



http://journaliss.ir

بهینه‌یابی بر مبنای عملکرد و ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های

بلند با سیستم مهاربندی زیپر و شورون

کیوان فرزاد^{۱*}، حامد محمدی^۲

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران

*aromiyeh@postbox.iaou.ac.ir، Keyvan.farzad@iaou.ac.ir

چکیده

طراحی بهینه سازه‌ها و کاهش مواد مصرفی در اجرای سازه‌ها یک چالش پیش رو در روند طراحی مهندسی است. یک روش کارآمد برای نیل به هدف فوق، استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی است. باین حال اکثر بررسی‌های انجام‌شده درخصوص استفاده از این الگوریتم‌ها در مهندسی سازه محدود به ارائه مفاهیم طراحی بوده و جنبه عملی در آن‌ها کم‌تر بوده است. هدف اصلی این مطالعه کاربرد عملی روش‌های بهینه‌یابی ارائه‌شده و به حداقل رساندن وزن سازه‌ای و مقایسه وزن بهینه در قاب‌های فولادی بلند با سیستم باربر جانبی زیپر و شورون در معرض بارهای لرزه‌ای و در عین حال برآورد تمامی نیازهای آیین‌نامه‌ای است. به منظور رسیدن به هدف فوق، قاب‌های فولادی ۱۰ و ۱۵ طبقه با استفاده از الگوریتم‌های مختلف، که عملکرد آن‌ها در مقالات مختلف به اثبات رسیده است، برای بهینه‌یابی در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است. سیستم باربر جانبی زیپر به منظور اصلاح رفتار فراکامانشی سیستم مهاربندی شورون پیشنهاد شده و ضعف‌های سیستم شورون را بعد از کمانش بادبندهای آن جبران می‌نماید. برای تخمین دقیق‌تر رفتار این سیستم‌ها در رویارویی با بارهای لرزه‌ای روش طراحی مورد استفاده به منظور بهینه‌یابی قاب‌های فوق در این مطالعه، آنالیزهای غیرخطی و طراحی بر مبنای عملکرد است. نتایج به دست آمده توسط الگوریتم‌های مختلف بهینه‌یابی در این بررسی، نشانگر برتری الگوریتم اصلاح‌شده دلفین نسبت به سایر الگوریتم‌ها و همچنین کاهش وزن بهینه ۶٪ سیستم زیپر نسبت به سیستم شورون است. همچنین تأیید و تصدیق‌های ارائه‌شده توسط آنالیز دینامیکی افزاینده بیانگر قابل اطمینان‌تر بودن سیستم زیپر نسبت به شورون است.

واژگان کلیدی

ساختمان بلند، سیستم زیپر، الگوریتم بهینه‌یابی فراکاوشی، طراحی بر مبنای عملکرد، آنالیز دینامیکی افزایشی

Performance based optimization and seismic assessment of tall structures with zipper and chevron bracing system

K. Farzad, H. Mohammadi

Abstract

Optimal structural design and reducing material consumption are ongoing challenges in engineering practice. An effective approach to achieve these goals is the use of metaheuristic optimization algorithms. However, most studies employing such algorithms in structural engineering have focused mainly on conceptual design, with limited emphasis on practical implementation. The main objective of this study is to apply practical optimization methods to minimize structural weight and to compare the optimal weight of tall steel frames equipped with zipper and chevron braced lateral systems under seismic loading, while satisfying all code requirements. To this end, 10- and 15-story steel frames were optimized using several metaheuristic algorithms whose performance has been validated in previous research. The zipper braced system has been proposed to improve the post-buckling behavior of chevron braced frames and to compensate for their weaknesses after brace buckling. To better capture the seismic behavior of these systems, nonlinear analyses and performance-based design procedures were employed in the optimization process. The results show that the modified Dolphin algorithm outperforms the other optimization algorithms considered in this study. In addition, the zipper system achieves approximately 6% lower optimal weight compared to the chevron system. Incremental Dynamic Analysis (IDA) results further confirm that the zipper system provides higher reliability and superior seismic performance than the chevron system.

Keywords

Metaheuristic Algorithm, Zipper Braced Frame, Performance Based Design, Incremental Dynamic Analysis



در طراحی‌های مهندسی هدف مطلوب، کاهش هزینه پروژه به مقدار ممکن و رسیدن به اهداف عملکردی مورد نیاز است. این مفهوم در قالب طراحی مهندسی و به صورت دقیق‌تر در بهینه‌سازی سازه در طراحی گنجانده می‌شود. با پیچیده‌تر شدن مسائل بهینه‌سازی و عدم کارایی مطلوب روش‌های تحلیلی سنتی، نیاز به ابزارهای قوی‌تر برای حل این مسائل نمود پیدا کرد. در پاسخ به این نیاز، الگوریتم‌های حل فراکاوشی ظهور پیدا کردند. این روش‌ها هیچ‌گونه نیازی به اطلاعات مشتق مسئله ندارند و با عملگرهای خاص خود قادر به فرار از بهینه محلی و کشف بهینه کلی هستند. نکته مهم دیگر در طراحی بهینه، روش تحلیل و طراحی سازه است. آیین‌نامه‌های لرزه‌ای در حال تغییر به سمت طراحی مبتنی بر عملکرد هستند. بر اساس این روش طراحی، سازه به صورت غیرخطی تحلیل شده و اطمینان حاصل می‌شود که در هر مرحله طراحی، تمام اهداف عملکردی توسط سازه ارضا می‌شود. با توسعه فلسفه جدید طراحی سازه، برخلاف روش‌های طراحی لرزه‌ای موجود، امکان انتخاب، تعیین و تنظیم عملکرد سازه در شرایط بحرانی وجود دارد. به این ترتیب با پذیرش خطر مشخص و طراحی سازه بر مبنای سطح عملکرد بالاتر، از ایجاد خسارت‌های اقتصادی، جانی و زیست‌محیطی سنگین‌تر ناشی از خطر زمین‌لرزه می‌توان جلوگیری نمود [۱].

در این روش طراحی، معیارهای پذیرش در قالب مقادیر آستان‌های برای پاسخ‌های کلی سازه و پاسخ‌های موضعی اعضا ارائه شده‌اند. این مقادیر، آستانه وابسته به سطوح عملکردی انتخابی در سطح خطر لرزه‌ای خاص هستند. سه سطح عملکردی معمول در این روش به طور خلاصه عبارت هستند از مقاومت سازه در مقابل زلزله‌های خفیف، قابل تعمیر بودن سازه در مقابل زلزله‌های متوسط و عدم فرو ریزش در زلزله‌های شدید [۲].

روش‌های بهینه‌سازی را می‌توان به طور مؤثر در طراحی‌های بر مبنای عملکرد استفاده نمود و عملکرد سازه را به عنوان یکی از اهداف طراحی و یا قیدهای مسئله تعریف کرد [۳]. نکته مهم دیگر در طراحی لرزه‌ای سازه، انتخاب سیستم مهاربندی جانبی است. در این میان، سیستم قاب فولادی زبیر یک قاب مهاربندی همگرا با شکل‌پذیری قابل قبول بوده که یک روش به روز شده از سیستم قاب مهاربندی شورون (V شکل) است. سیستم شورون دارای سختی و مقاومت بالا بوده اما رفتار بعد از کماتش آن ضعیف

است [۴]. در قاب‌های مهاربندی شده شورون معمولی زمانی که بار جانبی افزایش می‌یابد، مهاربندهای فشاری کماتش می‌کنند و ظرفیت تحمل نیروی محوری آن‌ها کاهش می‌یابد؛ این در حالی است که نیروی مهاربندهای کششی در حال افزایش‌اند تا اینکه در نهایت به حد تسلیم برسند؛ در این وضعیت در محل اتصال مهاربندها به تیرها، نیروی قائم نامتعادل‌کننده بزرگی وارد می‌شود که می‌تواند باعث به وجود آمدن تغییر شکل‌های بزرگ در تیر شود. به طور عمومی این سیستم قادر به باز توزیع نیروها بعد از شکست موضعی به وجود آمده در یکی از طبقات نبوده و رفتار مناسبی را در زلزله‌های گذشته نشان نداده است [۵].

برای جلوگیری از کاهش نامطلوب مقاومت جانبی قاب، آیین‌نامه‌های طراحی الزام می‌دارند که تیرها علاوه بر تحمل نیروهای ثقلی از مقاومت کافی برای مقابله با این نیروی قابل توجه، برخوردار باشند؛ البته رعایت چنین ضابطه‌ای منجر به ایجاد تیرهای بسیار قوی خواهد شد که از نقطه نظر طراحی لرزه‌ای، امری نامطلوب محسوب می‌شود. برای جلوگیری از مکانیزم طبقه نرم در قاب‌های با سیستم شورون، **خطیب^۱** و **همکاران** پیشنهاد افزودن یک ستون مابین طبقات و در وسط دهانه بابتند را دادند. در این سیستم مهاربندی، نیروی نامتعادل به وجود آمده در طبقه، از طریق عضو زبیر به طبقه بالایی انتقال داده شده و بر این اساس فشار وارد شده بر روی مهاربند فشاری طبقه بالا افزایش یافته و در نهایت این مهاربند دچار کماتش می‌شود [۶].

مکانیزم کلی سیستم در قاب‌های مهاربندی زبیر زمانی به وجود می‌آید که تمامی بادبندهای فشاری به صورت هم‌زمان دچار کماتش شوند. کماتش هم‌زمان بادبندها در ارتفاع کلی سازه منجر به ناپایداری و فرو ریزش سازه خواهد شد. پیش‌بینی شرایط به وجود آمده فوق، تنها از طریق انجام تحلیل‌های غیرخطی میسر است [۷]. از مزایای سیستم مهاربندی زبیر می‌توان به توزیع دوباره نیروهای مابین طبقات، توزیع دررفت طبقات در کل سازه و در نتیجه دررفت یکنواخت در طبقات و استفاده مناسب از عملکرد غیرالاستیک قاب فولادی در ارتفاع آن نام برد.

طراحی بهینه سازه‌های تحت بارهای لرزه‌ای، یکی از مسائل محاسباتی پیچیده در مهندسی سازه است. بهترین رویه برای تحلیل سازه‌ها، از جمله قاب‌های مهاربندی شده فولادی، آنالیز تاریخیچه زمانی برای مجموعه‌ای از حرکات زمین است؛ اما مقدار و زمان محاسبات مورد نیاز این آنالیز زیاد بوده و روند بهینه‌سازی

^۱ Khatib

با این روش به شدت زمان بر خواهد بود. برای مقابله با این مشکل، یک روش تحلیل با هزینه کم تر محاسباتی مانند روش های تحلیل خطی یا استاتیکی غیرخطی، به طور معمول در روند بهینه یابی اعمال شده و در نهایت طرح های ارائه شده توسط آنالیزهای دینامیکی، مورد تأیید و تصدیق قرار می گیرند [۸ و ۹]. یک روش تحلیل دینامیکی دقیق که در حال حاضر نیز کاربرد وسیعی در کارهای تحقیقاتی دارد و در این مطالعه هم مورد استفاده قرار گرفته است، روش آنالیز دینامیکی افزایشی است. این روش آنالیز، طیف وسیعی از شتابنگاشت ها را در تحلیل سازه ها در نظر گرفته و به پاسخ های کلی تری دست می یابد.

با وجود پیشرفت قابل توجه در حوزه بهینه سازی مهندسی سازه، اغلب پژوهش های موجود تمرکز خود را بر ارائه مفاهیم طراحی یا کاربردهای محدود الگوریتم های فراکاوشی گذاشته اند و بعد عملی و واقعی این روش ها در چارچوب طراحی لرزه ای مبتنی بر آیین نامه ها کم تر مورد توجه قرار گرفته است. نوآوری اصلی این پژوهش در آن است که فراتر از ارائه یک روش بهینه سازی، به ارزیابی کاملاً عملی و قابل پیاده سازی آن در طراحی واقعی قاب های فولادی بلند با سیستم های مهاربندی شورون و زیپر می پردازد. در این تحقیق، روش های فراکاوشی نه تنها برای تعیین وزن بهینه سازه به کار گرفته شده اند، بلکه فرآیند تحلیل و طراحی به گونه ای سازماندهی شده است که تمامی الزامات آیین نامه ای و اهداف عملکردی در قالب تحلیل دینامیکی افزایشی (IDA) به طور کامل ارزیابی شوند. بدین ترتیب این مطالعه از یک سو، کارایی عملی روش بهینه سازی را در محیط واقعی طراحی لرزه ای نشان می دهد و از سوی دیگر، امکان مقایسه شفاف و مستدل رفتار لرزه ای و وزن بهینه دو سیستم مهاربندی شورون و زیپر را فراهم می سازد.

۲- پژوهش های مرتبط

در ارتباط با موضوع بهینه یابی بر مبنای عملکرد قاب های فولادی با سیستم مهاربندی همگرا، بررسی های محدودی صورت پذیرفته است. یکی از کارهای پژوهشی قابل توجه، بررسی های صورت گرفته توسط قلی زاده و همکاران است. آن ها با استفاده از الگوریتم های بهینه یابی، اقدام به بهینه یابی موقعیت قرارگیری بادبندهای ضربدری در قاب های فولادی نموده اند که نتایج

حاصل، بیانگر تأثیر قابل توجه جانمایی بادبند با استفاده از الگوریتم های فراکاوشی بر وزن سازه است [۱۰].

یکی دیگر از کارهای انجام شده توسط قلی زاده و همکاران در خصوص بهینه یابی بر مبنای عملکرد قاب های فولادی، ارائه یک الگوریتم بهینه یابی برای حل موقعیت بهینه بادبندهای ضربدری است. هدف اصلی در مطالعه آن ها، یافتن جانمایی بهینه بادبندهای ضربدری و سیستم مهاربندی قطری در قاب های فولادی تحت بارهای لرزه ای است [۱۱].

