



نشریه علمی صنعت ساختمان
سال ۱۴۰۵، دوره ۱، شماره ۲، صفحه ۱۱-۴
آدرس نشریه: <https://jci.tvu.ac.ir>



10.22034/jci.2026.2085916.1037

طراحی لرزه‌ای قاب‌های فولادی با استفاده از تحلیل پوش‌آور اصلاح‌شده و الگوریتم PSO براساس سطوح عملکردی مختلف

نویسندگان: مجتبی حنطه^{۱*}، هانیه ملک^۲

۱ دانشگاه ملی مهارت - دانشکده شهید رجایی کاشان - دپارتمان عمران
۲ دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل ایران.



واژه‌های کلیدی:

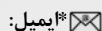
ماشین یادگیری سریع
الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام
ذرات شناسایی خرابی تیر
فولادی شبکه عصبی

دریافت: ۲۹ بهمن ۱۴۰۴

بازنگری: ۰۹ خرداد ۱۴۰۵

پذیرش: ۰۶ تیر ۱۴۰۵

انتشار الکترونیکی: ۰۱ تیر ۱۴۰۵



mhenteh@semnan.ac.ir

چکیده:

یکی از چالش‌های مهم در طراحی سازه‌ها، کاهش آسیب‌پذیری لرزه‌ای آنها در برابر زلزله با حفظ معیارهای عملکردی مورد انتظار است. روش طراحی بر اساس عملکرد (PBD) به عنوان رویکردی نوین، فراتر از تمرکز صرف بر الزامات تجویزی آیین‌نامه‌ای، سعی در کنترل پاسخ واقعی سازه تحت سطوح مختلف خطر دارد. در این پژوهش، طراحی لرزه‌ای قاب‌های خمشی فولادی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) و تحلیل پوش‌آور اصلاح‌شده انجام شده است. در این روش، هدف بهینه‌سازی وزن سازه در عین رعایت الزامات عملکردی در سطوح بهره‌برداری بی‌وقفه (IO)، ایمنی جانی (LS) و پیشگیری از فروپاشی (CP) است. از نرم‌افزار OpenSees برای تحلیل غیرخطی سازه و از MATLAB برای پیاده‌سازی الگوریتم PSO بهره گرفته شده است. همچنین برای اعتبارسنجی نتایج بدست آمده، تحلیل نهایی با استفاده از SAP2000 انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب PSO و تحلیل پوش‌آور اصلاح‌شده می‌تواند طرح‌های بهینه‌ای با دقت بالا و کارایی لرزه‌ای مطلوب ارائه دهد به طوری که وزن سازه را تا ۱۵/۳۳٪ نسبت به سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری نظیر GA، ACO و HS کاهش می‌دهد.

۱- مقدمه

طراحی لرزه‌ای سازه‌ها یکی از اصلی‌ترین دغدغه‌های مهندسان عمران به‌ویژه در مناطق زلزله‌خیز است. با گذر زمان، روش‌های تحلیل و طراحی نیز دستخوش تغییرات اساسی شده‌اند. در روش‌های سنتی، تمرکز اصلی بر طراحی مبتنی بر نیرو و مقاومت‌های مجاز بود، اما در دهه‌های اخیر، رویکردی جدید با عنوان طراحی بر اساس عملکرد (PBSD) مطرح شده که هدف آن، تأمین سطوح مختلف عملکردی برای سازه در برابر زلزله‌هایی با شدت‌های مختلف است. در این رویکرد، در عوض تمرکز صرف بر مقاومت، پاسخ واقعی سازه تحت بارگذاری لرزه‌ای بررسی می‌شود و سطح خسارت قابل پذیرش در هر زلزله تعریف می‌گردد [۱].

یکی از ابزارهای اصلی ارزیابی عملکرد سازه‌ها، تحلیل پوش‌آور است که نوعی تحلیل استاتیکی غیرخطی به شمار می‌رود. در این تحلیل، یک الگوی بارگذاری جانبی به تدریج افزایش می‌یابد تا رفتار غیرخطی و نقاط تسلیم سازه مشخص شوند. با اینکه روش کلاسیک پوش‌آور ساده و سریع است، ولی نتایج آن ممکن است دقت کافی برای تحلیل‌های پیشرفته نداشته باشد. بنابراین در تحقیقات اخیر، نسخه‌های اصلاح‌شده تحلیل پوش‌آور توسعه یافته‌اند تا با در نظر گرفتن تغییر شکل‌های مدال و تاریخچه بارگذاری، عملکرد دقیق‌تری ارائه دهند [۲،۳].

در کنار ابزارهای تحلیلی، استفاده از الگوریتم‌های هوشمند در بهینه‌سازی طراحی سازه‌ها نیز رواج یافته است. یکی از این روش‌ها، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) است که نخستین بار توسط کندی و ابره‌ارت در سال ۱۹۹۵ معرفی شد [۴]. این الگوریتم که از رفتار اجتماعی گروه‌های حیوانات الهام گرفته شده، به دلیل سادگی پیاده‌سازی، نرخ همگرایی بالا و توانایی جست‌وجو در

فضای غیرخطی و چندبعدی، در مسائل طراحی سازه‌ها بسیار موفق بوده است [۵].

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی از ترکیب PSO با روش‌های تحلیل لرزه‌ای مانند پوش‌آور برای بهینه‌سازی وزن، هندسه یا سختی قاب‌های فولادی و بتنی بهره گرفته‌اند. برای مثال، Poli و Feng، در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۲۴ از نسخه بهبودیافته PSO برای طراحی قاب‌های فولادی مقاوم در برابر زلزله استفاده کردند و عملکرد لرزه‌ای بهتری نسبت به سایر روش‌ها گزارش دادند [۶، ۷]. همچنین، در مروری که توسط Ahmed G. Gad در سال ۲۰۲۲ انجام شد، کاربردهای گسترده الگوریتم PSO، در خصوص در مهندسی عمران، از جمله در طراحی مقاوم‌سازی لرزه‌ای و کنترل فعال سازه‌ها، بررسی شد [۸]. علاوه بر این، تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که روش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر جمعیت مانند PSO در ترکیب با تحلیل پوش‌آور اصلاح‌شده می‌تواند طراحی‌هایی دقیق، اقتصادی و مطابق با سطوح عملکردی تعریف‌شده ارائه دهند [۹، ۱۰]. از جمله کارهای برجسته در این زمینه می‌توان به مطالعه‌ی Zakian و Kaveh در سال ۲۰۲۳ اشاره کرد که چارچوبی برای طراحی لرزه‌ای پیشرفته قاب‌های فولادی با استفاده از PSO ارائه داده و نتایج آن را با تحلیل پوش‌آور اعتبارسنجی کردند [۱۱]. GhasemofAli و همکاران در پژوهش خود به بهینه‌سازی چندهدفه قاب‌های فولادی مقاوم در برابر زلزله با استفاده از الگوریتم PSO و تحلیل پوش‌آور پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که استفاده از PSO می‌تواند وزن سازه را کاهش داده و تغییر مکان نسبی طبقات را کنترل کند، درحالی‌که الزامات آیین‌نامه‌ای را نیز برآورده می‌سازد [۱۲]. Gholizadeh و همکاران چهار الگوریتم ترکیبی برای بهینه‌سازی طراحی قاب‌های فولادی ارائه دادند. نتایج حاکی از آن است که این رویکردها می‌توانند عملکرد لرزه‌ای سازه را بهبود بخشیده و هزینه‌های ساخت را کاهش دهند [۱۳]. Fattahi و Gholizadeh در پژوهش خود به بررسی بهینه‌سازی قاب‌های بلند فولادی با استفاده از نسخه‌های پیشرفته الگوریتم PSO پرداختند. یافته‌ها نشان می‌دهد که این الگوریتم‌ها می‌توانند طراحی‌های بهینه‌تری ارائه دهند که منجر به کاهش وزن و بهبود عملکرد لرزه‌ای می‌شود [۱۴]. در مطالعه‌ای که توسط Barbagallo و همکاران انجام شد به ارزیابی شکل

شاخص‌های ارزیابی شامل موارد زیر هستند:

- Hypervolume (HV) •
- Generational Distance (GD) •
- Inverted Generational Distance (IGD) •
- Spacing to Extent (STE) •

این شاخص‌ها معیارهای عینی برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها فراهم می‌کنند [۲۳]. مقدارهای پایین‌تر GD و IGD نشان‌دهنده کیفیت بهتر راه‌حل‌ها و پوشش مناسب جبهه پارتو هستند. به‌طور مشابه، مقدار کمتر STE نشان‌دهنده پراکندگی بهتر راه‌حل‌ها در فضای طراحی است [۲۳]. برای ایجاد مبنای مقایسه‌ای، نتایج آماری حاصل از ۳۰ اجرای مستقل الگوریتم بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شوند [۲۴] و آزمون رتبه‌بندی فریدمن نیز برای تحلیل تطبیقی عملکرد نسبی الگوریتم‌ها در مسائل مختلف بهینه‌سازی سازه‌ای استفاده می‌شود [۲۳].

مطالعات نشان می‌دهند که PSO به‌طور پیوسته عملکرد بهتری در همگرایی و کیفیت پاسخ برای طراحی بهینه قاب فولادی نسبت به سایر الگوریتم‌ها از جمله الگوریتم ژنتیک (GA)، بهینه‌سازی کلونی مورچگان (ACO) و جستجوی هارمونی (HS) دارد. همچنین، روش جستجوی سیستم باردار (CSS) نیز نسبت به روش‌های سنتی طراحی، بهبودهای قابل توجهی نشان داده است. این پژوهش بررسی می‌کند که چگونه ترکیب PSO با تحلیل پوش‌آور، یک متدولوژی مؤثر برای بهینه‌سازی قاب‌های فولادی تحت بارگذاری لرزه‌ای ایجاد می‌کند و در عین حال از رعایت معیارهای عملکرد در سطوح خطر مختلف اطمینان حاصل می‌شود.

