

# مقایسه عملکرد لرزه ای میراگرهای تسلیمی مرکزی از فولاد ساختمانی و فولاد با حد جاری شدن پایین در قابهای فولادی متداول

سید مهدی زهرائی

دانشیار قطب علمی مهندسی و مدیریت زیرساخت‌های عمرانی، دانشکده عمران دانشگاه تهران

mzahrai@ut.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۳/۹/۵]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۱/۱۱/۲۳]

**چکیده** - این پژوهش به مقایسه عملکرد لرزه‌ای میراگرهای تسلیمی مرکزی با درصد بازشوی ۲۰ تا ۳۰٪، از فولاد ساختمانی و فولاد با حد جاری شدن پایین در ساختمان‌های فولادی متداول پرداخته است. به این منظور قاب‌های یک طبقه با استفاده از نرم‌افزار ANSYS تحلیل شد و با استفاده و استناد به نتایج به دست آمده ابتدا همین سازه‌ها با مقاطع و هندسه مشابه در نرم افزار SAP2000 مدل‌سازی شده و پس از مطابقت نتایج، مدل‌های قاب‌های فولادی ۵ و ۷ طبقه در نرم افزار SAP2000 به روش تحلیل بار افزون تحلیل شدند. نتایج این پژوهش نشان دهنده بهبود رفتار لرزه‌ای این قاب‌ها در صورت استفاده از فولاد با حد جاری شدن پایین به جای فولاد معمولی در سیستم قاب مرکزی است. افزایش سختی قاب با میراگر کمینه به میزان ۱/۵ برابر به بالا، کاهش تغییر مکان حد تسلیم ۵۰ درصد به بالا، بهبود منحنی‌های هیستریزس و همچنین تشکیل عمده مفاصل پلاستیک روی اعضا میراگر تسلیمی مرکزی از جمله نتایج به دست آمده است.

**واژگان کلیدی** - میراگر تسلیمی مرکزی، فولاد ساختمانی، فولاد با حد جاری شدن پایین، منحنی هیستریزس، مفصل پلاستیک.

## ۱- مقدمه

مهاربندی با وجود استقبال زیاد، معایبی نیز دارد که دانشمندان را ترغیب به استفاده از سیستم‌های پیشرفته‌تر کرده است تا بتوانند با برطرف کردن عیوب سیستم‌های مهاربندی باعث بهبود رفتار لرزه‌ای آن‌ها شوند. در سال‌های اخیر سیستم‌های مدرن مقاوم در برابر زلزله گسترش یافته‌اند که در آن‌ها دیدگاه اصلی کمینه کردن مقدار انرژی هیستریزیک تلف شده در خود اعضای اصلی سازه و انتقال آن به قطعات کمکی است. برای رسیدن به این هدف دو روش

اساس روش طراحی سیستم‌های متداول مقاوم در برابر زلزله بر مقاومت و سختی در برابر بار جانبی استوار است که به عنوان مثال می‌توان به سیستم مهاربندی جانبی، دیواربرشی، قاب مقاوم خمشی و سیستم دوگانه یا مختلط اشاره کرد. رفتار یک سازه که تحت تأثیر بارهای لرزه‌ای قرار گرفته است بستگی زیادی به ظرفیت آن در اتلاف انرژی زلزله دارد. در میان موارد یاد شده، سیستم‌های

وارد محدوده غیرارتجاعی شده و شروع به جذب انرژی کنند و از وارد آمدن آسیب‌های جدی به المان‌های اصلی سازه جلوگیری نمایند. این مطلب در آزمایش‌هایی که در سال ۱۹۸۸ میلادی به وسیله‌ی صبوری انجام شده، به اثبات رسیده است [۱].

ژوراکوفسکی و همکارانش آزمایش‌هایی روی قاب‌های مجهز به سیستم میراگر تسلیمی مرکزی و قاب‌های فاقد این نوع میراگر انجام داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که قاب‌های مجهز به سیستم میراگر تسلیمی مرکزی دارای مقاومت و شکل پذیری و قابلیت جذب انرژی به مراتب بیشتر از قاب‌های فاقد این نوع میراگر است [۲ و ۳].

سیامپی و فرتی در سال ۱۹۹۰ با پژوهشی روی مهاربندی با شکل خاص، اتلاف انرژی در دو حالت با اتصال پیچی و صلب را بررسی و توانایی اعضای مهاربندی در استهلاک انرژی را مطالعه کردند [۴]. چن و همکاران رفتار هیسترتیک مهاربندهای کمانش ناپذیر ساخته شده از فولاد با حد جاری شدن پایین<sup>۲</sup> (LYS) را بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها از ۴ نمونه آزمایش با مقیاس بزرگ ضمن بیان مزایای مهاربندهای کمانش ناپذیر در افزایش مقدار مقاومت، انعطاف پذیری و ظرفیت اتلاف انرژی، نشان داده است که استفاده از فولاد با حد جاری شدن پایین، تغییر شکل کم و کرنش سخت شدگی زیادی برای سیستم مهاربندی دارد [۵].

درصد بازشوی بهینه این سیستم‌ها به وسیله‌ی روفه‌گری‌نژاد بررسی شده است و قاب با بازشوی ۳۰٪ بهترین میزان اتلاف انرژی همراه با تغییر مکان مناسب را در مقایسه با مدل‌های دیگر نشان داده است [۶].

نتایج آزمایش‌ها و مطالعات عددی شین و سانگ در بررسی رفتار هیسترتیک میراگرهای<sup>۳</sup> ADAS ساخته شده از فولاد با حد جاری شدن پایین (LYS) و فولاد A36، حاکی از

و دیدگاه عمده وجود دارد که یکی مانند استفاده از سیستم‌های جداسازی پایه سعی در کاهش انرژی ورودی به سازه را دارد و دیگری بر روی مکانیزم‌های اتلاف انرژی در سازه متمرکز است. بنابراین می‌توان گفت که در روش‌های مدرن مجموعه عوامل مقاومت، سختی و شکل پذیری بررسی می‌شوند و تأمین نشدن هر یک از این سه عامل باعث ایمن نبودن سازه در برابر زلزله خواهد شد. در سال‌های اخیر به منظور دست یافتن به رفتار لرزه‌ای بهتر، سیستم مهاربند تسلیمی مرکزی<sup>۱</sup> (YDBF) در محل تقاطع مهاربندهای ضربداری مطرح شده است که بر پایه مصالح شکل پذیر جاری شونده عمل می‌کند. این قاب میانی بسته که چهار گوشه آن به اعضای قطری متصل شده است وظیفه‌ی جذب و اتلاف انرژی را در تحریکات لرزه‌ای متوسط و شدید بر عهده دارد. در واقع هنگامی که زلزله رخ می‌دهد، میراگر جاری شونده‌ی مرکزی به صورت یک فیوز عمل کرده و با جذب و استهلاک انرژی و محدود نمودن بارهای جانبی وارده از خسارت به اعضای اصلی سازه مانند تیرها و ستون‌ها جلوگیری می‌کند. برای تأمین شرایط بالا باید میراگر جاری شونده مرکزی به گونه‌ای طرح شود که قبل از هر گونه جاری شدن تیر یا ستون و یا کمانش عضو قطری، جاری شود.