از دیگر بررسی های انجام شده، می توان به پژوهش فرزاد و همکاران اشاره نمود. آن ها با استفاده از الگوریتم های بهینه یابی، اقدام به تعیین موقعیت بهینه مهار بازویی در سازه های بلند نموده اند. مطالعات آن ها بیانگر تأثیر قابل توجه موقعیت مهار بازویی در وزن بهینه این سیستم است [۱۲].

در مطالعه کاوه و همکاران، اقدام به تعیین جانمایی های بهینه مختلف بادبند ضربدری در قاب های فولادی پنج دهانه با تعداد طبقات مختلف با استفاده از الگوریتم های مختلف شده و با صرف نظر از نامطمئی های به وجود آمده در این گونه قاب ها، از تحلیل استاتیکی خطی برای برآورد پاسخ سازه استفاده شده است. در پژوهش فوق، جانمایی های بهینه مختلف بادبند ضربدری در قاب های فولادی ارائه شده است [۱۳].

هاگیشیتا^۱ در مطالعه خود برای یافتن جواب بهینه، موقعیت بادبند را همراه با نوع بادبند، بررسی کرده است. سازه مورد بررسی آن ها قاب پنج دهانه سه طبقه است. او به این نتیجه رسید که انتخاب نوع بادبند با توجه به موقعیت بادبند صورت می گیرد و در طبقات پایین، بادبند ضربدری و در طبقات بالا بادبندهای K و V شکل از نظر اقتصادی مؤثرتر هستند [۱۴].

کامشکی^۲ و همکاران، قاب های ۱۵ طبقه فولادی را با موقعیت ثابت بادبند و انواع بادبندها و همچنین قاب خمشی را با الگوریتم ژنتیک، مورد بررسی قرار دادند. آن ها به این نتیجه رسیدند که قاب فولادی با بادبند ضربدری نسبت به سایر قاب ها وزن کم تر و سختی زیادی دارد [۱۵].

اما در خصوص کارهای انجام یافته در مورد توسعه رفتارشناسی سیستم مهاربندی جانبی زیپر و همچنین ارتقای روش های طراحی این سیستم، می توان به مطالعه یانگ^۳ و همکاران اشاره نمود [۱۶]. آن ها در پژوهش خود یک روش

¹ Hagishita

² Kameshki

³ Yang

طراحی برای نیل به رفتار شکل پذیر در قاب‌های زیپر ارائه نمودند. نتایج حاصل از بررسی انجام شده، نشانگر طراحی ایمن این سیستم است. همچنین توزیع دررفت طبقات در ارتفاع سازه بیانگر یکنواختی آسیب‌های وارده در ارتفاع سازه است.

اوزچلیک^۱ و همکاران، در مطالعه خود به بررسی عملکرد لرزه‌ای قاب‌های کم مرتبه، میان مرتبه و بلندمرتبه پرداختند [۱۷]. مطالعات آن‌ها نشان دهنده تأثیر قابل توجه عضو زیپر در عملکرد لرزه‌ای قاب‌های میان مرتبه و بلندمرتبه است.

تیرکا^۲ و همکاران، در مطالعه خود با بررسی قاب‌های با سیستم مهار جانبی زیپر واقع شده در نواحی لرزه‌ای با ریسک بالا و نزدیک گسل اقدام به ارائه روش طراحی استاتیکی مناسب و همچنین رفتارشناسی این سیستم نمودند [۱۸].

مطالعه دیگر درخصوص بررسی عملکرد قاب‌های زیپر و برآورد رفتار هیستریتیک آن‌ها، توسط **ظاهری و همکاران** صورت گرفته است [۱۹]. پژوهش آن‌ها نشان دهنده تأثیر عضو زیپر در بازتوزیع نیروی نامتعادل به وجود آمده در بادبندها ناشی از کمناش بادبند فشاری در کل ارتفاع سازه و کاهش چرخش‌های پلاستیک تیر اتصال دهنده بادبندها است.

امامی و همکاران، با مطالعه بروی رفتار قاب‌ها با تعداد طبقات مختلف، به این نتیجه رسیدند که اضافه نمودن عضو زیپر به سیستم شورون موجب بهتر شدن رفتار دینامیکی سیستم و در نتیجه کنترل دررفت طبقات می‌شود [۴].

همان‌طور که ملاحظه می‌شود مطالعات انجام شده درخصوص سیستم باربر جانبی زیپر، بیانگر تأثیر قابل توجه افزودن این عضو بر رفتار سیستم است.

۳- فرمول بندی الگوریتم‌های بهینه‌یابی فراکاوشی

امروزه الگوریتم‌های فراکاوشی در حل مسائل، مخصوصاً مسائل مهندسی دارای محبوبیت زیادی هستند. در مجموعه بزرگی از مسائل، الگوریتم‌های فراکاوشی می‌توانند با کم‌ترین هزینه محاسباتی در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها، به نتایج بهینه دست یابند. علاوه بر موارد فوق، این الگوریتم‌ها تنها برای حل مسائل خاصی مورد استفاده قرار نمی‌گیرند و می‌توانند برای مسائل گوناگون مفید باشند. هر الگوریتم بهینه‌سازی فراکاوشی دارای فرمول بندی مخصوص خود است تا به جواب بهینه کلی نایل شود. در ادامه سه الگوریتم بهینه‌یابی فراکاوشی که در مقاله‌های مختلف بر روی مسائل مشابه پژوهش حاضر، مورد استفاده قرار گرفته‌اند معرفی

می‌شوند. در این مطالعه برای بهینه‌یابی قاب‌های فولادی از سه الگوریتم مختلف مطرح شده استفاده خواهد شد تا رویکردهای مختلف بهینه‌سازی پیاده‌سازی شده تا به جواب‌های بهینه کلی قابل اعتمادتری نایل شود.

۳-۱- الگوریتم اصلاح شده دلفین (MDE)

موقعیت یابی صوتی^۳ دلفین‌ها یک رادار بیولوژیکی است که از آن برای شکار در طبیعت استفاده می‌کند. الگوریتم بهینه‌سازی دلفین با الهام از این رفتار دلفین‌ها اقدام به جستجو در فضای طراحی می‌نماید [۲۰]. مهم‌ترین گام‌های الگوریتم اصلاح شده دلفین^۴ مطابق زیر است:

۱- تولید تعداد NL موقعیت به صورت تصادفی برای هر دلفین.

۲- محاسبه احتمال ازبیش تعریف شده PP با استفاده از رابطه (۱).

$$PP(Loop_i) = PP_1 + (1 - PP_1) \frac{Loop_i^{power}}{(LoopsNumber)^{power} - 1} \quad (1)$$

که در آن (PP₁) ضریب همگرایی در تکرار اول، (Loop_i) شماره حلقه و (Power) تعیین کننده درجه منحنی و (LoopsNumber) بیان کننده تعداد تکرار یا حلقه لازم برای همگرا شدن الگوریتم است که با توجه به تلاش محاسباتی، لازمه الگوریتم برای رسیدن به جواب تعیین می‌شود.

۳- محاسبه شایستگی هر یک از موقعیت‌های تولید شده در مرحله یک. شایستگی باید به صورتی تعریف شود که بهترین جواب دارای بیشترین مقدار باشد. به بیان دیگر باید هدف الگوریتم، افزایش مقدار شایستگی باشد.

۴- توزیع شایستگی هر یک از موقعیت‌ها مطابق یک توزیع مثلثی متقارن یا هر توزیع متقارن دیگر در فضای طراحی.

۵- محاسبه شایستگی تجمعی AF بر اساس قانون دلفین مطابق رابطه (۲).

$$AF_{(A+k)j} = \frac{1}{R_e} (R_e - |K|) Fitness(i) + AF_{(A+k)j} \quad (2)$$

که در آن (AF_{(A+k)j}) شایستگی تجمعی (A+k) امین عضو ماتریس فضای طراحی است که برای متغیر ژام انتخاب شده است. (R_e) مقدار شعاع تأثیری است که شایستگی تجمعی مربوط به یک موقعیت، فضای اطراف را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین (Fitness(i)) برابر مقدار شایستگی مربوط به موقعیت i است.

³ Echolocation

⁴ Modified Dolphin Echolocation Algorithm

¹ Ozcelik

² Tirca



۶- برای توزیع هموارتر احتمالات در فضای طراحی یک مقدار کوچک ε مطابق رابطه (۳) به تمامی احتمالات محاسبه شده در گام قبلی به فضای طراحی افزوده می شود.

$$\varepsilon = AF + \varepsilon \quad (3)$$

۷- یافتن بهترین جواب به دست آمده از بین تمام موقعیت ها و برابر صفر قرار دادن مقدار AF آن.

۸- محاسبه مقدار احتمال انتخاب گزینه $(i(i=1 \text{ to } AL_j))$ برای متغیر $(j(j=1 \text{ to } NV))$ طبق رابطه (۴):

$$P_{ij} = \frac{AF_{ij}}{\sum_{i=1}^{LA_j} AF_{ij}} \quad (4)$$

۹- اختصاص مقدار احتمال برابر PP به تمامی گزینه های مربوط به متغیرهای بهترین موقعیت و اختصاص مقدار احتمال مربوط به سایر گزینه های فضای طراحی برابر با P_{ij} .

۱۰- تکرار گام های ۲ الی ۸ به تعداد حلقه انتخاب شده برای مسئله مورد نظر [۲۱].

۲-۳- الگوریتم آموزش مدرسه (SBO)

الگوریتم SBO یک الگوریتم فراکاوشی است که از پروسه آموزشی الهام گرفته شده است. الگوریتم SBO یک استراژی تبادل مشترک اطلاعات است که اجازه می دهد فضای جستجو به صورت گسترده بررسی شده و نتایج با کیفیت بالاتری به دست آید [۲۲]. این الگوریتم شامل سه مرحله است که به طور خلاصه در زیر بیان می شود:

۱- فاز معلم: برای شبیه سازی این پروسه در الگوریتم، مکانیزیم معلم بایستی در تمامی دامنه متغیرهای طراحی اعمال شود. هریک از متغیرهای طراحی به صورت موضوعات جداگانه بررسی می شوند. در طول فاز معلم، دانش آموزان سعی می کنند اطلاعات خود را در موضوعات مختلف (متغیرهای طراحی مختلف) با توجه به دانش معلم، به روزرسانی نمایند. این عملیات به صورت ریاضی به شکل زیر تعریف می شود:

$$X_{new}^k(j) = X_{old}^k(j) \pm \Delta(j) \quad (5)$$

$$\Delta(j) = T_f \times r |M(j) - T(j)| \quad (6)$$

که در آن $(X^k(j))$ بیانگر زامین متغیر طراحی برای k امین بردار طراحی، (T_f) فاکتور آموزش، (r) یک عدد تصادفی در بازه $[0,1]$ ، $(M(j))$ متوسط کلاس و $(T(j))$ شرایط معلم است. در روابط (۵) و (۶)، $(\Delta(j))$ نشان دهنده اختلاف مابین معلم و متوسط کلاس

برای هر متغیر طراحی است (علامت آن باید طوری انتخاب شود که موجب حرکت دانش آموزان به طرف معلم شود). (T_f) فاکتور آموزش در رابطه (۶)، تنها پارامتر قابل تغییر در الگوریتم است و برای تعیین اندازه جستجوی محلی به کار می رود.

۲- فاز دانش آموز: یادگیری متقابل در بین دانش آموزان یک کلاس می تواند باعث افزایش عملکرد فردی و در نتیجه افزایش عملکرد کلی کلاس شود. شیوه فاز دانش آموز به صورت زیر است:

الف) انتخاب یک دانش آموز به صورت تصادفی، p

ب) انتخاب یک دانش آموز دیگر، q به طوری که $q \neq p$

پ) ارزیابی شایستگی هر دو دانش آموز

ت) اگر $F^p < F^q$ (دانش آموز p بهتر از دانش آموز q است) در این صورت:

$$X_{new}^p(j) = X_{old}^p(j) + r[X_{old}^q(j) - X^p(j)] \quad (7)$$

در غیر این صورت:

$$X_{new}^q(j) = X_{old}^q(j) + r[X^p(j) - X_{old}^q(j)] \quad (8)$$

در روابط (۷) و (۸)، (r) یک عدد تصادفی در بازه $[0,1]$ است. در صورتی که شایستگی دانش آموز q بهتر از دانش آموز p باشد، دانش آموز p به طرف دانش آموز q حرکت خواهد نمود و در غیر این صورت، برعکس خواهد بود. جهت و مقدار تغییرات وابسته به موقعیت فعلی دانش آموزان در فضای طراحی و اختلاف شایستگی دانش آموزان p و q خواهد بود.

۳- فاز مدرسه: در این مرحله با تعریف چندین کلاس و گسترش تبادل اطلاعات میان دانش آموزان به کل مدرسه، اقدام به انجام عملیات بهینه یابی می شود. در الگوریتم SBO هر کلاس مستقل در مدرسه، به طور هم زمان با استفاده از دو فاز قبلی اقدام به جستجوی فضای طراحی می نماید سپس در انتهای هر تکرار، یک ائتلافی از معلمین (یک معلم از هر کلاس) تشکیل می شود. قبل از شروع تکرار بعدی الگوریتم، برای هر یک از کلاس ها، یک معلم جدید از ائتلاف معلمین اختصاص داده می شود. این کار موجب انتقال دانش بین کلاس ها خواهد شد. انتخاب معلمین برای هریک از کلاس ها توسط مکانیزیم رولت^۲ با توجه به شایستگی معلم صورت می گیرد. در شکل (۱) فلوجارت الگوریتم SBO نشان داده شده است.

¹ School-Based Optimization

² Roulette Wheel Selection Mechanism

برای هر زوج از ذرات در تکرار l ام و برای هر مأمور i ام، موقعیت مرکز جرم (X^C) و فاصله ذرات (Dl) با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱) به دست می آید:

$$X_i^f(l) = \frac{m_i X_i(l) + m_{\frac{nop}{2}+i} X_{\frac{nop}{2}+i}^f(l)}{m_i + m_{\frac{nop}{2}+i}}, \quad i = 1, 2, \dots, \frac{nop}{2} \quad (10)$$

$$Dl_i(l) = \left| X_i(l) - X_{\frac{nop}{2}+i}^f(l) \right|, \quad i = 1, 2, \dots, \frac{nop}{2} \quad (11)$$

که (nop) ، نشان دهنده تعداد ذرات است.

