

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

گروه عمران - سازه

بهینه‌یابی سازه‌ها با استفاده از روش‌های فراابتکاری

ترکیباتی

دانشجو: محمدحسین طالب‌پور

استاد راهنما:

دکتر وحیدرضا کلات‌جاری

رساله دکتری جهت اخذ درجه دکتری

بهمن ماه ۱۳۹۲



دانشگاه گیلان

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۱۲

باسمه تعالی

شماره: ۴۲ / ۱۳۹۹

تاریخ: ۹۹/۱۱/۱۴

ویرایش: —

صورت جلسه دفاع از رساله دکتری (Ph.D)

بدینوسیله گواهی می شود آقای محمد حسین طالب پور دانشجوی دکتری رشته عمران به شماره دانشجویی ۸۸۱۸۳۱۵ ورودی مهر ماه سال ۱۳۸۸ در تاریخ ۹۲/۱۱/۱۶ از رساله خود با عنوان: بهینه یابی سازه ها با استفاده از روش های فرا اکتشافی ترکیباتی دفاع و با اخذ نمره به درجه : نائل گردید.

<input checked="" type="checkbox"/> الف) درجه عالی: نمره ۱۹-۲۰	<input type="checkbox"/> ب) درجه بسیار خوب: نمره ۱۸/۹۹-۱۷
<input type="checkbox"/> ج) درجه خوب: نمره ۱۶/۹۹-۱۵	<input type="checkbox"/> د) غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد
<input type="checkbox"/> نیاز به اصلاحات دارد	

ه) رساله

ردیف	هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبۀ علمی	امضاء
۱	دکتر وحیدرضا کلات جاری	استاد راهنما	استادیار	
۲	دکتر غلامرضا قدرتی امیری	استاد مدعو خارجی	استاد	
۳	دکتر علی کیهانی	استاد مدعو داخلی	استادیار	
۴	دکتر احمد احمدی	استاد مدعو داخلی	دانشیار	
۵	دکتر مهدی عجمی	سرپرست (نماینده) تحصیلات تکمیلی دانشکده	استادیار	

مدیر محترم تحصیلات تکمیلی دانشگاه:

ضمن تأیید مراتب فوق مقرر فرمائید اقدامات لازم بعمل آید.

رئیس دانشکده و رئیس هیئت داوران:

تاریخ و امضاء:

تقدیم به ساحت مقدس

شش ماہہ صحرائی کربلا حضرت علی اصغر (ع)

تشکر و قدردانی

در آغاز سخن خداوند را سپاسگزارم که مرا در اتمام رساله حاضر یاری رساند و همواره با الطاف بی دریغش راهگشای من بود. بی شک این مهم جز با یاری خودش و بندگان صالحش مقدور نبود. لذا بر خود واجب می‌دانم از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر کلات‌جاری که فراتر از یک استاد دانشگاه، در مسیر پربین و خم زندگی و مسیر حق و حقیقت، سوار بر پیچک دوستی و محبت، راهگشای اینجانب بود؛ صمیمانه تشکر و سپاسگزاری نمایم و از خداوند منان توفیقات روزافزون برای ایشان خواستارم. امیدوارم که شمع وجودشان که از قطره قطره‌های آن به من درس زندگی و از پرتو نورش به من راه زندگی آموخت، همواره فروزان و سلامت باشد.

همچنین از کلیه اساتید دانشکده عمران دانشگاه شاهرود که با خدمت خالصانه و تلاش صادقانه خود در زمینه رشد و تعالی شخصیت علمی و انسانی، گام‌های مؤثری برداشته‌اند و دوستان عزیزم به خصوص جناب آقای علی نقی‌زاده کمال تشکر و قدردانی را دارم و امیدوارم همواره در زندگی پیروز و سربلند باشند.

در پایان نیز از خانواده محترم، پدر و مادر عزیز و فداکارم، که با نفس گرم مسیحایی خودشان، همواره پشتیبانم در کوچه‌های غربت زندگی بودند، بسیار سپاسگزارم. لذا دستان مبارکشان را که بوی اسپند مهر می‌دهد؛ می‌بوسم و سلامتی و کامیابی را برایشان از خداوند متعال خواستارم.

محمدحسین طالب‌پور

زمستان ۱۳۹۲

دانشجو تأیید می‌نماید که مطالب مندرج در این رساله نتیجه تحقیقات خودش می‌باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی و مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این رساله متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد.

بهمن ماه ۱۳۹۲

چکیده

یکی از هنرهای مهندسی، کسب بیشترین بازده با انتخاب یک سیستم مناسب و صرف کمترین هزینه است. این مهم سبب تولد و توسعه علم بهینه‌یابی در حوزه‌های مختلف علوم مهندسی شده است. در این راستا رساله حاضر در پنج محور پژوهشی در جهت توسعه بهینه‌یابی سازه‌ها با استفاده از روش‌های فراابتکاری و بهبود عملکرد این روش‌ها پی‌ریزی شده و سعی گردیده تا با گام‌هایی هدفمند، دستاوردهای نوینی حاصل شود. بدین منظور در اولین محور پژوهشی، بررسی برخی از رایج‌ترین روش‌های فراابتکاری در مسائل بهینه‌یابی سازه‌ها مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس سعی شده تا با شناسایی ابعاد و چالش‌های مختلف هر روش و نیز میزان حساسیت الگوریتم‌ها به پارامترهای موجود، پیشنهادهای در جهت بهبود عملکرد و چگونگی استفاده مناسب از این الگوریتم‌ها ارائه شود. در محور دوم پژوهش، با استعانت از دستاوردهای محور نخستین، روش جستجوی چندمنظوره در جهت افزایش عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه شده است. کارآیی این ایده در الگوریتم ژنتیک براساس ساختارهای مختلف موجود، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه روش کاوش چندفراابتکاری با استفاده از الگوریتم‌های مختلف فراابتکاری به عنوان ساختار هر جزیره در جهت توسعه روش جستجوی چندمنظوره ارائه شده است. این روش از جمله موفق‌ترین الگوریتم‌ها در کاوش فضاهای طراحی مختلف با میزان دقت ویژه‌ای بوده و می‌توان در زمینه‌های حساس مهندسی از این روش بهره برد. این روش با مطالعه مسائل مختلف در حوزه‌های گوناگون مورد بررسی قرار گرفته است. در محور سوم پژوهش، ایده نوین مش‌بندی فضای کاوش با الهام از فرآیند انفصال در روش اجزای محدود مطرح شده است. این ایده با افزای فضای طراحی و جستجوی فضای کاوش در دو مرحله

(جستجوی سراسری و محلی)، توانسته است، سرعت عملیات بهینه‌یابی را افزایش و جواب‌هایی با دقت مطلوب بدست آورد. در محور چهارم این رساله، الگوریتم ترکیبی HACOHSGA ارائه شده است که حاصل ترکیب سه روش ACO، HS و GA می‌باشد. این روش نیز دارای سرعت مناسبی در برای فرآیند طراحی بهینه است و از مزایا هر روش به نحو مقتضی استفاده می‌کند. در نهایت در آخرین گام پژوهشی این رساله، روش نقاط متحرک با کسب دید مناسب نسبت به شیوه بهینه‌یابی روش‌های فراابتکاری، پیشنهاد شده است. این روش با نگاشت اعضا و طرح‌های هر جمعیت به فضای برداری و حرکت براساس ویژگی‌های جمعیت حاضر، عملیات بهینه‌یابی را به صورت فرآیند تکاملی در پیش می‌گیرد. ویژگی روش نقاط متحرک ثبات در اجراهای مختلف بوده و با یک بار اجرا می‌توان به کسب جواب مناسب بهینه اعتماد نمود.

واژگان کلیدی:

بهینه‌یابی، الگوریتم‌های فراابتکاری، روش جستجوی چندمنظوره، روش کاوش چندفراابتکاری، روش مش‌بندی فضای طراحی، روش HACOHSGA، روش نقاط متحرک.

لیست مقالات مستخرج از رساله

۲- مقالات پذیرش شده (مجلات معتبر علمی)

- ۱- کلات جاری، وحیدرضا؛ طالب پور، محمدحسین. "بهینه‌یابی سطح مقطع و توپولوژی سازه‌های خریایی توسط روش اصلاحی جستجوی چندمنظوره"، نشریه تخصصی مهندسی عمران - نقشه‌برداری - دانشکده فنی، دوره ۴۵، شماره ۳، شهریورماه ۱۳۹۰، صفحه ۳۶۳ - ۳۵۱.
- 2- Kaveh, Ali., Kalatjari, Vahid Reza., Talebpour, Mohammad Hosein., Torkamazadeh, Javad., "Configuration optimization of Trusses Using Multi Heuristic based search Method" International Journal of Optimization in Civil Engineering, 3, 1, 2013, pp. 151-178.
- 3- Talebpour, Mohammad Hosein., Kaveh, Ali., Kalatjari, Vahid Reza., "Optimization of skeletal structures using a hybridized ACO, HS and GA algorithm" Iranian Journal of Science and Technology, 38, C1, 2014. pp. 1-20.

۲- مقالات پذیرش شده (کنفرانس‌های معتبر علمی)

- ۴- کلات جاری، وحیدرضا؛ طالب پور، محمدحسین. "بهینه‌یابی سطح مقطع و توپولوژی سازه‌ها از طریق الگوریتم ژنتیک و بررسی تأثیر روش‌های گوناگون فرآیند انتخاب در روند بهینه‌یابی"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۶ و ۷ اردیبهشت ۱۳۹۰.
- ۵- کلات جاری، وحیدرضا؛ طالب پور، محمدحسین؛ رحیمی، وحید. "بهینه‌یابی سطح مقطع و توپولوژی سازه‌ها از طریق الگوریتم ژنتیک و بررسی تأثیر اپراتورهای پیوند در روند

بهینه‌یابی، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۶ و ۷ اردیبهشت ۱۳۹۰.

۶- کلات جاری، وحیدرضا؛ طالب‌پور، محمدحسین؛ عابدی، صادق؛ مولایی، علی. "مقایسه و بررسی روند بهینه‌سازی سازه‌های خریایی با استفاده از روش جستجوی چندمنظوره و روش جستجوی ذرات باردار"، اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه، زیباکنار، ایران، ۲۷ بهمن ۱۳۹۰.

۷- کلات جاری، وحیدرضا؛ طالب‌پور، محمدحسین؛ ترکمان‌زاده، جواد. "بهینه‌یابی سطح مقطع و توپولوژی سازه‌ها از طریق الگوریتم ژنتیک و بررسی تأثیر روش‌های گوناگون اپراتور جهش در روند بهینه‌یابی"، نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۹ - ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۱.

۸- نوریان، امین؛ کلات جاری، وحیدرضا؛ طالب‌پور، محمدحسین. "بهینه‌یابی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری با استفاده از روش اصلاحی جستجوی چندمنظوره"، نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۹ - ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۱.

۹- کلات جاری، وحیدرضا؛ عابدی، صادق؛ طالب‌پور، محمدحسین؛ مولایی، علی. "مقایسه روند بهینه‌یابی سازه‌های خریایی با استفاده از الگوریتم ترکیبی اجتماع مورچگان و جستجوی هارمونی و روش جستجوی چندمنظوره"، دومین کنفرانس ملی مدیریت بحران: نقش فناوری‌های نوین در کاهش آسیب‌پذیری ناشی از حوادث غیرمترقبه، تهران، ایران، خرداد ۱۳۹۱.

۱۰- کلات جاری، وحیدرضا؛ طالب‌پور، محمدحسین. "بررسی تأثیر پارامتر HCMR در بهینه‌یابی سطح مقطع قاب‌های فولادی براساس روش جستجوی هارمونی"، سومین کنفرانس ملی سازه و فولاد، تهران، ایران، ۴ و ۵ دی ۱۳۹۱.

۱۱- کلات جاری، وحیدرضا؛ طالب پور، محمدحسین. "بهینه‌یابی قاب‌های فولادی براساس روش PSO و بررسی تأثیر پارامترهای شناختی و اجتماعی در روند بهینه‌یابی"، سومین کنفرانس ملی سازه و فولاد، تهران، ایران، ۴ و ۵ دی ۱۳۹۱.

۱۲- کلات جاری، وحیدرضا؛ طالب پور، محمدحسین. "بررسی تأثیر ضریب تبخیر فرمومون در بهینه‌یابی سطح مقطع قاب‌های فولادی بر اساس روش کلونی مورچگان"، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه مهندسی شهید نیکبخت، زاهدان، ایران، ۱۷ و ۱۸ اردیبهشت ۱۳۹۲.

۱۳- کلات جاری، وحید رضا؛ طالب پور، محمد حسین. "بهینه‌یابی قاب‌های فولادی براساس روش جستجوی ذرات باردار و بررسی تأثیر پارامتر بازه زمانی در روند بهینه‌یابی"، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه مهندسی شهید نیکبخت، زاهدان، ایران، ۱۷ و ۱۸ اردیبهشت ۱۳۹۲.

۱۴- کلات جاری، وحیدرضا؛ طالب پور، محمدحسین. "بهبود الگوریتم ژنتیک در بهینه‌یابی سازه‌های خریایی با استفاده از ایده پیشنهادی مش‌بندی فضای جستجو"، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه مهندسی شهید نیکبخت، زاهدان، ایران، ۱۷ و ۱۸ اردیبهشت ۱۳۹۲.

صفحه	عنوان
سه	تصویب نامه
چهار	تقدیم اثر
پنج	تقدیر و تشکر
شش	اقرار نامه
هفت	چکیده
نه	لیست مقالات مستخرج از رساله
دوازده	فهرست مطالب
هیجده	فهرست اشکال
بیست و سه	فهرست جداول
بیست و شش	فهرست علائم و پارامترها

فصل اول: مقدمه و کلیات

۱	
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ ضرورت بهینه‌یابی در مهندسی عمران
۵	۳-۱ کلیات و مبانی پایه علم بهینه‌یابی
۱۰	۴-۱ شرح کلی فصول

فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته در روش‌های فراابتکاری و ...

۱۳	
۱۴	۱-۲ مقدمه
۱۶	۲-۲ الگوریتم‌های فراابتکاری
۱۷	۱-۲-۲ الگوریتم ژنتیک
۲۲	۲-۲-۲ الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت
۲۶	۳-۲-۲ الگوریتم جستجوی ممنوعه
۲۹	۴-۲-۲ الگوریتم کلونی مورچگان

۳۵	۵-۲-۲ الگوریتم اجتماع ذرات
۳۹	۶-۲-۲ الگوریتم جستجوی هارمونی
۴۳	۷-۲-۲ الگوریتم جستجوی ذرات باردار
۴۸	۳-۲ الگوریتم‌های ترکیباتی
۴۹	۱-۳-۲ الگوریتم ترکیبی ACO و PSO (HPSACO)
۵۱	۲-۳-۲ الگوریتم ترکیبی ACO، PSO و HS
۵۲	۳-۳-۲ الگوریتم ترکیبی PSO و GA (HGAPSO)

۵۵ فصل سوم: روش‌ها و راهکارهای پیشنهادی

۵۶	۱-۳ مقدمه
۵۸	۲-۳ بررسی و بهبود عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری
۵۸	۱-۲-۳ الگوریتم ژنتیک
۵۹	۱-۱-۲-۳ فرآیند انتخاب
۵۹	۱-۱-۲-۳ روش چرخ‌گردان
۶۰	۲-۱-۲-۳ روش رتبه‌بندی
۶۱	۳-۱-۲-۳ روش رقابتی
۶۱	۴-۱-۲-۳ روش پیشنهادی
۶۲	۵-۱-۲-۳ بررسی روش‌های انتخاب
۶۴	۲-۱-۲-۳ عملگر پیوند
۶۵	۱-۲-۱-۲-۳ پیوند تک نقطه‌ای
۶۵	۲-۲-۱-۲-۳ پیوند دو نقطه‌ای
۶۵	۳-۲-۱-۲-۳ پیوند یکنواخت
۶۶	۴-۲-۱-۲-۳ اپراتور معکوس‌سازی
۶۶	۵-۲-۱-۲-۳ اپراتور حذف و تولید مجدد
۶۷	۶-۲-۱-۲-۳ روش پیشنهادی
۶۷	۷-۲-۱-۲-۳ بررسی روش‌های عملگر پیوند

۷۰	۳-۱-۲-۳ عملگر جهش
۷۱	۱-۳-۱-۲-۳ جهش با نرخ ثابت
۷۱	۲-۳-۱-۲-۳ جهش با نرخ صعودی
۷۲	۳-۳-۱-۲-۳ جهش با نرخ نزولی
۷۲	۴-۳-۱-۲-۳ حالت پیشنهادی جهش با نرخ ثابت
۷۳	۵-۳-۱-۲-۳ حالت پیشنهادی جهش با نرخ نزولی
۷۳	۶-۳-۱-۲-۳ بررسی حالات مختلف عملگر جهش
۷۵	۲-۲-۳ الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت
۷۶	۱-۲-۲-۳ پارامتر ثابت بولتزمن
۷۶	۱-۱-۲-۲-۳ مقدار ثابت برای پارامتر k_B
۷۷	۲-۱-۲-۲-۳ حالت صعودی برای پارامتر k_B
۷۷	۳-۱-۲-۲-۳ حالت نزولی برای پارامتر k_B
۷۸	۴-۱-۲-۲-۳ بررسی حالات مختلف پارامتر k_B
۸۰	۳-۲-۳ الگوریتم جستجوی ممنوعه
۸۱	۱-۳-۲-۳ پارامتر بازه همسایگی
۸۱	۱-۱-۳-۲-۳ مقدار ثابت برای پارامتر nw
۸۲	۲-۱-۳-۲-۳ حالت صعودی برای پارامتر nw
۸۲	۳-۱-۳-۲-۳ حالت نزولی برای پارامتر nw
۸۳	۴-۱-۳-۲-۳ بررسی حالات مختلف پارامتر nw
۸۶	۴-۲-۳ الگوریتم کلونی مورچگان
۸۶	۱-۴-۲-۳ ضریب تبخیر فرمون
۸۷	۱-۱-۴-۲-۳ مقدار ثابت برای پارامتر e_r
۸۸	۲-۱-۴-۲-۳ حالت صعودی برای پارامتر e_r
۸۸	۳-۱-۴-۲-۳ حالت نزولی برای پارامتر e_r
۸۹	۴-۱-۴-۲-۳ بررسی حالات مختلف پارامتر e_r
۹۱	۵-۲-۳ روش اجتماع ذرات

- ۹۲ ۱-۵-۲-۳ بررسی ضرایب C_1 و C_2
- ۹۲ ۱-۱-۵-۲-۳ حالت ۱ برای ضرایب C_1 و C_2
- ۹۳ ۲-۱-۵-۲-۳ حالت ۲ برای ضرایب C_1 و C_2
- ۹۳ ۳-۱-۵-۲-۳ حالت ۳ برای ضرایب C_1 و C_2
- ۹۳ ۴-۱-۵-۲-۳ حالت ۴ برای ضرایب C_1 و C_2
- ۹۴ ۵-۱-۵-۲-۳ بررسی حالات مختلف ضرایب C_1 و C_2
- ۹۶ ۶-۲-۳ روش جستجوی هارمونی
- ۹۶ ۱-۶-۲-۳ بررسی پارامتر $HCMR$
- ۹۶ ۱-۱-۶-۲-۳ مقادیر ثابت برای پارامتر $HCMR$
- ۹۷ ۲-۱-۶-۲-۳ حالت صعودی برای پارامتر $HCMR$
- ۹۷ ۳-۱-۶-۲-۳ حالت نزولی برای پارامتر $HCMR$
- ۹۸ ۴-۱-۶-۲-۳ بررسی حالات مختلف پارامتر $HCMR$
- ۱۰۰ ۷-۲-۳ روش جستجوی ذرات باردار
- ۱۰۱ ۱-۷-۲-۳ بررسی پارامتر بازه زمانی
- ۱۰۱ ۱-۱-۷-۲-۳ مقادیر ثابت برای پارامتر بازه زمانی
- ۱۰۲ ۲-۱-۷-۲-۳ حالت صعودی برای پارامتر بازه زمانی
- ۱۰۲ ۳-۱-۷-۲-۳ حالت نزولی برای پارامتر بازه زمانی
- ۱۰۳ ۴-۱-۷-۲-۳ بررسی حالات مختلف پارامتر بازه زمانی
- ۱۰۵ ۳-۳ روش نوین جستجوی چندمنظوره
- ۱۰۶ ۱-۳-۳ روش جستجوی چندمنظوره بر پایه الگوریتم‌های ژنتیک
- ۱۱۲ ۱-۱-۳-۳ بهینه‌یابی قاب شیب‌دار غیرمنشوری با تیرهای یکنواخت
- ۱۱۴ ۲-۳-۳ روش نوین کاوش چندفرآیندکاری
- ۱۱۹ ۱-۲-۳-۳ بهینه‌یابی پیکربندی خریای مستوی ۱۵ میله‌ای
- ۱۲۱ ۴-۳ ایده نوین انفصال فضای کاوش
- ۱۲۴ ۱-۴-۳ ایده نوین انفصال فضای طراحی در الگوریتم ژنتیک
- ۱۲۵ ۱-۱-۴-۳ انتخاب نماینده در ایده انفصال فضای طراحی در GA

- ۱۲۹ ۲-۱-۴-۳ انتخاب تعداد زیرمجموعه‌ها برای ایده انفصال فضای طراحی در GA
- ۱۳۶ ۱-۲-۱-۴-۳ بهینه‌یابی دکل ۴۷ میله‌ای براساس ایده پیشنهادی در GA
- ۱۳۹ ۲-۴-۳ ایده نوین انفصال فضای طراحی در الگوریتم کلونی مورچگان
- ۱۴۰ ۱-۲-۴-۳ انتخاب نماینده در ایده انفصال فضای طراحی برای روش ACO
- ۱۴۴ ۱-۱-۲-۴-۳ بهینه‌یابی دکل ۴۷ میله‌ای براساس ایده پیشنهادی در ACO
- ۱۴۶ ۵-۳ الگوریتم ترکیباتی پیشنهادی HACOHSGA
- ۱۵۱ ۱-۵-۳ بهینه‌یابی قاب فولادی پنج طبقه - دو دهانه براساس روش HACOHSGA
- ۱۵۴ ۶-۳ الگوریتم نوین نقاط متحرک
- ۱۵۷ ۱-۶-۳ فرمولبندی مسئله بهینه‌یابی براساس الگوریتم پیشنهادی نقاط متحرک
- ۱۶۴ ۲-۶-۳ بررسی کارآیی و عملکرد الگوریتم پیشنهادی نقاط متحرک
- ۱۶۶ ۱-۲-۶-۳ بهینه‌یابی قاب فولادی پنج طبقه - دو دهانه براساس روش MP

فصل چهارم: نتایج و پیشنهادات

- ۱۶۷ ۱-۴ مقدمه
- ۱۶۸ ۲-۴ نتایج
- ۱۷۱ ۳-۴ پیشنهادات برای ادامه پژوهش

منابع: لیست مراجع

- ۱۸۱ پیوست الف: مثال‌های بهینه‌یابی
- ۱۸۲ الف-۱ مقدمه
- ۱۸۲ الف-۲ بهینه‌یابی سطح مقطع و توپولوژی خرپای مستوی ده میله‌ای
- ۱۸۴ الف-۳ بهینه‌یابی سطح مقطع و توپولوژی خرپای فضایی ۲۵ میله‌ای
- ۱۸۷ الف-۴ بهینه‌یابی سطح مقطع قاب فولادی هشت طبقه - یک دهانه
- ۱۸۹ الف-۵ بهینه‌یابی سطح مقطع و توپولوژی شبکه‌های متعامد ۲×۲، ۳×۳ و ۵×۵
- ۱۹۲ الف-۶ بهینه‌یابی قاب شیب‌دار غیرمنشوری با تیرهای غیریکنواخت

۱۹۴	الف-۷ بهینه‌یابی سطح مقطع و هندسه سازه فضاکار تخت دولایه ۸×۸
۲۰۲	الف-۸ بهینه‌یابی سطح مقطع برج فولادی ۷۲ میله‌ای
۲۰۵	الف-۹ بهینه‌یابی سطح مقطع خرپای مستوی ۲۰۰ میله‌ای
۲۰۷	الف-۱۰ بهینه‌یابی پیکربندی خرپای ۱۰ میله‌ای
۲۰۹	الف-۱۱ بهینه‌یابی پیکربندی خرپای فضایی ۲۵ میله‌ای
۲۱۲	الف-۱۲ بهینه‌یابی پیکربندی خرپای ۱۳۱ میله‌ای
۲۱۵	الف-۱۳ بهینه‌یابی سطح مقطع برج فولادی ۹۴۲ میله‌ای
۲۱۹	الف-۱۴ بهینه‌یابی سطح مقطع برج فولادی ۵۸۲ میله‌ای
۲۲۱	الف-۱۵ بهینه‌یابی سطح مقطع دکل انتقال نیرو ۲۴۴ میله‌ای
۲۲۵	الف-۱۶ بهینه‌یابی سطح مقطع دکل انتقال نیرو ۱۶۰ میله‌ای
۲۲۹	الف-۱۷ بهینه‌یابی سطح مقطع خرپای مستوی ۵۲ میله‌ای

- ۱۳ فصل دوم: مروری بر تحقیقات گذشته در روش‌های فراابتکاری و ...
- ۱۹ شکل (۱-۲) - فرآیند بهینه‌یابی براساس روش GA
- ۲۴ شکل (۲-۲) - فرآیند بهینه‌یابی براساس روش SA
- ۲۷ شکل (۳-۲) - فرآیند بهینه‌یابی براساس روش TS
- ۳۱ شکل (۴-۲) - فرآیند بهینه‌یابی براساس روش ACO
- ۳۶ شکل (۵-۲) - همکاری گروه ماهیان در تهیه غذا و حفاظت از خود در برابر ...
- ۳۷ شکل (۶-۲) - فرآیند بهینه‌یابی براساس روش PSO
- ۴۰ شکل (۷-۲) - مقایسه فرآیند بهینه‌یابی HS و اجرای موسیقی
- ۴۰ شکل (۸-۲) - فرآیند بهینه‌یابی براساس روش HS
- ۴۳ شکل (۹-۲) - تولید هارمونی جدید در روش HS
- ۴۴ شکل (۱۰-۲) - فرآیند بهینه‌یابی براساس روش CSS
- ۵۱ شکل (۱۱-۲) - فرآیند بهینه‌یابی براساس روش HPSACO
- ۵۳ شکل (۱۲-۲) - فرآیند بهینه‌یابی براساس روش HGAPSO
- ۵۵ فصل سوم: روش‌ها و راهکارهای پیشنهادی
- ۶۰ شکل (۱-۳) - مدلی از چرخ گردان
- ۶۳ شکل (۲-۳) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط روش‌های مختلف انتخاب برای ...
- ۶۳ شکل (۳-۳) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط روش‌های مختلف انتخاب برای ...
- ۶۵ شکل (۴-۳) - شیوه پیوند تک نقطه‌ای
- ۶۵ شکل (۵-۳) - شیوه پیوند دو نقطه‌ای
- ۶۶ شکل (۶-۳) - شیوه پیوند یکنواخت
- ۶۶ شکل (۷-۳) - شیوه اپراتور معکوس‌سازی
- ۶۷ شکل (۸-۳) - شیوه اپراتور حذف و تولید مجدد
- ۶۸ شکل (۹-۳) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط شیوه‌های مختلف پیوند برای ...

- شکل (۳-۱۰) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط شیوه‌های مختلف پیوند برای ... ۶۸
- شکل (۳-۱۱) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط روش‌های مختلف جهش برای ... ۷۴
- شکل (۳-۱۲) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط روش‌های مختلف جهش برای ... ۷۴
- شکل (۳-۱۳) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط مقادیر حالت ۱ برای قاب پنج طبقه ... ۷۹
- شکل (۳-۱۴) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط حالات مختلف برای قاب پنج طبقه ... ۷۹
- شکل (۳-۱۵) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط مقادیر حالت ۱ برای قاب هشت ... ۷۹
- شکل (۳-۱۶) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط حالات مختلف برای قاب هشت ... ۷۹
- شکل (۳-۱۷) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط مقادیر حالت ۱ برای قاب پنج طبقه ... ۸۴
- شکل (۳-۱۸) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط حالات مختلف برای قاب پنج طبقه ... ۸۴
- شکل (۳-۱۹) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط مقادیر حالت ۱ برای قاب هشت ... ۸۵
- شکل (۳-۲۰) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط حالات مختلف برای قاب هشت ... ۸۵
- شکل (۳-۲۱) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط مقادیر حالت ۱ برای قاب پنج طبقه ... ۸۹
- شکل (۳-۲۲) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط حالات مختلف برای قاب پنج طبقه ... ۸۹
- شکل (۳-۲۳) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط مقادیر حالت ۱ برای قاب هشت ... ۹۰
- شکل (۳-۲۴) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط حالات مختلف برای قاب هشت ... ۹۰
- شکل (۳-۲۵) - سیر فرآیند بهینه‌یابی حالات مختلف برای قاب پنج طبقه - دو ... ۹۵
- شکل (۳-۲۶) - سیر فرآیند بهینه‌یابی حالات مختلف برای قاب هشت طبقه - یک ... ۹۵
- شکل (۳-۲۷) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط مقادیر حالت ۱ برای قاب پنج طبقه ... ۹۹
- شکل (۳-۲۸) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط حالات مختلف برای قاب پنج طبقه ... ۹۹
- شکل (۳-۲۹) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط مقادیر حالت ۱ برای قاب هشت ... ۹۹
- شکل (۳-۳۰) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط حالات مختلف برای قاب هشت ... ۹۹
- شکل (۳-۳۱) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط مقادیر حالت ۱ برای قاب پنج طبقه ... ۱۰۴
- شکل (۳-۳۲) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط حالات مختلف برای قاب پنج طبقه ... ۱۰۴
- شکل (۳-۳۳) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط مقادیر حالت ۱ برای قاب هشت ... ۱۰۴
- شکل (۳-۳۴) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط حالات مختلف برای قاب هشت ... ۱۰۴
- شکل (۳-۳۵) - حالت اول روش جستجوی چندمنظوره (MSM-GA-1) ۱۰۸

- شکل (۳-۳۶) - حالت دوم روش جستجوی چندمنظوره (MSM-GA-2) ۱۰۹
- شکل (۳-۳۷) - تأیید فنی نرم‌افزار بهینه‌یاب سازه‌های میله‌ای براساس روش ... ۱۱۱
- شکل (۳-۳۸) - هندسه و بارگذاری قاب شیب‌دار غیرمنشوری با تیرهای یکنواخت ۱۱۳
- شکل (۳-۳۹) - حالات روش کاوش چندفرآیندکاری (MHSM) ۱۱۵
- شکل (۳-۴۰) - سیر فرآیند بهینه‌یابی برج فولادی ۵۸۲ میله‌ای ۱۱۸
- شکل (۳-۴۱) - سیر فرآیند بهینه‌یابی دکل انتقال نیرو ۲۴۴ میله‌ای ۱۱۸
- شکل (۳-۴۲) - سیر فرآیند بهینه‌یابی دکل انتقال نیرو ۱۶۰ میله‌ای ۱۱۸
- شکل (۳-۴۳) - سیر فرآیند بهینه‌یابی برج فولادی ۷۲ میله‌ای ۱۱۸
- شکل (۳-۴۴) - خرپای ۱۵ میله‌ای ۱۱۹
- شکل (۳-۴۵) - طرح بهینه توپولوژی و هندسی خرپای ۱۵ میله‌ای ۱۲۰
- شکل (۳-۴۶) - سیر همگرایی خرپای ۵۲ میله‌ای توسط حالات مختلف پیشنهادی ... ۱۲۷
- شکل (۳-۴۷) - سیر همگرایی برج ۷۲ میله‌ای توسط حالات مختلف پیشنهادی ... ۱۲۸
- شکل (۳-۴۸) - سیر همگرایی دکل ۴۷ میله‌ای توسط حالات مختلف پیشنهادی ... ۱۳۳
- شکل (۳-۴۹) - سیر همگرایی خرپای ۵۲ میله‌ای توسط حالات مختلف پیشنهادی ... ۱۳۴
- شکل (۳-۵۰) - سیر همگرایی برج ۷۲ میله‌ای توسط حالات مختلف پیشنهادی ... ۱۳۵
- شکل (۳-۵۱) - سیر همگرایی قاب ۸ طبقه - یک دهانه توسط حالات مختلف ... ۱۳۵
- شکل (۳-۵۲) - دکل ۴۷ میله‌ای ۱۳۷
- شکل (۳-۵۳) - سیر همگرایی بهینه‌یابی دکل ۴۷ میله‌ای توسط حالات ... ۱۴۲
- شکل (۳-۵۴) - سیر همگرایی بهینه‌یابی خرپای ۵۲ میله‌ای توسط حالات ... ۱۴۳
- شکل (۳-۵۵) - سیر همگرایی بهینه‌یابی برج ۷۲ میله‌ای توسط حالات ... ۱۴۳
- شکل (۳-۵۶) - سیر همگرایی قاب ۸ طبقه - یک دهانه توسط حالات مختلف ... ۱۴۴
- شکل (۳-۵۷) - روش نوین ترکیباتی و پیشنهادی HACOHSGA ۱۴۹
- شکل (۳-۵۸) - سیر فرآیند بهینه‌یابی خرپای ۵۲ میله‌ای ۱۵۰
- شکل (۳-۵۹) - سیر فرآیند بهینه‌یابی برج فولادی ۷۲ میله‌ای ۱۵۰
- شکل (۳-۶۰) - سیر فرآیند بهینه‌یابی خرپای ۲۰۰ میله‌ای ۱۵۰
- شکل (۳-۶۱) - سیر فرآیند بهینه‌یابی قاب هشت طبقه - یک دهانه ۱۵۱

- ۱۵۱ شکل (۳-۶۲) - سیر فرآیند بهینه‌یابی قاب پنج طبقه - دو دهانه
- ۱۵۲ شکل (۳-۶۳) - قاب پنج طبقه - دو دهانه
- ۱۵۶ شکل (۳-۶۴) - روش نوین پیشنهادی نقاط متحرک (MP)
- ۱۶۴ شکل (۳-۶۵) - سیر فرآیند بهینه‌یابی قاب هشت طبقه - یک دهانه
- ۱۶۴ شکل (۳-۶۶) - سیر فرآیند بهینه‌یابی قاب پنج طبقه - دو دهانه
- ۱۶۵ شکل (۳-۶۷) - سیر فرآیند بهینه‌یابی برج فولادی ۷۲ میله‌ای
- ۱۶۵ شکل (۳-۶۸) - سیر فرآیند بهینه‌یابی خرپای ۵۲ میله‌ای

۱۸۱ پیوست الف: مثال‌های بهینه‌یابی

- ۱۸۲ شکل (الف-۱) - خرپای مستوی ده میله‌ای
- ۱۸۳ شکل (الف-۲) - توپولوژی بهینه برای خرپای مستوی ده میله‌ای
- ۱۸۵ شکل (الف-۳) - خرپای فضایی ۲۵ میله‌ای
- ۱۸۶ شکل (الف-۴) - توپولوژی بهینه برای خرپای فضایی ۲۵ میله‌ای
- ۱۸۷ شکل (الف-۵) - قاب هشت طبقه - یک دهانه
- ۱۸۹ شکل (الف-۶) - شبکه متعامد 2×2
- ۱۸۹ شکل (الف-۷) - شبکه متعامد 3×3
- ۱۹۰ شکل (الف-۸) - شبکه متعامد 5×5
- ۱۹۰ شکل (الف-۹) - طرح بهینه شبکه متعامد 2×2
- ۱۹۱ شکل (الف-۱۰) - طرح بهینه شبکه متعامد 3×3
- ۱۹۱ شکل (الف-۱۱) - طرح بهینه شبکه متعامد 5×5
- ۱۹۳ شکل (الف-۱۲) - هندسه و بارگذاری قاب شیب‌دار غیرمنشوری با تیرهای غیریکنواخت
- ۱۹۵ شکل (الف-۱۳) - نمای دوبعدی و سه بعدی سازه فضاکار تخت دو لایه 8×8
- ۱۹۵ شکل (الف-۱۴) - نمای دوبعدی و سه بعدی طرح هندسی بهینه سازه فضاکار ...
- ۲۰۲ شکل (الف-۱۵) - نمای دوبعدی و سه بعدی برج فولادی ۷۲ میله‌ای
- ۲۰۵ شکل (الف-۱۶) - خرپای مستوی ۲۰۰ میله‌ای
- ۲۰۸ شکل (الف-۱۷) - طرح بهینه توپولوژی و هندسی خرپای ۱۰ میله‌ای

- ۲۱۰ شکل (الف-۱۸) - طرح بهینه توپولوژی و هندسی خرپای ۲۵ میله‌ای در حالات ...
- ۲۱۲ شکل (الف-۱۹) - سازه مبنا خرپای ۱۳۱ میله‌ای
- ۲۱۴ شکل (الف-۲۰) - طرح بهینه خرپای ۱۳۱ میله‌ای
- ۲۱۷ شکل (الف-۲۱) - برج فولادی ۹۴۲ میله‌ای
- ۲۲۰ شکل (الف-۲۲) - برج فولادی ۵۸۲ میله‌ای
- ۲۲۲ شکل (الف-۲۳) - دکل انتقال نیرو ۲۴۴ میله‌ای
- ۲۲۵ شکل (الف-۲۴) - دکل انتقال نیرو ۱۶۰ میله‌ای
- ۲۳۰ شکل (الف-۲۵) - خرپای مستوی ۵۲ میله‌ای

۵۵	فصل سوم: روش‌ها و راهکارهای پیشنهادی
۱۱۳	جدول (۱-۳) محدوده متغیرهای طراحی برای قاب شیب‌دار غیرمنشوری با تیرهای ...
۱۱۴	جدول (۲-۳) نتایج طرح بهینه قاب شیب‌دار با تیرهای یکنواخت به روش MSM-GA
۱۲۰	جدول (۳-۳) مجموعه لیست مقاطع برای پیکربندی خرپای ۱۵ میله‌ای
۱۲۱	جدول (۴-۳) نتایج طرح بهینه پیکربندی خرپای ۱۵ میله‌ای براساس روش ...
۱۲۶	جدول (۵-۳) اعضای لیست مقاطع برای هر زیرمجموعه در ایده انفصال فضای ...
۱۳۷	جدول (۶-۳) بارگذاری مؤثر بر دکل ۴۷ میله‌ای
۱۳۸	جدول (۷-۳) نتایج طرح بهینه دکل ۴۷ میله‌ای براساس ایده نوین انفصال فضای ...
۱۴۱	جدول (۸-۳) تقسیم‌بندی اعضای لیست مقاطع قاب ۸ طبقه - یک دهانه در ...
۱۴۱	جدول (۹-۳) اعضای لیست مقاطع در حالات ۱، ۲ و ۳ ایده پیشنهادی برای قاب ...
۱۴۵	جدول (۱۰-۳) نتایج طرح بهینه دکل ۴۷ میله‌ای براساس ایده نوین انفصال فضای ...
۱۵۲	جدول (۱۱-۳) بارگذاری مؤثر بر قاب پنج طبقه - دو دهانه
۱۵۳	جدول (۱۲-۳) اعضای لیست مقاطع برای طراحی بهینه قاب پنج طبقه - دو دهانه
۱۵۳	جدول (۱۳-۳) نتایج طرح بهینه قاب پنج طبقه - دو دهانه براساس روش نوین ...
۱۶۶	جدول (۱۴-۳) نتایج طرح بهینه قاب پنج طبقه - دو دهانه براساس روش نوین ...
۱۸۱	پیوست الف: مثال‌های بهینه‌یابی
۱۸۳	جدول (الف-۱) اعضای لیست مقاطع برای بهینه‌یابی سطح مقطع و توپولوژی ...
۱۸۴	جدول (الف-۲) نتایج طرح بهینه سطح مقطع و توپولوژی خرپای ۱۰ میله‌ای به ...
۱۸۴	جدول (الف-۳) نتایج طرح بهینه سطح مقطع و توپولوژی خرپای ۱۰ میله‌ای به ...
۱۸۵	جدول (الف-۴) تنش‌های مجاز کششی و فشاری و گروه‌بندی اعضای خرپای ...
۱۸۶	جدول (الف-۵) بارگذاری مؤثر بر خرپای فضایی ۲۵ میله‌ای
۱۸۶	جدول (الف-۶) نتایج طرح بهینه سطح مقطع و توپولوژی خرپای ۲۵ میله‌ای ...
۱۸۶	جدول (الف-۷) اعضای لیست مقاطع برای قاب هشت طبقه - یک دهانه

- جدول (الف-۸) نتایج طرح بهینه قاب هشت طبقه - یک دهانه براساس روش‌های ... ۱۸۸
- جدول (الف-۹) نتایج طرح بهینه قاب هشت طبقه - یک دهانه براساس ایده‌ها و ... ۱۸۸
- جدول (الف-۱۰) نتایج طرح بهینه سطح مقطع و توپولوژی شبکه متعامد 2×2 به ... ۱۹۲
- جدول (الف-۱۱) نتایج طرح بهینه سطح مقطع و توپولوژی شبکه متعامد 3×3 به ... ۱۹۲
- جدول (الف-۱۲) نتایج طرح بهینه سطح مقطع و توپولوژی شبکه متعامد 5×5 به ... ۱۹۲
- جدول (الف-۱۳) محدوده متغیرهای طراحی برای قاب شیب‌دار غیرمنشوری با ... ۱۹۳
- جدول (الف-۱۴) نتایج طرح بهینه قاب شیب‌دار با تیرهای غیریکنواخت به روش ... ۱۹۴
- جدول (الف-۱۵) نتایج طرح بهینه متغیر هندسی سازه فضاکار تخت دولایه 8×8 ... ۱۹۶
- جدول (الف-۱۶) نتایج طرح بهینه سطح مقطع سازه فضاکار تخت دولایه 8×8 به ... ۱۹۷
- جدول (الف-۱۷) بارگذاری مؤثر بر برج فولادی ۷۲ میله‌ای ۲۰۳
- جدول (الف-۱۸) مجموعه لیست مقاطع ۲۰۳
- جدول (الف-۱۹) نتایج طرح بهینه برج فولادی ۷۲ میله‌ای براساس روش‌های ... ۲۰۴
- جدول (الف-۲۰) نتایج طرح بهینه برج فولادی ۷۲ میله‌ای براساس ایده‌ها و ... ۲۰۴
- جدول (الف-۲۱) مجموعه لیست مقاطع برای خرپای مستوی ۲۰۰ میله‌ای ۲۰۶
- جدول (الف-۲۲) نتایج طرح بهینه خرپای ۲۰۰ میله‌ای براساس روش نوین ... ۲۰۶
- جدول (الف-۲۳) نتایج طرح بهینه پیکربندی خرپای ۱۰ میله‌ای براساس روش ... ۲۰۸
- جدول (الف-۲۴) بارگذاری مؤثر بر خرپای فضایی ۲۵ میله‌ای ۲۰۹
- جدول (الف-۲۵) نتایج طرح بهینه پیکربندی خرپای ۲۵ میله‌ای براساس روش ... ۲۱۱
- جدول (الف-۲۶) نتایج طرح بهینه پیکربندی خرپای ۱۳۱ میله‌ای براساس روش ... ۲۱۵
- جدول (الف-۲۷) اعضای لیست مقاطع بر طبق آیین‌نامه AISC-ASD برای برج ... ۲۱۶
- جدول (الف-۲۸) نتایج طرح بهینه برج فولادی ۹۴۲ میله‌ای براساس روش MHSM ۲۱۸
- جدول (الف-۲۹) نتایج طرح بهینه برج فولادی ۵۸۲ میله‌ای براساس روش MHSM ۲۲۱
- جدول (الف-۳۰) تغییرمکان مجاز و بارگذاری مؤثر بر دکل انتقال نیرو ۲۴۴ میله‌ای ۲۲۲
- جدول (الف-۳۱) لیست مجموعه مقاطع برای دکل انتقال نیرو ۲۴۴ میله‌ای ۲۲۳
- جدول (الف-۳۲) مختصات گرهی دکل انتقال نیرو ۲۴۴ میله‌ای - mm ۲۲۳
- جدول (الف-۳۳) نتایج طرح بهینه دکل انتقال نیرو ۲۴۴ میله‌ای براساس روش ... ۲۲۴

- ۲۲۶ جدول (الف-۳۴) گروه‌بندی و همبندی اعضای دکل انتقال نیرو ۱۶۰ میله‌ای
- ۲۲۷ جدول (الف-۳۵) بارهای مؤثر بر دکل انتقال نیرو ۱۶۰ میله‌ای
- ۲۲۷ جدول (الف-۳۶) لیست مقاطع موجود برای دکل انتقال نیرو ۱۶۰ میله‌ای
- ۲۲۸ جدول (الف-۳۷) مختصات گرهی دکل انتقال نیرو ۱۶۰ میله‌ای - *cm*
- ۲۲۹ جدول (الف-۳۸) نتایج طرح بهینه دکل انتقال نیرو ۱۶۰ میله‌ای براساس روش ...
- ۲۳۰ جدول (الف-۳۹) نتایج طرح بهینه خرپای ۵۲ میله‌ای براساس روش‌های مراجع ...
- ۲۳۱ جدول (الف-۴۰) نتایج طرح بهینه خرپای ۵۲ میله‌ای براساس ایده‌ها و روش‌های ...

پارامتر	عنوان	پارامتر	عنوان
R	فضای طراحی	$[A_0]$	طرح بهینه
$g_i(A)$	نامین قید نامساوی	$F(A)$	تابع هدف
a	متغیر طراحی	$k_i(A)$	نامین قید مساوی
LS	تعداد بیت‌های هر زیررشته	Nos	تعداد متغیرهای طراحی
IR_i	عدد صحیح متناظر با زیررشته i ام	b	بیت
$\phi(A)$	تابع هدف اصلاح شده	$\{S\}$	مجموعه لیست مقاطع موجود
nlc	تعداد ترکیبات بارگذاری	K	ثابت جریمه
$Fit(A)$	تابع شایستگی	G_q	میزان نقض قیود
P_m	نرخ جهش	P_c	نرخ پیوند
ΔE	تغییرات انرژی	T	دمای سیستم
T_f	دمای نهایی سیستم	T_s	دمای اولیه سیستم
nw	بازه همسایگی	η	ضریب سردشدن
k_B	ثابت بولتزمن	$P(\Delta\phi)$	احتمال پذیرفتن طرح جدید
P_{ij}	احتمال انتخاب (احتمال جذب)	$[Ph]$	ماتریس فرومون
ρ_0	ضریب بهنگام‌سازی محلی	v_i	ضریب پدیداری برای نامین حالت
ω	ضریب اینرسی وزنی	e_r	نرخ تبخیر سراسری فرومون
C_2	پارامتر اجتماعی	C_1	پارامتر شناختی
$HCMR$	نرخ در نظرگیری حافظه	HMS	اندازه حافظه هارمونی
bw	پهنای باند همسایگی	PAR	نرخ تنظیم نت
NP	تعداد ذرات (تعداد نقاط)	$[HM]$	ماتریس حافظه هارمونی
a^{CSS}	شعاع هر ذره در روش CSS	Δt	پارامتر بازه زمانی
m_j	جرم نامین ذره	CM	حافظه بار
k_v	ضریب سرعت	k_a	ضریب شتاب
$iter_{max}$	تعداد کل تکرارها	$iter$	شماره تکرار
C_3	ضریب تأثیر جمعیت	r_{ij}	فاصله بین ذرات i و j

پارامتر	عنوان
IS_i	مقدار متناظر با زیررشته نام در لیست مقاطع
Q	تعداد کل قیود حاکم بر مسئله بهینه‌یابی
$\Delta\phi$	اختلاف توابع هدف اصلاح شده طرح کاندید و طرح مبنا
i_c	تعداد تکرارهای موجود در هر سیکل سردشدن تدریجی
i_f	حداکثر تکرارهای موجود در هر سیکل سردشدن تدریجی
i_s	حداقل تکرارهای موجود در هر سیکل سردشدن تدریجی
Ns	تعداد حالات ممکن برای هر متغیر طراحی
\bar{P}_i^j	مقدار احتمال تجمعی نامین حالت برای نامین متغیر طراحی
α	ضریب اهمیت نسبی اثر فرومون
β	ضریب اهمیت نسبی اطلاعات اکتشافی
μ	مجموعه کوچک بهترین طرح‌ها در ACO
$r\lambda$	تعداد اعضای مجموعه μ
ΔP_{ij}	مقدار فرومون لازم برای بجای گذاری در مسیر ij
X_i	موقعیت نامین ذره در فضای برداری
V_i	سرعت نامین ذره در فضای برداری
P_i^k	بهترین موقعیت ذره نام از ابتدا تا نامین تکرار
P^g	بهترین موقعیت یک ذره از ابتدا تا تکرار جاری
$Ran_{1,2,3}$	اعداد تصادفی یکنواخت در محدوده صفر تا یک
q_j	بار الکتریکی هر ذره
CMS	مجموعه کوچک بهترین ذرات
F_j	نیروی برآیند وارد بر ذره نام
R_i^k	موقعیت نامین ذره انتخابی از جمعیت حاضر در نامین تکرار
Z_i^k	نامین مسیر در نامین تکرار
P_i	مقدار احتمال متناظر با هر طرح
MNP	شماره هر عضو از جمعیت

پارامتر	عنوان
P_{Cu}	مقدار احتمال برای تخصیص بیت والد شایسته به فرزندان
$MP \lambda$	ضریب استانداردسازی در روش MP
N_{cp}	تعداد اعضای جمعیت منتخب
MNP	شماره هر طرح در جمعیت
$r_{0, 1, 2, 3}$	ضرایب حرکت در روش MP
E	مدول الاستیسیته
ρ	جرم مخصوص
γ	وزن مخصوص
$\sigma_{all (Ten)}$	تنش مجاز کششی
$\sigma_{all (com)}$	تنش مجاز فشاری
δ	تغییر مکان مجاز
DL	بار مرده
LL	بار زنده
WL	بار باد
$S_{x, y}$	اساس مقطع حول محورهای x و y
$I_{x, y}$	ممان اینرسی حول محورهای x و y
$r_{x, y}$	شعاع ژیراسیون حول محورهای x و y
F_y	تنش تسلیم
λ_{max}	لاغری حداکثر
C_c	لاغری مرزی بین کمانش ارتجاعی و غیرارتجاعی
k	ضریب طول مؤثر
l	طول عضو
$P_{x, y}$	نیرو در جهات x و y
σ^{cr}	تنش مجاز کمانشی

فصل اول

مقدمه و

کلیات

۱-۱ مقدمه

انسان بطور غریزی تمام فعالیت‌هایش را به شکلی انجام می‌دهد، که ناراحتی و دردش حداقل باشد و در صورت امکان انرژی را صرفه‌جویی نماید. این تمایل و اراده باید به نحوی باشد که با توجه به منابع محدود، بیشینه خروجی یا سود حاصل گردد [۱]. مثال‌های بی‌شماری در تاریخ زندگی بشر یافت می‌شود که هدف تمامی آن‌ها دستیابی به بیشترین سود همراه با کمترین مصرف انرژی است. این مهم امروزه با عنوان فرآیند بهینه‌یابی به صورت استاندارد و توسعه یافته در بسیاری از علوم مورد بحث بوده و زمینه تحقیقات بسیاری از محققین در علوم مختلف می‌باشد. کمبود فضا و امکانات، کمبود منابع انرژی، محدودیت‌های مصالح، سیطره اقتصاد بر علوم مختلف و نیز ذات تکامل‌گرایی انسان سبب افزایش اهمیت و تخصیص جایگاه ویژه فرآیند بهینه‌یابی در علوم مختلف شده است. فرآیند بهینه‌یابی را می‌توان بطور مختصر بشرح زیر تعریف نمود [۱]:

”ارائه بهترین مدل و طراحی قابل قبول بر اساس معیارهای کیفی و کمی از پیش تعریف شده“
بر اساس این تعریف فرآیند بهینه‌یابی در هر علمی می‌بایست منجر به تولید بهترین محصول و یا جواب ممکن در شرایط موجود گردد. در این راستا عموماً ارائه مدل و طرحی با بالاترین بازدهی و خروجی همراه با کمترین هزینه براساس شرایط سیستم، با تعبیر بهترین حالت عنوان می‌گردد. کمترین هزینه به صورت‌های مختلفی همچون کمترین مصرف انرژی، کمترین مواد اولیه، کمترین فضا و ... متناسب با شرایط سیستم تعریف می‌شود. این شرایط مبتنی بر معیارهای کیفی و کمی

مختص سیستم در قالب علم مربوطه بیان خواهد شد. برای نیل به این هدف در قدیم عموماً از روش سعی و خطا جهت یافتن مدل و طرح بهینه استفاده می‌گردید. در این روند مدل و یا طرح اولیه بصورت تجربی و با استفاده از درک و تجربه تعیین و سپس براساس عملیات سعی و خطا، مدل و طرح اولیه در جهت افزایش بازدهی و کاهش هزینه بهبود داده می‌شد. بر اساس این شیوه، طرح نهایی بیش از حد به مدل و حالت اولیه وابسته بوده و عموماً مدلی مشابه حالت اولیه با تغییرات اندک نتیجه می‌گردید. بعدها با پیشرفت علوم رایانه و امکان محاسبات پیچیده و حجیم، روش‌های متعدد بهینه‌یابی پیشنهاد گردید که سبب تحولی عظیم و توسعه‌ای شگرف در فرآیند بهینه‌یابی شد. بدین ترتیب فرآیند بهینه‌یابی با روش‌های مختلف بر پایه رایانه‌ها برای انجام محاسبات مختلف بصورت علم بهینه‌یابی مطرح گردید. این علم فصل مشترک بسیاری از علوم کاربردی بوده و اهمیت ویژه‌ای در علوم مختلف دارد. در این راستا مهندسی عمران^۱ نیز از این قاعده مستثنی نبوده و علم بهینه‌یابی زمینه پژوهش را برای بسیاری از محققین عمران فراهم ساخته است. بدین‌منظور در فصل حاضر ابتدا به بررسی ضرورت علم بهینه‌یابی در مهندسی عمران پرداخته شده است. سپس کلیات و مبانی پایه علم بهینه‌یابی برای مسائل مهندسی مورد توجه و شرحی مختصر برای روش‌های بهینه‌یابی مطرح گردیده است. در انتهای این فصل نیز شرحی کلی از فصول رساله ارائه خواهد شد.

۱-۲ ضرورت بهینه‌یابی در مهندسی عمران

امروزه دنیای علم با سرعتی شگرف در تمامی زمینه‌ها رو به پیشرفت نهاده و در این مسیر، ابداعات و اکتشافات نقش بسیار مهمی را ایفا می‌نمایند. اما همواره در این مسیر تلاش‌های علمی بر پایه استفاده بهینه از امکانات پی‌ریزی شده است و قسمت عمده‌ای از تلاش‌های بشر بر طبق قاعده افزایش بازدهی همراه با صرف کمترین هزینه استوار است. عرصه مهندسی عمران نیز در کلیه زمینه‌ها به خصوص طراحی سازه‌های کاربردی، خارج از این قاعده نبوده و همواره تلاش مهندسين عمران بر

^۱ . Civil Engineering

طبق اصل طراحی‌های بهینه بنا نهاده شده است. در این راستا یکی از مهم‌ترین زمینه‌های مهندسی عمران طراحی سازه‌های مختلف برای کاربردهای گوناگون می‌باشد. بدین‌منظور همواره تلاش مهندسی بر قاعده طراحی ایمن و در عین حال اقتصادی استوار است. به بیان دیگر دو اصل مهم در طراحی سازه‌های مهندسی، اقتصاد و ایمنی می‌باشد و اساساً طراحی می‌بایست مبتنی بر اقتصاد باشد. چراکه نبود توجه به اقتصاد در روند طراحی، منجر به استفاده از مدلی بسیار قوی برای هر سازه جهت تأمین ایمنی می‌شود. به عبارت دیگر در فرآیند طراحی، حالات و مدل‌های مختلفی برای ساختن سازه موردنظر قابل ارائه است؛ اما از میان تمامی حالات، بهترین حالت دربرگیرنده بالاترین عملکرد برای سازه در عین کمترین هزینه می‌باشد. بدین ترتیب تلاش‌ها در فرآیند طراحی در جهت رسیدن به چنین حالتی پی‌ریزی می‌شود. هرچند امروزه در برخی مواقع فرآیند طراحی سازه‌ها براساس ارائه مدلی تجربی و بهبود آن براساس عملیات سعی و خطا انجام می‌شود. اما این روال ذات نهفته بهینه‌یابی را در فرآیند طراحی حذف نمی‌نماید. به عبارت دیگر اساساً فرآیند طراحی سازه از دیدگاه منطق مهندسی، می‌بایست منجر به مدلی با حداقل هزینه و حداکثر عملکرد شود. این مهم بیانی شیوا برای فرآیند بهینه‌یابی در قالب مهندسی عمران است. در این راستا همواره بالاترین عملکرد و بیشترین بازدهی بحث ایمنی طرح را براساس آیین‌نامه‌های طراحی کنترل و کمترین هزینه بحث اقتصاد طرح را برای سازه موردنظر تأمین می‌نماید. بدین‌سان دو اصل مهم علم بهینه‌یابی هم‌ارز با دو اصل مهم فرآیند طراحی قرار می‌گیرد. فرآیندی که می‌بایست منجر به سازه‌ای با بالاترین عملکرد همراه با کمترین هزینه شود. در این راستا مفهوم بالاترین عملکرد در قالب‌هایی همچون استفاده از تمام توان اعضا و ... مطرح می‌شود. از سوی دیگر نیز مفهوم کمترین هزینه در طراحی سازه در بیان‌هایی همچون کمترین مصرف مصالح، کمترین فضا برای سازه و ... دیده می‌شود.

توجیه بهینه‌یابی در فرآیند طراحی سازه‌های کاربردی، تنها دلیل برای جایگاه علم بهینه‌یابی در مهندسی عمران نیست. به عبارت دیگر مفهوم بهینه‌یابی به صورت‌های دیگر نیز در مهندسی عمران خودنمایی می‌نماید. نگرش به تاریخچه پیشرفت مهندسی عمران، بیانگر موقعیت ویژه علم بهینه‌یابی و

توجه به آن در سیر تکاملی علم عمران و سازه می‌باشد. امروزه سازه‌های مهندسی در جهت استفاده بهینه از فضا در بعد سوم یعنی همان ارتفاع رشد نموده‌اند. مصالح سبک جایگزین مصالح سنگین گذشته شده‌اند. پانل‌های بسیار نازک و سبک، امروزه به جای دیوارهای باربر و عریض گذشته مورد استفاده قرار می‌گیرند. مشابه این تغییرات در سیر تکاملی مهندسی عمران، تأییدی بر جایگاه ویژه علم بهینه‌یابی می‌باشد. اگرچه برخی از این تغییرات، به طور غیر مستقیم با علم بهینه‌یابی مربوط می‌باشد، اما در نهایت به سوی ارائه طرحی بهینه منجر شده است. به عنوان نمونه اصلی‌ترین هدف در سبک‌سازی سازه، کاهش تأثیر نیروی زلزله می‌باشد. اما در حقیقت با کاهش وزن سازه، گامی مؤثر در جهت کاهش هزینه همراه با افزایش عملکرد سازه برداشته شده است که این مهم در واقع تعریف علم بهینه‌یابی به زبان مهندسی عمران است.

در هر صورت نکته حائز اهمیت توجه به علم بهینه‌یابی و جایگاه آن در مهندسی عمران می‌باشد که این مهم نیازمند تحقیقات برنامه‌ریزی شده‌ای است. خوشبختانه در این راستا پژوهشگران مهندسی عمران نیز تحقیقات ارزشمندی را از سالیان گذشته آغاز نموده و تا به امروز ادامه دارد. به همین سبب در این رساله نیز سعی شده است تا گامی در جهت پیشبرد علم بهینه‌یابی در مهندسی عمران برداشته شود. بدین منظور در بخش بعدی به ارائه کلیات و مبانی پایه علم بهینه‌یابی و دسته‌بندی روش‌های بهینه‌یابی پرداخته شده است.

۳-۱ کلیات و مبانی پایه علم بهینه‌یابی

امروزه علم بهینه‌یابی^۱ مورد توجه بسیاری از محققین و مهندسین قرار دارد. با توجه به تاریخچه واژه بهینه‌یابی می‌توان اذعان داشت که اولین تکنیک بهینه‌سازی توسط کارل فردریش گاوس ابداع گردید. اما عمده اصطلاحات مورد استفاده در این حوزه به دوره معاصر برمی‌گردد.

^۱. Optimization

اصطلاح برنامه‌ریزی خطی^۱ به عنوان یکی از ابتدایی‌ترین تکنیک‌های بهینه‌یابی، نخستین بار توسط جرج برنارد دانتزیگ در سال ۱۹۴۰ میلادی به کار گرفته شد [۲]. واژه برنامه، در کلمه برنامه‌ریزی اشاره به طرح‌های لجستیکی و آموزشی ارتش ایالات متحده امریکا دارد که دانتزیگ آن را مورد مطالعه قرار داد [۳-۴]. البته بایستی توجه داشت که قدمت علم بهینه‌یابی با توجه به تعریف واژه بهینه‌یابی بسیار طولانی‌تر می‌باشد. به عنوان نمونه مصریان باستان با استفاده از تکنیک‌های به خصوصی سعی در طراحی و ساخت کشتی‌های بادبانی با محاسن ویژه‌ای نموده و بدین ترتیب بیشترین بازدهی همراه با کمترین هزینه و انرژی را نتیجه می‌گرفتند. مشابه این فعالیت‌ها در دوران‌های مختلف زندگی بشر قابل مشاهده می‌باشد [۳]. این فعالیت‌ها در حوزه‌های مختلف ارائه شده و تحت عنوان فرآیند بهینه‌یابی توصیف می‌شود. چراکه همواره در فرآیند بهینه‌یابی سعی در کسب بهترین طرح و حداکثر خروجی همراه با حداقل ورودی می‌باشد. این مهم در مهندسی عمران نیز به وضوح در زمینه‌های مختلف به خصوص فرآیند طراحی سازه‌های گوناگون قابل مشاهده است. بر این اساس همان‌طور که پیشتر بیان شد، در حوزه مهندسی عمران همواره تلاش‌ها بر پایه ارائه بهترین طرح با کمترین مصرف مصالح و هزینه با توجه به شرایط و محدودیت‌های طراحی همراه می‌باشد. بدین ترتیب فرآیند بهینه‌یابی در حوزه طراحی سازه‌ها، می‌بایست منجر به بهترین طرح به ازای محدودیت‌های موجود شود. در این راستا عواملی از قبیل تعداد متغیرهای طراحی، بزرگی فضای جستجو و قیود کنترل‌کننده طرح، سبب شکل‌گیری محدودیت‌های مختلف شده و از جمله عوامل بازدارنده برای نیل به طرح بهینه در زمان قابل قبول می‌باشند. برای این منظور عموماً مبانی علم بهینه‌یابی در فرآیند طراحی بهینه سازه‌های مختلف برای بیان عوامل مذکور ثابت بوده و به شکل استاندارد بشرح زیر تعریف می‌شود [۵]:

یافتن مقدار A_0 از میان کلیه حالات و طرح‌های موجود، بطوری که

$$\forall A_0 \in R \quad \Rightarrow \quad F(A_0) \leq F(A) \quad (1-1)$$

$$A_0 = [a_0^1, a_0^2, \dots, a_0^{Nos}]$$

^۱ . Linear Programming

مشروط بر آن که

$$\begin{aligned} g_i(A_0) &\leq 0 & i = 1, \dots, m_g \\ k_j(A_0) &= 0 & j = 1, \dots, m_k \end{aligned}$$

باشد.

در تعریف فوق R بیانگر کلیه حالات ممکن و غیرممکن برای طراحی سازه موردنظر می‌باشد که می‌بایست بهترین حالت یعنی A_0 از میان کلیه حالات مختلف پیدا شود. طرح A_0 براساس متغیرهای طراحی قابل تعریف بوده و بیانگر نقطه‌ای در فضای طراحی¹ Nos بعدی R می‌باشد. بدین ترتیب مقادیر a^1 تا a^{Nos} بیانگر متغیرهای طراحی² مسئله می‌باشند که عموماً بهترین مقادیر برای هر یک از آن‌ها متناسب با بازه تغییرات، سبب تشکیل بهترین طرح یعنی $A_0 = [a_0^1, a_0^2, \dots, a_0^{Nos}]$ می‌شود. از سوی دیگر براساس تعداد متغیرهای طراحی، فضای طراحی یعنی R قابل تعریف می‌باشد. R یک فضای Nos بعدی متناسب با بازه تغییرات متغیرهای طراحی است. نقطه A_0 در فضای طراحی بهترین موقعیت را داشته و بیانگر بهترین طرح برای سازه موردنظر می‌باشد. بنابراین A_0 دارای بیشترین بازدهی همراه با کمترین هزینه برای سازه موردنظر بوده و این مهم سبب برتری آن نسبت به سایر حالات موجود در R شده است. معیارهای بررسی بیشترین بازدهی همراه با کمترین هزینه در قالب تابع یا توابع هدف³ بیان می‌شود. به عبارت دیگر میزان شایستگی هر طرح برای سازه، براساس توابع هدف ارزیابی می‌شود. اما در این راستا تعریف توابع هدف چندگانه برای طراحی بهینه سازه سبب پیچیدگی مسئله خواهد شد. بدین ترتیب برای اجتناب از این موضوع، مهم‌ترین تابع را به عنوان تابع هدف و سایر توابع را در قالب محدودیت‌هایی برای فرآیند طراحی تعریف می‌نمایند. این راهکار ساده‌ترین حالت می‌باشد. راه حل دیگر تعریف یک تابع هدف مرکب می‌باشد که اهداف مسئله براساس ضرایب وزنی در قالب آن تعریف می‌شوند. در هر صورت راه حل اول مرسوم‌تر بوده و در ادبیات بهینه‌یابی بیشتر استفاده می‌شود [۵]. بر این اساس در فرمولبندی مسئله بهینه‌یابی تابع F به

¹ . Design Space

² . Design Variable

³ . Objective Functions

عنوان هدف اصلی فرآیند بهینه‌یابی و توابع g و k به عنوان قیود^۱ و محدودیت تعریف خواهند شد. برای طراحی بهینه‌سازه، تابع F وزن^۲ سازه و یا حجم^۳ مصالح مصرفی و ... است. بنابراین در نتیجه فرآیند بهینه‌یابی براساس حالت A_0 بهترین مقدار برای تابع F حاصل می‌گردد. توابع g و k نیز که از اهداف کلی مسئله می‌باشند، بصورت قیود و محدودیت تعریف می‌شوند. براساس این توابع حالات ممکن و غیرممکن در بین کلیه حالات یعنی فضای R مشخص می‌شود. به عبارت دیگر توابع g و k بطور غیرمستقیم در بررسی طرح‌های مختلف برای طراحی سازه موردنظر مؤثر بوده و شایستگی بهترین حالت یعنی A_0 براساس توابع g و k نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این راستا g بیانگر قیود نامساوی و k بیانگر قیود مساوی می‌باشند. این قیود عموماً در طراحی سازه بر اساس آیین‌نامه^۴ تعیین شده و ایمنی سازه را کنترل می‌نمایند. قید نسبت تنش برای اعضای سازه، مقدار تغییرمکان مجاز گره‌های فعال سازه و ... از جمله قیود مرسوم در فرآیند طراحی بهینه‌سازه بوده که براساس آیین‌نامه‌های طراحی تعریف و ایمنی طرح نهایی را تأمین می‌نمایند.

بدین ترتیب در فرآیند طراحی بهینه‌سازه، سعی می‌شود سازه‌ای با کمترین وزن و کمترین مصالح همراه با مناسب‌ترین ایمنی مطابق آیین‌نامه حاصل گردد. این مهم با یافتن طرح A_0 از میان دیگر طرح‌های موجود در فضای طراحی R نتیجه می‌شود. این مسئله سبب شده است تا در دهه‌های اخیر محققین مختلف، روش‌های گوناگونی را برای فرآیند بهینه‌یابی و نیل به طرح بهینه در زمان قابل قبول ارائه دهند. بدین‌منظور تنوع خاصی در زمینه الگوریتم‌های بهینه‌یابی شکل گرفته است [۶-۷]. در این راستا دو دسته کلی و رایج برای طراحی بهینه‌سازه‌ها وجود دارد.

دسته اول بهینه‌یابی براساس روش‌های قطعی و یا به تعبیر صحیح‌تر روش‌های ریاضی است که با نام روش‌های کلاسیک شناخته می‌شود. روش برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیرخطی^۵، روش

1 . Constraints

2 . Weight

3 . Volume

4 . Code

5 . Nonlinear Programming

نیوتن^۱، شبه نیوتن و روش‌های گرادیان از جمله روش‌های کلاسیک می‌باشند [۱، ۶]. این روش‌ها بر اساس اصول و قواعد ریاضی پی‌ریزی شده و عموماً نیازمند محاسبه مشتق و دیگر اپراتورهای ریاضیات در روند بهینه‌یابی می‌باشند. اکثر روش‌های کلاسیک قابلیت بهینه‌یابی براساس متغیرهای پیوسته^۲ را داشته و بدین ترتیب نیازمند راهکارهای ویژه‌ای برای استفاده در بهینه‌یابی مبتنی بر متغیرهای گسسته^۳ می‌باشند. از سوی دیگر اغلب این روش‌ها نیازمند نقطه‌ای اولیه برای شروع فرآیند بهینه‌یابی بوده و تا حدودی مسیر بهینه‌یابی جهت کسب طرح بهینه، وابسته به موقعیت نقطه اولیه^۴ می‌باشد. در هر صورت روش‌های کلاسیک که به طور رسمی از دهه ۴۰ آغاز شده است، امروزه نیز در روند طراحی بهینه برخی از سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و برخی از محققین علم بهینه‌یابی به کارآیی آن‌ها اعتقاد فراوانی دارند.

دسته دوم روش‌های بهینه‌یابی، روش‌های هوشمند تصادفی^۵ است که از تئوری احتمالات و نیز پدیده‌های طبیعی بهره می‌گیرد. این روش‌ها در ادبیات بهینه‌یابی با عنوان روش‌های فراابتکاری^۶ معرفی می‌گردند [۷-۸]. در سالیان گذشته استفاده از روش‌های فراابتکاری به سبب گریز از مشتقات تابع هدف و قیود، محاسبات سنگین ریاضی و عوامل دیگر گسترش زیادی یافته و مورد توجه بسیاری از محققین واقع شده است. به همین دلیل تحقیقات مختلف و الگوریتم‌های گوناگونی بر پایه روش‌های فراابتکاری ارائه شده است. الگوریتم ژنتیک^۷ (GA)، جستجوی ممنوعه^۸ (TS)، الگوریتم کلونی مورچگان^۹ (ACO)، اجتماع ذرات^{۱۰} (PSO)، الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت^{۱۱} (SA) و جستجوی هارمونی^{۱۲} (HS) از جمله روش‌های فراابتکاری می‌باشند. این روش‌ها با ترکیب قوانین طبیعی و

¹ . Newton

² . Continuous Variable

³ . Discrete Variable

⁴ . Initial Point

⁵ . Random Intelligent

⁶ . Meta-heuristic Algorithm

⁷ . Genetic Algorithm (GA)

⁸ . Tabu Search (TS)

⁹ . Ant Colony Optimization (ACO)

¹⁰ . Particle Swarm Optimization (PSO)

¹¹ . Simulated Annealing (SA)

¹² . Harmony Search (HS)

احتمالات تصادفی در طبیعت، فرآیند جستجو را در پیش گرفته و با تولید طرح‌های ارتقاء یافته متعدد، فضای طراحی را بررسی و کاوش می‌نمایند. به بیان دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری، روش‌های هوشمند تصادفی می‌باشند که با کمک نقاط مختلف فضای طراحی را جستجو می‌نمایند. منطق اکثر این الگوریتم‌ها با الهام از فرآیندهای طبیعی شکل گرفته است. به عنوان نمونه الگوریتم‌های استراتژی تکاملی^۱ (ES) و ژنتیک با الهام از فرآیندهای بیولوژیکی در طبیعت و ساختار ژن^۲ ها و کروموزوم^۳ ها شکل گرفته است. الگوریتم‌هایی همچون کلونی مورچگان، اجتماع پرندگان و زنبور عسل^۴ (BA) نیز براساس منطق رفتار حیوانات تشکیل شده است. الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت با الهام از فرآیندهای فیزیکی فلزات در زمان حرارت شکل گرفته است. در سایر الگوریتم‌های فراابتکاری نیز هر یک سعی شده است تا با شبیه‌سازی فرآیندهای طبیعی، مسائل بهینه‌یابی مدلسازی و حل شود.

تحقیقات در زمینه الگوریتم‌های فراابتکاری همچنان ادامه داشته و فرآیند بهینه‌یابی براساس روش‌های فراابتکاری در هر علمی از جمله حوزه مهندسی عمران به عنوان یکی از زمینه‌های تحقیقاتی به شمار می‌رود [۷-۹]. به همین سبب در این رساله سعی شده است تا با کسب دید مناسب نسبت به تحقیقات گذشته، روند توسعه و گسترش روش‌های فراابتکاری در طراحی بهینه سازه‌های مهندسی، در پیش گرفته شود. بدین ترتیب برای این رساله در فصول متمادی بشرح زیر گام‌های مؤثری در راستای بهبود و توسعه شیوه‌های بهینه‌یابی سازه‌ها با استفاده از روش‌های فراابتکاری برداشته و پیشنهادهایی در جهت افزایش کارایی این الگوریتم‌ها ارائه شده است.

۱-۴ شرح کلی فصول

در این راستا در فصل دوم الگوریتم‌های فراابتکاری مورد توجه قرار گرفته و با ارائه ویژگی‌های کلی این روش‌ها، به بررسی برخی از جزئیات لازم از روش‌های فراابتکاری پرداخته شده است. در این

^۱ . Evolutionary Strategies (ES)

^۲ . Gene

^۳ . Chromosome

^۴ . Bee Algorithm (BA)

فصل شیوه بهینه‌یابی براساس برخی از رایج‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری در زمینه طراحی بهینه سازه‌ها از قبیل الگوریتم ژنتیک، الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت، روش جستجوی ممنوعه، الگوریتم کلونی مورچگان و ... قابل مشاهده می‌باشد. در نهایت در انتهای فصل دوم، با توجه به گسترش امروزی روش‌های ترکیباتی بر پایه الگوریتم‌های فراابتکاری، شرح مختصری برای این روش‌ها ارائه و به عنوان نمونه، چند الگوریتم ترکیبی بر پایه روش‌های فراابتکاری مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

در فصل سوم که بخش اصلی این رساله می‌باشد، راهکارهای پیشنهادی در جهت توسعه و بهبود عملکرد روش‌های فراابتکاری در طراحی بهینه سازه‌ها ارائه شده است. این راهکارها در پنج بخش دسته‌بندی شده و براساس برنامه‌ای هدفمند با گام‌های متوالی به سرانجام رسیده است. در این راستا در اولین بخش به بررسی جزئیات برخی از رایج‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری پرداخته شده است. در این راستا سعی شده است تا با ارائه پیشنهاداتی کاربردی برای هر یک از روش‌های موردنظر، کارایی الگوریتم‌های مذکور افزایش یابد. این مهم مستلزم دقت و شناسایی ابعاد مختلف هر روش است که براساس بررسی‌های انجام شده در فرآیند بهینه‌یابی سازه‌ها حاصل شده است. سپس با کسب دید مناسب نسبت به شیوه الگوریتم‌های فراابتکاری موردنظر، در دومین بخش به ارائه روش نوین جستجوی چندمنظوره پرداخته شده است. این روش بر پایه ایده جستجوی جزیره‌ای، فرآیند کاوش فضای طراحی را به شیوه‌ای کارآمد در پیش گرفته و عملکرد الگوریتم موردنظر را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. کارایی این ایده براساس فرآیند طراحی بهینه سازه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در راستای توسعه ایده جستجوی چندمنظوره، روش کاوش چندفراابتکاری نیز در این بخش ارائه و در فرآیند طراحی بهینه سازه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. در بخش بعدی ایده نوین تقسیم‌بندی فضای طراحی با الهام از فرآیند انفصال در روش اجزای محدود ارائه شده است. این ایده گامی مؤثر در جهت بهبود عملکرد الگوریتم‌های مختلف بهینه‌یابی می‌باشد. کارایی ایده پیشنهادی در بهبود عملکرد برخی از روش‌های فراابتکاری در فصل سوم مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج دلالت بر

تأثیر مثبت آن دارد. در بخش چهارم، در راستای توسعه الگوریتم‌های فراابتکاری با پیروی از روند گسترش روش‌های ترکیبی بر پایه الگوریتم‌های فراابتکاری، روش پیشنهادی HACOHSGA که حاصل ترکیب الگوریتم کلونی مورچگان، روش جستجوی هارمونی و الگوریتم ژنتیک می‌باشد، ارائه شده است. در این روش سعی شده تا محاسن و ویژگی‌های مثبت الگوریتم‌های پایه تقویت و معایب هر یک کمرنگ شود. کارآیی این روش نیز در فرآیند طراحی بهینه سازه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. در بخش پنجم با کسب دید کلی از شیوه روش‌های فراابتکاری در جستجوی فضای طراحی، الگوریتم نوین نقاط متحرک پیشنهاد شده است. این روش با استفاده از فرآیند تکاملی براساس ویژگی‌های جمعیت حاضر، به سوی تولید طرح‌های شایسته در فضای طراحی گام برمی‌دارد. بدین منظور با نداشت طرح‌های مختلف سازه‌ای به مجموعه نقاط فعال و متحرک، فرآیند کاوش براساس جستجوی تصادفی هوشمند در پیش گرفته می‌شود. براین اساس جمعیت‌های متوالی براساس خصوصیات مجموعه نقاط جمعیت پیشین با استفاده از فرآیند تکاملی بهبود و تا کسب طرح بهینه براساس معیار خاتمه الگوریتم ادامه می‌یابد. کارآیی الگوریتم پیشنهادی نقاط متحرک نیز همانند سایر ایده‌های پیشنهادی در فرآیند طراحی بهینه سازه‌ها بررسی شده است. نتایج دلالت بر عملکرد مناسب این روش دارد.

در پیوست الف این رساله، مفروضات و شرایط مثال‌های مختلف بهینه‌یابی به همراه نتایج حاصل براساس راهکارهای پیشنهادی فصل سوم قابل مشاهده است. بدین ترتیب برای بررسی کارآیی ایده‌ها و روش‌های پیشنهادی فصل سوم از مثال‌های این پیوست استفاده شده و نتایج حاصل در جداول مختلف در قیاس با دیگر مراجع ارائه شده است.

فصل دوم

مروری بر تحقیقات

گذشته در روش‌های

فراابتکاری و

الگوریتم‌های ترکیباتی

۱-۲ مقدمه

همان طور که در فصل قبل اشاره شد، الگوریتم‌های فراابتکاری، دسته‌ای از روش‌های بهینه‌یابی می‌باشند که بر پایه تئوری احتمالات و نیز پدیده‌های طبیعی شکل گرفته‌اند. این روش‌ها فضای طراحی را به صورت نقطه به نقطه جستجو نموده و در سیر فرآیند بهینه‌یابی با پیروی از منطق الگوریتم به سوی نقطه بهینه حرکت می‌نمایند. عموماً منطق الگوریتم‌های فراابتکاری، براساس قوانین موجود در طبیعت و رفتارهای تکاملی محیط پیرامون در زمینه‌های مختلف شکل گرفته است. همین مهم سبب تفاوت‌های عمده در شیوه جستجوی الگوریتم‌های فراابتکاری می‌شود [۹]. بدین ترتیب الگوریتم‌های فراابتکاری گوناگون همراه با مزایای خاص، توسط محققین مختلف ابداع شده است.

نکته حائز اهمیت و مشترک بین اکثر الگوریتم‌های فراابتکاری، پیروی از دو اصل تنوع^۱ و تشدید^۲ در روند بهینه‌یابی است. در این راستا، هر یک از الگوریتم‌های فراابتکاری، می‌بایست ضمن جستجوی کل فضای طراحی، همسایگی طرح‌های مستعد را با دقت بیشتری کاوش نمایند. این دو هدف براساس اصول تنوع و تشدید در هر الگوریتم قابل مشاهده می‌باشد. بدین منظور هر الگوریتم برای کسب جواب‌های متنوع و طرح‌های مناسب، نیازمند راهکاری برای جستجوی سراسری^۳ در کل فضای طراحی می‌باشد. این مهم براساس اصل تنوع در هر الگوریتم متناسب با شیوه جستجو نتیجه

^۱ . Diversification

^۲ . Intensification

^۳ . Global Search

می‌شود. از سوی دیگر شیوه جستجوی الگوریتم می‌بایست پتانسیل کاوش در اطراف و همسایگی طرح‌های مناسب را داشته باشد. بدین‌منظور همواره در الگوریتم‌های فراابتکاری، راهکارهای ویژه‌ای برای جستجوی محلی^۱ اطراف طرح‌های مناسب ارائه می‌شود. این مهم در الگوریتم‌های فراابتکاری با تعبیر اصل تشدید مشاهده می‌گردد [۱۰]. استفاده از نخبه‌گرایی^۲ (شایسته‌سالاری)، حافظه جستجو و ... نمونه‌ای از راهکارهای الگوریتم‌های فراابتکاری برای ارائه مفاهیم اصل تشدید می‌باشند.

بدین‌ترتیب همواره در الگوریتم‌های فراابتکاری، راهکارهایی مبتنی بر اصل تنوع با جستجوی کل فضای طراحی، سبب تشکیل مجموعه طرح‌های مستعد در نواحی مختلف فضای کاوش می‌شود. از سوی دیگر راهکارهایی بر پایه اصل تشدید نیز سبب جستجو در اطراف طرح‌های مستعد حاصل از راهکارهای اصل تنوع خواهد شد. نکته حائز اهمیت در این فرآیند، برقراری تعادل و توازن بین راهکارهای مربوط به اصول تنوع و تشدید می‌باشد. به بیان دیگر شیوه جستجوی هر الگوریتم می‌بایست به نحوی باشد که با ترکیب دو اصل تنوع و تشدید، جستجوی محلی و سراسری به صورت متعادل در فرآیند بهینه‌یابی ظاهر شوند. اگر الگوریتم دارای راهکارهای قدرتمندی در اصل تنوع باشد، سبب افزایش ماهیت تصادفی الگوریتم در فرآیند بهینه‌یابی می‌شود. بدین‌ترتیب سرعت همگرایی الگوریتم به نقطه بهینه کاهش یافته و فضای طراحی بصورت تصادفی جستجو می‌شود. از سوی دیگر اگر الگوریتم دارای راهکارهای ضعیفی در اصل تنوع باشد، نمی‌تواند فضای کاوش را به‌طور نسبتاً جامع جستجو نماید. در مورد اصل تشدید نیز مشابه اصل تنوع حساسیت خاصی وجود دارد. بدین‌ترتیب که اگر الگوریتم دارای راهکارهای قدرتمندی برای اصل تشدید باشد، احتمال گرفتاری در نقاط بهینه محلی افزایش یافته و سرعت الگوریتم جهت کسب بهینه عمومی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر اگر الگوریتم با راهکارهای خود اصل تشدید را پوشش ندهد، احتمال کسب طرح بهینه کاهش می‌یابد و فضای طراحی به خوبی جستجو نمی‌شود. به بیان دیگر در این شرایط همسایگی طرح‌های مستعد

^۱ . Local Search

^۲ . Elitism

جستجو نشده و اساساً احتمال کسب بهینه سراسری^۱ اندک است. در این راستا نکته حائز اهمیت، انجام راهکارهای مناسب برای ایجاد توازن و تعادل بین اصول تنوع و تشدید در هر تکرار از الگوریتم‌های فراابتکاری است. اجرای راهکارهایی در جهت افزایش شدت اصل تنوع در تکرارهای اولیه و اصل تشدید در تکرارهای نهایی از راه حل‌های مرسوم در الگوریتم‌های فراابتکاری برای جستجوی مناسب‌تر فضای کاوش می‌باشد که به صورت نهفته در شیوه جستجوی برخی از الگوریتم‌های فراابتکاری قابل مشاهده است.

در هر صورت با توجه به اصول مطرح، در چند دهه اخیر الگوریتم‌های فراابتکاری گوناگونی توسط محققین مختلف با الهام از فرآیندهای تکاملی محیط پیرامون ارائه شده است. در برخی مواقع نیز تعدادی از محققین سعی نموده‌اند تا با ترکیب الگوریتم‌های فراابتکاری، روش جدیدی مبتنی بر اصول تنوع و تشدید ارائه دهند و بدین‌سان الگوریتم ترکیبی کارآمدی برای بهینه‌یابی پیشنهاد نمایند. بدین‌منظور در فصل حاضر سعی شده است تا ابتدا شرحی مختصر برای مرسوم‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌یابی سازه‌های مهندسی ارائه شود. سپس در ادامه برخی از الگوریتم‌های ترکیبی^۲ بر پایه الگوریتم فراابتکاری ارائه شده است.

۲-۲ الگوریتم‌های فراابتکاری

همان‌طور که پیشتر بیان گردید، اکثر الگوریتم‌های فراابتکاری بر پایه الهام از فرآیندهای طبیعی شکل گرفته و کل فضای طراحی را به صورت نقطه به نقطه بررسی می‌نمایند و می‌توانند بدون محدودیتی در نوع متغیرهای طراحی، بر روی هر نوع فضای طراحی با هر نوع قیدی، کار کنند. این خواص سبب شده است تا این روش‌ها جایگاه ویژه‌ای در حل مسائل بهینه‌یابی یافته و در سالیان اخیر بطور چشمگیری توسعه یابند. ایده اصلی روش‌های فراابتکاری نخستین بار توسط فوگل در سال ۱۹۶۶ با الگوریتم استراتژی تکاملی مطرح گردید [۱۱]. پس از وی جان هولند در سال ۱۹۷۵ در

^۱ . Global Optimum

^۲ . Hybrid Algorithm

دانشگاه میشیگان بهینه‌یابی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک را بر پایه ساختار ژن‌ها و کروموزوم‌ها مطرح کرد [۱۲]. نظریه وی توسط دانشجویانش توسعه یافته و گلدبرگ در سال ۱۹۸۹ الگوریتم ژنتیک فعلی را ارائه داد [۱۳]. در سال ۱۹۸۳، کیرکپاتریک براساس الگوریتم محاسباتی متروپلیس [۱۴] که بر پایه نظریه سرد شدن تدریجی استوار بود، یک روش بهینه‌یابی با نام شبیه‌سازی بازپخت را ارائه نمود [۱۵]. سپس در سال ۱۹۸۶ گلاور روش بهینه‌یابی جستجوی ممنوعه را مطرح نمود [۱۶]. کلورنی و دوریگو در سال ۱۹۹۱ روش بهینه‌یابی بر پایه زندگی دسته جمعی مورچگان را با نام سیستم مورچه^۱ ارائه دادند [۱۷]. در سال ۱۹۹۵، ابرهارت و کندی با الهام از نظریه اجتماع پرندگان و ماهی‌ها روش اجتماع ذرات را ارائه دادند [۱۸]. جیم و همکاران در سال ۲۰۰۱ روش جستجوی هارمونی را براساس هماهنگی گروه موسیقی ارائه نمودند [۱۹]. در سال ۲۰۰۶ ارول روش بیگ بنگ^۲ را مطرح نمود [۲۰]. در سال ۲۰۰۹، راشدی براساس قوانین فیزیک روش جستجوی گرانشی^۳ را ارائه نمود [۲۱]. کاوه در سال ۲۰۱۰ روش جستجوی ذرات باردار^۴ را در بهینه‌یابی سازه‌ها بر پایه قوانین فیزیک و قوانین نیوتن و نیز روش جستجوی گرانشی مطرح نمود [۲۲]. روش بهینه‌یابی براساس رفتار پرتو نور در گذر از اجسام مختلف^۵، نیز در سال ۲۰۱۲ توسط کاوه ارائه شد [۲۳]. البته سیر توسعه و ارائه الگوریتم‌های فراابتکاری مختلف، جامع‌تر از فرآیند مذکور می‌باشد و در این بحث، بخشی از رایج‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری مطرح شده است.

۲-۲-۱ الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک (GA) یکی از روش‌های فراابتکاری است که از قوانین بیولوژیکی طبیعت پیروی می‌کند. این الگوریتم یک روش جستجوی هوشمند است که براساس ساختار ژن‌ها و کروموزوم‌ها شکل گرفته است. GA نخستین بار توسط جان هولند در سال ۱۹۷۵ در دانشگاه

^۱ . Ant System (AS)

^۲ . Big Bang-Big Crunch

^۳ . Gravitational Search Algorithm (GSA)

^۴ . Charged System Search (CSS)

^۵ . Ray Optimization (RO)

میشیگان مطرح شد [۱۲] و پس از وی توسط جمعی از دانشجویانش مثل گلدبرگ توسعه یافت [۱۳ و ۲۴]. از نخستین مقالات در زمینه بهینه‌یابی سیستم‌های سازه‌ای با استفاده از GA می‌توان به کارهای جنکینز [۲۵]، راجیو و کریشنامورتی [۲۶]، لین و هاجلا [۲۷] و گریسون و پک [۲۸] اشاره کرد. سپس بسیاری از محققین مقالات متنوعی درباره بسط دامنه کاربرد GA، بهبود نتایج و افزایش سرعت محاسبات در فرآیند طراحی بهینه‌سازه‌ها تا به امروز ارائه نمودند [۲۹-۳۲]. الگوریتم ژنتیک براساس اصل ادامه حیات بهترین‌ها و تکثیر نوع برتر پی‌ریزی شده است. این روش هوشمند بطور موفقیت‌آمیزی طرح بهینه عمومی را بدون در نظر گرفتن فرضیات محدود کننده‌ای از قبیل پیوسته بودن فضای جستجو و یا وجود مشتقات پیدا می‌کند. الگوریتم GA در ابتدا با مجموعه‌ای از جواب‌های تصادفی (رشته‌ها)^۱ که به آن جمعیت^۲ گفته می‌شود، آغاز می‌گردد. از این جواب‌ها برای ساخت جمعیت بعدی استفاده می‌شود، به این امید که جمعیت‌های جدید بهتر از جمعیت قدیم باشند. روش‌هایی که برای ایجاد جمعیت جدید مطرح می‌شوند، براساس انتخاب رشته‌های مناسب بنا نهاده شده‌اند. بنابراین بهترین‌ها شانس بیشتری برای تولیدمثل و ادامه حیات خواهند داشت. این فرآیند آنقدر تکرار می‌شود تا براساس معیار همگرایی طرح مناسب و بهینه حاصل شود. فلوجارت شکل (۱-۲) چگونگی و ترتیب فرآیند بهینه‌یابی از طریق GA را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (۱-۲) مشاهده می‌شود، اولین گام تولید جمعیت اولیه است. از آنجا که GA با متغیرهای طراحی رمز شده کار می‌کند، لذا ضروری است که متغیرهای طراحی به صورت یک رشته رمز بیان شوند. شیوه‌های متنوعی برای بیان متغیرهای طراحی به صورت یک رشته رمز وجود دارد. مرسوم‌ترین حالت، شیوه رمز کردن دودویی^۳ می‌باشد. در این حالت هر رشته متشکل از یک سری بیت^۴‌های دودویی است که در کنار یکدیگر چیده شده‌اند. بنابراین برای تولید جمعیت اولیه در

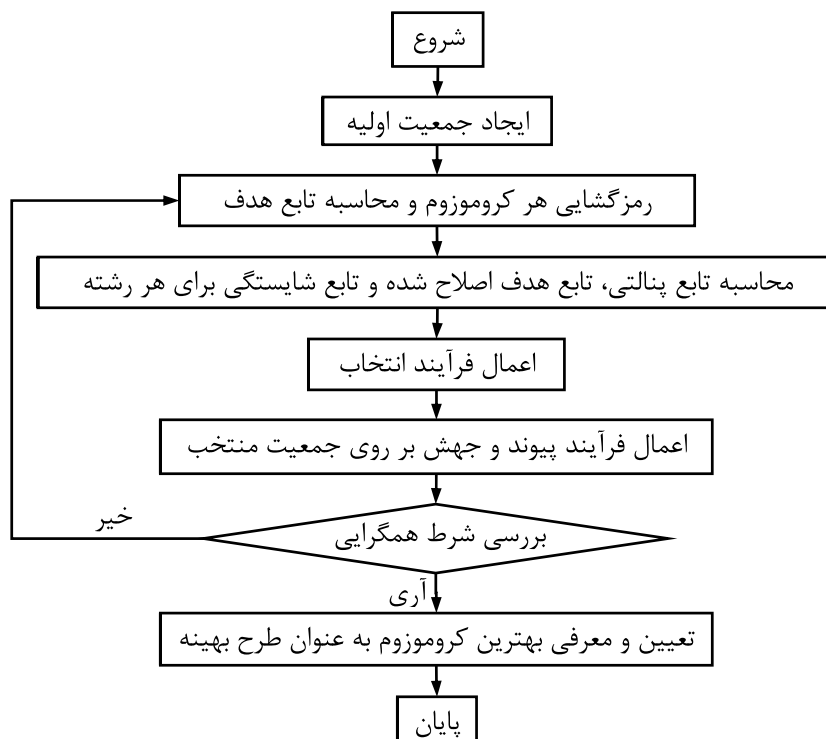
1 . Strings

2 . Population

3 . Binary

4 . Bit

فرآیند بهینه‌یابی براساس GA، به تعداد زیررشته‌های^۱ متناظر با متغیر طراحی اعداد تصادفی دودویی تولید می‌شود [۳۳]. بدین ترتیب می‌توان به تعداد اعضای جمعیت، رشته‌های مختلفی تولید نمود. هر یک از رشته‌های حاصل، معادل طرحی در فضای جستجو^۲ و هر زیررشته در هر رشته بیانگر متغیر طراحی متناظر می‌باشند.



شکل (۱-۲) - فرآیند بهینه‌یابی براساس روش GA

با توجه به آن که یک زیررشته LS بیتی اعداد صفر تا $2^{LS}-1$ را کد می‌نماید، مقدار متناظر

زیررشته نام بشرح زیر محاسبه می‌شود:

$$b_{LS-1} \cdots b_2 b_1 b_0 \Leftrightarrow IR_i = \sum_{j=0}^{LS-1} 2^j b_j \quad (1-2)$$

در رابطه (۱-۲)، هر بیت b می‌تواند اعداد صفر تا یک را اختیار نماید. IR_i عدد صحیح متناظر با زیررشته نام می‌باشد که در محدوده صفر تا $2^{LS}-1$ قرار دارد. حال برای آن که IR_i به شماره لیست

^۱ . Substring

^۲ . Search Space

{S} مربوط به مقادیر مجاز گسسته متغیرهای طراحی ارتباط داده شود، از رابطه (۲-۲) استفاده خواهد شد.

$$IS_i = \text{Int} \left(IR_i * \frac{(Nos - 1)}{(2^{LS} - 1)} \right) + 1 \quad 1 \leq IS_i \leq Nos \quad ; \quad 0 \leq IR_i \leq 2^{LS} - 1 \quad (2-2)$$

براساس رابطه (۲-۲) مقدار رمزگشایی شده هر زیررشته متناظر با یکی از اعضای مجموعه {S} قرار می‌گیرد. با رمزگشایی هر رشته، مقدار تابع هدف اصلاح شده^۱ مبتنی بر تابع هدف و تابع جریمه^۲ برای هر رشته (طرح) قابل محاسبه است. برای این منظور می‌توان از رابطه کلی زیر برای محاسبه تابع هدف اصلاح شده یعنی $\phi(A)$ استفاده نمود.

$$\phi(A) = F(A) \left[1 + K \left(\sum_{q=1}^{nlc} \sum \max[0, G_q] \right) \right] \quad (3-2)$$

در رابطه (۳-۲)، $F(A)$ تابع هدف مسئله بهینه‌یابی می‌باشد که عموماً در طراحی بهینه سازه‌ها وزن و یا حجم مصالح مصرفی سازه است. G_q میزان نقص قیود و Q تعداد کل قیود حاکم بر مسئله می‌باشد. K ثابت جریمه و nlc تعداد ترکیبات بارگذاری در فرآیند طراحی بهینه سازه است. براساس رابطه (۳-۲) می‌توان به هر رشته یک مقدار شایستگی^۳ اختصاص داد. برای این منظور می‌توان از تابع شایستگی بشرح رابطه (۴-۲) استفاده نمود [۲۶].

$$Fit(A) = [\phi_{\max}(A) + \phi_{\min}(A)] - \phi(A) \quad (4-2)$$

در رابطه فوق $\phi_{\max}(A)$ و $\phi_{\min}(A)$ بترتیب حداکثر و حداقل مقدار تابع هدف اصلاح شده در جمعیت جاری می‌باشد. بر اساس رابطه (۴-۲) رشته‌ای با کمترین مقدار تابع هدف اصلاح شده دارای بیشترین مقدار شایستگی می‌باشد.

با محاسبه شایستگی اعضای جمعیت، نوبت به اعمال فرآیند انتخاب^۴ برای تشکیل جمعیت والدین^۵ می‌رسد. روش‌های متنوعی برای انتخاب رشته‌های شایسته وجود دارد. اما هدف اصلی در همه

1 . Modified Objective Function

2 . Penalty Function

3 . Fitness

4 . Selection

5 . Parents

آن‌ها انتخاب رشته‌هایی (طرح‌هایی) با میزان شایستگی بالا از جمعیت جاری و تکثیر^۱ آن‌ها، طی قرارگیری در مکانی به نام استخر تولیدمثل^۲ است. روش چرخ‌گردان^۳، روش رتبه‌بندی^۴، روش مسابقه‌ای^۵ و ... از جمله روش‌های رایج در GA برای اعمال فرآیند انتخاب می‌باشد [۳۳-۳۴]. در هر صورت براساس هر یک از روش‌های فرآیند انتخاب، می‌بایست رشته‌های شایسته از میان جمعیت به عنوان والد انتخاب شوند.