با وارد شدن فولاد به صنعت ساختمان، سعی بر این بود که با افزایش مقاومت و ظرفیت کردن مقاطع اعضا، وزن سازه کاهش یابد و اقتصادی‌تر شود. اما در بعضی اعضا به ویژه در سازه‌های فولادی که تحت بارهای جانبی مخصوصاً بارهای ناشی از زلزله قرار دارند، بهتر است از مقاومت جانبی آن تا حدی کاسته شود تا سازه بتواند از خود رفتار شکل پذیرتری نشان دهد. استفاده از فولادی با تنش تسلیم کمتر در اعضای که تحت بار جانبی قرار می‌گیرند به علت کاربرد مقاطع بزرگتر، باعث افزایش سختی سازه شده و همچنین موجب می‌شود این اعضا در تغییر مکان‌های کمتری

2 Low Yield Steel

3 Added Damping And Stiffness

1 Yielding damped braced frame

ظرفیت تغییرشکل بالای همه مدل‌های مورد مطالعه در صورت استفاده از LYS به جای A36 است [۱۰]. در بررسی عددی به روش اجزاء محدود به وسیله‌ی میساکیدیس، استفاده از فولاد با حد جاری شدن پایین (LYS) و فولاد معمولی ساختمانی در پانل‌های دیوار برشی فولادی مقایسه می‌شود. همچنین این پژوهش به امکان استفاده از سیستم یاد شده در مقاوم سازی ساختمان‌های موجود پرداخته است. نتایج نشان از بهبود رفتار لرزه‌ای و منحنی هیستریزیس در صورت استفاده از LYS می‌باشد. تسلیم شدگی در اعضا را نیز می‌توان به شکل مطلوبی کنترل و هدایت کرد [۱۱].

در این مقاله سعی شده مقایسه‌ای بین عملکرد لرزه‌ای میراگرهای تسلیمی مرکزی از فولاد ساختمانی و فولاد با حد جاری شدن پایین در قاب‌های فولادی با تعداد طبقات متداول بررسی شود و بدین منظور ابتدا قاب‌های یک طبقه و یک دهانه در نرم افزار ANSYS مدل شده‌اند و همین مدل با مقاطع مشابه در نرم افزار SAP2000 منظور شده‌اند. نتایج از دو نرم افزار مورد بررسی، مطابقت داده می‌شوند و با توجه به نتایج کالیبره شده قاب‌های ۵ و ۷ طبقه با بازشوهای ۲۰ و ۳۰ درصد و در دو حالت استفاده از فولاد معمولی ساختمانی و فولاد با حد جاری شدن پایین در قاب میانی مدل شده و تحلیل بار افزون انجام شده و نتایج بررسی می‌شود.

## ۲- مشخصات قاب‌های مورد بررسی

در بخش اول و در قسمت بررسی قاب به وسیله‌ی نرم افزار ANSYS، ۲ جفت قاب (۴ مورد قاب) یک دهانه و یک طبقه به ارتفاع طبقه ۳ متر و ابعاد دهانه ۴ متر مجهز به سیستم میراگر تسلیمی مرکزی با ابعاد بازشوی قاب مرکزی ۲۰٪ و ۳۰٪، بررسی و تحلیل شده‌اند که برای هر یک از این بازشوها از فولاد معمولی<sup>۴</sup> (MS) و فولاد با حد

بهبود رفتار لرزه‌ای میراگرهای ADAS، توانایی جذب انرژی بالا و همچنین تسلیم یکنواخت عضو میراگر در مقابل بارهای دینامیکی در صورت استفاده از (LYS) است [۷]. رفتار میراگرهای تسلیمی مرکزی با فولادهای ساختمانی و فولادهای جاذب انرژی با درصد بازشوهای مختلف در قاب‌های یک طبقه به وسیله‌ی صبوری و صناعی‌پور بررسی شده است که نتایج نشان دهنده بهبود رفتار هیستریزیس و افزایش قابلیت جذب انرژی قاب‌ها در صورت جایگزینی فولاد جاذب انرژی به جای فولاد معمولی ساختمانی است، همچنین قاب با بازشوی ۲۰٪ بهترین عملکرد را نسبت به سایر نمونه‌ها داشته است [۸].

صبوری و قلهکی در سال ۱۳۸۶، رفتار هیستریزیس دو نمونه دیوار برشی فولادی شکل پذیر ۳ طبقه را تحت بارگذاری چرخه‌ای آزمایش کردند. دیوارهای یاد شده دارای دو نوع اتصال تیر به ستون صلب و ساده بوده و در ورق پانل‌ها و ستون‌ها به ترتیب از فولاد شکل پذیر با حد جاری شدن پایین و فولاد پر مقاومت استفاده شد که ابتدا ورق‌ها، سپس تیرها و در پایان ستون‌ها به تسلیم رسیدند. نتایج نشان داد که با استفاده از فولاد شکل پذیر با حد جاری شدن پایین (فولاد جاذب انرژی) و پر مقاومت به ترتیب در ورق و ستون‌ها، می‌توان تسلیم شدگی در اعضا را به شکل مطلوبی کنترل و هدایت کرده و نیز با جلوگیری از ایجاد مودهای خرابی نامطلوب، عمده جذب انرژی را به ورق فولادی منتقل کرد [۹].

در بررسی عددی به روش اجزاء محدود به وسیله‌ی لشگری، مقاومت، سختی، ظرفیت جذب انرژی، ظرفیت تغییرشکل و همچنین تاثیر نسبت عرض به ضخامت ورق‌های فلزی در رفتار کمانشی آن‌ها در دیوارهای برشی فولادی ساخته شده از فولاد با حد جاری شدن پایین (LYS) و فولاد A36 بررسی شده‌اند. پانل‌های دیوار برشی از LYS و المان‌های مرزی دیوار از A36 است. نتایج مطالعات عددی حاکی از ظرفیت جذب انرژی بالا و

و در قسمت غیرارتجاعی  $E' = 2 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$  و به ترتیب در حالت استفاده از فولاد معمولی ساختمانی و فولاد با حد جاری شدن پایین  $\sigma_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$  و  $\sigma_y = 900 \text{ kg/cm}^2$  منظور شده است.

## ۲-۱- مقاطع مورد استفاده

در قاب‌های یک طبقه و یک دهانه، مقطع ستون‌ها از پروفیل توخالی (قوطی)  $120 \times 120 \times 5$ ، مقطع تیر از مقطع  $1$  شکل  $180$  (IPE180) و مقطع مهاربندها از دوبل ناودانی  $65$  (2UNP65) که به هم متصل شده اند و به شکل قوطی در آمده اند استفاده شده است، همچنین مقطع قاب‌های میراگر مرکزی از پروفیل توپر مستطیلی است که در جدول ۱ شرح داده شده است.

جدول (۱): ابعاد مقطع قاب‌های میراگر مرکزی بر حسب cm

سیستم	MS-20%	MS-30%	LYS-20%	LYS-30%
طول	5.5	6.5	8	9
عرض	5.5	6.5	8	9

در قاب‌های ۵ و ۷ طبقه، ستون‌ها از مقطع قوطی (جزئیات آنها در بند ۵-۲ آورده شده)، تیرها از مقطع  $1$  شکل (۲۶۰- IPE۲۲۰)، مهاربندها از دوبل ناودانی (۱۶۰-۱۱۰) (2UNP۱۱۰) و قاب‌های میراگر مرکزی از پروفیل توپر مستطیلی با ابعاد متنوع طراحی و سپس در مدل برای تحلیل بارافزون استفاده شده است.

## ۳- بارگذاری و تحلیل سازه

برای بررسی رفتار هیستریزس مدل‌های یک طبقه در نرم افزار ANSYS، مدل‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای مطابق با پیشنهاد (AISC-Seismic Provisions(1997 قرار گرفته‌اند که به صورت جابه‌جایی جانبی در تراز طبقه در نظر گرفته شده است.

جاری شدن پایین (LYS)، استفاده شده است. همچنین در این پژوهش از کماتش خارج از صفحه جلوگیری شده است (که بر اساس نتایج کارهای قبلی انجام شده موضوع قابل توجهی نبوده و به لحاظ انتخاب هندسه میراگر تسلیمی مرکزی و مقاطع مصرفی، مشکل خاصی در عملکرد میراگر در قاب ایجاد نمی‌کند) و آنالیز کماتش غیرخطی که یک آنالیز استاتیکی می باشد با فعال بودن دستور تغییرشکل‌های بزرگ (دستور NLGEOM,ON)، انجام می‌گیرد.