توانایی ایجاد تعادل بین اکتشاف^۳ و استخراج^۴ یکی از مهم ترین ویژگی های این الگوریتم است. در طی فرایند بهینه سازی نرخ اکتشاف کاهش یافته و نرخ استخراج افزایش می یابد. در الگوریتم CMO موقعیت ذرات به صورت زیر به روز می شود:

در مرحله اول، یک پارامتر کنترل کننده (CP) ، که مقدار آن در طول فرایند بهینه سازی از یک به صفر تغییر پیدا می کند، به صورت رابطه (۱۲) تعریف می شود:

$$CP(l) = \exp\left(-\frac{5l}{l_{max}}\right) \quad (12)$$

که (l_{max}) حداکثر مقدار تکرارهای بهینه سازی است. اگر مقدار Dl_i بیش تر از مقدار CP باشد، موقعیت زوج ذرات i ام در فاز اکتشاف به صورت رابطه های (۱۳) و (۱۴) به روز می شود:

$$X_i(l+1) = X_i(l) - r \cdot (X_i^f(l) - X_i(l)) + r \cdot (X_{best}(l) - X_i(l)) \quad (13)$$

$$X_{\frac{nop}{2}+i}(l+1) = X_{\frac{nop}{2}+i}(l) + r \cdot (X_i^f(l) - X_{\frac{nop}{2}+i}(l)) + r \cdot (X_{best}(l) - X_{\frac{nop}{2}+i}(l)) \quad (14)$$

اگر مقدار Dl_i کم تر از مقدار CP باشد، موقعیت زوج ذرات i ام در فاز استخراج به صورت روابط (۱۵) و (۱۶) به روز می شود:

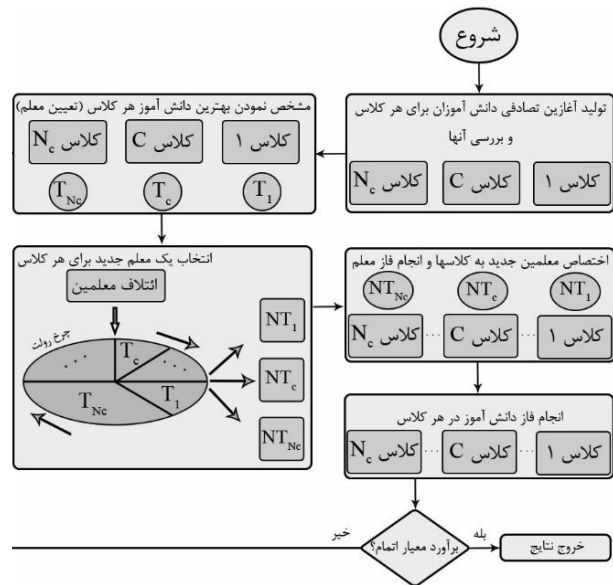
$$X_i(l+1) = X_i(l) + r \cdot (X_i(l) - X_{\frac{nop}{2}+i}(l)) \quad (15)$$

$$X_{\frac{nop}{2}+i}(l+1) = X_{\frac{nop}{2}+i}(l) + r \cdot (X_i(l) - X_{\frac{nop}{2}+i}(l)) \quad (16)$$

که در روابط فوق، (r) عددی رندوم بین صفر و یک بوده و (X_{best}) بهترین حل پیداشده تا آن لحظه است.

۴- طراحی بر مبنای عملکرد

روش طراحی بر مبنای عملکرد در سه مرحله زیر خلاصه می شود:



شکل ۱- فلوچارت الگوریتم آموزش مدرسه

۳-۳- الگوریتم بهینه سازی مرکز جرم (CMO)

الگوریتم بهینه سازی مرکز جرم^۱، به علت دارا بودن تنها یک پارامتر تنظیم و قابلیت حل مسائل پیچیده بهینه سازی بر پایه مفهوم فیزیکی مرکز جرم، فرمول بندی شده است. به طوری که جرم هر مأمور جستجو بزرگ تر باشد، فاصله آن تا مرکز جرم کوچک تر خواهد بود و برعکس. در ادامه فرمول بندی الگوریتم بهینه سازی مرکز جرم ارائه می شود [۱۱].

در الگوریتم CMO جرم هر مأمور جستجو از رابطه (۹) محاسبه می شود:

$$m_i = \frac{1}{fit_i} \quad (9)$$

که در آن (fit_i) مقدار برازندگی^۲ تابع هدف به ازای موقعیت مأمور i ام است.

مأموران جستجو بر اساس برازندگی آنها مرتب شده و به دو گروه مساوی تقسیم می شوند. هر مأمور جستجو یک جرم نامیده می شود. جرم های بزرگ تر در گروه اول و جرم های کوچک تر در گروه دوم قرار می گیرند. هر جرم در گروه اول با یک جرم در گروه دوم بر اساس فاصله بین آنها به روز می شود.

³ Exploration

⁴ Exploitation

¹ Center of Mass Optimization Algorithm

² Fitness

الف- تعریف اهداف عملکردی^۱ که ترکیبی از سطوح مخاطره^۲ و عملکرد است.

ب- تعیین ظرفیت لرزه‌ای سازه و المان‌های آن از طریق انجام تحلیل مدل ریاضی سیستم.

پ- بررسی عملکرد سازه و کنترل اهداف عملکردی تعریف‌شده در مرحله یک.

به‌طور مختصر اهداف عملکردی، مشخص‌کننده هدف عملکردی لرزه‌ای مطلوب سازه است. در این تحقیق بر اساس FEMA-356 سه هدف عملکردی برای سازه‌ها در نظر گرفته می‌شود [۲۳]:

- قابلیت استفاده بی‌وقفه^۳: در این سطح عملکردی پیش‌بینی می‌شود در اثر زلزله، مقاومت و سختی اجزای سازه تغییر قابل توجهی پیدا نکند و استفاده بی‌وقفه از آن ممکن باشد.
 - ایمنی جانی^۴: در این سطح عملکردی پیش‌بینی می‌شود در اثر وقوع زلزله، خرابی در سازه ایجاد شود ولی میزان آن به اندازه‌ای نباشد که منجر به خسارت جانی شود.
 - آستانه فروریزش^۵: در این سطح عملکردی پیش‌بینی می‌شود در اثر وقوع زلزله، خرابی گسترده در سازه ایجاد شود ولی سازه فرو نریزد و تلفات جانی به حداقل برسد.
- برای تعریف اهداف عملکردی لازم است بیش از یک سطح خطر تعریف شود. در اغلب روش‌های طراحی بر مبنای عملکرد، حداقل سه سطح خطر در نظر گرفته می‌شود:
- سطح خطر ۱ (یا زلزله سطح سرویس پایه): زلزله ارائه شده در این سطح خطر، دارای دوره بازگشت کوتاه است. بنابراین احتمال وقوع آن در عمر سازه زیاد است. به‌صورت احتمالاتی، امکان وقوع آن برابر ۵۰٪ در ۵۰ سال می‌باشد.
 - سطح خطر ۲ (یا زلزله سطح طراحی): به‌صورت نرمال فرض می‌شود زلزله این سطح خطر، دارای احتمال افزایش ۱۰٪ در ۵۰ سال را داشته باشد.
 - سطح خطر ۳ (یا زلزله سطح معتبر ماکزیمم): چنین سطح خطری را می‌توان در اهداف عملکردی بالا (تأسیسات بحرانی) مورد استفاده قرار داد و فرض می‌شود احتمال افزایش آن در ۵۰ سال ۲٪ است.

در این مطالعه، برای آنالیز سازه و برآورد ظرفیت آن از تحلیل پوش‌آور استفاده می‌شود. برای انجام طراحی مبتنی بر عملکرد در مرحله اول، سازه باید برای بارهای ثقلی و همچنین سایر محدودیت‌های طراحی در حالت سرویس جوابگو باشد. بارهای

ثقلی با ترکیب بار $1.2(DL) + 1.6(LL)$ در طراحی اعضا برای جوابگویی در برابر بارهای ثقلی با توجه به آیین‌نامه AISC 360-22 [۳۰]، بر روی تیرها اعمال می‌شود. پس از ارضای مرحله اول، نیاز سازه برای هر یک از سطوح عملکردی توسط آنالیز غیرخطی استاتیکی کنترل می‌شود. مقدار بار ثقلی که هنگام آنالیز پوش‌آور به‌صورت ثابت بر روی تیرها اعمال می‌شود مطابق FEMA-356 از ترکیب بار $Q = 1.1(DL + 0.25 LL)$ به‌دست می‌آید. تغییر مکان هدف بر اساس FEMA-356 با استفاده از رابطه (۱۷) محاسبه می‌شود:

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4 \pi^2} g \quad (17)$$

که در آن (T_e) زمان تناوب اصلی مؤثر ساختمان در امتداد مورد بررسی مطابق رابطه (۱۸) و سایر ضرایب مطابق دستورات FEMA-356 در مطالعه حاضر، اعمال می‌شوند. همچنین (S_a) شتاب طیفی به‌زای زمان تناوب اصلی مؤثر T_e است.

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (18)$$

که در آن (T_i) پریود اصلی الاستیک سازه، (K_i) و (K_e) به‌ترتیب سختی جانبی ارتجاعی و سختی جانبی مؤثر است. مقدار (S_a) برای هر یک از سطوح عملکردی مطابق رابطه (۱۹) محاسبه می‌شود:

$$S_a^i = \begin{cases} F_a S_s^i (0.4 + \frac{3T}{T_0^i}) & \text{if } 0 < T \leq 0.2 T_0^i \\ F_a S_s^i & \text{if } 0.2 T_0^i < T \leq T_0^i \\ \frac{F_v S_1^i}{T} & \text{if } T > T_0^i \end{cases} \quad (19)$$

که در آن (T_0) مطابق رابطه (۲۰) محاسبه می‌شود:

$$T_0^i = \frac{F_v S_1^i}{F_a S_s^i} \quad (20)$$

مقادیر (F_a) ، (F_v) ، (S_s) و (S_1) برای یک منطقه‌ای با خاک نوع D مطابق جدول (۱) و شکل (۲) است [۲۴]:

جدول ۱- مقادیر پارامترهای لرزه‌ای مربوط به خاک نوع D

سطح عملکرد	سطح مخاطره	S_s	S_1	F_a	F_v
IO	سال ٪۵۰/۵۰	۰/۶۵۸	۰/۱۹۸	۱/۲۷	۲/۰۰

⁴ Life Safety

⁵ Collapse Prevention

¹ Performance Objective

² Hazard Level

³ Immediate Occupancy



شتاب طیفی در پریود متناظر با مود n است و (Γ) از رابطه (۲۴) به دست می‌آید:

$$\Gamma = \frac{[\phi]^T [m] \{l\}}{M_n} \text{ in which } M_n = [\phi]^T [m] [\phi] \quad (24)$$

رابطه (۲۳) در صورت استفاده از ترکیب دو مد به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$F_j = \alpha_1 \Gamma_1 m \phi_1 S_a(\zeta_1, T_1) \pm \alpha_2 \Gamma_2 m \phi_2 S_a(\zeta_2, T_2) \quad (25)$$

بنابراین در پروسه‌هایی که نیازمند آنالیز پوش‌آور با انواع الگوهای بارگذاری است، می‌توان با روابط فوق چندین ترکیب از مد شکل‌های مختلف سازه را به‌عنوان الگوی بارگذاری اعمال نمود [۲۶].

۴-۱- فرمول‌بندی مسائل بهینه‌یابی بر مبنای عملکرد

می‌توان مسئله بهینه‌سازی مبتنی بر عملکرد را به صورت زیر فرمول‌بندی نمود:

$$\text{minimize: } F(x) \quad (26)$$

$$\text{subject to: } g_i^s(x) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (27)$$

$$g_j^{PBD}(x) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (28)$$

که در روابط فوق، (g_i^s) قید تنش اعضا تحت بارهای ثقلی که مطابق AISC-341-22 [۳۰] اعمال می‌شود و (g_j^{PBD}) قیود مربوط به طراحی مبتنی بر عملکرد هستند که مطابق روابط زیر اعمال می‌شوند. قیدهای مربوط به دررفت طبقات برای هر یک از سطوح عملکردی مطابق رابطه (۲۹) هستند:

$$g_i = \frac{\Delta^i}{(\Delta^i)_{all}} - 1 \leq 0 \quad i = IO, LS, CP \quad (29)$$

که در آن (Δ) دررفت طبقات و $(\Delta)_{all}$ دررفت مجاز طبقات برای هر یک از سطوح عملکردی که مطابق FEMA-356 برابر با مقادیر ارائه شده در جدول (۲) است [۲۳]:

جدول ۲- مقادیر مجاز دررفت طبقات

سطح عملکرد	$(\Delta)_{all}$
IO	٪۰/۵
LS	٪۱/۵
CP	٪۲/۰

مکانیزم‌های محتمل خرابی در تیرها مطابق آیین‌نامه FEMA-356 تلاش‌های کنترل‌شونده توسط تغییرشکل (DC) در

LS	سال	۰/۷۹۴	۰/۲۳۷	۱/۱۸	۱/۹۲
	٪۱۰/۵۰				
CP	سال	۱/۱۵۰	۰/۳۴۶	۱/۰۴	۱/۷۰
	٪۲/۵۰				

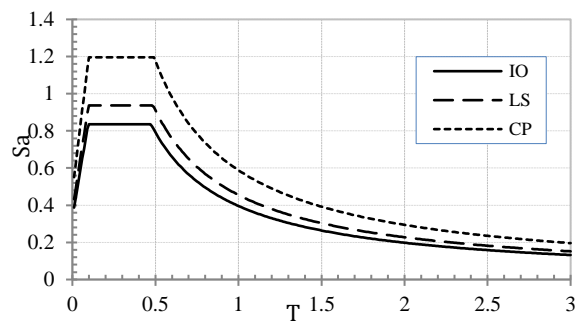
در جدول (۱) پارامترهای (S_s) پریود کوتاه^۱، (S_1) پریود اولیه شتاب پاسخ^۲ و (F_a) و (F_v) ضرایب سایت^۳ هستند. الگوی توزیع نیروی جانبی آنالیز پوش‌آور در ارتفاع ساختمان مطابق رابطه (۲۱) است:

$$C_{vx} = \frac{W_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n W_i h_i^k} \quad (21)$$

که در آن (w_i) قسمتی از وزن طبقه i ام، (h_i) ارتفاع طبقه i ام و (k) مطابق رابطه (۲۲) محاسبه می‌شود:

$$k = \begin{cases} 2 & \text{for } T \geq 2.5 \text{ seconds} \\ 1 & \text{for } T \leq 0.5 \text{ seconds} \end{cases} \quad (22)$$

که برای مقادیر میانی (T) با استفاده از درون‌یابی، مقدار k محاسبه می‌شود.