پس از انتخاب والدین نوبت به اعمال عملگرهای GA^۶ همچون عملگر پیوند^۷، عملگر جهش^۸ و ... برای تولید جمعیت فرزندان^۹ می‌رسد. عملگر پیوند از رایج‌ترین اپراتورهای GA است. برای عملگر پیوند نیز راهکارهای متنوعی توسط محققین مختلف ارائه شده است. پیوند تک نقطه‌ای^{۱۰}، پیوند دونقطه‌ای^{۱۱}، پیوند یکنواخت^{۱۲} و ... از راهکارهای مرسوم در GA برای اعمال فرآیند پیوند بر روی جمعیت والدین می‌باشد. براساس عملگر پیوند با تخصیص نرخ پیوند^{۱۳} (P_c) رشته‌های واجد شرایط برگزیده می‌شوند. بدین‌منظور با تولید یک عدد تصادفی و مقایسه آن با مقدار P_c می‌توان رشته‌های والد را از میان استخر تولیدمثل انتخاب نمود. در صورتی که عدد تصادفی از نرخ پیوند کوچکتر باشد، رشته مربوطه برای پیوند انتخاب می‌شود. با تکرار این روند برای تمامی اعضا، رشته‌های واجد شرایط برگزیده می‌شوند. سپس براساس یکی از روش‌های عملگر پیوند، رشته‌های منتخب با یکدیگر ترکیب خواهند شد [۳۳-۳۴]. بدین ترتیب جمعیت فرزندان براساس عملگر پیوند قابل تشکیل می‌باشد. اما از دیگر مراحل رایج در GA که تکامل جمعیت برای نسل بعد را به دنبال دارد، استفاده از عملگر جهش می‌باشد. هدف از بکارگیری اپراتور جهش، کاوش بهتر فضای طراحی و ایجاد پراکندگی بیشتر در

^۱ . Reproduction

^۲ . Mating Pool

^۳ . Roulette Wheel

^۴ . Rank

^۵ . Tournament

^۶ . Operator GA

^۷ . Crossover

^۸ . Mutation

^۹ . Offspring

^{۱۰} . Single Point Crossover

^{۱۱} . Two Point Crossover

^{۱۲} . Uniform Crossover

^{۱۳} . Crossover Rate

محدوده فضای طراحی است. در فرآیند جهش برای کدگذاری دودویی، با تخصیص نرخ جهش^۱ (P_m) برای تک تک بیت‌های فرزندان، اعداد تصادفی تولید می‌شود. در صورتی که این اعداد از نرخ جهش کوچکتر باشد، مقدار بیت مربوطه از صفر به یک یا بالعکس تبدیل می‌شود [۳۳-۳۴]. با اعمال عملگر جهش، جمعیت فرزندان برای نسل بعدی آماده خواهد شد. اما قبل از آن می‌بایست شرط خاتمه^۲ الگوریتم بررسی شود. روش‌های متنوعی برای شرط خاتمه در الگوریتم ژنتیک وجود دارد. مرسوم‌ترین حالت، کنترل تعداد مراحل نسل‌سازی می‌باشد [۳۳-۳۴]. به بیان دیگر GA مراحل فوق را با تولید جمعیت جدید و ارزیابی شایستگی رشته‌های آن تا تکمیل تعداد نسل‌سازی پیش‌بینی شده تکرار می‌کند. زمانی که شرط خاتمه برقرار شود، الگوریتم بهترین رشته را به عنوان طرح بهینه معرفی می‌نماید.

۲-۲-۲ الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت

هنگام انجماد فلزات یا شکل‌گیری ساختمان بلوری، ممکن است به یک حالت جامد با چندین ساختمان اتمی داخلی یا بلوری متفاوت، متناسب با سطوح مختلف انرژی رسید که این مهم به نرخ سرد شدن بستگی دارد. اگر مجموعه به سرعت سرد شود، حالت جامد حاصل به احتمال زیاد حاشیه کوچکی از پایداری خواهد داشت. برای رسیدن به پایداری بیشتر فرآیند سرد شدن تدریجی انجام می‌شود که در آن فلز تا یک دمای بالا مجدداً حرارت داده شده و به آرامی سرد می‌شود تا به اتم‌ها فرصت کافی برای یافتن موقعیت‌هایی مناسب مبتنی بر اصل کمینه‌سازی انرژی پتانسیل، داده شود. از سوی دیگر در فرآیند سرد شدن تدریجی طبیعی مشاهده می‌شود که در فاصله زمانی که فلز در یک دمای خاص نگه داشته می‌شود، امکان جهش به حالت انرژی بالاتر قبل از رسیدن به حالت یکنواخت، وجود دارد [۱].

^۱ . Mutation Rate

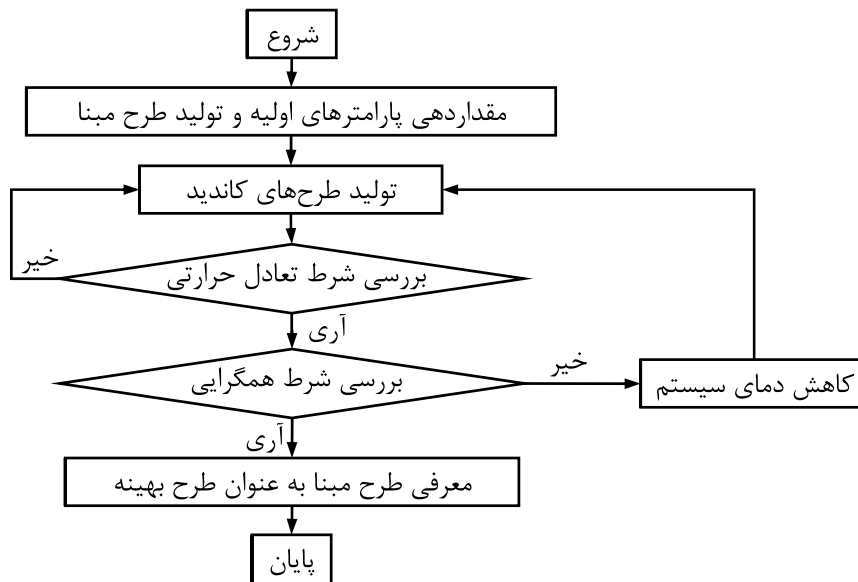
^۲ . Termination Criterion

الگوریتم محاسباتی که فرآیند سرد شدن تدریجی را شبیه‌سازی می‌کند توسط متروپلیس و همکاران در سال ۱۹۵۳ پیشنهاد شده و به الگوریتم متروپلیس^۱ معروف است [۱۴]. بر اساس الگوریتم متروپلیس، در یک دمای T ، محل یک اتم را به شکل اتفاقی دچار اختلال کرده و میزان تغییر حاصل در انرژی سیستم ΔE را محاسبه می‌کند. اگر حالت انرژی جدید از حالت اولیه پایین‌تر باشد، آنگاه ساختار جدید اتم‌ها پذیرفته می‌شود. از طرف دیگر اگر $\Delta E > 0$ باشد، حالت اختلالی سبب افزایش انرژی شده است. در این شرایط، حالت جدید براساس یک تصمیم احتمالی ممکن است پذیرفته یا رد شود. در هر دما، انبوهی از ساختارهای اتمی با موقعیت‌های اتفاقی متفاوت بوجود می‌آید تا به یک سطح انرژی یکنواخت برسند که معمولاً به آن تعادل حرارتی می‌گویند. آن گاه دما کاسته می‌شود و چرخه دوباره شروع می‌شود. این گام‌ها در حالی که دما به آهستگی کاهش می‌یابد، به صورت پی در پی تکرار می‌شود تا حالت انرژی کمینه حاصل گردد.

کیرکپاتریک بر اساس الگوریتم متروپلیس، فرآیند بهینه‌یابی را ارائه داده است [۱۵]. بر این اساس با جایگزین نمودن حالت انرژی با تابع هدف اصلاح شده $(\phi(A))$ و نیز با استفاده از متغیر طراحی a برای ساختار ذرات، الگوریتم متروپلیس در مسائل بهینه‌یابی قابل اجرا است. در این الگوریتم حرکت از یک نقطه a_i به موقعیت دیگر a_j در فضای طراحی سبب تغییر در $\phi(A)$ می‌شود. دمای T نیز یک پارامتر کنترلی است که همگرایی فرآیند را تنظیم کرده و در طی فرآیند بهینه‌یابی متناسب با مقدار اولیه دما^۲ (T_s) بروزرسانی می‌شود. از سوی دیگر تعداد چرخه‌های موردنیاز برای رسیدن به تعادل حرارتی نیز باید قبل از کاهش T مشخص شده باشد. شکل (۲-۲) فلوجارت روش SA را نمایش می‌دهد [۳۵-۳۶].

^۱ . Metropolis Algorithm

^۲ . Starting Temperature



شکل (۲-۲) - فرآیند بهینه‌یابی براساس روش SA

براساس شکل (۲-۲) الگوریتم SA با مقداردهی پارامترهای اولیه همچون دمای اولیه (T_s) ، دمای نهایی^۱ (T_f) ، ضریب سرد شدن^۲ (η) و ... شروع می‌شود. سپس طرحی بصورت تصادفی در فضای جستجو با نام طرح مبنا تولید می‌شود. برای این منظور مقادیر متغیرهای طراحی به صورت تصادفی و متناسب با بازه مجاز مقداردهی می‌شود. برخی از محققین توصیه می‌نمایند که طرح مبنا، عاری از هرگونه نقض قیود باشد [۳۶-۳۵]. در هر صورت با تولید طرح مبنا مقدار تابع هدف اصلاح شده برای آن براساس رابطه (۳-۲) قابل محاسبه است.

در الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت، فرآیند جستجو با تولید طرح کاندید^۳ در همسایگی^۴ طرح مبنا در پیش گرفته می‌شود. برای این منظور یک متغیر طراحی از طرح مبنا انتخاب و مقدار آن متناسب با بازه مجاز متغیر طراحی و محدوده همسایگی (nw) بصورت تصادفی تغییر می‌نماید. سپس $\phi(A)$ برای طرح جدید محاسبه می‌شود. در صورتی که طرح جدید شایستگی بیشتری نسبت به طرح مبنا داشته باشد، جایگزین طرح مبنا خواهد شد، در غیر این صورت طرح جدید براساس یک تصمیم احتمالی

^۱ . Final Temperature

^۲ . Cooling Factor

^۳ . Candidate Design

^۴ . Neighborhood

ممکن است پذیرفته و یا رد شود. احتمال پذیرفتن طرح جدید $P(\Delta\phi)$ بشرح رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۶-۳۵].

$$P(\Delta\phi) = e^{\left(\frac{-\Delta\phi}{Tk_B}\right)} \quad (۵-۲)$$

در رابطه (۵-۲) $\Delta\phi$ اختلاف توابع هدف اصلاح شده متناظر با طرح جدید و طرح مبنا می‌باشد که مقداری مثبت است. k_B ثابت بولتزمن^۱ و T دمای فعلی سیستم است. تصمیم قبول یا رد طرح جدید با تولید عدد تصادفی در محدوده صفر تا یک و مقایسه آن با $P(\Delta\phi)$ صورت می‌پذیرد. اگر عدد تصادفی تولید شده از مقدار $P(\Delta\phi)$ کمتر باشد، آن گاه طرح جدید علی‌رغم شایستگی کمتر، جایگزین طرح مبنا می‌شود. اما اگر عدد تصادفی تولیدی بیشتر از $P(\Delta\phi)$ باشد، طرح جدید رد شده و طرح مبنا بدون تغییر باقی می‌ماند.

فرآیند تولید طرح‌های کاندید در محدوده طرح مبنای جاری به تعداد متغیرهای طراحی انجام می‌شود. به بیان دیگر در هر تکرار از یک سیکل سرد شدن^۲ تدریجی، تمامی متغیرهای طراحی می‌بایست تغییر نموده و در اصطلاح الگوریتم SA، دچار آشفتگی^۳ شوند. تعداد تکرارها در هر سیکل سرد شدن تدریجی قبل از کاهش دما براساس رابطه زیر تعیین می‌شود [۳۶-۳۵].

$$i_c = i_f + (i_f - i_s) \left(\frac{T - T_f}{T_f - T_s} \right) \quad (۶-۲)$$

در رابطه فوق، i_c تعداد تکرارهای موجود در هر سیکل سرد شدن تدریجی است. i_f و i_s بترتیب مقادیر حداکثر و حداقل تکرارها در هر سیکل فرآیند سرد شدن تدریجی است که در مرحله اول توسط کاربر مشخص می‌شود. براساس رابطه (۶-۲) متغیرهای طراحی طرح مبنا در هر سیکل سرد شدن، به تعداد i_c دچار آشفتگی خواهند شد و بدین ترتیب تعادل حرارتی قبل از کاهش دما حاصل می‌گردد.

^۱ . Boltzmann Constant

^۲ . Cooling Cycle

^۳ . Perturbation

هنگامی که تمامی تکرارها برای هر سیکل سرد شدن انجام پذیرفت، تعادل در دمای جاری برای ساختار متغیرهای موجود حاصل می‌شود. سپس مقدار دما برای سیکل بعدی بصورت زیر تغییر می‌نماید [۳۶-۳۵].

$$T^{j+1} = T^j \cdot \eta \quad (7-2)$$

در رابطه (۷-۲)، بالا نویس η دلالت بر شماره هر تکرار در کل فرآیند بهینه‌یابی دارد. به بیان دیگر در پایان هر تکرار، مقدار دما با ضریب η کاهش یافته و سیکل بعدی با دمای جدید آغاز می‌شود.

فرآیند فوق تا زمانی که دمای سیستم از دمای نهایی (T_f) بیشتر باشد، انجام می‌پذیرد. هنگامی که دمای جاری سیستم از دمای نهایی کمتر شود، الگوریتم خاتمه یافته و طرح مبنای حاضر به عنوان طرح بهینه معرفی می‌گردد. به بیان دیگر در الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت، شرط خاتمه با کنترل میزان دمای جاری سیستم (T) بررسی و ارزیابی می‌شود.

۲-۲-۳ الگوریتم جستجوی ممنوعه

همان طور که پیشتر بیان شد، الگوریتم جستجوی ممنوعه (TS) نخستین بار توسط گلاور در سال ۱۹۸۶ مطرح گردید [۱۶]. وی با الهام از معنای کلمه تابو^۱ در فرهنگ لغت زبان تنگا^۲ فرآیند بهینه‌یابی براساس الگوریتم TS را پیشنهاد نمود. فرهنگ لغت زبان تنگا مربوط به مردم جزایر پلینزی^۳ در اقیانوس آرام است که در آن واژه تابو به معنای ماده مقدسی است که لمس کردن آن به سبب قداست ماده، ممنوع می‌باشد. بر اساس این معنا، در الگوریتم TS نیز ماهیتی با عنوان لیست ممنوعه^۴ وجود دارد که حرکت‌های ممنوع در آن ذخیره می‌شوند. بدین ترتیب الگوریتم بهینه‌یابی مجاز به انجام حرکت‌های موجود در لیست ممنوعه نیست. این روش با استفاده از لیست ممنوعه و نیز انتخاب طرح‌هایی در همسایگی^۵ طرح مبنا، یک تکنیک ساده بهینه‌یابی را پدید می‌آورد که فرآیند جستجو

1. Tabu

2. Tonga

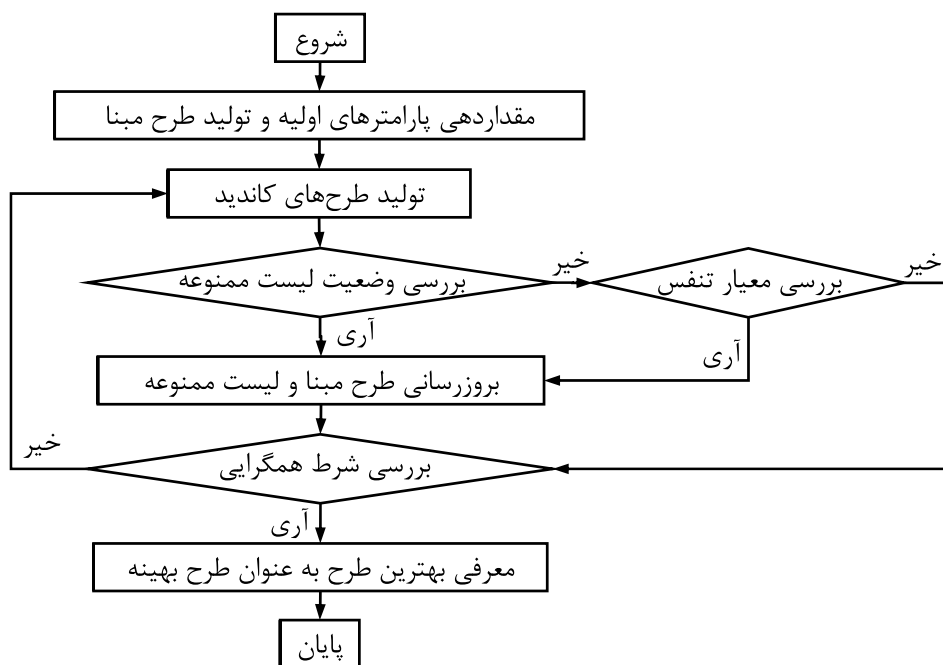
3. Polynesia

4. Tabu List

5. Vicinity

در فضای کاوش را بصورت محلی و موضعی انجام می‌دهد. برای این منظور الگوریتم با انتخاب جوابی قابل قبول در فضای طراحی آغاز می‌شود. سپس بهترین طرح در همسایگی طرح مبنا متناسب با بازه همسایگی انتخاب خواهد شد. در گام بعدی الگوریتم بهترین طرح همسایه را در صورتی که مجاز باشد، جایگزین طرح مبنا می‌نماید. اجازه این عمل براساس لیست ممنوعه و در صورت لزوم براساس معیار تنفس^۱ صادر خواهد شد. برای این منظور الگوریتم حرکتی که منجر به بهترین طرح کاندید شده است را کنترل می‌نماید. اگر این حرکت^۲ در لیست ممنوعه قرار نداشته باشد، طرح موردنظر جایگزین طرح مبنا شده و حرکت مربوطه در لیست ممنوعه ذخیره می‌شود. اما اگر حرکت موردنظر در لیست ممنوعه قرار داشته باشد، الگوریتم معیار تنفس را کنترل می‌نماید. در صورت برقراری معیار تنفس، طرح موردنظر یعنی بهترین طرح همسایه، جایگزین طرح مبنا خواهد شد. در نهایت لیست ممنوعه بروزرسانی شده و فرآیند جستجو تا برقراری شرط خاتمه مجدداً تکرار می‌شود [۳۷-۳۹].

براساس این مفاهیم، فرآیند بهینه‌یابی مبتنی بر روش TS بشرح شکل (۳-۲) قابل اجرا می‌باشد.



شکل (۳-۲) - فرآیند بهینه‌یابی براساس روش TS

^۱ . Aspiration Criterion

^۲ . Move

همان‌طور که در شکل (۲-۳) مشاهده می‌شود، الگوریتم TS نیز با مقداردهی برخی از پارامترها همچون بازه همسایگی (nw)، پارامتر بروزرسانی لیست ممنوعه و ... شروع می‌شود. سپس طرح مبنا با تولید تصادفی مقادیر متغیرهای طراحی مبتنی بر بازه مجاز برای هر متغیر، تشکیل و مقدار $\phi(A)$ برای آن براساس رابطه (۲-۳) محاسبه خواهد شد. در ادامه با تولید طرح‌های کاندید در همسایگی طرح مبنا، فرآیند بهینه‌یابی براساس TS در پیش گرفته می‌شود. برای این منظور یک متغیر طراحی انتخاب و مقدار آن با توجه به nw و نیز محدوده مجاز دچار تغییر می‌شود. این تغییرات در مقدار متغیرهای طراحی سبب تولید طرح‌های کاندید خواهد شد. بدین ترتیب به تعداد $2nw$ طرح کاندید می‌توان تولید نمود که بستگی به شرایط مقدار متغیر طراحی دارد. به بیان دیگر اگر مقدار متغیر طراحی در نزدیکی و یا مرز محدوده مجاز برای متغیر طراحی نباشد، می‌توان به تعداد $2nw$ طرح کاندید تولید نمود [۳۵]. سپس طرح‌های کاندید تولید شده براساس رابطه (۲-۳) ارزیابی شده و بهترین طرح در همسایگی طرح مبنا انتخاب می‌شود. در این فرآیند می‌بایست حرکتی که سبب تولید طرح منتخب (بهترین طرح بین طرح‌های کاندید در همسایگی طرح مبنا) شده است را نیز در نظر گرفت [۳۷-۳۸].

پس از مشخص شدن طرح منتخب، ابتدا لیست ممنوعه کنترل می‌شود. این لیست حاوی حرکت‌های مختلف در فضای کاوش می‌باشد که در تکرارهای پیشین در تولید بهترین طرح همسایه انجام شده است. اگر حرکتی که منجر به تولید طرح منتخب شده، در لیست ممنوعه نباشد، طرح موردنظر جایگزین طرح مبنا می‌شود، حتی اگر میزان تابع هدف اصلاح شده برای آن بیشتر از مقدار تابع هدف اصلاح شده طرح مبنا باشد. به بیان دیگر در روش جستجوی ممنوعه، بدون توجه به مقدار $\phi(A)$ برای طرح منتخب، در صورتی که حرکت موردنظر در فضای طراحی در لیست ممنوعه نباشد، طرح موردنظر جایگزین طرح مبنا می‌شود. سپس حرکتی که منجر به تولید طرح منتخب شده در لیست ممنوعه با احتمال خروج صفر ذخیره می‌شود. اما در صورتی که حرکت مورد نظر در لیست

ممنوعه باشد، الگوریتم معیار تنفس را بررسی می‌نماید. براساس معیار تنفس، در صورتی طرح منتخب جایگزین طرح مبنا خواهد شد، که میزان تابع هدف اصلاح شده برای آن کمتر از مقدار تابع هدف اصلاح شده طرح مبنا باشد. در غیر این صورت طرح مبنا بدون تغییر باقی می‌ماند. به بیان دیگر در بررسی معیار تنفس در صورتی که $\phi(A)$ طرح منتخب بیشتر از طرح مبنا باشد، طرح مبنا تغییری نمی‌نماید. اما اگر $\phi(A)$ آن کمتر از طرح مبنا باشد، جایگزین طرح مبنا می‌شود [۳۵]. در هر صورت در ادامه محتوی لیست ممنوعه بروزرسانی می‌شود. به بیان دیگر پارامتر زمانی لیست ممنوعه برای حرکت‌های موجود افزایش می‌یابد. این مهم می‌تواند احتمال خروج برخی از حرکت‌ها را افزایش داده و یا سبب خروج برخی از حرکت‌ها از لیست ممنوعه شود [۳۷-۳۹]. در نهایت شرط خاتمه برای الگوریتم بررسی می‌شود. در الگوریتم TS می‌توان شرط خاتمه را با تکمیل تعداد مراحل تکرار کنترل نمود. برای این منظور مراحل فوق با تولید طرح‌های کاندید در اطراف طرح مبنا آغاز و تا تکمیل تعداد دفعات پیش‌بینی شده تکرار می‌شود. زمانی که شرط خاتمه محقق شود، الگوریتم بهترین طرح را به عنوان طرح بهینه معرفی می‌نماید.

۲-۲-۴ الگوریتم کلونی مورچگان

یکی از روش‌های فراابتکاری که کارآیی مناسبی در بهینه‌یابی سازه‌ها دارد، روش کلونی مورچگان (ACO) می‌باشد. این روش نخستین بار توسط کولورنی و همکاران و دوریگو با عنوان سیستم مورچه (AS) برای حل مسئله فروشنده دوره‌گرد^۱ مطرح شد [۱۷ و ۴۰]. سپس توسط سایر محققین در دیگر علوم کاربردی مورد استفاده قرار گرفت. در این راستا روش‌های مختلفی بر پایه اصول الگوریتم کلونی مورچگان با عناوینی همچون سیستم جامعه مورچه^۲، سیستم مورچه حداکثر و حداقل^۳، سیستم مورچه رتبه‌بندی شده^۴، سیستم مورچه بهترین و بدترین^۱ و ... پیشنهاد شده است

^۱ . Traveling Salesman Problem (TSP)

^۲ . Ant Colony System (ACS)

^۳ . Max-Min Ant System (MMAS)

^۴ . Rank-Based Ant System (RBAS)

[۴۱]. تئوری این روش‌ها با الهام از رفتار مورچگان در جستجوی غذا شکل گرفته است. مورچه‌ها حشرات اجتماعی نابینایی هستند که در یک جامعه با همکاری متقابل، رفتارهای مختلفی از جمله یافتن غذا از خود نشان می‌دهند. مورچه‌ها کوتاهترین مسیر^۲ بین لانه و منبع غذایی را بطور موفقیت‌آمیزی با استفاده از ماده شیمیایی به نام فرومون^۳ کشف می‌نمایند. هر مورچه هنگام حرکت از محلی به محل دیگر، مقداری فرومون برای تشخیص راه برگشت و نیز تعیین مسیر توسط سایر مورچگان، از خود به جای می‌گذارد. هر چه میزان فرومون یک مسیر بیشتر باشد، شانس انتخاب مسیر توسط سایر مورچگان افزایش می‌یابد. لذا مسیری که منجر به منبع غذایی شده، شانس بیشتری برای انتخاب توسط سایر مورچگان و نیز فرومون‌گذاری^۴ مجدد دارد. مقدار فرومون هر مسیر همواره متناسب با عبور دیگر مورچه‌ها و نیز فرآیند تبخیر^۵ در حال تغییر می‌باشد. پارامتر تبخیر سبب می‌شود تا در فرآیند جستجو غذا توسط مورچگان، مسیرهای طولانی و نافرجام، حذف شوند. بنابراین در طی فرآیند جستجو، کوتاهترین مسیر تا منبع غذایی، توسط مورچه‌ها کشف می‌شود. بدین ترتیب با الهام از رفتار مورچگان در جستجوی غذا فرآیند بهینه‌یابی مبتنی بر روش ACO بشرح شکل (۲-۴) قابل اجرا می‌باشد [۴۲-۴۳].

همان‌طور که در شکل (۲-۴) مشاهده می‌شود، الگوریتم ACO نیز همانند سایر الگوریتم‌های فراابتکاری نیازمند مقداردهی پارامترهای روش می‌باشد. بدین منظور پارامترهای اولیه الگوریتم کلونی مورچگان همچون تعداد اعضای جمعیت، نرخ تبخیر^۶، پارامتر بهنگام‌سازی محلی^۷ و ... مقداردهی می‌شود.

^۱ . Best and Worst Ant System (BWAS)

^۲ . Path

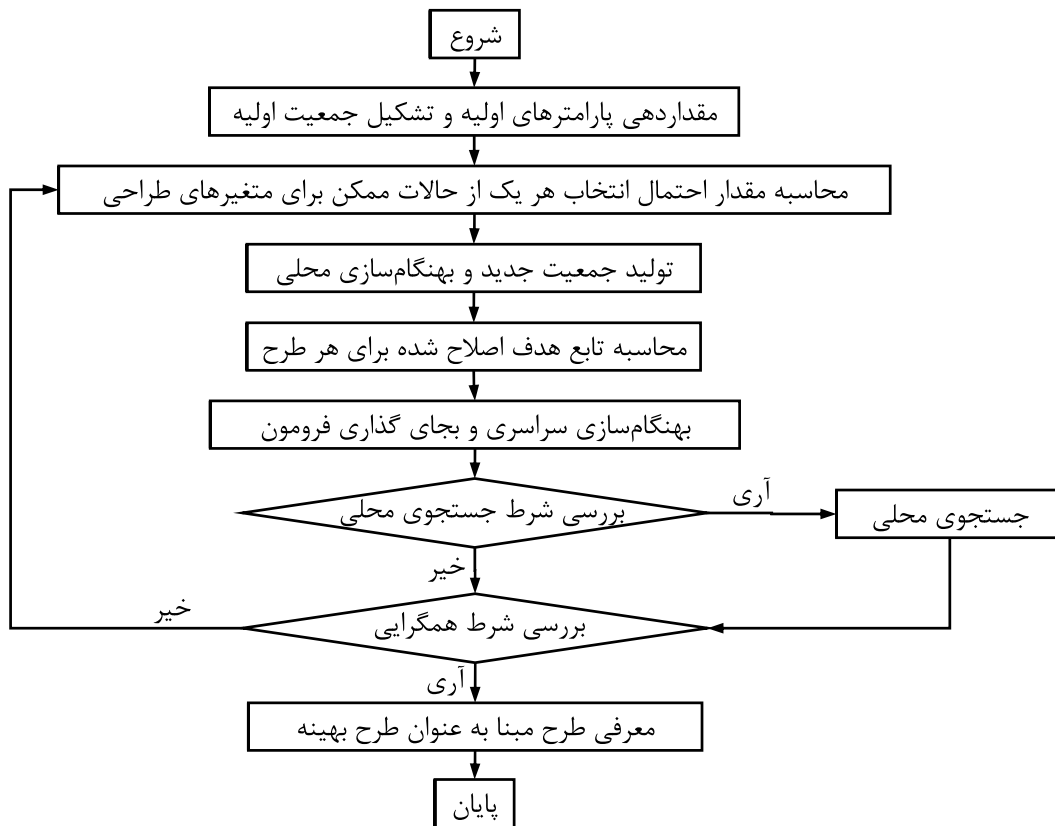
^۳ . Pheromone

^۴ . Deposit

^۵ . Evaporation

^۶ . Deposit Rate

^۷ . Local Update Parameter



شکل (۲-۴) - فرآیند بهینه‌یابی براساس روش ACO

در نخستین مرحله میزان فرومون اولیه^۱ برای تمامی حالات ممکن نیز مقداردهی می‌شود. بدین ترتیب با توجه به آن که برای هر متغیر طراحی به تعداد حالات ممکن، حق انتخاب وجود دارد؛ ماتریسی به نام Ph به ابعادی متناسب با تعداد متغیرهای طراحی و حالات ممکن برای متغیرهای طراحی بشرح رابطه (۲-۸) ایجاد می‌گردد. در این ماتریس هر درایه (Ph_{ij}) دلالت بر میزان فرومون i امین حالت از حالات ممکن برای j امین متغیر طراحی دارد [۳۵].

$$Ph = \begin{bmatrix} Ph_{11} & Ph_{12} & \dots & Ph_{1Nos} \\ Ph_{21} & Ph_{22} & \dots & Ph_{2Nos} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ Ph_{Ns1} & Ph_{Ns2} & \dots & Ph_{NsNos} \end{bmatrix}_{Ns \times Nos} \quad (۲-۸)$$

^۱ . Evaporation Rate

در رابطه (۸-۲)، Ns تعداد حالات ممکن برای هر متغیر طراحی و Nos تعداد متغیرهای طراحی مسئله می‌باشد. بر اساس رابطه (۸-۲)، میزان فرومون اولیه قابل مقداردهی می‌باشد. برای این منظور از رابطه (۹-۲) بشرح زیر استفاده می‌شود [۴۲].

$$Ph_{ij}^0 = \frac{1}{F(A)_{\min}} \quad (9-2)$$

در رابطه (۹-۲)، $F(A)_{\min}$ مقدار تابع هدف به ازای اختصاص اولین حالت از حالات ممکن برای هر متغیر طراحی به تمامی متغیرهای طراحی مسئله می‌باشد.

پس از مقداردهی اولیه پارامترهای الگوریتم ACO، احتمال انتخاب^۱ هر یک از حالات موجود برای هر متغیر طراحی بشرح رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$P_{ij} = \frac{[Ph_{ij}]^\alpha [v_i]^\beta}{\sum_{k=1}^{Ns} [Ph_{kj}]^\alpha [v_k]^\beta} \quad i=1, \dots, Ns \quad j=1, \dots, Nos \quad (10-2)$$

در رابطه فوق P_{ij} دلالت بر احتمال انتخاب نامین حالت (مسیر) برای نامین متغیر طراحی دارد. مقادیر α و β نیز بترتیب بیانگر اهمیت نسبی اثر فرومون^۲ و ضریب اهمیت نسبی اطلاعات اکتشافی^۳ می‌باشند [۴۴]. در رابطه (۱۰-۲) v_i نیز ضریب پدیداری^۴ برای نامین حالت از حالات ممکن می‌باشد که بشرح رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$v_i = \frac{1}{a_i} \quad a_i \in S \quad ; \quad i=1, \dots, Ns \quad (11-2)$$

در رابطه فوق a_i بیانگر حالت منتخب از حالات ممکن است.

پس از محاسبه مقادیر احتمال انتخاب، جمعیت جدید شکل می‌گیرد. بر این اساس مجموع مقادیر P_{ij} برای نامین متغیر طراحی برابر یک است. حال اگر درصد احتمال بدست آمده برای نامین متغیر طراحی به صورت یک دایره نشان داده شود؛ مقادیر P_{ij} ها، قطاع آن را تشکیل می‌دهد. با تولید یک عدد تصادفی بین صفر و یک، حالتی از حالات ممکن برای نامین متغیر طراحی، با قطاع بزرگتر

¹ . Selection Probabilities

² . Relative Importance of the Pheromone

³ . Relative Importance of the Heuristic Information

⁴ . Visibility Coefficient

شانس بیشتری برای انتخاب پیدا می‌کند. برای اجرای این روش، براساس رابطه زیر احتمال تجمعی P_i برای ژامین متغیر طراحی با نام \bar{P}_i^j بشرح (۱۲-۲) تعیین می‌شود.

$$\bar{P}_i^j = \sum_{k=1}^i P_{kj} \quad i = 1, \dots, N_s \quad (12-2)$$

حال عددی تصادفی در محدوده صفر تا یک تولید می‌شود. با مقایسه مقدار عدد تصادفی با مقادیر \bar{P}_i^j ، حالت منتخب از حالات ممکن برای ژامین متغیر طراحی مشخص می‌شود. این روال برای تمامی متغیرهای طراحی انجام شده و بدین ترتیب طرح جدید شکل می‌گیرد. فرآیند فوق به تعداد اعضای جمعیت تکرار می‌شود تا جمعیت جدید براساس مقادیر P_{ij} مبتنی بر میزان Ph_{ij} شکل گیرد. پس از تشکیل جمعیت جدید، میزان فرومون متناظر با تمامی حالات منتخب (مسیرهای طی شده) برای هر متغیر طراحی با ضریب ثابتی به صورت رابطه (۱۳-۲) کاهش می‌یابد [۴۳].

$$Ph_{ij}^{new} = \rho_0 Ph_{ij}^{old} \quad (13-2)$$

در رابطه (۱۳-۲)، Ph_{ij}^{old} و Ph_{ij}^{new} بترتیب مقدار فرومون جدید و قدیم برای مسیرهای طی شده است. ρ_0 نیز ضریب بهنگام‌سازی محلی است که دارای مقداری در محدوده صفر تا یک می‌باشد.

پس از بهنگام‌سازی محلی، مقدار تابع هدف اصلاح شده برای طرح‌های جمعیت جدید براساس رابطه (۳-۲) محاسبه می‌شود. سپس جمعیت حاضر براساس میزان $\phi(A)$ رتبه‌بندی و مرتب خواهد شد. به طوری که اولین طرح در جمعیت مرتب شده دارای کمترین مقدار $\phi(A)$ و آخرین طرح دارای بیشترین مقدار برای $\phi(A)$ باشد. با مرتب‌سازی جمعیت، عملیات بهنگام‌سازی سراسری در پیش گرفته می‌شود. برای این منظور کلیه مقادیر درایه‌های ماتریس فرومون متناسب با ضریب نرخ تبخیر بشرح رابطه (۱۴-۲) کاهش می‌یابند [۳۵ و ۴۴].

$$[Ph]^{new} = (1 - e_r)[Ph]^{old} \quad (14-2)$$

در رابطه (۱۴-۲)، e_r نرخ تبخیر سراسری فرومون است و رونویس old و new به ترتیب دلالت بر ماتریس قدیم و جدید دارد.

پس از انجام فرآیند بهنگام‌سازی سراسری فرومون^۱، نوبت به اعمال عملیات بجای گذاری فرومون^۲ بر روی مسیرهای طی شده می‌رسد. برای این منظور ابتدا جمعیت کوچکی از بهترین‌های جمعیت حاضر به نام μ به تعداد λ_r تشکیل می‌شود. سپس مقدار فرومون حالاتی از حالات ممکن برای متغیرهای طراحی که در مرحله انتخاب، برگزیده شده‌اند (مسیرهای طی شده) بشرح (۱۵-۲) افزایش می‌یابد [۳۵].

$$Ph_{ij} = Ph_{ij} + e_r \cdot \left[(\Delta Ph_{ij}) + \sum_{k=1}^{\lambda_r} (\lambda_r - k) (\Delta Ph_{ij})_k \right] \quad (15-2)$$

در رابطه (۱۵-۲)، k شماره طرح موردنظر در جمعیت μ می‌باشد. $(\Delta Ph_{ij})_k$ میزان فرومون لازم برای بجای گذاری در مسیر ij می‌باشد که به کیفیت جواب حاصل از k امین طرح بستگی دارد، لذا بشرح رابطه (۱۶-۲) محاسبه می‌شود.

$$(\Delta Ph_{ij})_k = \frac{1}{\phi(A)^k} \quad (16-2)$$

پس از فرومون‌گذاری، مراحل لازم برای هر تکرار از فرآیند بهینه‌یابی براساس الگوریتم ACO پایان می‌یابد. اما محققین متعددی در این مرحله، اعمال فرآیند جستجوی محلی را در صورت برقراری شرط مربوطه پیشنهاد می‌نمایند. روش‌های مختلفی برای جستجوی محلی در ACO وجود دارد. رایج‌ترین حالت که امروزه به عنوان بخشی از مراحل ACO ارائه می‌شود، اعمال تغییرات در میزان درایه‌های ماتریس فرومون است [۴۲]. برای این منظور فرومون مربوط به محدوده‌ای از حالات ممکن در اطراف بهترین طرح برابر مقدار فرومون اولیه و مابقی درایه‌های ماتریس فرومون برابر صفر منظور می‌شود. محدوده موردنظر براساس درصد مشخصی که در مرحله اول تعیین می‌شود، برای تعریف همسایگی به کار گرفته خواهد شد. به بیان دیگر چند حالت در بالا و پایین متغیرهای طراحی بهترین طرح، از حالات ممکن به عنوان محدوده همسایگی تعریف شده و فرومون متناظر با آن‌ها در ماتریس فرومون برابر مقدار فرومون اولیه و بقیه درایه‌های ماتریس فرومون برابر صفر منظور می‌گردد. نکته قابل توجه در این فرآیند، شرط جستجوی محلی می‌باشد. برای این منظور در صورتی که در چند

¹ . Global Pheromone Update

² . Accumulation of Pheromone

تکرار متوالی از فرآیند بهینه‌یابی، تغییری در مقدار تابع هدف بهترین طرح حاصل نشود، فرآیند جستجوی محلی در پیش گرفته می‌شود.

در هر صورت با اعمال یا عدم اعمال جستجوی محلی، فرآیند بهینه‌یابی مبتنی بر ACO با کنترل شرط خاتمه ادامه می‌یابد. بدین ترتیب می‌توان شرط خاتمه را با تکمیل تعداد مراحل تکرار کنترل نمود. به عبارت دیگر الگوریتم ACO مراحل شکل (۲-۴) را با محاسبه احتمال انتخاب و تولید جمعیت جدید تا تکمیل تعداد دفعات پیش بینی شده تکرار می‌نماید. زمانی که شرط خاتمه محقق شد، الگوریتم بهترین طرح را به عنوان طرح بهینه معرفی می‌نماید.

۲-۲-۵ الگوریتم اجتماع ذرات

از جمله الگوریتم‌های فراابتکاری که در دهه اخیر مورد توجه محققین علوم مهندسی قرار گرفته، روش جستجوی اجتماع ذرات (PSO) می‌باشد. این روش نخستین بار در سال ۱۹۹۵ توسط راسل ابرهات دانشمند علوم کامپیوتر و جیمز کندی روانشناس مسائل اجتماعی ارائه شده است [۱۸]. این محققین با مطالعه رفتار موجودات گروهی همچون پرندگان، ماهیان، انسان‌ها و ... اساس روش PSO را در علم بهینه‌یابی پی‌ریزی نمودند. به بیان دیگر الگوریتم PSO با الهام از شیوه زندگی موجودات گروهی در نیل به اهداف موردنظر شکل گرفته است. این موجودات با حرکت دسته جمعی، اهداف گروه همچون تهیه غذا، حفاظت از خود در برابر دشمن و ... را برآورده می‌سازند. به عنوان مثال، شکل (۲-۵) همکاری دسته جمعی ماهیان را در تهیه غذا و نیز حفاظت از خود در برابر دشمن را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، همکاری گروهی ماهیان سبب بدام انداختن پلانکتون‌ها^۱ در مرکز گروه و شکار آنها شده است. از سوی دیگر براساس این شکل ماهیان با حرکت دسته جمعی و گمراه ساختن ماهیان بزرگتر، از خود در برابر دشمن محافظت می‌نمایند. بدین ترتیب هر ماهی در مجموعه با رعایت مقررات انفرادی و نیز گروهی سبب نیل به اهداف گروه می‌شود.

^۱ . Planktons

این مقررات با تخصیص اطلاعات کلی در میان اعضای جمعیت شکل گرفته و سبب حرکت تکاملی در جهت نیل به اهداف گروه می‌شود. مطالعه حرکت دسته جمعی پرندگان در زمان مهاجرت نیز بیانگر حرکت تکاملی جهت دستیابی به اهداف گروه می‌باشد. رعایت قوانین تکی و گروهی توسط هر پرنده، سبب می‌شود تا با حرکت V شکل در زمان مهاجرت به اهدافی همچون حداقل‌سازی مصرف انرژی و ... دست یابند. مطالعه بر رفتار اجتماعی انسان‌ها نیز نتیجه‌ای مشابه دیگر موجودات دارد. البته شایان ذکر است که رفتار اجتماعی انسان بسیار پیچیده‌تر از سایر موجودات می‌باشد. زیرا علاوه بر ماهیت و حرکت فیزیکی، در فضای باور و اعتقادات نیز تکاپو دارد.



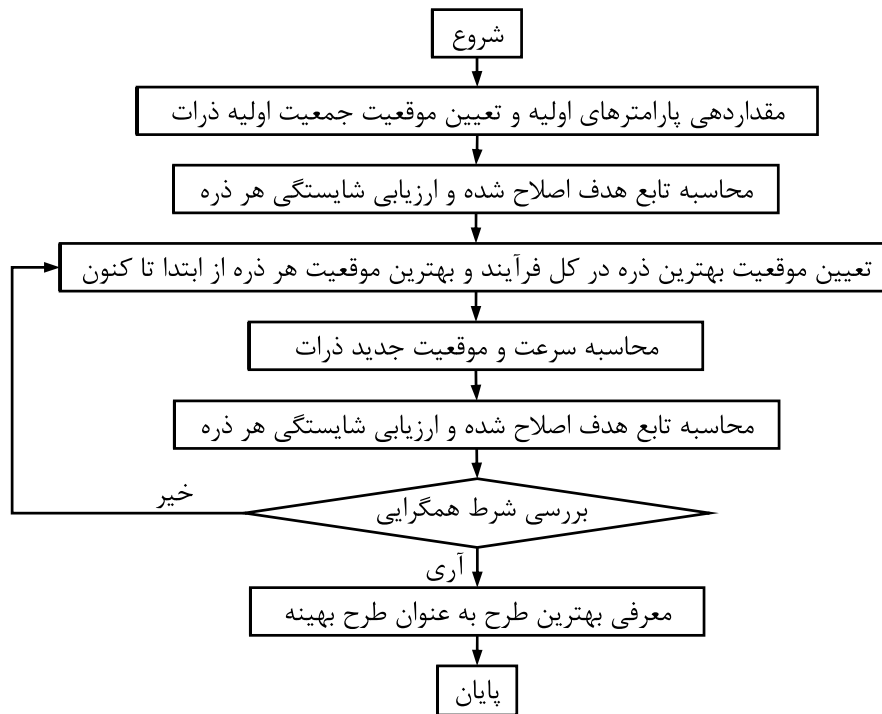
شکل (۲-۵) - همکاری گروه ماهیان در تهیه غذا و حفاظت از خود در برابر دشمنان

در هر صورت روش PSO با الهام از شیوه زندگی موجودات گروهی، به عنوان یکی از الگوریتم‌های فراابتکاری در علم بهینه‌یابی مطرح شده است. این روش نیز همانند سایر الگوریتم‌های فراابتکاری از یک جمعیت اولیه که شامل طرح‌های ممکن در فضای طراحی است، برای شروع فرآیند بهینه‌یابی استفاده می‌نماید. هر طرح در این جمعیت به عنوان یک ذره^۱ (عضو) در گروه شناخته می‌شود. هر ذره متناسب با مقدار سرعت^۲ مربوطه در فضای طراحی حرکت می‌نماید. سرعت هر ذره وابسته به بهترین موقعیت ذره مربوطه از ابتدا تا کنون و نیز موقعیت بهترین ذره در بین تمامی ذرات است. بدین ترتیب حرکت هر ذره در فضای ممکن در دو جهت صورت می‌گیرد. ۱- حرکت به سوی بهترین موقعیتی که

^۱ . Particle

^۲ . Velocity

ذره موردنظر از ابتدا تا کنون مشاهده نموده است. ۲- حرکت به سوی بهترین موقعیتی که دیگر ذرات از ابتدا تا کنون مشاهده نموده‌اند. نمودار شکل (۲-۶) فرآیند بهینه‌یابی براساس روش PSO را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۶) - فرآیند بهینه‌یابی براساس روش PSO

همان‌طور که در شکل (۲-۶) مشاهده می‌شود، الگوریتم PSO نیز همانند سایر الگوریتم‌های فراابتکاری، نیازمند یک جمعیت اولیه می‌باشد. در این الگوریتم هر ذره بیانگر یک طرح در فضای طراحی می‌باشد. بنابراین در یک فضای طراحی به ابعاد Nos موقعیت i امین ذره براساس بردار $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iNos}]^T$ تعریف می‌شود. از سوی دیگر سرعت ذره i ام نیز طبق بردار $V_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iNos}]^T$ بیان می‌شود. بدین ترتیب برای تولید جمعیت اولیه، ابتدا تعدادی ذره (طرح) به صورت تصادفی در فضای کاوش تولید می‌شود. مقدار سرعت اولیه برای تمامی ذرات برابر صفر منظور می‌شود. سپس مقدار تابع هدف اصلاح شده برای هر ذره بشرح رابطه (۲-۳) محاسبه می‌شود. براساس رابطه (۲-۳) می‌توان بهترین ذرات را مشخص نمود. بنابراین با توجه به آنکه در الگوریتم

PSO هر ذره می‌بایست به سوی بهترین موقعیت خود و نیز بهترین موقعیت دیگر ذرات حرکت نماید، بردارهای $P_i^k = [p_{i1}^k, p_{i2}^k, \dots, p_{iNos}^k]^T$ و $P^g = [p_1^g, p_2^g, \dots, p_{Nos}^g]^T$ تعریف می‌شوند. بردار P_i^k بیانگر بهترین موقعیت ذره نام از ابتدا تا k امین تکرار است و بردار P^g نیز بیانگر بهترین موقعیت یک ذره از ابتدا تا کنون در بین تمام ذرات می‌باشد. پس از تشکیل بردارهای موردنظر، موقعیت هر ذره (طرح) در فضای جستجو براساس روابط زیر تغییر می‌نماید [۳۵ و ۴۵].

$$X_i^{k+1} = X_i^k + \Delta t * V_i^{k+1} \quad (۱۷-۲)$$

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + C_1 \text{Ran}_1 \left(\frac{p_i^k - X_i^k}{\Delta t} \right) + C_2 \text{Ran}_2 \left(\frac{p_g - X_i^k}{\Delta t} \right) \quad (۱۸-۲)$$

در روابط (۱۷-۲) و (۱۸-۲)، X_i^k موقعیت ذره نام در k امین تکرار، V_i^k سرعت ذره نام در k امین تکرار، ω ضریب اینرسی وزنی^۱ سرعت مرحله قبل، Δt پارامتر بازه زمانی، Ran_1 و Ran_2 اعداد تصادفی یکنواخت در محدوده صفر تا یک و C_1 و C_2 نیز بترتیب پارامترهای شناختی^۲ و اجتماعی^۳ می‌باشند.

با حرکت هر ذره براساس رابطه (۱۷-۲) در فضای جستجوی و کسب موقعیت جدید، جمعیت ذرات جدید قابل تشکیل می‌باشد. پس از تشکیل جمعیت جدید، ابتدا شرط خاتمه الگوریتم بررسی می‌شود. در صورت عدم برقراری شرط خاتمه، فرآیند بهینه‌یابی براساس PSO با محاسبه تابع هدف اصلاح شده برای ذرات جمعیت جدید مجدداً تکرار می‌شود. این فرآیند تا برقراری شرط خاتمه ادامه می‌یابد. عموماً شرط خاتمه در الگوریتم PSO با کنترل تعداد دفعات تکرار ارزیابی می‌شود. برای این منظور الگوریتم مراحل بهینه‌یابی را به تعداد مشخص که از قبل تعیین شده، تکرار می‌نماید. سپس در نهایت با برقراری شرط خاتمه (پایان تکرارهای مشخص شده) الگوریتم بهترین ذره را به عنوان طرح بهینه معرفی می‌نماید.

^۱ . Inertia Weight

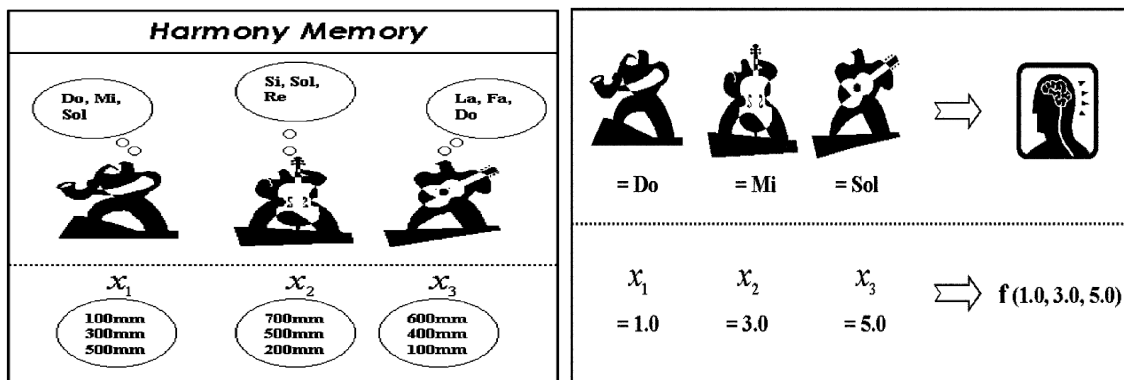
^۲ . Cognitive Factor

^۳ . Social Factor

۲-۲-۶ الگوریتم جستجوی هارمونی

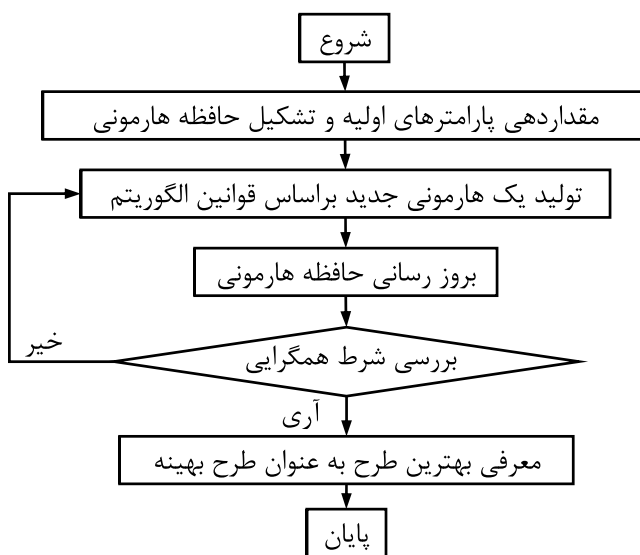
در راستای توسعه الگوریتم‌های فراابتکاری، لی و جیم در سال ۲۰۰۱ روش جستجوی هارمونی (HS) را ارائه و در بهینه‌یابی مسائل مختلف مهندسی مورد استفاده قرار دادند [۱۹]. در سالیان بعد این روش، توسط سایر محققین مورد بررسی و در برخی موارد تکامل و بهبود یافته است [۴۶-۴۷]. روش جستجوی هارمونی با الهام از فرآیند نوازندگان در حین نواختن موسیقی بصورت فی‌البداهه، برای یافتن حالتی مناسب شکل گرفته است. همان‌طور که در فرآیند اجرای موسیقی بصورت فی‌البداهه، نوازندگان در جستجوی یافتن بهترین هماهنگی برای اجرای کنسرتی زیبا می‌باشند، در فرآیند بهینه‌یابی نیز متغیرهای طراحی هر بردار، بدنبال یافتن بهترین مقدار برای تابع هدف می‌باشند. بدین‌سان برای اجرای فرآیند بهینه‌یابی براساس روش جستجوی هارمونی، هر نوازنده با متغیر طراحی جایگزین و شبیه‌سازی می‌شود. مجموعه نوازندگان در کنار یکدیگر نیز هم‌ارز با بردار طراحی بوده که متشکل از متغیرهای طراحی است. زیبایی و کیفیت صدای موسیقی نیز با مقدار تابع هدف به ازای بردار متغیرهای طراحی شبیه‌سازی و جایگزین خواهد شد. اجرای فی‌البداهه موسیقی نیز مشابه اتخاذ مقداری تصادفی برای متغیرهای طراحی است. همان‌طور که هر موسیقی‌دان در اجرای کنسرت سعی دارد تا با انتخاب نتی^۱ مناسب بهترین کنسرت را در کنار سایر موسیقی‌دانان اجرا نماید، در مسائل بهینه‌یابی نیز انتخاب مقداری مناسب برای هر متغیر طراحی امری مهم و ضروری است تا در کنار سایر متغیرهای طراحی، بهترین بردار طراحی را تشکیل دهد. شکل (۲-۷) قیاسی مناسب بین روش بهینه‌یابی HS و فرآیند اجرای موسیقی توسط موسیقی‌دانان را نمایش می‌دهد [۴۸-۴۹].

^۱ . Note



شکل (۷-۲) - مقایسه فرآیند بهینه‌یابی HS و اجرای موسیقی

بدین ترتیب فرآیند بهینه‌یابی براساس روش HS با الهام از فرآیند نوازندگان در اجرای کنسرتی زیبا و نیز اعمال تغییرات اندک، برای مسائل مهندسی قابل اجرا می‌باشد. شکل (۸-۲) کلیات الگوریتم روش جستجوی هارمونی را برای حل مسائل بهینه‌یابی نشان می‌دهد.



شکل (۸-۲) - فرآیند بهینه‌یابی براساس روش HS

همان‌طور که در شکل (۸-۲) مشاهده می‌شود، روش جستجوی هارمونی نیز در ابتدا نیازمند مقداردهی پارامترهای اولیه همچون پارامتر اندازه حافظه هارمونی^۱، نرخ در نظرگیری حافظه^۲، نرخ تنظیم نت^۳ و ... می‌باشد. از سوی دیگر در این روش می‌بایست ماتریس HM که بیانگر جمعیت اولیه

^۱ . Harmony Memory Size (HMS)

^۲ . Harmony Memory Considering Rate (HMCR)

^۳ . Pitch Adjusting Rate (PAR)

است را نیز تشکیل داد. این ماتریس با عنوان حافظه هارمونی^۱ شناخته شده و طرح‌های موجود در آن بصورت تصادفی به تعداد HMS تولید می‌شود. نکته حائز اهمیت در این ماتریس آن است که کلیه طرح‌های موجود می‌بایست فاقد نقض قیود باشند. به بیان دیگر برای تشکیل حافظه هارمونی طرحی بصورت تصادفی تولید و سپس میزان نقض قیود سازه در پاسخ به کلیه وضعیت‌های بارگذاری بررسی می‌شود. در صورت عدم نقض قیود، طرح موردنظر در ماتریس HM ذخیره می‌شود، در غیر این صورت مجدداً طرحی بصورت تصادفی تولید می‌شود. این فرآیند آنقدر تکرار می‌شود تا به تعداد HMS طرح بدون نقض قید در ماتریس HM ذخیره شود [۵۰]. البته پیشنهادهاتی برای جلوگیری از این عملیات تکراری جهت تولید جمعیت اولیه ارائه شده است. براین اساس جمعیت اولیه بصورت کاملاً تصادفی تولید و مقدار تابع هدف اصلاح شده برای هر طرح براساس رابطه (۲-۳) محاسبه می‌شود. براساس رابطه (۲-۳) هر طرحی که دارای نقض قیود و تابع هدف کمتری باشد، مقدار تابع هدف اصلاح شده کمتری نیز خواهد داشت. در هر صورت ماتریس HM با تولید تصادفی مقادیر متغیرهای طراحی بشرح رابطه زیر تشکیل خواهد شد [۳۵].

$$HM = \begin{bmatrix} a_1^1 & a_2^1 & \dots & a_{Nos}^1 \\ a_1^2 & a_2^2 & \dots & a_{Nos}^2 \\ \vdots & \vdots & & \\ a_1^{HMS} & a_2^{HMS} & \dots & a_{Nos}^{HMS} \end{bmatrix}_{HMS \times Nos} \quad (19-2)$$

پس از تشکیل ماتریس HM میزان تابع هدف اصلاح شده برای هریک از طرح‌های موجود بشرح رابطه (۲-۳) محاسبه و تعیین می‌شود.

در ادامه هارمونی جدید که مترادف با طرحی جدید می‌باشد، براساس قوانین HS تشکیل می‌شود. برای این منظور یک بردار جدید طراحی $A' = [a_1', a_2', \dots, a_{Nos}']$ بر اساس سه حالت ممکن مبتنی بر قوانین HS و پارامترهای $HMCR$ و PAR ساخته می‌شود. بر این اساس هر مقدار a_i' می‌تواند مبتنی بر پارامتر $HMCR$ یا بصورت تصادفی مجدداً تولید شود و یا بر اساس مقادیر متناظر موجود در HM یعنی a_i^1 تا a_i^{HMS} تعیین گردد. این مرحله با تولید یک عدد تصادفی بین صفر و یک

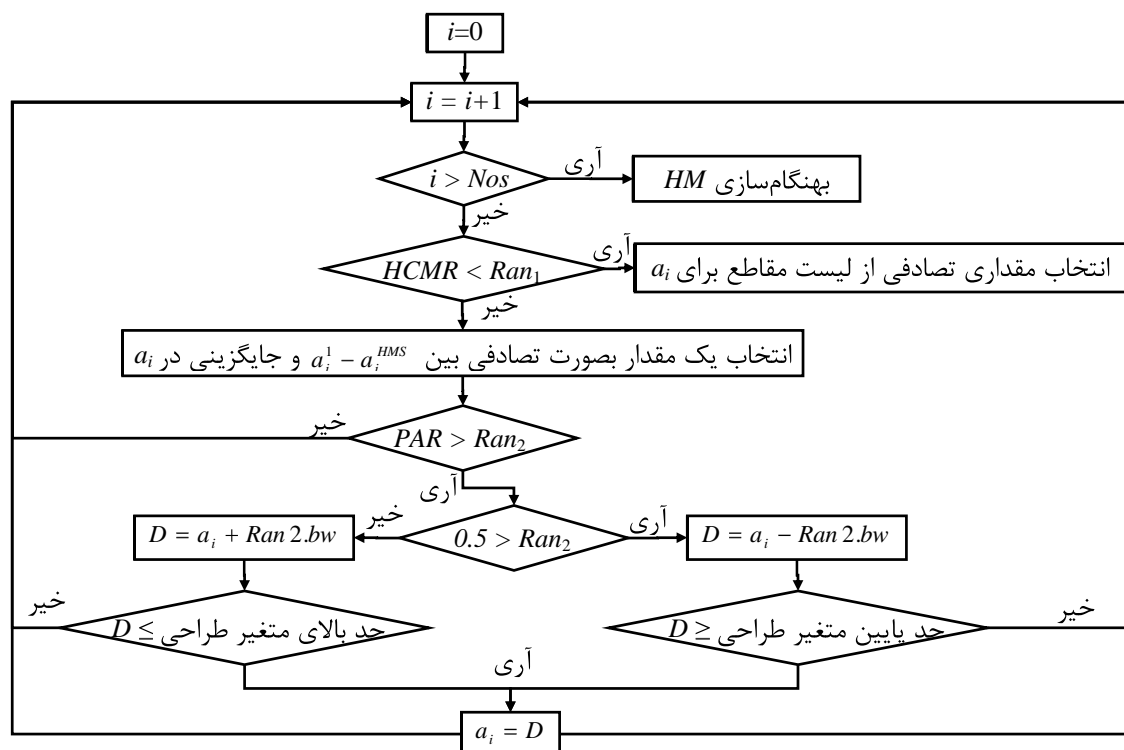
^۱ . Harmony Memory (HM)

(Ran_1) و مقایسه آن با مقدار $HMCR$ قابل اجرا است. در صورتی که عدد تصادفی بیشتر از $HMCR$ باشد، a_i' بصورت تصادفی براساس محدوده مجاز λ امین متغیر طراحی مقداردهی می‌شود. اما در صورتی که عدد تصادفی (Ran_1) از مقدار $HCMR$ کمتر باشد، a_i' مبتنی بر مقادیر متناظر موجود در ماتریس HM تعیین خواهد شد. برای این منظور مقدار a_i' بصورت تصادفی برابر یکی از مقادیر a_i^1 تا a_i^{HMS} قرار داده می‌شود. به بیان دیگر در این مرحله هر متغیر از بردار طراحی A' با احتمال $HCMR$ درصد از مقادیر موجود در ماتریس HM انتخاب می‌شود و با احتمال $1-HCMR$ درصد ممکن است مجدداً بصورت تصادفی تولید شود. در ادامه در صورتی که a_i' از مقادیر HM تعیین شود، با احتمال $1-PAR$ درصد، همسایگی مقدار a_i' نیز جستجو می‌شود. برای این منظور عدد تصادفی دیگری در محدوده صفر تا یک (Ran_2) تولید و با مقدار پارامتر PAR مقایسه می‌شود. اگر عدد تصادفی کوچکتر از PAR باشد، a_i' بدون تغییر باقی می‌ماند. اما در صورتی که عدد تصادفی تولید شده (Ran_2) از مقدار PAR بیشتر باشد، a_i' تغییر کرده و از همسایگی مقدار فعلی، متناسب با محدوده متغیر طراحی انتخاب می‌شود. به بیان دیگر در این شرایط مقدار a_i' براساس میزان پهنای باندها¹ همسایگی (bw) بشرح فلوجارت شکل (۹-۲) تغییر می‌نماید. شرح کامل این مرحله برای روش HS در شکل (۹-۲) قابل مشاهده است [۴۸-۵۰].

پس از تشکیل بردار جدید (هارمونی جدید) براساس شکل (۹-۲) نتیجه با مقادیر موجود در ماتریس HM مقایسه می‌شود. در صورتی که بردار جدید A' از بدترین طرح موجود در HM بهتر باشد، بردار جدید A' جایگزین بدترین طرح موجود در HM خواهد شد. در غیراین صورت حافظه هارمونی بدون تغییر باقی می‌ماند. به بیان دیگر در این مرحله طرح‌های موجود در ماتریس HM براساس طرح جدید A' حاصل از شکل (۹-۲) بروزسانی می‌شود. معیار برتری در مقایسه برای جایگزینی طرح جدید، براساس رابطه (۳-۲) صورت می‌پذیرد. در نهایت شرط خاتمه الگوریتم بررسی خواهد شد. تکرار مراحل الگوریتم به تعداد دفعات مشخص، از مرسوم‌ترین شروط خاتمه برای روش

¹ . Bandwidth (bw)

HS می‌باشد. به عبارت دیگر الگوریتم HS مراحل فوق را تا تکمیل تعداد دفعات پیش‌بینی شده تکرار می‌کند. زمانی که شرط خاتمه محقق شود، الگوریتم بهترین طرح در حافظه هارمونی را به عنوان طرح بهینه معرفی می‌نماید.



شکل (۹-۲) - تولید هارمونی جدید در روش HS

۷-۲-۲ الگوریتم جستجوی ذرات باردار

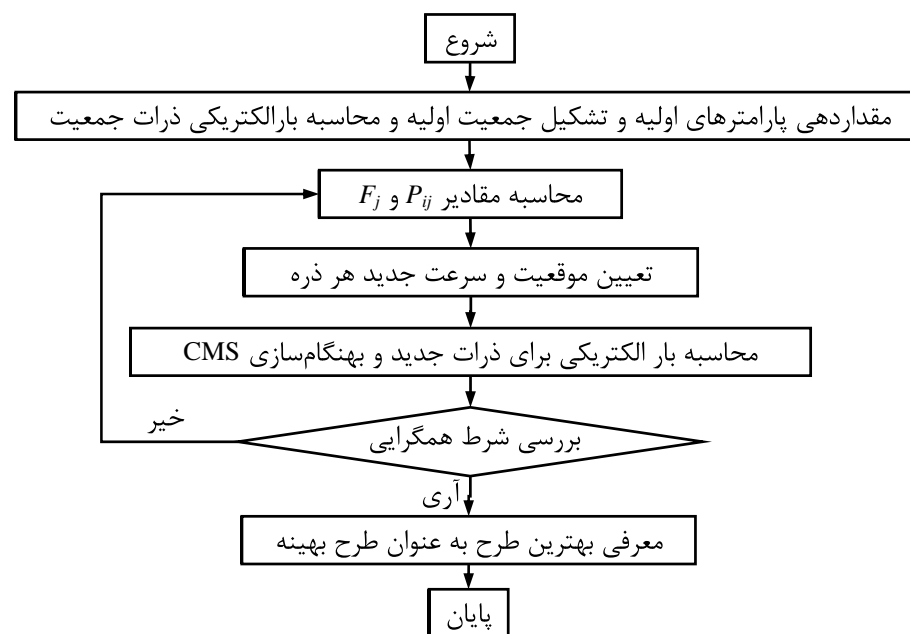
روش جستجوی ذرات باردار (CSS) از جمله الگوریتم‌های فراابتکاری است که نخستین بار توسط کاوه و همکاران در سال ۲۰۱۰ ارائه و در سال‌های بعد با عناوینی همچون CSS-FBM، MCSS و ... توسعه یافت [۲۲ و ۵۱-۵۲]. در روش CSS، فرآیند بهینه‌یابی براساس قوانین ذرات باردار و قوانین حرکت نیوتن^۱ انجام می‌شود. برای این منظور هر بردار متغیرهای طراحی به عنوان یک ذره باردار^۲ در فضای طراحی در نظر گرفته می‌شود. هر ذره دارای یک میدان الکتریکی^۳ است که

^۱ . Newtonian Mechanic Laws

^۲ . Charged Particle (CP)

^۳ . Electrical Fields

بواسطه مقدار بار الکتریکی مبتنی بر میزان شایستگی طرح هم‌ارز با ذره تعریف می‌شود. در ادامه هر ذره تحت تأثیر میدان الکتریکی دیگر ذرات قرار گرفته و متناسب با مقدار نیروی الکتریکی^۱ ناشی از دیگر ذرات، در فضای طراحی حرکت نموده و بدین ترتیب موقعیت جدیدی را در فضای طراحی کسب می‌نماید. چگونگی حرکت ذرات در فضای کاوش براساس قوانین حرکت نیوتن پی‌ریزی شده است. بدین ترتیب که هر ذره مبتنی بر موقعیت سابق خود و میزان سرعت و شتاب ناشی از نیروی وارده توسط دیگر ذرات، به سمت موقعیت جدید حرکت می‌نماید تا بهترین موقعیت در فضا را بدست آورد. بهترین موقعیت برای هر ذره، مکانی است که بواسطه قرارگیری در موقعیت موردنظر، دارای بیشترین میدان الکتریکی است. بنابراین هر ذره در کنار دیگر ذرات، تلاش می‌نماید که به بهترین موقعیت مکانی خود برسد. با الهام از این مفاهیم روش CSS بصورت نمودار شکل (۲-۱۰) قابل اجرا می‌باشد.



شکل (۲-۱۰) - فرآیند بهینه‌یابی براساس روش CSS

همان‌طور که در شکل (۲-۱۰) مشاهده می‌شود، الگوریتم CSS نیز همانند سایر روش‌های فراابتکاری، نیازمند مقداردهی اولیه برای تعدادی از پارامترها است. پارامترهایی از قبیل تعداد ذرات هر جمعیت

^۱ . Electrical Force

(NP)، شعاع ذرات (a^{CSS}) و ... می‌بایست در ابتدا مقداردهی شوند. در ادامه جمعیت اولیه بصورت تصادفی با عنوان حافظه بار^۱ تولید می‌شود. هر عضو از این جمعیت با نام ذره شناخته شده و میزان سرعت اولیه برای تمامی ذرات برابر صفر منظور می‌شود. سپس می‌بایست میزان بار الکتریکی هر ذره محاسبه گردد. برای این منظور ابتدا میزان تابع هدف اصلاح شده برای هر ذره بشرح رابطه (۲-۳) تعیین می‌شود. سپس میزان بار الکتریکی هر ذره بشرح رابطه (۲-۲۰) قابل محاسبه است [۲۲ و ۵۳].

$$q_j = \frac{\phi_j - \phi_{worst}}{\phi_{best} - \phi_{worst}} \quad j = 1, \dots, NP \quad (2-20)$$

در رابطه (۲-۲۰)، q_j بار الکتریکی هر ذره^۲ است، ϕ_j مقدار تابع هدف اصلاح شده برای ژامین ذره جمعیت حاضر می‌باشد. ϕ_{best} و ϕ_{worst} به ترتیب مقادیر تابع هدف اصلاح شده برای بهترین و بدترین ذرات جمعیت حاضر می‌باشد. به بیان دیگر ϕ_{best} مربوط به کمترین مقدار تابع هدف اصلاح شده و ϕ_{worst} مقدار بیشترین تابع هدف اصلاح شده در جمعیت حاضر است.

پس از محاسبه میزان بار الکتریکی ذرات، جمعیت کوچکی از بهترین‌های جمعیت حاضر با عنوان CMS ساخته می‌شود. به عبارت دیگر تعدادی از بهترین ذرات (طرح) جمعیت حاضر با بیشترین مقدار بار الکتریکی در جمعیت CMS سازماندهی می‌شوند.

با تشکیل جمعیت CMS تمامی عوامل اولیه برای روش CSS مهیا شده و الگوریتم فرآیند بهینه‌یابی را با محاسبه احتمال جذب هر ذره توسط سایر ذرات (P_{ij}) آغاز می‌نماید. برای این منظور مقدار P_{ij} بشرح رابطه (۲-۲۱) محاسبه می‌شود [۵۳].

$$P_{ij} = \begin{cases} 1 & \frac{\phi_i - \phi_{best}}{\phi_j - \phi_i} > ran_3 \quad \vee \quad \phi_j < \phi_i \\ 0 & else \end{cases} \quad (2-21)$$

در رابطه (۲-۲۱)، ran_3 یک عدد تصادفی در محدوده صفر تا یک می‌باشد. مقادیر ϕ_j و ϕ_i نیز به ترتیب دلالت بر مقدار تابع هدف اصلاح شده برای ژامین و ژامین ذره در جمعیت حاضر دارند.

^۱ . Charged Memory (CM)

^۲ . Magnitude of Charge (q_j)

با محاسبه P_{ij} برای ذرات جمعیت حاضر، مقدار نیروی برآیند وارد بر هر ذره توسط دیگر ذرات،

براساس رابطه (۲۲-۲) قابل محاسبه می‌باشد [۲۲ و ۵۳].

$$F_j = q_j \sum_{i, i \neq j} \left(\frac{q_i}{a^3} r_{ij} \cdot i_1 + \frac{q_i}{r_{ij}^2} \cdot i_2 \right) P_{ij} (X_i - X_j), \quad \begin{cases} i_1 = 1, i_2 = 0 & \Leftrightarrow r_{ij} < a \\ i_1 = 0, i_2 = 1 & \Leftrightarrow r_{ij} \geq a \end{cases} \quad (22-2)$$

در رابطه (۲۲-۲)، F_j نیروی برآیند وارد بر ذره j ام است. a^{CSS} و q_j بترتیب شعاع^۱ و بار الکتریکی ذره

j ام بوده که مقدار شعاع عموماً برابر واحد فرض می‌شود. r_{ij} فاصله بین ذرات i و j بوده که براساس

رابطه (۲۳-۲) محاسبه می‌شود.

$$r_{ij} = \frac{\|X_i - X_j\|}{\left\| \frac{X_i + X_j}{2} - X_{best} \right\| + \varepsilon} \quad (23-2)$$

در رابطه (۲۳-۲)، X_i و X_j به ترتیب موقعیت نامین و j امین ذره باردار در فضای طراحی است. X_{best}

مربوط به موقعیت بهترین ذره در جمعیت حاضر بوده و ε یک عدد مثبت کوچک برای جلوگیری از

بی معنی شدن کسر (صفر شدن مخرج) می‌باشد.

در ادامه براساس روش CSS، هر ذره متناسب با نیروی وارده توسط دیگر ذرات و نیز قوانین

حرکت نیوتن در فضای کاوش حرکت می‌نماید. برای این منظور پس از تعیین مقدار نیروی وارد بر

j امین ذره توسط دیگر ذرات (F_j)، ذره j در فضای طراحی براساس رابطه (۲۴-۲) به سوی موقعیت

جدید ($X_{j,new}$) حرکت می‌نماید [۲۲ و ۵۳].

$$X_{j,new} = X_{j,old} + Ran_1 \cdot k_a \frac{F_j}{m_j} \cdot \Delta t^2 + Ran_2 \cdot k_v \cdot V_{j,old} \cdot \Delta t \quad (24-2)$$

در رابطه فوق $X_{j,old}$ و $X_{j,new}$ به ترتیب موقعیت قدیم و جدید j امین ذره در فضای کاوش می‌باشند.

$V_{j,old}$ سرعت قدیم ذره j ام و Ran_1 و Ran_2 اعدادی تصادفی در محدوده صفر تا یک است. Δt پارامتر

بازه زمانی و m_j جرم j امین ذره است که برابر q_j در نظر گرفته می‌شود. k_a و k_v نیز به ترتیب ضریب

^۱ . Radius (a)

شتاب^۱ و ضریب سرعت^۲ می‌باشند که برای کنترل میزان شتاب و سرعت ذره در رابطه (۲-۲۴) لحاظ می‌شوند. این مقادیر در طی فرآیند بهینه‌یابی براساس روابط زیر تنظیم خواهند شد.

$$k_a = 0.5(1 + iter/iter_{max}) \quad (25-2)$$

$$k_v = 0.5(1 - iter/iter_{max}) \quad (26-2)$$

در روابط فوق $iter$ دلالت بر شماره تکرار و $iter_{max}$ برابر تعداد کل تکرارها در فرآیند بهینه‌یابی می‌باشد.

پس از محاسبه موقعیت جدید هر ذره، سرعت جدید هر ذره ($V_{j,new}$) برای تکرار بعدی بشرح رابطه (۲-۲۷) محاسبه می‌شود.

$$V_{j,new} = \frac{X_{j,new} - X_{j,old}}{\Delta t} \quad (27-2)$$

در روش CSS نکته حائز اهمیت در تعیین موقعیت جدید ذرات، امکان خروج هر ذره از محدوده مجاز براساس رابطه (۲-۲۴) می‌باشد. به بیان دیگر متغیرهای طراحی دارای حدود بالا و پایین می‌باشند و ممکن است در مرحله حرکت ذرات براساس رابطه (۲-۲۴)، یکی از متغیرهای طراحی از محدوده مجاز خارج شود. لذا در این شرایط عملیات اصلاح موقعیت جدید برای متغیر طراحی مربوطه انجام می‌شود. برای این منظور در روش CSS موقعیت متغیر طراحی برای ذره مربوطه با استفاده از جمعیت CMS و قوانین روش جستجوی هارمونی در تولید هارمونی جدید، تغییر نموده و در محدوده مجاز مقاداردهی می‌شود. بدین ترتیب موقعیت مناسب و مجاز برای ذره مربوطه ارائه خواهد شد [۲۲ و ۵۳].

با محاسبه موقعیت جدید و سرعت جدید برای تمامی ذرات جمعیت حاضر، فرآیند بهینه‌یابی با تعیین مقدار بار الکتریکی ذرات جدید و بهنگام‌سازی جمعیت CMS ادامه می‌یابد. بدین‌منظور براساس رابطه (۲-۳) مقدار تابع هدف اصلاح شده برای هر ذره (طرح) محاسبه و سپس با استفاده از رابطه (۲-۲۰) مقدار بار الکتریکی ذرات جدید تعیین می‌شود. در ادامه براساس میزان بار الکتریکی ذرات جدید، جمعیت CMS که متشکل از بهترین ذرات می‌باشد، بروزرسانی خواهد شد.

¹ . Acceleration Coefficient

² . Velocity Coefficient

برای این منظور در صورتی که ذره‌ای از ذرات جدید بار الکتریکی بیشتری نسبت به بدترین ذره *CMS* داشته باشد، ذره جدید جایگزین ذره نامناسب در جمعیت *CMS* خواهد شد. پس از بهنگام‌سازی جمعیت *CMS*، شرط خاتمه بررسی می‌شود. در روش *CSS* شرط خاتمه الگوریتم با تکمیل تعداد دفعات تکرار کنترل می‌شود. به عبارت دیگر روش *CSS* مراحل فوق را با محاسبه P_{ij} و F_j آغاز و تا تکمیل تعداد دفعات پیش‌بینی شده تکرار می‌نماید. زمانی که شرط خاتمه محقق شود، الگوریتم بهترین طرح (ذره) را به عنوان طرح بهینه معرفی می‌نماید.

۲-۳ الگوریتم‌های ترکیباتی

همان طور که پیشتر بیان شد، هر الگوریتم فراابتکاری فضای طراحی را با الهام از فرآیندهای تکاملی محیط پیرامون بر پایه اصول تنوع و تشدید به شیوه‌ای منحصر بفرد جستجو می‌نماید. این شیوه منحصر بفرد، سبب شده است تا برخی از الگوریتم‌های فراابتکاری بر پایه اصل تشدید پی‌ریزی شده و جستجوی محلی را بهتر از جستجوی سراسری انجام دهند. روش‌هایی همچون جستجوی ممنوعه (TS)، جستجوی هارمونی (HS) و ... از جمله روش‌های می‌باشند که بر پایه اصل تشدید بنا نهاده شده و فضای طراحی را براساس فرآیند جستجوی محلی کاوش می‌نمایند. اما برخی دیگر از الگوریتم‌های فراابتکاری متناسب با شیوه کاوش در فرآیند جستجوی سراسری موفق‌تر از جستجوی محلی می‌باشند. روش اجتماع ذرات (PSO)، روش جستجوی ذرات باردار (CSS) و ... از جمله این روش‌ها می‌باشند که در آن‌ها راهکارهای اکتسابی از محیط پیرامون سبب افزایش توانایی در بحث اصل تنوع نسبت به اصل تشدید شده است. برخی دیگر از الگوریتم‌های فراابتکاری متناسب با شیوه اکتسابی از محیط پیرامون، دو اصل تنوع و تشدید را در نظر گرفته‌اند، اما در بحث ایجاد توازن منطقی بین اصول تنوع و تشدید، نیازمند راهکارهای ویژه‌ای می‌باشند. این مسائل سبب شده تا هر یک از الگوریتم‌های فراابتکاری محاسن و بعضاً معایب ویژه‌ای در چگونگی جستجوی فضای طراحی جهت نیل به نقطه کمینه داشته باشند. به همین دلیل در سالیان اخیر برخی از محققین علم

بهینه‌یابی، به ترکیب روش‌های فراابتکاری اقدام نموده، تا بدین ترتیب از تمامی مزایای روش‌های ترکیب شده استفاده نمایند. به بیان دیگر این محققین سعی نموده‌اند تا با ترکیب دو یا سه الگوریتم فراابتکاری، روشی ترکیبی ارائه دهند که دارای مزایای الگوریتم‌های فراابتکاری اولیه بوده و معایب هر روش در الگوریتم ترکیبی کمرنگ و یا محو شده باشد. تعداد این الگوریتم‌های ترکیبی زیاد بوده و بسیاری از محققین در علوم مختلف متناسب با ویژگی‌های مسئله بهینه‌یابی، الگوریتم‌های ترکیبی مختلفی بر پایه روش‌های فراابتکاری ارائه نموده‌اند. به همین سبب در این بخش به بررسی مختصر چند الگوریتم ترکیبی به عنوان نمونه پرداخته شده است.

۲-۳-۱ الگوریتم ترکیبی PSO و ACO (HPSACO)^۱

روش بهینه‌یابی HPSACO از جمله الگوریتم‌های ترکیبی است که بر پایه ترکیب دو روش مطرح PSO و ACO شکل گرفته است [۵۴-۵۵]. در این روش فرآیند بهینه‌یابی در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول، بهینه‌یابی براساس روش PSO صورت پذیرفته و عملیات بهینه‌یابی براساس الگوریتم ACO در مرحله دوم انجام می‌شود. به بیان دیگر در الگوریتم HPSACO ابتدا PSO محدوده طرح بهینه را می‌یابد (جستجوی سراسری) و ACO فرآیند جستجوی محلی را براساس یافته‌های PSO انجام می‌دهد (جستجوی محلی). برای این منظور، بر پایه روش PSO، تعدادی ذره (طرح) بصورت تصادفی در فضای کاوش تولید می‌شود. این طرح‌ها جمعیت اولیه را تشکیل می‌دهند. سپس موقعیت ذرات براساس بهترین ذره (شایسته‌ترین طرح)، بهترین موقعیت هر ذره از ابتدا تا کنون و نیز یک ذره انتخابی در جمعیت حاضر، تغییر می‌نماید. این حرکت در فضای طراحی بر پایه اصول روش PSO با اندکی تغییرات شکل گرفته است. بدین‌سان موقعیت هر ذره (طرح) در روش HPSACO نیز همانند روش PSO بشرح رابطه (۲-۱۷) محاسبه می‌شود. اما در روش HPSACO سرعت هر ذره با اندکی تغییرات نسبت به روش PSO بشرح رابطه (۲-۲۸) تعیین می‌شود [۵۴-۵۵].

^۱ . Heuristic Particle Swarm Ant Colony Optimization (HPSACO)

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + C_1 \text{Ran}_1 \left(\frac{P_i^k - X_i^k}{\Delta t} \right) + C_2 \text{Ran}_2 \left(\frac{P_g - X_i^k}{\Delta t} \right) + C_3 \text{Ran}_3 \left(\frac{R_i^k - X_i^k}{\Delta t} \right) \quad (28-2)$$

همان‌طور که در رابطه فوق مشاهده می‌شود، در روش HPSACO عبارت چهارم یعنی

$$C_3 \text{Ran}_3 \left(\frac{R_i^k - X_i^k}{\Delta t} \right)$$

عبارت، C_3 ضریب تأثیر جمعیت حاضر^۱ و Ran_3 عدد تصادفی یکنواخت در محدوده صفر تا یک می‌باشد. R_i^k نیز موقعیت i امین ذره انتخابی (بصورت تصادفی) از جمعیت حاضر در k امین تکرار است.

سایر پارامترهای رابطه (28-2) مشابه رابطه (18-2) می‌باشد.

پس از حرکت هر ذره (طرح) در فضای کاوش براساس روابط (28-2) و (17-2)، فرآیند

بهینه‌یابی در HPSACO وارد مرحله دوم می‌شود. در مرحله دوم ACO فرآیند کاوش را براساس

جستجوی محلی ادامه می‌دهد. برای این منظور در این مرحله، مورچه‌ها عملیات بجای گذاری فرومون

را براساس نتایج PSO در پیش می‌گیرند. بدین ترتیب براساس رابطه (29-2) و الگوریتم ACO

همسایگی بهترین ذره حاصل از مرحله قبل (روش PSO) فرومون گذاری و جستجو می‌شود [54-55].

$$Z_i^k = N(P_g^k, \sigma) \quad (29-2)$$

در رابطه فوق Z_i^k بیانگر i امین مسیر در k امین تکرار می‌باشد. $N(P_g^k, \sigma)$ نیز یک مقدار تصادفی بین

σ و P_g^k است که σ بشرح رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\sigma = (A_{\max} - A_{\min}) \times \eta \quad (30-2)$$

در رابطه فوق η پارامتری است که در ابتدا توسط کاربر مشخص می‌شود. براساس رابطه (29-2)

مسیرهای خوب فرومون گذاری و نهایتاً طرحی در همسایگی بهترین طرح (P_g^k) تولید خواهد شد. در

ادامه مقدار تابع هدف اصلاح شده برای Z_i^k بر اساس رابطه (3-2) محاسبه می‌شود. در صورتی که

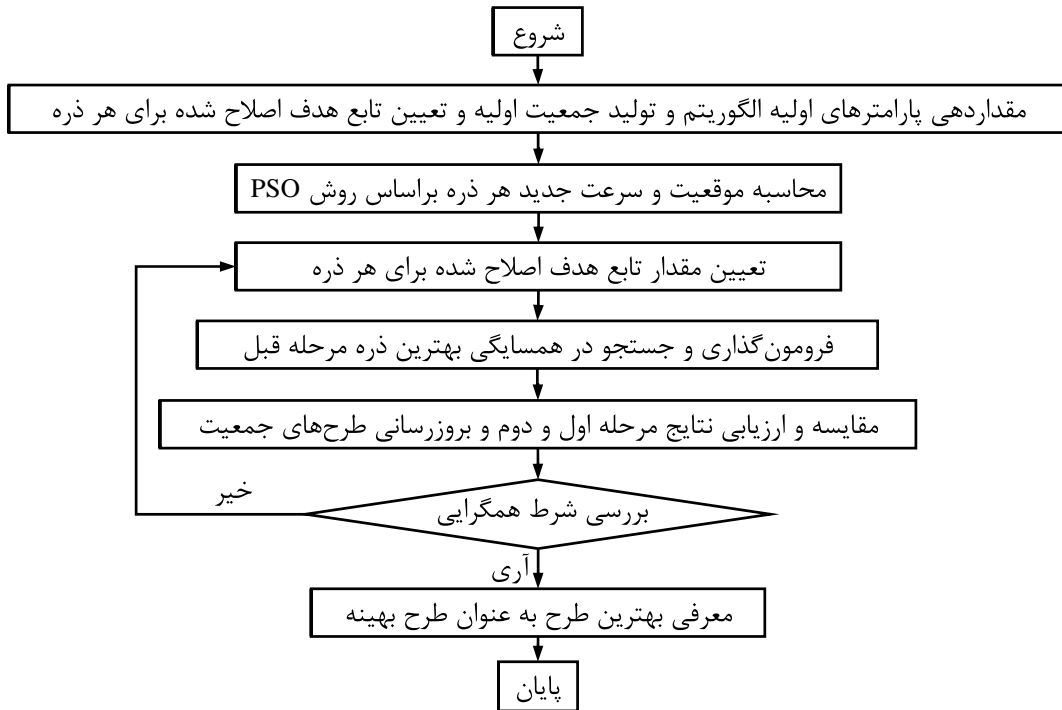
مقدار $\phi(Z_i^k)$ از مقدار تابع هدف اصلاح شده بهترین طرح مرحله اول، کمتر باشد، Z_i^k جایگزین طرح

موردنظر خواهد شد. در غیر این صورت طرح‌های جمعیت حاصل از مرحله اول تغییر نکرده و مجدداً

براساس رابطه (28-2) و (17-2) مبتنی بر روش PSO در فضای طراحی حرکت می‌نمایند. این

¹ . Passive Congregation Coefficient

فرآیند تا برقراری شرط خاتمه ادامه می‌یابد. شکل (۲-۱۱) مراحل بهینه‌یابی براساس روش HPSACO را نشان می‌دهد [۵۵].



شکل (۲-۱۱) - فرآیند بهینه‌یابی براساس روش HPSACO

۲-۳-۲ الگوریتم ترکیبی PSO، ACO و HS

فرآیند بهینه‌یابی براساس روش HPSACO را می‌توان با بکارگیری الگوریتم HS بهبود بخشید. برای این منظور در صورتی که موقعیت جدید یک ذره در فرآیند بهینه‌یابی HPSACO از محدوده متغیر طراحی خارج شود، آنگاه مقدار متغیر طراحی براساس شیوه تولید هارمونی در روش HS اصلاح و تعیین می‌شود. بدین ترتیب در صورت خروج مقدار یک متغیر طراحی از محدوده مجاز، عدد تصادفی در محدوده صفر تا یک تولید می‌شود و سپس براساس روش HS و یکی از سه حالت زیر، مقدار متغیر طراحی مربوطه اصلاح خواهد شد [۵۶].

حالت (۱): در صورتی که عدد تولید شده از مقدار $HMCR$ (مقداردهی شده توسط کاربر) بیشتر باشد، متغیر طراحی موردنظر بطور تصادفی در محدوده مجاز، مقداردهی می‌شود. اما در غیر

این صورت، ابتدا متغیر طراحی مربوطه از میان مجموعه HM که شامل بهترین ذرات می‌باشد، انتخاب و مقداردهی می‌شود. سپس در ادامه این حالت (عدد تصادفی کوچکتر از $HMCR$)، عدد تصادفی جدیدی تولید شده و دو حالت زیر بررسی می‌شود.

حالت (۲): در صورتی که عدد تصادفی جدید تولید شده از مقدار PAR (مقداردهی شده توسط کاربر براساس روش HS) بیشتر باشد، مقدار متغیر طراحی بدون تغییر باقی می‌ماند و در اصطلاح هیچ کاری انجام نمی‌شود.

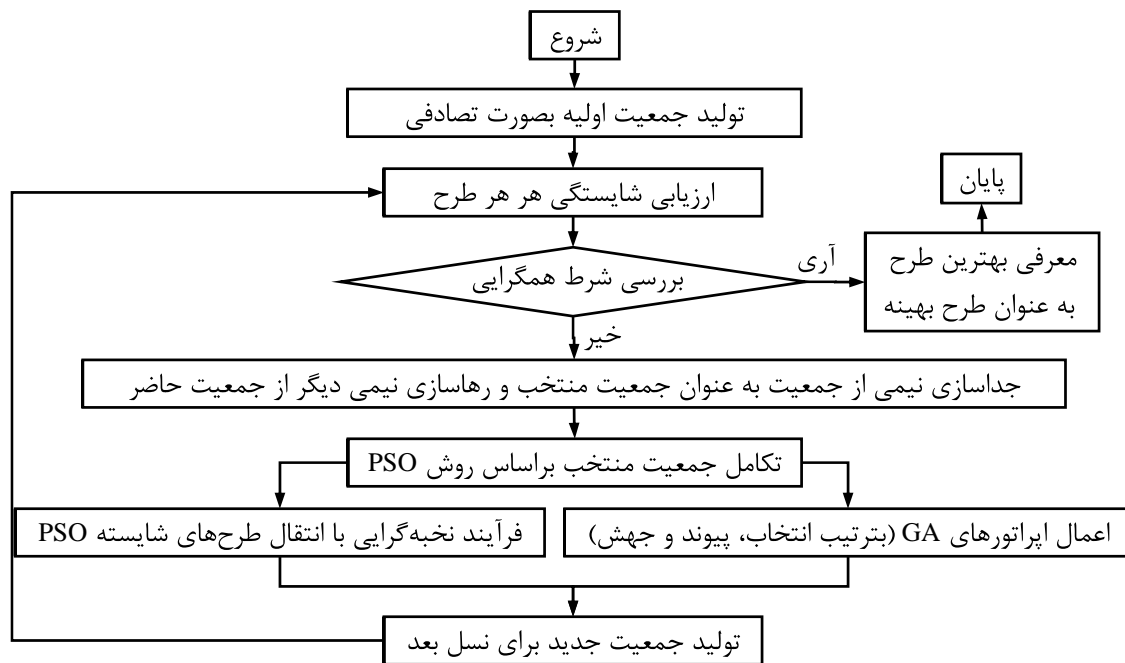
حالت (۳): در صورتی که عدد تصادفی جدید تولید شده از مقدار PAR کمتر باشد، مقدار متغیر طراحی تغییر نموده و مقداری در همسایگی موقعیت فعلی کسب می‌نماید. برای این منظور براساس روش HS که پیشتر بیان شد، از پارامتر bw استفاده می‌شود.

۲-۳-۳ الگوریتم ترکیبی GA و PSO (HGAPSO)^۱

روش HGAPSO از دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری است که با ترکیب دو روش GA و PSO فضای جستجو را کاوش می‌نماید. اساس این روش مبتنی بر روش GA بوده و الگوریتم PSO برای تکامل برخی از اعضای جمعیت، پیش از اعمال اپراتورهای GA مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای این منظور در ابتدا جمعیتی بصورت تصادفی تولید می‌شود که مشابه تولید جمعیت اولیه در دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری است. در ادامه با تعیین مقدار تابع هدف اصلاح شده برای اعضای جمعیت، می‌توان اعضای جمعیت را براساس مقدار $\phi(A)$ مرتب نمود. سپس نصف جمعیت که متشکل از بهترین‌های جمعیت حاضر می‌باشند، انتخاب شده و مابقی حذف می‌شوند. در ادامه فرآیند تکامل و بهبود براساس روش PSO بر روی جمعیت منتخب انجام خواهد شد. جمعیت تکامل یافته براساس PSO جایگزین اعضای حذف شده در مرحله قبل می‌شود. سپس جمعیت کامل شده به روش GA سپرده می‌شود تا تکامل بر اساس اپراتورهای انتخاب، پیوند و جهش انجام شود. به بیان دیگر نتایج

^۱ . Hybrid Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization (HGAPSO)

روش PSO و جمعیت منتخب به عنوان والد برای عملگرهای GA برگزیده شده و براساس آنها جمعیت فرزندان نتیجه خواهد شد. نکته حائز اهمیت اعمال نخبه‌گرایی برای طرح‌هایی است که در فرآیند PSO بهبود یافته‌اند. به بیان دیگر طرح‌هایی که براساس روش PSO نسبت به موقعیت پیشین خود بهبود یابند، بدون اعمال اپراتورهای GA به نسل بعدی منتقل می‌شوند. در هر صورت با تشکیل جمعیت نسل بعدی، مجدداً الگوریتم با جداسازی جمعیت منتخب فرآیند بهینه‌یابی را آغاز می‌نماید. این روند تا برقراری شرط خاتمه الگوریتم ادامه می‌یابد. شکل (۲-۱۲) فرآیند بهینه‌یابی بر اساس الگوریتم ترکیبی HGAPSO را نشان می‌دهد [۵۷].



شکل (۲-۱۲) - فرآیند بهینه‌یابی براساس روش HGAPSO

در روش HGAPSO پیشنهاداتی برای اپراتورهای GA و نیز مقدار ω و دیگر ضرایب PSO در جهت بهبود الگوریتم ترکیبی ارائه شده است که در اساس سیستم ترکیب دو روش تأثیری ندارد [۵۷]. لذا در این متن از ارائه این پیشنهادات صرف‌نظر شده است.

فصل سوم

روش‌ها و راهکارهای

پیشنهادی

۳-۱ مقدمه

نیازهای بشر به علم بهینه‌یابی سبب ایجاد تحقیقات متعددی در دهه‌های گذشته برای توسعه الگوریتم‌های بهینه‌یابی در زمینه‌های مختلف شده است. الگوریتم‌های فراابتکاری نیز متناسب با کاربردهای گوناگون، از این قاعده مستثنی نبوده و در سال‌های اخیر تحقیقات مختلفی در جهت توسعه و گسترش روش‌های فراابتکاری توسط محققین علم بهینه‌یابی ارائه شده است. بهبود نتایج، افزایش سرعت محاسبات، گسترش کاربرد هر روش و ... اهداف محققین در تحقیقات علمی برای الگوریتم‌های فراابتکاری بوده و تا به امروز نیز ادامه دارد. در این راستا ساختارهای متعددی برای الگوریتم‌های موجود و پیشنهادات گوناگونی در جهت توسعه الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه شده است. اما نکته حائز اهمیت و مشترک بین تلاش‌های اکثر محققین علم بهینه‌یابی افزایش کارایی هر الگوریتم برای کسب جواب قابل قبول در محدوده زمانی مناسب می‌باشد. این معیار از مهمترین عوامل برای سنجش کارآمدی ایده‌های پیشنهادی در زمینه بهبود و ارائه الگوریتم‌های فراابتکاری مختلف می‌باشد. تحقیقات در زمینه توسعه و گسترش علم بهینه‌یابی براساس الگوریتم‌های فراابتکاری در علوم مختلف همچنان ادامه داشته و شیوه‌ها و ساختارهای متفاوتی توسط محققین مختلف بر پایه مفهوم کسب جواب مناسب در زمان قابل قبول برای هر الگوریتم ارائه می‌شود.