در بخش دوم و در قسمت بررسی قاب به وسیله نرم افزار SAP2000، ۴ جفت قاب (۸ مورد قاب) ۵ و ۷ طبقه و ۵ دهانه مجهز به سیستم میراگر تسلیمی مرکزی با ابعاد بازشوی قاب مرکزی ۲۰٪ و ۳۰٪، مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند که برای هر یک از این بازشوها نیز از فولاد معمولی (MS) و فولاد با حد جاری شدن پایین (LYS)، استفاده شده است.

طراحی اعضا بر اساس روش‌های تنش‌های مجاز و بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان به وسیله برنامه SAP2000 صورت پذیرفته است. لازم به ذکر است که طراحی به صورتی انجام شده که اعضای اصلی قاب تحت ترکیب بارهای مربوط به مبحث دهم مقررات ملی ساختمان در محدوده تنش‌های مجاز قرار گیرند و اعضای میراگر تسلیمی مرکزی تحت همان ترکیب بار اما با ضریب ۰/۵ برای بار زلزله از ناحیه تنش‌های الاستیک خارج نشوند، این تمهید برای اطمینان از رفتار غیرخطی اعضای میراگر در زلزله‌های متوسط و قوی منظور شده است.

منحنی تنش- کرنش مصالح مورد استفاده به صورت دوخطی گرفته شده که در هر دو حالت استفاده از فولاد معمولی ساختمانی و فولاد با حد جاری شدن پایین، در قسمت ارتجاعی  $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$  ،  $\nu = 0.3$

توزیع نوع دوم (Push2) توزیع یکنواخت انتخاب شده است.

بار جانبی که به ترتیب فوق انتخاب شده است، جداگانه در دو جهت مثبت و منفی به سازه وارد می‌شود و رابطه بین برش پایه و تغییر مکان نقطه کنترل برای هر گام افزایش نیروهای جانبی تا رسیدن به تغییر مکانی معادل ۱/۵ برابر تغییر مکان هدف ثبت می‌شود.

در تحلیل غیرخطی، بارهای ثقلی اعضا مطابق زیر در ترکیب با بار جانبی منظور شده‌اند.

$$Q_G = 1.1(Q_D + Q_L)$$

$$Q_G = 0.9Q_D$$

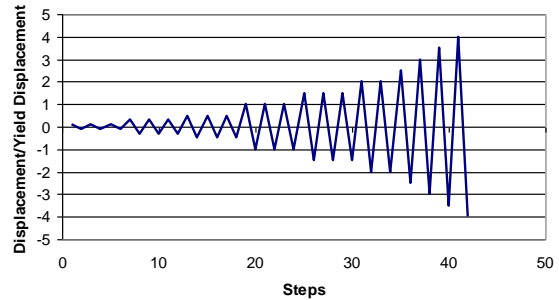
در سازه‌های مورد بررسی کمتر از ۷۵ درصد جرم سازه‌ای در مود ارتعاشی اول در جهت مورد نظر مشارکت می‌کنند، که به عنوان نمونه یک مورد از قاب‌های مورد بررسی در جدول ۲ آمده است.

جدول (۲): نتایج به دست آمده از تحلیل مودال قاب 7MS-30%

Output Case Text		Step Type Text	Step Num Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	SumL Unitle
MODAL	Mode		1	0.731988	0.704942	0	0	0.7049
MODAL	Mode		2	0.265417	0.185097	0	3.903E-20	0.8900
MODAL	Mode		3	0.156541	0.055339	0	5.439E-17	0.9453
MODAL	Mode		4	0.137798	0	0	0.072176	0.9453
MODAL	Mode		5	0.137798	0	0	0.065608	0.9453
MODAL	Mode		6	0.112293	0.024678	0	1.186E-18	0.9700
MODAL	Mode		7	0.098922	0	0	0.584094	0.9700
MODAL	Mode		8	0.098989	0.000001663	0	4.529E-19	0.9700
MODAL	Mode		9	0.085134	0.014442	0	8.499E-19	0.9844
MODAL	Mode		10	0.077414	2.819E-18	0	0.006544	0.9844
MODAL	Mode		11	0.076497	0.000045	0	1.409E-17	0.9845
MODAL	Mode		12	0.067652	0.008252	0	6.29E-16	0.9927

#### ۴- پارامترهای مدلسازی رفتار برای روش‌های غیرخطی

برای مدلسازی رفتاری اجزا برای روش استاتیکی غیرخطی از رابطه کلی نیرو- تغییر شکل یا منحنی‌های دیگری که رفتار را تحت افزایش یکنوای تغییر شکل نشان می‌دهند استفاده می‌شود. در شکل ۲ منحنی ساده شده کلی رفتار بار- تغییر شکل نشان داده شده است. این مدل از نقطه A (عضو فاقد بارگذاری) تا یک نقطه تسلیم مؤثر در B، خطی است و بین نقاط B و C سختی کاهش یافته‌ای به صورت



شکل (۱): بارگذاری چرخه‌ای مطابق پیشنهاد AISC-Seismic Provisions(1997) [۱۲]

همچنین قاب‌های ۵ و ۷ طبقه مورد بررسی با نرم افزار SAP2000(ver11.0.8) و به روش آنالیز استاتیکی غیرخطی و بر اساس دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه شماره ۳۶۰)، بررسی شد [۱۳].

#### ۳-۱- تغییر مکان هدف

برای محاسبه تغییر مکان هدف، بر اساس روش تفصیلی دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای (نشریه شماره ۳۶۰) از رابطه زیر استفاده می‌شود [۱۳]:

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2} g$$

در این رابطه  $C_0$  تا  $C_3$  ضرایب اصلاحی طبق نشریه ۳۶۰ و  $S_a$  شتاب طیفی به ازای  $T_e$  زمان تناوبی اصلی مؤثر هستند.

#### ۳-۲- توزیع بار جانبی

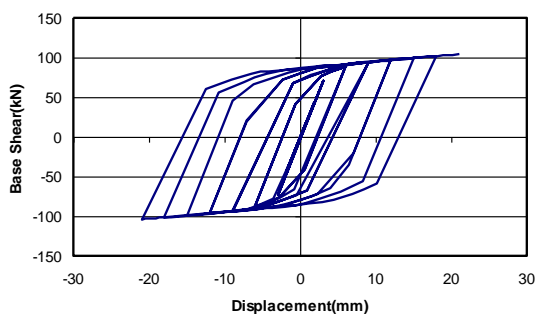
توزیع بار جانبی بر مدل سازه باید تا حد امکان شبیه به آنچه که در هنگام زلزله رخ می‌دهد باشد تا حالت‌های بحرانی تغییر شکل و نیروهای داخلی را در اعضا ایجاد نماید. مطابق با ضوابط دستورالعمل باید حداقل دو نوع توزیع بار جانبی بر روی سازه اعمال شود. در این مقاله، به عنوان توزیع نوع اول (Push1)، توزیع متناسب با نیروهای جانبی حاصل از تحلیل دینامیکی خطی طیفی و به عنوان

گوشه میراگر تسلیمی مرکزی تعریف می شود. همچنین برای مهاربندهای متصل به این میراگرها نیز از مفصل های فشاری- کششی استفاده می شود.