شکل ۲- منحنی طیف پاسخ مطابق جدول (۱)

آیین‌نامه FEMA-356 تأکید می‌کند در آنالیز پوش‌آور، حداقل باید از دو الگوی بار جانبی که به مدل ریاضی اعمال می‌شود، استفاده نمود. در این مطالعه، از الگوی بار جانبی مطابق با C_{vx} (رابطه (۲۱)) و الگوی بار جانبی یکنواخت مطابق توزیع جرم در هر سطح و همچنین برای در نظر گرفتن مشارکت مدهای بالاتر از الگوی بار جانبی مطابق رابطه (۲۳) نیز استفاده می‌شود [۲۵]. پاسخ‌های دریافت‌شده، مقادیر حداکثر ارائه شده توسط سه الگوی بار جانبی فوق خواهد بود.

$$F_j = \Sigma \alpha_n \Gamma_n m \phi_n S_n(\xi_n, T_n) \quad (23)$$

که در آن (α_n) ضریب اصلاح است که مقدار آن می‌تواند منفی یا مثبت باشد؛ (ϕ_n) بردار مد شکل مربوط به مد n ام و (S_n)

¹ Short-Period

² First Sec-Period Response Acceleration

³ Site Coefficients

خمش ستون هستند. قید تغییرشکل محوری برای بادبندها مطابق رابطه (۳۴) است:

$$g_{\Delta_i}^{p/50}(X) = \begin{cases} \frac{\Delta_{Ci}^{p/50}}{\Delta_{PTi}^{p/50}} - 1 \leq 0 & \text{in compression} \\ \frac{\Delta_{Ti}^{p/50}}{\Delta_{PTi}^{p/50}} - 1 \leq 0 & \text{in tension} \end{cases}, \quad (34)$$

$i = 1, 2, \dots, nb$

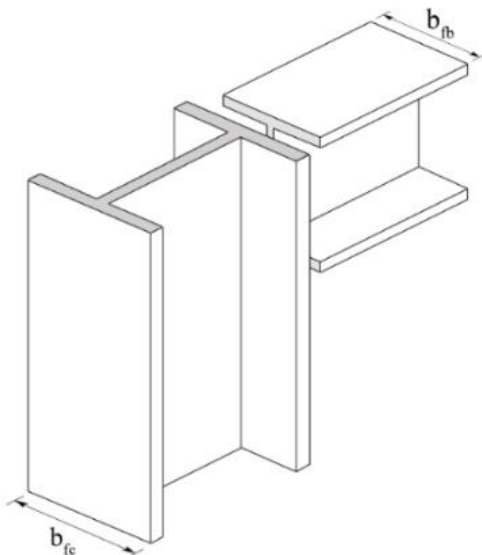
که در آن، $(\Delta_{Ci}^{p/50})$ و $(\Delta_{Ti}^{p/50})$ به ترتیب تغییرشکل محوری بادبند نام برای سطح خطر $p/50$ در فشار و کشش، $(\Delta_{PTi}^{p/50})$ و $(\Delta_{PCi}^{p/50})$ مقادیر مجاز آن‌ها مطابق جداول ۵-۶ و ۵-۷، FEMA-356 و (nb) تعداد بادبندها می‌باشد. برای کنترل تغییرشکل محوری ستون در کشش از رابطه (۳۴) استفاده می‌شود و مقادیر مجاز آن مطابق جداول ۵-۶ و ۵-۷، FEMA-356 تعیین می‌شود. نکته مهم دیگر در طراحی قاب‌های فولادی، در نظر گرفتن قید مربوط به اتصال تیر به ستون برای ملاحظات اجرایی است که با توجه به شکل (۳) مطابق رابطه (۳۵) فرمول‌بندی می‌شود:

$$g_{B1} = \frac{b_{fb}}{b_{fc}} - 1 \leq 0, \quad m = 1, \dots, nj \quad (35)$$

قید مربوط به اتصال ستون به ستون در طبقات، مطابق رابطه (۳۶) در نظر گرفته می‌شود:

$$g_c = \frac{A_c^T}{A_c^B} - 1 \leq 0 \quad (36)$$

که در آن، (A_c^B) سطح مقطع ستون طبقه پایین و (A_c^T) سطح مقطع ستون طبقه بالا است.



شکل ۳- اتصال تیر به ستون

سطوح مختلف عملکرد است. معیار پذیرش بر اساس میزان چرخش پلاستیک تیرها مطابق رابطه (۳۰) در نظر گرفته می‌شود.

$$g_2 = \frac{\theta^i}{(n\theta_y)} - 1 \leq 0 \quad i = IO, LS, CP \quad (30)$$

که در آن، (θ) چرخش پلاستیک تیر در هر سطح عملکرد، (n) مطابق جدول ۵-۶ و ۵-۷ آیین‌نامه FEMA-356 بر اساس میزان فشردگی مقاطع فولادی و (θ_y) مطابق رابطه (۳۱) محاسبه می‌شود:

$$\theta_y = \frac{ZF_y e l_b}{6EI_b} \quad (31)$$

که در آن، (Z) مدول مقطع پلاستیک، $(F_y e)$ تنش تسلیم مورد انتظار فولاد، (l_b) طول عضو، (E) مدول الاستیسیته و (I_b) ممان اینرسی عضو است. معیار پذیرش ستون در طراحی بر مبنای عملکرد، بر اساس کنترل مکانیزم‌های محتمل خرابی در ستون تعریف می‌شود. برای رسیدن به این مهم، باید تلاش‌های کنترل‌شونده توسط نیرو (FC) و تلاش‌های کنترل‌شونده توسط تغییرشکل (DC) در سطوح مختلف عملکرد ستون مشخص شوند.

ستون‌های دارای نیروی خمش همراه با نیروی محوی در تغییرمکان هدف کم‌تر از ۵۰٪ مقاومت فشاری حد پایین ستون (P_{CL}) به صورت کنترل‌شونده توسط تغییرشکل لحاظ شده و قید حداکثر چرخش پلاستیک برای هر ستون در این حالت مطابق رابطه (۳۲) در نظر گرفته می‌شود:

$$g_{DC,i}^{p/50}(X) = \frac{\theta_i^{p/50}}{\theta_{p,i}^{p/50}} - 1 \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, nc \quad (32)$$

که در آن، $(\theta_i^{p/50})$ حداکثر چرخش پلاستیک ستون نام در سطح خطر $p/50$ ، $(\theta_{p,i}^{p/50})$ چرخش مجاز ستون نام تعریف شده در جداول ۵-۶ و ۵-۷، FEMA-356 که با توجه به مقدار نیروی محوی و شرایط فشردگی لرزه‌ای مقطع فولادی بوده، همچنین تعداد ستون‌ها می‌باشد. ستون‌های دارای نیروی خمش همراه با نیروی محوی در تغییرمکان هدف بیشتر یا مساوی با ۵۰٪ (P_{CL}) به صورت کنترل‌شونده توسط نیرو لحاظ شده و قید حداکثر چرخش پلاستیک برای هر ستون در این حالت مطابق رابطه (۳۳) در نظر گرفته می‌شود:

$$g_{FC,i}^{p/50}(X) = \frac{P_{UF,i}^{p/50}}{P_{CL}} + \frac{M_{UF,i}^{p/50}}{M_{CL}} - 1 \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, nc \quad (33)$$

که در آن، $(P_{UF,i}^{p/50})$ و $(M_{UF,i}^{p/50})$ به ترتیب نیروی محوی و لنگر خمش ایجاد شده توسط بارهای ثقلی در مشارکت با نیروهای لرزه‌ای در حالت کنترل نیرو برای ستون نام در سطح خطر $p/50$ و (P_{CL}) و (M_{CL}) به ترتیب مقاومت فشاری حد پایین و مقاومت

¹ Lower-Bound Compression Strength

۵- بهینه‌یابی سازه‌های فولادی با سیستم مهار جانبی

زیپر و شورون

سازه‌های مورد بررسی در این مطالعه، قاب‌های سه دهانه ۱۰ و ۱۵ طبقه هستند. گروه‌بندی اعضای این سازه‌ها به این صورت انجام می‌شود که ستون‌های کناری و داخلی در دو گروه مختلف در دو طبقه متوالی قرار می‌گیرند. گروه‌بندی تیرها، بادبندها و زیپر‌ها مانند ستون‌ها در دو طبقه متوالی مطابق شکل (۴) انجام می‌گیرد. مقطع اعضای تیر و ستون از لیست مقاطع استاندارد W-section و مقاطع بادبند و اعضای زیپر از لیست مقاطع باکس HSS مطابق جدول (۳) انتخاب می‌شود.

مقادیر بار مرده و زنده اعمالی بر روی تیرها به ترتیب ۳۱/۵ کیلونیوتن بر متر و ۹/۸ کیلونیوتن بر متر هستند. تنش تسلیم المان‌های تیر، ستون و اعضای زیپر به ترتیب ۳۴۴/۷ مگاپاسکال، ۳۴۴/۷ مگاپاسکال، ۳۱۷/۲ مگاپاسکال با درصد سخت‌شدگی ۰/۳، همچنین تنش تسلیم المان‌های بادبند ۳۱۷/۲ مگاپاسکال است. وزن واحد حجم فولاد و مدول الاستیسیته به ترتیب ۶۷/۷۲ کیلونیوتن بر مترمکعب و ۲۰۰ گیگاپاسکال در نظر گرفته می‌شود. مزایای الگوریتم‌های انتخاب‌شده تعداد کم پارامترهای قابل تنظیم است. مقدار پارامتر Power در الگوریتم MDE در این مطالعه برابر با ۰/۵ و مقدار T_f در الگوریتم SBO به صورت تصادفی بین دو عدد ۱ و ۲ انتخاب می‌شود. در این تحقیق از نرم‌افزار Opensees برای انجام آنالیزهای بارافزون استفاده شده است.

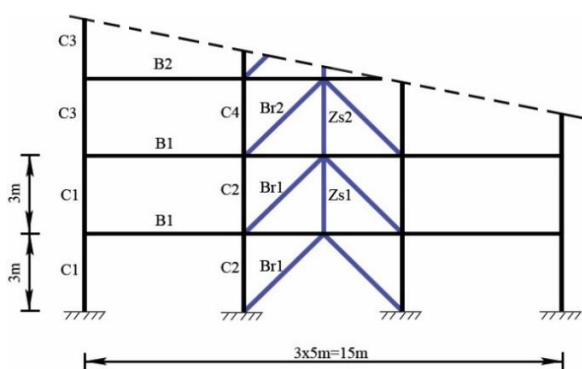
در مدل‌سازی غیرخطی تیرها و ستون‌ها در نرم‌افزار Opensees، پلاستیسیته توزیع‌شده از طریق المان‌های تیر-ستون غیرخطی با مقاطع فیبری اعمال می‌شود. این رویکرد، برخلاف ایده‌آل‌سازی مفصل پلاستیک در گره‌های مشخص، امکان بروز تسلیم را نه تنها در دو انتهای عضو، بلکه در امتداد کل طول آن فراهم می‌سازد. در مدل‌های تحلیلی قاب‌های مورد مطالعه، اثرات $P-\Delta$ برای تمامی اعضا با استفاده از تبدیلات هندسی هم‌چرخشی در نظر گرفته شده‌اند.

برای مدل‌سازی مصالح، فیبرهای تیر و ستون به یک مدل دوخطی با نسبت سخت‌شدگی پس از تسلیم برابر با ۳ درصد مدول الاستیسیته اختصاص داده می‌شوند تا رفتار غیرخطی مصالح به درستی ثبت شود. مدل‌سازی رفتار غیرخطی مهاربندها به مراتب پیچیده‌تر است، زیرا نیازمند در نظر گرفتن برهم‌کنش تسلیم،

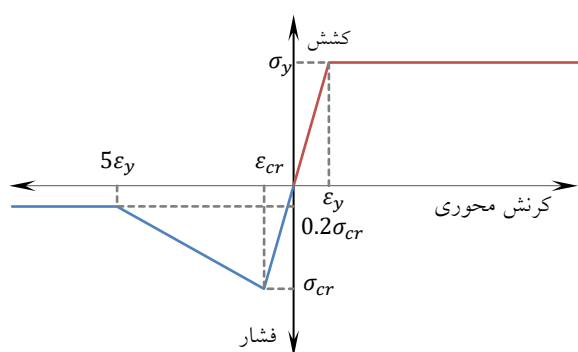
کمانش کلی، کمانش موضعی و شکست است. یکی از روش‌های متداول، استفاده از مدل فیبری محوری-خمشی است که نیازمند کالیبراسیون مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی برای تعیین پارامترهایی از جمله تعداد المان‌های مناسب در هر مهاربند، میزان اولیه ناکاملی میانی طول و نسبت سخت‌شدگی مصالح است.

