



http://journalissss.ir

طراحی بهینه قاب مهاربندی کمانش تاب مبتنی بر یکنواختی جابجایی نسبی و وزن مصالح مصرفی با استفاده از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی

روح الله شیرجانی^۱، سید علی رضوی طباطبائی^{۲*}

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه علم و فرهنگ

۲- استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه علم و فرهنگ

*تهران، صندوق پستی ۱۳۱۴۵۸۷۱، s.alirazavi@gmail.com

چکیده

مهاربندهای کمانش تاب یکی از سیستم‌های نوین مقاوم لرزه‌ای می‌باشند. سطح مقطع هسته و طول مهاربند کمانش تاب از مهم‌ترین مشخصه‌ی این مهاربندها می‌باشد که در هزینه تولید آن تأثیر مستقیم دارد. با کاهش سطح مقطع مهاربندهای کمانش تاب، تقاضای ناشی از ظرفیت مهاربندها کاهش یافته و ابعاد تیرها و ستون‌ها نیز کاهش می‌یابد. هدف از این تحقیق، بهینه‌سازی وزن سازه، وزن مهاربندهای کمانش تاب با حفظ یکنواختی جابجایی‌های نسبی سازه در طبقات به وسیله تغییر سطح مقطع هسته و طول مهاربندهای کمانش تاب در ارتفاع سازه می‌باشد. بهینه‌سازی بر اساس تاییح حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی قاب‌ها انجام می‌گیرد. تحلیل تاریخچه زمانی قاب‌های مورد مطالعه تحت هفت رکوردهای زلزله در نرم افزار OpenSees انجام شده است. به این منظور تابع هدف و قیود موردنظر در الگوریتم‌های NSGA-II، MOPSO، MOEA-D، PESA-II، SPEA-II و MOPSO-II انجام شده است. نتایج بهینه‌سازی نشان داده است که برای هر سه تابع هدف وزن سازه، وزن مهاربند کمانش تاب و یکنواختی جابجایی نسبی مقادیر بهینه‌سازی با درصدهای بالای عملکرد سازه را بهینه کردند، به طوری که در مورد وزن مهاربند کمانش تاب ضمن حفظ توزیع یکنواخت جابجایی نسبی، در برخی موارد در سازه‌های ۶ طبقه مورد بررسی تا حدود ۵۰ درصد امکان کاهش وزن مهاربند وجود دارد.

واژگان کلیدی

بهینه‌سازی چندهدفه، مهاربندهای کمانش تاب، طراحی بهینه، تحلیل تاریخچه زمانی، تغییر مکان جانبی نسبی

Optimum design of BRB frame based on drift uniformity and material weight using nonlinear time history analysis

R. Shirjani, S.A. Razavi

Abstract

Buckling-Restrained Braces (BRBs) are one of the new seismic resistant systems. The cross-sectional area and length of the BRB brace is one of the most important characteristics of these braces that directly affects the cost of BRB frames. Since beams, columns, and connections are designed for the maximum forces developed in BRB, the decrease in cross-sectional area of the BRBs decreases the steel consumption in the whole structure. The main purpose of this study is to optimize the weight of the structure, BRBs weight while uniforming the drift profile by changing the cross-sectional area and the length of the BRBs using genetic algorithms and other multi-objective optimization algorithms. Optimization is based on the results of nonlinear time history analysis under seven earthquake records using OpenSees software. For this purpose, the objective function and constraints were defined in the genetic algorithm NSGA-II, MOPSO, MOEA-D, PESA-II, SPEA-II, and the initial population produced was entered as the initial cross-sectional area and length of the braces in the Opensees software. The optimization results show that for all three objective functions, the optimization values with high percentages of structural performance were optimized in such a way that the weight of BRB can be decreased up to about 50%.

Keywords

Multi-objective optimization, Buckling-restrained brace, Optimum design, Time history analysis, Inter-story drift



۱- مقدمه

استاتیکی خطی مقایسه نمودند [۶]. Richards و Oxborrow طی یک تحقیق با استفاده از الگوریتم ژنتیک و آنالیز غیرخطی تاریخچه‌ی زمانی توزیع بهینه‌ای از مقاومت را در قاب‌های BRBF بلند ارائه دادند؛ به طوریکه علاوه بر دست یافتن به سطح مقطع‌های حداقل، قیود تغییرمکان جانبی نسبی مجاز طبقات و شکل پذیری تأمین گردد. این محققین قاب‌های ۳، ۹، ۱۲ و ۱۸ طبقی مهاربندی شده‌ی فولادی را جهت صحبت‌سنگی مورد مطالعه قرار دادند. در قاب‌های سه و شش طبقه سطح مقطع مهاربندها از بالا به پایین افزایش می‌یابد و در قاب‌های ۹ و ۱۲ طبقه توزیع سطح مقطع بر اساس تغییر مکان جانبی نسبی طبقات یکسان در طبقات صورت گرفته است ولی در قاب ۱۸ طبقه توزیع معنادار و مشخصی برای مساحت مهاربندها جهت یکسان شدن تغییری مکان جانبی نسبی طبقات یافت نشد [۷].

Farhat و همکارانش در تحقیقی روی قاب‌های BRBF مسائله‌ی بهینه‌سازی تک هدفه و چندهدفه را با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل نمودند. هدف مسائله‌ی تک منظوره بهینه‌یابی هزینه (سطح مقطع مهاربند کمانش تاب) و اهداف مسائله‌ی چندمنظوره، بهینه‌یابی هزینه و آسیب وارد بر سازه می‌باشد. قید مسائله‌ی نیز محدود کردن کرنش مهاربند کمانش تاب به کرنش حد گسیختگی است. آن‌ها یک روش سیستماتیک به منظور به دست آوردن مقطع بهینه‌ی مهاربند کمانش تاب جهت مقاوم سازی سازه‌های موجود در برابر زلزله‌های شدید ارائه کردند. بهینه‌یابی بر اساس نتایج تحلیل دینامیکی خطی صورت گرفت. همچنین به منظور بهبود بخشیدن به عملکرد روش معروفی شده، یک روش مقدماتی بر پایه‌ی آنالیز استاتیکی خطی را ارائه نمودند [۸]. Mousavi و همکارانش در سال ۲۰۲۱ در پژوهشی تحلیلی به ارائه روش طراحی قاب‌های مهاربندی کمانش تاب بر اساس یکنواختی جابجایی نسبی پرداختند [۹]. امروزه به منظور اتلاف انرژی زلزله، استفاده از میراگرهای سازه‌ها موردن توجه قرار گرفته است. مهاربندهای همگرا یکی از انواع میراگرهای تسلیمی محسوب می‌شوند که بخش زیادی از اتلاف انرژی در این سیستم‌ها توسط تسلیم مهاربند درکشش صورت می‌گیرد. در فشار، پدیده‌ی کمانش قبل از تسلیم، منجر به اتلاف انرژی کمتر، کاهش سختی جانبی قاب، کاهش انرژی جذب شده در حلقه‌های هیسترزیس^۱ و نایپایداری در یک طبقه و یا کل سازه می‌شود [۱۰ و ۱۱].

مهاربندهای کمانش تاب یک نوع نسبتاً جدید و بهبود یافته از مهاربندهای همگرا هستند با این تفاوت که این مهاربندها هم

بهینه‌سازی یک فعالیت مهم و تعیین‌کننده در طراحی سازه می‌باشد. طراحان زمانی قادر خواهند بود مدل‌های بهتری طراحی کنند که بتوانند با روش‌های بهینه‌سازی در صرف زمان و هزینه‌ی طراحی صرفه‌جویی نمایند. بسیاری از مسائل بهینه‌سازی در مهندسی، طبیعتاً پیچیده‌تر و مشکل‌تر از آن هستند که با روش‌های مرسوم بهینه‌سازی نظری روش برنامه‌ریزی خطی و نظایر آن قابل حل باشند. از جمله راه حل‌های موجود در برخورده با این گونه مسائل، استفاده از الگوریتم‌های تکاملی است. علاوه بر این، هدف از بهینه‌سازی یافتن بهترین جواب قابل قبول، با توجه به محدودیت‌های مسئله است. برای یک مسئله، ممکن است جواب‌های مختلفی موجود باشد که برای مقایسه‌ی آن‌ها و انتخاب جواب بهینه تابعی به نام تابع هدف تعريف می‌شود.

محققان زیادی طراحی لرزه‌ای بهینه‌ی ساختمانها را هدف کار خود قرار دادند. تحقیقات گوناگونی با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی انجام شده است، که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود.

Hosseini و Khosravian در تحقیقی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، طرحی بهینه برای میراگرهای TADAS ارائه نمودند [۱]. در این تحقیق به بهینه نمودن تعداد پره‌های میراگر TADAS، پارامترهای فیزیکی آن و همچنین محل قرارگیری آن در ارتفاع سازه پرداخته شده است. Tehranizadeh و Katebi به منظور توزیع مناسب مقاومت و سختی برای استفاده‌ی بهینه از ظرفیت ساختمان‌های بتنی از الگوریتم ژنتیک چندهدفه‌ی NSGA-II استفاده کردند [۲]. Xu و همکارانش روشی برای بهینه‌سازی چندهدفه‌ی سازه‌های خمشی فولادی بر پایه‌ی مفاهیم طراحی بر اساس عملکرد ارائه نمودند. الگوریتم بهینه‌سازی انتخابی توسط آن‌ها دوهدفه بوده که یکی بیان کننده‌ی هزینه و دیگری بیان کننده‌ی خسارت وارده و نحوه‌ی عملکرد سازه حین زلزله می‌باشد [۳]. Lagaros و همکارانش طراحی بهینه‌ی قاب‌های خمشی فولادی را با در نظر گرفتن دو آنالیز خطی و غیرخطی تاریخچه‌ی زمانی بررسی کردند [۴]. Ohsaki و همکارانش به حداقل نمودن فولاد مصرفی در قاب‌های خمشی فولادی و افزایش اتلاف انرژی پلاستیک در سطح عملکرد خرابی کامل پرداختند و برای این منظور از تحلیل تاریخچه زمانی و یک فرمولاسیون چندهدفه استفاده کردند [۵].

Balling و همکارانش قاب‌های مهاربندی کمانش تاب (BRBF) با ارتفاع کم را با استفاده از آنالیز تاریخچه‌ی زمانی، بهینه و نتایج طراحی را با نتایج حاصل از پروسه‌ی آنالیز



ژن‌های ضعیفتر از بین می‌روند. به عبارت دیگر نتیجه عملیات متقابل ژن‌ها و کروموزوم‌ها باقی ماندن موجودات اصلاح و برتر است. الگوریتم ژنتیک نیز بر همین اساس بهترین پاسخ بهینه‌سازی را می‌یابد، در این تحقیق از الگوریتم‌های فراابتکاری^۷ چندهدفه NSGA-II، MOEA-D، PESA-II، SPEA2 و MOPSO نیز استفاده شده است.

تحقیق‌های بسیاری در زمینه طراحی به همراه بهینه‌سازی انجام شده است، اما اکثر آنان بهینه‌سازی‌های تک هدفه بوده‌اند یا از روش‌های شناخته شده استفاده نکرده‌اند.

در بسیاری از تحقیق‌های انجام گرفته با استفاده از بعضی از فرمول‌های بنیادین مهندسی روش‌هایی سخت و پیچیده استفاده شده است که ترکیب آن روش‌ها یا الگوریتم‌های بهینه‌سازی (به خصوص چند هدفه) سخت و دشوار است.