## ۵- بررسی نتایج

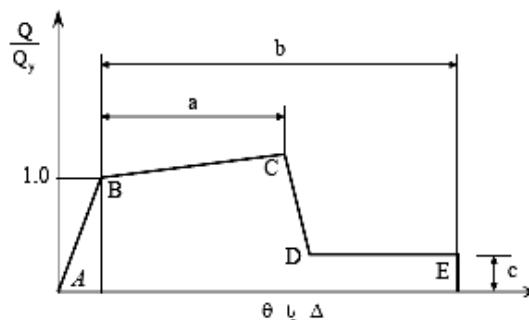
### ۵-۱- بررسی نتایج حاصل از نرم افزار ANSYS

منحنی های چرخه ای (هیستریزیس) قاب های یک طبقه یک دهانه مجهز به میراگرهای تسلیمی مرکزی دارای فولاد با حد جاری شدن پایین و فولاد معمولی در شکال های ۳ تا ۶ آورده شده است. با مقایسه این شکل ها ملاحظه می شود که سیستم های مجهز به میراگرهای تسلیمی مرکزی دارای فولاد با حد جاری شدن پایین نسبت به فولاد معمولی در شرایط بازشوی یکسان، دارای قابلیت تحمل چرخه های بارگذاری بیشتری است. با توجه به این که در صورت استفاده از فولاد با حد جاری شدن پایین در سیستم میراگر تسلیمی مرکزی چرخه های هیستریزیس در تغییر مکان کمتری تشکیل می شود و با توجه به اینکه سطح مقطع عضو میراگر نسبت به حالت استفاده از فولاد معمولی افزایش می یابد منحنی هیستریزیس سازه بهبود پیدا می کند و میزان جذب انرژی سیستم در هر دوره از بارگذاری به صورت قابل ملاحظه ای افزایش می یابد.



شکل (۳): منحنی چرخه ای نمونه یک طبقه ۲۰٪ LYS

خطی وجود دارد که با یک کاهش ناگهانی در مقاومت در برابر بار جانبی از نقطه C به نقطه D می رسد و تا نقطه E ثابت می ماند. سرانجام در این نقطه مقاومت به صفر کاهش می یابد.



شکل (۲): منحنی نیرو- تغییر شکل برای اعضای فولادی کنترل شونده به وسیله تغییر شکل [۱۳]

شیب از نقطه B تا نقطه C، با نادیده گرفتن آثار بارهای ثقلی بر تغییر شکل جانبی، ۳٪ شیب اولیه منظور می شود مگر اینکه شیب دیگری با آزمایش یا تحلیل، بهتر تشخیص داده شود. نقطه C دارای عرضی برابر با مقاومت عضو و طولی برابر با مقدار تغییر مکانی که در آن کاهش شدید مقاومت آغاز می شود، است.

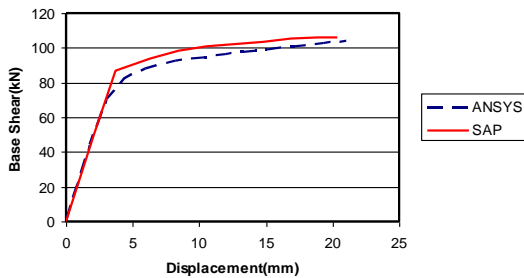
### ۴-۱- مفصل پلاستیک

طبق فرضیات اساسی سیستم میراگر تسلیمی مرکزی، اعضای اصلی مانند تیر و ستون و بادبند، در هنگام زلزله باید در محدوده ارتجاعی باقی بمانند و عضو تسلیمی مرکزی به عنوان میراگر اجازه ورود به محدوده غیر ارتجاعی را دارد که برای فهمیدن چگونگی رفتار اعضا در محدوده پلاستیک، نیاز است تا مفصل های پلاستیک<sup>۵</sup> روی اعضا تعریف شود.

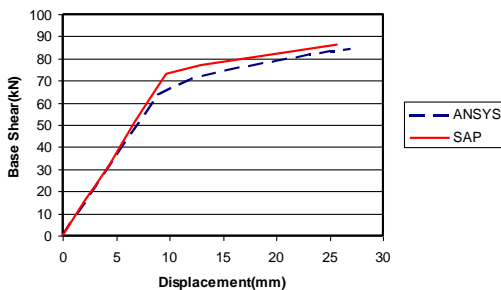
نظر به آنکه مود تسلیم نمونه، مود خمشی است، با توجه به توزیع های تنش نمونه های یک طبقه و به کمک تعریف مفصل در نشریه ۳۶۰ [۱۳]، مفصل های خمشی در چهار

می شود که مدل LYS-20% دارای تغییر مکان تسلیم کمتر، سختی بیشتر و رفتار بهتری نسبت به سایر مدل ها است. در مدل های یک طبقه در صورت استفاده از فولاد با حد جاری شدن پایین به جای فولاد معمولی در قاب مرکزی، سختی سیستم حدوداً ۲/۵ برابر شده و تغییر مکان تسلیم نیز ۵۰ درصد کاهش پیدا می کند.

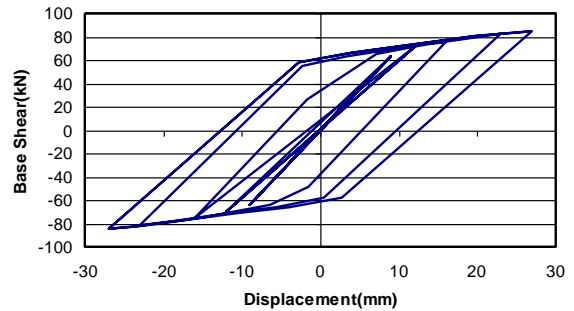
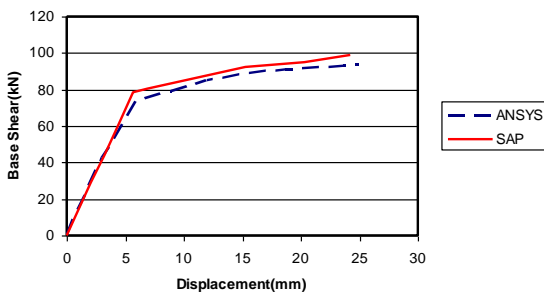
همچنین با مقایسه پوش منحنی های حاصل از نرم افزارهای ANSYS و SAP2000 می توان گفت استفاده از نتایج ANSYS در مدلسازی و کالیبره نمودن نتایج SAP2000 قابل قبول بوده و می توان از این فرضیات و تعاریف در مدلسازی قابهای ۵ و ۷ طبقه در نرم افزار SAP2000 استفاده کرد.



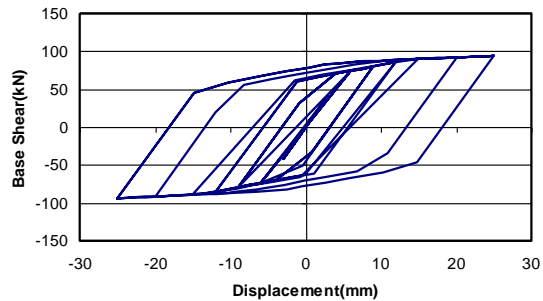
شکل (۷): مقایسه پوش و منحنی ظرفیت ۱ طبقه LYS-20%



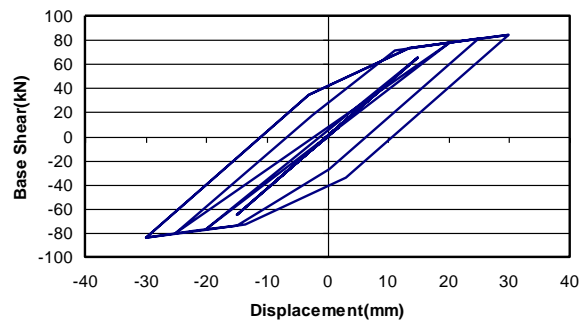
شکل (۸): مقایسه پوش و منحنی ظرفیت یک طبقه MS-20%



