

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



پردیس بین المللی خوارزمی

رساله دکتری مهندسی سازه

# انتخاب بهینه محل، آرایش و تعداد دهانه‌های بادبندی در سازه‌های فولادی با استفاده از روش کاوش چندفرآیندکاری و قیود دینامیکی

نگارنده: امیرحسین مهاجر

استاد راهنما

دکتر وحیدرضا کلاتجاری

استاد مشاور

دکتر محمدحسین طالب‌پور

بهمن ۱۴۰۰

تقدیم بہ پدر مادر مہربانم

باسپاس از استاد راهنمای محترم جناب آقای دکتر کلاتجاری که اینجانب را  
در تهیه رساله یاری نمودند. همچنین مراتب تشکر خود را از جناب آقای  
دکتر طالب پور استاد مشاور گرامی، اعلام می نمایم.

# تعمد نامه

اینجانب **امیرحسین مهاجر** دانشجوی دوره دکتری رشته **عمران پردیس بین المللی خوارزمی** دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده رساله **انتخاب بهینه محل، آرایش و تعداد دهانه‌های مهاربندی در سازه‌های فولادی با استفاده از روش کاوش چندفرآیندکاری و قیود دینامیکی تحت راهنمایی دکتر وحیدرضا کلاتجاری** متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

## تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

مسئله بهینه‌سازی و تجزیه و تحلیل سازه‌ها از سالها پیش در مجامع مهندسی سازه مطرح بوده است و همواره علاقه مهندسين بر استفاده بهينه از مصالح از جمله مصالح سازه‌ای و تأمين حداکثر ايمني بوده است. هدف طراحی بهينه قابهای فولادی معمولاً بهينه کردن وزن قاب (با عنوان تابع هدف) است. تاکيد اين رساله بر يافتن مختصات و آرایش بهينه مناسب از بين سه تپ مهاربند همگرا در قابهای فولادی ساده کوتاه، متوسط و بلند مرتبه با ابعاد و دهانه‌های مشخص می‌باشد، در نهايت نیز یک طرح بهينه وزنی برای قابها تحت قيود مقاومت طراحی (روش LRF)، فرکانس، جابجایی، مکان مهاربندها در ارتفاع قاب و مقدار نیروی کششی مهاربندها ارائه می‌گردد. همچنین متغیرهای طراحی شامل مقاطع تمامی المانها، مختصات گره‌ای دو سر مهاربند و یکی از تپ‌های مهاربند همگرا (شامل مهاربند هفتی- هشتی یک در میان، مهاربند ضربدری و مهاربند قطری) می‌باشند. در این پژوهش قابها با استفاده از ارتباط بين دو نرم‌افزار OPENSEES و MATLAB بر مبنای الگوریتم بهينه‌سازی چندفرآینتکاری (روشی ترکیبی و نوین بر اساس پردازش موازی جزیره‌ای با چهار جزیره) که دارای متغیرهای گسسته هستند، بهينه‌سازی شده‌اند. یافته‌های این تحقیق شامل مقاطع و موقعیت بهينه مهاربندها در قابها، تاریخچه همگرایی برای قابها تحت الگوریتم بهينه‌سازی چندفرآینتکاری و نسبت تقاضا به ظرفیت قابهای بهينه شده تحت قيود اعمال شده می‌باشند. ضمناً در گروه قابهای میان مرتبه (با مهاربندی هفتی- هشتی) برای نشان دادن کارایی الگوریتم بهينه‌سازی چندفرآینتکاری، نمودار همگرایی این دسته از قابها تحت الگوریتم کلونی مورچگان نیز ارائه شده است. نتایج، سرعت بالای همگرایی و کیفیت مناسب جواب‌های بهينه روش کاوش چندفرآینتکاری نسبت به الگوریتم بهينه‌سازی کلونی مورچگان را در این قابها نشان می‌دهند. قابل ذکر می‌باشد که وزن قابهای میان مرتبه در شروع بهينه‌سازی با الگوریتم کلونی مورچگان ۵۱٪ بیشتر از الگوریتم این پژوهش است و در حالیکه میانگین همگرایی در الگوریتم چندفرآینتکاری ۱۳۶ تکرار می‌باشد الگوریتم کلونی مورچگان با میانگین ۸۶ تکرار بیشتر از الگوریتم چندفرآینتکاری به همگرایی خود رسیده است. نهایتاً هم الگوریتم چندفرآینتکاری نسبت به الگوریتم کلونی مورچگان با میانگین اختلاف وزن ۷/۵٪ قابهای میان مرتبه را بهينه‌تر طرح نموده است. همچنین طبق نتایج بهينه‌یابی با الگوریتم چندفرآینتکاری وزن بهينه ابتدا متعلق به قابهای ساده با مهاربندی هفتی- هشتی سپس از آن مهاربندی قطری و در آخر برای مهاربندی ضربدری می‌باشد. به بیان دقیقتر میانگین وزن بهينه قابهای ساده با مهاربند هفتی- هشتی ۶/۸٪ کمتر از میانگین وزن مهاربند ضربدری و میانگین وزن قابهای ساده با مهاربند قطری نیز ۴/۲٪ کمتر از میانگین وزن مهاربند ضربدری شده است. در مورد محل بهينه جایگذاری مهاربندها هم نتایج الگوریتم پیشنهادی نشان داد مهاربندها در دهانه‌های مرکزی و مجاور هم قرار گرفته‌اند.

**کلمات کلیدی:** بهينه‌سازی، الگوریتم چندفرآینتکاری، قاب فولادی ساده، جانمایی و آرایش بهينه بابدند همگرا، قید فرکانس، پردازش موازی جزیره‌ای.

## مقاله مستخرج از رساله

Mohajer. A. H, Kalatjari. V. R, Talebpour. M. H, 2022, Optimization of location, topology and number of bracing spans in steel structures using multi meta-heuristic based search method and dynamic constraints, **International Journal of Steel Structures**.

# فهرست مطالب

|    |                                             |
|----|---------------------------------------------|
| ۱  | فصل اول: کلیات                              |
| ۲  | ۱-۱ مقدمه.....                              |
| ۸  | ۲-۱ بهینه‌سازی در مهندسی سازه.....          |
| ۱۰ | ۳-۱ دسته‌بندی مسائل بهینه‌سازی.....         |
| ۱۰ | ۱-۳-۱ مسائل برنامه‌ریزی خطی و غیرخطی.....   |
| ۱۰ | ۲-۳-۱ مسائل درجه دوم.....                   |
| ۱۱ | ۴-۱ تکنیک‌های حل مسائل بهینه‌سازی.....      |
| ۱۱ | ۵-۱ سیستم‌های مقاوم در برابر بار جانبی..... |
| ۱۲ | ۱-۵-۱ سیستم قاب‌های مهاربندی شده.....       |
| ۱۲ | ۶-۱ تحلیل.....                              |
| ۱۲ | ۱-۶-۱ تحلیل استاتیکی.....                   |
| ۱۳ | ۲-۶-۱ تحلیل دینامیکی.....                   |
| ۱۳ | ۷-۱ روش محاسباتی.....                       |
| ۱۳ | ۱-۷-۱ روش‌های عددی.....                     |
| ۱۳ | ۸-۱ ابعاد رساله.....                        |
| ۱۵ | ۹-۱ اهداف تحقیق.....                        |
| ۱۶ | ۱۰-۱ ضرورت انجام تحقیق.....                 |
| ۱۶ | ۱۱-۱ فرضیات تحقیق.....                      |
| ۱۷ | ۱۲-۱ ساختار، محتوا و محدودیت‌های پژوهش..... |

## فصل دوم: مروری بر ادبیات فنی و مطالعات پیشین

۱۹

۱-۲ مقدمه..... ۲۰

۲-۲ بهینه‌سازی و بهینه‌سازی در مهندسی..... ۲۱

۱-۲-۲ تاریخچه بهینه‌سازی..... ۲۳

۳-۲ روش‌های ابتکاری و فراابتکاری..... ۲۵

۱-۳-۲ رده‌بندی الگوریتم‌های فراابتکاری..... ۲۵

۲-۳-۲ سابقه روش‌های فراابتکاری..... ۲۶

۴-۲ بهینه‌سازی سازه و الگوریتم‌های آن..... ۳۱

۱-۴-۲ تاریخچه بهینه‌سازی سازه‌های فولادی مهاربندی..... ۳۴

۵-۲ مرور تحقیقات گذشته پیرامون مباحث بهینه‌سازی- روش فراابتکاری به همراه الگوریتم‌های آن-

بهینه‌سازی سازه و سیستم مهاربندی..... ۳۷

۶-۲ بهینه‌سازی قاب تحت قید فرکانس و مروری بر تحقیقات انجام شده در این زمینه..... ۵۱

۷-۲ جمع‌بندی..... ۵۴

## فصل سوم: مبانی نظری، روش و راهکار انجام پژوهش

۵۵

۱-۳ مقدمه..... ۵۶

۲-۳ الگوریتم ژنتیک..... ۵۷

۱-۲-۳ فرایند انتخاب..... ۶۱

۱-۱-۲-۳ روش چرخ گردان..... ۶۱

۲-۱-۲-۳ روش رتبه‌بندی..... ۶۲

۳-۱-۲-۳ روش رقابتی..... ۶۳

۲-۲-۳ عملگر پیوند..... ۶۳

۱-۲-۲-۳ پیوند تک نقطه‌ای..... ۶۴

- ۶۴.....۳-۲-۲ پیوند دو نقطه‌ای
- ۶۵.....۳-۲-۲ پیوند یکنواخت
- ۶۵.....۳-۲-۳ عملگر جهش
- ۶۶.....۳-۲-۱ جهش با نرخ ثابت
- ۶۶.....۳-۲-۲ جهش با نرخ صعودی
- ۶۷.....۳-۲-۳ جهش با نرخ نزولی
- ۶۷.....۳-۳ الگوریتم ازدحام ذرات
- ۷۰.....۳-۳-۱ بررسی ضرایب  $C_1$  و  $C_2$
- ۷۱.....۳-۳-۱ حالت ۱ برای ضرایب  $C_1$  و  $C_2$
- ۷۱.....۳-۳-۲ حالت ۲ برای ضرایب  $C_1$  و  $C_2$
- ۷۱.....۳-۳-۳ حالت ۳ برای ضرایب  $C_1$  و  $C_2$
- ۷۲.....۳-۳-۴ حالت ۴ برای ضرایب  $C_1$  و  $C_2$
- ۷۲.....۳-۴ الگوریتم بیگ بنگ- بیگ کرانچ
- ۷۵.....۳-۵ الگوریتم جستجو ذرات باردار
- ۸۰.....۳-۵-۱ پارامتر زمانی
- ۸۰.....۳-۶ پردازش موازی الگوریتم‌ها
- ۸۱.....۳-۶-۱ الگوریتم ژنتیکی موازی جزیره‌ای
- ۸۳.....۳-۷ الگوریتم روش جستجو چندمنظوره مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری
- ۸۶.....۳-۸ فرمول‌بندی و کلاسه‌بندی مساله بهینه‌سازی در جزیره‌های الگوریتم چندفراابتکاری
- ۸۸.....۳-۸-۱ تعریف تابع هدف، شبه هدف و تابع جریمه در جزیره‌های الگوریتم چندفراابتکاری
- ۸۹.....۳-۸-۲ تعریف قیود در جزیره‌های الگوریتم چندفراابتکاری

- ۸۹.....۳-۸-۲-۱ قید مقاومت طراحی
- ۹۱.....۳-۸-۲-۲ قید جابجایی نسبی (دریفت)
- ۹۲.....۳-۸-۲-۳ قید فرکانس
- ۹۳.....۳-۸-۲-۴ قید مقدار مجاز (قابل تحمل) نیروی کششی مهاربندها
- ۹۴.....۳-۸-۲-۵ قرارگیری محل مهاربندها در دهانه ها و در ارتفاع قاب
- ۹۴.....۳-۹ معرفی قابها، توزیع نیروی لرزه‌ای و بارگذاری
- ۹۶.....۳-۱۰ صحت‌سنجی الگوریتم مورد مطالعه

#### فصل چهارم: یافته‌های پژوهش

- ۱۰۱.....۴-۱ مقدمه
- ۱۰۲.....۴-۲ لیست مقاطع المانهای بهینه‌یابی شده
- ۱۰۲.....۴-۳ وزن و تیپ‌بندی مقاطع قابهای بهینه‌یابی شده
- ۱۰۳.....۴-۴ نحوه اجرای برنامه‌های نگارش شده
- ۱۰۳.....۴-۵ مقادیر پارامترهای به کار رفته در الگوریتم‌های فراابتکاری جزایر
- ۱۰۵.....۴-۶ تاریخچه وزنی قابها در مرحله وقفه مهاجرت
- ۱۱۱.....۴-۷ نتایج قاب ۶ طبقه (سه دهانه و مهاربند ضربدری)
- ۱۱۳.....۴-۸ نتایج قاب ۶ طبقه (سه دهانه و مهاربند هفتی-هشتی)
- ۱۱۵.....۴-۹ نتایج قاب ۶ طبقه (سه دهانه و مهاربند قطری)
- ۱۱۶.....۴-۱۰ نتایج قاب ۶ طبقه (چهار دهانه و مهاربند ضربدری)
- ۱۱۸.....۴-۱۱ نتایج قاب ۶ طبقه (چهار دهانه و مهاربند هفتی-هشتی)
- ۱۲۰.....۴-۱۲ نتایج قاب ۶ طبقه (چهار دهانه و مهاربند قطری)

- ۱۳-۴ نتایج قاب ۶ طبقه (پنج دهانه و مهاربند ضربدری)..... ۱۲۱
- ۱۴-۴ نتایج قاب ۶ طبقه (پنج دهانه و مهاربند هفتی- هشتی)..... ۱۲۳
- ۱۵-۴ نتایج قاب ۶ طبقه (پنج دهانه و مهاربند قطری)..... ۱۲۵
- ۱۶-۴ نتایج قاب ۹ طبقه (چهار دهانه و مهاربند ضربدری)..... ۱۲۶
- ۱۷-۴ نتایج قاب ۹ طبقه (چهار دهانه و مهاربند هفتی- هشتی)..... ۱۲۸
- ۱۸-۴ نتایج قاب ۹ طبقه (چهار دهانه و مهاربند قطری)..... ۱۳۰
- ۱۹-۴ نتایج قاب ۹ طبقه (پنج دهانه و مهاربند ضربدری)..... ۱۳۱
- ۲۰-۴ نتایج قاب ۹ طبقه (پنج دهانه و مهاربند هفتی- هشتی)..... ۱۳۳
- ۲۱-۴ نتایج قاب ۹ طبقه (پنج دهانه و مهاربند قطری)..... ۱۳۵
- ۲۲-۴ نتایج قاب ۹ طبقه (شش دهانه و مهاربند ضربدری)..... ۱۳۶
- ۲۳-۴ نتایج قاب ۹ طبقه (شش دهانه و مهاربند هفتی- هشتی)..... ۱۳۸
- ۲۴-۴ نتایج قاب ۹ طبقه (شش دهانه و مهاربند قطری)..... ۱۴۰
- ۲۵-۴ نتایج قاب ۱۵ طبقه (هفت دهانه و مهاربند ضربدری)..... ۱۴۱
- ۲۶-۴ نتایج قاب ۱۵ طبقه (هفت دهانه و مهاربند هفتی- هشتی)..... ۱۴۳
- ۲۷-۴ نتایج قاب ۱۵ طبقه (هفت دهانه و مهاربند قطری)..... ۱۴۵
- ۲۸-۴ نتایج قاب ۱۵ طبقه (هشت دهانه و مهاربند ضربدری)..... ۱۴۶
- ۲۹-۴ نتایج قاب ۱۵ طبقه (هشت دهانه و مهاربند هفتی- هشتی)..... ۱۴۸
- ۳۰-۴ نتایج قاب ۱۵ طبقه (هشت دهانه و مهاربند قطری)..... ۱۵۰
- ۳۱-۴ نتایج قاب ۱۵ طبقه (ده دهانه و مهاربند ضربدری)..... ۱۵۱
- ۳۲-۴ نتایج قاب ۱۵ طبقه (ده دهانه و مهاربند هفتی- هشتی)..... ۱۵۳
- ۳۳-۴ نتایج قاب ۱۵ طبقه (ده دهانه و مهاربند قطری)..... ۱۵۵

۳۴-۴ جمع‌بندی نتایج..... ۱۵۶

۳۵-۴ مقایسه نتایج حاصل شده با نتایج طراحی به روشهای متداول..... ۱۵۷

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۶۳

۱-۵ مقدمه..... ۱۶۴

۲-۵ مقایسه نتایج بهینه در قابهای ۹ طبقه با الگوریتم MHSM و الگوریتم ACO..... ۱۶۴

۳-۵ مقایسه نتایج بهینه در قابها با آرایش مهاربندی ضربدری، هفتی- هشتی و قطری..... ۱۶۵

۴-۵ بررسی و تفسیر نمودارهای منته از قیود اعمالی بر قابها..... ۱۶۷

۵-۵ خلاصه و نتیجه‌گیری..... ۱۶۸

۶-۵ پیشنهادات..... ۱۷۰

پیوست‌ها ۱۷۱

الف: برنامه تحلیل در اپنسیس..... ۱۷۲

ب: برنامه تحلیل مودال در اپنسیس..... ۱۷۹

پ: برنامه تابع هدف در متلب..... ۱۸۳

ت: برنامه الگوریتم ازدحام ذرات..... ۱۸۷

ث: برنامه الگوریتم جستجو ذرات باردار..... ۱۸۹

ج: برنامه الگوریتم ژنتیک..... ۱۹۱

چ: برنامه الگوریتم بیگ بنگ- بیگ کرانچ..... ۱۹۳

مراجع ۱۹۵

## فهرست جداول

- جدول (۱-۲): قاب سه طبقه با مهاربند هم محور..... ۴۷
- جدول (۲-۲): قاب سه طبقه با مهاربند برون محور..... ۴۷
- جدول (۳-۲): قاب هفت طبقه با مهاربند هم محور..... ۴۷
- جدول (۴-۲): قاب هفت طبقه با مهاربند برون محور..... ۴۸
- جدول (۵-۲): قاب ده طبقه با مهاربند هم محور..... ۴۸
- جدول (۶-۲): قاب ده طبقه با مهاربند برون محور..... ۴۹
- جدول (۱-۳): اطلاعات فهرست شتاب نگاشتی پیشنهادی..... ۹۳
- جدول (۲-۳): روابط حاکم بر برخی از پارامترهای معادله (۴۸-۳)..... ۹۵
- جدول (۳-۳): توضیح پارامترهای رابطه (۴۹-۳) در آیین نامه لرزه ای کشور آمریکا..... ۹۶
- جدول (۴-۳): مقایسه بین نتایج بهینه سازی با روش الگوریتم چندفرابتنکاری و روش الگوریتم ژنتیک برای انتخاب بهینه محل مهاربند..... ۱۰۰
- جدول (۱-۴): پارامترهای الگوریتم ژنتیک..... ۱۰۴
- جدول (۲-۴): پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات..... ۱۰۵
- جدول (۳-۴): پارامترهای الگوریتم جستجو ذرات باردار..... ۱۰۵
- جدول (۴-۴): پارامترهای الگوریتم بیگ بنگ- بیگ کرانچ..... ۱۰۵
- جدول (۵-۴): مقایسه وزن بهینه قابها در دو الگوریتم MHSM و الگوریتم ACO..... ۱۵۶
- جدول (۶-۴): مقایسه وزن بهینه قابها با مهاربند ضربدری، مهاربند هفتی- هشتی و مهاربند قطری..... ۱۵۶
- جدول (۷-۴): میانگین نسبت تنش، میانگین نسبت فرکانس بار به فرکانس قابها و میانگین نسبت جابجایی نسبی به جابجایی مجاز طبقات با مهاربند ضربدری، مهاربند هفتی- هشتی و مهاربند قطری..... ۱۵۷

جدول (۴-۸) : مقایسه وزن بهینه دو قاب ۶ و ۹ طبقه در حالت بهینه‌یابی با الگوریتم رساله و طراحی بهینه  
با نرم‌افزار ایتبس..... ۱۶۱

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۱): نمونه ای از چیدمان مهاربندی براساس طرح معمول و طرح پراکنده..... ۶
- شکل (۱-۲): نمونه ای از طبقه بندی انواع روش های بهینه سازی..... ۲۲
- شکل (۱-۳): فرایند بهینه یابی بر اساس روش GA..... ۵۸
- شکل (۲-۳): مدلی از چرخ گردان..... ۶۲
- شکل (۳-۳): شیوه پیوند تک نقطه ای..... ۶۴
- شکل (۴-۳): شیوه پیوند دو نقطه ای..... ۶۴
- شکل (۵-۳): شیوه پیوند یکنواخت..... ۶۵
- شکل (۶-۳): فرایند بهینه یابی بر اساس روش PSO..... ۷۰
- شکل (۷-۳): فرایند بهینه یابی بر اساس روش BB-BC..... ۷۴
- شکل (۸-۳): فرایند بهینه یابی بر اساس روش CSS..... ۷۶
- شکل (۹-۳): طرح شماتیک از نحوه تقسیم جمعیت و مهاجرت بین جزایر..... ۸۲
- شکل (۱۰-۳): مهاجرت طرح های منتخب به جزیره برتر در روش کاوش چندفرآیندکاری (MHSM)..... ۸۴
- شکل (۱۱-۳): الگوریتم روش پیشنهادی جستجو چندمنظوره (MHSM)..... ۸۵
- شکل (۱۲-۳): فلوچارت کلی بهینه یابی در هر جزیره..... ۸۸
- شکل (۱۳-۳): مثالهای مورد مطالعه در مقاله صحت سنجی..... ۹۷
- شکل (۱۴-۳): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند قاب ۸ طبقه صفری و ماهر..... ۹۸
- شکل (۱۵-۳): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند قاب ۴ طبقه صفری و ماهر..... ۹۹
- شکل (۱-۴): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند ضربدری در قاب ۶ طبقه ۳ دهانه..... ۱۱۱
- شکل (۲-۴): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند هفتی\_ هشتی در قاب ۶ طبقه ۳ دهانه..... ۱۱۳

- شکل (۳-۴): موقعیت بهینه مهاربند قطری در قاب ۶ طبقه ۳ دهانه..... ۱۱۵
- شکل (۴-۴): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند ضربدری در قاب ۶ طبقه ۴ دهانه..... ۱۱۶
- شکل (۵-۴): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند هفتی- هشتی در قاب ۶ طبقه ۴ دهانه..... ۱۱۸
- شکل (۶-۴): موقعیت بهینه مهاربند قطری در قاب ۶ طبقه ۴ دهانه..... ۱۲۰
- شکل (۷-۴): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند ضربدری در قاب ۶ طبقه ۵ دهانه..... ۱۲۱
- شکل (۸-۴): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند هفتی- هشتی در قاب ۶ طبقه ۵ دهانه..... ۱۲۳
- شکل (۹-۴): موقعیت بهینه مهاربند قطری در قاب ۶ طبقه ۵ دهانه..... ۱۲۵
- شکل (۱۰-۴): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند ضربدری در قاب ۹ طبقه ۴ دهانه..... ۱۲۶
- شکل (۱۱-۴): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند هفتی- هشتی در قاب ۹ طبقه ۴ دهانه..... ۱۲۸
- شکل (۱۲-۴): موقعیت بهینه مهاربند قطری در قاب ۹ طبقه ۴ دهانه..... ۱۳۰
- شکل (۱۳-۴): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند ضربدری در قاب ۹ طبقه ۵ دهانه..... ۱۳۱
- شکل (۱۴-۴): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند هفتی- هشتی در قاب ۹ طبقه ۵ دهانه..... ۱۳۳
- شکل (۱۵-۴): موقعیت بهینه مهاربند قطری در قاب ۹ طبقه ۵ دهانه..... ۱۳۵
- شکل (۱۶-۴): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند ضربدری در قاب ۹ طبقه ۶ دهانه..... ۱۳۶
- شکل (۱۷-۴): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند قاب هفتی- هشتی در ۹ طبقه ۶ دهانه..... ۱۳۸
- شکل (۱۸-۴): موقعیت بهینه مهاربند قطری در قاب ۹ طبقه ۶ دهانه..... ۱۴۰
- شکل (۱۹-۴): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند ضربدری در قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه..... ۱۴۱
- شکل (۲۰-۴): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند هفتی- هشتی در قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه..... ۱۴۳
- شکل (۲۱-۴): موقعیت بهینه مهاربند قطری در قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه..... ۱۴۵
- شکل (۲۲-۴): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند ضربدری در قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه..... ۱۴۶
- شکل (۲۳-۴): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند هفتی- هشتی در قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه..... ۱۴۸

- شکل (۴-۲۴): موقعیت بهینه مهاربند قطری در قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه..... ۱۵۰
- شکل (۴-۲۵): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند ضربدری در قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه..... ۱۵۱
- شکل (۴-۲۶): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند هفتی\_ هشتی در قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه..... ۱۵۳
- شکل (۴-۲۷): موقعیت بهینه مهاربند قطری در قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه..... ۱۵۵
- شکل (۴-۲۸): کنترل مقاطع قاب بهینه شده ۶ طبقه با مهاربند ضربدری در نرم افزار ایتبس ..... ۱۵۸
- شکل (۴-۲۹): طراحی مقاطع بهینه قاب ۶ طبقه، معرفی شده توسط کاربر در نرم افزار ایتبس (وزن ۸/۱ تن، حالت اول)..... ۱۵۸
- شکل (۴-۳۰): طراحی مقاطع بهینه قاب ۶ طبقه، معرفی شده توسط کاربر در نرم افزار ایتبس (وزن ۷/۹۷ تن، حالت دوم)..... ۱۵۹
- شکل (۴-۳۱): کنترل مقاطع قاب بهینه شده ۹ طبقه با مهاربند هفتی\_ هشتی در نرم افزار ایتبس..... ۱۵۹
- شکل (۴-۳۲): طراحی مقاطع بهینه قاب ۹ طبقه، معرفی شده توسط کاربر در نرم افزار ایتبس (وزن ۳۰ تن، حالت اول)..... ۱۶۰
- شکل (۴-۳۳): طراحی مقاطع بهینه قاب ۹ طبقه، معرفی شده توسط کاربر در نرم افزار ایتبس (وزن ۲۵/۸۶ تن، حالت دوم)..... ۱۶۰

## فهرست نمودارها

- نمودار (۱-۲): مقایسه وزن قاب ۳ طبقه با مهاربند هم محور در حالات مختلف جدول (۱-۲)..... ۴۹
- نمودار (۲-۲): مقایسه وزن قاب ۳ طبقه با مهاربند برون محور در حالات مختلف جدول (۲-۲)..... ۴۹
- نمودار (۳-۲): مقایسه وزن قاب ۷ طبقه با مهاربند هم محور در حالات مختلف جدول (۳-۲)..... ۵۰
- نمودار (۴-۲): مقایسه وزن قاب ۷ طبقه با مهاربند برون محور در حالات مختلف جدول (۴-۲)..... ۵۰
- نمودار (۵-۲): مقایسه وزن قاب ۱۰ طبقه با مهاربند هم محور در حالات مختلف جدول (۵-۲)..... ۵۰
- نمودار (۶-۲): مقایسه وزن قاب ۱۰ طبقه با مهاربند برون محور در حالات مختلف جدول (۶-۲)..... ۵۱
- نمودار (۱-۳): تاریخچه همگرایی برای قاب ۸ طبقه صفری و ماهر..... ۹۸
- نمودار (۲-۳): تاریخچه همگرایی برای قاب ۴ طبقه صفری و ماهر..... ۹۹
- نمودار (۱-۴): تاریخچه وزنی در ۵۰ بار وقفه مهاجرت برای قاب ۶ طبقه ۳ دهانه با مهاربند هفتی..... ۱۰۶
- نمودار (۲-۴): تاریخچه وزنی در ۵۰ بار وقفه مهاجرت برای قاب ۶ طبقه ۴ دهانه با مهاربند هفتی..... ۱۰۶
- نمودار (۳-۴): تاریخچه وزنی در ۵۰ بار وقفه مهاجرت برای قاب ۶ طبقه ۵ دهانه با مهاربند هفتی..... ۱۰۷
- نمودار (۴-۴): تاریخچه وزنی در ۵۰ بار وقفه مهاجرت برای قاب ۹ طبقه ۴ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۰۷
- نمودار (۵-۴): تاریخچه وزنی در ۵۰ بار وقفه مهاجرت برای قاب ۹ طبقه ۵ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۰۷
- نمودار (۶-۴): تاریخچه وزنی در ۵۰ بار وقفه مهاجرت برای قاب ۹ طبقه ۶ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۰۸
- نمودار (۷-۴): تاریخچه وزنی در ۵۰ بار وقفه مهاجرت برای قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه با مهاربند قطری..... ۱۰۸
- نمودار (۸-۴): تاریخچه وزنی در ۵۰ بار وقفه مهاجرت برای قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه با مهاربند قطری..... ۱۰۸

- نمودار (۴-۹): تاریخچه وزنی در ۵۰ بار وقفه مهاجرت برای قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه با مهاربند قطری..... ۱۰۹
- نمودار (۴-۱۰): تاریخچه همگرایی برای قاب ۶ طبقه ۳ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۱۱
- نمودار (۴-۱۱): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۶ طبقه ۳ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۱۲
- نمودار (۴-۱۲): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۶ طبقه ۳ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۱۲
- نمودار (۴-۱۳): تاریخچه همگرایی برای قاب ۶ طبقه ۳ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی..... ۱۱۳
- نمودار (۴-۱۴): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۶ طبقه ۳ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی..... ۱۱۴
- نمودار (۴-۱۵): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۶ طبقه ۳ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی..... ۱۱۴
- نمودار (۴-۱۶): تاریخچه همگرایی برای قاب ۶ طبقه ۳ دهانه با مهاربند قطری..... ۱۱۵
- نمودار (۴-۱۷): تاریخچه همگرایی برای قاب ۶ طبقه ۴ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۱۶
- نمودار (۴-۱۸): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۶ طبقه ۴ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۱۷
- نمودار (۴-۱۹): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۶ طبقه ۴ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۱۷
- نمودار (۴-۲۰): تاریخچه همگرایی برای قاب ۶ طبقه ۴ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی..... ۱۱۸
- نمودار (۴-۲۱): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۶ طبقه ۴ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی..... ۱۱۹
- نمودار (۴-۲۲): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۶ طبقه ۴ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی..... ۱۱۹
- نمودار (۴-۲۳): تاریخچه همگرایی برای قاب ۶ طبقه ۴ دهانه با مهاربند قطری..... ۱۲۰
- نمودار (۴-۲۴): تاریخچه همگرایی برای قاب ۶ طبقه ۵ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۲۱

نمودار (۴-۲۵): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۶ طبقه ۵ دهانه با مهاربند ضربدری.....۱۲۲

نمودار (۴-۲۶): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۶ طبقه ۵ دهانه با مهاربند ضربدری.....۱۲۲

نمودار (۴-۲۷): تاریخچه همگرایی برای قاب ۶ طبقه ۵ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی.....۱۲۳

نمودار (۴-۲۸): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۶ طبقه ۵ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی.....۱۲۴

نمودار (۴-۲۹): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۶ طبقه ۵ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی.....۱۲۴

نمودار (۴-۳۰): تاریخچه همگرایی برای قاب ۶ طبقه ۵ دهانه با مهاربند قطری.....۱۲۵

نمودار (۴-۳۱): تاریخچه همگرایی برای قاب ۹ طبقه ۴ دهانه با مهاربند ضربدری.....۱۲۶

نمودار (۴-۳۲): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۹ طبقه ۴ دهانه با مهاربند ضربدری.....۱۲۷

نمودار (۴-۳۳): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۹ طبقه ۴ دهانه با مهاربند ضربدری.....۱۲۷

نمودار (۴-۳۴): تاریخچه همگرایی برای قاب ۹ طبقه ۴ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی.....۱۲۸

نمودار (۴-۳۵): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۹ طبقه ۴ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی.....۱۲۹

نمودار (۴-۳۶): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۹ طبقه ۴ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی.....۱۲۹

نمودار (۴-۳۷): تاریخچه همگرایی برای قاب ۹ طبقه ۴ دهانه با مهاربند قطری.....۱۳۰

نمودار (۴-۳۸): تاریخچه همگرایی برای قاب ۹ طبقه ۵ دهانه با مهاربند ضربدری.....۱۳۱

نمودار (۴-۳۹): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۹ طبقه ۵ دهانه با مهاربند ضربدری.....۱۳۲

نمودار (۴-۴۰): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۹ طبقه ۵ دهانه با مهاربند ضربدری.....۱۳۲

نمودار (۴-۴۱): تاریخچه همگرایی برای قاب ۹ طبقه ۵ دهانه با مهاربند هفتی\_ هشتی..... ۱۳۳

نمودار (۴-۴۲): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۹ طبقه ۵ دهانه با مهاربند هفتی\_ هشتی..... ۱۳۴

نمودار (۴-۴۳): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۹ طبقه ۵ دهانه با مهاربند هفتی\_ هشتی..... ۱۳۴

نمودار (۴-۴۴): تاریخچه همگرایی برای قاب ۹ طبقه ۵ دهانه با مهاربند قطری..... ۱۳۵

نمودار (۴-۴۵): تاریخچه همگرایی برای قاب ۹ طبقه ۶ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۳۶

نمودار (۴-۴۶): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۹ طبقه ۶ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۳۷

نمودار (۴-۴۷): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۹ طبقه ۶ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۳۷

نمودار (۴-۴۸): تاریخچه همگرایی برای قاب ۹ طبقه ۶ دهانه با مهاربند هفتی\_ هشتی..... ۱۳۸

نمودار (۴-۴۹): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۹ طبقه ۶ دهانه با مهاربند هفتی\_ هشتی..... ۱۳۹

نمودار (۴-۵۰): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۹ طبقه ۶ دهانه با مهاربند هفتی\_ هشتی..... ۱۳۹

نمودار (۴-۵۱): تاریخچه همگرایی برای قاب ۹ طبقه ۶ دهانه با مهاربند قطری..... ۱۴۰

نمودار (۴-۵۲): تاریخچه همگرایی برای قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۴۱

نمودار (۴-۵۳): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۴۲

نمودار (۴-۵۴): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۴۲

نمودار (۴-۵۵): تاریخچه همگرایی برای قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه با مهاربند هفتی\_ هشتی..... ۱۴۳

نمودار (۴-۵۶): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه با مهاربند هفتی\_ هشتی..... ۱۴۴

نمودار (۴-۵۷): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی..... ۱۴۴

نمودار (۴-۵۸): تاریخچه همگرایی برای قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه با مهاربند قطری..... ۱۴۵

نمودار (۴-۵۹): تاریخچه همگرایی برای قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۴۶

نمودار (۴-۶۰): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۴۷

نمودار (۴-۶۱): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۴۷

نمودار (۴-۶۲): تاریخچه همگرایی برای قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی..... ۱۴۸

نمودار (۴-۶۳): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی..... ۱۴۹

نمودار (۴-۶۴): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی..... ۱۴۹

نمودار (۴-۶۵): تاریخچه همگرایی برای قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه با مهاربند قطری..... ۱۵۰

نمودار (۴-۶۶): تاریخچه همگرایی برای قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۵۱

نمودار (۴-۶۷): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۵۲

نمودار (۴-۶۸): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه با مهاربند ضربدری..... ۱۵۲

نمودار (۴-۶۹): تاریخچه همگرایی برای قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی..... ۱۵۳

نمودار (۴-۷۰): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی..... ۱۵۴

نمودار (۴-۷۱): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی..... ۱۵۴

نمودار (۴-۷۲): تاریخچه همگرایی برای قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه با مهاربند قطری..... ۱۵۵

نمودار (۵-۱): درصد اختلاف وزن قابها با مهاربند ضربدري نسبت به مهاربند هفتي\_ هشتي.....۱۶۶

نمودار (۵-۲): درصد اختلاف وزن قابها با مهاربند قطري نسبت به مهاربند هفتي\_ هشتي.....۱۶۶

نمودار (۵-۳): درصد اختلاف وزن قابها با مهاربند ضربدري نسبت به مهاربند قطري.....۱۶۷

# فصل اول : کلیات

## ۱-۱ مقدمه

سازه‌ها و ساختمانها به علت نیروهای ایجاد شده از زلزله دچار تغییر مکان و ارتعاش می‌گردند. مرسوم‌ترین حالت کنترل تغییر مکان‌ها در ساختمان‌ها، بادبندها هستند که به فرم‌های گوناگون طراحی و اجرا می‌شوند. انتخاب یک طرح و چیدمان مناسب برای بادبندها تأثیر مهمی بر رفتار و عملکرد سازه دارد. در تحلیل و طراحی سازه‌های فلزی، برای ایستادگی و پایداری در برابر زلزله، معمولاً از بادبندها استفاده می‌شود. باید توجه داشت که عموماً امکان قرارگیری بادبندها در محل‌های مختلفی از پلان ساختمان وجود دارد، لذا محاسب می‌باید حالت‌های مختلف برای جایگذاری بادبندها در محل‌های گوناگون را مورد بررسی قرار دهد. بهترین مکان جایگذاری مهاربندها، عموماً با سعی و خطا مشخص می‌گردد. این پروسه در واقع بسیار مشکل و زمان‌گیر است، لذا نیاز به مقوله بهینه‌سازی که این فرایند را با دقت و سرعت مناسبی انجام دهد کاملاً مشخص می‌باشد [۲۶، ۲۵]. در این پژوهش، انتخاب بهینه محل، آرایش و تعداد دهانه‌های مهاربندی در قاب-های فولادی ساده با استفاده از روش کاوش چندفراتکباری و قیود دینامیکی، مورد توجه قرار گرفته است و لذا در ابتدا مفاهیم مربوط به این موضوع بررسی می‌گردد.

مقاومت و سختی و شکل پذیری و میرایی به عنوان چهار رکن اساسی در طراحی تمامی سازه‌ها قلمداد می‌شود. در خصوص سازه‌های ساختمانی مقاومت مترادف با طراحی سازه و هر یک از اعضای آن می‌باشد که با هدف پاسخگو بودن سازه در برابر بارهای وارده و ترکیبات مختلف آنها است. در این خصوص طراحی سازه در برابر بارهای جانبی از جمله باد و زلزله و بارهای خاص از جمله بار ناشی از ضربه و برخورد اشیا به سازه و بار انفجار که از نوع بارهای دینامیکی سریع و با شدت زیاد بوده و سایر بارها از جمله بارهای حرارتی و بار ناشی از نشست‌های غیریکنواخت سازه و بارهای ناشی از جمع‌شدگی و به طور کلی انبساط و انقباض ناشی از تغییرات دمایی و بارهای ناشی از خزش و وارفنگی بسیار اهمیت دارد. در خصوص سازه‌های معمول ساختمانی طرح لرزه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و طراح بایستی براساس علم و تجربه خود و

رعایت اصول طراحی در نهایت سازه‌ای مقاوم و اقتصادی را به عنوان سازه مقاوم در برابر زلزله طرح نماید. قطعا مواردی از جمله منظم بودن سازه در پلان و ارتفاع (منظمی جرمی و هندسی)- جانمایی و نوع و شکل مناسب سیستم مهاربندی- شرایط بازشوها در کف و دیوارها- نوع مصالح- بارهای وارده و توزیع آنها براساس طرح تیرریزی و نوع سقف- ارتفاع سازه- روش تحلیل- نوع خاک و خطر لرزه خیزی منطقه همگی در طرح نهایی سازه تاثیرگذار می‌باشند. سختی با هدف محدود نمودن تغییرشکل و تغییرمکان جانبی سازه‌ها بوده که توسط سیستم‌های مهاربندی شامل مهاربند فولادی (به اشکال و انواع مختلف و انواع جدید آن همچون مهاربندهای کمانش تاب و مهاربندهای با آلیاژهای حافظه دار) یا دیوار برشی بتنی یا دیوار برشی فولادی یا دیوار مرکب بتنی فولادی یا قوی نمودن تیرها و ستون‌ها (به خصوص تیر و ستون در پیرامون سازه) تامین می‌گردد. در خصوص هر یک از سیستم‌های مهاربندی در ادامه توضیحات کامل آمده است. نکته اینکه یکی از موارد مهم مرتبط با این پژوهش جانمایی- تعداد و شکل مناسب دهانه‌های مهاربندی همگرا در قابهای فولادی ساده است که این موضوع خود به مشخصات سازه و نوع خاک و خطر لرزه‌خیزی منطقه و منظمی و نامنظمی سازه در پلان و ارتفاع و نوع و شکل مهاربندی بستگی دارد. ولیکن تامین مقاومت و سختی سازه به صورت توأم و مناسب (مقاومت زیاد یا سختی بالا به تنهایی نمی‌توانند منجر به عملکرد لرزه‌ای مطلوب سازه ها گردند بلکه ترکیبی مناسب از آنها شرایط مطلوب را بدست می‌دهد) کاملا بستگی به قضاوت و تجربه و علم طراح در خصوص طراحی سیستم لرزه بر سازه دارد. به هر حال هدف از تامین سختی، کنترل و محدود نمودن تغییرشکل‌ها و تغییرمکان جانبی سازه در حدی بوده که آیین‌نامه‌ها مقرر دانسته ولیکن جدای از توصیه آیین‌نامه‌ها تغییرشکل‌ها نباید به نحوی باشند که خللی به بهره برداری سازه وارد سازند. موضوع بعدی در خصوص شکل‌پذیری سازه بوده که به بیان ساده می‌توان از آن به عنوان عاملی جهت جذب و استهلاک انرژی زلزله بواسطه تغییرشکل‌های سازه و ورود سازه به ناحیه غیرخطی یاد نمود که با استفاده از روشهای مختلف می‌توان آنرا تامین نمود. یکی از این روش‌ها استفاده از مهاربندهای برون محور بوده که نسبت به نوع هم محور دارای شکل‌پذیری به مراتب بالاتری می‌باشند. لذا جانمایی و نوع و شکل مهاربند تا

به اینجای کار هم بر طراحی و هم بر سختی و هم بر شکل‌پذیری سازه تاثیرگذار است و بایستی در طرح آن دقت خاصی نمود. به طور کلی شکل‌پذیری و میرایی با هدف تخفیف و کاهش نیروی جانبی زلزله مطرح می‌باشند ولی شکل‌پذیری به واسطه نوع سیستم باربر جانبی مثلاً استفاده از مهاربند برون محور (یا بواسطه جزئیاتی خاص برای اتصالات یا فاصله خاموت‌ها یا استفاده از ستون‌های دایره‌ای بتنی) تامین می‌شود و همانطور که بیان گردید هدف از آن جذب و استهلاک نیروهای ایجاد شده ناشی از زلزله بواسطه قبول تغییرشکل‌های بیشتر سازه می‌باشد. میرایی بواسطه استفاده از ابزار و تجهیزاتی نظیر میراگرهای جرمی و ویسکوالاستیک به عنوان ابزاری جهت جذب بیشتر نیروهای زلزله بوده که تحقیقات در خصوص آن ادامه دارد. هر سازه‌ای بایستی به مقداری مناسب دارای هر یک از فاکتورهای چهار گانه نامبرده باشد تا عملکرد لرزه‌ای مناسبی را از خود در هنگام وقوع زلزله نشان دهد. در حقیقت این چهار عامل مکمل یکدیگر می‌باشند [۲۸،۲۷].

در طراحی تمامی سازه‌ها توجه به ایمن و اقتصادی بودن سازه- طرح معماری مناسب و اصولی- شرایط ژئوتکنیکی خاک و داشتن ظرفیت باربری مناسب دارای اهمیت به سزایی می‌باشد که در ادامه در خصوص آنها مطالبی بیان شده است. برای طرح یک سازه مقاوم در برابر زلزله علاوه بر رعایت ضوابط و مقررات آیین نامه‌های ساختمانی می‌بایست قبل از طراحی شرایطی که باعث افزایش آسیب‌پذیری سازه در هنگام بروز زمین لرزه می‌شود را شناسایی نمود و راهکارهایی برای مقابله با آنها پیش بینی نمود.

در ساختمان‌های فولادی سیستم مهاربندی نقش اساسی را در تامین ایمنی ساختمان بر عهده دارد. در این خصوص دو گروه مهاربند هم محور و برون محور مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهاربندهای هم محور دارای سختی بالا و شکل‌پذیری کم می‌باشند و در برابر بارهای تناوبی چندان مناسب نیستند با این حال در عمل مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مقابل مهاربندهای برون محور دارای شکل‌پذیری بالایی می‌باشند و در مناطق با لرزه خیزی بالا مناسبند. در مجموع معایب و مزایای مهاربندهای هم محور را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

مزایا:

الف: سختی قابل قبول در زلزله و تغییر مکان کم ناشی از بارهای جانبی در ساختمان.

ب: ساده بودن طراحی و جزییات اتصالات و روش اجرایی (البته در مورد سخت کننده‌های جان تیر در مورد مهاربند هفتی و هشتی باید دقت زیادی نمود).

معایب:

الف: ضعف در بارهای تناوبی بعد از چند سیکل.

ب: شکل پذیری کم و عملکرد ضعیف از لحاظ جذب انرژی زلزله.

پ: در نوسانات و ارتعاشات بعد از ورود به حالت غیرخطی پایداری خود را سریع‌تر از مهاربند برون محور از دست می‌دهند.

ت: محدودیت در تعبیه بازشوها به خصوص در مورد مهاربند ضربدری.

در خصوص مهاربندهای برون محور آنچه که اهمیت دارد جزئیات مربوط به تیر پیوند است. در خصوص این نوع مهاربندها که طراحی و اجرای آنها دشوارتر از مهاربندهای هم محور است باید توجه داشت که یک گره بادبند به محل تقاطع تیر و ستون اتصال نیابد و یک گره دیگر بادبند به تیر متصل باشد. آنچه که در خصوص تیر پیوند مهم است رفتار آن است. هر چه این طول کمتر باشد رفتار آن به سمت برشی است و بهتر است و با افزایش طول تیر پیوند رفتار آن برشی - خمشی و در نهایت خمشی خواهد بود. مقدار مناسب این طول و طراحی این نوع مهاربند ها براساس آیین‌نامه‌های معتبری چون AISC صورت می‌گیرد [۲۹].

در مجموع معایب و مزایای مهاربندهای برون محور را می‌توان به شرح زیر بیان نمود:

مزایا:

الف: شکل پذیری مناسب و بالا.

ب: کاهش وزن اسکلت به میزان قابل توجه در صورت استفاده از مهاربند برون محور.

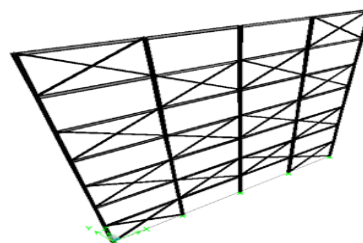
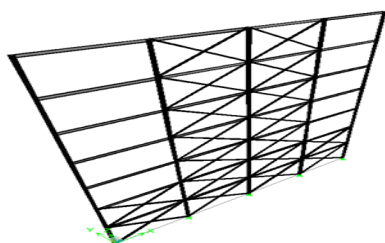
پ: امکان ایجاد بازشوهای مناسب.

معایب:

الف: طراحی و اجرای پیچیده نسبت به مهاربند هم محور.

ب: نیاز به دقت زیاد در طراحی جزئیات سخت کننده ها و اتصالات مهاربندی [۳۱,۳۰].

براساس مطالعات انجام گرفته استفاده از چیدمان و طرح مهاربندی پراکنده (حتی در ساختمانهای یک طبقه) به جای چیدمان سنتی مهاربندها می تواند منجر به توزیع بهتر نیروها و سختی در تمامی قاب شده و دیگر تمرکز تنش و سختی در قسمتی از قاب را نداشته باشیم که در طرح های سنتی و معمول اغلب با آن مواجه هستیم. این موضوع علاوه بر کاهش تغییرشکلها و تغییر مکان جانبی سازه منجر به طرح بهینه سازه شده و مهمتر اینکه طرح و ابعاد فونداسیون نیز اقتصادی تر می گردد و سازه در برابر نیروهای برکنش نیز مقاومت به مراتب بیشتری را دارد [۳۳,۳۲].



شکل (۱-۱): نمونه ای از چیدمان مهاربندی براساس طرح معمول و طرح پراکنده [۳۲]

قابل ذکر است که بهینه یابی هنر پیدا کردن بهترین حالت و پاسخ در بین حالت های ممکن است. بهینه یابی در طراحی بسیاری از سازه های مهندسی به منظور حداقل نمودن هزینه یا افزایش ارزش و سود نقش دارد. به علت تاثیر بهینه یابی در علم های مختلف، این بحث پیشرفت زیادی کرده است، به گونه ای که در انواع علوم مانند ریاضیات، مهندسی و مدیریت تحت بررسی و پردازش قرار گرفته است و نام های گوناگونی مانند برنامه ریزی خطی و غیر خطی ریاضی برای اشاره به مباحث بهینه یابی استفاده می-شود [۳۴].

الگوریتم‌های بهینه‌یابی عموماً به دو قسمت الگوریتم‌های دقیق و الگوریتم‌های تقریبی دسته‌بندی می‌گردند. الگوریتم‌های دقیق جواب‌های بهینه را به شکل دقیقی ارائه می‌دهند ولی در بحث مسائل بهینه‌یابی سخت کیفیت لازم را ندارند و زمان زیادی را صرف حل اینگونه مسائل می‌کنند. الگوریتم‌های تقریبی می‌توانند پاسخ‌های عالی و در زمانی قابل قبول برای مسائل بهینه‌یابی ارائه دهند. الگوریتم‌های تقریبی به دو قسمت اصلی الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری بخش‌بندی می‌شوند. مشکل اصلی الگوریتم‌های ابتکاری، گرفتن جواب بهینه در نقاط بهینه محلی و همگرایی سریع در این محل‌ها می‌باشد. در نتیجه برای رفع این مشکلات الگوریتم‌های فراابتکاری ارائه گردیده‌اند. در واقع این الگوریتم‌ها توانایی حل بازه گسترده‌ای از مسائل را دارند. مدل‌های مختلفی از این نوع الگوریتم در سال‌های گذشته به وجود آمده است که همه به عنوان الگوریتم فراابتکاری شناخته می‌شوند [۳۵].

از الگوریتم‌های اصلی فراابتکاری می‌توان الگوریتم‌های ژنتیک، کلونی مورچه‌ها، ازدحام ذرات، الگوریتم قهرمانی لیگهای ورزشی، و الگوریتم پویا حشره آبیگر برکه را نام برد. در سال‌های گذشته نیز الگوریتم‌های فراابتکاری جدیدی به وجود آمده‌اند که از شناخته شده‌ترین آن‌ها می‌توان به الگوریتم بهینه-سازی گرگ خاکستری بهبود یافته، الگوریتم ملخ، الگوریتم نهنگ و الگوریتم کلونی زنبور عسل را نام برد [۳۵].

پروسه به وجود آمدن الگوریتم‌های فراابتکاری شامل سه مرحله است که هر مرحله شامل گام‌های گوناگونی می‌باشد. در هر قسمت فعالیت‌هایی باید انجام گردد تا آن مرحله تکمیل گردد. گام اول حاضر سازی است که شناخت قابل قبولی از مسئله حاصل می‌گردد و هدف‌های طرح الگوریتم فراابتکاری برای آن باید با نظر به راه‌حلهای موجود برای مسئله کاملاً مشخص می‌گردد. گام دوم، ساخت است. اصلی‌ترین هدف این گام تعیین روش حل، مشخص کردن ضوابط‌های اندازه‌گیری عملکرد، و طرح الگوریتم برای تعیین هدف حل انتخابی می‌باشد. مرحله پایانی نیز پیاده‌سازی است که در آن روی الگوریتم طرح شده در گام پیشین، تنظیم عملگرها، تحلیل و ارائه گزارش انجام می‌گردد [۳۵].

## ۱-۲ بهینه‌سازی در مهندسی سازه

در سالهای گذشته، ساختمان‌های فولادی، با توجه به خواص‌شان که وزن سبک و ساخت راحت است، به گونه فراوانی در ساخت پلها، کارخانه‌ها و سالن‌های ورزشی استفاده شده‌اند. با این وصف، کاربرد این ساختمانها به علت زیاد بودن هزینه‌های ساخت محدود می‌باشد. برای به حداقل رساندن هزینه ساخت و در نتیجه معرفی هر چه بیشتر کاربرد اسکلت فولادی، طراحان با استفاده از روش‌ها و مدل‌های کامپیوتری و استفاده از روش‌های مختلف، تلاش بر بهینه نمودن سازه‌های فلزی کردند. بهینه‌یابی در رشته عمران مشخص نمودن یک ایده فنی و اقتصادی برای ساختمان برابر با آیین‌نامه‌ها است. استراتژی در بهینه‌یابی مینیمم کردن وزن و هزینه‌های اجرایی است. در علوم‌های مهندسی مختلف دیگر نیز مهمترین عامل کم کردن هزینه عملیات است. در طراحی بهینه ساختمان‌ها عموماً وزن ساختمان تابع هدف می‌باشد و روش-های بهینه‌یابی علاوه بر ارضای روابط آیین‌نامه و قیود تعیین شده، وزن ساختمان را کم می‌سازند [۳۶].

برای بهبود رفتار ساختمان، گونه‌های مختلف بهینه‌یابی به شرح ذیل استفاده می‌گردد: بهینه‌یابی شکل، اندازه و توپولوژی (که چه مقدار از اعضا در کل ساختمان استفاده می‌شود و این المانها در کدامین جای ساختمان قرار بپذیرند). این حالت‌ها به طور فزاینده‌ای در علوم مهندسی، عملی و کاربردی هستند. چنانچه توپولوژی اعضا در ساختمان بهینه شود رفتار، شکل‌پذیری و عملکرد ساختمان بهبود پیدا می‌کند.

اهمیت طراحی، در به دست آوردن سازه‌هایی با وزن مینیمم می‌باشد، البته در دیگر علوم مرتبط با فرآیندهای مهندسی مانند ساخت خودرو، هزینه ساخت در اولویت می‌باشد، البته ممکن است پارامتر وزن، هزینه سیستم را تحت شعاع خود قرار دهد. کاهش مواد اولیه و کمبود منابع انرژی، سبب ایجاد سازه‌هایی کم وزن و با راندمان بالا گردیده است. این نظر و ایده سبب می‌شود که طراحان از تکنیک‌های بهینه‌یابی وزن و هزینه استفاده کنند. قبل از استفاده از کامپیوتر، تمام تحلیل‌ها در سازه‌ها به وسیله معادلات دیفرانسیل حل می‌گشت. این معادلات به سبک سری‌های نامحدود و فرم تحلیلی و البته گاهی اوقات به

کمک روش‌های عددی، حل می‌گشتند. مجهولات تغییر مکان‌ها و تنش‌ها نیز بر روی یک محیط پیوسته مشخص می‌شدند. در ادامه این بخش متغیرهای طراحی، تابع هدف و قیود از مراحل مربوط به رابطه‌سازی مسئله بهینه‌سازی در مهندسی سازه بررسی شده است [۳۶].

#### الف: متغیرهای طراحی

در بهینه نمودن اجزا و عملکرد سازه، تغییر در مشخصات ابتدایی یک پیش‌فرض است. به طور مشخص پتانسیل تغییر بر اساس بازه‌ای از تغییرات در قسمتی از پارامترها عنوان می‌شود. چنین پارامترهایی در اصطلاح بهینه‌سازی معمولاً متغیرهای طراحی نامیده می‌گردد. متغیرهای طراحی شامل مساحت یا اندازه المانها و مولفه‌های کنترل هندسه سازه است. متغیرهای طراحی اگر به صورت پیوسته باشند یک بازه تغییرات دارند و هر مقدار در آن بازه را می‌توانند در بر بگیرند. در اکثر مسئله‌های طراحی و برای حل مسئله بهینه‌یابی، از فرم پیوسته متغیرهای طراحی صرف‌نظر می‌گردد. هنگامی پارامتر بهینه حاصل شد، آن موقع متغیر طراحی را به نزدیک‌ترین مقدار گسسته موجود تبدیل می‌نماییم. ضمناً تعیین متغیرهای طراحی در موفقیت بهینه‌یابی بسیار تاثیر دارد. به خصوص آنکه باید اطمینان حاصل کرد که تعیین متغیرهای طراحی با مدل پیشنهادی تحلیلی هماهنگی دارد.

#### ب: تابع هدف

معنا و مفهوم بهینه‌یابی ناگزیر می‌سازد که بهینه بودن به وسیله تابعی به اسم تابع هدف مشخص شود. چنانکه بهینه‌یابی بیش از یک تابع هدف را در بر بگیرد به نام بهینه‌سازی چندمعیاره شناخته می‌شود. در بهینه‌سازی سازه‌ها، وزن، جابجایی‌ها، تنش‌ها، فرکانس‌ها، بارهای کمانش و هزینه یا مجموعی از آنها را می‌توان به عنوان توابع هدف استفاده کرد.

#### پ: قیود

قیود معنی حدود بر متغیرهای طراحی را مشخص می‌نماید.

## ۳-۱ دسته‌بندی مسائل بهینه‌سازی

### ۱-۳-۱ مسائل برنامه‌ریزی خطی<sup>۱</sup> و غیر خطی<sup>۲</sup>

چنانچه در یک مسئله بهینه‌یابی تابع هدف و تابع همسان با قیود همگی خطی باشند، آن گاه با یک مسئله بهینه‌سازی خطی یا مسئله برنامه‌ریزی خطی موسوم مواجه هستیم. شکل کلی یک مسئله خطی (شامل پارامتر متغیر طراحی  $X$ ، تابع هدف، قیود تساوی و نامساوی و محدودیت‌ها) به شرح زیر است [۳۴]:

$$\text{Min } C^T x + d \quad (1-1)$$

$$Ax \leq u,$$

$$Bx = v.$$

اگر هم در یک مسئله بهینه‌یابی حداقل یک قید یا تابع هدف در حالت خطی نباشد، مسئله به یک مسئله برنامه‌ریزی غیر خطی تبدیل می‌گردد.

### ۲-۳-۱ مسائل درجه دوم<sup>۳</sup>

گونه‌ای از مسائل بهینه‌یابی غیر خطی که حداکثر نزدیکی را به مسائل خطی دارند، به نام مسائل برنامه‌ریزی درجه دوم نامیده می‌شوند. در این تیپ مسائل، تابع هدف به صورت درجه دوم است و همه قیودها خطی می‌باشند. شکل کلی آنها نیز به صورت ذیل است [۳۴]:

$$\text{Min } x^T H x + C^T x + d \quad (2-1)$$

$$Ax \leq u,$$

$$Bx = v.$$

---

<sup>۱</sup> . linear programming problems

<sup>۲</sup> . Nonlinear programming problems

<sup>۳</sup> . second order problems

## ۴-۱ تکنیک‌های حل مسائل بهینه‌سازی

حل کردن و گرفتن جواب از یک مسئله بهینه‌یابی ممکن است به گونه‌های مختلفی تشریح شود. در ابتدا منظور از حل یک مسئله بهینه‌یابی پیدا کردن جواب بهینه سراسری<sup>۴</sup> است. اما در زمان‌هایی مسئله با یافتن جواب بهینه محلی<sup>۵</sup> نیز حل می‌گردد. روش‌های متفاوتی برای حل مسائل بهینه‌یابی مطرح می‌باشد. در این رساله از روش‌های مدرن بهینه‌سازی (الگوریتم‌های فراابتکاری و چندفراابتکاری) که در فصول بعدی به صورت مبسوط شرح داده شده، استفاده گردیده است.

## ۵-۱ سیستم‌های مقاوم در برابر بار جانبی

در مبحث مهندسی ساختمان سیستم‌های مختلفی برای باربری و انتقال نیروهای ایجاد شده ناشی از زلزله استفاده می‌شوند. در همه این سیستم‌ها باید کل مجموعه بر اثر نیروی جانبی زلزله به شکل به هم پیوسته رفتار کند، در حقیقت مهندس محاسب باید به این مورد توجه کند که ساختمان مقاوم در مقابل نیروی زلزله از المانهای جدا و بدون انسجام، مانند تیرها، دیوارها، ستونها و بادبندها تشکیل نشده است، بلکه این کارکرد یکدست سیستم است که نیروی زلزله را به فونداسیون و زمین منتقل می‌نماید. البته قابل ذکر است که هر یک از المانها می‌باید خط سیر نیرو را در هر المان با اتصال قابل قبول آن به المان دیگر دنبال کرده و نهایتاً از انتقال نیرو به شالوده و زمین اطمینان حاصل کرد.