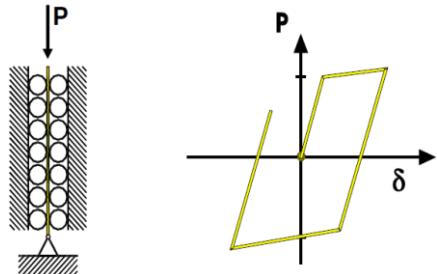
در این تحقیق سعی شده است تا طراحی بهینه سازه با روشی صورت گیرد که امروزه در دسترس طراحان و مهندسان سازه قرار دارد و در عوض از این قابلیت که تغییر در طول و مساحت مهاربند موجب تغییر در اندازه مقطع تیر و ستون‌ها می‌شود، استفاده کرد. بدین ترتیب برای تمام طبقات یک سازه ممکن است ابعادی جدا گانه برای مهاربند کمانش تاب استفاده نمود. اگر برای هر طبقه مهاربند کمانش تاب ابعادی جدا گانه لحاظ شود، تعداد حالات طراحی ممکن است تا چند میلیون هم پیش برود. لذا از الگوریتم‌های چندهدفه برای کاهش این تعداد تا چندهزار و برای افزایش سرعت آنالیز از همگام سازی برنامه‌های Matlab و OpenSees در استفاده شده است تا بهترین جواب‌ها بر اساس توابع هدف انتخاب شود.

به این ترتیب در نهایت برای یک سازه مجموعه‌ای از بهترین جواب‌ها وجود خواهد داشت که در هر کدام از توابع هدف، بهترین حالت است.

۱-۱- اهداف تحقیق

از آنچاکه عامل کنترل‌کننده‌ی هزینه‌ی قاب‌های مهاربندی شده با مهاربند کمانش تاب سطح مقطع هسته‌ی آن‌ها و طول آن‌ها می‌باشد، هدف اصلی در این تحقیق، بهینه کردن سطح مقطع هسته این مهاربندها و طول آن‌ها در ارتفاع قاب‌های دو بعدی بوده به نحوی که در تمام طبقات از توزیع جابجایی نسبی یکنواخت استفاده شود که تمام این اهداف تحت سه تابع هدف وزن مهاربند، وزن کل سازه بدون وزن مهاربند و میزان تخطی سازه از پیوستگی جابجایی نسبی در ارتفاع سازه (توزیع جابجایی نسبی یکنواخت) پیاده سازی شده است. در روند

در کشش و هم در فشار، در مقاومت تنظیم شده^۸ خود تقریباً به طور مشابه وارد ناحیه‌ی غیر الاستیک می‌شوند (شکل ۱۱) [۱۲] و ۱۳]. در این مهاربندها هسته نقش باربری محوری و غلاف فولادی و ماده پرکننده (گروت یا بتون) درون آن نقش عامل مقید کردن کمانش هسته را ایفا می‌کند. از آنچاکه هسته‌ی فولادی در برابر کمانش مقاوم است، تنها کرنش‌های محوری یکنواخت را تحمل می‌کند و مفاصل پلاستیک کمانشی، در مهاربند کمانش تاب شکل نمی‌گیرند [۱۳] ایده‌ی مهاربندهای کمانش تاب برای اولین بار در ژاپن به شکل تعییه‌ی هسته‌ی فولادی بین پانل‌های بتونی و همچنین تعییه‌ی آن در مقطع توخالی (غلاف) پرشده با بتون مطرح شد و امروزه به عنوان یکی از سیستم‌های مناسب لرزه‌های شناخته شده هستند. هدفی که در این تحقیق دنبال می‌شود رسیدن به یک طرح بهینه برای سطح مقطع و طول مهاربندهای کمانش تاب در ارتفاع سازه در عین تأمین قیود مورد نظر نظری تأمین تغییرمکان جانبی مجاز، جلوگیری از بروز خستگی کم چرخه و یکنواخت نمودن جابجایی نسبی می‌باشد. این هدف با استفاده از الگوریتم‌های MOEA-D، PESA-II، SPEA2، MOPSO، NSGA-II و چند هدفه این محقق شده است.



شکل ۱- مکانیسم رفتاری مهاربندهای کمانش تاب [۱۳]

الگوریتم ژنتیک روش بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت جاندار است که می‌توان در طبقه‌بندی روش‌های بهینه‌سازی، از آن به عنوان یک الگوریتم تکاملی^۹ از مجموع الگوریتم‌های جستجوی تصادفی هدایت شده یادکرد. این الگوریتم، الگوریتمی مبتنی بر تکرار است و اصول اولیه آن از علم ژنتیک اقتباس گردیده است. علم ژنتیک، علمی است که درباره چگونگی توارث و انتقال صفات بیولوژیکی از نسلی به نسل بعد صحبت می‌کند. عامل اصلی انتقال صفات بیولوژیکی در موجودات زنده کروموزوم‌ها^{۱۰} و ژن‌ها^{۱۱} است و نحوه عملکرد آن‌ها به گونه‌ای است که درنهایت ژن‌ها و کروموزوم‌های برتر و قوی مانده و

مسائل چندهدفه با رویکرد پرتو از دسته مسائل پیچیده‌تر در حل مسائل چندهدفه می‌باشند. علت این است که معمولاً جواب بهینه‌خواصی برای این روش‌ها به دست نمی‌آید [۱۴]. برای انجام مقایسه‌های مناسب در بهینه‌سازی چندهدفه از مفهوم غلبه استفاده می‌شود. بدین‌صورت که فرض کنید F کل فضای موجه مسئله باشد و $F = \{x_1, x_2\}$ دو جواب از این مسئله باشد، می‌گوییم x_1 بر x_2 غالب است (یا x_2 مغلوب x_1 است) اگر و فقط اگر، x_1 نسبت به x_2 در هیچ‌کدام از اهداف بدتر نباشد. می‌گوییم $x_1 \leq f_i(x_2) \forall i \in \{1, 2, \dots, m\}$ (یا $f_i(x_1) < f_i(x_2)$). به حداقل دریکی از اهداف اکیداً بهتر باشد ($f_i(x_1) < f_i(x_2)$). به عبارت دیگر حل‌های نامغلوب حل‌هایی هستند که جواب‌های دیگر را پوشش می‌دهند ولی خودشان توسط حل‌های دیگر پوشش داده نمی‌شوند. حال با توجه به این مفهوم دو عملگر به گوریتم‌های تک هدفه اضافه شده و به گوریتم‌های چندهدفه شهرت یافته‌اند، که این دو عملگر مرتب‌سازی سریع پاسخ‌های نامغلوب^{۱۰} و فاصله ازدحامی^{۱۱} می‌باشند [۱۴].

در این تحقیق از گوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه شده است، هر کدام از این گوریتم‌ها بهترین جواب‌ها را به روشی خاص انتخاب می‌کند که در قسمت مقدمه به توضیح روش گوریتم ژنتیک پرداخته شده است.

الگوریتم SPEA-II گوریتم کارایی است که از یک آرشیو خارجی^{۱۲} برای ذخیره‌ی پاسخ‌های غیر تعیین‌کننده که در طی جستجوی گوریتم یافت می‌شود، استفاده می‌کند.

یکی از شناخته‌ترین گوریتم‌های چندهدفه، نسخه‌ی دوم گوریتم چندهدفه‌ی پرتو^{۱۳} (PESA-II) است که در آن برای تولید پاسخ‌های جدید از عملگرهای گوریتم ژنتیک استفاده می‌شود.

الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات (MOPSO) توسط Coello در سال ۲۰۰۴ معرفی گردید [۱۵]. در واقع این گوریتم تعییمی است از گوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) که برای حل مثال چندهدفه بکار می‌رود. در گوریتم MOPSO یک مفهومی به نام آرشیو یا مخزن^{۱۴} نسبت به گوریتم PSO اضافه شده است که به تالار مشاهیر^{۱۵} نیز معروف است. انتخاب بهترین جواب کلی و بهترین خاطره شخصی برای هر ذره گام مهم و اساسی در گوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ازدحام ذرات است.

الگوریتم MOEA-D^{۱۶} که در سال ۲۰۰۷ توسط Zhang و Li [۱۶] توسعه داده شد، مسئله چندهدفه را به تعدادی زیرمسئله

بهینه‌سازی معیار خسارت به علت خستگی کم چرخه^۷ نیز کنترل شده تا از عدم گسیختگی مهاربندها اطمینان حاصل شود. برای رسیدن به توزیع بهینه، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم‌های فراابتکاری در MATLAB انجام شد و تحلیل‌های انجام گرفته روی قاب‌های مورد مطالعه، تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت هفت شتاب‌نگاشت به منظور افزایش دقت انجام شده است و به منظور بالا رفتن سرعت تحلیل‌های غیرخطی از نرم‌افزار OpenSees استفاده شد. به منظور انجام تحقیق ارتباطی بین دو نرم‌افزار OpenSees و MATLAB برقرار شد به نحوی که برنامه MATLAB بتواند کاملاً به صورت خودکار تحلیل نتایج حاصل از آنالیز سازه توسط OpenSees را بررسی و دستورات لازم جهت طراحی سازه را به برنامه OpenSees بدهد.

۲- بهینه‌سازی چندهدفه

امروزه بسیاری از مسائل کاربردی در جهان واقعی را مسائل بهینه‌سازی ترکیباتی چندهدفه تشکیل می‌دهند که اهداف در تضاد با یکدیگر بوده و بهبود در یک هدف باعث بهتر شدن هدف دیگر نمی‌شود. اکثر مطالعات در زمینه‌ی مثال تولید-توزیع در زنجیره تأمین به صورت تک معیار و یا تک هدفه بررسی شده است در حالی که یک هدف یا معیار در مسائل کاربردی واقعی و عملی کافی نمی‌باشد. بدین ترتیب بهینه‌سازی چندهدفه نه تنها به دلیل ماهیت چندهدفه مثال دنیای واقعی، بلکه به دلیل اینکه هنوز سوالات بدون جواب متعددی در این زمینه وجود دارد، می‌تواند از جمله تحقیقات مهم تلقی شود.

در مثال بهینه‌سازی تک هدفه، با بهینه ساختن تابع هدف الگوریتم به پایان می‌رسد اما در مسائل چندهدفه بهینه‌سازی هم‌زمان چند تابع هدف کار سخت و زمان‌بری است و در اغلب این‌گونه مسائل تعدادی جواب قابل قبول بر اساس معیارهای نامغلوبی به دست می‌اید؛ بنابراین جواب نهایی به شکل دسته‌ای از جواب‌ها^۸ است که نماینده موازن‌های^۹ از تابع هدف مختلف مسئله است. درنهایت یکی از جواب‌ها به عنوان جواب مرجع توسط تصمیم‌گیرنده انتخاب می‌شود، یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه کلی را می‌توان به صورت رابطه (۱) تعریف کرد:

$$f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_Q(x)] \quad (1)$$

Subject: $x \in X$

که $X \subseteq R^Q$ فضای حل موجه مسئله و $\{x_1, x_2, \dots, x_p\}$ مجموعه متغیرهای تصمیم در فضای p بعدی است. از بین این مجموعه حل‌های متناهی حل مناسب جواب‌هایی خواهد بود که عملکرد قابل قبولی را نسبت به همه اهداف داشته باشد. حل



بهینه‌سازی اسکالر (تک هدفه) تجزیه می‌کند و آن‌ها را هم‌زمان بهینه می‌نماید. در این روش یک بردار وزن برای هر زیرمسئله تعریف می‌شود و توابع هدف با استفاده از این بردار وزن در غالب یک تابع هدف کلی تجمعی می‌شود.