بدین ترتیب در رساله حاضر طی فرآیندی هدفمند و با برنامه‌ای مشخص، راهکارهای نوین و پیشنهاداتی کارآمد در زمینه توسعه الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه شده است. برای این منظور ابتدا به

بررسی ابعاد مختلف برخی از رایج‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری در زمینه طراحی سازه‌های گوناگون پرداخته شده است. در این مرحله سعی گردیده تا با ارائه پیشنهاداتی برای پارامترها و ساختارهای هر روش، کارایی الگوریتم مربوطه افزایش یابد و دید وسیع‌تری برای روش مربوطه در حساسیت به پارامتر موردنظر ارائه شود. در مرحله بعدی با شناسایی برخی از چالش‌های الگوریتم‌های فراابتکاری، روش نوین جستجوی چندمنظوره (روش جزیره‌ای) که شیوه‌ای کارآمد برای جستجوی فضای طراحی می‌باشد، ارائه شده است. این روش متناسب با شیوه جستجو برای افزایش کارایی الگوریتم‌های مختلف فراابتکاری با ساختارهای گوناگون مؤثر می‌باشد. سپس در جهت توسعه روش جستجوی چندمنظوره، الگوریتم نوین کاوش چندفراابتکاری ارائه شده است. این روش شیوه‌ای منحصربفرد در بکارگیری روش‌های مختلف فراابتکاری به صورت همزمان برای اعمال فرآیند بهینه‌یابی می‌باشد. در مرحله سوم با کسب دید کلی نسبت به شیوه بهینه‌یابی الگوریتم‌های فراابتکاری حاصل از مراحل پیشین، ایده نوین انفصال فضای طراحی با الهام از روش اجزای محدود ارائه شده است. این ایده راهکاری کلی برای بهبود عملکرد اکثر الگوریتم‌های بهینه‌یابی بوده و اساساً چگونگی جستجوی فضای طراحی را براساس شیوه الگوریتم، به صورت مناسب‌تر و کارآمدتری ارائه و اصلاح می‌نماید. در مرحله چهارم با شناخت محاسن و معایب برخی از الگوریتم‌های فراابتکاری، الگوریتم نوین ترکیباتی براساس روش کلونی مورچگان، الگوریتم ژنتیک و روش جستجوی هارمونی ارائه شده است این روش دارای قابلیت‌ها و محاسن مختلف ACO، GA و HS بوده و شیوه ترکیب سبب کمرنگ شدن معایب روش‌های مذکور شده است. در نهایت در مرحله پنجم الگوریتم نوین نقاط متحرک که فضای طراحی را به صورت جستجوی تصادفی هوشمند، کاوش می‌نماید، ارائه شده است. این الگوریتم با کسب تجربیات گام‌های پیشین در بررسی و ارائه پیشنهادات مختلف در زمینه توسعه الگوریتم‌های فراابتکاری شکل گرفته است.

۳-۲ بررسی و بهبود عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری

همان‌طور که پیشتر بیان شد، در این بخش ابتدا برخی از رایج‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری در زمینه طراحی بهینه‌سازها مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا مزایا و معایب روش‌های موردنظر شناسایی شده و سعی گردیده تا با ارائه پیشنهاداتی، روش موردنظر توسعه و بهبود یابد و میزان حساسیت هر روش به عوامل موردنظر مشخص شود. به بیان دیگر در اولین مرحله از راهکارهای پیشنهادی، توسعه برخی از رایج‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری با ارائه پیشنهاداتی در زمینه ساختار الگوریتم، مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور از مرسوم‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری همچون الگوریتم ژنتیک، روش شبیه‌سازی بازپخت، روش جستجوی ممنوعه، الگوریتم کلونی مورچگان، روش اجتماع ذرات، روش جستجوی هارمونی و روش جستجوی ذرات باردار استفاده شده است. نظریات پیشنهادی در بهبود هر الگوریتم با اصلاح شیوه اعمال پارامترهای هر روش و ساختارهای موجود همراه می‌باشد. این پیشنهادات براساس فرآیند طراحی بهینه‌سازهای مختلف بشرح بخش‌های زیر مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج به صورت نمودارهای سیر همگرایی ارائه و مقایسه شده است.

۳-۲-۱ الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک (GA) یکی از روش‌های فراابتکاری است که بر پایه نظریه تکامل تدریجی طبیعت و حیات بهترین‌ها بنا نهاده شده است. در این راستا محققین مختلف، مقالات متنوعی را در زمینه بهینه‌یابی‌سازها براساس GA ارائه داده‌اند. این روش امروزه در بهینه‌یابی‌سازها جایگاه مناسبی داشته و به عنوان یکی از روش‌های فراابتکاری در زمینه طراحی بهینه‌سازها مورد استفاده قرار می‌گیرد. تاریخچه طولانی GA سبب ارائه مقالات و تحقیقات متعددی برای GA در زمینه‌های مختلف شده است [۲۴-۳۲]. این مسئله سبب بروز ساختارهای متفاوتی در مراحل مختلف بهینه‌یابی براساس GA گردیده است. به همین سبب در این بخش به بررسی ساختارهای مراحل انتخاب، پیوند و جهش پرداخته و سعی شده است تا با ارائه پیشنهاداتی برای هر یک از مراحل مذکور، شیوه

بهینه‌یابی براساس GA جهت کسب جواب مناسب در زمان قابل قبول بهبود یابد. لازم به ذکر است که در توضیحات بخش‌های آتی، به بیان هر قسمت به صورت خاص پرداخته شده و در بررسی‌های موجود شیوه کلی فرآیند GA براساس توضیحات بخش ۲-۲-۱ از فصل دوم در نظر گرفته می‌شود.

۳-۲-۱-۱ فرآیند انتخاب

فرآیند انتخاب از رایج‌ترین مراحل در بهینه‌یابی براساس GA می‌باشد. در این فرآیند رشته‌های شایسته از میان جمعیت به عنوان والد انتخاب می‌شوند. هدف از این فرآیند انتخاب بهترین رشته‌ها و تکثیر آن‌ها طی قرارگیری در استخر تولیدمثل می‌باشد. براساس فرآیند انتخاب رشته‌های شایسته شانس بیشتری برای برگزیده شدن به عنوان والد دارند. اما روش‌های انتخاب به گونه‌ای است که براساس آن‌ها احتمال انتخاب رشته‌هایی با شایستگی کمتر نیز وجود دارد. روش‌های متنوعی برای فرآیند انتخاب وجود دارد که در ذیل به شرح مختصر برخی از رایج‌ترین روش‌ها به همراه روش پیشنهادی پرداخته شده است [۳۳-۳۴].

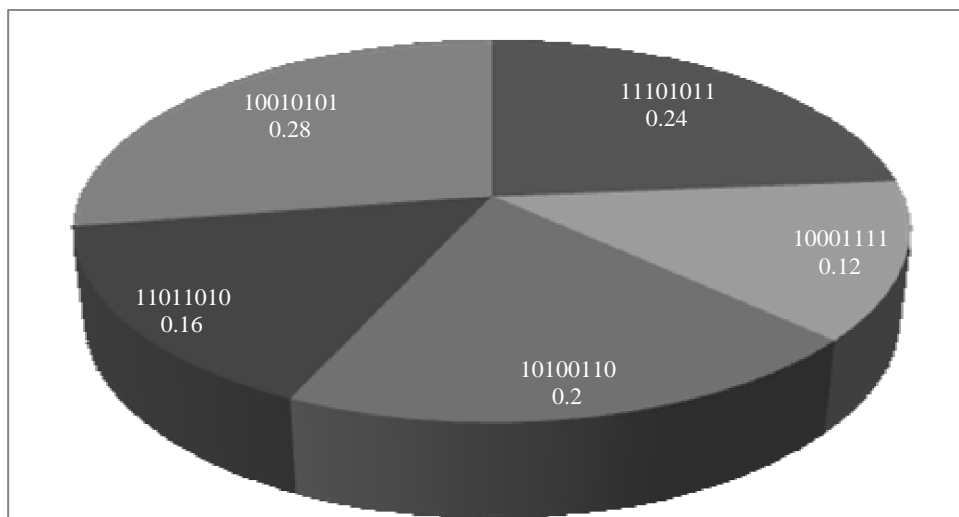
۳-۲-۱-۱-۲ روش چرخ‌گردان

یکی از روش‌های متداول در فرآیند انتخاب، روش چرخ‌گردان است. در این روش احتمال حضور رشته نام براساس شایستگی آن طبق رابطه (۳-۱) تعیین می‌شود. بر اساس این رابطه، حاصل جمع احتمال‌های محاسباتی برای کل اعضای جمعیت برابر یک است.

$$P_i = \frac{Fit_i}{\sum_{j=1}^{NP} Fit_j} \quad i = 1, \dots, NP \quad (1-3)$$

در رابطه (۳-۱) NP تعداد اعضای جمعیت و Fit مقدار شایستگی هر رشته (طرح) بشرح رابطه (۲-۴) است. حال اگر درصد احتمال بدست آمده برای هر رشته به صورت بخشی از یک چرخ‌گردان نشان

داده شود، شکل (۱-۳) به صورت نمونه حاصل می‌گردد. براساس این شکل مقادیر P_i ها، قطاع‌های چرخ‌گردان را تشکیل می‌دهند.



شکل (۱-۳) - مدلی از چرخ‌گردان

در ادامه برای اجرای این روش براساس رابطه (۲-۳) پارامتر احتمال تجمعی برای هر رشته (طرح) تعیین می‌شود.

$$\bar{P}_i = \sum_{j=1}^{MNP} P_j \quad i=1, \dots, NP \quad (2-3)$$

در رابطه (۲-۳)، MNP شماره هر عضو از جمعیت جاری (شماره هر رشته) و \bar{P}_i مقدار پارامتر احتمال تجمعی برای رشته نام می‌باشد.

پس از محاسبه احتمال تجمعی، به تعداد اعضای جمعیت، اعداد تصادفی یکنواخت در محدوده صفر تا یک تولید می‌شود. اگر عدد تصادفی تولیدی کوچکتر یا مساوی با \bar{P}_i نظیر رشته نام باشد، آن رشته (طرح) برای تکثیر انتخاب می‌شود و در استخر تولیدمثل قرار می‌گیرد.

۳-۱-۲-۱-۲-۳ روش رتبه‌بندی

در روش رتبه‌بندی ابتدا اعضای جمعیت براساس مقادیر شایستگی رتبه‌بندی و مرتب می‌شوند. بدین منظور رشته‌ای با کمترین شایستگی دارای رتبه یک و بهترین رشته در رتبه NP (تعداد اعضای

جمعیت) قرار می‌گیرد. سپس انتخاب رشته‌ها (طرح‌ها) براساس رتبه هر رشته صورت می‌پذیرد. بنابراین مقدار P_i در ارتباط با شانس حضور رشته i ام بشرح رابطه (۳-۳) محاسبه می‌گردد.

$$P_i = \frac{MNP}{\sum_{j=1}^{NP} j} \quad i = 1, \dots, NP \quad (3-3)$$

در ادامه همانند روش چرخ‌گردان مقادیر تجمعی \bar{P}_i طبق رابطه (۳-۲) تعیین و سپس با تولید اعداد تصادفی یکنواخت در محدوده صفر تا یک و مقایسه آن با \bar{P}_i رشته (طرح) منتخب مشخص و در استخر تولیدمثل قرار می‌گیرد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، تفاوت روش رتبه‌بندی با روش چرخ‌گردان در شیوه محاسبه احتمال حضور هر رشته (طرح) می‌باشد.

۳-۲-۱-۱-۳ روش رقابتی

در روش رقابتی، زیرمجموعه کوچکی از رشته‌های جمعیت حاضر به صورت تصادفی انتخاب شده و به رقابت می‌پردازند. معیار رقابت، میزان شایستگی هر رشته (طرح) است. سرانجام در این رقابت یکی از رشته‌ها به پیروزی رسیده و به عنوان والد برگزیده و در استخر تولیدمثل قرار می‌گیرد. این فرآیند برای انتخاب تمامی والدها به تعداد NP تکرار می‌شود. تعداد رشته‌ها در هر زیرمجموعه به تعداد اعضای جمعیت بستگی داشته و با عنوان سائز رقابت توسط کاربر مقداردهی می‌شود. اما عموماً دو یا سه رشته برای رقابت انتخاب می‌شوند [۵۸].

۳-۲-۱-۱-۴ روش پیشنهادی

با بررسی روش‌های مختلف فرآیند انتخاب، مشاهده گردید که در برخی موارد ممکن است متناسب با شیوه هر روش، بهترین رشته از نسلی به نسل بعدی منتقل نشود. این مهم سبب کاهش نمره شایستگی نسل بعدی نسبت به نسل پیشین خواهد شد. هر چند احتمال این مسئله کم می‌باشد،

اما در بررسی‌های انجام شده حذف بهترین رشته در برخی از نسل‌ها مشاهده شده است. البته استفاده از مفهوم شایسته سالاری در ترکیب با روش‌های انتخاب، این مشکل را برطرف می‌سازد. اما شیوه هیچ یک از روش‌های مذکور، براساس انتقال بهترین رشته پی‌ریزی نشده است. به همین سبب روش پیشنهادی برای فرآیند انتخاب براساس تکثیر بهترین رشته ارائه شده است. برای این منظور ابتدا جمعیت حاضر براساس شایستگی مرتب می‌شود. طوری که بهترین رشته به عنوان اولین عضو جمعیت و رشته‌ای با کمترین شایستگی در جایگاه NP قرار گیرد. سپس تعداد مشخصی از رشته‌های جمعیت حاضر که مشتمل بر بهترین‌ها می‌باشند (رشته‌های مجموعه منتخب)، در استخر تولید مثل قرار گرفته و مابقی اعضای جمعیت حذف می‌شوند. برای تکمیل جمعیت والدین در استخر تولیدمثل، رشته‌های جدیدی با افزودن و کسر عدد یک به مقدار رمزگشایی شده برخی از زیررشته‌های بهترین رشته (نخستین رشته) تولید می‌شود. انتخاب زیررشته‌های بهترین رشته به صورت تصادفی صورت می‌پذیرد. در صورت نیاز برای تکمیل جمعیت والدین، می‌توان از رشته دوم نیز در عملیاتی مشابه رشته اول، استفاده نمود. تعداد رشته‌های مجموعه منتخب و زیررشته‌های انتخاب برای اعمال تغییرات، از عوامل مهم در روش پیشنهادی می‌باشد که توسط کاربر در ابتدای فرآیند بهینه‌یابی مشخص می‌شود. لازم به ذکر است که می‌توان در روش پیشنهادی، تمامی زیررشته‌های بهترین رشته را برای تکمیل جمعیت والدین، در معرض تغییرات قرار داد. در این شرایط تعداد اعضای مجموعه منتخب و بالطبع مقدار NP نیز براساس تعداد متغیرهای طراحی مسئله، مقداردهی می‌شود [۵۹].

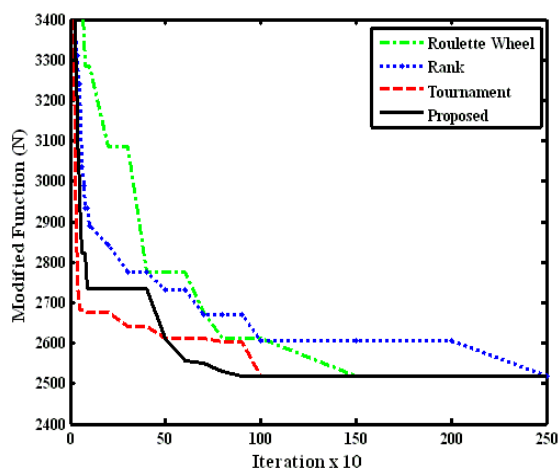
۳-۲-۱-۱-۵ بررسی روش‌های انتخاب

همان‌طور که پیشتر بیان شد، برای بررسی روش‌های مختلف فرآیند انتخاب از مسائل طراحی بهینه سازه‌ها استفاده شده است. برای این منظور دو مثال در زمینه بهینه‌یابی سطح مقطع^۱ و

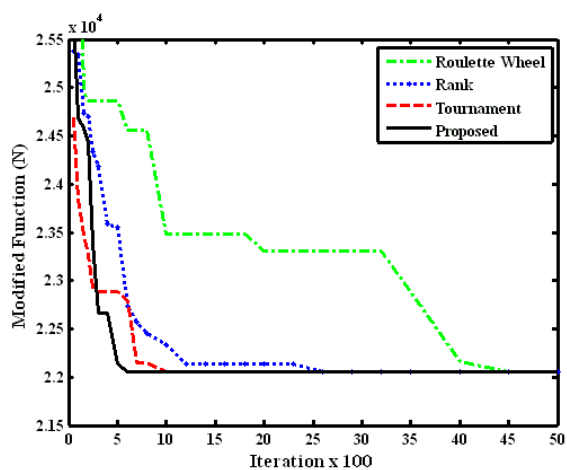
^۱ . Sizing

توپولوژی^۱ سازه‌های خرپایی در نظر گرفته شده است. خرپای مستوی ده میله‌ای و خرپای فضایی ۲۵ میله‌ای مثال‌های برگزیده برای بررسی کارایی روش‌های مختلف انتخاب و روش پیشنهادی است. شرح مفروضات مسائل خرپای ۱۰ میله‌ای و ۲۵ میله‌ای در پیوست الف به ترتیب بخش الف-۲ و الف-۳ برای اجرای فرآیند بهینه‌یابی سطح مقطع و توپولوژی ارائه شده است. در بررسی‌های انجام شده، سعی گردیده تا شرایط یکسانی برای روش‌های مختلف انتخاب، فراهم شود. از سوی دیگر مفهوم نخبه‌گرایی (شایسته‌سالاری) نیز برای روش‌های چرخ‌گردان، رتبه‌بندی و رقابتی منظور شده است. بدین ترتیب قضاوتی عادلانه بین روش پیشنهادی و سایر روش‌ها صورت می‌پذیرد.

نتایج حاکی از آن است که تمامی روش‌های مذکور فضای طراحی را با موفقیت جستجو نموده و به طرح بهینه دست یافته‌اند و تنها تفاوت آن‌ها در سرعت رسیدن به طرح بهینه می‌باشد. اشکال (۳-۲) و (۳-۳) سیر تکاملی فرآیند بهینه‌یابی توسط روش‌های مختلف انتخاب را برای مثال‌های مذکور نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در رسم نمودارهای همگرایی، اجراهای متوالی فرآیند بهینه‌یابی برای هر مثال انجام شده و موفق‌ترین اجرا (کسب طرح بهینه) که دارای بهترین سیر همگرایی می‌باشد، به عنوان سیر همگرایی روش مربوطه انتخاب شده است.



شکل (۳-۳) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط روش‌های مختلف انتخاب برای خرپای فضایی ۲۵ میله‌ای



شکل (۳-۲) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط روش‌های مختلف انتخاب برای خرپای مستوی ۱۰ میله‌ای

^۱ . Topology

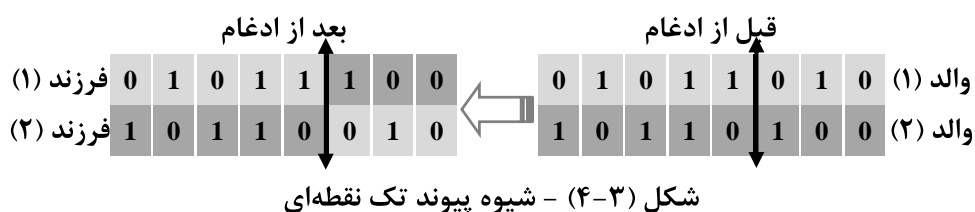
همان‌طور که در اشکال (۲-۳) و (۳-۳) مشاهده می‌شود، روش رتبه‌بندی به آهستگی همگرا شده و برای رسیدن به نقطه بهینه نیازمند تعداد نسل‌سازی بیشتری نسبت به سایر روش‌ها است. بنابراین این روش برای مسائل بزرگ توصیه نمی‌شود. روش چرخ‌گردان نیز متناسب با شیوه انتخاب در جهت پرورش بیش از حد مفاهیم اصل تنوع گام برداشته و این مهم سبب تأثیر فراوان پارامترهای تصادفی در روند انتخاب والدین و در نتیجه فرآیند بهینه‌یابی می‌شود. به همین سبب در فرآیند بهینه‌یابی براساس GA با روش انتخاب چرخ‌گردان، ماهیت تصادفی بر عملیات جستجوی فضای طراحی حاکم می‌شود. بنابراین استفاده از این روش نیز در مسائل با فضای طراحی پیچیده و بزرگ توصیه نمی‌شود. روش پیشنهادی و روش مسابقه‌ای دارای سرعت همگرایی بهتری نسبت به سایر روش‌های انتخاب می‌باشند. روش پیشنهادی آهنگ پایدار و ثابتی در نیل به نقطه کمینه داشته و با تکثیر طرح‌هایی اطراف بهترین رشته، مفهوم اصل تشدید را در سیر همگرایی براساس GA کنترل می‌نماید. الگوریتم ژنتیک از جمله الگوریتم‌هایی با راهکارهای قدرتمند در پوشش مفاهیم اصل تنوع می‌باشد. به همین سبب روش پیشنهادی با ایجاد توازن منطقی بین اصول تنوع و تشدید، سبب افزایش کارایی GA در نیل به نقطه بهینه می‌شود. در هر صورت روش‌های رقابتی و روش پیشنهادی برای مسائل بهینه‌یابی با فضای بزرگ و پیچیده مناسب می‌باشد.

۲-۱-۲-۳ عملگر پیوند

عملگر پیوند (ادغام) از جمله مرسوم‌ترین اپراتورهای GA است. این عملگر عموماً نیازمند دو رشته جهت اعمال فرآیند پیوند می‌باشد. رشته‌های منتخب براساس نرخ پیوند برگزیده و با یکدیگر ترکیب می‌شوند. در این بخش به بررسی برخی از رایج‌ترین شیوه‌های پیوند به همراه حالت پیشنهادی پرداخته شده و در نهایت براساس نمودارهای سیر همگرایی، ارزیابی جامعی برای شیوه‌های پیوند ارائه شده است [۳۳-۳۴].

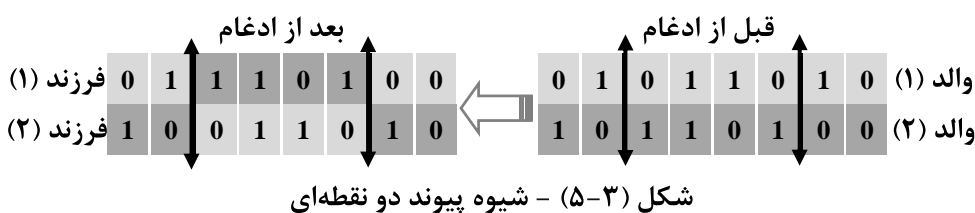
۳-۲-۱-۲-۱ پیوند تک نقطه‌ای

در پیوند تک نقطه‌ای پس از انتخاب والدین براساس نرخ پیوند از استخر تولیدمثل، مکانی به صورت تصادفی در طول رشته‌های والدین انتخاب می‌شود. سپس بیت‌های بعد از این مکان طی فرآیند ادغام، بین دو رشته جابجا می‌شوند. شکل (۳-۴) به صورت شماتیک، فرآیند پیوند تک نقطه‌ای را نشان می‌دهد.



۳-۲-۱-۲-۲ پیوند دو نقطه‌ای

پیوند دو نقطه‌ای تقریباً مشابه پیوند تک نقطه‌ای می‌باشد. با این تفاوت که در پیوند دو نقطه‌ای پس از مشخص شدن والدین، دو مکان به صورت تصادفی در طول رشته‌ها انتخاب می‌شود. سپس بیت‌های بین این دو نقطه بین رشته‌های والدین جابجا می‌شوند. شکل (۳-۵) شیوه پیوند دو نقطه‌ای را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

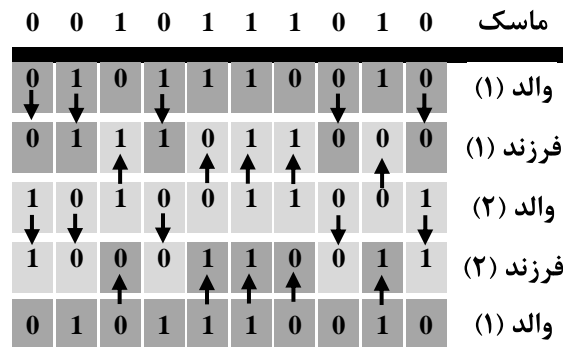


۳-۲-۱-۲-۳ پیوند یکنواخت

در این روش هر بیت از رشته‌های فرزندان، براساس یک احتمال پنجاه درصدی از والدهایش انتخاب شده و شکل می‌گیرد. برای این منظور از یک الگوی رشته‌ای به نام ماسک^۱ استفاده می‌شود. طول رشته ماسک برابر طول هر رشته از جمعیت بوده و بیت‌های آن به صورت تصادفی تولید

^۱ . Mask

می‌شوند. برای اجرای پیوند یکنواخت، بیت‌های فرزندان براساس مقادیر هم‌ارز در رشته ماسک و والدین تشکیل می‌شود. بدین ترتیب هنگامی که در ماسک مقدار بیت هم‌ارز صفر باشد، بیت از والد اول و اگر مقدار یک باشد، بیت از والد دوم کپی می‌شود. در شکل (۳-۶) شیوه پیوند یکنواخت قابل مشاهده است.



شکل (۳-۶) - شیوه پیوند یکنواخت

۳-۲-۱-۲-۳ اپراتور معکوس‌سازی^۱

عملگر معکوس‌سازی از جمله اپراتورهایی است که در برخی مواقع جایگزین عملگر پیوند در فرآیند بهینه‌یابی براساس GA می‌شود. در این روش، ابتدا یک رشته براساس نرخ معکوس‌سازی برگزیده و سپس دو نقطه در طول رشته منتخب مشخص می‌شود. در نهایت بیت‌های مابین این دو نقطه در رشته منتخب معکوس خواهد شد. شکل (۳-۷) شیوه اپراتور معکوس‌سازی را نمایش می‌دهد.



شکل (۳-۷) - شیوه اپراتور معکوس‌سازی

۳-۲-۱-۲-۳ اپراتور حذف و تولید مجدد^۲

اپراتور حذف و تولید مجدد نیز مشابه عملگر معکوس‌سازی بوده و در برخی مواقع به جای اپراتور پیوند مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش پس از مشخص شدن رشته منتخب براساس نرخ

^۱ . Inversion

^۲ . Deletion and Regeneration

عملگر، دو نقطه در طول رشته تعیین می‌شود. سپس بیت‌های بین دو نقطه حذف و مجدداً به صورت تصادفی تولید می‌شوند. شکل (۸-۳) شیوه اپراتور حذف و تولید مجدد را نمایش می‌دهد.



۳-۲-۱-۲-۶ روش پیشنهادی

حالت پیشنهادی برای عملگر پیوند براساس تکامل و بهبود عملکرد روش پیوند یکنواخت پیریزی شده است. برای این منظور ابتدا رشته‌های والدین براساس نرخ پیوند انتخاب می‌شوند. سپس رشته ماسک همانند پیوند یکنواخت تولید می‌شود. در گام بعدی برای هر بیت عددی تصادفی تولید و با مقدار حاصل از رابطه (۴-۳) مقایسه می‌شود. در صورتی که عدد تصادفی تولید شده از مقدار رابطه (۴-۳) بیشتر باشد، بیت‌های فرزندان براساس الگوری ماسک و مشابه روش پیوند یکنواخت انتخاب می‌شوند. اما در حالتی که عدد تصادفی تولیدی از مقدار رابطه (۴-۳) کمتر باشد، بیت رشته‌های فرزندان از والد شایسته‌تر انتخاب می‌شوند.

$$P_{Cu} = P_{Cu}^{Min} + (P_{Cu}^{Max} - P_{Cu}^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (4-3)$$

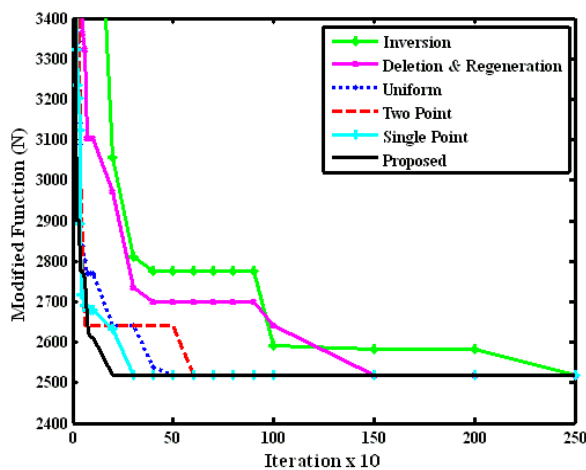
در رابطه (۴-۳)، P_{Cu} مقدار احتمال برای تخصیص بیت والد شایسته به فرزندان می‌باشد. مقادیر P_{Cu}^{Min} و P_{Cu}^{Max} نیز به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار مربوطه بوده که توسط کاربر مشخص می‌شود. $iter$ و $iter_{Max}$ نیز دلالت بر شماره نسل حاضر و تعداد کل نسل‌سازی در فرآیند بهینه‌یابی دارند.

۳-۲-۱-۲-۷ بررسی روش‌های عملگر پیوند

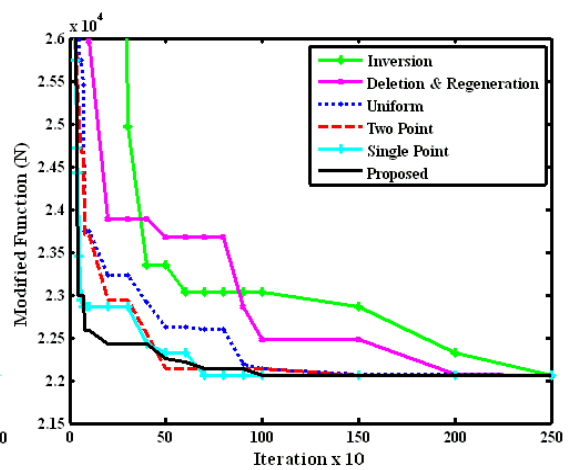
برای بررسی روش‌های مختلف اپراتور پیوند نیز همانند روش‌های مختلف انتخاب، از مسائل طراحی بهینه سازه‌ها در زمینه بهینه‌یابی سطح مقطع و توپولوژی استفاده شده است. خرپای مستوی ۱۰ میله‌ای و خرپای فضایی ۲۵ میله‌ای مثال‌های منتخب برای بررسی کارایی روش‌های مختلف

عملگر پیوند و حالت پیشنهادی است. شرح مفروضات این مسائل برای اجرای فرآیند بهینه‌یابی سطح مقطع و توپولوژی در پیوست الف، بخش الف-۲ و الف-۳ ارائه شده است. در بررسی‌های انجام شده، سعی گردیده تا شرایط یکسانی برای حالات مختلف فراهم شود. بدین ترتیب قضاوتی عادلانه بین روش پیشنهادی و سایر روش‌ها صورت می‌پذیرد.

نتایج حاکی از آن است که تمامی روش‌های مذکور فضای طراحی را با موفقیت جستجو نموده و به طرح بهینه دست یافته‌اند و تنها تفاوت آن‌ها در سرعت رسیدن به طرح بهینه می‌باشد. شکل (۳-۹) و (۳-۱۰) سیر تکاملی فرآیند بهینه‌یابی توسط شیوه‌های مختلف پیوند را برای مثال‌های موردنظر نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در رسم نمودارهای همگرایی، اجراهای متوالی فرآیند بهینه‌یابی برای هر مثال انجام شده و موفق‌ترین اجرا (کسب طرح بهینه) که دارای بهترین سیر همگرایی می‌باشد، به عنوان سیر همگرایی روش مربوطه برگزیده شده است.



شکل (۳-۱۰) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط شیوه‌های مختلف پیوند برای خرپای فضایی ۲۵ میله‌ای



شکل (۳-۹) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط شیوه‌های مختلف پیوند برای خرپای مستوی ۱۰ میله‌ای

همان‌طور که در اشکال (۳-۹) و (۳-۱۰) مشاهده می‌شود، عملگر معکوس‌سازی روند بهینه‌یابی را با کیفیت مناسبی طی نکرده است. علت این امر را می‌توان در شیوه تکامل جمعیت فرزندان براساس روش مذکور دانست. به بیان دیگر از آنجا که در این روش بیت‌های بین دو نقطه قطع^۱ معکوس

^۱ . Cross Site

می‌شوند، شیوه تکامل جمعیت منتخب، ماهیتی تصادفی یافته و ممکن است که رشته‌های مستعد حاصل از فرآیند بهینه‌یابی، شایستگی خود را از دست بدهند. بنابراین در این اپراتور ارزش رشته والد تأثیر اندکی در رشته فرزند دارد و مفید بودن آن نقش کمی در رشته فرزند ایفا می‌نماید.

روش حذف و تولید مجدد، از روش معکوس‌سازی بهتر عمل نموده است. این مطلب در اشکال (۹-۳) و (۱۰-۳) قابل مشاهده است. اما با این وجود، این روش نیز همانند روش معکوس‌سازی روند نیل به نقطه بهینه را به خوبی طی نکرده است. به بیان دیگر از آن جا که این روش در شیوه تکامل خود از یک ماهیت تصادفی برای تولید بیت‌های بین دو نقطه قطع استفاده می‌نماید، فرآیند بهینه‌یابی را به سمت جستجوی تصادفی حرکت می‌دهد. از دیگر دلایل ناکامی این روش نیز می‌توان به تأثیر اندک شایستگی رشته والد بر روی رشته فرزند اشاره نمود که این مسئله نیز همانند اپراتور معکوس‌سازی سبب کندی فرآیند بهینه‌یابی می‌شود.

روش‌های پیوند یکنواخت، دو نقطه‌ای و تک نقطه‌ای از دو اپراتور فوق بهتر عمل کرده و تقریباً همگام با یکدیگر سیر همگرایی را طی نموده‌اند. علت موفقیت این روش‌ها را می‌توان در تأثیر مستقیم بیت‌های رشته والدین در رشته فرزندان دانست. به بیان دیگر در روش‌های پیوند یکنواخت، دو نقطه‌ای و تک نقطه‌ای شایستگی رشته‌های والدین مؤثر بوده و طی فرآیند پیوند، این شایستگی به واسطه بیت‌های هر رشته به فرزندان منتقل می‌شود. از سوی دیگر علت موفقیت روش پیوند تک نقطه‌ای نسبت به پیوند دو نقطه‌ای و یکنواخت را می‌توان در شیوه روش با اعمال اغتشاش و تغییرات کمتر در رشته‌های والدین برای تولید رشته فرزندان دانست. به عبارت دیگر در روش پیوند تک نقطه‌ای، با ایجاد یک نقطه قطع، اغتشاش و تغییرات اندکی در رشته‌های والدین برای تولید رشته‌های فرزندان رخ می‌دهد. به همین سبب این روش، سیر همگرایی را بهتر از روش پیوند دو نقطه‌ای و یکنواخت طی نموده است. پیوند دو نقطه‌ای با اغتشاشات کمتر نسبت به پیوند یکنواخت، بعد از روش پیوند تک نقطه‌ای سیر همگرایی را به خوبی طی نموده است. اما در روش پیوند یکنواخت اغتشاشات و تغییرات در رشته‌های والدین بسیار زیاد بوده و این مسئله در برخی مواقع سبب بی‌نظمی در تشکیل

رشته‌های فرزندان و انتقال صفات مناسب به آن‌ها می‌شود. به بیان دیگر از آن جا که در این روش رشته‌های فرزند براساس الگوی ماسک با یک احتمال پنجاه درصدی از والدین انتخاب می‌شوند، اغتشاش و تغییرات در بیت‌های رشته فرزندان بالا بوده و سبب دگرگونی بسیاری در رشته فرزندان می‌شوند. همین مسئله سبب می‌شود که سیر تکاملی بهینه‌یابی با سرعت کمتری نسبت به روش پیوند دونقطه‌ای و تک نقطه‌ای طی شود.

همان‌طور که پیشتر بیان شد، روش پیشنهادی در جهت بهبود عملکرد روش پیوند یکنواخت ارائه شده که میزان موفقیت این مهم با دقت در اشکال (۳-۹) و (۳-۱۰) قابل مشاهده است. براساس روش پیشنهادی میزان اغتشاشات و تغییرات برای روش پیوند یکنواخت کاهش یافته است. بدین منظور با تکمیل فرآیند نسل‌سازی، مقدار P_{Cu} براساس رابطه (۳-۴) به تدریج افزایش یافته و بالطبع احتمال تشکیل فرزندان براساس والد شایسته‌تر نیز همگام با مقدار P_{Cu} افزایش می‌یابد. این مهم سبب تولید رشته‌هایی در همسایگی والد شایسته‌تر خواهد شد. بنابراین از یک سو میزان اغتشاشات و تغییرات کاهش یافته و نظمی تقریبی برای تولید فرزندان حاصل می‌گردد و از سوی دیگر مفاهیم اصل تشدید به تدریج در سیر همگرایی براساس GA ظاهر می‌شود. بدین ترتیب در سیر فرآیند بهینه‌یابی احتمال جستجو اطراف طرح‌های مستعد به تدریج افزایش می‌یابد. این دلایل سبب کارآمدی روش پیشنهادی برای اپراتور پیوند در فرآیند بهینه‌یابی براساس GA می‌شود.

۳-۲-۱-۳ عملگر جهش

از دیگر مراحل رایج در عملیات GA که تکامل جمعیت برای نسل بعد را به دنبال خواهد داشت، استفاده از اپراتور جهش است. هدف از بکارگیری اپراتور جهش، کاوش بهتر فضای جستجو و ایجاد پراکندگی بیشتر در محدوده فضای طراحی است. در غیاب عملکرد اپراتور جهش در صورتی که فقط از اپراتور پیوند استفاده شود، پس از طی چند نسل، رشته برتر به تعداد اعضای جمعیت تکثیر یافته و فرآیند پیوند نمی‌تواند تغییری در جمعیت فرزندان ایجاد نماید. بنابراین استفاده از اپراتور

جهش تأثیر بسزایی در کیفیت فرآیند بهینه‌یابی براساس GA دارد. در فرآیند جهش برای کدگذاری دودویی، با تخصیص نرخ جهش (P_m)، برای تک‌تک بیت‌های فرزندان اعداد تصادفی تولید می‌شود. در صورتی که این اعداد از نرخ جهش کوچکتر باشد، مقدار بیت مربوطه از صفر به یک یا بالعکس تبدیل می‌شود. مقدار مناسب نرخ جهش در کیفیت نتایج تأثیر بسزایی می‌گذارد. نرخ جهش بالا سبب می‌شود که نظم جمعیت فرزندان بهم خورد و عملیات GA به سمت روند کاوش تصادفی سوق داده شود. در حالی که نرخ جهش پایین سبب می‌شود، فضای طراحی به خوبی کاوش نشود. در این راستا شیوه‌های متفاوتی برای اعمال فرآیند جهش و چگونگی تنظیم نرخ جهش ارائه شده است که در زیر ساختارهایی از رایج‌ترین شیوه‌های موجود، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است [۳۳-۳۴].

۳-۲-۱-۳ جهش با نرخ ثابت^۱

رایج‌ترین حالت ممکن در اعمال عملگر جهش، استفاده از نرخ ثابت برای کل فرآیند بهینه‌یابی در جهش است که متناسب با فضای طراحی و قیود مسئله و حس مهندسی مقداردهی می‌شود. بدین منظور در ابتدای فرآیند بهینه‌یابی عددی بین صفر تا یک برای مقدار P_m منظور می‌شود. این مقدار در کل فرآیند بهینه‌یابی ثابت است. مقادیر بیت‌های اعضای جمعیت با تولید اعداد تصادفی در محدوده صفر تا یک و مقایسه با مقدار P_m (در صورت کوچکتر بودن عدد تصادفی بیت مربوطه) تغییر می‌نمایند.

۳-۲-۱-۲ جهش با نرخ صعودی^۲

در این حالت از عملگر جهش، فرآیند تقریباً مشابه جهش با نرخ ثابت است. با این تفاوت که نرخ جهش به صورت صعودی در کل فرآیند بهینه‌یابی تغییر می‌نماید. به عبارت دیگر در ابتدا احتمال

^۱ . Uniform

^۲ . Increased

کمی برای نرخ جهش منظور شده و در طی عملیات بهینه‌یابی، مقدار نرخ جهش به صورت خطی متناسب با نسبت شماره نسل به تعداد کل نسل‌ها، براساس رابطه (۳-۵) افزایش می‌یابد.

$$P_m = P_m^{Min} + (P_m^{Max} - P_m^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (۳-۵)$$

در رابطه (۳-۵)، P_m^{Max} و P_m^{Min} به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل نرخ جهش می‌باشد که در ابتدای فرآیند بهینه‌یابی توسط کاربر مقداردهی می‌شوند.

۳-۲-۱-۳ جهش با نرخ نزولی^۱

در این حالت از عملکرد جهش، نرخ جهش به صورت کاهشی در کل فرآیند بهینه‌یابی تغییر می‌نماید. به عبارت دیگر در ابتدا احتمال جهش برای بیت‌های اعضای جمعیت بالا بوده و در طی عملیات بهینه‌یابی، مقدار نرخ جهش به صورت خطی متناسب با نسبت شماره نسل به تعداد کل نسل‌ها براساس رابطه (۳-۶) کاهش می‌یابد [۶۰].

$$P_m = P_m^{Max} - (P_m^{Max} - P_m^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (۳-۶)$$

۳-۲-۱-۴ حالت پیشنهادی جهش با نرخ ثابت^۲

در این رساله برای بهبود عملکرد جهش در فرآیند بهینه‌یابی براساس GA، یک شیوه پویا برای افزایش کارایی عملکرد جهش پیشنهاد شده است. بدین منظور در ابتدا تعداد کل نسل‌سازی‌های فرآیند بهینه‌یابی به تعداد بیت‌های هر زیررشته (متغیر طراحی سطح مقطع در مسائل طراحی بهینه سازه‌ها) تقسیم و بازه‌های فرآیند بهینه‌یابی مشخص می‌شوند. سپس عملکرد جهش معمول بر روی تمامی بیت‌های هر رشته اعمال می‌شود. در گام بعدی در طی عملیات بهینه‌یابی و رسیدن به انتهای بازه اول، نخستین بیت سمت چپ هر زیررشته (متغیر طراحی سطح مقطع) تثبیت شده و نرخ جهش برای

^۱ . Decreased

^۲ . Proposal-Uniform

آن برابر صفر منظور می‌شود و روند بهینه‌یابی تا پایان بازه دوم از تعداد کل نسل‌سازی ادامه می‌یابد. پس از آن نرخ جهش دو بیت سمت چپ برابر صفر منظور شده و این روند تا آخرین بیت هر زیررشته ادامه می‌یابد. در این حالت نرخ جهش برای دیگر بیت‌های هر زیررشته ثابت بوده و تنها برای بیت‌های تثبیت شده برابر صفر می‌باشد.

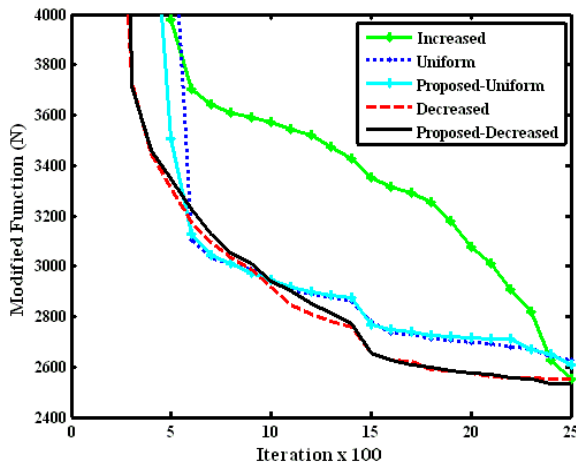
۳-۲-۱-۳-۵ حالت پیشنهادی جهش با نرخ نزولی^۱

در این حالت، ساختار عملگر جهش تقریباً مشابه حالت قبل می‌باشد. با این تفاوت که مقدار نرخ جهش در طی فرآیند بهینه‌یابی برای بیت‌های فعال، براساس رابطه (۳-۶) کاهش می‌یابد.

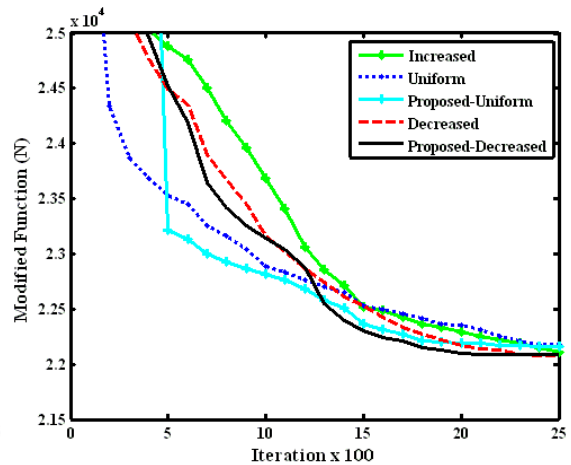
۳-۲-۱-۳-۶ بررسی حالات مختلف عملگر جهش

برای بررسی حالات مختلف اپراتور جهش، همانند عملگر ادغام از مثال‌های بهینه‌یابی سطح مقطع و توپولوژی سازه‌ها استفاده شده است. بدین منظور خرپای مستوی ۱۰ میله‌ای و خرپای فضایی ۲۵ میله‌ای بشرح مفروضات پیوست الف، بخش‌های الف-۲ و الف-۳ در نظر گرفته شده است. در بررسی‌های انجام شده شرایط یکسانی برای تمامی حالات منظور و سعی شده است تا ارزیابی کارآمدی برای عملکرد حالات مختلف ارائه شود. برای این منظور برای هر حالت در هر مثال ۵۰ بار فرآیند بهینه‌یابی اجرا و سیر همگرایی تعیین می‌شود. سپس میانگین سیر همگرایی ۵۰ اجرا به عنوان نماینده حالت مربوطه برای مثال موردنظر لحاظ خواهد شد. بدین ترتیب برای هر مثال متناسب با تعداد حالات موجود، ۲۰۰ اجرای فرآیند بهینه‌یابی صورت پذیرفته است. این شیوه سبب می‌شود تا تأثیر پارامترهای تصادفی در روند بهینه‌یابی براساس GA، کم‌رنگ شده و قضاوتی عادلانه‌تر برای کارآیی حالات موجود ارائه شود. اشکال (۳-۱۱) و (۳-۱۲) سیر همگرایی برای حالات مختلف در هر مثال را براساس شیوه مذکور نشان می‌دهد.

^۱ . Proposal-Decreased



شکل (۳-۱۲) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط روش های مختلف جهش برای خردی فضای ۲۵ میله‌ای



شکل (۳-۱۱) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط روش های مختلف جهش برای خردی مستوی ۱۰ میله‌ای

همان‌طور که در اشکال (۳-۱۱) و (۳-۱۲) مشاهده می‌شود، جهش با نرخ ثابت دارای سیر همگرایی نسبتاً مناسبی می‌باشد. اما این حالت دارای مشکلات بخصوصی از جمله انتخاب مقدار نرخ جهش بوده که برای مقداردهی مناسب این نرخ نیازمند عملیات سعی و خطا است. بنابراین علی‌رغم کیفیت نسبتاً مناسب سیر همگرایی جهش با نرخ ثابت، پیشنهاد می‌شود از حالات جهش با نرخ پویا استفاده شود. در این راستا جهش با نرخ صعودی، کارآیی مناسبی در بهینه‌یابی سازه‌های موجود نداشته است. بنابراین استفاده از این حالت توصیه نمی‌شود. اما جهش با نرخ نزولی عملکرد مناسبی در فرآیند بهینه‌یابی براساس GA دارد. این مهم با دقت در اشکال (۳-۱۱) و (۳-۱۲) قابل مشاهده است. بنابراین می‌توان برای پرهیز از عملیات سعی و خطا جهت یافتن مقدار مناسب نرخ جهش در حالت جهش با نرخ ثابت، از حالت پویا و فعال به صورت نزولی برای نرخ جهش استفاده نمود.

حالات پیشنهادی نیز در جهت بهبود عملکرد اپراتور جهش ارائه شده است. همان‌طور که در اشکال (۳-۱۱) و (۳-۱۲) مشاهده می‌شود، هر یک از حالات پیشنهادی سبب بهبود عملکرد حالت مشابه در جهش معمولی شده است. به بیان دیگر حالت پیشنهادی با نرخ ثابت، کارآیی جهش با نرخ ثابت را بهبود بخشیده و حالت پیشنهادی با نرخ نزولی، سبب بهبود عملکرد جهش با نرخ نزولی شده که در شکل (۳-۱۱) واضح‌تر می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان در شیوه روش پیشنهادی با تثبیت

بیت‌های ابتدایی هر زیررشته در طی فرآیند بهینه‌یابی دانست. به عبارت دیگر با تثبیت بیت‌های ابتدایی هر زیررشته در طی عملیات بهینه‌یابی، بازه تغییرات متغیر طراحی مربوطه به آهستگی کوچک می‌شود. این شیوه سبب می‌شود که در اواخر فرآیند بهینه‌یابی بواسطه اپراتور جهش، هر متغیر طراحی فقط در همسایگی خود تغییر نماید. این مسئله گامی مؤثر در تبیین اصل تشدید برای شیوه بهینه‌یابی براساس GA می‌باشد که در اواخر فرآیند بهینه‌یابی اتفاق می‌افتد. از سوی دیگر با توجه به آن که مسئله مذکور در اواخر فرآیند بهینه‌یابی رخ می‌دهد، احتمال کسب بهینه محلی و یا گرفتاری در نقطه بهینه محلی اندک است. چراکه در اوایل فرآیند بهینه‌یابی تمامی بیت‌های هر زیررشته در معرض تغییر بواسطه عملگر جهش قرار دارند و بدین‌سان مفاهیم اصل تنوع در ابتدای فرآیند بهینه‌یابی وجود دارد. به بیان دیگر شیوه پیشنهادی برای حالات جهش با نرخ ثابت و جهش با نرخ نزولی، سبب تنظیم جستجوی محلی پس از یافتن محدوده طرح بهینه در اواخر فرآیند بهینه‌یابی می‌شود و بدین ترتیب توازنی منطقی بین مفاهیم اصول تنوع و تشدید در سیر بهینه‌یابی براساس GA ایجاد می‌نماید.

۲-۲-۳ الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت

همان‌طور که در بخش ۲-۲-۲ از فصل پیش مشاهده شد، الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت (SA) از جمله الگوریتم‌های فراابتکاری است که با شیوه‌ای کارآمد و متمایل به مفاهیم اصل تشدید، فضای طراحی را جستجو می‌نماید. در فرآیند بهینه‌یابی براساس SA احتمال پذیرش هر طرح یعنی $P(\Delta\phi)$ که براساس رابطه (۵-۲) محاسبه می‌شود، از ارکان اصلی الگوریتم است. با دقت در رابطه (۵-۲) مشاهده می‌شود که مقدار $P(\Delta\phi)$ متأثر از سه پارامتر $\Delta\phi$ ، T و k_B است. پارامترهای $\Delta\phi$ و T در طی عملیات بهینه‌یابی براساس شیوه الگوریتم SA بطور پی در پی تغییر کرده و بروزسانی می‌شوند. اما مقدار پارامتر ثابت بولتزمن عموماً در طی فرآیند بهینه ثابت بوده و توسط کاربر همراه مقادیر اولیه الگوریتم مقداردهی می‌شود. البته لازم به ذکر است که برخی از محققین مقدار این پارامتر را براساس

روابطی به سایر پارامترهای الگوریتم مربوط می‌سازند [۳۵-۳۶]. در هر صورت k_B با تأثیر بسزایی که در مقدار نهایی احتمال پذیرش هر طرح دارد، عاملی مؤثر در شیوه بهینه‌یابی براساس SA می‌باشد. بنابراین مقدار این پارامتر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین سبب در این بخش به بررسی و ارزیابی پارامتر ثابت بولتزمن بشرح زیر پرداخته شده است.

۳-۲-۱-۲ پارامتر ثابت بولتزمن

همان‌طور که پیشتر بیان شد، مقدار پارامتر ثابت بولتزمن، عاملی مهم و تأثیرگذار در فرآیند بهینه‌یابی براساس SA می‌باشد. انتخاب مقدار بزرگ برای k_B سبب افزایش مقدار $P(\Delta\phi)$ شده و شیوه جستجوی فضای طراحی را به سمت جستجوی تصادفی سوق می‌دهد. از سوی دیگر انتخاب مقدار کوچک برای k_B سبب کاهش مقدار $P(\Delta\phi)$ و افزایش احتمال گرفتاری در بهینه محلی و نیز عدم جستجوی سراسری فضای طراحی می‌شود. به بیان دیگر می‌توان بیان نمود که پارامتر ثابت بولتزمن معیاری برای کنترل مفاهیم اصل تنوع در الگوریتم SA می‌باشد. بدین ترتیب در این رساله برخی از حالات ممکن و رایج برای k_B بشرح زیر ارائه و مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا سعی شده است تا با ارائه پیشنهاداتی برای شیوه اعمال مقدار k_B به صورت پویا و فعال در طی فرآیند بهینه‌یابی، کارایی الگوریتم SA افزایش یابد.

۳-۲-۱-۱ مقدار ثابت برای پارامتر k_B

در این حالت که به عنوان حالت ۱ معرفی می‌گردد، پارامتر ثابت بولتزمن به صورت مقداری ثابت لحاظ شده است. بدین‌منظور k_B برابر مقادیر ثابت ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹ و ۱ در اجراهای متفاوت الگوریتم SA در نظر گرفته شده است. برای اجتناب از تأثیر پارامترهای تصادفی در روند بهینه‌یابی، به ازای هر مقدار پارامتر ثابت بولتزمن، ۱۰ اجرای مستقل برای فرآیند

۱. Case 1

بهینه‌یابی صورت گرفته است. سپس میانگین سیر همگرایی برای هر یک از مقادیر k_B محاسبه و ارزیابی شده است. در ادامه میانگین مقادیر سیر همگرایی برای تمامی مقادیر ثابت k_B تعیین (میانگین ۱۰۰ اجرای فرآیند بهینه‌یابی) و به صورت نماینده سیر همگرایی مربوط به پارامتر ثابت بولتزن با مقدار ثابت ارائه شده است.

۲-۲-۲-۱-۲-۳ حالت صعودی برای پارامتر k_B

در این حالت که با عنوان حالت ^{۱۲} مشخص می‌شود، مقدار پارامتر ثابت بولتزن به صورت صعودی در کل فرآیند بهینه‌یابی تغییر می‌نماید. به عبارت دیگر در ابتدا احتمال کمی برای k_B منظور شده و در طی عملیات بهینه‌یابی، مقدار k_B به صورت خطی متناسب با نسبت شماره تکرار به تعداد کل تکرارها، براساس رابطه (۷-۳) افزایش می‌یابد.

$$k_B = k_B^{Min} + (k_B^{Max} - k_B^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (7-3)$$

در رابطه (۷-۳)، k_B^{Min} و k_B^{Max} به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل پارامتر ثابت بولتزن در عملیات بهینه‌یابی است. این مقادیر به ترتیب برابر یک و ۰/۱ منظور شده است. از سوی دیگر در این حالت نیز برای کاهش تأثیر عوامل تصادفی در روند بهینه‌یابی و مقایسه نتایج، نمودارهای سیر همگرایی از میانگین ۳۰ اجرای مستقل فرآیند بهینه‌یابی حاصل می‌شود.

۲-۲-۲-۱-۳ حالت نزولی برای پارامتر k_B

این حالت که با عنوان حالت ^{۱۳} معرفی شده است، تقریباً مشابه حالت ۲ است؛ با این تفاوت که مقدار پارامتر ثابت بولتزن در کل فرآیند بهینه‌یابی به صورت نزولی تغییر می‌نماید. به بیان دیگر در انتهای عملیات بهینه‌یابی مقادیر کوچکی برای پارامتر ثابت بولتزن منظور شده و در طی عملیات

^۱ . Case 2

^۲ . Case 3

بهینه‌یابی، مقدار k_B به صورت خطی متناسب با نسبت شماره تکرار به تعداد کل تکرارها، براساس رابطه (۸-۳) کاهش می‌یابد.

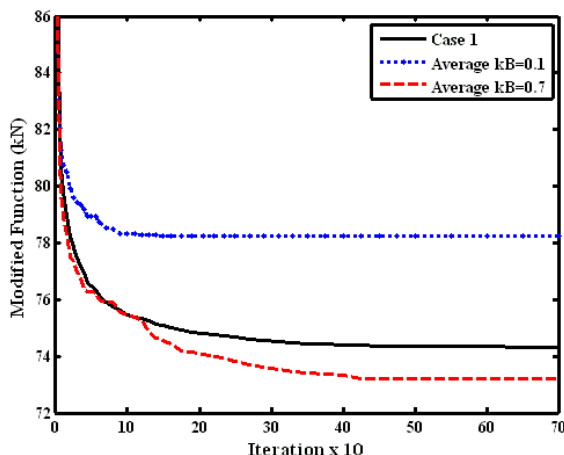
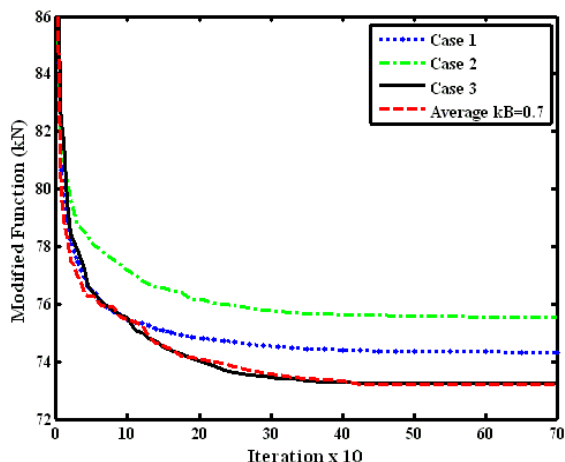
$$k_B = k_B^{Max} - (k_B^{Max} - k_B^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (۸-۳)$$

در رابطه (۸-۳) نیز مشابه رابطه (۷-۳)، مقادیر حداقل و حداکثر پارامتر ثابت بولتزمن برابر ۰/۱ و یک لحاظ شده است. از سوی دیگر در این حالت نیز مشابه حالت ۲، برای کاهش تأثیر عوامل تصادفی در روند بهینه‌یابی، ۳۰ اجرای مستقل فرآیند بهینه‌یابی انجام و سپس میانگین این اجراها به عنوان سیر همگرایی حالت ۳ معرفی شده است.

۳-۲-۲-۱-۴ بررسی حالات مختلف پارامتر k_B

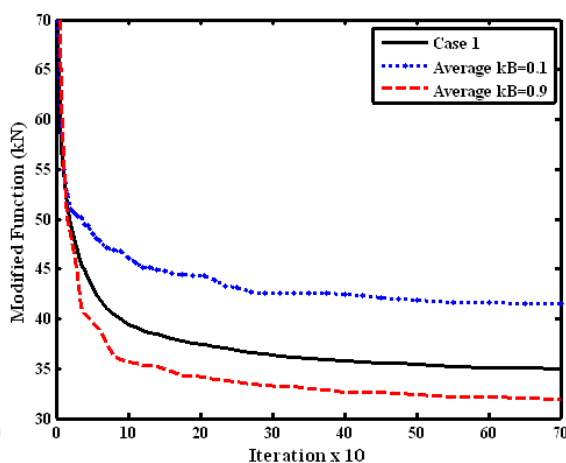
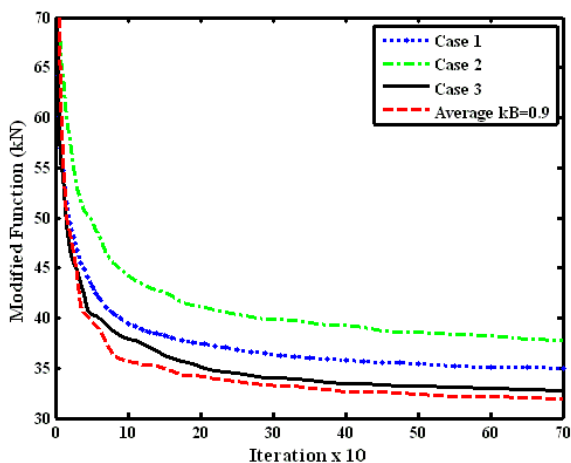
برای بررسی حالات مختلف پارامتر ثابت بولتزمن از مسائل طراحی بهینه سازه‌ها استفاده شده است. برای این منظور دو مثال در زمینه بهینه‌یابی سطح مقطع سازه‌های قابی در نظر گرفته شده است. قاب فولادی پنج طبقه - دو دهانه و قاب فولادی هشت طبقه - یک دهانه، مثال‌های برگزیده جهت بررسی کارایی حالات مذکور برای k_B است. شرح مفروضات مسائل قاب فولادی پنج طبقه - دو دهانه در بخش ۳-۵-۱ از فصل حاضر و قاب هشت طبقه - یک دهانه در پیوست الف بخش الف-۴ ارائه شده است. در بررسی‌های انجام شده، سعی گردیده تا شرایط یکسانی برای حالات مختلف فراهم شود. بدین ترتیب قضاوتی عادلانه بین حالات مذکور صورت می‌پذیرد.

شکل (۳-۱۳) سیر تکاملی فرآیند بهینه‌یابی را توسط مقادیر مختلف حالت ۱ در بهترین وضعیت ($k_B = ۰/۷$) و بدترین وضعیت ($k_B = ۰/۱$)، به همراه میانگین کلیه مقادیر این حالت (۱۰۰) اجرای مستقل) برای مثال قاب پنج طبقه - دو دهانه نشان می‌دهد. از سوی دیگر در شکل (۳-۱۴) نیز سیر تکاملی فرآیند بهینه‌یابی توسط کلیه حالات به همراه بهترین نتیجه حالت ۱ یعنی $k_B = ۰/۷$ برای این مثال قابل مشاهده است.



شکل (۳-۱۳) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط مقادیر شکل (۳-۱۴) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط حالات مختلف برای قاب پنج طبقه-دو دهانه
 حالت ۱ برای قاب پنج طبقه-دو دهانه

شکل (۳-۱۵) نیز سیر تکاملی فرآیند بهینه‌یابی را توسط حالت ۱ به ازای مقادیر ۰/۹ و ۰/۱ در بهترین و بدترین روند بهینه‌یابی به همراه میانگین کلیه مقادیر حالت مذکور، برای قاب هشت طبقه - یک دهانه را نشان می‌دهد. از سوی دیگر در شکل (۳-۱۶) نیز روند بهینه‌یابی برای این مثال براساس حالات مختلف به همراه بهترین سیر همگرایی حالت ۱ ($k_B = 0.9$) قابل مشاهده است.



شکل (۳-۱۵) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط مقادیر حالت ۱ برای قاب هشت طبقه - یک دهانه
 شکل (۳-۱۶) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط حالات مختلف برای قاب هشت طبقه - یک دهانه

همان‌طور که در نمودارهای اشکال (۳-۱۳) تا (۳-۱۶) مشاهده می‌شود، سیر تکاملی فرآیند بهینه‌یابی براساس اتخاذ مقداری ثابت، می‌تواند روند مناسبی را ارائه دهد. بنابراین برای اجرای فرآیند بهینه‌یابی براساس SA، می‌توان با انتخاب مقداری ثابت برای پارامتر ثابت بولتزمن، فرآیند بهینه‌یابی

را اجرا نمود. اما نکته حائز اهمیت مقدار این پارامتر می‌باشد. به بیان دیگر همان‌طور که در اشکال (۳-۱۳) و (۳-۱۵) مشاهده می‌شود، بهترین سیر تکاملی بهینه‌یابی برای اولین مثال به ازای مقدار 0.17 و برای مثال دوم به ازای مقدار 0.9 برای پارامتر k_B حاصل شده است. این مهم بیانگر آن است که اتخاذ مقداری ثابت و مناسب برای k_B به عوامل مختلفی همچون شرایط مسئله، فضای طراحی و ... بستگی دارد. بدین ترتیب انتخاب مقدار ثابت و مناسب برای عملکرد قابل قبول مستلزم فرآیند سعی و خطا می‌باشد. در این رساله اعمال حالاتی پویا و فعال برای پارامتر ثابت بولتزمن جهت افزایش کارایی الگوریتم SA ارائه شده است. بدین منظور حالات ۲ و ۳ با اتخاذ شیوه صعودی و نزولی برای مقدار پارامتر k_B مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که در اشکال (۳-۱۴) و (۳-۱۶) مشاهده می‌شود، حالت ۲ با اعمال مقدار k_B به صورت صعودی، روند بهینه‌یابی را به خوبی طی نکرده است. لذا این حالت برای پارامتر k_B در فرآیند بهینه‌یابی براساس الگوریتم SA، توصیه نمی‌شود. از سوی دیگر حالت ۳ با اعمال مقدار k_B به صورت نزولی، سیر تکاملی فرآیند بهینه‌یابی را به خوبی طی نموده است. این حالت دارای روندی مناسب و تقریباً منطبق بر بهترین عملکرد در حالت ثابت می‌باشد. براساس حالت ۳ با تغییر مقدار k_B به صورت نزولی، میزان احتمال پذیرش $P(\Delta\phi)$ هر طرح نیز به طور نزولی در طی فرآیند بهینه‌یابی تغییر می‌نماید. بنابراین در ابتدای فرآیند بهینه‌یابی، احتمال تغییر طرح مبنا بیشتر از انتهای فرآیند بهینه‌یابی است. این مهم سبب می‌شود که مفاهیم اصل تنوع در ابتدای فرآیند بهینه‌یابی افزایش یافته و با گذشت تکرارهای الگوریتم به آهستگی کاهش یابد. بنابراین توصیه می‌شود، به جای انتخاب مقداری ثابت برای پارامتر k_B که مستلزم عملیات سعی و خطا است، از حالت ۳ استفاده شود.

۳-۲-۳ الگوریتم جستجوی ممنوعه

همان‌طور که در بخش ۳-۲-۲ از فصل پیش بیان شد، روش جستجوی ممنوعه (TS) از الگوریتم‌های فراابتکاری با راهکارهای قدرتمند در اصل تشدید بوده و همانند الگوریتم SA فضای

طراحی را با تولید طرح‌های کاندید در همسایگی طرح مبنا، جستجو می‌نماید. این روش نیز همانند دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری وابسته به پارامترهای مختلفی در روند بهینه‌یابی می‌باشد که مقادیر این پارامترها تأثیر بسزایی در روند بهینه‌یابی دارد. پارامتر بازه همسایگی (nw) از عوامل مهم در چگونگی جستجوی فضای کاوش در الگوریتم TS است. بنابراین در این بخش میزان تأثیر این پارامتر به ازای حالات و مقادیر مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۳-۲-۳-۱ پارامتر بازه همسایگی

در روش TS تعداد طرح‌های کاندید براساس مقدار پارامتر بازه همسایگی مشخص می‌شوند. در حالت کلی می‌توان به تعداد $2nw$ طرح کاندید در اطراف طرح مبنا تولید نمود که این مسئله به شرایط و محدوده متغیر طراحی بستگی دارد. اگر مقدار متغیر طراحی در نزدیکی و یا مرز محدوده مجاز نباشد، می‌توان با اعمال تغییرات در مقدار متغیر طراحی، به تعداد $2nw$ طرح کاندید تولید نمود [۳۵]. بدین ترتیب این پارامتر در بهینه‌یابی براساس TS محدوده جستجو اطراف طرح مبنا را کنترل می‌نماید. لذا می‌بایست مقدار nw با دقت و حساسیت خاصی انتخاب شود. چراکه این مقدار می‌تواند تأثیر فراوانی بر روی نتایج طرح بهینه و نیز سیر تکاملی فرآیند بهینه‌یابی داشته باشد. بدین ترتیب در این رساله برای الگوریتم TS، تأثیر پارامتر بازه همسایگی مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور مقدار nw در حالات مختلف بشرح زیر ارائه و ارزیابی شده است.

۳-۲-۳-۱ مقدار ثابت برای پارامتر nw

در این حالت که با عنوان حالت ۱ مشخص می‌شود، پارامتر بازه همسایگی به صورت مقدار ثابت لحاظ شده است. بدین منظور در اجراهای متفاوت برای روش TS مقدار nw برابر مقادیر ثابت ۱، ۰.۵، ۱.۰، ۲.۰، ۳.۰، ۴.۰ و ۵.۰ تعداد اعضای محدوده مجاز متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده است. در طراحی بهینه‌یابی سطح مقطع سازه‌ها، محدوده مجاز متغیرهای طراحی براساس لیست

مقاطع منفصل مشخص می‌شوند. بنابراین می‌توان بیان نمود که در حالت ۱ مقدار nw برابر نسبتی از تعداد اعضای لیست مقاطع (N_s) است. در این حالت برای گریز از تأثیر پارامترهای تصادفی در روند بهینه‌یابی، به ازای هر مقدار مشخص از پارامتر بازه همسایگی، ۱۰ اجرای مستقل برای فرآیند بهینه‌یابی صورت گرفته است. سپس میانگین سیر همگرایی برای هر nw محاسبه و بررسی شده است. در ادامه میانگین مقادیر سیر همگرایی برای تمامی مقادیر ثابت nw محاسبه و به صورت نماینده سیر همگرایی مربوط به پارامتر بازه همسایگی با مقدار ثابت ارائه می‌شود.

۳-۲-۳-۱-۲ حالت صعودی برای پارامتر nw

این حالت با عنوان حالت ۲ ارائه شده و براساس آن مقدار پارامتر بازه همسایگی به صورت صعودی در کل فرآیند بهینه‌یابی تغییر می‌نماید. به عبارت دیگر در ابتدا مقدار کمی برای nw منظور شده و در طی عملیات بهینه‌یابی، مقدار nw به صورت خطی متناسب با نسبت شماره تکرار به تعداد کل تکرارها، براساس رابطه (۹-۳) افزایش می‌یابد.

$$nw = nw^{Min} + (nw^{Max} - nw^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (9-3)$$

در رابطه (۹-۳)، مقادیر nw^{Min} و nw^{Max} به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل پارامتر بازه همسایگی در عملیات بهینه‌یابی است. این مقادیر برای مقایسه با حالت ۱ به ترتیب برابر حداکثر (۰.۵۰) و حداقل (۰.۱) مقادیر ثابت در حالت ۱ در نظر گرفته شده است. از سوی دیگر در حالت ۲ نیز برای کاهش تأثیر عوامل تصادفی روش TS و مقایسه نتایج، نمودار سیر همگرایی از میانگین ۳۰ اجرای متفاوت فرآیند بهینه‌یابی حاصل شده است.

۳-۲-۳-۱-۳ حالت نزولی برای پارامتر nw

این حالت که با عنوان حالت ۳ ارائه می‌گردد، تقریباً مشابه حالت ۲ است؛ با این تفاوت که مقدار پارامتر بازه همسایگی در کل فرآیند بهینه‌یابی به صورت نزولی تغییر می‌نماید. به عبارت دیگر

در انتهای عملیات بهینه‌یابی مقادیر کوچکی برای پارامتر بازه همسایگی منظور شده و در طی عملیات بهینه‌یابی، مقدار nw به صورت خطی متناسب با نسبت شماره تکرار به تعداد کل تکرارها، براساس رابطه (۳-۱۰) کاهش می‌یابد.

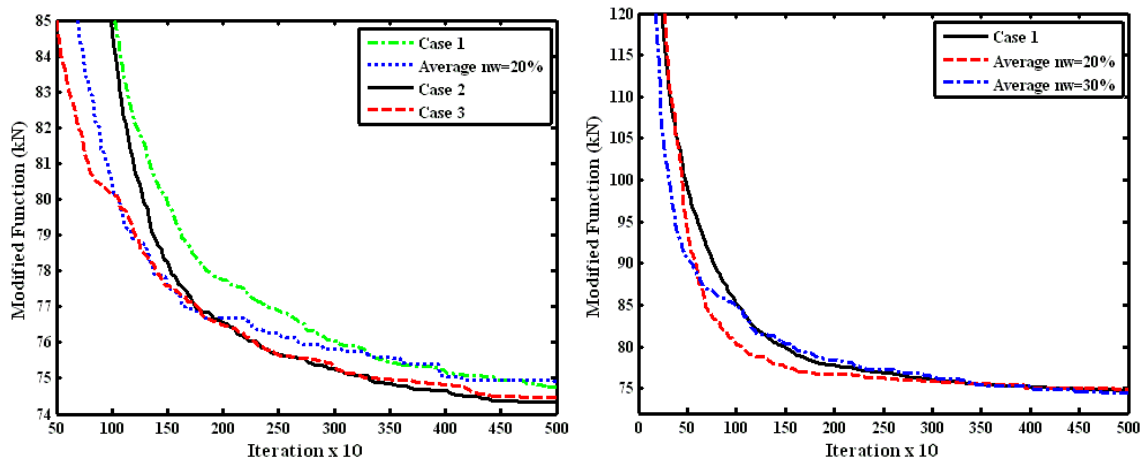
$$nw = nw^{Max} - (nw^{Max} - nw^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (۳-۱۰)$$

پارامترهای رابطه (۳-۱۰) مشابه رابطه (۳-۹) می‌باشد. در این حالت نیز مشابه حالت ۲ برای گریز از تأثیر عوامل تصادفی در روند بهینه‌یابی و مقایسه نتایج، در هر مثال ۳۰ بار فرآیند بهینه‌یابی اجرا و سپس میانگین این اجراها، به عنوان سیر همگرایی حالت ۳ برای مثال مربوطه در نظر گرفته شده است.

۳-۲-۳-۱-۴ بررسی حالات پارامتر nw

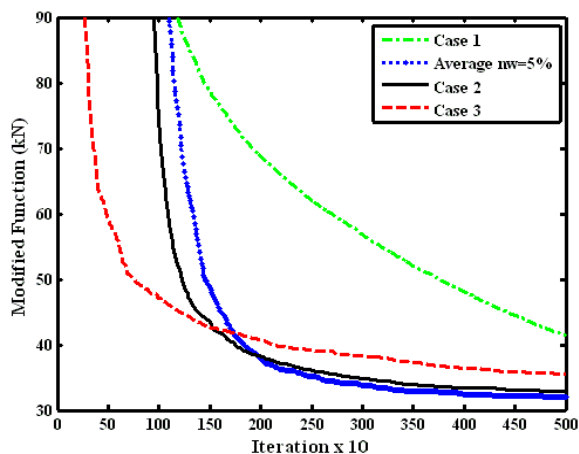
برای بررسی حالات مختلف پارامتر بازه همسایگی، از مثال‌های بهینه‌یابی سطح‌مقطع قاب‌های فولادی استفاده شده است. برای این منظور قاب پنج طبقه - دو دهانه و قاب هشت طبقه - یک دهانه به ترتیب بشرح بخش ۳-۵-۱ از فصل حاضر و بخش الف-۵ از پیوست الف در نظر گرفته شده است. در بررسی‌های انجام شده سعی گردیده تا شرایط یکسانی برای تمامی حالات مهیا شود. بنابراین قضاوتی صحیح‌تر نسبت به عملکرد هر یک از حالات ارائه می‌شود. لازم به ذکر است که برای حالت ۱ در اولین مثال (قاب پنج طبقه - دو دهانه) به سبب کوچکی فضای طراحی، مقادیر ثابت ۰.۱٪، ۰.۵٪ و ۱۰٪ یکسان فرض شده و مقدار nw برابر یک لحاظ گردیده است. بدین ترتیب در این مثال نمودار سیر همگرایی فرآیند بهینه‌یابی برای تمامی مقادیر ثابت حالت ۱، میانگین ۵۰ اجرای فرآیند بهینه‌یابی می‌باشد. این در حالی است که برای مثال ۲ (قاب هشت طبقه - یک دهانه) برای رسم نمودار سیر همگرایی فرآیند بهینه‌یابی، توسط کلیه مقادیر ثابت حالت ۱، ۷۰ بار فرآیند بهینه‌یابی اجرا شده است. اشکال (۳-۱۷) و (۳-۱۸) سیر تکاملی فرآیند بهینه‌یابی را توسط حالات مختلف برای پارامتر nw در مثال قاب پنج طبقه - دو دهانه نشان می‌دهد. در شکل (۳-۱۷) نمودار میانگین ۱۰ اجرای

مختلف فرآیند بهینه‌یابی برای مقادیر بازه همسایگی به ازای ۲۰٪ و ۳۰٪ تعداد اعضای لیست مقاطع (به ترتیب بهترین و بدترین سیر همگرایی)، به همراه میانگین کل حالات مقادیر ثابت (میانگین ۵۰ اجرای فرآیند بهینه‌یابی در حالت ۱) رسم شده است. از سوی دیگر در شکل (۳-۱۸) نمودار میانگین حالات ۱، ۲ و ۳ به همراه میانگین ۱۰ اجرای مختلف برای nw برابر ۲۰٪ تعداد اعضای لیست مقاطع که دارای بهترین عملکرد در حالت ۱ می‌باشد، قابل مشاهده است.

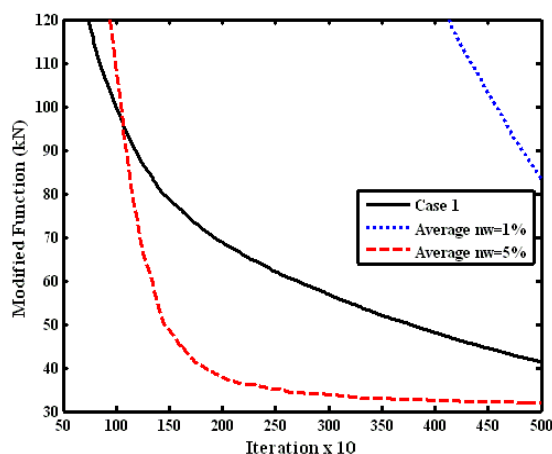


شکل (۳-۱۷) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط مقادیر شکل (۳-۱۸) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط حالات مختلف برای قاب پنج طبقه - دو دهانه
حالت ۱ برای قاب پنج طبقه - دو دهانه

در شکل (۳-۱۹) میانگین سیر تکاملی فرآیند بهینه‌یابی برای بازه همسایگی به ازای مقادیر ۱٪ و ۵٪ تعداد اعضای لیست مقاطع که به ترتیب دارای بهترین و نامناسب‌ترین عملکرد در حالت ۱ برای قاب هشت طبقه - یک دهانه می‌باشند، رسم شده است. در این شکل میانگین سیر فرآیند بهینه‌یابی برای کلیه مقادیر ثابت (۷۰ اجرا) در مثال مذکور نیز قابل مشاهده است. از سوی دیگر شکل (۳-۲۰) میانگین سیر تکاملی فرآیند بهینه‌یابی برای حالات ۱، ۲ و ۳ به همراه بهترین میانگین سیر بهینه‌یابی در مقادیر ثابت ($0.05Ns$) نشان می‌دهد.



شکل (۳-۲۰) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط حالات مختلف برای قاب هشت طبقه - یک دهانه



شکل (۳-۱۹) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط مقادیر حالت ۱ برای قاب هشت طبقه - یک دهانه

همان‌طور که در نمودارهای اشکال (۳-۱۷) تا (۳-۲۰) مشاهده می‌شود، پارامتر بازه همسایگی تأثیر فراوانی در روند بهینه‌یابی دارد. این مهم در مثال‌هایی با فضای طراحی بزرگ همانند نمودارهای اشکال (۳-۱۹) و (۳-۲۰) برای قاب فولادی هشت طبقه - یک دهانه که تعداد لیست مقاطع آن بسیار زیاد می‌باشد، بهتر قابل مشاهده است. بنابراین انتخاب مقدار مناسب برای nw در روش جستجوی ممنوعه به خصوص در مثال‌هایی با فضای طراحی بزرگ، امری مهم و ضروری است. اتخاذ مقداری ثابت برای nw در فرآیند بهینه‌یابی براساس TS مستلزم عملیات سعی و خطا است و می‌بایست متناسب با شرایط مسئله، فضای طراحی و ... تعیین شود. این مهم در اجراهای مختلف با مقادیر گوناگون برای nw حاصل می‌شود. به عنوان نمونه همان‌طور که در شکل (۳-۱۷) مشاهده می‌شود، بهترین سیر فرآیند بهینه‌یابی برای اولین مثال به ازای مقدار nw برابر ۳ ($0.2Ns$) حاصل شده است. در حالی که برای مثال دوم براساس شکل (۳-۱۹) بهترین سیر همگرایی به ازای مقدار ۱۳ ($0.05Ns$) برای nw بدست آمده است.

در این رساله برای اجتناب از عملیات سعی و خطا با اجراهای مختلف فرآیند بهینه‌یابی برای کسب مقدار مناسب nw حالات پویا و فعال ۲ و ۳ ارائه شده است. همان‌طور که در اشکال (۳-۱۸) و (۳-۲۰) مشاهده می‌شود، به ازای حالات ۲ و ۳ تقریباً روند مناسبی برای بهینه‌یابی براساس TS ارائه شده است. در این میان حالت ۲ با یک روند مقاردهی صعودی برای nw ، سیر همگرایی بهتری نسبت

به حالت ۳ برای هر دو مثال داشته و تقریباً همگام با بهترین سیر بهینه‌یابی در حالت ۱ حرکت نموده است. بنابراین پیشنهاد می‌شود، در بهینه‌یابی سازه‌ها براساس روش TS پارامتر بازه همسایگی به صورت متغیر و براساس رابطه (۳-۹) در نظر گرفته شود.

۳-۲-۴ الگوریتم کلونی مورچگان

همان‌طور که در بخش ۲-۲-۴ از فصل پیش بیان شد، الگوریتم کلونی مورچگان (ACO) با الهام از فرآیند جستجوی غذا توسط مورچه‌ها شکل گرفته است. این روش از جمله الگوریتم‌های فراابتکاری است که مورد توجه بسیاری از محققین در علوم مختلف می‌باشد. الگوریتم ACO نخستین بار برای حل مسئله فروشنده دوره‌گرد ارائه [۱۷] و پس از آن توسط محققین دیگر در علوم مختلف به کار گرفته شد [۴۲-۴۴ و ۶۱]. این مسئله سبب شده است تا شیوه‌های گوناگونی با عناوین مختلف بر پایه روش کلونی مورچگان برای فرآیند بهینه‌یابی ارائه شود [۴۱]. در این راستا هر یک از محققین سعی نموده‌اند تا با ارائه ساختاری جدید برای بهینه‌یابی بر پایه زندگی مورچگان، الگوریتم کارآمدی را ارائه دهند. اما در تمامی این ساختارها، کلیات ACO مبتنی بر شیوه جستجوی غذا توسط مورچگان براساس فرآیند بجای گذاری و تبخیر فرومون حفظ شده است. بدین ترتیب برخی از پارامترهای روش ACO همچون ضریب تبخیر فرومون، میزان فرومون اولیه و ... وجه مشترک اکثر الگوریتم‌های کلونی مورچگان می‌باشد [۴۱-۴۴]. این پارامترها از جمله عوامل اساسی در روند بهینه‌یابی براساس ACO بوده و عموماً مقدار هر یک در روند بهینه‌یابی مهم می‌باشد. بنابراین در این رساله به بررسی ضریب تبخیر فرومون بشرح زیر پرداخته شده است.

۳-۲-۴-۱ ضریب تبخیر فرومون

فرآیند تبخیر فرومون از جمله عوامل اساسی در فرآیند جستجوی غذا توسط مورچگان می‌باشد. تبخیر سبب می‌شود تا مسیرهای طولانی و نافرجام، حذف شده و در طی فرآیند جستجو،

کوتاهترین مسیر تا منبع غذایی، توسط مورچه‌ها کشف می‌شود. به طور مشابه فرآیند تبخیر در الگوریتم‌های ACO نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. چراکه براساس این فرآیند احتمال انتخاب طرح‌های نامناسب و ناشایسته در روند بهینه‌یابی به تدریج کاهش می‌یابد. در این راستا ضریب تبخیر فرومون (e_r) پارامتری مهم برای کنترل فرآیند تبخیر در روند بهینه‌یابی براساس ACO می‌باشد. این پارامتر از جمله پارامترهای اولیه الگوریتم ACO بوده و عموماً تنظیم مقداری مناسب برای e_r مستلزم فرآیند سعی و خطا است. به طور معمول این پارامتر براساس فضای طراحی، قیود مسئله و ... مقداردهی می‌شود [۴۱-۴۴]. بدین ترتیب در این رساله برای اجتناب از عملیات سعی و خطا جهت مقداردهی e_r به ارائه حالاتی پویا و فعال برای مقدار e_r بشرح بخش زیر پرداخته شده است. در این راستا حالات پیشنهادی و حالت مرسوم با مقدار ثابت برای e_r براساس نمودارهای سیر همگرایی مقایسه خواهد شد.

۳-۲-۴-۱-۱ مقدار ثابت برای پارامتر e_r

در این حالت که با عنوان حالت ۱ مشخص می‌شود، ضریب تبخیر فرومون به صورت مقداری ثابت لحاظ شده است. بنابراین نرخ تبخیر فرومون برابر مقادیر ثابت ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۹ در اجراهای متفاوت فرآیند بهینه‌یابی در نظر گرفته شده است. در این حالت برای گریز از تأثیر سایر پارامترهای تصادفی الگوریتم ACO، به ازای هر یک از مقادیر مذکور برای ضریب e_r ، ۱۰ اجرای مستقل فرآیند بهینه‌یابی صورت گرفته است. سپس میانگین سیر فرآیند بهینه‌یابی در اجراهای مختلف برای هر مقدار محاسبه و به عنوان نماینده سیر همگرایی برای ضریب موردنظر معرفی شده است. در نهایت میانگین کلیه اجراهای متوالی (۹۰ اجرا) برای تمامی مقادیر ثابت نیز محاسبه و به عنوان سیر همگرایی حالت ۱ ارائه شده است.

۳-۲-۴-۱-۲-۳ حالت صعودی برای پارامتر e_r

در این حالت که حالت ۲ نامیده می‌شود، مقدار نرخ تبخیر به صورت صعودی در کل فرآیند بهینه‌یابی تغییر می‌نماید. به عبارت دیگر برای حالت ۲ در ابتدا احتمال کمی برای نرخ تبخیر فرومون منظور شده و در طی عملیات بهینه‌یابی، مقدار e_r به صورت خطی متناسب با نسبت شماره تکرار به تعداد کل تکرارها، براساس رابطه (۱۱-۳) افزایش می‌یابد.

$$e_r = e_r^{Min} + (e_r^{Max} - e_r^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (11-3)$$

در رابطه (۱۱-۳)، e_r^{Min} و e_r^{Max} به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل ضریب تبخیر فرومون می‌باشد که برای هماهنگ‌سازی در مقایسه با حالت ۱ به ترتیب برابر $0/9$ و $0/1$ در نظر گرفته شده است. در این حالت برای کاهش تأثیر عوامل تصادفی در ACO، ۳۰ اجرای مستقل فرآیند بهینه‌یابی صورت گرفته و سپس نمودار سیر همگرایی براساس میانگین سیر بهینه‌یابی ۳۰ اجرا حاصل شده است.

۳-۲-۴-۱-۳-۳ حالت نزولی برای پارامتر e_r

این حالت که با عنوان حالت ۳ مشخص می‌شود، مشابه حالت ۲ است؛ با این تفاوت که مقدار ضریب تبخیر فرومون در کل فرآیند بهینه‌یابی به صورت کاهشی تغییر می‌نماید. به عبارت دیگر در انتهای عملیات بهینه‌یابی احتمال کمی برای نرخ تبخیر فرومون منظور شده و در طی عملیات بهینه‌یابی، مقدار e_r به صورت خطی متناسب با نسبت شماره تکرار به تعداد کل تکرارها، براساس رابطه (۱۲-۳) کاهش می‌یابد.

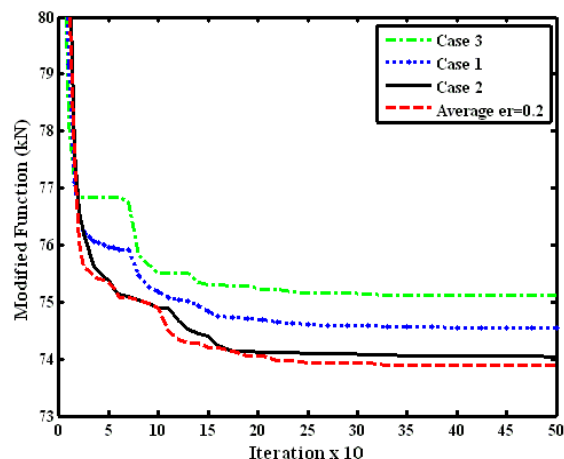
$$e_r = e_r^{Max} - (e_r^{Max} - e_r^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (12-3)$$

پارامترهای رابطه (۱۲-۳) مشابه رابطه (۱۱-۳) می‌باشد. در این حالت نیز مشابه حالت ۲ برای گریز از تأثیر پارامترهای تصادفی ACO، نمودار سیر همگرایی از میانگین ۳۰ اجرای فرآیند بهینه‌یابی حاصل شده است.

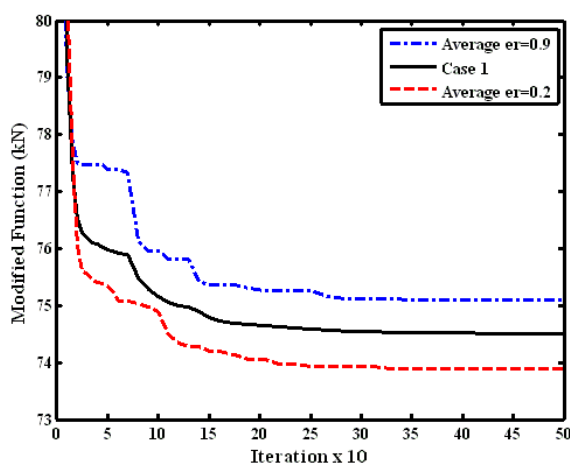
۳-۲-۴-۱-۴ بررسی حالات مختلف پارامتر e_r

برای بررسی حالات مختلف پارامتر ضریب تبخیر فرومون از مسائل طراحی بهینه سازه‌ها استفاده شده است. بدین منظور مشابه الگوریتم‌های فراابتکاری پیشین، قاب فولادی پنج طبقه - دو دهانه و قاب فولادی هشت طبقه - یک دهانه به عنوان مثال‌های برگزیده برای بررسی کارایی حالات مختلف e_r می‌باشند. شرح مفروضات مسائل قاب فولادی پنج طبقه - دو دهانه در بخش ۳-۵-۱ از فصل حاضر و قاب هشت طبقه - یک دهانه در پیوست الف بخش الف-۴ ارائه شده است. در بررسی حالات مختلف ضریب تبخیر فرومون، سعی گردیده تا شرایط یکسانی برای حالات مختلف فراهم شود. بدین ترتیب قضاوتی عادلانه بین حالات مذکور صورت می‌پذیرد.

شکل (۳-۲۱) نمودار میانگین سیر تکاملی فرآیند بهینه‌یابی را به ازای مقادیر $0/2$ و $0/9$ (به ترتیب بهترین و بدترین سیر همگرایی) برای ضریب تبخیر فرومون به همراه میانگین سیر همگرایی حالت ۱ در مسئله بهینه‌یابی قاب فولادی پنج طبقه - دو دهانه نشان می‌دهد. از سوی دیگر شکل (۳-۲۲) میانگین سیر تکاملی فرآیند بهینه‌یابی را برای مثال مذکور به ازای حالات ۱، ۲ و ۳ نشان می‌دهد. در این شکل برای ارزیابی مناسب حالات ۲ و ۳، بهترین سیر همگرایی در حالت ۱ به ازای مقدار ثابت $0/9$ برای e_r نیز رسم شده است.

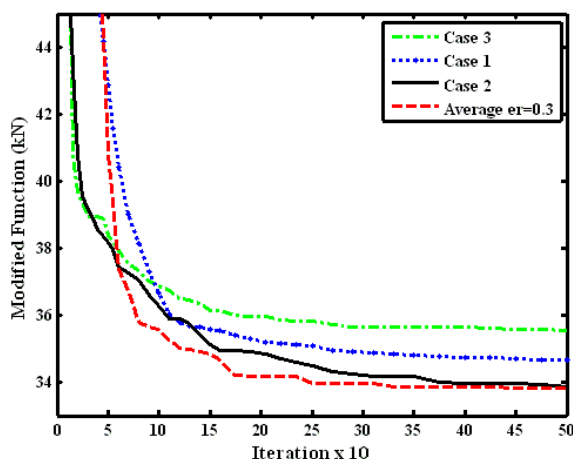


شکل (۳-۲۲) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط حالات مختلف برای قاب پنج طبقه - دو دهانه

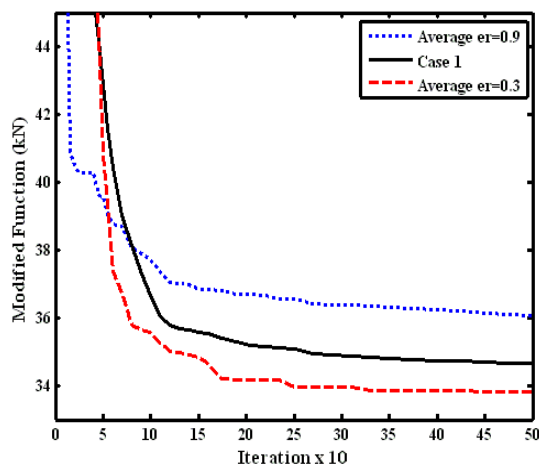


شکل (۳-۲۱) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط مقادیر حالت ۱ برای قاب پنج طبقه - دو دهانه

شکل (۳-۲۳) میانگین سیر تکاملی فرآیند بهینه‌یابی برای قاب فولادی هشت طبقه - یک دهانه را به ازای بهترین و نامناسب‌ترین عملکرد برای مقادیر e_r به همراه میانگین کلیه مقادیر ثابت e_r نشان می‌دهد. از سوی دیگر در شکل (۳-۲۴) میانگین سیر همگرایی برای مثال مذکور به ازای حالات ۱، ۲ و ۳ و نیز میانگین سیر همگرایی برای مقدار e_r برابر $0/3$ (بهترین عملکرد در حالت ۱) قابل مشاهده است.



شکل (۳-۲۴) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط حالات مختلف برای قاب هشت طبقه - یک دهانه



شکل (۳-۲۳) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط مقادیر حالت ۱ برای قاب هشت طبقه - یک دهانه

همان‌طور که در اشکال (۳-۲۱) و (۳-۲۳) مشاهده می‌شود، ضریب تبخیر فرمون، عاملی مهم در فرآیند بهینه‌یابی براساس ACO است. بنابراین انتخاب مقداری صحیح برای این پارامتر در راستای عملکرد مناسب بهینه‌یابی براساس ACO امری ضروری و قابل تأمل می‌باشد. انتخاب مقادیر ثابت برای e_r از مرسوم‌ترین شیوه‌ها در بهینه‌یابی براساس ACO است. بر این اساس انتخاب مقدار بزرگی همچون $0/9$ توصیه نمی‌شود. چراکه در هر دو مثال، سیر همگرایی مناسبی ارائه نشده است. با بررسی‌های انجام شده مشخص گردید که با کاهش مقدار e_r و حرکت به سوی مقدار $0/1$ عملکرد بهینه‌یابی براساس ACO افزایش می‌یابد. اما این مهم دارای مرز مشخصی می‌باشد که به عنوان نمونه برای اولین مثال مقدار $0/2$ و برای مثال دوم مقدار $0/3$ برای e_r به عنوان بهترین مقادیر می‌باشند. با گذشت از این مرز عملکرد بهینه‌یابی روند نزولی می‌یابد. بنابراین نمی‌توان مقداری را به عنوان بهترین

میزان برای تمامی مثال‌ها معرفی نمود. در این راستا می‌بایست ضریب تبخیر فرومون براساس فضای طراحی، قیود مسئله و ... طی فرآیند سعی و خطا مقداردهی شود. برای اجتناب از این عملیات، در این رساله روابطی پویا و فعال برای e_r بشرح حالات ۲ و ۳ ارائه شده است. همان‌طور که در اشکال (۲۲-۳) و (۲۴-۳) مشاهده می‌شود، حالت ۲ با شیوه‌ای صعودی برای ضریب تبخیر فرومون، سیر همگرایی مناسب‌تری نسبت به حالات ۱ و ۳ ارائه می‌دهد. در این حالت احتمال انتخاب مقادیری از محدوده مجاز متغیرهای طراحی که سبب کاهش کیفیت طرح بهینه می‌شوند، به آرامی طی فرآیند بهینه‌یابی کاهش می‌یابد. بدین ترتیب فضای کاوش به آهستگی کوچک می‌شود. از سوی دیگر همان‌طور که در اشکال (۲۲-۳) و (۲۴-۳) مشاهده می‌شود، سیر همگرایی حالت ۲ انطباق مناسبی با بهترین سیر همگرایی با مقدار ثابت برای e_r در هر دو مثال دارد. بنابراین حالت ۲ می‌تواند جایگزین شایسته‌ای برای حالت e_r با مقدار ثابت مناسب شود. چراکه تنظیم و اتخاذ مقدار ثابت مناسبی برای e_r مستلزم عملیات سعی و خطا و تجربه در شیوه بهینه‌یابی براساس ACO می‌باشد.