انواع اصلی سیستم‌های پایدار در برابر زلزله عبارتند از:

۱. قاب با عملکرد خمشی

۲. قاب بادبندی

۳. دیوار برشی فلزی

---

<sup>۴</sup> . Global optimum

<sup>۵</sup> . Local optimum

۴. قاب پایدار بعلاوه خراباهای متناوب

۵. قاب لوله‌ای

در این تحقیق، سازه برای تحمل بار جانبی به شکل قاب ساده فولادی با انواع مهاربندی CBF در نظر گرفته شده است که در ذیل به شرح آن می‌پردازیم.

## ۱-۵-۱ سیستم قاب‌های مهاربندی شده

یکی از مرسوم‌ترین حالت‌ها برای رویارویی با زلزله در ساختمان‌های فلزی استفاده از بادبند است. بادبندها به انواع مختلفی طراحی و اجرا می‌گردند. شکل‌بندی قاب‌های بادبندی عمدتاً از نوع هم‌محور یا برون‌محور می‌باشد. بادبندهای هم‌محور سختی قاب را به نسبت قاب خمشی معادل زیاد می‌نماید و جابجایی افقی ساختمان را کمتر می‌کند. قاب با بادبند برون‌محور دو پارامتر سختی جانبی قابل قبول و اتلاف انرژی بالا را با همدیگر جمع کرده و استفاده می‌نماید. در قاب بادبندی برون‌محور، برون‌محوری اتصال بادبندی باعث به وجود آمدن خمش و برش در محل تیر نزدیک به مهار می‌گردد. به این شکل، تنش‌های این قسمت از تیر وارد ناحیه غیر خطی شده و باعث جذب و هدر رفت نیروی لرزه می‌شود. این قسمت تیر پیوند نام دارد [۳۰].

## ۱-۶ تحلیل

### ۱-۶-۱ تحلیل استاتیکی

در این نوع تحلیل که عموماً در ساختمان‌های منظم انجام می‌پذیرد با محدودیتهایی من جمله عدم در نظر گرفتن مدت زمان زلزله روبرو هستیم و عمدتاً در طرح ابتدایی ساختمان استفاده می‌گردد. در این

رساله از زلزله طرح آیین‌نامه لرزه‌ای آمریکا برای تحلیل استاتیکی خطی استفاده می‌شود [۱].

## ۱-۶-۲ تحلیل دینامیکی

این تحلیل با مدل‌های تاریخچه زمانی و طیفی در آیین‌نامه‌ها مشخص گردیده است و بر مبنای خصوصیات واقعی زلزله، ساختمان با این مدل تحلیل می‌گردد. مهمترین خصوصیت این روش استفاده از زمان و مقادیر مختلف شتاب زلزله است [۱].

## ۱-۷-۷ روش محاسباتی

### ۱-۷-۱ روش‌های عددی

علاوه بر متدهای گوناگون من جمله روش تفاضل محدود و روش المان محدود که در آنها از برنامه‌های عددی به خاطر تحلیل مسایل گوناگون استفاده می‌شود. در این رساله برای انجام محاسبات عددی و بهینه‌سازی از نرم‌افزار متلب و از نرم‌افزار OpenSees (اپنسیس) برای تحلیل سازه استفاده می‌شود. البته تحلیل در این نرم‌افزار مبتنی بر روش اجزای محدود می‌باشد.

## ۱-۸ ابعاد رساله

قابل ذکر است که هر سازه‌ای بعد از طراحی و اجرا، ضمن داشتن ایمنی باید به گونه‌ای باشد که در برابر بارها و نیروهای وارده هیچکدام از قیدها را نقض ننماید و ضمناً کمترین هزینه ساخت را داشته باشد. در این پژوهش قرار است تا بهترین آرایش و تعداد دهانه‌های مهاربندی قابهای فولادی ساده برای زلزله طرح و بر اساس یک مسئله بهینه‌یابی ارائه و تشخیص داده شود. در این تحقیق از روش پردازش موازی جهت

تحلیل و بهینه‌یابی در یک تیپ از قابهای کوتاه مرتبه استفاده شده است. موازی سازی یا محاسبات موازی در حقیقت به حل همزمان یک برنامه (که به قسمت‌های کوچک‌تری تبدیل شده است) بر روی چند پردازش‌گر به منظور رسیدن به سرعت بالاتر اطلاق می‌گردد. هدف نهایی این است که پروسه حل یک مسئله را می‌توان به زیروظایف ریزتری تقسیم کرد که با اجرای همزمان این زیروظایف و یکی کردن آنها، مسئله اصلی در مدت زمان کوتاهی حل می‌گردد. موازی سازی اجرای یک پروسه به گونه همزمان و با تقسیم عملیاتهای پردازش روی چندین پردازش‌گر به خاطر افزایش اثربخشی و در انتها سرعت بخشیدن برای رسیدن به جواب است. ایده این مبحث بر این است که هر مسئله‌ای قابل تقسیم شدن به چند مسئله با مقدار ریزتر است که این مسئله‌های کوچک شده به صورت همزمان حل شده و در انتها یکپارچه شوند تا نتیجه انتهایی با سرعت بیشتر بدست آید. کم شدن زمان محاسبات، توانایی حل مسایل بزرگ‌تر، غالب شدن بر محدودیت‌های حافظه، کاهش هزینه اقتصادی و استفاده از تکنولوژی‌های به روز از جمله محاسنی است که موازی سازی نسبت به انجام عملیات بر روی داده‌ها به صورت سری (روش پیشین پردازش داده‌ها) دارد [۳۷].

در این رساله از این روش جهت بهینه‌سازی توپولوژی مهاربندها در قابهای فولادی ساده کوتاه، میان و بلند مرتبه فلزی بهره گرفته خواهد شد. همچنین در این تحقیق انواع مهاربند CBF (مهاربند ضربدری، مهاربند قطری و مهاربند هفتی-هشتی یک در میان<sup>۶</sup>)، از جمله متغیرهای طراحی محسوب می‌شود. بر این اساس، پس از تعریف تابع هدف، قیود مسئله (شامل فرکانس، مقاومت طراحی اعضا، جابجایی نسبی و مقدار مجاز نیروی کششی مهاربندها) و ساخت الگوریتمی بر اساس موازی‌سازی جزیره‌ای (متشکل از جزایر بهینه‌یابی ذرات باردار، ازدحام ذرات، ژنتیک و انفجار بزرگ) یک روش پیشنهادی جهت توپولوژی بهینه مهاربندها در سه تیپ قابهای فولادی ساده ارائه خواهد شد. شناسایی مکان بهینه دهانه‌های مهاربندی با دقت مناسب و تشخیص بهترین آرایش مهاربندی با رویکرد بهبود شاخص‌های لرزه‌ای، نوآوری این تحقیق خواهد بود.

---

<sup>6</sup> . Multi-story X-bracing

## ۹-۱ اهداف تحقیق

سیستم مهاربندی که سختی زیادی دارد و نیروهای زلزله به وسیله المان‌ها به شکل محوری جابجا می‌شوند، به علت کاهش هزینه مدل اقتصادی می‌باشد. سختی ثانویه قاب عامل اصلی تری نسبت به مقاومت آن است. به خصوص در زمانی که قاب تحت بارهای زلزله است، زیاد شدن سختی ثانویه و فرکانس قاب تبدیل به اصلی‌ترین عامل طراحی می‌گردد. برای یک قاب بزرگ، بهینه‌یابی آرایش سیستم بادبندی کار مشکلی است. بادبندها در قابهای بسیاری استفاده می‌شوند؛ با این وصف قرارگیری و تعداد این المان‌ها عمدتاً به شکل سنتی و دستی مشخص می‌شود. نیک‌بختانه روش بهینه‌یابی توپولوژی یک مدل قوی برای پیروز شدن بر این مسئله ارائه داده است.

تحقیق پیش رو تلاشی است در جهت ارائه الگوریتمی مؤثر و کاربردی برای بهینه‌سازی قاب فولادی ساده مهاربندی با رویکرد کاهش وزن سازه (و به تبع آن برش پایه وارد بر سازه  $V=C.W$ ) و کاهش پاسخ-های لرزه‌ای سازه بر پایه هوش مصنوعی و تکنیک بهینه‌سازی توپولوژی مهاربندها. این بهینه‌سازی تحت قیود آیین‌نامه و قید فرکانس و در قابهای مختلف بررسی خواهد شد. اهداف مدنظر این پژوهش به طور خلاصه در ادامه ارائه شده است:

۱. ارائه الگوریتم کاوش چندفرآیندکاری جهت تعیین بهترین توپولوژی مهاربندی، (تعداد دهانه‌ها و آرایش مهاربندی با هدف کاهش پاسخ‌های دینامیکی سازه) در قاب‌های فولادی ساده دو بعدی و همچنین مقایسه این روش در یک تیپ از قابها با یک الگوریتم فرآیندکاری منتخب ذکر شده در این رساله.
۲. شناسایی محل بهینه قرارگیری دهانه‌های مهاربندی در یک قاب فولادی مشخص.
۳. تاثیر بکارگیری هوش مصنوعی در طراحی نوین سازه‌ای از منظر بهبود شاخص‌های لرزه‌ای سازه.
۴. تعیین بهترین نوع مهاربند (همگرا) برای یک پیکربندی معین با استفاده از نتایج الگوریتم معرفی شده در این پژوهش.

## ۱۰-۱ ضرورت انجام تحقیق

در این تحقیق الگوریتمی نوآورانه و کاربردی ارائه می‌شود که بهینه‌سازی توپولوژی قابهای مهاربندی را بر پایه هوش مصنوعی و روش پردازش موازی جزیره‌ای انجام می‌دهد. در اکثر ساختمان‌های تحت بار جانبی باد و زلزله بهینه‌یابی تنها وزن مدل مناسبی نیست. بنابراین این اواخر بحث‌هایی برای بهینه‌یابی تحت قید فرکانس انجام گردیده است. ارزشمندی پایش قید فرکانس در ساختمان‌ها برای جلوگیری از پدیده تشدید و حساب نمودن فرکانس ساختمان در مودهای گوناگون به همراه مینیمم نمودن وزن مورد بررسی و توجه قرار گرفته است. بهینه‌یابی ساختمان تحت قید فرکانس، خیلی بر کنترل ویژگی‌های دینامیکی ساختمان موثر می‌باشد. به گونه نمونه در مسئله‌هایی با ارتعاشات فرکانس پایین، فرکانس و شکل‌های مودی ساختمان بسیار بر جواب دینامیکی ساختمان اثر می‌گذارد. پس باید قیودی بر دامنه فرکانس ساختمان اعمال شود تا محدوده ارتعاش کم شود و از تشدید در جواب ساختمان جلوگیری گردد. البته این نکته را هم باید در نظر گرفت که قیدهای فرکانس بسیار غیرخطی بوده و باعث مشکل شدن عملیات محاسبات ریاضیاتی می‌گردد و همچنین همگرایی نیز بسار سخت اتفاق می‌افتد. برای پیروزی بر این مشکلات روش‌های بهینه‌یابی بر مبنای الگوریتم‌های فراابتکاری در رسیدن به پاسخ استفاده می‌گردد.

## ۱۱-۱ فرضیات تحقیق

برخی فرضیه‌های اجرایی این پژوهش به قرار موارد زیر است:

۱. در این رساله قابها با آیین‌نامه بارگذاری آمریکا (ASCE7) بررسی و تحلیل خواهند گردید.
۲. قابها با کاربری مسکونی فرض شده است و بر اساس این فرض مقدار ضریب اهمیت ساختمان  $I=1$  (در گروه II آیین‌نامه مذکور) است. قابل ذکر است خاک از نوع C می‌باشد.
۳. سیستم سازه ای از نوع قاب فولادی ساده به همراه مهاربند همگرا می‌باشد.

۴. قاب‌ها دو بعدی و تحلیل از نوع خطی فرض می‌شود. این قاب‌ها برای زلزله طرح بهینه می‌گردند.
۵. مدل‌ها شامل ۳ تیپ سازه ۶، ۹ و ۱۵ طبقه به نمایندگی از سازه‌های کوتاه، میان و بلند مرتبه می‌باشد.
۶. مهاربندهای مورد مطالعه شامل مهاربندهای  $V$ ،  $V$  و  $V$  معکوس (یک در میان) و قطری خواهند بود.
- همچنین برخی فرضیات علمی این پژوهش به قرار موارد زیر است :
۱. میان نوع مهاربند اعم از هم محور و برون محور و رفتار لرزه‌ای سازه فولادی ارتباطی مستقیم وجود دارد به قسمی که مهاربند هم محور سختی بالا و مهاربند برون محور شکل پذیری بالایی را دارد و لذا هر کدام شرایط خاصی را (خواه مثبت و خواه منفی) در سازه ایجاد می‌کند.
۲. در سازه‌های فولادی کوتاه و با سختی زیاد تامین شکل پذیری و در سازه‌های بلند تامین سختی به منظور محدود نمودن تغییرمکان جانبی ضرورت دارد.
۳. میان تعداد مهاربندها در پلان و ارتفاع سازه و موقعیت استقرار آنها و رفتار لرزه‌ای سازه ارتباطی مستقیم وجود دارد به قسمی که طرح سایر اعضا از جمله تیر و ستون و فونداسیون و به طور کلی پاسخ لرزه‌ای سازه و طرح نهایی آن کاملاً متأثر از انتخاب نوع و محل استقرار مهاربندها می‌باشد.
۴. چیدمان پراکنده مهاربندها در ارتفاع سازه منجر به توزیع یکنواخت سختی و شکل‌پذیری در سازه شده که مزیت آن عدم تمرکز تنش و سختی در قسمتی از قاب و عملکرد لرزه‌ای بسیار مناسب سازه می‌باشد. این موضوع طرح اقتصادی سازه و فونداسیون آنرا منجر می‌گردد.

## ۱-۲ ساختار، محتوا و محدودیت‌های پژوهش

این پژوهش در فصول مجزا انجام شده است. در ابتدا و در فصل اول، به بیان و طرح مسئله و انگیزه انجام رساله پرداخته شده است. در این خصوص در گام اول کلیات موضوع و اهداف پژوهش بیان شده است و به طور کلی نکات کلیدی در خصوص موضوع پژوهش در ابتدای امر مطرح شده است. در ادامه و در دومین

فصل به بررسی تحقیق‌های انجام شده حول موضوع تحقیق بر مبنای مقالات گوناگون و نتیجه‌های آنان توجه شده است تا عوامل موثر و پارامترهایی که به عنوان متغیرهای مستقل قلمداد شده شناسایی شده و تاثیر آنها بر نتایج مشخص گردد. در فصل سوم به مبانی و متدولوژی تحقیق توجه شده است. در این قسمت متدولوژی استفاده شده در تحقیق با جزئیات بررسی شده و پروسه کلی در این قسمت آمده است. در فصل چهارم با بررسی و تحلیل نمونه‌ها (قاب‌ها) و همچنین درج پارامترهای به کار رفته در بهینه‌یابی، نتایج نهایی استخراج و نگارش شده است. در نهایت در فصل پنجم نیز به جمع بندی مطالب و استخراج نتایج رساله پرداخته شده و پیشنهاداتی جهت ادامه تحقیقات در آینده پیرامون موضوع این پژوهش ارائه شده است.

در خصوص محدودیت‌های این پژوهش نیز می‌توان اذعان داشت که در متدهای عادی تهیه مقالات، ابتدا در آزمایشگاهها نمونه‌ها با اندازه واقعی ساخته می‌شوند و بررسی روی آنها صورت می‌پذیرد و در ادامه با متدهای عددی پاسخ‌های مدل آزمایشگاهی اعتبار سنجی و بررسی می‌گردد. تهیه نمونه در اندازه حقیقی و انجام آزمایشات روی نمونه‌ها به دو علت در این تحقیق مشکل بود. اولاً عدم وجود تجهیزات لازم برای تهیه نمونه‌ها و انجام آزمایشات لازم روی آنها و دوماً با فرض بودن یا تهیه امکانات مخارج زیادی بر محقق تحمیل می‌گردد که فاقد توجیه است. البته در مورد کار گروهی و تیمی این مورد امری عادی است. عامل بعدی که خیلی اهمیت دارد و عمدتاً در آزمایشات با آن مواجه هستیم محدودیت‌های نمونه تهیه گردیده و مقدار نمونه‌های آزمایشگاهی بعلاوه محدودیت در اعمال بارها بر روی مدل‌ها است. به طور کلی محدودیت‌های این پژوهش شامل موارد زیر است:

- مخارج زیاد تهیه مدل و آزمایشات مربوط به آن در اندازه حقیقی در آزمایشگاه.
- عدم وجود لوازم، امکانات و فضای قابل قبول برای مطالعات آزمایشگاهی.
- محدودیت زمانی پژوهش به منظور مطالعه بر روی روش‌ها و نمونه‌ها و تعداد بیشتری از پارامترها.

## فصل دوم: مروری بر ادبیات فنی و مطالعات پیشین

## ۱-۲ مقدمه

به خاطر تحقیق و مشابه سازی دقیق در هر موضوع مهندسی و همینطور انجام مطالعات موردی بر روی آن مسئله در گام نخست شناخت مقدارهای مشخص یا عامل‌های متفاوت موثر بر مسئله از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. در این جهت محقق نخست باید این پارامترها را مشخص کرده. البته این امر نیاز به بررسی مطالعات گوناگون حول بحث مورد نظر را دارد. بنابراین بهره‌جویی از تحقیقات مختلف خیلی از اهمیت برخوردار است و می‌تواند به عنوان خط اصلی این تحقیق و ادامه پژوهشها در آینده باشد. بر مبنای این ایده در ادامه این فصل کوشش گردیده تا به بررسی تعدادی از تحقیقات انجام شده به وسیله پژوهشگرها پرداخته شود.

سیستم‌های مهاربندی در طراحی ساختمان‌ها به علت محدود نمودن جابجایی‌ها و ضمانت پایداری، استفاده می‌شوند. جابجایی افقی در ساختمانهای با ارتفاع زیاد به شکل توانی از ارتفاع ساختمان زیاد می‌شود و به همین دلیل مقدار زیادی فولاد احتیاج است تا بتوان جابجایی افقی را مهار کرد، ضمناً در این مدل ساختمانها تعیین جای بهینه بادبندها کار سختی می‌باشد. حالت‌های زیادی در مورد جایگذاری بادبندها وجود دارد. از بین آنها بادبند ضربدری برای هر طبقه یا همه طبقات ساختمان و بادبندهای قطری و هفتی شکل دوبر یا تکی خیلی کاربرد دارند. البته قابل ذکر است که مدل سعی و خطا خیلی مشکل بوده و زمان زیادی می‌گیرد و حتی شاید غیر ممکن باشد؛ لذا نیاز به مدلی است که پروسه بهینه‌یابی را دقیق و عالی انجام بدهد. در این پژوهش مهاربندهای CBF مورد توجه بوده است. با توجه به عنوان این پژوهش که انتخاب بهینه محل، آرایش و تعداد دهانه‌های مهاربندی در قابهای فولادی ساده با استفاده از روش کاوش چندفرآینتی و قیود دینامیکی می‌باشد چند مفهوم مورد توجه قرار گرفته و براساس آن، مطالعات انجام شده بررسی و نتایج بدست آمده از تحقیقات استخراج گردیده است. در این خصوص مطالعات انجام شده در مورد بهینه‌سازی و تاریخچه آن، روش‌های ابتکاری، فراابتکاری و تاریخچه آن، بهینه‌یابی سازه به طور کلی و

سازه فولادی به صورت موردی و نهایتاً بهینه‌یابی محل، آرایش و تعداد مهاربندها در سازه‌های فولادی مورد توجه قرار گرفته است.

## ۲-۲ بهینه‌سازی و بهینه‌سازی در مهندسی

برنامه‌ریزی خطی یا بهینه‌یابی ریاضی، به انتخاب بهترین عضو از یک فضا شامل اعضای در دسترس اشاره می‌نماید. در ابتدایی‌ترین حالت کوشش می‌گردد که با انتخاب هدفمند اطلاعات از یک دامنه قابل دسترس و حل یک تابع حقیقی مقدار ماکزیمم یا مینیمم آن محاسبه گردد. در قلمرو مدیریت اصولاً دو فرض وجود دارد [۳۶]:

الف: نبود محدودیت در منابع

ب: بودن محدودیت در منابع

اگر گزینه اول فوق را قبول کنیم خواهیم توانست از متدهایی مانند محاسبه اولین و دومین مشتق از تابع هدف، مقدار تابع بهینه را حساب نمود و اگر گزینه دوم را بپذیریم بنا به تیپ مسئله می‌توان روشهایی را مانند مدل غیر خطی، خطی، نرخ لاگرانژ، حتمی یا احتمالی طرح نمود و با به کارگیری روشهای موجود به سمت مقدار بهینه حرکت نمود. انواع روش‌های بهینه‌سازی عبارتند از:

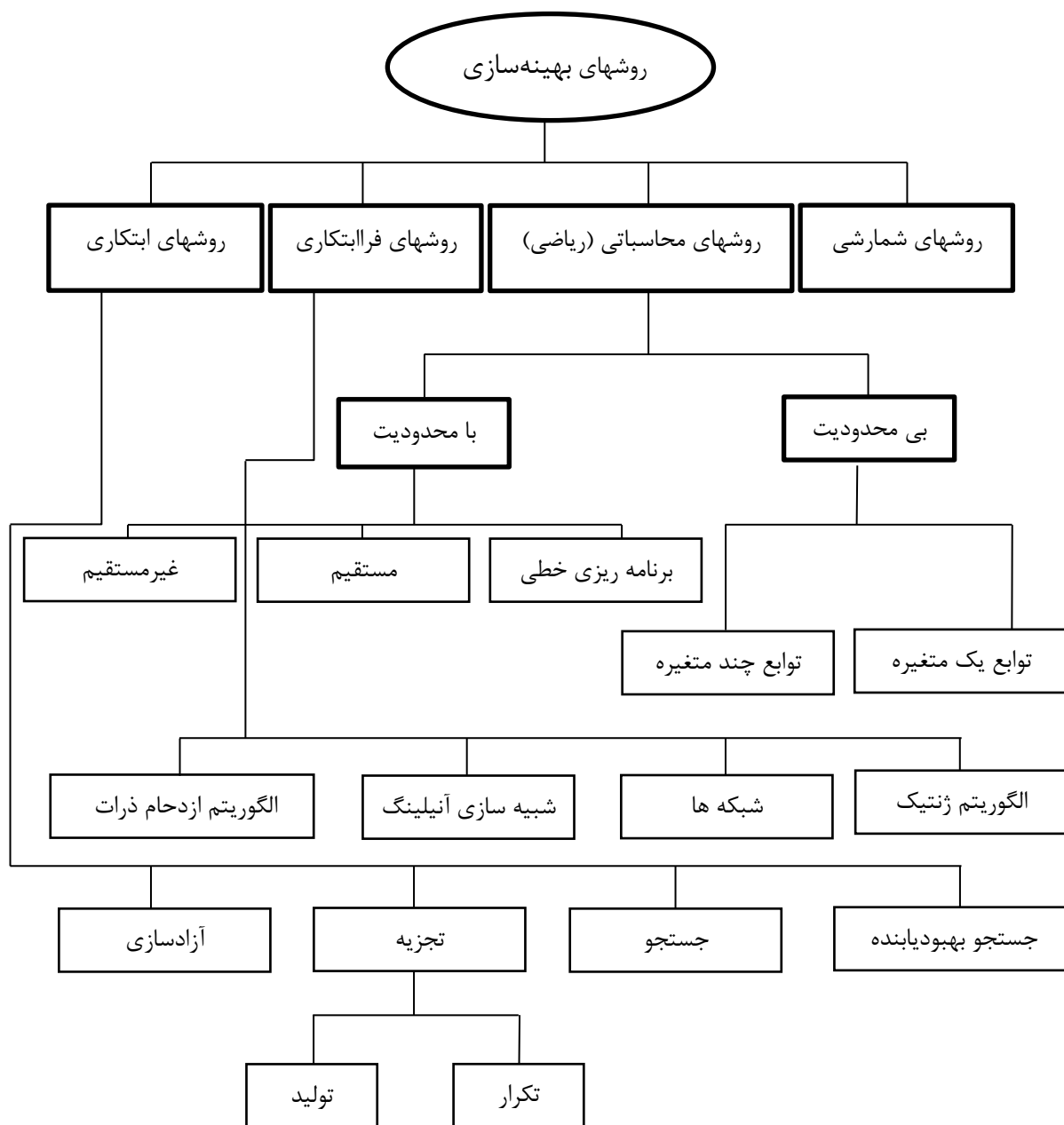
الف: روش‌های تحلیلی

روش‌های تحلیلی بیشتر به دنبال حل دقیق مسائل هستند. از این رو شامل گرفتن مشتق و پیدا کردن جواب بهینه هستند. هدف نهایی این تیپ از الگوریتم‌های بهینه‌یابی تعهد در گرفتن پاسخ بهینه است، اما استفاده از آنها در مسائل با پیچیدگی بالا یا مسائل بزرگ یا دارای تابع گسسته دشوار است.

ب: روش‌های فراابتکاری

روش‌های فراابتکاری یا فرااکتشافی برای حل مسائل بزرگتر و با توابع بدرفتار مناسب‌ترند. اگرچه این روش‌ها نمی‌توانند رسیدن به جواب بهینه را تضمین کنند. الگوریتم ژنتیک و تبرید شبیه‌سازی شده

مثال‌هایی از این الگوریتم‌ها هستند. در ادامه نمونه‌ای از طبقه‌بندی انواع روش‌های بهینه‌سازی در شکل (۲-۱) نشان داده شده است [۳۵].



شکل (۲-۱): نمونه‌ای از طبقه‌بندی انواع روش‌های بهینه‌سازی [۳۵]

## ۲-۲-۱ تاریخچه بهینه‌سازی

دانشمند دانمارکی، جنسن<sup>۷</sup> (در سال ۱۹۰۶ میلادی) معنی همگرا بودن و مشتق گرفتن از نامعادلات را توصیف کرد که اخیراً به نام نامعادله جنسن از آن استفاده می‌گردد و تاثیر اصلی را در بحث همگرا بودن در بهینه‌یابی بازی می‌کند. مسئله همگرا شدن بحثی ویژه و خیلی مهم در زمینه بهینه‌یابی علم ریاضیات می‌باشد به این شکل که وقتی یک حالت بهین پیدا می‌شود، همیشه این اطمینان وجود دارد که این حالت همان نقطه بهینه در مسئله است. طیف زیادی از مسئله‌های بهینه‌یابی را می‌شود در بحث بهینه-یابی همگرا مجدداً دسته‌بندی نمود که از بین استفاده‌های گسترده آن می‌شود به طرح بهینه، سامانه‌های کنترلی، متناسب کردن و مدل سازی داده‌ها، انجام عملیات بر روی داده‌های سیگنال و غیره اشاره نمود. بعد آن کارل منجر<sup>۸</sup> (در سال ۱۹۳۰ میلادی) موضوع پیک را در گردهمایی ریاضی در اتریش بیان کرد که این موضوع، دغدغه بسیاری از پیک‌ها و افراد مسافر بود. اقدامات مربوط او نهایتاً در سال ۱۹۳۲ انتشار پیدا کرد که در آن کم فاصله‌ترین مسیر بین تعداد بیشماری از نقطه‌ها یا همان شهرها را معین می‌کرد که فاصله هر دو نقطه مشخص بود. هر چند این مشکل را می‌شود با مقداری آزمون و خطا محاسبه کرد، ولی هیچ الگوریتم قابل قبولی برای پیدا کردن اینچنین پاسخی وجود ندارد. در هر حالت، قانون آسان رفتن به کوتاه‌ترین نقاط، کمترین مسیر را به ما نمی‌دهد. این مشکل در حال حاضر به نام فروشنده دوره‌گرد<sup>۹</sup> مشخص است و به تعداد دیگری از مسئله‌ها از جمله اختصاص منابع، بررسی مسیرهای مختلف در شبکه، تنظیم کردن زمان و کارکرد جستجو نیز ارتباط پیدا می‌کند. کانتوروچ (در سال ۱۹۳۹ میلادی) نخستین نفری بود که الگوریتمی را برای استفاده در برنامه‌ریزی خطی ابداع کرد و آن را در بحث اقتصاد استفاده کرد. او بحث ایجاد طرح‌ریزی بهینه و مدل‌های تاثیرگذار را با هدف پیدا کردن جوابها برای استفاده در برنامه‌ریزی خطی مشخص نمود، که به خاطر این عمل با ارزشش همراه کوپمنس در سال ۱۹۷۵ جایزه نوبل را دریافت کرد.

<sup>7</sup> . J. Jensen

<sup>8</sup> . Karl Menger

<sup>9</sup> . Traveling salesman problem

اقدام مهم دیگری که به وسیله دانتزیگ<sup>۱۰</sup> (در سال ۱۹۴۷ میلادی) محقق شد، ایجاد مدل سیمپلکس بود که برای حل کردن قضیه برنامه‌ریزی خطی با اندازه بزرگ انجام پذیرفت. دورفمن<sup>۱۱</sup> (در سال ۱۹۴۸ میلادی) در تحقیقی که انتشار پیدا کرد بیان نمود که برنامه‌ریزی خطی در سال‌های ۱۹۳۹ و ۱۹۴۷ جدا از هم سه دفعه و هر دفعه با مقدار کمی اختلاف طرح شده که نخستین بار به وسیله استاد ریاضیات روسی، کانتوروویچ، سپس به وسیله استاد اقتصاد هلندی، کوپمنس و در انتها در سال ۱۹۴۷، توسط استاد ریاضی آمریکایی، دانتزیگ صورت پذیرفته است. مدل سیمپلکس دورانی ریاضی‌دان آمریکایی، می‌تواند طیف بسیاری از مسئله‌های تصمیم‌گیری سیاسی با سختی زیاد را حل نماید[۲]. علاوه بر این هارولد کان<sup>۱۲</sup> و تاکر<sup>۱۳</sup> (در سال ۱۹۵۱ میلادی) روی قضیه بهینه‌یابی غیرخطی بحث نمودند و فرض نقطه بهینه را مجدداً بهبود بخشیدند، همانند موقعیتی که آقای کاروش در سال ۱۹۳۹ در تز تحصیلات تکمیلی خود پیشنهاد داد. در حقیقت در حال حاضر شرایط کاروش کان تاکر به عنوان بهینگی تعمیم یافته ضرایب لاگرانژ در نامعادلات غیر خطی می‌باشند[۳].

بعد از آن بلمن<sup>۱۴</sup> (در سال ۱۹۵۷ میلادی) در آمریکا وقتی که در حال بررسی روی مشخص کردن چند مرحله بودن و پروسه طراحی بود طرح دینامیکی و اصل بهینه بودن را ارتقا بخشید و در عین حال کلمه طرح‌ریزی دینامیک را به وجود آورد. ایده طرح‌ریزی دینامیک به سال ۱۹۴۴ برمی‌گردد وقتی که نومن<sup>۱۵</sup> و مورگنستر<sup>۱۶</sup> (در سال ۱۹۴۴ میلادی) روی مسئله‌های مربوط به اراده کردن تربیتی مطالعه می‌نمودند. علاوه بر این نومن کمک بسیاری به پیشرفت تحقیق موثر کرد. در ابتدای سال ۱۸۴۰ میلادی، وقتی که بیج<sup>۱۷</sup> بر روی هزینه جابجایی و دسته‌بندی پست‌ها بررسی می‌کرد، قدیمی‌ترین پژوهش در بحث تحقیق موثر را انجام می‌داد. عمل با اهمیت دیگری نیز در زمان جنگ جهانی دوم انجام پذیرفت و از آن

---

<sup>10</sup> . George Dantzig

<sup>11</sup> . Dorfman

<sup>12</sup> . Harold Kuhn

<sup>13</sup> . A. W. Tucker

<sup>14</sup> . Richard Bellman

<sup>15</sup> . John von Neumann

<sup>16</sup> . O. Morgenestern

<sup>17</sup> . Charles Babbage

زمان بود که پیدا کردن پاسخ‌های بهینه در طیف بسیاری از مسئله‌های بحث برانگیز چند رشته‌ای مانند پروژه‌های طراحی، شبکه‌های ارتباطی، مدیریت کردن زمان توسعه یافت [۳]. بعد از سال ۱۹۶۰، مقالات زیادی در بحث بهینه‌یابی تولید گردید که همه آنها شامل مجموعه‌ای از گذشته بهینه‌یابی مربوط به سال ۱۹۶۰ میلادی بودند. با توسعه علم، مدل‌های حل نوآورانه‌ای جایگزین مدل‌های قدیمی شدند که می‌توانند مسائل بهینه‌یابی پیچیده‌تری را حل کنند [۴].

## ۲-۳ روش‌های ابتکاری و فراابتکاری

مدل‌های فراابتکاری و ابتکاری روش‌های حل راهبردی هستند که به وسیله آزمون و خطا عمل می‌کنند و به خاطر ارائه روش‌های حل مناسب برای قضیه‌ای سخت در مدت زمان کاربردی و توجیه‌پذیر به کار می‌روند. مقصود، پیدا کردن پاسخ‌های مناسب و قابل قبول در یک مدت زمان معین است. هیچگونه ضمانتی برای این که مناسب‌ترین پاسخ تهیه شود، وجود ندارد و حتی نمی‌شود حدس زد که یک الگوریتم چگونه عمل می‌کند. فکر ما اینگونه است که یک الگوریتم خوب و عملی می‌تواند در بیشتر زمان‌ها خوب عمل کند و پاسخ‌های مناسبی را تولید کند. در بین پاسخ‌های تولید شده، انتظار ما این است که بیشتر آنها نزدیک به پاسخ‌های خوب باشند، هر چند هیچگونه ضمانتی برای چنین حالتی وجود نخواهد داشت [۳۸].

## ۲-۳-۱ رده‌بندی الگوریتم‌های فراابتکاری

مقیاس‌های گوناگونی می‌تواند برای رده‌بندی الگوریتم‌های فراابتکاری استفاده شود [۳۵]:

- ۱- بر اساس یک پاسخ و بر اساس جمعیت: الگوریتم‌های با یک پاسخ در زمان پروسه پیدا کردن جواب، پاسخ را تغییر می‌دهند، در صورتی که در الگوریتم‌های بر اساس جمعیت در زمان پیدا کردن، یک جمعیت از پاسخ‌ها بشمار آورده می‌شوند. از الگوریتم‌های معروف فراابتکاری بر اساس جمعیت می‌توان الگوریتم‌های

ژنتیک، کلونی زنبورها، کلونی مورچه‌ها و ازدحام ذرات را نام برد. از الگوریتم‌های معمول فراابتکاری بر اساس یک جواب می‌توان الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و جستجو ممنوع را ذکر کرد.

۲- **با ایده و بدون گرفتن ایده از طبیعت:** خیلی از الگوریتم‌های فراابتکاری از طبیعت ایده گرفته‌اند، در این بین تعدادی از الگوریتم‌های فراابتکاری نیز از طبیعت ایده گرفته نشده‌اند.

۳- **حتمی و فرضی:** یک الگوریتم فراابتکاری حتمی مانند جستجو ممنوع، مشکل را به وسیله اراده حتمی حل می‌کند. ولی در الگوریتم‌های فراابتکاری فرضی مانند شبیه‌سازی تبرید، از یک تعداد قانون‌های فرضی در زمان گشتن استفاده می‌گردد.

۴- **با حافظه و بی حافظه:** تعدادی از الگوریتم‌های فراابتکاری بدون حافظه هستند. به این شکل که، این تیپ الگوریتم‌ها از داده‌های به وجود آمده در زمان گشتن استفاده نمی‌نمایند (به عنوان نمونه الگوریتم شبیه‌سازی تبرید). البته تعدادی از الگوریتم‌های فراابتکاری مانند جستجو ممنوع از حافظه استفاده می‌نمایند. این حافظه، داده‌های پیدا شده در زمان گشتن را در خود حفظ می‌کند [۲].

## ۲-۳-۲ سابقه روش‌های فراابتکاری

هنگامیکه تورینگ<sup>۱۸</sup> (در سال ۱۹۵۲ میلادی) توفیق یافت نماد آلمان‌ها را در Bletchley park با کمک ولچمن<sup>۱۹</sup> استاد ریاضی در انگلستان (که در دهه ۱۹۴۰ موفق به ابداع ماشین برقی برای اکتشاف رمز مواد منفجره شده بود) پیدا کند، شاید نخستین نفری بود که از الگوریتم‌های ابتکاری در موقع جنگ جهانی دوم استفاده نمود. این ماده منفجره که به لقب یک الگوریتم ابتکاری استفاده گردید به اسم تورینگ نامیده شد و به خاطر گشتن از میان حدوداً ۱۰<sup>۲۲</sup> ترکیب که هدفش قرار دادن موشکافانه رمزها در یک پیام کدگذاری بود، انجام می‌گرفت. تورینگ متد گشتن خود را جستجو ابتکاری نام‌گذاری کرد، البته گمان

---

<sup>18</sup> . Alan Turing

<sup>19</sup> . Gordon Welchman

می‌رفت که این متد در بیشتر زمان‌ها عمل کند اما هیچگونه ضمانتی برای پیدا کردن پاسخ درست وجود نداشت، ولی به هر حال خود پیروزی قابل اعتنایی به شمار می‌رفت. در سال ۱۹۴۵ میلادی آقای تورینگ در لابراتوار فیزیک انگلستان<sup>۲۰</sup> شروع به کار نمود، مکانی که طرح خود برای موتور محاسباتی خودکار را ایجاد کرد. وی در یک مقاله در سال ۱۹۴۸ که با موضوع ماشین آلات تیزهوش<sup>۲۱</sup> بود مدلهای ابداعی خود را در بحث شبکه‌های عصبی<sup>۲۲</sup>، ماشین‌های اتومات<sup>۲۳</sup>، الگوریتم‌های تکامل یافته و ویرایش اولیه الگوریتم ژنتیک عنوان نمود[۲].

پیشرفت الگوریتم‌های تکاملی دومین قدم تاثیرگذار بود که در سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰ رخ داد. نخستین مرتبه جان هالند<sup>۲۴</sup> و تیمش (در سال ۱۹۷۵ میلادی) در دانشگاه ایالتی میشیگان الگوریتم‌های ژنتیک را به روز کردند. در ابتدا سال ۱۹۶۲ میلادی هالند بر روی سیستم‌های قابل تطبیق بررسی نمود و نخستین دفعه محاسباتی مانند باز ترکیبی<sup>۲۵</sup> و برخورد<sup>۲۶</sup> را برای تهیه نمودن این سیستم‌ها استفاده نمود. او در مقاله خود روش پیشرفت الگوریتم‌های ژنتیک را به طور اختصار عنوان کرد. در همان زمان، جانگ<sup>۲۷</sup> (در سال ۱۹۷۵ میلادی) تز خود را به پایان رساند که برتری الگوریتم‌های ژنتیک<sup>۲۸</sup> را در بکارگیری بسیاری از توابع هدف، چه به شکل چند مودالی<sup>۲۹</sup> یا حتی جدا شده<sup>۳۰</sup> عنوان می‌کرد[۲].

در سال ۱۹۵۶ بکارگیری متدهای بهینه‌یابی عددی برای محاسبات در بحث مهندسی سازه عنوان شده است. یکی از مقالات موثر در بحث متدهای بهینه‌یابی سازه‌ها به وسیله هی من در سال ۱۹۵۶ انجام گردید. متدهای بهینه‌یابی زمان محاسبات را کم می‌کرد[۵].

---

<sup>20</sup> . National Physics laboratory

<sup>21</sup> . Intelligent machinery

<sup>22</sup> . Neural Network

<sup>23</sup> . Learning machine

<sup>24</sup> . John Holland

<sup>25</sup> . Reproduction

<sup>26</sup> . Cross over

<sup>27</sup> . Kenneth De Jong

<sup>28</sup> . Genetic Algorithm

<sup>29</sup> . Multi Modal

<sup>30</sup> . Discrete

الگوریتم تبرید (SA) بر مبنای خنک گردیدن فلزها در سال ۱۹۹۱ توسط بالینگ ارائه گردید. الگوریتم جستجو هارمونی (HS) نیز در سال ۲۰۰۴ میلادی توسط گیم و لی عنوان شد. الگوریتم جستجو ممنوع در سال ۱۹۹۵ میلادی توسط بلند در بهینه‌یابی استفاده گردید. در سال ۲۰۰۴ میلادی کمپ و تیمش الگوریتم کلونی مورچگان (ACO) را استفاده کردند. همچنین الگوریتم PSO توسط پرز و بدینان معرفی شد. در سال ۲۰۱۴ کاوه و همکاران نیز، الگوریتم ازدحام ذرات را معرفی کردند[۵].

الگوریتم ژنتیک یک مدل گشتن است که بر مبنای بنیاد تحولی داروین و مدل وابسته به علم زیست‌شناسی بنا گردیده شده و در محاسبات ریاضی مثل شایستگی، ترکیب و باز ترکیب، جهش و تعیین بهترین‌ها عنوان می‌گردد. از وقتی که الگوریتم‌های ژنتیک در حل طیف بسیاری از مسئله‌های بهینه‌یابی به خوبی عمل کردند هزاران پژوهش و کتاب در این مقوله نوشته شده است. خیلی از اطلاعات عنوان می‌نماید که امروزه دارایی بزرگ بسیاری موسسات در به کار گرفتن این الگوریتم‌ها به منظور حل کردن مسئله‌های سخت بهینه‌یابی ترکیبی هزینه می‌گردد[۶].

در زمان مشابه و در سال ۱۹۶۳، هانس شفل و اینگو رچنبرگ با کمک هم در دانشگاه صنعتی برلین یک مدل گشتن برای حل قضایا بهینه‌یابی در بحث مهندسی حمل و نقل هوایی را توسعه دادند که به اسم راهبرد تکاملی مشهور است. لارنس فوگل (در سال ۱۹۶۰ میلادی) به بهره‌برداری از تکامل مشابه‌سازی شده برای یک پروسه آموختن و همچنین به عنوان یک وسیله جهت تحقیق در هوش مصنوعی علاقه پیدا کردند. بعداً لارنس فوگل با کمک اون و والش (در سال ۱۹۶۶ میلادی) مدل‌های برنامه‌ریزی تکامل یافته را به اسم ماشین‌های با وضعیت محدود که جهش‌های اتفاقی یکی از این ماشین‌ها است، گسترش دادند. متدهای جدید ذکر شده با سامان‌پذیری زیادتری به اتمام رسیدند و محاسبات تکمیلی نامیده شدند[۲].

الگوریتم‌های فراابتکاری در سالهای ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ شکوفا شدند. عمل تاثیرگذار دیگری در سال ۱۹۸۳ میلادی رخ داد که شبیه‌سازی تبرید نام گرفت و به وسیله گلت، وش و کیرک، (در سال ۱۹۸۳ میلادی) انجام پذیرفت، به این شکل که از پروسه گرمایشی فلزات ایده گرفته شده بود. نحوه کار این

الگوریتم به این صورت است که نخست با فرض یک پاسخ ابتدایی در دماهای زیاد آغاز می‌شود و آهسته مدل سرد می‌شود. یک جواب نو در حالتی قابل پذیرش خواهد بود که خوبتر باشد، در غیر این حالت فقط در زمانی قابل پذیرش است که بتواند حالتی را مهیا کند که مدل از افتادن در نقاط بهینه محلی فرار کند. بنابراین قابل انتظار است زمانی که مدل آرام و مقداری سرد شود، بهینه کلی قابل دسترس باشد [۳۵].

مدل جستجو ممنوع که توسط گلور در سال ۱۹۸۶ میلادی به وجود آمد از ابتدایی ترین استفاده-های متدهای فراابتکاری است، هر چند مقاله اصلی او مورد جستجو ممنوع در سال ۱۹۹۷ میلادی انتشار یافت.

مارکو دوریگو در سال ۱۹۹۲ میلادی تز تحصیلات تکمیلی خود را که در مورد الگوریتم‌های مربوط به طبیعت و بهینه‌یابی بود، به پایان رساند. او در رساله‌اش اقدام نوآورانه خود را که در مورد بهینه‌یابی کلونی مورچگان بود شرح داد. این مدل گشتن از ازدحام زیرکانه مورچه‌گان ایده گرفته شده بود که از ماده شیمیایی فرومون برای فرستادن مواد شیمیایی استفاده می‌کند. بعداً جان کوزا (در سال ۱۹۹۲ میلادی) از استنفورد تحقیقی در مورد برنامه ژنتیک انتشار داد که بر اصل مفاهیم نوآورانه‌ای مبنی بر تعلیم‌های اتوماتیک<sup>۳۱</sup> معین می‌شد و موجب تحولی در برنامه‌های رایانه‌ای بود. این الهام باعث استفاده و به کارگیری از اصل ژنتیک برای به وجود آوردن برنامه‌های رایانه‌ای شد که می‌توان خوبترین آنها را در هر تیپ از مسئله استفاده نمود [۳].

در ابتدا قرن جدید، مسئله‌ها حتی پرشورتر شدند. نخست زنگ وو جیم<sup>۳۲</sup> و تیمش (در سال ۲۰۰۱ میلادی) الگوریتم جستجو هارمونی<sup>۳۳</sup> را پیشرفت دادند، که به گونه زیادی در حل قضایای متفاوت بهینه‌یابی مانند پخش آب، مدیریت زمان و طراحی جابجایی آن استفاده شد. الگوریتم زنبور عسل توسط تووی<sup>۳۴</sup> و

---

<sup>31</sup> . Machine learning

<sup>32</sup> . Zong Woo Geem

<sup>33</sup> . Harmony Search

<sup>34</sup> . C. Tovey

نکرانی<sup>۳۵</sup> (در سال ۲۰۰۴ میلادی) عنوان شد و هدف نیز بهینه نمودن محل‌های اجتماع در عالم بود. پیرو آن فم<sup>۳۶</sup> و تیمش (در سال ۲۰۰۵ میلادی) با پیشرفت الگوریتم زنبور عسل و بعدا کارابوگو<sup>۳۷</sup> (در سال ۲۰۰۵ میلادی) ازدحام زنبور عسل تصنعی را پیشرفت دادند[۲].

الگوریتم کرم شبتاب توسط یانگ (در سال ۲۰۰۸ میلادی) پیشرفت داده شد. مجموعاً تعدادی تحقیقات در مورد الگوریتم کرم شبتاب منتشر گردید و این الگوریتم توجه خیلی از پژوهشگران را جلب نمود. متد جستجو ذرات باردار الکتریکی<sup>۳۸</sup> از نوآورانه‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری است که به وسیله قانون-های غالب بر فیزیک شروع به گشتن فضای طراحی موضوع می‌کند. این متد به وسیله طلعت اهری و کاوه (در سال ۲۰۱۰ میلادی) به وجود آمد. این متد از نوآورانه‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری است که قانون‌های استفاده شده در این الگوریتم بر این پایه‌اند: قانون‌های گاوس و کولمب و قانون‌های نیوتن از مهندسی مکانیک. پژوهشگران همیشه دنبال پیدا کردن الگوریتم‌هایی خوبتر یا قویتر، برای مسئله‌های بهینه‌یابی به خصوص برای قضایای سخت بوده‌اند. در هر صورت، این فرضیات حالتی را مشخص می‌نمایند که اگر الگوریتم الف برای بیشتر تابع‌های بهینه‌یابی از الگوریتم ب خوبتر عمل کند، آن موقع الگوریتم ب برای دیگر تابع‌ها خوبتر از الف کار خواهد نمود. به بیان دیگر، اگر از همه پهنه تابع‌های ممکن معدل بگیریم هر دو الگوریتم‌های الف و ب عموماً مناسب کار خواهند کرد. البته قابل گفتن است که در کل هیچ الگوریتم خوبتری وجود ندارد. بنابراین، پژوهشگران فهمیدند که برای یک قضیه بهینه‌یابی موجود نیازی به معدل‌گیری روی تمام حالات موجود نمی‌باشد. موردی که ما پی آن هستیم این می‌باشد که خوبترین پاسخ‌ها را بیابیم و در نیل به این هدف احتیاجی نیست تا از همه پهنه تابع‌ها معدل بگیریم. علاوه بر این، یک حقیقت قبول شده است که هیچ حالت خاصی وجود ندارد. ولی در عمل به وسیله تجربه می‌توان فهمید که در هر تیپ قضیه بهینه‌یابی داده شده، تعدادی از الگوریتم‌ها خوبتر از بقیه کار می‌کنند. پس اخیراً پژوهشگران روی

---

<sup>35</sup> . S. Nakrani

<sup>36</sup> . D. T. Pham

<sup>37</sup> . D. Karaboga

<sup>38</sup> . Charged System Search

یافتن خوبترین و فعال‌ترین الگوریتم‌ها متمرکز شده‌اند. تکلیف ما مهندسين یافتن الگوریتم‌های خوبتر برای بیشتر مباحث است، ولی نه برای تمام مسائل [۲].

## ۲-۴ بهینه‌سازی سازه و الگوریتم‌های آن

تحقیقات زیادی در حوزه بهینه‌سازی سازه‌ها صورت گرفته است، که اکثر آنها با مسائل آکادمیک یا کوچک سروکار داشته‌اند. برای دهه‌ها این تکنولوژی توسط مهندسين سازه در عمل به عنوان کاری رمزگونه و مستور با ارزش عملی کم اجتناب می‌شد. در سالهای گذشته، تلاشهای زیادی برای ورود مبحث بهینه‌یابی سازه به مهندسی عمران انجام شده است. مبحث بهینه‌یابی اهمیت زیادی در طراحی سازه‌ها و ساختمان‌ها، خصوصاً در طراحی ساختمان‌های با ارتفاع بسیار بلند (آسمان خراش‌ها) دارد. اخیراً، بهینه‌سازی سازه توجه طراحان و فعالان در زمینه سازه‌های بلند را به خود جلب نموده است. شرکت‌های برجسته در طراحی سازه‌های بلند مانند Arup، SOM وارد عمل شده‌اند. برای مثال، Arup یک گروه جهت تمرکز بر چیزی که اسمش را CDO یعنی طراحی محاسباتی و بهینه‌سازی گذاشته، تشکیل داده است. هدف بهینه‌سازی سازه شاید سه گانه باشد. ۱: اتوماتیک نمودن فرآیند پیچیده طراحی؛ ۲: بهینه‌سازی عملکرد سازه؛ ۳: حداقل نمودن هزینه کلی سازه. کارهای اولیه بر روی مینیمم کردن وزن خصوصاً در ساختمان‌های فلزی تمرکز کرده بودند و عموماً به وسیله مهندسين عمران مورد ایراد قرار می‌پذیرفت که یک کمینه نمودن وزن سازه الزاماً موجب کاهش هزینه نمی‌شود. سازه‌های بتن مسلح نیز شامل دو نوع مصالح هستند که باید برای مسئله بهینه‌سازی هزینه فرموله شوند. بهینه‌سازی سازه‌ای ممکن است هدفی باشد برای پیدا کردن خوبترین طرح که مخارج، وزن و دیگر پارامترهای تعیین شده برای ساختمان را در یک حالت بارگذاری برآورده نموده، در صورتیکه ایستایی، سختی، مقاومت و حتی زیباشناختی را برآورده سازد. این مسئله توجه بسیاری از کارفرمایان را در دنیا به خود جلب نموده است. روش‌های بهینه‌سازی عملی برای طراحی سازه‌ها شامل گامهای زیر است [۷]:

- انتخاب المان‌های مناسب با استفاده از الگوریتم‌های ریاضی.

- کاهش وزن مصالح مورد استفاده.
  - بهینه‌سازی ساخت مانند کاهش دور ریز ورق در ساخت اسکلت فلزی.
  - استفاده از مدلسازی و تحلیل دقیق تر مانند تحلیل غیرخطی دینامیکی و اندرکنش خاک و سازه.
- طرح غیر اقتصادی یا غیر اصولی در مهندسی سازه به محاسبات مدل‌ها به شکل غیر بهینه تعلق می‌پذیرد. طرح‌های با ضریب اطمینان بالا (غیر اقتصادی) مشخص می‌باشند که در زمان بررسی و محاسبات بیشتر از مقدار و گنجایش مورد احتیاج طرح می‌گردند. در این حالت امکانات طرح در زمان استفاده مورد بررسی قرار نمی‌پذیرند. هنگامی که در زمان بررسی، راهبرد مناسبی برگزیده نشود، قطعاً حجم کار و عملیات زیاد می‌شود. در زمان طرح نیز چنانچه ویژگی‌های مهندسی سازه برای بارهای بیشتر از حد استفاده، محاسبه گردند، در زمان ساخت بر باد رفتن مصالح و نیروی کار را مشاهده می‌کنیم. مخارج و مدت زمان ساختن طرح نیز بیشتر خواهد شد. برخلاف، طرح‌هایی با ضریب اطمینان پایین (غیر ایمن) معرفی می‌گردند که در زمان بررسی کم‌تر از مقدار مورد احتیاج (مینیمم موجود در استانداردها) طرح گردند. در این زمان طرح جوابگوی خواسته‌های بهره‌بردار نمی‌باشد. در علم مهندسی ساختمان اگر سازه پایین‌تر از مقدار مورد احتیاج بررسی و محاسبه گردد، در این شکل ساختمان و المان‌های آن همیشه بیشتر از تحمل و حدود بهره‌برداری آن بارگذاری می‌گردد، در این شکل، می‌باید نسبت به مقاوم‌سازی ساختمان، برای رسیدن مقاومت به مقاومت مورد احتیاج اقدام نمود. این شکل طرح نیز موجب زیاد شدن مخارج به علت انجام کارهای مجدد، استفاده مصالح بیشتر و استفاده بیشتر از نیروی کار می‌گردد. با عنایت به هزینه‌های زیادی که در سال برای طرح و ساخت طرح‌های عمرانی می‌شود و همچنین تاثیری که طرح‌های غیر بهینه در زیاد شدن مخارج و زیاد شدن زمان اتمام طرح‌ها دارد بررسی مورد گفته شده ضروری می‌باشد. برای استفاده از راهکارهای سبک ساختن سازه ابتدا باید به علت‌های افزایش وزن ساختمان توجه مناسب شود. بعد از پی بردن به علت‌ها می‌باید برای از بین بردن یا کم کردن تاثیر آن علت‌ها و همچنین وزن نهایی سازه کوشش کرد[۸].

طراحی سازه ها به طور کلی شامل مراحل بوده که در زیر به برخی از آنها اشاره شده است:

الف: بررسی شرایط نظم سازه و در صورت لزوم اقدام به ایجاد نظم در پلان و ارتفاع قبل از شروع به طراحی ( تقسیم پلان سازه به بلوک های با اشکال منظم در پلان و ایجاد نظم در ارتفاع و توزیع یکنواخت جرم در پلان و ارتفاع سازه)

ب: بررسی طرح سقف و تعداد و ابعاد و شکل بازشوها و تیرچه ریزی و ابعاد دهانه ها و جزئیات اجرایی سقف و ارزیابی سیستم لرزه بر مناسب برای سازه در دو جهت و طرح ریزی دقیق سیستم مهاربندی جانبی اعم از نوع و شکل و ابعاد و جانمایی در پلان و ارتفاع سازه و چیدمان مربوط به آن

پ: ارزیابی مسایل معماری در خصوص تعداد و ابعاد و شکل بازشوها و موقعیت آنها به عنوان کاربرد به منظور درب و پنجره

ت: ارزیابی خاک محل به لحاظ ظرفیت باربری و نشست و لایه بندی و پاسخ لرزه ای ساختگاه

ث: بررسی تاثیر انواع تحلیل اعم از استاتیکی و دینامیکی و تحلیل بدون و با لحاظ اندرکنش خاک و سازه بر نتایج بدست آمده و طرح سازه [۸].

در سالیان پیشین الگوریتم های فراکاوشی بسیاری برای بهینه یابی ساختمان ها استفاده گردیده است. این الگوریتم ها از طبیعت ایده گرفته شده اند و قابلیت بالایی در محاسبه قضایای سخت نسبت به متدهای بر اساس گرادیان دارند. طبیعت اتفاقی<sup>۳۹</sup> این متدها باعث می گردد که الگوریتم پهنه بزرگتری را نسبت به متدهای بر اساس گرادیان کاوش کند. برای نیل به پاسخ های خوبتر و کم کردن تعداد آنالیز، الگوریتم های زیادی که از نمونه های متفاوت (من جمله تئوری تکامل، سبک های اجتماعی، زیست شناسی، موزیک و فیزیک) ایده گرفته شده اند پیشرفت بسیاری پیدا کرده اند. برای مثال به الگوریتم های کرم شب تاب، ژنتیک و اجتماع پرندگان می توان اشاره کرد. کارایی هر کدام از این متدها طی تحقیقات پیشین بر روی ساختمان های

---

<sup>39</sup> . stochastic nature

گوناگون ثابت شده است. فرق بین این متدها در مورد همگرایی<sup>۴۰</sup>، متد نمایش انتخاب‌های جدید و روش برداشت از طرح نو می‌باشد. همه این الگوریتم‌ها شامل دو قسمت مهم برای نیل به پاسخ می‌باشند. مرتبه اول، گشتن همه پهنه طراحی به شکل تصادفی برای نیل به پاسخ بهینه کلی می‌باشد. در مرتبه دوم گشتن به مکان‌هایی از پهنه طراحی که پاسخ‌های خوبتری از آن حاصل شده متمرکز می‌گردد[۳۹].

## ۲-۴-۱ تاریخچه بهینه‌سازی سازه‌های فولادی مهاربندی

برگزیدن توپولوژی بهینه در قابهای بادبندی فلزی مورد مهمی می‌باشد که از بین تحقیق‌های صورت پذیرفته، پژوهشی در مورد توپولوژی قاب بادبندی به وسیله میجار<sup>۴۱</sup> و تیمش (در سال ۱۹۹۸ میلادی)، انجام پذیرفته است. در این تحقیق، مشخص گردیده است که قاب مهاربندی ضربدری با اتصالات ساده در قیاس با نوع‌های دیگر بادبندها، منجر به قاب‌های با وزن کمتر می‌شوند اما در قاب‌هایی همانند قاب با بادبند قطری و هفتی به مقدار بادبند ضربدری شکل مقاومت جانبی کافی را ارائه نمی‌دهند. علاوه بر این در قاب‌هایی با اتصالات ساده و با بادبند قطری و هفتی شکل، محدودیت جابجایی طبقه‌های وسط در فرایند طراحی حاکم می‌باشند. علاوه بر این برای قاب بادبندی شده مشخص گردیده است که هندسه بهینه به طور ضمنی حاصل می‌شود و به صورت عددی صحه‌گذاری می‌گردد[۲].

به کارگیری قاب با رفتار خمشی به همراه بادبند در طراحی ساختمانهای با ارتفاع زیاد افزایش یافته است. قاب‌های بادبندی در ساختمانهایی مانند Jhon Hancock در آمریکا و آسمان خراش Broadgate در انگلستان و China tower bank در چین به کار گرفته شده است. طرح این قابها با شیوه مرسوم و با مدل بادبندهای قطری شکل با زاویه‌های ۴۵ و ۶۰ درجه انجام گرفته است. به هر صورت، افراد کمی از مهندسين در قدیم تحقیقاتی در مورد مشخص نمودن بادبند بهینه و نسبت‌های تاثیرگذار مانند زوایا، به انجام رسانیده-

---

<sup>40</sup> . Encoding the candidates

<sup>41</sup> . Mijar

اند. اندازه‌گیری میزان عملکرد ساختمانها مانند مقدار نیروی کمانش، تغییر مکان انتهایی و فرکانس بوده است [۲].

فرهودی و کاوه (در سال ۲۰۱۰ میلادی) نیز الگوریتم مورچه‌ها را برای بهینه‌یابی توپولوژی بادبند-های ضربدری ساختمان‌های فلزی به کار گرفتند [۴۰].