به‌طور جایگزین، می‌توان رفتار مهاربند را با یک مدل پدیده‌شناختی [۳۱]، که توسط FEMA نیز تأیید شده است، مدل‌سازی نمود. در این روش، رفتار مهاربند در فشار و کشش مطابق با منحنی‌های هیستریزس مشخص مطابق شکل (۵) تعریف می‌شود؛ به طوری که مقاومت فشاری پساکمانشی معمولاً حدود ۲۰ درصد بار اولیه کمانش در نظر گرفته می‌شود؛ این مقدار مطابق با توصیه‌های FEMA است. در محیط Opensees، برای مدل‌سازی رفتار مصالح تیر و ستون از مدل Steel01 استفاده می‌شود؛ درحالی‌که برای ثبت پاسخ هیستریزس غیرخطی مهاربندها از ماده uniaxialMaterial Hysteretic بهره گرفته می‌شود.

برای اعمال تمامی ضوابط آیین‌نامه‌ای و الگوریتم‌های بهینه‌یابی از نرم‌افزار کد نویسی MATLAB استفاده شده است.



شکل ۴- گروه‌بندی المان‌های سازه‌ای



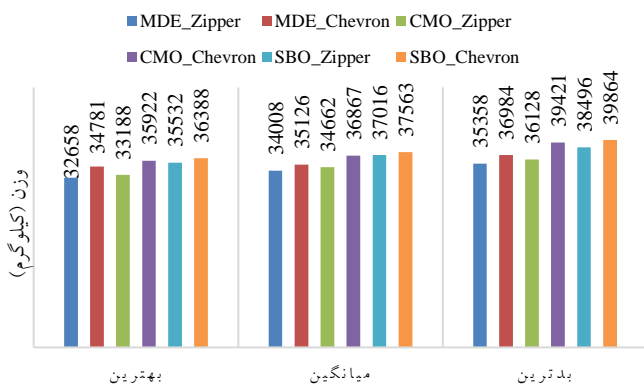
شکل ۵- منحنی تنش-کرنش رفتار مهاربند

جدول ۳- لیست مقاطع

مقاطع تیرها و ستون‌ها						مقاطع بادبندها و اعضای زیپر			
ردیف	مقطع	ردیف	مقطع	ردیف	مقطع	ردیف	مقطع	ردیف	مقطع
۱	W14×22	۱۱	W14×74	۲۱	W14×193	۳۱	HSS3×3×0.375	۴۱	HSS9×9×0.625
۲	W14×26	۱۲	W14×82	۲۲	W14×211	۳۲	HSS3-1/2×3-1/2×0.375	۴۲	HSS10×10×0.500
۳	W14×30	۱۳	W14×90	۲۳	W14×233	۳۳	HSS4×4×0.500	۴۳	HSS10×10×0.625
۴	W14×34	۱۴	W14×99	۲۴	W14×257	۳۴	HSS4-1/2×4-1/2×0.500	۴۴	HSS14×14×0.500
۵	W14×38	۱۵	W14×109	۲۵	W14×283	۳۵	HSS5×5×0.500	۴۵	HSS14×14×0.625
۶	W14×43	۱۶	W14×120	۲۶	W14×311	۳۶	HSS6×6×0.500	۴۶	HSS16×16×0.625
۷	W14×48	۱۷	W14×132	۲۷	W14×342	۳۷	HSS7×7×0.625	۴۶	HSS18×18×0.625
۸	W14×53	۱۸	W14×145	۲۸	W14×370	۳۸	HSS8×8×0.500	۴۸	HSS20×20×0.625
۹	W14×61	۱۹	W14×159	۲۹	W14×398	۳۹	HSS8×8×0.625	۴۹	HSS22×22×0.625
۱۰	W14×68	۲۰	W14×176	۳۰	W14×426	۴۰	HSS9×9×0.500	۵۰	HSS24×24×0.625

جدول ۴- نتایج بهینه‌یابی برای قاب ۱۰ طبقه

وزن (کیلوگرم)	SBO		CMO		MDE	
	شورون	زیپر	شورون	زیپر	شورون	زیپر
بهترین	۳۶۳۸۸	۳۵۵۳۲	۳۵۹۲۲	۳۳۱۸۸	۳۴۷۸۱	۳۲۶۵۸
میانگین	۳۷۵۶۳	۳۷۰۱۶	۳۶۸۶۷	۳۴۶۶۲	۳۵۱۲۶	۳۴۰۰۸
بدترین	۳۹۸۶۴	۳۸۴۹۶	۳۹۴۲۱	۳۶۱۲۸	۳۶۹۸۴	۳۵۳۵۸
انحراف از معیار	۱۰.۲۰	۹.۵۴	۸.۹۶	۹.۳۷	۹.۴۳	۸.۶۱
درصد	٪ ۱۱/۴۲	٪ ۸/۸	٪ ۱۰	٪ ۱/۶۳	٪ ۶/۵	--
نسبت به بهترین نتیجه						



شکل ۶- مقایسه وزن بهینه سیستم زیپر و شورون به دست آمده توسط الگوریتم‌های مختلف برای قاب ۱۰ طبقه

۵-۱- بهینه‌یابی قاب‌های ۱۰ طبقه با سیستم مهار جانبی زیپر و شورون

برای بهینه‌یابی قاب‌های ۱۰ طبقه توسط الگوریتم بهینه‌یابی اصلاح شده دلفین (MDE) تعداد سازه در هر تکرار الگوریتم برابر ۴۰ با تعداد تکرار ۳۰۰ و توسط الگوریتم آموزش مدرسه (SBO) تعداد تکرار برابر ۳۰۰، تعداد کلاس برابر ۲ و تعداد دانش‌آموز برابر ۲۰ و توسط الگوریتم مرکز جرم (CMO) تعداد تکرار برابر ۳۰۰، تعداد سازه در هر تکرار الگوریتم برابر ۴۰ در نظر گرفته می‌شود. به منظور رسیدن به جواب بهینه و پرهیز از جواب بهینه موضعی، عملیات بهینه‌یابی با تعداد تکرارهای فوق به تعداد ۱۰ مرتبه برای هر الگوریتم تکرار شده است. در جدول (۴) نتایج آماری وزن به دست آمده طی ۱۰ مرتبه بهینه‌یابی توسط هر الگوریتم نشان داده شده است. همان‌طور که از این جدول مشاهده می‌شود، بهترین نتیجه آماری به دست آمده مربوط به الگوریتم MDE است. همچنین در شکل (۶) نمودار میله‌ای مقایسه مستقیم وزن بهینه سیستم زیپر و شورون به دست آمده توسط الگوریتم‌های مختلف نشان داده شده است. مقاطع سازه‌ای بهینه حاصل، مطابق جدول (۳) توسط الگوریتم MDE در شکل (۷) نشان داده شده است. شکل (۸) منحنی همگرایی الگوریتم‌ها برای بهترین نتیجه حاصل را برای قاب مورد مطالعه نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۸) می‌توان ملاحظه نمود نرخ همگرایی الگوریتم MDA نسبت به الگوریتم‌های CMO و SBO یکنواخت است. همچنین در شکل (۹) نمودار پوش‌آور نشان داده شده است.

طبقه نرم و جلوگیری از پدید آمدن الگوی فروریزش پراکنده است. این درحالی است که در قاب شورون، مفاصل پلاستیک در طبقات پایین و بالایی پراکندگی بیش تری دارند که می تواند به شکل گیری مکانیزم های نامطلوب در حین زلزله های شدید منجر شود. به طور کلی، مجموعه نتایج کمی و کیفی نشان می دهد که سیستم زیبر در قیاس با قاب شورون با موارد زیر، رفتار لرزه ای برتر و مطمئن تری را برای سازه ۱۰ طبقه فراهم می آورد.

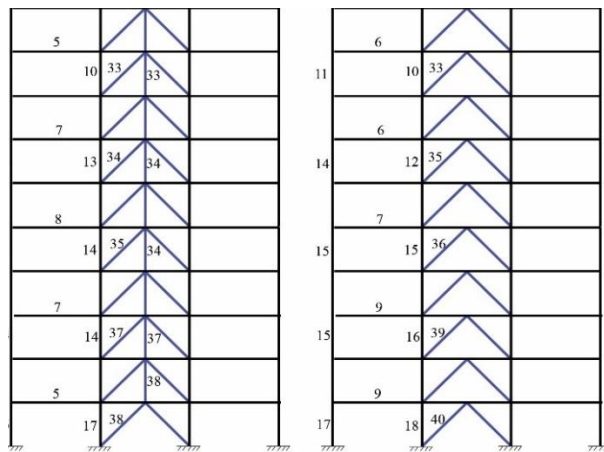
- کاهش قابل توجه دررفت،
- افزایش کارایی بادبندها و فعال شدن یکنواخت تر آنها،
- تمرکز کنترل شده مفاصل پلاستیک و بهبود رفتار در سطح CP.

۵-۲- بهینه یابی قاب های ۱۵ طبقه با سیستم مهار جانبی زیبر و شورون

برای بهینه یابی قاب ۱۵ طبقه فولادی با سیستم مهار جانبی زیبر و شورون توسط الگوریتم بهینه یابی دلفین، تعداد سازه در هر تکرار الگوریتم برابر ۴۰ با تعداد تکرار ۴۰۰ و توسط الگوریتم آموزش مدرسه، تعداد تکرار برابر ۴۰۰، تعداد کلاس برابر ۲ و همچنین تعداد دانش آموز برابر ۲۰ و توسط الگوریتم مرکز جرم، تعداد تکرار برابر ۴۰۰، تعداد سازه در هر تکرار الگوریتم برابر ۴۰ در نظر گرفته می شود. برای رسیدن به جواب بهینه و پرهیز از جواب بهینه موضعی، عملیات بهینه یابی با تعداد تکرارهای فوق به تعداد ۱۰ مرتبه برای هر الگوریتم تکرار شده است.

در جدول (۵) نتایج آماری وزن به دست آمده طی ۱۰ مرتبه بهینه یابی توسط هر الگوریتم نشان داده شده است. همان طور که از این جدول مشاهده می شود بهترین نتیجه آماری به دست آمده مربوط به الگوریتم MDE است. همچنین در شکل (۱۰) نمودار میله ای مقایسه مستقیم وزن بهینه سیستم زیبر و شورون به دست آمده توسط الگوریتم های مختلف نشان داده شده است.

مقاطع سازه ای به دست آمده مطابق جدول (۳) توسط الگوریتم MDE در شکل (۱۲) نشان داده شده است. شکل (۱۳) منحنی همگرایی الگوریتم ها، برای بهترین نتیجه حاصل را در قاب مورد مطالعه نشان می دهد. با توجه به شکل (۱۳) می توان ملاحظه نمود نرخ همگرایی الگوریتم MDA نسبت به الگوریتم های CMO و SBO یکنواخت است. همچنین در شکل (۱۴) نمودار پوش آور نشان داده شده است. همان طور که از نمودار پوش آور مشخص است، اعضای زیبر موجب بازیابی سختی سازه می شود.



شکل ۷- بهترین نتیجه مقاطع بهینه سازه ای به دست آمده توسط الگوریتم ها برای قاب سیستم زیبر و شورون ۱۰ طبقه فولادی

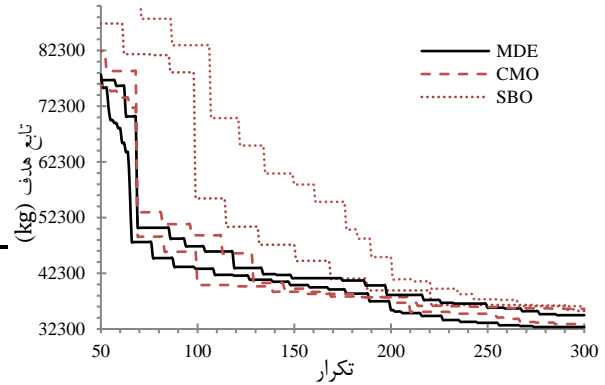
قیدهای آیین نامه ای حاکم بر روند طراحی قاب ۱۰ طبقه شامل قید مربوط به دررفت طبقات در سطح IO، قید مربوط به تغییر شکل محوری بادبندها در سطح IO، قید مربوط به ستون های کنترل شونده توسط نیرو $g_{FC,i}^{2/50}$ در سطح عملکرد CP و همچنین قید مربوط به چرخش پلاستیک اعضا در سطح CP هستند. شکل (۱۱) مقادیر قیود فوق را برای بهینه ترین قاب به دست آمده توسط الگوریتم MDE برای سیستم زیبر و شورون نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می شود تمامی قیود طراحی بر مبنای عملکرد در محدوده مجاز قرار دارند.

همان طور که از نمودار پوش آور و نمودار قیدهای فعال قاب های شورون و زیبر مشخص است، عضو زیبر باعث جلوگیری از تغییر شکل های بزرگ و ایجاد مکانیزم نامتقارن در بادبندها، رفتار قاب به صورت چند طبقه ای و هماهنگ، کاهش مقادیر مفصل های پلاستیک، پخش انرژی بین چند طبقه، ایجاد مسیر جایگزین برای انتقال نیروهای قائم ناشی از رفتار مختلف مهاربندها و بازیابی سختی سازه در سطوح بالای بار جانبی می شود.