۳-۲-۵ روش اجتماع ذرات

الگوریتم اجتماع ذرات (PSO) که در بخش ۲-۲-۵ از فصل پیشین به طور کامل شرح داده شد، یک تکنیک بهینه‌یابی است که با نداشتن فضای طراحی به فضای برداری و الگوبرداری از شیوه موجودات دسته جمعی، فرآیند جستجو را در پیش می‌گیرد. این روش با راهکارهای قدرتمند در زمینه مفاهیم اصل تنوع، فضای طراحی را کاوش نموده و براساس قابلیت‌های شناختی هر ذره و پتانسیل‌های اجتماعی گروه ذرات، به سوی نقطه بهینه حرکت می‌نماید [۴۵]. در این راستا پارامترهای شناختی (C_1) و اجتماعی (C_2) عوامل مهم در کنترل میزان حرکت می‌باشند. این پارامترها تأثیر فراوانی در عملکرد الگوریتم داشته و با تقابلی غیرمستقیم، شیوه حرکت به سوی نقطه بهینه را کنترل می‌نمایند. اهمیت این پارامترها سبب شده تا شیوه‌های مختلفی برای اعمال هر یک در مسائل گوناگون به کار گرفته شود. اما نکته حائز اهمیت تقابل این دو پارامتر با یکدیگر در فرآیند

بهینه‌یابی براساس PSO می‌باشد. بدین‌منظور در این رساله به بررسی اهمیت پارامترهای شناختی و اجتماعی و نیز تأثیر آن‌ها بر یکدیگر بشرح بخش زیر پرداخته شده است.

۳-۲-۵-۱ بررسی ضرایب C_1 و C_2

الگوریتم PSO نیز همانند سایر الگوریتم‌های فراابتکاری، وابسته به یک سری پارامتر و مقادیر اولیه بوده که مقدار و شیوه اعمال هر یک تأثیر بسزایی در روند بهینه‌یابی دارند. در این راستا پارامترهای شناختی و اجتماعی از عوامل مهم و اساسی در بهینه‌یابی براساس روش PSO می‌باشند. این پارامترها به صورت مستقیم در میزان سرعت هر ذره مؤثر بوده و بدین‌ترتیب بطور غیر مستقیم در موقعیت نهایی هر ذره تأثیر فراوانی دارند. از سوی دیگر براساس رابطه حرکت ذرات در روش PSO میزان هر یک از پارامترها C_1 و C_2 و نیز شیوه اعمال آن‌ها بر قابلیت‌های هر ذره و پتانسیل‌های گروه ذرات نیز مؤثر می‌باشند. بدین‌ترتیب برای ارزیابی نسبتاً کلی بر تأثیر این پارامترها در روند بهینه‌یابی براساس PSO، چهار حالت بشرح زیر ارائه و مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۲-۵-۱-۱ حالت ۱ برای ضرایب C_1 و C_2

در این حالت پارامترهای C_1 و C_2 به صورت نزولی در کل فرآیند بهینه‌یابی تغییر می‌نمایند. به عبارت دیگر در ابتدای فرآیند بهینه‌یابی مقادیر C_1 و C_2 دارای بیشترین مقدار بوده و در طی عملیات بهینه‌یابی به صورت خطی متناسب با نسبت شماره تکرار به تعداد کل تکرارها، براساس رابطه (۳-۱۳) کاهش می‌یابند.

$$C_i = C_i^{Max} - (C_i^{Max} - C_i^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad i = 1, 2 \quad (۳-۱۳)$$

در رابطه (۳-۱۳)، C_i^{Max} و C_i^{Min} به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل پارامتر موردنظر در فرآیند بهینه‌یابی است.

۲-۱-۵-۲-۳ حالت ۲ برای ضرایب C_1 و C_2

این حالت مشابه حالت ۱ است، با این تفاوت که مقدار پارامترهای C_1 و C_2 در کل فرآیند بهینه‌یابی به صورت صعودی تغییر می‌نماید. به عبارت دیگر در انتهای عملیات بهینه‌یابی مقادیر پارامترهای C_1 و C_2 به بیشترین مقدار می‌رسند. برای این منظور مقادیر پارامترهای C_1 و C_2 در طی فرآیند بهینه‌یابی، به صورت خطی متناسب با نسبت شماره تکرار به تعداد کل تکرارها، براساس رابطه (۱۴-۳) افزایش می‌یابد.

$$C_i = C_i^{Min} + (C_i^{Max} - C_i^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad i=1,2 \quad (14-3)$$

پارامترهای رابطه (۱۴-۳) مشابه رابطه (۱۳-۳) است.

۲-۱-۵-۳-۳ حالت ۳ برای ضرایب C_1 و C_2

در این حالت مقادیر پارامترهای C_1 و C_2 دارای رفتاری متفاوت می‌باشند. به بیان دیگر در این حالت مقدار پارامتر C_1 در طی فرآیند بهینه‌یابی کاهش و مقدار پارامتر C_2 افزایش می‌یابد. برای این منظور از روابط (۱۵-۳) و (۱۶-۳) استفاده شده است.

$$C_1 = C_1^{Max} - (C_1^{Max} - C_1^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (15-3)$$

$$C_2 = C_2^{Min} + (C_2^{Max} - C_2^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (16-3)$$

پارامترهای روابط فوق مشابه رابطه (۱۳-۳) می‌باشند.

۲-۱-۵-۴-۳ حالت ۴ برای ضرایب C_1 و C_2

این حالت تقریباً مشابه حالت ۳ می‌باشد. با این تفاوت که رفتار پارامترهای C_1 و C_2 بر خلاف حالت ۳ در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر در این حالت پارامتر C_1 دارای رفتاری صعودی و

پارامتر C_2 به صورت نزولی در طی فرآیند بهینه‌یابی، متناسب با نسبت شماره تکرار به تعداد کل تکرارها تغییر می‌نماید. برای این منظور از روابط (۱۷-۳) و (۱۸-۳) استفاده می‌شود.

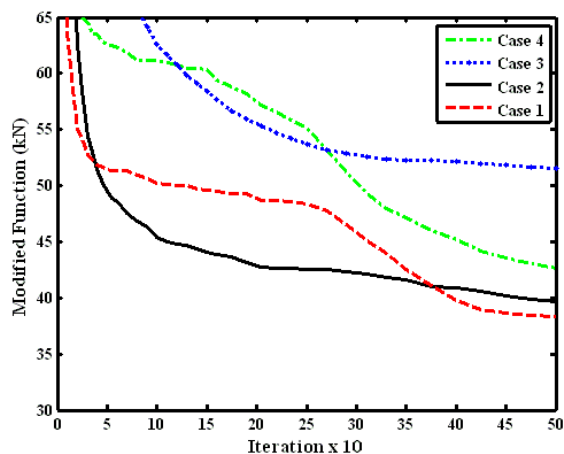
$$C_1 = C_1^{Min} + (C_1^{Max} - C_1^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (۱۷-۳)$$

$$C_2 = C_2^{Max} - (C_2^{Max} - C_2^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (۱۸-۳)$$

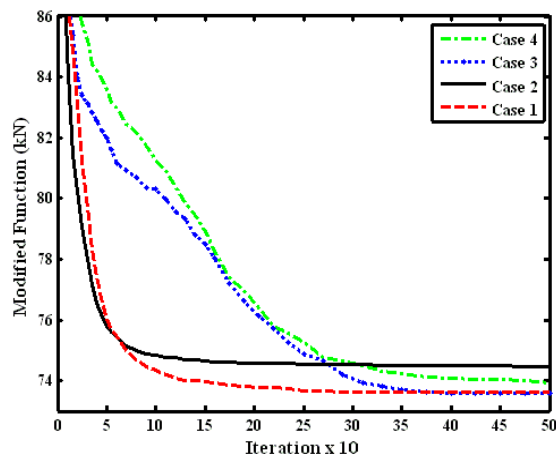
۳-۲-۵-۱-۵ بررسی حالات مختلف ضرایب C_1 و C_2

برای بررسی پارامترهای شناختی و اجتماعی در روش PSO مشابه دیگر الگوریتم‌های مذکور از مثال‌های طراحی بهینه سطح مقطع سازه‌ها استفاده شده است. بدین منظور قاب پنج طبقه - دو دهانه بشرح بخش ۳-۵-۱ و قاب هشت طبقه - یک دهانه بشرح پیوست الف-۴ انتخاب شده‌اند. در بررسی‌های انجام شده سعی گردیده تا شرایط یکسانی برای تمامی حالات فراهم شود. بدین ترتیب قضاوتی منطقی و عادلانه برای حالات مذکور شکل خواهد گرفت. در این راستا برای کلیه حالات مقادیر حداقل و حداکثر پارامترهای C_1 و C_2 به ترتیب برابر ۰/۵ و یک لحاظ شده است. این مقادیر طی بررسی‌های مختلف روش PSO با مقادیر ثابت برای پارامترهای C_1 و C_2 حاصل گردیده است. از سوی دیگر برای اجتناب از تأثیر عوامل تصادفی در روند بهینه‌یابی براساس PSO و مقایسه جامع نتایج حالات مختلف، نمودار سیر همگرایی هر حالت از میانگین ۳۰ اجرای مستقل فرآیند بهینه‌یابی حاصل شده است.

اشکال (۳-۲۵) و (۳-۲۶) میانگین سیر تکاملی فرآیند بهینه‌یابی را برای حالات مذکور نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان و چگونگی اعمال پارامترهای C_1 و C_2 تأثیر فراوانی در روند بهینه‌یابی براساس روش PSO دارد. با دقت در شکل (۳-۲۶) مشخص می‌شود که این تأثیر برای مثال‌هایی با فضای طراحی بزرگ به واسطه محدوده مجاز وسیع برای متغیرهای طراحی بیشتر است. بنابراین اتخاذ شیوه و مقداری مناسب برای پارامترهای C_1 و C_2 در روش بهینه‌یابی براساس PSO امری مهم و ضروری است.



شکل (۳-۲۶) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط حالات مختلف برای قاب هشت طبقه - یک دهانه



شکل (۳-۲۵) - سیر فرآیند بهینه‌یابی حالات مختلف برای قاب پنج طبقه - دو دهانه

همان‌طور که در اشکال (۳-۲۵) و (۳-۲۶) مشاهده می‌شود سیر همگرایی برای حالات ۳ و ۴ در طی فرآیند بهینه‌یابی دارای رفتار مناسبی نیست. در این حالات شیوه اعمال پارامترهای C_1 و C_2 به صورت متفاوت با یکدیگر منظور شده است. بر این اساس می‌توان بیان نمود که مقدار و شیوه اعمال هر یک از پارامترهای مذکور در میزان قابلیت‌های شناختی هر ذره و پتانسیل‌های اجتماعی ذرات مؤثر است. سیر همگرایی حالات ۱ و ۲ نیز تأییدی بر این مطلب است. همان‌طور که در اشکال (۳-۲۵) و (۳-۲۶) مشاهده می‌شود، برای حالاتی که رفتار پارامترهای C_1 و C_2 یکسان است، سیر همگرایی در هر دو حالت نزولی و صعودی بهتر از حالات ۳ و ۴ می‌باشد. بنابراین اتخاذ رفتار متفاوت برای اعمال پارامترهای C_1 و C_2 توصیه نمی‌شود و بهتر است پارامترهای موردنظر دارای رفتار یکسانی باشند تا با تأثیر متقابل نسبت به معیارهای یکدیگر، فضای طراحی را با همکاری متقابل کاوش نمایند.

حالت ۱ از بین تمامی حالات مذکور، سیر همگرایی مناسب‌تری برای هر دو مثال ارائه داده است. این حالت با رفتار نزولی برای پارامترهای C_1 و C_2 توازنی منطقی بین مفاهیم اصول تنوع و تشدید پدید می‌آورد. بدین ترتیب که در ابتدای فرآیند بهینه‌یابی، الگوریتم طرح‌های متنوعی با اعمال فرآیند جستجوی سراسری بواسطه مقادیر پارامترهای C_1 و C_2 دارد. پس از طی تکرارهای متوالی، در انتهای فرآیند بهینه‌یابی مفاهیم اصل تشدید به واسطه جستجوی محلی با مقادیر اندک پارامترهای C_1 و C_2 ظاهر می‌شود. این حالت در کسب نتایج طرح بهینه نیز از سایر حالات موفق‌تر بوده است.

۳-۲-۶ روش جستجوی هارمونی

همان طور که در فصل دوم بخش ۲-۲-۶ به طور کامل شرح داده شد، روش جستجوی هارمونی (HS) از جمله الگوریتم‌های فراابتکاری با مضامین ویژه در اصل تشدید می‌باشد. این روش با الهام از فرآیند نوازنده‌ها در جستجوی یک حالت مناسب برای نواختن موسیقی شکل گرفته است. روش HS نیز همانند سایر الگوریتم‌های فراابتکاری، نیازمند مقداردهی پارامترهای مختلفی می‌باشد. این پارامترهای در روند بهینه‌یابی تأثیر بسزایی داشته و همواره اتخاذ مقدار مناسب برای هر یک امری مهم و ضروری است [۴۸-۵۰]. در این راستا پارامترهای مختلفی همچون PAR و bw که از عوامل مهم در فرآیند بهینه‌یابی براساس HS می‌باشند، توسط برخی از محققین بررسی شده است [۴۶]. اما در این میان پارامتر $HCMR$ کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به همین سبب در این رساله برای روش بهینه‌یابی براساس HS، پارامتر $HCMR$ انتخاب و بشرح بخش زیر به ازای حالات و مقادیر مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

۳-۲-۶-۱ بررسی پارامتر $HCMR$

پارامتر $HCMR$ از عوامل اساسی در فرآیند بهینه‌یابی براساس HS است که در روند تشکیل بردار متغیرهای طراحی نقشی اساسی ایفا می‌نماید. مقدار این پارامتر به صورت غیر مستقیم معیاری برای کنترل مفاهیم اصل تنوع در روش HS است. پارامتر $HCMR$ از جمله عوامل اولیه الگوریتم HS بوده که در ابتدای فرآیند بهینه‌یابی مقداردهی می‌شود [۴۸-۵۰]. اتخاذ مقدار مناسب برای این پارامتر از جمله دغدغه‌های بهینه‌یابی براساس HS می‌باشد. به همین سبب در این بخش حالات مختلف و ممکن برای پارامتر $HCMR$ بشرح زیر تعریف و مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۲-۶-۱-۱ مقادیر ثابت برای پارامتر $HCMR$

این حالت که با عنوان حالت ۱ معرفی می‌گردد، رایج‌ترین شیوه برای مقداردهی پارامتر $HCMR$ می‌باشد. در این حالت پارامتر $HCMR$ به صورت مقداری ثابت لحاظ شده است. بدین‌منظور

$HCMR$ برابر مقادیر ثابت ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸ و ۰/۹ در اجراهای متفاوت فرآیند بهینه‌یابی در نظر گرفته شده است. برای گریز از تأثیر پارامترهای تصادفی در روند بهینه‌یابی، به ازای هر مقدار پارامتر $HCMR$ ، ۱۰ اجرای مستقل برای فرآیند بهینه‌یابی صورت گرفته است. سپس میانگین سیر همگرایی برای هر مقدار $HCMR$ محاسبه و ارائه شده است. در ادامه میانگین سیر همگرایی برای تمامی مقادیر ثابت پارامتر $HCMR$ محاسبه (میانگین ۹۰ اجرای فرآیند بهینه‌یابی) و به صورت نماینده سیر همگرایی مربوط به پارامتر $HCMR$ با مقدار ثابت ارائه می‌شود.

۲-۲-۶-۱-۲ حالت صعودی برای پارامتر $HCMR$

در این حالت مقدار پارامتر $HCMR$ به صورت صعودی در کل فرآیند بهینه‌یابی تغییر می‌نماید. به عبارت دیگر در ابتدا احتمال کمی برای $HCMR$ منظور شده و در طی فرآیند بهینه‌یابی، مقدار $HCMR$ به صورت خطی متناسب با نسبت شماره تکرار به تعداد کل تکرارها، براساس رابطه (۳-۱۹) افزایش می‌یابد.

$$HCMR = HCMR^{Min} + (HCMR^{Max} - HCMR^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (۳-۱۹)$$

در رابطه (۳-۱۹)، $HCMR^{Max}$ و $HCMR^{Min}$ به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل پارامتر $HCMR$ در فرآیند بهینه‌یابی براساس HS می‌باشند.

۲-۲-۶-۱-۳ حالت نزولی برای پارامتر $HCMR$

این حالت که با عنوان حالت ۳ مشخص می‌گردد، مشابه حالت ۲ است؛ با این تفاوت که مقدار پارامتر $HCMR$ در کل فرآیند بهینه‌یابی به صورت نزولی تغییر می‌نماید. به عبارت دیگر در انتهای عملیات بهینه‌یابی احتمال کمی برای پارامتر $HCMR$ منظور شده و در طی فرآیند بهینه‌یابی، مقدار $HCMR$ به صورت خطی متناسب با نسبت شماره تکرار به تعداد کل تکرارها، براساس رابطه (۳-۲۰) کاهش می‌یابد.

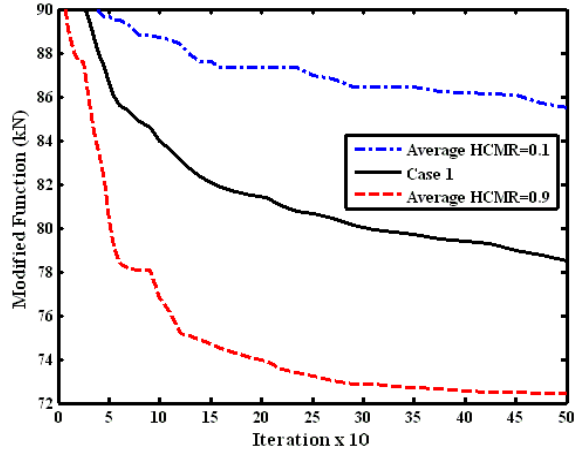
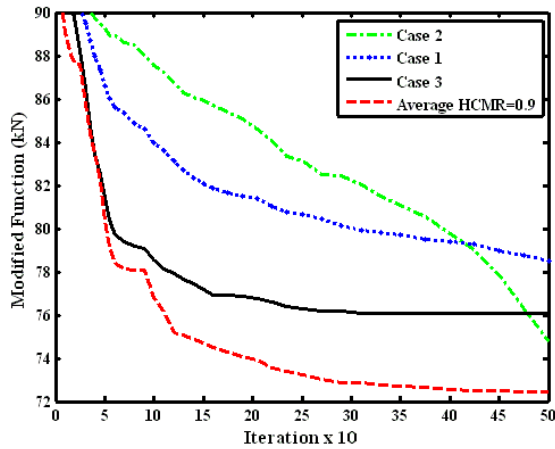
$$HCMR = HCMR^{Max} - (HCMR^{Max} - HCMR^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (20-3)$$

پارامترهای رابطه (20-3) مشابه رابطه (19-3) می باشند.

۳-۲-۶-۱-۴ بررسی حالات مختلف پارامتر HCMR

برای بررسی تأثیر پارامتر HCMR در روند بهینه‌یابی براساس HS به ازای حالات مذکور از مثال‌های بهینه‌یابی سطح‌مقطع قاب‌های فولادی استفاده شده است. بدین‌منظور مشابه حالات پیش قاب پنج طبقه - دو دهانه از بخش ۳-۵-۱ و قاب هشت طبقه - یک دهانه از پیوست الف-۴ به عنوان مثال‌های منتخب، برگزیده شده‌اند. در بررسی‌های انجام شده سعی گردیده برای تمامی حالات شرایط یکسانی فراهم شود تا قضاوتی کارآمد برای بهبود عملکرد HS براساس پارامتر HCMR ارائه شود. بدین‌منظور برای همگام‌سازی حالات ۲ و ۳ با حالت ۱، مقادیر حداقل و حداکثر پارامتر HCMR در روابط (20-3) و (19-3) به ترتیب برابر ۰/۱ و ۰/۹ منظور شده است. از سوی دیگر برای کاهش تأثیر عوامل تصادفی در روش HS، سیر همگرایی فرآیند بهینه‌یابی هر یک از حالات ۲ و ۳ براساس میانگین سیر همگرایی ۳۰ اجرای مستقل صورت گرفته است.

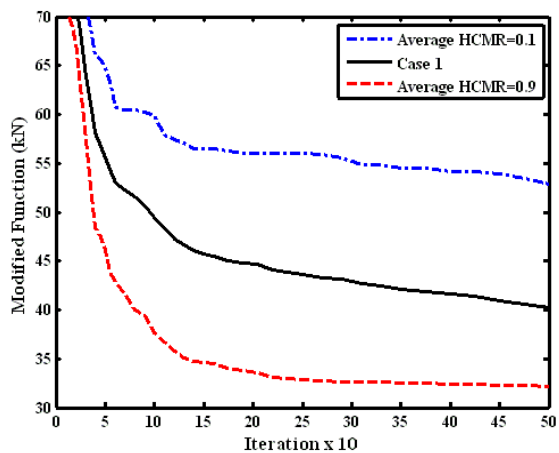
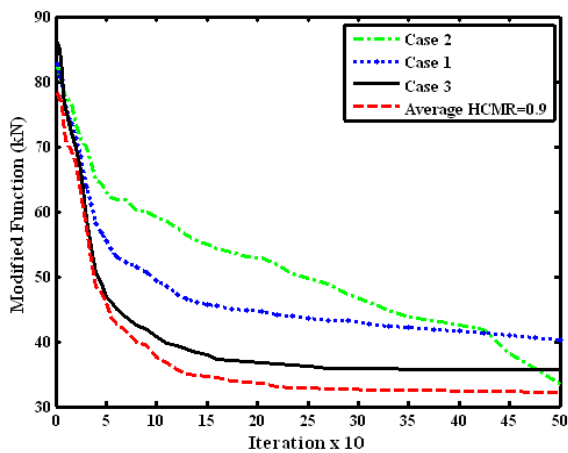
اشکال (27-3) و (28-3) میانگین سیر همگرایی برای قاب پنج طبقه - دو دهانه به ازای حالات مختلف پارامتر HCMR را نشان می‌دهد. در شکل (27-3) میانگین سیر همگرایی برای مثال مذکور به ازای مقدار ثابت در بهترین و بدترین عملکرد برای پارامتر HCMR رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بهترین سیر همگرایی مربوط به مقدار ۰/۹ و نامناسب‌ترین سیر تکاملی بهینه‌یابی مربوط به مقدار ۰/۱ برای پارامتر HCMR می‌باشد. از سوی دیگر در شکل (28-3) میانگین سیر همگرایی برای حالات ۱، ۲ و ۳ به همراه بهترین سیر فرآیند بهینه‌یابی در حالت ۱ (HCMR = ۰/۹) رسم شده است.



شکل (۳-۲۸) - سیر فرآیند بهینه یابی توسط حالات مختلف برای قاب پنج طبقه - دو دهانه

شکل (۳-۲۷) - سیر فرآیند بهینه یابی توسط مقادیر حالت ۱ برای قاب پنج طبقه - دو دهانه

در شکل (۳-۲۹) میانگین سیر همگرایی به ازای مقادیر ثابت ۰/۹ و ۰/۱ برای پارامتر $HCMR$ که به ترتیب بهترین و بدترین سیر همگرایی در حالت ۱ می باشند، برای قاب هشت طبقه - یک دهانه رسم شده است. در این شکل میانگین سیر همگرایی برای حالت ۱ نیز قابل مشاهده است. از سوی دیگر در شکل (۳-۳۰) میانگین سیر همگرایی برای مثال مذکور به ازای حالات ۱، ۲ و ۳ و نیز مقدار ثابت ۰/۹ برای پارامتر $HCMR$ رسم شده است.



شکل (۳-۳۰) - سیر فرآیند بهینه یابی توسط حالات مختلف برای قاب هشت طبقه - یک دهانه

شکل (۳-۲۹) - سیر فرآیند بهینه یابی توسط مقادیر حالت ۱ برای قاب هشت طبقه - یک دهانه

همان طور که در اشکال (۳-۲۷) و (۳-۲۹) مشاهده می شود، اختلاف سیر همگرایی بین بهترین و بدترین عملکرد به ازای مقدار ثابت برای پارامتر $HCMR$ بسیار زیاد می باشد. بدین ترتیب می توان بیان

نمود که مقدار این پارامتر تأثیر فراوانی در روند بهینه‌یابی براساس HS دارد. لذا اتخاذ مقداری صحیح و مناسب برای این پارامتر امری مهم و ضروری در روش HS می‌باشد. با بررسی‌های انجام شده، مشخص گردید که سیر تکاملی فرآیند بهینه‌یابی به تدریج با افزایش مقدار *HCMR* بهبود یافته و روند مناسب‌تری برای نیل به نقطه بهینه در پیش می‌گیرد. این مطلب در هر دو مثال مذکور مشاهده شده است. نکته حائز اهمیت دیگر در بررسی‌های انجام شده و اشکال (۳-۲۷) و (۳-۲۹) آن است که در هر دو مثال موجود، سیر همگرایی به ازای مقدار ۰/۹ برای پارامتر *HCMR* دارای روند مناسبی است. این برتری در مقادیر طرح بهینه نیز مشاهده شده است. از سوی دیگر براساس اشکال (۳-۲۸) و (۳-۳۰) کارآیی حالت مقدار ثابت ۰/۹ برای *HCMR* در قیاس با حالات ۲ و ۳ نیز مناسب‌تر است. بنابراین اتخاذ مقداری ثابت در محدوده ۰/۸۵ تا ۰/۹۵ برای این پارامتر می‌تواند روند بهینه‌یابی مناسبی را ارائه دهد. حالت ۳ نیز برای مثالی با فضای طراحی بزرگ (مثال دوم) تقریباً نزدیک به مقدار برتر حالت ۱، سیر تکاملی بهینه‌یابی را طی نموده است. این مطلب با دقت در شکل (۳-۳۰) قابل مشاهده می‌باشد. بنابراین اتخاذ حالت نزولی برای پارامتر *HCMR* در مثال‌هایی با فضای طراحی بزرگ به واسطه محدوده وسیع متغیرهای طراحی، می‌تواند راهکار نسبتاً منطقی و مناسبی برای نیل به نقطه بهینه ارائه دهد. براساس این حالت احتمال پذیرش مقادیر متغیرهای طراحی مبتنی بر طرح‌های موجود در حافظه هارمونی (*HM*) به تدریج کاهش می‌یابد و در انتهای فرآیند بهینه‌یابی احتمال تولید طرح‌هایی خارج از مقادیر موجود در *HM* افزایش می‌یابد. این شیوه می‌تواند تا حدودی در انتهای فرآیند بهینه‌یابی سبب رهایی از دام بهینه محلی شود.

۳-۲-۷ روش جستجوی ذرات باردار

روش جستجوی ذرات باردار (*CSS*) از معدود الگوریتم‌های بهینه‌یابی است که با فرآیند طراحی بهینه سازه‌ها مطرح شد [۲۲]. این روش بر پایه قوانین ذرات باردار و قوانین حرکت نیوتن، فضای طراحی را جستجو می‌نماید. شرح کامل روش *CSS* در فصل دوم بخش ۲-۲-۷ ارائه شده است. این

روش نیز همانند سایر الگوریتم‌های فراابتکاری وابسته به پارامترهای مختلفی می‌باشد که هر یک نقش بسزایی در روند بهینه‌یابی دارند. تأثیر برخی از این پارامترها در روند بهینه‌یابی توسط دیگر محققین مورد بررسی قرار گرفته و به صورت پویا و فعال در روند بهینه‌یابی تغییر می‌نمایند [۵۱-۵۳]. اما برخی از پارامترهای روش CSS همچون پارامتر بازه زمانی (Δt) کمتر مورد توجه قرار گرفته و عموماً در روند بهینه‌یابی براساس CSS به صورت ثابت منظور می‌شود. به همین سبب در این رساله تأثیر پارامتر Δt در روند بهینه‌یابی براساس روش CSS بشرح زیر مورد توجه و بررسی قرار گرفته است.

۳-۲-۱-۷ بررسی پارامتر بازه زمانی

پارامتر بازه زمانی از جمله عوامل روش CSS می‌باشد که در موقعیت جدید هر طرح به صورت مستقیم بشرح رابطه (۲-۲۴) اثر دارد. این پارامتر به صورت ضربی با توان یک در سرعت مرحله پیشین ($v_{j,old}$) و به صورت ضربی با توان دو در مقدار نیروی برآیند وارد بر هر ذره (F_j) اثر دارد. پارامتر بازه زمانی براساس پیشنهاد مطرح‌کنندگان روش CSS همواره برابر یک در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب براساس این پیشنهاد پارامتر Δt در رابطه (۲-۲۴) تأثیری نداشته و حذف می‌شود. در حالی که در فرآیند تکاملی ذرات باردار در دنیای واقعی، پارامتر بازه زمانی از مسائل مهم بوده و قابل حذف نمی‌باشد. به همین سبب در این رساله به بررسی تأثیر لزوم و عدم لزوم این پارامتر در عملکرد روش CSS پرداخته شده است. برای این منظور مقدار پارامتر Δt به ازای مقادیر مختلف و حالات متفاوت که بشرح زیر ارائه و مورد ارزیابی قرار گرفته است. حالات موجود و مقادیر مفروض نتیجه بررسی‌های انجام شده در روند بهینه‌یابی براساس CSS می‌باشد.

۳-۲-۱-۷-۱ مقادیر ثابت برای پارامتر بازه زمانی

در این حالت که با عنوان حالت ۱ معرفی می‌گردد، پارامتر بازه زمانی به صورت مقداری ثابت لحاظ شده است. بدین منظور مقدار Δt برابر مقادیر ثابت ۰/۵، ۰/۶، ۰/۷، ۰/۸، ۰/۹، ۱، ۱/۱، ۱/۲، ۱/۳،

۱/۴ و ۱/۵ در اجراهای متفاوت روش CSS در نظر گرفته شده است. انتخاب این مقادیر نتیجه بررسی‌های مختلف انجام شده برای روش بهینه‌یابی CSS است. در ادامه برای این حالت در جهت کاهش تأثیر پارامترهای تصادفی در روند بهینه‌یابی، به ازای هر مقدار پارامتر بازه زمانی، ۱۰ اجرای مستقل برای فرآیند بهینه‌یابی صورت گرفته است. سپس میانگین سیر همگرایی برای هر Δt محاسبه و تعیین شده است. در نهایت میانگین سیر همگرایی برای تمامی مقادیر ثابت Δt محاسبه (میانگین ۱۰۰ اجرای فرآیند بهینه‌یابی) و به صورت نماینده سیر همگرایی حالت ۱ که مربوط به پارامتر بازه زمانی با مقدار ثابت می‌باشد، ارائه شده است.

۳-۲-۷-۱-۲ حالت صعودی برای پارامتر بازه زمانی

در این حالت که با عنوان حالت ۲ مشخص می‌شود، پارامتر بازه زمانی به صورت صعودی در کل فرآیند بهینه‌یابی تغییر می‌نماید. به عبارت دیگر به ازای این حالت در ابتدای فرآیند بهینه‌یابی احتمال کمی برای Δt منظور شده و در طی عملیات بهینه‌یابی، مقدار پارامتر Δt به صورت خطی متناسب با نسبت شماره تکرار به تعداد کل تکرارها، براساس رابطه (۳-۲۱) افزایش می‌یابد.

$$\Delta t = \Delta t^{Min} + (\Delta t^{Max} - \Delta t^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (۳-۲۱)$$

در رابطه (۳-۲۱)، Δt^{Max} و Δt^{Min} به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل پارامتر بازه زمانی در فرآیند بهینه‌یابی است.

۳-۳-۷-۱-۳ حالت نزولی برای پارامتر بازه زمانی

این حالت که با عنوان حالت ۳ معرفی می‌گردد، مشابه حالت ۲ است؛ با این تفاوت که مقدار پارامتر بازه زمانی در کل فرآیند بهینه‌یابی به صورت نزولی تغییر می‌نماید. به عبارت دیگر به ازای این حالت، در انتهای فرآیند بهینه‌یابی مقادیر کوچکی برای پارامتر بازه زمانی منظور شده و در طی

عملیات بهینه‌یابی، مقدار Δt به صورت خطی متناسب با نسبت شماره تکرار به تعداد کل تکرارها، براساس رابطه (۲۲-۳) کاهش می‌یابد.

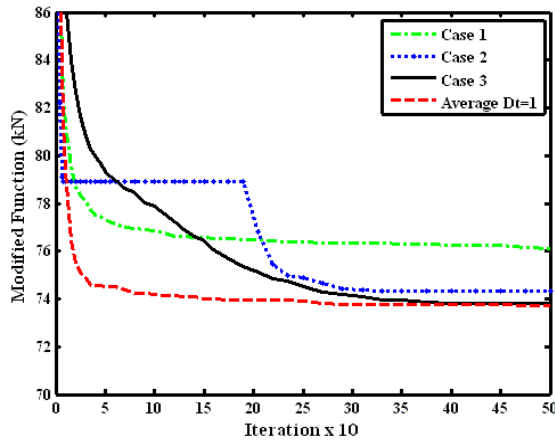
$$\Delta t = \Delta t^{Max} - (\Delta t^{Max} - \Delta t^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (22-3)$$

پارامترهای رابطه (۲۲-۳) مشابه رابطه (۲۱-۳) است.

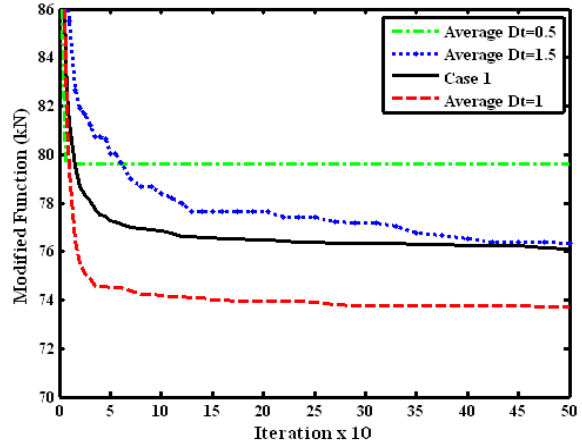
۳-۲-۷-۱-۴ بررسی حالات مختلف پارامتر بازه زمانی

برای بررسی تأثیر لزوم و عدم لزوم پارامتر بازه زمانی در روند بهینه‌یابی براساس CSS، مشابه دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری از مسائل بهینه‌یابی سطح مقطع قاب‌های فولادی استفاده شده است. بدین منظور قاب پنج طبقه - دو دهانه بشرح بخش ۳-۵-۱ و قاب هشت طبقه - یک دهانه بشرح پیوست الف-۴ مثال‌های برگزیده برای بررسی پارامتر Δt در بهینه‌یابی براساس CSS می‌باشند. در بررسی‌های انجام شده برای قضاوتی منطقی نسبت به عملکرد پارامتر بازه زمانی، سعی شده است تا شرایط یکسانی برای تمامی حالات منظور شود. بدین ترتیب مقادیر حداقل و حداکثر در حالات ۲ و ۳ برای هماهنگی با حالت ۱ به ترتیب برابر ۰/۵ و ۱/۵ لحاظ گردیده است. این مقادیر طی بررسی‌های مختلف روش CSS نتیجه شده است. از سوی دیگر در حالات ۲ و ۳ نیز برای اجتناب از تأثیر عوامل تصادفی در روند بهینه‌یابی و مقایسه نتایج، سیر همگرایی هر حالت از میانگین ۳۰ اجرای مستقل فرآیند بهینه‌یابی حاصل می‌شود.

اشکال (۳۱-۳) و (۳۲-۳) میانگین سیر بهینه‌یابی را برای قاب پنج طبقه - دو دهانه به ازای حالات و مقادیر مختلف پارامتر Δt نشان می‌دهد. در شکل (۳۱-۳) میانگین سیر همگرایی به ازای مقادیر حداکثر، حداقل و بهترین مقدار ثابت برای پارامتر بازه زمانی، به همراه میانگین سیر همگرایی حالت ۱ رسم شده است. از سوی دیگر بهترین سیر همگرایی به ازای مقدار ثابت در شکل (۳۲-۳) با حالات ۱، ۲ و ۳ مقایسه شده است.

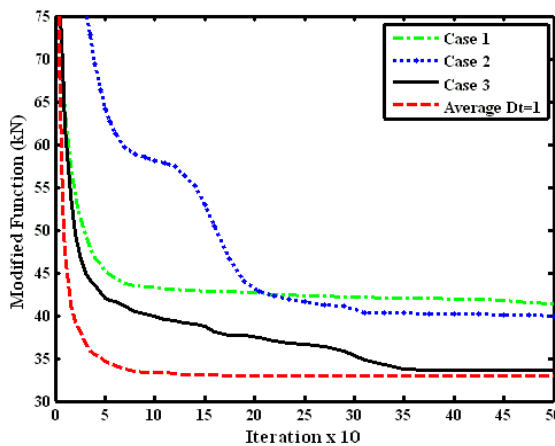


شکل (۳-۳۲) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط حالات مختلف برای قاب پنج طبقه - دو دهانه

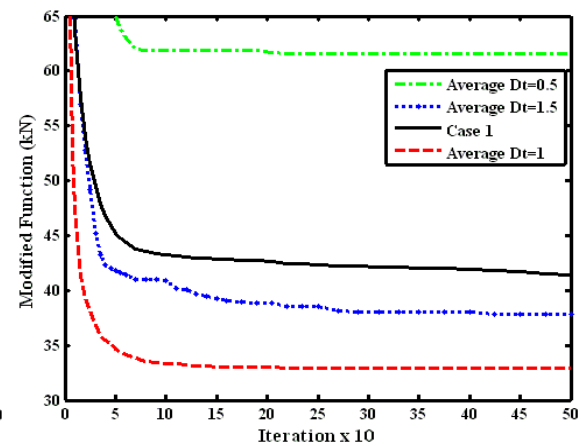


شکل (۳-۳۱) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط مقادیر حالت ۱ برای قاب پنج طبقه - دو دهانه

در شکل (۳-۳۳) میانگین سیر همگرایی به ازای حداقل و حداکثر مقادیر ثابت برای مثال قاب هشت طبقه - یک دهانه رسم شده است. در این شکل بهترین میانگین سیر همگرایی به ازای مقدار ثابت یک و نیز میانگین سیر همگرایی حالت ۱ (۱۱۰ اجرای فرآیند بهینه‌یابی) منظور شده است. از سوی دیگر در شکل (۳-۳۴) بهترین میانگین سیر همگرایی مقادیر ثابت برای پارامتر Δt به همراه میانگین سیر همگرایی حالات مختلف قابل مشاهده است.



شکل (۳-۳۴) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط حالات مختلف برای قاب هشت طبقه - یک دهانه



شکل (۳-۳۳) - سیر فرآیند بهینه‌یابی توسط مقادیر حالت ۱ برای قاب هشت طبقه - یک دهانه

همان‌طور که در اشکال (۳-۳۱) و (۳-۳۳) مشاهده می‌شود، پارامتر بازه زمانی، عاملی مهم در روند بهینه‌یابی براساس CSS می‌باشد. چراکه عدم انتخاب مقداری صحیح برای این پارامتر روند بهینه‌یابی

را دستخوش تغییرات چشمگیری می‌نماید. این مطلب با مشاهده اختلاف سیر همگرایی مقادیر مختلف در حالت ۱ براساس اشکال (۳۱-۳) و (۳۳-۳) قابل مشاهده می‌باشد. بنابراین انتخاب مقداری مناسب برای پارامتر بازه زمانی در روش بهینه‌یابی براساس CSS امری مهم و ضروری است.

از سوی دیگر همان‌طور که در اشکال (۳۲-۳) و (۳۴-۳) مشاهده می‌شود، مقدار واحد برای پارامتر Δt مقداری مناسب می‌باشد، چراکه در هر دو مثال مذکور بهترین سیر همگرایی را نسبت به سایر حالات از خود نشان داده است. اتخاذ مقدار واحد برای این پارامتر سبب می‌شود تا موقعیت جدید هر ذره در روش CSS کمتر دچار آشفتگی و تغییرات شود و اصولاً براساس سایر پارامترهای رابطه (۲۴-۲) شکل گیرد. بنابراین برای فرآیند طراحی بهینه‌سازها براساس روش CSS، مقدار یک برای پارامتر بازه زمانی توصیه می‌شود. پس از حالت اتخاذ مقدار واحد برای پارامتر بازه زمانی، حالت ۳ با شیوه‌ای نزولی برای Δt روند مناسبی را برای بهینه‌یابی براساس CSS ارائه می‌دهد. در این حالت مقدار پارامتر Δt در ابتدا بالا بوده و با افزایش تعداد دفعات تکرار، مقدار آن به صورت خطی کاهش می‌یابد. ممکن است با بررسی بیشتر روش بهینه‌یابی براساس CSS بتوان مقادیر حداقل و حداکثری را پیشنهاد نمود که سبب افزایش کارایی CSS براساس حالت ۳ شود.

۳-۳ روش نوین جستجوی چندمنظوره

با بررسی‌های انجام شده در بخش ۳-۲، مشاهده گردید که اکثر الگوریتم‌های فراابتکاری وابستگی فراوانی به پارامترهای مختلف روش دارند. عدم شناخت صحیح این پارامترها سبب می‌شود تا کارایی هر یک از الگوریتم‌های فراابتکاری به طور چشمگیری دستخوش تغییرات شود. در این راستا براساس تحقیقات بخش پیشین و با بررسی‌های انجام شده و ارائه حالات پویا و فعال برای برخی از پارامترهای هر یک از الگوریتم‌های فراابتکاری انتخابی، سعی شده است تا فرآیند سعی و خطا جهت کسب مقدار مناسب پارامتر از روند بهینه‌یابی براساس الگوریتم مربوطه حذف شود. در این بخش نیز

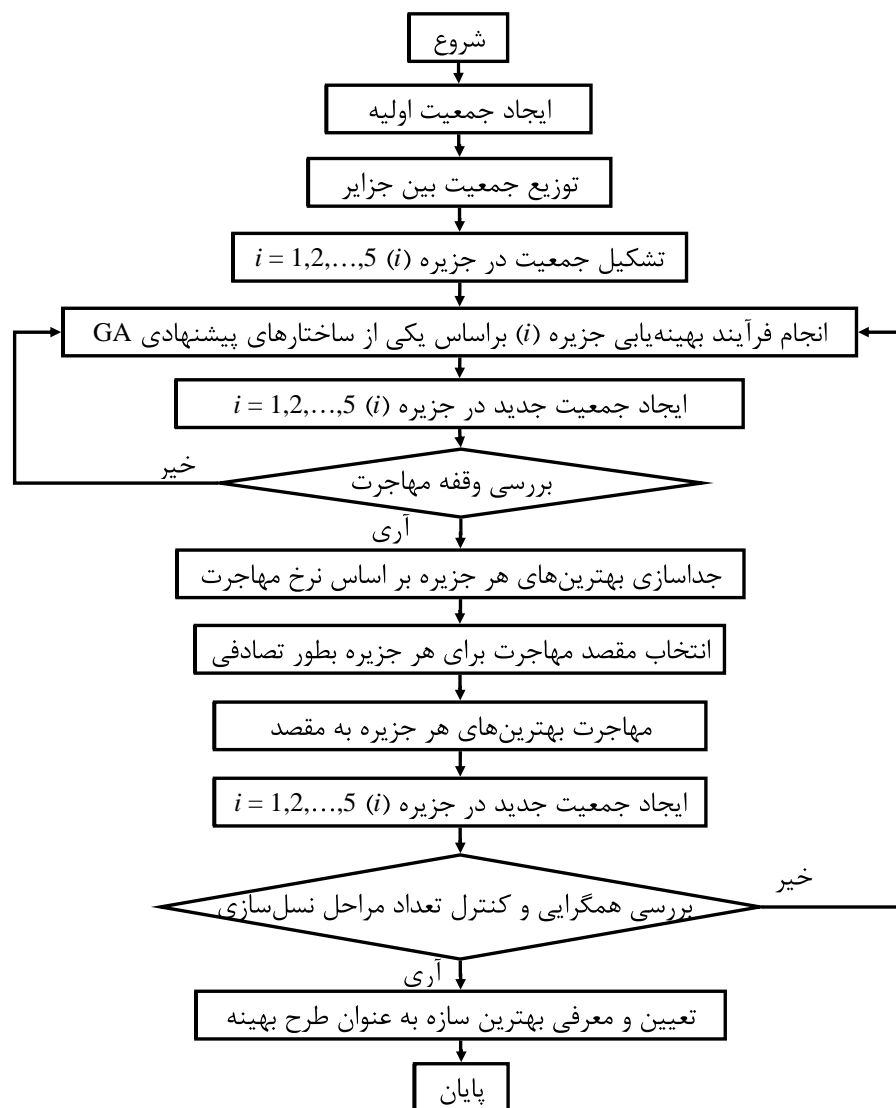
در راستای توسعه و بهبود کارایی الگوریتم‌های فراابتکاری، روش جستجوی چندمنظوره^۱ (MSM) ارائه شده است. در این روش سعی گردیده تا با استفاده از تفکر سیستم جزیره‌ای و به کارگیری ساختارهای مختلف روش موردنظر، تأثیر مقادیر پارامترهای و روابط حاکم بر الگوریتم انتخابی کاهش یابد. برای این منظور به عنوان نمونه جهت ارائه روش MSM از الگوریتم ژنتیک بشرح زیر استفاده شده است.

۳-۳-۱ روش جستجوی چندمنظوره بر پایه الگوریتم‌های ژنتیک

الگوریتم ژنتیک از جمله روش‌هایی است که متناسب با تاریخچه نسبتاً طولانی و کارایی مناسب، دارای ساختارهای متفاوتی برای هر یک از مراحل GA بشرح بخش ۲-۲-۱ و ۳-۲-۱ می‌باشد. اکثر این ساختارهای نتیجه تحقیقات متعدد توسط محققین مختلف برای GA است [۲۴-۳۴]. در هر ساختار پیشنهادی پارامترها و روابط GA و عوامل شیوه پیشنهادی تأثیر فراوانی بر عملکرد الگوریتم ژنتیک در فرآیند بهینه‌یابی دارند. عدم شناخت صحیح این پارامترها و روابط حاکم بر GA از قبیل تعداد اعضای جمعیت، تعداد نسل‌ها، نرخ عملگرهای GA همچون پیوند و جهش، نوع و پارامترهای تابع جریمه، تابع شایستگی، فرآیند انتخاب و ... سبب می‌شود تا در برخی مواقع کارایی الگوریتم کاهش یابد. در این رساله روش جستجوی چندمنظوره با ویژگی‌های منحصر بفرد در افزایش دقت در کاوش فضای طراحی و کاهش تأثیر پارامترهای GA و روابط حاکم بر آن، براساس ساختارهای مختلف پیشنهادی توسط محققین، ارائه شده است. در روش نوین MSM بر پایه الگوریتم ژنتیک (MSM-GA)، ابتدا جمعیت GA به بخش‌های مختلف (جزایر متنوع) تقسیم می‌شود [۶۲]. هر جزیره دارای روش بهینه‌یابی مبتنی بر GA با ساختاری متفاوت است. این طریقه عمل سبب می‌شود، جواب‌ها از تنوع خوبی برخوردار شوند. روش MSM-GA در دو حالت با عنوان‌های MSM-GA-1 و MSM-GA-2 بشرح زیر ارائه شده است.

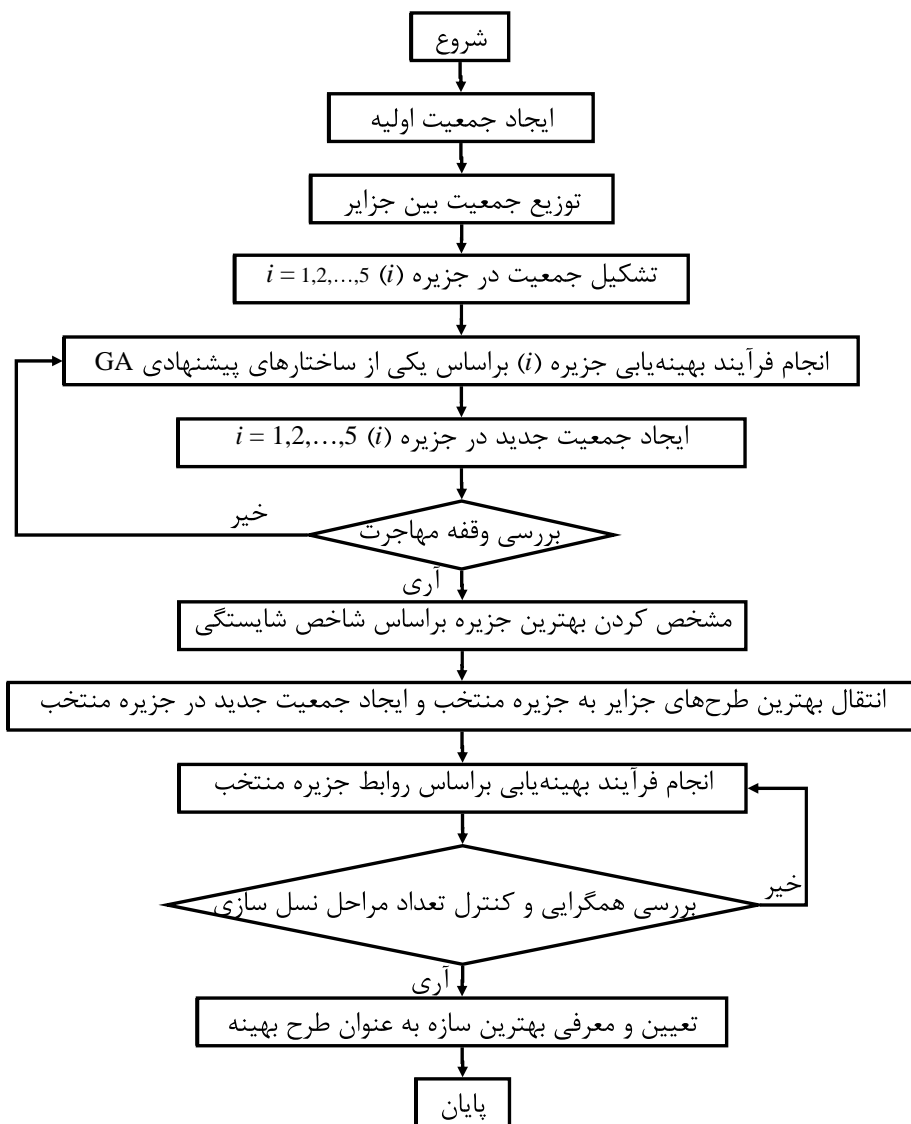
^۱ . Multi Search Method (MSM)

در MSM-GA-1 بهترین اعضای هر جزیره براساس نرخ مهاجرت پس از طی چند نسل مشخص مبتنی بر وقفه مهاجرت، به طور تناوبی به جزایر دیگر منتقل می‌شود. پارامتر وقفه مهاجرت بیانگر تعداد نسل‌های بین هر انتقال و نرخ مهاجرت بیانگر درصد اعضای منتخب برای انتقال از هر جزیره در زمان انتقال می‌باشد. بدین ترتیب عملگر مهاجرت، درصدی از بهترین‌های یک زیرجمعیت را به جزیره دیگر فرستاده و جایگزین اعضای با شایستگی پایین می‌نماید. در فرآیند مهاجرت هر کدام از زیرجمعیت‌ها دارای یک مقصد تصادفی می‌باشند و این مقصدها به طور تصادفی در هر دوره تناوب مهاجرت مشخص می‌شوند. پس از فرآیند مهاجرت، هر ساختار از الگوریتم ژنتیک موجود در جزایر، جمعیت‌های مهاجر را با باقیمانده اعضای جمعیت ترکیب می‌نماید و به سوی حصول جمعیتی با شایستگی بالاتر گام بر می‌دارد. در MSM-GA-1 به سبب وجود مکانیزم مهاجرت، جواب‌ها در خلال فرآیند کاوش از تنوع خاصی برخوردارند. چراکه به دلیل خصوصیات مجزا و ساختارهای متفاوت هر جزیره، از تمامی روش‌های معتبر و کارآمد معرفی شده توسط محققین بهره گرفته شده است. بدین ترتیب هر مسئله بهینه‌یابی در یک لحظه با چندین روش، بررسی و فضای طراحی کاوش می‌شود و در ادامه بهترین نتایج، بین دیگر جزایر به اشتراک گذاشته و اعضای جدیدی در اختیار هر جزیره برای پرورش قرار می‌گیرد. این خصوصیات بطور دسته جمعی سبب کاهش تأثیر پارامترها و روابط حاکم بر عملیات GA می‌شود و کارآیی الگوریتم ژنتیک برای کاوش دقیق‌تر فضای طراحی افزایش می‌یابد. شکل (۳-۳۵) مراحل حالت اول روش MSM-GA را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۳۵) - حالت اول روش جستجوی چندمنظوره (MSM-GA-1)

در MSM-GA-2 نیز مشابه MSM-GA-1، نخست مسئله بهینه‌یابی براساس روش‌های مختلف جزایر بررسی و فضای طراحی کاوش می‌شود. سپس براساس شیوه این روش در زمان وقفه مهاجرت، شایسته‌ترین جزیره در نیل به نقطه کمینه شناسایی می‌شود. در ادامه الگوریتم حاکم بر جزیره برتر در کل سیستم حاکم خواهد شد. به بیان دیگر بهترین نتایج حاصل از جزایر مختلف، در جزیره منتخب گردآوری و فرآیند بهینه‌یابی براساس ساختار مطرح در جزیره منتخب ادامه می‌یابد. این شیوه ضمن کاهش تأثیر پارامترهای GA، سبب افزایش سرعت عملیات بهینه‌یابی نیز می‌شود. لازم به ذکر است که در MSM-GA-2 وقفه مهاجرت بیشتر از MSM-GA-1 است. شکل (۳-۳۶) مراحل حالت دوم روش MSM-GA را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۳۶) - حالت دوم روش جستجوی چندمنظوره (MSM-GA-2)

در مسائلی که به دلیل زیاد بودن متغیرهای طراحی و بزرگ بودن فضای کاوش، تأثیر پارامترهای GA نقش اساسی ایفا می‌نمایند، مدل پیشنهادی به طور مؤثری فضای کاوش را جستجو می‌نماید. در این راستا میزان کارآمدی روش MSM بر پایه الگوریتم‌های ژنتیک با مسائل بهینه‌یابی سطح‌مقطع و توپولوژی سازه‌های خرپایی، مسائل بهینه‌یابی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری، مسئله بهینه‌یابی سطح‌مقطع و هندسه سازه فضاکار تخت دولایه و نیز مسائل بهینه‌یابی سطح‌مقطع سازه‌های خرپایی مورد بررسی قرار گرفته است. براین اساس برای مسائل بهینه‌یابی سطح‌مقطع و توپولوژی، خرپای ۱۰ میله‌ای بشرح بخش الف-۲، خرپای فضایی ۲۵ میله‌ای بشرح بخش الف-۳ و شبکه‌های

متعامد 2×2 ، 3×3 و 5×5 بشرح پیوست الف بخش الف-۵ در نظر گرفته شده است. برای مسائل بهینه‌یابی قاب‌های شیب‌دار، مسئله بهینه‌یابی قاب شیب‌دار غیرمنشوری با تیرهای یکنواخت بشرح بخش‌های ۳-۱-۱ به عنوان نمونه در این فصل ارائه و مسئله بهینه‌یابی قاب شیب‌دار غیرمنشوری با تیرهای غیریکنواخت نیز بشرح بخش الف-۶ از پیوست الف بررسی شده است [۶۳-۶۴]. مسئله بهینه‌یابی سطح‌مقطع و هندسه سازه فضاکار نیز براساس سازه فضاکار تخت دولایه 8×8 بشرح پیوست الف بخش الف-۷ مورد بررسی قرار گرفته است [۶۵]. از سوی دیگر برای مسائل بهینه‌یابی سطح مقطع نیز از برج فولادی ۷۲ میله‌ای بشرح بخش الف-۸ و خرپای مستوی ۲۰۰ میله‌ای بشرح بخش الف-۹ از پیوست الف استفاده می‌شود [۶۶]. نتایج طرح بهینه برای مثال‌های مذکور براساس روش MSM-GA بیانگر توانایی این روش در کاوش دقیق‌تر فضای طراحی است. این نتایج در جداول مربوط به هر مثال، قابل مشاهده است. همان‌طور که در نتایج این مثال‌ها مشاهده می‌شود، آهنگ پایدار و ثابت روش MSM-GA سبب می‌شود تا الگوریتم از گسترش و پرورش اعضای نالایق جلوگیری نموده و به ترویج اعضای شایسته در فضای ژنتیک می‌پردازد. از سوی دیگر به سبب بی‌نیاری نسبی روش MSM-GA به پارامترها و روابط حاکم بر GA، فرآیند سعی و خطا برای اتخاذ مقادیر مناسب تقریباً حذف می‌شود. لازم به ذکر است که روش MSM-GA با ارائه ساختارهای پیشنهادی بخش ۳-۲-۱ برای GA و به کارگیری این پیشنهادات در یکی از جزایر، در برخی مواقع با عنوان روش اصلاحی جستجوی چندمنظوره و یا روش جستجوی چندگانه معرفی می‌گردد. این روش برای طراحی بهینه سازه‌های خرپایی در قالب یک نرم‌افزار به جامعه مهندسين عرضه شده است. این نرم‌افزار دارای تأیید فنی از دبیرخانه شورای عالی انفورماتیک کشور مربوط به معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور با شماره شناسایی ۲۰۳۸۹۲ است. شکل (۳-۳۷) تأیید فنی نرم‌افزار بهینه‌یاب سازه‌های میله‌ای براساس روش جستجوی چندگانه را نشان می‌دهد.

معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور
 دبیرخانه شورای عالی انفورماتیک کشور

به نام خدا

شماره:
 ۲۰/۳۷-۱۰۳۹۰۴
 تاریخ: ۴ - مرداد ۱۳۸۹

کوبای تأیید فنی نرم افزار

نرم افزار بهینه یاب سازه های میلدای (خرپا) بر اساس روش جستجوی چندگان

با استناد به ماده ۸ و قانون حمایت از حقوق پدیدآورندگان نرم افزارهای رایانه ای، مصوب ۱۳۷۹/۱۰/۴ مجلس شورای اسلامی و بخش چهارم این نامه اجرائی قانون مذکور، تحت شماره شناسایی زیر تأیید فنی شد. مشخصات دارندگان حقوق مادی و معنوی (مالکان و پدیدآورندگان) در فهرست کوبای مندرج است.

۲ ۰ ۳ ۸ ۹ ۲

بررسی است ثبت نرم افزار فوق و شرآن تابع قوانین و مقررات مربوط می باشد.

از طرف: **مندی شرقانی**
 محمد مهدی رحمتی
 معاون نظارت راهبردی و
 دبیر شورای عالی انفورماتیک کشور

این کوبای مذکور در وقتی مسموب می شود هرگونه عمل آن مستوجب پیگرد قانونی است.

شخص متبقی		شخص متبقی	
ردیف	نام دارنده مالکیت	ردیف	نام دارنده مالکیت
۱	دبیرخانه گیت های	۱	دبیرخانه گیت های
۲	محمد حسین طالب پور	۲	محمد حسین طالب پور
شماره ملی	۲۵۱۱۴۵۳۱۷	شماره ملی	۲۵۱۱۴۵۳۱۷

شخصات دارندگان حقوق مادی و معنوی (پدیدآورنده / مالکان)

شخصات دارندگان حقوق مادی و معنوی (پدیدآورنده / مالکان)

توجه: اطلاعات مندرج در این کوبای مندرج در این سند مستحق پیگرد قانونی نمی باشد.

شکل (۳-۳۷) - تأیید فنی نرم افزار بهینه یاب سازه های میلدای بر اساس روش جستجوی چندگانه

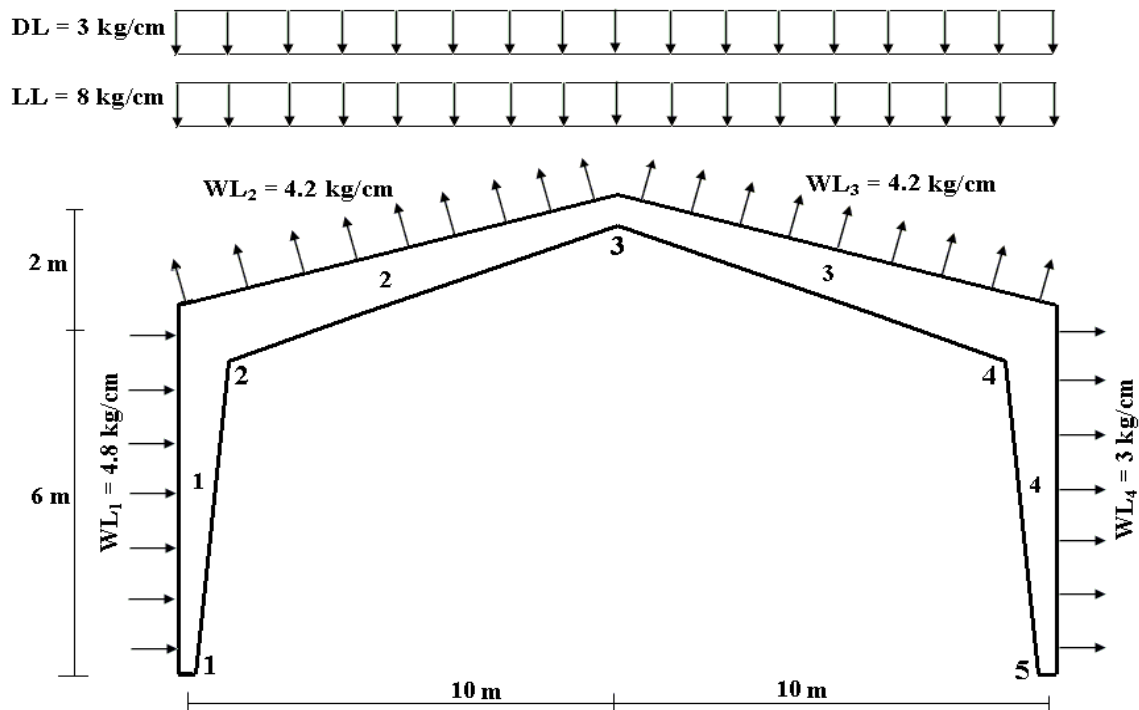
از نکات حائز اهمیت در روش MSM به کارگیری ساختارهای متفاوت دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری در جزایر روش MSM می‌باشد. به بیان دیگر می‌توان در جزایر روش MSM از شیوه‌های مختلف الگوریتمی همچون کلونی مورچگان که دارای ساختارهای متعددی است، استفاده نمود. بدین ترتیب روش جستجوی چندمنظوره بر پایه الگوریتم‌های کلونی مورچگان (MSM-ACO) پدید می‌آید که در کاهش تأثیر پارامترها و روابط حاکم بر ACO مؤثر بوده و فضای طراحی را با دقت بیشتری جستجو می‌نماید.

از ویژگی‌های دیگر روش MSM آن است که متناسب با شیوه جستجو، امکان بهره‌گیری از سیستم‌های رایانه موازی [۶۲] با تخصیص هر جزیره به یک سیستم، نیز مهیا می‌باشد. به بیان دیگر این روش به سبب شیوه جستجوی موازی در فضای طراحی، قابلیت استفاده از سیستم‌های پردازش موازی را دارا بوده و بدین‌سان می‌تواند سبب افزایش مضاعف سرعت عملیات بهینه‌یابی و کسب نتایج مناسب در فضای طراحی شود.

۳-۳-۱-۱-۱ بهینه‌یابی قاب شیب‌دار غیرمنشوری با تیرهای یکنواخت

در این مثال فرآیند طراحی بهینه‌یابی با مشخصات هندسی و بارگذاری مطابق شکل (۳-۳۸) براساس روش MSM-GA مورد توجه قرار گرفته است. ترکیبات بارگذاری براساس آیین‌نامه بارگذاری [۶۷] در نظر گرفته شده است. در فرآیند طراحی بهینه ρ و E به ترتیب برابر 0.00785 kg/cm^3 و $2/1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ در نظر گرفته می‌شود.

از سوی دیگر یک مهار طولی در فاصله 400 cm از پایه ستون فرض شده است. بدین ترتیب طول عضو مهارنشده حول محور ضعیف برابر 400 cm فرض می‌شود. فاصله سینه‌بندهای تیر نیز برابر 200 cm انتخاب شده است.



شکل (۳-۳۸) - هندسه و بارگذاری قاب شیب‌دار غیرمنشوری با تیرهای یکنواخت

محدوده مجاز برای ابعاد تیر و ستون براساس ورق‌های موجود در بازار بشرح جدول (۳-۱) دسته‌بندی شده‌اند.

جدول (۳-۱) محدوده متغیرهای طراحی برای قاب شیب‌دار غیرمنشوری با تیرهای یکنواخت

متغیر	شرح متغیر	حدبالا	حدپایین	متغیر	شرح متغیر	حدبالا	حدپایین
۱	ارتفاع جان در گره ۱ از عضو ۱	۱۰	۱۰۰	۱۱	ارتفاع جان در گره ۳ از عضو ۳	۱۰	۱۰۰
۲	ارتفاع جان در گره ۲ از عضو ۱	۱۰	۱۰۰	۱۲	ارتفاع جان در گره ۴ از عضو ۳	۱۰	۱۰۰
۳	عرض بال عضو ۱	۱۰	۱۰۰	۱۳	عرض بال عضو ۳	۱۰	۱۰۰
۴	ضخامت جان عضو ۱	۰/۲	۳/۵	۱۴	ضخامت جان عضو ۳	۰/۲	۳/۵
۵	ضخامت بال عضو ۱	۰/۲	۳/۵	۱۵	ضخامت بال عضو ۳	۰/۲	۳/۵
۶	ارتفاع جان در گره ۲ از عضو ۲	۱۰	۱۰۰	۱۶	ارتفاع جان در گره ۴ از عضو ۴	۱۰	۱۰۰
۷	ارتفاع جان در گره ۳ از عضو ۲	۱۰	۱۰۰	۱۷	ارتفاع جان در گره ۵ از عضو ۴	۱۰	۱۰۰
۸	عرض بال عضو ۲	۱۰	۱۰۰	۱۸	عرض بال عضو ۴	۱۰	۱۰۰
۹	ضخامت جان عضو ۲	۰/۲	۳/۵	۱۹	ضخامت جان عضو ۴	۰/۲	۳/۵
۱۰	ضخامت بال عضو ۲	۰/۲	۳/۵	۲۰	ضخامت بال عضو ۴	۰/۲	۳/۵

نتایج مربوط به طرح بهینه در جدول (۲-۳) در قیاس با مرجع [۶۸] ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، روش MSM-GA به طرحی بهینه‌تر دست یافته است.

جدول (۲-۳) نتایج طرح بهینه قاب شیب‌دار با تیرهای یکنواخت به روش MSM-GA - cm

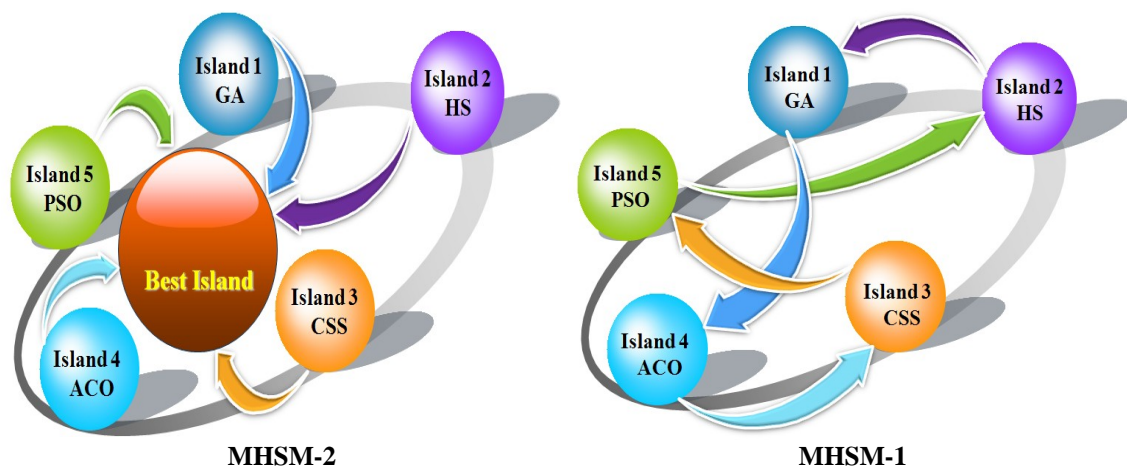
متغیر	شرح متغیر	MSM-GA	مرجع [۶۸] SQP	متغیر	شرح متغیر	MSM-GA	مرجع [۶۸] SQP
۱	ارتفاع جان در گره ۱ از عضو ۱	۳۲	۱۶/۱۵	۱۱	ارتفاع جان در گره ۳ از عضو ۳	۳۴	۱۷/۲
۲	ارتفاع جان در گره ۲ از عضو ۱	۶۶	۱۰۲/۵۶	۱۲	ارتفاع جان در گره ۴ از عضو ۳	۹۶	۱۲۵/۰۳
۳	عرض بال عضو ۱	۲۱	۲۷/۹۶	۱۳	عرض بال عضو ۳	۱۲	۱۲/۰۱
۴	ضخامت جان عضو ۱	۰/۴	۰/۶۱۶	۱۴	ضخامت جان عضو ۳	۰/۶	۰/۷۱۵
۵	ضخامت بال عضو ۱	۱	۰/۸۷۸	۱۵	ضخامت بال عضو ۳	۱	۰/۶۳
۶	ارتفاع جان در گره ۲ از عضو ۲	۸۷	۱۲۵/۰۳	۱۶	ارتفاع جان در گره ۴ از عضو ۴	۶۵	۱۰۲/۵۶
۷	ارتفاع جان در گره ۳ از عضو ۲	۳۸	۱۷/۲	۱۷	ارتفاع جان در گره ۵ از عضو ۴	۲۱	۱۶/۱۵
۸	عرض بال عضو ۲	۱۳	۱۲/۰۱	۱۸	عرض بال عضو ۴	۲۱	۲۷/۹۶
۹	ضخامت جان عضو ۲	۰/۶	۰/۷۱۵	۱۹	ضخامت جان عضو ۴	۰/۴	۰/۶۱۶
۱۰	ضخامت بال عضو ۲	۱	۰/۶۳	۲۰	ضخامت بال عضو ۴	۱	۰/۸۷۸
		حجم - cm^3				۲۰۱۴۸۵	۲۴۲۵۲۴

۳-۳-۲ روش نوین کاوش چندفرآبتکاری

همان‌طور که پیشتر بیان شد، اکثر الگوریتم‌های فرآبتکاری وابسته به چگونگی اعمال و مقدار پارامترهای مختلفی در روند بهینه‌یابی می‌باشند. با بررسی‌های مختلف الگوریتم‌های فرآبتکاری و ارزیابی جزئیات هر روش و نیز شناسایی ابعاد مختلف الگوریتم MSM، ایده روش کاوش چندفرآبتکاری^۱ (MHSM) شکل گرفته است. این روش در جهت توسعه روش MSM با بکارگیری الگوریتم‌های فرآبتکاری مختلف به عنوان ساختار هر جزیره ارائه شده است. بدین‌منظور در هر جزیره روش MHSM یک الگوریتم فرآبتکاری به کار گرفته می‌شود. الگوریتم‌های GA، ACO، PSO، HS و CSS روش‌های فرآبتکاری منتخب برای جزایر روش MHSM می‌باشند. شیوه عمل در روش MHSM مشابه روش MSM بوده و این الگوریتم نیز در دو حالت با عناوین MHSM-1 و MHSM-2 ارائه شده

^۱ . Multi Heuristic based Search Method (MHSM)

است. بدین ترتیب در روش MHSM همانند روش MSM ابتدا جمعیت اولیه به بخش‌های مختلف تقسیم و زیرجمعیت‌ها در جزایر موجود سازماندهی می‌شود. هر جزیره دارای روش بهینه‌یابی مجزایی بشرح الگوریتم‌های مذکور بشرح توضیحات فصل دوم و بخش ۲-۳ می‌باشد. در پایان چند نسل‌سازی معین با استفاده از وقفه مهاجرت و نرخ مهاجرت بهترین‌ها بین جزایر جابجا می‌شوند. با تکرار این روند، روش MHSM-1 شکل می‌گیرد. در MHSM-2 همانند حالت دوم روش MSM، بهترین جزیره براساس طرح‌های موجود در جزایر، در زمان وقفه مهاجرت مشخص می‌شود. سپس روابط حاکم بر جزیره برتر در کل سیستم حاکم شده و فرآیند بهینه‌یابی براساس الگوریتم منتخب ادامه می‌یابد. شکل (۳-۳۹) نمایی شماتیک از حالات روش پیشنهادی کاوش چندفرابتنکاری را نشان می‌دهد.



MHSM-2

MHSM-1

شکل (۳-۳۹) - حالات روش کاوش چندفرابتنکاری (MHSM)

نکته حائز اهمیت در روش‌های MHSM فرآیند مهاجرت می‌باشد که می‌بایست اعضای مهاجر براساس شرایط و ساختار اعضای جزیره مبدأ تغییر یابند. این تغییر یک نوع سازگاری با محیط جزیره مبدأ می‌باشد. برای این منظور ابتدا یک معیار مشترک برای مقایسه برتری اعضای جزایر لازم است. این مهم براساس تابع هدف اصلاح شده بشرح رابطه (۲-۳) حاصل می‌شود. سپس فرآیند دگرگونی و سازگاری برای اعضای مهاجر متناسب با ساختار و الگوریتم حاکم بر جزیره مبدأ بشرح زیر صورت می‌پذیرد.

اگر مقصد جزیره GA باشد، اعضای مهاجر به فضای ژنتیک نگاشت شده و به رشته‌هایی هم‌ارز با طرح‌های معادل با اعضای مهاجر تبدیل می‌شود. اگر مقصد جزایر PSO و CSS باشد، اعضای مهاجر به فضای برداری نگاشت شده و هر طرح به صورت یک بردار در فضای طراحی مشخص می‌گردد. در صورتی که مقصد جزیره HS باشد، هر یک از اعضای مهاجر به صورت یک ماتریس سطری به تعداد Nos درایه بیان می‌شود. درایه‌های هر یک از این ماتریس‌های سطری، بیانگر مقدار متغیرهای طراحی مربوط به طرح مهاجر می‌باشد. این ماتریس‌های سطری قابلیت جانشینی برای طرح‌های موجود در ماتریس HM را دارند. اما مسئله قابل توجه در جزیره ACO است. اگر مقصد جزیره ACO باشد، به سبب آن که انتخاب حالات شایسته براساس رابطه (۲-۱۰) با استفاده از میزان فرومون هر حالت در ماتریس Ph انجام می‌شود، می‌بایست ابتدا درایه‌های معادل برای طرح‌های مهاجر در ماتریس Ph مشخص شود. سپس میزان فرومون درایه‌های موردنظر متناسب با کیفیت (مقدار تابع هدف اصلاح شده) طرح‌های مهاجر افزایش یابد. بدین ترتیب شانس انتخاب مقدار مشخص مربوط به متغیرهای طراحی اعضای مهاجر در فرآیند بهینه‌یابی براساس ACO در جزیره مربوطه افزایش می‌یابد. برای افزایش میزان فرومون درایه‌های معادل با طرح‌های مهاجر از رابطه (۳-۲۳) استفاده می‌شود.

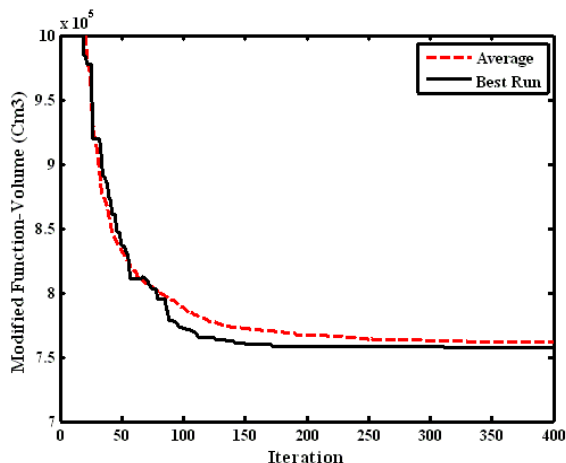
$$Ph_{ij}^{new} = Ph_{ij}^{old} + \left[(1 - e_r) \times \frac{Ph_{ij}^{old}}{2Ph_{ij}^0} \times \frac{\phi_{best}}{\phi_k} (iter^{0.05}) \right] \quad (۳-۲۳)$$

در رابطه (۳-۲۳) ϕ_{best} میزان تابع هدف اصلاح‌شده بهترین طرح در جزیره ACO در زمان مهاجرت می‌باشد. ϕ_k نیز میزان تابع هدف اصلاح‌شده k امین طرح مهاجر است. سایر پارامترهای رابطه (۳-۲۳) در بخش‌های گذشته به خصوص بخش ۲-۲-۴ از فصل پیش تعریف شده است.

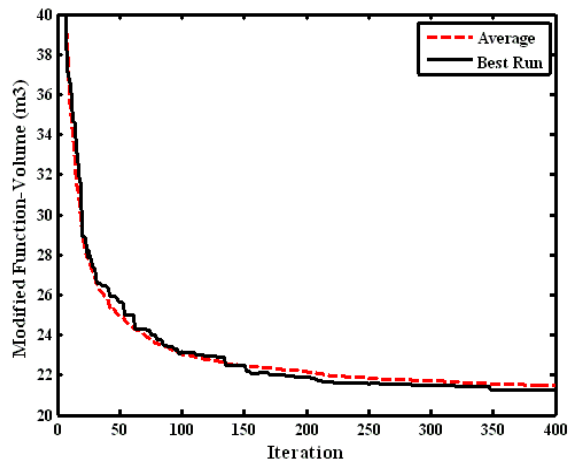
براساس اصول فوق فرآیند مهاجرت در روش MHSM قابل اجرا می‌باشد. کلیات مراحل روش‌های MHSM مشابه روش MSM بشرح اشکال (۳-۳۵) و (۳-۳۶) است. این روش نیز متناسب با شیوه جستجوی موازی قابلیت استفاده از سیستم‌های پردازش موازی را دارا می‌باشد. ویژگی منحصر بفرد روش MHSM کاهش تأثیر پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری و نیز افزایش دقت و دامنه جستجوی فضای طراحی است. بدین منظور برای ارزیابی معیار دقت الگوریتم MHSM در کاوش

فضای جستجوی مسائلی با فضای طراحی بزرگ از مثال‌های بهینه‌یابی پیکربندی سازه‌های خریایی استفاده شده است. خریای مستوی ۱۰ میله‌ای بشرح بخش الف-۱۰، خریای فضایی ۲۵ میله‌ای بشرح بخش الف-۱۱ و خریای ۱۳۱ میله‌ای بشرح بخش الف-۱۲ از پیوست الف و خریای مستوی ۱۵ میله‌ای بشرح بخش ۳-۲-۱ مثال‌های منتخب برای بررسی میزان دقت الگوریتم MHSM در کاوش فضاهای بزرگ جستجوی می‌باشند. در مسائل پیکربندی به سبب اتخاذ سه نوع متغیر طراحی سطح‌مقطع، توپولوژی و هندسه به صورت همزمان، فضای طراحی به طور چشمگیری رشد نموده و احتمال گرفتاری در بهینه محلی زیاد می‌باشد. به همین سبب این نوع مسائل معیار مناسبی برای ارزیابی دقت کاوش فضای طراحی و عدم گرفتاری در بهینه محلی براساس الگوریتم پیشنهادی است. نتایج مثال‌های مذکور در جداول مربوط به هر مثال در قیاس با دیگر مراجع قابل مشاهده می‌باشد. براساس این جداول، روش MHSM فضای طراحی را دقیق‌تر از سایر مراجع جستجو نموده و به طرحی بهینه‌تر دست یافته است. در راستای بررسی میزان دقت روش MHSM فرآیند بهینه‌یابی برج فولادی ۹۴۲ میله‌ای نیز بشرح بخش الف-۱۳ از پیوست الف مورد بررسی قرار گرفته است [۶۹]. نتایج این مسئله با بکارگیری تنها سه جزیره در بخش الف-۱۳ ارائه شده است. این نتایج نیز دلالت بر کارآیی مناسب روش MHSM در کاوش فضای طراحی دارد.

از سوی دیگر برای ارزیابی میزان سرعت همگرایی و میزان کاهش تأثیر پارامترهای موجود در الگوریتم‌های فراابتکاری از مسائل بهینه‌یابی سطح‌مقطع دکل‌های فولادی استفاده شده است. بدین منظور برج فولادی ۵۸۲ میله‌ای بشرح بخش الف-۱۴، دکل انتقال نیرو ۲۴۴ میله‌ای بشرح بخش الف-۱۵، دکل انتقال نیرو ۱۶۰ میله‌ای بشرح بخش الف-۱۶ و برج فولادی ۷۲ میله‌ای بشرح بخش الف-۸ از پیوست الف براساس روش MHSM مورد ارزیابی قرار گرفته است. اشکال (۳-۴۰) تا (۳-۴۳) سیر همگرایی مثال‌های مذکور را براساس روش MHSM نشان می‌دهد.

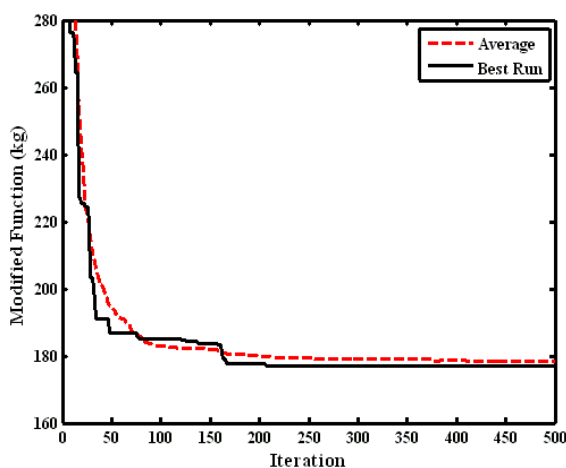


شکل (۳-۴۱) - سیر فرآیند بهینه‌یابی
دکل انتقال نیرو ۲۴۴ میله‌ای

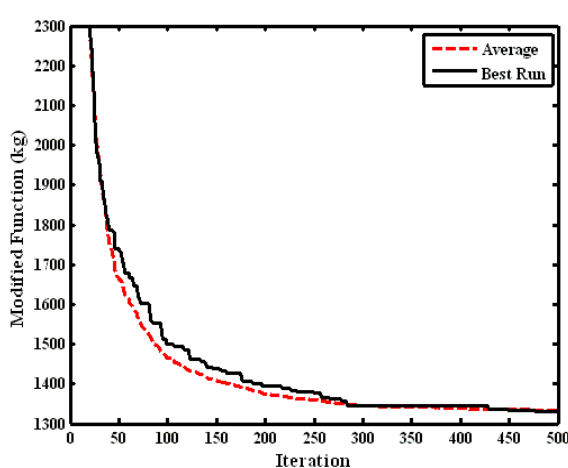


شکل (۳-۴۰) - سیر فرآیند بهینه‌یابی
برج فولادی ۵۸۲ میله‌ای

در اشکال (۳-۴۰) تا (۳-۴۳) نمودار میانگین ۱۰ اجرای مستقل و متوالی فرآیند بهینه‌یابی براساس روش MHSM به همراه بهترین روند برای فرآیند بهینه‌یابی در اجراهای متوالی برای مثال‌های مذکور رسم شده است.



شکل (۳-۴۳) - سیر فرآیند بهینه‌یابی
برج فولادی ۷۲ میله‌ای



شکل (۳-۴۲) - سیر فرآیند بهینه‌یابی
دکل انتقال نیرو ۱۶۰ میله‌ای

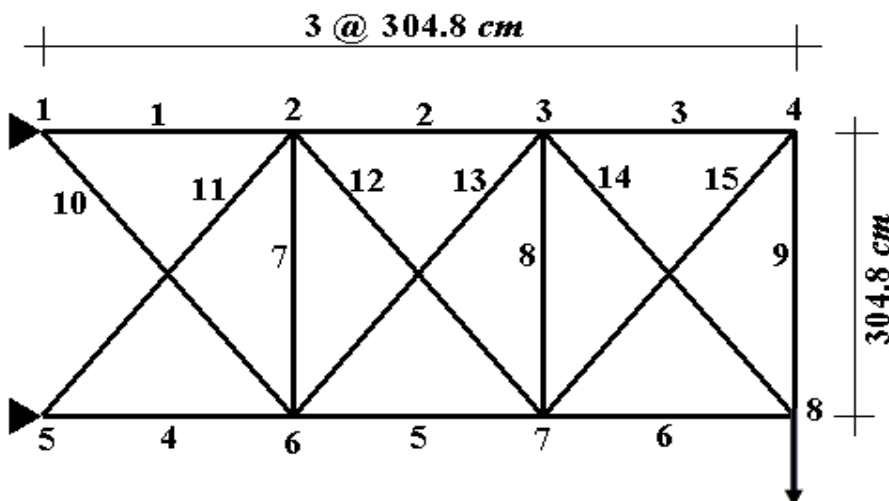
همان‌طور که در اشکال فوق مشاهده می‌شود، نمودار بهترین حالت و میانگین اجراهای متوالی به یکدیگر بسیار نزدیک می‌باشند. این مهم دلالت بر آهنگ ثابت و پایدار روند بهینه‌یابی روش MHSM در نیل به نقطه بهینه داشته و تا حدودی بیانگر عدم وابستگی نسبی روش MHSM به پارامترهای

موجود در الگوریتم‌های فراابتکاری هر جزیره می‌باشد. به بیان دیگر براساس روش MHSM تأثیر پارامترهای روش‌های موجود در جزایر کاهش یافته است. از سوی دیگر نزدیکی نمودار بهترین اجرا و میانگین اجراهای متوالی بیانگر اطمینان از یک بار اجرای روش MHSM برای کسب طرح قابل قبول می‌باشد. به بیان دیگر روش MHSM از اجراهای متوالی برای کسب جواب مناسب تا حد زیادی مبری بوده و با یک بار اجرای این روش طرحی مناسب و بهینه حاصل می‌گردد.

لازم به ذکر است که نتایج طرح بهینه برای مثال‌های مذکور نیز در جداول مربوط به هر مثال ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده خواهد شد، برای مسائل بهینه‌یابی سطح‌مقطع دکل‌های فولادی نیز روش MHSM از سایر روش‌های مراجع دیگر موفق‌تر بوده و فضای طراحی را با دقت بیشتر و طیف گسترده‌تری کاوش نموده و به طرحی بهینه‌تر دست یافته است.

۳-۲-۱- بهینه‌یابی پیکربندی خرپای مستوی ۱۵ میله‌ای

در این مثال به بهینه‌یابی خرپای مستوی ۱۵ میله‌ای مطابق شکل (۳-۴۴) براساس روش MHSM پرداخته شده است. برای این سازه E و γ به ترتیب برابر $MPa \times 10^4 / 6/895$ و $0/0272 N/cm^3$ در نظر گرفته شده و مقدار بار اعمالی برابر $44/537 kN$ فرض می‌شود.



شکل (۳-۴۴) - خرپای ۱۵ میله‌ای

در فرآیند طراحی تنها قید تنش با مقدار مجاز $172/4 \text{ MPa} \pm$ در نظر گرفته شده و محدوده مجاز متغیرهای طراحی هندسی با ضریب دقت $0/0254 \text{ cm}$ بشرح زیر تعریف می‌شوند.

$$254 \text{ cm} < x_2 = x_6 < 355.6 \text{ cm} \quad , \quad 558.8 \text{ cm} < x_3 = x_7 < 660.4 \text{ cm}$$

$$254 \text{ cm} < y_2 < 355.6 \text{ cm} \quad , \quad 254 \text{ cm} < y_3 < 355.6 \text{ cm} \quad , \quad 127 \text{ cm} < y_4 < 228.6 \text{ cm}$$

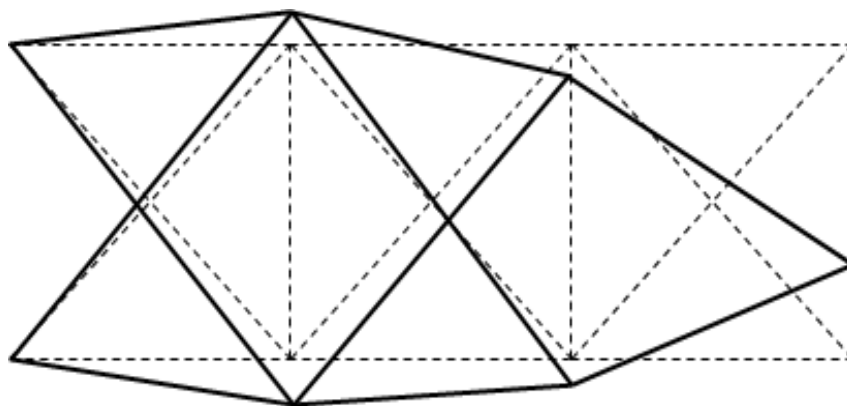
$$-50.8 \text{ cm} < y_6 < 50.8 \text{ cm} \quad , \quad -50.8 \text{ cm} < y_7 < 50.8 \text{ cm} \quad , \quad 50.8 \text{ cm} < y_8 < 152.4 \text{ cm}$$

لیست مقاطع موجود نیز بشرح جدول (۳-۳) در نظر گرفته شده است.

جدول (۳-۳) مجموعه لیست مقاطع برای پیکربندی خرپای ۱۵ میله‌ای

شماره	cm^2	شماره	cm^2	شماره	cm^2	شماره	cm^2
۱	۰/۷۱۶	۹	۳/۴۷۷	۱۷	۱۷/۴	۲۵	۴۶/۴
۲	۰/۹۱	۱۰	۶/۱۵۵	۱۸	۱۸/۰۶۴	۲۶	۵۵
۳	۱/۱۲۳	۱۱	۶/۹۷۴	۱۹	۲۰/۲	۲۷	۶۰
۴	۱/۴۱۹	۱۲	۷/۵۷۴	۲۰	۲۳	۲۸	۷۰
۵	۱/۷۴۲	۱۳	۸/۶	۲۱	۲۴/۶	۲۹	۸۶
۶	۱/۸۵۲	۱۴	۹/۶	۲۲	۳۱	۳۰	۹۲/۱۹۳
۷	۲/۲۳۹	۱۵	۱۱/۳۸۱	۲۳	۳۸/۴	۳۱	۱۱۰/۷۷۴
۸	۲/۸۳۹	۱۶	۱۳/۸۱۹	۲۴	۴۲/۴	۳۲	۱۲۳/۷۴۲

شکل (۳-۴۵) طرح بهینه توپولوژی و هندسی خرپای مستوی ۱۵ میله‌ای را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۴۵) - طرح بهینه توپولوژی و هندسی خرپای ۱۵ میله‌ای

نتایج طرح بهینه برای متغیرهای طراحی سطح مقطع و هندسه در جدول (۳-۴) همراه با نتایج دیگر مراجع قابل مشاهده است.

جدول (۳-۴) نتایج طرح بهینه پیکربندی خرپای ۱۵ میله‌ای براساس روش MHSM

شماره گروه	مرجع [۷۰]	مرجع [۷۱]	مرجع [۷۲]	MHSM
$a_1 - cm^2$	۷/۵۷۴	۶/۹۷۴	۶/۱۵۵	۶/۱۵۵
$a_2 - cm^2$	۶/۱۵۵	۳/۴۷۷	۶/۱۵۵	۳/۴۷۷
$a_3 - cm^2$	۲/۸۳۹	--	--	--
$a_4 - cm^2$	۸/۶	۶/۹۷۴	۶/۹۷۴	۶/۱۵۵
$a_5 - cm^2$	۶/۱۵۵	۶/۱۵۵	۳/۴۷۷	۳/۴۷۷
$a_6 - cm^2$	۱/۱۲۳	۲/۸۳۹	۳/۴۷۷	۲/۸۳۹
$a_7 - cm^2$	۲/۸۳۹	--	--	--
$a_8 - cm^2$	۲/۸۳۹	۰/۹۱	--	--
$a_9 - cm^2$	۶/۹۷۴	--	--	--
$a_{10} - cm^2$	۸/۶	۱/۷۴۲	۲/۸۳۹	۲/۸۳۹
$a_{11} - cm^2$	۷/۵۷۴	۱/۷۴۲	۱/۴۱۹	۳/۴۷۷
$a_{12} - cm^2$	۷/۵۷۴	۳/۴۷۷	۰/۷۱۶	۱/۱۲۳
$a_{13} - cm^2$	۲/۲۳۹	۰/۹۱	۲/۲۳۹	۱/۱۲۳
$a_{14} - cm^2$	۲/۲۳۹	۲/۸۳۹	۳/۴۷۷	۳/۴۷۷
$a_{15} - cm^2$	۲/۸۳۹	--	--	--
$x_2 - cm$	۳۱۲/۹	۲۸۴/۰۹۹	۲۷۲/۷۶۲	۳۰۴/۸۱۲
$x_3 - cm$	۵۸۸/۲۵۱	۶۱۵/۸۲۳	۶۲۰/۹۱۱	۶۱۰/۲۰۹
$y_2 - cm$	۲۷۲/۲۶	۲۶۴/۲۱۱	۳۱۸/۵۶۶	۳۳۶/۵۷
$y_3 - cm$	۳۰۲/۷۰۵	۲۷۷/۴۱۹	۲۹۷/۹۰۵	۲۷۳/۲۵۳
$y_4 - cm$	۱۵۳/۵۷۳	--	--	--
$y_6 - cm$	-۴۲/۴۸۶	-۲۷/۴۸۳	-۴/۱۲۷	-۴۴/۶۷۱
$y_7 - cm$	۳۹/۵۳۵	-۲۸/۲۷	۴۵/۹۳	-۲۵/۵۱۷
$y_8 - cm$	۹۳/۰۷۸	۱۲۴/۰۵۴	۱۲۷/۵۱۸	۹۸/۰۱۴
وزن - kN	۵۳۶/۱۳۵	۳۴۶/۱۱۶	۳۳۴/۰۴۶	۳۲۵/۸۸۹

۳-۴ ایده نوین انفصال فضای کاوش

تقریباً در تمامی الگوریتم‌های بهینه‌یابی، با رشد فضای کاوش، سرعت همگرایی و نیل به نقطه بهینه کاهش و احتمال کسب بهینه محلی افزایش می‌یابد. به عنوان نمونه این مسئله در فرآیند طراحی بهینه سطح مقطع سازه‌ها، با افزایش لیست مقاطع موجود اتفاق می‌افتد. به بیان دیگر در روند طراحی بهینه سازه‌ها با افزایش لیست مقاطع موجود، فضای طراحی به طور چشمگیری بزرگ شده و این مسئله سبب کاهش سرعت همگرایی و در برخی موارد کسب بهینه محلی می‌شود. در این راستا،

الگوریتم‌های فراابتکاری نیز از این قاعده مستثنی نبوده و در اکثر این روش‌ها نیز با رشد فضای جستجو، سرعت همگرایی کاهش و احتمال کسب بهینه محلی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در الگوریتم ژنتیک با افزایش تعداد اعضای لیست مقاطع (N_s) که معادل گسترش فضای کاوش است، طول هر زیررشته (LS) افزایش می‌یابد. به دنبال افزایش طول هر زیررشته، طول هر رشته که بیانگر طرحی در فضای طراحی است، نیز افزایش خواهد یافت. این مسئله سبب کاهش سرعت همگرایی و افزایش احتمال کسب بهینه محلی در فرآیند بهینه‌یابی براساس GA خواهد شد. مشابه این مسئله در الگوریتم کلونی مورچگان نیز وجود دارد. در ACO با افزایش تعداد حالات ممکن برای هر متغیر طراحی، ابعاد ماتریس فرمون بزرگ شده و این مسئله سبب کاهش مقادیر احتمال انتخاب هر یک از حالات موجود برای هر متغیر طراحی (P_{ij}) بشرح رابطه (۲-۱۰) می‌شود. الگوریتم‌های دیگر بهینه‌یابی نیز تقریباً مشابه GA و ACO می‌باشند.

به همین سبب در راستای تلاش‌ها و تحقیقات برای بهبود عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری، در این رساله ایده نوین انفصال فضای طراحی ارائه شده است. بر این اساس با الهام از فرآیند انفصال در روش اجزای محدود، فضای جستجو به نحوی منطقی تجزیه و منفصل می‌گردد و مقدار هر متغیر طراحی در محدوده مناسب فضای کاوش مورد جستجو قرار می‌گیرد. برای این منظور در ابتدا محدوده مجاز متغیرهای طراحی به تعدادی زیرمجموعه تقسیم می‌شود. در فرآیند طراحی بهینه سطح مقطع سازه‌ها، محدوده مجاز متغیرهای طراحی براساس لیست مقاطع منفصل بیان می‌گردد. بنابراین در ایده پیشنهادی برای فرآیند طراحی بهینه سازه‌ها، می‌بایست لیست مقاطع موجود به تعدادی زیرمجموعه تقسیم شود. لازم به ذکر است که تعداد زیرمجموعه‌ها و تعداد اعضای هر زیرمجموعه در ایده پیشنهادی، براساس انتخاب کاربر و متناسب با شرایط مسئله و لیست مقاطع مشخص می‌شود که عاملی مهم و قابل تأمل است. در ادامه یک عضو از زیرمجموعه به عنوان نماینده برگزیده خواهد شد. انتخاب نماینده هر زیرمجموعه نیز از عوامل مهم و تأثیرگذار در ایده پیشنهادی می‌باشد. در هر صورت پس از مشخص شدن نمایندگان هر زیرمجموعه، لیست مقاطع جدید برای تمامی متغیرهای

طراحی شکل می‌گیرد. این لیست شامل نمایندگان هر زیرمجموعه می‌باشد. بدین ترتیب هر متغیر طراحی از لیست مقاطع جدید برای انتخاب سطح مقطع استفاده می‌نماید. به بیان دیگر لیست مقاطع مسئله بهینه‌یابی براساس فرآیند افراز به لیستی جدید با تعداد اعضای کمتر نسبت به لیست اولیه تبدیل می‌شود. در مسائل بهینه‌یابی غیر از مسئله طراحی بهینه سازه‌ها نیز فرآیند افراز منجر به تعریف حالات ممکن جدید برای هر متغیر طراحی خواهد شد که تعداد این حالات نسبت به وضعیت اولیه به مراتب کمتر است.