شی<sup>۴۲</sup> و بالداک<sup>۴۳</sup> و (در سال ۲۰۰۶ میلادی) از متد الگوریتم ژنتیک در بهینه‌یابی سازه‌ها استفاده نمودند. [۴۱] همچنین ونگ<sup>۴۴</sup> (در سال ۲۰۱۳ میلادی) به وسیله الگوریتم ژنتیک و آنالیز غیرخطی، مدل‌های خرپایی را بهینه‌سازی کرد. [۴۲]

برومند (در سال ۲۰۱۰ میلادی) به وسیله عضوهای پی در پی، مدل بادبندی را برای بارهای غیر استاتیکی در ساختمانها (در بهسازی) بهینه کرد. در این مدل، سقف طبقات به شکل عضوهای صلب منظور می‌گردند. [۲]

مدل لیانگ<sup>۴۵</sup> (در سال ۲۰۰۷ میلادی) از یک شناسه عملکرد مبتنی بر انرژی انباشته شده در سازه بر اثر تغییر شکل کشسان آن و به منظور بهینه‌سازی ساختمان‌های فلزی استفاده می‌نماید [۲].

لاگاروس<sup>۴۶</sup> و تیمش (در سال ۲۰۰۸ میلادی)، بهینه‌یابی را یک مرتبه بیشتر از علم مهندسی ساختمان قرار دادند، به این شکل که بهینه‌یابی از جمع هندسه، اندازه و آرایش برای طرح ساختمان‌های فلزی به انضمام گشودگی جان تیرها به وسیله استانداردهای نوین منفعت می‌برد. بهینه‌یابی اندازه در مشخص کردن مساحت ستون و تیرها به کار برده می‌شود و بهینه‌یابی آرایش و شکل نیز برای تعیین مقدار و اندازه گشودگی جان تیرها استفاده می‌شود [۴۳].

عضو مهار، عضو مرکزی در قابهای بادبندی هم مرکز است که تحت تغییر شکل‌های غیر خطی در زمان بارهای زلزله باعث تلف شدن نیرو و انرژی می‌گردد. مهم می‌باشد که این عضو بارهای محوری برگشتی

---

<sup>42</sup> . Shea

<sup>43</sup> . Baldock

<sup>44</sup> . Wang

<sup>45</sup> . Liang

<sup>46</sup> . Lagaros

را بتواند تاب بیاورد و در موقعی که برای کشش جاری می‌گردد و تحت نیروی فشاری کمانه می‌کند دچار انهدام نگردد. پروفیل‌های با سطح مقطع تو خالی و با شکل مستطیل، مربع و حلقوی عموماً در بادبندها استفاده می‌شود. ضمناً تحقیقات بسیاری در مورد رفتار این المانها در ساختمان‌های فلزی به هدف نشان دادن رفتار غیر خطی آنها انجام شده است. در مقاله گاگینز<sup>۴۷</sup> (در سال ۲۰۰۴ میلادی) عملکرد هیستریزیس<sup>۴۸</sup> المان‌های تو خالی مستطیل و مربع شکل در ساختمانهای فلزی که تحت بارگذاری دوره‌ای غیر خطی قرار داشتند تحت بررسی قرار گرفت. علاوه بر این او آزمایش‌های سیکلی زیادی روی این مقاطع برای جمع کردن اطلاعات آزمایشگاهی و تهیه نمونه‌های عددی انجام داده است. در آزمایش‌هایی که او انجام داده است انواع مدل‌های بادبندی با طول‌های مختلف که تحت زیاد شدن گستره تغییر مکان سیکلی قرار داشتند، به کار گرفته شده بودند [۲].

نمونه عددی استفاده شده در برنامه اپنسیس (در سال ۲۰۰۰ میلادی) برای المان‌های بادبندی به ویله یوریز<sup>۴۹</sup> (در سال ۲۰۰۵ میلادی) تهیه گردیده است. اپنسیس از نمونه‌های تئوریک و فیزیکی برای نشان دادن بادبندها استفاده می‌کند. عوامل زیادی در بررسی عملکرد بادبند موثر است که دربرگیرنده انحنای ابتدایی، شمارگان نقطه‌های به هم پیوسته و تعداد اعضا می‌باشد که گاگینز و سالوده<sup>۵۰</sup> (در سال ۲۰۰۵ میلادی) به منظور تهیه یک نمونه عددی، تحت بررسی قرار داده‌اند. نمونه عددی نخستین دفعه به وسیله گاگینز انجام پذیرفت که از ۱۵ آزمون سیکلی استفاده کرد که بعداً با ۱۶ آزمون سیکلی توسط نیپ<sup>۵۱</sup> و تیمش (در سال ۲۰۱۰ میلادی) پیشرفت یافت.

کریستیانسن<sup>۵۲</sup> و تیمش (در سال ۲۰۰۰ میلادی)، مدلی برای تهیه کردن خودکار نمونه‌های فضایی بر اصل بهینه‌یابی شکل<sup>۵۳</sup> و آرایش توسعه دادند. مدل بهینه‌یابی یا فرآیند ساختن نمونه، اول به وسیله

---

<sup>47</sup> . Goggins

<sup>48</sup> . Hysteresis

<sup>49</sup> . Uriez

<sup>50</sup> . Salawde

<sup>51</sup> . Nip

<sup>52</sup> . Christiansen

<sup>53</sup> . Shape optimization

تعدادی از شروط مرزی، محدودیت‌ها، توابع هدف و یک نمونه ابتدایی با تخصیص مقادیر اولیه می‌باشد. به وسیله این اطلاعات ابتدایی که وارد مسئله شده‌اند، نمونه به گونه خودکار، آرایش ابتدایی خود را عوض می‌کند تا توابع هدف برای شروط مرزی بهینه گردند [۲].

در ارتباط با مسئله بهینه‌یابی موقعیت مهاربند در قاب‌های فولادی مطالعات خیلی زیادی در دسترس نمی‌باشد. فرهودی و کاوه مدل‌های فلزی با انواع ارتفاع‌های مختلف را با الگوریتم‌های گوناگون تحت مطالعه قرار دادند. آنها در بررسی خود با چشم پوشی از بی قاعدگی‌های درست شده در این تیپ مدلها از آنالیز خطی برای گرفتن جواب ساختمان استفاده کرده‌اند [۴۴]. اساک<sup>۵۴</sup> و هاشیتا در بررسی خود برای پیدا کردن پاسخ بهینه، مکان بادبندها را با تیپ بادبند و نوع‌های اتصال مورد مطالعه قرار دادند. قاب مطالعه شده آنها قاب پنج دهانه با سه طبقه بود. این محققان به این نتیجه رسیدند که تعیین تیپ بادبند به وسیله مکان بادبند انجام می‌پذیرد و در طبقه‌های پایین بادبند ضربدری شکل و در طبقه‌های بالاتر بادبندهای کا و هفتی شکل مناسب‌تر هستند [۴۵]. ساکا و کامشکی سازه‌های فلزی را با مکان دائم و حالت‌های گوناگون بادبند و همینطور قاب با رفتار خمشی را با برنامه الگوریتم ژنتیک تحت مطالعه قرار دادند. این محققان پی بردند که سازه فلزی با بادبند ضربدری نسبت به بقیه سازه‌ها وزن کمتر و مقاومت بیشتری دارد [۴۶].

## ۲-۵ مرور تحقیقات گذشته پیرامون مباحث بهینه‌سازی - روش

## فراابتکاری به همراه الگوریتم‌های آن - بهینه‌سازی سازه و سیستم

### مهاربندی

برای مطالعه موشکافانه در بحث، شناسایی عوامل گوناگون و نیز مطالعه تحقیقات محققان خیلی مهم می‌باشد. بنابراین در دنباله این بخش تلاش می‌گردد تا به توصیف تعدادی از تحقیقات کار شده به

---

<sup>54</sup> . T. Hagishita, M. Ohsaki

وسیله سایر پژوهشگران پرداخته شود. در این بند به بازبینی تعدادی تحقیقات انجام پذیرفته حول بحث پژوهش پرداخته شده است.

امروزه نگاه به کمینه سازی وزن سازه یکی از اهداف مهم طراحی سازه ها می باشد که می تواند در کاهش وزن موثر لرزه ای سازه و افزایش بهره وری آن و نیز کاهش هزینه های ساخت و اقتصادی بودن سازه ها، اثرگذار باشد. لذا کمینه سازی وزن در طراحی سازه ها می بایست مورد توجه جدی جوامع مهندسی قرار گیرد و این موضوع، ضرورت طراحی بهینه سازه ها را تبیین می نماید. دستیابی به این هدف، از طریق الگوریتم های بهینه سازی مختلف میسر می باشد که برخی از این الگوریتم ها، با توجه به زمان بر نبودن و کاهش هزینه های محاسباتی و ساده بودن درک آن برای مهندسان، می توانند نقش مهمی در طراحی بهینه سازه ها، ایفا نمایند. در پژوهش انجام شده توسط قاسمی و شهرکی و شرافت خواه، رویکردی برای طراحی بهینه سازه های بتن مسلح با سیستم مقاوم قاب خمشی به وسیله متد بهینه یابی ازدحام ذرات پیشنهاد شد که طراحی بهینه را بر مبنای ضوابط طراحی آیین نامه ای ایران، میسر می سازد. نتایج بدست آمده از این رویکرد، بیانگر موثر بودن رویکرد پیشنهادی در کاهش وزن و نیز هزینه ساخت سازه های مورد بررسی می باشد [۹].

از آنجا که تعیین شدت خسارت و آسیب وارد شده به سازه در بارهای لرزه ای از اهمیت بالایی برخوردار است، لذا پژوهش های فراوانی در این مورد هم صورت پذیرفته است. در مقاله قیاسی، ترک زاده یک روش تشخیص آسیب سه مرحله ای برای سازه های فضایی در مقیاس بزرگ با استفاده از الگوریتم بهینه سازی خفاش پیشرفته ارائه گردید. در این مقاله ابتدا ماتریس های سختی بر اساس روش کرون به دست می آیند. سپس از یک شاخص مبتنی بر انرژی کرنش مودال برای تعیین دقیق آسیب های احتمالی سازه استفاده می شود. در مرحله سوم نیز، شدت خسارت از طریق الگوریتم ذکر شده با استفاده از نتایج مرحله دوم برآورد می شود [۴۷].

در مقاله‌ای دیگر، کاوه و فرهودی بهینه‌سازی چیدمان مهاربندی در قابهای فلزی را با الگوریتم تکامل دیفرانسیل و پژواک دلفین معرفی نمودند. در این مطالعه، جزئیات بهینه‌سازی توپولوژی مهاربندهای هم مرکز به منظور یافتن راه حل‌های مهندسی برای طرح اقتصادی قاب‌های فولادی توسط دو الگوریتم فوق ذکر گردیده است. نتایج بهینه‌سازی با نتایج سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری از جمله الگوریتم ژنتیک، کلونی مورچه‌ها و بیگ بنگ - بیگ کرانچ مقایسه و ارائه شده است. در مجموع با توجه به نمودارهای همگرایی، این دو الگوریتم عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر الگوریتم‌ها ارائه دادند [۴۸].

در تحقیق حسانسبی بهینه‌یابی با الگوریتم‌های ازدحام ذرات، اجتماع مورچه‌ها و ژنتیک برای سازه‌های فلزی انجام پذیرفت. بعد از گرفتن پاسخ‌ها مشخص گردید که الگوریتم ازدحام ذرات پاسخ‌های قابل قبول‌تر و بهتری نسبت به دو الگوریتم دیگر دارد [۴۹].

در مقاله خیرالدین، عندلیب و بزاز یک سیستم مهاربندی جدید با استفاده از المان‌های حلقوی یا دیافراگم دایره‌ای در مقابل سیستم دیگری که فاقد این دیافراگم بود مورد بررسی قرار پذیرفت. هدف نیز تعویض المانهای آسیب دیده بادبندی بدون تعمیرات اساسی در ساختمان بود. نتایج نشان داد که استفاده از دیافراگم حلقوی عملکرد بهتری در نیل به اهداف تحقیق دارد [۵۰].

فرآیند شناسایی اعضای آسیب دیده یکی از مهمترین و ضروری ترین بخش‌های نگهداری و ترمیم ساختمان‌ها است. کومار و همکاران نیز با متد تلفیق داده‌های بیزین همراه با الگوریتم بهینه‌یابی مبتنی بر آموزش و یادگیری و با هدف پایش سلامت و تشخیص آسیب در ساختمان‌ها، خرپاها و سازه‌های سه بعدی ثابت کردند رویکرد این روش برای اهداف این تحقیق بسیار قوی می‌باشد [۵۱].

شناسایی مکان و ابعاد آسیب لرزه‌ای یکی از مهمترین راه‌های حفظ ساختار کلی ساختمان است. نبوی و غلامپور با الگوریتم بهینه‌یابی ملخ و با هدف شناسایی محل و شدت خرابی ثابت کردند این الگوریتم از عملکرد بالایی در این زمینه برخوردار است. تابع هدف در بهینه‌سازی تحقیق با استفاده از شتاب‌های ساختاری آسیب دیده و شتاب‌های تحلیلی به دست آمده از یک مدل تحلیلی تعریف شده است [۵۲].

عندلیب، بزاز و خیرالدین نیز برای شکل‌پذیری و اتلاف انرژی در بادبندهای هم مرکز از حلقه‌های فلزی در محل تقاطع این بادبندها استفاده کردند. شکل‌پذیری و عملکرد حلقه‌های فولادی ساخته شده از صفحات فلزی (سه حلقه فولادی ساخته شده از دو نیم حلقه) در این مقاله بررسی گردید و نتایج نشان داد که نوع اتصال بر عملکرد حلقه تاثیر بسزایی دارد [۵۳].

در تحقیقی هایالیوژلو با استفاده از الگوریتم بهینه‌یابی ژنتیک و با هدف طراحی سازه‌های فلزی شبه صلب برای کم کردن مخارج ساخت، دو روش طراحی تنش مجاز و طراحی بر اساس بار و مقاومت را بررسی کرد. نتایج نشان داد که به کارگیری الگوریتم ژنتیک به همراه روش طراحی بار و مقاومت حدود هشت درصد ساختمانهای فلزی را بهینه‌تر طراحی می‌نماید [۵۴].

یکی دیگر از الگوریتم‌های جدید بهینه‌سازی، الگوریتم ازدحام توسعه یافته با رفتار کوانتومی می‌باشد. طلعت اهری و عزیزی، مقاله‌ای برای بهینه‌سازی ساختمان‌ها (با اندازه واقعی) و با این الگوریتم ارائه داده‌اند. در این مقاله محاسبات کوانتومی به الگوریتم بهینه ساز ازدحام توسعه یافته استاندارد وارد شده است. در این روش، فرآیند به‌روزرسانی موقعیت برای عوامل جستجو با استفاده همزمان از بهترین موقعیت تاکنون همه ذرات، مرکز جرم همه ذرات، بهترین موقعیت تا کنون هر ذره و میانگین بهترین موقعیت همه ذرات انجام می‌شود. در این مقاله ۳ سازه ساختمانی با اندازه واقعی در نظر گرفته شده و مورد بهینه‌سازی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی نسبت به سایر الگوریتم‌ها جواب بهتری را ارائه می‌نماید [۵۵].

دیگر الگوریتم نوین بهینه‌سازی الگوریتم دینامیک (پویا) حشره آبیگر برکه می‌باشد که کاوه، اسلاملو و خدادادی از این الگوریتم برای بهینه‌سازی سازه‌های اسکلتی در مقاله خود استفاده کردند. این الگوریتم از طبیعت الهام گرفته شده است و مکانیسم های تغذیه، رفتار سرزمینی و جانشینی در حشرات آبی را تقلید می‌کند. کارایی این الگوریتم با بهینه‌سازی سازه‌های خرپا و قاب‌های مختلف تحت شرایط بارگذاری متنوع و محدودیت های متعدد مورد آزمایش قرار گرفت. با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده توسط این الگوریتم و سایر

روش‌ها مشخص می‌شود که الگوریتم فوق یک تکنیک مناسب برای بهینه‌سازی طراحی سازه و به حداقل رساندن وزن سازه‌ها می‌باشد [۵۶].

مدل‌های گوناگونی برای رسیدن به جواب در مسئله‌های بهینه‌یابی وجود دارد، اما با وجود توابع غیرخطی و بزرگ شدن موضوع در مسئله بهینه‌یابی مدل‌های ریاضیات فاقد توانایی برای حل مسئله می‌شوند. به طور کلی مقدار مدل‌هایی که ملاک‌های قابل قبول طراحی را برآورده می‌نمایند بسیار است اما تعیین یک مدل کم خرج در این زمان‌ها به آسانی مقدور نمی‌باشد. به همین علت الگوریتم‌های فراابتکاری در حال توسعه هستند. در مقاله حسنی مقدم و حنطه، تلاش شده تا به وسیله برنامه بهینه‌یابی ازدحام ذرات، به حل مساله بهینه‌سازی وزن قابهای فولادی پرداخته شود. در این بررسی، طرح بهینه ۲ سازه فلزی ۳ دهانه دو طبقه و پنج طبقه به وسیله برنامه بهینه‌یابی ازدحام ذرات انجام پذیرفته و پاسخ‌های طرح با پاسخ نرم‌افزار ایتبس قیاس شده است. جواب‌های این قیاس مشخص می‌نماید که مدل‌های منتج شده از برنامه بهینه‌یابی ازدحام ذرات بسیار کم هزینه‌تر از مدل‌های حاصل شده از نرم‌افزار ایتبس هستند [۱۰].

قابل ذکر است که ایران همواره در معرض خطر زمین لرزه قرار دارد و بنابراین طرح ساختمانها در مقابل بارهای زلزله ارزش بالایی دارد. البته همیشه پژوهشگران سعی میکنند عملکرد ساختمانها را در مقابل زلزله بشناسند. در مقاله شمس، سازه‌های فلزی بادبندی دو بعدی سه، پنج و هفت طبقه با شکل‌پذیری ویژه و قرار گرفته در ناحیه‌های زلزله خیز مورد بهینه‌یابی قرار گرفته‌اند. در آنالیز و محاسبات ابتدایی این سازه‌ها تلاش بر این بوده تا از ضابطه‌های استانداردهای بارگذاری و محاسبات سازه‌های فلزی سود برده شود. قابهای مورد مطالعه بر پایه استانداردهای رایج، طرح شده‌اند و با برنامه بهینه‌یابی مشخص گردیده در تحقیق در تراز ایمنی جانی، بهینه گردیده و همراه برنامه اپنسیس، تحت آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی به وسیله دو شتاب نگاشت با قدرت‌های مختلف قرار گرفتند. در خاتمه تحت یک بار لرزه‌ای تصنعی اندازه ماکزیمم تغییر طول کششی ایجاد شده در هر بادبند قاب بهینه شده با اندازه ماکزیمم ذکر گردیده در استاندارد برای بادبند در تراز خرابی سازه پایش می‌گردد و دوباره قاب بهینه شده با برنامه بهینه‌سازی قبلی، بهینه می‌گردد و اینگونه

کارایی چند هدفه لرزه‌ای قابها ضمانت می‌گردد. پاسخ‌ها حاوی آن است که فقط با ده تکرار برنامه بهینه‌یابی مشخص شده، علاوه بر بهتر شدن کارایی لرزه‌ای قابها، کم شدن وزن بادبندها و به تبع آن کاهش وزن همه قابها را شاهد خواهیم بود [۱۱].

در پژوهشی قادری و سلمانیان و قیامی باجگیرانی الگوریتم‌های گروه ذرات و گرگ خاکستری بهبود یافته، مقایسه گردیده است. یک راهکار جدید برای هر یک از الگوریتم‌ها ارایه و بررسی شد. نتایج حاکی از بهبود عملکرد راهکارهای پیشنهادی در هردو الگوریتم است. در این پژوهش الگوریتم گروه ذرات نسبت به الگوریتم گرگ خاکستری بهبود یافته نتایج بهتری ارایه داشته است [۱۲].

در تحقیقی دیگر متعلق به عسگری و سامی از الگوریتم سنجاقک استفاده شده است. قابل ذکر است که سیستم مهاربندی واگرا، یکی از مهمترین اجزا مهاربند واگرا تیر پیوند است و با جذب و استهلاک انرژی مانع از وارد شدن آسیب به سایر قسمت‌های سازه می‌گردد. از اینرو پارامتر پراکندگی در پاسخ سازه با توجه به اینکه بر پارامترهای طول دهانه و طول تیر پیوند در مهاربند واگرا تاثیر می‌گذارد تاثیر به سزایی در تامین شکل‌پذیری قابها مهاربندی شده دارد. روش پیشنهاد شده این مقاله بر روی دو قاب ۱۰ طبقه و ۱۶ طبقه اعمال شده است. از اینرو سه سناریو برای بهینه‌سازی، مورد استفاده قرار گرفت که عبارتند از: فقط مینیمم کردن وزن، فقط مینیمم کردن جابجایی، مینیمم کردن وزن و جابجایی همزمان. هر سه سناریو به نوبه خود موجب بهینه‌سازی و مینیمم شدن تابع هدف می‌شوند. نتایج نشان دهنده آن است که بهینه‌سازی وزن و جابجایی نتایج بسیار مطلوبی بر آرایش بهینه مهاربند دارد [۱۳].

در سالهای پیشین برنامه‌های مختلفی برای بهینه‌یابی بادبندها به کار گرفته شده است که در بحث بهینه‌یابی ساختمان‌ها فوق العاده خوب بوده‌اند. طراحی بهینه ساختمانها عموماً از تعیین پارامترهای طراحی به نحوی حاصل می‌شوند که در وقتی که تابع هدف کمینه می‌گردد محدودیت‌های مشخصی نیز قانع شوند. یک برنامه بهینه‌یابی موثر دو نشانه دارد: توانمندی پیدا کردن نقاط بهینه کلی بی آنکه در نقاط بهینه محلی بیافتیم و دوم دارا بودن آنالیز مورد احتیاج با تعداد پایین‌تر در پروسه بهینه‌یابی. در پژوهشی انجام پذیرفته

بهینه‌ترین وضعیت بادبندهای ضربدری شکل در سازه‌های فلزی به وسیله برنامه بهینه‌یابی فراابتکاری خفاش حاصل شده است. این برنامه در سال ۲۰۱۰ میلادی به وسیله یانگ شناسانده شد که بر پایه رفتار جهت‌یابی صدای کم خفاش‌ها قرار دارد. خفاش‌ها می‌توانند در خاموشی محض به پیدا کردن طعمه خود بپردازند [۱۴]. یکی از پارامترهای تاثیر گذار مهم در طراحی لرزه‌ای سیستم‌های ساختمانی، عامل وزن می‌باشد که این عامل نقش مستقیمی بر عملکرد پارامترهای دیگر دارد. در حال حاضر محاسبین با نگرستن اثرات رد نکردنی وزن ساختمان و لزوم سبک سازی در پی یافتن راهی برای کاهش آن هستند. چنانچه بتوان وزن سازه را با حفظ پارامترهای مقاومت و عملکرد کاهش داد، این کاهش وزن بر جابجایی نیز تاثیر می‌گذارد که به تبع آن انرژی بیشتری جذب می‌کند که در نهایت خسارت وارده کم می‌شود و با اقلان اقتصاد، ایمنی و قابلیت اعتماد سازه افزایش می‌یابد. سیستم‌های مهاربندی یکی از سیستم‌های رایج باربر جانبی می‌باشند که به دلیل سازگاری این مهاربندها با شرایط و نیازهای معماری و در عین حال تامین سختی مناسب استفاده از این سیستم‌ها در ساختمان‌های بلند که استفاده از سیستم‌های سازه‌ای دیگر مقدور نیست روز به روز در حال افزایش است. در مقاله سامی و عسگری برای بررسی تاثیر تکیه‌گاه بر میزان جابجایی و وزن سازه و به تبع آن کاهش فولاد مصرفی، دو مدل ۱۰ و ۱۶ طبقه در نظر گرفته شده است، برای تعیین آرایش بهینه مهاربند نیز دو سناریو مطرح گردیده که در سناریو اول تکیه گاه‌های دو مدل به صورت مفصلی و در سناریو دوم تکیه گاه‌های مساله به صورت گیردار در نظر گرفته شده است. نتایج بدست آمده نشان دهنده آن است که تکیه گاه گیردار تاثیر بیشتری بر جواب مساله بهینه‌سازی که همان آرایش بهینه مهاربند برای رسیدن به وزن کمتر است را دارد [۱۵].

در مقاله مشارموحد و محرمی معیار بهینگی جهت طراحی بهینه وزن سازه‌های قاب خمشی دو بعدی در نظر گرفته شده و کارایی این روش در مقابل روش‌های فراابتکاری نشان داده شده است. این مهم از طریق بررسی و مقایسه نتایج به دست آمده از روش معیار بهینگی با نتایج حاصل از الگوریتم‌های ژنتیک و کلونی مورچه در مراجع مختلف به دست آمده است [۱۶].

در همه علوم‌های فنی و مهندسی، بهینه‌یابی نقش مهمی را بازی می‌کند. در پژوهش ابراهیمی و سیدپور قاب‌های سه بعدی به وسیله برنامه تکامل تفاضلی مورد بهینه‌یابی قرار گرفته‌اند. برنامه تکامل تفاضلی یک برنامه بهینه‌یابی اتفاقی بر پایه توده جمعیت می‌باشد و از جمله الگوریتم‌های فرا اکتشافی به حساب می‌آید. برای بررسی عملکرد الگوریتم تکامل تفاضلی سه مثال مورد بررسی قرار گرفته شده و با نتایج حاصل از تحقیقات گذشته مقایسه شده است؛ با مقایسه این نتایج، کارایی و موثر بودن این الگوریتم در حل مسایل بهینه‌سازی نشان داده شده است [۱۷].

در چند دهه اخیر استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی سازه‌ها مورد توجه بسیاری بوده و سازه‌های فولادی و بتنی با هدف بهینه‌سازی وزن مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در مقاله محمدی فرسام و عدل پرور و محمودآبادی تابع هدف وزن سازه بوده که در رابطه مستقیم با هزینه آن قرار دارد. مدل‌های طراحی به صورت مجزا بهینه شده و با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک و با روش طراحی LRFD مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. مقاطع المان‌ها همچون متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده‌اند و محدودیت‌های آیین‌نامه مبحث دهم به صورت قیود طراحی در نظر گرفته شده‌اند. در نهایت نمودارهای مربوط به الگوریتم ژنتیک و میزان تنش‌های بدست آمده نتایج مطلوبی را نشان می‌دهد [۱۸].

در کنار سازه‌های فلزی، ساختمانهای بتن‌آرمه در ساختار ساختمان‌سازی ایران از مقام مهمی برخوردار هستند. برای بهسازی تعدادی از سازه‌های بتن‌آرمه ساخته شده از بادبندهای فلزی با اتصال ساده به سازه بتن آرمه استفاده می‌گردد. به کارگیری بادبندهای فولادی برای بهسازی ساختمانهای بتنی، به خاطر برتری‌های فنی و اقتصادی این سبک، با ارزش و قابل توجه می‌باشد. در مقاله حیدری و حاجتی مدارایی و مدندوست تعدادی سازه مفروض به عنوان مرجع با پلان ثابت  $16 \times 16$  متر و سه تیپ تعداد طبقات پنج، ده و پانزده سقف در نظر گرفته شده‌اند که با استفاده از پنج نوع از انواع مهاربندهای مرسوم و با کمک تجزیه و تحلیل‌های مورد نیاز سعی شده بهترین نوع مهاربند، تعداد بهینه دهانه‌های مهاربندی و همچنین چیدمان بهینه این مهاربندی‌ها تعیین شود. پارامترهای مورد بررسی تحقیق حاضر شامل تغییر مکان تراز بالای

ساختمان، تغییرات در مقدار برش پایه، تاثیر افزایش وزن ناشی از مهاربندها در عملکرد سازه ها و تغییرمکان نسبی (بین طبقات) سازه ها می باشند. کلیه تحلیل ها به وسیله برنامه ایتبس انجام شده است. ملاحظه شد که استفاده از مهاربند فولادی در قاب بتنی موجب افزایش سختی جانبی قاب بتنی می گردد در این مطالعه مهاربند ضربدری شکل بازدهی بالاتری تا معادل ۵۰٪ داشته است. همچنین وزن اضافی ناشی از افزودن مهاربندها به سازه در مقایسه با وزن کلی سازه مقدار بسیار ناچیزی است که حدوداً ۴٪ افزایش وزن نسبت به سایر مهاربندهای مورد بررسی در آن مشاهده شده است [۱۹].

به کارگیری بهینه مواد و مصالح در احداث ساختمان ها به عنوان یک ایده مهم در طراحی هر ساختمان لحاظ می شود. با توجه به اینکه احداث ساختمانها برای پیمانکاران مخارج زیادی دارد بنابراین نظر محاسین به طرف انتخاب هایی می رود که از نظر فنی و هزینه ای قابل توجیه بوده و ضمناً تمام هدف های از قبل مشخص شده ساختمان را نیز برآورده کند. بدین وسیله در تحقیق اسدیان و صبوری، بهینه یابی ساختمان های با رفتار خمشی فلزی ۳، ۶ و ۹ طبقه برای کم کردن وزن ساختمان که ملاکی از مخارج احداث آن است، با در نظر گرفتن ضوابط در استانداردها و قیدهای مقاومتی ساختمان مقابل بار جانبی، مطالعه گردیده است. با توجه به اینکه برنامه و الگوریتم های قدیمی، به گونه قاطع نمی توانستند پاسخ بهینه را در پهنه جستجو بیابند. در این تحقیق از شماری الگوریتم و برنامه های فراابتکاری برای بهینه یابی استفاده شد، که این برنامه ها شامل الگوریتم های جستجو گرانشی، ژنتیک و ازدحام ذرات بودند. برای قیاس موشکافانه و درستی کارکرد برنامه های مشخص گردیده، پاسخ های به دست آمده از این الگوریتم ها از نظر مدت زمان کارکرد، پاسخ بهینه داده شده و تعدد تکرارها مقایسه شده اند [۲۰].

در مقاله قیاسی و همکاران به صورت خاص، تشخیص محل و شدت خرابی در سازه ها با استفاده از الگوریتم های مختلف بهینه سازی و تغییرات انرژی کرنشی مودال المان های سازه بررسی شده است. الگوریتم های بررسی شده در این پژوهش شامل الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO)، جستجو هارمونی (HS)، الگوریتم جستجو فاخته (CS) و الگوریتم جستجو گرانشی (GSA) می باشد. معمولاً خرابی موجب

کاهش سختی سازه و در نتیجه تغییر خصوصیات مودال سازه می‌شود. در این مطالعه، با استفاده از تغییرات انرژی کرنشی مودال المان، اندیس خرابی هر المان بدست آمده، محل و شدت خرابی تعیین می‌شود. محاسبه این تغییرات تنها به چند مود شکل اندازه گیری شده و ماتریس سختی المان نیاز دارد. اختلاف بین اندیس خرابی سازه خراب واقعی و مدل شده به عنوان تابع هدف به کار گرفته شده است. این روش بر روی سازه خرابی به صورت عددی پیاده سازی شده است. نتایج روش پیشنهادی نشان می‌دهد که این مدل‌ها به گونه عالی و با دقت خوبی مکان و مقدار آسیب را در ساختمان تعیین می‌کنند. با این وجود بین الگوریتم‌های مطرح شده الگوریتم CS قابلیت بهتری در جستجو فضا مسئله داشته و در نتیجه دقت بالاتری در تشخیص خرابی در سازه‌ها دارد [۲۱].

نهایتاً به عنوان خاتمه بررسی مطالعات پیشین در مورد سیستم مهاربندی بهینه می‌توان گفت که یکی از موارد مهم در تمامی پروژه‌های مهندسی کاهش هزینه‌ها است. این موضوع به فاکتورهای زیادی وابسته است که در روند مطالعات و طراحی و اجرای پروژه‌ها که توسط عوامل پروژه صورت می‌گیرد بایستی مورد توجه قرار گیرد. در پژوهش محمدی و امامی کورنده و شفیعی سرتشتیزی، تمرکز اصلی بر روی انتخاب سیستم بهینه مهاربندی در ساختمان‌های فلزی کوتاه، متوسط، بلند مرتبه و اصلاح مهاربندها و اتصالات آنها با هدف افزایش شکل‌پذیری و بررسی تأثیر آن بر بهینه شدن طرح سازه‌ها است که با استفاده از نرم‌افزارهایی چون ETABS, SAFE, PLAXIS2D, PLAXIS 3D FOUNDATION محقق گردیده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که استفاده از روش‌هایی چون پراکنده نمودن مهاربندها در ارتفاع قاب و عدم تمرکز آنها در چند دهانه و استفاده از فیوزهای ارتباطی به منظور کنترل محل خرابی سیستم مهاربندی و طول مناسب تیر پیوند نه به لحاظ پژوهشی صرف بلکه به لحاظ عملی در طراحی‌ها منجر به کاهش چشمگیر هزینه‌های پروژه می‌گردد. به این منظور ۳ قاب فولادی مهاربندی شده به قرار ۳ و ۷ و ۱۰ طبقه با اشکال مهاربندی مختلف هم محور و برون محور فرض گردیده و نوع مهاربند بهینه در هر حالت براساس تحلیل نرم‌افزاری مشخص می‌شود. این نتایج در قالب جداول و نمودارهای ۱ الی ۶ در ذیل اشاره شده است [۲۲].

جدول (۱-۲): قاب سه طبقه با مهاربند هم محور [۲۲]

| شماره حالت | تیپ خاک براساس آیین نامه ۲۸۰۰ | سیستم لرزه بر جانبی |
|------------|-------------------------------|---------------------|
| ۱          | II , I                        | مهاربند ضربدری      |
| ۲          | III , IV                      | مهاربند ضربدری      |
| ۳          | I , II                        | مهاربند قطری        |
| ۴          | III , IV                      | مهاربند قطری        |
| ۵          | I , II                        | مهاربند هفتی        |
| ۶          | III , IV                      | مهاربند هفتی        |
| ۷          | I , II                        | مهاربند هشتی        |
| ۸          | III , IV                      | مهاربند هشتی        |

جدول (۲-۲): قاب سه طبقه با مهاربند برون محور [۲۲]

| شماره حالت | تیپ خاک براساس آیین نامه ۲۸۰۰ | سیستم لرزه بر جانبی    |
|------------|-------------------------------|------------------------|
| ۱          | I , II                        | مهاربند قطری برون محور |
| ۲          | III , IV                      | مهاربند قطری برون محور |
| ۳          | I , II                        | مهاربند هفتی برون محور |
| ۴          | III , IV                      | مهاربند هفتی برون محور |
| ۵          | I , II                        | مهاربند هشتی برون محور |
| ۶          | III , IV                      | مهاربند هشتی برون محور |

جدول (۳-۲): قاب هفت طبقه با مهاربند هم محور [۲۲]

| شماره حالت | تیپ خاک براساس آیین نامه ۲۸۰۰ | سیستم لرزه بر جانبی |
|------------|-------------------------------|---------------------|
| ۱          | I                             | مهاربند ضربدری      |
| ۲          | II                            | مهاربند ضربدری      |
| ۳          | III , IV                      | مهاربند ضربدری      |
| ۴          | I                             | مهاربند قطری        |
| ۵          | II                            | مهاربند قطری        |
| ۶          | III , IV                      | مهاربند قطری        |
| ۷          | I                             | مهاربند هفتی        |
| ۸          | II                            | مهاربند هفتی        |
| ۹          | III , IV                      | مهاربند هفتی        |
| ۱۰         | I                             | مهاربند هشتی        |
| ۱۱         | II                            | مهاربند هشتی        |
| ۱۲         | III , IV                      | مهاربند هشتی        |

جدول (۲-۴): قاب هفت طبقه با مهاربند برون محور [۲۲]

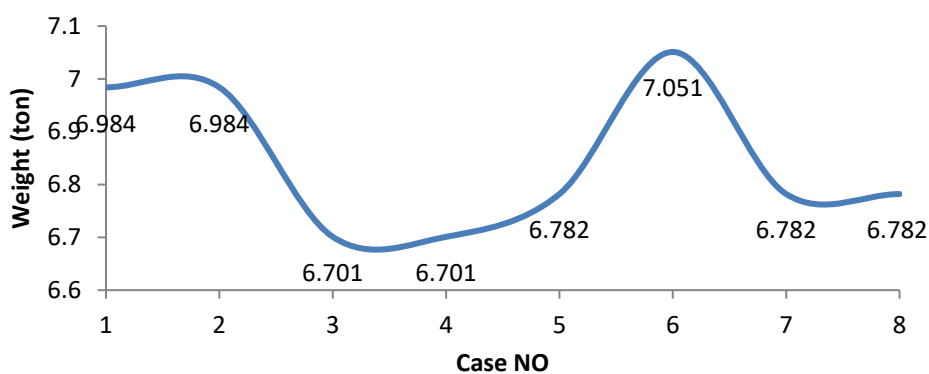
| شماره حالت | تیپ خاک براساس آیین نامه ۲۸۰۰ | سیستم لرزه بر جانبی |
|------------|-------------------------------|---------------------|
| ۱          | I                             | مهاربند قطری        |
| ۲          | II                            | مهاربند قطری        |
| ۳          | III , IV                      | مهاربند قطری        |
| ۴          | I                             | مهاربند هفتی        |
| ۵          | II                            | مهاربند هفتی        |
| ۶          | III , IV                      | مهاربند هفتی        |
| ۷          | I                             | مهاربند هشتی        |
| ۸          | II                            | مهاربند هشتی        |
| ۹          | III , IV                      | مهاربند هشتی        |

جدول (۲-۵): قاب ده طبقه با مهاربند هم محور [۲۲]

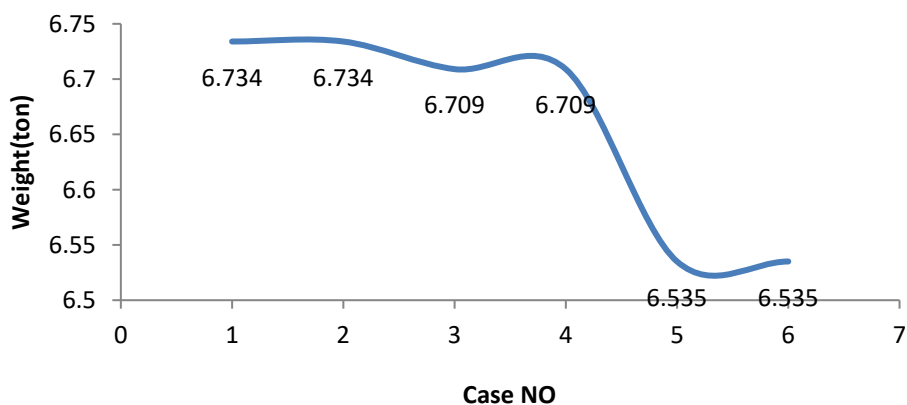
| شماره حالت | تیپ خاک براساس آیین نامه ۲۸۰۰ | سیستم لرزه بر جانبی |
|------------|-------------------------------|---------------------|
| ۱          | I                             | مهاربند ضربدری      |
| ۲          | II                            | مهاربند ضربدری      |
| ۳          | III , IV                      | مهاربند ضربدری      |
| ۴          | I                             | مهاربند قطری        |
| ۵          | II                            | مهاربند قطری        |
| ۶          | III , IV                      | مهاربند قطری        |
| ۷          | I                             | مهاربند هفتی        |
| ۸          | II                            | مهاربند هفتی        |
| ۹          | III , IV                      | مهاربند هفتی        |
| ۱۰         | I                             | مهاربند هشتی        |
| ۱۱         | II                            | مهاربند هشتی        |
| ۱۲         | III , IV                      | مهاربند هشتی        |

جدول (۲-۶): قاب ده طبقه با مهاربند برون محور [۲۲]

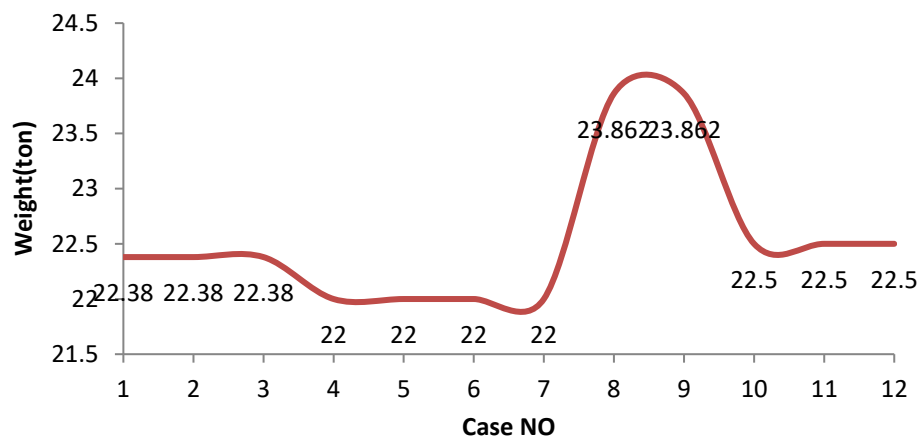
| شماره حالت | تیپ خاک براساس آیین نامه ۲۸۰۰ | سیستم لرزه بر جانبی |
|------------|-------------------------------|---------------------|
| ۱          | I                             | مهاربند قطری        |
| ۲          | II                            | مهاربند قطری        |
| ۳          | III , IV                      | مهاربند قطری        |
| ۴          | I                             | مهاربند هفتی        |
| ۵          | II                            | مهاربند هفتی        |
| ۶          | III , IV                      | مهاربند هفتی        |
| ۷          | I                             | مهاربند هشتی        |
| ۸          | II                            | مهاربند هشتی        |
| ۹          | III , IV                      | مهاربند هشتی        |



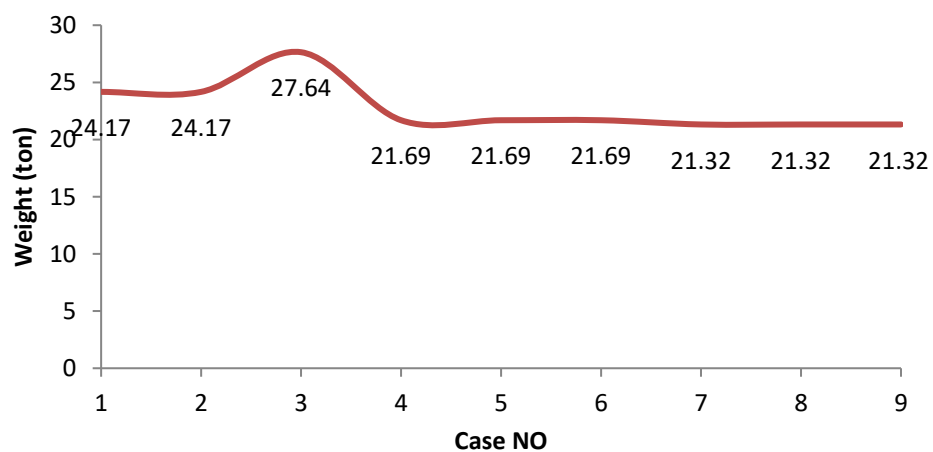
نمودار (۲-۱): مقایسه وزن قاب ۳ طبقه با مهاربند هم محور در حالات مختلف جدول (۲-۱) [۲۲]



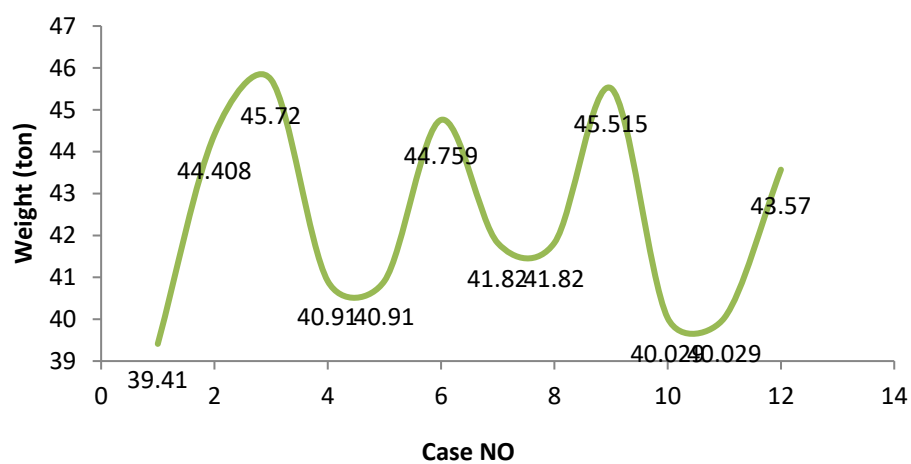
نمودار (۲-۲): مقایسه وزن قاب ۳ طبقه با مهاربند برون محور در حالات مختلف جدول (۲-۲) [۲۲]



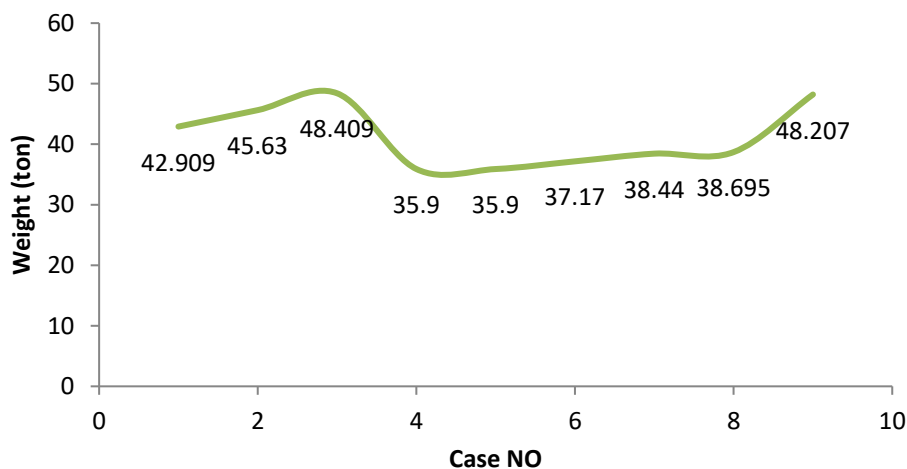
نمودار (۳-۲): مقایسه وزن قاب ۷ طبقه با مهاربند هم محور در حالات مختلف جدول (۳-۲) [۲۲]



نمودار (۴-۲): مقایسه وزن قاب ۷ طبقه با مهاربند برون محور در حالات مختلف جدول (۴-۲) [۲۲]



نمودار (۵-۲): مقایسه وزن قاب ۱۰ طبقه با مهاربند هم محور در حالات مختلف جدول (۵-۲) [۲۲]



نمودار (۶-۲): مقایسه وزن قاب ۱۰ طبقه با مهاربند برون محور در حالات مختلف جدول (۶-۲) [۲۲]

براساس این پژوهش، نتایج طرح بهینه سیستم مهاربند براساس حداقل وزن قابها به صورت زیر است:

- برای قاب ۳ طبقه با مهاربند هم محور مهاربند قطری بهینه‌ترین است.
- برای قاب ۳ طبقه با مهاربند برون محور مهاربند هشتی بهینه‌ترین است.
- برای قاب ۷ طبقه با مهاربند هم محور مهاربند قطری بهینه‌ترین است.
- برای قاب ۷ طبقه با مهاربند برون محور مهاربند هشتی بهینه‌ترین است.
- برای قاب ۱۰ طبقه با مهاربند هم محور مهاربند ضربدری بهینه‌ترین است.
- برای قاب ۱۰ طبقه با مهاربند برون محور مهاربند هفتی بهینه‌ترین است.

## ۶-۲ بهینه‌سازی قاب تحت قید فرکانس و مروری بر تحقیقات انجام

### شده در این زمینه

در مسئله‌های بهینه‌یابی که محدودیت مربوط به فرکانس اضافه بر تاثیر مهم الگوریتم بهینه‌یابی لحاظ گردیده است، مدل گرفتن جواب از مسئله که در حقیقت فرکانس است بسیار مهم می‌باشد. چون که مقدار دقت جوابها اثر زیادی در اوزان بهینه گردیده در سازه‌ها دارد. بعلاوه به خاطر زیاد بودن و تعدد

تکرارهای آنالیز شتاب و سرعت این برنامه‌ها برای گرفتن جواب‌ها بسیار مهم است. به گونه نمونه ساختاری که آماده می‌باشد برای قید فرکانس بهینه گردد و قضیه بهینه‌یابی آن جمعیتی مساوی چهل و تکرار مساوی دویست دارا باشد می‌باید هشت هزار آنالیز اجرا گردد تا به جواب قابل قبول برسیم، حالا اگر هر آنالیز به مقدار ۱ ثانیه تندتر به پایان برسد، مدت زمان کارکرد حدوداً دو ساعت کمتر می‌شود. در ضمن بیشتر پژوهشگرانی که محدودیت (قید) فرکانس را بر ساختمان به کار گرفته‌اند سازه‌های آسانی را برای آنالیز برگزیده‌اند تا آنالیز سریعتر پایان یابد و تعدد آنالیزهای مورد احتیاج را کمتر کنند. این امر باعث می‌شود پاسخ‌هایی جامع و قابل قبول در ساختمان به دست نیاید. در این پژوهش برای گرفتن جواب غیرالاستیک، فرکانس ساختمان از برنامه اپنسیس به دست آمده است تا بتواند آنالیز ساختمان را در امر بهینه‌یابی انجام بدهد. این نرم‌افزار با دقت و سرعت خود قادر خواهد بود به شکلی عالی هدف‌های مسئله‌های بهینه‌یابی را دقیقتر و در مدت کوتاه‌تر به انجام برساند.

در پژوهش بغلانی و دهقان و ابراهیمی توانی، طرح بهینه وزنی برای سازه‌ها تحت چند قید فرکانس و همچنین قید جابجایی ارایه شده است. نتیجه نشان داد که محدودیت‌های فرکانسی خطی نمی‌باشد و در مقابل متغیرهای طراحی به فرم ضمنی می‌باشند و البته غیر محدب. بهینه‌یابی توسط یک الگوریتم فراکاوشی انجام می‌شود که متغیرهای گسسته دارد. برخورد اجسام بهبود یافته<sup>۵۵</sup> به عنوان الگوریتم بهینه‌یابی در این پژوهش انتخاب شده است. برنامه سپ یک برنامه تحلیل و طراحی مناسب در علم مهندسی می‌باشد که در بین محاسبین ساختمان علاقه‌مندان بسیاری دارد. از برنامه سپ برای تحلیل و از برنامه متلب برای بهینه‌یابی، در این تحقیق استفاده شده است. در این پژوهش دو قاب دو بعدی مهاربندی تحت قید فرکانس و جابه‌جایی بهینه شده و نتایج با تحقیقات گذشته مقایسه گردیده است. نتایج وزن‌های سازه بهینه شده کمتر و همگرایی بهتر و همچنین ارضای بهتر قیود را نشان داد[۵].

در زمینه بهینه‌یابی ساختمانهای فلزی تحت قید فرکانس، پژوهشهای زیادی صورت پذیرفته است

که از بین این پژوهشها می‌شود به تحقیق‌های مکی و فان که در زمینه بهینه‌یابی سازه‌های فلزی با استفاده از روش معیار بهینگی<sup>۵۶</sup> کار کرده‌اند، اشاره نمود [۵۷].

علاوه بر این در بحث مربوط به فرکانس پژوهش‌های زیادی توسط قلی‌زاده، سلاجقه و ترک‌زاده صورت پذیرفته است [۵۸] که در زمینه بهینه‌یابی قابهای خرابی تحت قید فرکانس با برنامه بهینه‌یابی ژنتیک و همچنین به کارگیری شبکه‌های عصبی می‌باشند.

البته الگوریتم‌های فراکاوشی در بهینه‌یابی سازه‌ها با قید فرکانس نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. لینگن و همکاران با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهبود یافته، طرح بهینه‌ای برای خرپا تحت قید فرکانس ارائه دادند [۵۹]. سلاجقه و همکاران برای یافتن وزن بهینه سازه تحت قید فرکانس از الگوریتم ژنتیک و شبکه‌های عصبی استفاده کردند. [۵۸] ژو و همکاران نیز در مقاله‌ای برای قید فرکانس نشان دادند که با توجه به ماهیت دینامیکی این قید، الگوریتم ژنتیک نسبت به روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی دارای اولویت می‌باشد، در حالیکه این الگوریتم به زمان محاسباتی بیشتر و تحلیل‌های مجدد مقادیر ویژه نیاز دارد. این مقاله از روش‌های تحلیل مجدد مقادیر ویژه در الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی استفاده می‌کند [۶۰].

محققان ونکایات و گراندی یک برنامه بهینه‌یابی برای طرح ساختمان‌ها با حداقل وزن محتمل تحت چند محدودیت فرکانس معرفی کردند. تاثیر این برنامه با طرح شماری قاب خرابی با ۴۹۰ پارامتر مشخص گردیده است. برنامه در همه حالات خیلی عالی عمل نمود و طرح بهینه با حدوداً بیست تکرار به دست آمد. علاوه بر این گراندی فرم‌های گوناگون توضیح بهینه‌یابی فرکانس را ارائه نمود و سنجش تحلیل حساسیت به ویژه برای بردارهای ویژه تکراری را مورد ارزیابی قرار داد، او ارزیابی‌های قیده‌ای به کار رفته، به ویژه محدودیت (قید) فرکانس را ارائه نمود و برنامه‌های به کار رفته در محاسبه این تیپ مسئله‌ها را بیان کرد [۶۱].

در مقاله‌ای دیگر لی با الگوریتم کرم شبتاب هیبریدی تکاملی و قید فرکانس، شکل و اندازه‌های

---

<sup>56</sup> . Optimality Criterion Method

مقطع خریاها را بهینه‌سازی کرد. این الگوریتم ترکیبی از الگوریتم تفاضلی و الگوریتم کرم شب‌تاب است. نتایج نشان داد که با این الگوریتم همگرایی به طور قابل توجهی بهبود یافته و دقت حل مساله افزایش می‌یابد. شش خریا برای اعتبار این الگوریتم بررسی شده است [۶۲].

## ۷-۲ جمع‌بندی

با وجود تحقیقات ذکر شده در این فصل و کوشش‌هایی که در سالیان گذشته به منظور بهتر شدن کارایی الگوریتم و برنامه‌های فراابتکاری انجام گردیده است، باز هم مشکلات بنیادی‌ای به آنها وارد می‌باشد. نخستین مشکل مهم در مسئله‌های سازه‌های معمولی، زمان زیاد برای اجرای این برنامه‌ها است. برای نمونه در برنامه ژنتیک شمار مورد نیاز نسل‌ها جهت همگرا شدن عموماً بسیار می‌باشد و برای هر نسل شمار بسیاری کروموزوم باید آنالیز گردد. روش پردازش موازی گونه‌ای از متدهای مرسوم است که می‌تواند مشکل ذکر گردیده را برطرف نماید. تا به امروز تحقیقاتی که در مورد مبحث موازی‌سازی در الگوریتم و برنامه‌های فراابتکاری انجام گرفته است حول دو مورد ذیل می‌باشد: اول: موازی‌سازی جزیره‌ای [۶۳] و دوم: موازی-سازی مستقیم [۶۴].

در مورد اول (مبنای این پژوهش)، ابتدا جمعیت ابتدایی به چند زیرجمعیت تبدیل گشته و هر یک از بخش‌ها به وسیله یک پردازنده به طور جداگانه بهینه‌یابی می‌گردد. مورد دوم هم که به مدل ارباب-برده معروف است، دارای یک پردازنده عمده و  $n-1$  پردازنده فرعی است. این پردازنده‌ها به شکل موازی و جداگانه کار خود را انجام می‌دهند و پاسخ‌ها را به پردازنده اصلی می‌فرستند.

قابل ذکر است که در فصل سوم انگیزه اصلی ارائه این رساله که همان ابداع روشی نوآورانه مبتنی بر الگو پردازش موازی (روش جزیره‌ای و با چندین الگوریتم فراابتکاری) است شرح داده می‌شود. در این متد طرح بهینه عمومی بدون وجود مشکلات مرسوم که در زمینه بهینه‌یابی الگوریتم‌های تک فراابتکاری است حاصل می‌گردد.

## فصل سوم: مبانی نظری، روش و راهکار انجام پژوهش

## ۳-۱ مقدمه

احتیاج مهندسين به دانش بهينه‌سازي باعث به وجود آمدن پژوهش‌های بسياری در سال‌های پيشين در جهت پيشرفت برنامه‌های بهينه‌سازي در عرصه‌های گوناگون شده است. الگوريتم‌های فراابتکاري هم هماهنگ با استفاده‌های متنوع، از اين قانون جدا نبوده و جديداً پژوهش‌های گوناگونی برای پيشرفت و بسط دادن الگوريتم‌های فراابتکاري به وسيله پژوهشگران دانش بهينه‌سازي معرفي گرديده است. پيشرفت در بهتر شدن پاسخ‌ها، زياد شدن شتاب در محاسبه‌ها و افزايش به کارگيري هر برنامه جزء هدف‌های پژوهشگران در پژوهش‌های خود برای الگوريتم و برنامه‌های فراابتکاري بوده است و تا به اين تاريخ نيز دنبال شده است. در اين جهت قالب‌های گوناگونی برای الگوريتم و برنامه‌های حاضر و توصيه‌های مختلفی برای پيشرفت الگوريتم‌های فراابتکاري بيان شده است. ولی مورد قابل توجه و يکسان بين فعاليت‌های اکثر پژوهشگران دانش بهينه‌سازي زياد گرديدن عملکرد هر برنامه برای به دست آوردن جواب مناسب در فاصله زمانی قابل قبول می‌باشد. اين ضابطه از برترين عامل‌ها برای قياس عملکردی اندیشه‌های معرفي شده در بهتر شدن و عرضه الگوريتم و برنامه‌های فراابتکاري گوناگون است. قابل ذکر است پژوهش‌ها در بحث پيشرفت دانش بهينه‌سازي بر پایه برنامه‌های فراابتکاري در زمينه‌های گوناگون هم اکنون نيز دنبال می‌شود و روش‌ها و قالب‌های گوناگونی به وسيله پژوهشگران متعدد بر اساس ایده پاسخ قابل قبول در مدت کوتاه به نفع هر الگوريتم بيان می‌گردد.

بنابراين در پژوهش ارائه شده طی پروسه‌ای مشخص و با الگوريتمی معين، شيوه عمل‌های جديد و توصيه‌های موثر در بحث پيشرفت الگوريتم و برنامه‌های فراابتکاري بيان گرديده است. به اين قصد اول به مطالعه بعد‌های گوناگون تعدادی از مرسوم‌ترین الگوريتم و برنامه‌های فراابتکاري در بحث بهينه‌سازي توجه شده است. در اين قسمت تلاش شده قالب‌های هر برنامه و عملکرد الگوريتم آن بررسی شود و نگاه بازتری برای الگوريتم معرفي شده بيان گردد. در گام دوم با معرفي تعدادی از مشکلات الگوريتم و برنامه‌های

فراابتکاری، مدل جدید کاوش چند منظوره که روشی موثر در گشتن پهنه طراحی است، بیان گردیده است. این شیوه، در تناسب با روش کاوش به منظور زیاد شدن عملکرد الگوریتم و برنامه‌های گوناگون فراابتکاری با قالب‌های مختلف تاثیرگذار می‌باشد. پس از آن برای پیشرفت مدل جستجو چند منظوره، الگوریتم جدید جستجو چندفراابتکاری بیان گردیده است. این مدل روشی خاص برای استفاده از برنامه‌های گوناگون فراابتکاری به شکل اجرای همزمان آنها در انجام پروسه بهینه‌سازی است. در گام انتهایی نیز مشخصا به فرمول بندی مساله بهینه‌سازی و تعریف پارامترهای موثر در این تحقیق از جمله قیود، تابع هدف و شبه هدف، روش تحلیل، بارگذاری، صحت‌سنجی و سایر جزئیات روش انجام این تحقیق به طور مفصل پرداخته شده است.