با وجود پیشرفت‌های یاد شده، هنوز تحقیقات کافی در زمینه ترکیب روش پوش‌آور اصلاح‌شده با الگوریتم PSO در قاب‌های خمشی فولادی بر مبنای سطوح عملکردی مختلف انجام نشده است. از این رو، در این پژوهش سعی شده است چارچوبی نوین برای طراحی لرزه‌ای ارائه شود که در آن، مدل‌های سازه‌ای در نرم‌افزار OpenSees تحلیل شده و روند بهینه‌سازی با استفاده از کد توسعه‌یافته در MATLAB انجام می‌شود. همچنین برای ارزیابی عملکرد نهایی طرح‌ها، نتایج بدست‌آمده با تحلیل‌های نهایی در SAP2000 اعتبارسنجی می‌شوند. این رویکرد ترکیبی می‌تواند راهکاری مؤثر و دقیق برای دستیابی به طراحی اقتصادی، مقاوم و مبتنی بر عملکرد ارائه کند.

۲. روش‌شناسی:

۲.۱. طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد:

طراحی لرزه‌ای مبتنی بر عملکرد، معیارهای خاصی را برای رفتار سازه تحت شدت‌های مختلف زلزله تعیین می‌کند و چارچوبی برای مهندسان فراهم می‌آورد تا به نتایج عملکردی قابل‌پیش‌بینی دست یابند. برخلاف رویکردهای سنتی مبتنی بر نیرو، این روش بر توانایی ساختمان در جهت برآورده شدن اهداف عملکردی از پیش تعیین‌شده تحت زلزله‌هایی با شدت مشخص تمرکز دارد. استاندارد FEMA-356 چهار سطح عملکردی پایه را تعریف می‌کند که ستون فقرات طراحی لرزه‌ای مبتنی بر عملکرد برای قاب‌های فولادی را شکل می‌دهند:

سطح عملیاتی: این سطح نشان‌دهنده کمترین میزان آسیب است. سازه تقریباً تمام مقاومت و سختی پیش از زلزله را حفظ می‌کند و تنها ترک‌های جزئی در نماها، دیوارهای جداکننده، سقف‌ها و عناصر سازه‌ای مشاهده می‌شود. تمام سیستم‌های مکانیکی، الکتریکی و تأسیسات لوله‌کشی همچنان فعال و قابل بهره‌برداری باقی‌مانند (در صورت لزوم با استفاده از منابع پشتیبان)، و میزان آسیب به اجزای غیرسازه‌ای بسیار ناچیز خواهد بود [۲۵].

بهره‌برداری بی‌وقفه (IO): در این سطح عملکردی، میزان آسیب کلی سازه در حد خفیف بوده و ظرفیت باربری و سختی سازه تقریباً حفظ می‌شود. سیستم‌های سازه‌ای آسیب‌هایی مشابه سطح عملیاتی تجربه می‌کنند اما سیستم‌های غیرسازه‌ای تا حدودی بیشتر آسیب می‌بینند. اجزای غیرسازه‌ای همچنان در محل خود باقی می‌مانند، اگرچه ممکن است نیاز به تعمیر یا پاک‌سازی باشد. سامانه‌های حیاتی همچنان به کار خود ادامه می‌دهند [۲۵].

ایمنی جانی (LS): در این سطح، آسیب قابل توجه به اجزای سازه‌ای و غیرسازه‌ای وارد می‌شود. ساختمان ممکن است بخش زیادی از مقاومت و سختی جانبی خود را از دست بدهد، هرچند اعضای باربر ثقیل همچنان عمل می‌کنند. انتظار نمی‌رود که دیوارها به بیرون فرو بریزند اما تغییر مکان دائمی، ترک‌های گسترده، خردشدگی، جاری‌شدگی و کماتش در عناصر مقاوم جانبی رخ می‌دهد [۲۵].

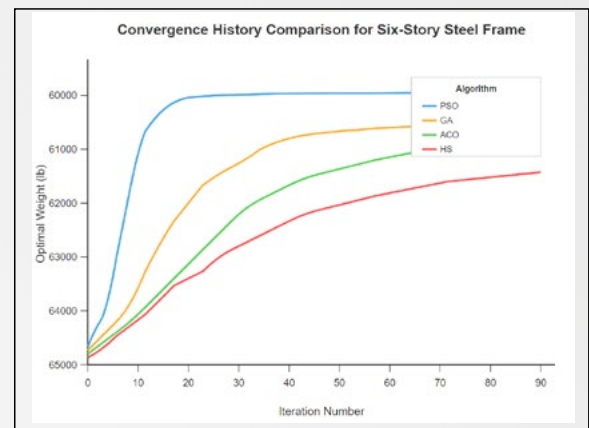
آستانه فروریزش (CP): در این سطح، سازه دچار آسیب‌های شدید می‌گردد و بیشتر مقاومت و سختی پیش‌زلزله‌ای خود در سیستم‌های مقاوم جانبی را از دست می‌دهد. ستون‌ها و دیوارهای باربر ثقیل هنوز فعال‌اند، اما ساختمان در آستانه فروریزش است. ترک‌های بزرگ، خردشدگی، کماتش و شکست در اجزا دیده می‌شود. اجزای غیرسازه‌ای نیز به‌شدت آسیب دیده و ممکن است خطر سقوط داشته باشند [۲۵].

۲.۲. محاسبه جابجایی هدف با استفاده از روش ضریب جابجایی:

روش ضریب جابجایی (DCM) برای تخمین بیشترین جابجایی‌ای (جابجایی هدف) استفاده می‌شود که احتمالاً سازه در طول زلزله طرح تجربه می‌کند. این روش از یک منحنی ظرفیت دوخطی استفاده...

منحنی‌های پوش‌آور در طراحی لرزه‌ای مبتنی بر عملکرد قاب‌های فولادی مقاوم در برابر خمشی پرداخته شد. نتایج نشان داد که انتخاب مناسب شکل منحنی پوش‌آور می‌تواند دقت پیش‌بینی عملکرد سازه را افزایش دهد [۱۵]. Hassani و Rahmati یک استراتژی بهینه‌سازی مبتنی بر PSO برای ارتقاء لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی ارائه کردند. نتایج نشان می‌دهد که این رویکرد می‌تواند به بهبود عملکرد لرزه‌ای و کاهش هزینه‌های تقویت سازه منجر شود [۱۶]. Sabery و همکاران در مطالعه خود، مقایسه‌ای بین الگوریتم‌های فراابتکاری مختلف انجام دادند. نتایج حاکی از آن است که الگوریتم PSO عملکرد بهتری در یافتن طراحی‌های بهینه نسبت به سایر الگوریتم‌ها دارد [۱۷]. Zarrin و Farahi به بررسی استفاده از PSO همراه با یادگیری ماشین برای پیش‌بینی مقاومت لرزه‌ای سازه‌های فولادی پرداختند. یافته‌ها نشان می‌دهد که این ترکیب می‌تواند دقت پیش‌بینی عملکرد سازه را افزایش دهد [۱۸].

مطابق شکل (۱)، مقایسه‌های تجربی میان الگوریتم‌های فراابتکاری نشان می‌دهد که الگوریتم PSO در بهینه‌سازی قاب‌های فولادی شش طبقه عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها دارد. هنگام مقایسه با روش‌های جایگزین مانند الگوریتم ژنتیک (GA)، جستجوی هارمونی (HS) و بهینه‌سازی کلونی مورچگان (ACO)، PSO به‌طور مداوم سازه‌هایی با وزن کمتر تولید می‌کند [۱۹]. تست‌های دقیق نشان می‌دهند که سازه‌هایی که با PSO طراحی شده‌اند، نسبت به آنهایی که با روش‌های متداول بهینه شده‌اند وزن کمتری دارند. در یکی از مطالعات، وزن قاب طراحی‌شده با PSO برابر با ۶۰۱۲۰ پوند گزارش شد، درحالی‌که با سایر الگوریتم‌ها وزن به ۶۱۸۱۳ پوند رسید [۱۹]. پرازده‌ترین الگوریتم‌ها معمولاً شامل ترکیبی از راهبردهای تمرکز و تنوع‌سازی هستند، که به شکل مؤثری فضای متغیرهای پیچیده در مسائل طراحی قاب‌های فولادی را جستجو می‌کنند [۲۰]. قاب‌های چهارطبقه مقاوم در برابر خم‌شدگی نیز به‌عنوان معیارهای مفید برای ارزیابی بازده الگوریتم‌ها از نظر توانایی همگرایی و سرعت محاسباتی استفاده می‌شوند [۲۰].



شکل ۱. نمودار مقایسه PSO با GA، ACO و HS در قاب ۶ طبقه

Figure 1. Comparison of PSO with GA, ACO, and HS in the 6-story frame.

تحلیل پروفیل جابجایی نسبی طبقات و توزیع مفاصل پلاستیک در قاب‌های دوازده طبقه، الگوهای رفتاری مهمی را در برابر بارگذاری لرزه‌ای آشکار می‌سازد. در یکی از مطالعات که سازه‌هایی با نامنظمی قائم را بررسی کرده بود، میانگین بیشینه جابجایی طبقات و رانش بین‌طبقه‌ای حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، در محدوده مجاز طراحی قرار داشت [۲۱]. با این حال، رانش میانگین در طبقات یازدهم و دوازدهم به ترتیب ۳/۶٪ و ۸٪ از حد طراحی فراتر رفت، که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بیشتر طبقات بالایی در برابر زلزله است [۲۱]. الگوی توزیع مفاصل پلاستیک عمدتاً از نوع مکانیزم خمش تیر در قاب‌های بهینه‌شده بود و توالی تشکیل آنها از طبقات پایین آغاز شده و با افزایش بار جانبی به سمت بالا گسترش می‌یافت. مقادیر شکل‌پذیری ماکزیم ثبت‌شده نیز معمولاً کمتر از مقادیر طراحی‌شده باقی ماندند که نشان‌دهنده رویکرد محافظه‌کارانه در طراحی است [۲۱].