با مشخص شدن لیست مقاطع جدید (حالات ممکن جدید برای متغیرهای طراحی) فرآیند بهینه‌یابی براساس الگوریتم انتخابی آغاز می‌شود. از آنجا که در این مرحله لیست مقاطع فقط شامل نمایندگان هر زیرمجموعه است، عملیات بهینه‌یابی با تعبیر جستجوی سراسری انجام می‌شود. به عبارت دیگر در این مرحله محدوده طرح بهینه برای هر متغیر طراحی بواسطه جستجوی سراسری مبتنی بر لیست مقاطع جدید مشخص خواهد شد. فرآیند بهینه‌یابی در این مرحله به تعداد مشخصی که از قبل تعیین شده، ادامه می‌یابد. براساس بررسی‌های انجام شده این معیار برابر نصف تعداد کل تکرارهای الگوریتم پیشنهاد می‌شود. این اتخاذ سبب می‌شود تا الگوریتم زمان کافی برای انجام فرآیند جستجوی سراسری داشته باشد. شایان ذکر است که این معیار متناسب با شرایط مسئله و الگوریتم انتخابی، قابل تغییر می‌باشد. پس از پایان تعداد تکرارهای مرتبط با جستجوی سراسری، نوبت به اعمال فرآیند جستجوی محلی براساس الگوریتم انتخابی می‌رسد. برای این منظور لیست مقاطع برای هر متغیر طراحی (حالات ممکن برای هر متغیر طراحی) متناسب با نتیجه طرح بهینه حاصل از فرآیند جستجوی سراسری تغییر خواهد کرد. به بیان دیگر مقادیر طرح بهینه حاصل از جستجوی سراسری برای هر متغیر طراحی، بیانگر زیرمجموعه‌ای از لیست مقاطع است. بنابراین در این مرحله، زیرمجموعه مربوطه به عنوان لیست مقاطع جدید برای متغیر طراحی مورد نظر منظور می‌شود. بدین ترتیب هر متغیر طراحی از لیست مقاطع جدید براساس مقدار حاصل از مرحله جستجوی سراسری، استفاده می‌نماید. بدیهی است که ممکن است در این مرحله لیست مقاطع منتخب برای هر

متغیر طراحی متفاوت باشد. از سوی دیگر نیز در این مرحله تعداد اعضای لیست مقاطع برای هر متغیر طراحی بمراتب کمتر از تعداد لیست مقاطع اولیه (N_s) است. در هر صورت پس از مشخص شدن لیست مقاطع جدید برای هر متغیر طراحی، فرآیند بهینه‌یابی براساس الگوریتم انتخابی ادامه می‌یابد. در این مرحله حوالی طرح بهینه حاصل از مرحله جستجوی سراسری، کاوش می‌شود.

بدین ترتیب براساس ایده پیشنهادی، فضای طراحی در دو مرحله با ایجاد توازنی منطقی بین فرآیند جستجوی محلی و سراسری مبتنی بر الگوریتم انتخابی مورد کاوش قرار خواهد گرفت. برای این منظور ابتدا محدوده طرح بهینه با اعمال فرآیند جستجوی سراسری نتیجه می‌شود، سپس همسایگی طرح بهینه حاصل با اعمال جستجوی محلی کاوش خواهد شد. ایده پیشنهادی براساس این شیوه ضمن افزایش دقت در جستجوی فضای طراحی، سبب افزایش سرعت همگرایی در بهینه‌یابی براساس الگوریتم انتخابی می‌شود. کارآیی این ایده طی مثال‌های طراحی بهینه سازه‌ها برای دو الگوریتم ACO و GA بشرح بخش‌های آتی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۳-۴-۱ ایده نوین انفصال فضای طراحی در الگوریتم ژنتیک

همان‌طور که پیشتر بیان شد، در بهینه‌یابی براساس GA با افزایش لیست مقاطع، به واسطه افزایش طول هر رشته، دقت در جستجوی فضای طراحی و سرعت همگرایی برای نیل به نقطه بهینه کاهش می‌یابد. بنابراین ایده پیشنهادی برای افزایش کارآیی GA در جهت کمرنگ نمودن مشکلات فوق ارائه شده است. بدین‌منظور در این بخش به بررسی تأثیر ایده پیشنهادی و عوامل مختلف آن پرداخته شده است. در این راستا دو عامل مهم ایده پیشنهادی در بهینه‌یابی براساس GA مورد بررسی قرار خواهد گرفت. عضو منتخب از هر زیرمجموعه برای نمایندگی و تعداد زیرمجموعه‌ها به همراه تعداد اعضای هر زیرمجموعه، عوامل مهم و اساسی در ایده پیشنهادی می‌باشند. به همین سبب ضمن بررسی تأثیر ایده پیشنهادی در روند بهینه‌یابی براساس GA، تأثیر عوامل مذکور نیز در دو بخش متفاوت بشرح زیر مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۳-۴-۱-۱ انتخاب نماینده در ایده انفصال فضای طراحی در GA

یکی از نکات اساسی در ایده نوین انفصال فضای طراحی، انتخاب عضوی از هر زیرمجموعه به عنوان نماینده جهت تعریف لیست مقاطع مرحله جستجوی سراسری می‌باشد. برای این منظور هر یک از اعضای زیرمجموعه‌ها می‌تواند کاندید باشد. اما در منطقی‌ترین تفکر، بزرگترین عضو، کوچکترین عضو و عضو میانی در هر زیرمجموعه، بهترین اعضا برای کاندید نمایندگی خواهند بود. بدین ترتیب سه حالت برای بررسی بهترین نماینده در نظر گرفته می‌شود. در حالت اول پس از تقسیم‌بندی لیست مقاطع به تعدادی زیرمجموعه، بزرگترین عضو هر زیرمجموعه به عنوان نماینده زیرمجموعه انتخاب و در لیست مقاطع جدید برای مرحله جستجوی سراسری قرار می‌گیرد. در حالت دوم کمترین سطح مقطع در لیست مقاطع هر زیرمجموعه به عنوان نماینده زیرمجموعه انتخاب و بر این اساس لیست مقاطع مرحله جستجوی سراسری تعریف می‌شود. در حالت سوم عضو میانی هر زیرمجموعه به عنوان نماینده انتخاب و در لیست مقاطع جدید قرار می‌گیرد.

برای بررسی کارایی ایده پیشنهادی براساس حالات مذکور در الگوریتم ژنتیک، دو مثال در زمینه بهینه‌یابی سطح مقطع سازه‌های خرپایی انتخاب شده است. بدین منظور خرپای ۵۲ میله‌ای بشرح پیوست الف-۱۷ و برج فولادی ۷۲ میله‌ای بشرح پیوست الف-۸ مثال‌های منتخب برای بررسی حالات مختلف ایده پیشنهادی می‌باشند. در هر دو مثال لیست مقاطع بشرح جدول (الف-۱۸) می‌باشد. براساس تعداد اعضای لیست مقاطع در جدول (الف-۱۸)، طول هر زیررشته در فرآیند بهینه‌یابی براساس GA برابر شش بیت است. بنابراین طول هر رشته براساس تعداد متغیرهای طراحی برابر $6Nos$ خواهد بود که Nos تعداد متغیرهای طراحی مسئله می‌باشد. بدین ترتیب طول هر رشته در بهینه‌یابی براساس GA برای مثال خرپای ۵۲ میله‌ای برابر ۷۲ بیت و برای مثال برج فولادی ۷۲ میله‌ای برابر ۹۶ بیت است.

در هر صورت جهت اعمال ایده پیشنهادی برای مثال‌های فوق براساس حالات مذکور، لیست مقاطع موجود به هشت زیرمجموعه هشت عضوی بشرح جدول (۳-۵) تقسیم می‌شود. نکته حائز

اهمیت در این فرآیند مرتب‌سازی لیست مقاطع جدول (الف-۱۸) از کمترین سطح مقطع تا بیشترین سطح مقطع می‌باشد. به بیان دیگر قبل از تقسیم‌بندی لیست مقاطع، می‌بایست اعضای مجموعه اصلی $\{S\}$ به صورت صعودی مرتب شوند.

جدول (۳-۵) اعضای لیست مقاطع برای هر زیرمجموعه در ایده انفصال فضای طراحی - mm^2

شماره	{S1}	{S2}	{S3}	{S4}	{S5}	{S6}	{S7}	{S8}
۱	۷۱/۶۱۳	۳۸۸/۳۸۶	۹۳۹/۹۹۸	۱۶۹۶/۷۷۱	۲۴۷۷/۴۱۴	۳۲۰۶/۴۴۵	۷۴۱۹/۴۳۰	۱۲۸۳۸/۶۸۴
۲	۹۰/۹۶۸	۴۹۴/۱۹۳	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۸۵۸/۰۶۱	۲۴۹۶/۷۶۹	۳۳۰۳/۲۱۹	۸۷۰۹/۶۶۰	۱۴۱۹۳/۵۲۰
۳	۱۲۶/۴۵۱	۵۰۶/۴۵۱	۱۰۴۵/۱۵۹	۱۸۹۰/۳۱۹	۲۵۰۳/۲۲۱	۳۷۰۳/۲۱۸	۸۹۶۷/۷۲۴	۱۴۷۷۴/۱۶۴
۴	۱۶۱/۲۹۰	۶۴۱/۲۸۹	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۹۹۳/۵۴۴	۲۶۹۶/۷۶۹	۴۶۵۸/۰۵۵	۹۱۶۱/۲۷۲	۱۵۸۰۶/۴۲۰
۵	۱۹۸/۰۶۴	۶۴۵/۱۶۰	۱۲۸۳/۸۶۸	۲۱۸۰/۶۴۱	۲۷۲۲/۵۷۵	۵۱۴۱/۹۲۵	۹۹۹۹/۹۸۰	۱۷۰۹۶/۷۴۰
۶	۲۵۲/۲۵۸	۷۲۹/۰۳۱	۱۳۷۴/۱۹۱	۲۲۳۸/۷۰۵	۲۸۹۶/۷۶۸	۵۵۰۳/۲۱۵	۱۰۳۲۲/۵۶۰	۱۸۰۶۴/۴۸۰
۷	۲۸۵/۱۶۱	۷۹۲/۲۵۶	۱۵۳۵/۴۸۱	۲۲۹۰/۳۱۸	۲۹۶۱/۲۸۴	۵۹۹۹/۹۸۸	۱۰۹۰۳/۲۰۴	۱۹۳۵۴/۸۰۰
۸	۳۶۳/۲۲۵	۸۱۶/۷۷۳	۱۶۹۰/۳۱۹	۲۳۴۱/۹۳۱	۳۰۹۶/۷۶۸	۶۹۹۹/۹۸۶	۱۲۱۲۹/۰۰۸	۲۱۶۱۲/۸۶۰

سپس براساس حالات پیشنهادی در هر حالت لیست مقاطع اولیه برای تمامی متغیرهای طراحی براساس نمایندگان هر زیرمجموعه شکل می‌گیرد. بدین ترتیب لیست مقاطع در ابتدای فرآیند بهینه‌یابی الگوریتم ژنتیک برای هر یک از حالات پیشنهادی بشرح زیر می‌باشد.

$$\{S\}\text{-Case1} = \{363.225, 816.773, \dots, 21612.86\} - mm^2$$

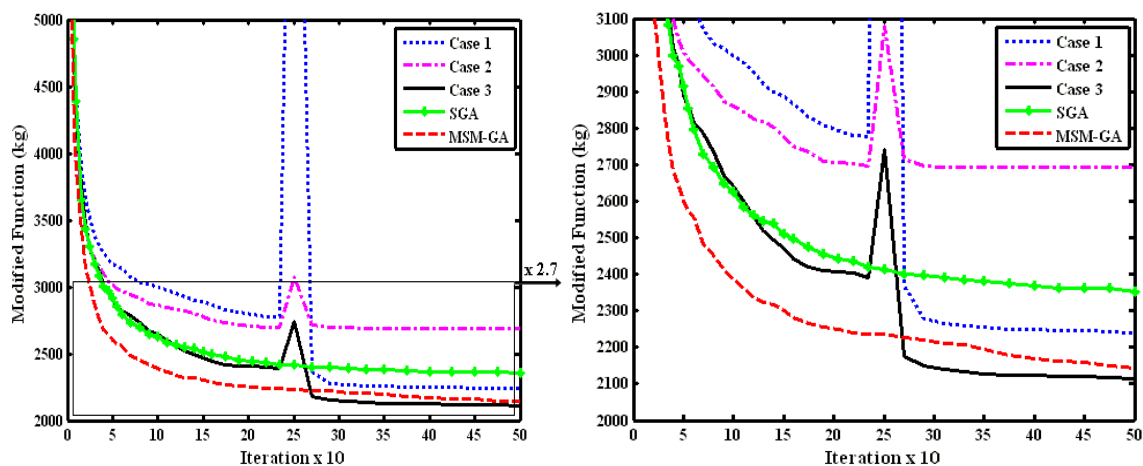
$$\{S\}\text{-Case2} = \{71.613, 388.386, \dots, 12838.684\} - mm^2$$

$$\{S\}\text{-Case3} = \{198.064, 645.160, \dots, 17096.74\} - mm^2$$

با تغییر لیست مقاطع در هر حالت براساس مجموعه‌های فوق، طول هر زیررشته در فرآیند بهینه‌یابی براساس الگوریتم ژنتیک به سه بیت کاهش می‌یابد و بدین ترتیب طول هر رشته برابر $3Nos$ خواهد بود. به عبارت دیگر براساس ایده پیشنهادی طول هر زیررشته و رشته در فرآیند بهینه‌یابی براساس GA نصف حالت مرسوم شده است. در ادامه همان‌طور که پیشتر بیان شد، جستجوی سراسری براساس لیست مقاطع جدید صورت می‌پذیرد. سپس با پایان فرآیند جستجوی سراسری، لیست مقاطع برای هر متغیر طراحی متناسب با نتیجه حاصل و براساس جدول (۳-۵) تغییر می‌یابد و بدین ترتیب فرآیند جستجوی محلی در پیش گرفته خواهد شد. از آنجاکه در مرحله جستجوی محلی نیز

تعداد اعضای لیست مقاطع برای هر متغیر طراحی برابر هشت بیت است، لذا در مرحله جستجوی محلی نیز طول هر زیررشته برابر سه بیت و طول هر رشته برابر 3Nos می‌باشد. بنابراین طول هر رشته در مراحل جستجوی سراسری و محلی برای خرپای ۵۲ میله‌ای برابر ۳۶ بیت و برای برج فولادی ۷۲ میله‌ای برابر ۴۸ بیت است.

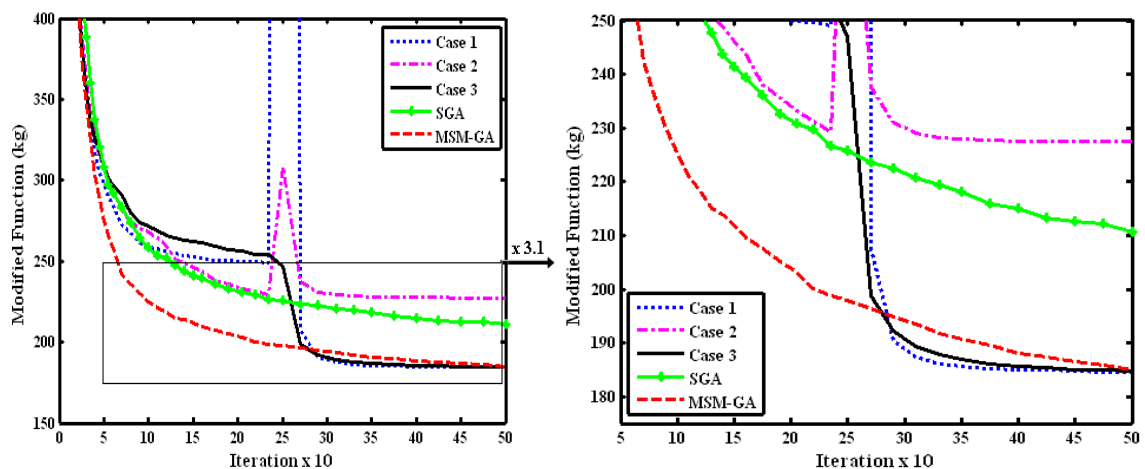
با کاهش طول هر رشته در فرآیند بهینه‌یابی براساس GA، سرعت همگرایی و نیز میزان دقت در کاوش فضای طراحی افزایش می‌یابد. به همین سبب هر یک از مراحل جستجوی سراسری و محلی به طور جداگانه، بهتر از حالت ساده الگوریتم ژنتیک عمل نموده و فضای طراحی جدید خود را موفق‌تر کاوش می‌نمایند. همکاری و تقابل این دو مرحله در کنار یکدیگر سبب افزایش کارایی GA می‌شود. این مهم در اشکال (۳-۴۶) و (۳-۴۷) قابل مشاهده است. این اشکال تأثیر ایده پیشنهادی در حالات مذکور را در قیاس با الگوریتم ژنتیک ساده^۱ (SGA) و الگوریتم ژنتیک بهبود یافته براساس روش جستجوی چندمنظوره (MSM-GA) بشرح بخش ۳-۳-۱، نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در این اشکال برای اجتناب از تأثیر پارامترهای تصادفی در روند بهینه‌یابی، برای حالات پیشنهادی و نیز حالات SGA و MSM-GA در هر مثال ۴۰ اجرای مستقل انجام شده است. سپس میانگین اجراهای متوالی در هر حالت به عنوان سیر همگرایی حالت موردنظر رسم شده است.



شکل (۳-۴۶) - سیر همگرایی خرپای ۵۲ میله‌ای توسط حالات مختلف پیشنهادی، SGA و MSM-GA

^۱ . Simple Genetic Algorithm

همان‌طور که در شکل (۳-۴۶) مشاهده می‌شود، نامناسب‌ترین سیر همگرایی مربوط به حالت ۲ می‌باشد. این در حالی است که بهترین سیر همگرایی براساس حالت ۳ ارائه شده است. این حالت با ارائه توازنی منطقی بین فرآیند جستجوی محلی و سراسری، فضای طراحی را کاوش می‌نماید. بنابراین می‌توان بیان نمود که حالت پیشنهادی ۳ سبب افزایش عملکرد GA در طراحی بهینه سازه‌ها شده است. پس از حالت ۳، روش MSM-GA نیز سیر همگرایی مناسبی از خود نشان داده و تقریباً نزدیک به حالت ۳ حرکت نموده است. در این مثال حالت ۱ نیز دارای عملکرد بهتری نسبت به حالت ساده الگوریتم ژنتیک می‌باشد. هر چند این برتری به میزان حالت ۳ و روش MSM-GA نمی‌باشد، اما می‌توان بیان نمود که این حالت نیز سبب بهبود عملکرد GA شده است.



شکل (۳-۴۷) - سیر همگرایی برج ۷۲ میله‌ای توسط حالات مختلف پیشنهادی، SGA و MSM-GA

برای برج فولادی ۷۲ میله‌ای نیز حالت ۳ دارای بهترین عملکرد است. در این مثال همان‌طور که در شکل (۳-۴۷) مشاهده می‌شود، حالت ۱ و روش MSM-GA نیز دارای عملکردی مناسب و تقریباً نزدیک به حالت ۳ بوده و سیر همگرایی مناسب‌تری نسبت به حالت SGA ارائه شده است.

بنابراین در حالت کلی می‌توان بیان نمود که استفاده از عضو میانی هر زیرمجموعه (حالت ۳) در ایده پیشنهادی بهترین راه حل جهت افزایش کارایی الگوریتم GA براساس ایده انفصال فضای طراحی می‌باشد.

لازم به ذکر است، تغییر ناگهانی که در سیر همگرایی حالات پیشنهادی مشاهده می‌شود، مربوط به مرز جستجوی سراسری و محلی است. به عبارت دیگر پس از آن که فرآیند جستجوی سراسری به پایان رسید و لیست مقاطع برای هر متغیر طراحی مشخص شد، در مرحله جستجوی محلی مقادیر اولیه برای هر زیررشته به طور تصادفی از لیست مقاطع این مرحله انتخاب می‌شود. این فرآیند براساس تولید جمعیت اولیه تصادفی شکل می‌گیرد. به بیان دیگر در ابتدای هر یک از مراحل موجود (جستجوی سراسری و محلی) جمعیت اولیه متناسب با لیست مقاطع مربوطه به صورت تصادفی تولید می‌شود. به همین سبب در سیر همگرایی حالات پیشنهادی تغییر ناگهانی در مرز بین جستجوی محلی و سراسری وجود دارد. البته بایستی توجه داشت که نقطه شروع در مرحله جستجوی محلی، بسیار نزدیک‌تر به طرح بهینه نسبت به مرحله جستجوی سراسری می‌باشد.

۳-۴-۱-۲ انتخاب تعداد زیرمجموعه‌ها برای ایده انفصال فضای طراحی در GA

از نکات مهم و قابل تأمل در ایده پیشنهادی انفصال فضای طراحی، تعداد زیرمجموعه‌ها و تعداد اعضای هر زیرمجموعه می‌باشد. این دو پارامتر به یکدیگر وابسته بوده و مقدار هر یک متناسب با تعداد اعضای لیست مقاطع (N_s)، مقدار دیگری را نیز مشخص می‌نماید. از سوی دیگر این دو پارامتر بیانگر فضای طراحی مراحل جستجوی سراسری و محلی بوده و در کارآیی ایده پیشنهادی تأثیر فراوانی دارند. به همین سبب در این بخش به بررسی تأثیر ابعاد و تعداد اعضای زیرمجموعه‌های مراحل جستجوی سراسری و محلی در ایده پیشنهادی انفصال فضای طراحی پرداخته شده است. بدین منظور از مثال‌های بهینه‌یابی سطح مقطع سازه‌های اسکلتی همچون خریای ۵۲ میله‌ای، برج فولادی ۷۲ میله‌ای و قاب هشت طبقه - یک دهانه استفاده می‌شود. شرح مفروضات مثال‌های مذکور به ترتیب در پیوست الف-۱۷، الف-۸ و الف-۴ ارائه شده است. برای نمونه جهت ارائه کارآیی ایده پیشنهادی دکل ۴۷ میله‌ای نیز بشرح بخش ۳-۴-۱-۲-۱ در این فصل مورد بررسی قرار گرفته است.

لازم به ذکر است که مثال‌های خریایی دارای لیست مقاطع یکسانی بشرح جدول (الف-۱۸) می‌باشند. در حالی که لیست مقاطع قاب هشت طبقه - یک دهانه متفاوت بوده و بشرح جدول (الف-۷) است. بدین ترتیب برای مثال‌های خریایی متناسب با لیست مقاطع جدول (الف-۱۸)، روند بررسی تعداد زیرمجموعه‌ها و اعضای آن‌ها در فرآیند بهینه‌یابی براساس GA، در سه حالت بشرح زیر ارائه و مورد ارزیابی قرار گرفته است.

حالت (۱) در این حالت لیست مقاطع جدول (الف-۱۸) پس از مرتب‌سازی به صورت صعودی به چهار زیرمجموعه ۱۶ تایی تقسیم‌بندی می‌شود. بنابراین تعداد اعضای لیست مقاطع در مرحله جستجوی سراسری برابر چهار عضو و تعداد اعضای لیست مقاطع در مرحله جستجوی محلی برابر شانزده عضو خواهد بود. بدین ترتیب طول هر زیررشته در مرحله جستجوی سراسری برابر دو بیت و در مرحله جستجوی محلی برابر چهار بیت است. براین اساس زیرمجموعه‌های حالت ۱ براساس لیست مقاطع جدول (الف-۱۸) بشرح زیر تعریف می‌شود.

$$\{S1\}\text{-Case1} = \{71.613, 90.968, \dots, 816.773\} - mm^2$$

$$\{S2\}\text{-Case1} = \{939.998, 1008.385, \dots, 2341.931\} - mm^2$$

$$\{S3\}\text{-Case1} = \{2477.414, 2496.769, \dots, 6999.986\} - mm^2$$

$$\{S4\}\text{-Case1} = \{7419.43, 8709.66, \dots, 21612.86\} - mm^2$$

سپس با توجه به نتایج بخش ۳-۴-۱-۱ عضو میانی هر زیرمجموعه به عنوان نماینده برگزیده و لیست مقاطع مرحله جستجوی سراسری برای حالت ۱ بشرح زیر تشکیل خواهد شد.

$$\{S\}\text{-Case1} = \{388.386, 1690.319, \dots, 12838.684\} - mm^2$$

این حالت متناظر با انتخاب مشی با ابعاد بزرگ در روش اجزای محدود می‌باشد.

حالت (۲) در این حالت لیست مقاطع جدول (الف-۱۸) به هشت زیرمجموعه ۸ تایی مطابق جدول (۳-۵) تقسیم می‌شود. بنابراین تعداد اعضای لیست مقاطع در مرحله جستجوی سراسری و محلی با یکدیگر برابر بوده و برابر هشت عضو می‌باشد. بدین ترتیب طول هر زیررشته در مرحله جستجوی سراسری و محلی برابر سه بیت است. لازم به ذکر است که لیست مقاطع مرحله جستجوی سراسری در این حالت با انتخاب عضو میانی زیرمجموعه‌های جدول (۳-۵)، بشرح زیر تعریف می‌شود.

$$\{S\}\text{-Case2} = \{198.064, 645.16, \dots, 17096.74\} - mm^2$$

حالت ۳) در این حالت لیست مقاطع جدول (الف-۱۸) به شانزده زیرمجموعه ۴تایی تقسیم‌بندی می‌شود. بنابراین در این حالت تعداد اعضای لیست مقاطع در مرحله جستجوی سراسری برابر شانزده عضو و در مرحله جستجوی محلی برابر چهار عضو می‌باشد. بدین ترتیب در حالت ۳ طول هر زیررشته در مرحله جستجوی سراسری برابر چهار بیت و در مرحله جستجوی محلی برابر دو بیت خواهد بود. بر این اساس زیرمجموعه‌های حالت ۳ بشرح زیر تعریف می‌شوند.

$$\{S1\}\text{-Case3} = \{71.613, 90.968, \dots, 161.29\} - mm^2$$

$$\{S2\}\text{-Case3} = \{198.064, 252.258, \dots, 363.225\} - mm^2$$

$$\{S16\}\text{-Case3} = \{17096.74, 18064.48, \dots, 21612.86\} - mm^2$$

سپس همانند حالات پیشین، عضو میانی هر زیرمجموعه به عنوان نماینده برگزیده و لیست مقاطع مرحله جستجوی سراسری برای حالت ۳ بشرح زیر تشکیل خواهد شد.

$$\{S\}\text{-Case3} = \{126.451, 285.161, \dots, 19354.8\} - mm^2$$

این حالت متناظر با انتخاب مشی با ابعاد کوچک در روش اجزای محدود می‌باشد.

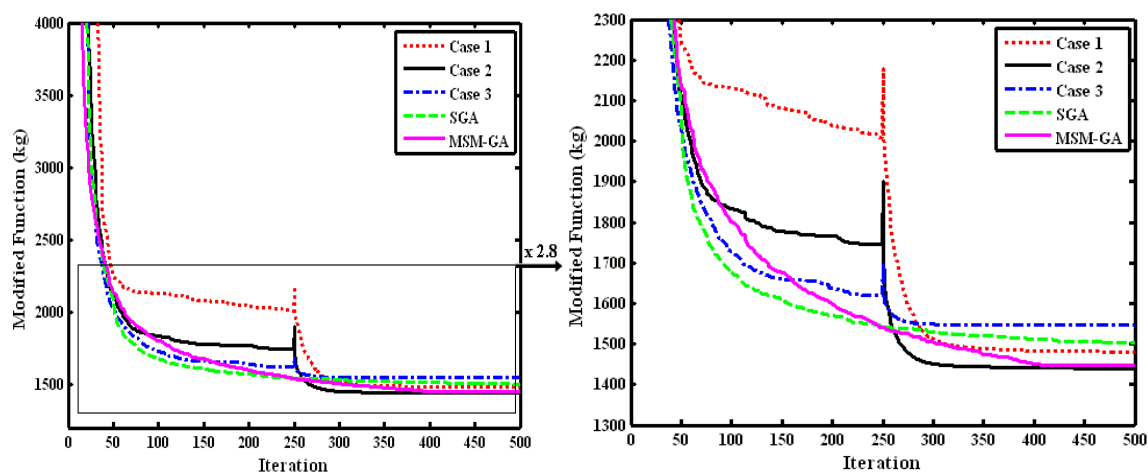
از سوی دیگر برای قاب هشت طبقه - یک دهانه، حالات فوق قابل تعریف نمی‌باشد، چراکه لیست مقاطع این مثال با مثال‌های خرابایی متفاوت بوده و بشرح جدول (الف-۷) است. بنابراین برای این مثال نیز پس از مرتب‌سازی اعضای جدول (الف-۷) براساس مقدار سطح مقطع، مجموعه لیست مقاطع به زیرمجموعه‌های مختلفی برای اعمال ایده پیشنهادی تقسیم می‌شود. برای این منظور قاب هشت طبقه - یک دهانه در شش حالت برای ایده پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در حالت اول مجموعه لیست مقاطع به چهار زیرمجموعه ۶۷تایی تقسیم شده است. بنابراین در مرحله جستجوی سراسری طول هر زیررشته برابر دو بیت و در مرحله جستجوی محلی برابر هفت بیت می‌باشد. در حالت دوم مجموعه $\{S\}$ به هشت زیرمجموعه تقسیم می‌شود که هفت زیرمجموعه ۳۴تایی و یک زیرمجموعه ۳۰تایی است. بدین ترتیب برای حالت دوم در مرحله جستجوی سراسری طول هر زیررشته برابر سه بیت و در مرحله جستجوی محلی برابر شش بیت است. در حالت سوم

مجموعه لیست مقاطع به ۱۵ زیرمجموعه ۱۷ تایی و یک زیرمجموعه ۱۳ تایی تقسیم بندی می شود. طول هر زیررشته برای این حالت در مرحله جستجوی سراسری برابر چهار بیت و در مرحله جستجوی محلی برابر پنج بیت است. در حالت چهارم مجموع لیست مقاطع به ۳۰ زیرمجموعه تقسیم می شود که ۲۹ زیرمجموعه دارای ۹ عضو و مجموع آخر دارای ۷ عضو می باشد. برای این حالت طول هر زیررشته در مرحله جستجوی سراسری برابر ۵ بیت و در مرحله جستجوی محلی برابر چهار بیت است. در حالت پنجم مجموع $\{S\}$ به ۵۳ زیرمجموعه ۵ تایی و یک زیرمجموعه ۳ تایی تقسیم می شود. بدین ترتیب برای این حالت طول هر زیررشته در مرحله جستجوی سراسری برابر ۶ بیت و در مرحله جستجوی محلی برابر ۳ بیت می باشد. در حالت ششم مجموع $\{S\}$ به ۹۰ زیرمجموعه تقسیم می شود که ۸۹ زیرمجموعه دارای سه عضو و مجموع آخر تک عضوی است. برای این حالت طول هر زیررشته در مرحله جستجوی سراسری برابر ۷ بیت و در مرحله جستجوی محلی برابر دو بیت است.

نکته حائز اهمیت در حالات مختلف پیشنهادی برای مثال های مذکور، روند صعودی برای طول هر زیررشته در مرحله جستجوی سراسری و نزولی برای طول هر زیررشته در مرحله جستجوی محلی با اندازه گام واحد می باشد. بدین ترتیب ابعاد تقسیم بندی در حالات مختلف به تدریج کوچک می شود. در هر صورت با تقسیم بندی و مشخص شدن حالات مختلف برای مثال های مورد نظر، ایده پیشنهادی انفصال فضای طراحی بشرح توضیحات بخش ۳-۴ قابل اجرا است. با اجرای حالات مختلف برای هر مثال، می توان ارزیابی جامعی نسبت به انتخاب تعداد زیرمجموعه ها در ایده پیشنهادی ارائه داد. در این راستا برای تکمیل فرآیند بررسی ایده انفصال فضای طراحی در الگوریتم GA، در هر مثال حالات الگوریتم ژنتیک ساده (SGA) و الگوریتم ژنتیک ارتقاء یافته براساس روش نوین جستجوی چندمنظوره (MSM-GA) نیز ارائه و با حالات پیشنهادی مقایسه شده است. از سوی دیگر برای کاهش تأثیر پارامترهای تصادفی GA در فرآیند بررسی نتایج، عملیات بهینه یابی در هر حالت برای هر مثال ۴۰ بار اجرا شده و سپس میانگین سیر همگرایی برای اجراهای مختلف (۴۰ اجرا برای هر حالت)

به عنوان سیر همگرایی حالت موردنظر ارائه شده است. بدین ترتیب قضاوت مناسب‌تری بین حالات مختلف ایده پیشنهادی و حالات ساده و ارتقاء یافته GA صورت می‌پذیرد.

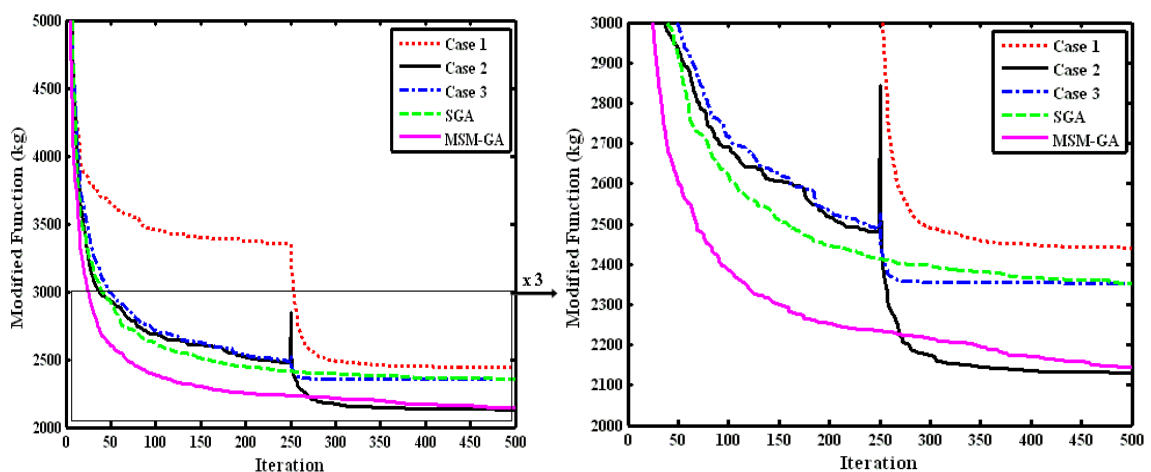
شکل (۳-۴۸) نمودار سیر همگرایی را به ازای حالات پیشنهادی به همراه حالت ساده و ارتقاء یافته الگوریتم ژنتیک برای دکل ۴۷ میله‌ای نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت همگرایی حالت پیشنهادی ۲ در دستیابی به طرح بهینه مناسب‌تر از سایر حالات می‌باشد. این در حالی است که حالت ۲ از ایده پیشنهادی در بهترین روند بهینه‌یابی از بین ۴۰ اجرای متوالی در نسل ۳۶۴ به طرح بهینه مناسب و سبک‌تر نسبت به سایر حالات و دیگر مراجع دست یافته است. لازم به ذکر است که روش SGA در نسل ۴۸۲ و MSM-GA در نسل ۴۷۰ در بهترین اجرا از بین ۴۰ اجرای متوالی، به طرح‌های سنگین‌تر نسبت به حالت ۲ از ایده پیشنهادی دست یافته‌اند. در حالت دو مجموعه $\{S\}$ به هشت زیرمجموعه هشت‌تایی تقسیم شده است. مفروضات مسئله بهینه‌یابی و نتایج مربوط به طرح بهینه برای دکل ۴۷ میله‌ای، در بخش ۳-۴-۱-۲-۱ قابل مشاهده است.



شکل (۳-۴۸) - سیر همگرایی دکل ۴۷ میله‌ای توسط حالات مختلف پیشنهادی، SGA و MSM-GA

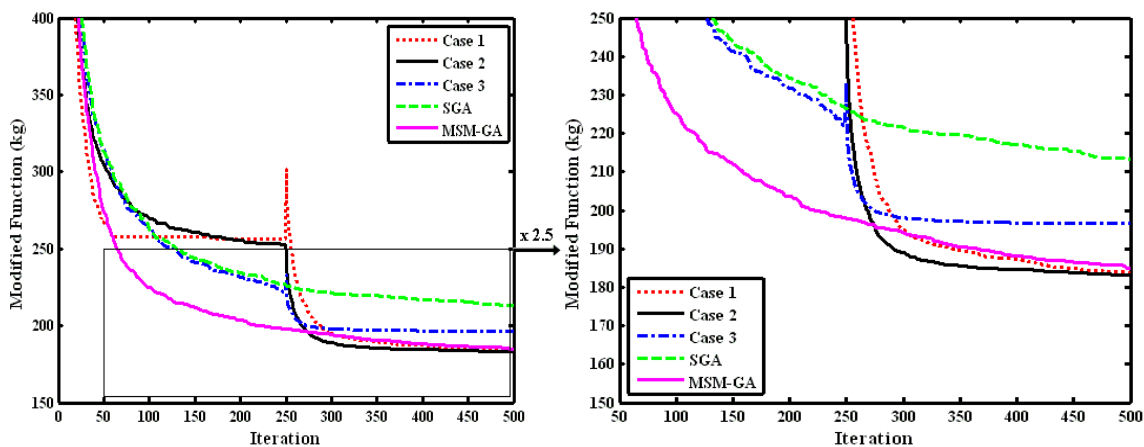
شکل (۳-۴۹) نمودارهای سیر همگرایی برای خریای ۵۲ میله‌ای را براساس حالات مختلف ایده پیشنهادی و نیز روش‌های SGA و MSM-GA نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این مثال نیز سرعت همگرایی حالت پیشنهادی ۲ در دستیابی به طرح بهینه، مناسب‌تر از سایر حالات

می‌باشد. در این مثال حالت ۲ از ایده پیشنهادی در نسل شماره ۴۶۶ در بهترین اجرا از بین ۴۰ اجرای متوالی به طرحی بهینه‌تر نسبت به سایر حالات و دیگر مراجع دست یافته است. لازم به ذکر است که براساس روش‌های SGA و MSM-GA به ترتیب در نسل‌های شماره ۴۸۷ و ۴۷۱ از بهترین اجرا بین اجراهای متوالی، طرح‌های سنگین‌تری نسبت به حالت ۲ ایده پیشنهادی حاصل شده است. جدول (الف-۴۰) نتایج طرح بهینه حاصل از حالت ۲ براساس ایده پیشنهادی را نشان می‌دهد.



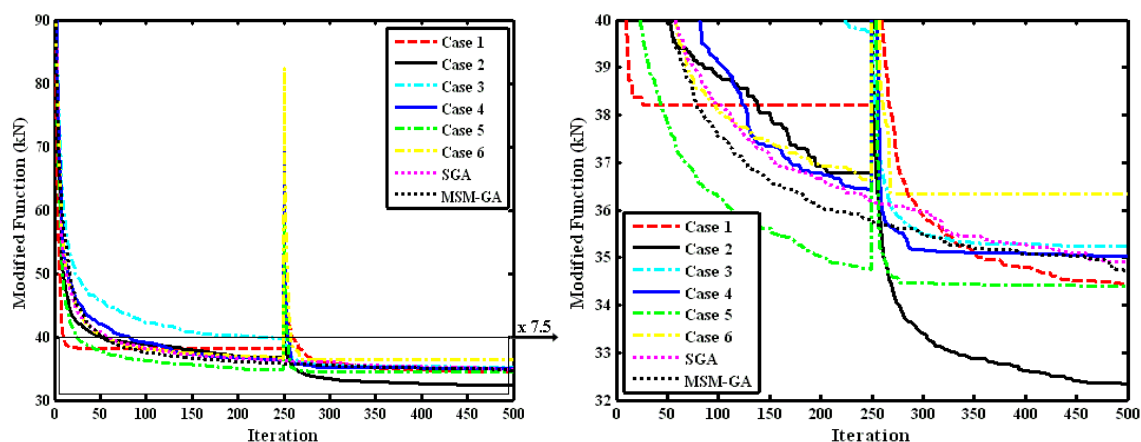
شکل (۳-۴۹) - سیر همگرایی خرپای ۵۲ میله‌ای توسط حالات مختلف پیشنهادی، SGA و MSM-GA

شکل (۳-۵۰) نمودارهای سیر همگرایی برای برج فولادی ۷۲ میله‌ای را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت همگرایی حالت پیشنهادی ۲ در دستیابی به طرح بهینه مناسب‌تر از سایر حالات می‌باشد. برای این مثال نیز حالت ۲ از ایده پیشنهادی در نسل شماره ۳۸۰ در بهترین اجرا بین ۴۰ اجرای متوالی به طرحی با وزن $176/806 \text{ kg}$ دست یافته است، که سبک‌تر نسبت به سایر حالات و دیگر مراجع می‌باشد. شایان ذکر است که شماره نسل‌های مشابه برای روش‌های SGA و MSM-GA به ترتیب برابر ۳۶۷ و ۴۵۰ بوده و این روش‌ها به ترتیب مقادیر $186/229 \text{ kg}$ و $177/177 \text{ kg}$ را در بهترین اجرا بین ۴۰ اجرای متوالی، به عنوان طرح بهینه معرفی نموده‌اند. جدول (الف-۲۰) نتایج طرح بهینه حالت پیشنهادی ۲ را براساس ایده انفصال فضای طراحی نشان می‌دهد.



شکل (۳-۵۰) - سیر همگرایی برج ۷۲ میله‌ای توسط حالات مختلف پیشنهادی، SGA و MSM-GA

شکل (۳-۵۱) سیر همگرایی برای حالات مختلف را برای قاب هشت طبقه - یک دهانه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این مثال حالت ۲ از سایر حالات پیشنهادی موفق‌تر بوده و سرعت کسب طرح بهینه بالاتری نسبت به سایر حالات دارد. از سوی دیگر حالت ۲ در کاوش فضای طراحی از سایر حالات موفق‌تر بوده و فضای طراحی را با دقت بیشتری کاوش نموده است. این حالت در بهترین اجرا بین ۴۰ اجرای متوالی در نسل شماره ۳۳۴ به طرحی بهینه‌تر نسبت به سایر حالات و دیگر مراجع دست یافته است. لازم به ذکر است که روش‌های SGA و MSM-GA در بهترین اجرا به ترتیب به طرح‌های با وزن $۳۲/۶۳۹۷۷ \text{ kN}$ و $۳۱/۴۰۲۶۷ \text{ kN}$ در نسل‌های شماره ۴۹۹ و ۴۸۴ دست یافته‌اند. جدول (الف-۹) نتایج طرح بهینه حاصل از حالت پیشنهادی ۲ را برای قاب هشت طبقه - یک دهانه براساس ایده پیشنهادی نشان می‌دهد.



شکل (۳-۵۱) - سیر همگرایی قاب ۸ طبقه - یک دهانه توسط حالات مختلف پیشنهادی، SGA و MSM-GA

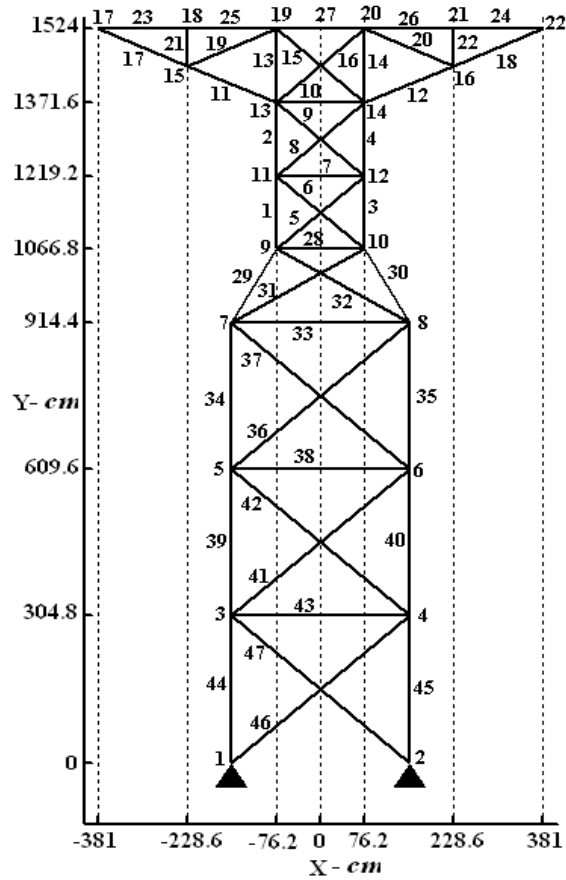
با ارزیابی نتایج بشرح اشکال فوق، مشخص گردید که انتخاب زیرمجموعه‌هایی با اعضای زیاد در مرحله جستجوی سراسری برای ایده پیشنهادی مناسب نمی‌باشد. به بیان دیگر با ریز نمودن مجموعه {S} به زیرمجموعه‌های زیاد احتمال گرفتاری در بهینه محلی افزایش یافته و کارآیی ایده پیشنهادی کاهش می‌یابد. این مهم در اشکال (۳-۴۸) تا (۳-۵۱) قابل مشاهده است. از سوی دیگر ایده پیشنهادی حالت ۲ که دارای طول زیررشته‌ای برابر سه بیت در مرحله جستجوی سراسری می‌باشد، در تمام مثال‌های مورد بررسی، نتایج بهتری را ارائه داده است. به بیان دیگر تقسیم‌بندی منطقی و متعادل براساس ایده پیشنهادی می‌تواند در بهبود الگوریتم ژنتیک برای نیل به نقطه بهینه مؤثر باشد. اشکال (۳-۴۸) تا (۳-۵۱) که هر کدام نتیجه حداقل ۲۰۰ اجرای مستقل برای مثال‌های مورد بررسی می‌باشند، کارآیی حالت ۲ ایده پیشنهادی را نشان می‌دهند. در این حالت ضمن کاهش طول هر زیررشته به سبب تقسیم‌بندی فضای طراحی و نیز وجود زیرمجموعه‌هایی با تعداد اعضای مناسب، مرحله جستجوی محلی با موفقیت اطراف طرح بهینه حاصل از مرحله جستجوی سراسری را کاوش نموده است. این مهم بدلیل کاهش طول هر زیررشته و در نتیجه طول هر رشته در مراحل عملیات بهینه‌یابی براساس GA است، که سبب افزایش سرعت عملیات و بهبود نتیجه طرح بهینه می‌شود.

۳-۴-۱-۲-۱-۴-۳ بهینه‌یابی دکل ۴۷ میله‌ای براساس ایده پیشنهادی در GA

در این مثال به بهینه‌یابی سطح مقطع دکل ۴۷ میله‌ای پرداخته شده است. شکل (۳-۵۲) سازه موردنظر را نمایش می‌دهد. در این سازه E و ρ به ترتیب برابر $206842/8 \text{ MPa}$ و $8303/97 \text{ kg/m}^3$ فرض می‌شود. براساس تقارن سازه، اعضای دکل ۴۷ میله‌ای در ۲۷ گروه دسته‌بندی شده و حداکثر تنش مجاز فشاری و کششی برای کلیه اعضای سازه به ترتیب برابر $103/4214 \text{ MPa}$ و $137/895 \text{ MPa}$ لحاظ شده است. از سوی دیگر تنش مجاز کمانشی نیز برای اعضای سازه براساس رابطه زیر کنترل می‌شود.

$$\sigma_i^{cr} = -\frac{kEa_i}{l_i^2} \quad (\text{الف-۸})$$

در رابطه (الف-۸) ثابت کمانش k برابر $3/96$ در نظر گرفته شده است [۵۰].



شکل (۳-۵۲) - دکل ۴۷ میله‌ای

لیست مقاطع برای دکل ۴۷ میله‌ای بشرح جدول (الف-۱۸) بوده و سازه در معرض سه وضعیت بارگذاری مطابق جدول (۳-۶) قرار گرفته است.

جدول (۳-۶) بارگذاری مؤثر بر دکل ۴۷ میله‌ای

وضعیت بارگذاری	شماره گره	نیرو در جهت $X - kN$	نیرو در جهت $Y - kN$
۱	۱۷	۲۶/۶۸۹	-۶۲/۲۷۵
	۲۲	۲۶/۶۸۹	-۶۲/۲۷۵
۲	۱۷	۲۶/۶۸۹	-۶۲/۲۷۵
	۲۲	--	--
۳	۱۷	--	--
	۲۲	۲۶/۶۸۹	-۶۲/۲۷۵

نتایج حاصل برای طرح بهینه دکل ۴۷ میله‌ای براساس ایده پیشنهادی در روش GA بشرح جدول (۷-۳) در قیاس با دیگر مراجع قابل مشاهده است.

جدول (۷-۳) نتایج طرح بهینه دکل ۴۷ میله‌ای براساس ایده نوین انفصال فضای طراحی در GA

شماره گروه	مرجع [۵۰]	مرجع [۶۹]	مرجع [۶۹]	حالت ۲ پیشنهادی
	HS	MSM-GA	ACO+HS	GA
۱ - mm ²	۲۴۷۷/۴۱۴	۲۴۷۷/۴۱۴	۲۴۷۷/۴۱۴	۲۴۷۷/۴۱۴
۲ - mm ²	۲۱۸۰/۶۴۱	۲۲۳۸/۷۰۵	۲۱۸۰/۶۴۱	۲۱۸۰/۶۴۱
۳ - mm ²	۴۹۴/۱۹۳	۴۹۴/۱۹۳	۴۹۴/۱۹۳	۴۹۴/۱۹۳
۴ - mm ²	۹۰/۹۶۸	۹۰/۹۶۸	۱۲۶/۴۵۱	۷۱/۶۱۳
۵ - mm ²	۵۰۶/۴۵۱	۵۰۶/۴۵۱	۶۴۱/۲۸۹	۵۰۶/۴۵۱
۶ - mm ²	۱۲۸۳/۸۶۸	۱۲۸۳/۸۶۸	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۲۸۳/۸۶۸
۷ - mm ²	۱۳۷۴/۱۹۱	۱۳۷۴/۱۹۱	۱۳۷۴/۱۹۱	۱۳۷۴/۱۹۱
۸ - mm ²	۷۹۲/۲۵۶	۷۹۲/۲۵۶	۷۹۲/۲۵۶	۷۹۲/۲۵۶
۹ - mm ²	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۰۰۸/۳۸۵
۱۰ - mm ²	۱۳۷۴/۱۹۱	۱۳۷۴/۱۹۱	۱۳۷۴/۱۹۱	۱۳۷۴/۱۹۱
۱۱ - mm ²	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳
۱۲ - mm ²	۷۱/۶۱۳	۹۰/۹۶۸	۷۱/۶۱۳	۹۰/۹۶۸
۱۳ - mm ²	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸
۱۴ - mm ²	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۲۸۳/۸۶۸	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸
۱۵ - mm ²	۹۳۹/۹۹۸	۹۳۹/۹۹۸	۹۳۹/۹۹۸	۹۳۹/۹۹۸
۱۶ - mm ²	۲۸۵/۱۶۱	۳۶۳/۲۲۵	۴۹۴/۱۹۳	۳۶۳/۲۲۵
۱۷ - mm ²	۲۳۴۱/۹۳۱	۲۳۴۱/۹۳۱	۲۳۴۱/۹۳۱	۲۳۴۱/۹۳۱
۱۸ - mm ²	۹۳۹/۹۹۸	۹۳۹/۹۹۸	۹۳۹/۹۹۸	۹۳۹/۹۹۸
۱۹ - mm ²	۲۵۲/۲۵۸	۲۵۲/۲۵۸	۲۵۲/۲۵۸	۱۶۱/۲۹۰
۲۰ - mm ²	۱۹۹۳/۵۴۴	۲۱۸۰/۶۴۱	۱۹۹۳/۵۴۴	۱۹۹۳/۵۴۴
۲۱ - mm ²	۹۳۹/۹۹۸	۹۳۹/۹۹۸	۸۱۶/۷۷۳	۷۹۲/۲۵۶
۲۲ - mm ²	۱۲۶/۴۵۱	۱۶۱/۲۹۰	۱۹۸/۰۶۴	۱۹۸/۰۶۴
۲۳ - mm ²	۲۴۷۷/۴۱۴	۲۴۹۶/۷۶۹	۲۴۷۷/۴۱۴	۲۴۷۷/۴۱۴
۲۴ - mm ²	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۰۰۸/۳۸۵
۲۵ - mm ²	۱۲۶/۴۵۱	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۹۰/۹۶۸
۲۶ - mm ²	۲۹۶۱/۲۸۴	۲۹۶۱/۲۸۴	۲۹۶۱/۲۸۴	۲۹۶۱/۲۸۴
۲۷ - mm ²	۹۳۹/۹۹۸	۱۰۰۸/۳۸۵	۹۳۹/۹۹۸	۹۳۹/۹۹۸
وزن - kg	۱۰۸۷/۱۷	۱۱۰۷/۸۵۶	۱۰۸۲/۸۸۱	۱۰۸۱/۴۹۹

۳-۴-۲ ایده نوین انفصال فضای طراحی در الگوریتم کلونی مورچگان

همان‌طور که پیشتر بیان شد، در الگوریتم ACO با افزایش تعداد حالات ممکن برای هر متغیر طراحی (افزایش تعداد اعضای لیست مقاطع)، مقادیر احتمال انتخاب متناظر با حالات ممکن برای متغیرهای طراحی (P_{ij}) کاهش می‌یابد. این مسئله براساس رابطه (۲-۱۰) قابل توجیه است. بر این اساس هر چه تعداد حالات ممکن برای هر متغیر طراحی بیشتر باشد، مقادیر P_{ij} های متناظر، براساس نسبت تجمعی رابطه (۲-۱۰) دارای تعداد بیشتر و مقادیر کمتری خواهد بود. چراکه براساس رابطه (۲-۱۰) مجموع مقادیر P_{ij} برای هر متغیر طراحی برابر یک است. افزایش تعداد و کاهش مقادیر P_{ij} ها سبب کاهش سرعت همگرایی و افزایش احتمال کسب بهینه محلی در فرآیند بهینه‌یابی براساس ACO می‌شود. این مهم به سبب آن است که برای افزایش احتمال انتخاب حالات مناسب برای هر متغیر طراحی، الگوریتم نیازمند تعداد دفعات تکرار زیادی بوده و ممکن است حالات مناسب به سبب تعداد زیاد P_{ij} ها به راحتی کسب نشود. به همین دلیل سرعت همگرایی کاهش و احتمال کسب بهینه محلی افزایش می‌یابد. در هر صورت افزایش تعداد حالات ممکن برای متغیرهای طراحی، تأثیر منفی بر عملکرد روش ACO مشابه روش GA دارد. این مهم در فرآیند طراحی بهینه‌سازها نیز دیده می‌شود. با افزایش تعداد اعضای لیست مقاطع منفصل در فرآیند طراحی بهینه‌سازها براساس الگوریتم ACO، سرعت همگرایی کاهش و احتمال کسب بهینه محلی افزایش می‌یابد. به همین سبب در راستای توسعه و بهبود عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری، ایده انفصال فضای طراحی برای کاهش تأثیر افزایش لیست مقاطع در فرآیند طراحی بهینه‌سازها براساس ACO پیشنهاد شده است. این ایده در بهبود عملکرد GA بشرح بخش پیشین موفقیت قابل توجهی داشته است. بدین‌منظور در این بخش به بررسی ایده پیشنهادی در بهبود عملکرد ACO پرداخته می‌شود. در این راستا چگونگی انتخاب نماینده مناسب در ایده انفصال فضای طراحی مجدداً همانند GA بشرح بخش ۳-۴-۱-۱ برای ACO نیز مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۳-۴-۲-۱ انتخاب نماینده در ایده انفصال فضای طراحی برای روش ACO

همان طور که پیشتر در الگوریتم ژنتیک مشاهده گردید، انتخاب عضو مناسب برای نماینده هر زیرمجموعه جهت تشکیل لیست مقاطع جستجوی سراسری، تأثیر فراوانی بر عملکرد ایده پیشنهادی در بهبود GA دارد. در این بخش بررسی می‌شود که تا چه میزان پارامترهای ایده پیشنهادی انفصال فضای طراحی، همچون انتخاب عضو برای نمایندگی هر زیرمجموعه، وابسته به شیوه الگوریتم انتخابی است. به همین سبب در این بخش حالات مشابه الگوریتم ژنتیک برای انتخاب عضو از هر زیرمجموعه جهت نمایندگی، در روش ACO برای طراحی بهینه سازه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این بررسی میزان تأثیر ایده پیشنهادی در بهبود عملکرد ACO نیز مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور حالات پیشنهادی با حالت ارتقاء یافته ACO (S-ACO) مقایسه می‌شود. در این راستا حالات پیشنهادی مشابه الگوریتم ژنتیک با اتخاذ بزرگترین، کوچکترین و عضو میانی هر زیرمجموعه به عنوان نماینده زیرمجموعه‌ها به ترتیب با عنوان حالت ۱، حالت ۲ و حالت ۳ تعریف می‌شود. برای بررسی حالات پیشنهادی در قیاس با S-ACO از مثال‌های طراحی بهینه سازه‌های اسکلتی استفاده شده است. بدین منظور دکل ۴۷ میله‌ای بشرح بخش ۳-۴-۲-۱-۱ از فصل حاضر و خرپای ۵۲ میله‌ای بشرح بخش الف-۱۷، برج فولادی ۷۲ میله‌ای بشرح بخش الف-۸ و قاب هشت طبقه - یک دهانه بشرح بخش الف-۴ از پیوست الف انتخاب شده‌اند. در این راستا لیست مقاطع مثال‌های خرپایی براساس جدول (الف-۱۸) به هشت زیرمجموعه ۸ تایی بشرح جدول (۳-۵) تقسیم‌بندی می‌شود. سپس حالات پیشنهادی براساس زیرمجموعه‌های موجود تعریف و لیست مقاطع مرحله جستجوی سراسری برای هر حالت مشابه الگوریتم ژنتیک بشرح توضیحات بخش ۳-۴-۲-۱-۱ تشکیل می‌شود.

برای قاب هشت طبقه - یک دهانه متناسب با لیست مقاطع بشرح جدول (الف-۷)، برای اعمال ایده پیشنهادی، اعضای لیست مقاطع پس از مرتب‌سازی به ۳۳ گروه هشت‌تایی و یک گروه ۴ تایی بشرح جدول (۳-۸) تقسیم‌بندی می‌شوند.

جدول (۸-۳) تقسیم‌بندی اعضای لیست مقاطع قاب ۸ طبقه - یک دهانه در ایده انفصال فضای طراحی

مجموعه ۱	مجموعه ۲	مجموعه ۳	...	مجموعه ۳۲	مجموعه ۳۳	مجموعه ۳۳
W6 x 9	W4 x 13	W6 x 16	...	W14 x 370	W40 x 466	W40 x 593
W8 x 10	W8 x 13	W10 x 17	...	W40 x 372	W30 x 477	W14 x 605
W10 x 12	W5 x 16	W6 x 20	...	W27 x 448	W27 x 539	W14 x 808
W6 x 12	W12 x 16	W8 x 21	...	W14 x 455	W14 x 550	W36 x 848

این تقسیم‌بندی به سبب برابری تعداد اعضای زیرمجموعه‌های این مثال با مثال‌های خرابایی است. در هر صورت براساس تقسیم‌بندی مذکور، در مرحله جستجوی سراسری برای ایده پیشنهادی مجموعه لیست مقاطع شامل ۳۴ عضو بشرح جدول (۹-۳) می‌باشد که هر زیرمجموعه در قیاس با لیست اولیه دارای تعداد مقاطع کمتری است.

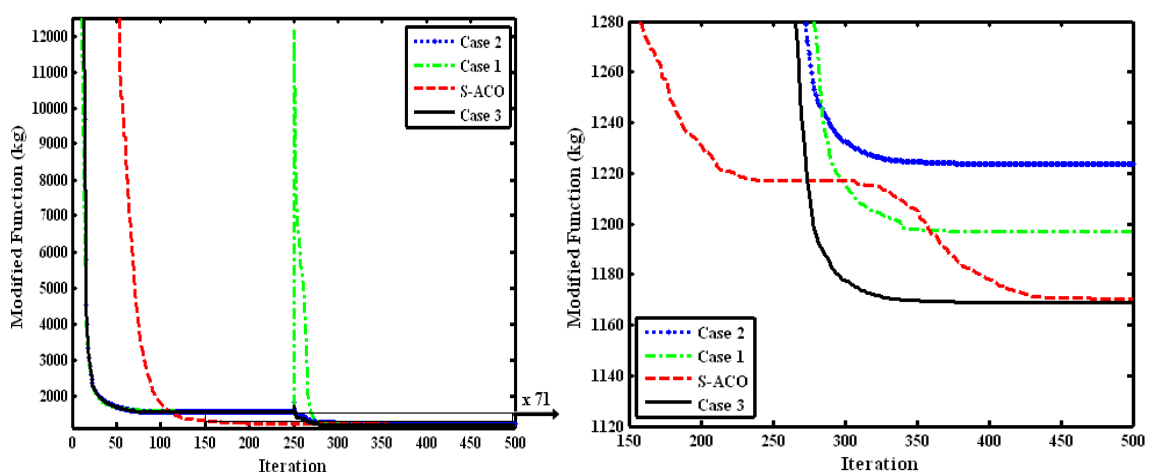
جدول (۹-۳) اعضای لیست مقاطع در حالات ۱، ۲ و ۳ ایده پیشنهادی برای قاب هشت طبقه - یک دهانه

شماره هر زیرمجموعه	۱	۲	...	۳۳	۳۴
اعضای لیست مقاطع برای حالت ۱	W6 x 12	W12 x 16	...	W14 x 550	W36 x 848
اعضای لیست مقاطع برای حالت ۲	W10 x 12	W6 x 15	...	W40 x 503	W14 x 730
اعضای لیست مقاطع برای حالت ۳	W6 x 9	W4 x 13	...	W40 x 466	W40 x 593

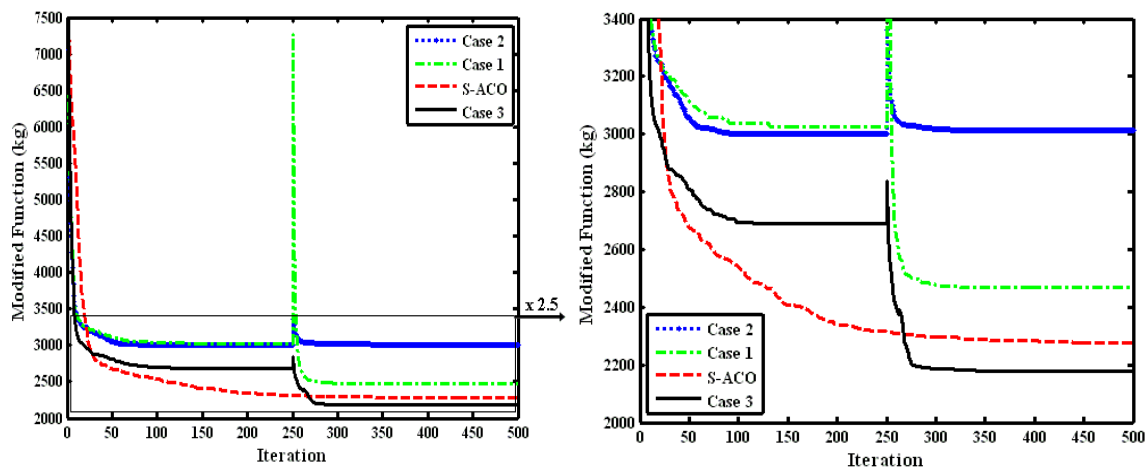
در ادامه با تشکیل لیست مقاطع مرحله جستجوی سراسری در ایده پیشنهادی برای هر مثال، فرآیند بهینه‌یابی براساس ACO اجرا می‌شود. سپس همان‌طور که پیشتر بیان شد، با پایان فرآیند جستجوی سراسری، لیست مقاطع برای هر متغیر طراحی متناسب با نتیجه حاصل و براساس اعضای هر زیرمجموعه تغییر می‌یابد و فرآیند جستجوی محلی در پیش گرفته خواهد شد. از آنجاکه برای تمامی مثال‌ها تعداد اعضای لیست مقاطع در مراحل جستجوی سراسری و محلی بمراتب کمتر از لیست اولیه

است، انتظار می‌رود، شیوه بهینه‌یابی براساس ACO بهبود یابد. این مهم در اشکال (۳-۵۳) تا (۳-۵۶) قابل بررسی می‌باشد. لازم به ذکر است، برای اجتناب از تأثیر پارامترهای تصادفی روش ACO در روند بهینه‌یابی و سیر همگرایی، برای هر حالت در هر مثال ۴۰ اجرای مستقل انجام شده است. سپس میانگین اجراهای متوالی در هر حالت برای هر مثال به عنوان سیر همگرایی حالت موردنظر جهت مقایسه رسم شده است.

اشکال (۳-۵۳) تا (۳-۵۶) سیر همگرایی برای مثال‌های مذکور را براساس حالات ۱، ۲ و ۳ به همراه حالت ارتقاء یافته ACO (S-ACO) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سرعت همگرایی حالت پیشنهادی ۳ در دستیابی به طرح بهینه برای تمامی مثال‌ها مناسب‌تر از سایر حالات می‌باشد. این حالت در ایده انفصال برای الگوریتم ژنتیک نیز نسبت به سایر حالات، سیر همگرایی مناسب‌تری ارائه داده است. از سوی دیگر حالت ۳ به طرحی بهینه‌تر نسبت به حالات ۱، ۲ و S-ACO و نیز دیگر مراجع برای تمامی مثال‌ها دست یافته است. نتایج طرح بهینه توسط حالت ۳، در قیاس با دیگر مراجع برای مثال‌های مذکور به صورت جداول مختلف در مثال‌های مربوطه ارائه شده است.

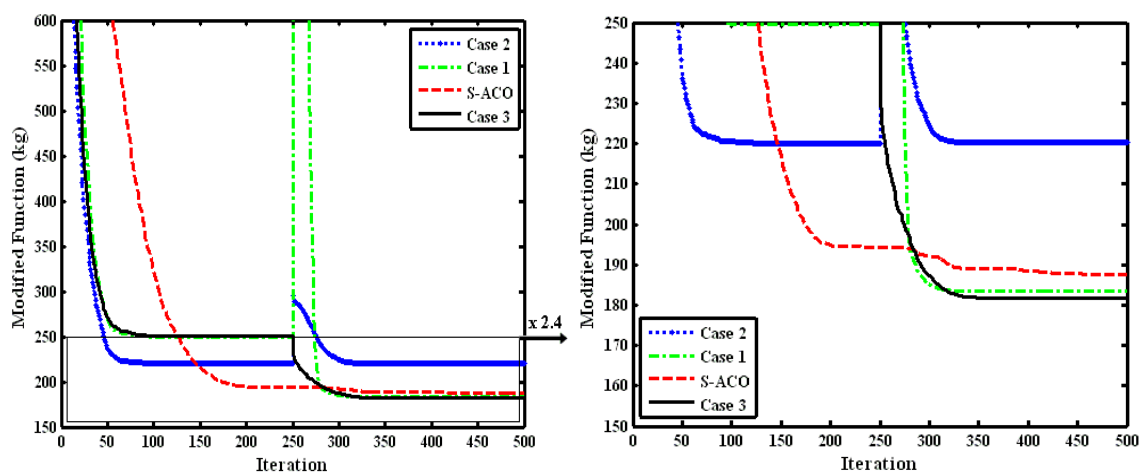


شکل (۳-۵۳) - سیر همگرایی بهینه‌یابی دکل ۴۷ میله‌ای توسط حالات مختلف پیشنهادی و روش S-ACO

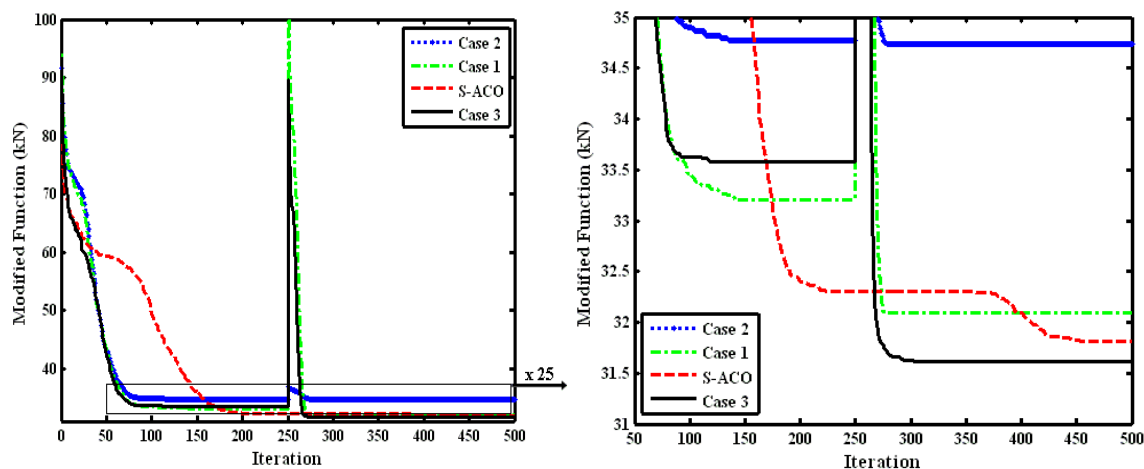


شکل (۳-۵۴) - سیر همگرایی بهینه‌یابی خرپای ۵۲ میله‌ای توسط حالات مختلف پیشنهادی و روش S-ACO

لازم به ذکر است که روش S-ACO در مثال‌های مطرح برای این بخش با استفاده از فرآیند جستجوی محلی و تمهیدات دیگر، موفق بوده و سیر همگرایی مناسب و تقریباً نزدیک به حالت ۳ ارائه داده است. بایستی توجه داشت که حالت S-ACO با حالت ساده الگوریتم کلونی مورچگان متفاوت بوده و عملکرد این روش با استفاده از راهکارهای مختلفی همچون عملیات جستجوی محلی و ... بهبود یافته است. به همین سبب حالت S-ACO در برخی از مثال‌ها دارای سیر همگرایی مناسب‌تری نسبت به حالت ۱ و ۲ می‌باشد. اما در هر صورت نسبت به حالت ۳ دارای سیر همگرایی ضعیف‌تری است.



شکل (۳-۵۵) - سیر همگرایی بهینه‌یابی برج ۷۲ میله‌ای توسط حالات مختلف پیشنهادی و روش S-ACO



شکل (۳-۵۶) - سیر همگرایی قاب ۸ طبقه - یک دهانه توسط حالات مختلف پیشنهادی و روش S-ACO

همان‌طور که در اشکال (۳-۵۳) تا (۳-۵۶) مشاهده گردید، در تمامی مثال‌های مورد بررسی حالت پیشنهادی ۳ با اتخاذ عضو میانی به عنوان نماینده زیرمجموعه، سیر همگرایی مناسب‌تری نسبت به سایر حالات و حالت S-ACO ارائه داده است. در این حالت پس از ورود الگوریتم به مرحله جستجوی محلی، نمودار سیر همگرایی برای تمامی مثال‌ها دارای افت چشمگیری می‌باشد، که بیانگر حرکت الگوریتم به سوی نقطه بهینه است. برتری حالت ۳ نسبت به سایر حالات موجود در نتایج طرح بهینه نیز مشاهده شده است. از سوی دیگر در بررسی‌های انجام شده برای ایده پیشنهادی در GA بشرح بخش ۳-۴-۱-۱، حالت ۳ عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر حالات و روش‌های SGA و MSM-GA ارائه داده است. بنابراین می‌توان بیان نمود که اتخاذ عضو میانی برای هر زیرمجموعه به عنوان نماینده، بهترین راه‌حل در ایده انفصال فضای طراحی جهت افزایش عملکرد الگوریتم انتخابی است.

۳-۴-۱-۲-۱-۴-۳-۱ بهینه‌یابی دکل ۴۷ میله‌ای براساس ایده پیشنهادی در ACO

در این مثال به بهینه‌یابی سطح مقطع دکل ۴۷ میله‌ای بشرح شکل (۳-۵۲) براساس ایده انفصال فضای طراحی در ACO پرداخته شده است. فرضیات طراحی و مفروضات مسئله بهینه‌یابی بشرح بخش ۳-۴-۱-۲-۱-۴-۳ در نظر گرفته می‌شود.

نتایج حاصل برای طرح بهینه دکل ۴۷ میله‌ای براساس ایده پیشنهادی در روش ACO بشرح

جدول (۳-۱۰) در قیاس با دیگر مراجع قابل مشاهده است.

جدول (۳-۱۰) نتایج طرح بهینه دکل ۴۷ میله‌ای براساس ایده نوین انفصال فضای طراحی در ACO

شماره گروه	مرجع [۵۰]	مرجع [۶۹]	مرجع [۶۹]	حالت ۲ پیشنهادی
	HS	MSM-GA	ACO+HS	ACO
۱ - mm ²	۲۴۷۷/۴۱۴	۲۴۷۷/۴۱۴	۲۴۷۷/۴۱۴	۲۴۷۷/۴۱۴
۲ - mm ²	۲۱۸۰/۶۴۱	۲۲۳۸/۷۰۵	۲۱۸۰/۶۴۱	۲۱۸۰/۶۴۱
۳ - mm ²	۴۹۴/۱۹۳	۴۹۴/۱۹۳	۴۹۴/۱۹۳	۴۹۴/۱۹۳
۴ - mm ²	۹۰/۹۶۸	۹۰/۹۶۸	۱۲۶/۴۵۱	۷۱/۶۱۳
۵ - mm ²	۵۰۶/۴۵۱	۵۰۶/۴۵۱	۶۴۱/۲۸۹	۵۰۶/۴۵۱
۶ - mm ²	۱۲۸۳/۸۶۸	۱۲۸۳/۸۶۸	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۲۸۳/۸۶۸
۷ - mm ²	۱۳۷۴/۱۹۱	۱۳۷۴/۱۹۱	۱۳۷۴/۱۹۱	۱۳۷۴/۱۹۱
۸ - mm ²	۷۹۲/۲۵۶	۷۹۲/۲۵۶	۷۹۲/۲۵۶	۷۹۲/۲۵۶
۹ - mm ²	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۰۰۸/۳۸۵
۱۰ - mm ²	۱۳۷۴/۱۹۱	۱۳۷۴/۱۹۱	۱۳۷۴/۱۹۱	۱۳۷۴/۱۹۱
۱۱ - mm ²	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳
۱۲ - mm ²	۷۱/۶۱۳	۹۰/۹۶۸	۷۱/۶۱۳	۹۰/۹۶۸
۱۳ - mm ²	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸
۱۴ - mm ²	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۲۸۳/۸۶۸	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸
۱۵ - mm ²	۹۳۹/۹۹۸	۹۳۹/۹۹۸	۹۳۹/۹۹۸	۹۳۹/۹۹۸
۱۶ - mm ²	۲۸۵/۱۶۱	۳۶۳/۲۲۵	۴۹۴/۱۹۳	۳۶۳/۲۲۵
۱۷ - mm ²	۲۳۴۱/۹۳۱	۲۳۴۱/۹۳۱	۲۳۴۱/۹۳۱	۲۳۴۱/۹۳۱
۱۸ - mm ²	۹۳۹/۹۹۸	۹۳۹/۹۹۸	۹۳۹/۹۹۸	۹۳۹/۹۹۸
۱۹ - mm ²	۲۵۲/۲۵۸	۲۵۲/۲۵۸	۲۵۲/۲۵۸	۱۶۱/۲۹۰
۲۰ - mm ²	۱۹۹۳/۵۴۴	۲۱۸۰/۶۴۱	۱۹۹۳/۵۴۴	۱۹۹۳/۵۴۴
۲۱ - mm ²	۹۳۹/۹۹۸	۹۳۹/۹۹۸	۸۱۶/۷۷۳	۷۹۲/۲۵۶
۲۲ - mm ²	۱۲۶/۴۵۱	۱۶۱/۲۹۰	۱۹۸/۰۶۴	۱۹۸/۰۶۴
۲۳ - mm ²	۲۴۷۷/۴۱۴	۲۴۹۶/۷۶۹	۲۴۷۷/۴۱۴	۲۴۷۷/۴۱۴
۲۴ - mm ²	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۰۰۸/۳۸۵
۲۵ - mm ²	۱۲۶/۴۵۱	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۹۰/۹۶۸
۲۶ - mm ²	۲۹۶۱/۲۸۴	۲۹۶۱/۲۸۴	۲۹۶۱/۲۸۴	۲۹۶۱/۲۸۴
۲۷ - mm ²	۹۳۹/۹۹۸	۱۰۰۸/۳۸۵	۹۳۹/۹۹۸	۹۳۹/۹۹۸
وزن - kg	۱۰۸۷/۱۷	۱۱۰۷/۸۵۶	۱۰۸۲/۸۸۱	۱۰۸۱/۴۹۹

۳-۵ الگوریتم ترکیباتی پیشنهادی HACOHSGA

طی بررسی‌های انجام شده در زمینه شیوه بهینه‌یابی الگوریتم‌های فراابتکاری مختلف، مشخص گردید که برخی از این روش‌ها در زمینه مفاهیم تنوع قدرتمندتر از مفاهیم تشدید بوده و برخی دیگر در زمینه پوشش مفاهیم تشدید موفق‌تر از مفاهیم تنوع می‌باشند. به بیان دیگر برخی از الگوریتم‌های فراابتکاری متناسب با شیوه الگوریتم در زمینه جستجوی سراسری فضای طراحی موفق بوده و برخی دیگر با استفاده از فرآیند جستجوی محلی و به صورت موضعی فضای طراحی را کاوش می‌نمایند. این مسئله ایده ترکیب الگوریتم‌های مختلف فراابتکاری را برای ایجاد توازن بین اصول تنوع و تشدید و استفاده از محاسن الگوریتم‌های مختلف را پدید می‌آورد. بر این اساس همان‌طور که در بخش ۲-۳ مشاهده گردید، در الگوریتم‌های ترکیباتی سعی می‌شود تا محاسن روش‌های پایه تقویت و معایب هر یک کمرنگ شود. بدین‌منظور در این رساله نیز طی کسب دید کلی و مناسب نسبت به شیوه برخی از الگوریتم‌های فراابتکاری، روش نوینی بر پایه ترکیب الگوریتم‌های ACOS، HS و GA با عنوان HACOHSGA پیشنهاد شده است. در HACOHSGA فرآیند جستجوی سراسری و محلی به طور همزمان انجام می‌شود. طوری که روش ACOS فرآیند جستجوی سراسری را بر عهده دارد و روش HS فرآیند جستجوی محلی را همزمان با روش ACOS در صورت برقراری شرط جستجوی محلی دنبال می‌کند. برای تقویت شیوه پیشنهادی با ترکیب روش‌های ACOS و HS، نیز از روش‌های انتخاب GA جهت برگزیدن بهترین حالات ممکن برای هر متغیر طراحی براساس مقادیر P_{ij} استفاده شده است. در این راستا روش چرخ‌گردان (HACOHSGA-Ra)، روش رتبه‌بندی (HACOHSGA-Ro) و روش مسابقه‌ای (HACOHSGA-T) به عنوان حالات مختلف پیشنهادی می‌باشند که کارایی آن‌ها طی مثال‌های بهینه‌یابی سطح‌مقطع سازه‌های اسکلتی مورد ارزیابی قرار گرفته است. شیوه الگوریتم پیشنهادی HACOHSGA برای بهینه‌یابی سطح‌مقطع سازه‌های اسکلتی بشرح زیر می‌باشد.

ابتدا همانند سایر الگوریتم‌های فراابتکاری پارامترهای اولیه روش HACOHSGA که متشکل از پارامترهای ACOS، HS و شرط جستجوی محلی می‌باشد، مقداردهی می‌شود. سپس ماتریس فرومون

شرح رابطه (۸-۲) تشکیل و میزان فرومون اولیه براساس رابطه (۹-۲) مقداردهی خواهد شد. در ادامه احتمال انتخاب هر یک از مقاطع موجود در لیست مقاطع برای هر متغیر طراحی بشرح رابطه (۱۰-۲) محاسبه می‌شود. پس از محاسبه مقادیر احتمال انتخاب، جمعیت جدید می‌بایست براساس مقادیر P_{ij} تعیین شود. برای این منظور روش‌های مختلف انتخاب در GA براساس بخش‌های ۳-۱-۱-۲-۳ تا ۳-۱-۱-۲-۳ استفاده و بشرح زیر ارائه شده است.

HACOHS-GA-Ro در این حالت از شیوه انتخاب چرخ‌گردان در GA استفاده شده است. این حالت تقریباً مشابه حالت مرسوم ACO بوده و فقط مفاهیم چرخ‌گردان در شیوه انتخاب ظاهر می‌شوند. بر این اساس با توجه به آن که مجموع مقادیر P_{ij} برای λ مین متغیر طراحی برابر یک است، بنابراین می‌توان درصد احتمال بدست آمده برای λ مین متغیر طراحی را به صورت یک چرخ‌گردان نشان داد؛ مقادیر P_{ij} ها قطعات‌های این چرخ را تشکیل می‌دهند. با تولید عدد تصادفی بین صفر و یک، سطح مقطعی از لیست مقاطع با قطعه بزرگتر، شانس بیشتری برای انتخاب دارد. اجرای این حالت براساس توضیحات و روابط بخش ۳-۱-۱-۲-۳ قابل انجام می‌باشد.

HACOHS-GA-Ra در این حالت از شیوه رتبه‌بندی برای انتخاب سطح مقطع از لیست مقاطع مبتنی بر میزان فرومون استفاده می‌شود. بر این اساس ابتدا مقادیر P_{ij} برای λ مین متغیر طراحی از کوچکترین مقدار تا بزرگترین مقدار مرتب می‌شوند. طوری که سطح مقطعی با کمترین میزان نسبت احتمال، دارای رتبه یک و به همین ترتیب مورد بعدی دو و ... در نهایت سطح مقطعی با بیشترین نسبت احتمال دارای رتبه‌ای برابر N_s خواهد بود. سپس انتخاب سطح مقطع براساس رتبه هر یک از اعضا در لیست مرتب شده صورت می‌گیرد. برای این منظور از شرح کلی بخش ۳-۱-۱-۲-۳ استفاده می‌شود.

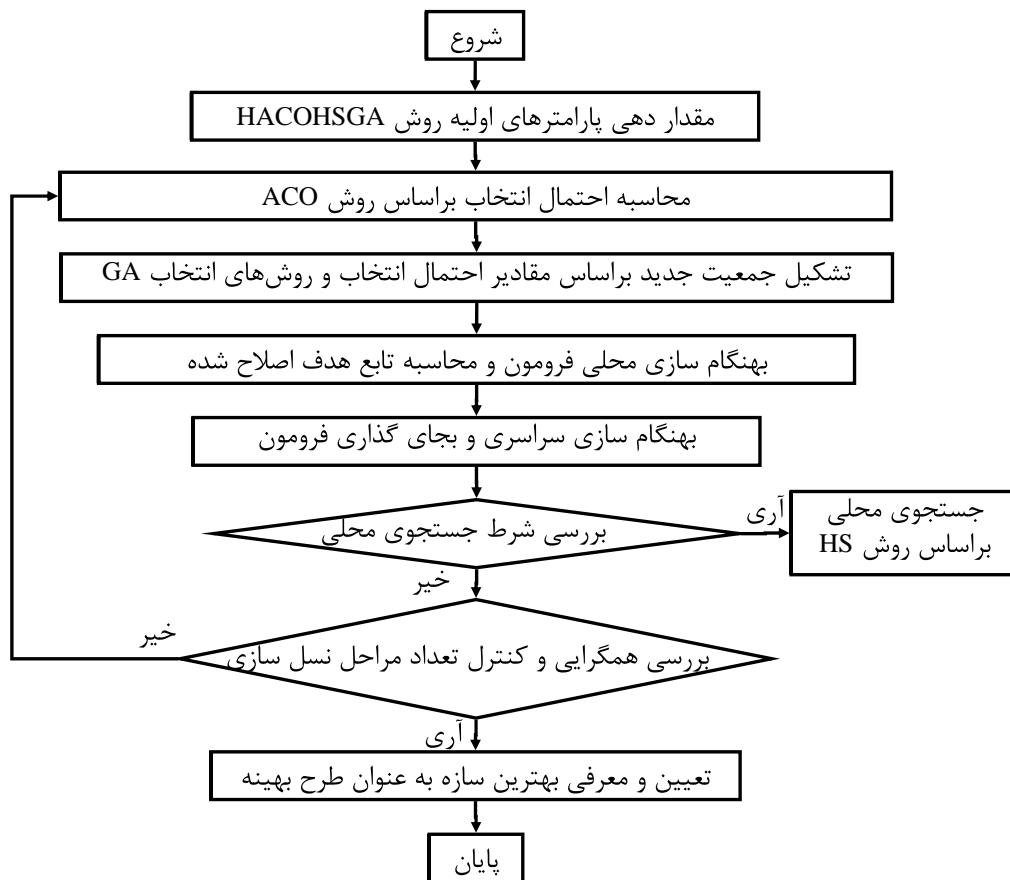
HACOHS-GA-T در این حالت از شیوه انتخاب مسابقه‌ای به منظور انتخاب سطح مقطع برای λ مین متغیر طراحی استفاده شده است. بر این اساس متناسب با سایز رقابت، تعدادی سطح مقطع از

لیست مقاطع برای زامین متغیر طراحی به صورت تصادفی برگزیده می‌شوند و در یک رقابت، سطح مقطعی از لیست مقاطع با بزرگترین مقدار P_{ij} برای زامین متغیر طراحی انتخاب می‌شود.

با تکرار فرآیند انتخاب متناسب با حالات پیشنهادی موردنظر، مقادیر سطح مقطع برای هر طرح مشخص می‌شود. در ادامه می‌توان جمعیت جدید را براساس شیوه موردنظر تشکیل داد. پس از تشکیل جمعیت جدید فرآیندهای بهنگام‌سازی محلی بشرح رابطه (۲-۱۳)، محاسبه مقدار تابع هدف اصلاح شده برای هر عضو از جمعیت بشرح رابطه (۲-۳)، بهنگام‌سازی سراسری بشرح رابطه (۲-۱۴) و فرآیند بجای گذاری فرمومون بشرح رابطه (۲-۱۵) صورت می‌پذیرد. سپس شرط جستجوی محلی برای اعمال فرآیند جستجوی محلی براساس روش HS کنترل می‌شود. بدین‌منظور در صورتی که در چند نسل متوالی از فرآیند بهینه‌یابی، تغییری در مقدار $\phi(A)$ متناظر با بهترین طرح جمعیت حاصل نشود، فرآیند جستجوی محلی در پیش گرفته می‌شود. برای اعمال فرآیند جستجوی محلی طرح‌های جمعیت کوچک μ در ماتریسی به نام H سازماندهی می‌شوند. این ماتریس دارای ابعاد $\lambda_r \times Nos$ بوده و هم‌ارز با ماتریس HM بشرح رابطه (۲-۱۹) در روش HS می‌باشد. سپس به تعداد λ_r بردار جدید متغیرهای طراحی براساس فلوجارت شکل (۲-۹) مبتنی بر قوانین HS بشرح بخش ۲-۲-۶ تشکیل می‌شود. بدین‌ترتیب ماتریس H (جمعیت کوچک μ) براساس شیوه روش HS بروزرسانی خواهد شد. در ادامه فرآیند جستجوی محلی، درایه‌های ماتریس فرمومون مربوط به محدوده‌ای از حالات ممکن در لیست مقاطع برای اعضای ماتریس H برابر مقدار فرمومون اولیه قرار گرفته و مابقی درایه‌های ماتریس فرمومون برابر صفر منظور می‌شود. به بیان دیگر فرمومون متناظر با چند سطح مقطع در بالا و پایین طرح‌های H در لیست مقاطع در ماتریس فرمومون برابر مقدار اولیه و بقیه درایه‌های ماتریس فرمومون برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. محدوده موردنظر برای همسایگی اعضای ماتریس H متناسب با مقدار bw (پارامتر روش HS) تعیین خواهد شد.

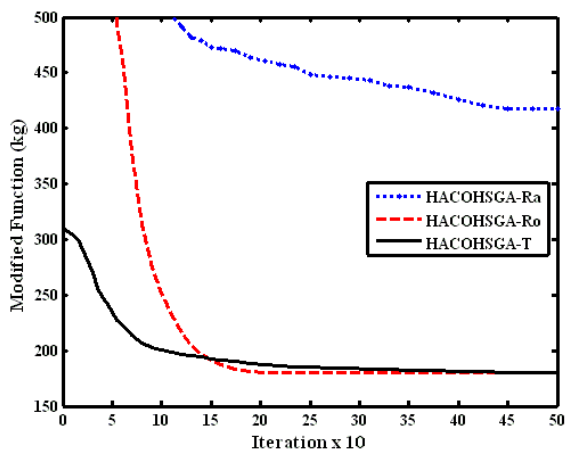
در آخرین گام روش پیشنهادی HACOHSGA شرط خاتمه الگوریتم بررسی می‌گردد. در صورت عدم برقراری شرط خاتمه مراحل روش HACOHSGA به تعداد دفعات مشخص تکرار شده و

در نهایت الگوریتم بهترین طرح را به عنوان طرح بهینه معرفی می‌نماید. شکل (۳-۵۷) مراحل روش پیشنهادی و ترکیباتی HACOHSGA را نشان می‌دهد.

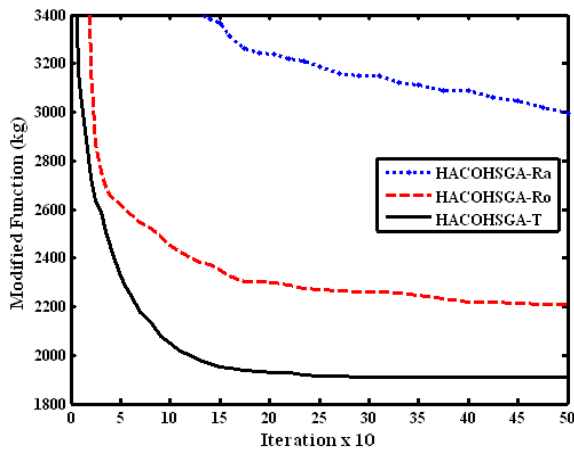


شکل (۳-۵۷) - روش نوین ترکیباتی و پیشنهادی HACOHSGA

همان‌طور که پیشتر بیان شد، برای بررسی کارایی الگوریتم پیشنهادی HACOHSGA از مسائل بهینه‌یابی سطح‌مقطع سازه‌های اسکلتی استفاده شده است. بدین‌منظور خرابی ۵۲ میله‌ای بشرح مفروضات بخش الف-۱۷، برج فولادی ۷۲ میله‌ای بشرح بخش الف-۸، خرابی ۲۰۰ میله‌ای بشرح بخش الف-۹ و قاب هشت طبقه - یک دهانه بشرح مفروضات بخش الف-۴ از پیوست الف و قاب پنج طبقه - دو دهانه بشرح مفروضات بخش ۳-۵-۱ از فصل حاضر در نظر گرفته شده است. اشکال (۳-۵۸) تا (۳-۶۲) نمودار سیر همگرایی را براساس حالات مختلف روش پیشنهادی HACOHSGA نشان می‌دهد.

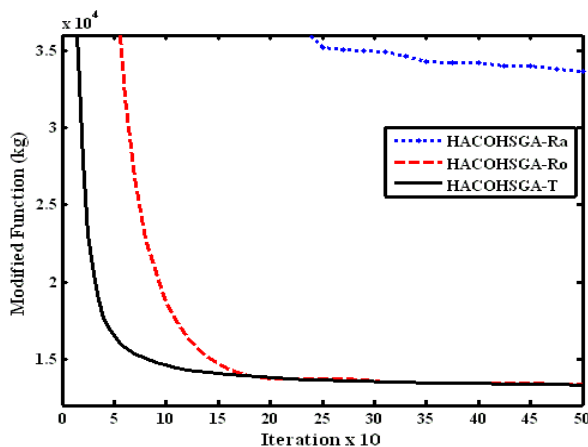


شکل (۳-۵۹) - سیر فرآیند بهینه‌یابی
برج فولادی ۷۲ میله‌ای



شکل (۳-۵۸) - سیر فرآیند بهینه‌یابی
خرپای ۵۲ میله‌ای

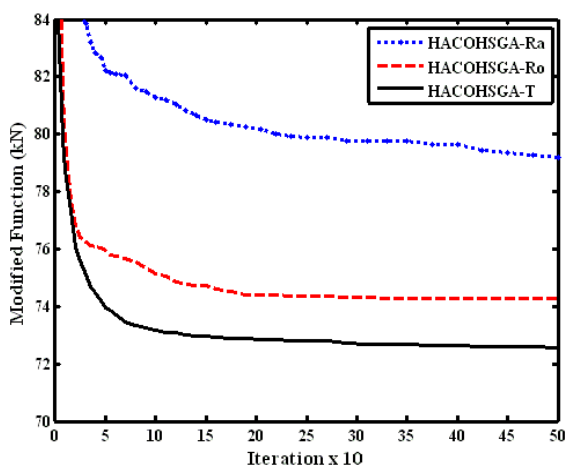
هر نمودار در هر شکل برای مثال‌های مذکور، میانگین ۳۰ اجرای مختلف حالات پیشنهادی می‌باشد. بدین ترتیب تأثیر پارامترهای تصادفی در حالات پیشنهادی روش HACOHS-GA کاهش یافته و قضاوت مناسب‌تری نسبت به کارایی هر حالت ارائه می‌شود.



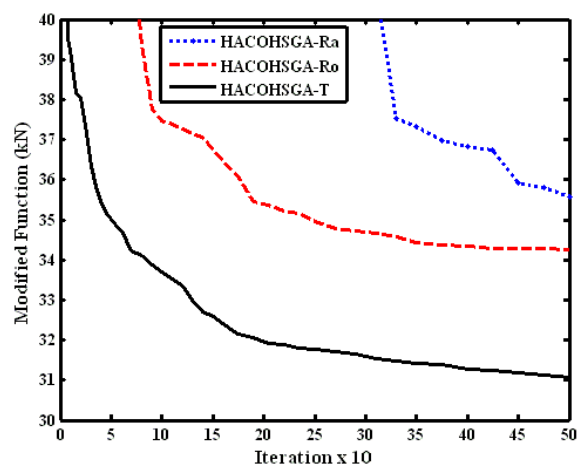
شکل (۳-۶۰) - سیر فرآیند بهینه‌یابی خرپای ۲۰۰ میله‌ای

همان‌طور که در اشکال (۳-۵۸) تا (۳-۶۲) مشاهده می‌شود، در تمامی مثال‌های موجود، روش پیشنهادی HACOHS-GA-T از سایر روش‌ها موفق‌تر بوده است و سرعت بالاتری برای کسب طرح بهینه نسبت به سایر روش‌های پیشنهادی حاضر داشته است. از سوی دیگر روش پیشنهادی HACOHS-GA-Ro در فضاهای کاوش کوچک با لیست مقاطع کم، نیز دارای سیر همگرایی مناسبی است. اما در فضاهای کاوش بزرگ موفقیتی همچون روش HACOHS-GA-T ندارد. لذا این روش برای

فضاهای کاوش بزرگ توصیه نمی‌شود. روش HACOHSGA-Ra سرعت همگرایی ضعیفی داشته و در مسائل حاضر روند مناسبی برای کسب نقطه بهینه ندارد. بنابراین استفاده از این حالت جهت طراحی بهینه سازه‌ها اسکلتی توصیه نمی‌شود.



شکل (۳-۶۲) - سیر فرآیند بهینه‌یابی
قاب پنج طبقه - دو دهانه

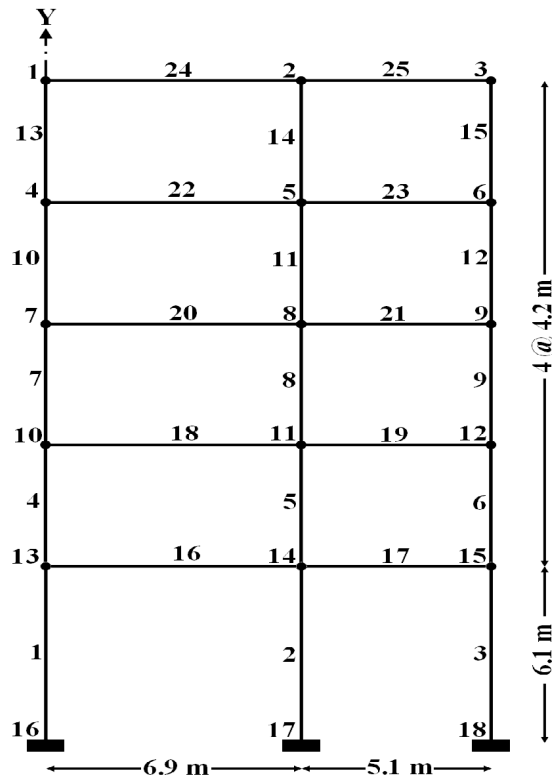


شکل (۳-۶۱) - سیر فرآیند بهینه‌یابی
قاب هشت طبقه - یک دهانه

از سوی دیگر روش پیشنهادی HACOHSGA-T در کیفیت نتایج نیز نسبت به دیگر حالات پیشنهادی و الگوریتم‌های سایر مراجع موفق‌تر بوده است. نتایج طرح بهینه برای سازه‌های مذکور در بخش‌های مربوط به هر مثال قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده خواهد شد، روش پیشنهادی HACOHSGA-T عملکرد و کارایی مناسبی نسبت به دیگر مراجع دارد. در این راستا به عنوان نمونه قاب پنج طبقه - دو دهانه بشرح بخش بعدی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۳-۵-۱- بهینه‌یابی قاب فولادی پنج طبقه - دو دهانه براساس روش HACOHSGA

در این مثال به بهینه‌یابی قابی همانند شکل (۳-۶۳) پرداخته شده است. برای کلیه اعضای سازه E و γ به ترتیب برابر $20.5/8 \text{ GPa}$ و 78 kN/m^3 تعریف شده است. بر طبق مراجع [۷۳-۷۴] مقدار تنش مجاز برای کلیه اعضای سازه برابر $166/6 \text{ MPa} \pm$ و تغییرمکان مجاز (δ) برای گره‌های آخرین طبقه برابر $\frac{1}{500}$ ارتفاع قاب در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۳-۶۳) - قاب پنج طبقه - دو دهانه

بارهای DL ، LL و WL در سه حالت بشرح ترکیبات زیر به سازه اعمال می‌شوند، که مقادیر و جهت بارهای مذکور در جدول (۳-۱۱) تعریف شده است.