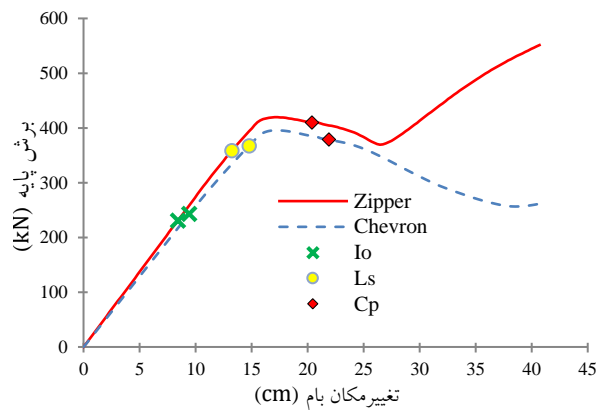
نتایج به دست آمده از شکل (۹) نشان می دهد که سیستم زیبر در مقایسه با سیستم شورون عملکرد لرزه ای کارآمدتری ارائه می کند. در سطح عملکرد IO، سیستم زیبر قادر است حداکثر دررفت بین طبقه ای را حدود ۸ تا ۱۰ درصد نسبت به قاب شورون کاهش دهد؛ این کاهش دررفت ناشی از افزایش سختی جانبی مؤثر و بهبود توزیع تغییر مکان ها در ارتفاع سازه است.

نسبت تقاضا به ظرفیت ستون ها در سطح CP نیز در هر دو سیستم در محدوده مشابه (حدود ۰/۵۷ تا ۰/۹۷) قرار دارد، اما الگوی تشکیل مفاصل پلاستیک در قاب زیبر که عمدتاً در ناحیه میانی ارتفاع متمرکز شده است، نشان دهنده کنترل بهتر مکانیزم

قیدهای آیین‌نامه‌ای حاکم بر روند طراحی قاب ۱۵ طبقه، شامل قید مربوط به دررفت طبقات در سطح IO، قید مربوط به تغییر شکل محوری باندبدها در سطح IO، قید مربوط به ستون‌های کنترل‌شونده توسط نیرو $g_{FC,i}^{2/50}$ در سطح عملکرد CP و همچنین قید مربوط به چرخش پلاستیک اعضا در سطح CP هستند.



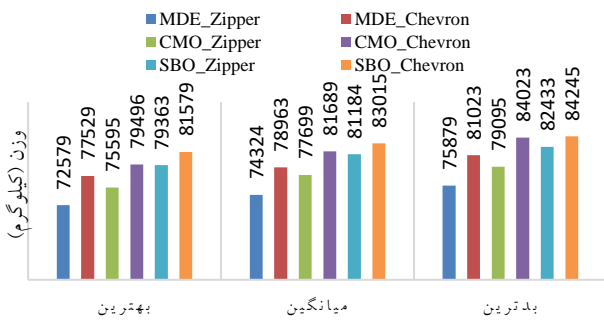
شکل ۸- منحنی‌های همگرایی الگوریتم‌های MDE, CMO, SBO برای قاب‌های بهینه ۱۰ طبقه فولادی با سیستم زیپر و شورون



شکل ۹- نمودار پوش‌آور تحت الگوی بار جانبی C_{vx} برای بهترین نتیجه حاصل قاب سیستم زیپر و شورون ۱۰ طبقه فولادی

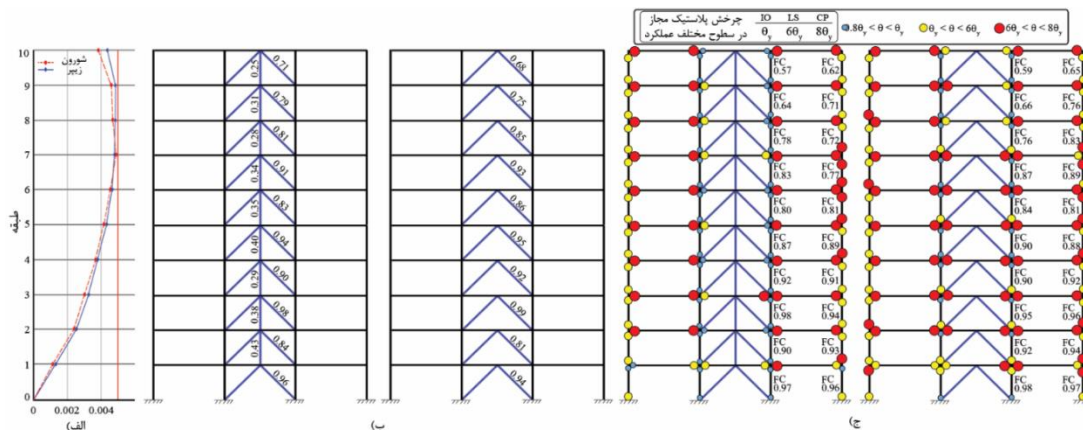
جدول ۵- نتایج بهینه‌یابی برای قاب ۱۵ طبقه

وزن (کیلوگرم)	SBO		CMO		MDE	
	شورون	زیپر	شورون	زیپر	شورون	زیپر
بهترین	۸۱۵۷۹	۷۹۳۶۳	۷۹۴۹۶	۷۵۵۹۵	۷۷۵۲۹	۷۲۵۷۹
میانگین	۸۳۰۱۵	۸۱۱۸۴	۸۱۶۸۹	۷۷۶۹۹	۷۸۹۶۳	۷۴۳۲۴
بدترین	۸۴۲۴۵	۸۲۴۳۳	۸۴۰۲۳	۷۹۰۹۵	۸۱۰۲۳	۷۵۸۷۹
انحراف از معیار	۱۰۰۸	۱۰۵۸	۱۱۱۳	۱۰۲۸	۱۰۰۵	۹۹۲
درصد	٪۱۲/۴	٪۹/۳۵	٪۹/۵۳	٪۴/۱۵	٪۶/۸۲	—
نسبت به بهترین نتیجه						

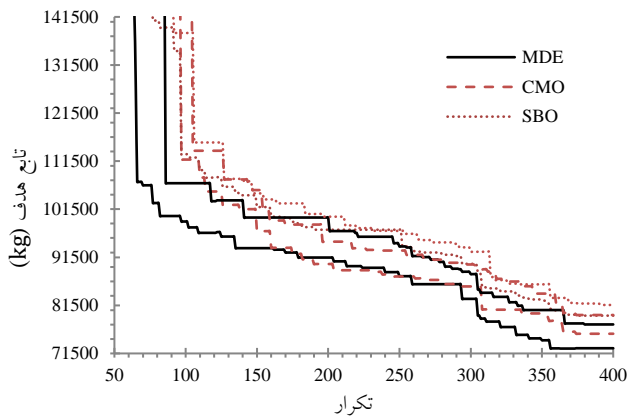


شکل ۱۰- مقایسه وزن بهینه سیستم زیپر و شورون به دست آمده توسط الگوریتم‌های مختلف برای قاب ۱۵ طبقه

شکل (۱۵) مقادیر قیود فوق را برای بهینه‌ترین قاب به دست آمده توسط الگوریتم MDE را نشان می‌دهند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تمامی قیود طراحی بر مبنای عملکرد در محدوده مجاز قرار دارند.

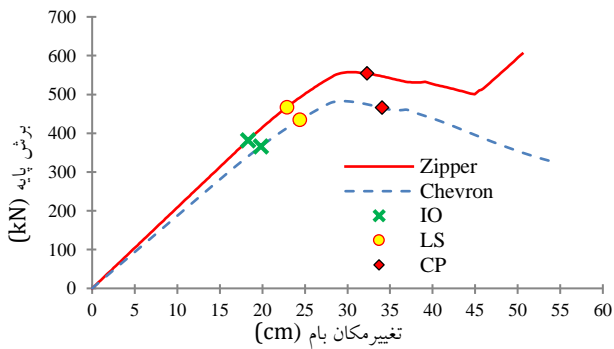


شکل ۱۱- قیدهای طراحی فعال برای قاب‌های ۱۰ طبقه بهینه، الف) مقادیر دررفت طبقات در سطح IO، ب) تغییر شکل محوری باندبدها در سطح IO ج) مقادیر قید مربوط به ستون‌های کنترل‌شونده توسط نیرو و قید مربوط به چرخش پلاستیک اعضا در سطح CP



شکل ۱۳- منحنی‌های همگرایی الگوریتم‌های MDE, CMO, SBO برای

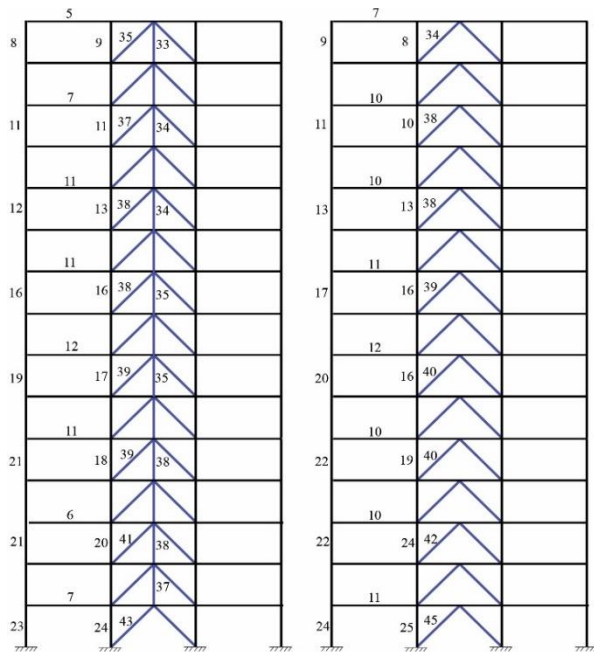
قاب‌های بهینه ۱۵ طبقه فولادی با سیستم زیپر و شورون



شکل ۱۴- نمودار پوش‌آور تحت الگوی بار جانبی C_{vx} برای بهترین

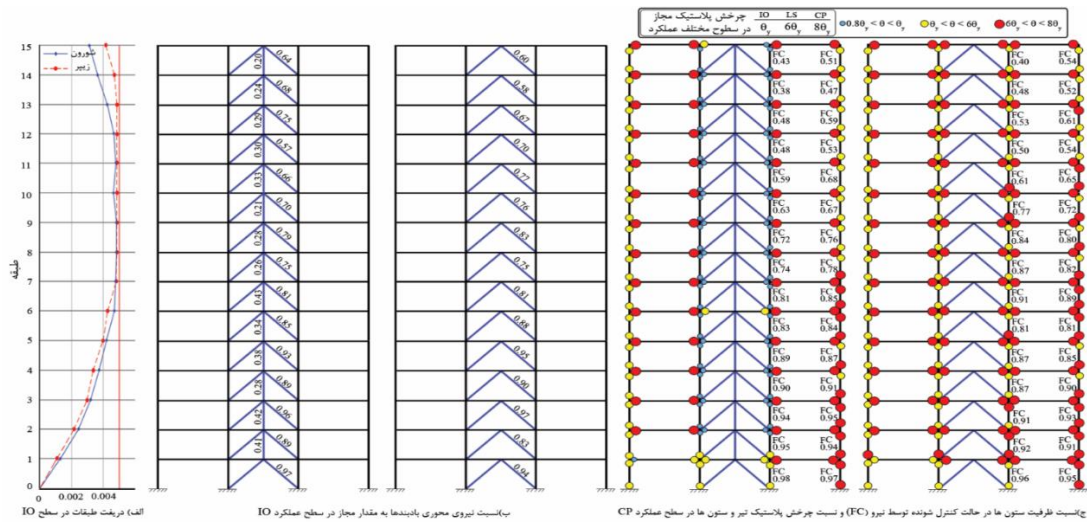
نتیجه حاصل قاب سیستم زیپر و شورون ۱۵ طبقه فولادی

تحلیل مقادیر نسبت تغییرشکل محوری مهاربندها در مدل ۱۵ طبقه، نشان می‌دهد که اگرچه مقدار میانگین این شاخص در قاب شورون برابر ۰/۸۶ و مقداری بزرگ‌تر از مقدار متناظر در قاب زیپر (۰/۷۹) است، اما پراکندگی تغییرشکل‌ها در قاب شورون بسیار نامنظم و همراه با نوسان‌های شدید بین طبقات بوده است. در مقابل، در قاب زیپر، روند تغییرشکل‌ها کاملاً پیوسته و منظم بوده و انحراف معیار آن حدود ۱۵٪ کم‌تر از قاب شورون به دست آمد، که بیانگر بهبود قابل‌توجه در یکنواختی توزیع تقاضای محوری است. علاوه بر این، نسبت تغییرشکل اعضای زیپر با میانگین حدود ۰/۳۱ نشان می‌دهد که این عضو به‌طور میانگین حدود ۴۰٪ از تقاضای محوری طبقه را جذب می‌کند و به این ترتیب، از انتقال کامل آن به مهاربندها جلوگیری کرده و منجر به کاهش تمرکز تغییرشکل در طبقات می‌شود. این رفتار سبب توزیع تدریجی تقاضا در ارتفاع و جلوگیری از تشکیل مکانیزم طبقه ضعیف می‌شود. بنابراین سیستم زیپر نه تنها موجب یکنواختی تغییرشکل در ارتفاع می‌شود، بلکه از منظر کنترل تقاضای محوری و بهبود عملکرد لرزه‌ای، برتری قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به سیستم شورون نشان می‌دهد.



شکل ۱۵- بهترین نتیجه مقاطع بهینه سازه‌ای به‌دست‌آمده توسط

الگوریتم‌ها برای قاب سیستم زیپر و شورون ۱۵ طبقه فولادی



شکل ۱۵- قیدهای طراحی فعال برای قاب‌های ۱۵ طبقه بهینه، الف) مقادیر دریف طبقات در سطح IO ب) تغییر شکل محوری بادبندها در سطح IO ج) مقادیر قید مربوط به ستون‌های کنترل‌شونده توسط نیرو و قید مربوط به چرخش پلاستیک اعضا در سطح CP

مقیاس نمودن رکوردهای زلزله از شتاب طیفی مد اول نوسان در میرایی ۵٪ ($S_a(T1,5\%)$) استفاده می‌شود و مقادیر آن در هر تحلیل، ۰/۱ افزایش داده می‌شود. با استفاده از روش مقیاس‌نمودن فوق، اختلاف بین طیف پاسخ طراحی و طیف پاسخ رکورد زلزله کاهش خواهد یافت. این روش نتایج منسجم‌تری را نسبت به سایر روش‌های مقیاس‌نمودن رکورد زلزله دربردارد [۲۸]. از جمله معیارهای شدت خرابی سازه‌های تحت بارهای افقی، می‌توان به برش پایه، حداکثر تغییر مکان سازه و دریفت بین طبقه و... اشاره نمود. با توجه به اینکه اکثر کدهای طراحی و همچنین آیین‌نامه‌های مورد استفاده در این مطالعه از دریفت بین طبقات به‌عنوان حالت‌های حدی استفاده می‌کنند، در این مطالعه نیز از دریفت بین طبقات به‌عنوان معیار سنجش شدت خرابی استفاده می‌شود. نکته مهم دیگر در آنالیز IDA، مشخصات و تعداد رکوردهای زلزله است. در این بررسی مشخصات رکوردهای انتخابی مطابق جدول (۶) می‌باشد.