۳- هندسه سازه

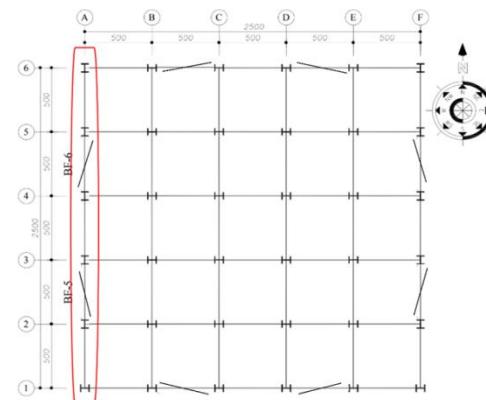
سازه‌ی انتخاب شده از مرجع [۱۷] می‌باشد که به عنوان یک ساختمان نمونه شامل اتصالات مفصلی و واقع در تهران با خاک نوع II می‌باشد و طراحی آن با استفاده از استاندارد ۲۸۰۰ (۱۳۹۲) (ویرایش چهارم) انجام شده است. در شکل (۲) قاب محور A که جهت مدل‌سازی غیرخطی و بهینه‌سازی سطح مقطع مهاربندها مورداستفاده قرار می‌گیرد، نمایش داده شده است. ارتفاع هر طبقه ۳ متر و طول هر دهانه ۵ متر است. بهینه‌سازی برای دو سازه ۶ و ۱۰ طبقه که نمای آن به ترتیب در شکل (۳-الف و ب) نشان داده شده‌اند به صورت دوبعدی انجام خواهد گرفت، همچنین در جدول (۱) پارامترهای سیستم باربر لرزه‌ای آورده شده است.

مرجع	مقدار	پارامتر
-	۱۸ متر و ۳۰ متر	ارتفاع ساختمان
-	تهران	محل سازه
استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم)	۰/۳۵	شتاب مبنای طرح (A)
استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم)	II	نوع خاک
-	مسکونی واداری	كاربری
استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم)	۱	ضریب اهمیت
استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم)	BRBF با اتصالات ساده‌ی تیر-ستون	سیستم باربر لرزه‌ای
استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم)	۷	ضریب رفتار (R)
استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم)	۵/۵	Cd

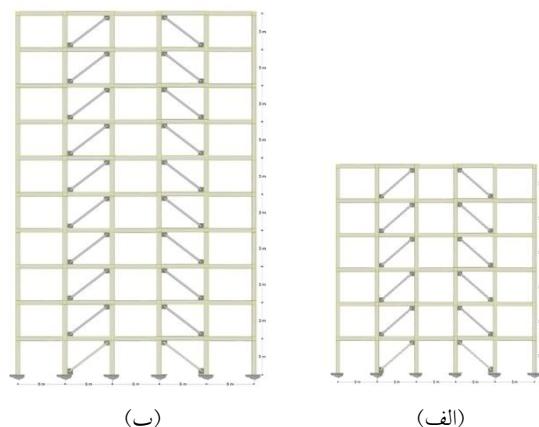
۴- مدل‌سازی غیرخطی سازه

جهت مدل‌سازی و تحلیل غیرخطی سازه از نرم‌افزار OpenSees که یک نرم‌افزار کدباز^{۱۷} می‌باشد استفاده گردید. مدل‌سازی مهاربندها با استفاده از المان تیرستون غیرخطی^{۱۸} و سطح مقطع فایبری یا رشته‌ای^{۱۹} انجام گرفته است. در روش فایبری سطح مقطع موردنظر به المان‌های کوچک تقسیم می‌شود و با اختصاص ماده دلخواه به هریک از المان‌ها، می‌توان به جای فرض فرآیند پلاستیک شدن در نقاط خاصی از سازه (مانند فرض مفصل خمی در وسط یا دو سر تیر)، پلاستیک شدن را به صورت توزیع یافته در همه طول المان در نظر گرفت که موجب افزایش دقت مدل‌سازی می‌گردد [۱۸].

همانطور که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد تیرها و ستون‌های دهانه‌ی مهاربندی شده‌ی مهاربند کمانش تاب باید به اندازه‌ی کافی مقاوم باشند تا در زمان تسليم مهاربندها در طول زلزله همچنان الاستیک باقی بمانند و وارد ناحیه‌ی غیر ارجاعی نشوند؛ بنابراین اختصاص المان تیرستون الاستیک^{۲۰} به تیرها و ستون‌ها کافی است و سرعت تحلیل‌های غیرخطی نیز کاهش می‌یابد ولی به منظور کنترل رفتار این المان‌ها و اطلاع از اینکه وارد ناحیه‌ی غیرخطی شده‌اند یا نه از المان تیرستون غیرخطی استفاده شده است. در هر دو سازه، قاب محور A جهت تحلیل دوبعدی غیرخطی و بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. رابطه تنش-کرنش مقاطع فولادی با استفاده از مصالح Steel02 در نرم‌افزار OpenSees شبیه‌سازی شده است. این



شکل ۲- پلان قاب مهاربندی شده [۱۸]



شکل ۳- نمای قاب ۶ و ۱۰ طبقه



انتخاب گردد؛ بنابراین در این تحقیق هفت زوج شتاب‌نگاشت مورداستفاده قرار گرفته است تا بتوان پاسخ‌های میانگین آن‌ها را در فرآیند بهینه‌سازی مورداستفاده قرارداد.

۴-۲- رکوردهای مورداستفاده

به منظور انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی برای محاسبه پاسخ‌ها از هفت رکورد شامل رکوردهای ناهانی^{۲۲}، لوما^{۳۳}، کیپ مندسینو^{۲۴}، نورث ریچ^{۲۵}، چیچی^{۲۶}، ایرپینیا^{۲۷}، لوما پریتا^{۲۸} استفاده گردیده است تا بتوان پاسخ‌های میانگین آن‌ها را مورداستفاده قرارداد. رکوردها از بین مجموعه رکوردهای ارائه شده در PEER انتخاب شدند. در جدول (۲) مشخصات رکوردهای انتخابی نشان داده شده است و شکل (۴) نیز نمودار طیف پاسخ شتاب رکوردهای انتخابی را نشان می‌دهد. روش مقیاس بر اساس روش پیشنهاد شده در استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) [۱۹] انجام شده است.

در شکل (۵) میانگین طیف پاسخ شتاب رکوردهای انتخابی نشان داده شده است.

۵- فرآیند بهینه‌سازی

هدف از بهینه‌سازی در این تحقیق، حداقل نمودن طول و سطح مقطع مهاربندهای کمایش تاب با رعایت قیود تعریف شده می‌باشد. برای محاسبه و کنترل قیود مورداستنظر از نتایج میانگین حاصل از تحلیل غیرخطی قاب‌ها تحت هفت زلزله توسط نرم‌افزار OpenSees در الگوریتم بهینه‌سازی کد نویسی شده در MATLAB استفاده شده است. برای این نتظر لازم بود ارتباطی بین دو نرم‌افزار OpenSees و MATLAB برقرار گردد تا نتایج تحلیل غیرخطی در OpenSees به عنوان ورودی الگوریتم بهینه‌سازی، مورداستفاده قرار گیرد و بر عکس، یعنی مقاطع تولید شده توسط الگوریتم بهینه‌سازی نیز در OpenSees مورد استفاده قرار گیرد. در ادامه جریان این فرآیند ارائه شده است.

مصالح رفتار چرخه‌ای را به خوبی تقریب می‌زنند و سخت‌شوندگی کرنشی را به صورت کینماتیک در نظر می‌گیرد.

پارامترهای موردنیاز برای تعیین رفتار مصالح Steel02 عبارت اند از F_y : تنش تسلیم، E : سختی الاستیک اولیه، b نسبت سخت‌شوندگی کرنشی و R : میزان انحنا در محل تلاقي دو خط نمودار. تنش تسلیم هسته فولادی مهاربندهای کمایش تاب و تیرها و ستون‌ها به ترتیب برابر ۲۶۲۰ و ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع در نظر گرفته شده‌اند. به منظور خروجی گرفتن خستگی کم چرخه از مهاربندهای کمایش تاب مدل شده در Fatigue OpenSees جهت کنترل معیار خسارت، از مصالح استفاده شده است. این مصالح توسط Uriz تعریف گردیده که تأثیر خستگی کم چرخه را در مدل در نظر می‌گیرد. این مصالح بر اساس خسارت تجمعی ماینر و روابط کافین-مانسون معیار خسارت را در مهاربندهای شمارنده‌ی رین فلو^{۲۱} به منظور مصالح یک مدل اصلاح‌شده شمارنده‌ی رین فلو^{۲۱} به منظور شمارش تعداد چرخه‌ها که پیش‌ازین شرح داده شده بود، به کار گرفته شده است و به مصالح Steel02 اختصاص داده می‌شود.

پارامترهای موردنیاز جهت تعریف این مصالح، تنش تسلیم فولاد مقطع و همچنین دو مقدار m و E_0 که به ترتیب بیانگر شیب منحنی کافین-مانسون در فضای لگاریتمی و مقدار کرنش در حلقه‌های که منجر به شکست می‌شود، می‌باشند.

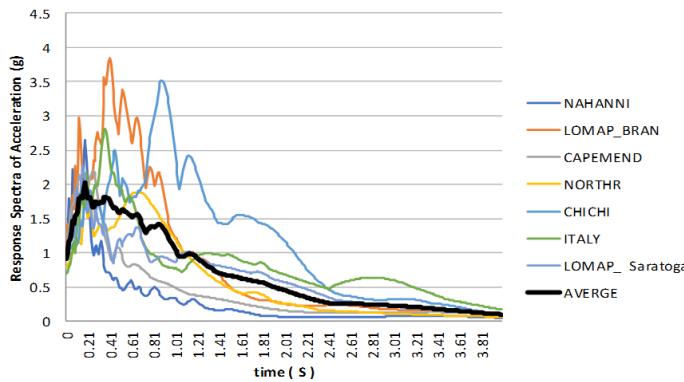
۴-۱- تحلیل تاریخچه‌ی زمانی

تحلیل دینامیکی غیرخطی روی قاب موردبخت در دو سازه‌ی ۶ و ۱۰ طبقه انجام شد. طبق آینین نامه ۲۸۰۰ شتاب‌نگاشت‌هایی که در تعیین اثر حرکت زمین مورداستفاده قرار می‌گیرند باید تا حد امکان نمایانگر حرکت واقعی زمین در محل احداث بنا، در هنگام وقوع زلزله، باشند که برای نیل به این هدف لازم است حداقل هفت زوج شتاب‌نگاشت متعلق به مؤلفه‌های افقی هفت زلزله‌ی مختلف ثبت شده با مشخصات مذکور در همین آینین نامه