- i) $DL+0.9(LL+WL)$ ii) $DL+WL$ iii) $DL+LL$

جدول (۳-۱۱) بارگذاری مؤثر بر قاب پنج طبقه - دو دهانه

موقعیت بار	بزرگی بار	نوع بار
اعضای ۱۶، ۱۷، ۱۸، ... و ۲۴، ۲۵	$w_x = -11.76 \text{ kN/m}$	بار مرده (DL)
گره‌های ۱ و ۳	$P_y = -19.6 \text{ kN}$	
گره‌های ۴، ۶، ۷، ۹، ۱۰، ۱۲، ۱۳ و ۱۵	$P_y = -40.2 \text{ kN}$	بار زنده (LL)
اعضای ۱۶، ۱۷، ... و ۲۵	$w_x = -10.78 \text{ kN/m}$	
گره ۱	$P_x = 5.684 \text{ kN}$	بار باد (WL)
گره ۴	$P_x = 7.252 \text{ kN}$	
گره ۷	$P_x = 6.664 \text{ kN}$	
گره ۱۰	$P_x = 5.978 \text{ kN}$	
گره ۱۳	$P_x = 6.272 \text{ kN}$	

در فرآیند طراحی، می‌بایست ستون‌های هر طبقه دارای سطح مقطع یکسانی باشند. از سوی دیگر کلیه تیرهای سازه به طور مستقل طراحی می‌شوند. بنابراین در مجموع ۱۵ متغیر طراحی برای مسئله بهینه‌یابی در نظر گرفته می‌شود، که از لیست مقاطع موجود در جدول (۳-۱۲) انتخاب خواهد شد.

جدول (۳-۱۲) اعضای لیست مقاطع برای طراحی بهینه قاب پنج طبقه - دو دهانه

شماره	$A - cm^2$	$I_y - cm^4$	$S_y - cm^3$	$I_x - cm^4$	$S_x - cm^3$	شماره	$A - cm^2$	$I_y - cm^4$	$S_y - cm^3$	$I_x - cm^4$	$S_x - cm^3$
۱	۵۱/۳۸	۲۵۴۵/۵	۲۸۲/۸۳	۱۴۳۹	۲۱۱/۷	۸	۹۷	۱۵۰۲۱/۳	۹۳۸/۸۳	۴۷۸۷	۵۴۴۴
۲	۵۷/۶۶	۳۵۶۰/۸	۳۵۶/۰۸	۱۸۷۲	۲۵۶/۴	۹	۱۰۹/۸	۱۶۱۱۳/۵	۱۰۰۷/۱	۵۸۰۱	۶۴۴/۵
۳	۶۳/۶۷	۴۷۸۷/۷	۴۳۵/۲۵	۲۳۱۳	۳۰۰/۳	۱۰	۱۲۱/۷۸	۲۳۷۴۸/۲	۱۳۱۹/۳۵	۷۱۴۷	۷۴۴/۵
۴	۶۹/۸۱	۶۷۱۰/۲	۵۳۷/۴۶	۲۶۴۷	۳۳۹/۴	۱۱	۱۳۶/۱۸	۲۵۳۰۳/۴	۱۴۰۵/۷۵	۸۵۰۲	۸۶۷/۸
۵	۷۹/۸۱	۷۲۳۹/۱	۵۷۹/۱۳	۳۲۷۲	۴۰۸/۹	۱۲	۱۵۰/۰۹	۳۵۱۵۵/۴	۱۷۵۷/۷۷	۹۶۴۶	۹۶۴/۶
۶	۸۰/۰۴	۹۵۰۵/۱	۶۷۸/۱۳	۳۴۲۰	۴۱۷/۱	۱۳	۱۶۶/۰۹	۳۷۲۸۸/۷	۱۸۶۴/۴۴	۱۱۲۷۸	۱۱۰۵/۷
۷	۹۱/۲۴	۱۰۲۳۶/۸	۷۳۱/۲	۴۱۹۲	۴۹۹/۱	۱۴	۱۸۲/۰۹	۳۹۴۲۲/۱	۱۹۷۱/۱	۱۲۹۷۵	۱۲۴۷/۶۲

نتایج طرح بهینه براساس روش پیشنهادی در جدول (۳-۱۳) قابل مشاهده است.

جدول (۳-۱۳) نتایج طرح بهینه قاب پنج طبقه - دودخانه براساس روش نوین ترکیباتی HACOHSGA

شماره گروه	مرجع [۷۳]	مرجع [۷۴]	روش پیشنهادی
	RDQA	DLM	HACOHSGA-T
۱ - cm^2	۸۰/۰۴	۸۰/۰۴	۸۰/۰۴
۲ - cm^2	۸۰/۰۴	۶۹/۸۱	۶۹/۸۱
۳ - cm^2	۶۹/۸۱	۶۹/۸۱	۶۹/۸۱
۴ - cm^2	۶۹/۸۱	۶۳/۶۷	۶۹/۸۱
۵ - cm^2	۶۹/۸۱	۶۳/۶۷	۵۱/۳۸
۶ - cm^2	۸۰/۰۴	۹۷	۸۰/۰۴
۷ - cm^2	۸۰/۰۴	۶۹/۸۱	۹۷
۸ - cm^2	۸۰/۰۴	۸۰/۰۴	۸۰/۰۴
۹ - cm^2	۶۹/۸۱	۶۹/۸۱	۶۹/۸۱
۱۰ - cm^2	۸۰/۰۴	۸۰/۰۴	۸۰/۰۴
۱۱ - cm^2	۶۹/۸۱	۶۹/۸۱	۵۷/۶۶
۱۲ - cm^2	۶۹/۸۱	۸۰/۰۴	۸۰/۰۴
۱۳ - cm^2	۶۹/۸۱	۵۷/۶۶	۵۷/۶۶
۱۴ - cm^2	۶۹/۸۱	۸۰/۰۴	۸۰/۰۴
۱۵ - cm^2	۶۹/۸۱	۶۳/۶۷	۶۹/۸۱
وزن - kN	۷۴/۶۰	۷۲/۲۷	۷۲/۵۹۶

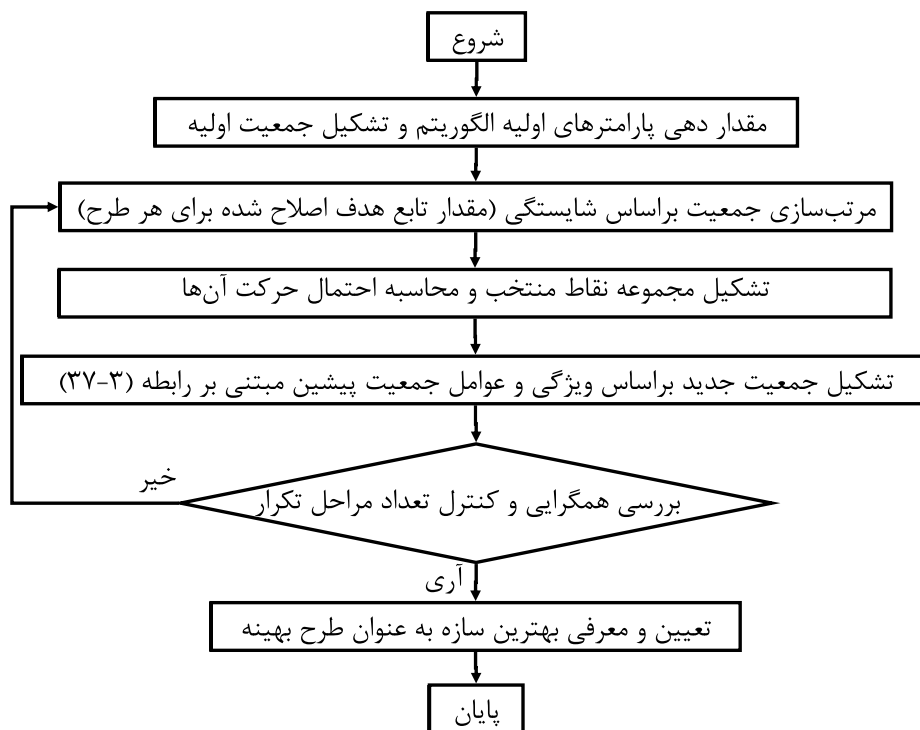
۳-۶ الگوریتم نوین نقاط متحرک

همان طور که پیشتر بیان شد، الگوریتم‌های فراابتکاری با استفاده از رفتارهای تکاملی محیط پیرامون، فرآیند جستجو را در پیش گرفته و با تولید طرح‌های ارتقاء یافته متعدد، فضای طراحی را کاوش می‌نمایند. این الگوریتم‌ها با جستجوی نقطه به نقطه فضای کاوش و با پیروی از منطق الگوریتم و ایجاد توازن بین راهکارهای اصول تنوع و تشدید، در فرآیند تکامل تدریجی به سوی نقطه بهینه حرکت می‌نمایند. این مهم با بررسی الگوریتم‌های فراابتکاری مختلف، همچون GA، ACO، PSO و ... بشرح فصل دوم و بخش ۳-۲ مشاهده شده است.

بنابراین در این رساله در راستای توسعه و بهبود عملکرد الگوریتم‌های فراابتکاری، سعی شده است تا با الهام از شیوه جستجوی روش‌های مختلف فراابتکاری از قبیل GA، HS، CSS، PSO و ...، الگوریتم نوین نقاط متحرک^۱ (MP) ارائه شود. بدین منظور با توجه به تجربیات بررسی الگوریتم‌های فراابتکاری مذکور بشرح فصل دوم و نیز دقت در شیوه جستجوی فضای کاوش براساس اصول تنوع و تشدید توسط هر الگوریتم بشرح بخش ۳-۲، روش نقاط متحرک پیشنهاد شده است. در روش MP فضای کاوش توسط یک سری نقاط متحرک جستجو می‌شود. بر این اساس در الگوریتم MP هر طرح در فضای طراحی بیانگر نقطه‌ای متحرک و فعال در فضای کاوش می‌باشد و مجموعه نقاط متحرک، جمعیت را تشکیل می‌دهند. نقاط متحرک با حرکت و جابجایی در فضای کاوش، سبب ایجاد فرآیند تکاملی برای جمعیت‌های پی در پی شده و به سوی نقطه بهینه حرکت می‌نمایند. حرکت و جابجایی نقاط متحرک در فضای کاوش همواره براساس عوامل و ویژگی‌های جمعیت قبلی پی‌ریزی شده است. برای این منظور اولین جمعیت مشابه دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری، به صورت تصادفی تولید می‌شود. سپس جمعیت‌های بعدی به صورت پی در پی براساس ویژگی‌های جمعیت پیشین به امید تولید طرح‌های شایسته شکل می‌گیرد. به بیان دیگر نقاط متحرک در هر تکرار براساس عوامل مربوط به جمعیت حاضر، در فضای طراحی حرکت می‌نمایند و بدین ترتیب جمعیت جدید با شایستگی بیشتر

^۱ . Moving Point

نسبت به جمعیت پیشین ارائه می‌شود. برای این منظور موقعیت نقاط هر جمعیت براساس مرکز هندسی نقاط جمعیت قبل، مرکز هندسی نقاط منتخب جمعیت پیشین و موقعیت نقاط منتخب جمعیت قبل مشخص می‌شود. بدین ترتیب نقاط متحرک هر جمعیت با حرکت در فضای طراحی به سوی مرکز کلیه نقاط، مرکز نقاط منتخب و نیز موقعیت نقاط منتخب جمعیت حاضر، جمعیت جدید را تشکیل می‌دهند. در این راستا میانگین میزان کیفیت نقاط جمعیت حاضر و میانگین مقدار کیفیت مجموعه نقاط منتخب و نیز میزان کیفیت هر یک از نقاط منتخب در مقدار جابجایی نقاط متحرک مؤثر می‌باشند. از دیگر عوامل مهم در شکل‌گیری موقعیت نقاط متحرک جمعیت جدید، میزان تغییرات و جابجایی هر نقطه در جمعیت قبل می‌باشد که به صورت عاملی مستقل در رسیدن به موقعیت جدید هر نقطه مؤثر است. به عبارت دیگر مقدار جابجایی هر نقطه در شکل‌گیری جمعیت پیشین به صورت مستقل در موقعیت جدید هر نقطه لحاظ می‌شود. بدین ترتیب هر نقطه در هر جمعیت در موقعیت فعلی براساس سه عامل مطرح مذکور در جمعیت قبل و نیز تغییرات حرکت پیشین، در فضای کاوش جابجا شده و در نهایت جمعیت جدید با حرکت تمامی نقاط شکل می‌گیرد. بر اساس این روش، فرآیند بهینه‌یابی به صورت تکاملی و شیوه‌ای مبتنی بر جستجوی تصادفی هوشمند هدایت شده و تا برقرای شرط خاتمه ادامه می‌یابد و بدین‌سان طرح بهینه در فرآیند تکامل تدریجی حاصل می‌گردد. شکل (۳-۶۴) مراحل الگوریتم نوین نقاط متحرک را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۶۴) - روش نوین پیشنهادی نقاط متحرک (MP)

همان‌طور که ملاحظه شد، فرآیند الگوریتم MP دارای روند تکاملی برای جمعیت‌های پی در پی مشابه الگوریتم ژنتیک می‌باشد که این مهم براساس ویژگی‌های هر جمعیت صورت می‌پذیرد. از سوی دیگر حرکت نقاط متحرک در فضای کاوش مشابه فرآیند بهینه‌یابی براساس روش اجتماع ذرات و روش جستجوی ذرات باردار می‌باشد. روش جستجوی هارمونی نیز که از الگوریتم‌های قدرتمند با راهکارهای اصل تشدید می‌باشد، برای جستجوی محلی الگوریتم MP انتخاب شده است. این مهم با استفاده از قوانین HS در تشکیل هارمونی جدید برآورده می‌شود. بدین ترتیب الگوریتم MP در چارچوب روش‌های فراابتکاری و نیز با دقت و الهام در شیوه بهینه‌یابی الگوریتم‌های مذکور، شکل گرفته است. در این راستا بشرح بخش آتی فرمولبندی شیوه جستجوی روش پیشنهادی MP با توجه به ساختار شکل (۳-۶۴) ارائه شده است.

۳-۶-۱ فرمولبندی مسئله بهینه‌یابی براساس الگوریتم پیشنهادی نقاط متحرک

در الگوریتم MP ابتدا پارامترهای اولیه الگوریتم از قبیل تعداد نقاط متحرک^۱ (NP)، ضریب استانداردسازی (λ^{MP}) و ... مقداردهی می‌شوند. سپس جمعیت اولیه به صورت تصادفی و براساس محدوده متغیرهای طراحی تولید می‌شود. این جمعیت می‌بایست براساس شایستگی از بهترین تا بدترین طرح مرتب شود. بدین منظور مقدار تابع هدف اصلاح شده برای هر طرح بشرح رابطه (۳-۲) محاسبه می‌شود. براساس این رابطه می‌توان شایستگی هر طرح را ارزیابی نمود. در این راستا هر طرحی که قیود مسئله را بیشتر نقض نماید، مقدار تابع ϕ متناظر با آن بیشتر و در نتیجه دارای شایستگی کمتری است و هر طرحی که دارای ϕ کمتری باشد، از شایستگی بیشتری برخوردار خواهد بود. بدین ترتیب طرح‌هایی با ϕ کوچکتر به عنوان طرح‌های شایسته‌تر در نظر گرفته می‌شوند. بر این اساس اعضای جمعیت طبق شایستگی مرتب خواهد شد. بدین منظور شایسته‌ترین طرح رتبه یک و ناشایسته‌ترین طرح در جایگاه NP قرار می‌گیرد. NP تعداد طرح‌های موجود در جمعیت است که معادل تعداد نقاط متحرک در فضای جستجو می‌باشد.

پس از مرتب‌سازی اعضای جمعیت، هر طرح براساس روابط پیشنهادی روش MP در فضای طراحی جابجا می‌شود. بدین منظور موقعیت جدید هر نقطه بشرح رابطه (۳-۲۴) تعیین می‌شود.

$$X_{new}^k = X_{old}^k + \Delta X_{new}^k \quad k = 1, \dots, NP \quad (۳-۲۴)$$

در رابطه (۳-۲۴)، X_{old}^k و X_{new}^k به ترتیب بیانگر موقعیت k امین طرح از جمعیت حاضر (موقعیت فعلی طرح) و جمعیت جدید می‌باشند که معادل طرح‌هایی همچون $A = [a_1, a_2, \dots, a_{Nos}]$ در فضای برداری است. ΔX_{new}^k نیز مقدار جابجایی k امین طرح در فضای طراحی برای جمعیت حاضر بوده که بر اساس رابطه (۳-۲۵) محاسبه و ارزیابی می‌گردد.

$$\Delta X_{new}^k = r_0 \Delta X_{old}^k + Term1 + Term2 + Term3 \quad (۳-۲۵)$$

^۱ . Number of Points

در رابطه (۲۵-۳)، ΔX_{old}^k میزان تغییرات و جابجایی k امین طرح (نقطه) در تکرار قبلی است. لازم به ذکر است که مقدار ΔX_{old}^k در اولین تکرار برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. از سوی دیگر r_0 ضریب کاهنده‌ای است که براساس رابطه (۲۶-۳) به صورت خطی و نزولی تعریف می‌شود.

$$r_0 = 1 - 0.9(iter / iter_{max}) \quad (26-3)$$

در رابطه (۲۶-۳)، $iter$ و $iter_{max}$ به ترتیب بیانگر شماره تکرار و تعداد کل تکرارها در فرآیند بهینه‌یابی است. بدین ترتیب مقدار r_0 در کل فرآیند بهینه‌یابی بصورت خطی و نزولی بین مقادیر یک تا ۰/۱ تغییر می‌نماید. این تدبیر سبب می‌شود تا روش MP در تکرارهای ابتدایی از فرآیند بهینه‌یابی، سریع‌تر به سمت نقطه بهینه حرکت نموده و نقاط متنوعی را تولید نماید. بنابراین در تکرارهای ابتدایی مفاهیم اصل تنوع در فرآیند بهینه‌یابی بیشتر مشاهده می‌شود. از سوی دیگر در تکرارهای آخر به سبب کاهش مقدار ضریب r_0 ، الگوریتم MP با پیروی از اصل تشدید همسایگی طرح‌های شایسته را دقیق‌تر جستجو می‌نماید.

در رابطه (۲۵-۳) توابع $Term1$ ، $Term2$ و $Term3$ دلالت بر سه عامل اصلی برای تشکیل جمعیت‌های جدید که در بخش پیشین شرح داده شد، دارند. بر این اساس $Term1$ سبب حرکت هر نقطه (طرح) به سوی مرکز نقاط جمعیت حاضر می‌شود. بنابراین می‌بایست مرکز نقاط هر جمعیت تعیین شود. برای این منظور نقطه مرکز جمعیت حاضر یعنی موقعیت $X^{Avg} = [x_1^{Avg}, x_2^{Avg}, \dots, x_{Nos}^{Avg}]$ براساس رابطه (۲۷-۳) مشخص می‌شود

$$x_i^{Avg} = \frac{1}{NP} \sum_{j=1}^{NP} x_j \quad i = 1, \dots, n \quad (27-3)$$

با محاسبه X^{Avg} مقدار $Term1$ برای هر طرح بشرح رابطه (۲۸-۳) محاسبه خواهد شد.

$$Term1 = r_1 Ran_1 \left[\frac{\phi_1}{\phi_{Avg}} (X^{Avg} - X_{old}^k) \right] \quad (28-3)$$

براساس رابطه فوق هر نقطه (طرح) در جمعیت جدید به مقدار $Term1$ به سوی مرکز کلیه نقاط جمعیت قبل حرکت می‌نماید. در رابطه (۲۸-۳) Ran_1 بیانگر عددی تصادفی و یکنواخت در محدوده صفر تا یک است. ϕ_1 بیانگر مقدار تابع هدف اصلاح شده بهترین طرح در جمعیت حاضر (اولین طرح

در هر جمعیت) است. پارامتر r_1 نیز ضریبی است که در حرکت هر نقطه به سوی مرکز نقاط جمعیت مؤثر است. برای ایجاد آهنگ پایدار در رسیدن به طرح بهینه، ضریب r_1 در طی فرآیند بهینه‌یابی بصورت خطی و نزولی بشرح رابطه (۲۹-۳) تعریف می‌شود. براساس رابطه (۲۹-۳) بیشترین مقدار r_1 در ابتدای عملیات بهینه‌یابی با مقدار یک و کمترین مقدار آن برابر $0/1$ در پایان فرآیند بهینه‌یابی است. بدین ترتیب در ابتدا مقادیر $Term1$ بیشتر بوده و این مهم سبب افزایش تولید نقاط متنوع در کل فضای طراحی خواهد شد. بنابراین اصل تنوع در ابتدای فرآیند بهینه‌یابی حاکم است. از سوی دیگر طی فرآیند بهینه‌یابی، مقادیر $Term1$ به آهستگی کوچک می‌شود. این مهم سبب افزایش اصل تشدید و کاهش مفاهیم اصل تنوع در انتهای فرآیند بهینه‌یابی خواهد شد. بدین سان در انتهای فرآیند بهینه‌یابی، همسایگی طرح‌های مستعد کاوش می‌شود.

$$r_1 = 1 - 0.9(iter / iter_{max}) \quad (29-3)$$

در رابطه (۲۸-۳)، ϕ^{Avg} میانگین مقادیر تابع هدف اصلاح شده طرح‌های جمعیت حاضر می‌باشد. این مقدار بشرح رابطه (۳۰-۳) محاسبه می‌شود.

$$\phi_{Avg} = \frac{1}{NP} \sum_{j=1}^{NP} \phi_j \quad (30-3)$$

با محاسبه ϕ^{Avg} می‌توان مقدار $Term1$ برای رابطه (۲۵-۳) براساس رابطه (۲۸-۳) محاسبه نمود.

از سوی دیگر در رابطه (۲۵-۳) $Term2$ بیانگر مقدار حرکت هر طرح به سوی مرکز نقاطی با شایستگی بالا از جمعیت قبل می‌باشد. این نقاط با عنوان نقاط منتخب^۱ تعریف می‌گردند. بدین ترتیب مقدار $Term2$ برای هر طرح در جمعیت حاضر بشرح رابطه (۳۱-۳) محاسبه می‌شود.

$$Term2 = r_1 Ran_2 \left[\frac{\phi_1}{\phi_{Avg-cp}} (X^{Avg-cp} - X_{old}^k) \right] \quad (31-3)$$

در رابطه فوق Ran_2 بیانگر عددی تصادفی و یکنواخت در محدوده صفر تا یک می‌باشد. ϕ^{Avg-cp} در رابطه (۳۱-۳) نیز میانگین مقادیر تابع هدف اصلاح شده طرح‌های متناظر با نقاط منتخب در جمعیت حاضر است. این مقدار در فرآیند بهینه‌یابی بشرح رابطه (۳۲-۳) محاسبه می‌شود.

^۱ . Choosing Points

$$\phi^{Avg-cp} = \frac{1}{Ncp} \sum_{j=1}^{Ncp} \phi_j \quad (32-3)$$

در رابطه فوق Ncp بیانگر تعداد نقاط مجموعه منتخب (طرح‌هایی با شایستگی مناسب) در جمعیت حاضر می‌باشد. در رابطه (31-3) $X^{Avg-cp} = [x_1^{Avg-cp}, x_2^{Avg-cp}, \dots, x_{Nos}^{Avg-cp}]$ نیز بیانگر نقطه مرکز نقاط منتخب می‌باشد که بشرح رابطه (33-3) تعیین می‌گردد.

$$x_i^{Avg-cp} = \frac{1}{Ncp} \sum_{j=1}^{Ncp} x_j \quad i = 1, \dots, n \quad (33-3)$$

نکته حائز اهمیت در محاسبه $Term2$ تعیین مجموعه نقاط منتخب و یا به تعبیر صحیح‌تر در فرآیند بهینه‌یابی سازه‌ها، تعیین مجموعه‌ای از طرح‌های شایسته در هر جمعیت است. برای این منظور معیاری تحت عنوان شایستگی استاندارد براساس رابطه (34-3) تعریف می‌شود [1].

$$\phi_{sf} = \phi_{Avg} + \lambda^{MP} \sqrt{\left(\frac{1}{(NP+1)} \sum_{j=1}^{NP} (\phi_j - \phi_{Avg})^2 \right)} \quad (34-3)$$

در رابطه فوق ϕ_{sf} شایستگی استاندارد می‌باشد. λ^{MP} نیز ضریب استانداردسازی شایستگی است که در ابتدای فرآیند بهینه‌یابی مشخص می‌شود. اتخاذ مقادیر λ^{MP} کوچک سبب همگرایی زودرس الگوریتم خواهد شد. براین اساس الگوریتم فرصت کافی برای جستجوی فضای طراحی نداشته و در بهینه محلی گرفتار می‌شود. از سوی دیگر اتخاذ مقادیر بزرگ برای λ^{MP} نیز توصیه نمی‌شود، چرا که بدین ترتیب الگوریتم به سوی جستجوی تصادفی هدایت می‌شود. بنابراین انتخاب مقدار صحیح λ^{MP} از مسائل مهم در الگوریتم MP بوده و معیارهای اصل تنوع را کنترل می‌نماید. با بررسی‌های انجام شده توصیه می‌شود که در مسائل بهینه‌یابی سازه‌ها مقدار λ^{MP} در محدوده 0/5 تا 1 در نظر گرفته شود.

با محاسبه ϕ_{sf} می‌توان مجموعه نقاط منتخب را تشکیل و پارامتر Ncp را مشخص نمود. بر این اساس طرح‌هایی که دارای تابع هدف اصلاح شده‌ای کمتری از مقدار ϕ_{sf} باشند، در مجموعه نقاط منتخب دسته‌بندی می‌شوند. بدین ترتیب با تشکیل مجموعه نقاط منتخب، مقادیر ϕ^{Avg-cp} و X^{Avg-cp} براساس روابط (32-3) و (33-3) قابل محاسبه است.

پس از محاسبه مقدار $Term2$ می‌بایست برای تعیین میزان جابجایی هر طرح، مقدار $Term3$ نیز محاسبه شود. $Term3$ بیانگر حرکت هر طرح در فضای طراحی به سوی موقعیت هر یک از نقاط منتخب در جمعیت حاضر است تا بدین‌سان طرحی با شایستگی بیشتر برای جمعیت جدید حاصل گردد. برای این منظور مقدار $Term3$ برای هر طرح بشرح رابطه (۳۵-۳) تعیین می‌گردد.

$$Term3 = r_3 \sum_{j=1}^{Ncp} \left[\frac{\phi_1}{\phi_j} (X^j - X_{old}^k) \right] \quad (35-3)$$

در رابطه (۳۵-۳)، r_3 ضریبی است که در میزان حرکت به سوی موقعیت نقاط منتخب مؤثر است. این پارامتر بصورت صعودی در کل فرآیند بهینه‌یابی بشرح رابطه (۳۶-۳) افزایش می‌یابد. براساس رابطه (۳۶-۳) کمترین مقدار r_3 در ابتدای عملیات بهینه‌یابی $0/1$ و بیشترین مقدار آن برابر یک در پایان فرآیند بهینه‌یابی است. اتخاذ شیوه صعودی برای r_3 سبب افزایش تدریجی تأثیر $Term3$ در فرآیند بهینه‌یابی می‌شود. رفتار صعودی $Term3$ نیز سبب می‌شود تا الگوریتم در تکرارهای نهایی از گرفتاری در بهینه محلی رهایی یابد. به بیان دیگر می‌توان اذعان داشت که وجود $Term3$ در الگوریتم MP مشابه فرآیند جهش در الگوریتم ژنتیک است.

$$r_3 = 0.1 + 0.9(iter / iter_{max}) \quad (36-3)$$

از سوی دیگر در رابطه (۳۵-۳) X^j نیز بیانگر موقعیت z امین طرح در فضای طراحی از مجموعه نقاط منتخب است.

با محاسبه مقدار $Term3$ مقدار ΔX_{new}^k در رابطه (۲۵-۳) به راحتی قابل محاسبه است. با تعیین مقدار ΔX_{new}^k نیز مقدار X_{new}^k برحسب رابطه (۲۴-۳) محاسبه و موقعیت جدید هر طرح در جمعیت جدید مبتنی بر پارامترهای جمعیت قبل، مشخص می‌گردد. بنابراین در حالت کلی رابطه حاکم بر الگوریتم MP بشرح رابطه (۳۷-۳) قابل بیان می‌باشد.

$$\begin{aligned}
X_{new}^k &= X_{old}^k + r_0 \Delta X_{old}^k \\
&+ r_1 \left[Ran_1 \left[\frac{\phi_1}{\phi_{Avg}} (X^{Avg} - X_{old}^k) \right] + Ran_2 \left[\frac{\phi_1}{\phi_{Avg-cp}} (X^{Avg-cp} - X_{old}^k) \right] \right] \\
&+ r_3 \sum_{j=1}^{Ncp} \left[\frac{\phi_1}{\phi_j} (X^j - X_{old}^k) \right] \quad k = 1, \dots, NP
\end{aligned} \tag{۳۷-۳}$$

با محاسبه X_{new}^k برای تمامی طرح‌های جمعیت حاضر، جمعیت جدید قابل تشکیل می‌باشد. با تشکیل جمعیت جدید فرآیند بهینه‌یابی تا برقراری شرط خاتمه ادامه می‌یابد. زمانی که شرط خاتمه محقق شود، الگوریتم بهترین طرح را به عنوان طرح بهینه معرفی می‌نماید. تعیین تعداد دفعات تکرار مشخص، از ساده‌ترین راه‌حل‌ها برای شرط خاتمه در الگوریتم‌های فراابتکاری است. بدین منظور الگوریتم مراحل تکرار را به تعداد دفعات مشخص انجام و در نهایت بهترین طرح را به عنوان طرح بهینه معرفی می‌نماید.

از تمهیدات ویژه‌ای که کارایی الگوریتم MP را افزایش می‌دهد، اتخاذ فرآیند شرطی برای حرکت نقاط منتخب در هر جمعیت است. به عبارت دیگر با بررسی‌های انجام شده مشخص گردید، اگر شرط منطقی برای حرکت نقاط منتخب در هر جمعیت وجود داشته باشد، کارایی الگوریتم افزایش می‌یابد. برای این منظور به ازای هر طرح در مجموعه نقاط منتخب، عدد تصادفی یکنواختی در محدوده صفر تا یک تولید می‌شود، اگر عدد تولیدی از مقدار تابع رابطه (۳۸-۳) بیشتر باشد، نقطه موردنظر همانند سایر اعضای جمعیت براساس رابطه (۳۷-۳) در فضای طراحی حرکت می‌نماید. در غیر این صورت نقطه (طرح) موردنظر بدون هیچ تغییری به جمعیت بعدی منتقل می‌شود.

$$P_i = \frac{(\phi_{sf} - \phi_i)}{(\phi_{sf} - \phi_1) + \varepsilon} \quad i = 1, \dots, Ncp \tag{۳۸-۳}$$

در رابطه فوق P_i مقدار احتمال متناظر با هر طرح در مجموعه نقاط منتخب و ε مقداری کوچک برای جلوگیری از صفر شدن مخرج است [۲۲].

از موارد مهم دیگری که در مسائل بهینه‌یابی سازه‌ها رخ می‌دهد، خروج مقدار هر متغیر طراحی از محدوده مجاز براساس رابطه (۳۷-۳) می‌باشد. به بیان دیگر ممکن است براساس رابطه (۳۷-۳) در

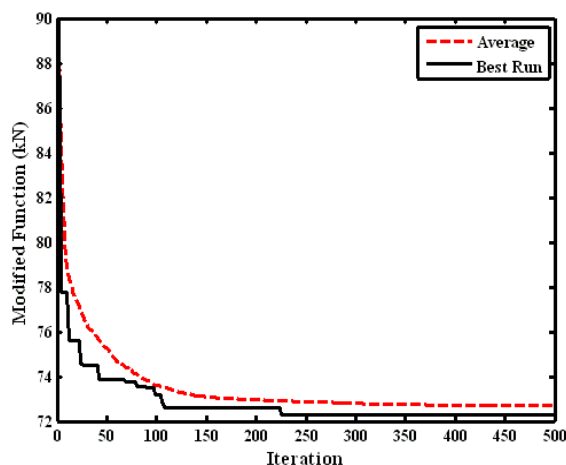
ابتدای فرآیند بهینه‌یابی میزان ΔX_{new}^k سبب مقداردهی متغیری خارج از محدوده مجاز شود. این مهم در برخی الگوریتم‌های فراابتکاری مشاهده می‌شود که هر یک راهکارهای مختلفی را ارائه می‌دهند [۲۲ و ۴۵]. با بررسی‌های انجام شده توصیه می‌شود، در صورت بروز چنین اتفاقی در الگوریتم MP، متغیر مربوطه براساس روش HS در تولید هارمونی جدید، مقداردهی شود. برای این منظور متغیر مربوطه براساس پارامتر $HCMR^{MP}$ می‌تواند به صورت تصادفی در محدوده مجاز مقداردهی شود و یا براساس مقادیر متناظر موجود در مجموعه منتخب مقداردهی شود. این مرحله با تولید عددی تصادفی در محدوده صفر تا یک و مقایسه آن با مقدار $HCMR^{MP}$ قابل اجرا است. در صورتی که عدد تصادفی از مقدار $HCMR^{MP}$ بیشتر باشد، متغیر موردنظر به صورت تصادفی در محدوده مجاز مقداردهی می‌شود. اما اگر عدد تصادفی کمتر از $HCMR^{MP}$ باشد، متغیر مربوطه براساس مقادیر متناظر در مجموعه منتخب مقداردهی می‌شود. در این حالت احتمال کسب مقداری در همسایگی هر یک از مقادیر متناظر در مجموعه منتخب نیز براساس پارامتر PAR^{MP} وجود دارد. برای این منظور عدد تصادفی جدیدی در محدوده صفر تا یک تولید و با مقدار PAR^{MP} مقایسه می‌شود. اگر عدد تصادفی جدید از مقدار PAR^{MP} کوچکتر باشد مقدار متغیر مربوطه بدون هیچ تغییری از مقادیر متناظر در مجموعه منتخب مقداردهی می‌شود. اما در غیر این صورت متغیر مربوطه براساس پارامتر بازه همسایگی از اطراف مقادیر متناظر در مجموعه منتخب مقداردهی خواهد شد. مقادیر $HCMR^{MP}$ و PAR^{MP} در ابتدای فرآیند بهینه‌یابی توسط کاربر مقداردهی می‌شود. با بررسی‌های انجام شده توصیه می‌شود که مقدار پارامتر $HCMR^{MP}$ کوچکتر از مقدار پارامتر مشابه در روش HS ($HCMR$) [۴۸-۴۹] مقداردهی شود. بنابراین انتخاب مقداری در محدوده ۰/۱ تا ۰/۵ مناسب است. لازم به ذکر است که با بررسی‌های انجام شده، مشخص گردید که احتمال خروج متغیر طراحی از محدوده مجاز برای روش MP در ابتدای فرآیند بهینه‌یابی بیشتر بوده و این احتمال به صورت نزولی در انتهای فرآیند کاهش می‌یابد. از سوی دیگر بررسی‌های انجام شده، نشان می‌دهد که در حالت کلی برای

الگوریتم MP احتمال خروج مقدار متغیر طراحی از محدوده مجاز به نسبت سایر الگوریتم‌های فراابتکاری، کمتر است.

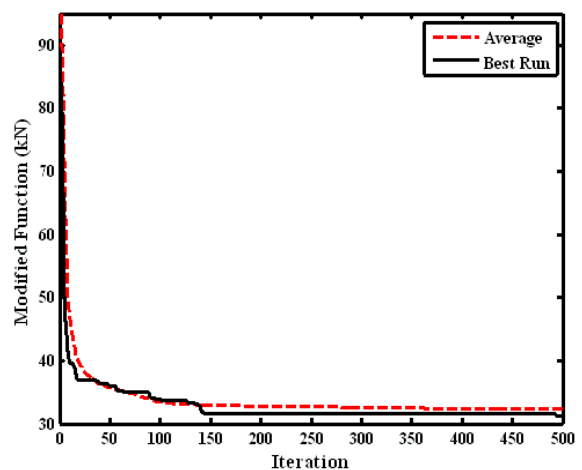
کارآیی الگوریتم MP براساس بخش آتی، طی مثال‌های بهینه‌یابی سطح مقطع سازه‌های اسکلتی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۳-۶-۲ بررسی کارآیی و عملکرد الگوریتم پیشنهادی نقاط متحرک

برای بررسی کارآیی الگوریتم MP از مثال‌های بهینه‌یابی سازه‌های اسکلتی با فضاهای طراحی متفاوت، استفاده شده است. بدین منظور قاب هشت طبقه - یک دهانه بشرح بخش الف-۴، برج فولادی ۷۲ میله‌ای بشرح مفروضات بخش الف-۸ و خرابای مستوی ۵۲ میله‌ای بشرح بخش الف-۱۷ از پیوست الف و قاب پنج طبقه - دو دهانه بشرح بخش ۳-۶-۲-۱ از فصل حاضر انتخاب شده‌اند. در هر مثال برای اجتناب از تأثیر پارامترهای تصادفی و بیان کارآیی الگوریتم، ۵۰ اجرای فرآیند بهینه‌یابی بصورت مستقل انجام شده است. سپس سیر همگرایی میانگین برای ۵۰ اجرا رسم و با بهترین سیر همگرایی در بین ۵۰ اجرا مقایسه شده است. اشکال (۳-۶۵) تا (۳-۶۸) نمودار سیر همگرایی بهترین اجرا و میانگین اجراهای متوالی را برای هر مثال نشان می‌دهد.

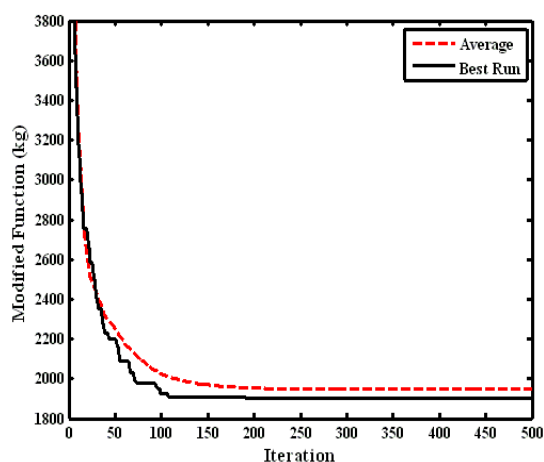


شکل (۳-۶۶) - سیر فرآیند بهینه‌یابی
قاب پنج طبقه - دو دهانه

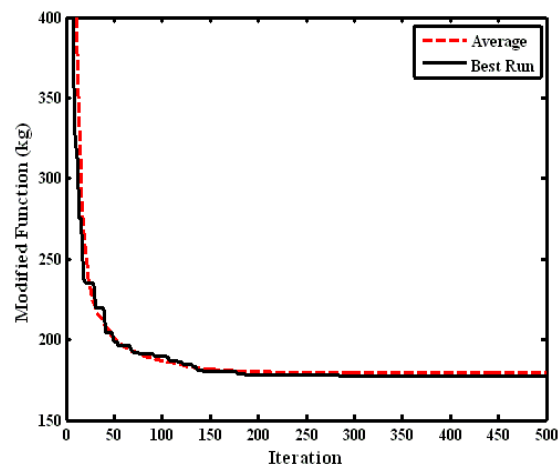


شکل (۳-۶۵) - سیر فرآیند بهینه‌یابی
قاب هشت طبقه - یک دهانه

همان‌طور مشاهده می‌شود، نتایج بشرح نمودارهای اشکال (۳-۶۵) تا (۳-۶۸) حاکی از انطباق تقریبی نمودار سیر همگرایی میانگین و بهترین اجرا دارد. این مهم دلالت بر ثبات و پایداری الگوریتم در اجراهای مختلف داشته و بیانگر آن است که روند بهینه‌یابی سیری تصادفی ندارد و الگوریتم پیشنهادی MP به صورت هوشمند فضای طراحی را جستجو می‌نماید. بدین ترتیب می‌توان به اجرای یک بار الگوریتم برای دستیابی به طرحی مناسب در فرآیند طراحی بهینه‌سازها اعتماد نمود.



شکل (۳-۶۸) - سیر فرآیند بهینه‌یابی
خرپای ۵۲ میله‌ای



شکل (۳-۶۷) - سیر فرآیند بهینه‌یابی
برج فولادی ۷۲ میله‌ای

از دیگر تمهیدات برای بررسی کارایی الگوریتم MP، مقایسه میانگین مقادیر طرح بهینه در ۵۰ اجرای متوالی با مقدار بهترین نتیجه برای طرح بهینه حاصل از روش MP است. بررسی‌های انجام شده بیانگر نزدیکی این دو مقدار با یکدیگر می‌باشد. این مقایسه نیز بیانگر ثبات و پایداری در شیوه بهینه‌یابی و یافتن طرح بهینه مناسب براساس الگوریتم MP است. از سوی دیگر این مهم بیانگر عدم تصادفی بودن الگوریتم MP در نیل به نقطه بهینه می‌باشد. به بیان دیگر می‌توان به یک بار اجرای الگوریتم پیشنهادی MP جهت کسب جواب قابل قبول اعتماد نمود. این مهم در مسائل طراحی بهینه‌سازها، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نتایج طرح بهینه براساس روش MP برای سازه‌های مذکور در بخش‌های مربوط به هر مثال، در قیاس با دیگر مراجع به همراه میانگین ۵۰ اجرای متوالی قابل مشاهده

است. همان طور که مشاهده می‌شود، درصد اختلاف مقدار میانگین و بهترین طرح برای مثال‌های مذکور، اندک می‌باشد.

۳-۶-۲-۱ بهینه‌یابی قاب فولادی پنج طبقه - دو دهانه براساس روش MP

در این مثال به بهینه‌یابی سطح مقطع قاب پنج طبقه - دو دهانه بشرح شکل (۳-۶۳) براساس روش پیشنهادی MP پرداخته شده است. فرضیات طراحی و مفروضات مسئله بهینه‌یابی بشرح بخش ۳-۵-۱ فرض می‌شود.

نتایج حاصل برای طرح بهینه قاب مذکور براساس روش پیشنهادی بشرح جدول (۳-۱۴) در قیاس با دیگر مراجع قابل مشاهده است.

جدول (۳-۱۴) نتایج طرح بهینه قاب پنج طبقه - دودهانه براساس روش نوین نقاط متحرک (MP)

شماره گروه	مرجع [۷۳]	مرجع [۷۴]	روش پیشنهادی
	RDQA	DLM	MP
۱ - cm^2	۸۰/۰۴	۸۰/۰۴	۸۰/۰۴
۲ - cm^2	۸۰/۰۴	۶۹/۸۱	۶۹/۸۱
۳ - cm^2	۶۹/۸۱	۶۹/۸۱	۶۹/۸۱
۴ - cm^2	۶۹/۸۱	۶۳/۶۷	۶۹/۸۱
۵ - cm^2	۶۹/۸۱	۶۳/۶۷	۵۱/۳۸
۶ - cm^2	۸۰/۰۴	۹۷	۸۰/۰۴
۷ - cm^2	۸۰/۰۴	۶۹/۸۱	۹۷
۸ - cm^2	۸۰/۰۴	۸۰/۰۴	۸۰/۰۴
۹ - cm^2	۶۹/۸۱	۶۹/۸۱	۶۹/۸۱
۱۰ - cm^2	۸۰/۰۴	۸۰/۰۴	۸۰/۰۴
۱۱ - cm^2	۶۹/۸۱	۶۹/۸۱	۵۷/۶۶
۱۲ - cm^2	۶۹/۸۱	۸۰/۰۴	۸۰/۰۴
۱۳ - cm^2	۶۹/۸۱	۵۷/۶۶	۵۷/۶۶
۱۴ - cm^2	۶۹/۸۱	۸۰/۰۴	۸۰/۰۴
۱۵ - cm^2	۶۹/۸۱	۶۳/۶۷	۶۹/۸۱
وزن - kN	۷۴/۶۰	۷۳/۲۷	۷۲/۵۹۶
میانگین	--	--	۷۲/۷۰۱

فصل چهارم

نتایج و

پیشنهادات

۴-۱ مقدمه

در این فصل به بیان خلاصه‌ای از نتایج و دستاوردهای حاصل از این رساله پرداخته شده است. همچنین با ارائه پیشنهاداتی در زمینه تحقیقات و فعالیت‌های حاضر، راه‌های آتی برای ادامه پژوهش مطرح شده است. هدف از این رساله بهینه‌یابی سازه‌ها با استفاده از روش‌های فراابتکاری ترکیباتی بوده و در این راستا به توسعه، گسترش و بهبود عملکرد روش‌های فراابتکاری پرداخته شده است. بدین ترتیب براساس پنج محور پژوهشی و گام‌های تحقیقاتی مبتنی بر فصل سوم دستاوردهای کلی بشرح زیر حاصل می‌شود.

در اولین گام تحقیقاتی، محور پژوهش براساس بررسی برخی از رایج‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری و شناسایی جزئیات و قابلیت‌های روش‌های مختلف پی‌ریزی گردید. در این راستا پیشنهادات مختلفی در جهت بهبود عملکرد هر یک از روش‌های موردنظر ارائه و کارآیی این پیشنهادات در حوزه طراحی بهینه سازه‌ها، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل برای هر روش از الگوریتم‌های موردنظر، دستاوردهای ارزشمندی جهت استفاده صحیح و آگاهانه نسبت به برخی از پارامترها را ارائه داد.

در گام دوم تحقیقاتی این رساله، محور پژوهش در راستای ارائه روش نوین جستجوی چندمنظوره در جهت کاهش تأثیر پارامترها و روابط حاکم بر الگوریتم‌های فراابتکاری بنا گردید. بدین منظور کارآیی ایده پیشنهادی جستجوی جزیره‌ای در قالب مثال‌های معتبر بهینه‌یابی سازه‌ها در

زمینه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از عملکرد مناسب روش MSM در کسب اهداف مورد نظر داشت. در این گام روش کاوش چندفرآینتکاری (MHSM) نیز با الهام از شیوه جزیره‌ای روش MSM پیشنهاد گردید. در این روش با استفاده از شیوه توزیع جزیره‌ای، جواب‌ها از تنوع مناسبی برخوردار بوده و فضای طراحی با وسعت بیشتری توسط الگوریتم‌های مختلف فرآینتکاری هر جزیره، کاوش می‌شود. بدین ترتیب مسئله بهینه‌یابی بطور همزمان با چندین روش فرآینتکاری ارزیابی و تمامی مزایای الگوریتم‌های فرآینتکاری مورد استفاده قرار گرفته است. از سوی دیگر روش MHSM به سبب استقلال نسبی در اختصاص مقادیر مشخص به پارامترها و روابط حاکم، از اجزای متوالی مبری بوده و با آهنگی ثابت و مطمئن به سمت بهینه سراسری حرکت و احتمال گرفتاری در بهینه محلی کاهش می‌یابد. این روش به عنوان یکی از دقیق‌ترین روش‌های پیشنهادی برای کسب جواب مطلوب در علوم مختلف و حوزه‌های حساس بهینه‌یابی که کسب جواب از اهمیت بالایی برخوردار است، پیشنهاد و توصیه می‌شود.

در گام سوم تحقیقاتی، محور پژوهش با الهام از شیوه انفصال در روش اجزای محدود و تقسیم‌بندی فضای طراحی، منتهی به افزایش عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌یابی شد. بر اساس این ایده، فرآیند بهینه‌یابی در دو مرحله جستجوی سراسری و محلی با فضاهای طراحی مختلف انجام و بدین ترتیب افزایش سرعت همگرایی حاصل گردید. دلیل این امر کاهش ابعاد فضای طراحی در مراحل جستجوی سراسری و محلی نسبت به حالت متعارف می‌باشد. در این راستا محدوده مناسب برای هر متغیر طراحی در مرحله جستجوی سراسری حاصل و در ادامه براساس جستجوی محلی مقدار متغیر طراحی مربوطه در محدوده حاصل از مرحله پیشین (مرحله جستجوی سراسری) یافت می‌شود. بنابراین مسئله بهینه‌یابی براساس ایده پیشنهادی با ایجاد توازنی منطقی در دو مرحله جستجوی سراسری و محلی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. ایده پیشنهادی براساس روند طراحی بهینه سازه‌ها در برخی از الگوریتم‌های فرآینتکاری مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج حاکی از عملکرد مناسب این ایده در

بهبود هر یک از الگوریتم‌های انتخابی داشت. بدین ترتیب ایده پیشنهادی می‌تواند برای بهبود عملکرد اکثر روش‌های بهینه‌یابی که وابسته به ابعاد فضای طراحی می‌باشند، مورد استفاده قرار گیرد.

در گام چهارم تحقیقات، محور پژوهش در راستای توسعه روش‌های ترکیباتی جهت استفاده از محاسن چند الگوریتم، منجر به ارائه روش نوین و ترکیباتی HACOHSGA شد. این روش فضای کاوش را با استفاده از قابلیت‌های الگوریتم کلونی مورچگان، روش جستجوی هارمونی و الگوریتم GA به صورت ترکیبی و در قالب یک روش، مورد جستجو قرار می‌دهد. در این راستا روش‌های مختلف فرآیند انتخاب در GA مورد ارزیابی و نتایج حاکی از عملکرد مناسب روش مسابقه‌ای نسبت به دیگر روش‌های فرآیند انتخاب داشت. نتایج بررسی‌های انجام شده، دلالت بر کارایی مناسب روش پیشنهادی دارد. بر این اساس در روش پیشنهادی از خصوصیات و محاسن الگوریتم‌های پایه مذکور استفاده و معایب هر یک به طور مؤثری کمرنگ شده است. از ویژگی‌های اساسی روش پیشنهادی HACOHSGA، سرعت مناسب فرآیند بهینه‌یابی در رسیدن به محدوده جواب بهینه است. لذا در مسائلی که عامل سرعت مهم است، استفاده از این روش جهت فرآیند بهینه‌یابی توصیه می‌شود.

در آخرین گام از پژوهش‌های انجام شده، محور تحقیقات بر پایه ارائه روش نوین نقاط متحرک پی‌ریزی شده است. این روش با اتخاذ ویژگی‌های مرسوم روش‌های بهینه‌یابی و کسب تجربیات لازم شکل گرفته است. براین اساس مشابه روش‌های CSS و PSO فضای طراحی به فضای برداری نگاشت و با استفاده از فرآیند تکاملی مبتنی بر ویژگی‌های هر جمعیت، به سوی کسب جواب‌های شایسته و مناسب گام برداشته می‌شود. ویژگی اساسی روش پیشنهادی نقاط متحرک، ثبات و پایداری در کسب جواب بهینه به ازای اجراهای متوالی در محدوده زمانی مناسب می‌باشد. این مسئله برای فرآیند طراحی بهینه سازه‌ها، امری مهم و قابل توجه بوده و بنابراین می‌توان از این الگوریتم جهت طراحی بهینه سازه‌های مهندسی عمران استفاده نمود.

۲-۴ نتایج

نتایج حاصل از این رساله براساس راهکارهای پیشنهادی به طور خلاصه بشرح زیر قابل بیان است.

- ۱- بکارگیری مقادیر و شیوه‌های مناسب استفاده صحیح از پارامترهای روش‌های فراابتکاری و نیز بکارگیری ایده انفصال فضای طراحی، جهت بهبود عملکرد و کارآیی الگوریتم‌های منتخب.
- ۲- استفاده از ساختار جزیره‌ای براساس روش‌های MSM و MHSM در جهت کاهش تأثیر پارامترهای الگوریتم‌های فراابتکاری و نیز افزایش دقت در جستجوی فضای کاوش.
- ۳- استفاده از روش ترکیباتی HACOHSGA در جهت افزایش سرعت عملیات بهینه‌یابی در رسیدن به محدوده طرح بهینه.
- ۴- استفاده از روش MP با توجه به ویژگی ثبات و پایداری در اجراهای متوالی در فرآیند طراحی بهینه سازه‌های مختلف.

۳-۴ پیشنهادات برای ادامه پژوهش

- در راستای توسعه و بهبود عملکرد روش‌های بهینه‌یابی، موضوعات زیر جهت ادامه تحقیقات حاضر پیشنهاد می‌شود.
- ۱- بکارگیری روش‌های پیشنهادی جهت بهینه‌یابی سازه‌هایی با محیط‌های پیوسته.
 - ۲- گسترش روش‌های پیشنهادی در فرآیند بهینه‌یابی علوم مختلف و حوزه‌های پژوهشی دیگر همچون مهندسی برق، مهندسی کنترل، مهندسی صنایع، علوم مدیریتی و ...
 - ۳- استفاده از مفاهیم زیست محیطی و قوانین حاکم بر طبیعت و موجودات زنده جهت ارائه الگوریتم‌های نوین.
 - ۴- استفاده از روش‌های کارآمد تحلیلی جهت افزایش سرعت عملیات بهینه‌یابی.

منابع

لیست مراجع

- [1] Haftka R. T. and Gurdal Z., (1992), "*Elements of structural optimization*", 3rd edition, Kluwer academic publishers, Boston, MA.
- [2] Dantzig G. B., (1940), "On the non-existence of tests approach the normal distribution function", *Annals. Math. Stat.*, **11, June**, pp 186-192.
- [3] Dantzig G. B., (1963), R-366-PR, "Linear programming and extensions", A report prepared for United States Air Force Project Rand.
- [4] Dantzig G. B. and Thapa M. N., (1997), "*Linear programming 1: introduction*", Springer-Verlag, New York, LLC.
- [5] Rao S. S., (2009), "*Engineering optimization theory and practice*", 4th edition, John Wiley & Sons, New Jersey.
- [6] Bazaraa M. S., Sherali H. D. and Shetty C. M., (2006), "*Nonlinear programming theory and algorithms*", 3rd edition, John Wiley and Sons, New Jersey.
- [7] Gendreau M. and Potvin J. Y., (2010), "*Handbook of metaheuristics*", 2th edition, Springer Science + Business Media, New York, LLC.
- [8] Dréo J., Siarry P., Petrowski A. and Taollard E., (2006), "*Metaheuristic for hard optimization*", Springer-Verlag, Berlin.
- [9] Yang X. S., (2008), "*Nature inspired metaheuristic algorithm*", 2nd edition, Luniver Press, UK.
- [10] Blum C. and Roli A., (2003), "Metaheuristic in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison", *ACM. Comput. Surv.*, **35, 3**, pp 268-308.
- [11] Fogel L. J., Qwens A. J. and Walsh M. J., (1966), "*Artificial intelligence trough simulated evolution*", John Wiley & Sons, Chichester.
- [12] Holland J. H., (1975), PhD. thesis, "Adaptation in natural and artificial system", The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.

- [13] Goldberg D. E., (1989), “*Genetic algorithm in search optimization and machine learning*”, Addison-Wesley Longman Publishing Co, Boston, MA.
- [14] Metropolis N., Rosenbluth A. W., Rosenbluth M. N. and Teller A. H., (1953), “Equation of State calculations by fast computing machines”, *J. Chem. Phys.*, **21**, **6**, pp 1087-1092.
- [15] Kirkpatrick S., Gelatt C. D. and Vecchi M. P., (1983), “Optimization by simulated annealing”, *Science*, **220**, **4598**, pp 671-680.
- [16] Glover F., (1986), “Future paths for integer programming and links to artificial intelligence”, *Comput. Operations Res.*, **13**, **5**, pp 533-549.
- [17] Colormi A., Dorigo M. and Maniezzo V., (1991), “Distributed optimization by ant colony”, Proc. First European Conf. Artificial Life., pp 134-142, Paris, France.
- [18] Kennedy J. and Eberhart R., (1995), “Particle swarm optimization”, Proc. IEEE, Int. Conf. Neural Networks., pp 1942-1948.
- [19] Geem Z. W., Kim J. H. and Loganathm G. V., (2001), “A new heuristic optimization algorithm: Harmony Search”, *Simulation*, **76**, **2**, pp 60-68.
- [20] Erol O. K. and Eksin I., (2006), “A new optimization method: Big Bang-Big Crunch”, *Adv. Eng. Software.*, **37**, **2**, pp 106-111.
- [21] Rashedi E., Nezamabadipour H. and Saryazdi S., (2009), “GSA: a gravitational search algorithm”, *Inform. Sci.*, **179**, **13**, pp 2232-2248.
- [22] Kaveh A. and Talatahari S., (2010), “A novel heuristic optimization method charged system search”, *Acta. Mech.*, **213**, (3-4), pp 267-289.
- [23] Kaveh A. and Khayatazad M., (2012), “A new meta-heuristic method: Ray Optimization”, *Comput. Struct.*, **112-113**, **December**, pp 283-294.
- [24] Goldberg D. E. and Samtani M. P., (1986), “Engineering optimization via genetic algorithm”, Proc. 9th Conf. Electronic Computation, pp 471-482.
- [25] Jenkins W. M., (1991), “Towards structural optimization via the genetic algorithm”, *Comput. Struct.*, **40**, **5**, pp 1321-1327.
- [26] Rajeev S. and Krishnamoorthy C. S., (1992), “Discrete optimization of structures using genetic algorithms”, *J. Struct. Eng.*, **118**, **5**, pp 1233-1250.
- [27] Lin C. Y. and Hajela P., (1992), “Genetic algorithms in optimization problems with discrete and integer design variables”, *Eng. Optim.*, **19**, **4**, pp 309-327.
- [28] Grierson D. E. and Pak W. H., (1993), “Optimal sizing, geometrical and topological design using a genetic algorithm”, *Struct. Multidisc. Optim.*, **6**, **3**, pp 151-59.

- [29] Kaveh A. and Kalatjari V., (2004), "Size/Geometry optimization of trusses by the force method and genetic algorithm", *Z. Angew. Math. Mech*, **84**, **5**, pp 347-357.
- [30] Toğan V. and Daloğlu T. A., (2008), "An improved genetic algorithm with initial population strategy and self-adaptive member grouping", *Comput. Struct.*, **86**, (11-12), pp 1204-1218.
- [31] Dede T., Bekiroğlu S. and Ayvaz Y., (2010), "Weight minimization of trusses with genetic algorithm", *Appl. Soft. Comput.*, **11**, **2**, pp 2565-2575.
- [32] Safari D., Maheri M. R. and Maheri A., (2013), "On the performance of a modified multiple-deme genetic algorithm in LRFD design on steel frames", *IJST. Transaction of Civil: Engineering*, **37**, **2**, pp 169-190.
- [33] Sivanandam S. N. and Deepa S. N., (2008), "Introduction to genetic algorithms", Springer-Berlin Heidelberg, New York.
- [34] Haupt R. L. and Haupt E., (2004), "Practical genetic algorithm", 2nd Edition, John Wiley and Sons, New York.
- [35] Hasançebi O., Carbaş S., Doğan E., Erdal F. and Saka M. P., (2009), "Performance evaluation of metaheuristic search techniques in the optimum design of real size pin jointed structures", *Comput. Struct.*, **87**, (5-6), pp 284-302.
- [36] Hasançebi O. and Erbatur F., (2002), "On efficient use of simulated annealing in complex structural optimization problems", *Acta. Mech.*, **157**, (1-4), pp 27-50.
- [37] Kargahi M., Anderson J. and Dessouky M., (2006), "Structural weight optimization of frames using tabu search. I: optimization procedure", *J. Struct. Eng.*, **132**, **12**, pp 1858-1868.
- [38] Bland J. A., (1995), "Discrete-variable optimal structural design using tabu search", *Struct. Multidisc. Optim.*, **10**, **2**, pp 87-93.
- [39] Glover F., (1989), "Tabu search-part I", *ORSA J. Comput.*, **1**, **3**, pp 190-206.
- [40] Dorigo M., (1992), PhD. thesis, "Optimization learning and natural algorithms", Dipartimento Elettronica e informazione, Politecnico di Milano, Italy.
- [41] Cordón O., Herrera F. and Stützle T., (2002), "A review on ant colony optimization metaheuristic: basic, models and new trends", *Mathware. Soft. Comput.*, **9**, **3**, pp 1-35.
- [42] Camp C. V. and Bichon B. J., (2004), "Design of space trusses using ant colony optimization", *J. Struct. Eng.*, **130**, **5**, pp 741-751.
- [43] Camp C. V., Bichon B. J. and Stovall S. P., (2005), "Design of steel frames using ant colony optimization", *J. Struct. Eng.*, **131**, **3**, pp 369-379.

- [44] Capriles P. V. S. Z., Fonseca L. G., Barbosa H. J. C. and Lemonge A. C. C., (2007), "Rank-based ant colony algorithms for truss weight minimization with discrete variables", *Commun. Numer. Meth. Engng.*, **23**, **6**, pp 553-575.
- [45] Li L. J., Huang Z. B. and Liu F., (2009), "A heuristic particle swarm optimization method for truss structures with discrete variables", *Comput. Struct.*, **87**, **(7-8)**, pp 435-443.
- [46] Mahdavi M., Fasanghary M. and Damangir E., (2007), "An improved harmony search algorithm for solving optimization problems", *Appl. Math. Comput.*, **188**, **2**, pp 1567-1579.
- [47] Degertekin S. O., (2012), "Improved harmony search algorithms for sizing optimization of truss structures", *Comput. Struct.*, **92-93**, **(February)**, pp 229-241.
- [48] Lee K. S. and Geem Z. W., (2005), "A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: Harmony Search theory and practice", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, **194**, **(36-38)**, pp 3902-3933.
- [49] Lee K. S. and Geem Z. W., (2004), "A new structural optimization method based on the harmony search", *Comput. Struct.*, **82**, **(9-10)**, pp 781-798.
- [50] Lee K. S., Geem Z. W., Lee S. H. and Bae K. W., (2005), "The harmony search heuristic algorithm for discrete structural optimization", *Eng. Optim.*, **37**, **7**, pp 663-684.
- [51] Kaveh A. and Talatahari S., (2010), "A charged system search with a fly to boundary method for discrete optimum design of truss structures", *Asian j. Civil. Engg (Building and Housing)*, **11**, **3**, pp 277-293.
- [52] Kaveh A. and Talatahari S., (2011), "Optimization of large-scale truss structures using modified charge system search", *Int. J. Optim. Civil. Eng.*, **1**, **1**, pp 15-28.
- [53] Kaveh A. and Talatahari S., (2010), "Optimal design of skeletal structures via the charged system search algorithm", *Struct. Multidisc. Optim.*, **41**, **6**, pp 893-911.
- [54] Kaveh A. and Talatahari S., (2009), "A particle swarm ant colony optimization for truss structures with discrete variables", *J. Constr. Steel. Res.*, **65**, **(8-9)**, pp 1558-1568.
- [55] Kaveh A. and Talatahari S., (2008), "A discrete particle swarm ant colony optimization for design of steel frames", *Asian j. Civil. Engg (Building and Housing)*, **9**, **6**, pp 563-575.
- [56] Kaveh A. and Talatahari S., (2009), "Particle swarm optimizer, ant colony strategy and harmony search scheme hybridized for optimization of truss structures", *Comput. Struct.*, **87**, **(5-6)**, pp 267-283.

[57] Kaveh A. and Malakoutirad S., (2010), "Hybrid genetic algorithm and particle swarm optimization for the force method-based simultaneous analysis and design", *IJST. Transaction of Civil: Engineering*, **34**, **1**, pp 15-34.

[58] Yang J. and Soh C. K., (1997), "Structural optimization by genetic algorithms with tournament selection", *J. Comput. Civ. Eng.*, **11**, **3**, pp 195-200.

[59] Kaveh A. and Kalatjari V. R., (2002), "Genetic algorithm for discrete-sizing optimal design of trusses using the force method", *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, **55**, **1**, pp 55-72.

[60] Issa H. K. and Mohammad F. A., (2010), "Effect of mutation schemes on convergence to optimum design of steel frames", *J. Constr. Steel. Res*, **66**, **7**, pp 954-61.

[61] Ostfeld A., (2011), "*Ant colony optimization - methods and applications*", In Tech, Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia.

[62] Tanimura Y., Hiroyasu T. and Miki M., (2001), "Discussion on distributed genetic algorithms for designing truss structures", Proc. 5th Int. Conf. Exhibi. Perf. Computing. Asia-Pacific Reg Queensland, Australia.

[۶۳] نوریان، ا.، کلات جاری و.ر.، طالب پور م.ح.، (۱۳۹۱)، "بهینه‌یابی قاب‌های شیب‌دار غیرمنشوری با استفاده از روش اصلاحی جستجوی چندمنظوره"، نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران.

[۶۴] عسکری، ا.، (۱۳۹۱)، پایان‌نامه ارشد: "بهینه‌یابی قاب‌های شیب‌دار صنعتی توسط پیش‌تنیدگی با استفاده از GA"، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شاهرود.

[۶۵] حق‌پرست، ص.، (۱۳۸۸)، پایان‌نامه ارشد: "بهینه‌یابی هندسه و سطح مقطع سازه‌های فضاکار با استفاده از الگوریتم ژنتیک"، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شاهرود.

[۶۶] کلات جاری و.ر.، طالب پور م.ح.، (۱۳۸۸)، "آموزش کاهش تأثیر پارامترهای الگوریتم ژنتیک در بهینه‌یابی سطح مقطع و توپولوژی سازه‌های خرپایی توسط روش جستجوی چندمنظوره"، نشریه علمی و پژوهشی فناوری آموزش، سال چهارم، جلد ۴، شماره ۱، ص ۵۷-۷۲.

[۶۷] دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، (۱۳۸۳)، "مقررات ملی ساختمان، مبحث ششم، بارهای وارد بر ساختمان"، چاپ پنجم، نشر توسعه ایران.

[۶۸] حسین زاده، ر.، (۱۳۸۰)، پایان‌نامه ارشد: "طرح بهینه قاب‌های شیب‌دار فولادی"، دانشکده عمران، دانشگاه تربیت مدرس.

[۶۹] عابدی، ص.، (۱۳۹۱)، پایان‌نامه ارشد: "مقایسه عملکرد روش‌های نوین بهینه‌سازی سازه‌ها (روش جزیره‌ای GA، روش ACO، روش CSS)"، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شاهرود.

[70] Wu S. J. and Chow P. T., (1995), "Integrated discrete and configuration optimization of trusses using genetic algorithms", *Comput. Struct.*, **55**, **4**, pp 695-702.

[71] Tang W., Tong L. and GU Y., (2005), "Improved genetic algorithm for design optimization of truss structures with sizing, shape and topology variables", *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, **62**, **13**, pp 1737-1762.

[72] Rahami H., Kaveh A. and Gholipour Y., (2008), "Sizing, geometry and topology optimization of trusses via force method and genetic algorithm", *Eng. Struct.*, **30**, **9**, pp 2360-2369.

[73] Chai S. and Sun H. C., (1996), "A relative difference quotient algorithm for discrete optimization", *Struct. Multidisc. Optim.*, **12**, **1**, pp 46-56.

[74] Juang D. S. and Chang W. T., (2006), "A revised discrete lagrangian-based search algorithm for the optimal design of skeletal structures using available section", *Struct. Multidisc. Optim.*, **31**, **3**, pp 201-210.

[75] Rajan S. D., (1995), "Sizing, Shape, and Topology Optimization of Trusses Genetic Algorithms", *J. Struct. Eng.*, **121**, **10**, pp 1480-1487.

[76] Kaveh A. and Kalatjari V. R., (2003), "Topology Optimization of trusses using genetic algorithm, force method and graph theory", *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, **58**, **5**, pp 771-791.

[77] Kaveh A. and Shahrouzi M., (2006), "Simultaneous topology and size optimization of structures by genetic algorithm using minimal length chromosome", *Eng. Computations. Int. J. Comput.-Aided. Eng. Soft.*, **23**, **6**, pp 644-674.

[78] Nanakorn P. and Meesomklin K., (2001), "An adaptive Penalty function in genetic algorithms for structural design optimization", *Comput. Struct.*, **79**, (29-30), pp 2527-39.

[79] Chai S., Shi L. S. and Sun H. C., (1999), "An application of relative difference quotient algorithm to topology optimization of truss structures with discrete variables", *Struct. Multidisc. Optim.*, **18**, **1**, pp 48-55.

- [80] AISC., (1994), “*Manual of steel construction - load & resistance factor design*”, 2th edition, American Institute of Steel Construction, Inc.
- [81] Khot N. S., Venkayya V. B. and Berke L., (1976), “Optimum structural design with stability constraints”, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, **10**, **5**, pp 1097-1114.
- [82] Camp C. V., Pezeshk S. and Cao G., (1998), “Optimized design of two dimensional structures using a genetic algorithm”, *J. Struct. Eng.*, **124**, **5**, pp 551-559.
- [83] Kaveh A. and Shojaei S. (2007), “Optimal design of skeletal structures using ant colony optimization”, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, **70**, **5**, pp 563-581.
- [84] Kaveh A. and Talatahari S., (2010), “An improved ant colony optimization for the design of planar steel design frames”, *Eng. Struct.*, **32**, **3**, pp 864-873.
- [85] Wu S. J. and Chow P. T., (1995), “Steady-state genetic algorithm for discrete optimization of trusses”, *Comput. Struct.*, **56**, **6**, pp 979-991.
- [86] Kaveh A. and Talatahari S., (2010), “Optimum design of skeletal structures using imperialist competitive algorithm”, *Comput. Struct.*, **88**, **(21-22)**, pp 1220-1229.
- [87] Kaveh A. and Bakhshpoori T., (2013), “Optimum design of space trusses using cuckoo search algorithm with levy flights”, *IJST. Transaction of Civil: Engineering*, **37**, **1**, pp 1-15.
- [88] Coello C. A. and Christiansen A. D., (2000), “Multiobjective optimization of trusses using genetic algorithms”, *Comput. Struct.*, **75**, **6**, pp 647-660.
- [89] AISC., (1989), “*Manual of steel construction - allowable stress design*”, 9th edition, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- [90] Erbatur F., Hasançebi O., Tütüncü İ. and Kılıç H., (2000), “Optimal design of planar and space structures with genetic algorithms”, *Comput. Struct.*, **75**, **2**, pp 209-224.
- [91] Toğan V. and Daloglu T. A., (2006), “Optimization of 3D trusses with adaptive approach in genetic algorithms”, *Eng. Struct.*, **28**, **7**, pp 1019-1027.
- [92] Groenwold A. A. and Stander N., (1997), “Optimal discrete sizing of truss structures subject to buckling constraints”, *Struct. Multidisc. Optim.*, **14**, **(2-3)**, pp 71-80.

پیوست الف

مثال‌های

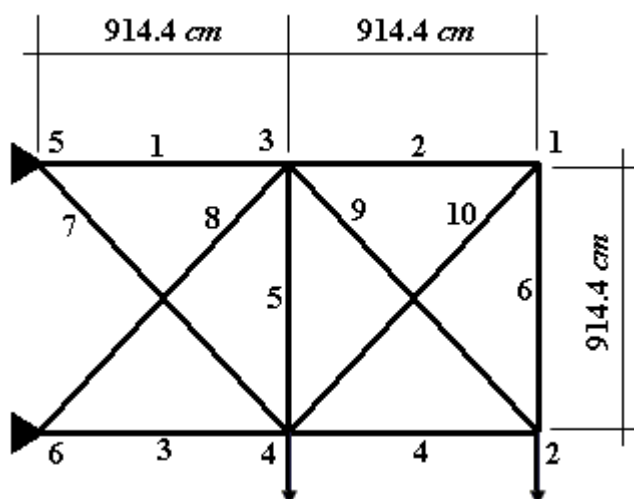
بهینه‌یابی

الف-۱ مقدمه

به منظور اجتناب از بیان مطالب تکراری در روند این رساله، مثال‌های طراحی بهینه سازه‌ها در زمینه‌های مختلف بشرح این فصل در نظر گرفته می‌شود. این مثال‌ها در جهت بررسی توانمندی راهکارهای پیشنهادی می‌باشد. در هر مثال مفروضات لازم برای فرآیند بهینه‌یابی قابل مشاهده است.

الف-۲ بهینه‌یابی سطح مقطع و توپولوژی خرپای مستوی ده میله‌ای

خرپای مستوی ۱۰ میله‌ای بشرح شکل (الف-۱) در نظر گرفته می‌شود. نیرو به گره‌های (۲) و (۴) سازه در راستای عمودی با مقدار $445/4 \text{ kN}$ وارد می‌شود.



شکل (الف-۱) - خرپای مستوی ده میله‌ای

برای کلیه اعضای خرپا E و γ به ترتیب برابر $68/97 \text{ GN/m}^2$ و $27126/4 \text{ N/m}^3$ در نظر گرفته شده است. برای این مثال مجموعه لیست مقاطع در دو حالت با عنوان $\{S_1\}$ و $\{S_2\}$ به شرح زیر تعریف می‌شوند.

جدول (الف-۱) اعضای لیست مقاطع برای بهینه‌یابی سطح مقطع و توپولوژی خرپای ده میله‌ای - $\{S_1\}$

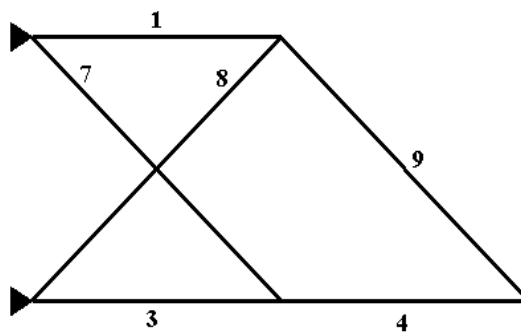
شماره cm^2	شماره cm^2	شماره cm^2	شماره cm^2	شماره cm^2	شماره cm^2	شماره cm^2	شماره cm^2	شماره cm^2	شماره cm^2	شماره cm^2	شماره cm^2				
۱۴۷/۷۴	۲۹	۱۰۳/۲۳	۲۵	۸۷/۱	۲۱	۳۷/۰۳	۱۷	۲۸/۹۷	۱۳	۲۳/۴۲	۹	۱۸/۵۸	۵	۱۰/۴۵	۱
۱۷۰/۹۷	۳۰	۱۲۱/۲۹	۲۶	۸۹/۶۸	۲۲	۴۶/۵۸	۱۸	۳۰/۹۷	۱۴	۲۴/۷۷	۱۰	۱۹/۹۴	۶	۱۱/۶۱	۲
۱۹۳/۵۵	۳۱	۱۲۸/۳۹	۲۷	۹۱/۶۱	۲۳	۵۱/۴۲	۱۹	۳۲/۰۶	۱۵	۲۴/۹۷	۱۱	۲۰/۱۹	۷	۱۵/۳۵	۳
۲۱۶/۱۳	۳۲	۱۴۱/۹۴	۲۸	۱۰۰	۲۴	۷۴/۱۹	۲۰	۳۳/۰۳	۱۶	۲۶/۹۷	۱۲	۲۱/۸۱	۸	۱۶/۹	۴

$$\{S_2\} = \{0.645, 3.226 \times I (I=1, 2, \dots, 76), 256.84, 258.06\}; \text{ cm}^2$$

قیود مسئله با تعریف قید تنش و تغییر مکان گره‌های فعال سازه در راستای محور Y بشرح زیر منظور شده است.

$$\sigma_{all(Ten)} = \sigma_{all(Com)} = \pm 172.4 \text{ MPa} \quad , \quad \delta_{all}^Y = 5.08 \text{ cm}$$

شکل (الف-۲) توپولوژی بهینه خرپای ۱۰ میله‌ای را نشان می‌دهد.



شکل (الف-۲) - توپولوژی بهینه برای خرپای مستوی ده میله‌ای

نتایج عددی برای متغیر طراحی سطح مقطع در جداول (الف-۲) و (الف-۳) برای مجموعه های $\{S_1\}$ و $\{S_2\}$ قابل مشاهده شده است.

جدول (الف-۲) نتایج طرح بهینه سطح مقطع و توپولوژی خرپای ۱۰ میله‌ای به روش MSM-GA به ازای $\{S_1\}$

MSM-GA	مرجع [۷۸]	مرجع [۷۷]	مرجع [۷۶]	مرجع [۷۵]	شماره گروه
۱۹۳/۵۵	۱۹۳/۵۵	۱۹۳/۵۵	۱۹۳/۵۵	۱۹۳/۵۵	$a_1 - cm^2$
--	--	--	--	--	$a_2 - cm^2$
۱۲۸/۳۹	۱۲۸/۳۹	۱۲۸/۳۹	۱۲۸/۳۹	۱۲۸/۳۹	$a_3 - cm^2$
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	$a_4 - cm^2$
--	--	--	--	--	$a_5 - cm^2$
--	--	--	--	--	$a_6 - cm^2$
۴۶/۵۸	۴۶/۵۸	۴۶/۵۸	۴۶/۵۸	۴۶/۵۸	$a_7 - cm^2$
۱۴۱/۹۴	۱۴۱/۹۴	۱۴۱/۹۴	۱۴۱/۹۴	۱۴۱/۹۴	$a_8 - cm^2$
۱۴۱/۹۴	۱۴۱/۹۴	۱۴۱/۹۴	۱۴۱/۹۴	۱۴۱/۹۴	$a_9 - cm^2$
--	--	--	--	--	$a_{10} - cm^2$
۲۲۰۵۸/۰۶	۲۲۰۵۸	۲۲۰۵۸	۲۲۰۵۸	۲۲۰۵۸	وزن - N

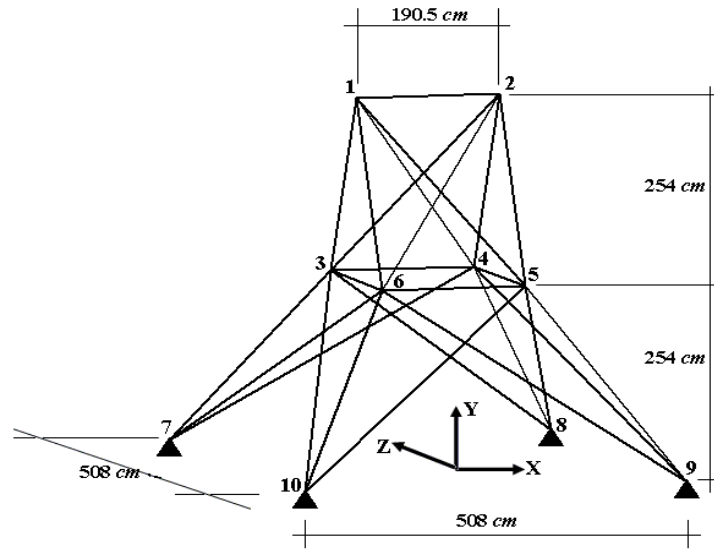
جدول (الف-۳) نتایج طرح بهینه سطح مقطع و توپولوژی خرپای ۱۰ میله‌ای به روش MSM-GA به ازای $\{S_2\}$

MSM-GA-1	MSM-GA-2	مرجع [۷۶]	شماره گروه
۱۸۷/۱	۱۸۷/۱	۱۸۷/۱	$a_1 - cm^2$
--	--	--	$a_2 - cm^2$
۱۵۴/۸۴	۱۵۴/۸۴	۱۵۴/۸۴	$a_3 - cm^2$
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	$a_4 - cm^2$
--	--	--	$a_5 - cm^2$
--	--	--	$a_6 - cm^2$
۳۸/۷۱	۳۸/۷۱	۳۸/۷۱	$a_7 - cm^2$
۱۳۲/۲۶	۱۳۵/۴۸	۱۳۵/۴۸	$a_8 - cm^2$
۱۳۵/۴۸	۱۳۵/۴۸	۱۳۵/۴۸	$a_9 - cm^2$
--	--	--	$a_{10} - cm^2$
۲۱۷۱۱/۹	۲۱۸۲۵	۲۱۸۲۵	وزن - N

الف-۳ بهینه‌یابی سطح مقطع و توپولوژی خرپای فضایی ۲۵ میله‌ای

خرپای فضایی ۲۵ میله‌ای با ۱۰ گره بشرح شکل (الف-۳) برای فرآیند بهینه‌یابی سطح مقطع و

توپولوژی انتخاب شده است.



شکل (الف-۳) - خرپای فضایی ۲۵ میله‌ای

در تمامی اعضای این خرپا E برابر $۶۸/۹۷ \text{ GN/m}^2$ و γ برابر $۲۷۱۲۶/۴ \text{ N/m}^3$ می‌باشد. اعضای خرپای مذکور در هشت گروه بشرح جدول (الف-۴) دسته‌بندی شده‌اند. تنش‌های مجاز کششی و فشاری هر گروه در جدول (الف-۴) نیز قابل مشاهده است. لیست مقاطع موجود به صورت مجموعه $\{S\}$ بشرح زیر تعریف می‌شود.

$$\{S\} = \{0.774, 1.255, 2.142, 3.348, 4.065, 4.632, 6.542, 7.742, 9.032, 10.839, 12.671, 14.581, 21.483, 34.839, 44.516, 52.903, 60.258, 65.226\}; \text{cm}^2$$

جدول (الف-۴) تنش‌های مجاز کششی و فشاری و گروه‌بندی اعضای خرپای ۲۵ میله‌ای - (N/cm^2)

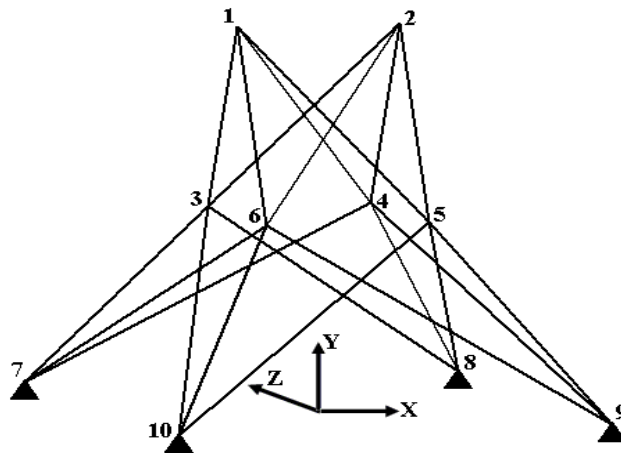
شماره گروه	شماره گره دو انتهای اعضای هر گروه	تنش مجاز فشاری	تنش مجاز کششی
۱	۱-۲	۲۴۲۰۴	۲۷۵۹۰
۲	۱-۴، ۲-۳، ۱-۵، ۲-۶	۷۹۹۴	۲۷۵۹۰
۳	۲-۵، ۲-۴، ۱-۳، ۱-۶	۱۱۹۳۶	۲۷۵۹۰
۴	۳-۶، ۴-۵	۲۴۲۰۴	۲۷۵۹۰
۵	۳-۴، ۵-۶	۲۴۲۰۴	۲۷۵۹۰
۶	۳-۱۰، ۶-۷، ۴-۹، ۵-۸	۴۶۶۲	۲۷۵۹۰
۷	۳-۸، ۴-۷، ۶-۹، ۵-۱۰	۴۶۶۲	۲۷۵۹۰
۸	۳-۷، ۴-۸، ۵-۹، ۶-۱۰	۷۶۶۴	۲۷۵۹۰

تغییر مکان مجاز گره‌های (۱) و (۲) در جهات X و Z برابر $\pm ۰/۸۸۹ \text{ cm}$ فرض شده و بارهای مؤثر بر سازه در دو وضعیت بشرح جدول (الف-۵) منظور می‌شود.

جدول (الف-۵) بارگذاری مؤثر بر خرپای فضایی ۲۵ میله‌ای

وضعیت بارگذاری	شماره گره	نیرو در جهت $kN - X$	نیرو در جهت $kN - Y$	نیرو در جهت $kN - Z$
۱	۱	۴/۴۵	-۲۲/۲۵	۴۴/۵
	۲	--	-۲۲/۲۵	۴۴/۵
	۳	۲/۲۲۵	--	--
	۶	۲/۲۲۵	--	--
۲	۱	--	-۲۲/۲۵	۸۹
	۲	--	-۲۲/۲۵	-۸۹

شکل (الف-۴) توپولوژی بهینه برای خرپای ۲۵ میله‌ای را نشان می‌دهد.



شکل (الف-۴) - توپولوژی بهینه برای خرپای فضایی ۲۵ میله‌ای

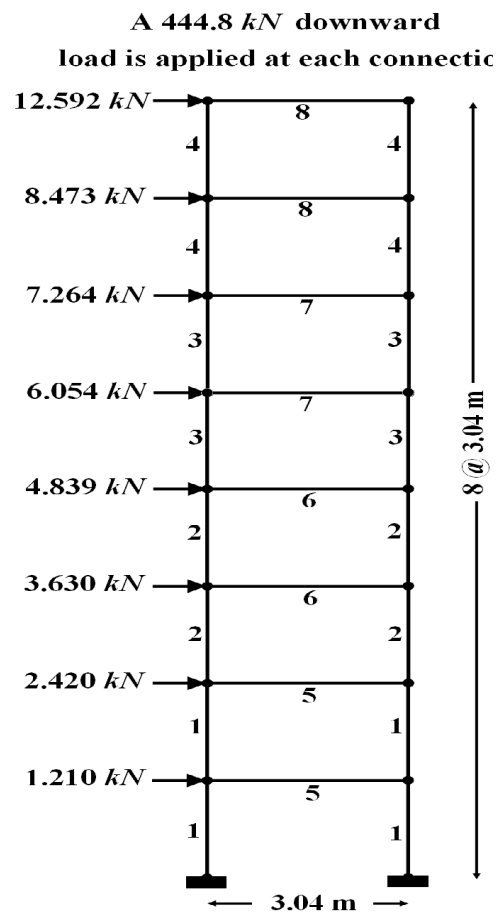
نتایج طرح بهینه در جدول (الف-۶) همراه با نتایج دیگر مراجع ارائه شده است.

جدول (الف-۶) نتایج طرح بهینه سطح مقطع و توپولوژی خرپای ۲۵ میله‌ای براساس روش MSM-GA

شماره گروه	مرجع [۷۹]	مرجع [۷۶]	مرجع [۷۷]	MSM-GA
$a_1 - cm^2$	--	--	--	--
$a_2 - cm^2$	۱۲/۶۷۱	۱۰/۸۳۹	۱۰/۸۳۹	۱۰/۸۳۹
$a_3 - cm^2$	۲۱/۴۸۳	۲۱/۴۸۳	۲۱/۴۸۳	۲۱/۴۸۳
$a_4 - cm^2$	--	--	--	--
$a_5 - cm^2$	--	--	--	--
$a_6 - cm^2$	۳/۳۴۸	۶/۵۴۲	۶/۵۴۲	۶/۵۴۲
$a_7 - cm^2$	۱۲/۶۷۱	۱۲/۶۷۱	۱۲/۶۷۱	۱۲/۶۷۱
$a_8 - cm^2$	۲۱/۴۸۳	۱۴/۵۸۱	۱۴/۵۸۱	۱۴/۵۸۱
وزن - N	۲۷۳۳/۵	۲۵۱۷/۲۴	۲۵۱۷/۲۴	۲۵۱۷/۲۴

الف-۴ بهینه‌یابی سطح مقطع قاب فولادی هشت طبقه - یک دهانه

در این مثال به بررسی قابی با هشت طبقه و یک دهانه بشرح شکل (الف-۵) پرداخته شده است. برای کلیه اعضای قاب E و γ به ترتیب برابر 200 GPa و $76/8 \text{ kN/m}^3$ فرض شده و تنها قید تغییر مکان با مقدار مجاز $5/8 \text{ cm}$ برای گره‌های طبقه آخر در نظر گرفته شده است. بارهای مؤثر بر سازه در یک وضعیت بشرح شکل (الف-۵) در نظر گرفته شده است.



شکل (الف-۵) - قاب هشت طبقه - یک دهانه

اعضای قاب مذکور در هشت گروه بشرح شکل (الف-۵) دسته‌بندی شده که از لیست ۲۶۸ تایی مقاطع

W بشرح جدول (الف-۷) انتخاب می‌شوند [۸۰].

جدول (الف-۷) اعضای لیست مقاطع برای قاب هشت طبقه - یک دهانه

شماره	نام مقطع	$A - cm^2$	$I_x - cm^4$	$S_x - cm^3$	$I_y - cm^4$	$S_y - cm^3$
۱	W 44 x 335	۶۳۴/۱۹۲۳	۱۲۹۴۴۷۹/۷۳۴	۲۳۱۰۵/۷۶	۴۹۹۴۷/۷۷۱	۲۴۵۸/۰۵۹
۲	W 44 x 290	۵۵۳/۵۴۷۳	۱۱۲۷۹۸۷/۱۶۳	۲۰۳۱۹/۹۵۹	۴۳۷۰۴/۲۹۹	۲۱۷۹/۴۷۹
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
۲۶۷	W 5 x 16	۳۰/۱۹۳۴	۸۸۶/۵۷۳	۱۳۹/۴۵۴	۳۱۲/۵۸۹	۴۹/۱۶۱
۲۶۸	W 4 x 13	۲۴/۷۰۹۶	۴۷۰/۳۴۱	۸۹/۴۷۳	۱۶۰/۶۶۵	۳۱/۱۳۵

نتایج طرح بهینه سازه مذکور براساس سایر مراجع در جدول (الف-۸) و برای ایده‌ها و روش‌های پیشنهادی رساله حاضر در جدول (الف-۹) ارائه شده است.

جدول (الف-۸) نتایج طرح بهینه قاب هشت طبقه - یک دهانه براساس روش‌های مراجع مختلف

شماره گروه	مرجع [۸۱]	مرجع [۵۷]	مرجع [۸۲]	مرجع [۸۳]	مرجع [۵۷]	مرجع [۸۴]	مرجع [۵۵]	
	GA	PSO	FEAPGEN	ACO	GA	HGAPSO	IACO	DPSACO
۱	W14 x 34	W21 x 44	W18 x 46	W21 x 50	W21 x 44	W18 x 35	W18 x 40	W18 x 35
۲	W10 x 39	W16 x 26	W16 x 31	W16 x 26	W18 x 35	W18 x 35	W16 x 26	W16 x 31
۳	W10 x 33	W21 x 44	W16 x 26	W16 x 26	W14 x 22	W14 x 22	W16 x 26	W16 x 26
۴	W8 x 18	W12 x 16	W12 x 16	W12 x 14	W12 x 14	W12 x 16	W12 x 14	W14 x 22
۵	W21 x 68	W14 x 30	W18 x 35	W16 x 26	W16 x 26	W16 x 31	W21 x 44	W16 x 31
۶	W24 x 55	W21 x 44	W18 x 35	W18 x 40	W18 x 40	W21 x 44	W18 x 35	W18 x 40
۷	W21 x 50	W14 x 22	W18 x 35	W18 x 35	W18 x 35	W18 x 35	W18 x 35	W16 x 26
۸	W12 x 40	W16 x 26	W16 x 26	W14 x 22	W14 x 22	W16 x 26	W12 x 22	W14 x 22
وزن kN	۴۱/۰۲	۳۳/۹۸۱۴	۳۲/۸۳	۳۱/۶۸	۳۱/۳۷۸۶	۳۱/۲۴۳	۳۱/۰۵	۳۰/۹۱

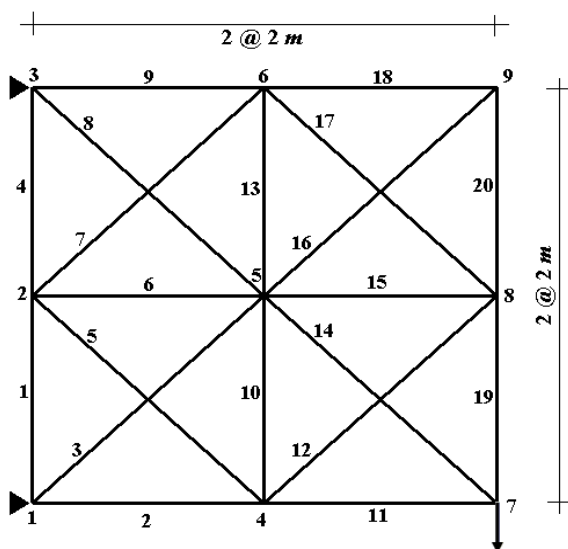
جدول (الف-۹) نتایج طرح بهینه قاب هشت طبقه - یک دهانه براساس ایده‌ها و روش‌های پیشنهادی رساله

شماره گروه	حالت ۲ ایده انفعال فضای طراحی در GA	حالت ۲ ایده انفعال فضای طراحی در ACO	روش پیشنهادی HACOHS-GA-T	روش پیشنهادی MP
۱	W 18 x 35	W 21 x 44	W 18 x 35	W 18 x 35
۲	W 18 x 35	W 16 x 26	W 16 x 31	W 16 x 31
۳	W 16 x 26	W 14 x 22	W 16 x 26	W 16 x 26
۴	W 12 x 16	W 12 x 16	W 12 x 16	W 12 x 16
۵	W 18 x 35	W 18 x 35	W 18 x 35	W 18 x 35
۶	W 18 x 35	W 18 x 35	W 18 x 35	W 18 x 35
۷	W 18 x 35	W 18 x 35	W 18 x 35	W 18 x 35
۸	W 14 x 22	W 16 x 26	W 16 x 26	W 16 x 26
وزن kN	۳۰/۸۰۹	۳۰/۸۳	۳۰/۷۸۸	۳۰/۸۹
میانگین	--	--	--	۳۲/۳۴

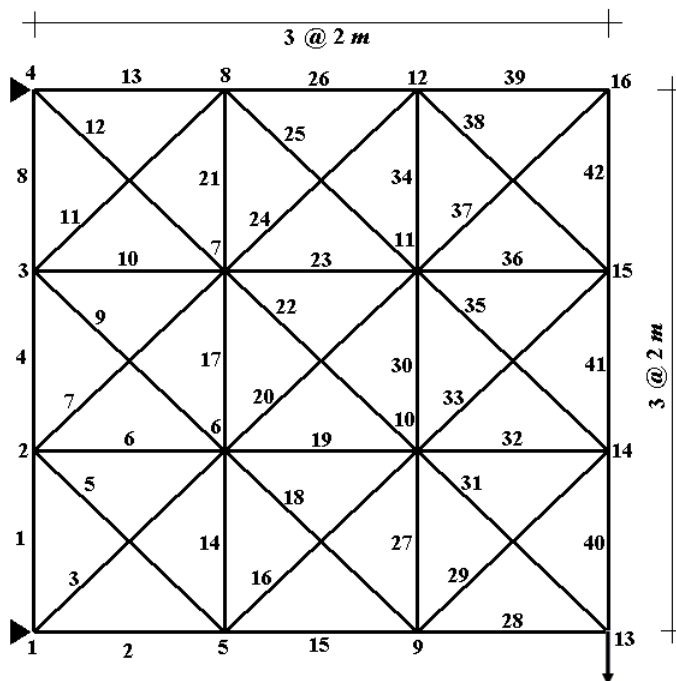
الف-۵ بهینه‌یابی سطح مقطع و توپولوژی شبکه‌های متعامد 2×2 ، 3×3 و 5×5

در اشکال (الف-۶)، (الف-۷) و (الف-۸) شبکه‌های متعامد فولادی 2×2 ، 3×3 و 5×5 مشاهده

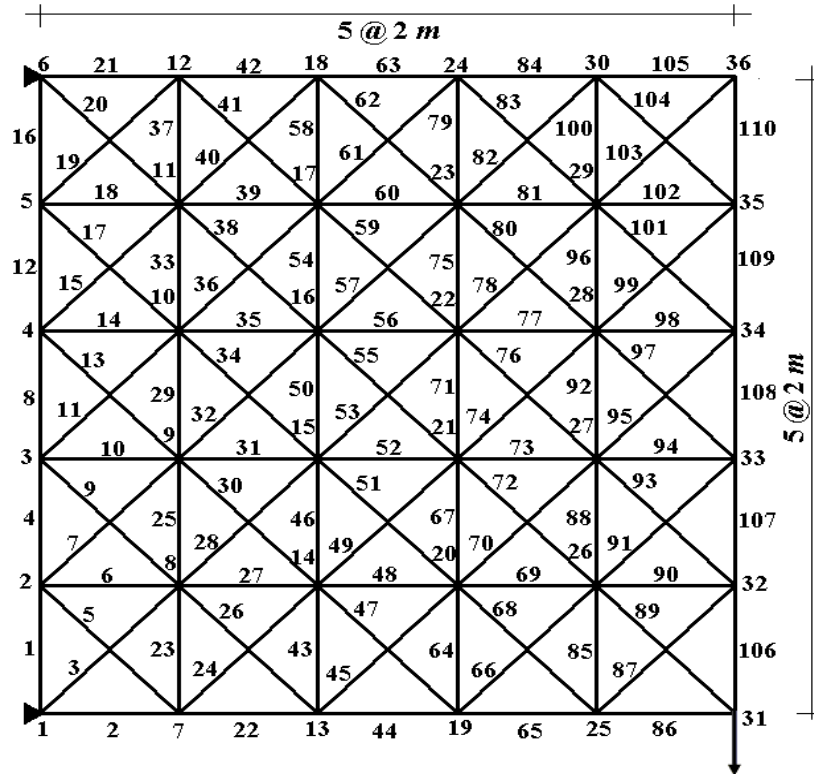
می‌شود. مقدار نیروی اعمالی برای اشکال مذکور برابر 200 kN می‌باشد.