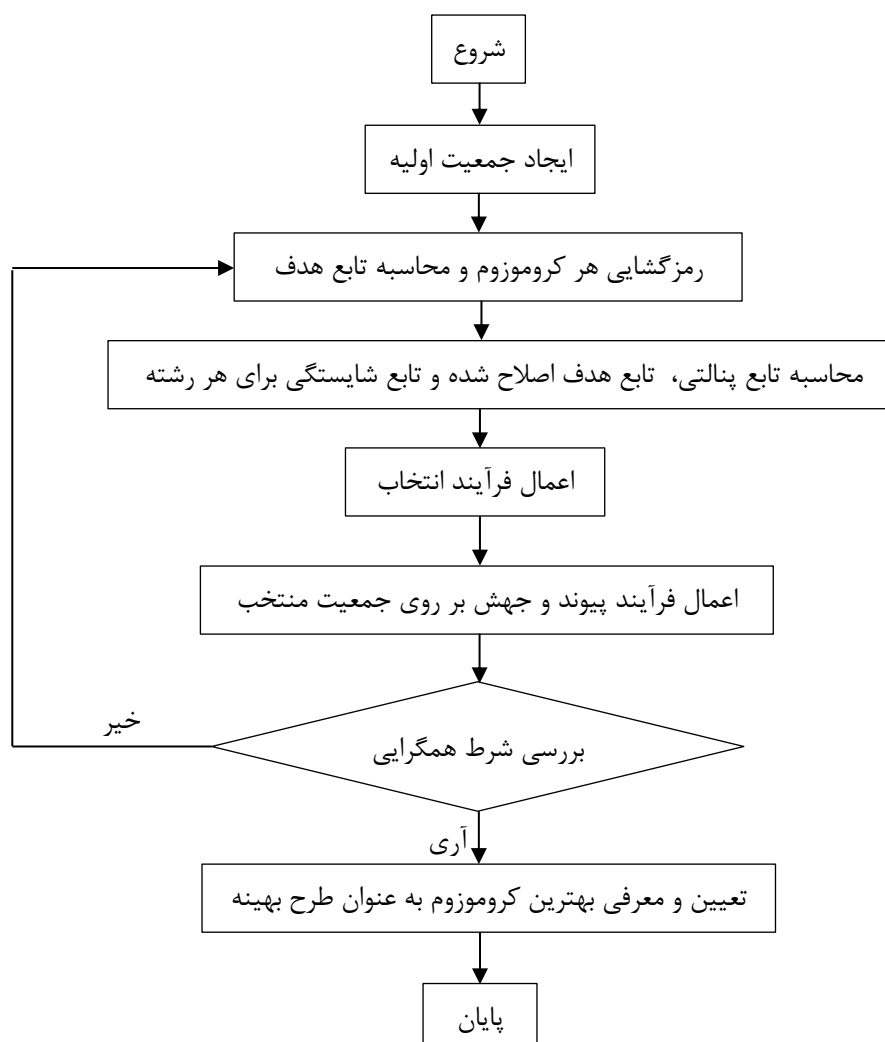
## ۳-۲ الگوریتم ژنتیک<sup>۵۷</sup> (GA)

الگوریتم ژنتیک (GA) یکی از روش‌های فراابتکاری است که از قوانین بیولوژیکی طبیعت پیروی می‌کند. این الگوریتم یک روش جستجو هوشمند است که براساس ساختار ژن‌ها و کروموزوم‌ها شکل گرفته است. GA نخستین بار توسط جان هولند در سال ۱۹۷۵ در دانشگاه میشیگان مطرح شد [۶۵] و پس از وی توسط جمعی از دانشجویانش مثل گلدبرگ توسعه یافت [۶۵]. از نخستین مقالات در زمینه بهینه‌یابی سیستم‌های سازه‌ای با استفاده از GA می‌توان به کارهای جنکینز [۶]، راجیو و کریشنامورتی [۶۶]، لین و هاجلا [۶۷] و گریسون و پک [۶۸] اشاره کرد. سپس بسیاری از محققین مقالات متنوعی درباره بسط دامنه کاربرد GA، بهبود نتایج و افزایش سرعت محاسبات در فرآیند طراحی بهینه سازه‌ها تا به امروز ارائه نمودند. الگوریتم ژنتیک براساس اصل ادامه حیات بهترین‌ها و تکثیر نوع برتر پی‌ریزی شده است. این روش هوشمند به طور موفقیت‌آمیزی طرح بهینه عمومی را بدون در نظر گرفتن فرضیات محدودکننده‌ای از قبیل پیوسته بودن فضای جستجو یا وجود مشتقات، پیدا می‌کند. الگوریتم GA در ابتدا با مجموعه‌ای از جوابهای تصادفی

---

<sup>57</sup> Genetic Algorithm

(رشته‌ها<sup>۵۸</sup>) که به آن جمعیت<sup>۵۹</sup> 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. فلوچارت شکل (۳-۱) چگونگی و ترتیب فرآیند بهینه‌یابی از طریق GA را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱): فرآیند بهینه‌یابی براساس روش GA [۶]

<sup>58</sup> Strings

<sup>59</sup> Population

همان‌طور که در شکل (۱-۳) 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<sup>۶۰</sup> می‌باشد. در این حالت هر رشته متشکل از یک سری بیت<sup>۶۱</sup>‌های دودویی است که در کنار یکدیگر چیده شده‌اند.

بنابراین برای تولید جمعیت اولیه در فرآیند بهینه‌یابی براساس GA، به تعداد زیررشته‌های<sup>۶۲</sup> متناظر با متغیر طراحی اعداد تصادفی دودویی تولید می‌شود [۶]. بدین ترتیب می‌توان به تعداد اعضای جمعیت، رشته‌های مختلفی تولید نمود. هر یک از رشته‌های حاصل، معادل طرحی در فضای جستجو<sup>۶۳</sup> و هر زیررشته در هر رشته بیانگر متغیر طراحی متناظر می‌باشند.

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

$$b_{LS-1} \cdots b_2 b_1 b_0 \Leftrightarrow IR_i = \sum_{j=0}^{LS-1} 2^j b_j \quad (1-3)$$

در رابطه (۱-۳)، هر بیت b می‌تواند اعداد صفر یا 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 {S} مربوط به ظرفیت گسسته متغیرهای طراحی ارتباط داده شود، از رابطه (۲-۳) استفاده خواهد شد.

$$IS_i = \text{Int} \left( IR_i * \frac{(NOS-1)}{(2^{LS}-1)} \right) + 1 ; 1 \leq IS_i \leq NOS ; 0 \leq IR_i \leq 2^{LS} - 1 \quad (2-3)$$

براساس رابطه (۲-۳) مقدار رمزگشایی شده هر زیررشته متناظر با یکی از اعضای مجموعه {S} قرار

می‌گیرد. با رمزگشایی هر رشته، مقدار تابع هدف اصلاح شده<sup>۶۴</sup> مبتنی بر تابع هدف و تابع جریمه<sup>۶۵</sup> برای هر

<sup>60</sup> Binary

<sup>61</sup> Bit

<sup>62</sup> Substring

<sup>63</sup> Search Space

<sup>64</sup> Modified Objective Function

<sup>65</sup> Penalty Function

رشته (طرح) قابل محاسبه است.

با محاسبه شایستگی اعضای جمعیت نوبت به اعمال فرآیند انتخاب<sup>۶۶</sup> برای تشکیل جمعیت والدین<sup>۶۷</sup> می‌رسد. روش‌های متنوعی برای انتخاب رشته‌های شایسته وجود دارد. اما هدف اصلی در همه آن‌ها انتخاب رشته‌هایی (طرح‌هایی) با میزان شایستگی بالا از جمعیت جاری و تکثیر<sup>۶۸</sup> آن‌ها، طی قرارگیری در مکانی به نام استخر تولیدمثل<sup>۶۹</sup> است. روش چرخ‌گردان<sup>۷۰</sup>، روش رتبه‌بندی<sup>۷۱</sup>، روش مسابقه‌ای<sup>۷۲</sup> از جمله روش‌های رایج در GA برای اعمال فرآیند انتخاب می‌باشد [۶۹، ۲۴]. 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<sup>۷۳</sup> همچون عملگر پیوند<sup>۷۴</sup>، عملگر جهش<sup>۷۵</sup> برای تولید جمعیت فرزندان<sup>۷۶</sup> می‌رسد. عملگر پیوند از رایج‌ترین اپراتورهای GA است. برای عملگر پیوند نیز راهکارهای متنوعی توسط محققین مختلف ارائه شده است. پیوند تک نقطه‌ای<sup>۷۷</sup>، پیوند دو نقطه‌ای<sup>۷۸</sup>، پیوند یکنواخت<sup>۷۹</sup> از راهکارهای مرسوم در GA برای اعمال فرآیند پیوند بر روی جمعیت والدین می‌باشد.

براساس عملگر پیوند با تخصیص نرخ پیوند<sup>۸۰</sup> ( $P_c$ ) رشته‌های واجد شرایط برگزیده می‌شوند. بدین منظور 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

---

<sup>66</sup> Selection  
<sup>67</sup> Parents  
<sup>68</sup> Reproduction  
<sup>69</sup> Mating Pool  
<sup>70</sup> Roulette Wheel  
<sup>71</sup> Rank  
<sup>72</sup> Tournament  
<sup>73</sup> Operator GA  
<sup>74</sup> Crossover  
<sup>75</sup> Mutation  
<sup>76</sup> Offspring  
<sup>77</sup> Single Sight Crossover  
<sup>78</sup> Two Point Crossover  
<sup>79</sup> Uniform Crossover  
<sup>80</sup> Crossover Rate

روش‌های عملگر پیوند، رشته‌های منتخب با یکدیگر ترکیب خواهند شد [۶۹،۲۴]. 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 محدوده فضای طراحی است. در فرآیند جهش بر اساس کدگذاری دودویی، با تخصیص نرخ جهش  $P_m$ <sup>۸۱</sup> 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. با اعمال عملگر جهش، جمعیت فرزندان برای نسل بعدی آماده خواهد شد. اما قبل از آن می‌بایست شرط خاتمه<sup>۸۲</sup> الگوریتم بررسی شود. روش‌های متنوعی برای شرط خاتمه در الگوریتم ژنتیک وجود دارد. مرسوم‌ترین حالت، کنترل تعداد مراحل نسل‌سازی می‌باشد.

## ۳-۲-۱ فرایند انتخاب

فرایند انتخاب از رایج‌ترین مراحل در بهینه‌یابی بر اساس GA می‌باشد. در این فرایند رشته‌های شایسته از میان جمعیت به عنوان والد انتخاب می‌شوند. هدف از این فرایند انتخاب بهترین رشته‌ها و تکثیر آنها طی قرارگیری در استخر تولید مثل می‌باشد. بر اساس فرایند انتخاب رشته‌های شایسته شانس بیشتری برای برگزیده شدن به عنوان والد دارند. اما روش‌های انتخاب به گونه‌ای است که بر اساس آنها احتمال انتخاب رشته‌هایی با شایستگی کمتر نیز وجود دارد. روش‌های متنوعی برای فرایند انتخاب وجود دارد که در ذیل به شرح مختصر برخی از رایج‌ترین روش‌ها پرداخته شده است [۶۹،۲۴].

## ۳-۲-۱-۱ روش چرخ گردان

یکی از روش‌های متداول در فرایند انتخاب، روش چرخ گردان است. در این روش احتمال حضور

<sup>81</sup> Mutation Rate

<sup>82</sup> Termination Criterion

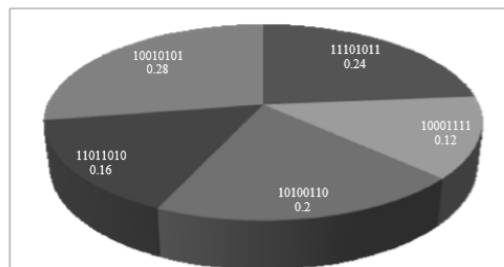
رشته  $i$ ام بر اساس شایستگی آن طبق رابطه (۳-۳) تعیین می‌شود. بر اساس این رابطه، حاصل جمع احتمال های محاسباتی برای کل اعضای جمعیت برابر یک است.

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

در رابطه (۳-۳)  $NP$  تعداد اعضای جمعیت و  $Fit$  مقدار شایستگی هر رشته (طرح) است. حال اگر درصد احتمال بدست آمده برای هر رشته به صورت بخشی از یک چرخ گردان نشان داده شود، شکل (۲-۳) به صورت نمونه حاصل می‌گردد. بر اساس این شکل مقادیر  $P_i$  ها، قطاع‌های چرخ گردان را تشکیل می‌دهند. در ادامه برای اجرای این روش بر اساس رابطه (۳-۴) پارامتر احتمال تجمعی برای هر رشته (طرح) تعیین می‌شود.

$$\bar{P}_i = \sum_{j=1}^{MNP} P_j \quad i = 1, \dots, NP \quad (4-3)$$

در رابطه (۳-۴)،  $MNP$  شماره هر عضو از جمعیت جاری (شماره هر رشته) و  $\bar{P}_i$  مقدار پارامتر احتمال تجمعی برای رشته  $i$ ام می‌باشد.



شکل (۲-۳): مدلی از چرخ گردان [۲۴]

پس از محاسبه احتمال تجمعی، به تعداد اعضای جمعیت، اعداد تصادفی یکنواخت در محدوده صفر تا یک تولید می‌شود. اگر عدد تولیدی کوچکتر یا مساوی با  $\bar{P}_i$  نظیر رشته  $i$ ام باشد، آن رشته (طرح) برای تکثیر انتخاب می‌شود و در استخر تولید مثل قرار می‌گیرد [۲۴].

### ۲-۱-۲-۳ روش رتبه‌بندی

در روش رتبه‌بندی ابتدا اعضای جمعیت بر اساس 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) بر اساس رتبه هر رشته صورت می‌پذیرد، بنابراین مقدار  $P_i$  در ارتباط با شانس حضور رشته  $i$  ام بشرح رابطه (۵-۳) محاسبه می‌گردد.

$$P_i = \frac{MNP}{\sum_{j=1}^{NP} j} \quad i = 1, \dots, NP \quad (5-3)$$

در ادامه همانند روش چرخ گردان مقادیر تجمعی  $\bar{P}_i$  طبق رابطه (۴-۳) 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 تولید مثل قرار می‌گیرد.

همانطور که مشاهده می‌شود، تفاوت روش رتبه‌بندی با روش چرخ گردان در شیوه محاسبه احتمال حضور هر رشته (طرح) می‌باشد [۲۴].

### ۳-۲-۱-۳ روش رقابتی

در روش رقابتی، زیر مجموعه 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 تولید مثل قرار می‌گیرد. این فرایند برای انتخاب تمامی والد‌ها به تعداد  $NP$  تکرار می‌شود. تعداد رشته‌ها در هر زیر مجموعه به تعداد اعضای جمعیت بستگی داشته و با عنوان سائز رقابت توسط کاربر مقدار دهی می‌شود، اما عموماً دو یا سه رشته برای رقابت انتخاب می‌شوند [۲۴].

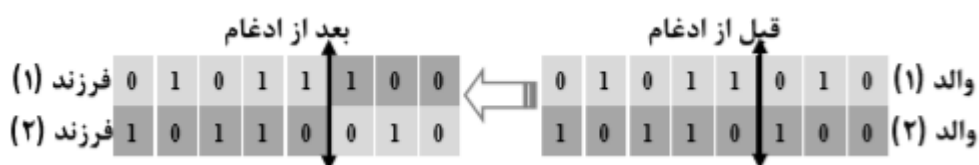
### ۳-۲-۲ عملگر پیوند

عملگر پیوند از جمله مرسوم‌ترین اپراتورهای GA می‌باشد. این عملگر عموماً نیازمند دو رشته جهت

اعمال فرایند پیوند است. رشته‌های منتخب بر اساس نرخ پیوند برگزیده و با یکدیگر ترکیب می‌شوند. برخی از رایج‌ترین شیوه‌های پیوند در بخش‌های ذیل ارائه شده است [۲۴].

### ۳-۲-۱ پیوند تک نقطه‌ای

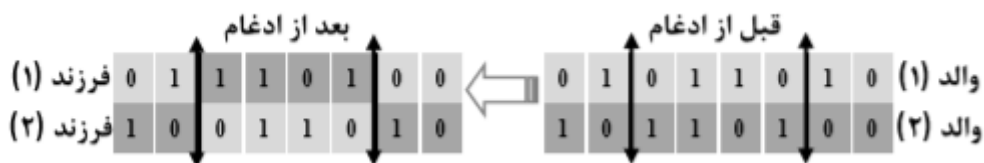
در پیوند تک نقطه‌ای پس از انتخاب والدین بر اساس نرخ پیوند از استخر تولید مثل، مکانی به صورت تصادفی در طول رشته‌های والدین انتخاب می‌شود. سپس بیت‌های بعد از این مکان طی فرایند ادغام، بین دو رشته جابجا می‌شوند. شکل (۳-۳) به صورت شماتیک، فرایند پیوند تک نقطه‌ای را نشان می‌دهد [۲۴].



شکل (۳-۳): شیوه پیوند تک نقطه‌ای [۲۴]

### ۳-۲-۲ 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 (۴-۳) شیوه پیوند دو نقطه‌ای را به صورت شماتیک نشان می‌دهد [۲۴].



شکل (۴-۳): شیوه پیوند دو نقطه‌ای [۲۴]

### ۳-۲-۲-۳ پیوند یکنواخت

در این روش هر بیت از رشته‌های فرزندان، بر اساس یک احتمال پنجاه درصدی از والدهایش انتخاب شده و شکل می‌گیرد. برای این منظور از یک رشته‌ای به نام ماسک<sup>۸۳</sup> استفاده می‌شود. طول رشته ماسک برابر طول هر رشته از جمعیت بوده و بیت‌های آن به صورت تصادفی تولید می‌شوند. برای اجرای پیوند یکنواخت، بیت‌های فرزندان بر اساس مقادیر هم ارز در رشته ماسک و والدین تشکیل می‌شود. بدین ترتیب هنگامی که در ماسک مقدار بیت هم ارز صفر باشد، بیت از والد اول و اگر مقدار یک باشد، بیت از والد دوم کپی می‌شود. در شکل (۳-۵) شیوه پیوند یکنواخت قابل مشاهده است [۲۴].

| ماسک      | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| والد (۱)  | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| فرزند (۱) | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| والد (۲)  | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| فرزند (۲) | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| والد (۱)  | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |

شکل (۳-۵): شیوه پیوند یکنواخت [۲۴]

### ۳-۲-۳ 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 فرایند پیوند نمی‌تواند تغییری در جمعیت فرزندان ایجاد نماید. بنابراین استفاده از اپراتور جهش تاثیر بسزایی در کیفیت فرایند

<sup>83</sup> Mask

بهینه‌یابی بر اساس GA دارد. در فرایند جهش بر اساس کدگذاری دودویی، با تخصیص نرخ جهش ( $P_m$ )، برای تک تک بیت‌های فرزندان اعداد تصادفی تولید می‌شود. در صورتی که این اعداد از نرخ کوچکتر باشد، مقدار بیت مربوطه از صفر به یک یا بالعکس تبدیل می‌شود. مقدار مناسب نرخ جهش در کیفیت نتایج تاثیر بسزایی می‌گذارد. نرخ جهش بالا سبب می‌شود که نظم جمعیت فرزندان بهم خورده 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 فرایند جهش و چگونگی تنظیم نرخ جهش ارائه شده است که در زیر ساختارهایی از رایج‌ترین شیوه‌های موجود، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است [۶۹،۲۴].

### ۳-۲-۳-۱ جهش با نرخ ثابت<sup>۸۴</sup>

رایج‌ترین حالت ممکن در اعمال عملگر جهش، استفاده از نرخ ثابت برای کل فرایند بهینه‌یابی در جهش است که متناسب با فضای طراحی و قیود مسئله و حس مهندسی مقدار دهی می‌شود. بدین منظور در ابتدای فرایند بهینه‌یابی عددی بین صفر تا یک برای مقدار  $P_m$  منظور می‌شود. این مقدار در کل فرایند 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 [۲۴].

### ۳-۲-۳-۲ جهش با نرخ صعودی<sup>۸۵</sup>

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

<sup>84</sup> Uniform

<sup>85</sup> Increased

نرخ جهش منظور شده و در طی عملیات بهینه‌یابی، مقدار نرخ جهش به صورت خطی متناسب با نسبت شماره نسل به تعداد کل نسل‌ها، بر اساس رابطه (۶-۳) افزایش می‌یابد.

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

در رابطه (۶-۳)،  $P_m^{Max}$  و  $P_m^{Min}$  به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل نرخ جهش می‌باشد که در ابتدای فرایند بهینه‌یابی توسط کاربر مقدار دهی می‌شوند [۲۴].

### ۳-۳-۲-۳ جهش با نرخ نزولی<sup>۸۶</sup>

در این حالت، نرخ جهش به صورت کاهشی در کل فرایند 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 بر اساس رابطه (۷-۳) کاهش می‌یابد [۲۴].

$$P_m = P_m^{Max} + (P_m^{Max} - P_m^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (۷-۳)$$

### ۳-۳ الگوریتم ازدحام ذرات<sup>۸۷</sup> (PSO)

از جمله الگوریتم‌های فراابتکاری که در دهه اخیر مورد توجه محققین علوم مهندسی قرار گرفته است، روش جستجو ازدحام 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 [۷۰]. این محققین با مطالعه رفتار موجودات گروهی همچون پرندگان، ماهیان و انسان‌ها 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 مورد

<sup>86</sup> Decreased

<sup>87</sup> Particle Swarm Algorithm

نظر شکل گرفته است. این موجودات با حرکت دسته جمعی، اهداف گروه همچون تهیه غذا، حفاظت از خود در برابر دشمن را برآورده می‌سازند. مطالعه حرکت دسته‌جمعی 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 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. 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<sup>88</sup> (عضو) در گروه شناخته می‌شود. هر ذره متناسب با مقدار سرعت<sup>89</sup> مربوطه در فضای طراحی حرکت می‌نماید. سرعت هر ذره وابسته به بهترین موقعیت ذره مربوطه از ابتدا تاکنون 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 ذره مورد نظر از ابتدا تا کنون مشاهده نموده است. ۲: حرکت به سوی بهترین موقعیتی که دیگر ذرات از ابتدا تاکنون مشاهده نموده‌اند. نمودار شکل (۳-۶) فرآیند بهینه‌یابی براساس روش PSO را نشان می‌دهد. 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 محاسبه می‌شود. براساس تابع هدف اصلاح شده می‌توان

<sup>88</sup> Particle

<sup>89</sup> Velocity

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

$P^g = [p^g1, p^g2, \dots, p^gNos]^T$  تعریف می‌شوند. بردار  $P_i^k$  بیانگر بهترین موقعیت ذره  $i$ ام از ابتدا تا  $k$ امین

تکرار است و بردار  $P^g$  نیز بیانگر بهترین موقعیت یک ذره از ابتدا تاکنون در بین تمام ذرات می‌باشد. پس از

تشکیل بردارهای مورد نظر، موقعیت هر ذره (طرح) در فضای جستجو براساس روابط زیر تغییر می-

نماید [۷۰، ۲۴].

$$X_i^{k+1} = X_i^k + \Delta t * V_i^{k+1} \quad (۸-۳)$$

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + C_1 \text{Ran}_1 \left( \frac{p_i^k - X_i^k}{\Delta t} \right) + C_2 \text{Ran}_2 \left( \frac{p_g - X_i^k}{\Delta t} \right) \quad (۹-۳)$$

در روابط (۸-۳) و (۹-۳)،  $X_i^k$  موقعیت ذره  $i$ ام در  $k$ امین تکرار،  $V_i^k$  سرعت ذره  $i$ ام در  $k$ امین تکرار،  $\omega$

ضریب اینرسی وزنی<sup>۹۰</sup> سرعت مرحله قبل،  $\Delta t$  پارامتر بازه زمانی،  $\text{Ran}_1$  و  $\text{Ran}_2$  اعداد تصادفی یکنواخت در

محدوده صفر تا یک و  $C_1$  و  $C_2$  نیز به ترتیب پارامترهای شناختی<sup>۹۱</sup> و اجتماعی<sup>۹۲</sup> می‌باشند. با حرکت هر ذره

براساس رابطه (۸-۳) در فضای جستجو 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

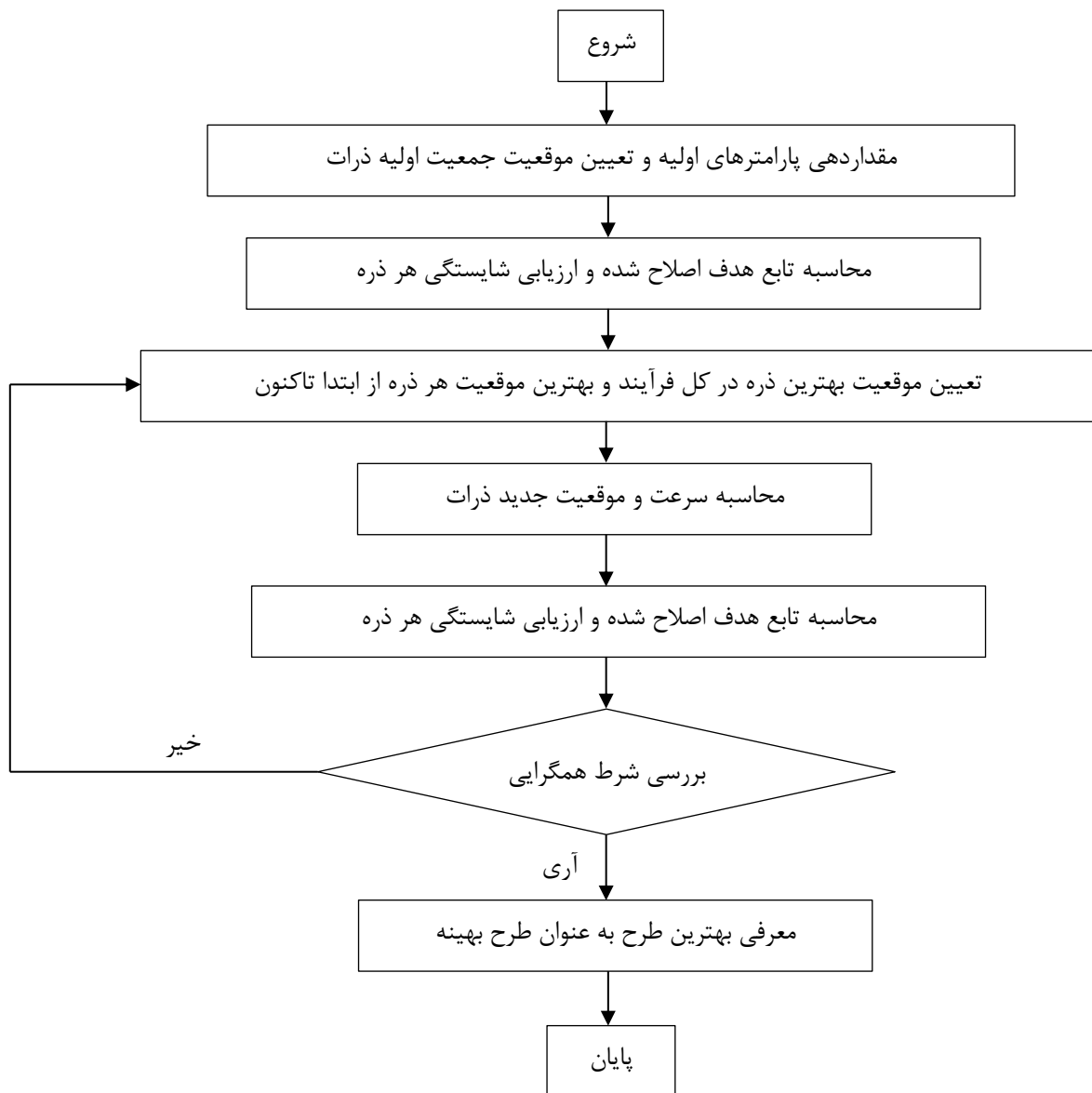
از قبل تعیین شده، تکرار می‌نماید. سپس در نهایت با برقراری شرط خاتمه (پایان تکرارهای مشخص شده)

الگوریتم بهترین ذره را به عنوان طرح بهینه معرفی می‌نماید.

<sup>۹۰</sup> Inertia Weight

<sup>۹۱</sup> Cognitive Factor

<sup>۹۲</sup> Social Factor



شکل (۳-۶): فرآیند بهینه‌یابی براساس روش PSO [۲۴]

### ۱-۳-۳ بررسی ضرایب $C_1$ و $C_2$

بر اساس 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 موثر می‌باشند. بدین ترتیب برای ارزیابی نسبتاً کلی بر تاثیر این پارامترها در روند بهینه‌یابی بر اساس PSO، چهار حالت به شرح ذیل مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳-۱-۳-۱ حالت ۱ برای ضرایب $C_1$ و $C_2$

در این حالت پارامترهای  $C_1$  و  $C_2$  به صورت نزولی در کل فرایند بهینه‌یابی تغییر می‌نمایند. به عبارت دیگر در ابتدای فرایند 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، بر اساس رابطه (۳-۱۰) کاهش می‌یابند.

$$C_i = C_i^{Max} - (C_i^{Max} - C_i^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad i = 1, 2 \quad (۳-۱۰)$$

در رابطه (۳-۱۰)،  $C_i^{Max}$  و  $C_i^{Min}$  به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل پارامتر مورد نظر در فرایند بهینه‌یابی است [۲۴].

### ۳-۱-۳-۲ 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 فرایند 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 فرایند بهینه‌یابی، به صورت خطی متناسب با نسبت شماره تکرار به تعداد کل تکرارها، بر اساس رابطه (۳-۱۱) افزایش می‌یابد [۲۴].

$$C_i = C_i^{Min} + (C_i^{Max} - C_i^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad i = 1, 2 \quad (۳-۱۱)$$

پارامترهای رابطه (۳-۱۱) مشابه رابطه (۳-۱۰) است.

### ۳-۱-۳-۳ 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 فرایند بهینه‌یابی کاهش و مقدار پارامتر  $C_2$  افزایش می‌یابد. برای این منظور از

روابط (۱۲-۳) و (۱۳-۳) استفاده شده است [۲۴].

$$C_1 = C_1^{Max} - (C_1^{Max} - C_1^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (12-3)$$

$$C_2 = C_2^{Min} + (C_2^{Max} - C_2^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (13-3)$$

پارامترهای روابط فوق مشابه رابطه (۱۰-۳) می‌باشند.

### ۳-۱-۴ 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 فرایند بهینه‌یابی، متناسب با نسبت شماره تکرار به تعداد کل تکرارها تغییر می‌نماید. برای این منظور از روابط (۱۴-۳) و (۱۵-۳) استفاده می‌شود [۲۴].

$$C_1 = C_1^{Min} + (C_1^{Max} - C_1^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (14-3)$$

$$C_2 = C_2^{Max} - (C_2^{Max} - C_2^{Min}) \frac{iter}{iter_{Max}} \quad (15-3)$$

### ۳-۴ الگوریتم بیگ بنگ - بیگ کرانچ<sup>۹۳</sup> (BB-BC)

شانس می‌تواند در حکم ائتلاف انرژی در طبیعت تلقی شود در حالی که همگرایی به سوی یک نقطه بهینه محلی یا کلی می‌تواند به عنوان جاذبه گرانش نگریسته شود. ائتلاف انرژی، بی‌نظمی را در ذرات منظم پدید می‌آورد. از پدیده تصادف نیز برای شروع به تولید مجموعه کاندیداهای حل جدید (بی‌نظمی یا هرج و مرج) استفاده خواهد شد. الگوریتم عنوان شده اولین بار توسط Eksin و Erol [۷۱] در سال ۲۰۰۶ معرفی شد و از دو تئوری مشهور درباره چگونگی آغاز و پایان کائنات، به نام تئوری انفجار بزرگ<sup>۹۴</sup> که مربوط است به

<sup>۹۳</sup> Big Bang–Big Crunch Algorithm

<sup>۹۴</sup> Big Bang

چگونگی پیدایش کائنات و تئوری انقباض بزرگ یا انهدام بزرگ<sup>۹۵</sup> که مربوط است به هم فرو رفتن عالم و پایان عمر آن، الهام گرفته شده است. این الگوریتم از لحاظ تولید جمعیت اولیه شبیه الگوریتم ژنتیک و PSO می باشد و در کل شامل دو فاز است: فاز بیگ بنگ<sup>۹۶</sup> و فاز بیگ کرانچ<sup>۹۷</sup>. مرحله تولید جمعیت اولیه را فاز بیگ بنگ گویند، که در آن جمعیت به صورت تصادفی و یکنواخت روی کل فضای جستجو پخش می شود. پس از آنکه جمعیت اولیه تولید شد، با توجه به تابع هدف میزان برازندگی<sup>۹۸</sup> هر یک از داوطلبها محاسبه می شود. بعد از فاز بیگ بنگ، توسط یک عملگر انقباضی، فاز بیگ کرانچ اعمال می شود که در طی آن با در نظر گرفت میزان برازندگی و موقعیت فعلی هر داوطلب، پارامتری به دست می آید که آن را مرکز جرم<sup>۹۹</sup> گویند. مرکز جرم در واقع متوسط موقعیت داوطلبها در فضای جستجو می باشد و می توان آن را با رابطه زیر به دست آورد [۷۱]:

$$x_j^c = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{f^i} x_j^i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{f^i}} \quad j = 1, 2, \dots, NT \quad (۱۶-۳)$$

که در آن  $x_j^c$  مؤلفه  $j$ ام مرکز جرم،  $x_j^i$  مؤلفه  $j$ ام جواب داوطلب  $i$ ام،  $f^i$  میزان برازندگی داوطلب  $i$ ام،  $N$  تعداد داوطلبها و  $NT$  تعداد ابعاد مسئله می باشد. پس از محاسبه مرکز جرم، موقعیت بعدی هر یک از جوابهای داوطلب در تکرار بعدی را می توان با استفاده از رابطه زیر به دست آورد [۷۱]:

$$x_j^{i,new} = x_j^c + r \times \frac{(x^{max} - x^{min})}{k} \quad J = 1, 2, \dots, NT \quad (۱۷-۳)$$

که در آن  $x_j^{i,new}$  مقدار جدید مؤلفه  $j$ ام داوطلب  $i$ ام،  $r$  عددی تصادفی با توزیع نرمال،  $x^{max}$  و  $x^{min}$  به ترتیب حداکثر و حداقل مقدار مجاز متغیر  $x$  و  $k$  شمارنده تکرار می باشد. پس از اینکه موقعیت بعدی هر یک از جوابها به دست آمد، مرکز جرم دوباره محاسبه می شود و سپس موقعیت هر یک از داوطلبها دوباره بهنگام سازی می شود. این روند آنقدر تکرار می شود تا شرط توقف ارضا شود. نکته ای که در اینجا حائز اهمیت

<sup>95</sup> Big Crunch

<sup>96</sup> Big Bang phase

<sup>97</sup> Big Crunch phase

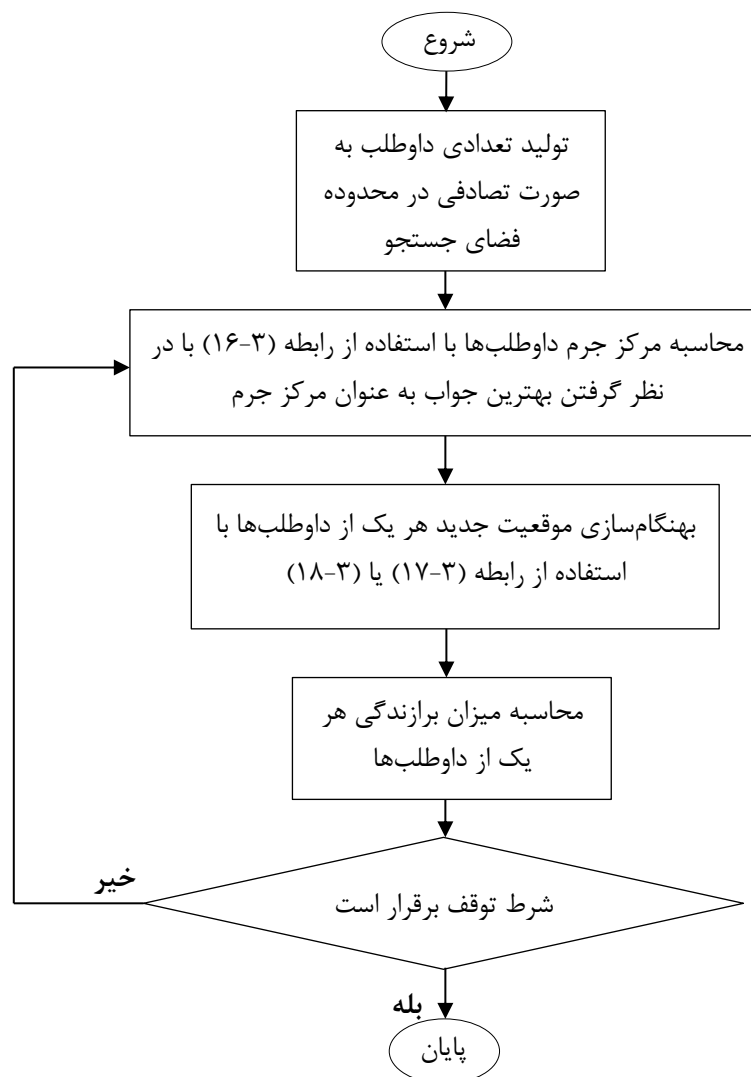
<sup>98</sup> Fitness

<sup>99</sup> Center of Mass

است این است که در رابطه (۱۷-۳) به جای استفاده از  $x_j^c$  به دست آمده از رابطه (۱۶-۳)، می‌توان از بهترین داوطلب در هر تکرار به عنوان مرکز جرم استفاده کرد. با در نظر گرفتن بهترین جواب در هر تکرار به عنوان مرکز جرم، رابطه (۱۷-۳) به صورت زیر نیز قابل بیان است [۷۱]:

$$x_j^{i,new} = x_j^{best} + r \times \frac{(x^{max} - x^{min})}{k} \quad J = 1, 2, \dots, NT \quad (۱۸-۳)$$

که در آن  $x_j^{best}$  مؤلفه  $J$ ام بهترین جواب در تکرار  $(k - 1)$ ام می‌باشد. سایر متغیرها نیز همان متغیرهای تعریف شده در رابطه (۱۷-۳) می‌باشند. فلوچارت این الگوریتم در شکل (۷-۳) نشان داده شده است.



شکل (۷-۳): فرآیند بهینه‌یابی براساس روش BB-BC [۷۱]

در الگوریتم مزبور فضای جستجو در هر تکرار کوچک‌تر می‌شود و این باعث می‌شود که همگرایی سرعت بالایی داشته باشد.

### ۳-۵ الگوریتم جستجو ذرات باردار<sup>۱۰۰</sup> (CSS)

روش جستجو 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 FBM, CSS, MCSS توسعه یافت [۷۲]. در روش CSS، فرآیند بهینه‌یابی براساس قوانین ذرات باردار و قوانین حرکت نیوتن<sup>۱۰۱</sup> انجام می‌شود. برای این منظور هر بردار متغیرهای طراحی به عنوان یک ذره باردار<sup>۱۰۲</sup> در فضای طراحی در نظر گرفته می‌شود. هر ذره دارای یک میدان الکتریکی<sup>۱۰۳</sup> است که به واسطه 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<sup>۱۰۴</sup> 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 به دست آورد. بهترین موقعیت برای هر ذره، مکانی است که به واسطه قرارگیری در موقعیت مورد نظر، 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 به صورت نمودار شکل (۳-۸) قابل اجرا می‌باشد [۷۲].

---

<sup>100</sup> Charged System Search Algorithm

<sup>101</sup> Newtonian Mechanic Laws

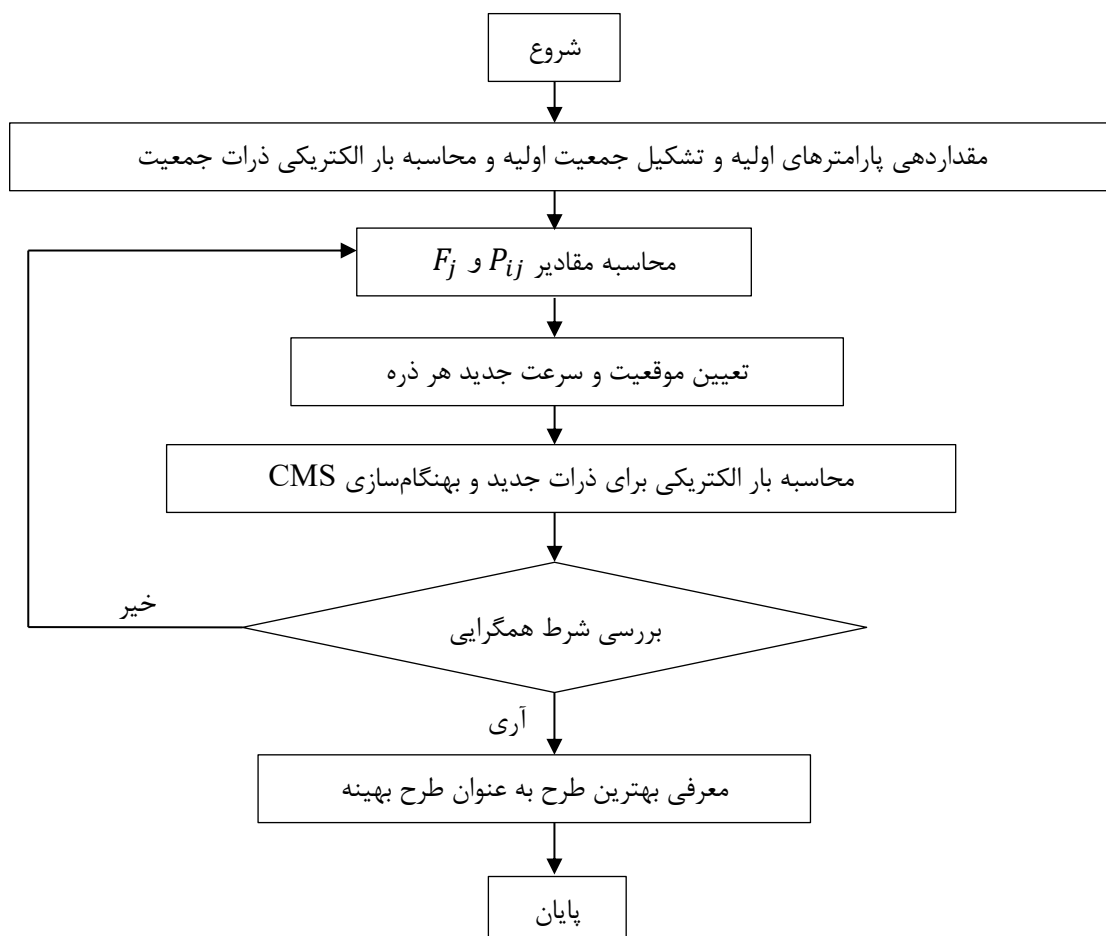
<sup>102</sup> Charged Particle (CP)

<sup>103</sup> Electrical Fields

<sup>104</sup> Electrical Force

همان طور که در شکل (۸-۳) مشاهده می‌شود، الگوریتم CSS نیز همانند سایر روش‌های فراابتکاری، نیازمند مقداردهی اولیه برای تعدادی از پارامترها است. پارامترهایی از قبیل تعداد ذرات هر جمعیت (NP)، شعاع ذرات ( $a^{CSS}$ ) می‌بایست در ابتدا مقداردهی شوند. در ادامه جمعیت اولیه به صورت تصادفی با عنوان حافظه بار<sup>۱۰۵</sup> 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 تعیین می‌شود. سپس میزان بار الکتریکی هر ذره به شرح رابطه (۱۹-۳) قابل محاسبه است [۷۲].

$$q_j = \frac{\phi_j - \phi_{worst}}{\phi_{best} - \phi_{worst}} \quad j = 1, \dots, NP \quad (19-3)$$



شکل (۸-۳): فرآیند بهینه‌یابی براساس روش CSS [۷۲]

در رابطه (۳-۱۹)،  $q_j$  بار الکتریکی هر ذره<sup>۱۰۶</sup> است،  $\phi_j$  مقدار تابع هدف اصلاح شده برای ژامین ذره جمعیت حاضر می‌باشد.  $\phi_{best}$  و  $\phi_{worst}$  به ترتیب مقادیر تابع هدف اصلاح شده برای بهترین و بدترین ذرات جمعیت حاضر می‌باشد. به بیان دیگر  $\phi_{best}$  مربوط به کمترین مقدار تابع هدف اصلاح شده و  $\phi_{worst}$  مقدار بیشترین تابع هدف اصلاح شده در جمعیت حاضر است [۷۲، ۲۴].

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 بهینه-یابی را با محاسبه احتمال جذب هر ذره توسط سایر ذرات ( $P_{ij}$ ) آغاز می‌نماید. برای این منظور مقدار  $P_{ij}$  به شرح رابطه (۳-۲۰) محاسبه می‌شود [۷۲، ۲۴].

$$P_{ij} = \begin{cases} 1 & \frac{\phi_i - \phi_{best}}{\phi_j - \phi_i} > \text{ran}_3 \vee \phi_j < \phi_i \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (20-3)$$

در رابطه (۳-۲۰)،  $\text{ran}_3$  یک عدد تصادفی در محدوده صفر تا یک می‌باشد. مقادیر  $\phi_i$  و  $\phi_j$  نیز به ترتیب دلالت بر مقدار تابع هدف اصلاح شده برای ژامین و ژامین ذره در جمعیت حاضر دارند. با محاسبه  $P_{ij}$  برای ذرات جمعیت حاضر، مقدار نیروی برآیند وارد بر هر ذره توسط دیگر ذرات، براساس رابطه (۳-۲۱) قابل محاسبه می‌باشد [۷۲، ۲۴].

$$F_j = q_j \sum_{i, i \neq j} \left( \frac{q_i}{a^3} r_{ij} \cdot i_1 + \frac{q_i}{r_{ij}^2} \cdot i_2 \right) P_{ij} (X_i - X_j), \begin{cases} i_1 = 1, i_2 = 0 \Leftrightarrow r_{ij} < a \\ i_1 = 0, i_2 = 1 \Leftrightarrow r_{ij} \geq a \end{cases} \quad (21-3)$$

در رابطه (۳-۲۱)،  $F_j$  نیروی برآیند وارد بر ذره ژام است.  $a^{CSS}$  و  $q_j$  به ترتیب شعاع<sup>۱۰۷</sup> و بار الکتریکی ذره

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

<sup>106</sup> Magnitude of Charge ( $q_j$ )

<sup>107</sup> Radius ( $a$ )

(۲۲-۳) محاسبه می‌شود [۷۲, ۲۴].

$$r_{ij} = \frac{\|X_i - X_j\|}{\left\|\frac{X_i + X_j}{2} - X_{best}\right\| + \varepsilon} \quad (22-3)$$

در رابطه (۲۲-۳)،  $X_i$  و  $X_j$  به ترتیب موقعیت آامین و ژامین ذره باردار در فضای طراحی است.  $X_{best}$  مربوط به موقعیت بهترین ذره در جمعیت حاضر بوده و  $\varepsilon$  یک عدد مثبت کوچک برای جلوگیری از بی‌معنی 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 ژامین ذره توسط دیگر ذرات ( $F_j$ )، ذره  $j$  در فضای طراحی براساس رابطه (۲۳-۳) به سوی موقعیت جدید ( $X_{j,new}$ ) حرکت می‌نماید [۷۲, ۲۴].

$$X_{j,new} = X_{j,old} + Ran_1 \cdot k_a \frac{F_j}{m_j} \cdot \Delta t^2 + Ran_2 \cdot k_v \cdot V_{j,old} \cdot \Delta t \quad (23-3)$$

در رابطه فوق  $X_{j,old}$  و  $X_{j,new}$  به ترتیب موقعیت قدیم و جدید ژامین ذره در فضای کاوش می‌باشند.  $V_{j,old}$  سرعت قدیم ذره ژام و  $Ran_1$  و  $Ran_2$  اعدادی تصادفی در محدوده صفر تا یک است.  $\Delta t$  پارامتر بازه زمانی و  $m_j$  جرم ژامین ذره است که برابر  $q_j$  در نظر گرفته می‌شود.  $k_v$  و  $k_a$  نیز به ترتیب ضریب شتاب<sup>۱۰۸</sup> و ضریب سرعت<sup>۱۰۹</sup> می‌باشند که برای کنترل میزان شتاب و سرعت ذره در رابطه (۲۳-۳) لحاظ می‌شوند. این مقادیر در طی فرآیند بهینه‌یابی براساس روابط زیر تنظیم خواهند شد [۷۲, ۲۴].

$$k_a = 0.5 \left( 1 + \frac{iter}{iter_{max}} \right) \quad (24-3)$$

$$k_v = 0.5 \left( 1 - \frac{iter}{iter_{max}} \right) \quad (25-3)$$

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 ذره ( $V_{j,new}$ ) برای تکرار بعدی به شرح رابطه (۲۶-۳)

<sup>108</sup> Acceleration Coefficient

<sup>109</sup> Velocity Coefficient

محاسبه می‌شود [۷۲, ۲۴].

$$V_{j,new} = \frac{X_{j,new} - X_{j,old}}{\Delta t} \quad (۲۶-۳)$$

در روش CSS نکته حائز اهمیت در تعیین موقعیت جدید ذرات، امکان خروج هر ذره از محدوده مجاز براساس رابطه (۲۳-۳) می‌باشد. به بیان دیگر متغیرهای طراحی دارای حدود بالا و پایین می‌باشند و ممکن است در مرحله حرکت ذرات براساس رابطه (۲۳-۳)، 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 جستجو هارمونی در تولید هارمونی جدید، تغییر نموده و در محدوده مجاز مقداردهی می‌شود. بدین ترتیب موقعیت مناسب و مجاز برای ذره مربوطه ارائه خواهد شد [۷۲, ۲۴].

با محاسبه موقعیت جدید و سرعت جدید برای تمام ذرات جمعیت حاضر، فرآیند بهینه‌یابی با تعیین مقدار بار الکتریکی ذرات جدید و بهنگام‌سازی جمعیت CMS ادامه می‌یابد. بدین منظور مقدار تابع هدف اصلاح شده برای هر ذره (طرح) محاسبه و سپس با استفاده از رابطه (۱۹-۳) مقدار بار الکتریکی ذرات جمعیت جدید تعیین می‌شود. در ادامه براساس میزان بار الکتریکی ذرات جدید، جمعیت CMS که متشکل از بهترین ذرات می‌باشد، بروزرسانی خواهد شد.

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 پیش بینی شده تکرار می‌نماید. زمانی که شرط خاتمه محقق شود، الگوریتم بهترین طرح (ذره) را به عنوان طرح بهینه معرفی می‌نماید.

### ۳-۵-۱ پارامتر بازه زمانی

پارامتر بازه زمانی از جمله عوامل روش CSS می باشد که در موقعیت جدید هر طرح به شرح رابطه (۳-۲۳) اثر دارد. این پارامتر به صورت ضربی با توان یک در سرعت مرحله پیشین ( $V_{j,old}$ ) و به صورت ضرب با توان دو در مقدار نیروی برآیند وارد بر هر ذره ( $F_j$ ) اثر دارد [۲۴].

### ۳-۶ پردازش موازی الگوریتم ها

الگوریتم های هم راستا در رشته های فنی مهندسی من جمله مهندسی کامپیوتر، برعکس الگوریتم های پی در پی کلاسیک، الگوریتم هایی می باشند که در آنان، هر دفعه جزئی از برنامه داخل پردازشگری متفاوت به اجرا در می آید و در انتها برای به دست آوردن پاسخ مناسب، جوابها در مجاورت یکدیگر قرار می پذیرند. تعدادی از الگوریتم ها را می شود به راحتی به چندین جزء بخش نمود. مثلاً، مطالعه و بررسی نمودن اعداد از ۱ الی ۱۰۰۰۰۰ برای مشخص نمودن عددهای اول را، می شود با تخصیص بازه ای از عددها به هر پردازشگر در دسترسی و بعد آن جمع آوری لیست پاسخ های مناسب، تقسیم بندی نمود. تعدادی از الگوریتم ها برای عمل کردن در مرحله های بعدی، احتیاج به جوابهای مرحله های گذشته دارند. این تیپ مسئله ها را مسئله های اساسا پی در پی می گویند. تکنیک های عددی مکرر، مثل تکنیک نیوتون، مثالی از برنامه های پی در پی هستند. تعدادی از این مسئله ها را بسیار سخت می شود به فرم موازی اجرا کرد ولو اینکه به شکل بازگشتی هم باشند. یک مدل برای نمونه الگوریتم جستجو درختی می باشد. الگوریتم و برنامه هایی که به شکل موازی هستند بسیار با ارزشند چون انجام عملیات محاسباتی وسیع به وسیله الگوریتم و برنامه های موازی، به خاطر عملکرد پردازشگرهای جدید، خیلی تندتر از انجام آنها با الگوریتم و برنامه های پی در پی می باشد. تولید یک کامپیوتر با یک پردازشگر بسیار با شتاب خیلی مشکل تر از تولید کامپیوتری با شمار بسیاری پردازشگر با

سرعت آهسته‌تر و با عملکرد مشابه می‌باشد. مع‌الوصف، در بحث سریع بودن الگوریتم و برنامه‌های موازی نیز تنگنای ویژه تئوریک وجود دارد. جزئی از هر الگوریتم موازی، پی در پی می‌باشد، به همین خاطر یک مکان اشباع در هر الگوریتم و برنامه موازی داریم. پس از آن مکان اشباع افزایش شمار پردازش‌گرها بیشتر شدن عملکرد را به دنبال خود نخواهد داشت و فقط باعث افزایش خرج و آسیب می‌شود. بحث هزینه‌های اقتصادی و دشواری الگوریتم و برنامه‌های موازی بر پایه حافظه و مدت زمانی (تعداد چرخه‌های پردازشگر) که استفاده می‌نمایند با حدس تعیین می‌گردد. الگوریتم و برنامه‌های موازی می‌بایست برای پیوسته شدن میان پردازش‌گرهای گوناگون نیز به فرم بهینه در بیایند. این نوع الگوریتم‌ها به دو روش با پردازشگرها رابطه برقرار می‌نمایند، تبادل پیغام و حافظه یکسان [۳۷].

### ۳-۶-۱ الگوریتم ژنتیکی موازی جزیره‌ای<sup>۱۱۰</sup>

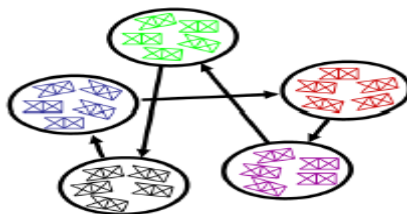
در این سیستم [۷۳-۷۴] (روش جستجو چندمنظوره  $MSM^{111}$  یا جزیره‌ای) که به الگوریتم ژنتیک توزیع شده معروف است، ابتدا جمعیت اولیه به چند زیرجمعیت (جزیره) تقسیم شده و هر یک از جزایر توسط یک پردازشگر به طور مستقل به بهینه‌سازی می‌پردازد. پس از گذشت چند نسل برای جلوگیری از ایجاد بهینه محلی و ایجاد تنوع در جواب، بهترین کروموزوم‌های هر جزیره به جزایر دیگر مهاجرت می‌کنند. پس از فرایند 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. طرح شماتیک از نحوه تقسیم جمعیت کل به جزایر و مهاجرت بین آن‌ها در شکل ۳-۹ نمایش داده شده است. کروموزوم‌های مهاجر که شایسته‌ترین کروموزوم‌های جزیره مبدأ بوده‌اند، جایگزین بدترین کروموزوم‌های جزیره مقصد می‌شوند. عمل مهاجرت به صورت متناوب تا رسیدن به شرط پایان بهینه‌یابی انجام می‌شود. به

---

<sup>110</sup> Island Parallel Genetic Algorithm

<sup>111</sup> Multi Search Method (MSM)

تعداد نسل‌سازی‌های بین دو مهاجرت، وقفه مهاجرت و به تعداد کروموزوم‌های مهاجر نرخ مهاجرت می‌گویند.



شکل (۳-۹): طرح شماتیک از نحوه تقسیم جمعیت و مهاجرت بین جزایر [۷۴]

به طور کلی پردازش موازی جزیره ای دارای مزایای زیر است:

- حجم داده‌های انتقالی با توجه به محدود بودن تعداد مهاجرت‌های بین جزایر، پایین است.
- با توجه به کوچک بودن جمعیت هر جزیره، عملیاتی مانند مرتب‌سازی کروموزوم‌ها، انتخاب و غیره سریع‌تر انجام می‌شود.
- مهاجرت کروموزوم‌های شایسته هر جزیره به جزایر دیگر باعث می‌شود تا جواب‌های متنوعی ایجاد شده و از احتمال افتادن در بهینه محلی کاسته شود.
- در این سیستم وابستگی الگوریتم ژنتیک به پارامترها و توابعش کاهش می‌یابد زیرا امکان استفاده از پارامترها و روش‌های گوناگون الگوریتم ژنتیک در هر یک از جزایر به صورت مستقل وجود دارد. انتخاب این پارامترها تأثیر قابل توجهی در امر بهینه‌یابی دارند. در روش جزیره‌ای با توجه به تعدد جزایر، امکان به‌کارگیری پارامترها و روش‌های گوناگون وجود دارد و لذا تعداد مراحل آزمون و خطا و احتمال گیر افتادن در بهینه محلی به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد [۲۴].

## ۷-۳ الگوریتم روش جستجو چندمنظوره مبتنی بر الگوریتم‌های

### فراابتکاری<sup>۱۱۲</sup>

در این رساله با استفاده از الگوریتم‌های ازدحام ذرات، ژنتیک، جستجو ذرات باردار، بیگ بنگ-بیگ کرانچ روشی ترکیبی و نوین (روش جستجو چندمنظوره مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری) جهت بهینه‌یابی محل، آرایش و تعداد دهانه‌های مهاربندی قابهای فولادی ساده ارائه می‌گردد.

در روش جستجو چندمنظوره مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری، جمعیت به بخش‌های مختلف (جزایر متنوع) تقسیم می‌شود. هر بخش دارای محیطی متفاوت و ساختاری منحصر به فرد است و از الگوریتم خاصی در هر جزیره استفاده خواهد شد. ویژگی‌ها و ساختار هر بخش بر اساس آزمودن عملگرها و پارامترهای الگوریتم‌ها و انتخاب بهترین‌ها، شکل می‌گیرد. به عبارت دیگر برای تشکیل جزایر، کلیه الگوریتم‌های اشاره شده در برنامه متلب کد نویسی شده و بر اساس نتایج، بهترین‌ها انتخاب و به کار گرفته شده‌اند. این طریقه عمل سبب می‌شود که جواب‌ها تنوع خوبی داشته باشند. پارامترهای الگوریتم‌های ذکر شده به صورت منفرد در مسایلی با تعداد زیاد متغیرهای طراحی، قیود و بزرگ بودن فضای کاوش، نقشی اساسی را در بهینه‌یابی ایفا می‌نمایند و استفاده از این الگوریتم‌ها لزوماً منتهی به جواب بهینه نمی‌شود، مدل پیشنهادی به طور مؤثر و هوشمندی فضای طراحی را مورد کاوش و در نهایت بهترین جواب‌های ممکن را ارائه می‌دهد.