نمودارهای تاریخچه همگرایی و شاخص‌های آماری عملکرد اطلاعات ارزشمندی درباره کارایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراهم می‌کنند. تحقیقات نشان می‌دهد که الگوریتم PSO احتمالاتی (Pro-PSO) همگرایی بسیار سریع‌تری نسبت به kPSO کلاسیک دارد، به‌گونه‌ای که فقط در ۱۲ تکرار به پاسخی دست می‌یابد که الگوریتم استاندارد برای آن به ۳۰۰ تکرار نیاز دارد [۲۲]. علاوه بر سرعت، کیفیت همگرایی نیز در Pro-PSO بالاتر است، به‌طوری که مقدار انحراف حداقلی برابر با ۸۹/۸۳ درصد آورده، درحالی‌که همین مقدار در PSO معمولی ۳۸۶/۲۹ گزارش شده است [۲۲].

می‌کند که با استفاده از ضرایب اصلاحی مقدار جابجایی هدف را محاسبه می‌کند [۲۶].
محاسبه جابجایی هدف به صورت رابطه (۱) می‌باشد:

$$\delta_i = C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4 \times S_a \times \left(\frac{T_e}{T_g} \right) \times g \quad (1)$$

که در آن:

- C_1 : نسبت بین جابجایی طیفی و جابجایی سقف ساختمان
- C_2 : نسبت بین بیشینه جابجایی غیرخطی و پاسخ الاستیک مورد انتظار (بین ۱/۵ تا ۱/۰ بر حسب دوره تناوب)
- C_3 : اثر رفتار هیستریزس با پدیده pinching و کاهش سختی
- C_4 : اثرات افزایش جابجایی ناشی از اثر P- Δ
- S_a : شتاب طیفی پاسخ
- T_e : دوره تناوب مؤثر ساختمان
- g : شتاب گرانش زمین [۲۷]

ضریب تغییر شکل غیرخطی (γ) بسیار مهم است، چراکه نسبت بین تقاضای جابجایی غیرخطی بیشینه و پاسخ الاستیک در سیستم SDOF غیرخطی را تعیین می‌کند [۲۸]. فرآیند محاسبه جابجایی هدف شامل تعیین مشخصات سازه‌ای، برآورد تقاضای لرزه‌ای، اجرای تحلیل پوش‌آور غیرخطی و استفاده از معادله بالا است [۲۹].

۳/۲. مدل‌سازی مفاصل پلاستیک و معادلات دوران تسلیم:

مدلسازی دقیق مفاصل پلاستیک، اساس بدست آوردن نتایج قابل اعتماد در تحلیل پوش‌آور است. دوران تسلیم مفصل به‌صورت حاصل‌ضرب انحنای تسلیم (M_y/EI) در طول مفصل تعریف می‌شود [۳۰].

در مفاصل خودکار تعریف‌شده توسط FEMA برای قاب‌ها، رابطه دوران تسلیم به‌صورت رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$\theta_y = \frac{M_p}{EI} \times \frac{L}{L} \quad (2)$$

که در آن:

M_p : ظرفیت لنگر پلاستیک که معمولاً برابر با $Z \times f_y$ است.

EI : سختی خمشی مقطع

L : طول عضو

علاوه بر این، معادله دوران پلاستیک شامل مقادیر کرنش بتن و عمق ناحیه فشاری نیز می‌باشد [۳۱]. استفاده از اتصالات نیمه‌صلب باعث ایجاد درجه‌ای از انعطاف‌پذیری جزئی در اتصال می‌شود که توزیع نیروها و الگوهای تغییر شکل اعضای سازه‌ای را به‌شکل معناداری تحت تأثیر قرار می‌دهد [۳۲]. بنابراین، انعطاف‌پذیری اتصالات باید به‌طور صریح و با استفاده از پارامترهای سختی مناسب مدلسازی شود.

۴/۲. تحلیل پوش‌آور غیرخطی با اتصالات نیمه‌صلب:

تحلیل پوش‌آور غیرخطی، به‌عنوان یکی از روش‌های پایه‌ای و کلیدی برای ارزیابی پاسخ سازه تحت بارگذاری لرزه‌ای شناخته می‌شود.

این روش بینش‌هایی فراتر از تحلیل‌های الاستیک خطی ارائه می‌دهد و توانایی بررسی رفتار واقعی و غیرخطی سازه‌ها را فراهم می‌سازد. یکی از ویژگی‌های متمایز این تحلیل، امکان مدلسازی انعطاف‌پذیر اتصالات از طریق اتصالات نیمه‌صلب است که نمایانگر دقیق‌تری از رفتار واقعی سازه هستند.

۱/۴/۲. تعریف الگوی بارگذاری در تحلیل پوش‌آور:

برای انجام تحلیل پوش‌آور، نیاز به تعریف دقیق الگوهای بارگذاری وجود دارد، به‌طوری‌که این الگوها توزیع نیروهای اینرسی در هنگام زلزله را به درستی بازنمایی کنند. تحقیقات نشان داده‌اند که باید چندین نوع الگوی بارگذاری در تحلیل لحاظ شود تا عملکرد لرزه‌ای سازه به‌درستی ارزیابی گردد [۳۲].

بر اساس استانداردهای FEMA-۳۵۶ و EC۸-۳، انجام تحلیل پوش‌آور با حداقل دو الگوی بارگذاری متفاوت الزامی است، تا حالت‌های پاسخ مختلف سازه بررسی شوند [۳۳].

رایج‌ترین الگوهای بارگذاری عبارتند از:

- متمرکز: تمامی بار جانبی فقط در طبقه بالایی اعمال می‌شود.
- پخش‌شده یکنواخت: بارها متناسب با وزن کف‌ها پخش می‌شوند.
- مثلثی: بارها متناسب با وزن و ارتفاع طبقات توزیع می‌شوند.
- بر اساس شکل مود: بارگذاری بر اساس توزیع نیروهای مود اول در تحلیل مودال لرزه‌ای انجام می‌شود.

نحوه توزیع بار تأثیر زیادی بر منحنی ظرفیت نهایی سازه دارد، از این‌رو توصیه شده است سازه‌ها با الگوهای مختلف بارگذاری تحلیل شوند. در تحلیل‌های کنترل‌شده با جابجایی، نسبت‌های نسبی

بارها از اهمیت بیشتری نسبت به مقادیر مطلق برخوردار هستند [۳۴].

۲/۴/۲. تحلیل پوش‌آور اصلاح‌شده:

تحلیل پوش‌آور سنتی، به‌دلیل فرضیات ساده‌سازی‌شده، در پیش‌بینی رفتار سازه‌ها تحت زلزله‌های شدید و با اثرات موده‌ای بالاتر محدودیت‌هایی دارد. برای غلبه بر این محدودیت‌ها، تحلیل پوش‌آور اصلاح‌شده (MPA) توسعه یافته است. در این روش، الگوهای بارگذاری بر اساس موده‌ای بالاتر و با در نظر گرفتن سختی کاهنده سازه تعیین می‌شوند.

مطالعات نشان داده‌اند که MPA در مقایسه با تحلیل پوش‌آور سنتی، دقت بالاتری به‌ویژه در سازه‌های بلند و تحت زلزله‌های نزدیک به گسل در پیش‌بینی پاسخ‌های غیرخطی سازه‌ها دارد.

۵/۲. فرموله‌سازی مسئله بهینه‌سازی برای ادغام با الگوریتم PSO:

بهینه‌سازی سازه‌ای در طراحی لرزه‌ای نیازمند تدوین دقیق مسئله بهینه‌سازی است تا راه‌حل‌های کارآمدی حاصل گردد و هم‌زمان الزامات عملکردی نیز رعایت شوند. مسئله بهینه‌سازی، پایه ریاضی برای عملکرد الگوریتم PSO است و شامل توابع هدف، متغیرهای طراحی و قیود می‌شود که فضای طراحی مجاز را تعریف می‌کنند.

۱/۵/۲. تابع هدف: کمینه‌سازی وزن سازه:

در بهینه‌سازی سازه‌ای، هدف اساسی دستیابی به سیستمی سازه‌ای است که ضمن تأمین کامل قیود مقاومتی و عملکردی، با کمترین میزان مصرف مصالح طراحی شود؛ به‌طوری‌که حداکثر کارایی سازه‌ای در قبال حداقل وزن حاصل گردد.

تحقیقات نشان می‌دهد که صرفه‌جویی در پروژه‌ها از طریق بهینه‌سازی سازه‌ای معمولاً در بازه ۱۰٪ تا ۲۰٪ قرار دارد که نشان‌دهنده تأثیر چشم‌گیر استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی در طراحی ساختمان است [۶].

برای قاب‌های فولادی تحت بارگذاری لرزه‌ای، تابع هدف به‌صورت کمینه‌سازی وزن کل سازه به شکل ریاضی مطابق رابطه (۳) بیان می‌شود:

$$\text{Minimize } f(x) = \sum (\rho_i \times L_i \times A_i) \quad (3)$$

که در آن:

P_i = چگالی ماده

L_i = طول عضو i

A_i = سطح مقطع عضو i

در کاربردهای پیشرفته‌تر، می‌توان از تابع هدف تعمیم‌یافته‌تری که شامل ضرایب وزنی اعضا است نیز استفاده کرد، تا اولویت انتخاب اجزا در فرآیند طراحی کنترل شود. این روش به مهندسين امکان می‌دهد کنترل بیشتری روی توپولوژی نهایی سازه داشته باشند و طراحی‌هایی بهینه را از نظر وزن و عملکرد حاصل کنند [۷].