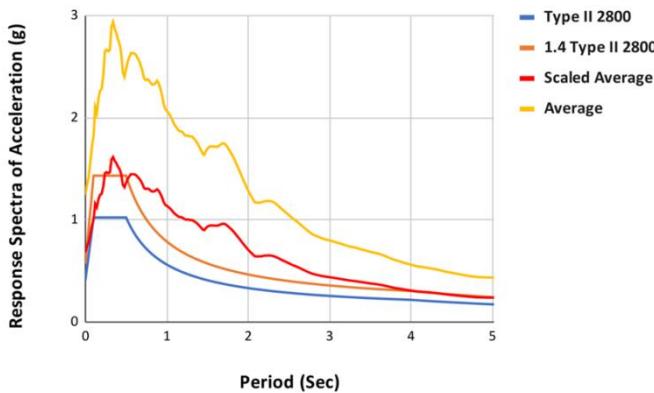
جدول ۲- مشخصات رکوردهای زلزله

نام زلزله	ایستگاه ثبت	سال	مقدار	Mechanism	Epicentral dist. (Km)(Rjb)	نوع خاک
ناهانی	Site 1	۱۹۸۵	۶/۷۶	Reverse	۲/۴۸	II
لوما	BRAN	۱۹۸۹	۶/۹۳	Reverse Oblique	۳/۸۵	II
کیپ مندسینو	Cape Mendocino	۱۹۹۲	۷/۰۱	Reverse	۰/۰۰	II
نورث ریچ	LA - Sepulveda VA Hospital	۱۹۹۴	۷/۶۹	Reverse	۰/۰۰	II
چیچی	TCU084	۱۹۹۹	۷/۶۲	Reverse Oblique	۰/۰۰	II
ایرپینیا	Sturno (STN)	۱۹۸۰	۶/۹۰	Normal	۶/۷۸	II
لوما پریتا	Saratoga - Aloha Ave	۱۹۸۹	۶/۹۳	Reverse Oblique	۷/۵۸	II





شکل ۴- طیف پاسخ شتاب رکوردها و میانگین آنها



شکل ۵- مقیاس نمودن طیف پاسخ متوسط زلزله‌ها با طیف پاسخ خاک II

جدول ۳- پارامترهای مورداستفاده در الگوریتم فرالیکاری به منظور

بهینه‌سازی

تعداد گام بهینه‌سازی (نسل)	اندازه جمعیت	تعداد متغیرهای طراحی	الگوریتم	قاب
۱۰۰	۳۰	۱۲	NSGA_II	۶ طبقه
۱۰۰	۵۰	۱۲	SPEA2	۶ طبقه
۱۰۰	۲۵	۱۲	PESA_II	۶ طبقه
۱۰۰	۳۰۰	۱۲	MOPSO	۶ طبقه
۱۰۰	۲۵	۱۲	MOEA_D	۶ طبقه
۱۰۰	۳۰	۲۴	NSGA_II	۱۰ طبقه
۱۰۰	۵۰	۲۴	SPEA2	۱۰ طبقه
۱۰۰	۲۵	۲۴	PESA_II	۱۰ طبقه
۱۰۰	۳۰۰	۲۴	MOPSO	۱۰ طبقه
۱۰۰	۲۵	۲۴	MOEA_D	۱۰ طبقه

۱-۵- فرمول‌بندی مسئله‌ی بهینه‌سازی

بهینه‌سازی مقادیر بهینه‌ی متغیرهای طراحی را جستجو می‌کند بطوریکه بهترین خروجی برای تابع هدف داده شده باشد و معیارهای آئین نامه و نظرات طراح (قیود) را تأمین نماید. مقدار بهینه می‌تواند مقدار کمینه یا بیشینه‌ی تابع موردنظر باشد. در این تحقیق مقدار کمینه‌ی تابع هدف، پاسخ مسئله‌ی بهینه‌سازی مطرح شده می‌باشد. به منظور استفاده از الگوریتم فرالیکاری بهینه‌سازی پارامترهای موردنیاز در این الگوریتم در جدول (۳) نشان داده شده است.

۲-۵- متغیرهای طراحی

مهاریندهای کمانش تاب، تحت زلزله، هم در کشش و هم در فشار تسلیم می‌شوند و این ویژگی مهاریندهای کمانش تاب است که باعث کارایی بهتر این مهاریندها نسبت به مهاریندهای معمولی شده است. تغییر در سطح مقطع، طول و ویژگی مصالح

شد، نقطه‌ی انتهایی برای عملکرد مهاربندهای کمانش تاب در برابر بارهای لرزه‌ای، گسیختگی به علت خستگی کم چرخه هست. با توجه به توضیحات ارائه شده، قیدی جهت کنترل معیار خسارت در اثر خستگی کم چرخه در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه معیار خسارت برای هر مهاربند طی یک تحلیل تاریخچه‌ی زمانی محاسبه می‌شود، باید معیار خسارت پالمگرن-ماینر^{۲۹} [۲۳] (FDI^{۳۰}) در تمامی مهاربندها طی هر هفت رکورد شتابنگاشت کمتر از یک باشد.

$$FDI = \sum \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} + \dots + \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (۶)$$

که در آن n_i تعداد سیکل و N_{fi} عمر خستگی (تعداد چرخه‌های تکرارشونده تا رسیدن به شکست) در هر دامنه‌ی ثابت کرنشی i می‌باشد. در صورتی که مقدار FDI بزرگ‌تر از یک شود، احتمال شکست وجود دارد.

همچنین قیود جانبی دیگری از جمله میزان حداقل و حداکثر برای عرض مقطع مهاربندها به ترتیب برابر ۱ و ۲۰ سانتی‌متر و حداقل ۳۵ سانتی‌متر طول مهاربند کمانش تاب برای قاب شش طبقه و ده طبقه در نظر گرفته شده است.

همچنین از آنجا که تعداد تحلیل‌ها در بهینه‌سازی‌های فرالبتکاری زیاد است و هر کدام از آن‌ها دارای اهمیت جداگانه می‌باشد لذا در برابر کفاایت نیروهای برشی و خمشی و محوری برای تیرها و ستون‌ها قیدی در نظر گرفته شده است به این معنی که در هر تحلیل تک‌تک تیرها و ستون‌ها موردنبررسی قرار گرفته و سطح مقطع مناسب آن‌ها از لیست سطح مقطع آماده شده انتخاب خواهد شد.

۴-۵ تابع هدف

تابع هدف که معمولاً به عنوان یک معیار هزینه یا عملکرد شناخته می‌شود بر اساس متغیرهای طراحی تعريف شده و انگیزه‌ی تصمیم‌گیری قلمداد می‌گردد. در طراحی بهینه، بهترین مقدار تابع هدف (کمینه یا بیشینه) به دست می‌آید، بطوری که همه‌ی قیدها تأمین گردند؛ بنابراین انتخاب یک تابع هدف مناسب مهم است. در این تحقیق یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه با تابع هدف مربوط به هزینه تحت بارهای لرزه‌ای حل می‌شود که هدف، حداقل نمودن سطح مقطع و طول مهاربندهای کمانش تاب به وسیله سه تابع هدف که یکی حداقل نمودن وزن مهاربندهای کمانش تاب رابطه (۵) و دیگری حداقل نمودن وزن کل سازه بدون مهاربندهای کمانش تاب رابطه (۶) و دیگری پیوستگی جابجایی نسبی (Drift) در سازه رابطه (۷) است.

مورداستفاده در هسته‌ی مهاربند و محل نصب آن در سازه در میزان تسليیم هسته مهاربند مؤثر است. وزن کل مهاربندها، وزن کل سازه بدون وزن مهاربندها و یکنواختی جابجایی نسبی به عنوان تابع‌های هدف انتخاب می‌شود. ضخامت مقاطع مهاربندها ثابت و برابر ۳ سانتی‌متر فرض شده و متغیر طراحی جهت بهینه‌سازی، عرض مقاطع و طول مهاربند در نظر گرفته شده است (رابطه (۸) و (۹)).

$$X = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_n) \quad (۲)$$

$$L = (l_1, l_2, l_3, \dots, l_n) \quad (۳)$$

که در آن n تعداد طبقات است و b_i عرض مقطع و l_i طول مهاربند i نام می‌باشد. لازم به ذکر است که برای هر طبقه یک نوع مهاربند در نظر گرفته شده است.

۳-۵ قیود طراحی

در طراحی سازه، متغیرها نمی‌توانند هر مقداری داشته باشند و می‌بایستی بر اساس یک سری از ملزومات و قیود، محدود شوند که به آن‌ها قیود طراحی گفته می‌شود. مهم‌ترین ضرورت در قاب‌های BRBF پس از اتمام زلزله این است که تغییر شکل‌های ماندگار در سازه و میزان آسیب وارد به آن حداقل شود. در این تحقیق تأمین چنین ضرورتی با اعمال قید محدود شدن جابجایی طبقات به مقدار مجاز فرمول (۴). به منظور اعمال تغییر مکان ماندگار سازه، فرض شده است که چنانچه مقدار جابجایی‌های ماندگار از رابطه (۵) کمتر باشد جابجایی ماندگار در محدوده قابل قبول قرار دارد.

$$\text{Allowable Drift} = 0.02 \quad (4)$$

$$\text{Residual Displacement} = 0.005 H \quad (5)$$

H ارتفاع سازه است. همچنین در روابط فوق Allowable Drift و $\text{Residual Displacement}$ مقدار جابجایی نسبی طبقه و جابجایی ماندگار مجاز است، مقدار تغییر مکان جانبی نسبی طبقات مطابق آیین‌نامه ASCE 7-22 [۲۱] و FEMA450 [۲۲] برابر ۲٪ در نظر گرفته شده است. حداکثر مقدار کرنش مهاربند تنها ملاک برای صحت عملکرد نمونه تا انتهای بارگذاری نمی‌باشد. طبق معیار خسارت تجمعی می‌بایست مجموعه‌ای از خسارت‌های خستگی کم چرخه‌های در مختلف در نظر گرفته شود تا بتوان با قطعیت بیشتری در مورد عملکرد مطلوب آن اظهار نظر کرد [۲۰]. با توجه به توضیحاتی که پیش‌ازین ارائه



که در آن Avg_{Drift} میانگین جابجایی نسبی (Drift) کل سازه، $Drift_{story}$ و $Disp_{Drift}$ جابجایی نسبی (Drift) هر طبقه، $Disp_{story}$ جابجایی ماندگار در هر طبقه، H ارتفاع سازه و W_{Disp} و W_{Drift} ضرایب کاهش دهنده هستند که در قیود ضرب خواهند شد تا مقادیر ترم های قیود، غالب بر تابع هدف نگردد.

لازمه به دست آوردن مقادیر تابع هدف گذراندن آن از چندین مرحله است که شامل بررسی کفايت خمشی برشی و نیروی محوری تیرها و ستونها می باشد همچنین کفايت جابجایی نسبی در ارتفاع سازه موربررسی قرار می گیرد و همین طور قیودی که در طول این کار باید در نظر گرفته شود تحت بررسی قرار می گیرد که مراحل آن توسط شکل (۶) نمایش داده شده است. از آنجاکه اکثر الگوریتم های به کار رفته در این تحقیق از سیستم پرتو پشتیبانی می کند به این معنی که علاوه بر مقادیر جواب فضای جواب هم موربررسی قرار می گیرد لذا جواب های بی نهایت و تهی قابل قبول نمی باشند و در روند بهینه سازی اختلال ایجاد می کند همچنین مقادیر طول و عرض مهاربند باید در محدوده قابل قبول باشد تا در صورت تغییراتی که در نسل ها به وجود می آید اعداد غیرقابل قبول در شکل هندسه سازه وارد برنامه OpenSees نشود این قیود در برنامه در نظر گرفته شده است تا جواب های قابل قبول و منطقی به دست آید.