شیوه عمل در روش مذکور مشابه روش ژنتیک جزیره ای (جستجو چندمنظوره) می‌باشد [۷۵]. بدین ترتیب که در ابتدا جمعیت اولیه به بخش‌های مختلف تقسیم و زیرجمعیت‌ها در جزایر موجود سازماندهی می‌شود. هر جزیره دارای روش بهینه‌یابی مجزایی بشرح الگوریتم‌های ذکر شده در ابتدای این فصل می‌باشد. سپس بهترین جزیره بر اساس طرح‌های موجود در جزایر، در زمان وقفه مهاجرت (تعداد تکرار هر الگوریتم

---

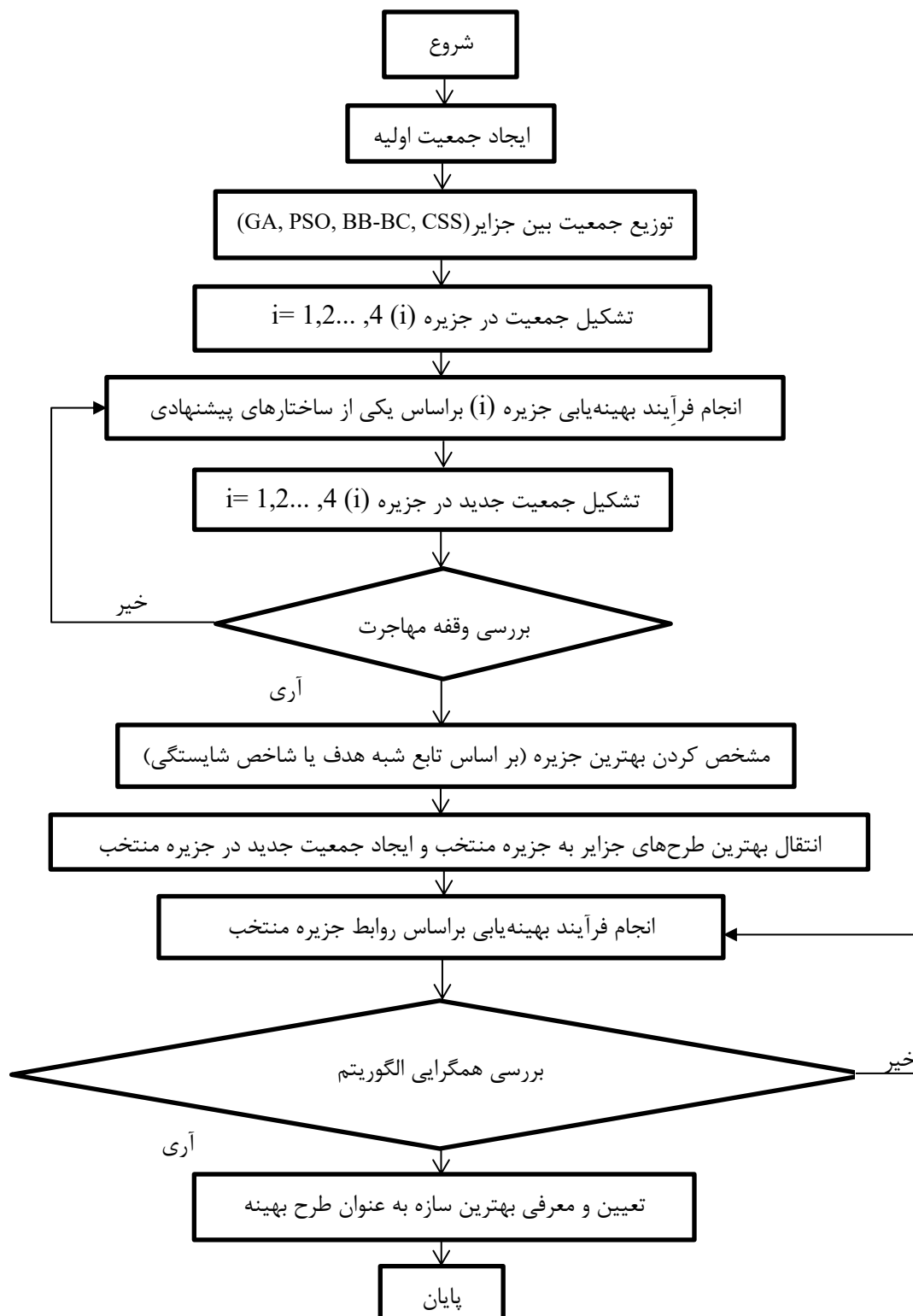
<sup>112</sup> Multi Heuristic based Search Method (MHSM)

که ۵۰ الی ۱۰۰ بار برای هر الگوریتم در نظر گرفته شده است) مشخص می‌شود. سپس روابط حاکم بر جزیره برتر بهینه‌یابی در کل سیستم حاکم شده و فرآیند بر اساس الگوریتم شکل (۳-۱۱) ادامه می‌یابد. شکل (۳-۱۰) نیز نمایی شماتیک از روش پیشنهادی کاوش چندفرابتکاری را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱۰): مهاجرت طرح های منتخب به جزیره برتر در روش کاوش چندفرابتکاری (MHSM)

قابل ذکر می‌باشد در مرحله انتقال بهترین طرحهای جزایر به جزیره منتخب، نرخ مهاجرت ۲۵ درصد در نظر گرفته می‌شود و نکته حائز اهمیت آن است که می‌بایست اعضای مهاجر بر اساس شرایط و ساختار اعضای جزیره مقصد (منتخب و برتر) تغییر یابند که این تغییر یک نوع سازگاری با محیط جزیره مقصد می‌باشد. به عنوان مثال اگر مقصد جزیره GA باشد اعضای مهاجر به فضای ژنتیک نگاشته می‌شوند یا اگر جزایر مقصد جزایر PSO و CSS باشد، اعضای مهاجر به فضای برداری نگاشت می‌شوند. نهایتاً هم در پژوهش حاضر برای مدلسازی الگوریتم چندفرابتکاری در یک تیپ قابهای کوتاه مرتبه، از سیستم پردازش موازی با ۴ کامپیوتر و برای سایر مدلها نیز به خاطر در دسترس نبودن همیشگی این ۴ کامپیوتر از یک کامپیوتر خانگی استفاده شده است.



شکل (۳-۱۱): الگوریتم روش پیشنهادی جستجو چندمنظوره (MHSM)

### ۳-۸ فرمول‌بندی و کلاسه‌بندی مساله بهینه‌یابی در جزیره‌های

#### الگوریتم چندفراتکاری

در این رساله بهینه‌یابی توپولوژی مهاربندی بر اساس تکنیک الگوریتم‌های فراتکاری جزیره‌ای، زمانی که متغیرهای طراحی منفک از هم بوده و باید از فهرست موجود<sup>۱۱۳</sup> "مقاطع"، "مختصات گره‌ای" و "یکی از تیپ‌های مهاربند همگرا شامل مهاربند هفتی-هشتی یک در میان، مهاربند قطری و مهاربند ضربدری" برگزیده گردند، تحت مطالعه واقع گردیده است. کلاسه‌بندی این موضوع به شرح زیر تعریف می‌شود:

یافتن "مختصات و آرایش بهینه" مناسب برای هر تیپ مهاربند در قاب فولادی با ابعاد و دهانه‌های مشخص.

متغیرهای طراحی مسئله عبارتند از:

مختصات گره‌ای دوسر اعضای مهاربندی:

$$\checkmark \quad [(X_i, Y_i), (X_j, Y_j)] = [(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots \dots \dots (x_{Nos}, y_{Nos})]^T; \quad (27-3)$$

$$(x_i, y_i) \in S; \quad i = 1, \dots, Nos$$

سطح مقطع المان‌ها:

$$\checkmark \quad [A] = [a_1, a_2, \dots, a_{Nos}]^T; \quad a_i \in S; \quad i = 1, \dots, Nos \quad (28-3)$$

نوع (تیپ) مهاربند<sup>۱۱۴</sup>:

$$\checkmark \quad [BT] = [b_1, b_2, \dots, b_{Nos}]^T; \quad b_i \in S; \quad i = 1, \dots, Nos \quad (29-3)$$

در نهایت پس از انتخاب و اختصاص اولیه ۳ پارامتر فوق، تحلیل توسط نرم‌افزار غیرخطی

OpenSees صورت می‌پذیرد، سپس قیود مسئله کنترل می‌شوند و طرح‌های واجد شرایط به عنوان جمعیت

<sup>113</sup> Available Section List

<sup>114</sup> Brace type

جدید وارد فاز کمینه سازی تابع هدف می‌شوند. فلوچارت کلی روش انجام این مراحل (برای هر جزیره) در شکل ۳-۱۲ نشان داده شده است.

قابل ذکر می‌باشد که کدنویسی الگوریتم در نرم‌افزار متلب (نرم‌افزاری با رویکرد ماتریسی) صورت می‌پذیرد و نرم‌افزار Opensees نیز (با استفاده از روش اجزای محدود) به تحلیل سازه مدلهای می‌پردازد. زبان TCL/TK مدل برنامه‌نویسی در Opensees است که از توانایی افزایش و ارائه گونه‌های مختلف المان‌های غیر سازه‌ای و سازه‌ای در مورد آنالیز بهره‌مند می‌باشد. این زبان از یک تعداد شاخه‌ها ساخته گردیده است که خصوصیت‌های ذیل را می‌شود در آن مشخص نمود [۷۶]:

الف: اجرا نمودن عملیات محاسباتی

ب: متغیرها و جانشینی مقادیرهای مشخص شده در آنان

پ: به کارگیری رابطه‌ها با شرایطی معین (for each, if, while, for)

ت: مدل‌های آنالیز

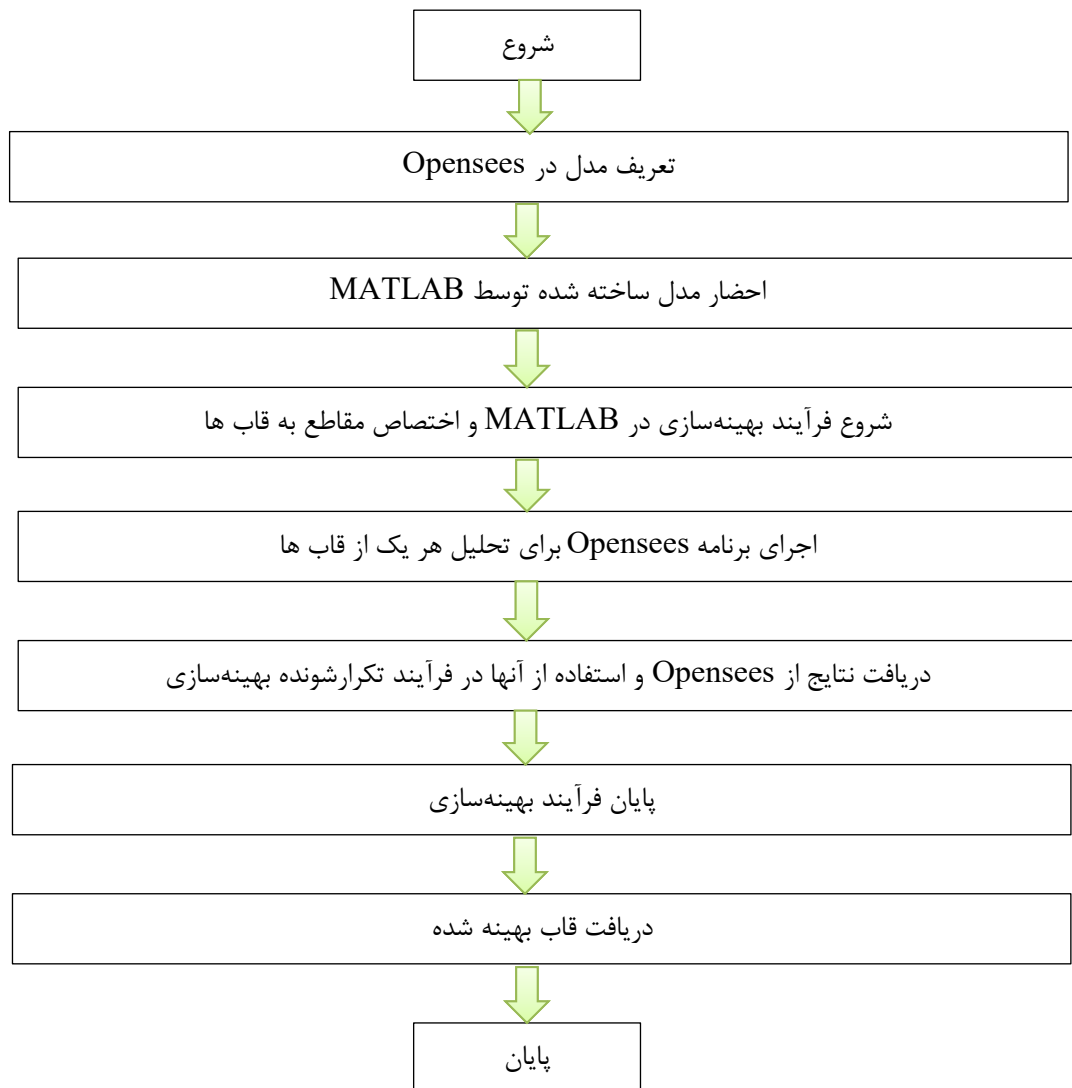
ث: تهیه اطلاعات ورودی به شکل کد نویسی

در خاتمه برای به کارگیری مطلوب از این زبان می‌باید این زبان با مدل المان محدود، همراه گردد. دسته-بندی ذیل بعد از این همانند ساختن حاصل می‌گردد:

الف: تهیه مدل: مشخص کردن اعضا، اعمال بار و معین سازی گره‌ها.

ب: تحلیل: تعیین نمودن نوع تحلیل.

پ: حاصل نتیجه تحلیل: تعیین پاسخهایی از سازه که بعد از پایان اجرا تحلیل باید مشخص گردند.



شکل (۳-۱۲): فلوچارت کلی بهینه‌یابی در هر جزیره

### ۳-۸-۱ تعریف تابع هدف، شبه هدف و تابع جریمه در جزیره‌های الگوریتم

#### چندفرابتکاری

در این رساله تابع هدف در فرآیند بهینه‌سازی مطابق رابطه ذیل، وزن سازه در نظر گرفته شده است.

$$F(A) = \sum_{i=1}^{Ne} \rho_i l_i a_i \quad (3-30)$$

Ne: تعداد اعضای سازه،  $\rho_i$ : وزن مخصوص مصالح<sup>۱۱۵</sup> هر عضو از سازه،  $l_i$ : طول هر عضو از سازه و  $a_i$ : سطح

مقطع هر عضو از سازه است.

همچنین برای تابع هدف اصلاح شده<sup>۱۱۶</sup> مبتنی بر تابع هدف و تابع جریمه<sup>۱۱۷</sup> از روابط ذیل استفاده می‌گردد.

$$\phi(A) = F(A)[1 + K(\sum_{q=1}^{nlc} \max[0, G_q])]$$
 (۳۱-۳)

$$K = k_j \times \ln(j + 1) \quad ; \quad j = 1, \dots, nk$$
 (۳۲-۳)

در رابطه (۳۱-۳)،  $F(A)$  تابع هدف مسئله بهینه‌یابی می‌باشد که در رابطه (۳۰-۳) تعریف گردیده است.  $G_q$  میزان نقص قیود و  $Q$  تعداد کل قیود حاکم بر مسئله می‌باشد.  $K$  ثابت جریمه و برابر با رابطه (۳-۳۲)،  $k_j$  مقدار ثابت هر بازه مهاجرت به تعداد کل  $nk$ ،  $j$  شمارنده مربوط به هر وقفه مهاجرت و  $nlc$  تعداد ترکیبات بارگذاری در فرآیند طراحی بهینه سازه است.

### ۲-۸-۳ تعریف قیود در جزیره‌های الگوریتم چندفرابتکاری

جهت کمینه سازی تابع هدف معرفی شده، قیود فرکانس، مقاومت طراحی، جابجایی نسبی و مقدار مجاز نیروی کششی مهاربندها در روند بهینه‌سازی توسط جزیره‌های الگوریتم چندفرابتکاری منظور می‌شوند. این قیود در بندهای ذیل به تفصیل اشاره شده است.

#### ۱-۲-۸-۳ قید مقاومت طراحی

در آیین‌نامه‌های طراحی سازه فولادی بر مبنای LRFD، محدودیت‌هایی برای مقاومت هر کدام از المانها، نحوه قرارگیری و بررسی تنش هر یک از المانها بیان شده است. محدودیت‌های مربوط به مقاومت ستون‌ها یا مهاربندها با توجه به اثر نیروی محوری همان ستون یا مهاربند مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. به این صورت که اگر میزان نیروی محوری کششی یا فشاری در المان مورد نظر از مقادیر معرفی شده در آیین‌نامه

<sup>116</sup> Modified Objective Function

<sup>117</sup> Penalty Function

تجاوز کند و عددی بزرگتر از یک را نشان دهد برای آن المان جریمه در نظر گرفته می‌شود. رابطه شرح فوق به صورت زیر بیان شده است [۲۳].

$$\frac{P_u}{\phi P_n} \leq 1.0 \quad (۳۳-۳)$$

همچنین در ستونهای قابها محدودیت دیگری به این صورت لحاظ گردید که مقاطع ستونهای طراحی شده طبقات تحتانی از مقاطع ستونهای طبقات بالایی باید بزرگتر باشد.

قابل ذکر است در تیرها لنگر خمشی تعیین کننده خواهد بود و با توجه به اینکه در سیستم قاب ساده، تیرها سهمی از بار جانبی نمی‌برند پس آنها را می‌توان بر اساس لنگر خمشی ماکزیمم بار ثقلی طراحی نمود. با توجه به توضیح عنوان شده می‌توان نتیجه گرفت که سطح مقطع تیرها در طول فرآیند بهینه‌سازی ثابت خواهد ماند. رابطه (۳۴-۳) برای طراحی تیرها در خمشی بیان شده است [۲۳].

$$\frac{M_u}{\phi_b M_n} \leq 1 \quad (۳۴-۳)$$

شایان ذکر است در روابط فوق  $P_u$  مقاومت فشاری حد نهایی،  $P_n$  مقاومت فشاری اسمی مقطع،  $\phi$  ضریب مقاومت در فشار و کشش که برابر ۰/۹ منظور می‌شود،  $M_u$  مقاومت خمشی حد نهایی در حول محور قوی،  $M_n$  مقاومت خمشی اسمی و  $\phi_b$  ضریب مقاومت که برای خمشی مساوی ۰/۹ است.

برای مهاربندها و ستونها در صورتی که تحت نیروی فشاری قرار بگیرند، مقاومت فشاری اسمی از رابطه ذیل محاسبه می‌گردد.

$$p_n = F_{cr} A_g \quad (۳۵-۳)$$

در رابطه فوق  $A_g$  سطح مقطع کلی مهاربند،  $p_n$  مقاومت فشاری اسمی و  $F_{cr}$  تنش فشاری ناشی از کمانش خمشی می‌باشد و مطابق روابط (۳۶-۳) و (۳۷-۳) محاسبه می‌گردد.

$$\frac{F_y}{F_e} \leq 2.25 \rightarrow F_{cr} = \left[ 0.658 \frac{F_y}{F_e} \right] F_y \quad (۳۶-۳)$$

$$\frac{F_y}{F_e} > 2.25 \rightarrow F_{cr} = 0.877 F_e \quad (۳۷-۳)$$

در روابط فوق  $F_y$  تنش تسلیم مهاربند و  $F_e$  تنش کمانش الاستیک می‌باشد که مطابق رابطه (۳۸-۳)

محاسبه می‌گردد.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (38-3)$$

$\left(\frac{KL}{r}\right)$  ضریب لاغری حداکثر عضو می‌باشد. طبق آیین‌نامه حداکثر لاغری به ۲۰۰ محدود گردیده است.

همچنین طبق مقررات ملی ساختمان (مبحث دهم) برای ستونهای با مقطع IPE یا IPB، تنش

فشاری ناشی از کمانش پیچشی مطابق رابطه (۳۹-۳) علاوه بر کمانش خمشی باید کنترل گردد [۲۳].

$$F_e = \left[ \frac{\pi^2 EC_W}{(K_Z L)^2} + GJ \right] \left( \frac{1}{I_X + I_Y} \right) \quad (39-3)$$

که  $C_W$  ثابت اعوجاج،  $GJ$  ضریب صلبیت پیچشی و  $K_Z$  ضریب طول موثر کمانش پیچشی است.

همچنین رابطه طراحی برای مهاربندها (در خارج از محل اتصال) و ستونهای تحت کشش به فرم

ذیل می‌باشد.

$$p_n = F_y A_g \quad (40-3)$$

پارامترهای ذکر شده رابطه (۴۰-۳) در قسمت مهاربندهای تحت فشار مشخص و تعریف شده است. البته با

این تفاوت که نیروها در حالت کششی می‌باشند. قابل ذکر است که در رابطه مربوط به مقاومت کششی

مهاربندها، کنترل عضو کششی در محل اتصال مورد نظر نبوده است.

### ۳-۸-۲-۲ قید جابجایی نسبی (دریافت)

جابجایی نسبی افقی طبقات (رابطه ۴۲-۳)، طبق آیین‌نامه بارگذاری آمریکا باید محدود به رابطه زیر

شود [۷۷].

$$\Delta_a = 0.02H \quad (41-3)$$

در رابطه فوق  $\Delta_a$  جابجایی نسبی مجاز طبقه و  $H$  ارتفاع طبقه می‌باشد.

همچنین روش محاسبه جابجایی نسبی طبقه در آیین‌نامه مطرح شده به شرح رابطه ذیل می‌باشد.

$$\Delta = \frac{C_d \delta_{xe}}{I_e} \quad (42-3)$$

در رابطه فوق  $\delta_{xe}$  جابجایی افقی نسبی طبقه،  $\Delta$  جابجایی نسبی واقعی طبقات و  $C_d$  ضریب بزرگنمایی تغییر مکان و برابر با ۵ در قابهای ساده به همراه مهاربند همگرا ویژه است.  $I_e$  نیز ضریب اهمیت ساختمان و برابر با ۱ می‌باشد.

### ۳-۲-۸-۳ قید فرکانس

از جمله علل محدود نمودن فرکانس‌های ارتعاش سازه، کاهش دامنه ارتعاشی (که باعث تنش و خیز در سازه خواهد شد) و جلوگیری از وقوع پدیده تشدید در پاسخ دینامیکی سازه می‌باشد. در اثر پدیده تشدید جابجایی‌های بزرگی در سازه رخ داده و این عامل باعث تخریب سازه می‌گردد. دلیل این پدیده به صورت زیر توجیه می‌شود.

همانطور که می‌دانیم پاسخ کلی یک سیستم  $n$  درجه آزادی با تبدیل سیستم به  $n$  سیستم یک درجه آزادی و محاسبه پاسخ‌ها قابل محاسبه است. پس با در نظر گرفتن نیروی هارمونیک  $F_0 \sin \bar{\omega} t$  برای یک سیستم یک درجه آزادی، پاسخ ذیل با در نظر گرفتن میرایی برای سازه طبق رابطه (۴۳-۳) به دست خواهد آمد:

$$U = \left[ \frac{1}{1 - \left( \frac{\bar{\omega}}{\omega} \right)^2} \right] \bar{u} \sin \bar{\omega} t \quad (43-3)$$

در این رابطه  $\bar{\omega}$  فرکانس بار و  $\omega$  فرکانس ارتعاشی سازه می‌باشد. حال چنانچه  $\omega = \bar{\omega}$  شود، عبارت داخل کروشه که همان ضریب بزرگنمایی دینامیکی است به سمت بی نهایت میل می‌کند که در این حالت پدیده تشدید در سازه مورد نظر رخ می‌دهد و باعث ایجاد تغییر شکلهای بزرگ در سازه می‌شود و با توجه به اینکه در عمل مصالح مصرفی مقاومت کافی در برابر این تغییر شکلهای بزرگ را نخواهند داشت سازه گسیخته خواهد شد [۱]. به طور کلی قید فرکانس می‌تواند به صورت ذیل در مسائل تعریف گردد:

$$\omega_{i^*} \leq \omega_i(X), \quad i=1, \dots, q_1 \quad (3-44)$$

که در آن  $\omega_i^*$   $i$  امین، فرکانس غالب زلزله و  $\omega_i$  فرکانس  $i$  ام سازه (به تعداد  $q_1$ ) می‌باشد.

در ادامه برای مقید کردن فرکانس مود اول قابهای مورد مطالعه در این رساله، جدول (۳-۱) که شامل ۳ شتاب نگاشت برای قابهای شش، نه و پانزده طبقه می‌باشد، تهیه شده و محتوای فرکانسی این شتاب نگاشت ها مورد بررسی قرار گرفته است. پریود غالب هر شتاب نگاشت، بیشینه شتاب زمین، بیشینه سرعت زمین و مدت زمان حرکت شدید زمین برای فهرست پیشنهادی (شتاب نگاشت های کوچالی ترکیه، زرند ایران و کولی بنیاباد ایران) در این جدول آمده است. قابل ذکر است که شتاب نگاشتهای فوق به گونه‌ای انتخاب گردیده‌اند که پریود قابهای تحقیق در محدوده پریود به دست آمده برای تشدید این شتاب نگاشت‌ها قرار بگیرند و در نتیجه با اعمال قید فرکانس خطر پدیده تشدید در مسئله بهینه‌یابی لحاظ و از آن جلوگیری شود. نهایتاً با توجه به شتاب نگاشتهای مندرج در جدول و منظور نمودن پریود غالب، قید فرکانس به این صورت در نظر گرفته می‌شود که فرکانس مود اول سازه باید بیشتر از  $1/52$  هرتز برای قابهای ۶ طبقه ( $\omega_{1,6s} \geq 1.52 \text{ Hz}$ )، بیشتر از  $1/21$  هرتز برای قابهای ۹ طبقه ( $\omega_{1,9s} \geq 1.21 \text{ Hz}$ ) و همچنین بیشتر از  $1/12$  هرتز برای قابهای ۱۵ طبقه باشد. ( $\omega_{1,15s} \geq 1.12 \text{ Hz}$ )

جدول (۳-۱): اطلاعات فهرست شتاب‌نگاشتی پیشنهادی

| Event Name     | Station        | PGA (g) | PGV (cm/s) | Duration Time (sec) | Soil Profile Type | Dominant Period (sec) |
|----------------|----------------|---------|------------|---------------------|-------------------|-----------------------|
| Khuli-baniabad | Ghaen          | 0.22    | 10.9       | 10.64               | 2                 | 0.66                  |
| Zarand         | Dam,shirinroud | 0.50    | 18.72      | 8                   | 2                 | 0.83                  |
| kocaeli        | Ambarli        | 0.25    | 40         | 30                  | 2                 | 0.9                   |

### ۳-۸-۲-۴ قید مقدار مجاز (قابل تحمل) نیروی کششی در مهاربندها

مهاربندها مطابق رابطه (۳-۴۵) باید در قابها طوری در نظر گرفته شوند که در راستای بارگذاری

جانبی، حداقل ۳۰ درصد و حداکثر ۷۰ درصد نیروی جانبی کل در آن راستا را در کشش تحمل کنند. [۲۳]

$$0.3 < \frac{T}{T+C} < 0.7 \quad (45-3)$$

که:

$$T = \sum (p_{nt} \cdot \cos \theta) = \sum (\cos \theta \cdot F_y \cdot A_g) \quad (46-3)$$

$$C = \sum (p_{nc} \cdot \cos \theta) = \sum (\cos \theta \cdot F_{cr} \cdot A_g) \quad (47-3)$$

در روابط فوق T و C به ترتیب حاصل جمع مقادیر مقاومت کششی اسمی مهاربندهای کششی و مقادیر حاصل جمع مقادیر مقاومت فشاری اسمی مهاربندهای فشاری می‌باشند.  $\theta$  نیز زاویه مهاربند ها با خط افق است. سایر پارامترهای مطرح شده نیز در بند ۳-۸-۲-۱ تعریف شده‌اند.

### ۳-۸-۲-۵ قید قرارگیری محل مهاربندها در دهانه ها و در ارتفاع قاب

به منظور پرهیز از نامنظمی قابها در ارتفاع و به خصوص نامنظمی قطع سیستم باربر جانبی، محل قرار گیری مهاربندها به نحوی مقید می‌گردد که در طبقه اول هر دهانه‌ای که مهاربند به آن تخصیص یابد، در ارتفاع قاب نیز مهاربند در همان دهانه قرار خواهد پذیرفت.

### ۳-۹ معرفی قابها، توزیع نیروی لرزه‌ای و بارگذاری

در این بخش، نمونه‌های مورد بررسی در فصل چهارم، روش توزیع نیروی زلزله در قابها و ترکیبات بارگذاری معرفی می‌گردند. مثال‌های عددی مورد بررسی، شامل قابهای دو بعدی ۶ طبقه (ارتفاع ۱۹/۲ متر) با ۵ دهانه چهار متری، ۴ دهانه پنج متری و ۳ دهانه شش متری، قابهای دو بعدی ۹ طبقه (ارتفاع ۲۸/۸ متر) با ۶ دهانه پنج متری، ۵ دهانه شش متری و ۴ دهانه هفت متری و نهایتاً قابهای دو بعدی ۱۵ طبقه (ارتفاع ۴۸ متر) با ۱۰ دهانه پنج متری، ۸ دهانه شش متری و ۷ دهانه هفت متری به نمایندگی از قابهای کوتاه، میان و بلند مرتبه می‌باشند.

بارهای زنده و مرده طبقات به صورت گسترده به تیرهای طبقات و بارهای جانبی طبق رابطه ذیل در قابها توزیع می‌شوند [۷۷]

$$F_i = (F_b - F_t) \frac{z_i^k m_i}{\sum_{j=1}^N z_j^k m_j} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (۴۸-۳)$$

در رابطه فوق،  $z_i$  ارتفاع تراز  $i$ ام (فاصله سقف طبقه  $i$ ام از تراز پایه)،  $m_i$  جرم معادل طبقه  $i$ ام شامل جرم واقعی طبقه  $i$  به علاوه بخشی از بارهای زنده،  $N$  تعداد طبقات (بالتر از تراز پایه)،  $k$  توانی است که براساس دوره تناوب اصلی سازه محاسبه می‌شود،  $F_t$ ، که در مواردی به نیروی شلاقی نیز معروف است، نیروی جانبی اضافی است که بر تراز آخر ( $N$ ام) اعمال می‌شود و از روابطی خاص قابل محاسبه است،  $F_b$  مقدار برش پایه، و  $F_i$  نیروی جانبی در تراز طبقه  $i$ ام است.

مقدار برش پایه و زمان تناوب اصلی در رابطه (۴۸-۳) برابر است با:

$$F_b = C_s \cdot W \quad (۴۹-۳)$$

$$T = 0.0488 H^{\frac{3}{4}} \quad (۵۰-۳)$$

جدول (۲-۳): روابط حاکم بر برخی از پارامترهای معادله (۴۸-۳) [۷۷]

| روابط                                                                                                                                                                                   | آیین‌نامه لرزه‌ای [۷۷] |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| $F_t = 0$<br>$T \leq 0.5s \rightarrow k = 1$<br>$T \geq 2.5s \rightarrow k = 2$<br>$0.5s < T < 2.5s \rightarrow k = 2$<br>مقدار $k$ می‌تواند با استفاده از درون‌یابی خطی نیز تعیین شود. | آمریکا                 |

توضیح و مقدار پارامترهای رابطه (۴۹-۳) در جدول (۳-۳) ذکر گردیده است. زمان تناوب رابطه (۳-۳)

(۵۰) نیز مختص قابهای ساده و مهاربند همگرا ویژه (قابهای مورد مطالعه در این رساله) می‌باشد. پارامتر  $H$  نیز ارتفاع ساختمان می‌باشد.

لازم به توضیح است که پهنه لرزه‌خیزی در منطقه  $D$  آیین‌نامه آمریکا (معادل گروه  $I$  لرزه خیزی

ایران) در نظر گرفته شده است. ساختگاه زمین نیز در گروه  $C$  (خاک بسیار متراکم) منظور گردیده است.

|                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| توضیح پارامترها                                                                                                                                                                                                                | آیین نامه لرزه‌ای [۷۷]                                                                        |
| $S_{DS}$ : شتاب طیف پاسخ طراحی در پریود کوتاه<br>$F_a$ : ضریبی وابسته به نوع ساختگاه=۱<br>$R$ : ضریب رفتار=۶<br>$W$ : وزن سازه<br>$S_s$ : ضریبی به دست آمده از نقشه‌های پهنه‌بندی=۱<br>$I_e$ : در رابطه (۳-۴۲) مشخص گردیده است | $C_s = \frac{S_{DS} I_e}{R}$<br>$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS}$<br>$S_{MS} = F_a S_s$<br>آمریکا |

$$U=1.2D\pm 1E+L \tag{51-3}$$

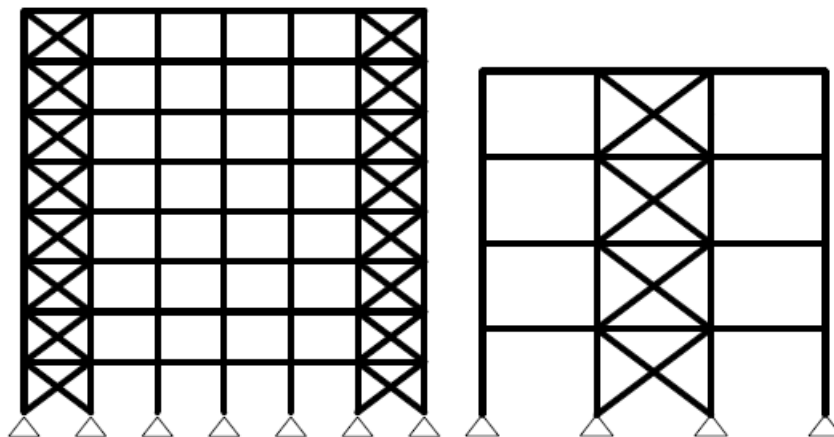
$$U=0.9D\pm 1E \tag{52-3}$$

$$U=1.2D+1.6L \quad (53-3)$$

بارهای زنده و مرده یکنواخت به ترتیب معادل  $Ll = 20 \cdot \frac{kg}{m^2}$  و  $DI = 55 \cdot \frac{kg}{m^2}$  در نظر گرفته شده است و مقدار تنش تسلیم فولاد نیز معادل  $240 \cdot \frac{kg}{cm^2}$  منظور گردیده است.

### ۳-۱۰ صحت سنجی الگوریتم مورد مطالعه

در پایان فصل مزبور برای صحت‌سنجی روند این پژوهش از مقاله صفری و ماهری [۷۸] استفاده شده است. در بخشی از تحقیق فوق الذکر، دو قاب ۴ و ۸ طبقه با هندسه ذیل در نظر گرفته شده‌اند که به وسیله الگوریتم ژنتیک موقعیت مهاربند ضربدری در آنها بهینه گردیده است. ارتفاع طبقات و طول دهانه به ترتیب سه و چهار متر می‌باشد. در مقاله ذکر شده تابع هدف مطابق رابطه (۳-۵۴) وزن در نظر گرفته شده است. همچنین قیود نیز مطابق روابط (۳-۵۵) می‌باشند.



شکل (۳-۱۳): مثالهای مورد مطالعه در مقاله صحت‌سنجی [۷۸]

$$\text{Minimize: } W=f(x) \quad (۵۴-۳)$$

$$\delta(x) \leq \delta_{\text{allow}}$$

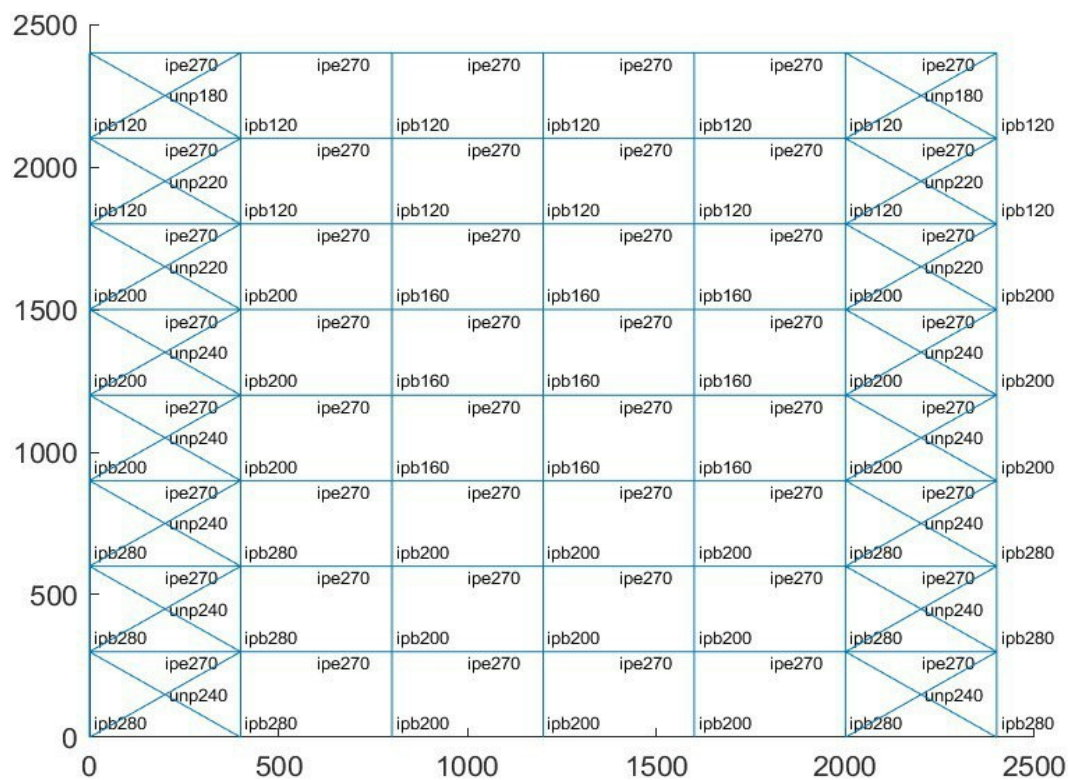
$$T(x) \leq T_{\text{allow}} \quad (۵۵-۳)$$

$$NL \leq N \leq NU$$

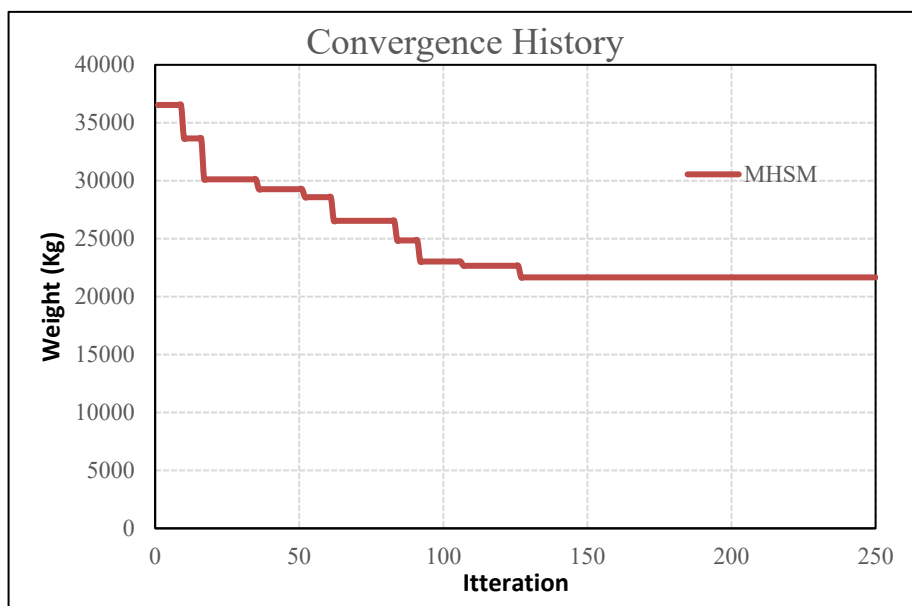
در روابط ذکر شده  $\delta_{\text{allow}}$  مقدار جابجایی نسبی مجاز،  $T_{\text{allow}}$  مقدار نیروی بالابرنده مجاز) حداکثر برابر با نیروی محوری ناشی از بار مرده بعلاوه درصدی از بار زنده) و  $NL$  و  $NU$  به ترتیب حد پایین و حد بالای تعداد دهانه‌های مهاربندی شده می‌باشد که در مقاله صفری و ماهر تعریف گردیده است [۷۸].

قابهای شکل (۳-۱۳) به کمک الگوریتم چندفرآینتکاری در این تحقیق نیز بهینه‌سازی شده‌اند تا بتوان صحت مدل‌سازی اپنسیس و همچنین پیاده‌سازی الگوریتم بهینه‌سازی را تضمین کرد. لازم به ذکر است که در تحقیق صفری و ماهر برخلاف تحقیق حاضر قید فرکانس در نظر گرفته نشده است و هدف اصلی تحقیق مذکور نیز بهینه‌سازی توپولوژی مهاربندها است و نه بهینه‌سازی مقاطع. البته برای طراحی مقاطع قابهای این مقاله، نویسندگان از آیین نامه AISC-ASD بهره برده‌اند.

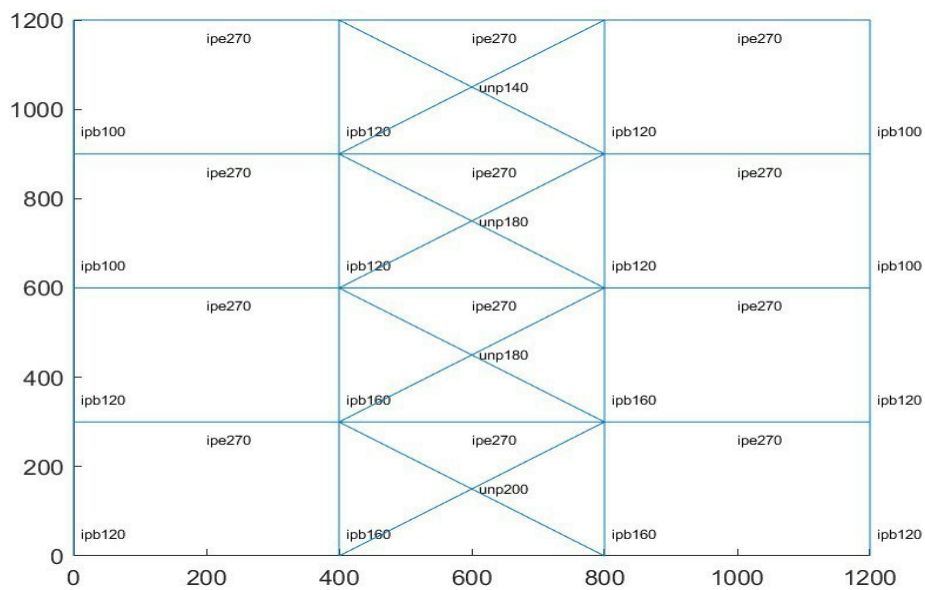
در این صحت‌سنجی نیز تمامی روابط و شرایط طبق مطالعه صفری و ماهر نوشته شده است. در ادامه نتیجه بهینه‌سازی قابهای مورد مطالعه به کمک روش تحقیق حاضر ارائه می‌شود.



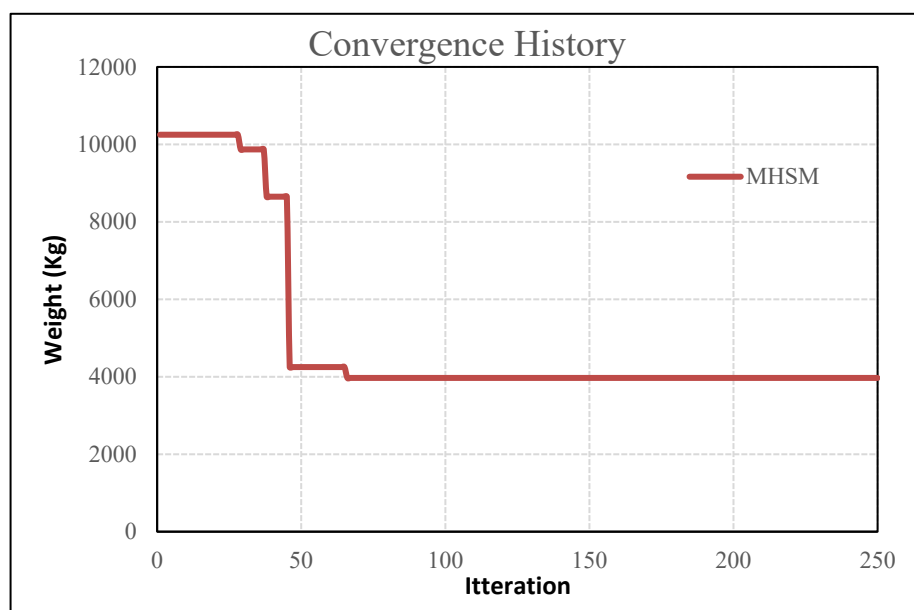
شکل (۳-۱۴): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند قاب ۸ طبقه صفری و ماهر



نمودار (۳-۱): تاریخچه همگرایی برای قاب ۸ طبقه صفری و ماهر



شکل (۳-۱۵): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند قاب ۴ طبقه صفری و ماهر



نمودار (۳-۲): تاریخچه همگرایی برای قاب ۴ طبقه صفری و ماهر

جدول (۳-۴): مقایسه بین نتایج بهینه‌سازی با روش الگوریتم چندفراتباری و روش الگوریتم ژنتیک برای انتخاب موقعیت بهینه مهاربند

| Parameter  | Method | Frame 1 (4 storey 3 spans) | Frame 2 (8 storey 6 spans) |
|------------|--------|----------------------------|----------------------------|
| Weight (T) | MHSM   | 3.97                       | 21.7                       |
|            | GA     | 4.42                       | 22.1                       |
| Drift (cm) | MHSM   | 1.22                       | 4.8                        |
|            | GA     | 1.42                       | 3.55                       |

نتایج مندرج در جدول فوق بیانگر این موضوع می‌باشد که الگوریتم این رساله به درستی نگارش و

اجرا گردیده است.

## فصل چهارم: یافته‌های پژوهش

## ۴-۱ مقدمه

در این فصل نتایج بهینه‌سازی قابهای رساله، با مشخصات ذکر شده در فصل سوم در قالب نمودار و شکل ارائه می‌شود. همانطور که در فصول قبل مطرح شد، در این تحقیق ۹ قاب با سه نوع مهاربند ضربدری، مهاربند هفتی-هشتی و مهاربند قطری برای اهداف ذکر شده مورد بررسی قرار گرفته است. در واقع به کمک الگوریتم MHSM و لینک دو نرم‌افزار MATLAB و OPENSEES در این تحقیق، ۲۷ دسته قاب بهینه‌سازی شده و جواب آنها استخراج گردیده است. لازم به ذکر است که ۳ دسته جواب مختص قابهای ۹ طبقه (با مهاربند هفتی-هشتی) برای الگوریتم فراابتکاری ACO نیز تکرار شده تا بتوان الگوریتم این تحقیق را با آن مقایسه نمود.

## ۴-۲ لیست مقاطع المانهای بهینه‌یابی شده

لیست مقاطع المانهای تیر، ستون و مهاربند مورد استفاده در بهینه‌سازی برای قابهای شش و نه طبقه از جدول اشتال (سری UNP,IPB,IPE) استخراج گردیده است. همچنین در قابهای پانزده طبقه نیز از لیست مقاطع تیر و مهاربند موجود در جدول اشتال (سری UNP,IPE) استفاده شده و لیست مقاطع ستونها هم شامل قوطی ساخته شده به ابعاد بیست، سی، چهل و پنجاه سانتی متر (با ضخامت ورق مشخص شده در نتایج قابها) می‌باشد.

## ۴-۳ وزن و تیپ‌بندی مقاطع قابهای بهینه‌یابی شده

در قسمت مقایسه و محاسبه وزن مدل‌ها با توجه به اینکه قابها از نوع ساده مهاربندی بوده و اتصالات نیز ساده می‌باشند و نه گیردار، بنابراین تیرها فقط برای بار مرده و زنده طرح گردیده‌اند. برای همه تیپ‌های بادبندی در قابهای نظیر هم سطح مقطع تیرها به مانند همدیگر لحاظ گردیده است و فقط المان-

های بادبندی و ستون‌ها برابر با نیروهای پخش گردیده در سازه، مورد بهینه‌یابی قرار گرفته‌اند. بدین‌سان، برای ارائه نتایج در ادامه این فصل، فقط اوزان بادبندها و ستونهای قابها در جداول و نمودارها لحاظ گردیده‌اند.

همچنین به لحاظ افزایش دقت در محاسبه تابع هدف برای هر طبقه یک تیپ مهاربند و برای هر محور یک تیپ ستون منظور گردیده است. تیپ‌بندی ستونها در ارتفاع نیز هر دو طبقه صورت پذیرفته است.

## ۴-۴ نحوه اجرای برنامه‌های نگارش شده

ترتیب ورود و اجرای دو نرم‌افزار MATLAB و OPENSEES برای بهینه‌سازی قابها در هر جزیره مطابق شکل (۳-۱۲) مشخص شده است. طبق شکل (۳-۱۲) در گام اول برای مدل‌سازی قابها در OPENSEES گامهای ذیل با برنامه‌نویسی انجام پذیرفته است: ۱: معرفی ابعاد مدل ۲: معرفی گره‌ها ۳: معرفی شرایط مرزی در تکیه‌گاهها ۴: معرفی مصالح ۵: معرفی و شماره‌گذاری المانها. در گام دوم هم برنامه متلب روند بهینه‌سازی (مطابق با کدهای مندرج در پیوست‌های ت تا چ) را مطابق الگوریتم شکل مزبور شروع می‌نماید و سپس تحلیل توسط اپنسیس (مطابق با کدهای مندرج در پیوست‌های الف و ب) انجام شده و این روند تا دریافت نتایج بهینه قابها در هر جزیره، برابر با الگوریتم مورد اشاره ادامه پیدا می‌کند. بدیهی است که الگوریتم شکل (۳-۱۲)، خود بخشی از الگوریتم پیشنهادی رساله جهت بهینه‌سازی نهایی قابها می‌باشد.

## ۴-۵ مقادیر پارامترهای به کار رفته در الگوریتم‌های فراابتکاری

### جزایر

ساختار انتخابی در الگوریتم‌های فراابتکاری این رساله (مندرج فصل سوم)، به شرح ذیل بیان می‌گردد. در الگوریتم ژنتیک در قسمت فرآیند انتخاب از روش رقابتی با سائز رقابت برابر با ۳، در قسمت عملگر پیوند از پیوند دو نقطه‌ای و در قسمت عملگر جهش از جهش با نرخ ثابت استفاده شده است. در الگوریتم ازدحام ذرات از حالت اول (مندرج در فصل سوم) برای ضرایب  $C_1$  و  $C_2$  استفاده شده است که این دو پارامتر به صورت نزولی در فرآیند بهینه‌سازی تغییر می‌نمایند. برای الگوریتم جستجو ذرات باردار نیز پارامتر بازه زمانی مقدار واحد (یک) انتخاب شده است. قابل توجه می‌باشد که پارامتر بازه زمانی در روند بهینه‌یابی این الگوریتم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. همچنین مطابق رابطه (۳-۳۲) پارامتر مقدار ثابت در هر بازه مهاجرت ( $k$ ) نیز برابر با ۱۰ منظور گردیده است.

در این تحقیق برای مشخص نمودن پارامترهای الگوریتم‌های جزایر، حساسیت قابها نسبت به تغییر مقادیر پارامترهای الگوریتم‌ها تحت بررسی قرار گرفته است. در ابتدا برای هر یک از پارامترها مقدار نرمالی را با توجه به تحقیقات انجام پذیرفته در گذشته و مقدارهای توصیه شده برمی‌گزینیم. سپس با ثابت قرار دادن پارامترها و تغییر هر یک از آنها، گستره قابل قبول هر پارامتر را محاسبه می‌نمائیم. در جداول (۴-۱) تا (۴-۴) مقادیر پارامترهای استفاده شده در الگوریتم‌ها برای بهینه‌یابی قابهای تحقیق معرفی شده است.

جدول (۴-۱): پارامترهای الگوریتم ژنتیک

| پارامترها         | مقدار  |
|-------------------|--------|
| جهش               | ۰/۰۵   |
| ادغام             | ۰/۸۵   |
| تکرار (تعداد نسل) | ۱۰۰-۵۰ |
| اندازه جمعیت      | ۱۵۰    |

جدول (۴-۲): پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات

| پارامترها                        | مقدار |
|----------------------------------|-------|
| C1                               | ۲     |
| C2                               | ۲     |
| W1 (کمینه روزرسانی<br>سرعت ذره)  | ۰/۴   |
| W2 (بیشینه روزرسانی<br>سرعت ذره) | ۰/۹   |
| تکرار                            | ۵۰    |
| اندازه جمعیت                     | ۱۵۰   |

جدول (۴-۳): پارامترهای الگوریتم جستجو ذرات باردار

| پارامترها     | مقدار                      |
|---------------|----------------------------|
| *شعاع بار ذره | $a=0.1 \times \max(Lb-Ub)$ |
| rand          | [۰ و ۱]                    |
| تکرار         | ۵۰                         |
| اندازه جمعیت  | ۱۵۰                        |

\*این پارامتر بستگی به محدوده متغیرهای طراحی دارد و می‌تواند واحد نیز فرض شود.

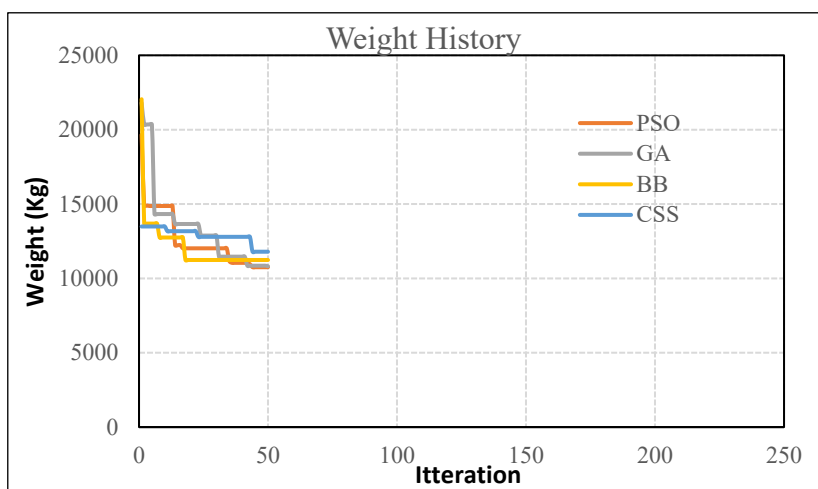
جدول (۴-۴): پارامترهای الگوریتم بیگ بنگ- بیگ کرانچ

| پارامترها    | مقدار   |
|--------------|---------|
| r            | [۰ و ۱] |
| تکرار        | ۵۰      |
| اندازه جمعیت | ۱۵۰     |

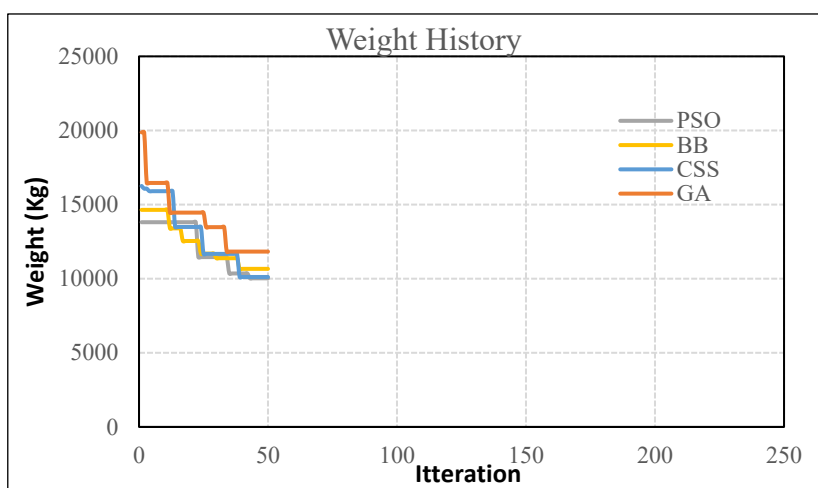
## ۴-۶ تاریخچه وزنی قابها در مرحله وقفه مهاجرت

با توجه به اینکه هر جزیره متناسب با مرجع مربوط به خود زیر جمعیت‌هایی تولید می‌نماید و این پروسه نیز به تعداد وقفه مهاجرت صورت می‌پذیرد لذا نخست نتایج ۵۰ بار وقفه مهاجرت در قابهای با مهاربندی ضربدری (برای ۳ حالت)، مهاربندی قطری (برای ۳ حالت) و مهاربندی هفتی- هشتی یک در میان (برای ۳ حالت) در نمودارهای (۴-۱) الی (۴-۹) و به فرم تاریخچه وزنی برای الگوریتم‌های ژنتیک،

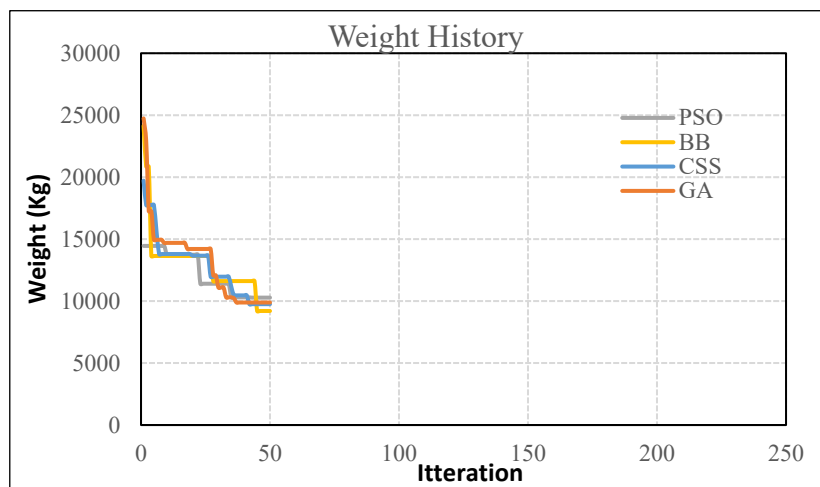
ازدحام ذرات، بیگ-ببگ-کرانچ و جستجو ذرات باردار ارائه می‌گردد. قابل ذکر است از این نتایج برای تشکیل جزیره برتر استفاده می‌گردد. به عنوان مثال طبق این نتایج در قاب ۶ طبقه پنج دهانه الگوریتم بیگ-ببگ-کرانچ به عنوان جزیره برتر انتخاب می‌شود و بخشی از طرحهای جزایر دیگر به این جزیره منتقل می‌گردد. در ادامه بعد از ارائه نمودارها میانگین وقفه مهاجرت برای هر ۳ حالت قابها ذکر می‌گردد.