۲/۵/۲. متغیرهای طراحی: انتخاب مقاطع W از AISC:

متغیرهای طراحی در بهینه‌سازی سازه‌ای پارامترهایی هستند که می‌توان آنها را برای بهینه‌سازی تابع هدف تغییر داد. در قاب‌های فولادی، این متغیرها معمولاً شامل مشخصات مقاطع عرضی اعضای سازه‌ای هستند که از مقاطع استاندارد مانند جدول AISC انتخاب می‌شوند.

فضای جستجو برای مساحت مقطع می‌تواند به‌صورت پیوسته یا گسسته تعریف شود، که در کاربردهای واقعی، حالت گسسته واقع‌گرایانه‌تر است، چرا که استانداردها و ظرفیت تولید کارخانجات، مقاطع مجاز را محدود می‌کنند [۶]. ماهیت گسسته این طراحی، چالش بیشتری برای الگوریتم‌های بهینه‌سازی ایجاد می‌کند اما در نهایت به طراحی‌هایی عملی‌تر منجر می‌شود.

همچنین می‌توان اعضای سازه‌ای را گروه‌بندی کرد تا هم تعداد متغیرهای طراحی کاهش یابد و هم جنبه‌های زیبایی‌شناسی و اجرایی سازه رعایت شود. برای مثال، همه تیرهای یک طبقه یا همه مهاربندهای یک منطقه می‌توانند از یک مقطع مشابه استفاده کنند تا طراحی متقارن و ساخت آسان‌تر حاصل شود.

مقادیر مجاز برای متغیرهای طراحی معمولاً با کران بالا و پایین طبق رابطه (۴) تعریف می‌شوند:

$$X_{\min} \leq X \leq X_{\max} \quad (4)$$

که در آن، $X_{\min}$ و $X_{\max}$ به ترتیب کران‌های پایین و بالای مجاز برای مقادیر طراحی هستند [۸]. این محدودیت‌ها تضمین می‌کنند که مقاطع انتخاب‌شده در محدوده‌های اجرایی باقی بمانند.

۳/۵/۲. مدیریت قیود با استفاده از روش تابع جریمه:

در بهینه‌سازی ریاضی، روش‌های جریمه ابزار مؤثری برای تبدیل مسائل بهینه‌سازی با قید به مسائل بدون قید هستند. این روش با افزودن مقدار جریمه به تابع هدف، نقض قیود را کنترل می‌کند و از این طریق، الگوریتم می‌تواند در فضای جستجوی آزاد حرکت کرده و به تدریج به سمت ناحیه مجاز همگرا شود [۳۵].

در این رویکرد، مسئله اصلی بهینه‌سازی با قید، به‌صورت یک مسئله بدون قید جدید طبق رابطه (۵) بازنویسی می‌شود:

$$\text{Minimize } T(x) = f(x) + P(x) \quad (5)$$

که در آن:

در بسیاری از کاربردها از مقدارهای استاندارد زیر استفاده می‌شود:

$$C_1 = C_2 = ۱.۴۹۶۱۸$$

$$w = ۰.۷۲۹۸$$

که ترکیبی اثربخش برای همگرایی مؤثر محسوب می‌شود [۳۷].

۷.۵.۲. مقداردهی اولیه جمعیت و معیارهای همگرایی:

مقداردهی اولیه جمعیت معمولاً با تولیدکننده‌های اعداد تصادفی انجام می‌شود، اما این روش‌ها ممکن است پراکندگی بهینه یا پوشش کامل فضای جستجو را تضمین نکنند [۲۵]. برای بهبود این وضعیت، روش‌هایی مانند دنباله‌های واگرای پایین پیشنهاد شده‌اند که اثربخشی جستجو را افزایش می‌دهند [۴۲].

تحلیل‌های همگرایی نشان داده‌اند که PSO استاندارد با احتمال بالا به جواب‌های بهینه جهانی می‌رسد [۴۳]. مطالعات نظری نیز همگرایی الگوریتم را در شرایط زیر تضمین کرده‌اند:

$$۱ > w > (c_1 + c_2) - ۱$$

$$۰ < w < ۱$$

فرآیند تکرار الگوریتم معمولاً تا رسیدن به تعداد تکرار حداکثری یا دستیابی به راه‌حل رضایت‌بخش ادامه می‌یابد [۴].

۳. مدل‌سازی:

۱.۳. طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد:

طراحی لرزه‌ای بر اساس عملکرد (PBSD) رویکردی است که به جای تمرکز صرف بر مقاومت سازه، بر رفتار و عملکرد آن در سطوح مختلف زلزله تأکید دارد. در این پژوهش، سطوح عملکردی مطابق با استاندارد FEMA-۳۵۶ شامل بهره‌برداری بی‌وقفه (IO)، ایمنی جانی (LS) و آستانه فروریزش (CP) در نظر گرفته شده‌اند. نسبت‌های رانش مجاز طبقات در این سطوح به ترتیب ۱/۷، ۲/۵ و ۵٪ می‌باشد. این سطوح به عنوان قیود طراحی در الگوریتم بهینه‌سازی اعمال شده‌اند.

جدول ۱. مقایسه پارامترهای سازه‌ای در سطوح مختلف عملکردی

Table 1. Comparison of Structural Parameters Across Different Performance Levels			
Parameter	Immediate Occupancy (IO)	Life Safety (LS)	Collapse Prevention (CP)
Allowable Inter-story Drift Ratio	0.7%	2.5%	5.0%
Beam Rotation Limits	0.005 rad	0.01 rad	0.02 rad
Column Rotation Limits	0.005 rad	0.01365 rad	0.0182 rad
Structural Damage Level	Light damage; no permanent drift	Significant damage; some permanent drift	Severe damage; substantial permanent drift
Post-Event Functionality	Building remains operational with minor repairs	Building requires significant repair before reoccupancy	Building severely damaged but does not collapse
Relative Structural Weight	+15-20% compared to LS design	Baseline reference	-10-15% compared to LS design
Structural Stiffness	High	Moderate	Low
Inelastic Deformation Ratio (C _i)	1.0-1.1	1.2-1.3	1.4-1.5

طبق جدول ۱ نسبت‌های جابجایی نسبی بین طبقه‌های به عنوان شاخص‌های اصلی برای سطوح عملکردی در سازه‌های قاب فولادی در نظر گرفته می‌شوند. تحقیقات نشان می‌دهد که این محدودیت‌ها مستقیماً با وضعیت آسیب و اهداف عملکردی مرتبط هستند.

مطالعات بیان می‌کنند که برای سازه‌های قاب فولادی، محدودیت‌های چرخش تیرها مطابق با استاندارد ASCE-41 به ترتیب برای سطوح IO، LS و CP برابر با ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۲ می‌باشند. برای ستون‌ها، این محدودیت‌ها برابر با ۰/۰۵، ۰/۰۱۳۶۵ و ۰/۰۱۸۲ هستند [۳۱].

علاوه بر این، محدودیت‌های جابجایی طراحی تأثیر قابل توجهی بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان دارند. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که ساختمان‌هایی که با محدودیت سخت‌گیرانه‌تری (مثلاً ۱/۵٪) طراحی شده‌اند، احتمال کمتری برای فراتر رفتن از سطح عملکرد نسبت به آنهایی که با محدودیت‌های بالاتر (مثلاً ۳٪) طراحی شده‌اند، دارند. حتی اگر تعداد طبقات در دو ساختمان یکسان باشد، تفاوت در محدودیت‌های طراحی جابجایی می‌تواند منجر به تفاوت در دوره تناوب اصلی سازه‌ها شود و در نتیجه پاسخ لرزه‌ای آنها تغییر کند [۱۰].

در ارزیابی و طراحی مقاوم‌سازی لرزه‌ای، معمولاً سطح عملکرد ایمنی جانی (LS) به عنوان معیار اصلی استفاده می‌شود. این سطح به صورت کیفی به عنوان سطحی از آسیب تعریف می‌شود که تضمین می‌کند سازه در وضعیت «ایمن برای جان» باقی می‌ماند [۳۳].

• $f(x)$: تابع هدف اصلی

• $P(x)$: تابع جریمه که میزان نقض قیود را اندازه‌گیری می‌کند.

برای قیود نابرابری (مانند محدودیت جابجایی یا مقاومت)، تابع جریمه به صورت مربعی طبق رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$P(x) = p \times \max(0, g(x))^2 \quad (۶)$$

که در آن:

• P : ضریب جریمه

• $g(x)$: تابع قید

• $\max(0, g(x))$: مقدار صفر وقتی که قید رعایت شده و مقدار مثبت در صورت نقض قید [۳۶].

در آغاز، ضریب جریمه p بر روی مقدار متوسطی تنظیم می‌شود (معمولاً ۱۰) و به تدریج در تکرارهای بعدی افزایش می‌یابد [۳۶]. این رویکرد تدریجی از بروز اختلالات عددی جلوگیری کرده و در عین حال اطمینان حاصل می‌کند که راه‌حل نهایی تمام قیود را برآورده سازد. این فرآیند تکراری تا زمانی ادامه می‌یابد که معیارهای همگرایی حاصل شود، به طوری که هر راه‌حل به عنوان نقطه شروع برای تکرار بعدی با ضریب جریمه افزایش یافته استفاده می‌شود [۳۵].