۶- بررسی نتایج حاصل از بهینه سازی

بهینه سازی توسط الگوریتم های فرالبتکاری NSGA-II، SPEA2، MOEA-D، PESA-II و MOPSO انجام خواهد گرفت و نتایج در ادامه توسط نمودارهای سه بعدی که هر کدام از محورهای آن نماد یکی از توابع هدف است نشان داده خواهد شد. از آنجا که این تحقیق یک بهینه سازی چند هدفه است، لذا اثر تابع هدف به صورت همزمان در نظر گرفته می شود.

روند کلی کار برای تمام الگوریتم های بهینه سازی به این صورت است که با ایجاد یک جمعیت اولیه و بررسی آن و با استفاده از فرمول ها و روش هایی که در هر کدام از الگوریتم ها وجود دارد بهترین جواب ها انتخاب شده و در نسل های بعد از ویژگی ها و خصوصیاتی که در هر کدام از جمعیت ها وجود دارد استفاده شده تا بهترین جمعیت های جدید به وجود آمده و در تمام این موارد تمام توابع هدف موربررسی قرار می گیرند. نتایجی که در نمودارها مشاهده می شود نماینگر جمعیت های انتخابی در آخرین نسل ها و یا بهترین جواب ها در طول تمام نسل ها بسته به نوع عملکرد الگوریتم می باشد، علاوه بر منتخب

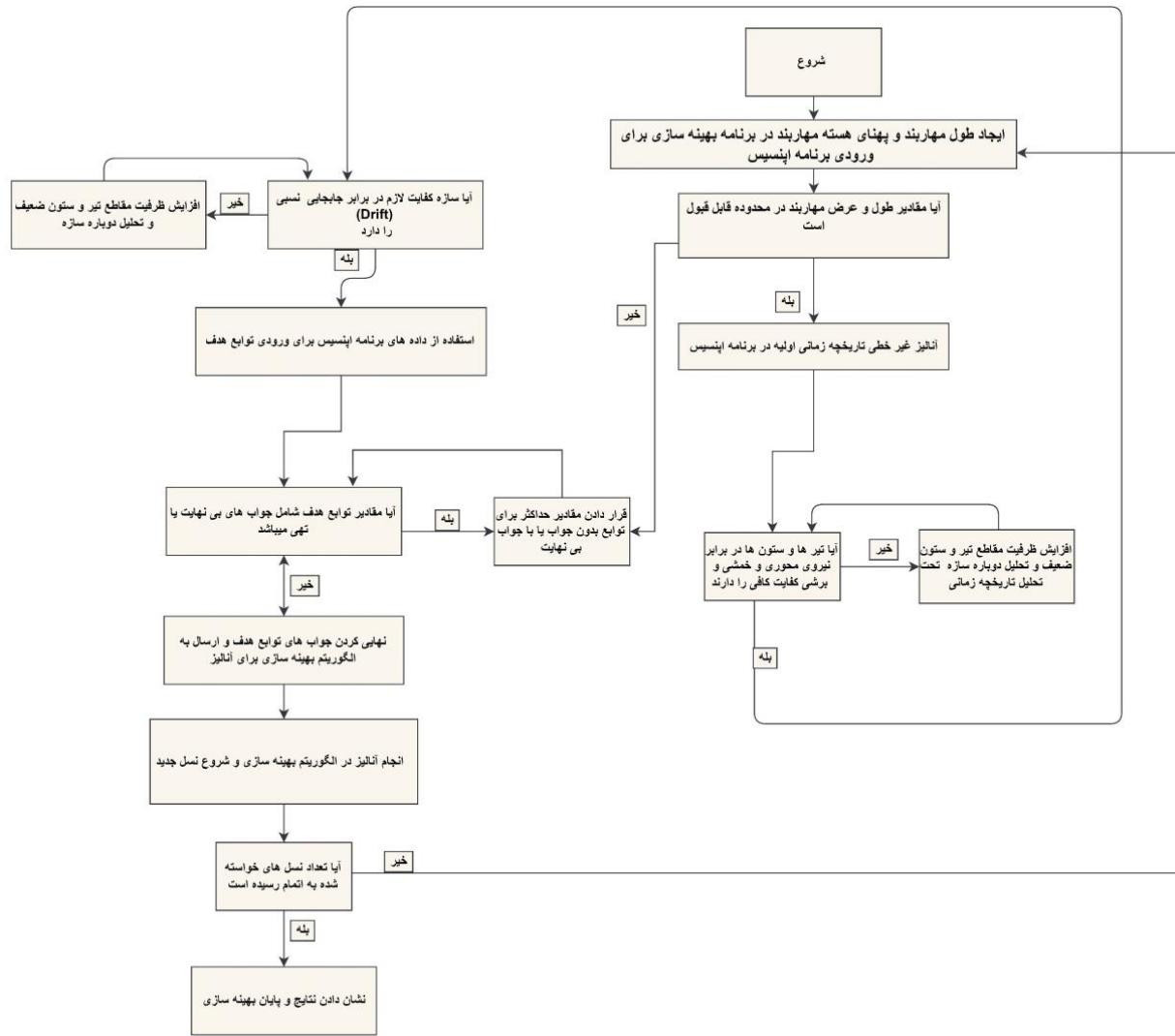
$$\begin{aligned} \text{Minimize } F_1(x) = & S_f(\rho \sum_{i=1}^n \frac{f_p}{f_d} \{L_i \cdot A_i\} \\ & + \rho \sum_{i=1}^n \frac{f_d}{f_p} \{L_i \cdot A_i\}) \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن n تعداد مهاربندها و A مساحت هسته مهاربند نام و L طول مهاربند نام و p وزن مخصوص فولاد مصرفی برای تیر و f ستون ها می باشد. f_p نیروی محوری واردہ به مهاربند نام و f_d نیروی مقاوم مهاربند نام است، S_f ضریبی برای کنترل خستگی کم چرخه است اگر هر کدام از مهاربندها در اثر خستگی کم قرار می دهد تا در نسل های بعد این اتفاق نیفتد. لازم به ذکر است که بسته به این که کدام یک از نیروی واردہ و یا نیروی مقاوم محوری مهاربند بیشتر باشد فقط یکی از ترم های رابطه (۷) محاسبه خواهد شد و دلیل آن این است که به نحوی اثر کم تر یا بیشتر از ظرفیت لازم شدن سطح مقطع مهاربند در الگوریتم های بهینه سازی دیده شود. در اینجا S_f و f_p نقش تابع جریمه را دارند، به منظور در نظر گرفتن اثر قیود در تعیین بهترین جمعیت (کمترین مقدار برای تابع هدف)، تابع جریمه ای متناسب با فاصله گرفتن قیود از فضای مجاز تصمیم مسأله تعریف شده که به تابع هدف اعمال می گردد. با بزرگ شدن مقدار تابع هدف مربوط به یک جمعیت، احتمال انتخاب آن جمعیت به عنوان بهترین جواب کاهش می یابد.

$$\text{Minimize } F_2(x) = \rho \sum_{j=1}^n \{L_j \cdot A_j\} \quad (8)$$

که در آن n تعداد تیرها و ستون ها و A مساحت سطح مقطع تیر و ستون نام و L طول تیر و ستون نام و p وزن مخصوص تیر و ستون ها می باشد. در رابطه (۸) بخش اول رابطه مربوط خود تابع هدف پیوستگی جابجایی نسبی است و بخش دوم و سوم آن به ترتیب توابع جریمه جابجایی نسبی و جابجایی ماندگار از مقادیر مجاز است. این تابع به گونه ای است که هر چه مقدار آن کمتر شود پیوستگی جابجایی در سازه بهتر خواهد بود.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } F_3(x) = & \sum_{j=1}^n |Avg_{Drift} - story_{Drift}| \\ & + W_{Drift} (\sum_{j=1}^n |Drift_{story} - 0.02|) \\ & + W_{Disp} (\sum_{j=1}^n |Disp_{story} - 0.005H|) \end{aligned} \quad (9)$$



شکل ۶- مراحل مختلف به دست آوردن توابع هدف و تأثیر بعضی از قیود در برنامه OpenSees

ضرایبی که نقش تابع جریمه را بر عهده دارند، واحد خود را از دست می‌دهند، بنابراین نمی‌توان برای مقدار توابع هدف واحد خاصی در نظر گرفت؛ بلکه باید آنان را با سایر جواب‌های به دست آمده در الگوریتم مقایسه کرد.

هرچه مقدار توابع وزن سازه و وزن مهاربند کمتر باشد، یعنی سازه در همان قسمت وزن کمتری دارد و هرچه مقدار تابع پیوستگی جابجایی نسبی کمتر شود، یعنی پیوستگی جابجایی نسبی در ارتفاع سازه بهتر انجام شده است.

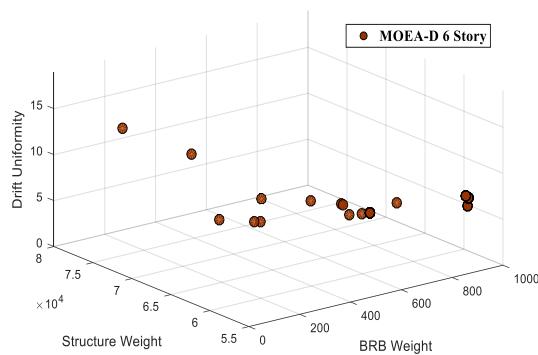
برای مقایسه جواب های به دست آمده با روش های معمول سازه ارائه شده در این مقاله با طراحی برنامه Etabs مقایسه شد که در پیش های بعدی، به آن بد اخته شده است.

نتایج بهینه‌سازی برای سازه ۶ طبقه تحت الگوریتم‌های مختلف در شکاهای (۱۲) تا (۱۵) نشان داده شده است و با

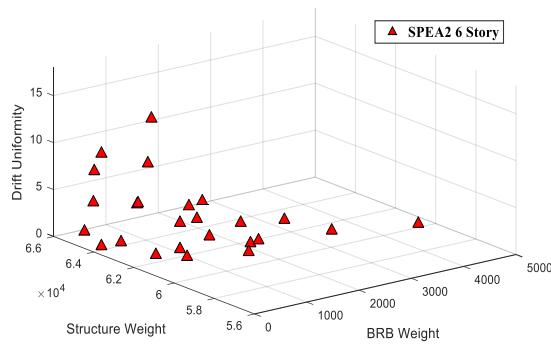
بودن تمام آن‌ها می‌توان روابطی که بین آن‌ها نسبت به هرکدام از توابع هدف وجود دارد را نیز مشاهده کرد. بهینه‌سازی برای دو سازه ۶ و ۱۰ طبقه انجام خواهد گرفت اول نتایج سازه ۶ طبقه و بعد نتایج سازه ۱۰ طبقه و بعد از آن عملکرد هر دو سازه ۶ و ۱۰ طبقه به صورت هم‌زمان در یک نمودار با یکدیگر برای هرکدام از الگوریتم‌ها نشان داده شده است و درنهایت نتایج بهینه‌سازی برای تمام الگوریتم‌ها به صورت هم‌زمان در یک نمودار سه‌بعدی برای هرکدام از سازه‌های ۶ و ۱۰ طبقه نشان داده خواهد شد.