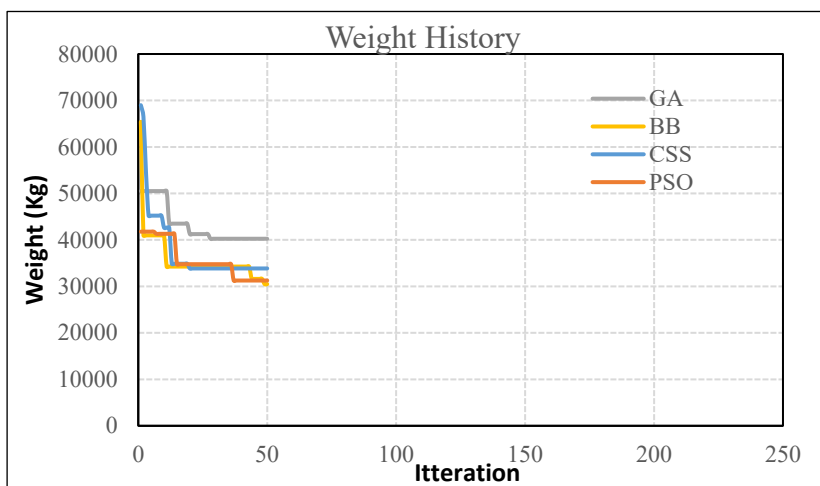
نمودار (۱-۴): تاریخچه وزنی در ۵۰ بار وقفه مهاجرت برای قاب ۶ طبقه ۳ دهانه با مهاربند هفتی-هشتی



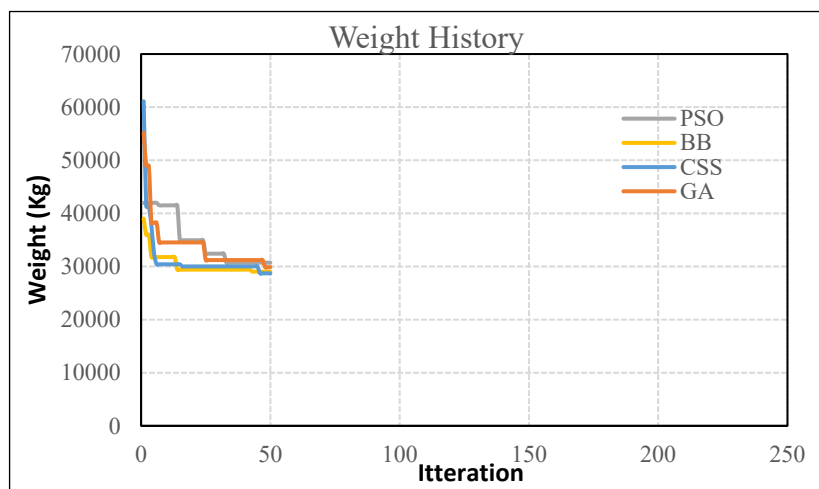
نمودار (۲-۴): تاریخچه وزنی در ۵۰ بار وقفه مهاجرت برای قاب ۶ طبقه ۴ دهانه با مهاربند هفتی-هشتی



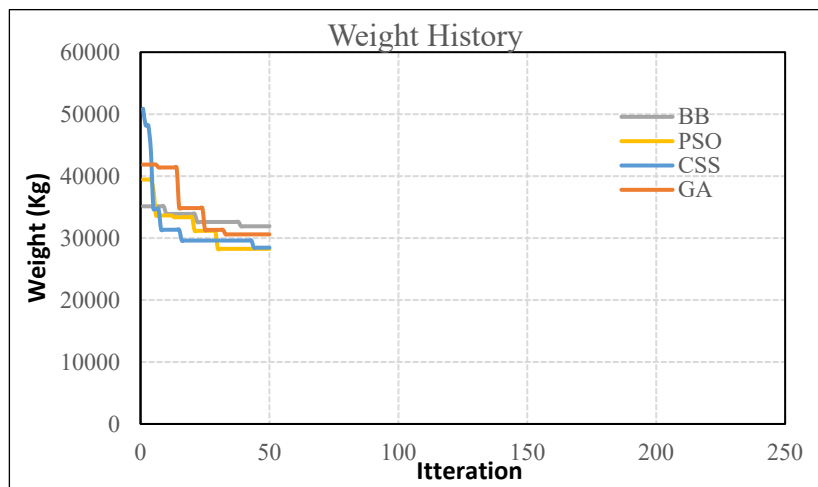
نمودار (۳-۴): تاریخچه وزنی در ۵۰ بار وقفه مهاجرت برای قاب ۶ طبقه ۵ دهانه با مهاربند هفتی-هشتی



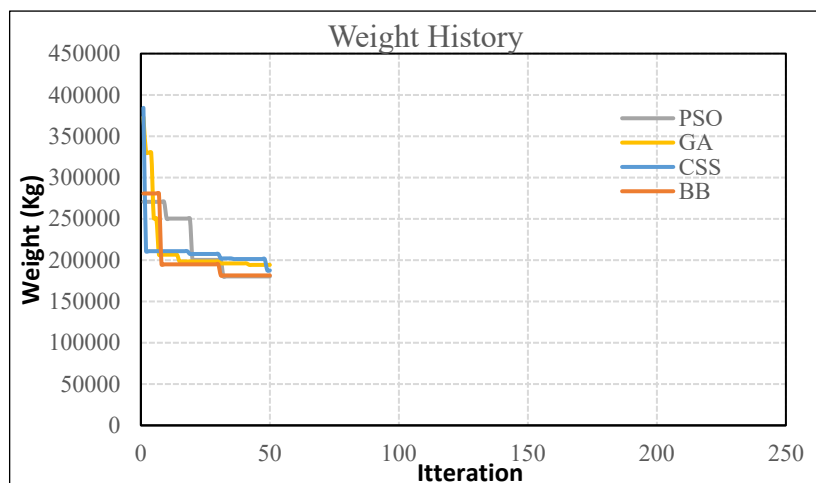
نمودار (۴-۴): تاریخچه وزنی در ۵۰ بار وقفه مهاجرت برای قاب ۹ طبقه ۴ دهانه با مهاربند ضربدری



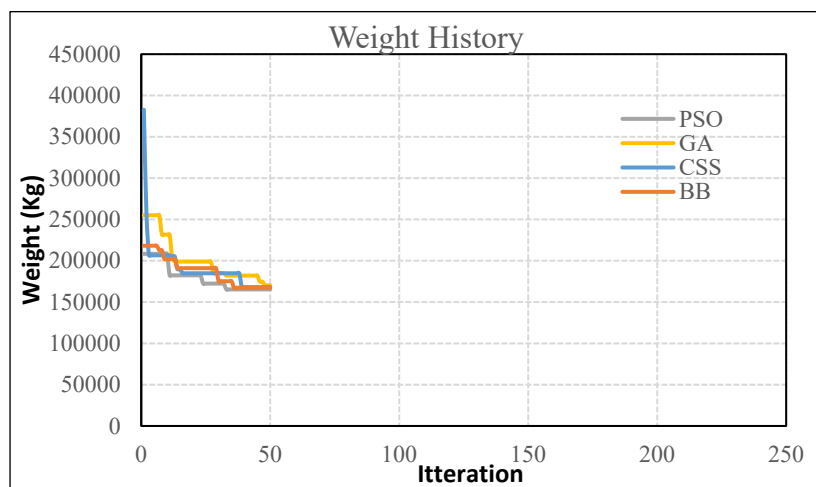
نمودار (۵-۴): تاریخچه وزنی در ۵۰ بار وقفه مهاجرت برای قاب ۹ طبقه ۵ دهانه با مهاربند ضربدری



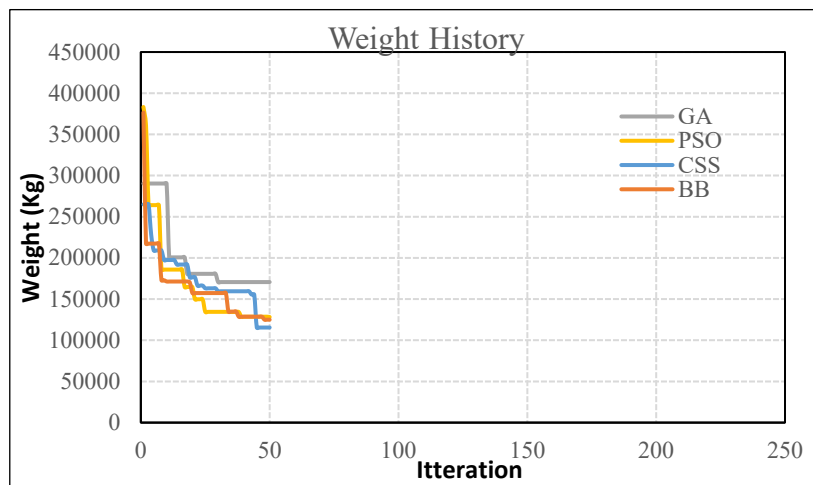
نمودار (۴-۶): تاریخچه وزنی در ۵۰ بار وقفه مهاجرت برای قاب ۹ طبقه ۶ دهانه با مهاربند ضربدری



نمودار (۴-۷): تاریخچه وزنی در ۵۰ بار وقفه مهاجرت برای قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه با مهاربند قطری



نمودار (۴-۸): تاریخچه وزنی در ۵۰ بار وقفه مهاجرت برای قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه با مهاربند قطری



نمودار (۴-۹): تاریخچه وزنی در ۵۰ بار وقفه مهاجرت برای قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه با مهاربند قطری

از نمودارهای (۴-۱) الی (۴-۹) می‌توان نتیجه گرفت که میانگین وزن در ۵۰ بار وقفه مهاجرت قابهای با مهاربندی هفتی- هشتی کوتاه مرتبه در الگوریتم ژنتیک برابر با ۱۳/۵ تن، الگوریتم ازدحام ذرات برابر با ۱۲/۲ تن، الگوریتم بیگ- بنگ- بیگ کرانچ ۱۲/۴ تن و برای الگوریتم جستجو ذرات باردار برابر با ۱۲/۷ تن می‌باشد.

در قابهای میان مرتبه با مهاربندی ضربدری میانگین فوق برای الگوریتم ژنتیک برابر با ۳۷/۲ تن، الگوریتم ازدحام ذرات برابر با ۳۳/۹ تن، الگوریتم بیگ- بنگ- بیگ کرانچ ۳۳ تن و برای الگوریتم جستجو ذرات باردار برابر با ۳۳/۵ تن می‌باشد.

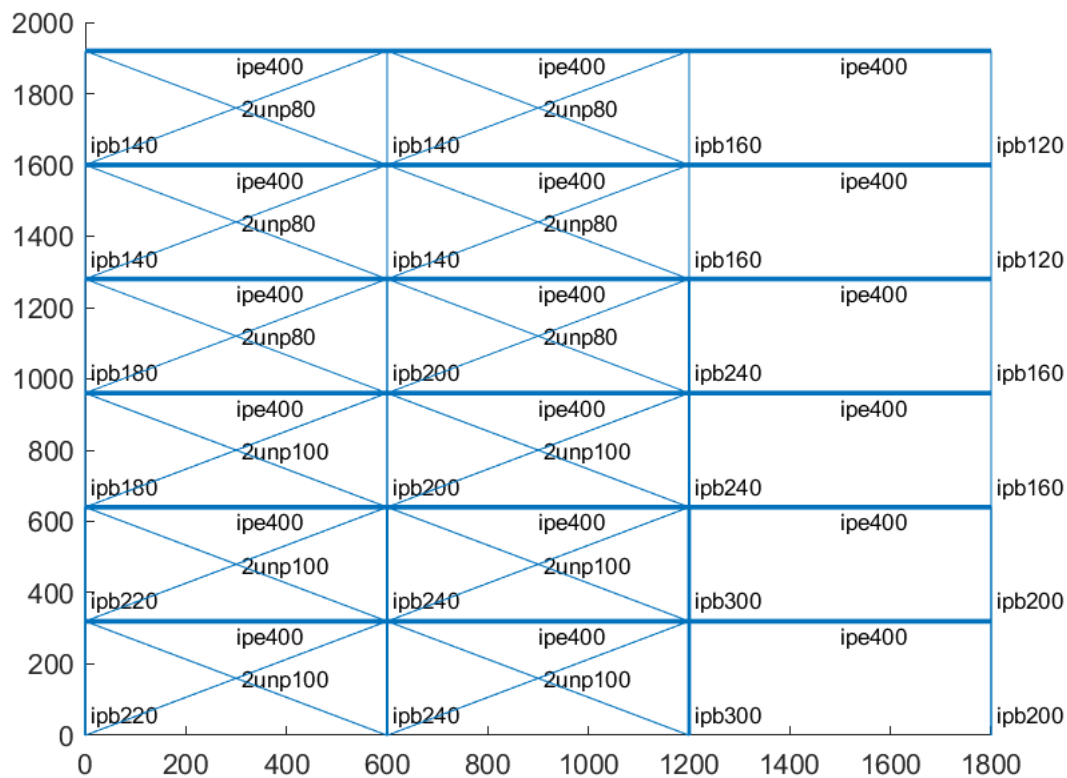
در قابهای بلند مرتبه با مهاربندی قطری نیز این میانگین برای الگوریتم ژنتیک برابر با ۱۹۸/۳ تن، الگوریتم ازدحام ذرات برابر با ۱۸۷/۱ تن، الگوریتم بیگ- بنگ- بیگ کرانچ ۱۸۳/۳ تن و برای الگوریتم جستجو ذرات باردار برابر با ۱۹۱/۳ تن می‌باشد.

قابل ذکر است چنانکه میانگین اعداد ذکر شده برای همه قابها محاسبه گردد دو الگوریتم ازدحام ذرات و بیگ- بنگ- بیگ دارای میانگین وزن کمتری در ۵۰ بار تکرار خود بوده‌اند.

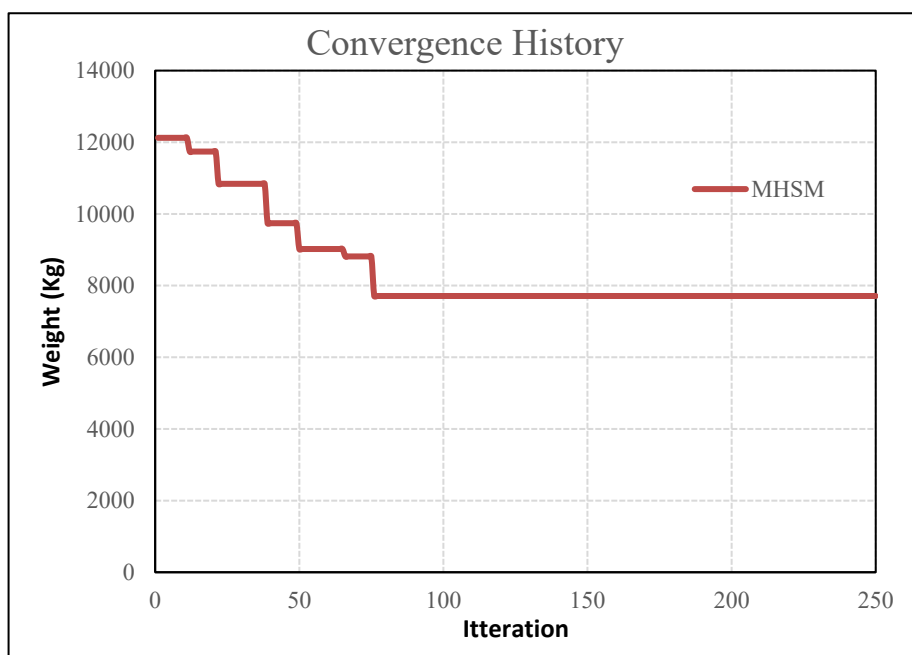
در ادامه این فصل نتایج بهینه‌سازی قابهای رساله در قالب شکل (شامل مقاطع قابها، محل بهینه و تعداد دهانه مهاربند ضربدری و مهاربند هفتی- هشتی و همچنین محل بهینه و تعداد دهانه مهاربند قطری)

و نمودار (شامل تاریخچه همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی در قابها، نسبت تنش المانهای مهاربند و ستون، نسبت جابجایی نسبی به جابجایی نسبی مجاز و نسبت فرکانس بار به فرکانس قاب) ارائه می‌گردد. همچنین در انتهای فصل با نرم افزار ایتبس نتایج در چندین قاب مورد صحت‌سنجی مجدد قرار می‌پذیرد و برتری روش این تحقیق در بهینه‌سازی نسبت به طراحی و بهینه‌یابی سازه‌ها با نرم‌افزارهای عرف محاسباتی (سپ یا ایتبس) در جامعه مهندسين مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

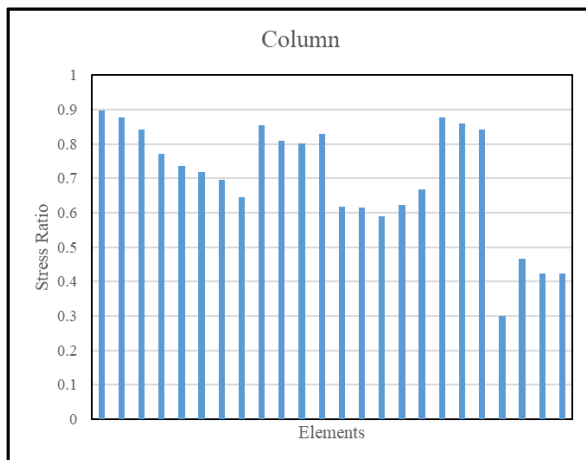
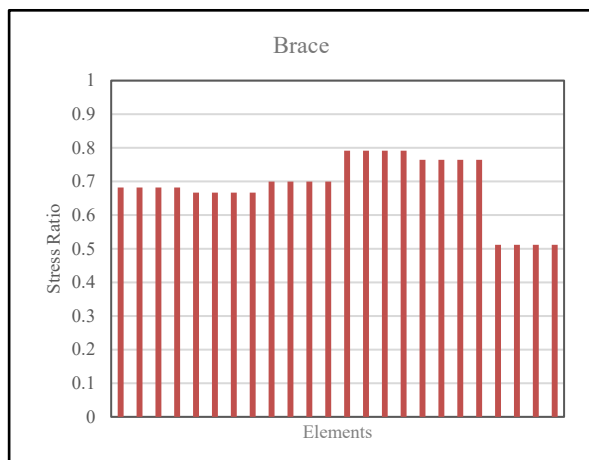
#### ۷-۴ نتایج قاب ۶ طبقه (سه دهانه و مهاربند ضربدری)



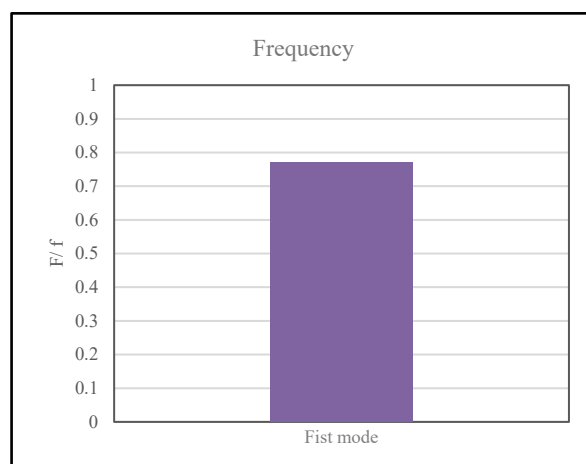
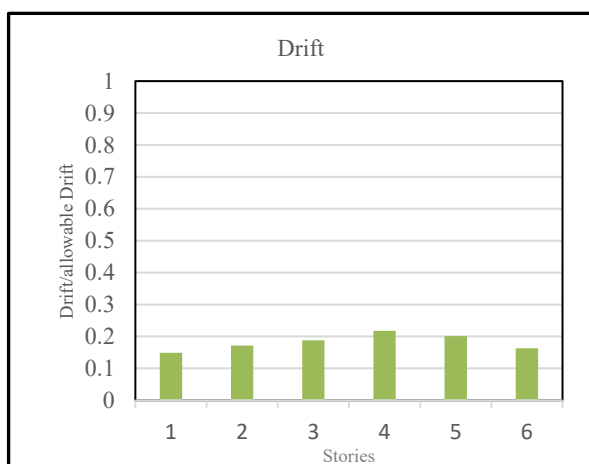
شکل (۴-۱): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند ضربدری در قاب ۶ طبقه ۳ دهانه



نمودار (۴-۱۰): تاریخچه همگرایی برای قاب ۶ طبقه ۳ دهانه با مهاربند ضربدری

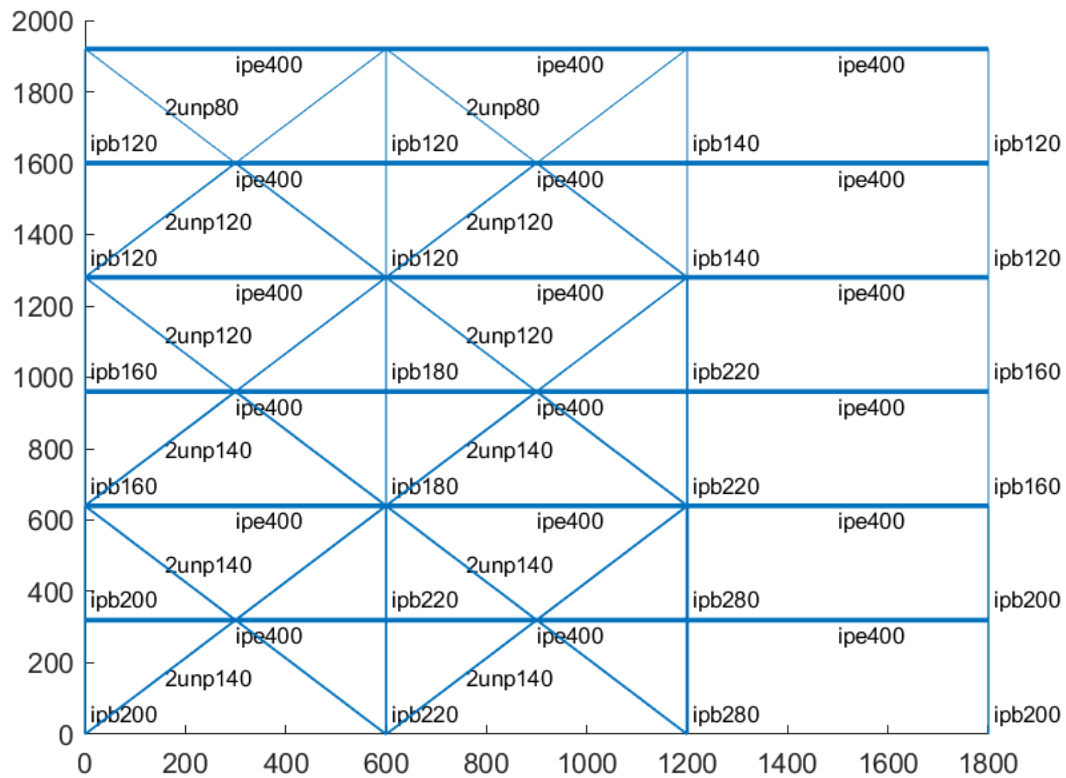


نمودار (۴-۱۱): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۶ طبقه ۳ دهانه با مهاربند ضربدری

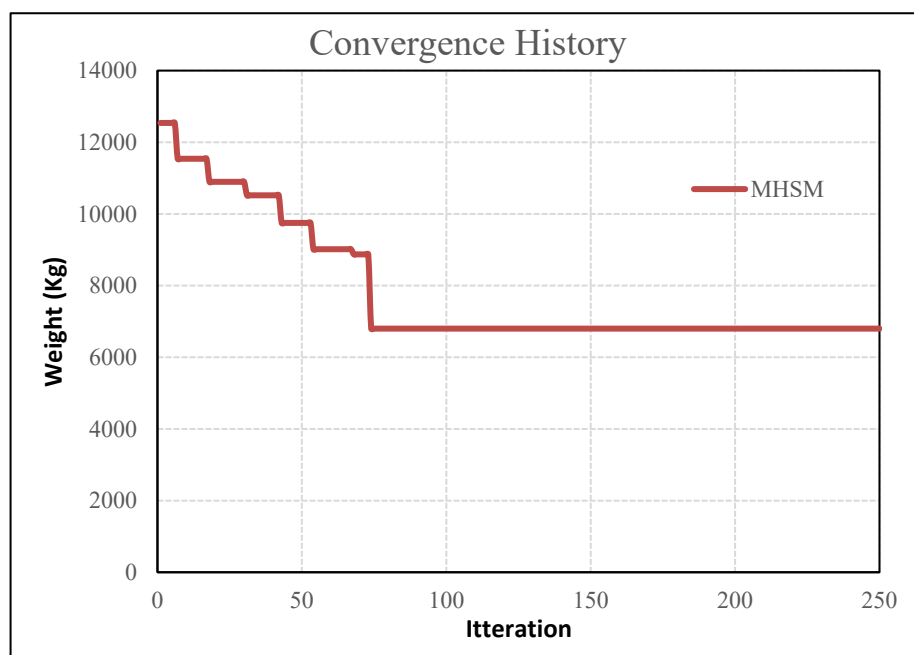


نمودار (۴-۱۲): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۶ طبقه ۳ دهانه با مهاربند ضربدری

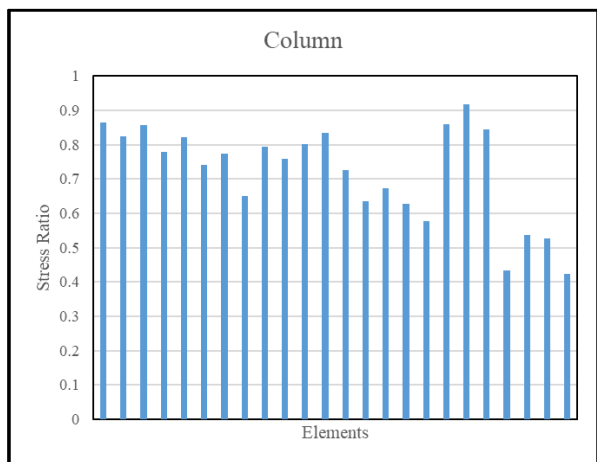
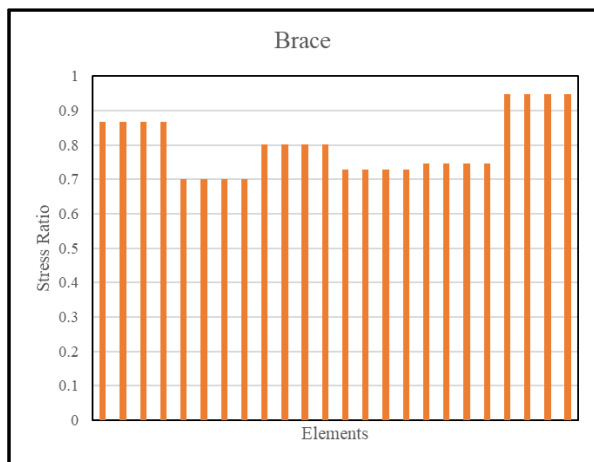
#### ۴-۸ نتایج قاب ۶ طبقه (سه دهانه و مهاربند هفتی- هشتی)



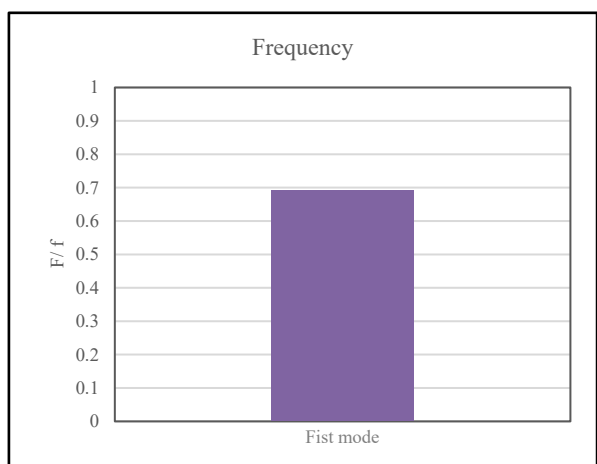
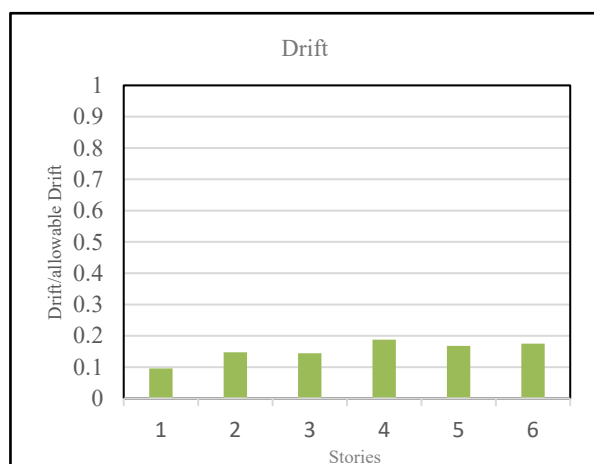
شکل (۴-۲): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند هفتی- هشتی در قاب ۶ طبقه ۳ دهانه



نمودار (۴-۱۳): تاریخچه همگرایی برای قاب ۶ طبقه ۳ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی

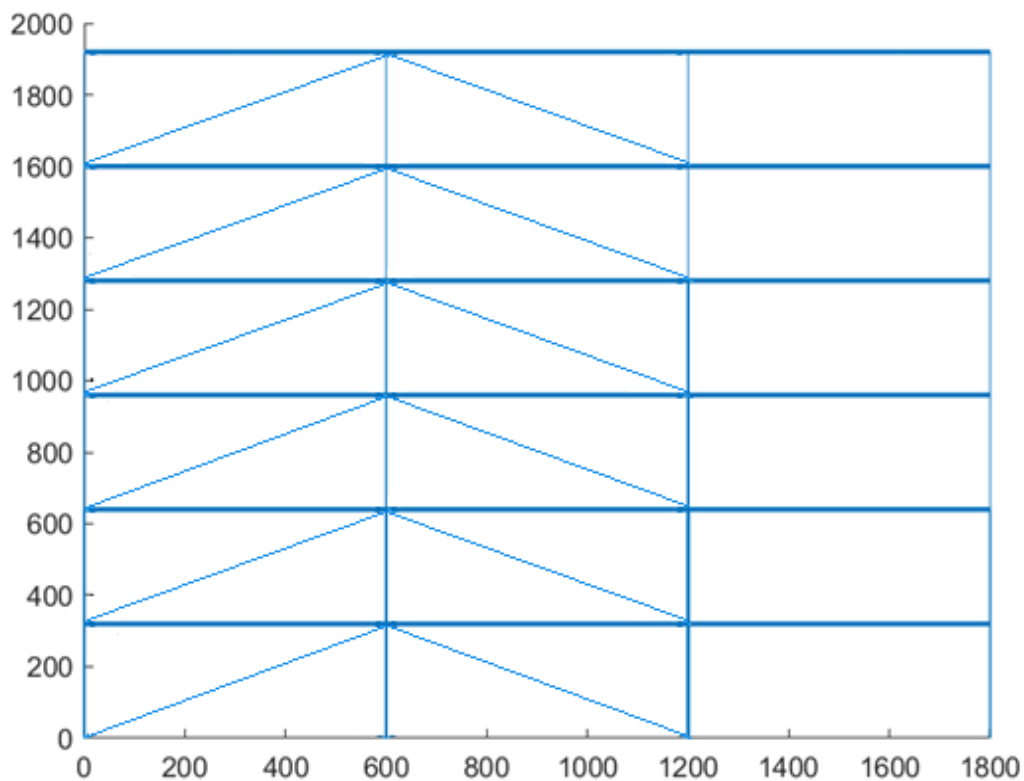


نمودار (۴-۱۴): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۶ طبقه ۳ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی

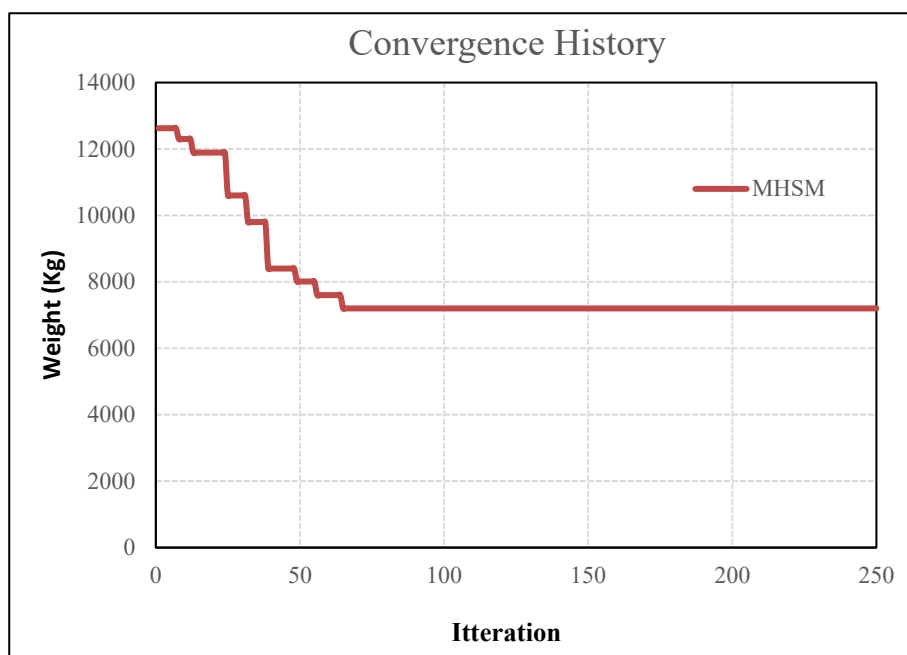


نمودار (۴-۱۵): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۶ طبقه ۳ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی

#### ۹-۴ نتایج قاب ۶ طبقه (سه دهانه و مهاربند قطری)

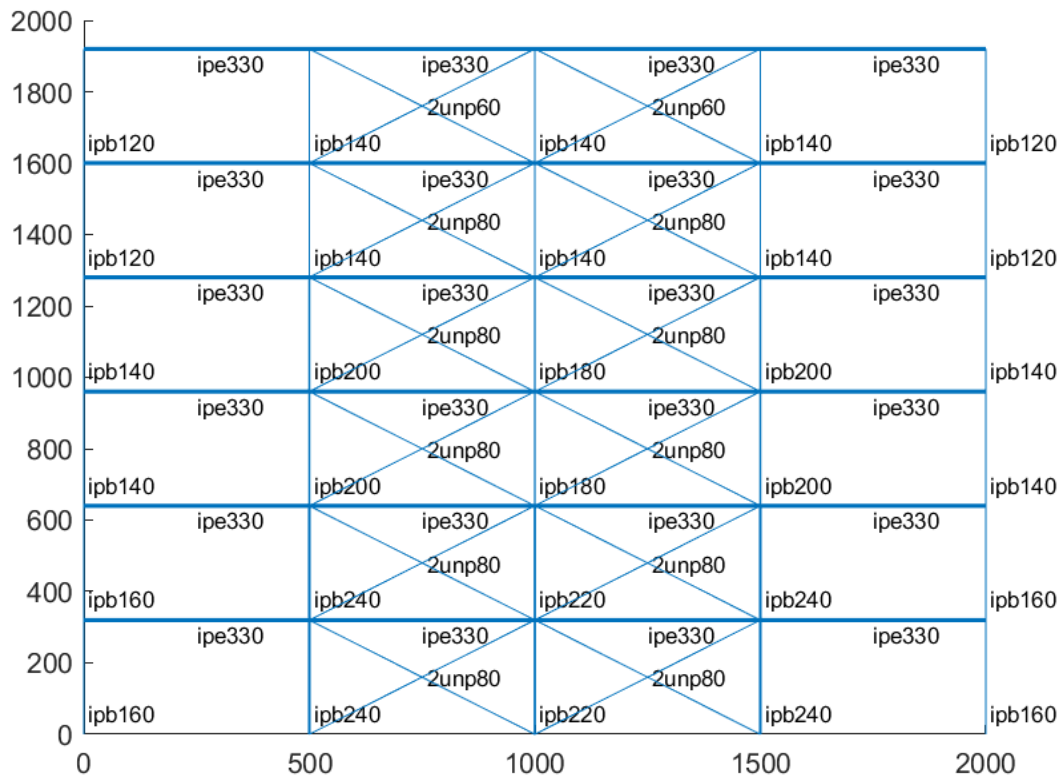


شکل (۳-۴): موقعیت بهینه مهاربند قطری در قاب ۶ طبقه ۳ دهانه

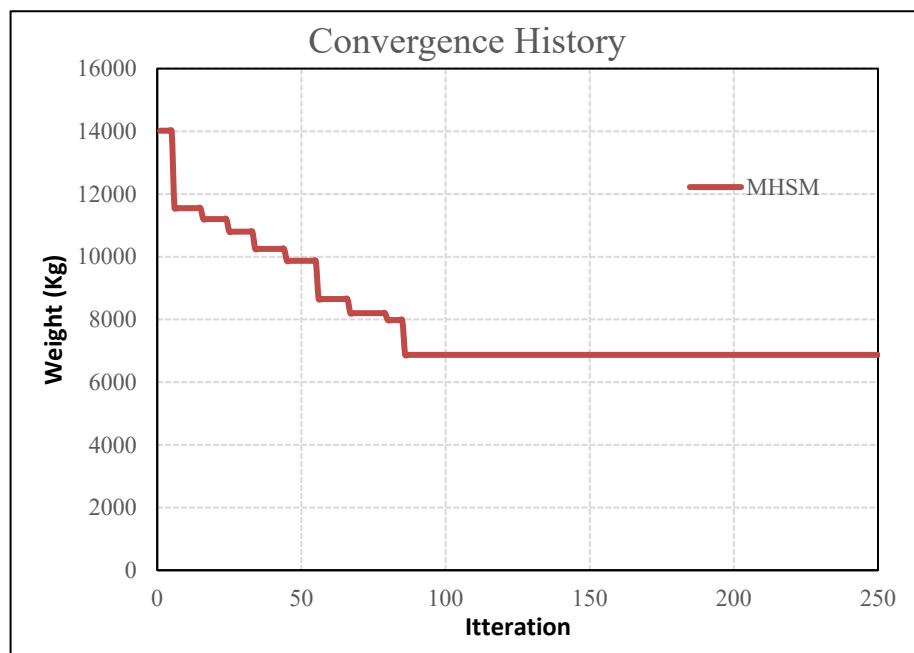


نمودار (۴-۱۶): تاریخچه همگرایی برای قاب ۶ طبقه ۳ دهانه با مهاربند قطری

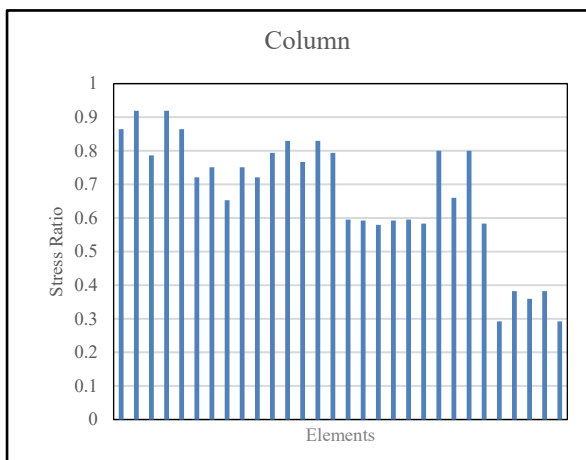
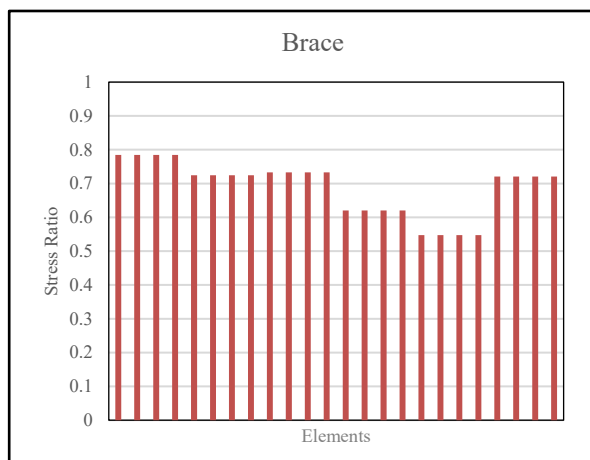
#### ۴-۱۰ نتایج قاب ۶ طبقه (چهار دهانه و مهاربند ضربدری)



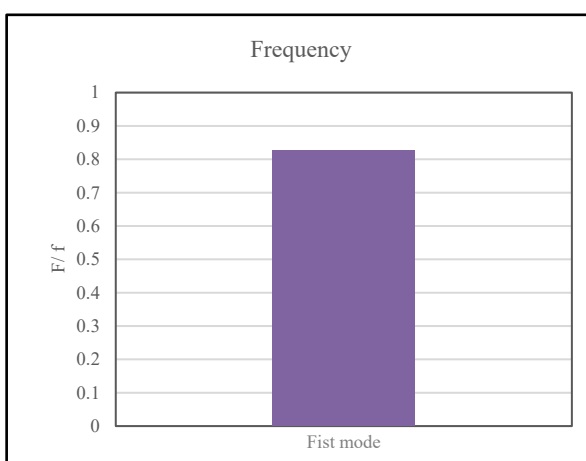
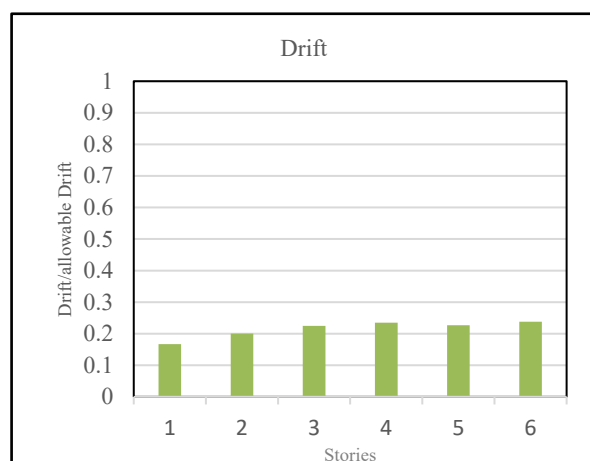
شکل (۴-۴): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند ضربدری در قاب ۶ طبقه ۴ دهانه



نمودار (۴-۱۷): تاریخچه همگرایی برای قاب ۶ طبقه ۴ دهانه با مهاربند ضربدری

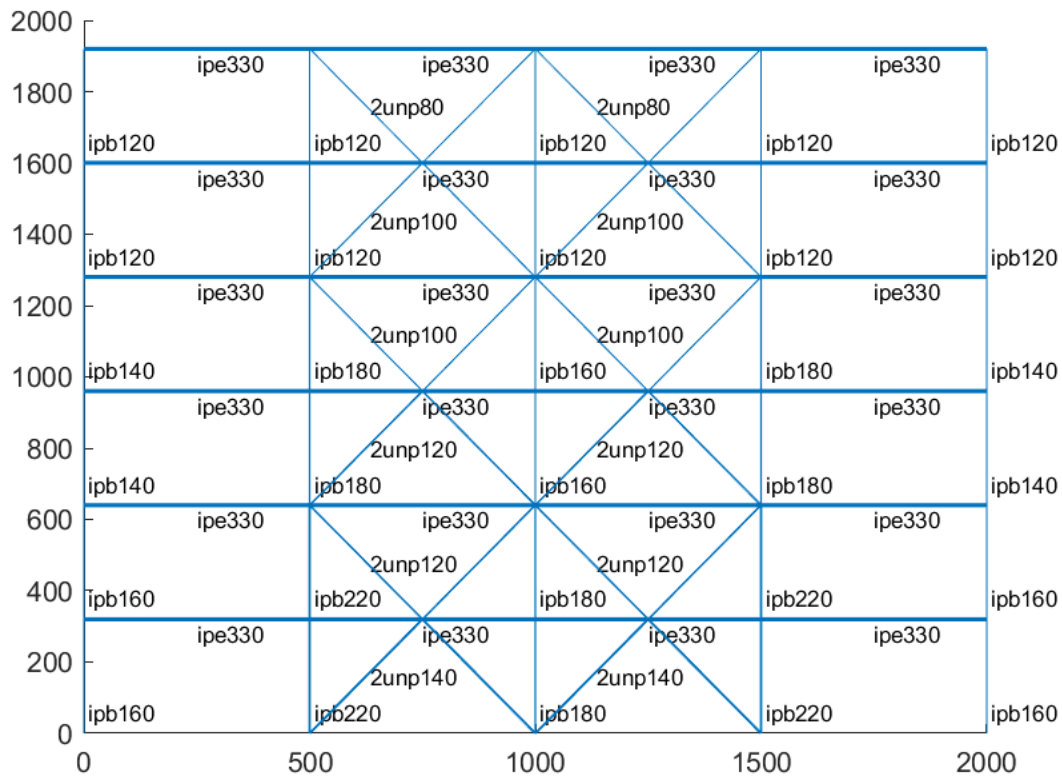


نمودار (۴-۱۸): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۶ طبقه ۴ دهانه با مهاربند ضربدری

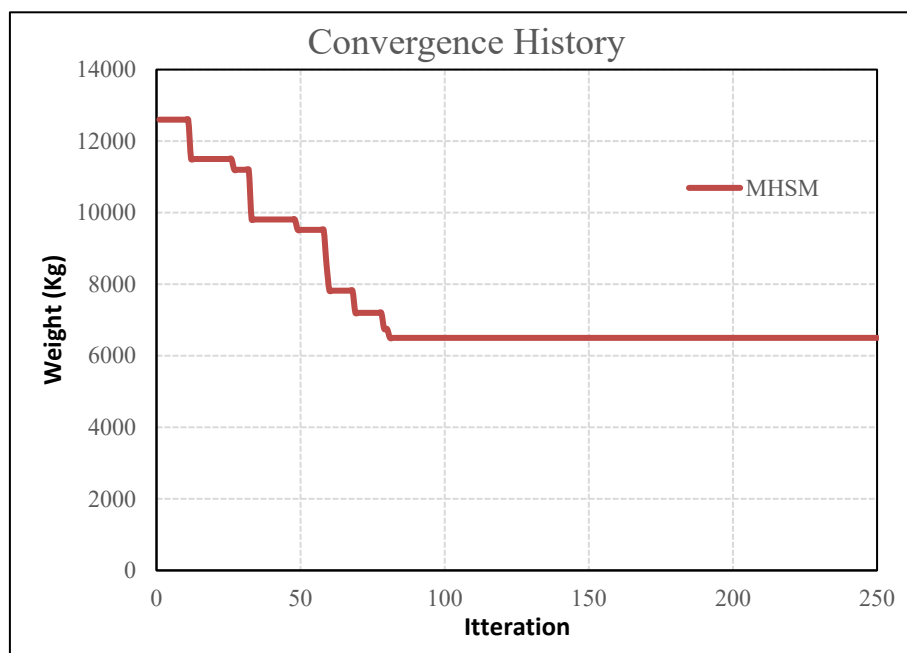


نمودار (۴-۱۹): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۶ طبقه ۴ دهانه با مهاربند ضربدری

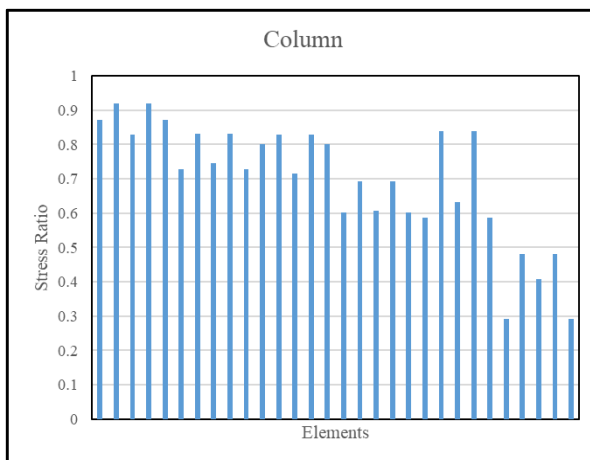
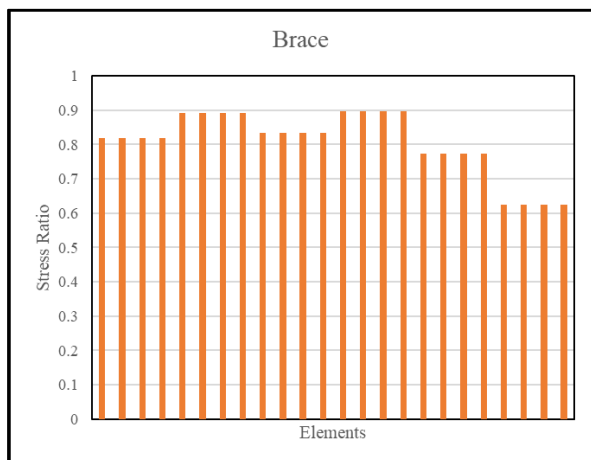
#### ۴-۱۱ نتایج قاب ۶ طبقه (چهار دهانه و مهاربند هفتی- هشتی)



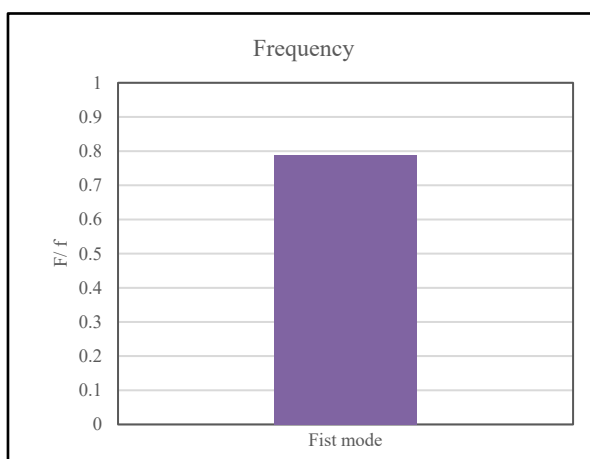
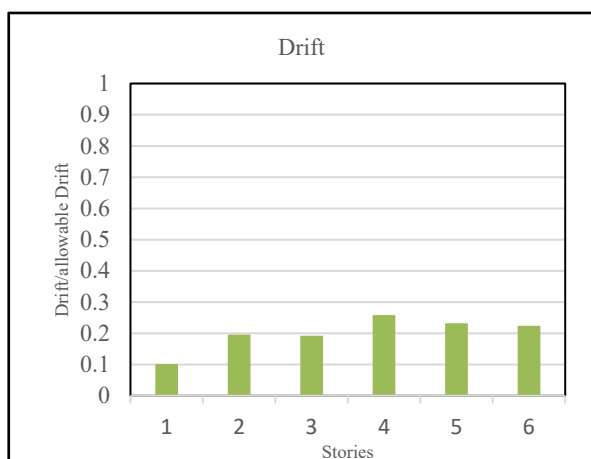
شکل (۴-۵): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند هفتی- هشتی در قاب ۶ طبقه ۴ دهانه



نمودار (۴-۲۰): تاریخچه همگرایی برای قاب ۶ طبقه ۴ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی

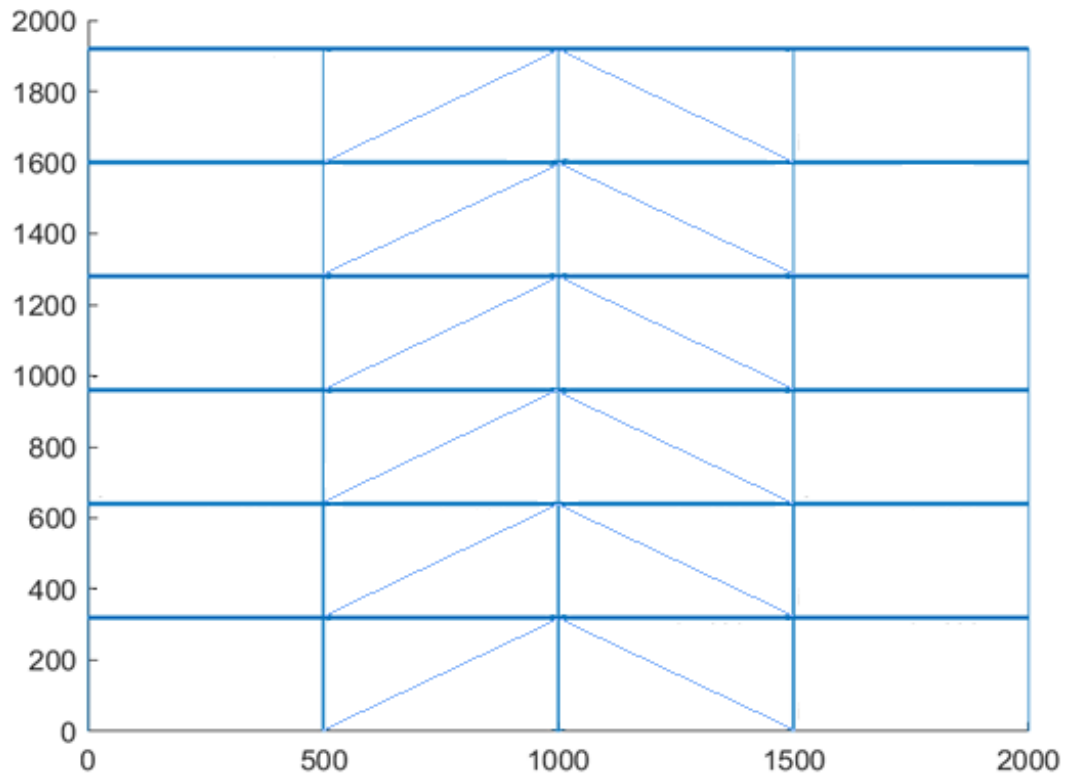


نمودار (۴-۲۱): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۶ طبقه ۴ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی

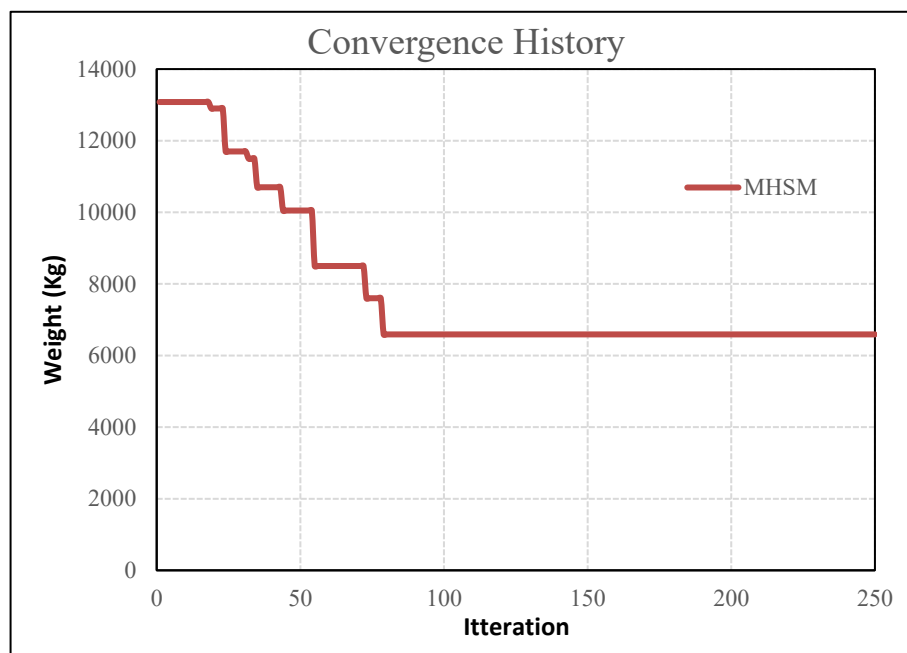


نمودار (۴-۲۲): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۶ طبقه ۴ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی

## ۴-۱۲ نتایج قاب ۶ طبقه (چهار دهانه و مهاربند قطری)

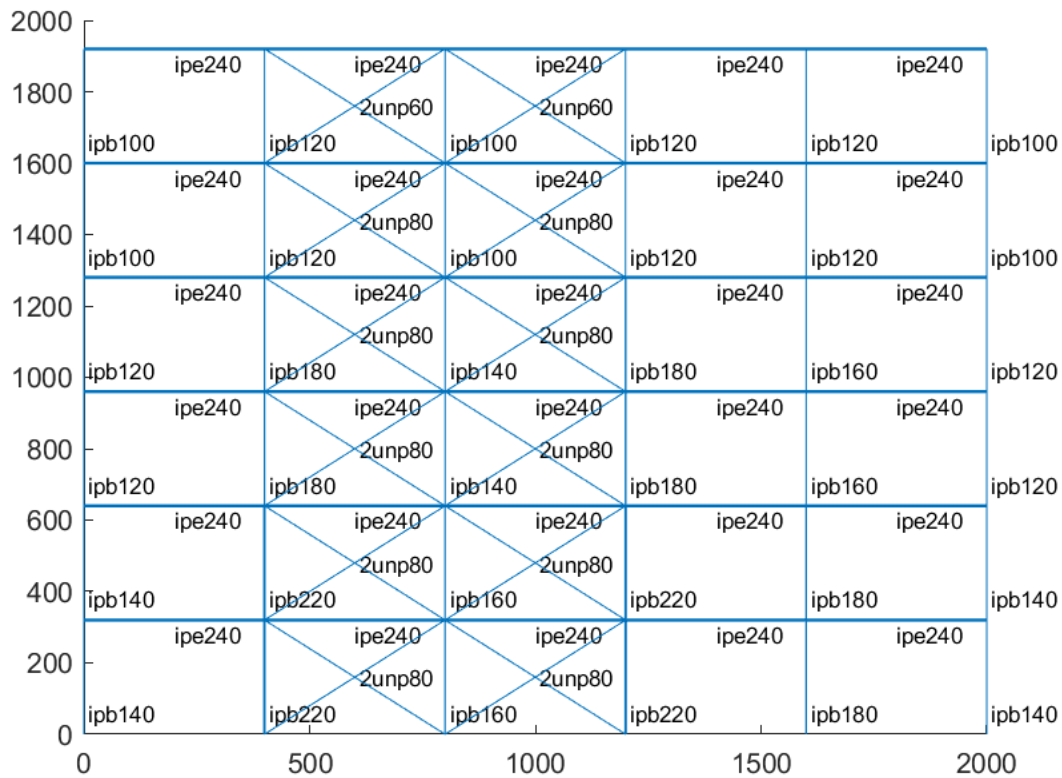


شکل (۴-۶): موقعیت بهینه مهاربند قطری در قاب ۶ طبقه ۴ دهانه

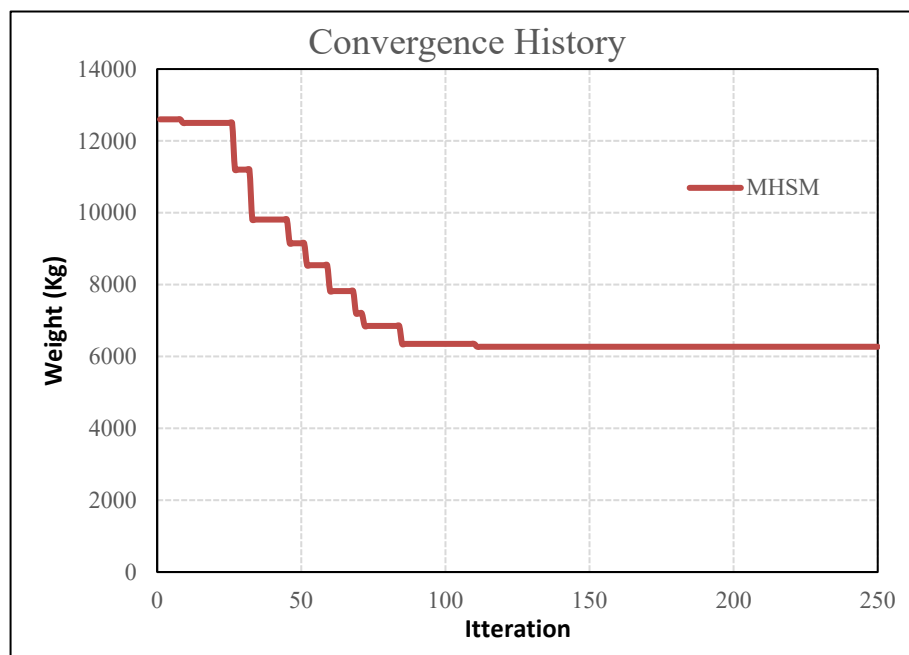


نمودار (۴-۲۳): تاریخچه همگرایی برای قاب ۶ طبقه ۴ دهانه با مهاربند قطری

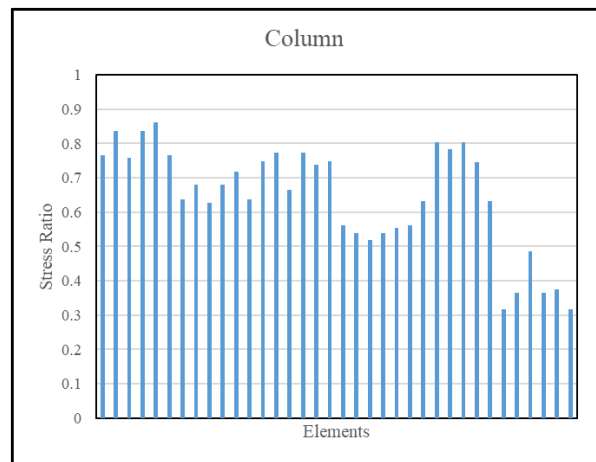
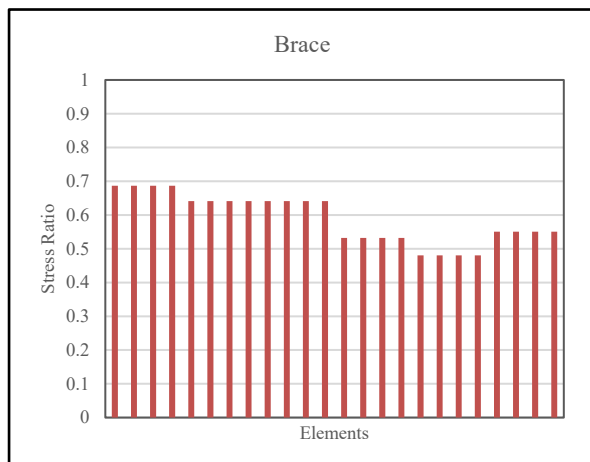
### ۱۳-۴ نتایج قاب ۶ طبقه (پنج دهانه و مهاربند ضربدری)