۶- ارزیابی لرزه‌ای سازه‌های فولادی بهینه با سیستم مهار

جانبی زیر و شورون

تحلیل دینامیکی افزاینده (IDA) یک رویکرد قوی در طراحی لرزه‌ای بر مبنای عملکرد است. نتایج استفاده از تحلیل IDA در کارهای تحقیقاتی متنوع ثابت کرده است که این روش، کارایی بسیار مناسبی در ارزیابی عملکردی سازه‌ها دارد و رفتار سازه را در طیف وسیعی از زلزله‌ها با شدت‌های مختلف منعکس می‌کند. داده‌های حاصل از این نوع تحلیل، اطلاعات ارزشمندی از جمله، محدوده پاسخ سازه در مقابل شدت‌های محتمل زمین‌لرزه، رفتار سازه در مقابل زمین‌لرزه‌های نادر و شدید، پاسخ طبیعی سازه به افزایش تدریجی شدت زمین‌لرزه، ظرفیت محتمل دینامیکی سیستم سازه و... را در اختیار طراح قرار می‌دهد [۲۷]. اولین مرحله مهم در آنالیز IDA، انتخاب معیار سنجش شدت زلزله (IM) و معیار سنجش شدت خرابی (DM) است. در این روش، تحلیل شدت زلزله با استفاده از ضریب مقیاس به‌طور مداوم برای هر یک از رکوردهای زلزله افزایش داده می‌شود. در این مطالعه برای

جدول ۶- مجموعه رکوردهای زلزله در آنالیز دینامیکی افزاینده

ID	Event	Station	ϕ^1	Soil ²	M ³	R ⁴ (km)
1	Loma Prieta, 1989		090	C,D	6.9	28.2
2	Imperial Valley, 1979	Agnews State Hospital	135	C,D	6.5	31.7
3	Loma Prieta, 1989	Plaster City	255	-,D	6.9	25.8
4	Loma Prieta, 1989	Hollister Diff. Array	270	B,D	6.9	21.4
5	Loma Prieta, 1989	Coyote Lake Dam Downstream	285	B,D	6.9	22.3
6	Imperial Valley, 1979	Cucapah	085	C,D	6.5	23.6
7	Loma Prieta, 1989	Sunnyvale Colton Ave	270	C,D	6.9	28.8
8	Imperial Valley, 1979	El Centro Array # 13	140	C,D	6.5	21.9
9	Imperial Valley, 1979	Westmoreland Fire Station	090	C,D	6.5	15.1
10	Loma Prieta, 1989	Hollister South & Pine	000	-,D	6.9	28.8
11	Loma Prieta, 1989	Sunnyvale Colton Ave	360	C,D	6.9	28.8
12	Superstition Hills, 1987	Wildlife Liquefaction Array	090	C,D	6.7	24.4
13	Imperial Valley, 1979	Chihuahua	282	C,D	6.5	28.7
14	Imperial Valley, 1979	Westmoreland Fire Station	230	C,D	6.5	21.9
15	Imperial Valley, 1979	WAHO	180	C,D	6.5	15.1

^۱ مؤلفه

^۲ کلاس خاک

^۳ بزرگی

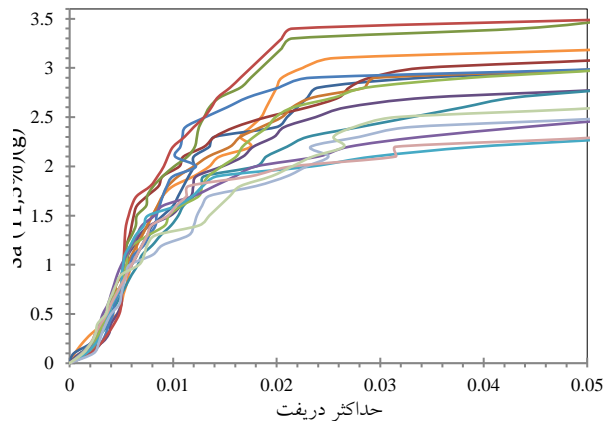
^۴ نزدیک‌ترین فاصله تا گسل

رکوردهای انتخاب شده در دسته رکوردهای دور از گسل طبقه‌بندی می‌شوند و از نظر ساختگاه و کلاس خاک ژئومتریکی^۱ در طبقه‌بندی خاک نوع D قرار می‌گیرند. برای بررسی احتمال آسیب‌پذیری سازه در حالت‌های حدی خاص، از منحنی‌های شکنندگی استفاده می‌شود. این منحنی‌ها با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده از آنالیز IDA و شرایط حدی تعریف شده رسم می‌شوند. برای یک شرایط حدی مشخص، منحنی‌های شکنندگی معمولاً با استفاده از تابع توزیع تجمعی لگ نرمال مدل‌سازی می‌شوند. احتمال فراتر رفتن از حالت آسیب $P(DS \geq ds_i | IM = x)$ با استفاده از رابطه (۳۷) محاسبه می‌شود [۲۹].

$$P(DS \geq ds_i | IM = x) = \Phi \left(\frac{\ln(x) - \ln(\theta_i)}{\beta_i} \right) \quad (37)$$

که در آن، Φ تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد، (θ_i) اندازه‌گیری شدت متوسط برای حالت آسیب ds_i است و (β_i) انحراف استاندارد لگاریتمی (پراکندگی) برای وضعیت آسیب ds_i می‌باشد. در این مطالعه سه شرایط حدی آسیب به صورت، قابلیت استفاده بی وقفه (IO)، ایمنی جانی (LS) و آستانه فروریزش (CP) به ترتیب با میزان حداکثر دررفت طبقات برابر ۰/۵٪، ۱٪ و ۲٪ مطابق FEMA-356 در نظر گرفته می‌شود.

۶-۱- ارزیابی لرزه‌ای قاب‌های بهینه ۱۰ طبقه زیر و شورون
نتایج مربوط به آنالیز دینامیکی افزایشنده قاب‌های بهینه ۱۰ طبقه تحت ۱۵ رکورد زلزله در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) نشان داده شده است.



شکل ۱۶- نمودار نتایج آنالیز دینامیکی افزایشنده برای قاب ۱۰ طبقه بهینه با سیستم باربر جانبی زیر

همچنین منحنی‌های شکنندگی قاب‌های مورد بررسی برای سه حالت حدی مختلف در شکل (۱۸) نشان داده شده است. در

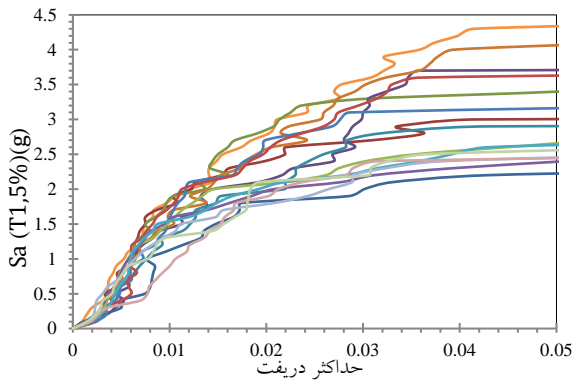
جدول (۷) احتمال ورود قاب‌های ۱۰ طبقه بهینه به هریک از سطوح عملکرد در شدت‌های مختلف نیروی لرزه‌ای با توجه به منحنی‌های شکنندگی، نشان داده شده است. بر اساس نتایج آنالیزهای IDA، سیستم باربر جانبی زیر عملکرد لرزه‌ای به مراتب مناسب‌تری نسبت به سیستم شورون از خود نشان می‌دهد. منحنی‌های شکنندگی در سه سطح IO، LS و CP بیانگر آن است که سازه مجهز به عضوهای زیر برای رسیدن به یک احتمال مشخص از تجاوز عملکردی، به شتاب طیفی بزرگ‌تری نیاز دارد. این تفاوت در سطح IO حدود ۱۰-۲۰ درصد، در سطح LS حدود ۳۰-۱۵ درصد و در سطح CP بیش از ۳۰٪ است. این نتایج نشان می‌دهد که مکانیزم توزیع مجدد نیرو ناشی از تیرهای زیر مانع از تشکیل مکانیزم طبقه ضعیف شده و موجب افزایش ظرفیت لرزه‌ای و کاهش احتمال فروریزش سازه می‌شود.

۶-۲- ارزیابی لرزه‌ای قاب‌های بهینه ۱۵ طبقه زیر و شورون
نتایج مربوط به آنالیز دینامیکی افزایشنده قاب‌های بهینه ۱۵ طبقه تحت ۱۵ رکورد زلزله در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) نشان داده شده است. همچنین منحنی‌های شکنندگی قاب‌های مورد بررسی برای سه حالت حدی مختلف در شکل (۲۱) نشان داده شده است. در جدول (۸) احتمال ورود قاب‌های ۱۵ طبقه بهینه به هریک از سطوح عملکرد در شدت‌های مختلف نیروی لرزه‌ای با توجه به منحنی‌های شکنندگی نشان داده شده است. بررسی منحنی‌های شکنندگی نشان می‌دهد که سیستم باربر جانبی زیر در تمامی سطوح عملکردی IO، LS و CP عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به سیستم شورون دارد.

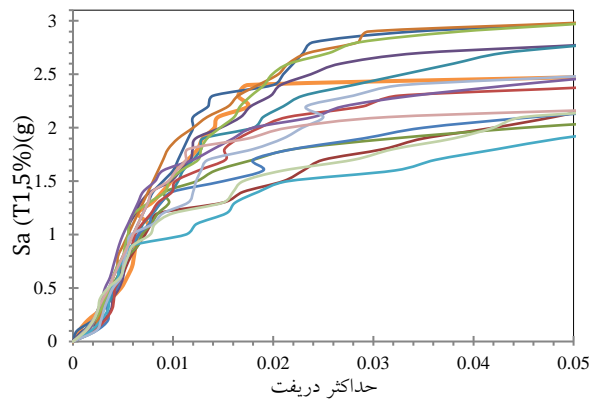
منحنی‌های پیوسته مرتبط با سیستم زیر به طور یکنواخت در شتاب طیفی‌های بزرگ‌تری نسبت به منحنی‌های خط‌چین مربوط به سیستم شورون قرار گرفته‌اند. این جابه‌جایی افقی بیانگر افزایش سختی و مقاومت مؤثر سازه در سطوح پایین‌تر و همچنین بهبود رفتار پس‌کمانش و کاهش احتمال فروریزش در سطوح عملکردی بالاتر است. مقایسه کمی منحنی‌ها نشان می‌دهد که ظرفیت لرزه‌ای سیستم زیر به ترتیب حدود ۲۰-۳۰ درصد در IO، حدود ۱۵-۲۵ درصد در LS و حدود ۳۰-۴۰ درصد در CP نسبت به سیستم شورون بهبود یافته است. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از عضوهای زیر امکان توزیع مناسب‌تر نیرو و جلوگیری از تشکیل مکانیزم طبقه ضعیف را فراهم کرده و در نهایت موجب افزایش تاب‌آوری لرزه‌ای سازه می‌شود.

¹ Geomatrix Soil Class

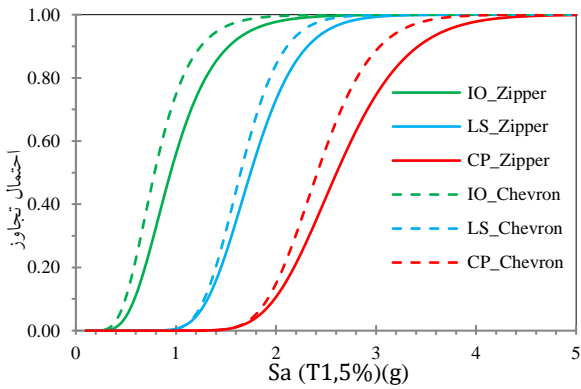




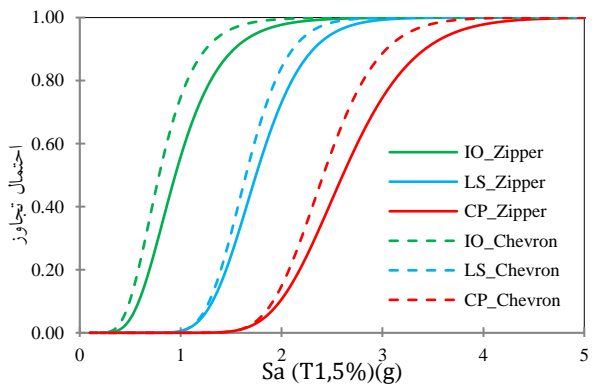
شکل ۲۰- نمودار نتایج آنالیز دینامیکی افزایشی برای قاب ۱۵ طبقه بهینه با سیستم باربر جانبی شورون



شکل ۱۷- نمودار نتایج آنالیز دینامیکی افزایشی برای قاب ۱۰ طبقه بهینه با سیستم باربر جانبی شورون



شکل ۲۱- منحنی‌های شکنندگی آنالیز دینامیکی افزایشی برای قاب‌های بهینه ۱۵ طبقه با سیستم باربر جانبی زیپر و شورون



شکل ۱۸- منحنی‌های شکنندگی آنالیز دینامیکی افزایشی برای قاب‌های بهینه ۱۰ طبقه با سیستم باربر جانبی زیپر و شورون