شکل (الف-۶) - شبکه متعامد 2×2



شکل (الف-۷) - شبکه متعامد 3×3

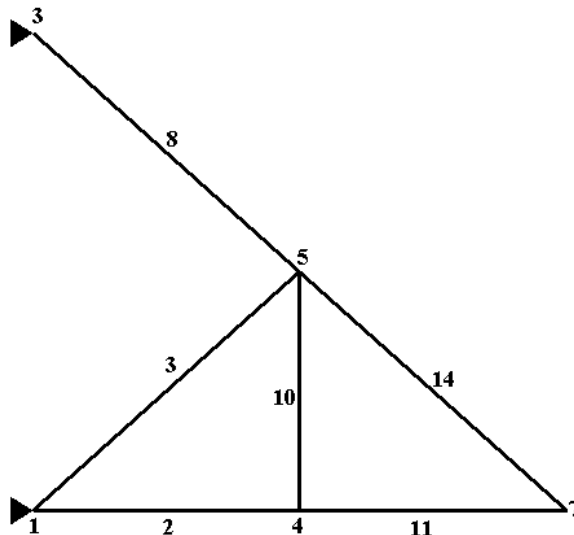


شکل (الف-۸) - شبکه متعامد ۵×۵

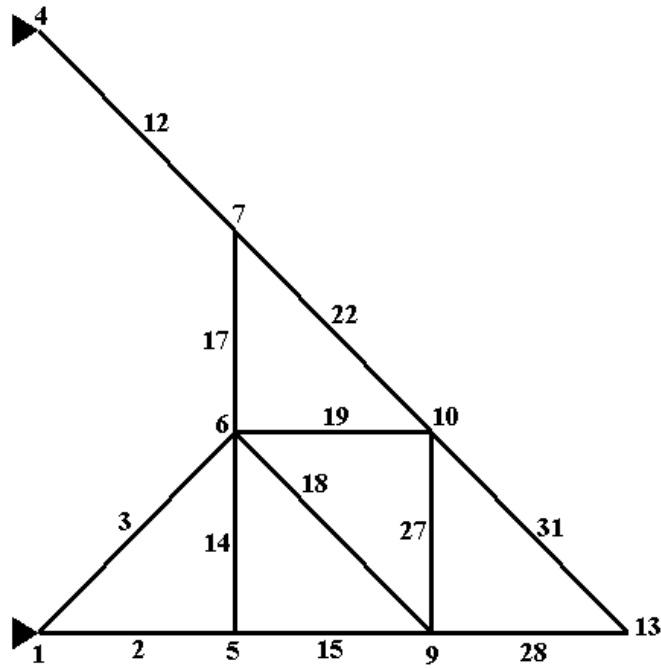
هدف حداقل کردن حجم سازه به ازای فقط قید تنش مجاز کششی و فشاری $MPa \pm 40$ است. مقاطع از لیست مجموعه $\{S\}$ بشرح زیر انتخاب می‌شوند.

$$\{S\} = \{0.01, 20.0, 40.0, 60.0, 80.0\}; cm^2$$

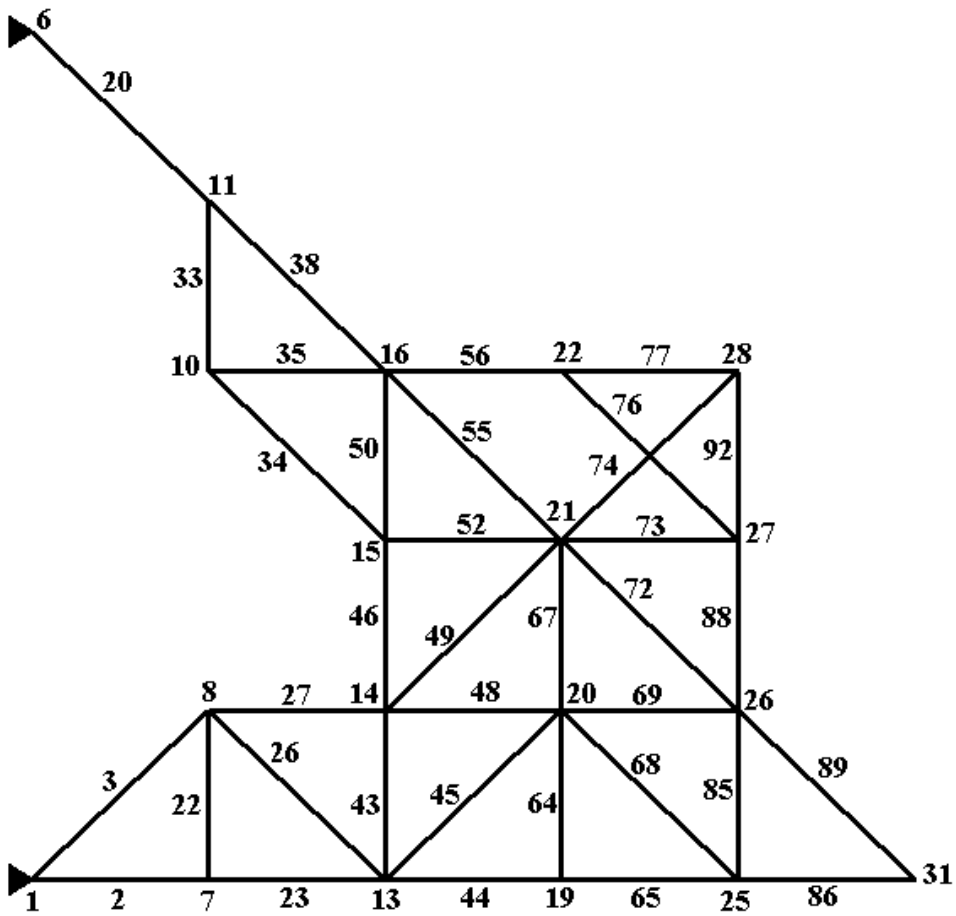
اشکال (الف-۹) تا (الف-۱۱) توپولوژی بهینه را برای شبکه‌های متعامد حاضر نشان می‌دهند.



شکل (الف-۹) - طرح بهینه شبکه متعامد ۲×۲



شکل (الف-۱۰) - طرح بهینه شبکه متعامد 3×3



شکل (الف-۱۱) - طرح بهینه شبکه متعامد 5×5

نتایج طرح بهینه برای سازه‌های این بخش در جداول (الف-۱۰) تا (الف-۱۲) در قیاس با دیگر مراجع ارائه شده است.

جدول (الف-۱۰) نتایج طرح بهینه سطح مقطع و توپولوژی شبکه متعامد ۲×۲ به روش MSM-GA

شماره اعضای توپولوژی بهینه	MSM-GA	مرجع [۷۶]	سطح مقطع - cm^2
۱۰، ۳		۱۹، ۱۸، ۱۷، ۱۶، ۱۵، ۱۲، ۹، ۳	۰/۰۱
۱۱، ۲		۱۱، ۲	۶۰
۸، ۱۴		۸، ۱۴	۸۰
حجم cm^3	۶۹۲۵۹/۶۶	$۰/۰۶۹۲۷ \times ۱۰^۶$	

جدول (الف-۱۱) نتایج طرح بهینه سطح مقطع و توپولوژی شبکه متعامد ۳×۳ به روش MSM-GA

شماره اعضای توپولوژی بهینه	MSM-GA	مرجع [۷۶]	سطح مقطع - cm^2
۲۷، ۱۹، ۱۸، ۱۷، ۱۴، ۳		۲۱، ۲۰، ۱۸، ۱۴، ۱۳، ۱۰، ۹، ۸، ۷، ۶، ۵، ۴	۰/۰۱
۲۸، ۱۵، ۲		۴۱، ۴۰، ۳۹، ۳۷، ۳۶، ۳۵، ۳۴، ۳۳، ۲۷، ۲۶	۶۰
۳۱، ۲۲، ۱۲		۲۸، ۱۵، ۲	۸۰
حجم cm^3	۱۰۳۸۹۵/۹	$۰/۱۰۳۹۳ \times ۱۰^۶$	

جدول (الف-۱۲) نتایج طرح بهینه سطح مقطع و توپولوژی شبکه متعامد ۵×۵ به روش MSM-GA

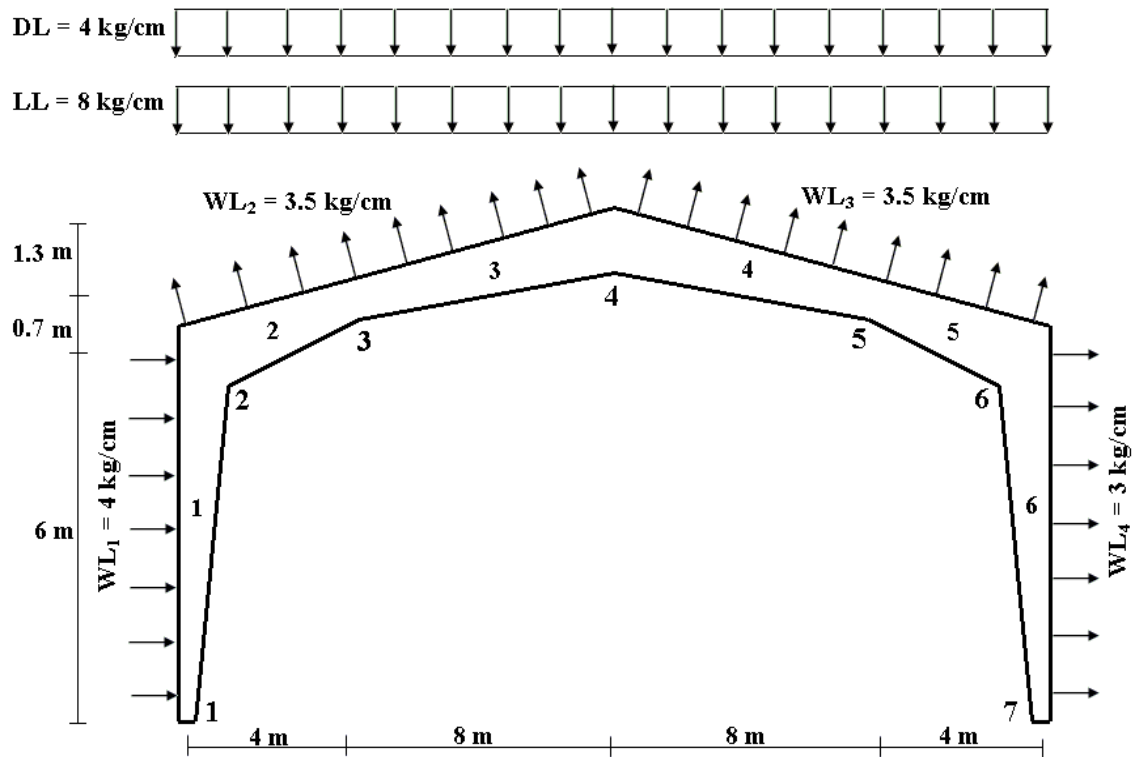
شماره اعضای توپولوژی بهینه	MSM-GA	سطح مقطع - cm^2
۷۳، ۶۹، ۶۸، ۶۷، ۶۴، ۵۶، ۵۲، ۵۰، ۴۹، ۴۸، ۴۶، ۴۵، ۴۳، ۳۵، ۳۴، ۳۳، ۲۷، ۲۶، ۲۲، ۳		۰/۰۱
۹۲، ۸۸، ۸۵، ۷۷، ۷۶، ۷۴		۶۰
۸۶، ۶۵، ۴۴، ۲۳، ۲		۸۰
۸۹، ۷۲، ۵۵، ۳۸، ۲۰		
حجم m^3	۱/۷۳۱۹۴	

الف-۶ بهینه‌یابی قاب شیب‌دار غیر منشوری با تیرهای غیر یکنواخت

در این مثال به بهینه‌یابی قاب شیب‌داری مطابق شکل (الف-۱۲) پرداخته شده است. مقادیر

بارهای اعمالی در شکل (الف-۱۲) قابل مشاهده است. فرضیات طراحی و فاصله مهاربندی مشابه مثال

بخش ۳-۳-۱-۱ می‌باشد.



شکل (الف-۱۲) - هندسه و بارگذاری قاب شیب‌دار غیرمنشوری با تیرهای غیریکنواخت

محدوده مجاز متغیرهای طراحی در فرآیند بهینه‌یابی بشرح جدول (الف-۱۳) در نظر گرفته می‌شود.

جدول (الف-۱۳) محدوده متغیرهای طراحی برای قاب شیب‌دار غیرمنشوری با تیرهای غیریکنواخت

متغیر	شرح متغیر	حدبالا	حدپایین	متغیر	شرح متغیر	حدبالا	حدپایین
۱	ارتفاع جان در گره ۱ از عضو ۱	۱۰	۱۰۰	۱۶	ارتفاع جان در گره ۴ از عضو ۴	۱۰	۱۰۰
۲	ارتفاع جان در گره ۲ از عضو ۱	۱۰	۱۰۰	۱۷	ارتفاع جان در گره ۵ از عضو ۴	۱۰	۱۰۰
۳	عرض بال عضو ۱	۱۰	۱۰۰	۱۸	عرض بال عضو ۴	۱۰	۱۰۰
۴	ضخامت جان عضو ۱	۰/۴	۳/۵	۱۹	ضخامت جان عضو ۴	۰/۴	۳/۵
۵	ضخامت بال عضو ۱	۰/۴	۳/۵	۲۰	ضخامت بال عضو ۳	۰/۴	۳/۵
۶	ارتفاع جان در گره ۲ از عضو ۲	۱۰	۱۰۰	۲۱	ارتفاع جان در گره ۵ از عضو ۵	۱۰	۱۰۰
۷	ارتفاع جان در گره ۳ از عضو ۲	۱۰	۱۰۰	۲۲	ارتفاع جان در گره ۶ از عضو ۵	۱۰	۱۰۰
۸	عرض بال عضو ۲	۱۰	۱۰۰	۲۳	عرض بال عضو ۵	۱۰	۱۰۰
۹	ضخامت جان عضو ۲	۰/۴	۳/۵	۲۴	ضخامت جان عضو ۵	۰/۴	۳/۵
۱۰	ضخامت بال عضو ۲	۰/۴	۳/۵	۲۵	ضخامت بال عضو ۵	۰/۴	۳/۵
۱۱	ارتفاع جان در گره ۳ از عضو ۳	۱۰	۱۰۰	۲۶	ارتفاع جان در گره ۶ از عضو ۶	۱۰	۱۰۰
۱۲	ارتفاع جان در گره ۴ از عضو ۲	۱۰	۱۰۰	۲۷	ارتفاع جان در گره ۷ از عضو ۶	۱۰	۱۰۰
۱۳	عرض بال عضو ۳	۱۰	۱۰۰	۲۸	عرض بال عضو ۶	۱۰	۱۰۰
۱۴	ضخامت جان عضو ۳	۰/۴	۳/۵	۲۹	ضخامت جان عضو ۶	۰/۴	۳/۵
۱۵	ضخامت بال عضو ۳	۰/۴	۳/۵	۳۰	ضخامت بال عضو ۶	۰/۴	۳/۵

مقادیر مربوط به طرح بهینه برای متغیرهای طراحی مسئله در جدول (الف-۱۴) قابل مشاهده است.

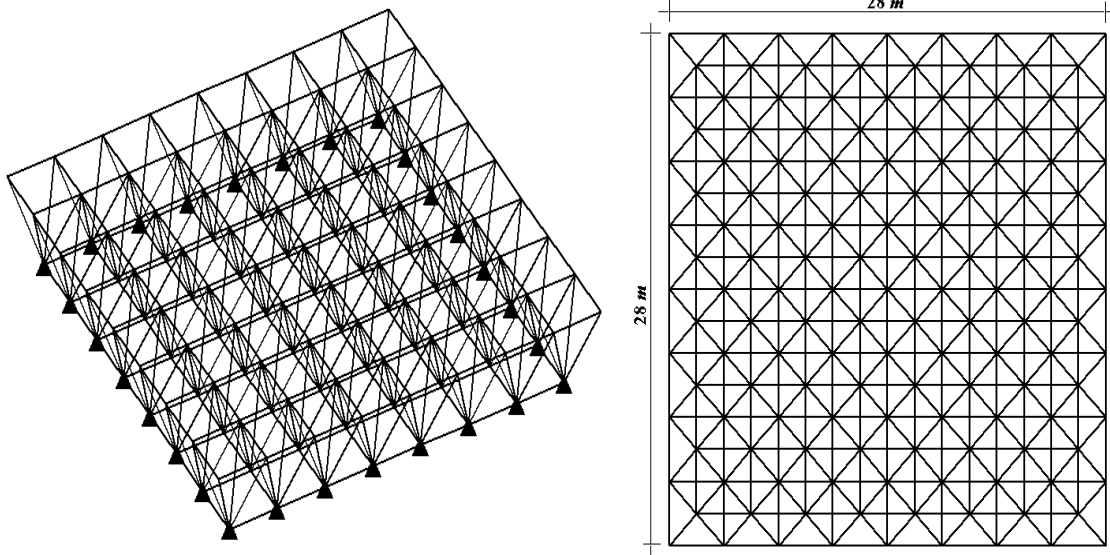
جدول (الف-۱۴) نتایج طرح بهینه قاب شیب‌دار با تیرهای غیریکنواخت به روش MSM-GA - cm

متغیر	شرح متغیر	MSM-GA	متغیر	شرح متغیر	MSM-GA
۱	ارتفاع جان در گره ۱ از عضو ۱	۵۵	۱۶	ارتفاع جان در گره ۴ از عضو ۴	۱۰۰
۲	ارتفاع جان در گره ۲ از عضو ۱	۹۷	۱۷	ارتفاع جان در گره ۵ از عضو ۴	۳۲
۳	عرض بال عضو ۱	۲۴	۱۸	عرض بال عضو ۴	۱۵
۴	ضخامت جان عضو ۱	۰/۶	۱۹	ضخامت جان عضو ۴	۰/۶
۵	ضخامت بال عضو ۱	۱/۵	۲۰	ضخامت بال عضو ۳	۰/۸
۶	ارتفاع جان در گره ۲ از عضو ۲	۵۶	۲۱	ارتفاع جان در گره ۵ از عضو ۵	۴۴
۷	ارتفاع جان در گره ۳ از عضو ۲	۱۰۰	۲۲	ارتفاع جان در گره ۶ از عضو ۵	۹۷
۸	عرض بال عضو ۲	۲۷	۲۳	عرض بال عضو ۵	۱۵
۹	ضخامت جان عضو ۲	۰/۶	۲۴	ضخامت جان عضو ۵	۰/۶
۱۰	ضخامت بال عضو ۲	۱/۲	۲۵	ضخامت بال عضو ۵	۲/۵
۱۱	ارتفاع جان در گره ۳ از عضو ۳	۲۲	۲۶	ارتفاع جان در گره ۶ از عضو ۶	۹۵
۱۲	ارتفاع جان در گره ۴ از عضو ۲	۹۷	۲۷	ارتفاع جان در گره ۷ از عضو ۶	۳۲
۱۳	عرض بال عضو ۳	۱۴	۲۸	عرض بال عضو ۶	۳۲
۱۴	ضخامت جان عضو ۳	۰/۶	۲۹	ضخامت جان عضو ۶	۰/۶
۱۵	ضخامت بال عضو ۳	۱	۳۰	ضخامت بال عضو ۶	۱/۵
		حجم فولاد مصرفی - cm^3			۳۴۷۲۱۰/۹۵

الف-۷ بهینه‌یابی سطح مقطع و هندسه سازه فضاکار تخت دو لایه ۸×۸

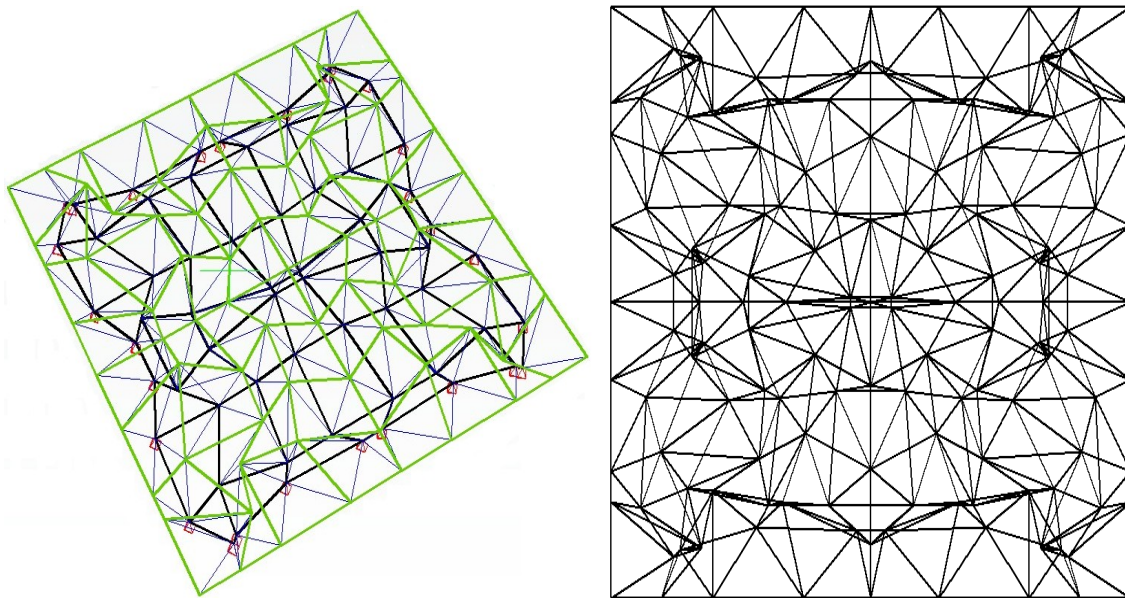
در این مثال به فرآیند بهینه‌یابی سطح مقطع و هندسه سازه فضاکار تخت دو لایه ۸×۸ با فرض ثابت بودن توپولوژی پرداخته شده است. برای این منظور سازه‌ای با ابعاد و توپولوژی مشخص بشرح شکل (الف-۱۳) در نظر گرفته شده است. E و ρ برای تمامی اعضا به ترتیب برابر 2038902 kg/cm^2 و 7850 kg/m^3 در نظر گرفته شده است. F_y نیز برابر 2400 kg/cm^2 منظور شده و بار مرده سقف برابر 180 kg/m^2 فرض می‌شود. تنش مجاز فشاری و کششی مطابق آیین‌نامه ایران لحاظ شده و خیز

مجاز برابر $\frac{L}{360}$ می‌باشد.



شکل (الف-۱۳) - نمای دو بعدی و سه بعدی سازه فضاکار تخت دو لایه 8×8

هندس بهینه سازه فضاکار تخت دو لایه بشرح شکل (الف-۱۴) نتیجه شده است.



شکل (الف-۱۴) - نمای دو بعدی و سه بعدی طرح هندسی بهینه سازه فضاکار تخت دو لایه 8×8

نتایج عددی برای موقعیت گرهی و سطح مقطع اعضای سازه بهینه در جداول (الف-۱۵) و (الف-۱۶) همراه با اطلاعات همبندی اعضای سازه ارائه شده است.

جدول (الف-۱۵) نتایج طرح بهینه متغیرهندسی سازه فضاکار تخت دو لایه ۸×۸ به روش MSM-GA - cm

Z	Y	X	شماره	Z	Y	X	شماره	Z	Y	X	شماره
۱۱۹	۲۵۶۳	۲۳۱۶	۷۱	۱۱۹	۱۰۳۴	۲۸۰۰	۳۶	۱۱۹	۰	۰	۱
۱۱۹	۲۳۴۵	۲۸۰۰	۷۲	۱۱۹	۱۴۰۰	۰	۳۷	۱۱۹	۰	۲۷۰	۲
۱۱۹	۲۸۰۰	۰	۷۳	۱۱۹	۱۴۰۰	۴۷۳	۳۸	۱۱۹	۰	۵۴۸	۳
۱۱۹	۲۸۰۰	۲۷۰	۷۴	۱۱۹	۱۴۰۰	۷۱۱	۳۹	۱۱۹	۰	۱۰۳۴	۴
۱۱۹	۲۸۰۰	۵۴۸	۷۵	۱۱۹	۱۴۰۰	۹۴۳	۴۰	۱۱۹	۰	۱۴۰۰	۵
۱۱۹	۲۸۰۰	۱۰۳۴	۷۶	۱۱۹	۱۴۰۰	۱۴۰۰	۴۱	۱۱۹	۰	۱۷۶۶	۶
۱۱۹	۲۸۰۰	۱۴۰۰	۷۷	۱۱۹	۱۴۰۰	۱۸۵۷	۴۲	۱۱۹	۰	۲۲۵۲	۷
۱۱۹	۲۸۰۰	۱۷۶۶	۷۸	۱۱۹	۱۴۰۰	۲۰۸۹	۴۳	۱۱۹	۰	۲۵۳۰	۸
۱۱۹	۲۸۰۰	۲۲۵۲	۷۹	۱۱۹	۱۴۰۰	۲۳۲۷	۴۴	۱۱۹	۰	۲۸۰۰	۹
۱۱۹	۲۸۰۰	۲۵۳۰	۸۰	۱۱۹	۱۴۰۰	۲۸۰۰	۴۵	۱۱۹	۴۵۵	۰	۱۰
۱۱۹	۲۸۰۰	۲۸۰۰	۸۱	۱۱۹	۱۷۶۶	۰	۴۶	۱۱۹	۲۳۷	۴۸۴	۱۱
۰	۱۹۳	۳۳۵	۸۲	۱۱۹	۱۵۸۶	۴۹۲	۴۷	۱۱۹	۵۰۸	۵۵۰	۱۲
۰	۲۲۸	۳۷۰	۸۳	۱۱۹	۱۸۱۷	۸۲۸	۴۸	۱۱۹	۴۵۶	۹۲۵	۱۳
۰	۳۳۶	۷۸۱	۸۴	۱۱۹	۱۶۴۵	۱۰۹۹	۴۹	۱۱۹	۲۵۷	۱۴۰۰	۱۴
۰	۳۱۸	۱۳۲۶	۸۵	۱۱۹	۱۷۹۲	۱۴۰۰	۵۰	۱۱۹	۴۵۶	۱۸۷۵	۱۵
۰	۳۱۸	۱۴۷۴	۸۶	۱۱۹	۱۶۴۵	۱۷۰۱	۵۱	۱۱۹	۵۰۸	۲۲۵۰	۱۶
۰	۳۳۶	۲۰۱۹	۸۷	۱۱۹	۱۸۱۷	۱۹۷۲	۵۲	۱۱۹	۲۳۷	۲۳۱۶	۱۷
۰	۲۲۸	۲۴۳۰	۸۸	۱۱۹	۱۵۸۶	۲۳۰۸	۵۳	۱۱۹	۴۵۵	۲۸۰۰	۱۸
۰	۱۹۶	۲۴۶۵	۸۹	۱۱۹	۱۷۶۶	۲۸۰۰	۵۴	۱۱۹	۶۰۲	۰	۱۹
۰	۴۲۹	۱۵۹	۹۰	۱۱۹	۲۱۹۸	۰	۵۵	۱۱۹	۶۹۳	۲۶۵	۲۰
۰	۵۲۲	۴۱۱	۹۱	۱۱۹	۲۱۰۷	۲۶۵	۵۶	۱۱۹	۶۶۲	۷۹۹	۲۱
۰	۴۳۶	۸۴۷	۹۲	۱۱۹	۲۱۳۸	۷۹۹	۵۷	۱۱۹	۷۸۲	۱۰۴۸	۲۲
۰	۴۳۹	۱۱۷۲	۹۳	۱۱۹	۲۰۱۸	۱۰۴۸	۵۸	۱۱۹	۶۱۴	۱۴۰۰	۲۳
۰	۴۳۹	۱۶۲۸	۹۴	۱۱۹	۲۱۸۶	۱۴۰۰	۵۹	۱۱۹	۷۸۲	۱۷۵۲	۲۴
۰	۴۳۶	۱۹۵۳	۹۵	۱۱۹	۲۰۱۸	۱۷۵۲	۶۰	۱۱۹	۶۶۲	۲۰۰۱	۲۵
۰	۵۲۲	۲۳۸۹	۹۶	۱۱۹	۲۱۳۸	۲۰۰۱	۶۱	۱۱۹	۶۹۳	۲۵۳۵	۲۶
۰	۴۲۹	۲۶۴۱	۹۷	۱۱۹	۲۱۰۷	۲۵۳۵	۶۲	۱۱۹	۶۰۲	۲۸۰۰	۲۷
۰	۹۵۴	۱۸۸	۹۸	۱۱۹	۲۱۹۸	۲۸۰۰	۶۳	۱۱۹	۱۰۳۴	۰	۲۸
۰	۹۳۷	۶۳۴	۹۹	۱۱۹	۲۳۴۵	۰	۶۴	۱۱۹	۱۲۱۴	۴۹۲	۲۹
۰	۹۴۵	۹۱۰	۱۰۰	۱۱۹	۲۵۶۳	۴۸۴	۶۵	۱۱۹	۹۸۳	۸۲۸	۳۰
۰	۹۸۱	۱۲۱۴	۱۰۱	۱۱۹	۲۲۹۲	۵۵۰	۶۶	۱۱۹	۱۱۵۵	۱۰۹۹	۳۱
۰	۹۸۱	۱۵۸۶	۱۰۲	۱۱۹	۲۳۴۴	۹۲۵	۶۷	۱۱۹	۱۰۰۸	۱۴۰۰	۳۲
۰	۹۴۵	۱۸۹۰	۱۰۳	۱۱۹	۲۵۴۳	۱۴۰۰	۶۸	۱۱۹	۱۱۵۵	۱۷۰۱	۳۳
۰	۹۳۷	۲۱۶۶	۱۰۴	۱۱۹	۲۳۴۴	۱۸۷۵	۶۹	۱۱۹	۹۸۳	۱۹۷۲	۳۴
۰	۹۵۴	۲۶۱۲	۱۰۵	۱۱۹	۲۲۹۲	۲۲۵۰	۷۰	۱۱۹	۱۲۱۴	۲۳۰۸	۳۵

ادامه جدول (الف-۱۵)

Z	Y	X	شماره	Z	Y	X	شماره	Z	Y	X	شماره
.	۲۳۶۱	۱۶۲۸	۱۳۴	.	۱۶۵۷	۲۳۶۳	۱۲۰	.	۱۲۶۶	۳۳۸	۱۰۶
.	۲۳۶۴	۱۹۵۳	۱۳۵	.	۱۵۳۴	۲۴۶۲	۱۲۱	.	۱۱۴۳	۴۳۷	۱۰۷
.	۲۲۷۸	۲۳۸۹	۱۳۶	.	۱۸۴۶	۱۸۸	۱۲۲	.	۱۲۷۱	۷۴۳	۱۰۸
.	۲۳۷۱	۲۶۴۱	۱۳۷	.	۱۸۶۳	۶۳۴	۱۲۳	.	۱۳۷۵	۱۲۹۱	۱۰۹
.	۲۶۰۴	۳۳۵	۱۳۸	.	۱۸۵۵	۹۱۰	۱۲۴	.	۱۳۷۵	۱۵۰۹	۱۱۰
.	۲۵۷۱	۳۷۰	۱۳۹	.	۱۸۱۹	۱۲۱۴	۱۲۵	.	۱۲۷۱	۲۰۵۷	۱۱۱
.	۲۴۶۴	۷۸۱	۱۴۰	.	۱۸۱۹	۱۵۸۶	۱۲۶	.	۱۱۴۳	۲۳۶۳	۱۱۲
.	۲۴۸۲	۱۳۲۶	۱۴۱	.	۱۸۵۵	۱۸۹۰	۱۲۷	.	۱۲۶۶	۲۴۶۲	۱۱۳
.	۲۴۸۲	۱۴۷۴	۱۴۲	.	۱۸۶۳	۲۱۶۶	۱۲۸	.	۱۵۳۴	۳۳۸	۱۱۴
.	۲۴۶۴	۲۰۱۹	۱۴۳	.	۱۸۴۶	۲۶۱۲	۱۲۹	.	۱۶۵۷	۴۳۷	۱۱۵
.	۲۵۷۲	۲۴۳۰	۱۴۴	.	۲۳۷۱	۱۵۹	۱۳۰	.	۱۵۲۹	۷۴۳	۱۱۶
.	۲۶۰۴	۲۴۶۵	۱۴۵	.	۲۲۷۸	۴۱۱	۱۳۱	.	۱۴۲۵	۱۲۹۱	۱۱۷
				.	۲۳۶۴	۸۴۷	۱۳۲	.	۱۴۲۵	۱۵۰۹	۱۱۸
				.	۲۳۶۱	۱۱۷۲	۱۳۳	.	۱۵۲۹	۲۰۵۷	۱۱۹

جدول (الف-۱۶) نتایج طرح بهینه سطح مقطع سازه فضاکار تخت دو لایه ۸×۸ به روش MSM-GA - cm^2

شماره	ابتدا	انتها	سطح مقطع	شماره	ابتدا	انتها	سطح مقطع	شماره	ابتدا	انتها	سطح مقطع
۱	۱	۲	۲/۵۴	۱۹	۲۱	۲۲	۲/۵۴	۳۷	۴۱	۴۲	۱۷/۲
۲	۲	۳	۳/۷۳	۲۰	۲۲	۲۳	۷/۳۳	۳۸	۴۲	۴۳	۱۸/۹
۳	۳	۴	۵/۷۴	۲۱	۲۳	۲۴	۷/۳۳	۳۹	۴۳	۴۴	۷/۰۷
۴	۴	۵	۸/۶۹	۲۲	۲۴	۲۵	۲/۵۴	۴۰	۴۴	۴۵	۵/۷۴
۵	۵	۶	۸/۶۹	۲۳	۲۵	۲۶	۸/۶۲	۴۱	۴۶	۴۷	۵/۷۴
۶	۶	۷	۵/۷۴	۲۴	۲۶	۲۷	۲/۵۴	۴۲	۴۷	۴۸	۷/۳۳
۷	۷	۸	۳/۷۳	۲۵	۲۸	۲۹	۵/۷۴	۴۳	۴۸	۴۹	۱۱/۲
۸	۸	۹	۲/۵۴	۲۶	۲۹	۳۰	۷/۳۳	۴۴	۴۹	۵۰	۲۶/۷
۹	۹	۱۰	۵/۷۴	۲۷	۳۰	۳۱	۱۱/۲	۴۵	۵۰	۵۱	۲۶/۷
۱۰	۱۰	۱۱	۲/۵۴	۲۸	۳۱	۳۲	۲۶/۷	۴۶	۵۱	۵۲	۱۱/۲
۱۱	۱۱	۱۲	۴/۵۳	۲۹	۳۲	۳۳	۲۶/۷	۴۷	۵۲	۵۳	۷/۳۳
۱۲	۱۲	۱۳	۵/۷۴	۳۰	۳۳	۳۴	۱۱/۲	۴۸	۵۳	۵۴	۵/۷۴
۱۳	۱۳	۱۴	۵/۷۴	۳۱	۳۴	۳۵	۷/۳۳	۴۹	۵۵	۵۶	۲/۵۴
۱۴	۱۴	۱۵	۴/۵۳	۳۲	۳۵	۳۶	۵/۷۴	۵۰	۵۶	۵۷	۸/۶۲
۱۵	۱۵	۱۶	۲/۵۴	۳۳	۳۷	۳۸	۵/۷۴	۵۱	۵۷	۵۸	۲/۵۴
۱۶	۱۶	۱۷	۵/۷۴	۳۴	۳۸	۳۹	۷/۰۷	۵۲	۵۸	۵۹	۷/۳۳
۱۷	۱۷	۱۹	۲/۵۴	۳۵	۳۹	۴۰	۱۸/۹	۵۳	۵۹	۶۰	۷/۳۳
۱۸	۱۸	۲۰	۸/۶۲	۳۶	۴۰	۴۱	۱۷/۲	۵۴	۶۰	۶۱	۲/۵۴

ادامه جدول (الف-۱۶)

شماره	ابتدا	انتهای	سطح مقطع	شماره	ابتدا	انتهای	سطح مقطع	شماره	ابتدا	انتهای	سطح مقطع	شماره
۵۵	۶۱	۶۲	۸/۶۲	۹۰	۱۸	۲۷	۲/۵۴	۱۲۵	۵۳	۶۲	۸/۶۲	۵۵
۵۶	۶۲	۶۳	۲/۵۴	۹۱	۱۹	۲۸	۳/۷۳	۱۲۶	۵۴	۶۳	۳/۷۳	۵۶
۵۷	۶۴	۶۵	۵/۷۴	۹۲	۲۰	۲۹	۸/۶۲	۱۲۷	۵۵	۶۴	۲/۵۴	۵۷
۵۸	۶۵	۶۶	۲/۵۴	۹۳	۲۱	۳۰	۸/۶۲	۱۲۸	۵۶	۶۵	۸/۶۲	۵۸
۵۹	۶۶	۶۷	۴/۵۳	۹۴	۲۲	۳۱	۱۲/۳	۱۲۹	۵۷	۶۶	۲/۵۴	۵۹
۶۰	۶۷	۶۸	۵/۷۴	۹۵	۲۳	۳۲	۱۷/۲	۱۳۰	۵۸	۶۷	۵/۷۴	۶۰
۶۱	۶۸	۶۹	۵/۷۴	۹۶	۲۴	۳۳	۱۲/۳	۱۳۱	۵۹	۶۸	۵/۷۴	۶۱
۶۲	۶۹	۷۰	۴/۵۳	۹۷	۲۵	۳۴	۸/۶۲	۱۳۲	۶۰	۶۹	۵/۷۴	۶۲
۶۳	۷۰	۷۱	۲/۵۴	۹۸	۲۶	۳۵	۸/۶۲	۱۳۳	۶۱	۷۰	۲/۵۴	۶۳
۶۴	۷۱	۷۲	۵/۷۴	۹۹	۲۷	۳۶	۳/۷۳	۱۳۴	۶۲	۷۱	۸/۶۲	۶۴
۶۵	۷۳	۷۴	۲/۵۴	۱۰۰	۲۸	۳۷	۳/۲۵	۱۳۵	۶۳	۷۲	۲/۵۴	۶۵
۶۶	۷۴	۷۵	۳/۷۳	۱۰۱	۲۹	۳۸	۲/۵۴	۱۳۶	۶۴	۷۳	۳/۷۳	۶۶
۶۷	۷۵	۷۶	۵/۷۴	۱۰۲	۳۰	۳۹	۹/۰۶	۱۳۷	۶۵	۷۴	۳/۲۵	۶۷
۶۸	۷۶	۷۷	۸/۶۹	۱۰۳	۳۱	۴۰	۲۶/۷	۱۳۸	۶۶	۷۵	۵/۷۴	۶۸
۶۹	۷۷	۷۸	۸/۶۹	۱۰۴	۳۲	۴۱	۸/۶۹	۱۳۹	۶۷	۷۶	۷/۰۷	۶۹
۷۰	۷۸	۷۹	۵/۷۴	۱۰۵	۳۳	۴۲	۲۶/۷	۱۴۰	۶۸	۷۷	۲/۵۴	۷۰
۷۱	۷۹	۸۰	۳/۷۳	۱۰۶	۳۴	۴۳	۹/۰۶	۱۴۱	۶۹	۷۸	۷/۰۷	۷۱
۷۲	۸۰	۸۱	۲/۵۴	۱۰۷	۳۵	۴۴	۲/۵۴	۱۴۲	۷۰	۷۹	۵/۷۴	۷۲
۷۳	۱	۱۰	۳/۷۳	۱۰۸	۳۶	۴۵	۳/۲۵	۱۴۳	۷۱	۸۰	۳/۲۵	۷۳
۷۴	۲	۱۱	۳/۲۵	۱۰۹	۳۷	۴۶	۳/۲۵	۱۴۴	۷۲	۸۱	۳/۷۳	۷۴
۷۵	۳	۱۲	۵/۷۴	۱۱۰	۳۸	۴۷	۲/۵۴	۱۴۵	۸۳	۸۲	۵/۵۷	۷۵
۷۶	۴	۱۳	۷/۰۷	۱۱۱	۳۹	۴۸	۹/۰۶	۱۴۶	۸۳	۸۳	۳/۷۳	۷۶
۷۷	۵	۱۴	۲/۵۴	۱۱۲	۴۰	۴۹	۲۶/۷	۱۴۷	۸۴	۸۴	۵/۷۴	۷۷
۷۸	۶	۱۵	۷/۰۷	۱۱۳	۴۱	۵۰	۸/۶۹	۱۴۸	۸۵	۸۵	۳/۲۵	۷۸
۷۹	۷	۱۶	۵/۷۴	۱۱۴	۴۲	۵۱	۲۶/۷	۱۴۹	۸۶	۸۶	۵/۷۴	۷۹
۸۰	۸	۱۷	۳/۲۵	۱۱۵	۴۳	۵۲	۹/۰۶	۱۵۰	۸۷	۸۷	۳/۷۳	۸۰
۸۱	۹	۱۸	۳/۷۳	۱۱۶	۴۴	۵۳	۲/۵۴	۱۵۱	۸۸	۸۸	۵/۵۷	۸۱
۸۲	۱۰	۱۹	۲/۵۴	۱۱۷	۴۵	۵۴	۳/۲۵	۱۵۲	۹۰	۹۰	۵/۵۷	۸۲
۸۳	۱۱	۲۰	۸/۶۲	۱۱۸	۴۶	۵۵	۳/۷۳	۱۵۳	۹۱	۹۱	۳/۷۳	۸۳
۸۴	۱۲	۲۱	۲/۵۴	۱۱۹	۴۷	۵۶	۸/۶۲	۱۵۴	۹۲	۹۲	۹/۰۶	۸۴
۸۵	۱۳	۲۲	۵/۷۴	۱۲۰	۴۸	۵۷	۸/۶۲	۱۵۵	۹۳	۹۳	۵/۷۴	۸۵
۸۶	۱۴	۲۳	۵/۷۴	۱۲۱	۴۹	۵۸	۱۲/۳	۱۵۶	۹۴	۹۴	۹/۰۶	۸۶
۸۷	۱۵	۲۴	۵/۷۴	۱۲۲	۵۰	۵۹	۱۷/۲	۱۵۷	۹۵	۹۵	۳/۷۳	۸۷
۸۸	۱۶	۲۵	۲/۵۴	۱۲۳	۵۱	۶۰	۱۲/۳	۱۵۸	۹۶	۹۶	۵/۵۷	۸۸
۸۹	۱۷	۲۶	۸/۶۲	۱۲۴	۵۲	۶۱	۸/۶۲	۱۵۹	۹۸	۹۸	۱۳/۲	۸۹

ادامه جدول (الف-۱۶)

شماره	ابتدا	انتهای	سطح مقطع	شماره	ابتدا	انتهای	سطح مقطع	شماره	ابتدا	انتهای	سطح مقطع
۱۶۰	۹۹	۱۰۰	۳/۷۳	۱۹۵	۱۳۹	۱۴۰	۳/۷۳	۱۶۰	۱۱۱	۱۱۹	۲/۵۴
۱۶۱	۱۰۰	۱۰۱	۲/۵۴	۱۹۶	۱۴۰	۱۴۱	۵/۷۴	۱۶۱	۱۱۲	۱۲۰	۵/۷۴
۱۶۲	۱۰۱	۱۰۲	۳/۲۵	۱۹۷	۱۴۱	۱۴۲	۳/۲۵	۱۶۲	۱۱۳	۱۲۱	۳/۹۴
۱۶۳	۱۰۲	۱۰۳	۲/۵۴	۱۹۸	۱۴۲	۱۴۳	۵/۷۴	۱۶۳	۱۱۴	۱۲۲	۳/۲۵
۱۶۴	۱۰۳	۱۰۴	۳/۷۳	۱۹۹	۱۴۳	۱۴۴	۳/۷۳	۱۶۴	۱۱۵	۱۲۳	۳/۷۳
۱۶۵	۱۰۴	۱۰۵	۱۳/۲	۲۰۰	۱۴۴	۱۴۵	۵/۵۷	۱۶۵	۱۱۶	۱۲۴	۳/۲۵
۱۶۶	۱۰۶	۱۰۷	۹/۰۶	۲۰۱	۸۲	۹۰	۲/۵۴	۱۶۶	۱۱۷	۱۲۵	۳/۲۵
۱۶۷	۱۰۷	۱۰۸	۷/۰۷	۲۰۲	۸۳	۹۱	۳/۷۳	۱۶۷	۱۱۸	۱۲۶	۳/۲۵
۱۶۸	۱۰۸	۱۰۹	۵/۷۴	۲۰۳	۸۴	۹۲	۱۳/۲	۱۶۸	۱۱۹	۱۲۷	۳/۲۵
۱۶۹	۱۰۹	۱۱۰	۵/۷۴	۲۰۴	۸۵	۹۳	۱۳/۲	۱۶۹	۱۲۰	۱۲۸	۳/۷۳
۱۷۰	۱۱۰	۱۱۱	۵/۷۴	۲۰۵	۸۶	۹۴	۱۳/۲	۱۷۰	۱۲۱	۱۲۹	۳/۲۵
۱۷۱	۱۱۱	۱۱۲	۷/۰۷	۲۰۶	۸۷	۹۵	۱۳/۲	۱۷۱	۱۲۲	۱۳۰	۵/۷۴
۱۷۲	۱۱۲	۱۱۳	۹/۰۶	۲۰۷	۸۸	۹۶	۳/۷۳	۱۷۲	۱۲۳	۱۳۱	۷/۰۷
۱۷۳	۱۱۴	۱۱۵	۹/۰۶	۲۰۸	۸۹	۹۷	۲/۵۴	۱۷۳	۱۲۴	۱۳۲	۸/۶۲
۱۷۴	۱۱۵	۱۱۶	۷/۰۷	۲۰۹	۹۰	۹۸	۵/۷۴	۱۷۴	۱۲۵	۱۳۳	۵/۷۴
۱۷۵	۱۱۶	۱۱۷	۵/۷۴	۲۱۰	۹۱	۹۹	۷/۰۷	۱۷۵	۱۲۶	۱۳۴	۵/۷۴
۱۷۶	۱۱۷	۱۱۸	۵/۷۴	۲۱۱	۹۲	۱۰۰	۸/۶۲	۱۷۶	۱۲۷	۱۳۵	۸/۶۲
۱۷۷	۱۱۸	۱۱۹	۵/۷۴	۲۱۲	۹۳	۱۰۱	۵/۷۴	۱۷۷	۱۲۸	۱۳۶	۷/۰۷
۱۷۸	۱۱۹	۱۲۰	۷/۰۷	۲۱۳	۹۴	۱۰۲	۵/۷۴	۱۷۸	۱۲۹	۱۳۷	۵/۷۴
۱۷۹	۱۲۰	۱۲۱	۹/۰۶	۲۱۴	۹۵	۱۰۳	۲/۵۴	۱۷۹	۱۳۰	۱۳۸	۲/۵۴
۱۸۰	۱۲۲	۱۲۳	۱۳/۲	۲۱۵	۹۶	۱۰۴	۷/۰۷	۱۸۰	۱۳۱	۱۳۹	۳/۷۳
۱۸۱	۱۲۳	۱۲۴	۳/۷۳	۲۱۶	۹۷	۱۰۵	۵/۷۴	۱۸۱	۱۳۲	۱۴۰	۱۳/۲
۱۸۲	۱۲۴	۱۲۵	۲/۵۴	۲۱۷	۹۸	۱۰۶	۳/۲۵	۱۸۲	۱۳۳	۱۴۱	۱۳/۲
۱۸۳	۱۲۵	۱۲۶	۳/۲۵	۲۱۸	۹۹	۱۰۷	۳/۷۳	۱۸۳	۱۳۴	۱۴۲	۱۳/۲
۱۸۴	۱۲۶	۱۲۷	۲/۵۴	۲۱۹	۱۰۰	۱۰۸	۳/۲۵	۱۸۴	۱۳۵	۱۴۳	۱۳/۲
۱۸۵	۱۲۷	۱۲۸	۳/۷۳	۲۲۰	۱۰۱	۱۰۹	۳/۲۵	۱۸۵	۱۳۶	۱۴۴	۳/۷۳
۱۸۶	۱۲۸	۱۲۹	۱۳/۲	۲۲۱	۱۰۲	۱۱۰	۲/۵۴	۱۸۶	۱۳۷	۱۴۵	۲/۵۴
۱۸۷	۱۳۰	۱۳۱	۵/۵۷	۲۲۲	۱۰۳	۱۱۱	۳/۲۵	۱۸۷	۱	۸۲	۷/۳۳
۱۸۸	۱۳۱	۱۳۲	۳/۷۳	۲۲۳	۱۰۴	۱۱۲	۳/۷۳	۱۸۸	۲	۸۲	۴/۸۳
۱۸۹	۱۳۲	۱۳۳	۹/۰۶	۲۲۴	۱۰۵	۱۱۳	۳/۲۵	۱۸۹	۱۰	۸۲	۷/۳۳
۱۹۰	۱۳۳	۱۳۴	۵/۷۴	۲۲۵	۱۰۶	۱۱۴	۳/۹۴	۱۹۰	۱۱	۸۲	۲/۵۴
۱۹۱	۱۳۴	۱۳۵	۹/۰۶	۲۲۶	۱۰۷	۱۱۵	۵/۷۴	۱۹۱	۲	۸۳	۳/۷۳
۱۹۲	۱۳۵	۱۳۶	۳/۷۳	۲۲۷	۱۰۸	۱۱۶	۲/۵۴	۱۹۲	۳	۸۳	۷/۰۷
۱۹۳	۱۳۶	۱۳۷	۵/۵۷	۲۲۸	۱۰۹	۱۱۷	۳/۷۳	۱۹۳	۱۱	۸۳	۳/۹۴
۱۹۴	۱۳۸	۱۳۹	۵/۵۷	۲۲۹	۱۱۰	۱۱۸	۳/۷۳	۱۹۴	۱۲	۸۳	۵/۷۴

ادامه جدول (الف-۱۶)

شماره	ابتدا	انتهای	سطح مقطع	شماره	ابتدا	انتهای	سطح مقطع	شماره	ابتدا	انتهای	سطح مقطع	شماره
۲۶۵	۳	۸۴	۷/۳۳	۳۰۰	۲۲	۹۲	۱۵/۶	۳۳۵	۳۱	۱۰۱	۳/۲۵	۲۶۵
۲۶۶	۴	۸۴	۸/۶۲	۳۰۱	۱۳	۹۳	۲/۵۴	۳۳۶	۳۲	۱۰۱	۵/۷۴	۲۶۶
۲۶۷	۱۲	۸۴	۱۱/۲	۳۰۲	۱۴	۹۳	۷/۰۷	۳۳۷	۲۳	۱۰۲	۳/۷۳	۲۶۷
۲۶۸	۱۳	۸۴	۱۱/۲	۳۰۳	۲۲	۹۳	۵/۷۴	۳۳۸	۲۴	۱۰۲	۳/۰۷	۲۶۸
۲۶۹	۴	۸۵	۷/۳۳	۳۰۴	۲۳	۹۳	۹/۰۶	۳۳۹	۳۲	۱۰۲	۵/۷۴	۲۶۹
۲۷۰	۵	۸۵	۵/۷۴	۳۰۵	۱۴	۹۴	۷/۰۷	۳۴۰	۳۳	۱۰۲	۳/۲۵	۲۷۰
۲۷۱	۱۳	۸۵	۱۳/۲	۳۰۶	۱۵	۹۴	۲/۵۴	۳۴۱	۲۴	۱۰۳	۳/۷۳	۲۷۱
۲۷۲	۱۴	۸۵	۵/۷۴	۳۰۷	۲۳	۹۴	۹/۰۶	۳۴۲	۲۵	۱۰۳	۴/۸۳	۲۷۲
۲۷۳	۵	۸۶	۵/۷۴	۳۰۸	۲۴	۹۴	۵/۷۴	۳۴۳	۳۳	۱۰۳	۴/۵۳	۲۷۳
۲۷۴	۶	۸۶	۷/۳۳	۳۰۹	۱۵	۹۵	۳/۷۳	۳۴۴	۳۴	۱۰۳	۲/۵۴	۲۷۴
۲۷۵	۱۴	۸۶	۵/۷۴	۳۱۰	۱۶	۹۵	۳/۲۵	۳۴۵	۲۵	۱۰۴	۵/۷۴	۲۷۵
۲۷۶	۱۵	۸۶	۱۳/۲	۳۱۱	۲۴	۹۵	۱۵/۶	۳۴۶	۲۶	۱۰۴	۳/۷۳	۲۷۶
۲۷۷	۶	۸۷	۸/۶۲	۳۱۲	۲۵	۹۵	۷/۳۳	۳۴۷	۳۴	۱۰۴	۴/۵۳	۲۷۷
۲۷۸	۷	۸۷	۷/۳۳	۳۱۳	۱۶	۹۶	۲/۵۴	۳۴۸	۳۵	۱۰۴	۳/۲۵	۲۷۸
۲۷۹	۱۵	۸۷	۱۱/۲	۳۱۴	۱۷	۹۶	۲/۵۴	۳۴۹	۲۶	۱۰۵	۹/۰۶	۲۷۹
۲۸۰	۱۶	۸۷	۱۱/۲	۳۱۵	۲۵	۹۶	۷/۳۳	۳۵۰	۲۷	۱۰۵	۷/۳۳	۲۸۰
۲۸۱	۷	۸۸	۷/۰۷	۳۱۶	۲۶	۹۶	۳/۲۵	۳۵۱	۳۵	۱۰۵	۳/۷۳	۲۸۱
۲۸۲	۸	۸۸	۳/۷۳	۳۱۷	۱۷	۹۷	۳/۲۵	۳۵۲	۳۶	۱۰۵	۴/۵۳	۲۸۲
۲۸۳	۱۶	۸۸	۵/۷۴	۳۱۸	۱۸	۹۷	۳/۲۵	۳۵۳	۲۸	۱۰۶	۹/۰۶	۲۸۳
۲۸۴	۱۷	۸۸	۳/۹۴	۳۱۹	۲۶	۹۷	۸/۶۹	۳۵۴	۲۹	۱۰۶	۹/۰۶	۲۸۴
۲۸۵	۸	۸۹	۴/۸۳	۳۲۰	۲۷	۹۷	۴/۵۳	۳۵۵	۳۷	۱۰۶	۸/۶۹	۲۸۵
۲۸۶	۹	۸۹	۷/۳۳	۳۲۱	۱۹	۹۸	۷/۳۳	۳۵۶	۳۸	۱۰۶	۸/۶۹	۲۸۶
۲۸۷	۱۷	۸۹	۲/۵۴	۳۲۲	۲۰	۹۸	۹/۰۶	۳۵۷	۲۹	۱۰۷	۲/۵۴	۲۸۷
۲۸۸	۱۸	۸۹	۷/۳۳	۳۲۳	۲۸	۹۸	۴/۵۳	۳۵۸	۳۰	۱۰۷	۷/۳۳	۲۸۸
۲۸۹	۱۰	۹۰	۳/۲۵	۳۲۴	۲۹	۹۸	۳/۷۳	۳۵۹	۳۸	۱۰۷	۴/۸۳	۲۸۹
۲۹۰	۱۱	۹۰	۳/۲۵	۳۲۵	۲۰	۹۹	۳/۷۳	۳۶۰	۳۹	۱۰۷	۱۵/۲	۲۹۰
۲۹۱	۱۹	۹۰	۴/۵۳	۳۲۶	۲۱	۹۹	۵/۷۴	۳۶۱	۳۰	۱۰۸	۳/۲۵	۲۹۱
۲۹۲	۲۰	۹۰	۸/۶۹	۳۲۷	۲۹	۹۹	۳/۲۵	۳۶۲	۳۱	۱۰۸	۷/۳۳	۲۹۲
۲۹۳	۱۱	۹۱	۲/۵۴	۳۲۸	۳۰	۹۹	۴/۵۳	۳۶۳	۳۹	۱۰۸	۳/۰۷	۲۹۳
۲۹۴	۱۲	۹۱	۲/۵۴	۳۲۹	۲۱	۱۰۰	۴/۸۳	۳۶۴	۴۰	۱۰۸	۷/۳۳	۲۹۴
۲۹۵	۲۰	۹۱	۳/۲۵	۳۳۰	۲۲	۱۰۰	۳/۷۳	۳۶۵	۳۱	۱۰۹	۷/۳۳	۲۹۵
۲۹۶	۲۱	۹۱	۷/۳۳	۳۳۱	۳۰	۱۰۰	۲/۵۴	۳۶۶	۳۲	۱۰۹	۳/۲۵	۲۹۶
۲۹۷	۱۲	۹۲	۳/۲۵	۳۳۲	۳۱	۱۰۰	۴/۵۳	۳۶۷	۴۰	۱۰۹	۳/۹۴	۲۹۷
۲۹۸	۱۳	۹۲	۳/۷۳	۳۳۳	۲۲	۱۰۱	۳/۰۷	۳۶۸	۴۱	۱۰۹	۲/۵۴	۲۹۸
۲۹۹	۲۱	۹۲	۷/۳۳	۳۳۴	۲۳	۱۰۱	۳/۷۳	۳۶۹	۳۲	۱۱۰	۳/۲۵	۲۹۹

ادامه جدول (الف-۱۶)

شماره	ابتدا	انتهای	سطح مقطع	شماره	ابتدا	انتهای	سطح مقطع	شماره	ابتدا	انتهای	سطح مقطع
۳۷۰	۳۳	۱۱۰	۷/۳۳	۴۰۵	۴۲	۱۱۹	۷/۳۳	۴۰۵	۴۲	۱۱۹	۷/۳۳
۳۷۱	۴۱	۱۱۰	۲/۵۴	۴۰۶	۴۳	۱۱۹	۲/۵۴	۴۰۶	۴۳	۱۱۹	۲/۵۴
۳۷۲	۴۲	۱۱۰	۳/۹۴	۴۰۷	۵۱	۱۱۹	۳/۹۴	۴۰۷	۵۱	۱۱۹	۳/۹۴
۳۷۳	۳۳	۱۱۱	۷/۳۳	۴۰۸	۵۲	۱۱۹	۷/۳۳	۴۰۸	۵۲	۱۱۹	۷/۳۳
۳۷۴	۳۴	۱۱۱	۳/۲۵	۴۰۹	۴۳	۱۲۰	۳/۲۵	۴۰۹	۴۳	۱۲۰	۳/۲۵
۳۷۵	۴۲	۱۱۱	۷/۳۳	۴۱۰	۴۴	۱۲۰	۷/۳۳	۴۱۰	۴۴	۱۲۰	۷/۳۳
۳۷۶	۴۳	۱۱۱	۳/۰۷	۴۱۱	۵۲	۱۲۰	۳/۰۷	۴۱۱	۵۲	۱۲۰	۳/۰۷
۳۷۷	۳۴	۱۱۲	۷/۳۳	۴۱۲	۵۳	۱۲۰	۷/۳۳	۴۱۲	۵۳	۱۲۰	۷/۳۳
۳۷۸	۳۵	۱۱۲	۲/۵۴	۴۱۳	۴۴	۱۲۱	۲/۵۴	۴۱۳	۴۴	۱۲۱	۲/۵۴
۳۷۹	۴۳	۱۱۲	۱۵/۲	۴۱۴	۴۵	۱۲۱	۱۵/۲	۴۱۴	۴۵	۱۲۱	۱۵/۲
۳۸۰	۴۴	۱۱۲	۴/۸۳	۴۱۵	۵۳	۱۲۱	۴/۸۳	۴۱۵	۵۳	۱۲۱	۴/۸۳
۳۸۱	۳۵	۱۱۳	۹/۰۶	۴۱۶	۵۴	۱۲۱	۹/۰۶	۴۱۶	۵۴	۱۲۱	۹/۰۶
۳۸۲	۳۶	۱۱۳	۹/۰۶	۴۱۷	۴۶	۱۲۲	۹/۰۶	۴۱۷	۴۶	۱۲۲	۹/۰۶
۳۸۳	۴۴	۱۱۳	۸/۶۹	۴۱۸	۴۷	۱۲۲	۸/۶۹	۴۱۸	۴۷	۱۲۲	۸/۶۹
۳۸۴	۴۵	۱۱۳	۸/۶۹	۴۱۹	۵۵	۱۲۲	۸/۶۹	۴۱۹	۵۵	۱۲۲	۸/۶۹
۳۸۵	۳۷	۱۱۴	۸/۶۹	۴۲۰	۵۶	۱۲۲	۸/۶۹	۴۲۰	۵۶	۱۲۲	۸/۶۹
۳۸۶	۳۸	۱۱۴	۸/۶۹	۴۲۱	۴۷	۱۲۳	۸/۶۹	۴۲۱	۴۷	۱۲۳	۸/۶۹
۳۸۷	۴۶	۱۱۴	۹/۰۶	۴۲۲	۴۸	۱۲۳	۹/۰۶	۴۲۲	۴۸	۱۲۳	۹/۰۶
۳۸۸	۴۷	۱۱۴	۹/۰۶	۴۲۳	۵۶	۱۲۳	۹/۰۶	۴۲۳	۵۶	۱۲۳	۹/۰۶
۳۸۹	۳۸	۱۱۵	۴/۸۳	۴۲۴	۵۷	۱۲۳	۴/۸۳	۴۲۴	۵۷	۱۲۳	۴/۸۳
۳۹۰	۳۹	۱۱۵	۱۵/۲	۴۲۵	۴۸	۱۲۴	۱۵/۲	۴۲۵	۴۸	۱۲۴	۱۵/۲
۳۹۱	۴۷	۱۱۵	۲/۵۴	۴۲۶	۴۹	۱۲۴	۲/۵۴	۴۲۶	۴۹	۱۲۴	۲/۵۴
۳۹۲	۴۸	۱۱۵	۷/۳۳	۴۲۷	۵۷	۱۲۴	۷/۳۳	۴۲۷	۵۷	۱۲۴	۷/۳۳
۳۹۳	۳۹	۱۱۶	۳/۰۷	۴۲۸	۵۸	۱۲۴	۳/۰۷	۴۲۸	۵۸	۱۲۴	۳/۰۷
۳۹۴	۴۰	۱۱۶	۷/۳۳	۴۲۹	۴۹	۱۲۵	۷/۳۳	۴۲۹	۴۹	۱۲۵	۷/۳۳
۳۹۵	۴۸	۱۱۶	۳/۲۵	۴۳۰	۵۰	۱۲۵	۳/۲۵	۴۳۰	۵۰	۱۲۵	۳/۲۵
۳۹۶	۴۹	۱۱۶	۷/۳۳	۴۳۱	۵۸	۱۲۵	۷/۳۳	۴۳۱	۵۸	۱۲۵	۷/۳۳
۳۹۷	۴۰	۱۱۷	۳/۹۴	۴۳۲	۵۹	۱۲۵	۳/۹۴	۴۳۲	۵۹	۱۲۵	۳/۹۴
۳۹۸	۴۱	۱۱۷	۲/۵۴	۴۳۳	۵۰	۱۲۶	۲/۵۴	۴۳۳	۵۰	۱۲۶	۲/۵۴
۳۹۹	۴۹	۱۱۷	۷/۳۳	۴۳۴	۵۱	۱۲۶	۷/۳۳	۴۳۴	۵۱	۱۲۶	۷/۳۳
۴۰۰	۵۰	۱۱۷	۳/۲۵	۴۳۵	۵۹	۱۲۶	۳/۲۵	۴۳۵	۵۹	۱۲۶	۳/۲۵
۴۰۱	۴۱	۱۱۸	۲/۵۴	۴۳۶	۶۰	۱۲۶	۲/۵۴	۴۳۶	۶۰	۱۲۶	۲/۵۴
۴۰۲	۴۲	۱۱۸	۳/۹۴	۴۳۷	۵۱	۱۲۷	۳/۹۴	۴۳۷	۵۱	۱۲۷	۳/۹۴
۴۰۳	۵۰	۱۱۸	۳/۲۵	۴۳۸	۵۲	۱۲۷	۳/۲۵	۴۳۸	۵۲	۱۲۷	۳/۲۵
۴۰۴	۵۱	۱۱۸	۷/۳۳	۴۳۹	۶۰	۱۲۷	۷/۳۳	۴۳۹	۶۰	۱۲۷	۷/۳۳

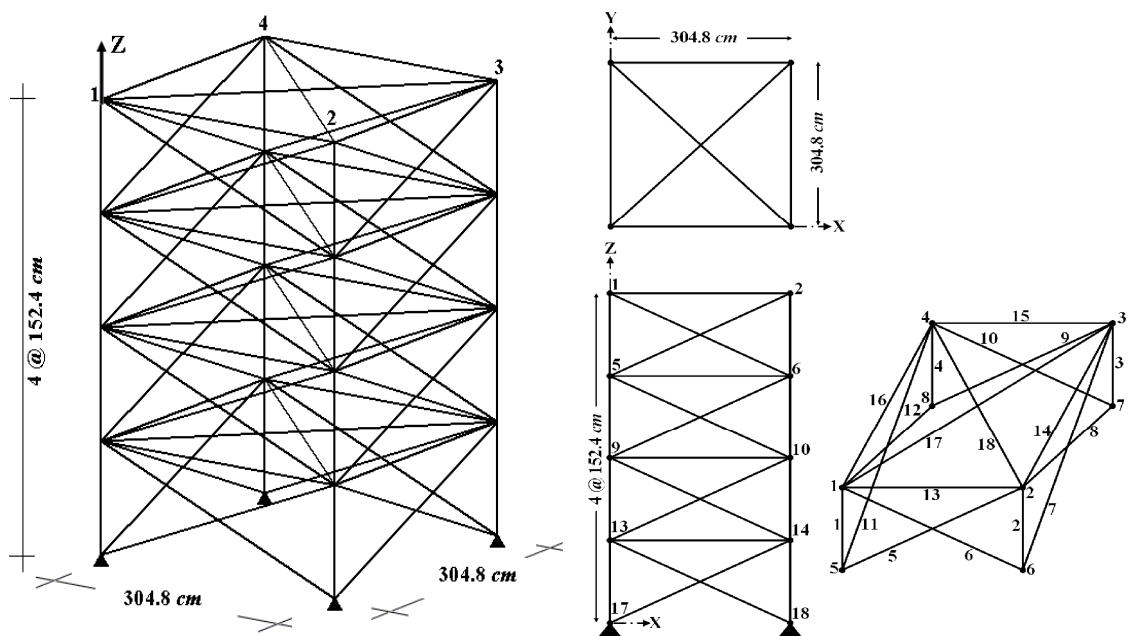
ادامه جدول (الف-۱۶)

شماره	ابتدا	انتهای	سطح مقطع	شماره	ابتدا	انتهای	سطح مقطع	شماره	ابتدا	انتهای	سطح مقطع
۴۷۵	۷۰	۱۳۶	۲/۵۴	۴۸۸	۷۵	۱۳۹	۷/۰۷	۵۰۱	۶۹	۱۴۳	۱۱/۲
۴۷۶	۷۱	۱۳۶	۲/۵۴	۴۸۹	۶۶	۱۴۰	۱۱/۲	۵۰۲	۷۰	۱۴۳	۱۱/۲
۴۷۷	۶۲	۱۳۷	۸/۶۹	۴۹۰	۶۷	۱۴۰	۱۱/۲	۵۰۳	۷۸	۱۴۳	۸/۶۲
۴۷۸	۶۳	۱۳۷	۴/۵۳	۴۹۱	۷۵	۱۴۰	۷/۳۳	۵۰۴	۷۹	۱۴۳	۷/۳۳
۴۷۹	۷۱	۱۳۷	۳/۲۵	۴۹۲	۷۶	۱۴۰	۸/۶۲	۵۰۵	۷۰	۱۴۴	۵/۷۴
۴۸۰	۷۲	۱۳۷	۳/۲۵	۴۹۳	۶۷	۱۴۱	۱۳/۲	۵۰۶	۷۱	۱۴۴	۳/۹۴
۴۸۱	۶۴	۱۳۸	۷/۳۳	۴۹۴	۶۸	۱۴۱	۵/۷۴	۵۰۷	۷۹	۱۴۴	۷/۰۷
۴۸۲	۶۵	۱۳۸	۲/۵۴	۴۹۵	۷۶	۱۴۱	۷/۳۳	۵۰۸	۸۰	۱۴۴	۳/۷۳
۴۸۳	۷۳	۱۳۸	۷/۳۳	۴۹۶	۷۷	۱۴۱	۵/۷۴	۵۰۹	۷۱	۱۴۵	۲/۵۴
۴۸۴	۷۴	۱۳۸	۴/۸۳	۴۹۷	۶۸	۱۴۲	۵/۷۴	۵۱۰	۷۲	۱۴۵	۷/۳۳
۴۸۵	۶۵	۱۳۹	۳/۹۴	۴۹۸	۶۹	۱۴۲	۱۳/۲	۵۱۱	۸۰	۱۴۵	۴/۸۳
۴۸۶	۶۶	۱۳۹	۵/۷۴	۴۹۹	۷۷	۱۴۲	۵/۷۴	۵۱۲	۸۱	۱۴۵	۷/۳۳
۴۸۷	۷۴	۱۳۹	۳/۷۳	۵۰۰	۷۸	۱۴۲	۷/۳۳				

الف-۸ بهینه یابی سطح مقطع برج فولادی ۷۲ میله‌ای

در این مثال به بهینه یابی برج فولادی ۷۲ میله‌ای مطابق شکل (الف-۱۵) پرداخته شده است.

برای این سازه، E و ρ به ترتیب برابر $۶۸۹۵۰ MPa$ و $۲۷۶۷/۹۹ kg/m^3$ در نظر گرفته شده است.



شکل (الف-۱۵) - نمای دو بعدی و سه بعدی برج فولادی ۷۲ میله‌ای

۷۲ عضو دکل فولادی در ۱۶ گروه دسته‌بندی شده و محدوده تنش برای اعضای سازه برابر

$MPa \pm 172/375$ و حداکثر تغییرمکان گره‌های فعال سازه برابر $cm \pm 0/635$ فرض شده است.

بارهای مؤثر بر سازه در دو وضعیت بشرح جدول (الف-۱۷) به سازه وارد شده و لیست مقاطع

بشرح جدول (الف-۱۸) دسته‌بندی می‌شود.

جدول (الف-۱۷) بارگذاری مؤثر بر برج فولادی ۷۲ میله‌ای

وضعیت بارگذاری	شماره گره	نیرو در جهت $kN - X$	نیرو در جهت $kN - Y$	نیرو در جهت $kN - Z$
۱	۱	۲۲/۲۵	۲۲/۲۵	-۲۲/۲۵
	۲	--	--	--
	۳	--	--	--
	۴	--	--	--
۲	۱	--	--	-۲۲/۲۵
	۲	--	--	-۲۲/۲۵
	۳	--	--	-۲۲/۲۵
	۴	--	--	-۲۲/۲۵

جدول (الف-۱۸) مجموعه لیست مقاطع

شماره	mm^2	شماره	mm^2	شماره	mm^2	شماره	mm^2	شماره	mm^2	شماره	mm^2
۱	۷۱/۶۱۳	۱۲	۶۴۱/۲۸۹	۲۳	۱۶۹۰/۳۱۹	۳۴	۲۴۹۶/۷۶۹	۴۵	۵۱۴۱/۹۲۵	۵۶	۱۲۱۲۹/۰۰۸
۲	۹۰/۹۶۸	۱۳	۶۴۵/۱۶۰	۲۴	۱۶۹۶/۷۷۱	۳۵	۲۵۰۳/۲۲۱	۴۶	۵۵۰۳/۲۱۵	۵۷	۱۲۸۳۸/۶۸۴
۳	۱۲۶/۴۵۱	۱۴	۷۹۲/۲۵۶	۲۵	۱۸۵۸/۰۶۱	۳۶	۲۶۹۶/۷۶۹	۴۷	۵۹۹۹/۹۸۸	۵۸	۱۴۱۹۳/۵۲۰
۴	۱۶۱/۲۹۰	۱۵	۸۱۶/۷۷۳	۲۶	۱۸۹۰/۳۱۹	۳۷	۲۷۲۲/۵۷۵	۴۸	۶۹۹۹/۹۸۶	۵۹	۱۴۷۷۴/۱۶۴
۵	۱۹۸/۰۶۴	۱۶	۹۳۹/۹۹۸	۲۷	۱۹۹۳/۵۴۴	۳۸	۲۸۹۶/۷۶۸	۴۹	۷۴۱۹/۴۳۰	۶۰	۱۵۸۰۶/۴۲۰
۶	۲۵۲/۲۵۸	۱۷	۱۰۰۸/۳۸۵	۲۸	۷۲۹/۰۳۱	۳۹	۲۹۶۱/۲۸۴	۵۰	۸۷۰۹/۶۶۰	۶۱	۱۷۰۹۶/۷۴۰
۷	۲۸۵/۱۶۱	۱۸	۱۰۴۵/۱۵۹	۲۹	۲۱۸۰/۶۴۱	۴۰	۳۰۹۶/۷۶۸	۵۱	۸۹۶۷/۷۲۴	۶۲	۱۸۰۶۴/۴۸۰
۸	۳۶۳/۲۲۵	۱۹	۱۱۶۱/۲۸۸	۳۰	۲۲۳۸/۷۰۵	۴۱	۳۲۰۶/۴۴۵	۵۲	۹۱۶۱/۲۷۲	۶۳	۱۹۳۵۴/۸۰۰
۹	۳۸۸/۳۸۶	۲۰	۱۲۸۳/۸۶۸	۳۱	۲۲۹۰/۳۱۸	۴۲	۳۳۰۳/۲۱۹	۵۳	۹۹۹۹/۹۸۰	۶۴	۲۱۶۱۲/۸۶۰
۱۰	۴۹۴/۱۹۳	۲۱	۱۳۷۴/۱۹۱	۳۲	۲۳۴۱/۹۳۱	۴۳	۳۷۰۳/۲۱۸	۵۴	۱۰۳۲۲/۵۶۰		
۱۱	۵۰۶/۴۵۱	۲۲	۱۵۳۵/۴۸۱	۳۳	۲۴۷۷/۴۱۴	۴۴	۴۶۵۸/۰۵۵	۵۵	۱۰۹۰۳/۲۰۴		

نتایج طرح بهینه سازه مذکور براساس دیگر مراجع در جدول (الف-۱۹) و برای ایده‌ها و روش‌های

پیشنهادی رساله حاضر در جدول (الف-۲۰) ارائه شده است.

جدول (الف-۱۹) نتایج طرح بهینه برج فولادی ۷۲ میله‌ای براساس روش‌های مراجع مختلف - mm^2

شماره گروه	مرجع [۴۵]	مرجع [۴۵]	مرجع [۴۵]	مرجع [۸۵]	مرجع [۵۴]	مرجع [۵۱]	مرجع [۸۶]	مرجع [۸۷]	
	PSO	PSOPC	HPSO	GA	DHPSACO	CSS	ICA	CSA	
a_1-a_4	۴۶۵۸/۰۵۵	۲۸۹۶/۷۶۸	۳۲۰۶/۴۴۵	۱۲۶/۴۵۱	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۲۸۳/۸۶۸	۱۲۸۳/۸۶۸	۱۱۶۱/۲۸۸	
a_5-a_{12}	۱۱۶۱/۲۸۸	۹۳۹/۹۹۸	۷۹۲/۲۵۶	۳۸۸/۳۸۶	۲۸۵/۱۶۱	۲۸۵/۱۶۱	۲۸۵/۱۶۱	۳۶۳/۲۲۵	
$a_{13}-a_{16}$	۷۲۹/۰۳۱	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۱۹۸/۰۶۴	۹۰/۹۶۸	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	
$a_{17}-a_{18}$	۱۲۶/۴۵۱	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۴۹۴/۱۹۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۹۰/۹۶۸	۷۱/۶۱۳	
$a_{19}-a_{22}$	۱۹۹۳/۵۴۴	۱۶۹۰/۳۱۹	۱۸۵۸/۰۶۱	۲۵۲/۲۵۸	۷۹۲/۲۵۶	۶۴۱/۲۸۹	۷۹۲/۲۵۶	۸۱۶/۷۷۳	
$a_{23}-a_{30}$	۵۰۶/۴۵۱	۷۲۹/۰۳۱	۹۳۹/۹۹۸	۲۵۲/۲۵۸	۳۶۳/۲۲۵	۳۶۳/۲۲۵	۳۸۸/۳۸۶	۳۶۳/۲۲۵	
$a_{31}-a_{34}$	۳۶۳/۲۲۵	۱۲۶/۴۵۱	۹۰/۹۶۸	۹۰/۹۶۸	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	
$a_{35}-a_{36}$	۵۰۶/۴۵۱	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۹۰/۹۶۸	۷۱/۶۱۳	
$a_{37}-a_{40}$	۱۹۹۳/۵۴۴	۸۱۶/۷۷۳	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۱۶۱/۲۸۸	۳۶۳/۲۲۵	۳۶۳/۲۲۵	۳۶۳/۲۲۵	۳۶۳/۲۲۵	
$a_{41}-a_{48}$	۷۹۲/۲۵۶	۹۳۹/۹۹۸	۷۹۲/۲۵۶	۳۸۸/۳۸۶	۳۶۳/۲۲۵	۳۶۳/۲۲۵	۳۶۳/۲۲۵	۲۸۵/۱۶۱	
$a_{49}-a_{52}$	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۹۰/۹۶۸	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	
$a_{53}-a_{54}$	۳۶۳/۲۲۵	۷۱/۶۱۳	۱۲۶/۴۵۱	۱۹۸/۰۶۴	۱۶۱/۲۹	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	
$a_{55}-a_{58}$	۱۲۸۳/۸۶۸	۲۸۵/۱۶۱	۲۵۲/۲۵۸	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۲۶/۴۵۱	۱۲۶/۴۵۱	۱۲۶/۴۵۱	۱۲۶/۴۵۱	
$a_{59}-a_{66}$	۱۰۴۵/۱۵۹	۹۳۹/۹۹۸	۹۳۹/۹۹۸	۴۹۴/۱۹۳	۹۳۹/۹۹۸	۳۶۳/۲۲۵	۳۶۳/۲۲۵	۳۸۸/۳۸۶	
$a_{67}-a_{70}$	۱۰۰۸/۳۸۵	۷۹۲/۲۵۶	۴۹۴/۱۹۳	۹۰/۹۶۸	۲۸۵/۱۶۱	۲۸۵/۱۶۱	۱۹۸/۰۶۴	۲۵۲/۲۵۸	
$a_{71}-a_{72}$	۸۱۶/۷۷۳	۹۳۹/۹۹۸	۱۰۰۸/۳۸۵	۷۱/۶۱۳	۳۶۳/۲۲۵	۴۹۴/۱۹۳	۳۸۸/۳۸۶	۳۶۳/۲۲۵	
وزن - kg	۵۴۸/۶۱۱	۴۲۷/۲۰۲	۴۲۳/۲۴۳	۱۹۳/۷۷۶	۱۷۸/۴۳۴	۱۷۸/۲۸۴	۱۷۸/۱۸۹	۱۷۶/۸۴۲	

جدول (الف-۲۰) نتایج طرح بهینه برج فولادی ۷۲ میله‌ای براساس ایده‌ها و روش‌های پیشنهادی رساله

شماره گروه	MSM-GA	حالت ۲ ایده انفصال فضای طراحی در GA	حالت ۲ ایده انفصال فضای طراحی در HACOHSGA-T	روش پیشنهادی MHSM	روش پیشنهادی MP
a_1-a_4	۱۲۸۳/۸۶۸	۱۳۷۴/۱۹۱	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۲۸۳/۸۶۸
a_5-a_{12}	۳۸۸/۳۸۶	۳۶۳/۲۲۵	۳۶۳/۲۲۵	۳۶۳/۲۲۵	۳۶۳/۲۲۵
$a_{13}-a_{16}$	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳
$a_{17}-a_{18}$	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳
$a_{19}-a_{22}$	۸۱۶/۷۷۳	۷۹۲/۲۵۶	۸۱۶/۷۷۳	۸۱۶/۷۷۳	۷۹۲/۲۵۶
$a_{23}-a_{30}$	۲۸۵/۱۶۱	۲۸۵/۱۶۱	۳۶۳/۲۲۵	۳۶۳/۲۲۵	۲۸۵/۱۶۱
$a_{31}-a_{34}$	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳
$a_{35}-a_{36}$	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳
$a_{37}-a_{40}$	۲۸۵/۱۶۱	۲۸۵/۱۶۱	۲۸۵/۱۶۱	۲۸۵/۱۶۱	۳۶۳/۲۲۵
$a_{41}-a_{48}$	۳۸۸/۳۸۶	۳۶۳/۲۲۵	۳۶۳/۲۲۵	۳۶۳/۲۲۵	۳۶۳/۲۲۵
$a_{49}-a_{52}$	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۹۰/۹۶۸
$a_{53}-a_{54}$	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳	۹۰/۹۶۸	۷۱/۶۱۳	۷۱/۶۱۳
$a_{55}-a_{58}$	۱۲۶/۴۵۱	۱۲۶/۴۵۱	۱۲۶/۴۵۱	۱۲۶/۴۵۱	۱۲۶/۴۵۱

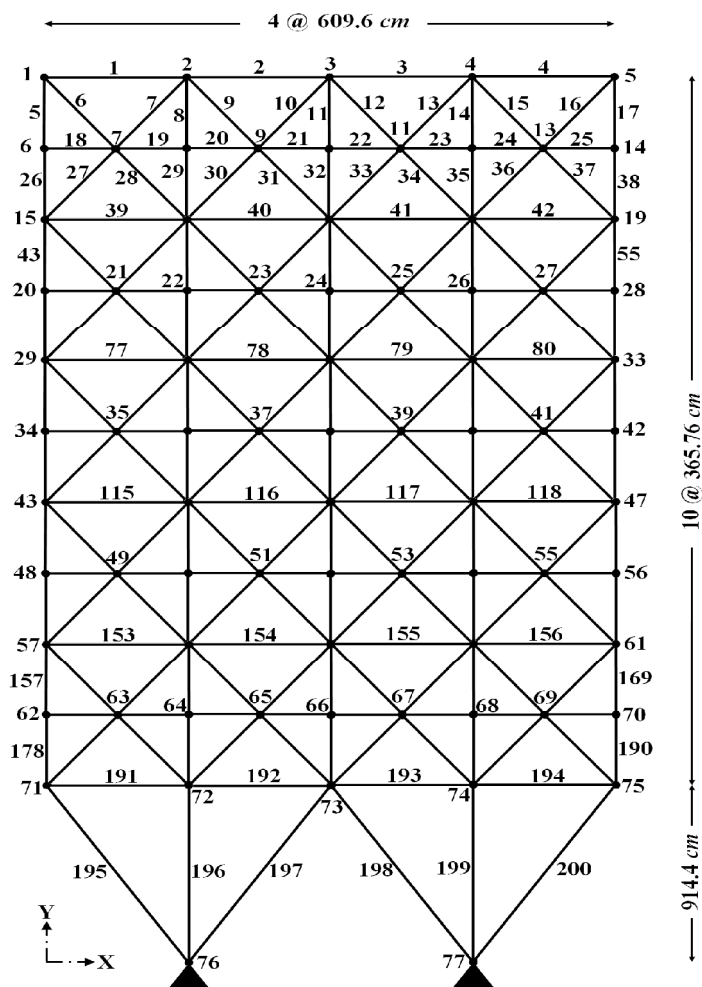
ادامه جدول (الف-۲۰)

شماره گروه	MSM-GA	حالت ۲ ایده انفضال فضای طراحی در GA	حالت ۲ ایده انفضال فضای طراحی در HACO HSGA-T	روش پیشنهادی	MHSM	روش پیشنهادی MP
$a_{59-a_{66}}$	۳۶۳/۲۲۵	۳۶۳/۲۲۵	۳۶۳/۲۲۵	۳۶۳/۲۲۵	۳۶۳/۲۲۵	۳۶۳/۲۲۵
$a_{67-a_{70}}$	۲۵۲/۲۵۸	۲۵۲/۲۵۸	۲۵۲/۲۵۸	۲۵۲/۲۵۸	۲۵۲/۲۵۸	۲۵۲/۲۵۸
$a_{71-a_{72}}$	۲۸۵/۱۶۱	۳۶۳/۲۲۵	۲۵۲/۲۵۸	۳۸۸/۳۸۶	۳۸۸/۳۸۶	۳۶۳/۲۲۵
وزن - kg	۱۷۷/۶۳	۱۷۶/۸۰۶	۱۷۷/۳۳۲	۱۷۶/۹۸۳	۱۷۶/۷۵۸	۱۷۷/۲۵
میانگین	--	--	--	--	--	۱۷۹/۵۵۲

الف-۹ بهینه‌یابی سطح مقطع خرپای مستوی ۲۰۰ میله‌ای

در این مثال به بهینه‌یابی خرپای مستوی ۲۰۰ میله‌ای بشرح شکل (الف-۱۶) پرداخته شده

است. مقادیر E و ρ به ترتیب برابر $206842/8 MPa$ و $7833/412 kg/m^3$ در نظر گرفته شده است.



شکل (الف-۱۶) - خرپای مستوی ۲۰۰ میله‌ای

اعضای سازه در ۲۹ گروه دسته‌بندی شده و تنها قید تنش برای کلیه اعضای خرپا با مقدار مجاز $MPa \pm 68/9476$ فرض شده است. بارهای مؤثر بر سازه در سه وضعیت به خرپا وارد می‌شوند. در وضعیت ۱ بار $4/448 kN$ به گره‌های ۱، ۶، ۱۵، ۲۰، ۲۹، ۳۴، ۴۳، ۴۸، ۵۷، ۶۲ و ۷۱ در جهت X وارد می‌شود. در وضعیت دوم بارگذاری، بار $44/48 kN$ به گره‌های ۱، ۲، ...، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ...، ۲۰، ۲۲، ۲۴، ۲۵، ...، ۷۳، ۷۴ و ۷۵ در جهت Y وارد می‌شود. وضعیت سوم نیز ترکیب وضعیت‌های ۱ و ۲ است. لیست مقاطع موجود برای بهینه‌یابی خرپای ۲۰۰ میله‌ای بشرح جدول (الف-۲۱) تعریف می‌شود.

جدول (الف-۲۱) مجموعه لیست مقاطع برای خرپای مستوی ۲۰۰ میله‌ای

شماره	mm^2	شماره	mm^2	شماره	mm^2	شماره	mm^2	شماره	mm^2
۱	۶۴/۵۱۶	۷	۷۵۷/۴۱۷۸	۱۳	۱۸۰۶/۴۴۸	۱۹	۴۲۳۹/۹۹۱۵	۲۵	۹۲۱۹/۳۳۶۳
۲	۲۲۳/۸۷۰۵	۸	۸۵۹/۹۹۸۲	۱۴	۲۰۱۹/۹۹۵۹	۲۰	۴۶۳۹/۹۹۰۷	۲۶	۱۱۰۷۷/۳۹۷۲
۳	۲۸۳/۸۷۰۴	۹	۹۵۹/۹۹۸	۱۵	۲۲۹/۹۹۵۴	۲۱	۵۴۹۹/۹۸۹	۲۷	۱۲۳۷۴/۱۶۸۸
۴	۳۴۷/۷۴۱۲	۱۰	۱۱۳۸/۰۶۲۲	۱۶	۲۴۵۹/۹۹۵	۲۲	۵۹۹۹/۹۸۸	۲۸	۱۵۲۷۷/۳۸۸۷
۵	۶۱۵/۴۸۲۶	۱۱	۱۳۸۱/۹۳۲۷	۱۷	۳۰۹۹/۹۹۳۷	۲۳	۶۹۹۹/۹۸۶	۲۹	۱۸۱۱۶/۰۹۲۸
۶	۶۹۷/۴۱۷۹	۱۲	۱۷۳۹/۹۹۶۵	۱۸	۳۸۳۹/۹۹۲۳	۲۴	۸۵۹۹/۹۸۲۸	۳۰	۲۱۷۴۱/۸۹۲

نتایج مربوط به طرح بهینه برای خرپای ۲۰۰ میله‌ای بشرح جدول (الف-۲۲) براساس روش‌های مختلف پیشنهادی در قیاس با دیگر مراجع ارائه شده است.

جدول (الف-۲۲) نتایج طرح بهینه خرپای ۲۰۰ میله‌ای براساس روش نوین ترکیباتی HACOHS-GA-T - mm^2

شماره	شماره اعضا	مرجع [۸۸]			مرجع [۳۰]		
		GA	GA	MSM-GA	HACOHS-GA-T	روش پیشنهادی	روش پیشنهادی
۱	۴، ۳، ۲، ۱	--	۲۲۳/۸۷۰۵	۲۲۳/۸۷۰۵	۲۲۳/۸۷۰۵	۲۲۳/۸۷۰۵	۲۲۳/۸۷۰۵
۲	۱۷، ۱۴، ۱۱، ۸، ۵	--	۶۹۷/۴۱۷۹	۶۹۷/۴۱۷۹	۶۹۷/۴۱۷۹	۶۹۷/۴۱۷۹	۶۹۷/۴۱۷۹
۳	۲۴، ۲۳، ۲۲، ۲۱، ۲۰، ۱۹	--	۶۴/۵۱۶	۶۴/۵۱۶	۶۴/۵۱۶	۶۴/۵۱۶	۶۴/۵۱۶
۴	۱۷۷	--	۶۴/۵۱۶	۶۴/۵۱۶	۶۴/۵۱۶	۶۴/۵۱۶	۶۴/۵۱۶
۵	۳۸، ۳۵، ۳۲، ۲۹، ۲۶	--	۱۳۸۱/۹۳۲۷	۱۳۸۱/۹۳۲۷	۱۳۸۱/۹۳۲۷	۱۳۸۱/۹۳۲۷	۱۳۸۱/۹۳۲۷
۶	۳۱، ۳۰، ۲۸، ۲۷، ۱۶، ۱۵، ۱۳، ۱۲، ۱۰، ۹، ۷، ۶	--	۲۲۳/۸۷۰۵	۲۲۳/۸۷۰۵	۲۲۳/۸۷۰۵	۲۲۳/۸۷۰۵	۲۲۳/۸۷۰۵

ادامه جدول (الف-۲۲)

مرجع [۳۰] روش پیشنهادی روش پیشنهادی				شماره اعضا	شماره
HACOHSGA-T	MSM-GA	GA	GA		
۶۴/۵۱۶	۶۴/۵۱۶	۶۴/۵۱۶	--	۴۲، ۴۱، ۴۰، ۳۹	۷
۲۰۱۹/۹۹۵۹	۲۰۱۹/۹۹۵۹	۲۰۱۹/۹۹۵۹	--	۵۵، ۵۲، ۴۹، ۴۶، ۴۳	۸
۶۴/۵۱۶	۶۴/۵۱۶	۲۲۳/۸۷۰۵	--	۶۲، ۶۱، ۶۰، ۵۹، ۵۸، ۵۷	۹
۳۰۹۹/۹۹۳۷	۳۰۹۹/۹۹۳۷	۳۰۹۹/۹۹۳۷	--	۷۶، ۷۳، ۷۰، ۶۷، ۶۴	۱۰
۲۸۳/۸۷۰۴	۲۸۳/۸۷۰۴	۲۸۳/۸۷۰۴	--	۶۸، ۶۶، ۶۵، ۵۴، ۵۳، ۵۱، ۵۰، ۴۸، ۴۷، ۴۵، ۴۴	۱۱
۶۴/۵۱۶	۲۲۳/۸۷۰۵	۲۸۳/۸۷۰۴	--	۷۵، ۷۴، ۷۲، ۷۱، ۶۹	۱۲
۳۸۳۹/۹۹۲۳	۳۸۳۹/۹۹۲۳	۳۸۳۹/۹۹۲۳	--	۸۰، ۷۹، ۷۸، ۷۷	۱۳
۶۴/۵۱۶	۶۴/۵۱۶	۲۲۳/۸۷۰۵	--	۹۳، ۹۰، ۸۷، ۸۴، ۸۱	۱۴
۴۲۳۹/۹۹۱۵	۴۲۳۹/۹۹۱۵	۴۲۳۹/۹۹۱۵	--	۱۰۰، ۹۹، ۹۸، ۹۷، ۹۶، ۹۵	۱۵
۳۴۷/۷۴۱۲	۶۱۵/۴۸۲۶	۶۱۵/۴۸۲۶	--	۱۱۴، ۱۱۱، ۱۰۸، ۱۰۵، ۱۰۲	۱۶
۱۱۳۸/۰۶۲۲	۲۲۳/۸۷۰۵	۲۲۳/۸۷۰۵	--	۱۰۴، ۱۰۳، ۹۲، ۹۱، ۸۹، ۸۸، ۸۶، ۸۵، ۸۳، ۸۲	۱۶
۵۴۹۹/۹۸۹	۵۴۹۹/۹۸۹	۵۴۹۹/۹۸۹	--	۱۱۳، ۱۱۲، ۱۱۰، ۱۰۹، ۱۰۷، ۱۰۶	۱۷
۶۴/۵۱۶	۶۴/۵۱۶	۶۴/۵۱۶	--	۱۱۸، ۱۱۷، ۱۱۶، ۱۱۵	۱۸
۵۹۹۹/۹۸۸	۵۹۹۹/۹۸۸	۵۹۹۹/۹۸۸	--	۱۳۱، ۱۲۸، ۱۲۵، ۱۲۲، ۱۱۹	۱۹
۸۵۹/۹۹۸۲	۶۱۵/۴۸۲۶	۶۱۵/۴۸۲۶	--	۱۳۸، ۱۳۷، ۱۳۶، ۱۳۵، ۱۳۴، ۱۳۳	۲۰
۳۴۷/۷۴۱۲	۹۵۹/۹۹۸	۱۱۳۸/۰۶۲۲	--	۱۵۲، ۱۴۹، ۱۴۶، ۱۴۳، ۱۴۰	۲۱
۸۵۹۹/۹۸۲۸	۸۵۹۹/۹۸۲۸	۸۵۹۹/۹۸۲۸	--	۱۳۰، ۱۲۹، ۱۲۷، ۱۲۶، ۱۲۴، ۱۲۳، ۱۲۱، ۱۲۰	۲۱
۱۱۳۸/۰۶۲۲	۲۸۳/۸۷۰۴	۲۲۳/۸۷۰۵	--	۱۵۱، ۱۵۰، ۱۴۸، ۱۴۷، ۱۴۵، ۱۴۴، ۱۴۲، ۱۴۱	۲۲
۸۵۹۹/۹۸۲۸	۸۵۹۹/۹۸۲۸	۸۵۹۹/۹۸۲۸	--	۱۵۶، ۱۵۵، ۱۵۴، ۱۵۳	۲۳
۱۷۳۹/۹۹۶۵	۱۷۳۹/۹۹۶۵	۱۳۸۱/۹۳۲۷	--	۱۶۹، ۱۶۶، ۱۶۳، ۱۶۰، ۱۵۷	۲۴
۲۲۹/۹۹۵۴	۲۴۵۹/۹۹۵	۳۰۹۹/۹۹۳۷	--	۱۷۶، ۱۷۵، ۱۷۴، ۱۷۳، ۱۷۲، ۱۷۱	۲۵
۵۴۹۹/۹۸۹	۵۴۹۹/۹۸۹	۵۹۹۹/۹۸۸	--	۱۹۰، ۱۸۷، ۱۸۴، ۱۸۱، ۱۷۸	۲۶
۱۱۰۷۷/۳۹۷۲	۱۱۰۷۷/۳۹۷۲	۱۱۰۷۷/۳۹۷۲	--	۱۶۸، ۱۶۷، ۱۶۵، ۱۶۴، ۱۶۲، ۱۶۱، ۱۵۹، ۱۵۸	۲۶
۱۲۷۱۴/۲۸۵	۱۲۷۱۸/۰۷۷	۱۲۹۴۷/۳۴۷	۱۶۰۸۸۲/۰۷	۱۸۹، ۱۸۸، ۱۸۶، ۱۸۵، ۱۸۳، ۱۸۲، ۱۸۰، ۱۷۹	۲۷
				۱۹۴، ۱۹۳، ۱۹۲، ۱۹۱	۲۸
				۲۰۰، ۱۹۸، ۱۹۷، ۱۹۵	۲۹
				۱۹۹، ۱۹۶	
				وزن - kg	

الف-۱۰ بهینه‌یابی پیکربندی خریای ۱۰ میله‌ای

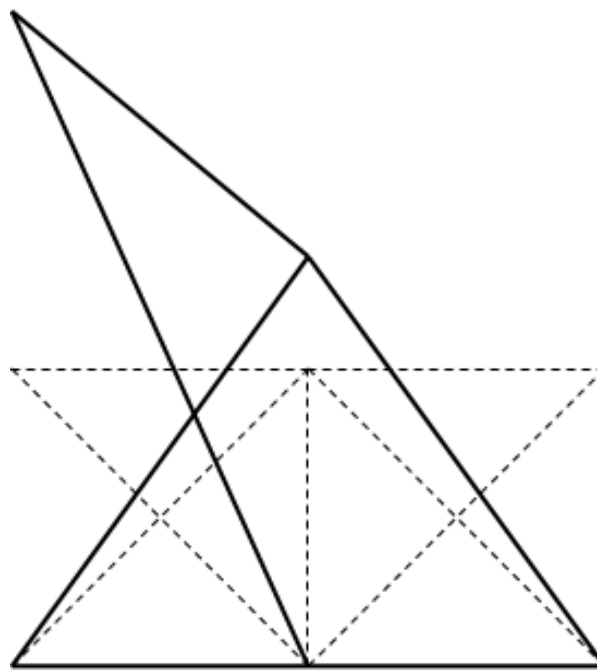
در این مثال به بهینه‌یابی سطح مقطع، توپولوژی و هندسه (پیکربندی) خریای ۱۰ میله‌ای

پرداخته شده است. شکل (الف-۱) سازه موردنظر را نمایش داده و مقادیر بارهای اعمالی و مشخصات

مصالح مصرفی بشرح بخش الف-۲ در نظر گرفته می‌شود. مقادیر مجاز تنش‌های فشاری و کششی و نیز مقدار تغییر مکان مجاز گرهی نیز بشرح بخش الف-۲ منظور شده است. لیست مقاطع موجود بشرح جدول (الف-۱) تعریف شده و محدوده مجاز متغیرهای طراحی هندسی نیز با ضریب دقت $25/4 \text{ cm}$ بشرح زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$254 \text{ cm} < y_1 < 457.2 \text{ cm} \quad , \quad 254 \text{ cm} < y_3 < 457.2 \text{ cm} \quad , \quad 254 \text{ cm} < y_5 < 457.2 \text{ cm}$$

نتایج عددی طرح بهینه سطح مقطع اعضای سازه مذکور به همراه نتایج دیگر مراجع در جدول (الف-۲۳) و طرح بهینه توپولوژی و هندسی بشرح شکل (الف-۱۷) ارائه شده است.