۷- نتایج الگوریتم های بهینه سازی برای سازه ۶ طبقه

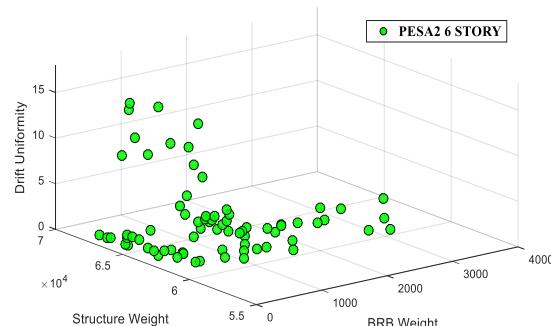
اعداد و نتایجی که از برنامه OpenSees استخراج می شوند دارای واحدی خاص هستند. اما زمانی که این اعداد در فرمولهای تابع هدف قرار می کیرند به دلیل ادغام شدن با



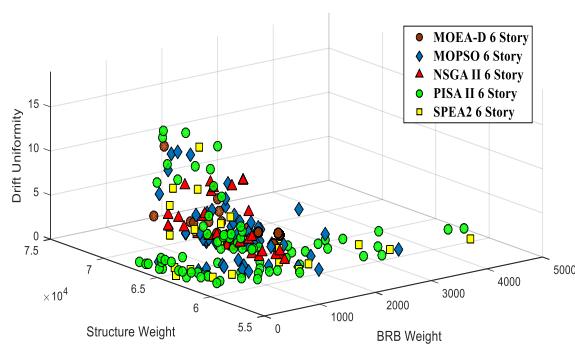
شکل ۹- نتایج الگوریتم بهینه‌سازی MOEA_D برای سازه ۶ طبقه



شکل ۱۰- نتایج الگوریتم بهینه‌سازی 2 برای سازه ۶ طبقه

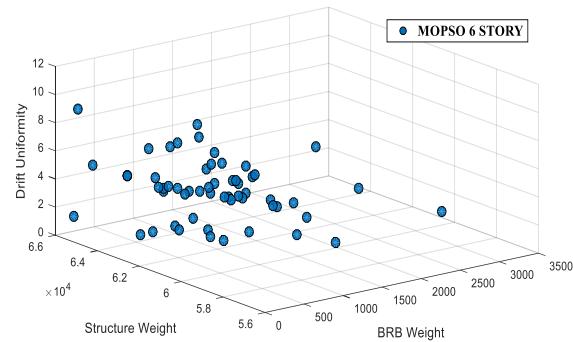


شکل ۱۱- نتایج بهینه‌سازی الگوریتم PESA II برای سازه ۶ طبقه

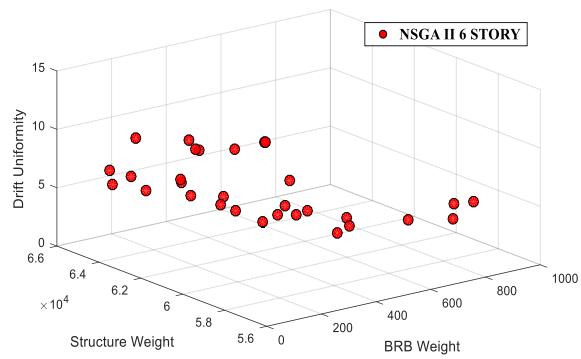


شکل ۱۲- مقایسه نتایج تمام الگوریتم‌های فراابتکاری برای بهینه‌سازی سازه ۶ طبقه

توجه به این شکل‌ها نتیجه گرفته می‌شود که این الگوریتم‌ها از همگرایی خوبی برخوردار است به طوری که با افزایش وزن سازه مقادیر پیوستگی جابجایی نسبی افزایش پیدا کرده و همین‌طور با افزایش مقادیر وزن مهاربند کماش تاب، مقدار وزن سازه و مقدار یکنواختی جابجایی نسبی کاهش پیدا می‌کند. همچنین سعی شده است که با استفاده از مقادیر جواب‌های گوناگون جواب‌های متنوعی برای توابع هدف پیدا شود تا بتوان پیوستگی و همگرایی لازم در جواب‌ها حاصل شود. جواب‌های به دست آمده مانند یک کاتالوگ از جواب‌های برتر انتخاب شده در هزاران تحلیل انجام شده توسط الگوریتم می‌باشد و کاربر می‌تواند بسته به نیاز خود و مقادیر موردنیاز برای توابع هدف یکی از جواب‌ها را انتخاب کرده و از آن استفاده کند. اگرچه که بازه جواب‌ها نسبت به یکدیگر متفاوت است، اما الگوریتم تلاش کرده است تا بتواند تمام بازه موردنظر و بهترین جواب‌های ممکن را انتخاب کرده و در انتها بهترین نتایج را نشان دهد و همچنین پیوستگی لازم میان جواب‌ها را ایجاد کند.

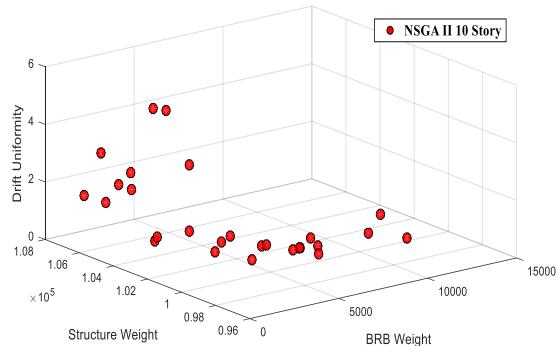


شکل ۷- نتایج بهینه‌سازی الگوریتم MOPSO برای سازه ۶ طبقه

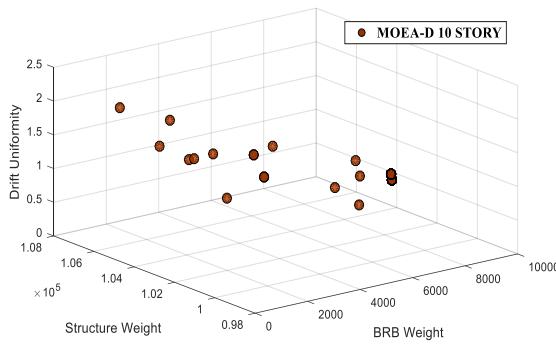


شکل ۸- نتایج الگوریتم بهینه‌سازی NSGA II برای سازه ۶ طبقه

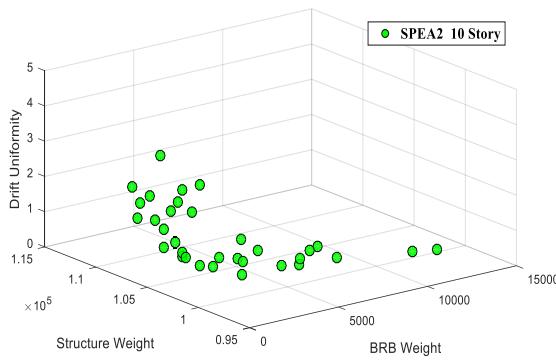
لازم به ذکر است که مقادیر توابع هدف به گونه‌ای تنظیم شده است که مقادیر کمتر آن‌ها جواب‌های بهتری خواهد بود اما



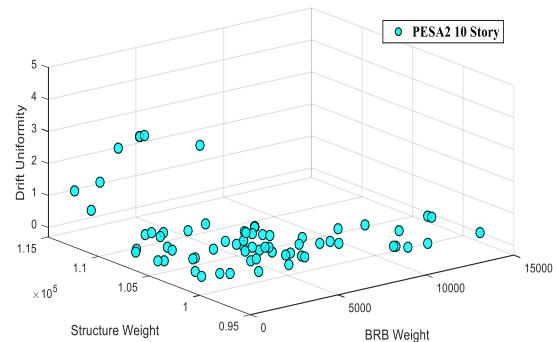
شکل ۱۴- نتایج الگوریتم بهینه‌سازی NSGA II برای سازه ۱۰ طبقه



شکل ۱۵- نتایج الگوریتم بهینه‌سازی MOEA-D برای سازه ۱۰ طبقه



شکل ۱۶- نتایج الگوریتم بهینه‌سازی SPEA 2 برای سازه ۱۰ طبقه



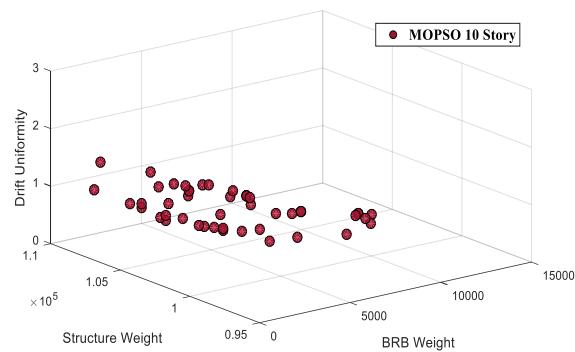
شکل ۱۷- نتایج بهینه‌سازی الگوریتم PESA II برای سازه ۱۰ طبقه

با توجه به اینکه سه تابع هدف وجود دارد و تغییر در یکی از توابع هدف، موجب تغییر در توابع هدف دیگر هم می‌شود، لذا الگوریتم مجموعه‌ای از جواب‌ها در بازه‌های متفاوت را انتخاب می‌کند تا بسته به نیاز بهترین جواب‌ها انتخاب شود، که حتی جواب‌های نشان داده شده نسبت به جواب‌های به دست آمده در خود الگوریتم از مقادیر بهتری برخوردار می‌باشند و جواب‌ها، جواب‌های منتخب و برتر هستند.

با مشاهده نتایج نمودارهای شکل (۱۲) مشخص می‌شود که با افزایش وزن سازه، مقادیر تابع وزن مهاربند کمانش تاب کاهش پیدا می‌کند و با کاهش وزن مهاربند کمانش تاب مقادیر پیوستگی جابجایی نسبی افزایش پیداکرده و همین‌طور با افزایش وزن سازه مقادیر پیوستگی جانبی نسبی افزایش پیدا می‌کند، اما تراکم جمعیت در قسمت کمترین مقدار برای وزن مهاربند است. این نتایج نشان‌هندۀ صحت جواب‌های به دست آمده از الگوریتم‌های متفاوت نسبت به یکدیگر می‌باشد؛ و جواب‌های به دست آمده در محدوده قابل توجهی برای تابع وزن سازه و کمانش تاب است که با کاهش آن مقادیر تابع وزن سازه و یکنواختی جابجایی نسبی با توجه به نمودار بیشتر می‌شود.

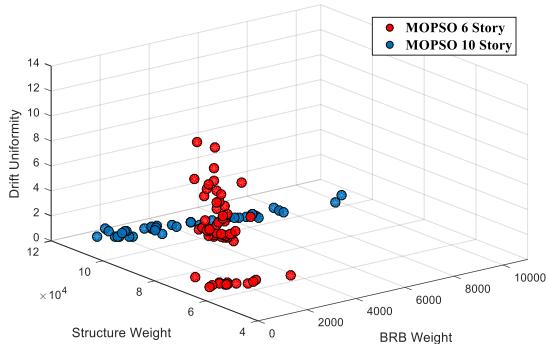
-۸- نتایج الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای سازه ۱۰ طبقه

نتایج بهینه‌سازی برای سازه ۱۰ طبقه تحت الگوریتم‌های مختلف در شکل‌های (۱۳) تا (۱۸) نشان داده شده است. جواب‌ها به صورت پراکنده قرار دارد و الگوریتم سعی کرده است تا با پیدا کردن جواب‌های گوناگون در بازه‌های متفاوت همگرایی لازم را به دست آورد.