شکل (۴): منحنی چرخه ای نمونه یک طبقه MS-20%



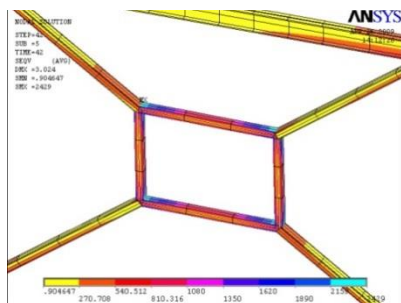
شکل (۵): منحنی چرخه ای نمونه یک طبقه LYS-30%



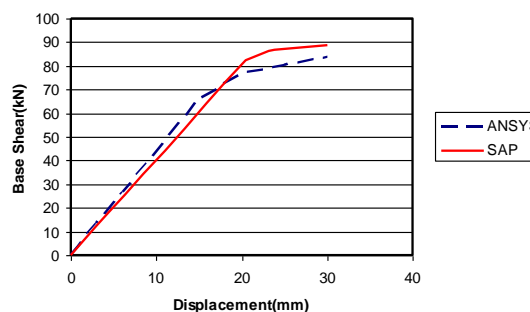
شکل (۶): منحنی چرخه ای نمونه یک طبقه MS-30%

با مقایسه شکل های ۷ تا ۱۰ ملاحظه می شود که سیستم های مجهز به میراگرهای تسلیمی مرکزی دارای فولاد با حد جاری شدن پایین نسبت به فولاد معمولی در شرایط بازشوی یکسان، دارای سختی بیشتر (شیب منحنی الاستیک بیشتر) و دارای تغییر مکان تسلیم کمتری است. سختی به دست آمده نمونه ها به ترتیب برابر ۲۰/۵، ۸، ۱۲/۶ و ۴/۸ کیلو نیوتن بر میلی متر و تغییر مکان تسلیم نمونه ها نیز به ترتیب برابر ۴، ۸، ۶ و ۱۳ میلی متر است. در نتیجه ملاحظه

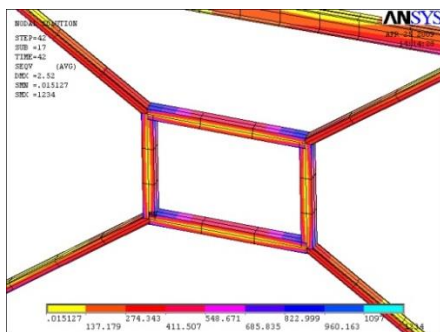
شکل (۱۲): کانتور تنش فون میسر نمونه یک طبقه LYS-20%



شکل (۹): مقایسه پوش و منحنی ظرفیت یک طبقه LYS-30%



شکل (۱۳): کانتور تنش فون میسر نمونه یک طبقه MS-30%



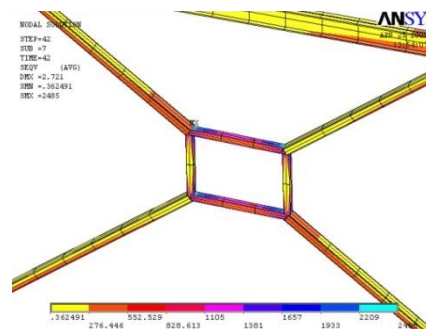
شکل (۱۰): مقایسه پوش و منحنی ظرفیت یک طبقه MS-30% همان‌گونه که در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ ملاحظه می‌شود مطابق کانتور تنش فون میسر چهار نمونه مورد مطالعه، المان‌هایی که بیش از سایر المان‌ها دارای تنش‌ها و کرنش‌های بیشینه است مربوط به اعضای میراگر تسلیمی مرکزی است و فرض مربوطه در زمینه عملکرد ارتجاعی اعضای اصلی سازه در این روش مورد تأیید قرار می‌گیرد. همچنین ملاحظه می‌شود که عمده بیشینه تنش در چهار گوشه قاب مرکزی متمرکز می‌شود.

شکل (۱۴): کانتور تنش فون میسر نمونه یک طبقه LYS-30%

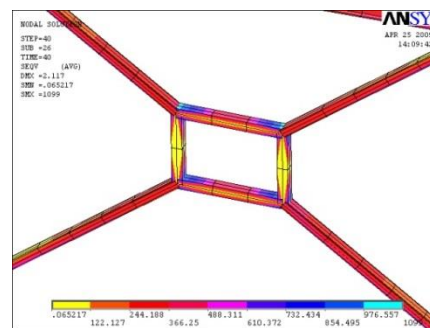
## ۵-۲- بررسی نتایج حاصل از نرم افزار SAP2000

نوع اتصالات تیر به ستون به صورت مفصلی در نظر گرفته شده است که هم با واقعیت اجرایی متداول قاب‌های مهاربندی، که از این نوع اتصالات استفاده می‌شود نزدیکتر باشد و هم آنکه با عدم اتصال صلب بین تیر و ستون در واقع سهم قاب خمشی در برابر بار جانبی در نظر گرفته نشود و کل مقاومت سازه در برابر بار جانبی بر عهده سیستم مهاربندی باشد و بدین ترتیب بتوان قضاوت صحیح تری نسبت به عملکرد قابهای مجهز به میراگر تسلیمی مرکزی در برابر بار جانبی به دست آورد.

جهت به دست آوردن ابعاد تیر و ستون و بادبندها، ابتدا دو قاب ۵ دهانه در ۵ و ۷ طبقه به صورت مهاربندی ضربدری (در دهانه های ۲ و ۴) مدل شده که در طراحی این سیستم‌ها به روش استاتیکی خطی و بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ از تیرهای IPE240 و ستون‌های کناری قوطی

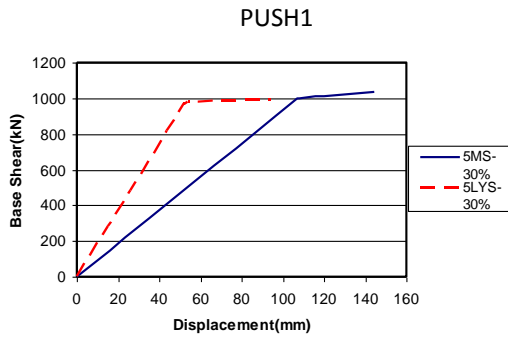


شکل (۱۱): کانتور تنش فون میسر نمونه یک طبقه MS-20%

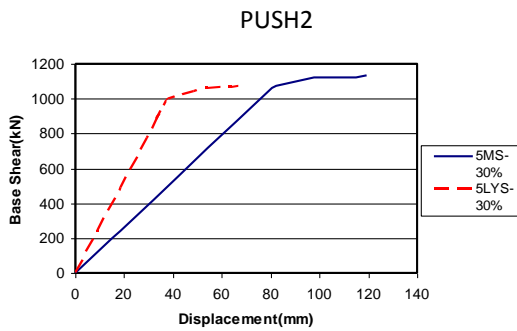




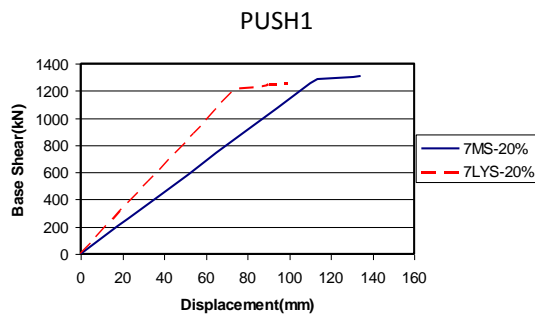
شکل (۱۶): مقایسه منحنی ظرفیت قاب ۵ طبقه با بازشوی ۲۰٪ و



