmark, N.M., Hall, W.J., (1982), "Earthquake Spectra and Design", El Cerrito, California: Earthquake Engineering Research Institute (EERI).

[14] Mahmoudi, M., Zare, M. (2010), "Evaluating response modification factors of concentrically braced steel Frames", Journal of Constructional Steel Research, Vol. 66, pp. 1196-1204.

[۱۵] معاونت امور فنی، (۱۳۸۵)، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، دستورالعمل بهسازی لرزه‌های ساختمان‌های موجود، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور.

[16] Computers and Structures Inc. ETABS Version 9. Berkeley, California.

[17] Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., and Fenves, G. L. (2006). The Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSEES) User Command-Language Manual, PEER, Univ. Calif., Berkeley, CA, (<http://opensees.berkeley.edu>). version. 2.4.1.

[18] Computers and Structures Inc. SAP2000 Version 14.2. Berkeley, California.

شکل‌پذیری این المان و جذب انرژی بالای آن می‌تواند قسمت عمده‌ای از جذب انرژی پلاستیک سازه را از این المان انتظار داشت. لازم به گفتن است، بیشینه نیروی وارد شده به مهاربند برابر بیشینه نیروی قابل تحمل به وسیله‌ی المان است، پس می‌توان المان را طوری طراحی کرد که از عدم کمانش مهاربند اطمینان حاصل کرد. رابطه به دست آمده بین مقدار نیروی تحمل شده به وسیله‌ی المان پیشنهادی و میزان استهلاک انرژی با نسبت ضخامت به قطر حلقه را می‌توان مبنای طراحی هرچه آسانتر و کاربردی قرار داد.

نتایج به دست آمده از تحلیل استاتیکی غیرخطی نشان دهنده کاهش میزان برش پایه و افزایش ضریب رفتار قاب با مهاربند دارای المان پیشنهادی در مقایسه با قاب با مهاربند بدون المان پیشنهادی است که منجر به کاهش هزینه ساخت سازه و نیز عملکرد مناسب و شکل‌پذیر بودن المان معرفی شده در سازه است.

۸-مراجع

[۱] کافی، م.ع.، "بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی تاثیر حلقه فولادی بر شکل‌پذیری مهاربندهای هم‌محور" ۱۳۸۷، پایان نامه دکتری مهندسی عمران، گرایش سازه، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

[2] Balendra, T. (1997), "Large-Scale Seismic Testing of Knee-Brace-Frame", Journal of Structural Engineering, January 1997, p.p 11-19.

[3] Tsai, K. C. , EERI, M., Chen, H. W., Hong, C. P. and Su, Y. F. (1993), "Design of steel Triangular Plate Energy Absorbers for Seismic Resistant Construction", Journal of Earthquake Spectra, Vol.9, No.3.

[4] Shih, M. H. , Sung, W. P. (2004), "A model for hysteretic behavior of Rhombic low yield strength steel added damping and stiffness", Journal of Computers and Structure 83 (2005) 895-908

[۵] عباس نیا، ر.، وتر، م.ح. و کافی، م.ع.، ۱۳۸۴، "بررسی عملکرد المان شکل‌پذیر در بادبندهای هم‌مرکز قاب‌های فولادی"، هفتمین کنگره بین‌المللی عمران.