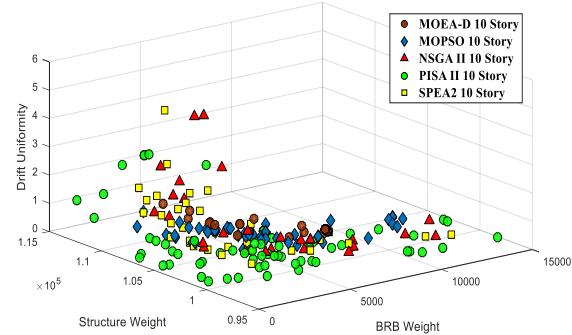


شکل ۱۳- نتایج بهینه‌سازی الگوریتم MOPSO برای سازه ۱۰ طبقه

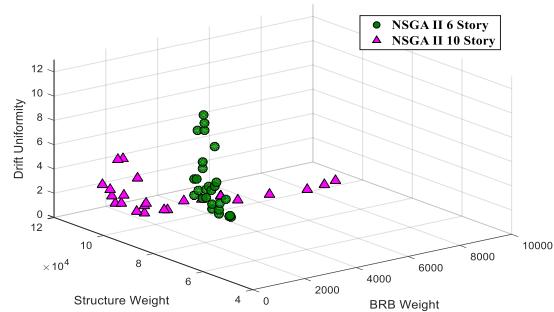
در شکل (۱۸) نتایج بهینه‌سازی برای سازه ۱۰ طبقه تحت تمام الگوریتم‌های به کار رفته در این تحقیق نشان داده شده است. نتایج به دست آمده در این نمودار نیز نشان‌دهنده آن است که



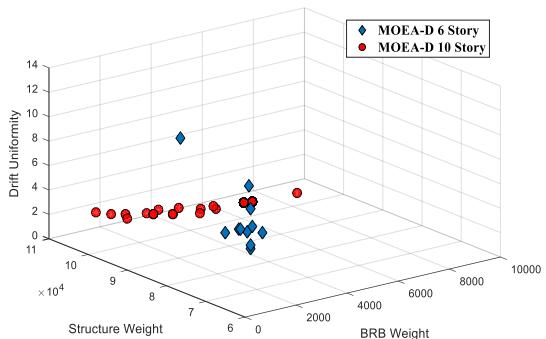
شکل -۱۹- نتایج بهینه‌سازی الگوریتم MOPSO برای سازه ۶ و ۱۰ طبقه



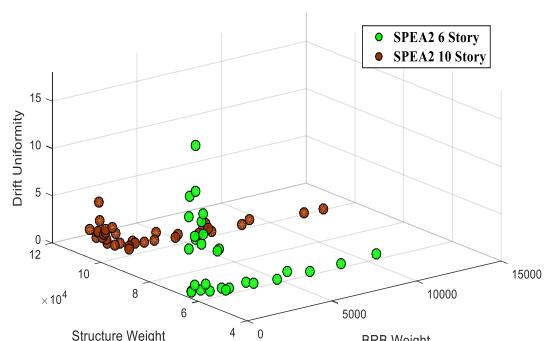
شکل -۱۸- مقایسه نتایج تمام الگوریتم های فراتکاری برای بهینه‌سازی سازه ۱۰ طبقه



شکل -۲۰- نتایج الگوریتم بهینه‌سازی NSGA II برای سازه ۶ و ۱۰ طبقه



شکل -۲۱- نتایج الگوریتم بهینه‌سازی MOEA-D برای سازه ۶ و ۱۰ طبقه



شکل -۲۲- نتایج الگوریتم بهینه‌سازی 2 SPEA برای سازه ۶ و ۱۰ طبقه

نتایج الگوریتم های متفاوت با یکدیگر همخوانی لازم را داشته و این امر نشان‌دهنده آن است که جواب‌های به دست آمده در محدوده قابل قبول می‌باشند؛ با کاهش وزن مهاربند مقادیر وزن سازه و جابجایی نسبی طبقات افزایش پیداکرده که این امر در مورد تمام الگوریتم های به کار رفته صادق است و علاوه بر تأیید جواب‌های به دست آمده توسط دیگر الگوریتم ها روند حرکت مقدار توابع هدف را نیز نشان می‌دهد، همچنین در الگوریتم های مختلف بازه‌ی تغییر جواب‌ها برای توابع هدف نسبتاً یکسان بوده است که نشان‌دهنده‌ی تطابق جواب‌ها در الگوریتم های متفاوت است.

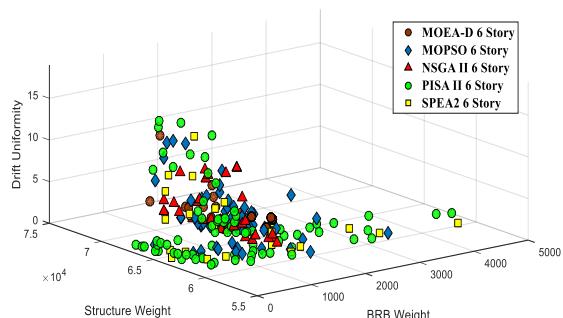
۹- مقایسه نتایج الگوریتم های بهینه‌سازی برای سازه ۶ و ۱۰ طبقه

نتایج بهینه‌سازی برای سازه ۶ و ۱۰ طبقه تحت الگوریتم های مختلف در شکل های (۱۹) تا (۲۳) نشان داده شده است. در تمام شکل ها، مقدار بازه جواب‌ها برای تابع هدف وزن مهاربند در سازه ۱۰ طبقه نسبت به سازه ۶ طبقه بیشتر است، که به دلیل تعداد طبقات بیشتر آن است. همچنین وزن سازه در ۱۰ طبقه بیشتر از وزن سازه ۶ طبقه است، اما مقادیر تابع پیوستگی جابجایی نسبی در سازه ۱۰ طبقه در بین عدد صفرتاً دو تغییر می‌کند و برای سازه ۶ طبقه بین صفرتاً هشت تغییر می‌کند که این امر نشان‌دهنده آن است که الگوریتم در سازه ۱۰ طبقه توانسته است تابع هدف پیوستگی جابجایی نسبی را بهتر به جواب برساند و در سازه ۶ طبقه این مقدار چند برابر سازه ۱۰ طبقه است که هر دوی این ها از نتایج تحلیل استاتیکی کمتر است که در بخش های جلوتر مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

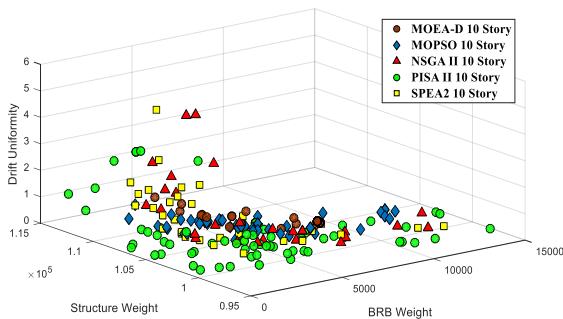
جدول ۵- مقادیر توابع هدف برای سازه ۱۰ طبقه تحت تحلیل

استاتیکی در برنامه Etabs

سازه ۱۰ طبقه		
تابع وزن مهاربند	تابع وزن سازه	Drift
۲/۸۸۲۱	۱۳۴۲۸۸/۱	۷/۲

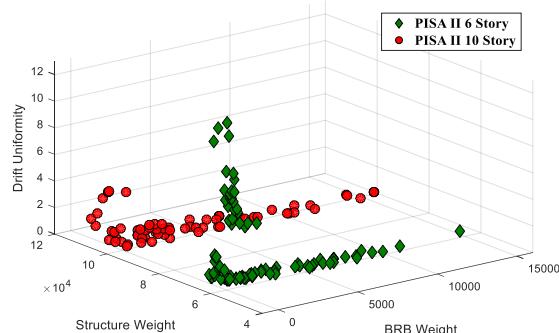


شکل ۲۴- مقایسه نتایج تمام الگوریتم‌های فراابتکاری برای بهینه‌سازی سازه ۶ طبقه



شکل ۲۵- مقایسه نتایج تمام الگوریتم‌های فراابتکاری برای بهینه‌سازی سازه ۱۰ طبقه

با توجه به بازه جواب‌ها در سازه ۶ طبقه برای تابع وزن مهاربند کمانش تاب در نتایج الگوریتم بهینه‌سازی مشاهده شود که نتایجی کمتر از ۵۰ درصد برای تابع وزن مهاربند می‌شود. این نتایجی کمتر از نتایج برنامه Etabs است و همین‌طور تمام کمانش تاب نسبت به نتایج برنامه Etabs دست آمده در قسمت وزن سازه برای بهینه‌سازی جواب‌های به دست آمده در سازه ۱۰ طبقه نسبتی بیشتر است. همین‌طور نتایج بهینه‌سازی اکثریت کمتر از مقدار تحلیل در برنامه Etabs است. همچنان‌بهای از تابع پیوستگی جابجایی نسبی که از مقدار محاسبه شده در برنامه Etabs بیشتر است، برای دو تابع هدف دیگر مقدارهای بسیار کمتری را محاسبه کرده‌اند و برای همین به عنوان جواب در لیست جواب‌های بهینه قرار داده شده‌اند.



شکل ۲۳- نتایج الگوریتم بهینه‌سازی PESA II برای سازه ۶ و ۱۰ طبقه

مقدار تابع وزن مهاربند کمانش تاب در محدوده‌های نسبتاً مشابه قرار دارد و آن‌هم به دلیل عملکرد این مهاربند است که بازه‌ی انتخابی که مهاربند می‌توانست در آن حرکت کند، همه مقادیر را مورد تحلیل قرار داده است و لذا بازه‌ی جواب‌های به دست آمده برای آن به نسبت به الگوریتم‌های دیگر بیشتر است. اما نتایج تابع پیوستگی جابجایی نسبی برای سازه ۱۰ طبقه بسیار بهتر از سازه ۶ طبقه است، که مشابه دیگر الگوریتم‌ها است و در سازه ۱۰ طبقه عملکرد بهتری را از خود نشان می‌دهد.

۱۰- مقایسه نتایج تمام الگوریتم‌های فراابتکاری نتایج تحلیل استاتیکی برنامه ETABS

جهت مقایسه نتایج بهینه‌سازی با روش‌های معمول طراحی، سازه‌های ۶ و ۱۰ طبقه توسط نرم افزار Etabs طراحی شده‌اند و با استفاده از داده‌های برنامه Etabs، سه تابع هدف گفته شده در بخش توابع هدف به صورت دستی محاسبه شده‌اند. نتایج توابع هدف از برنامه Etabs برای سازه‌های ۶ و ۱۰ طبقه به ترتیب در جداول (۴) و (۵) آمده است، همچنین نتایج بهینه‌سازی توابع هدف به روش الگوریتم‌های چنددهدله برای سازه‌های ۶ و ۱۰ طبقه به ترتیب در شکل (۲۴) و (۲۵) آورده شده است.

با استفاده از این مقادیر، مقایسه‌ای بین طراحی عادی با نتایج طراحی بهینه که در این مقاله از آن استفاده شده است، انجام گردیده است.