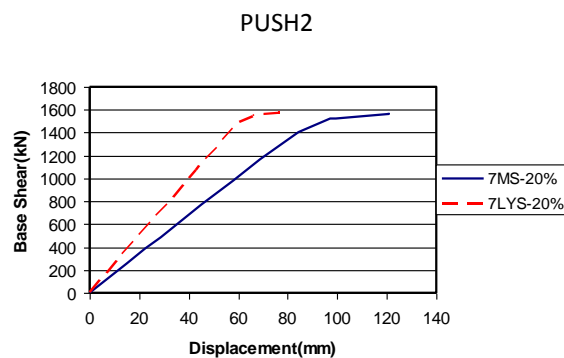
شکل (۱۷): مقایسه منحنی ظرفیت قاب ۵ طبقه با بازشوی ۳۰٪ و



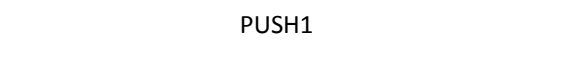
شکل (۱۸): مقایسه منحنی ظرفیت قاب ۵ طبقه با بازشوی ۳۰٪ و



شکل (۱۹): مقایسه منحنی ظرفیت قاب ۷ طبقه با بازشوی ۲۰٪ و

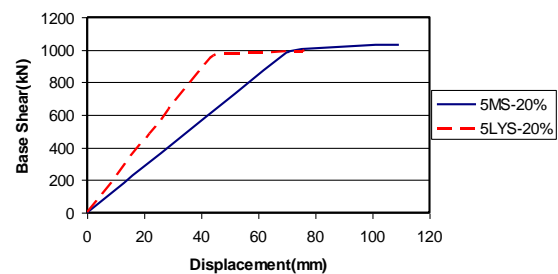


شکل (۲۰): مقایسه منحنی ظرفیت قاب ۷ طبقه با بازشوی ۲۰٪ و

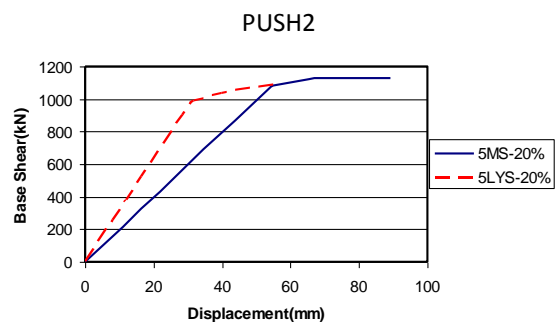


۶\*۶۰\*۱۲۰ در ۲ طبقه بالایی، ۵\*۸۰\*۱۴۰ در ۳ طبقه بعدی و ۸\*۸۰\*۱۶۰ در ۲ طبقه پائینی و در مجاورت مهاربندی از ستون‌های میانی قوطی ۸\*۱۰۰\*۱۵۰ در ۲ طبقه بالایی، ۱۰\*۱۸۰\*۲۶۰ در ۲ طبقه بعدی از بالا، ۱۰\*۲۵۰\*۳۵۰ در طبقه بعدی و ۱۶\*۲۵۰\*۳۵۰ در ۲ طبقه پائینی، و مهاربندهای 2UNP100 در ۲ طبقه بالایی، 2UNP120 در ۲ طبقه بعدی، 2UNP140 در ۲ طبقه بعدی و بالاخره 2UNP160 در طبقه پائین استفاده شده است.

با توجه به نمودارهای منحنی ظرفیت نمونه‌های مورد پژوهش (شکل‌های ۱۵ تا ۲۲)، مشاهده می‌شود که تمام نمونه‌های مورد بررسی در حالت‌های درصد بازشو و تعداد طبقات مشابه، دارای مقاومت نهایی تقریباً یکسان است و تغییرمکان نهایی و تغییرمکان تسلیم میراگرهای تسلیمی مرکزی مجهز به فولاد با حد جاری شدن پایین به مراتب کمتر از تغییرمکان نهایی و تغییرمکان تسلیم میراگرهای تسلیمی مرکزی مجهز به فولاد معمولی ساختمانی است که این امر باعث کاهش آثار نامطلوب  $P-\Delta$  و کاهش ممان‌ها و نیروهای وارد شده به اعضای اصلی سازه می‌شود.



شکل (۱۵): مقایسه منحنی ظرفیت قاب ۵ طبقه با بازشوی ۲۰٪ و

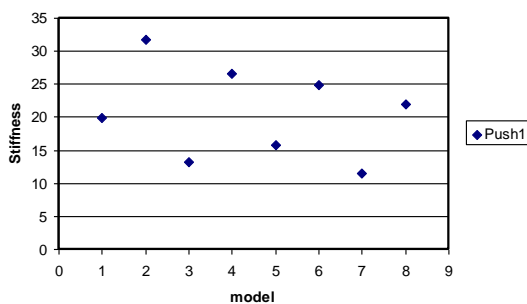


بازشوی ۳۰٪ غیرارتجاعی می‌شوند. همچنین همان‌گونه که انتظار می‌رود با افزایش ارتفاع از ۵ طبقه به ۷ طبقه سختی قاب‌ها نیز کاهش و تغییر مکان تسلیم افزایش پیدا می‌کند.

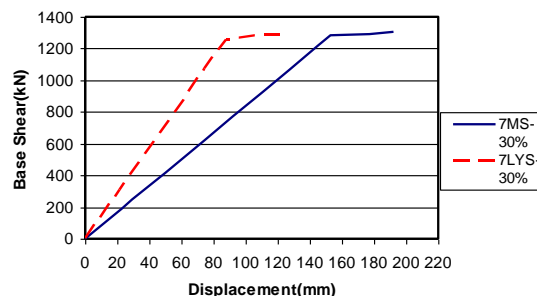
جدول (۳): شماره گذاری مدل‌های مورد بررسی

model	Model
1	5MS-20%
2	5LYS-20%
3	5MS-30%
4	5LYS-30%
5	7MS-20%
6	7LYS-20%
7	7MS-30%
8	7LYS-30%

با توجه به افزایش سختی و کاهش تغییر مکان مدل‌های مجهز به فولاد با حد جاری شدن پایین و همچنین به علت اینکه میراگرهای تسلیمی مرکزی مجهز به فولاد با حد جاری شدن پایین در تغییر مکان‌های کمتری غیرخطی شده و به عنوان عضو جاذب انرژی، عمده انرژی را جذب می‌کند، باعث می‌شود تا اجزا اصلی باربر سازه به علت کاهش آثار نامطلوب  $P-\Delta$  و کاهش ممان‌ها و نیروهای وارد شده، از گزند آسیب‌های جدی، به ویژه وقتی سازه وارد منطقه غیرخطی شده است در امان بمانند.



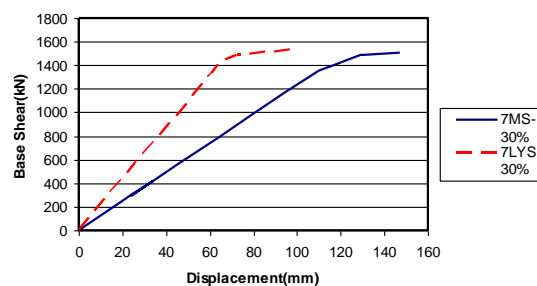
شکل (۲۳): مقایسه سختی مدل‌های مورد بررسی PUSH1



شکل (۲۱): مقایسه منحنی ظرفیت قاب ۷ طبقه با بازشوی ۳۰٪ و

PUSH2

همچنین به علت تغییر مقاطع میراگر، سختی میراگرهای تسلیمی مرکزی مجهز به فولاد با حد جاری شدن پایین به مراتب بیشتر از سختی میراگرهای تسلیمی مرکزی مجهز به فولاد معمولی ساختمانی است.