برای قیود طراحی لرزه‌ای مرتبط با سطوح عملکردی (IO، LS، CP)، تابع جریمه همان گونه که در آیین‌نامه‌های طراحی تعیین شده‌اند؛ شامل محدودیت‌های جابجایی نسبی و دوران پلاستیک است. دقت راه‌حل نهایی به طور قابل توجهی به انتخاب صحیح و تنظیم مناسب ضرایب جریمه در طول فرآیند بهینه‌سازی بستگی دارد.

۴.۵.۲. بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) در طراحی سازه‌ای:

استفاده از تکنیک‌های محاسباتی در تحلیل سازه‌ها باعث شده است که الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) به یکی از ابزارهای مؤثر در حل چالش‌های پیچیده طراحی لرزه‌ای تبدیل شود. این الگوریتم تصادفی مبتنی بر جمعیت، با بهره‌گیری از اصول رفتار جمعی (نظیر حرکت گروهي پرندگان یا ماهی‌ها)، به دلیل سادگی و کارایی بالا در یافتن پاسخ‌های بهینه در فضاهای جستجوی چندبعدی، مورد توجه فراوان قرار گرفته است.

۵.۵.۲. معادلات به‌روزرسانی سرعت و موقعیت:

الگوریتم PSO بر پایه دو رابطه ریاضی اصلی عمل می‌کند:

(۱) معادله به‌روزرسانی سرعت

(۲) معادله به‌روزرسانی موقعیت

معادله سرعت، طبق رابطه (۷) سه مؤلفه اصلی را در نظر می‌گیرد:

$$v(t+1) = w \times v(t) + c_1 \times r_1 \times (p_{best} - x(t)) + c_2 \times r_2 \times (g_{best} - x(t)) \quad (۷)$$

که در آن:

• $v(t)$: سرعت فعلی ذره

• w : وزن اینرسی

• c_1 و c_2 : ضرایب شتاب (برای اعتماد شخصی و اجتماعی)

• r_1 و r_2 : اعداد تصادفی بین ۰ و ۱

• p_{best} : بهترین موقعیت قبلی خود ذره

• g_{best} : بهترین موقعیت کل جمعیت [۳۷]

معادله مربوط به به‌روزرسانی موقعیت ذرات به شکل ساده‌تری طبق رابطه (۸) تعریف می‌شود:

$$x(t+1) = x(t) + v(t+1) \quad (۸)$$

این معادله باعث می‌شود هر ذره بر اساس سرعت جدیدش به سمت نواحی مطلوب حرکت کند [۳۸].

۶.۵.۲. وزن اینرسی و ضرایب شتاب:

وزن اینرسی w نقش مهمی در تعادل بین جستجوی گسترده در فضای کلی و تمرکز محلی روی پاسخ‌های امیدوارکننده دارد. تحقیقات نشان داده‌اند که مقادیر بین ۰/۴ تا ۰/۹ برای وزن اینرسی معمولاً نتایج بهینه‌ای ارائه می‌دهند [۳۹].

برای کاربردهای طراحی لرزه‌ای، استفاده از وزن اینرسی خطی کاهش یا وزن اینرسی مبتنی بر شبیه‌سازی تیریدی باعث بهبود عملکرد همگرایی الگوریتم می‌شود [۴۰].

ضرایب شتاب و c_1 و c_2 گاهی به آنها پارامترهای اعتماد نیز گفته می‌شود، به ترتیب بر تأثیر تجربه شخصی (شناختی) و تأثیر اجتماعی (رفتار گروهي) کنترل دارند.

• c_1 : اعتماد ذره به خودش

• c_2 : اعتماد ذره به سایر ذرات

مطالعات نشان داده‌اند که اگر ذرات بیش از حد سرگردان می‌شوند و اگر $C_2 \geq C_1$ باشد، آنها به طور زود هنگام به پاسخ‌های نهایی نزدیک می‌شوند که ممکن است بهینه نباشد [۴۱].



معادله سرعت طبق رابطه (۱۱) می‌باشد:

$$x(t+1) = x(t) + v(t+1) \quad (11)$$

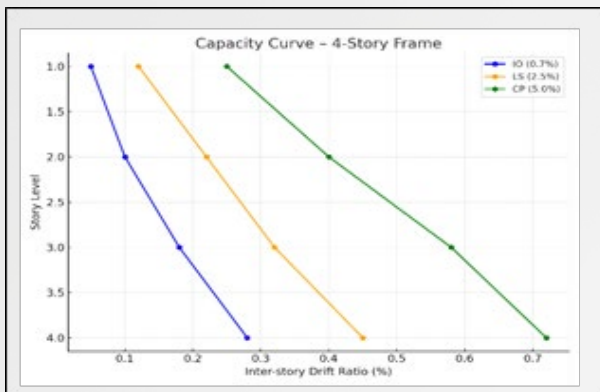
برای جلوگیری از همگرایی زود هنگام و بهبود دقت، از نسخه‌های بهبود یافته PSO مانند EPSO استفاده شده است.

۴. اعتبارسنجی عددی و نتایج همگرایی:

تحلیل‌های مقایسه‌ای نشان می‌دهند که روش‌های بهینه‌سازی، هنگام به‌کارگیری در قاب‌های واقعی سازه‌ای، اثربخشی بالایی دارند. آزمایش‌های تجربی شواهد دقیقی از عملکرد الگوریتم‌ها در مواجهه با چالش‌های مختلف طراحی ارائه می‌دهند.

۱.۴. قاب چهار طبقه:

در قاب چهار طبقه، فرآیند بهینه‌سازی با الگوریتم PSO نشان داد که در سطح عملکردی بهره‌برداری بی‌وقفه (IO)، وزن سازه حدود ۱۸٪ بیشتر از حالت ایمنی جانی (LS) است. همچنین در سطح آستانه فروریزش (CP)، وزن قاب تقریباً ۱۳٪ کمتر از حالت LS بدست آمد. الگوی شکل‌گیری مفاصل پلاستیک در طبقات پایین‌تر شروع و به تدریج به طبقات بالاتر گسترش یافت. همچنین، با افزایش سطح عملکردی مورد نظر، شکل منحنی ظرفیت از حالت خطی به رفتاری کاملاً غیرخطی متمایل شد. نتایج تحلیل پوش‌آور با مدل OpenSees و بررسی منحنی ظرفیت، رفتار قابل قبولی برای قاب تحت بارهای لرزه‌ای نشان داد. نمودار ظرفیت قاب ۴ طبقه شکل (۲) نشان می‌دهد که با افزایش سطح عملکردی IO (بهره‌برداری بی‌وقفه) به LS (ایمنی جانی) و سپس CP (آستانه فروریزش)، مقدار رانش بین‌طبقه‌ای در تمامی طبقات افزایش یافته است. در سطح IO، بیشترین نسبت رانش در طبقه چهارم حدود ۰.۲۸٪ است که کمتر از حد مجاز ۰.۷٪ است. در سطح LS این مقدار به ۰.۴۵٪ رسیده و در سطح CP به حدود ۰.۷۲٪ افزایش یافته است. توزیع رانش بین طبقات به صورت تدریجی و پیش‌رونده از طبقه اول به بالا افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده توزیع منطقی مفاصل پلاستیک در تحلیل پوش‌آور اصلاح‌شده است. تفاوت بین منحنی‌ها نشان می‌دهد که طراحی بر اساس سطح عملکردی CP منجر به افزایش شکل‌پذیری و کاهش سختی سازه شده است، در حالی که در IO، سختی و کنترل تغییر مکان‌ها بر طراحی غالب بوده‌اند.



شکل ۲. نمودار ظرفیت قاب چهار طبقه در سطوح عملکردی مختلف

Figure 2. Capacity Curve of the Four-Story Frame at Different Performance Levels

۲.۴. قاب هشت طبقه:

در قاب هشت طبقه، PSO توانست در سطح عملکردی CP وزن سازه را تا ۱۵/۳۳٪ نسبت به طرح اولیه کاهش دهد. این کاهش وزن در عین رعایت قیود رانش بین طبقه و چرخش مفاصل، نشان‌دهنده اثربخشی الگوریتم است. همچنین در سطح عملکردی IO، به دلیل سختی بیشتر سازه و محدودیت رانش، افزایش وزن تا ۲۰٪ مشاهده شد. مطابق شکل (۲) منحنی ظرفیت این قاب شیب ملایم‌تری نسبت به قاب چهار طبقه دارد، که بیانگر شکل‌گیری تدریجی‌تر مفاصل و پاسخ پایداری در برابر زلزله‌های شدید است. در قاب ۸ طبقه شکل (۳) نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود، با این تفاوت که تغییرات رانش در طبقات میانی و فوقانی به مراتب شدیدتر است. در سطح IO، بیشترین رانش بین طبقه‌ای در طبقه پنجم حدود ۰.۴۵٪ ثبت شده که با افزایش سطح عملکردی به LS و CP، این مقدار در طبقه چهارم به ترتیب به حدود ۰.۶۵٪ و ۱.۱۰٪ افزایش می‌یابد. توزیع منحنی‌ها در قاب ۸ طبقه نشان‌دهنده تمرکز نسبی تغییر مکان‌ها در طبقات میانی است که می‌تواند ناشی از مدهای بالاتر ارتعاش باشد. همچنین، شیب ملایم‌تر منحنی‌ها در سطوح پایین‌تر عملکرد، نشان‌دهنده سختی بالاتر سیستم سازه‌ای است. این نمودارها تأیید می‌کنند که استفاده از تحلیل پوش‌آور در کنار الگوریتم PSO به مهندس طراح این امکان را می‌دهد تا رفتار غیرخطی واقعی قاب را در سطوح مختلف عملکردی به درستی شبیه‌سازی و کنترل نماید.