جدول ۸- درصد احتمال ورود قاب‌های ۱۵ طبقه بهینه به هریک از سطوح عملکرد در شدت‌های مختلف نیروی لرزه‌ای

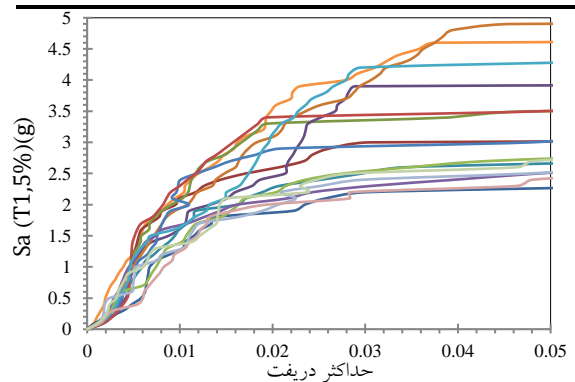
Sa (T1,5%)(g)	شورون		زیپر		شورون	
	IO	CP	LS	CP	LS	CP
۰/۵	۹٪	۰٪	۴٪	۰٪	۰٪	۰٪
۱	۷۳٪	۰٪	۶۰٪	۰٪	۰٪	۰٪
۱/۵	۹۶٪	۰٪	۹۰٪	۲۸٪	۰٪	۰٪
۲	۱۰۰٪	۱۲٪	۹۸٪	۷۵٪	۱۷٪	۱۲٪
۲/۵	۱۰۰٪	۴۵٪	۱۰۰٪	۹۵٪	۶۰٪	۴۵٪
۳	۱۰۰٪	۷۶٪	۱۰۰٪	۱۰۰٪	۸۹٪	۷۶٪

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه قاب‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه با سیستم باربر جانبی زیپر و شورون توسط سه الگوریتم مختلف، بهینه‌یابی شدند. انتخاب الگوریتم‌ها با توجه به عملکرد آن‌ها در مواجهه با مسائل مشابه بررسی شده در مقالات متعدد صورت پذیرفته است. نتایج به‌دست‌آمده بر موارد زیر دلالت دارند:

جدول ۷- درصد احتمال ورود قاب‌های ۱۰ طبقه بهینه به هریک از سطوح عملکرد در شدت‌های مختلف نیروی لرزه‌ای

Sa (T1,5%)(g)	شورون		زیپر		شورون	
	IO	CP	LS	CP	LS	CP
۰/۵	۲٪	۰٪	۲٪	۰٪	۰٪	۰٪
۱	۹۷٪	۰٪	۹۳٪	۱٪	۰٪	۰٪
۱/۵	۱۰۰٪	۴٪	۱۰۰٪	۶۳٪	۲۴٪	۵٪
۲	۱۰۰٪	۱۶٪	۱۰۰٪	۹۸٪	۸۷٪	۴۸٪



شکل ۱۹- نمودار نتایج آنالیز دینامیکی افزایشی برای قاب ۱۵ طبقه بهینه با سیستم باربر جانبی زیپر

۱- الگوریتم اصلاح شده دلفین در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها، دارای عملکرد مناسب‌تر در مواجهه با مسائل مورد بررسی در این مطالعه بوده و وزن بهینه کم‌تری را ارائه می‌نماید. به طوری که وزن بهینه سازه ۱۰ طبقه با سیستم زیپر توسط الگوریتم MDA، $1/63\%$ کم‌تر از الگوریتم CMO و $8/8\%$ کم‌تر از الگوریتم SBO به دست آمده است و همچنین وزن بهینه سازه ۱۵ طبقه با سیستم زیپر توسط الگوریتم MDA، $4/15\%$ کم‌تر از الگوریتم CMO و 9% کم‌تر از الگوریتم SBO است.

۲- نکته مهم دیگر وزن بهینه به دست آمده در دو سیستم مختلف است، به طوری که ملاحظه می‌شود وزن بهینه قاب‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه با سیستم زیپر حدود 6% کم‌تر از قاب‌های با سیستم باربر جانبی شورون می‌باشد. در واقع عملکرد اصلی الگوریتم در مواجهه با مسائل غیرخطی، ارائه حداقل وزن ممکن با برآورد تمامی قیدهای طراحی حاکم بوده و الگوریتم بهینه‌یابی با رساندن هم‌زمان تمامی قیدهای طراحی به حد مجاز آن‌ها، اقدام به ارائه بهینه‌ترین سازه ممکن با توجه به تابع هدف می‌نماید.

۳- با توجه به قیدهای فعال در روند طراحی قاب‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه، ملاحظه می‌شود قید مربوط به چرخش‌های پلاستیک اعضا در سطح عملکرد CP در قاب‌های با سیستم شورون بیش‌تر از سیستم زیپر در وزن بهینه سازه تأثیرگذار است.

۴- نکته مهم دیگر نوع آنالیز و روش طراحی به کار برده شده در عملیات بهینه‌یابی است. با توجه به عملکرد سیستم زیپر و شورون در مواجهه با بارهای لرزه‌ای و نوع رفتار بعد از تسلیم بادبندها، باید برای طراحی این سیستم از روش‌های غیرخطی بهره برد تا تخمین دقیق‌تری از رفتار این سیستم به دست آید. برای نیل به هدف فوق، در این مطالعه از آنالیز پوش‌آور با الگوهای بار جانبی مختلف استفاده شد و پاسخ‌های دریافتی از آنالیز فوق با شرایط حدی تعریف شده بر مبنای عملکرد در سطوح مختلف لرزه‌ای مورد مقایسه قرار گرفت. با توجه به نتایج و نمودارهای حاصل شده از روش طراحی بر مبنای عملکرد در این بررسی، از جمله مزایای سیستم باربر جانبی زیپر در مقایسه با سیستم شورون را می‌توان به محدود کردن چرخش‌های پلاستیک در تیرهای پیوند، توزیع یکنواخت نیروی زلزله و تسلیم‌شدگی بادبندها در ارتفاع سازه، کاهش سطح مقطع تیر پیوند در مقایسه با سیستم شورون و همچنین جلوگیری از تسلیم ناگهانی اعضای بادبند در سطوح بالای لرزه‌ای اشاره نمود.

۵- با توجه به نمودارهای پوش‌آور به دست آمده از قاب‌های بهینه ۱۰ و ۱۵ طبقه می‌توان ملاحظه نمود سیستم زیپر در مقایسه با سیستم شورون دارای سختی اولیه بیش‌تر و همچنین دارای

قابلیت بازیابی سختی کلی سازه در سطوح بالاتر بارهای جانبی بعد از تسلیم‌های به وجود آمده است.

۶- در انتهای این مطالعه برای تأیید و تصدیق نتایج به دست آمده از مرحله بهینه‌یابی، قاب‌های مورد بررسی با استفاده از آنالیز دینامیکی افزایشنده مورد تحلیل قرار گرفتند. بررسی منحنی‌های شکنندگی قاب‌های مورد مطالعه، اطلاعات ارزشمندی را در خصوص پاسخ سازه‌ها در طول زلزله‌های مختلف و همچنین ریسک‌های لرزه‌ای آن ارائه داد. نتایج حاصل از این آنالیز، بیانگر حاشیه ایمنی قابل قبول سازه‌ها بوده و نشانگر حاشیه ایمنی بالاتر قاب‌های با سیستم باربر جانبی زیپر در مقایسه با سیستم شورون است. از منحنی‌های شکنندگی به دست آمده از آنالیز دینامیکی افزایشنده برای قاب‌های بهینه ۱۰ و ۱۵ طبقه ملاحظه می‌شود حاشیه ایمنی قاب‌های با سیستم باربر جانبی زیپر در سطوح IO، LS و CP بالاتر از قاب‌های بهینه با سیستم شورون بوده و برتری سیستم زیپر را نشان می‌دهد.



- joints by scatter search", *Computers and Structures*, 86, pp.1983-1993.
- [15] Kameshki, E.S., and Saka, M.P. (2001), "Genetic algorithm based optimum bracing design of non-swaying tall plane frames", *Journal of Constructional Steel Research*, 57, pp.1081-1097.
- [16] Yang, C.S., Leon, R.T., and DesRoches, R. (2008), "Design and behavior of zipper-braced frames", *Engineering Structures*, 30(4), pp.1092-1100.
- [17] Ozcelik, Y., Saritas, A., and Clayton, P.M. (2016), "Comparison of chevron and suspended-zipper braced steel frames", *Journal of Constructional Steel Research*, 119, pp.169-175.
- [18] Tirca, L., and Chen, L. (2012), "The influence of lateral load patterns on the seismic design of zipper braced frames", *Engineering Structures*, 40, pp.536-555.
- [19] Zahrai, S.M., Pirdavari, M., and Farahani, H.M. (2013), "Evaluation of hysteretic behavior of eccentrically braced frames with zipper-strut upgrade", *Journal of Constructional Steel Research*, 83, pp.10-20.
- [20] Kaveh, A., and Farhoudi, N. (2013), "A new optimization method: Dolphin echolocation", *Advances in Engineering Software*, 59, pp.53-70.
- [21] Daryan, A.S., Salari, M., Palizi, S., and Farhoudi, N. (2023), "Size and layout optimum design of frames with steel plate shear walls by metaheuristic optimization algorithms", *In Structures*, 48, pp.657-668.
- [22] Farshchin, M., Maniat, M., Camp, C.V., and Pezeshk, S. (2018), "School based optimization algorithm for design of steel frames", *Engineering Structures*, 171, pp.326-335.
- [23] Federal Emergency Management Agent, Report No. FEMA 356, (2000), *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*, Washington D.C.
- [24] Kaveh, A., Azar, B.F., Hadidi, A., Sorochi, F.R., and Talatahari, S. (2010), "Performance-based seismic design of steel frames using ant colony optimization", *Journal of Constructional Steel Research*, 66(4), pp.566-574.
- [25] Poursha, M., Khoshnoudian, F., and Moghadam, A.S. (2009), "A consecutive modal pushover procedure for estimating the seismic demands of tall buildings", *Engineering Structures*, 31(2), pp.591-599.
- [26] Kalkan, E., and Sashi, K. (2004), "Method of modal combination for pushover analysis of building", 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada.
- [27] Vamvatsikos, D., and Cornell, C.A. (2002), "Incremental dynamic analysis", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(3), pp.491-514.
- [28] Dhakal, R., Singh, S., and Mander J. (2007), "Effectiveness of earthquake selection and scaling method in New Zealand", *Bulletin of the New*
- [1] Kaveh, A., and Nasrollahi, A. (2014), "A Performance-based seismic design of steel frames utilizing charged system search optimization", *Applied Soft Computing*, 22, pp.213-222.
- [2] Chen, W.F., and Lui, E.M. (2006), "Earthquake Engineering For Structural Design", CRC Press.
- [3] Pan, P., Ohsaki, M., and Kinoshita, T. (2007), "Constraint approach to performance-based design of steel moment-resisting frames", *Engineering Structures*, 29(2), pp.186-194.
- [4] Emami, F., and Bakhtiari-Moghadam, M. (2021), "Comparison of seismic behavior of chevron and suspended-zipper braced frames under near-fault ground motion", *Asian Journal of Civil Engineering*, 22(6), pp.1131-1141.
- [5] Yang, C.S. (2006), "Analytical and experimental study of concentrically braced frames with zipper struts", Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology.
- [6] Khatib, I.F., Mahin, S.A., and Pister, K.S. (1988), "Seismic behavior of concentrically braced steel frames", Berkeley, CA, USA, UCB/EERC-88/01: Earthquake Engineering Research Center, University of California.
- [7] Tremblay, R. and Tirca L. (2003), "Behavior of design of multi-story zipper concentrically braced steel frames for the mitigation of soft-story response", *Proceedings of 4th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas*, Naples.
- [8] Merczel, D.B., Somja, H., Aribert, J.M., and Lógó, J. (2013), "On the behaviour of concentrically braced frames subjected to seismic loading", *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 57(2), pp.113-122.
- [9] Merczel, D.B., Somja, H., Aribert, J.M., Hjiat, M., and Logo, J. (2014), "On the weak storey behaviour of concentrically braced steel frames", *In Eurodyn*.
- [10] Gholizadeh, S., and Poorhoseini, H. (2016), "Seismic layout optimization of steel braced frames by an improved dolphin echolocation algorithm", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 54(4), pp.1011-1029.
- [11] Gholizadeh, S., and Ebadijalal, M. (2018), "Performance based discrete topology optimization of steel braced frames by a new metaheuristic", *Advances in Engineering Software*, 123, pp.77-92.
- [12] Farzad, K., and Gholizadeh, S. (2022), "Seismic Performance-Based Layout Optimization of Outrigger System using Modified Dolphin Echolocation algorithm for Steel Tall Buildings", *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8, pp.122-143.
- [13] Kaveh, A., and Farhoudi, N. (2011), "A unified approach to parameter selection in meta-heuristic algorithms for layout optimization", *Journal of Constructional Steel Research*, 67, pp.1453-1462.
- [14] Hagishita, T., and Ohsaki, M. (2008), "Optimal placement of braces for steel frames with semi-rigid

- Zealand Society for Earthquake Engineering, 40, pp.989-1008.
- [29] Ibrahim, Y.E., and El-Shami, M.M. (2011), "Seismic fragility curves for mid-rise reinforced concrete frames in Kingdom of Saudi Arabia", The IES Journal Part A: Civil and Structural Engineering, 4(4), pp.213-223.
- [30] ANSI/AISC 360-22, (2022), Specification for structural steel buildings, American Institute of Steel Construction.
- [31] Uriz, P. (2008), "Toward earthquake-resistant design of concentrically braced steel-frame structures", Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- [31] Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M., and Fenves G., (2007), "OPENSEES Command Language Manual", University of California, Berkeley.
- [32] MATLAB,. (2024), The Language of Technical Computing, Math Works Inc.