شکل (الف-۱۷) - طرح بهینه توپولوژی و هندسی خربای ۱۰ میله‌ای

جدول (الف-۲۳) نتایج طرح بهینه پیکربندی خربای ۱۰ میله‌ای براساس روش MHSM

MHSM	مرجع [۷۲]	مرجع [۷۱]	مرجع [۷۵]	شماره گروه
۸۷/۱	۷۴/۱۹	۸۷/۱	۶۳/۸۷۱	$a_1 - \text{cm}^2$
--	--	--	۶۰/۶۴۵	$a_2 - \text{cm}^2$
۷۴/۱۹	۷۴/۱۹	۵۱/۴۲	۷۴/۱۹	$a_3 - \text{cm}^2$
۴۶/۵۸	۳۷/۰۳	۴۶/۵۸	۹/۶۷۷	$a_4 - \text{cm}^2$
--	--	۱۰/۴۵	--	$a_5 - \text{cm}^2$
--	--	--	۷۷/۴۲	$a_6 - \text{cm}^2$

ادامه جدول (الف-۲۳)

شماره گروه	مرجع [۷۵]	مرجع [۷۱]	مرجع [۷۲]	MHSM
$a_7 - cm^2$	۷۴/۱۹	۲۸/۹۷	۳۷/۰۳	۳۷/۰۳
$a_8 - cm^2$	۲۳/۲۲۶	۲۰/۱۹	۲۴/۷۷	۲۱/۸۱
$a_9 - cm^2$	--	۸۷/۱	۸۷/۱	۷۴/۱۹
$a_{10} - cm^2$	۶۷/۰۹۷	--	--	--
$y_1 - cm$	۴۷۳/۷۱	--	--	--
$y_3 - cm$	۱۴۰۸/۴۳	۱۳۴۰/۸۶۶	۱۲۸۶/۳۰۸	۱۲۶۰/۸
$y_5 - cm$	۱۹۹۸/۷۲۶	۲۲۵۷/۵۵۲	۲۰۰۵/۹۱۶	۲۰۱۵/۱۲۴
وزن - kN	۱۴/۴۷۴	۱۲/۵۱۶	۱۲/۱۱۳	۱۲/۰۸۳

الف-۱۱ بهینه‌یابی پیکربندی خرپای فضایی ۲۵ میله‌ای

در این مثال به بهینه‌یابی سطح مقطع، توپولوژی و هندسه خرپای فضایی ۲۵ میله‌ای پرداخته می‌شود. این سازه در شکل (الف-۳) قابل مشاهده است. برای تمامی اعضای خرپا، E و γ به ترتیب برابر $MPa \times 10^4$ و $0.272 N/cm^3$ فرض می‌شود. اعضای سازه مذکور در ۸ گروه بشرح جدول (الف-۴) دسته‌بندی شده و مقدار تنش مجاز کششی و فشاری برای تمامی اعضا برابر $MPa \pm 275/8$ و تغییرمکان مجاز گرهی برای تمامی گره‌های فعال سازه برابر $cm \ 0.89$ در نظر گرفته می‌شود. بارهای وارد بر سازه در یک وضعیت بشرح جدول (الف-۲۴) تعریف شده است.

جدول (الف-۲۴) بارگذاری مؤثر بر خرپای فضایی ۲۵ میله‌ای

شماره گره	نیرو در جهت $X - kN$	نیرو در جهت $Y - kN$	نیرو در جهت $Z - kN$
۱	۴/۴۵۴	-۴۴/۵۳۷	-۴۴/۵۳۷
۲	--	-۴۴/۵۳۷	-۴۴/۵۳۷
۳	۲/۲۲۷	--	--
۶	۲/۶۷۲	--	--

لیست مقاطع به صورت مجموعه $\{S\}$ بشرح زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$\{S\} = \{0.645 \times I (I=1, \dots, 26), 18.064, 19.335, 20.645, 21.935\}; cm^2$$

محدوده مجاز متغیرهای طراحی هندسی نیز با ضریب دقت $cm \ 0.254$ بشرح زیر تعریف می‌شود.

$$50.8 \text{ cm} < x_4 = x_5 = -x_3 = -x_6 < 152.4 \text{ cm} \quad , \quad 101.6 \text{ cm} < x_8 = x_9 = -x_7 = -x_{10} < 203.2 \text{ cm}$$

$$101.6 \text{ cm} < y_3 = y_4 = -y_5 = -y_6 < 203.2 \text{ cm} \quad , \quad 254 \text{ cm} < y_7 = y_8 = -y_9 = -y_{10} < 355.6 \text{ cm}$$

$$228.6 \text{ cm} < z_3 = z_4 = z_5 = z_6 < 330.2 \text{ cm}$$

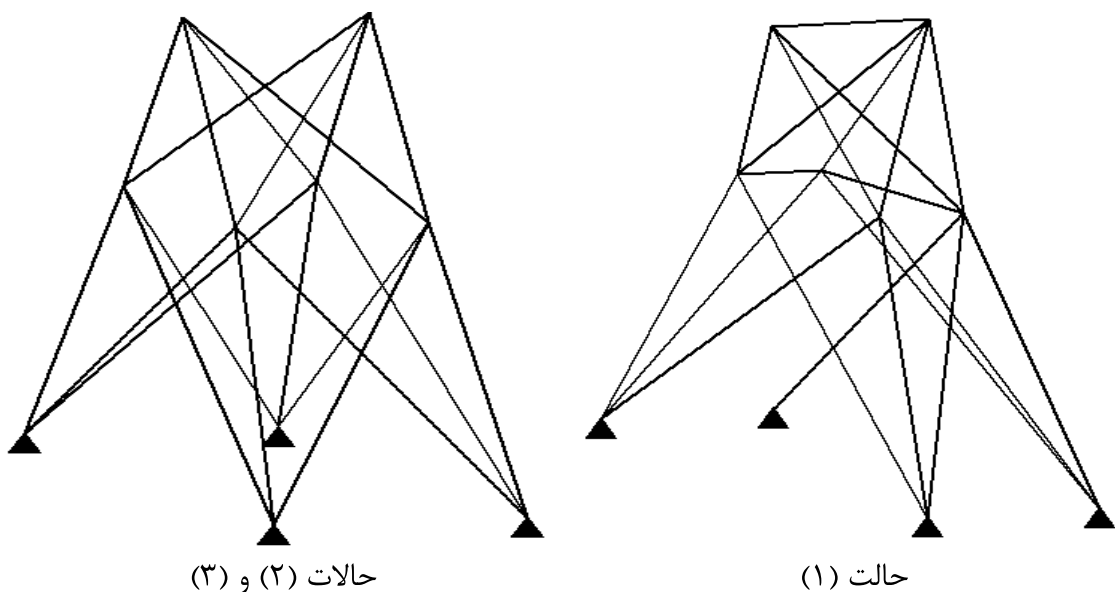
در این مثال فرآیند بهینه‌یابی در سه حالت انجام شده است. در حالت (۱)، امکان حذف هر عضو در فرآیند بهینه‌یابی توپولوژی در نظر گرفته شده است. در اکثر مقالات فرآیند بهینه‌یابی توپولوژی برای هر گروه در نظر گرفته می‌شود که امکان تولید طرح‌های ناپایدار را بواسطه حذف هر گروه افزایش می‌دهد. بدین ترتیب برای حالت (۲)، فرضیات مسئله دقیقاً مشابه دیگر مراجع در نظر گرفته شده است و امکان حذف هر گروه در فرآیند بهینه‌یابی توپولوژی لحاظ شده است. این مسئله سبب ایجاد طرح بهینه با اشکال منظم‌تر می‌شود. در حالت (۳)، بازه نقاط گرهی برای متغیرهای هندسی به استناد نقاط بهینه حاصل از حالت (۲)، بشرح زیر تغییر داده شده و مجدداً فضای طراحی با بازه‌های جدید برای متغیرهای هندسی، به صورت دقیق‌تر مورد کاوش قرار گرفته است.

$$190.5 \text{ cm} < x_4 = x_5 = -x_3 = -x_6 < 292.1 \text{ cm} \quad , \quad 254 \text{ cm} < x_8 = x_9 = -x_7 = -x_{10} < 355.6 \text{ cm}$$

$$355.6 \text{ cm} < y_3 = y_4 = -y_5 = -y_6 < 457.2 \text{ cm} \quad , \quad 838.2 \text{ cm} < y_7 = y_8 = -y_9 = -y_{10} < 939.8 \text{ cm}$$

$$675.64 \text{ cm} < z_3 = z_4 = z_5 = z_6 < 777.24 \text{ cm}$$

نتایج حاصل از طرح بهینه در اشکال (الف-۱۸) و جدول (الف-۲۵) قابل مشاهده است.



شکل (الف-۱۸) - طرح بهینه توپولوژی و هندسی خرپای ۲۵ میله‌ای در حالات مختلف براساس روش MHSM

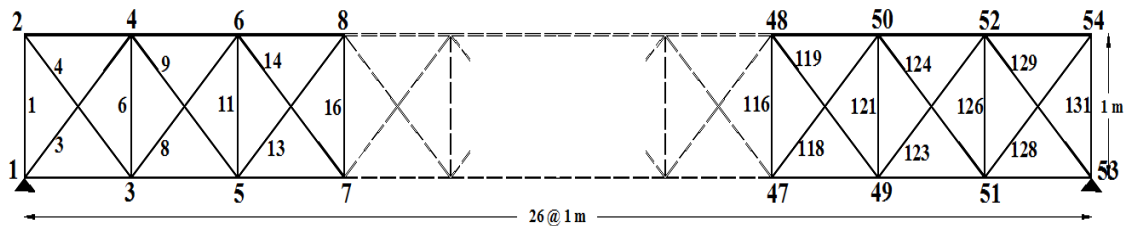
جدول (الف-۲۵) نتایج طرح بهینه پیکربندی خرابی ۲۵ میله‌ای براساس روش MHSM

MHSM			مرجع [۷۲]	مرجع [۷۱]	مرجع [۷۰]	شماره گروه
حالت (۳)	حالت (۲)	حالت (۱)				
--	--	۰/۶۴۵	--	--	۰/۶۴۵	$a_1 - cm^2$
۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	--	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۱/۲۹	$a_2 - cm^2$
۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۵/۱۶	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۱/۲۹	$a_3 - cm^2$
۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۵/۱۶	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۱/۲۹	$a_4 - cm^2$
۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۵/۱۶	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۱/۲۹	$a_5 - cm^2$
۶/۴۵	۵/۸۰۵	۳/۸۷	۵/۸۰۵	۵/۸۰۵	۷/۰۹۵	$a_6 - cm^2$
۶/۴۵	۵/۸۰۵	۳/۸۷	۵/۸۰۵	۵/۸۰۵	۷/۰۹۵	$a_7 - cm^2$
۶/۴۵	۵/۸۰۵	۳/۸۷	۵/۸۰۵	۵/۸۰۵	۷/۰۹۵	$a_8 - cm^2$
۶/۴۵	۵/۸۰۵	۳/۸۷	۵/۸۰۵	۵/۸۰۵	۷/۰۹۵	$a_9 - cm^2$
--	--	--	--	--	۱/۲۹	$a_{10} - cm^2$
--	--	۰/۶۴۵	--	--	۱/۲۹	$a_{11} - cm^2$
--	--	۰/۶۴۵	--	--	۱/۹۳۵	$a_{12} - cm^2$
--	--	--	--	--	۱/۹۳۵	$a_{13} - cm^2$
۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	$a_{14} - cm^2$
۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	$a_{15} - cm^2$
۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	$a_{16} - cm^2$
۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	$a_{17} - cm^2$
۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	--	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۱/۲۹	$a_{18} - cm^2$
۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۱/۲۹	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۱/۲۹	$a_{19} - cm^2$
۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۱/۲۹	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۱/۲۹	$a_{20} - cm^2$
۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۱/۲۹	۰/۶۴۵	۰/۶۴۵	۱/۲۹	$a_{21} - cm^2$
۵/۸۰۵	۶/۴۵	۵/۸۰۵	۶/۴۵	۶/۴۵	۵/۸۰۵	$a_{22} - cm^2$
۵/۸۰۵	۶/۴۵	--	۶/۴۵	۶/۴۵	۵/۸۰۵	$a_{23} - cm^2$
۵/۸۰۵	۶/۴۵	۵/۸۰۵	۶/۴۵	۶/۴۵	۵/۸۰۵	$a_{24} - cm^2$
۵/۸۰۵	۶/۴۵	۵/۸۰۵	۶/۴۵	۶/۴۵	۵/۸۰۵	$a_{25} - cm^2$
۹۸/۷۱۵۸	۹۸/۸۵۸۳	۵۰/۸	۹۸/۵۲۹۹	۱۰۱/۳۷۱	۱۰۴/۳۱۸	$x_4 - cm$
۱۶۰/۰۰۹۶	۱۵۳/۶۵۲۷	۱۵۲/۴۱۲	۱۶۷/۹۲۲	۱۵۷/۴۵۵	۱۳۵/۸۱۴	$y_4 - cm$
۲۹۹/۷۶۶۵	۳۰۵/۶۱۲۵	۳۱۱/۱۴۵	۲۸۶/۹۶۶	۳۰۰/۳۰۴	۳۱۶/۴۸۴	$z_4 - cm$
۱۳۰/۰۱۴۴	۱۲۷/۰۰۶۱	۱۰۵/۲۷۱۸	۱۲۳/۹۳۳	۱۳۴/۹۵	۱۲۹/۰۳۲	$x_8 - cm$
۳۵۵/۴۸۱۱	۳۴۹/۶۷۰۱	۳۵۰/۳۱۵	۳۵۲/۷۸۳۱	۳۵۱/۷۶۴	۳۳۳/۹۶	$y_8 - cm$
۵۰۴/۹۰۹	۵۰۸/۹۶۵	۴۹۷/۹۸۱	۵۰۸/۷۴۳	۵۱۰/۳۸۸	۶۰۵/۸۴۷	وزن - N

الف-۱۲ بهینه‌یابی پیکربندی خرپای ۱۳۱ میله‌ای

برای بهینه‌یابی سطح‌مقطع، توپولوژی و هندسه خرپای ۱۳۱ میله‌ای سازه اولیه‌ای مشابه شکل

(الف-۱۹) در نظر گرفته شده است.



شکل (الف-۱۹) - سازه مینا خرپای ۱۳۱ میله‌ای

برای این مسئله مقادیر تنش مجاز فشاری و کششی و نیز تغییرمکان مجاز گرهی بر طبق آیین‌نامه

AISC-ASD در نظر گرفته شده است [۸۹]. بر اساس این آیین‌نامه تنش مجاز فشاری بشرح روابط

زیر تعریف می‌شود:

در حالتی که $\lambda_{max} < C_c$ است.

$$\sigma_{all(com)} = \left(F_y \left[1 - \frac{\lambda_{max}^2}{2C_c^2} \right] \right) / \left(\frac{5}{3} + \frac{3\lambda_{max}}{8C_c} - \frac{\lambda_{max}^3}{8C_c^3} \right) \quad (\text{الف-۱})$$

و در صورتی که $\lambda_{max} \geq C_c$ است.

$$\sigma_{all(com)} = \frac{12\pi^2 E}{23\lambda_{max}^2} \quad (\text{الف-۲})$$

در روابط فوق F_y برابر 2400 kg/cm^2 لحاظ شده است. λ_{max} لاغری حداکثر است که برای عضو

فشاری حول محورهای X و Y بشرح رابطه (الف-۳) محاسبه می‌شود.

$$\lambda_{max} = l/r_i \quad i = X, Y \quad (\text{الف-۳})$$

در رابطه فوق l طول عضو و r_i شعاع ژیراسیون است. قید لاغری نیز برای اعضای سازه در روند طراحی

بهینه لحاظ شده است. بدین‌منظور حداکثر ضریب لاغری برای اعضای فشاری برابر ۲۰۰ و برای

اعضای کششی برابر ۳۰۰ در نظر گرفته شده است.

در رابطه (الف-۱)، C_c لاغری مرزی بین کمانش ارتجاعی و غیرارتجاعی می باشد که بشرح رابطه (الف-۴) محاسبه می شود.

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \quad (\text{الف-۴})$$

از سوی دیگر براساس آیین نامه، مقدار تنش مجاز کششی بشرح رابطه (الف-۵) تعیین خواهد شد.

$$\sigma_{all(Ten)} = 0.6F \quad (\text{الف-۵})$$

مقدار تغییرمکان مجاز گرهی نیز برای خرپای ۱۳۱ میله ای برابر $10/83 \text{ cm}$ در نظر گرفته می شود.

بار اعمالی به سازه به صورت گسترده بوده و با مقدار $17/5 \text{ kN/m}$ بر اعضای فوقانی سازه وارد

می شود. E و ρ نیز بترتیب برابر $2038901/2 \text{ kg/cm}^2$ و $0/00785 \text{ kg/cm}^3$ در نظر گرفته خواهد شد.

در فرآیند طراحی بهینه خرپای ۱۳۱ میله ای، برای نیل به اهداف اجرایی و زیبایی سازه، کلیه

متغیرهای طراحی به نحوی گروه بندی می شوند که طرح نهایی متقارن باشد. برای این منظور مبنای

سازه در گره وسط (گره ۲۷) در نظر گرفته شده است. بدین سان سازه از وسط دارای تقارن می باشد.

در این راستا متغیرهای طراحی سطح مقطع در ۶۶ گروه دسته بندی می شوند که تمامی گروه ها دارای

دو عضو بوده و تنها آخرین گروه دارای یک عضو است که مربوط به عضو قائم واصل بین گره های ۲۷

و ۲۸ است. برای هر گروه یک متغیر توپولوژی در نظر گرفته می شود. هر متغیر طراحی سطح مقطع

نیز متناسب با موقعیت براساس لیست مقاطع $\{S_1\}$ و $\{S_2\}$ مقداردهی خواهد شد. برای این منظور

اعضای فوقانی و تحتانی براساس لیست مقاطع $\{S_1\}$ و اعضای مورب و قائم براساس لیست مقاطع

$\{S_2\}$ مقداردهی می شود. لیست مقاطع $\{S_1\}$ و $\{S_2\}$ بشرح زیر در نظر گرفته شده است.

$$\{S_1\} = \{2UNP80, 2UNP100, 2UNP120, 2UNP140, 2UNP160, 2UNP180, 2UNP200, 2UNP220, 2UNP240\}$$

$$\{S_2\} = \{UNP80, UNP100, UNP120, UNP140, 2UNP80, 2UNP180, 2UNP100, 2UNP120, 2UNP140, 2UNP160\}$$

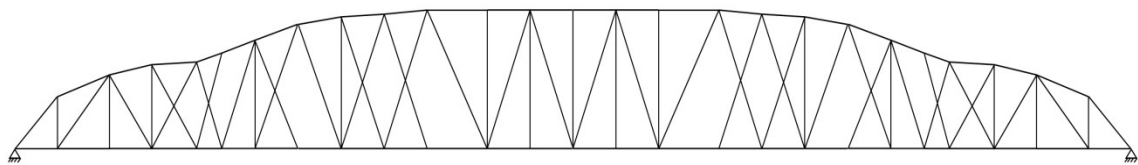
از سوی دیگر متغیرهای طراحی هندسی نیز متناسب با تقارن سازه در ۱۳ گروه دسته بندی شده و

محدوده مجاز برای هر یک با ضریب دقت 1 cm بشرح زیر تعریف می شوند.

$$\begin{aligned}
& -1340 \text{ cm} < x_2 = x_{54} < -1260 \text{ cm} \quad , \quad -1240 \text{ cm} < x_3 = x_4 = -x_{51} = -x_{52} < -1160 \text{ cm} \\
& -1140 \text{ cm} < x_5 = x_6 = -x_{49} = -x_{50} < -1060 \text{ cm} \\
& -1040 \text{ cm} < x_7 = x_8 = -x_{47} = -x_{48} < -960 \text{ cm} \\
& -940 \text{ cm} < x_9 = x_{10} = -x_{45} = -x_{46} < -860 \text{ cm} \\
& -840 \text{ cm} < x_{11} = x_{12} = -x_{43} = -x_{44} < -760 \text{ cm} \\
& -740 \text{ cm} < x_{13} = x_{14} = -x_{41} = -x_{42} < -660 \text{ cm} \\
& -640 \text{ cm} < x_{15} = x_{16} = -x_{39} = -x_{40} < -560 \text{ cm} \\
& -540 \text{ cm} < x_{17} = x_{18} = -x_{37} = -x_{38} < -460 \text{ cm} \\
& -440 \text{ cm} < x_{19} = x_{20} = -x_{35} = -x_{36} < -360 \text{ cm} \\
& -340 \text{ cm} < x_{21} = x_{22} = -x_{33} = -x_{34} < -260 \text{ cm} \\
& -240 \text{ cm} < x_{23} = x_{24} = -x_{31} = -x_{32} < -160 \text{ cm} \\
& -140 \text{ cm} < x_{25} = x_{26} = -x_{29} = -x_{30} < -60 \text{ cm} \quad , \quad 50 \text{ cm} < y_2 = y_{54} < 150 \text{ cm}
\end{aligned}$$

لازم به ذکر است که در روند طراحی بهینه خرپای ۱۳۱ میله‌ای، برای رسیدن به طرحی اجرایی‌تر، مختصات گرهی اعضای فوقانی در راستای محور قائم، براساس شیب مثبت هر عضو نسبت به افق تعیین می‌شوند. بدین ترتیب در پیکربندی طرح نهایی، شیب هیچ یک از اعضای فوقانی نسبت به افق منفی نخواهد شد و طرحی اجرایی حاصل می‌گردد. در این راستا متغیرهای طراحی شیب با ضریب دقت ۱ درجه دارای محدوده مجاز صفر تا ۳۰ درجه بوده و براساس تقارن سازه نسبت به وسط خرپا در ۱۴ گروه دسته‌بندی می‌شوند.

شکل (الف-۲۰) طرح بهینه توپولوژی، هندسه و شیب را برای خرپای ۱۳۱ میله‌ای، نشان می‌دهد.



شکل (الف-۲۰) - طرح بهینه خرپای ۱۳۱ میله‌ای

نتایج حاصل برای مقادیر متغیرهای طراحی سطح مقطع، هندسه و شیب در جدول (الف-۲۶) قابل مشاهده است.

جدول (الف-۲۶) نتایج طرح بهینه پیکربندی خرپای ۱۳۱ میله‌ای براساس روش MHSM

متغیر طراحی هندسی و شیب				متغیر طراحی توپولوژی و سطح مقطع					
--	y_2	--	x_2	2UNP160	a_{45}	UNP80	a_{23}	--	a_1
۸۸/۷۶	y_4	-۱۲۰۱	x_4	--	a_{46}	UNP80	a_{24}	2UNP80	a_2
۱۲۵/۶۶۶	y_6	-۱۰۸۰	x_6	2UNP80	a_{47}	2UNP140	a_{25}	2UNP100	a_3
۱۴۳/۱۲۲	y_8	-۹۸۱	x_8	UNP80	a_{48}	--	a_{26}	--	a_4
۱۴۶/۷۸۸	y_{10}	-۸۷۶	x_{10}	UNP80	a_{49}	2UNP80	a_{27}	--	a_5
۱۶۲/۵۹۷	y_{12}	-۸۱۷	x_{12}	2UNP160	a_{50}	UNP80	a_{28}	2UNP80	a_6
۱۸۳/۲۲۸	y_{14}	-۷۴۰	x_{14}	--	a_{51}	--	a_{29}	2UNP100	a_7
۲۱۰/۰۲۲	y_{16}	-۶۴۰	x_{16}	2UNP80	a_{52}	2UNP160	a_{30}	UNP140	a_8
۲۲۲/۳	y_{18}	-۵۴۰	x_{18}	--	a_{53}	UNP80	a_{31}	--	a_9
۲۲۷/۵۴۱	y_{20}	-۴۴۰	x_{20}	UNP80	a_{54}	2UNP80	a_{32}	2UNP80	a_{10}
۲۳۴/۵۳۴	y_{22}	-۳۴۰	x_{22}	2UNP160	a_{55}	UNP80	a_{33}	UNP80	a_{11}
۲۳۴/۵۳۴	y_{24}	-۲۰۰	x_{24}	UNP80	a_{56}	UNP80	a_{34}	2UNP80	a_{12}
۲۳۴/۵۳۴	y_{26}	-۱۰۰	x_{26}	2UNP80	a_{57}	2UNP160	a_{35}	--	a_{13}
۲۲۳۸۱/۳۷	وزن سازه (kg)			UNP80	a_{58}	--	a_{36}	UNP80	a_{14}
				--	a_{59}	2UNP80	a_{37}	2UNP120	a_{15}
				2UNP160	a_{60}	--	a_{38}	UNP80	a_{16}
				UNP80	a_{61}	UNP80	a_{39}	2UNP80	a_{17}
				2UNP80	a_{62}	2UNP160	a_{40}	2UNP80	a_{18}
				--	a_{63}	UNP80	a_{41}	UNP80	a_{19}
				UNP80	a_{64}	2UNP80	a_{42}	2UNP120	a_{20}
				2UNP160	a_{65}	UNP80	a_{43}	--	a_{21}
				UNP80	a_{66}	UNP80	a_{44}	2UNP80	a_{22}

الف-۱۳ بهینه‌یابی سطح مقطع برج فولادی ۹۴۲ میله‌ای

در این مثال به طراحی بهینه سطح مقطع برج فولادی ۹۴۲ میله‌ای (۲۶ طبقه) مطابق شکل (الف-۲۱) پرداخته شده است. برای کلیه اعضای سازه E ، ρ و F_y به ترتیب برابر 2038936 kg/cm^2 ، $7833/412 \text{ kg/m}^3$ و 2531 kg/cm^2 لحاظ شده است. تغییرمکان مجاز کلیه گره‌های فعال سازه در تمام جهات برابر $38/1 \text{ cm}$ فرض شده است. مقادیر مجاز تنش‌های فشاری و کششی نیز براساس آیین نامه AISD-ASD مطابق روابط (الف-۱)، (الف-۲) و (الف-۵) تعیین می‌شود [۸۹]. از سوی دیگر

اعضای سازه در ۵۹ گروه بشرح شکل (الف-۲۱) دسته‌بندی شده و برای فرآیند طراحی بهینه از لیست ۲۹۵ تایی مقاطع W بشرح جدول (الف-۲۷) استفاده می‌شود [۸۹].

جدول (الف-۲۷) اعضای لیست مقاطع بر طبق آیین‌نامه AISC-ASD برای برج ۹۴۲ میله‌ای

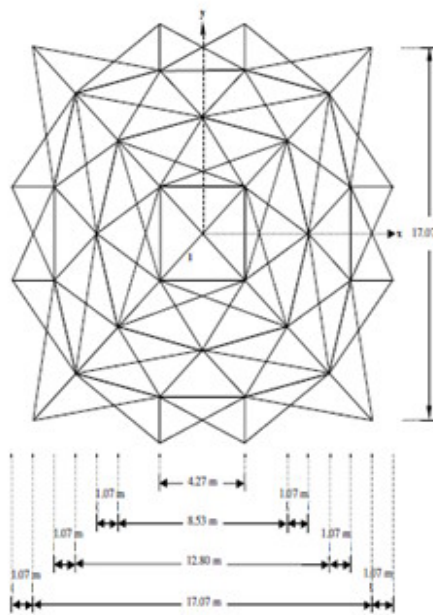
شماره	نام مقطع	$A - cm^2$	$I_x - cm^4$	$S_x - cm^3$	$I_y - cm^4$	$S_y - cm^3$
۱	W 44 x 285	۵۴۰/۶۴۴	۱۰۲۳۹۲۹/۳۰۷	۱۸۳۵۳/۵۱۱	۲۰۳۹۵/۳۴	۱۳۶۰/۱۲۶
۲	W 44 x 248	۴۶۹/۶۷۶	۸۹۰۷۳۵/۲۵۱	۱۶۱۰۸/۴۸۴	۱۸۱۰۶/۰۶۷	۱۲۱۲/۶۴۲
۲۹۴	W 5 x 16	۳۰/۱۹۳۴	۸۸۶/۵۷۳	۱۳۹/۴۵۴	۳۱۲/۵۸۹	۴۹/۱۶۱
۲۹۵	W 4 x 13	۲۴/۷۰۹۶	۴۷۰/۳۴۱	۸۹/۴۷۳	۱۶۰/۶۶۵	۳۱/۱۳۵

سازه در معرض یک وضعیت بارگذاری قرار داشته و بر این اساس بارهای قائم و افقی به گره‌های سازه اعمال می‌شود. بدین ترتیب بار قائم $13/344 \text{ kN}$ به گره‌های بخش‌های^۱ ۱ و ۳ و بار قائم $26/688 \text{ kN}$ به گره‌های بخش ۲ سازه در راستای محور Z اعمال شده و بار جانبی برابر $4/448 \text{ kN}$ به کلیه گره‌های فعال سازه در راستای محور Y وارد می‌شود. از سوی دیگر بار جانبی برابر با $6/672 \text{ kN}$ به گره‌های سمت چپ سازه و بار جانبی برابر با $4/448 \text{ kN}$ به گره‌های سمت راست سازه در راستای محور X اعمال می‌شود.

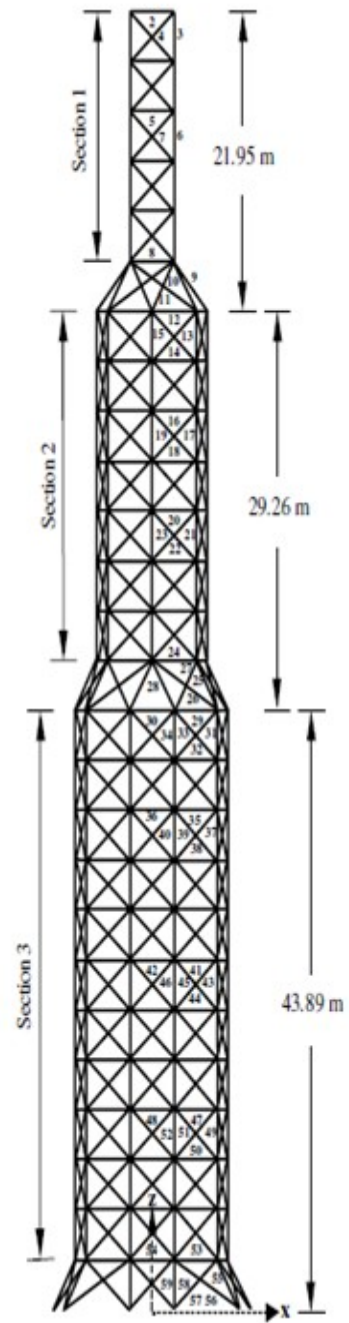
^۱. Sections



نمای سه بعدی



نمای بالا



نمای پهلو

شکل (الف-۲۱) - برج فولادی ۹۴۲ میله‌ای

نتایج مربوط به طرح بهینه برج فولادی ۹۴۲ میله‌ای در قیاس با دیگر مراجع در جدول

(الف-۲۸) قابل مشاهده می‌باشد.

جدول (الف-۲۸) نتایج طرح بهینه برج فولادی ۹۴۲ میله‌ای براساس روش MHSM - cm^2

شماره گروه	مرجع [۹۰]	مرجع [۳۶]	MHSM	شماره گروه	مرجع [۹۰]	مرجع [۳۶]	MHSM
۱	۴۱/۸۷	۱۷/۲۹	۱۷/۲۹	۳۱	۱۲۹/۰۳۲	۱۶۵/۱۶	۱۱۳/۵۴۸
۲	۱۷/۲۹	۱۷/۲۹	۱۷/۲۹	۳۲	۴۵/۶۷۷	۳۷/۸۷	۴۵/۶۷۷
۳	۱۷/۲۹	۱۷/۲۹	۱۷/۲۹	۳۳	۲۸/۵۸	۳۷/۸۷	۳۵/۷۴۱
۴	۲۸/۵۸	۲۸/۵۸	۲۸/۵۸	۳۴	۲۸/۵۸	۲۸/۵۸	۲۸/۵۸
۵	۱۷/۲۹	۱۷/۲۹	۱۷/۲۹	۳۵	۱۷/۲۹	۱۷/۲۹	۲۲/۹۰۳
۶	۳۵/۷۴۱	۲۸/۵۸	۲۸/۵۸	۳۶	۱۷/۲۹	۱۷/۲۹	۱۷/۲۹
۷	۳۰/۱۹۳	۲۸/۵۸	۲۸/۵۸	۳۷	۱۹۷/۴۱۸	۱۸۷/۷۴۱	۱۸۷/۷۴۱
۸	۴۱/۸۷	۱۷/۲۹	۱۷/۲۹	۳۸	۴۵/۶۷۷	۴۵/۶۷۷	۴۵/۶۷۷
۹	۹۴/۸۳۸	۳۷/۸۷	۴۵/۶۷۷	۳۹	۲۸/۵۸	۲۸/۵۸	۳۰/۱۹۳
۱۰	۴۵/۶۷۷	۴۵/۶۷۷	۴۵/۶۷۷	۴۰	۳۷/۸۷	۳۷/۸۷	۳۷/۸۷
۱۱	۲۸/۵۸	۲۸/۵۸	۲۸/۵۸	۴۱	۱۷/۲۹	۱۷/۲۹	۲۲/۹۰۳
۱۲	۱۷/۲۹	۱۷/۲۹	۱۷/۲۹	۴۲	۲۴/۷۰۹	۱۷/۲۹	۱۷/۲۹
۱۳	۴۱/۸۷	۳۷/۸۷	۴۵/۶۷۷	۴۳	۲۵۷/۴۱۸	۲۴۸/۳۸۶	۲۴۸/۳۸۶
۱۴	۲۸/۵۸	۲۸/۵۸	۲۸/۵۸	۴۴	۵۸/۹	۵۸/۹	۵۸/۹
۱۵	۳۰/۱۹۳	۲۴/۷۰۹	۲۸/۵۸	۴۵	۲۸/۵۸	۲۸/۵۸	۳۵/۷۴۱
۱۶	۱۷/۲۹	۱۷/۲۹	۱۷/۲۹	۴۶	۴۵/۶۷۷	۴۵/۶۷۷	۴۵/۶۷۷
۱۷	۵۳/۲۲۵	۵۳/۲۲۵	۵۳/۲۲۵	۴۷	۳۳/۹۳۵	۲۴/۷۰۹	۲۴/۷۰۹
۱۸	۲۸/۵۸	۲۸/۵۸	۲۸/۵۸	۴۸	۳۷/۸۷	۱۷/۲۹	۱۹/۰۹۶
۱۹	۲۸/۵۸	۲۸/۵۸	۲۸/۵۸	۴۹	۲۷۵/۴۸۳	۲۷۵/۴۸۳	۲۷۵/۴۸۳
۲۰	۱۷/۲۹	۱۷/۲۹	۱۷/۲۹	۵۰	۵۸/۹	۵۸/۹	۵۸/۹
۲۱	۶۶/۴۵۱	۶۶/۴۵۱	۶۶/۴۵۱	۵۱	۳۷/۸۷	۵۳/۲۲۵	۵۳/۲۲۵
۲۲	۳۷/۸۷	۳۷/۸۷	۳۷/۸۷	۵۲	۵۸/۹	۴۵/۶۷۷	۵۳/۲۲۵
۲۳	۵۸/۹	۴۷/۳۵۴	۴۵/۶۷۷	۵۳	۱۱۵/۴۸۳	۱۱۳/۵۴۸	۱۲۳/۲۲۵
۲۴	۷۶/۱۲۸	۶۶/۴۵۱	۷۲/۲۵۷	۵۴	۹۰/۹۶۷	۱۲۹/۶۷۷	۱۱۸/۰۶۴
۲۵	۱۱۰/۳۲۲	۹۲/۹۰۳	۹۲/۹۰۳	۵۵	۲۲۷/۷۴۱	۲۵۰/۳۲۲	۲۷۵/۴۸۳
۲۶	۶۲/۶۴۵	۵۸/۹	۵۸/۹	۵۶	۵۸/۹	۶۶/۴۵۱	۵۸/۹
۲۷	۲۸/۵۸	۲۸/۵۸	۳۷/۸۷	۵۷	۱۸۹/۶۷۷	۱۴۹/۶۷۷	۱۲۳/۲۲۵
۲۸	۴۹/۳۵۴	۴۵/۶۷۷	۴۵/۶۷۷	۵۸	۶۲/۶۴۵	۴۵/۶۷۷	۴۵/۶۷۷
۲۹	۴۵/۶۷۷	۴۹/۶۱۲	۴۵/۶۷۷	۵۹	۶۲/۶۴۵	۶۶/۴۵۱	۱۰۰/۶۴۴
۳۰	۴۱/۸۷	۳۹/۷۴۱	۴۱/۸۷				
حجم - cm^3				۲۲۴۰۵۸۱۷/۹۴			
				۲۲۸۳۶۹۳۸/۶۵			
				۲۱۹۹۷۱۷۷			

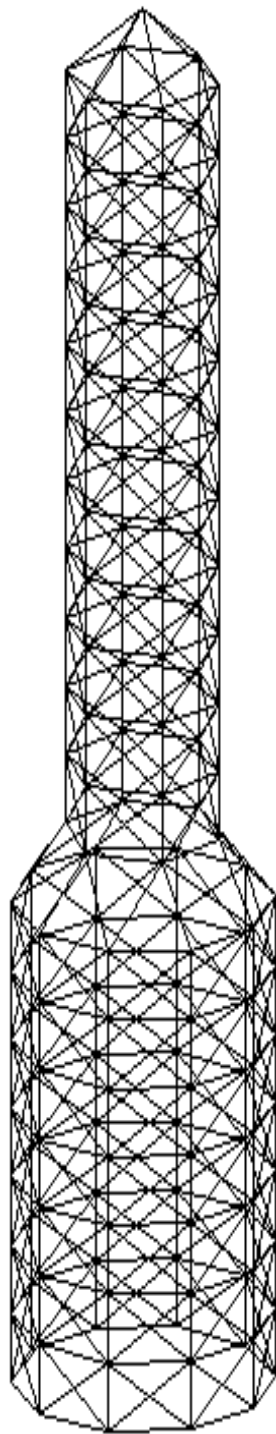
الف-۱۴ بهینه‌یابی سطح مقطع برج فولادی ۵۸۲ میله‌ای

در این مثال به ارزیابی فرآیند بهینه‌یابی سطح مقطع برج فولادی ۵۸۲ میله‌ای با ۸۰ متر ارتفاع مطابق شکل (الف-۲۲) پرداخته شده است. براساس تقارن سازه حول محورهای X و Y، اعضای سازه در ۳۲ گروه بشرح شکل (الف-۲۲) دسته‌بندی می‌شوند.

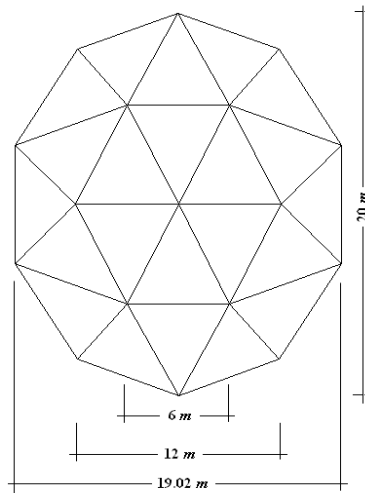
بارهای وارد بر سازه در یک وضعیت تعریف شده است که شامل یک بار 5 kN در جهات X و Y و نیز یک بار 30 kN در جهت Z وارد بر تمامی گره‌های فعال سازه می‌باشد. لیست مقاطع موجود براساس مجموعه ۱۳۷ تایی مقاطع اقتصادی و استاندارد W شکل (W8 - W27) با حدود بالا و پایین $1387/09 \text{ cm}^2$ و $39/74 \text{ cm}^2$ تعریف شده است.

مقادیر تنش‌های فشاری و کششی مجاز بر طبق آیین‌نامه AISC-ASD در نظر گرفته شده است که براساس این آیین‌نامه تنش مجاز فشاری با استفاده از روابط (الف-۱) و (الف-۲) و تنش مجاز کششی با استفاده از رابطه (الف-۵) تعیین می‌شود. لاغری حداکثر (λ_{max}) نیز حول محورهای X و Y بشرح رابطه (الف-۳) محاسبه شده و حداکثر ضریب لاغری برای اعضای فشاری ۲۰۰ و اعضای کششی ۳۰۰ منظور می‌شود [۸۹]. علاوه بر قیود فوق، قید تغییرمکان نیز با مقدار مجاز 8 cm برای تمامی گره‌های فعال سازه در جهات X، Y و Z لحاظ شده است.

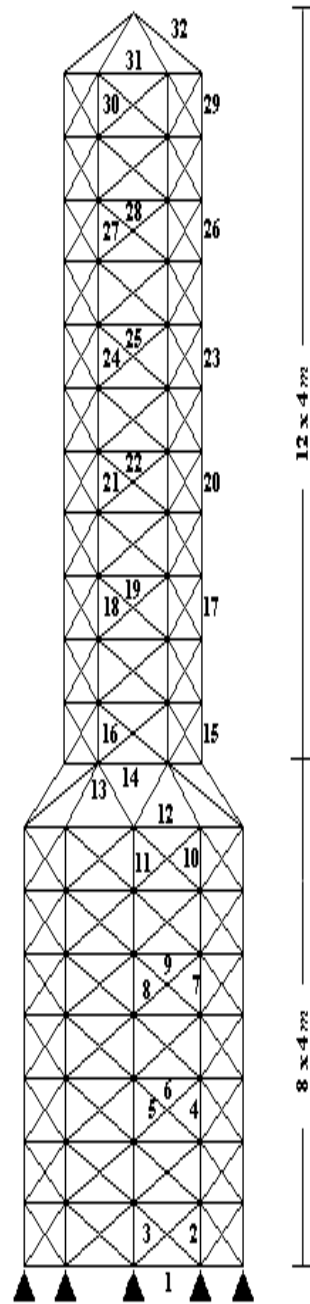
در فرآیند طراحی بهینه برج فولادی ۵۸۲ میله‌ای، E و F_y به ترتیب برابر $203893/6 \text{ MPa}$ و $253/1 \text{ MPa}$ در نظر گرفته شده است.



نمای سه بعدی



نمای بالا



نمای پهلو

شکل (الف-۲۲) - برج فولادی ۵۸۲ میله‌ای

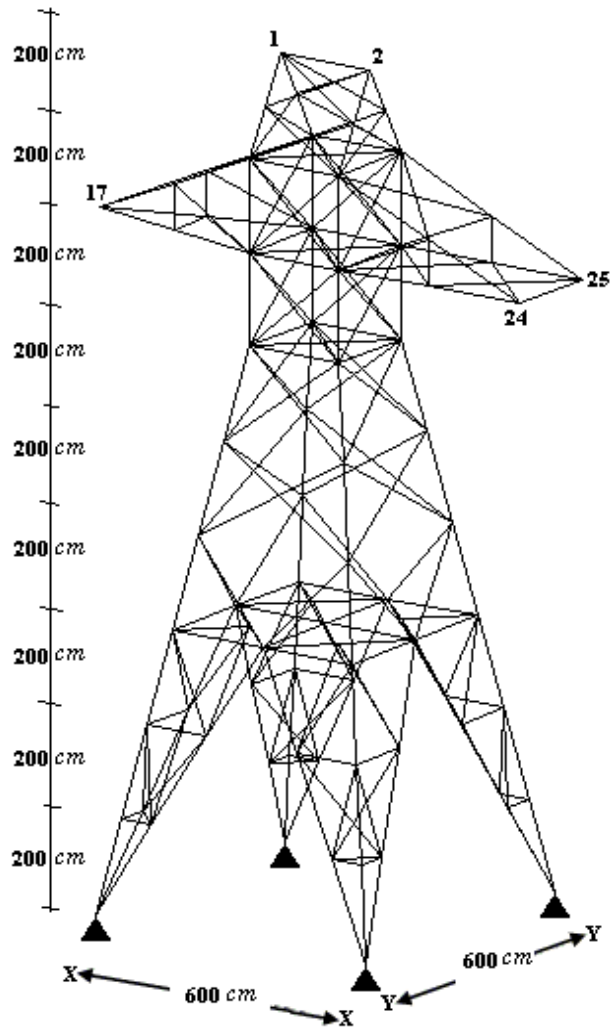
نتایج مربوط به طرح بهینه در قیاس با دیگر مراجع در جدول (الف-۲۹) قابل مشاهده است.

جدول (الف-۲۹) نتایج طرح بهینه برج فولادی ۵۸۲ میله‌ای براساس روش MHSM

شماره گروه	مرجع [۳۵]	مرجع [۵۴]	MHSM	شماره گروه	مرجع [۳۵]	مرجع [۵۴]	MHSM
۱	W8 x 21	W8 x 24	W8 x 21	۱۷	W8 x 21	W8 x 24	W8 x 21
۲	W12 x 79	W12 x 72	W12 x 72	۱۸	W12 x 72	W12 x 72	W12 x 72
۳	W8 x 24	W8 x 28	W8 x 28	۱۹	W8 x 28	W8 x 28	W8 x 24
۴	W10 x 60	W12 x 58	W10 x 54	۲۰	W10 x 54	W12 x 58	W10 x 60
۵	W8 x 24	W8 x 24	W8 x 24	۲۱	W8 x 24	W8 x 24	W8 x 24
۶	W8 x 21	W8 x 24	W8 x 21	۲۲	W8 x 21	W8 x 24	W8 x 21
۷	W8 x 48	W10 x 49	W10 x 49	۲۳	W10 x 49	W10 x 49	W8 x 48
۸	W8 x 24	W8 x 24	W8 x 24	۲۴	W8 x 24	W8 x 24	W8 x 24
۹	W8 x 21	W8 x 24	W8 x 21	۲۵	W8 x 21	W8 x 24	W8 x 21
۱۰	W10 x 45	W12 x 40	W8 x 40	۲۶	W8 x 40	W12 x 40	W10 x 45
۱۱	W8 x 24	W12 x 30	W8 x 24	۲۷	W8 x 24	W12 x 30	W8 x 24
۱۲	W10 x 68	W12 x 72	W12 x 72	۲۸	W12 x 72	W12 x 72	W10 x 68
۱۳	W14 x 74	W18 x 76	W18 x 76	۲۹	W18 x 76	W18 x 76	W14 x 74
۱۴	W8 x 48	W10 x 49	W10 x 49	۳۰	W10 x 49	W10 x 49	W8 x 48
۱۵	W18 x 76	W14 x 82	W14 x 82	۳۱	W14 x 82	W14 x 82	W18 x 76
۱۶	W8 x 31	W8 x 31	W8 x 31	۳۲	W8 x 31	W8 x 31	W8 x 31
			حجم - m^3				
۲۱/۲۳۷۳	۲۲/۰۶۰۷	۲۲/۳۹۵۸					

الف-۱۵ بهینه‌یابی سطح مقطع دکل انتقال نیرو ۲۴۴ میله‌ای

در این مثال به بهینه‌یابی سطح مقطع دکل انتقال نیرو ۲۴۴ میله‌ای مطابق شکل (الف-۲۳) پرداخته شده است. اعضای سازه در ۲۶ گروه دسته‌بندی شده و بارهای مؤثر بر سازه در دو وضعیت بشرح جدول (الف-۳۰) در نظر گرفته شده است. قید تغییرمکان نیز برای برخی از گره‌های سازه بشرح جدول (الف-۳۰) لحاظ شده و مقادیر تنش‌های فشاری و کششی نیز بر طبق آیین‌نامه AISC-ASD بشرح روابط (الف-۱)، (الف-۲) و (الف-۵) منظور شده است [۸۹]. برای روابط مذکور مقادیر E و F_y به ترتیب برابر 210 kN/mm^2 و $233/3 \text{ N/mm}^2$ فرض شده است. بدین ترتیب براساس رابطه (الف-۵) مقدار تنش کششی مجاز برابر 140 N/mm^2 بدست می‌آید. در فرآیند طراحی قید لاغری نیز برای اعضای سازه براساس آیین‌نامه تعریف شده است. بنابراین حداکثر ضریب لاغری برای اعضای فشاری و کششی به ترتیب برابر ۲۰۰ و ۳۰۰ منظور می‌شود.



شکل (الف-۲۳) - دکل انتقال نیرو ۲۴۴ میله‌ای

جدول (الف-۳۰) تغییر مکان مجاز و بارگذاری مؤثر بر دکل انتقال نیرو ۲۴۴ میله‌ای

قید تغییر مکان (mm)		بار اعمالی (kN)		شماره گره	وضعیت بارگذاری
Z	X	Z	X		
۱۵	۴۵	-۳۰	۱۰	۱	
۱۵	۴۵	-۳۰	۱۰	۲	
۱۵	۳۰	-۹۰	۳۵	۱۷	۱
۱۵	۳۰	-۴۵	۱۷۵	۲۴	
۱۵	۳۰	-۴۵	۱۷۵	۲۵	
۱۵	۴۵	-۳۶۰	--	۱	
۱۵	۴۵	-۳۶۰	--	۲	
۱۵	۳۰	-۱۸۰	--	۱۷	۲
۱۵	۳۰	-۹۰	--	۲۴	
۱۵	۳۰	-۹۰	--	۲۵	

لیست مجموعه مقاطع برای فرآیند طراحی بهینه بشرح جدول (الف-۳۱) می‌باشد.

جدول (الف-۳۱) لیست مجموعه مقاطع برای دکل انتقال نیرو ۲۴۴ میله‌ای

شماره	نام مقطع	r mm	$A - mm^2$	شماره	نام مقطع	r mm	$A - mm^2$	شماره	نام مقطع	r mm	$A - mm^2$
۱	L 6 x 6 x 1	۲۹/۷۲	۷۰۹۶/۷۶	۱۶	L 5 x 5 x 5/16	۲۵/۲۵	۱۹۵۴/۸۳	۳۱	L 3 1/2 x 3 1/2 x 1/2	۱۷/۳۵	۲۰۹۶/۷۷
۲	L 6 x 6 x 7/8	۲۹/۷۲	۶۲۷۷/۴۱	۱۷	L 4 x 4 x 3/4	۱۹/۷۶	۳۵۰۹/۶۷	۳۲	L 3 1/2 x 3 1/2 x 7/16	۱۷/۳۷	۱۸۵۱/۶۱
۳	L 6 x 6 x 3/4	۲۹/۷۲	۵۴۴۵/۱۵	۱۸	L 4 x 4 x 5/8	۱۹/۷۹	۲۹۷۴/۱۹	۳۳	L 3 1/2 x 3 1/2 x 3/8	۱۷/۴۵	۱۶۰۰
۴	L 6 x 6 x 5/8	۲۹/۷۲	۴۵۸۷/۰۹	۱۹	L 4 x 4 x 1/2	۱۹/۸۶	۳۵۲۴/۱۹	۳۴	L 3 1/2 x 3 1/2 x 5/16	۱۷/۵۳	۱۳۴۸/۳۸
۵	L 6 x 6 x 9/16	۲۹/۷۲	۴۱۴۸/۳۸	۲۰	L 4 x 4 x 7/16	۱۹/۹۴	۲۱۳۵/۴۸	۳۵	L 3 1/2 x 3 1/2 x 1/4	۱۷/۶۳	۱۰۹۰/۳۲
۶	L 6 x 6 x 1/2	۲۹/۷۲	۳۷۰۹/۶۷	۲۱	L 4 x 4 x 3/8	۲۰/۰۲	۱۸۴۵/۱۶	۳۶	L 2 1/2 x 2 1/2 x 1/2	۱۲/۳۷	۱۴۵۱/۶۱
۷	L 6 x 6 x 7/16	۳۰/۲۳	۳۲۶۴/۵۱	۲۲	L 4 x 4 x 5/16	۲۰/۰۹	۱۵۴۸/۳۸	۳۷	L 2 1/2 x 2 1/2 x 3/8	۱۲/۳۷	۱۱۱۶/۱۳
۸	L 6 x 6 x 3/8	۳۰/۲۳	۲۸۱۲/۹	۲۳	L 4 x 4 x 1/4	۲۰/۱۹	۱۲۵۱/۶۱	۳۸	L 2 1/2 x 2 1/2 x 5/16	۱۲/۴۲	۹۴۱/۹۳
۹	L 6 x 6 x 5/16	۳۰/۴	۲۳۵۴/۸۳	۲۴	L 3 x 3 x 1/2	۱۴/۸۳	۱۷۷۴/۱۹	۳۹	L 2 1/2 x 2 1/2 x 1/4	۱۲/۴۷	۷۶۷/۷۴
۱۰	L 5 x 5 x 7/8	۲۴/۷۱	۵۱۴۸/۳۸	۲۵	L 3 x 3 x 7/16	۱۴/۸۶	۱۵۶۷/۷۴	۴۰	L 2 1/2 x 2 1/2 x 3/16	۱۲/۵۷	۵۸۱/۹۳
۱۱	L 5 x 5 x 3/4	۲۴/۷۷	۴۴۷۷/۴۱	۲۶	L 3 x 3 x 3/8	۱۴/۹۱	۱۳۶۱/۲۹	۴۱	L 2 x 2 x 5/16	۹/۹۱	۷۴۱/۹۳
۱۲	L 5 x 5 x 5/8	۲۴/۸۴	۳۷۸۰/۶۴	۲۷	L 3 x 3 x 5/16	۱۴/۹۶	۱۱۴۸/۳۸	۴۲	L 2 x 2 x 1/4	۹/۹۳	۶۰۵/۱۶
۱۳	L 5 x 5 x 1/2	۲۴/۹۷	۳۰۶۴/۵۱	۲۸	L 3 x 3 x 1/4	۱۵/۰۴	۹۲۹/۰۳	۴۳	L 2 x 2 x 3/16	۱۰	۴۶۱/۲۹
۱۴	L 5 x 5 x 7/16	۲۵/۰۴	۲۶۹۶/۷۷	۲۹	L 3 x 3 x 3/16	۱۵/۱۴	۷۰۳/۲۲	۴۴	L 2 x 2 x 1/8	۱۰/۱۱	۳۱۲/۲۶
۱۵	L 5 x 5 x 3/8	(۲۵/۱۵)	۲۳۲۹/۰۳	۳۰	L 2 x 2 x 3/8	۹/۸۸	۸۷۷/۴۲	۴۵	L 1 1/4 x 1 1/4 x 3/16	۶/۱۹۸	۲۸۰

مختصات گرهی دکل انتقال نیرو ۲۴۴ میله‌ای بشرح جدول (الف-۳۲) تعریف می‌شود.

جدول (الف-۳۲) مختصات گرهی دکل انتقال نیرو ۲۴۴ میله‌ای - mm

شماره	X	Y	Z	شماره	X	Y	Z	شماره	X	Y	Z
۱	۹۱۵	۰	۱۶۴۷۰	۱۲	۹۱۵	-۹۱۵	۱۲۸۱۰	۲۳	-۲۷۴۵	۹۱۵	۱۲۸۱۰
۲	-۹۱۵	۰	۱۶۴۷۰	۱۳	۲۷۴۵	-۴۵۷/۵	۱۲۸۱۰	۲۴	-۴۵۷۵	۹۱۵	۱۲۸۱۰
۳	۹۱۵	۴۵۷/۵	۱۵۵۵۵	۱۴	۲۷۴۵	-۴۵۷/۵	۱۳۷۲۵	۲۵	-۴۵۷۵	-۹۱۵	۱۲۸۱۰
۴	-۹۱۵	۴۵۷/۵	۱۵۵۵۵	۱۵	۲۷۴۵	۴۵۷/۵	۱۲۸۱۰	۲۶	۹۱۵	۹۱۵	۱۰۹۸۰
۵	۹۱۵	-۴۵۷/۵	۱۵۵۵۵	۱۶	۲۷۴۵	۴۵۷/۵	۱۳۷۲۵	۲۷	۹۱۵	-۹۱۵	۱۰۹۸۰
۶	-۹۱۵	-۴۵۷/۵	۱۵۵۵۵	۱۷	۱۵۷۵	۰	۱۲۸۱۰	۲۸	-۹۱۵	-۹۱۵	۱۰۹۸۰
۷	۹۱۵	۹۱۵	۱۴۶۴۰	۱۸	-۹۱۵	۹۱۵	۱۲۸۱۰	۲۹	-۹۱۵	۹۱۵	۱۰۹۸۰
۸	-۹۱۵	۹۱۵	۱۴۶۴۰	۱۹	-۹۱۵	-۹۱۵	۱۲۸۱۰	۳۰	۱۲۲۰	۱۲۲۰	۹۱۵۰
۹	۹۱۵	-۹۱۵	۱۴۶۴۰	۲۰	-۲۷۴۵	۹۱۵	۱۳۷۲۵	۳۱	۱۲۲۰	-۱۲۲۰	۹۱۵۰
۱۰	-۹۱۵	-۹۱۵	۱۴۶۴۰	۲۱	-۲۷۴۵	-۹۱۵	۱۳۷۲۵	۳۲	-۱۲۲۰	-۱۲۲۰	۹۱۵۰
۱۱	۹۱۵	۹۱۵	۱۲۸۱۰	۲۲	-۲۷۴۵	-۹۱۵	۱۲۸۱۰	۳۳	-۱۲۲۰	۱۲۲۰	۹۱۵۰

ادامه جدول (الف-۳۲)

Z	Y	X	شماره	Z	Y	X	شماره	Z	Y	X	شماره
۱۸۳۰	-۲۴۴۰	۲۴۴۰	۶۴	۵۴۹۰	۹۱۵	-۹۱۵	۴۹	۷۳۲۰	۱۵۲۵	۱۵۲۵	۳۴
۱۸۳۰	۲۴۴۰	۲۴۴۰	۶۵	۳۶۶۰	۲۱۳۵	۹۱۵	۵۰	۷۳۲۰	-۱۵۲۵	۱۵۲۵	۳۵
۱۸۳۰	۱۸۳۰	۲۴۴۰	۶۶	۳۶۶۰	۹۱۵	۲۱۳۵	۵۱	۷۳۲۰	-۱۵۲۵	-۱۵۲۵	۳۶
۱۸۳۰	۲۴۴۰	۱۸۳۰	۶۷	۳۶۶۰	۲۱۳۵	۲۱۳۵	۵۲	۷۳۲۰	۱۵۲۵	-۱۵۲۵	۳۷
۱۸۳۰	-۲۴۴۰	-۱۸۳۰	۶۸	۳۶۶۰	-۲۱۳۵	۲۱۳۵	۵۳	۵۴۹۰	۱۸۳۰	۰	۳۸
۱۸۳۰	-۱۸۳۰	-۲۴۴۰	۶۹	۳۶۶۰	-۹۱۵	۲۱۳۵	۵۴	۵۴۹۰	-۱۸۳۰	۰	۳۹
۱۸۳۰	-۲۴۴۰	-۲۴۴۰	۷۰	۳۶۶۰	-۲۱۳۵	۹۱۵	۵۵	۵۴۹۰	-۱۸۳۰	۱۸۳۰	۴۰
۱۸۳۰	۱۸۳۰	-۲۴۴۰	۷۱	۳۶۶۰	-۲۱۳۵	-۹۱۵	۵۶	۵۴۹۰	۰	۱۸۳۰	۴۱
۱۸۳۰	۲۴۴۰	-۱۸۳۰	۷۲	۳۶۶۰	-۹۱۵	-۲۱۳۵	۵۷	۵۴۹۰	۱۸۳۰	۱۸۳۰	۴۲
۱۸۳۰	۲۴۴۰	-۲۴۴۰	۷۳	۳۶۶۰	-۲۱۳۵	-۲۱۳۵	۵۸	۵۴۹۰	۱۸۳۰	-۱۸۳۰	۴۳
۰	-۲۷۴۵	۲۷۴۵	۷۴	۳۶۶۰	۹۱۵	-۲۱۳۵	۵۹	۵۴۹۰	۰	-۱۸۳۰	۴۴
۰	۲۷۴۵	۲۷۴۵	۷۵	۳۶۶۰	۲۱۳۵	-۹۱۵	۶۰	۵۴۹۰	-۱۸۳۰	-۱۸۳۰	۴۵
۰	-۲۷۴۵	-۲۷۴۵	۷۶	۳۶۶۰	۲۱۳۵	-۲۱۳۵	۶۱	۵۴۹۰	-۹۱۵	-۹۱۵	۴۶
۰	۲۷۴۵	-۲۷۴۵	۷۷	۱۸۳۰	-۲۴۴۰	۱۸۳۰	۶۲	۵۴۹۰	-۹۱۵	۹۱۵	۴۷
				۱۸۳۰	-۱۸۳۰	۲۴۴۰	۶۳	۵۴۹۰	۹۱۵	۹۱۵	۴۸

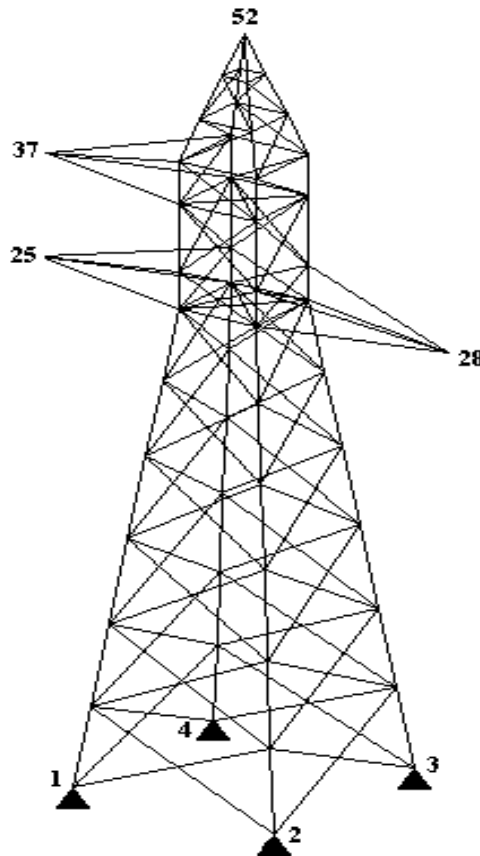
نتایج حاصل برای طرح بهینه در جدول (الف-۳۳) قابل مشاهده است.

جدول (الف-۳۳) نتایج طرح بهینه دکل انتقال نیرو ۲۴۴ میله‌ای براساس روش MHSM

MHSM	مرجع [۹۱]	شماره گروه	MHSM	مرجع [۹۱]	شماره گروه
L 2 x 2 x 1/8	--	۱۴	L 1 1/4 x 1 1/4 x 3/16	--	۱
L 6 x 6 x 3/4	--	۱۵	L 4 x 4 x 3/8	--	۲
L 4 x 4 x 5/16	--	۱۶	L 2 1/2 x 2 1/2 x 3/16	--	۳
L 2 x 2 x 1/8	--	۱۷	L 4 x 4 x 5/16	--	۴
L 2 x 2 x 1/8	--	۱۸	L 3 x 3 x 3/16	--	۵
L 2 1/2 x 2 1/2 x 3/16	--	۱۹	L 5 x 5 x 7/16	--	۶
L 5 x 5 x 7/8	--	۲۰	L 1 1/4 x 1 1/4 x 3/16	--	۷
L 3 1/2 x 3 1/2 x 1/4	--	۲۱	L 6 x 6 x 3/8	--	۸
L 2 1/2 x 2 1/2 x 3/16	--	۲۲	L 2 1/2 x 2 1/2 x 3/16	--	۹
L 2 1/2 x 2 1/2 x 3/16	--	۲۳	L 3 x 3 x 3/16	--	۱۰
L 2 x 2 x 1/8	--	۲۴	L 4 x 4 x 7/16	--	۱۱
L 1 1/4 x 1 1/4 x 3/16	--	۲۵	L 5 x 5 x 3/8	--	۱۲
L 1 1/4 x 1 1/4 x 3/16	--	۲۶	L 2 1/2 x 2 1/2 x 3/16	--	۱۳
۷۵۷۶۳۷/۳۵	۹۲۰۰۵۰		حجم - cm^3		

الف-۱۶ بهینه‌یابی سطح مقطع دکل انتقال نیرو ۱۶۰ میله‌ای

در این مثال به بهینه‌یابی سطح مقطع دکل انتقال نیرو ۱۶۰ میله‌ای بشرح شکل (الف-۲۴) پرداخته شده است. E و ρ برای اعضای سازه به ترتیب برابر $21.047 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ و 0.00785 kg/cm^3 در نظر گرفته شده است.



شکل (الف-۲۴) - دکل انتقال نیرو ۱۶۰ میله‌ای

اعضای دکل انتقال نیرو ۱۶۰ میله‌ای در گروه ۳۸ بشرح جدول (الف-۳۴) دسته‌بندی شده و مقادیر تنش مجاز کششی و فشاری برای تمامی اعضا برابر $1500 \text{ kg/cm}^2 \pm$ منظور می‌شود. قید کمانش اعضای فشاری نیز بشرح روابط زیر تعریف شده است.

در حالی که $kl/r \leq 120$ است:

$$\sigma_{all} = 1300 - \frac{(kl/r)^2}{24} \quad (\text{الف-۶})$$

و در صورتی که $kl/r > 120$ است:

$$\sigma_{all} = \frac{10^7}{(kl/r)^2}$$

(الف-۷)

در روابط فوق k برابر یک فرض می‌شود.

جدول (الف-۳۴) گروه‌بندی و همبندی اعضای دکل انتقال نیرو ۱۶۰ میلیه‌ای

شماره ابتدا	شماره ابتدا	شماره ابتدا	شماره ابتدا	شماره ابتدا	شماره ابتدا	شماره ابتدا	شماره ابتدا	شماره ابتدا	شماره ابتدا	شماره ابتدا	شماره ابتدا	شماره ابتدا	شماره ابتدا	شماره ابتدا	شماره ابتدا	شماره ابتدا	شماره ابتدا	شماره ابتدا	شماره ابتدا
۳۱	۳۶	۳۵	۱۲۹	۲۱	۲۹	۲۶	۹۷	۱۳	۲۷	۲۱	۶۵	۶	۱۶	۱۱	۳۳	۱	۵	۱	۱
۳۱	۳۸	۳۶	۱۳۰	۲۱	۳۰	۲۷	۹۸	۱۳	۲۶	۲۲	۶۶	۶	۱۵	۱۲	۳۴	۱	۶	۲	۲
۳۱	۳۹	۳۸	۱۳۱	۲۲	۳۵	۳۱	۹۹	۱۳	۳۰	۲۳	۶۷	۶	۱۳	۱۲	۳۵	۱	۷	۳	۳
۳۱	۳۵	۳۹	۱۳۲	۲۲	۳۶	۳۲	۱۰۰	۱۳	۲۹	۲۴	۶۸	۶	۱۶	۹	۳۶	۱	۸	۴	۴
۳۲	۴۴	۴۰	۱۳۳	۲۲	۳۸	۳۳	۱۰۱	۱۴	۲۹	۲۲	۶۹	۷	۱۸۱۷	۱۳	۳۷	۲	۶	۱	۵
۳۲	۴۵	۴۱	۱۳۴	۲۲	۳۹	۳۴	۱۰۲	۱۴	۲۷	۲۳	۷۰	۷	۱۹۱۸	۱۴	۳۸	۲	۵	۲	۶
۳۲	۴۶	۴۲	۱۳۵	۲۳	۳۹	۳۳	۱۰۳	۱۴	۲۶	۲۴	۷۱	۷	۲۰۱۹	۱۵	۳۹	۲	۷	۲	۷
۳۲	۴۷	۴۳	۱۳۶	۲۳	۳۵	۳۲	۱۰۴	۱۴	۳۰	۲۱	۷۲	۷	۲۰	۱۶	۴۰	۲	۶	۳	۸
۳۳	۴۵	۴۰	۱۳۷	۲۳	۳۶	۳۱	۱۰۵	۱۵	۲۷	۲۶	۷۳	۸	۱۸	۱۳	۴۱	۲	۸	۳	۹
۳۳	۴۶	۴۱	۱۳۸	۲۳	۳۸	۳۴	۱۰۶	۱۵	۲۹	۲۷	۷۴	۸	۱۷	۱۴	۴۲	۲	۷	۴	۱۰
۳۳	۴۷	۴۲	۱۳۹	۲۴	۳۸	۳۲	۱۰۷	۱۵	۳۰	۲۹	۷۵	۸	۱۹	۱۴	۴۳	۲	۵	۴	۱۱
۳۳	۴۴	۴۳	۱۴۰	۲۴	۳۶	۳۳	۱۰۸	۱۵	۲۶	۳۰	۷۶	۸	۱۸	۱۵	۴۴	۲	۸	۱	۱۲
۳۴	۴۵	۴۴	۱۴۱	۲۴	۳۵	۳۴	۱۰۹	۱۶	۲۶	۲۵	۷۷	۸	۲۰	۱۵	۴۵	۳	۹	۵	۱۳
۳۴	۴۶	۴۵	۱۴۲	۲۴	۳۹	۳۱	۱۱۰	۱۶	۲۸	۲۷	۷۸	۸	۱۹	۱۶	۴۶	۳	۱۰	۶	۱۴
۳۴	۴۷	۴۶	۱۴۳	۲۵	۳۵	۳۷	۱۱۱	۱۶	۳۰	۲۵	۷۹	۸	۱۷	۱۶	۴۷	۳	۱۱	۷	۱۵
۳۴	۴۷	۴۴	۱۴۴	۲۵	۳۹	۳۷	۱۱۲	۱۶	۲۸	۲۹	۸۰	۸	۲۰	۱۳	۴۸	۳	۱۲	۸	۱۶
۳۵	۴۸	۴۴	۱۴۵	۲۶	۴۰	۳۷	۱۱۳	۱۷	۳۱	۲۵	۸۱	۹	۲۱	۱۷	۴۹	۴	۱۰	۵	۱۷
۳۵	۴۹	۴۵	۱۴۶	۲۶	۴۳	۳۷	۱۱۴	۱۷	۳۲	۲۸	۸۲	۹	۲۲	۱۸	۵۰	۴	۹	۶	۱۸
۳۵	۵۰	۴۶	۱۴۷	۲۷	۴۰	۳۵	۱۱۵	۱۷	۳۳	۲۸	۸۳	۹	۲۳	۱۹	۵۱	۴	۱۱	۶	۱۹
۳۵	۵۱	۴۷	۱۴۸	۲۷	۴۱	۳۶	۱۱۶	۱۷	۳۴	۲۵	۸۴	۹	۲۴	۲۰	۵۲	۴	۱۰	۷	۲۰
۳۶	۴۸	۴۵	۱۴۹	۲۷	۴۲	۳۸	۱۱۷	۱۸	۳۱	۲۶	۸۵	۱۰	۲۲	۱۷	۵۳	۴	۱۲	۷	۲۱
۳۶	۴۹	۴۶	۱۵۰	۲۷	۴۳	۳۹	۱۱۸	۱۸	۳۲	۲۷	۸۶	۱۰	۲۱	۱۸	۵۴	۴	۱۱	۸	۲۲
۳۶	۵۰	۴۷	۱۵۱	۲۸	۳۸	۳۵	۱۱۹	۱۸	۳۳	۲۹	۸۷	۱۱	۲۳	۱۸	۵۵	۴	۹	۸	۲۳
۳۶	۵۱	۴۴	۱۵۲	۲۸	۳۹	۳۶	۱۲۰	۱۸	۳۴	۳۰	۸۸	۱۱	۲۲	۱۹	۵۶	۴	۱۲	۵	۲۴
۳۷	۴۹	۴۸	۱۵۳	۲۹	۴۰	۳۶	۱۲۱	۱۹	۳۲	۲۶	۸۹	۱۰	۲۴	۱۹	۵۷	۵	۱۳	۹	۲۵
۳۷	۵۰	۴۹	۱۵۴	۲۹	۴۱	۳۸	۱۲۲	۱۹	۳۱	۲۷	۹۰	۱۰	۲۳	۲۰	۵۸	۵	۱۴	۱۰	۲۶
۳۷	۵۱	۵۰	۱۵۵	۲۹	۴۲	۳۹	۱۲۳	۱۹	۳۴	۲۹	۹۱	۱۱	۲۱	۲۰	۵۹	۵	۱۵	۱۱	۲۷
۳۷	۵۱	۴۸	۱۵۶	۲۹	۴۳	۳۵	۱۲۴	۱۹	۳۳	۳۰	۹۲	۱۱	۲۴	۱۷	۶۰	۵	۱۶	۱۲	۲۸
۳۸	۵۲	۴۸	۱۵۷	۳۰	۴۱	۴۰	۱۲۵	۲۰	۳۳	۲۷	۹۳	۱۲	۲۶	۲۱	۶۱	۶	۱۴	۹	۲۹
۳۸	۵۲	۴۹	۱۵۸	۳۰	۴۲	۴۱	۱۲۶	۲۰	۳۲	۲۹	۹۴	۱۲	۲۷	۲۲	۶۲	۶	۱۳	۱۰	۳۰
۳۸	۵۲	۵۰	۱۵۹	۳۰	۴۳	۴۲	۱۲۷	۲۰	۳۱	۳۰	۹۵	۱۲	۲۹	۲۳	۶۳	۶	۱۵	۱۰	۳۱
۳۸	۵۲	۵۱	۱۶۰	۳۰	۴۰	۴۳	۱۲۸	۲۰	۳۴	۲۶	۹۶	۱۲	۳۰	۲۴	۶۴	۶	۱۴	۱۱	۳۲

بارهای مؤثر بر سازه در هشت وضعیت بشرح جدول (الف-۳۵) به سازه وارد و لیست مقاطع بشرح

جدول (الف-۳۶) در نظر گرفته می‌شود.

جدول (الف-۳۵) بارهای مؤثر بر دکل انتقال نیرو ۱۶۰ میله‌ای

وضعیت بارگذاری شماره گره				وضعیت بارگذاری شماره گره			
P_Z - kg	P_Y - kg	P_X - kg	شماره گره	P_Z - kg	P_Y - kg	P_X - kg	شماره گره
-۵۴۶		-۱۰۱۵	۲۵	-۵۴۶	--	-۱۰۹۱	۲۵
-۴۲۸	۱۲۵۹	-۶۳۶	۲۸	-۵۴۶	--	-۱۰۹۱	۲۸
-۵۴۶	--	-۹۵۱	۳۷	-۵۴۶	--	-۹۹۶	۳۷
-۴۹۱	--	-۹۱۷	۵۲	-۴۹۱	--	-۸۶۸	۵۲
-۵۴۶	--	-۱۰۱۵	۲۵	-۵۴۶	--	-۱۰۹۱	۲۵
-۵۴۶	--	-۱۰۱۵	۲۸	-۵۴۶	--	-۱۰۹۱	۲۸
-۴۲۸	۱۳۰۳	-۵۷۲	۳۷	-۵۴۶	--	-۹۹۶	۳۷
-۴۹۱	--	-۹۱۷	۵۲	-۳۶۳	۱۲۴۵	-۴۹۳	۵۲
-۵۴۶	--	-۱۰۱۵	۲۵	-۵۴۶	--	-۱۰۱۵	۲۵
-۴۲۸	۱۳۰۳	-۶۳۶	۲۸	-۵۴۶	--	-۱۰۱۵	۲۸
-۵۴۶	--	-۹۵۱	۳۷	-۵۴۶	--	-۹۵۱	۳۷
-۴۹۱	--	-۹۱۷	۵۲	-۴۹۱	--	-۹۱۷	۵۲
-۵۴۶	--	-۱۰۱۵	۲۵	-۵۴۶	--	-۱۰۱۵	۲۵
-۵۴۶	--	-۱۰۱۵	۲۸	-۵۴۶	--	-۱۰۱۵	۲۸
-۵۴۶	--	-۹۵۱	۳۷	-۴۲۸	۱۲۵۹	-۵۷۲	۳۷
-۳۶۳	۱۴۶۰	-۴۹۸	۵۲	-۵۴۶	--	-۹۱۷	۵۲

جدول (الف-۳۶) لیست مقاطع موجود برای دکل انتقال نیرو ۱۶۰ میله‌ای

r - cm	A - cm^2	شماره	r - cm	A - cm^2	شماره	r - cm	A - cm^2	شماره	r - cm	A - cm^2	شماره
۲/۹۴	۴۶/۹۴	۳۴	۲/۱۶	۲۱/۱۲	۲۳	۱/۲۶	۷/۴۴	۱۲	۰/۴۷	۱/۸۴	۱
۲/۹۲	۵۱	۳۵	۲/۳۶	۲۳/۲	۲۴	۱/۳۶	۸/۰۶	۱۳	۰/۵۷	۲/۲۶	۲
۳/۵۴	۵۲/۱	۳۶	۲/۵۷	۲۵/۱۲	۲۵	۱/۴۶	۸/۶۶	۱۴	۰/۶۷	۲/۶۶	۳
۳/۹۶	۶۱/۸۲	۳۷	۲/۳۵	۲۷/۵	۲۶	۱/۳۵	۹/۴	۱۵	۰/۷۷	۳/۰۷	۴
۳/۵۲	۶۱/۹	۳۸	۲/۵۶	۲۹/۸۸	۲۷	۱/۳۶	۱۰/۴۷	۱۶	۰/۸۷	۳/۴۷	۵
۳/۵۱	۶۸/۳	۳۹	۲/۱۴	۳۲/۷۶	۲۸	۱/۴۵	۱۱/۳۸	۱۷	۰/۹۷	۳/۸۸	۶
۳/۹۳	۷۶/۳۸	۴۰	۲/۳۳	۳۳/۹	۲۹	۱/۵۵	۱۲/۲۱	۱۸	۰/۹۷	۴/۷۹	۷
۳/۹۲	۹۰/۶	۴۱	۲/۹۷	۳۴/۷۷	۳۰	۱/۷۶	۱۳/۷۹	۱۹	۱/۰۶	۵/۲۷	۸
۳/۹۲	۹۴/۱۳	۴۲	۲/۵۴	۳۹/۱۶	۳۱	۱/۹۵	۱۵/۳۹	۲۰	۱/۱۶	۵/۷۵	۹
			۲/۹۳	۴۳	۳۲	۱/۷۴	۱۷/۰۳	۲۱	۱/۲۶	۶/۲۵	۱۰
			۲/۹۴	۴۵/۶۵	۳۳	۱/۹۴	۱۹/۰۳	۲۲	۱/۱۵	۶/۸۴	۱۱

مختصات گرهی دکل ۱۶۰ میله‌ای بشرح جدول (الف-۳۷) تعریف شده است.

جدول (الف-۳۷) مختصات گرهی دکل انتقال نیرو ۱۶۰ میله‌ای - cm

شماره	X	Y	Z	شماره	X	Y	Z	شماره	X	Y	Z
۱	-۱۰۵	-۱۰۵	۰	۱۹	۶۰/۰۸۵	۶۰/۰۸۵	۷۱۰	۳۷	-۲۰۷	۰	۱۲۵۶/۵
۲	۱۰۵	-۱۰۵	۰	۲۰	-۶۰/۰۸۵	۶۰/۰۸۵	۷۱۰	۳۸	۴۰	۴۰	۱۲۵۶/۵
۳	۱۰۵	۱۰۵	۰	۲۱	-۴۹/۸۰۵	-۴۹/۸۰۵	۸۷۲/۵	۳۹	-۴۰	۴۰	۱۲۵۶/۵
۴	-۱۰۵	۱۰۵	۰	۲۲	۴۹/۸۰۵	۴۹/۸۰۵	۸۷۲/۵	۴۰	-۴۰	-۴۰	۱۳۴۶/۵
۵	-۹۳/۹۲۹	-۹۳/۹۲۹	۱۷۵	۲۳	۴۹/۸۰۵	۴۹/۸۰۵	۸۷۲/۵	۴۱	۴۰	-۴۰	۱۳۴۶/۵
۶	۹۳/۹۲۹	-۹۳/۹۲۹	۱۷۵	۲۴	-۴۹/۸۰۵	۴۹/۸۰۵	۸۷۲/۵	۴۲	۴۰	۴۰	۱۳۴۶/۵
۷	۹۳/۹۲۹	۹۳/۹۲۹	۱۷۵	۲۵	-۲۱۴	۰	۱۰۲۷/۵	۴۳	-۴۰	۴۰	۱۳۴۶/۵
۸	-۹۳/۹۳۹	۹۳/۹۲۹	۱۷۵	۲۶	-۴۰	-۴۰	۱۰۲۷/۵	۴۴	-۲۶/۵۹۲	-۲۶/۵۹۲	۱۴۳۶/۵
۹	-۸۲/۸۵۹	-۸۲/۸۵۹	۳۵۰	۲۷	۴۰	۴۰	۱۰۲۷/۵	۴۵	۲۶/۵۹۲	-۲۶/۵۹۲	۱۴۳۶/۵
۱۰	۸۲/۸۵۹	-۸۲/۸۵۹	۳۵۰	۲۸	۲۱۴	۰	۱۰۲۷/۵	۴۶	۲۶/۵۹۲	۲۶/۵۹۲	۱۴۳۶/۵
۱۱	۸۲/۸۵۹	۸۲/۸۵۹	۳۵۰	۲۹	۴۰	۴۰	۱۰۲۷/۵	۴۷	-۲۶/۵۹۲	۲۶/۵۹۲	۱۴۳۶/۵
۱۲	-۸۲/۸۵۹	-۸۲/۸۵۹	۳۵۰	۳۰	-۴۰	-۴۰	۱۰۲۷/۵	۴۸	-۱۲/۷۳۷	-۱۲/۷۳۷	۱۵۲۶/۵
۱۳	-۷۱/۱۵۶	-۷۱/۱۵۶	۵۳۵	۳۱	-۴۰	-۴۰	۱۱۰۵/۵	۴۹	۱۲/۷۳۷	۱۲/۷۳۷	۱۵۲۶/۵
۱۴	۷۱/۱۵۶	-۷۱/۱۵۶	۵۳۵	۳۲	۴۰	۴۰	۱۱۰۵/۵	۵۰	۱۲/۷۳۷	۱۲/۷۳۷	۱۵۲۶/۵
۱۵	۷۱/۱۵۶	۷۱/۱۵۶	۵۳۵	۳۳	۴۰	۴۰	۱۱۰۵/۵	۵۱	-۱۲/۷۳۷	۱۲/۷۳۷	۱۵۲۶/۵
۱۶	-۷۱/۱۵۶	۷۱/۱۵۶	۵۳۵	۳۴	-۴۰	-۴۰	۱۱۰۵/۵	۵۲	۰	۰	۱۶۱۵
۱۷	-۶۰/۰۸۵	-۶۰/۰۸۵	۷۱۰	۳۵	-۴۰	-۴۰	۱۲۵۶/۵				
۱۸	۶۰/۰۸۵	۶۰/۰۸۵	۷۱۰	۳۶	۴۰	۴۰	۱۲۵۶/۵				

نتایج حاصل برای طرح بهینه دکل انتقال نیرو ۱۶۰ میله‌ای در جدول (الف-۳۸) همراه با نتایج دیگر

مراجع ارائه شده است.

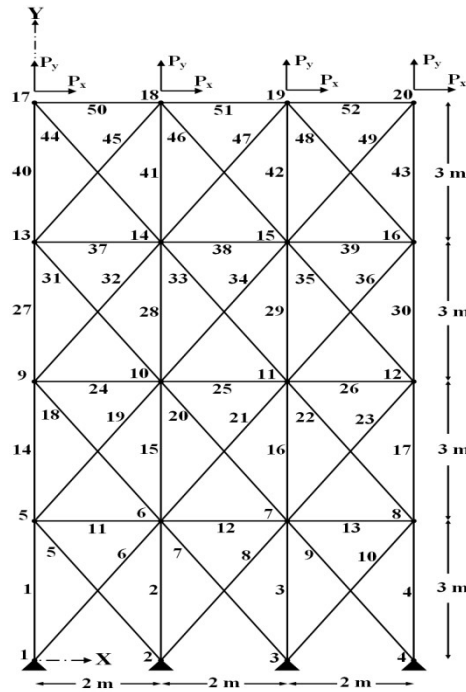
جدول (الف-۳۸) نتایج طرح بهینه دکل انتقال نیرو ۱۶۰ میله‌ای براساس روش MHSM - cm^2

شماره گروه مرجع [۹۲]	مرجع [۴۴]	مرجع [۷۴] MHSM	شماره گروه مرجع [۹۲]	مرجع [۴۴]	مرجع [۷۴] MHSM	مرجع [۴۴]	مرجع [۷۴] MHSM	شماره گروه مرجع [۹۲]	مرجع [۴۴]	مرجع [۷۴] MHSM
۱	۱۹/۰۳	۱۹/۰۳	۱۹/۰۳	۱۹/۰۳	۱۹/۰۳	۱۹/۰۳	۱۹/۰۳	۱	۱۹/۰۳	۳/۰۷
۲	۵/۲۷	۵/۲۷	۵/۲۷	۵/۲۷	۵/۲۷	۵/۲۷	۵/۲۷	۲	۵/۲۷	۲/۶۶
۳	۱۹/۰۳	۱۹/۰۳	۱۹/۰۳	۱۹/۰۳	۱۹/۰۳	۱۹/۰۳	۱۹/۰۳	۳	۱۹/۰۳	۸/۰۶
۴	۵/۲۷	۵/۲۷	۵/۲۷	۵/۲۷	۵/۲۷	۵/۲۷	۵/۲۷	۴	۵/۲۷	۵/۲۷
۵	۱۹/۰۳	۱۹/۰۳	۱۹/۰۳	۱۹/۰۳	۱۹/۰۳	۱۹/۰۳	۱۹/۰۳	۵	۱۹/۰۳	۶/۲۵
۶	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۶	۵/۷۵	۵/۷۵
۷	۱۵/۳۹	۱۵/۳۹	۱۵/۳۹	۱۵/۳۹	۱۵/۳۹	۱۵/۳۹	۱۵/۳۹	۷	۱۵/۳۹	۱/۸۴
۸	۶/۲۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۸	۵/۷۵	۴/۷۹
۹	۱۳/۷۹	۱۳/۷۹	۱۳/۷۹	۱۳/۷۹	۱۳/۷۹	۱۳/۷۹	۱۳/۷۹	۹	۱۳/۷۹	۲/۶۶
۱۰	۶/۲۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۱۰	۵/۷۵	۳/۴۷
۱۱	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۱۱	۵/۷۵	۱/۸۴
۱۲	۱۲/۲۱	۱۲/۲۱	۱۲/۲۱	۱۲/۲۱	۱۲/۲۱	۱۲/۲۱	۱۲/۲۱	۱۲	۱۲/۲۱	۲/۲۶
۱۳	۶/۸۴	۶/۲۵	۶/۲۵	۶/۲۵	۶/۲۵	۶/۲۵	۶/۲۵	۱۳	۶/۲۵	۳/۸۸
۱۴	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۵/۷۵	۱۴	۵/۷۵	۱/۸۴
۱۵	۲/۶۶	۳/۴۷	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶	۱۵	۲/۶۶	۱/۸۴
۱۶	۷/۴۴	۷/۴۴	۷/۴۴	۷/۴۴	۷/۴۴	۷/۴۴	۷/۴۴	۱۶	۷/۴۴	۳/۸۸
۱۷	۱/۸۴	۱/۸۴	۱/۸۴	۱/۸۴	۱/۸۴	۱/۸۴	۱/۸۴	۱۷	۱/۸۴	۱/۸۴
۱۸	۸/۶۶	۹/۴۰	۸/۶۶	۸/۶۶	۸/۶۶	۸/۶۶	۸/۶۶	۱۸	۸/۶۶	۱/۸۴
۱۹	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶	۲/۶۶	۱۹	۲/۶۶	۳/۸۸
					وزن - kg		۱۳۲۹/۷۱۵ ۱۳۳۱/۷۵ ۱۳۳۶/۷۴۹۳ ۱۳۵۹/۷۸۱			

الف-۱۷ بهینه‌یابی سطح مقطع خرپای مستوی ۵۲ میله‌ای

در این مثال به بهینه‌یابی خرپای ۵۲ میله‌ای پرداخته شده است. شکل (الف-۲۵) سازه مورد نظر را نمایش می‌دهد. E و ρ برای خرپای ۵۲ میله‌ای به ترتیب برابر $MPa \times 10^5$ و kg/m^3 ۷۸۶۰ فرض می‌شود. در شکل (الف-۲۵) مقادیر P_X و P_Y به ترتیب برابر $100 kN$ و $200 kN$ در نظر گرفته شده است.

از سوی دیگر اعضای خرپا در ۱۲ گروه دسته‌بندی شده و تنها قید تنش با محدوده مجاز $MPa \pm 180$ برای اعضای خرپا لحاظ شده است. لیست مقاطع برای فرآیند بهینه‌یابی خرپای ۵۲ میله‌ای بشرح جدول (الف-۱۸) می‌باشد.



شکل (الف-۲۵) - خرابای مستوی ۵۲ میله‌ای

نتایج طرح بهینه برای طرح بهینه خرابای ۵۲ میله‌ای براساس دیگر مراجع در جدول (الف-۳۹) و برای ایده‌ها و روش‌های پیشنهادی رساله حاضر در جدول (الف-۴۰) قابل مشاهده می‌باشد.

جدول (الف-۳۹) نتایج طرح بهینه خرابای ۵۲ میله‌ای براساس روش‌های مراجع مختلف - mm^2

مرجع [۵۱]	مرجع [۴۴]	مرجع [۵۰]	مرجع [۴۵]	مرجع [۵۴]	مرجع [۸۵]	شماره گروه
CSS	RBAS _{LU,2}	HS	HPSO	DHPSACO	GA	
۴۶۵۸/۰۵۵	۴۶۵۸/۰۵۵	۴۶۵۸/۰۵۵	۴۶۵۸/۰۵۵	۴۶۵۸/۰۵۵	۴۶۵۸/۰۵۵	a_1-a_4
۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸	a_5-a_{10}
۳۸۸/۳۸۶	۵۰۶/۴۵۱	۴۹۴/۱۹۳	۳۶۳/۲۲۵	۴۹۴/۱۹۳	۶۴۵/۱۶	$a_{11}-a_{13}$
۳۳۰۳/۲۱۹	۳۳۰۳/۲۱۹	۳۳۰۳/۲۱۹	۳۳۰۳/۲۱۹	۳۳۰۳/۲۱۹	۳۳۰۳/۲۱۹	$a_{14}-a_{17}$
۹۴۰	۹۴۰	۹۳۹/۹۹۸	۹۴۰	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۰۴۵/۱۵۹	$a_{18}-a_{23}$
۴۹۴/۱۹۳	۵۰۶/۴۵۱	۶۴۱/۲۸۹	۴۹۴/۱۹۳	۲۸۵/۱۶۱	۴۹۴/۱۹۳	$a_{24}-a_{26}$
۲۲۳۸/۷۰۵	۲۲۳۸/۷۰۵	۲۲۳۸/۷۰۵	۲۲۳۸/۷۰۵	۲۲۹۰/۳۱۸	۲۴۷۷/۴۱۴	$a_{27}-a_{30}$
۱۰۰۸/۳۸۵	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۰۴۵/۱۵۹	$a_{31}-a_{36}$
۴۹۴/۱۹۳	۳۸۸/۳۸۶	۳۶۳/۲۲۵	۳۸۸/۳۸۶	۳۸۸/۳۸۶	۲۸۵/۱۶۱	$a_{37}-a_{39}$
۱۲۸۳/۸۶۸	۱۲۸۳/۸۶۸	۱۲۸۳/۸۶۸	۱۲۸۳/۸۶۸	۱۲۸۳/۸۶۸	۱۶۹۶/۷۷۱	$a_{40}-a_{43}$
۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۰۴۵/۱۵۹	$a_{44}-a_{49}$
۴۹۴/۱۹۳	۵۰۶/۴۵۱	۴۹۴/۱۹۳	۷۹۲/۲۵۶	۵۰۶/۴۵۱	۶۴۱/۲۸۹	$a_{50}-a_{52}$
۰/۰۰۱۱۴۳	۰/۰۰۰۱۱۶	--	--	۰/۰۰۲۷۲۵	--	نقض قید
۱۸۹۷/۶۲	۱۸۹۹/۳۵	۱۹۰۳/۳۶	۱۹۰۵/۴۹۵	۱۹۰۴/۸۳	۱۹۷۰/۱۴۲	وزن - kg

جدول (الف-۴۰) نتایج طرح بهینه خرابای ۵۲ میله‌ای براساس ایده‌ها و روش‌های پیشنهادی رساله

شماره گروه	حالت ۲ ایده انفصال فضای طراحی در GA	حالت ۲ ایده انفصال فضای طراحی در ACO	روش پیشنهادی HACOHS-GA-T	روش پیشنهادی MP
۱ - mm ²	۴۶۵۸/۰۵۵	۴۶۵۸/۰۵۵	۴۶۵۸/۰۵۵	۴۶۵۸/۰۵۵
۲ - mm ²	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸
۳ - mm ²	۴۹۴/۱۹۳	۴۹۴/۱۹۳	۴۹۴/۱۹۳	۴۹۴/۱۹۳
۴ - mm ²	۳۳۰۳/۲۱۹	۳۳۰۳/۲۱۹	۳۳۰۳/۲۱۹	۳۳۰۳/۲۱۹
۵ - mm ²	۹۳۹/۹۹۸	۹۳۹/۹۹۸	۹۳۹/۹۹۸	۹۳۹/۹۹۸
۶ - mm ²	۴۹۴/۱۹۳	۴۹۴/۱۹۳	۴۹۴/۱۹۳	۴۹۴/۱۹۳
۷ - mm ²	۲۲۳۸/۷۰۵	۲۲۳۸/۷۰۵	۲۲۳۸/۷۰۵	۲۲۳۸/۷۰۵
۸ - mm ²	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۰۰۸/۳۸۵	۱۰۰۸/۳۸۵
۹ - mm ²	۴۹۴/۱۹۳	۵۰۶/۴۵۱	۴۹۴/۱۹۳	۴۹۴/۱۹۳
۱۰ - mm ²	۱۲۸۳/۸۶۸	۱۲۸۳/۸۶۸	۱۲۸۳/۸۶۸	۱۲۸۳/۸۶۸
۱۱ - mm ²	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸	۱۱۶۱/۲۸۸
۱۲ - mm ²	۴۹۴/۱۹۳	۴۹۴/۱۹۳	۴۹۴/۱۹۳	۴۹۴/۱۹۳
نقض قید	--	--	--	--
وزن - kg	۱۹۰۲/۶۰۵	۱۹۰۳/۱۸۳	۱۹۰۲/۶۰۵	۱۹۰۲/۶۰۵
میانگین	--	--	--	۱۹۴۶/۶۴۱

Abstract

Reach to maximum efficiency and minimum expenditure by choosing a proper system is an art in engineering. This issue results in appearance and development of optimization in different fields of engineering. In this regard, this thesis is established on five investigative lines to develop the optimization of structures using meta-heuristic methods and subsequently operation improvement of these methods. Novel achievements are obtained by trying purposive steps. Therefore, some of most common meta-heuristic methods in optimization problems of structures are studied in first investigative line. In this part, different dimensions and challenges of each method and sensitivity of algorithms to current parameters are trying to be determined and relevant suggestions are also proposed to improve the operation and to use the algorithms properly. In second investigative line, Multi Search Method (MSM) is offered to advance the operation of meta-heuristic algorithms using the results of previous line. Proficiency of this idea is evaluated in Genetic Algorithm based on various current structures. Afterwards, Multi Heuristic Search Method (MHSM) is presented to develop MSM takes advantage of different algorithms of meta-heuristic as the structure of each island. This method is one of the most successful algorithms for searching design spaces with remarkable precision and it could be beneficial in important fields of engineering. This method is studied in various domains and issues. Third investigative line proposes novel idea of sampling the searching space inspired by meshing process in finite element method. This concept, utilizing design space partitioning and seek the search space in two steps (global and local), can improve the operation speed and obtain desirably precise answers. Hybrid algorithm of HACOHSGA, which is resulted by combination of ACO, HS and GA methods, is offered as forth line of investigation. This method also has suitable speed for process of optimum design and employs the advantages of each method appropriately. Finally, at the last investigative step of this thesis, Moving Points (MP) method is suggested after a proper observation to meta-heuristic optimization methods. This method carries out the optimization

operation as an evolutionary process by mapping members and designs of each population to vector space and moving based on current population features. Characteristic of MP methods is stability in different performances, accordingly, after one performance can rely on obtaining suitable answer of optimization.

Keywords:

Optimization, Meta-heuristic algorithms, Multi search method, Multi heuristic search method, Sampling search space method, HACOHSGA method, Moving points method.



Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

**Optimization of Structures by Combinatorial Meta-heuristic
Methods**

Mohammad Hosein Talebpour

Supervisor:

Dr. Vahid Reza Kalatjari

Date: February, 2014