۳.۲. نوع سازه و مدل‌سازی هندسی:

در این پژوهش، دو قاب خمشی فولادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

- قاب اول: چهار طبقه با دو دهانه
- قاب دوم: هشت طبقه با دو دهانه

مدل‌سازی هندسی و رفتاری اعضا (تیرها و ستون‌ها) در نرم‌افزار OpenSees انجام شده است. مشخصات مصالح، مفاصل پلاستیک و توزیع بارهای ثقلی و جانبی به صورت کامل در این محیط تعریف شده‌اند. از آنجایی که مدل‌سازی بر اساس تحلیل غیرخطی صورت گرفته، منحنی‌های ظرفیت بدست آمده نیز به صورت غیرخطی استخراج شده‌اند.

جدول ۲. مشخصات هندسی و مصالح قاب‌های فولادی چهار طبقه و هشت طبقه

Table 2. Geometric and Material Properties of Four-Story and Eight-Story Steel Frames

Specification	Four-Story Frame	Eight-Story Frame
Number of stories	4	8
Number of bays in frame direction	2	2
Bay length (m)	5.0	5.0
Story height (m)	3.2	3.2
Beam sections (selected from AISC W-sections)	W250×33	W310×39
Column sections at lower stories	W360×51	W460×74
Column sections at upper stories	W250×33	W310×39
Steel grade	ASTM A36	ASTM A36
Steel modulus of elasticity (E)	$2.0 \times 10^5 \times 10^5$ MPa	$2.0 \times 10^5 \times 10^5$ MPa
Yield strength of steel (Fy)	250 MPa	250 MPa
Poisson's ratio	0.3	0.3
Type of connection	Semi-Rigid	Semi-Rigid
Number of modeled plastic hinges	24	48

۳.۳. پیاده‌سازی تحلیل پوش‌آور با استفاده از OpenSees:

نرم‌افزار OpenSees یک بستر قدرتمند برای اجرای تحلیل پوش‌آور با اتصالات نیمه‌صلب فراهم می‌کند. در پیاده‌سازی معمول این تحلیل، ابتدا تحلیل بار ثقلی روی سازه انجام می‌شود و سپس بار جانبی اعمال می‌گردد [۳۲]. این ترتیب بارگذاری باعث می‌شود که اثرات P-Δ در طول تحلیل به درستی در نظر گرفته شوند.

در ادامه، تحلیل استاتیکی با کنترل جابجایی اجرا می‌شود، به گونه‌ای که جابجایی کنترل شده در گره‌های کنترلی به صورت افزایشی اعمال می‌گردد تا زمانی که مقدار جابجایی هدف بدست آید [۳۳]. در مدل‌سازی اتصالات نیمه‌صلب، از عناصر بدون طول استفاده می‌شود که مانند فنرهای چرخشی عمل می‌کنند و پاسخ هیستریزس دوزبانه‌ای دارند. این پاسخ بر اساس مدل خرابی اصلاح‌شده ایبارا-کراونکلر تعریف می‌شود [۳۳].

در پایان، با استفاده از دستور loadConst بارهای ثقلی تثبیت شده و زمان برای شروع مرحله تحلیل پوش‌آور مجدداً تنظیم می‌شود [۳۳].

۴.۳. بهینه‌سازی با الگوریتم PSO:

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) یک روش فراابتکاری مبتنی بر هوش جمعی است که برای مسائل بهینه‌سازی پیوسته و گسسته کاربرد دارد. در این پژوهش، PSO برای کمینه‌سازی وزن کلی سازه با رعایت قیود عملکردی استفاده شده است.

۱.۴.۳. پارامترهای الگوریتم PSO:

- اندازه جمعیت ذره: ۳۰
- حداکثر تکرار: ۱۰۰
- وزن اینرسی (w): ۰.۷۲۹
- ضرایب شتاب (c_p, c_s): ۱/۴۹۴۴۵

۲.۴.۳. تابع هدف:

طبق رابطه (۹) هدف الگوریتم، کمینه‌سازی وزن کل سازه است:

$$\text{Minimize } f(x) = \sum (\rho_i \times A_i \times L_i) \quad (9)$$

که در آن:

Pi = چگالی عضو آم

A_i = سطح مقطع عضو

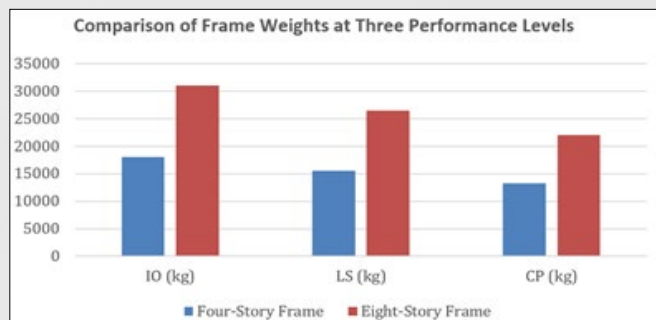
L_i = طول عضو

۳.۴.۳. به‌روزرسانی سرعت و موقعیت ذرات:

معادله سرعت طبق رابطه (۱۰) می‌باشد:

$$v(t+1) = w \times v(t) + c_1 \times r_1 \times (p_{best} - x(t)) + c_2 \times r_2 \times (g_{best} - x(t)) \quad (10)$$

در سطح CP، وزن آن به حدود ۲۲۰۰۰ کیلوگرم کاهش می‌یابد، به عبارتی بیش از ۲۹٪ کاهش می‌یابد. در قاب چهار طبقه نیز روند مشابهی دیده می‌شود. این نمودار به‌وضوح تأثیر مستقیم سطح عملکرد هدف را بر وزن نهایی سازه نشان می‌دهد و اهمیت بهینه‌سازی مصالح در طراحی مبتنی بر عملکرد را تأیید می‌کند.



شکل ۵. مقایسه وزن قاب‌ها در سه سطح عملکردی (IO، LS، CP)

(Figure 5. Comparison of Frame Weights at Three Performance Levels (IO, LS, CP)

نمودار پوش آور تغییرات ضریب برش پایه (V/W) نسبت به جابجایی نسبی بام (٪ ارتفاع) برای قاب‌های چهار و هشت طبقه در سه سطح عملکردی مختلف در شکل ۶ نمایش داده شده است. در هر دو قاب، سطوح عملکردی بالاتر (مانند IO) منحنی‌هایی با شیب تندتر و مقادیر نهایی برش بالاتر دارند، که نشان‌دهنده سختی بیشتر و مقاومت جانبی بالاتر سازه در این حالت است. برای مثال، قاب هشت طبقه در سطح IO ضریب برش پایه‌ای تا حدود ۱/۰۶ را تجربه می‌کند، در حالی که همین قاب در سطح CP تنها به حدود ۰/۷۲ می‌رسد. این تفاوت نشان می‌دهد که با افزایش سطح عملکرد، سازه‌ها سخت‌تر ولی سنگین‌تر می‌شوند. همچنین تفاوت در شکل منحنی‌ها بین قاب چهار و هشت طبقه بیانگر تأثیر ارتفاع سازه بر نحوه توزیع مفاصل پلاستیک و رفتار غیرخطی آنهاست.



شکل ۶. نمودار نیرو-جابجایی (Pushover Curve) برای قاب‌ها

(Figure 6. Force-Displacement Diagram (Pushover Curve) for the Frames)

۴/۴. محدودیت‌های تحقیق:

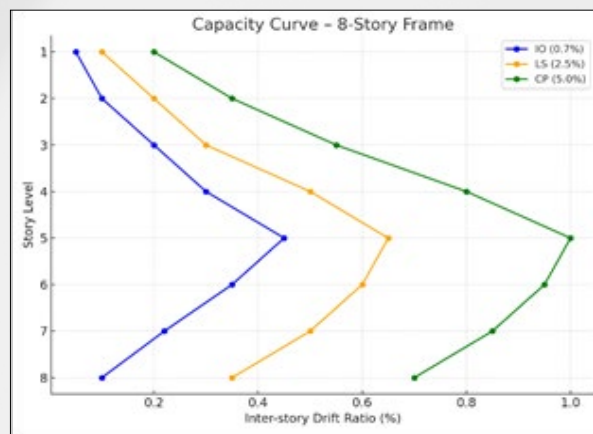
در این پژوهش، با وجود استفاده از تحلیل‌های غیرخطی و بهینه‌سازی پیشرفته، برخی فرضیات و محدودیت‌ها اجتناب‌ناپذیر بوده‌اند که ممکن است در تعمیم نتایج تأثیرگذار باشند:

۱. نوع اتصالات سازه‌ای در مدل‌سازی به‌صورت نیمه‌صلب فرض شده، اما پارامترهای سختی اتصال در تحلیل OpenSees به‌صورت میانگین و بدون تحلیل حساسیت انتخاب شده‌اند.
۲. اثر $P-\Delta$ (P-Delta) که ناشی از نیروهای محوری و جابجایی‌های بزرگ است، در روند تحلیل لحاظ شده ولی اثرات مرتبه دوم آن به‌صورت تقریبی مدل‌سازی شده و از تحلیل دینامیکی دقیق صرف‌نظر شده است.

۳. بارگذاری جانبی در تحلیل پوش آور صرفاً به‌صورت الگوی نیروهای یکنواخت یا مثلثی اعمال شده، در حالی که رفتار واقعی سازه در زلزله به توزیع مودال و تأثیر موده‌های بالاتر نیز وابسته است.

۴. مشخصات مصالح (فولاد سازه‌ای) به‌صورت ثابت و بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت آماری یا تغییرات ناشی از شرایط بهره‌برداری در نظر گرفته شده‌اند.

۵. تعریف تابع هدف و قیود در فرآیند بهینه‌سازی بر پایه وزن کل سازه و نسبت رانش بین طبقه‌ای بوده است؛ سایر پارامترهای عملکردی مانند دوره تناوب، سختی جانبی و مصرف انرژی در طراحی لحاظ نشده‌اند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، مدل‌سازی با در نظر گرفتن عدم قطعیت مصالح، شرایط مرزی واقعی‌تر، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، و تحلیل حساسیت پارامترها توسعه یابد...