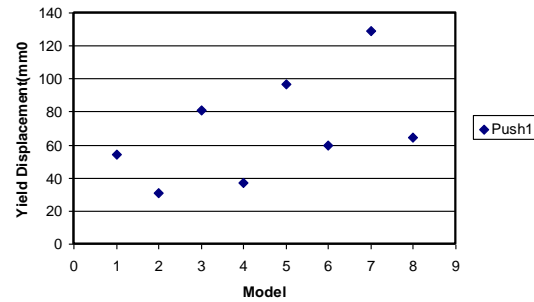


شکل (۲۲): مقایسه منحنی ظرفیت قاب ۷ طبقه با بازشوی ۳۰٪ و

PUSH1

مطابق شکل ۲۳ (معرفی مدل‌ها طبق جدول ۳) سختی به دست آمده نمونه‌ها به ترتیب برابر ۲۰، ۳۲، ۱۴، ۲۶، ۱۶، ۲۵، ۱۱ و ۲۲ کیلو نیوتن بر میلی‌متر است. همچنین مطابق شکل ۲۴ تغییر مکان تسلیم نمونه‌ها نیز به ترتیب برابر ۵۵، ۲۸، ۸۰، ۳۸، ۹۸، ۶۰، ۱۲۶ و ۶۲ میلی‌متر است. در نتیجه ملاحظه می‌شود که سختی قاب‌های با بازشوی ۲۰٪ (در حالت‌های مشابه)، به مراتب بزرگتر از سختی قاب‌های با بازشوی ۳۰٪ و تغییر مکان تسلیم قاب‌های با بازشوی ۲۰٪ (در حالت‌های مشابه)، به مراتب کمتر از تغییر مکان تسلیم قاب‌های با بازشوی ۳۰٪ است. در واقع قاب‌های با بازشوی ۲۰٪ در تغییر مکان‌های کمتری در مقایسه با قاب‌های با

قضاوت بر مبنای این معیار، نمونه‌هایی از چگونگی تشکیل مفاصل در جابه‌جایی هدف آورده شده که با توجه به شکل‌های ۲۵ و ۲۶ همان‌گونه که فرض شده بود، اعضای اصلی (تیر و ستون و بادبند) در محدوده ارتجاعی باقی مانده‌اند و تمام مفاصل پلاستیک خمشی روی اعضای میراگر تسلیمی مرکزی تشکیل شده‌اند. تغییر مکان هدف قاب‌های مورد بررسی نیز در جدول ۴ آورده شده است. قاب‌هایی که جنس فولاد مصرفی در میراگر تسلیمی مرکزی از جنس فولاد ساختمانی است، در جابه‌جایی هدف عمدتاً برای هر دو پوش مورد بررسی (جدول ۴)، در محدوده (IO-LS)، مفاصل پلاستیک تشکیل شده است و نشان می‌دهد که این سازه در این جابه‌جایی سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) را تامین می‌کند. جزئیات مراحل ایجاد مفاصل پلاستیک قاب ۵ طبقه شکل ۲۵ نیز برای دو حالت بارگذاری جانی در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است.



شکل (۲۴): مقایسه تغییر مکان حد تسلیم مدل‌های مورد بررسی

#### PUSH1

ملاحظه می‌شود که در مدل‌های یک، ۵ و ۷ طبقه در صورت استفاده از فولاد با حد جاری شدن پایین به جای فولاد معمولی در قاب مرکزی، سختی سیستم بین ۱/۵ تا ۲ برابر بیشتر و تغییر مکان تسلیم نیز حدوداً ۵۰ درصد کاهش پیدا می‌کند.

خروجی مهم دیگری که از آنالیز بارافزون به وسیله نرم افزار SAP2000 به دست می‌آید چگونگی تشکیل مفاصل پلاستیک خمشی بر حسب سطح عملکرد است که برای

جدول (۴): تغییر مکان هدف قاب‌های مورد بررسی

model	PUSH	$T_c(\text{sec})$	B	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$S_a$	$\frac{T_c^2}{4\pi^2}$	$\Delta(\text{m})$	$1.5*\Delta$
5MS-20%	PUSH1	0.5	2.5	1.4	1	1	1	0.875	0.00634035	0.076	0.11
	PUSH2	0.57	2.29	1.4	1	1	1	0.801	0.008239919	0.091	0.13
5LYS-20%	PUSH1	0.39	2.5	1.4	1.14	1	1	0.875	0.003857469	0.053	0.07
	PUSH2	0.45	2.5	1.4	1.06	1	1	0.875	0.005135683	0.065	0.09
5MS-30%	PUSH1	0.62	2.164	1.4	1	1	1	0.758	0.009748922	0.101	0.15
	PUSH2	0.7	1.995	1.4	1	1	1	0.698	0.012427086	0.119	0.17
5LYS-30%	PUSH1	0.43	2.5	1.4	1.08	1	1	0.875	0.004689323	0.061	0.09
	PUSH2	0.505	2.483	1.4	1	1	1	0.869	0.006467791	0.077	0.11
7MS-20%	PUSH1	0.61	2.188	1.4	1	1	1	0.766	0.009436977	0.102	0.15
	PUSH2	0.7	1.995	1.4	1	1	1	0.698	0.012427086	0.123	0.18
7LYS-20%	PUSH1	0.5	2.5	1.4	1	1	1	0.875	0.00634035	0.078	0.11
	PUSH2	0.61	2.188	1.4	1	1	1	0.766	0.009436977	0.102	0.15
7MS-30%	PUSH1	0.74	1.922	1.4	1	1	1	0.673	0.013887903	0.132	0.19

	PUSH2	0.84	1.766	1.4	1	1	1	0.618	0.017895004	0.156	0.23
7LYS-30%	PUSH1	0.55	2.345	1.4	1	1	1	0.821	0.007671823	0.089	0.13
	PUSH2	0.65	2.097	1.4	1	1	1	0.734	0.010715191	0.111	0.16

جدول (۵): نحوه تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب ۵ طبقه (PUSH1) 5LYS-20%

Step	D(mm)	V(KN)	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	Total
0	0	0	120	0	0	0	0	0	0	0	120
1	8	253.231	120	0	0	0	0	0	0	0	120
2	12	379.846	120	0	0	0	0	0	0	0	120
3	16.47346	521.448	120	0	0	0	0	0	0	0	120
4	21.66176	685.678	120	0	0	0	0	0	0	0	120
5	28.41894	899.569	120	0	0	0	0	0	0	0	120
6	30.94148	978.745	112	8	0	0	0	0	0	0	120
7	31.76509	990.182	104	16	0	0	0	0	0	0	120
8	39.80868	1034.48	104	0	10	6	0	0	0	0	120
9	43.34392	1053.95	104	0	0	4	10	2	0	0	120
10	55.45573	1059	104	0	0	4	8	4	0	0	120

جدول (۶): چگونگی تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب ۵ طبقه (PUSH2) 5LYS-20%

Step	D(mm)	V(KN)	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	Total
0	0	0	120	0	0	0	0	0	0	0	120
1	9.997349	220.435	120	0	0	0	0	0	0	0	120
2	14.997349	330.681	120	0	0	0	0	0	0	0	120
3	21.971997	484.468	120	0	0	0	0	0	0	0	120
4	28.696595	632.741	120	0	0	0	0	0	0	0	120
5	35.352404	779.497	120	0	0	0	0	0	0	0	120
6	43.257353	951.294	100	20	0	0	0	0	0	0	120
7	44.268952	965.39	88	32	0	0	0	0	0	0	120
8	45.64214	973.902	69	50	1	0	0	0	0	0	120
9	47.770577	977.262	61	40	19	0	0	0	0	0	120

10	50.024278	979.314	57	39	24	0	0	0	0	0	120
11	60.024278	985.023	56	8	56	0	0	0	0	0	120
12	70.024278	990.705	56	2	50	12	0	0	0	0	120
13	75.393466	993.756	55	2	34	21	7	1	0	0	120
14	76.463684	994.98	55	2	34	21	7	1	0	0	120

آستانه فروریزش (CP) را تامین کرده است که می‌تواند ناشی از منظور نمودن مقاومت یکسان طراحی برای دو نوع فولاد در میراگر تسلیمی مرکزی باشد. در واقع میراگرهای تسلیمی مرکزی مجهز به فولاد با حد جاری شدن پایین زودتر و درگام‌های زمانی کمتری نسبت به میراگرهای تسلیمی مرکزی مجهز به فولاد معمولی وارد محدوده غیرارتجاعی شده و شروع به جذب و اتلاف انرژی می‌کنند.