جدول ۴- مقادیر تابع هدف برای سازه ۶ طبقه تحت تحلیل

استاتیکی در برنامه Etabs

سازه ۶ طبقه		
تابع وزن سازه	تابع وزن مهاربند	Drift
۸۱۹۱۰/۴	۲۷۱۵/۶	۸/۱



قابل های مورد مطالعه در نرم افزار OpenSees مدل سازی شدند پس از ایجاد طول و سطح مقطع توسط الگوریتم بهینه سازی طول و عرض مقطع مهاربندها وارد محیط برنامه OpenSees شوند و پس از تحلیل نتایج آن گرفته شده و کفایت تیرها و ستون ها بررسی شده و همین طور کفاایت سازه در برابر جابجایی نسبی در ارتفاع سازه و پس از بررسی سازه در برابر پارامتر های آئین نامه ای از نتایج تحلیل توسط OpenSees برای گرفتن خروجی جهت به دست آوردن مقادیر توابع هدف استفاده شود.

با توجه به اینکه استفاده از الگوریتم بهینه سازی و تحلیل غیر خطی تماماً در کاهش سطح مقطع و طول مهاربند کمانش تاب اثر دارند، لذا تأثیر هریک به وسیله سه تابع هدف وزن مهاربند کمانش تاب، وزن کل سازه بدون مهاربند و یکنواختی جابجایی نسبی در ارتفاع سازه موردنظر رسی قرار گرفت. با استفاده از الگوریتم بهینه سازی جواب ها طوری هدایت شدند که حداقل جواب ها برای توابع هدف انتخاب شده و رابطه ای این سه تابع هدف با یکدیگر برای جواب های انتخاب شده توسط نمودار های نهایی نشان داده می شوند.

با توجه به نتایج الگوریتم های انجام شده این نتیجه حاصل می شود که کاهش مقدار تابع وزن مهاربند کمانش تاب باعث افزایش وزن کل سازه و افزایش مقدار تابع پیوستگی جابجایی نسبی می شود. همچنین برای مقادیر تابع وزن مهاربند کمانش تاب در مقدار های بالا مقدار تابع وزن سازه و تابع پیوستگی جابجایی های نسبی در مقادیر کمتر قرار خواهد داشت. همچنین با مقایسه نتایج بهینه سازی با نتایج تحلیل استاتیکی خطی در نرم افزار Etabs مشخص می شود که مقادیر به دست آمده در بهینه سازی با درصد های بسیار قابل توجهی مقادیر وزن مهاربند و وزن سازه و پیوستگی جابجایی نسبی را کاهش داده است و این اهمیت بهینه سازی در طراحی سازه های مجهز به مهاربند کمانش تاب را نشان می دهد.

این نمودارها همانند یک کاتالوگ عمل می کنند که اثر هر یک از توابع هدف نسبت به یکدیگر را نشان می دهد در صورتی که کاربر بخواهد هر کدام از این خاصیت ها را در مقادیر مشخصی که در نمودارها نشان داده شده است انتخاب کند و سازه ای با آن ویژگی داشته در اختیار داشته باشد می توان مشخصات این سازه را از نمودار انتخاب کرده و طول و عرض مهاربند را از نتایج آن گرفته و آن را استفاده کرد.

با توجه به بازه جواب ها در سازه ۱۰ طبقه برای تابع وزن مهاربند کمانش تاب در نتایج بهینه سازی نشان داده می شود که اکثریت جواب ها در بازه ۲۰۰۰ تا ۷۰۰۰ واقع شده است که عملکردی کمتر از ۷۰-۳۲ درصد برای تابع وزن مهاربند کمانش تاب نسبت به نتایج برنامه Etabs است و همین طور تمام جواب های به دست آمده در قسمت وزن سازه نتایج بهینه سازی کمتر از وزن سازه در Etabs قرار دارد و همین طور نقاط به دست آمده برای تابع پیوستگی جابجایی نسبی در نتایج بهینه سازی همه کمتر از مقدار تحلیل در برنامه Etabs است که نشان دهنده عملکرد بهتر بهینه سازی برای سازه ۱۰ طبقه در قسمت تابع پیوستگی جابجایی نسبی بوده است.

مقایسه توابع هدف با نتایج به دست آمده در تحلیل استاتیکی در نرم افزار Etabs نشان می دهد که بهینه سازی توانسته است برای هر کدام از توابع هدف درصد های بسیار قابل توجهی از کاهش مقادیر را نشان دهد که اهمیت بهینه سازی در طراحی ها را نشان می دهد.

۱۱- نتیجه گیری

در این تحقیق از الگوریتم فرالبتکاری PESA_{II}, SPEA2, NSGA_{II} و MOPSO در نرم افزار MATLAB جهت جستجوی بهترین جواب در مجموعه ای از جواب های ممکن برای مقاطع و طول مهاربند کمانش تاب استفاده شد. از طرفی جهت در نظر گرفتن رفتار واقعی سازه ها و استفاده حداقل از طرفیت مهاربندها، سازه ها تحت هفت رکورد زلزله در نرم افزار OpenSees مورد تحلیل دینامیکی غیر خطی قرار گرفت.

با اعمال قیود به مسئله های بهینه سازی، مجموعه ای از جواب های ممکن تولید و طی چندین گام بهینه سازی تلاش شد جوابی که بهترین مقدار برای سه تابع هدف وزن مهاربند کمانش تاب، وزن کل سازه بدون مهاربند و پیوستگی جابجایی نسبی را متوجه می شود، انتخاب گردد. قیود در نظر گرفته شده در این تحقیق، مقدار مجاز تغییر مکان جانی (Drift) در تمام طبقات، کنترل جابجایی ماندگار، کنترل نیرو های محوری خمشی و بر شی تیر و ستون ها و کنترل عدم گسیختگی مهاربندها به علت خستگی کم چرخه بود. بر اساس میزان تخطی قیود از مقادیر مجاز تعریف شده، تابع جریمه ای برای هر عضو از جمعیت تعریف شد که متناظر با آن احتمال انتخاب آن عضو کاهش یا افزایش یابد.

- [12] Ko, E., Kimura, I., Clark, P., Aiken, I. and Kasai, K. (1999), "Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices", In 68th Annual Convention, SEAOC, Santa Barbara, California, pp. 105-1122.
- [13] López, W.A. and Sabelli, R. (2004) "Seismic design of buckling-restrained braced frames", Steel tips.
- [14] Deb, K. (2001), "Multi-objective optimization using evolutionary algorithms", Chichester, UK.
- [15] Coello, C.A.C., Pulido, G.T. and Lechuga, M.S. (2004), "Handling multiple objectives with particle swarm optimization", IEEE Transactions on evolutionary computation, Vol. 8, pp. 256-279.
- [16] Zhang, Q. and Li, H. (2007), "MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition", IEEE Transactions on evolutionary computation, Vol. 11, pp. 712-731.
- [۱۷] حسینی هاشمی، ب.، علیرضایی، م. و احمدی، ح. (۱۳۹۵)، "تحلیل و طراحی سازه‌های فولادی: با تأکید بر روش حالات حدی، اصول طراحی به همراه مثال‌های کاربردی"، ناشر: دانش اترک.
- [18] Taucer, F., Spacone, E. and Filippou, F.C. (1991), "A fiber beam-column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures", Berkeley, California: Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California.
- [۱۹] آینه نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله - استاندارد ۲۸۰۰ (۱۳۹۶)، ویرایش چهارم، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، وزارت مسکن و شهرسازی.
- [20] Razavi, S.A., Mirghaderi, S.R. and Hosseini, A. (2014), "Experimental and numerical developing of reduced length buckling-restrained braces", Engineering Structures, Vol. 77, pp. 143-160.
- [21] ASCE 7-22, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. Standards. American Society of Civil Engineers.
- [22] FEMA 450, (2004), 2003 NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures Part1: Provisions, prepared by the Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. (FEMA Publication No. 450)
- [23] Nakamura, H., Maeda, Y. and Wada, A. (2000), "Fatigue properties of practical scale unbonded braces", Nippon steel technical Report.
- [۲۴] Khosravian, A. and Hosseini, A. (2009), "March. Application of a genetic algorithm for optimal passive control of buildings with metallic dampers", In Proceedings of the 10th WSEAS international conference on evolutionary computing, pp. 102-107.
- [۲۵] [۲] کاتبی، ل. (۱۳۹۳)، "استفاده بهینه از ظرفیت ساختمان‌های بتی با در نظر گرفتن توزیع مناسب مقاومت و سختی به روش طراحی بر اساس عملکرد"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه امیر کبیر.
- [۲۶] [۳] Xu, L., Gong, Y. and Grierson, D.E. (2006), "Seismic design optimization of steel building frameworks", Journal of Structural Engineering, Vol. 132, pp. 277-286.
- [۲۷] [۴] Lagaros, N.D., Fragiadakis, M., Papadrakakis, M. and Tsompanakis, Y. (2006), "Structural optimization: A tool for evaluating seismic design procedures", Engineering structures, Vol. 28, pp. 1623-1633.
- [۲۸] [۵] Ohsaki, M., Kinoshita, T. and Pan, P. (2007), "Multiobjective heuristic approaches to seismic design of steel frames with standard sections", Earthquake engineering & structural dynamics, Vol. 36, pp. 1481-1495.
- [۲۹] [۶] Balling, R.J., Balling, L.J. and Richards, P.W. (2009), "Design of buckling-restrained braced frames using nonlinear time history analysis and optimization", Journal of structural engineering, Vol. 135, pp. 461-468.
- [۳۰] [۷] Oxborrow, G.T. and Richards, P. (2009), "Optimized distribution of strength in tall buckling-restrained brace frames", In Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, pp. 819-824, CRC Press.
- [۳۱] [۸] Farhat, F., Nakamura, S. and Takahashi, K. (2009), "Application of genetic algorithm to optimization of buckling restrained braces for seismic upgrading of existing structures", Computers & structures, Vol. 87, pp. 110-119.
- [۳۲] [۹] Mousavi, S.A., Zahrai, S.M. and Pasand, A.A. (2021), "Drift-based seismic design procedure for Buckling Restrained Braced Frames", Structures, Vol. 30, pp. 62-74.
- [۳۳] [۱۰] Razavi S.A., Shemshadian, M.E., Mirghaderi, S.R. and Ahlehagh, S. (2011), "Seismic design of buckling restrained braced frames with reduced core length", In: Proceeding of the structural engineers world congress, Italy.
- [۳۴] [۱۱] Uang, C., Nakashima, M., Bozorgnia, Y. and Bertero, V. (2003), "Steel buckling restrained braced frames", CRC Press, p. chapter 16.

پی نوشت

- ^{۱۷} Open source
^{۱۸} Nonlinear beamcolumn
^{۱۹} Fiber section
^{۲۰} Elastic beamcolumn
^{۲۱} Rainflow
^{۲۲} Nahanni_Canada
^{۲۳} Loma Prieta
^{۲۴} Cape Mendocino
^{۲۵} Northridge
^{۲۶} Chi_Chi
^{۲۷} Irpinia_Italy
^{۲۸} Loma Prieta
^{۲۹} Palmgren-Miner
^{۳۰} Fatigue damage index

- ^۱ Hysteretic Cycle
^۲ Adjusted strength
^۳ Evolutionary algorithm
^۴ Chromosome
^۵ Gene
^۶ Meta-heuristic
^۷ Low cycle fatigue
^۸ Fronts
^۹ Trade-off
^{۱۰} Fast non-dominated sorting (FNDS)
^{۱۱} Crowding distance (CD)
^{۱۲} External archive
^{۱۳} Pareto envelope-based selection algorithm
^{۱۴} Repository
^{۱۵} Hall of Fame
^{۱۶} Multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition