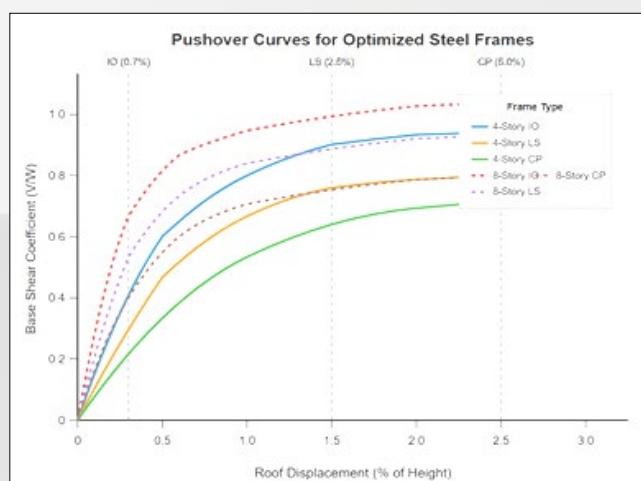


شکل ۳. نمودار ظرفیت قاب هشت طبقه در سطوح عملکردی مختلف

(Figure 3. Capacity Curve of the Eight-Story Frame at Different Performance Levels)

۳/۴. بحث و نتایج:

در شکل (۴) نمودارهای پوش آور قاب‌های فولادی بهینه‌شده آورده شده است. در این نمودار رابطه بین ضریب برش پایه و درصد جابجایی بام برای دو قاب فولادی چهار طبقه و هشت طبقه در سطوح عملکردی مختلف (IO، LS، CP) به‌تصویر کشیده شده است. در قاب ۴ طبقه در هر سه سطح عملکردی، رفتار صلب‌تری نسبت به قاب ۸ طبقه دارد. در سطح عملکردی IO (خط آبی)، سازه با شیب تندتری وارد ناحیه تسلیم می‌شود و ضریب برش پایه به بیش از ۰/۹ می‌رسد. با کاهش سطح عملکرد (از IO به CP)، منحنی‌ها پایین‌تر می‌آیند که نشان‌دهنده کاهش مقاومت جانبی و کاهش وزن سازه در طراحی است. قاب ۸ طبقه در مقایسه با قاب ۴ طبقه، منحنی‌های نرم‌تری دارد و به‌ویژه در CP (خط سبز)، کاهش شدید در ضریب برش پایه مشاهده می‌شود (تا حدود ۰/۶). در سطح IO (خط قرمز)، بیشترین مقاومت نسبی مشاهده می‌شود و منحنی با شیب زیاد و پاسخ صلب شروع می‌شود. رفتار پوش آور قاب‌های بهینه‌شده، نشان می‌دهد که با افزایش سطح عملکردی مورد نظر (از CP به IO)، سازه سخت‌تر و مقاوم‌تر طراحی می‌شود اما این موضوع منجر به افزایش وزن نیز می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که قاب‌های بلندتر (۸ طبقه) در سطوح عملکردی پایین‌تر، شکل‌پذیری بیشتری دارند ولی در برابر جابجایی‌های زیاد دچار افت عملکرد می‌شوند. تحلیل این نمودار نشان می‌دهد که انتخاب سطح عملکردی نقش کلیدی در تعادل بین مقاومت سازه‌ای، شکل‌پذیری و وزن نهایی سازه ایفا می‌کند. طراح باید بسته به سطح عملکرد هدف، بین صرفه‌جویی مصالح و پایداری لرزه‌ای تصمیم‌گیری کند.



شکل ۴. نمودار مقایسه قاب‌ها در سطوح عملکردی مختلف

(Figure 4. Comparison of Frames at Different Performance Levels)

نمودار شکل (۵) نشان می‌دهد که وزن کل سازه در هر دو قاب چهار و هشت طبقه، با کاهش سطح عملکردی از بهره‌برداری بی‌وقفه (IO) به سمت آستانه فروریزش (CP)، روندی کاهشی دارد. این کاهش به این دلیل است که در سطوح عملکرد پایین‌تر، محدودیت‌های سخت‌گیرانه‌تری برای رانش بین طبقه‌ای و دوران مفاصل وجود ندارد و در نتیجه می‌توان از اعضای سبک‌تری استفاده کرد. به‌طور خاص، قاب هشت طبقه در سطح IO دارای بیشترین وزن است (۳۱۰۰۰ کیلوگرم) و



۵. نتیجه گیری:

(۱) ترکیب الگوریتم PSO با تحلیل پوش آور اصلاح شده موجب بهبود چشم گیر عملکرد لرزه ای قاب های فولادی شد؛ به طوری که وزن سازه در سطح عملکردی آستانه فروریزش (CP) تا $15/33\%$ کمتر از روش های مبتنی بر الگوریتم های GA و ACO بدست آمد، در حالی که الزامات عملکردی همچنان رعایت شدند.

(۲) در سطح عملکردی بهره برداری بی وقفه (IO)، به دلیل محدودیت های سخت گیرانه در جابجایی مجاز، استفاده از اعضای مقاوم تر ضروری شد که این موضوع منجر به افزایش حدود ۲۰ درصدی وزن سازه نسبت به سطح ایمنی جانی (LS) شد.

(۳) در سطح عملکردی آستانه فروریزش (CP)، سازه ها توانستند با کاهش وزن بین ۱۰ تا ۱۵ درصد نسبت به سطح LS طراحی شوند؛ این کاهش در عین رعایت قیود لرزه ای، نشان دهنده کارایی الگوریتم PSO در شرایط بحرانی و طراحی اقتصادی است.

(۴) الگوریتم PSO با تنظیمات پارامتری (وزن اینرسی $w=0/729$ ، ضرایب شتاب $c_1=1/49455$ و $c_2=1$) توانست در کمتر از ۱۰۰ تکرار به پاسخ بهینه همگرا شود، که این موضوع نشان دهنده سرعت بالای همگرایی و کارایی محاسباتی آن است.

(۵) منحنی های ظرفیت حاصل از تحلیل پوش آور برای قاب های طراحی شده، روند منطقی و پیشرونده ای در شکل گیری مفاصل پلاستیک را نشان دادند؛ به ویژه در قاب های بلندتر، مفاصل از طبقات پایین آغاز شده و به تدریج به طبقات بالا گسترش یافتند، که بیانگر رفتار واقع بینانه سازه در زلزله است.

(۶) نمودار مقایسه وزن قاب ها نشان داد که سطح عملکرد هدف به شدت بر مقدار مصالح مصرفی و وزن نهایی سازه تأثیرگذار است. کاهش سطح عملکردی از IO به CP، در هر دو قاب، باعث کاهش وزنی تا حدود ۲۵٪ شد که اهمیت انتخاب هدف عملکردی مناسب را گوشزد می کند.

(۷) نمودار پوش آور (نیرو-جابجایی) نیز تأیید کرد که قاب های بهینه شده در سطح IO رفتار سخت تری دارند، اما در سطح CP شکل پذیری بیشتری از خود نشان می دهند. این انعطاف رفتاری برای طراحی بر اساس عملکرد، به مهندس امکان می دهد بین ایمنی و صرفه جویی مصالح، تعادل برقرار کند.

(۸) در مجموع، رویکرد تلفیقی PSO-Pushover چارچوبی قدرتمند برای طراحی لرزه ای سازه های فولادی فراهم می آورد که در آن می توان اهداف متضاد عملکردی و اقتصادی را به صورت همزمان محقق کرد.

بیانیه استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی:

در تهیه متن مقاله جهت بهبود خوانایی و روانی از ChatGPT 5 استفاده شده است. پس از استفاده از این ابزار، در مواردی که لازم بوده نویسندگان مقاله را بازنگری و ویرایش کرده و مسئولیت کامل مطالب منتشر شده در مقاله را می پذیرند.

تعارض منافع:

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

فهرست منابع:

- [1] FEMA 356, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency, 2000.
<https://www.nehrp.gov/pdf/fema356.pdf>
- [2] H. Krawinkler and G. D. P. K. Seneviratna, "Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation," Engineering Structures, vol. 20, no. 4- 6, pp. 452- 464, 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00092-8](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00092-8)
- [3] P. Fajfar, "A nonlinear analysis method for performance-based seismic design," Earthquake Spectra, vol. 16, no. 3, pp. 573- 592, 2000, doi: [10.1193/1.1586128](https://doi.org/10.1193/1.1586128)
- [4] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in Proc. ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, vol. 4, pp. 1942- 1948, 1995, doi: <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- [5] Y. del Valle, G. K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J.-C. Hernandez, and R. G. Harley, "Particle swarm optimization: Basic concepts, variants and applications in power systems," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 12, no. 2, pp. 171- 195, Apr. 2008, doi: [10.1109/TEVC.2007.896686](https://doi.org/10.1109/TEVC.2007.896686)
- [6] R. Poli, J. Kennedy, and T. Blackwell, "Particle swarm optimization: An overview," Swarm Intelligence, vol. 1, no. 1, pp. 33- 57, 2007, doi: [10.1007/s11721-007-0002-0](https://doi.org/10.1007/s11721-007-0002-0)
- [7] Y. Feng, "Performance-based seismic design optimization of reinforced concrete structures with multiple ground motions via surrogate model," 2024, doi: [10.21203/rs.3.rs-4427943/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4427943/v1).