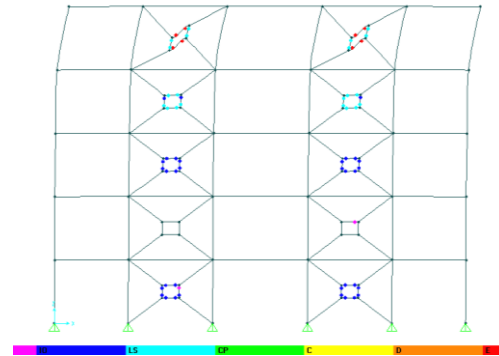
## ۶- نتیجه گیری

در صورت استفاده از فولاد با حد جاری شدن پایین به جای فولاد ساختمانی در قاب میانی سیستم تسلیمی مرکزی:

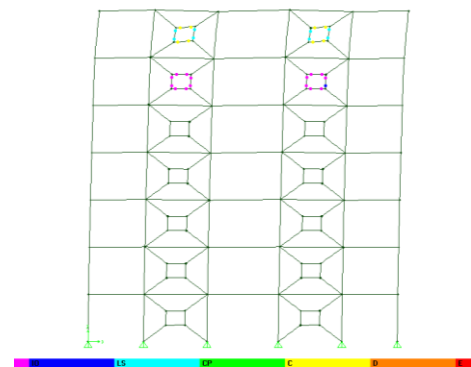
۱- سازه با توجه به مقاطع قویتر در میراگر، دارای سختی (شیب منحنی الاستیک) بیشتری بوده و چرخه‌های هیستریزس سازه بهبود پیدا می‌کند و قابلیت تحمل چرخه‌های بارگذاری افزایش می‌یابد.

۲- سازه در تغییر مکان‌های کمتری به حد تسلیم می‌رسد، به عبارت دیگر سازه (در حقیقت قاب میانی)، در جابه‌جایی‌های کمتری غیرارتجاعی شده و شروع به جذب و اتلاف انرژی می‌کند و از وارد آمدن آسیب‌های جدی به اعضای اصلی سازه جلوگیری می‌کند. لیکن چنانچه مبنای مقاومت یکسانی ملاک طراحی قرار گیرد، ممکن است سطح عملکرد پائین‌تری تامین شود.

۳- طبق انتظار، اعضای میراگر تسلیمی مرکزی بیشتر از سایر المان‌ها دارای تنش و کرنش بیشینه است. همچنین ملاحظه می‌شود که عمده بیشینه تنش در چهار گوشه قاب مرکزی متمرکز می‌شود.



شکل (۲۵): چگونگی تشکیل مفاصل قاب ۵ طبقه 5LYS-20% (PUSH2) بر حسب سطح عملکرد



شکل (۲۶): نحوه تشکیل مفاصل قاب ۷ طبقه 7LYS-30% (PUSH2) بر حسب سطح عملکرد

ولی در مقابل ملاحظه می‌شود قاب‌هایی که جنس فولاد مصرفی در میراگر تسلیمی مرکزی از فولاد با حد جاری شدن پایین است، در جابه‌جایی هدف کوچکتر خود بیشتر برای هر دو پوش مورد بررسی (جدول ۴)، در محدوده (LS-CP)، مفاصل پلاستیک در آن‌ها تشکیل شده است و نشان می‌دهد سازه در این جابه‌جایی سطح عملکرد

5. Chen, C.C., Chen, S.Y., and Liaw J.J., "Application of Low Yield Strength Steel on Controlled Plastification Ductile Concentrically Braced Frames", Can. J. Civ. Eng. 28(5):823-863, 2001.
6. Roufegarinejad. A, Sabouri.S, "Nonlinear Behavior of Yielding Damped Bracing Frames", 15<sup>th</sup> ASCE Engineering Mechanics Conference, June2-5, 2002, Columbia university, New York, NY.
7. Shin, M.H. and Sung, W.P., "A model for hysteretic behavior of rhombic low yield strength steel added damping and stiffness", Computers & Structures. 83:895-908, 2005.
8. Sabouri.S, Saneipoor.M, "Non-Linear Behavior of Yielding Damped Braced Frames With Mild Steel and Easy-Going Steel for Different Size of Opening", 5<sup>th</sup> International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran-Iran, May 2007.
9. صبوری، سعید و قلهکی، مجید "مطالعه آزمایشگاهی دو نمونه دیوار برشی فولادی شکل پذیر سه طبقه" دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی، ۱۳۸۶.
10. M.Lashgari, "Finite element analysis of thin steel plate shear walls", World Academy of Science, Engineering and Technology. 58, 2009.
11. Mistakidis, E., "Numerical study of low-yield point steel shear walls used for seismic applications", Engineering computations, vol. 27 Iss:2, pp.257-279. 2010.
12. American Institute of Steel Construction , AISC 1997, "Load and Resistance Factor Design", Manual of Steel Construction, 1997.
13. Iran Management and Planning Organization, "Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, Code No. 360", Tehran, 2007.

۴- تغییر مکان های ایجاد شده در سیستم میراگرهای تسلیمی مرکزی مجهز به فولاد با حد جاری شدن پایین به مراتب کمتر از تغییر مکان میراگرهای تسلیمی مرکزی مجهز به فولاد معمولی ساختمانی است که باعث کاهش آثار نامطلوب  $P-\Delta$  و کاهش ممان ها و نیروهای وارد شده به اعضای اصلی سازه می شود.

۵- با افزایش درصد بازشو از ۲۰٪ به ۳۰٪ سختی سیستم کاهش و جابه جایی حد تسلیم افزایش می یابد و با افزایش تعداد طبقات از ۵ طبقه به ۷ طبقه سختی سیستم کاهش و جابه جایی حد تسلیم افزایش می یابد.

۶- در مقایسه با مدل های یک طبقه، مدل LYS-20% رفتار هیستریزیس مطلوب تری نسبت به سایر مدل های یک طبقه دارد. همچنین مدل های 5LYS20% و 7LYS20% تغییر مکان حد تسلیم و تغییر مکان نهایی کمتر و سختی بیشتری نسبت به سایر مدل های ۵ طبقه و ۷ طبقه دارند.

## ۷- قدردانی

از حمایت پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران و همکاری مهندس سبحان آرمان نیکو تقدیر می شود.

## ۸- مراجع

1. Sabouri.S, "Lateral Load Resisting Systems An Innovative Idea to Application of Easy-Going Steel", Anguizesh Publishing co. Tehran-Iran, 2004.
2. Jurukovski. D, Petkovski. M, Rakicevic. Z, "Energy Absorbing in Regular and Composite Steel Frame Structures", Engineering Structures, vol. 17(s) 314-333, 1995.
3. Jurukovski. D, Simenov.B "Effectiveness of Energy Absorbing Elements in Composite Steel Frame Structures", Proceeding of Ninth World Conference on Earthquake Engineering , Tokyo-Kyoto, vol.4, 291-296, 1998.
4. Ciampi, V. Ferretti, S.A. "Energy dissipation in building using special bracing systems" Proceeding of 9th European Conference on Earthquake Engineering, Vol. 3, Moscow, 9-18, 1990.