- [8] Ahmed G. Gad, A. "Particle swarm optimization algorithm and its applications: A systematic review," Soft Computing, vol. 29, pp. 2531- 2561, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09694-4>
- [9] S. Ghaemifard and A. Ghannadiasl, "A comparison of metaheuristic algorithms for structural optimization: Performance and efficiency analysis," Advances in Civil Engineering, vol. 2024, no. 1, p. 2054173, 2024, doi: [10.1155/2024/2054173](https://doi.org/10.1155/2024/2054173).
- [10] M. Zaker Esteghamati, M. Banazadeh, and Q. Huang, "The effect of design drift limit on the seismic performance of RC dual high-rise buildings," The Structural Design of Tall and Special Buildings, vol. 27, no. 8, p. e1464, 2018, doi: [10.1002/tal.1464](https://doi.org/10.1002/tal.1464)
- [11] P. Zakian and A. Kaveh, "Seismic design optimization of engineering structures: A comprehensive review," Acta Mechanica, vol. 234, pp. 1305- 1330, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s00707-022-03470-6>
- [12] A. Ghasemof, M. Mirtaheeri, R. Karami Mohammadi, and M. Salkhordeh, "A multi-objective optimization framework for optimally designing steel moment frame structures under multiple seismic excitations," Earthquakes and Structures, vol. 23, no. 1, pp. 35- 57, 2022, doi: [10.12989/eas.2022.23.1.035](https://doi.org/10.12989/eas.2022.23.1.035).
- [13] S. Gholizadeh, R. Kamyab, and H. Dadashi, "Performance-based design optimization of steel moment frames," International Journal of Optimization in Civil Engineering, vol. 3, no. 2, pp. 327- 343, 2012, file:///C:/Users/MesterComputer/Downloads/1037920130208-1.pdf
- [14] S. Gholizadeh and F. Fattahi, "Design optimization of tall steel buildings by a modified particle swarm algorithm," The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2012, doi: [10.1002/tal.1042](https://doi.org/10.1002/tal.1042).
- [15] F. Barbagallo, M. Bosco, A. Ghersi, E. M. Marino, and P. P. Rossi, "Seismic assessment of steel MRFs by cyclic pushover analysis," The Open Construction and Building Technology Journal, vol. 13, pp. 12- 25, 2019, doi: [10.2174/18748368019130012](https://doi.org/10.2174/18748368019130012).
- [16] H. Rahmati and M. Hassani, "PSO-based optimal retrofitting strategy for seismic upgrade of steel buildings," Journal of Building Engineering, vol. 89, p. 108268, 2024, doi: [10.1016/j.jobte.2024.108268](https://doi.org/10.1016/j.jobte.2024.108268)
- [17] G. A. Sabery, G. H. Danishyar, and G. S. Mubarez, "A comparative study of meta-heuristic optimization algorithms for solving engineering design problems," Journal of Mathematics and Statistics Studies, vol. 4, no. 4, pp. 56- 69, Nov. 2023, doi: [10.32996/jmss.2023.4.4.6](https://doi.org/10.32996/jmss.2023.4.4.6)



- concrete buildings using nonlinear pushover analysis." *Engineering Structures* 27.8, 2005, 1289-1302, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.04.001>
- [28] A. Mechaala, C. Benazouz, S. Guezouli, and M. A. Benbouras, "Evaluation of the displacement coefficient method for seismic demands of structures," in 1st International Conference on Vulnerability and Rehabilitation of Structures, Algiers, May 2018, file:///C:/Users/MeisterComputer/Downloads/VRESTU2018.pdf
- [29] ProtaStructure, Design Guide: Calculation Target Displacement for Pushover Analysis (EC8), Version 1.0, Apr. 21, 2022, [https://cdn.protasoftware.com/documents/whitepaper/protastructure-design-guide-target-displacement-for-pushover-analysis-\(ec8\).pdf](https://cdn.protasoftware.com/documents/whitepaper/protastructure-design-guide-target-displacement-for-pushover-analysis-(ec8).pdf)
- [30] A. López-López, A. Tomas, and G. Sánchez-Olivares, "Influence of adjusted models of plastic hinges in nonlinear behaviour of reinforced concrete buildings," *Engineering Structures*, vol. 124, pp. 245- 257, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.engstruct.2016.06.021
- [31] M. A. Farouk and K. F. Khalil, "Alternative mathematical modeling for plastic hinge of reinforced concrete beam," *SN Applied Sciences*, vol. 2, no. 1, p. 113, Jan. 2020, doi: 10.1007/s42452-019-1684-9
- [32] P. Zarfam and M. Mofid, "On the assessment of modal nonlinear pushover analysis for steel frames with semi-rigid connections," *Structural Engineering and Mechanics*, vol. 32, no. 3, pp. 383- 398, Jun. 2009, doi: 10.12989/sem.2009.32.3.383.
- [33] R. Leslie, "The pushover analysis, explained in its simplicity," in Proceedings of 2nd National Conference - RACE'13, SAINTGITS College of Engineering, Kottayam, 2013, https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=0QBE-j74AAAAJ&citation_for_view=0QBEj74AAAAJ:lJCSPb-OGc4C
- [34] M. Baiguera, T. Rossetto, I. N. Robertson, and C. Petrone, "A procedure for performing nonlinear pushover analysis for tsunami loading to ASCE 7," *Journal of Structural Engineering*, vol. 148, no. 2, Nov. 2021, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003256
- [35] M. Schlüter and M. Gerdtts, "The oracle penalty method," *Journal of Global Optimization*, vol. 47, pp. 293- 325, Jun. 2010, doi: 10.1007/s10898-009-9477-0
- [36] A. E. Smith and D. W. Coit, "Penalty functions," in *Handbook of Evolutionary Computation*, T. Bäck, D. Fogel, and Z. Michalewicz, Eds., Oxford, UK: Oxford University Press and Institute of Physics Publishing, Sep. 1995, sec. C 5.2. <https://www.eng.auburn.edu/~aesmith/files/chapter.pdf>
- [37] M. Clerc and J. Kennedy, "The particle swarm—explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 1, pp. 58- 73, Feb. 2002, doi: 10.1109/4235.985692.
- [38] M. Hanteh, H. Malek, and A. Kheyroddin, "Proposing the combined MARS- PSO and ELM- PSO models for estimating the compressive strength of circular concrete columns wrapped with FRP sheets," *Soft Computing*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 1- 17, 2023, doi: 10.1007/s00500-023-08854-x
- [39] M. Akbari and M. Henteh, "Comparison of genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization algorithm (PSO) for discrete and continuous size optimization of 2D truss structures," *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 76- 97, 2019, doi: 10.22115/scce.2019.195713.1117
- [40] Y. Shi and R. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer," in Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC'98), pp. 69- 73, 1998, doi: 10.1109/ICEC.1998.699146
- [41] A. Trelea, "The particle swarm optimization algorithm: Convergence analysis and parameter selection," *Information Processing Letters*, vol. 85, no. 6, pp. 317- 325, Mar. 2003, doi: 10.1016/S0020-0190(02)00447-7
- [42] W. H. K. Bangyal, A. Hameed, W. Alosaimi, and H. Alyami, "A new initialization approach in particle swarm optimization for global optimization problems," *Computational Intelligence and Neuroscience*, vol. 2021, pp. 1- 17, May 2021, doi: 10.1155/2021/6628889
- [43] M. A. Gök and E. Öztemel, "Impact of population initialization strategies on PSO performance for job shop scheduling problems," *Applied Sciences*, vol. 16, no. 1, p. 266, 2026, doi: 10.3390/app16010266
- [18] F. Farahi and M. Zarrin, "Machine learning-assisted PSO for seismic resilience prediction in steel structures," *Automation in Construction*, vol. 151, p. 104726, 2023, doi: 10.1016/j.autcon.2023.104726
- [19] A. Saha and A. Pandey, "Seismic performance evaluation of reinforced concrete frames using pushover analysis," *Momentum International Journal of Civil Engineering*, vol. 1, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.64123/mijce.v1.i1.1
- [20] S. Arat, S. Senan, and Z. Orman, "A comparative study on PSO with other metaheuristic methods," in *Applying Particle Swarm Optimization*, B. A. Mercangöz, Ed., Cham, Switzerland: Springer, vol. 306, International Series in Operations Research & Management Science, 2021, doi: 10.1007/978-3-030-70281-6_4
- [21] R. Alberdi and K. Khandelwal, "Comparison of robustness of metaheuristic algorithms for steel frame optimization," *Engineering Structures*, vol. 102, pp. 40- 60, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.engstruct.2015.08.012
- [22] C. Yang and D. Simon, "A new particle swarm optimization technique," in 18th International Conference on Systems Engineering (ICSEng 2005), Sep. 2005, doi: 10.1109/ICSENG.2005.9
- [23] B. Abdellatif, C. Benazouz, A. Mebarki, and A. Mechaala, "Structural seismic design using hybrid machine learning and multi-objectives Particle swarm optimization algorithm: Case of Special moment frames in a high seismic zone," *Structures*, 2025, doi: 10.1016/j.istruc.2025.108441
- [24] S. Ganzerli, C. Pantelides, and L. Reaveley, "Performance-based design using structural optimization," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 29, no. 11, pp. 1677- 1690, Nov. 2000, doi: 10.1002/1096-9845(200011)29:11<1677::AID-EQE986>3.0.CO;2-N
- [25] A. Tharwat and W. Schenck, "Population initialization techniques for evolutionary algorithms for single-objective constrained optimization problems: deterministic vs. stochastic techniques," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 67, p. 100952, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.swevo.2021.100952
- [26] A. Bebamzadeh, C. Ventura, B. H. Pandey, and G. Taylor, "Design drift limits for performance-based seismic assessment and retrofit design of school buildings in British Columbia, Canada," in 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, vol. 1, May 2012, https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_5477.pdf
- [27] Zou, X-K., and C-M. Chan. "Optimal seismic performance-based design of reinforced