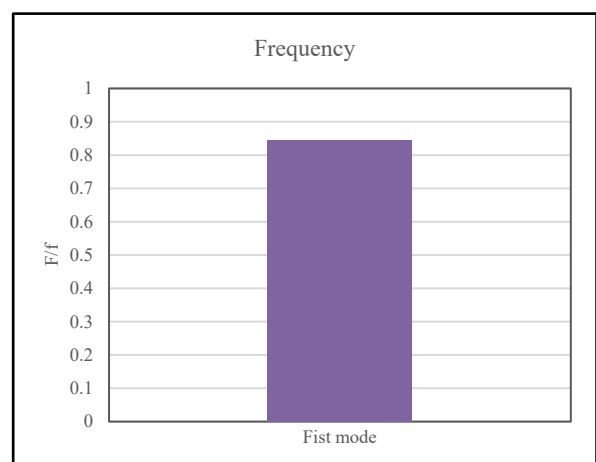
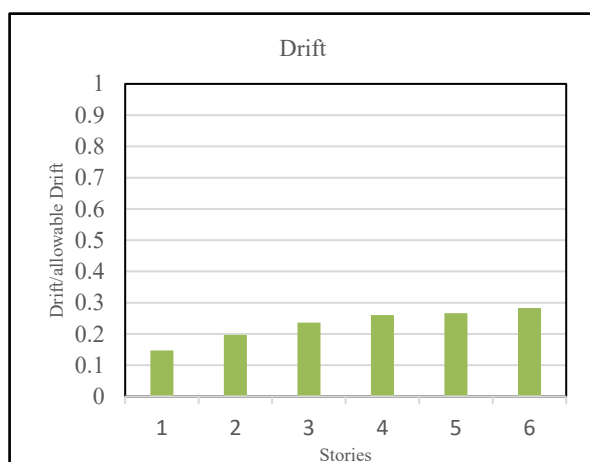
شکل (۷-۴): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند ضربدری در قاب ۶ طبقه ۵ دهانه



نمودار (۲۴-۴): تاریخچه همگرایی برای قاب ۶ طبقه ۵ دهانه با مهاربند ضربدری

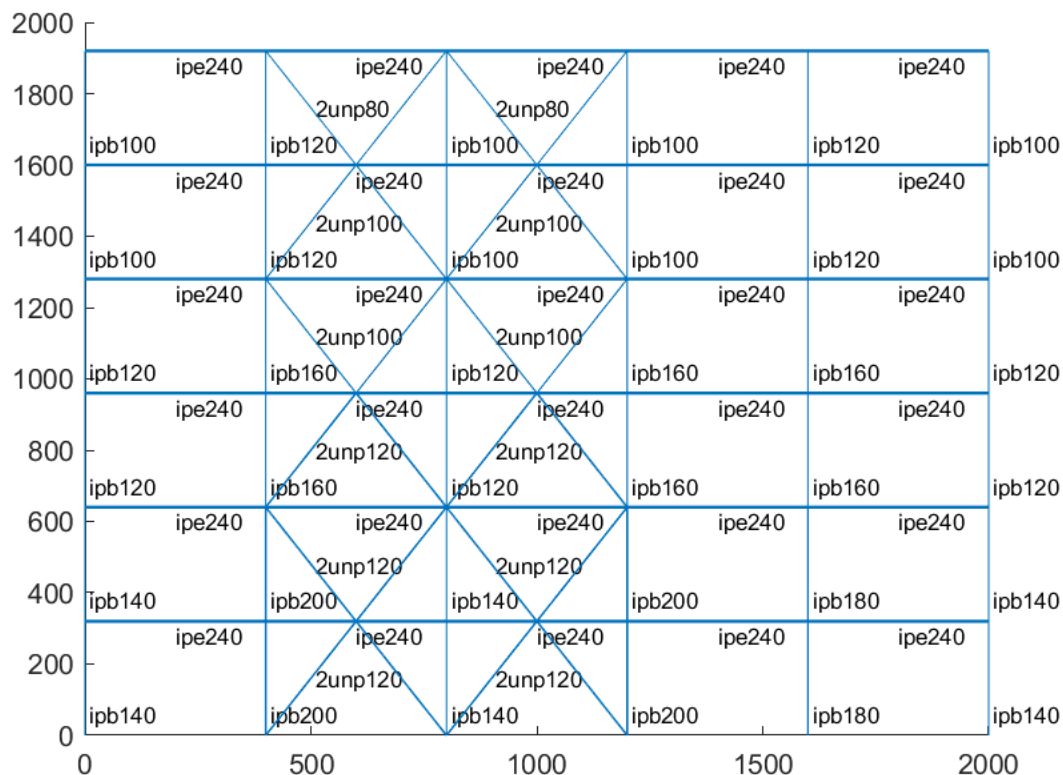


نمودار (۴-۲۵): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۶ طبقه ۵ دهانه با مهاربند ضربدری

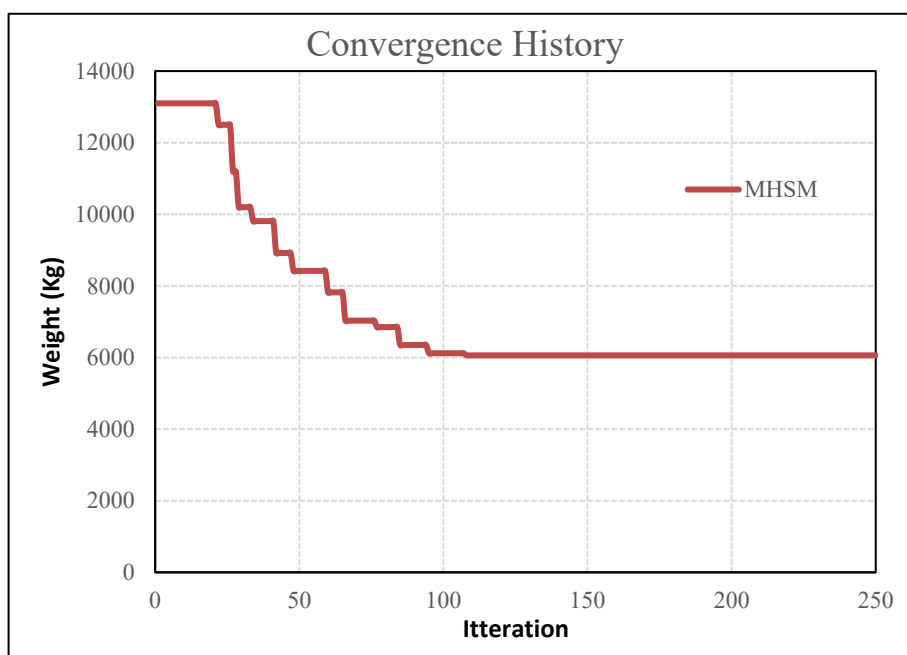


نمودار (۴-۲۶): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۶ طبقه ۵ دهانه با مهاربند ضربدری

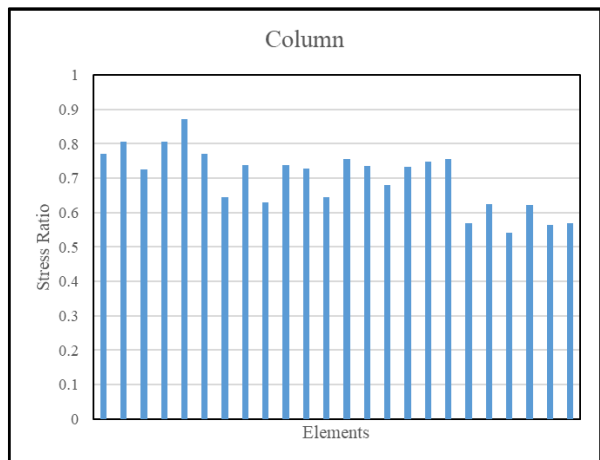
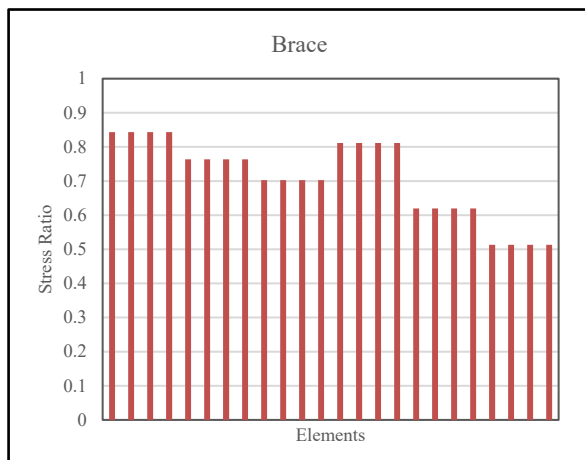
#### ۴-۱۴ نتایج قاب ۶ طبقه (پنج دهانه و مهاربند هفتی- هشتی)



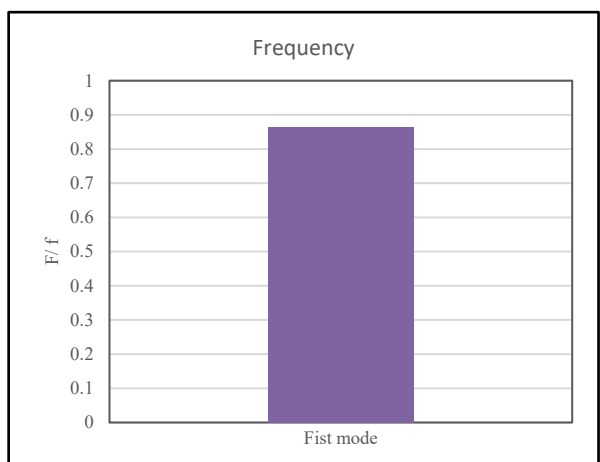
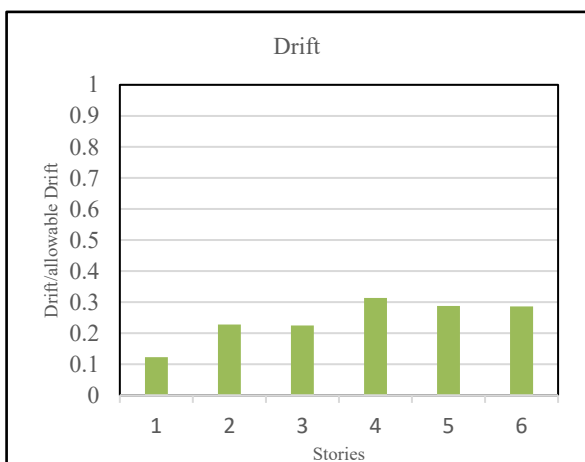
شکل (۴-۸): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند هفتی- هشتی در قاب ۶ طبقه ۵ دهانه



نمودار (۴-۲۷): تاریخچه همگرایی برای قاب ۶ طبقه ۵ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی

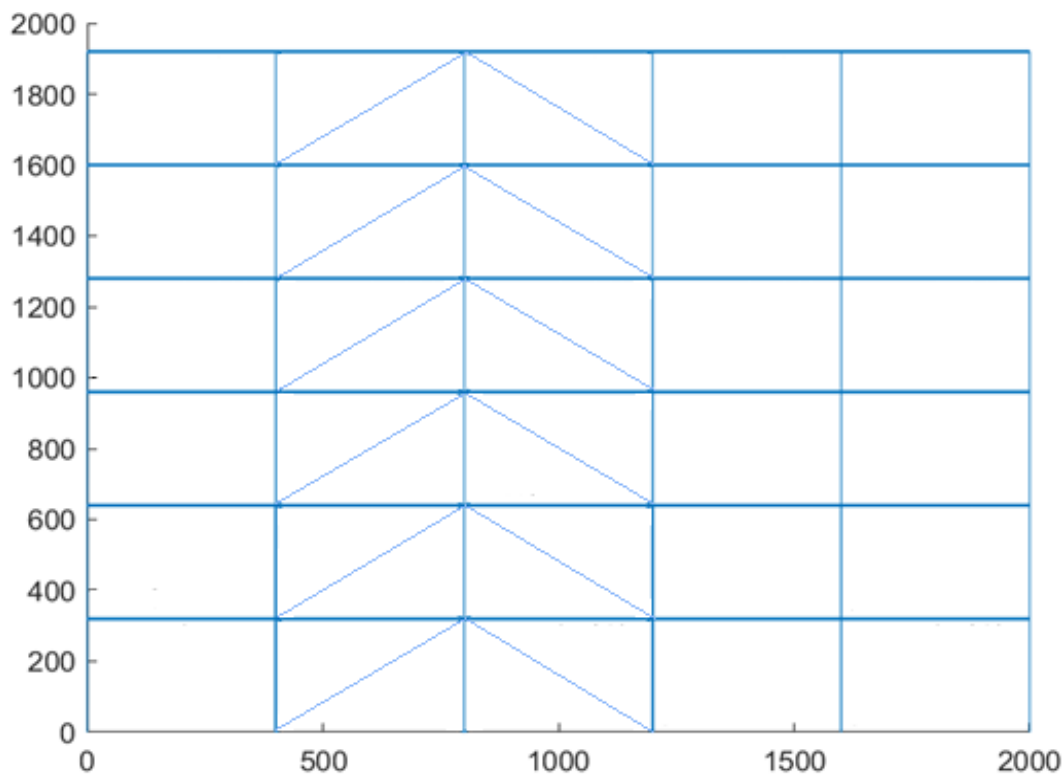


نمودار (۴-۲۸): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۶ طبقه ۵ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی

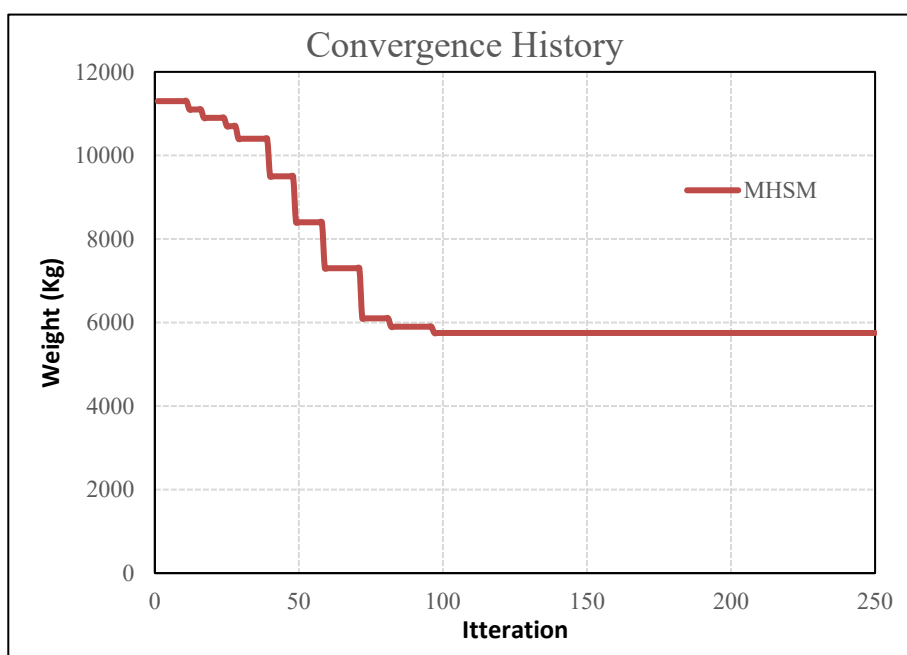


نمودار (۴-۲۹): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۶ طبقه ۵ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی

#### ۴-۱۵ نتایج قاب ۶ طبقه (پنج دهانه و مهاربند قطری)

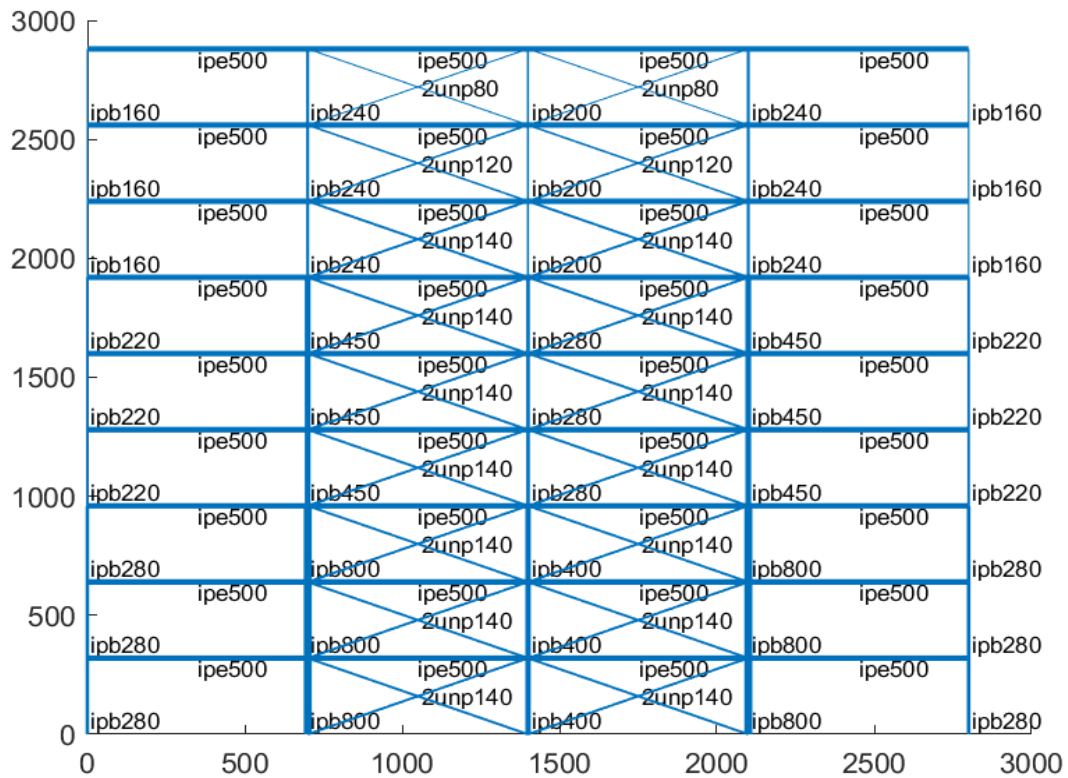


شکل (۴-۹): موقعیت بهینه مهاربند قطری در قاب ۶ طبقه ۵ دهانه

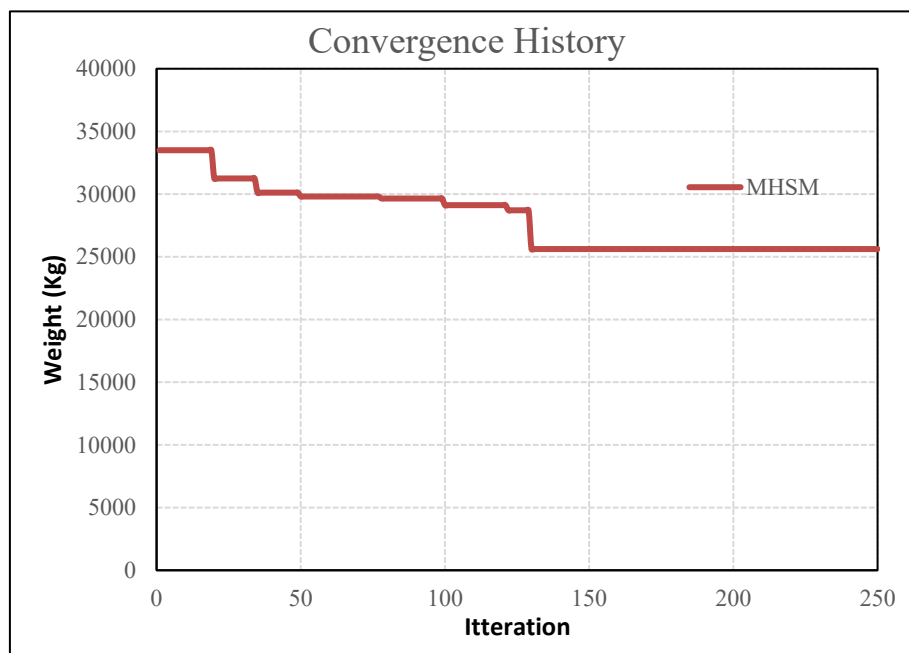


نمودار (۴-۳۰): تاریخچه همگرایی برای قاب ۶ طبقه ۵ دهانه با مهاربند قطری

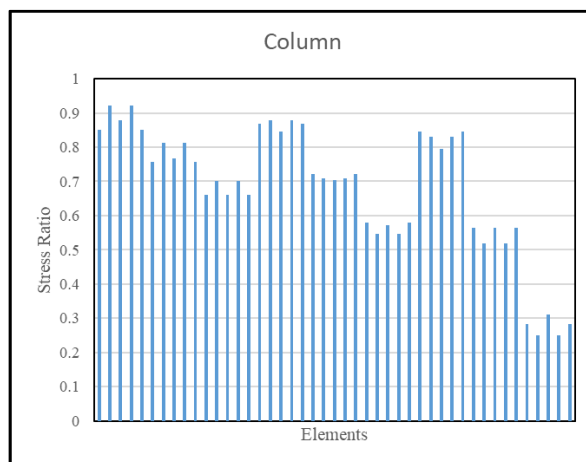
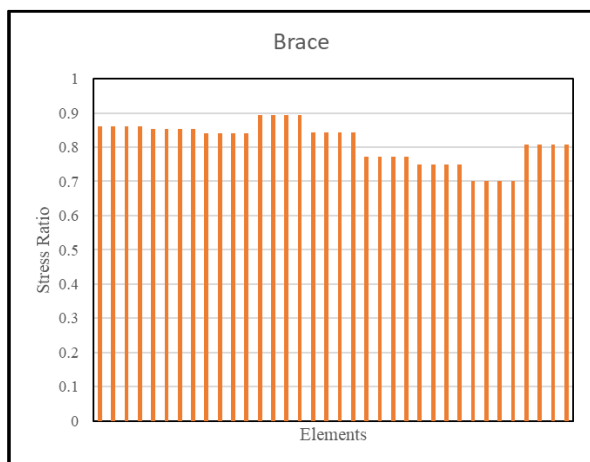
#### ۴-۱۶ نتایج قاب ۹ طبقه (چهار دهانه و مهاربند ضربدری)



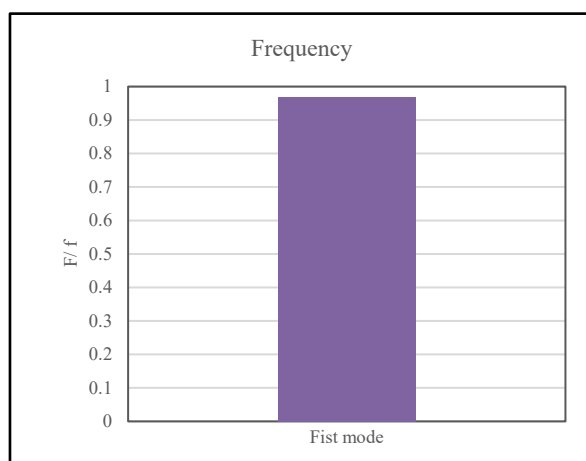
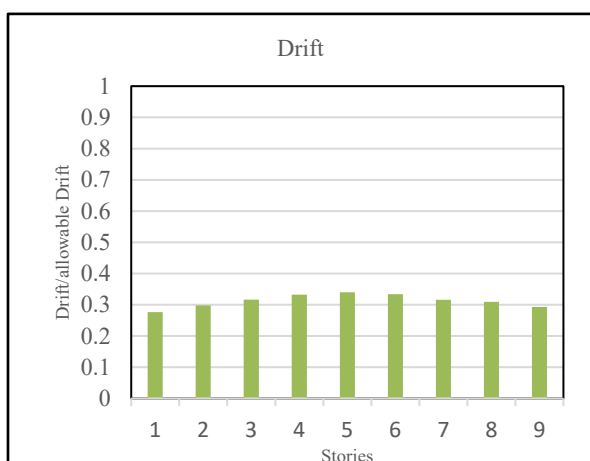
شکل (۴-۱۰): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند ضربدری در قاب ۹ طبقه ۴ دهانه



نمودار (۴-۳۱): تاریخچه همگرایی برای قاب ۹ طبقه ۴ دهانه با مهاربند ضربدری

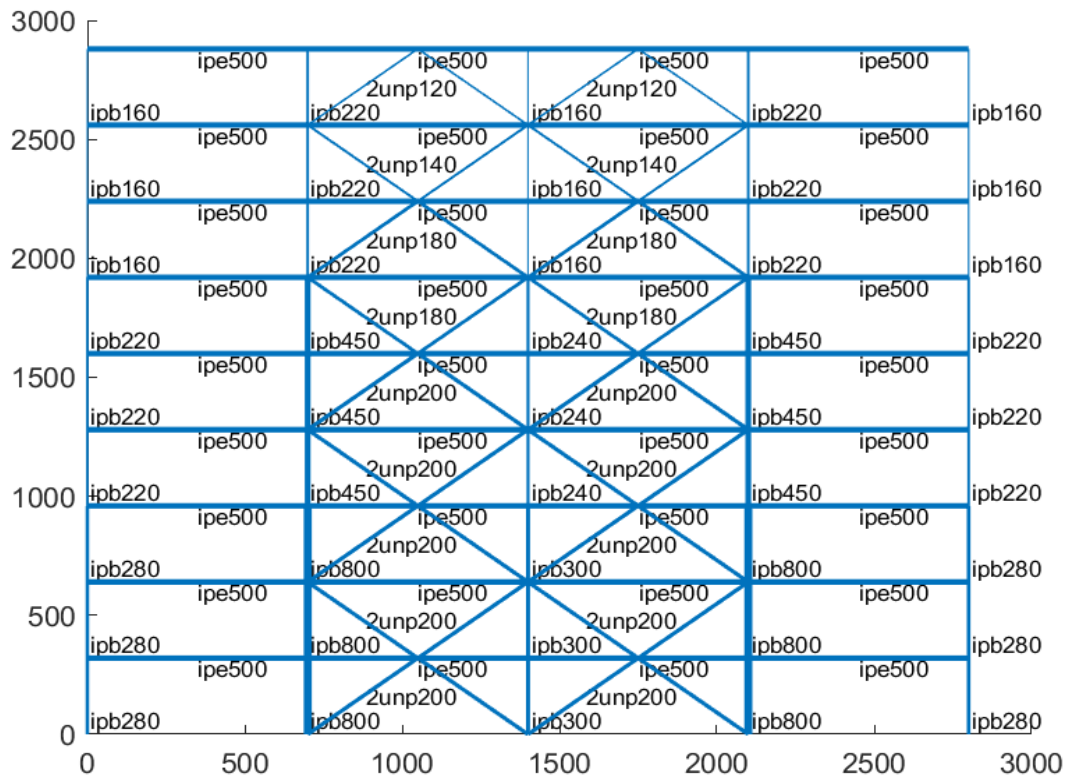


نمودار (۴-۳۲): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۹ طبقه ۴ دهانه با مهاربند ضربدری

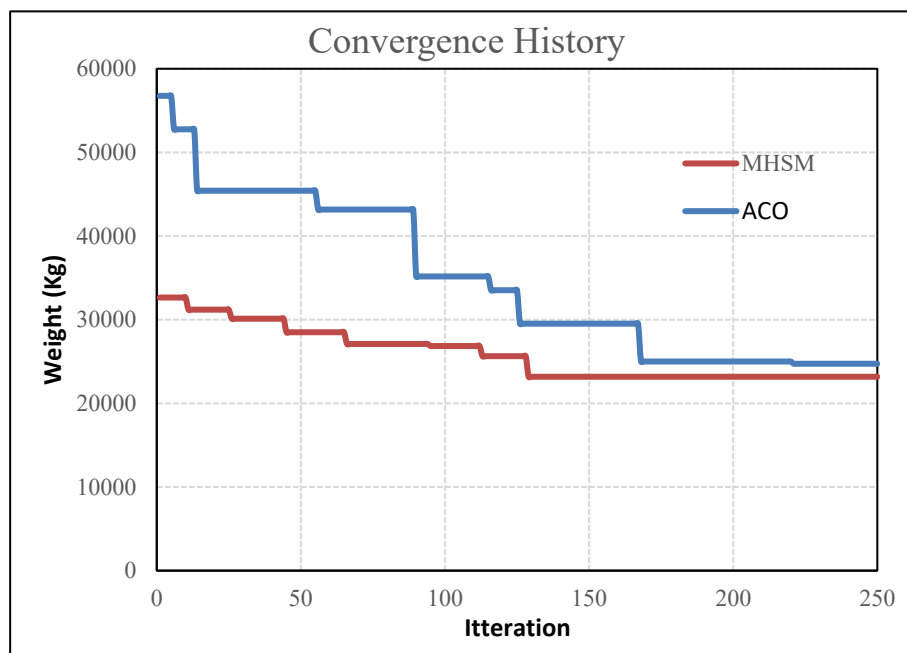


نمودار (۴-۳۳): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۹ طبقه ۴ دهانه با مهاربند ضربدری

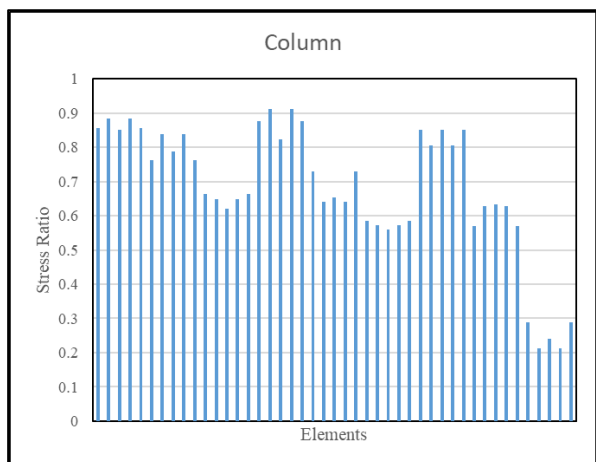
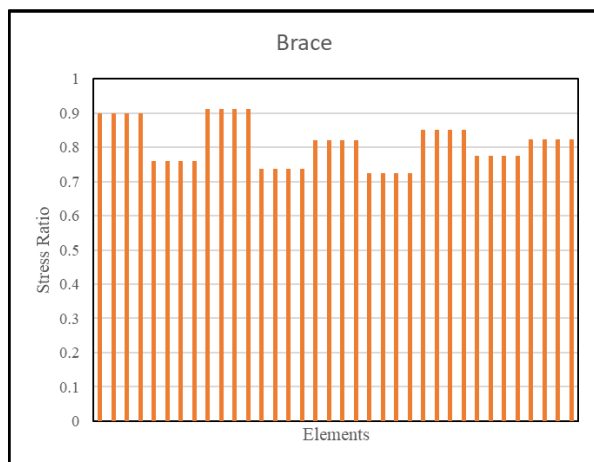
#### ۱۷-۴ نتایج قاب ۹ طبقه (چهار دهانه و مهاربند هفتی- هشتی)



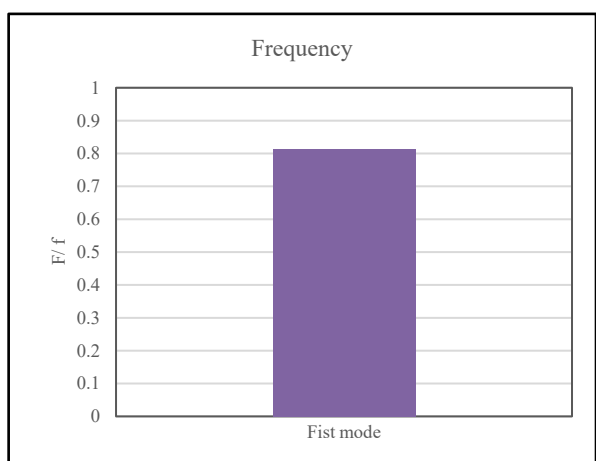
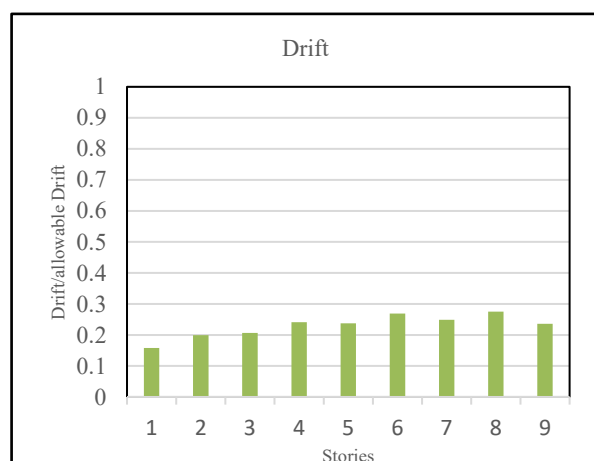
شکل (۱۱-۴) : مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند هفتی- هشتی در قاب ۹ طبقه ۴ دهانه



نمودار (۳۴-۴) : تاریخچه همگرایی برای قاب ۹ طبقه ۴ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی

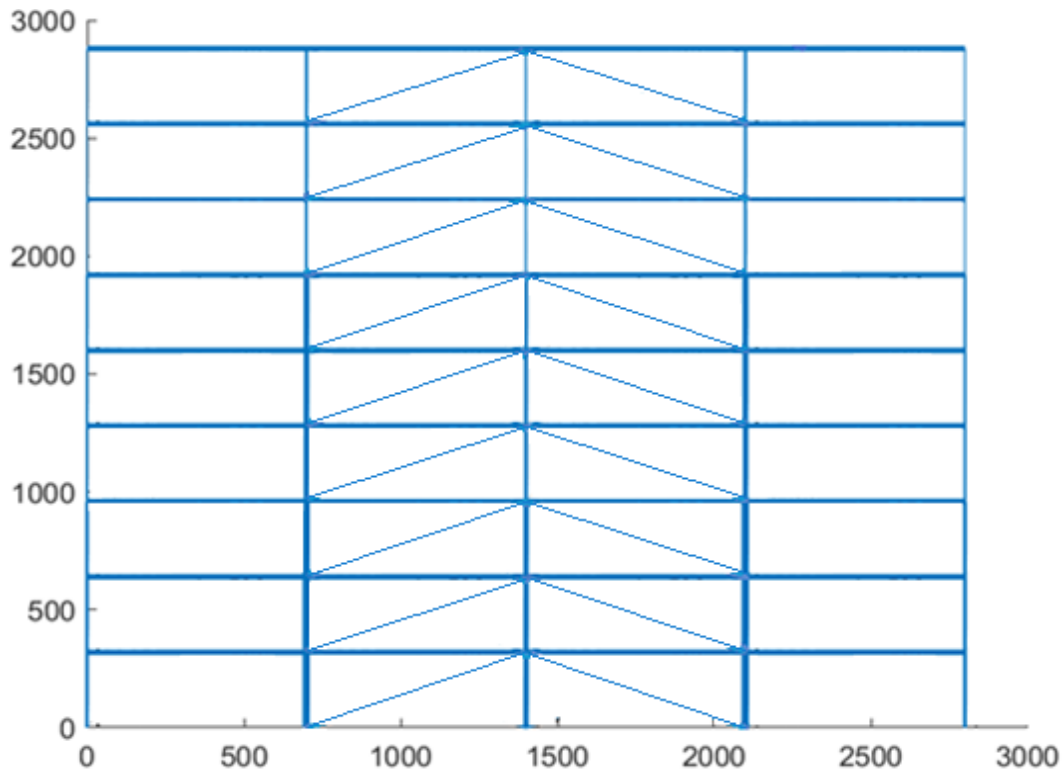


نمودار (۳۵-۴) : نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۹ طبقه ۴ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی

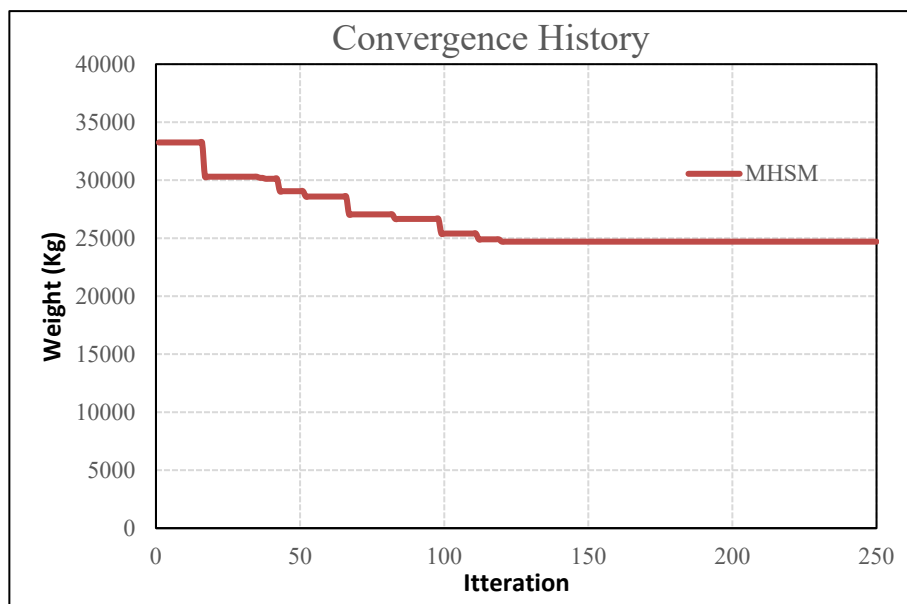


نمودار (۳۶-۴) : نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۹ طبقه ۴ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی

#### ۴-۱۸ نتایج قاب ۹ طبقه (چهار دهانه و مهاربند قطری)

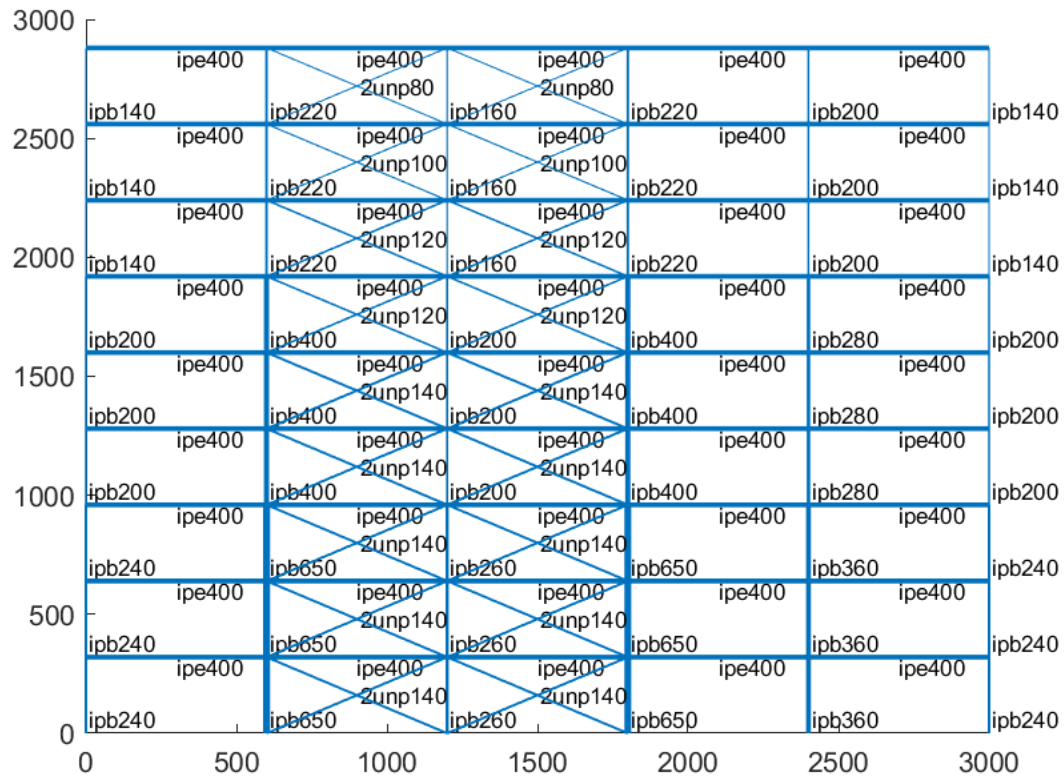


شکل (۴-۱۲): موقعیت بهینه مهاربند قطری در قاب ۹ طبقه ۴ دهانه

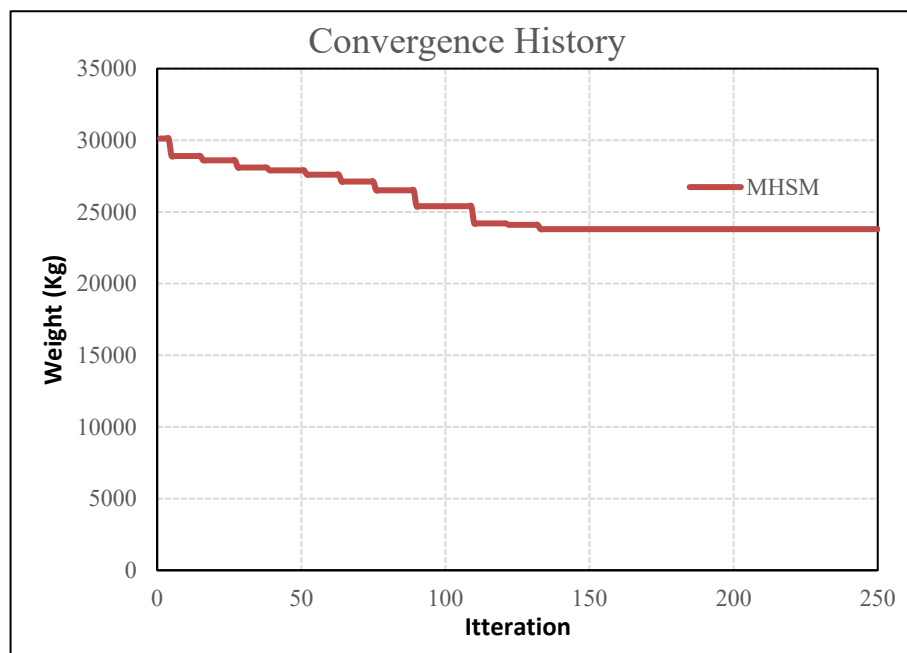


نمودار (۴-۳۷): تاریخچه همگرایی برای قاب ۹ طبقه ۴ دهانه با مهاربند قطری

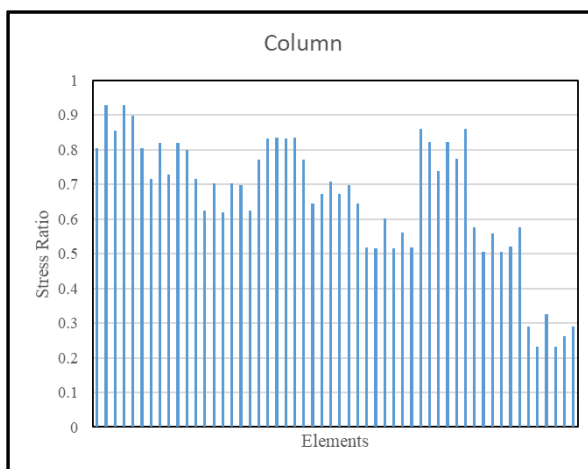
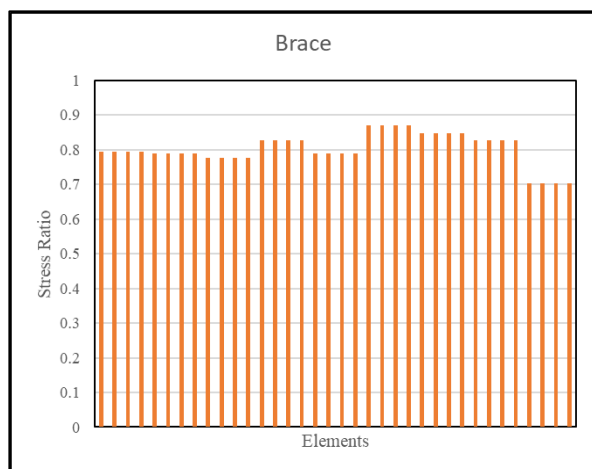
#### ۴-۱۹ نتایج قاب ۹ طبقه (پنج دهانه و مهاربند ضربدری)



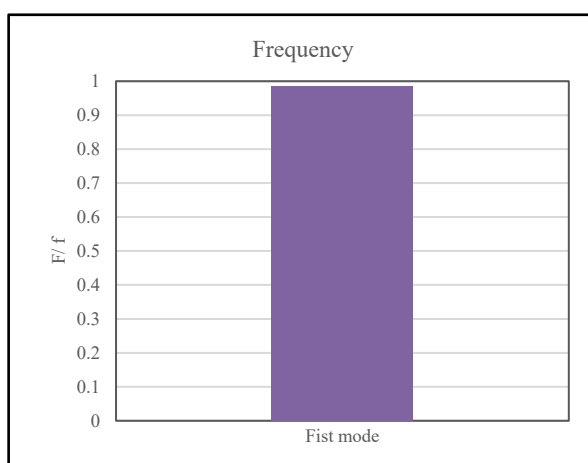
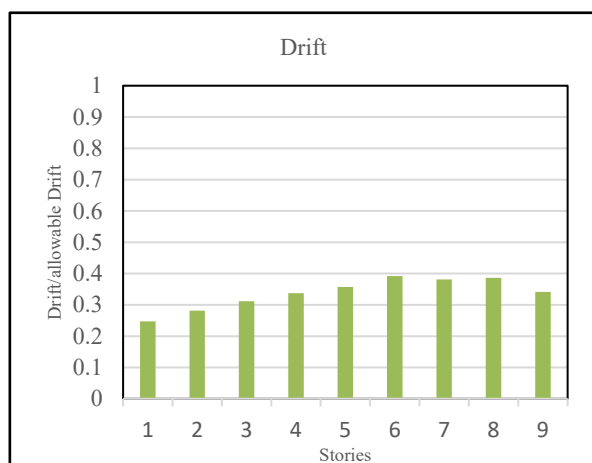
شکل (۴-۱۳): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند ضربدری در قاب ۹ طبقه ۵ دهانه



نمودار (۴-۳۸): تاریخچه همگرایی برای قاب ۹ طبقه ۵ دهانه با مهاربند ضربدری

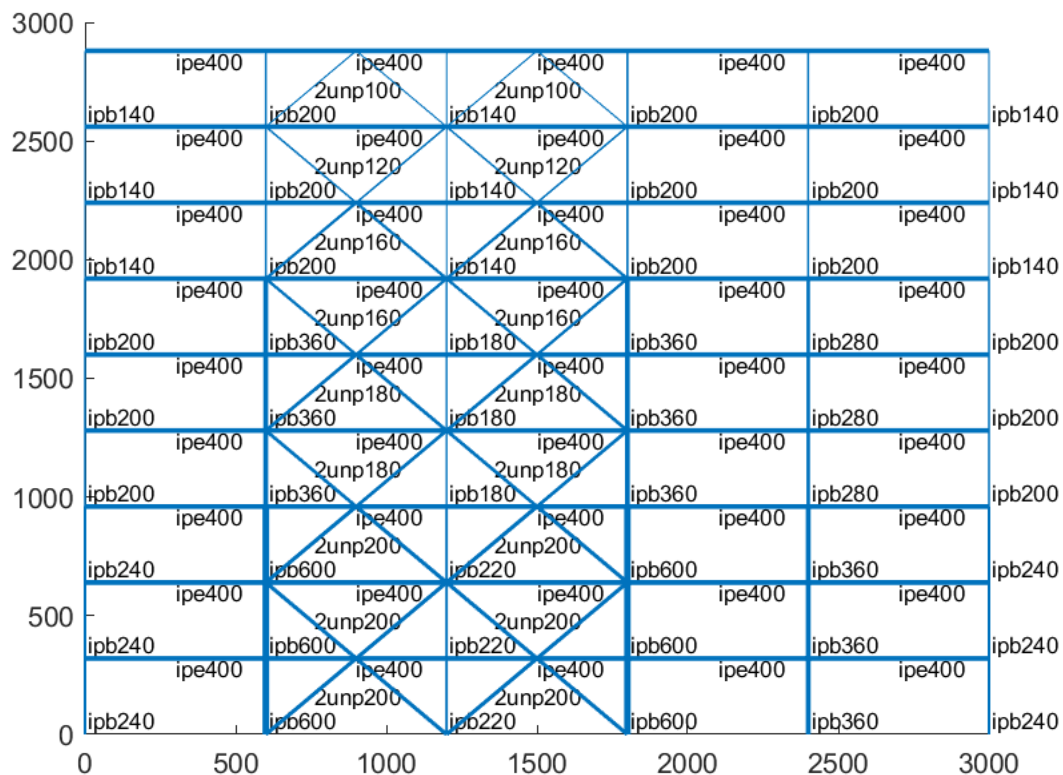


نمودار (۳۹-۴): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۹ طبقه ۵ دهانه با مهاربند ضربدری

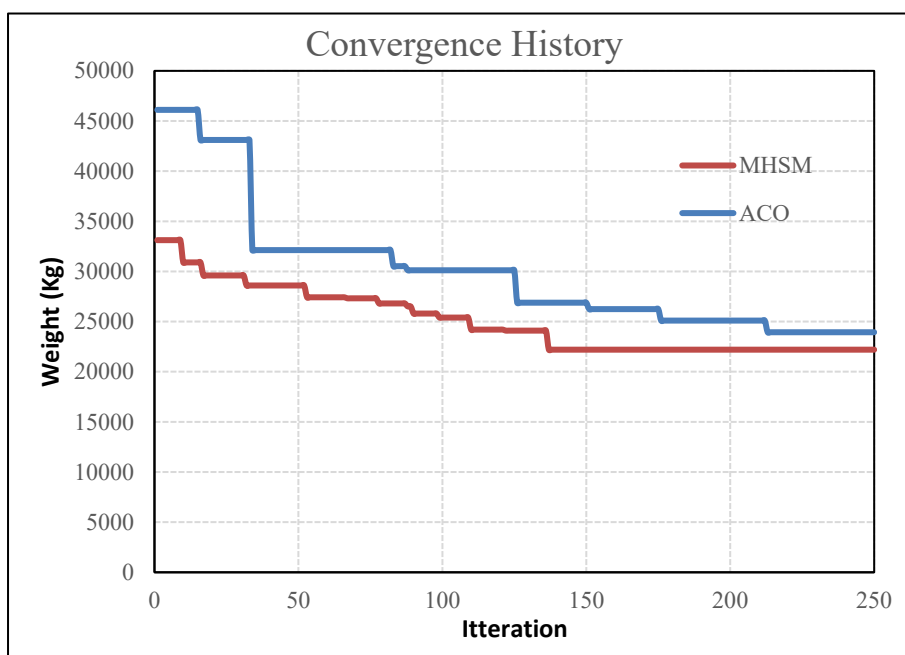


نمودار (۴۰-۴): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۹ طبقه ۵ دهانه با مهاربند ضربدری

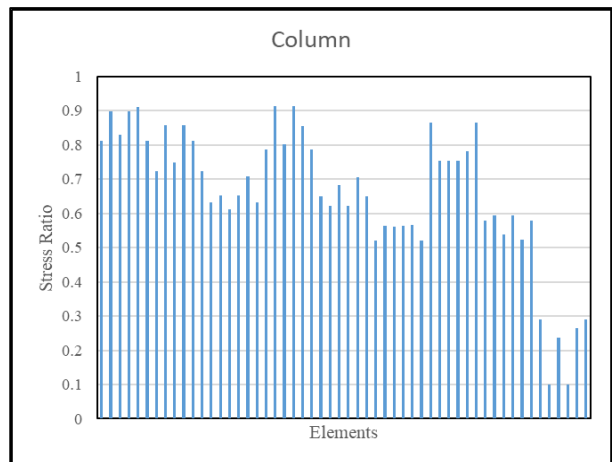
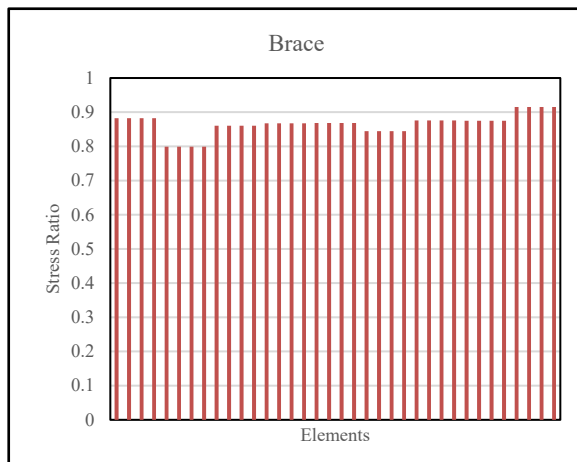
#### ۴-۲۰ نتایج قاب ۹ طبقه (پنج دهانه و مهاربند هفتی- هشتی)



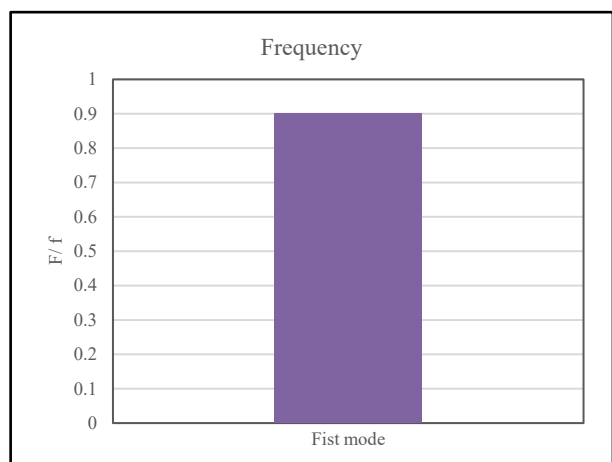
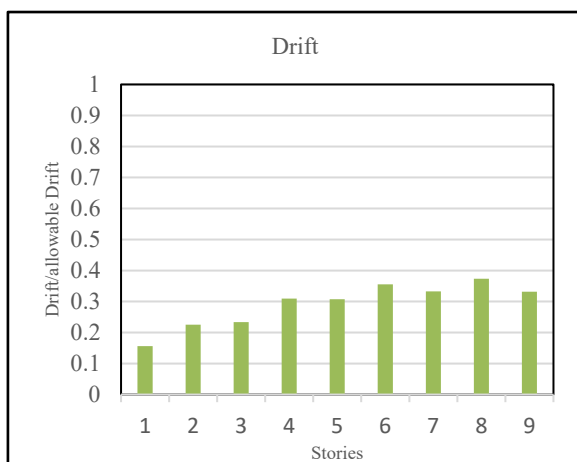
شکل (۴-۱۴): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند هفتی- هشتی در قاب ۹ طبقه ۵ دهانه



نمودار (۴-۴۱): تاریخچه همگرایی برای قاب ۹ طبقه ۵ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی

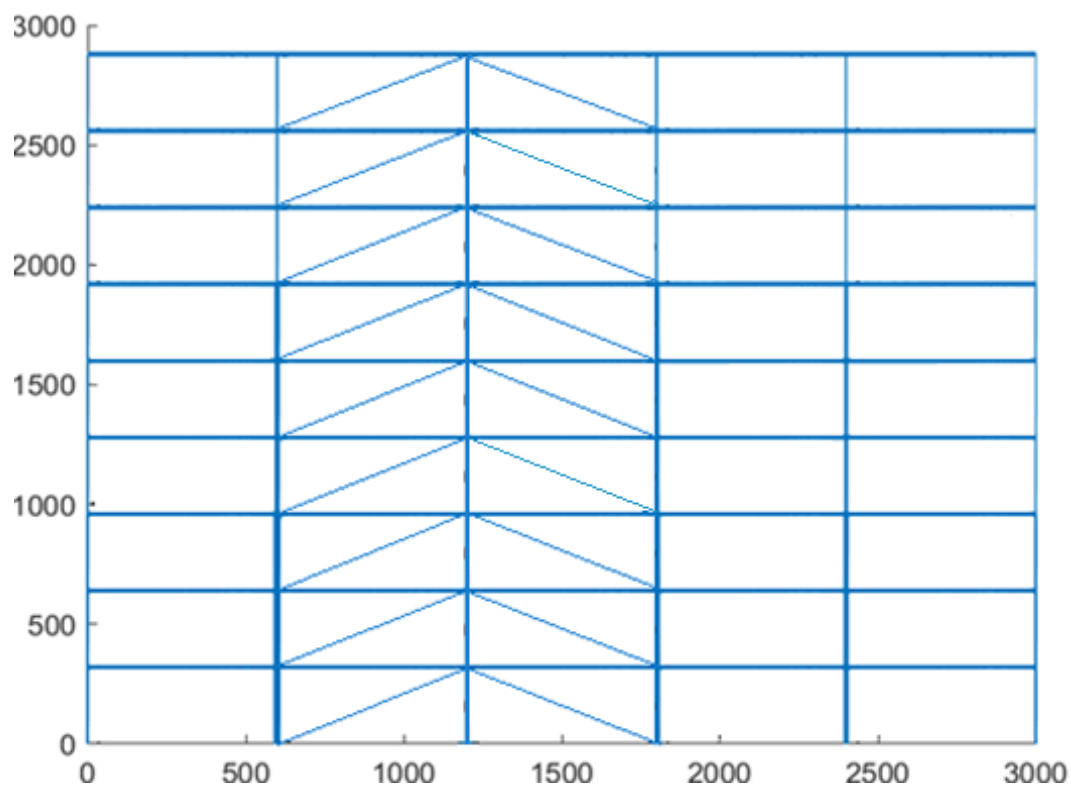


نمودار (۴-۴۲): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۹ طبقه ۵ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی

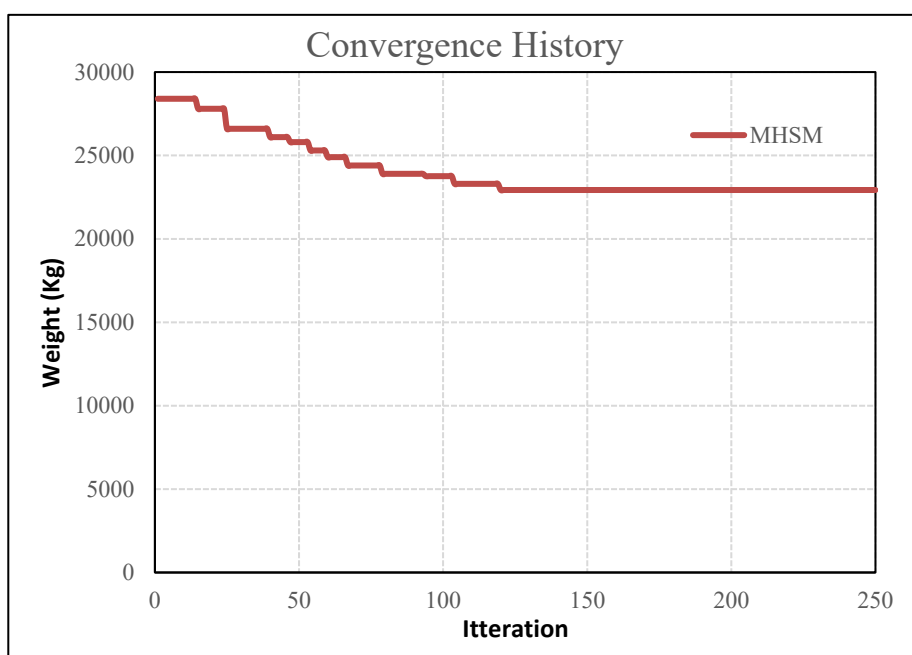


نمودار (۴-۴۳): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۹ طبقه ۵ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی

#### ۴-۲۱ نتایج قاب ۹ طبقه (پنج دهانه و مهاربند قطری)

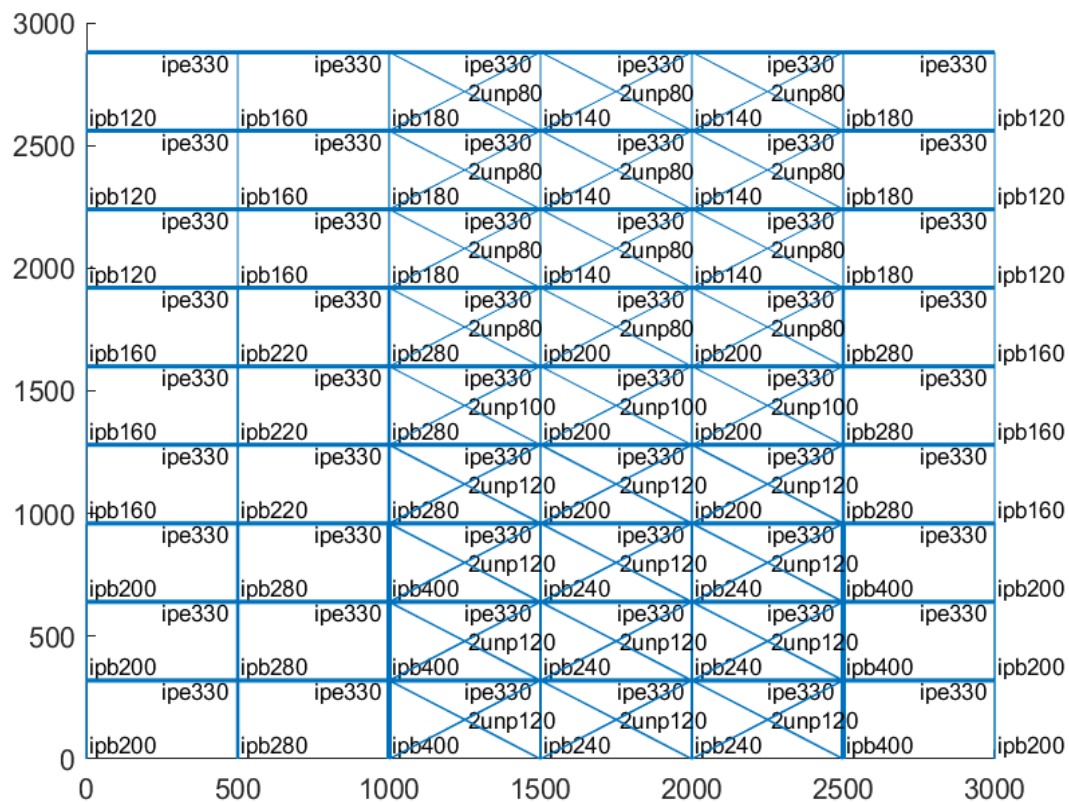


شکل (۴-۱۵): موقعیت بهینه مهاربند قطری در قاب ۹ طبقه ۵ دهانه

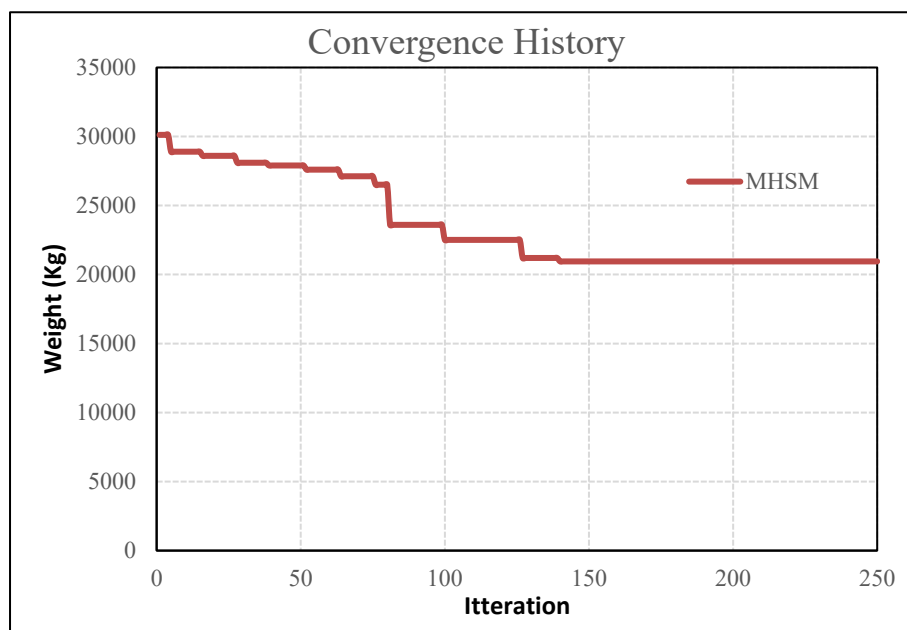


نمودار (۴-۴۴): تاریخچه همگرایی برای قاب ۹ طبقه ۵ دهانه با مهاربند قطری

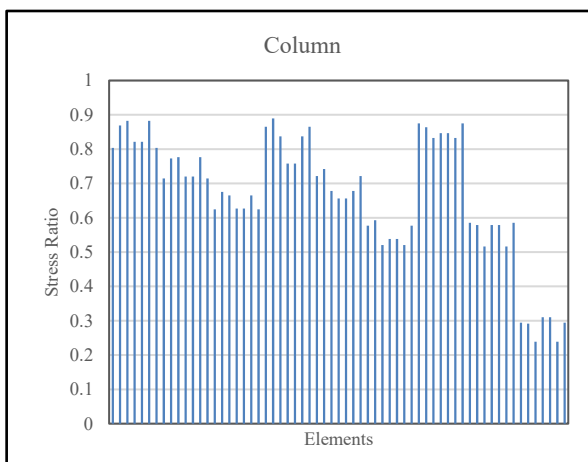
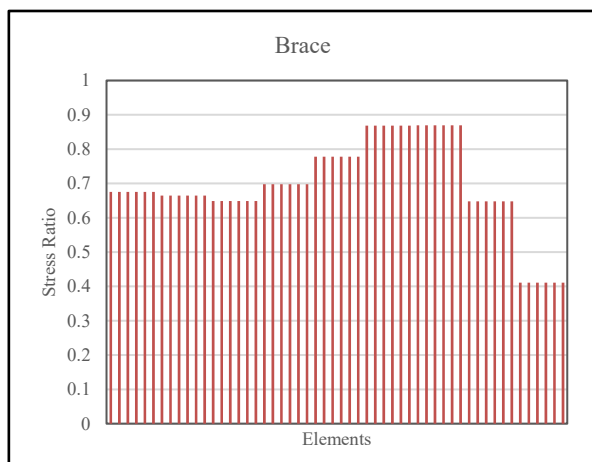
## ۴-۲ نتایج قاب ۹ طبقه (شش دهانه و مهاربند ضربدری)



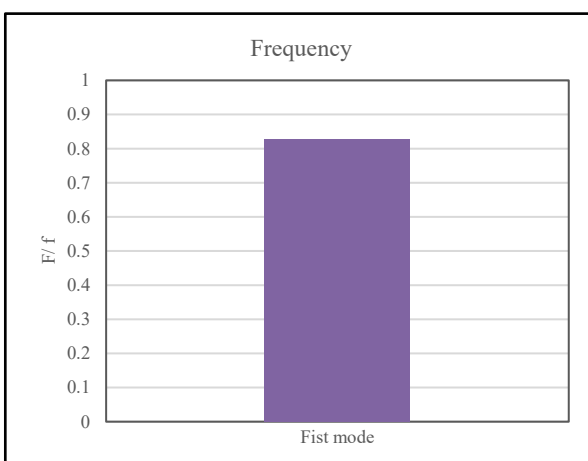
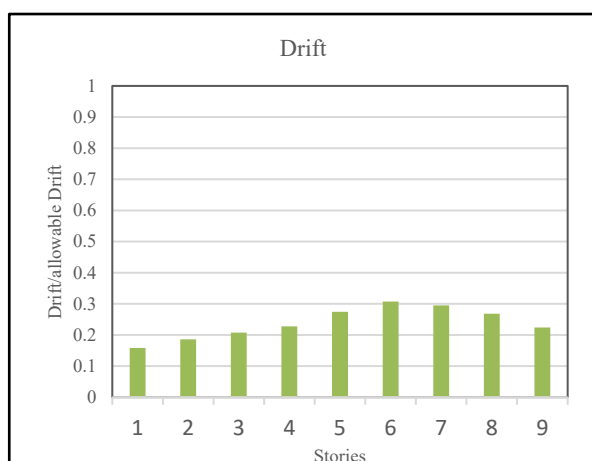
شکل (۴-۱۶): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند ضربدری در قاب ۹ طبقه ۶ دهانه



نمودار (۴-۴۵): تاریخچه همگرایی برای قاب ۹ طبقه ۶ دهانه با مهاربند ضربدری

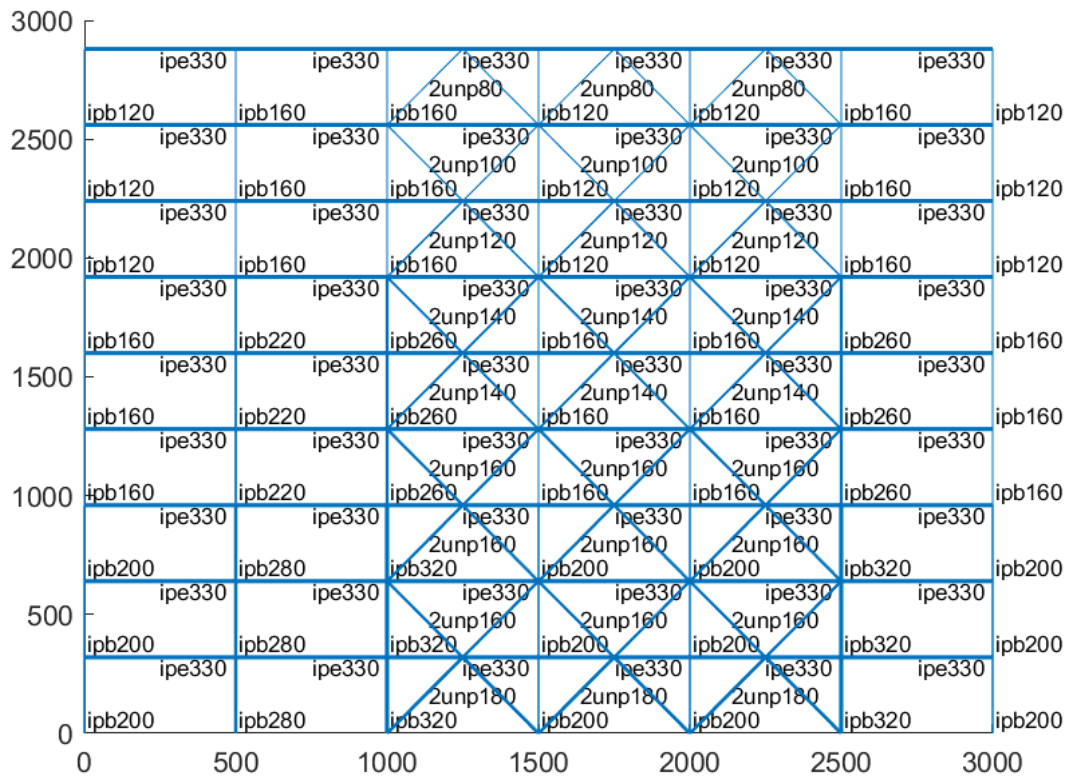


نمودار (۴-۴۶): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۹ طبقه ۶ دهانه با مهاربند ضربدری

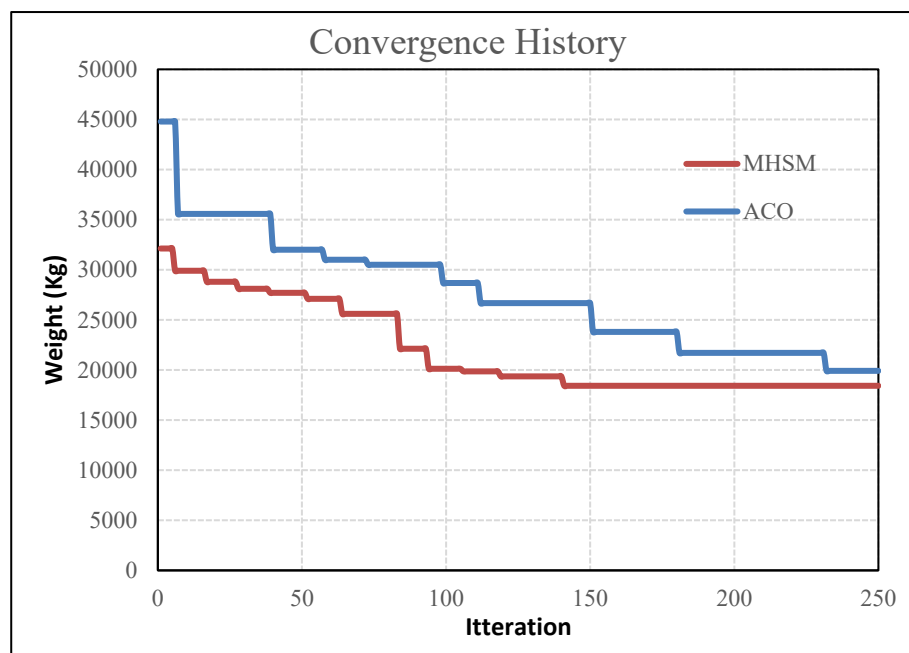


نمودار (۴-۴۷): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۹ طبقه ۶ دهانه با مهاربند ضربدری

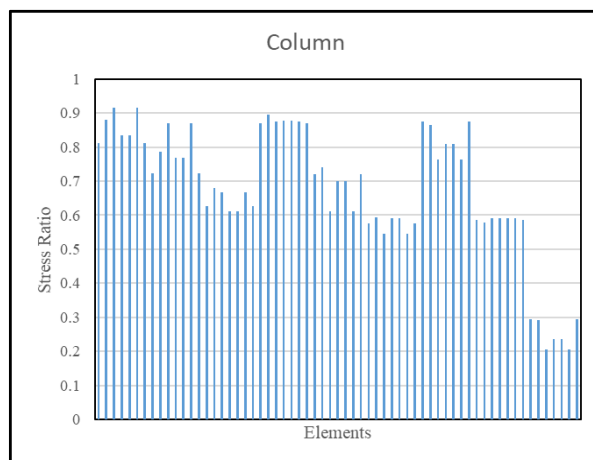
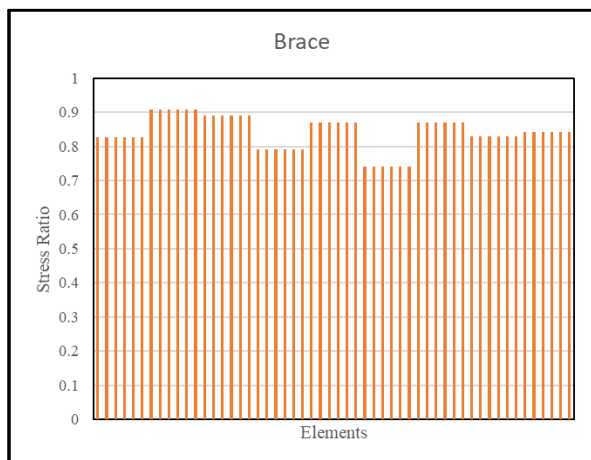
#### ۴-۲۳ نتایج قاب ۹ طبقه (شش دهانه و مهاربند هفتی- هشتی)



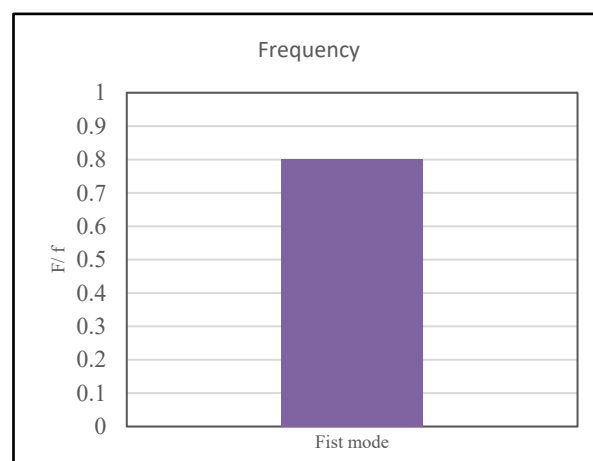
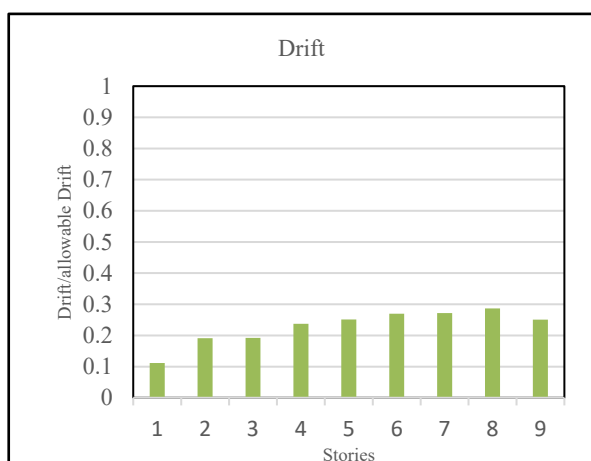
شکل (۴-۱۷): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند هفتی- هشتی در قاب ۹ طبقه ۶ دهانه



نمودار (۴-۴۸): تاریخچه همگرایی برای قاب ۹ طبقه ۶ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی

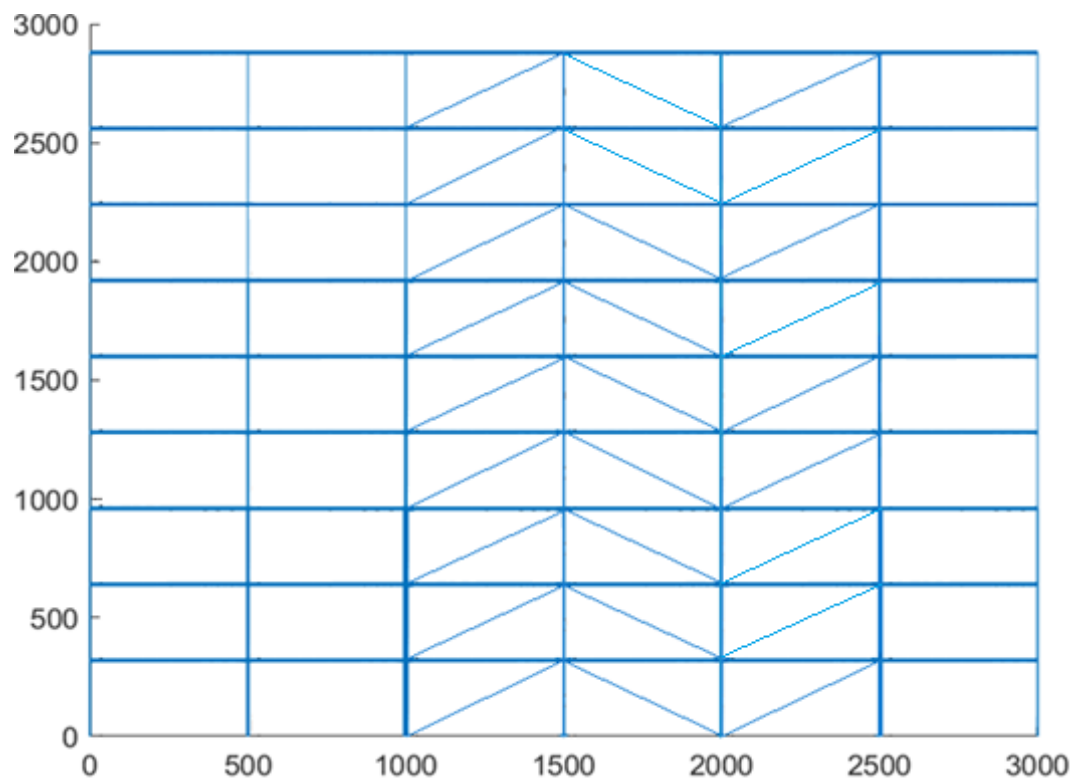


نمودار (۴-۴۹): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۹ طبقه ۶ دهانه با مهاربند هفتی\_ هشتی

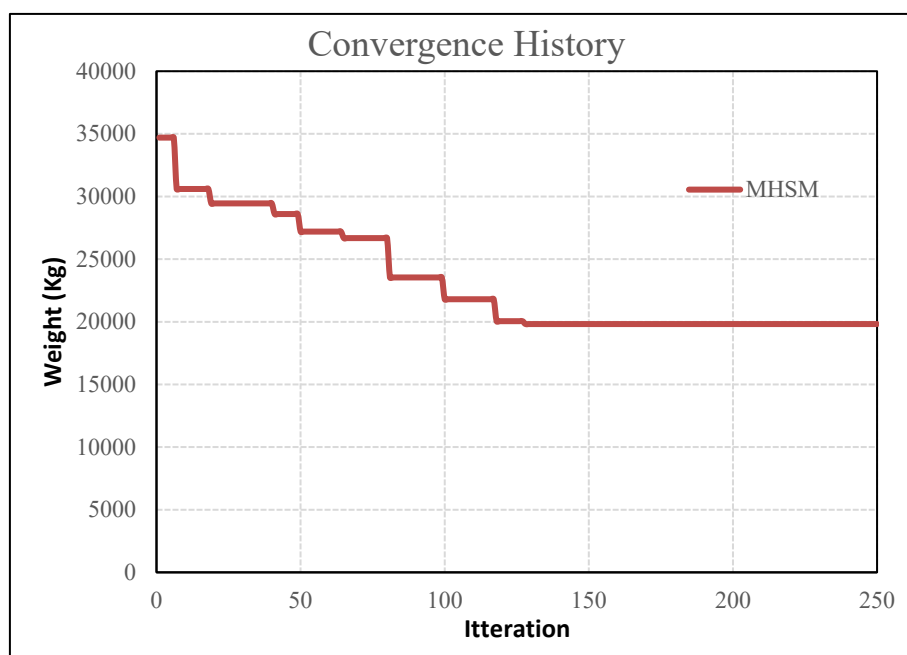


نمودار (۴-۵۰): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۹ طبقه ۶ دهانه با مهاربند هفتی\_ هشتی

## ۴-۲۴ نتایج قاب ۹ طبقه (شش دهانه و مهاربند قطری)

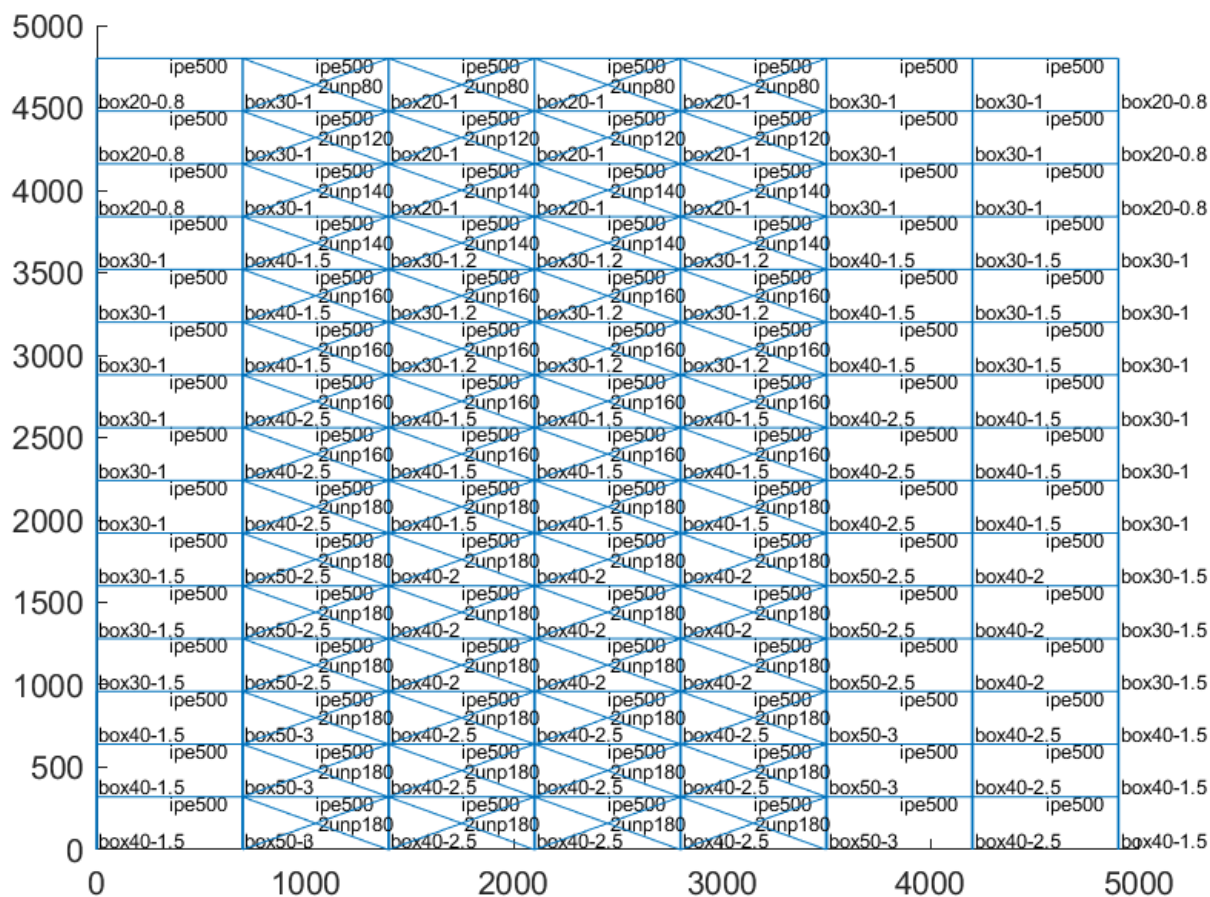


شکل (۴-۱۸): موقعیت بهینه مهاربند قطری در قاب ۹ طبقه ۶ دهانه

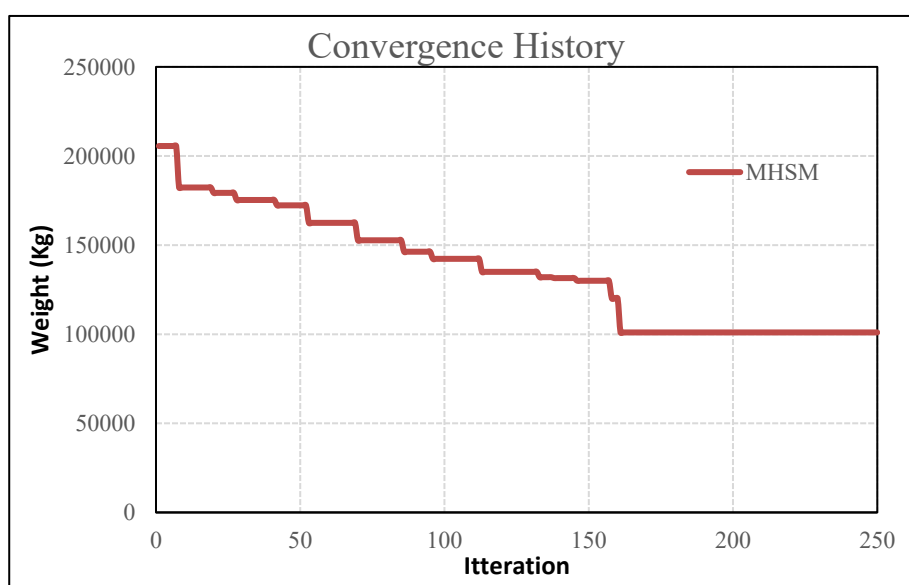


نمودار (۴-۵۱): تاریخچه همگرایی برای قاب ۹ طبقه ۶ دهانه با مهاربند قطری

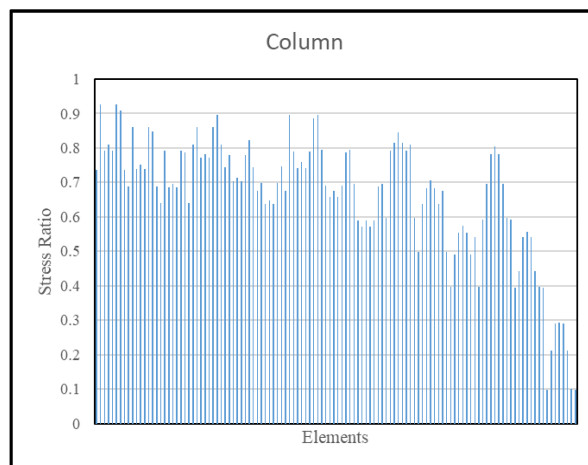
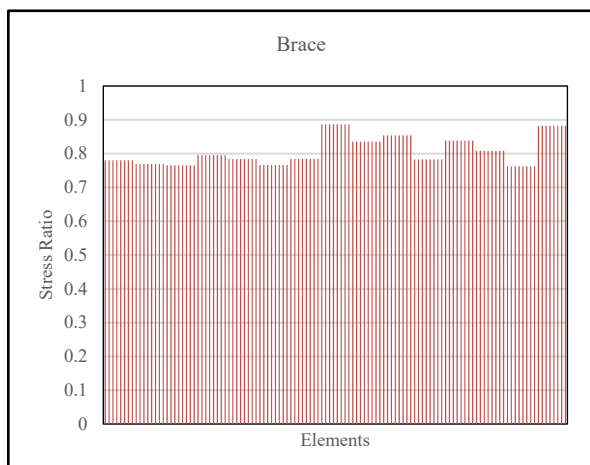
#### ۴-۲۵ نتایج قاب ۱۵ طبقه (هفت دهانه و مهاربند ضربدری)



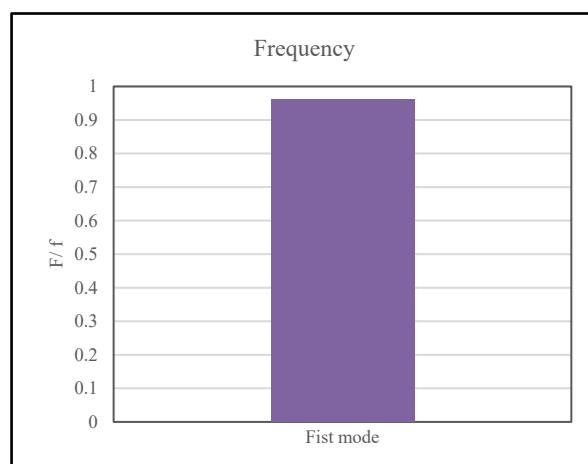
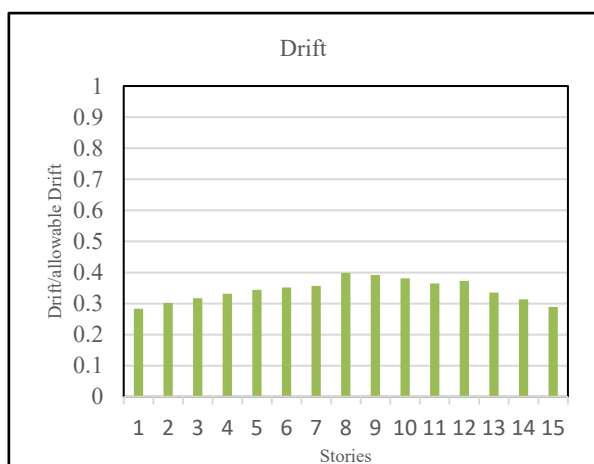
شکل (۴-۱۹): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند ضربدری در قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه



نمودار (۴-۵۲): تاریخچه همگرایی برای قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه با مهاربند ضربدری

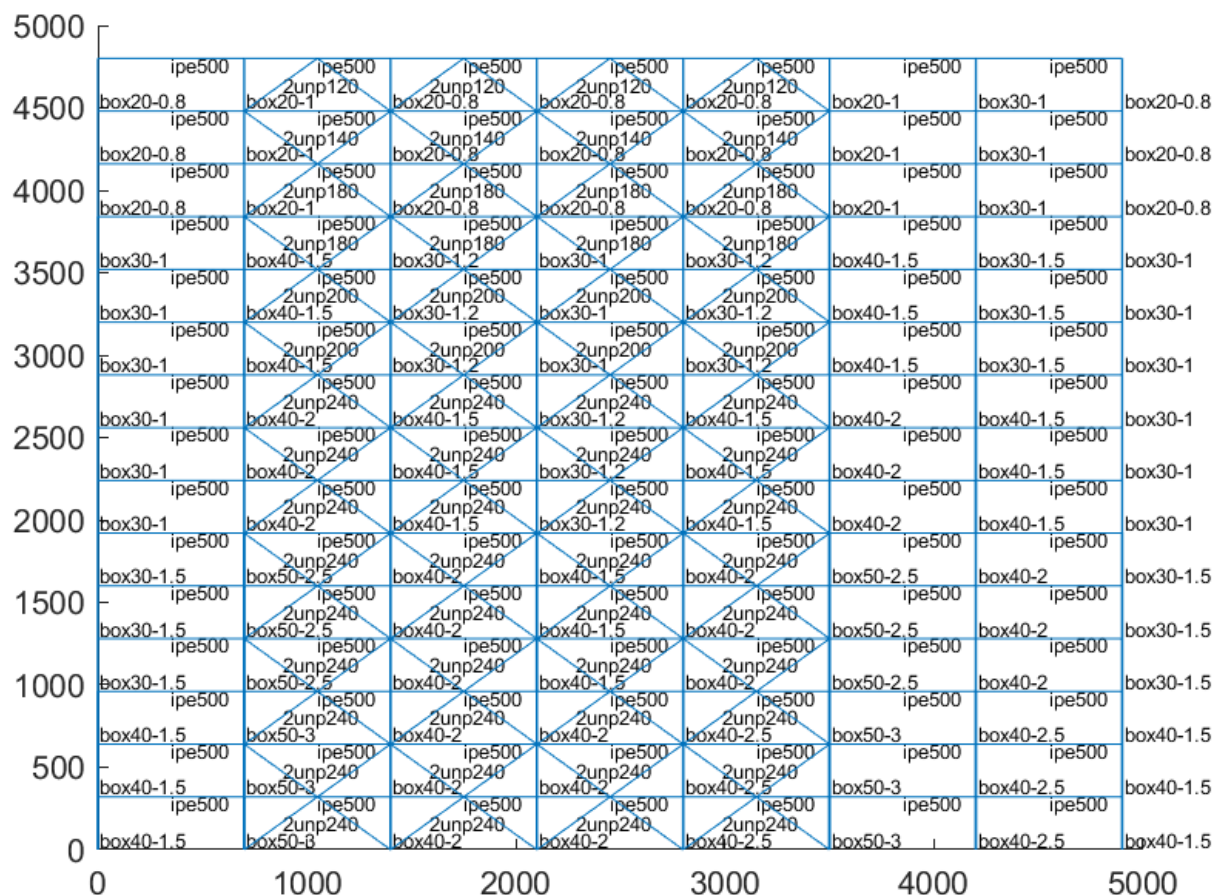


نمودار (۴-۵۳): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه با مهاربند ضربدری

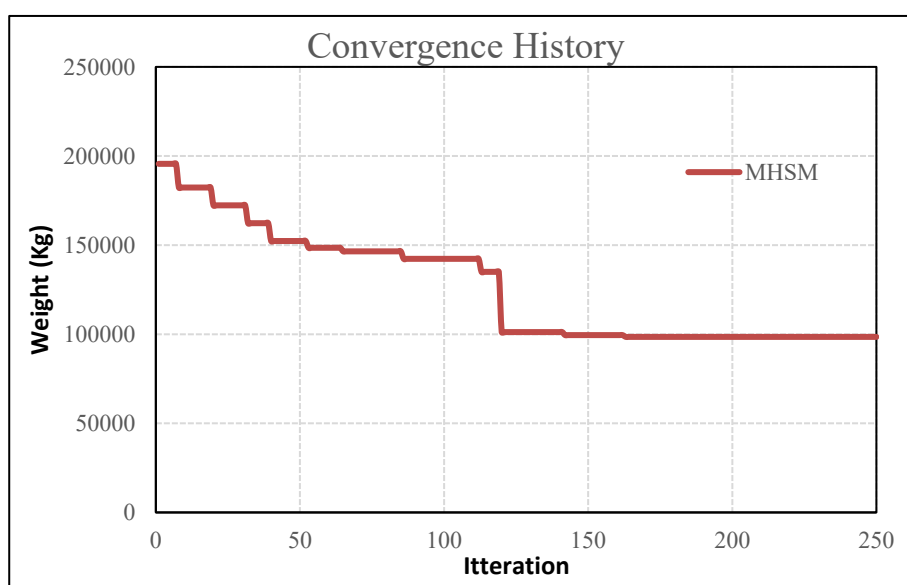


نمودار (۴-۵۴): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه با مهاربند ضربدری

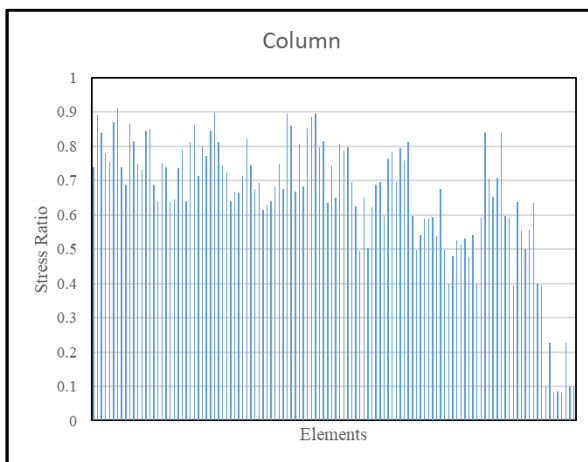
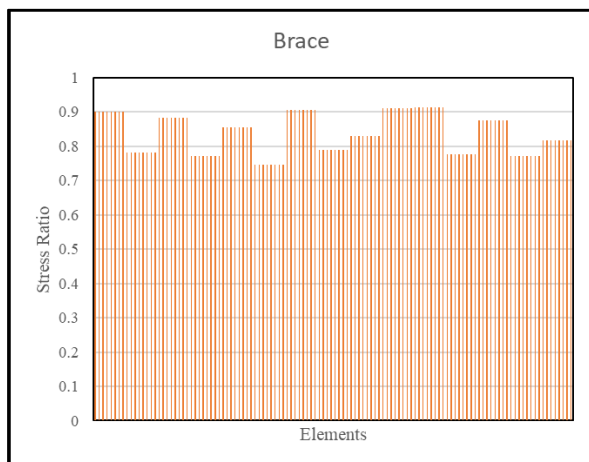
## ۴-۲۶ نتایج قاب ۱۵ طبقه (هفت دهانه و مهاربند هفتی- هشتی)



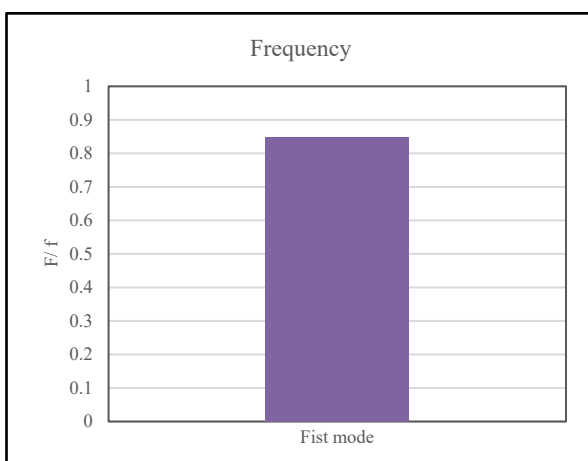
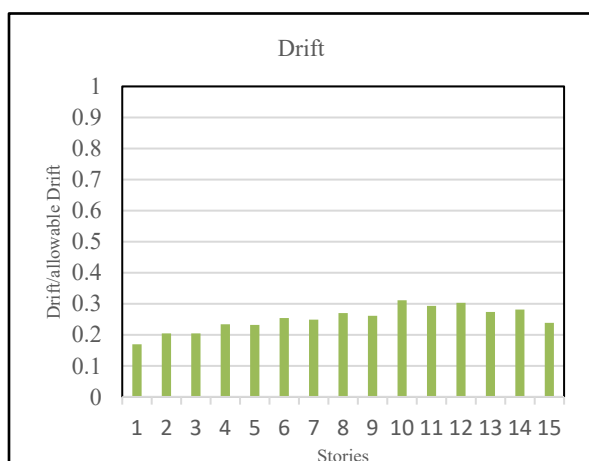
شکل (۴-۲۰): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند هفتی- هشتی در قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه



نمودار (۴-۵۵): تاریخچه همگرایی برای قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی

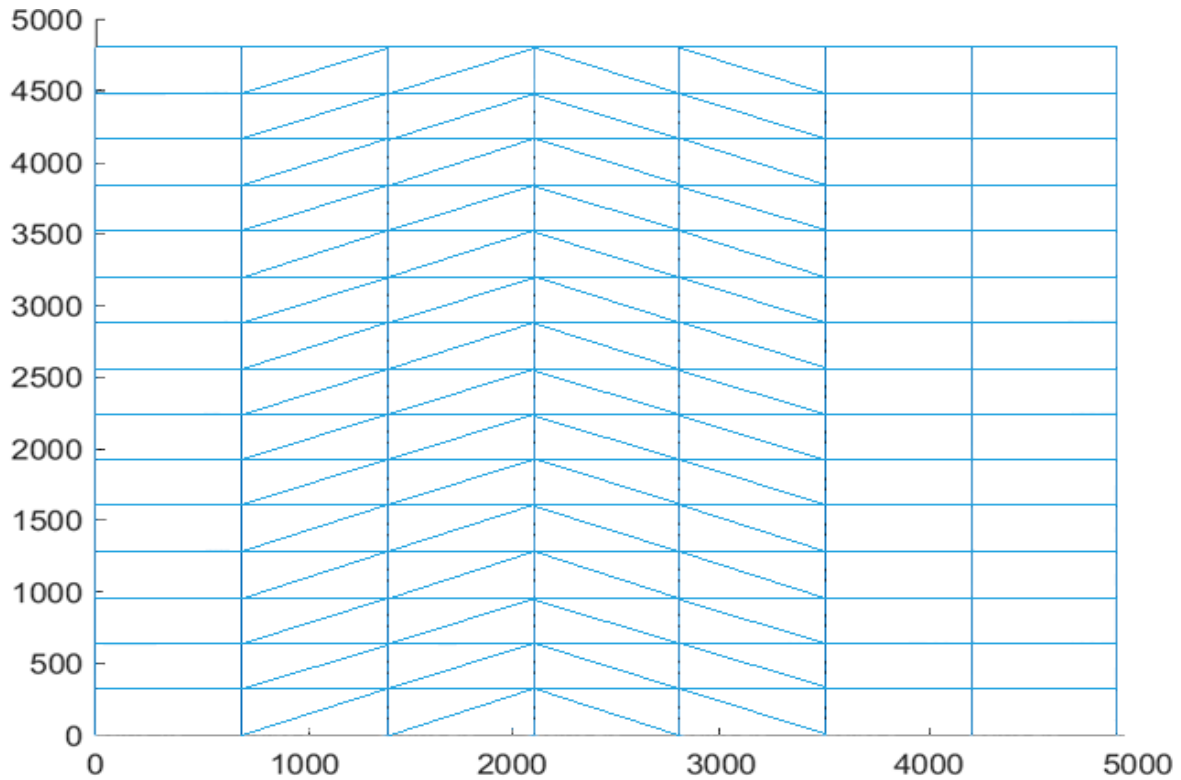


نمودار (۴-۵۶): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه با مهاربند هفتی-هشتی

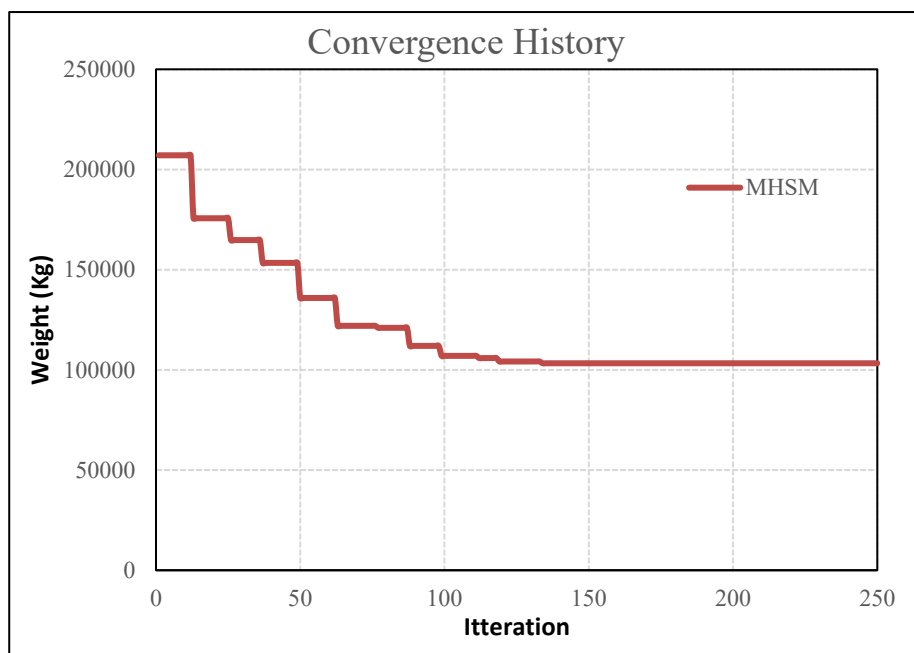


نمودار (۴-۵۷): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه با مهاربند هفتی-هشتی

#### ۴-۲۷ نتایج قاب ۱۵ طبقه (هفت دهانه و مهاربند قطری)

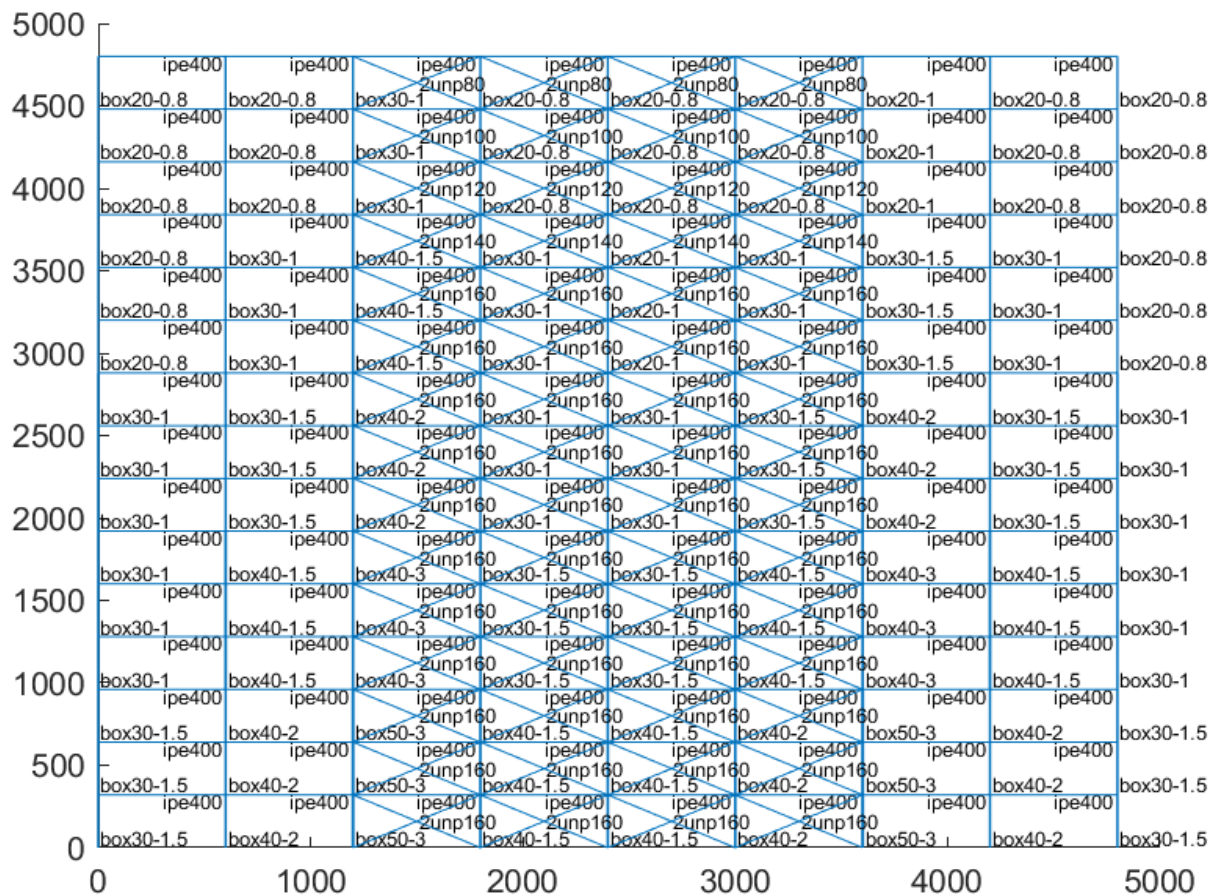


شکل (۴-۲۱): موقعیت بهینه مهاربند قطری در قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه

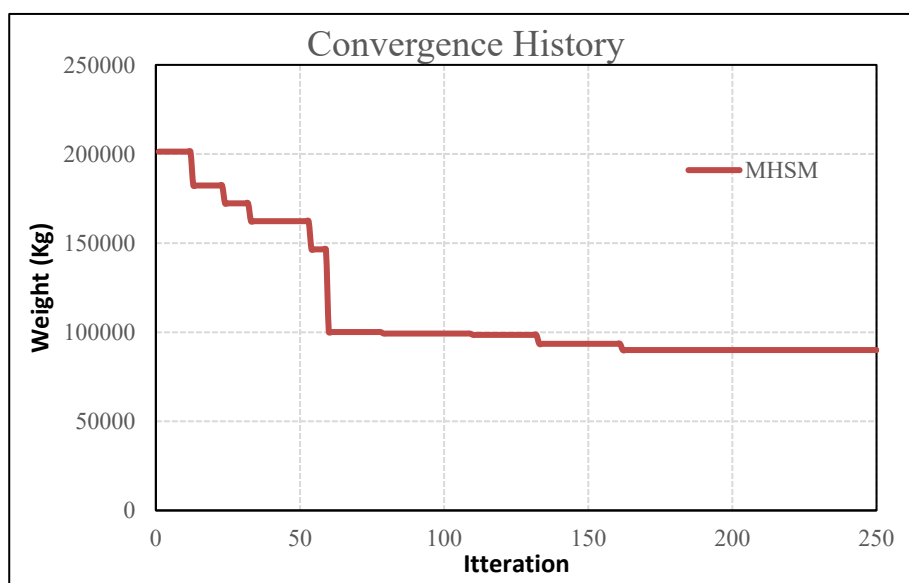


نمودار (۴-۵۸): تاریخچه همگرایی برای قاب ۱۵ طبقه ۷ دهانه با مهاربند قطری

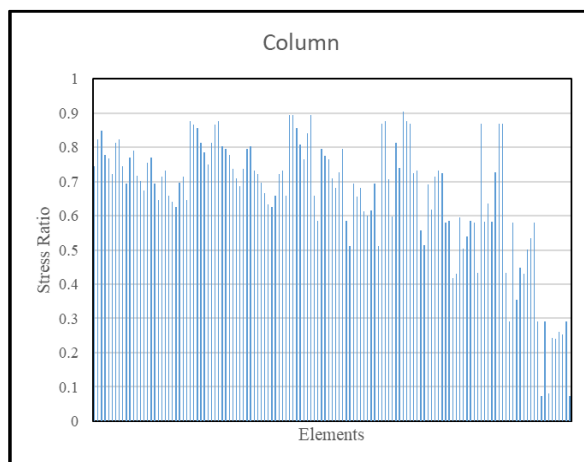
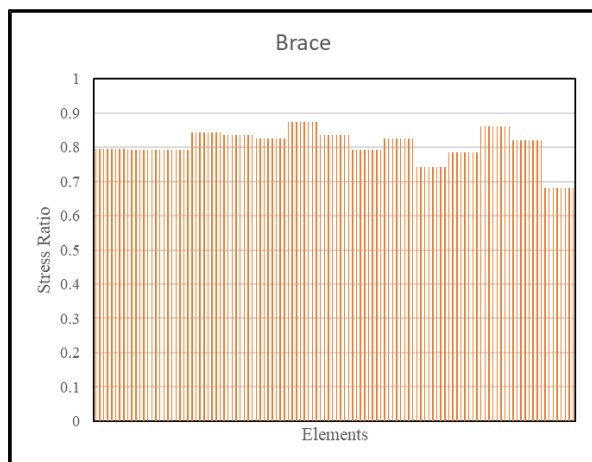
#### ۴-۲۸ نتایج قاب ۱۵ طبقه (هشت دهانه و مهاربند ضربدری)



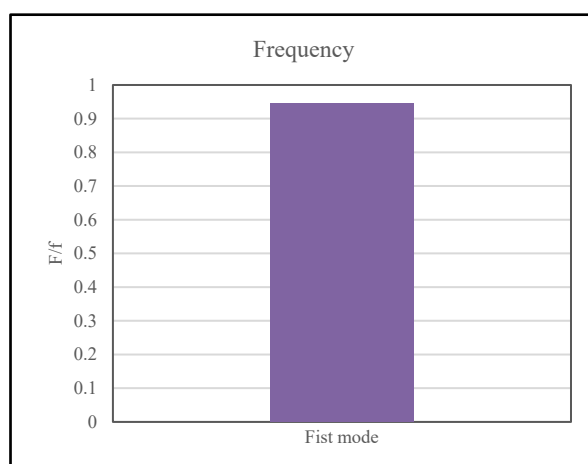
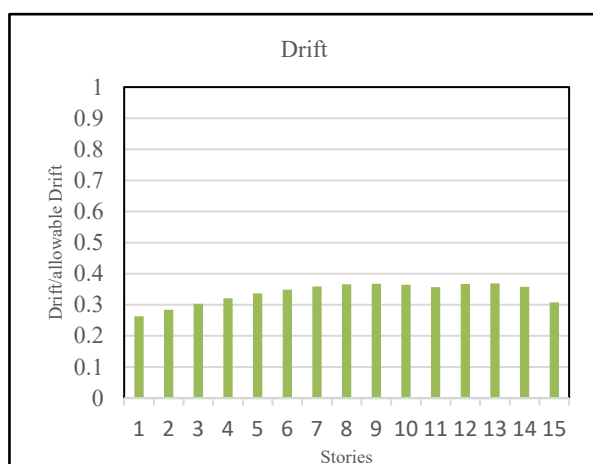
شکل (۴-۲۲): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند ضربدری در قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه



نمودار (۴-۵۹): تاریخچه همگرایی برای قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه با مهاربند ضربدری

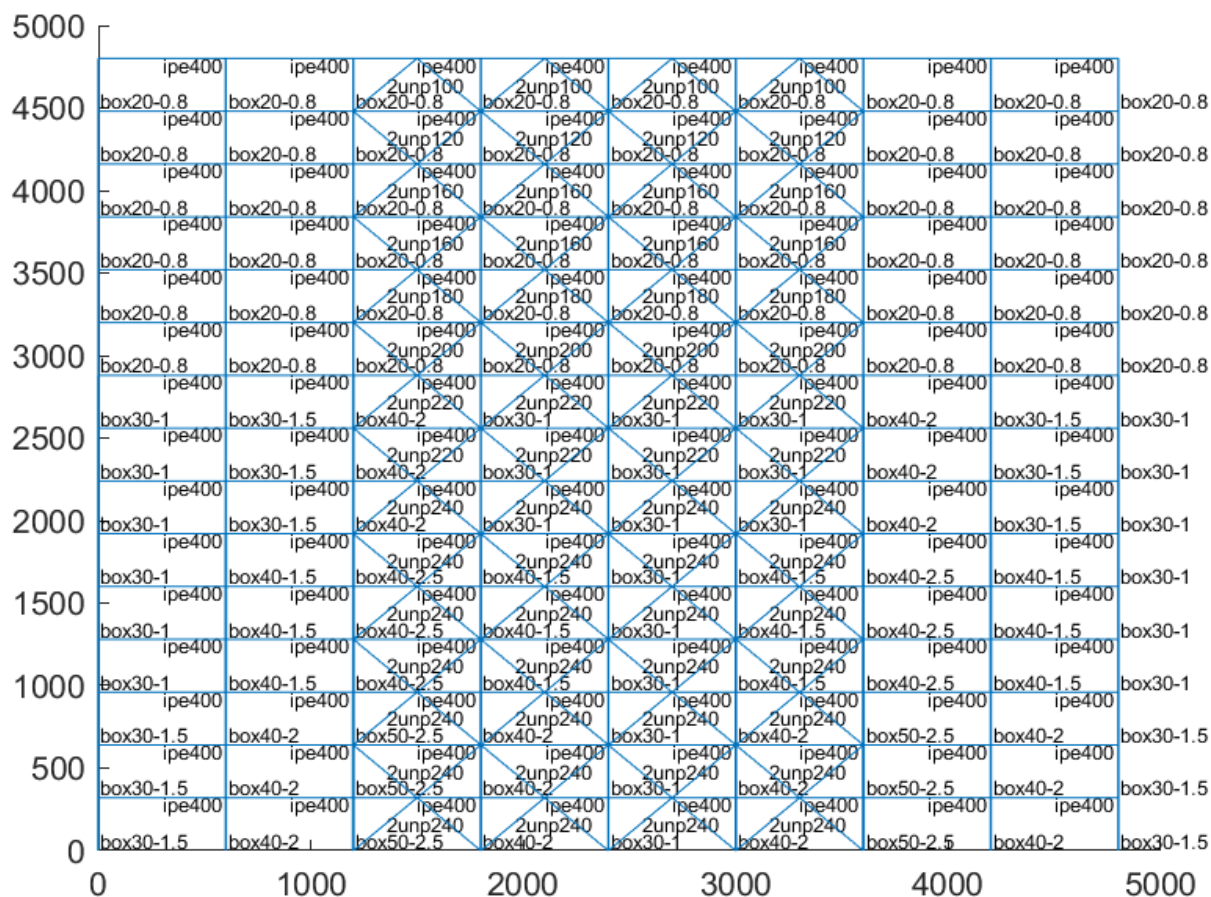


نمودار (۴-۶۰): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه با مهاربند ضربدری

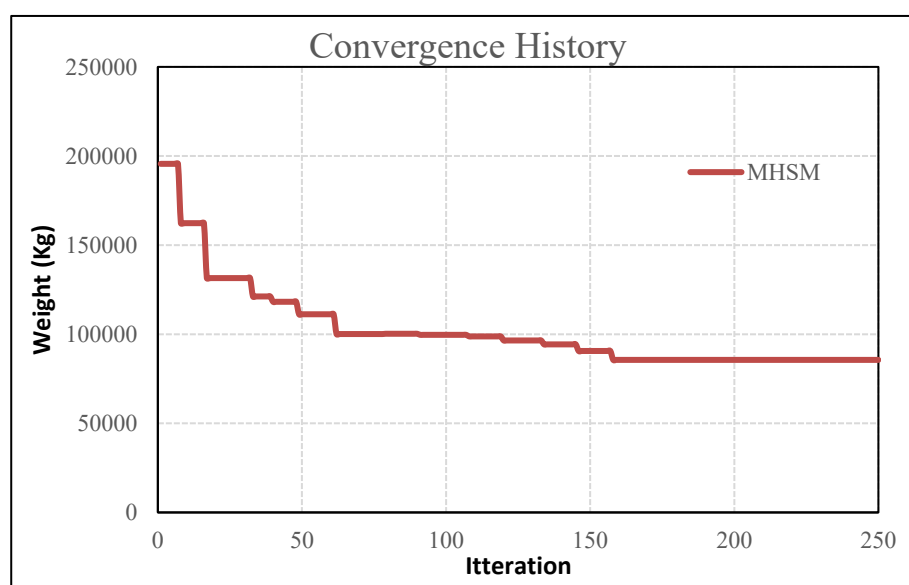


نمودار (۴-۶۱): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه با مهاربند ضربدری

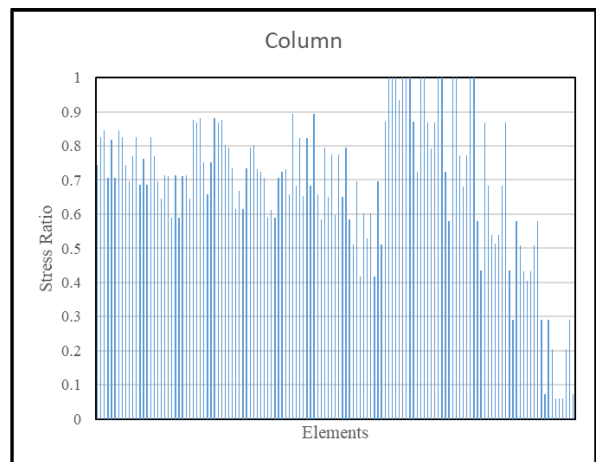
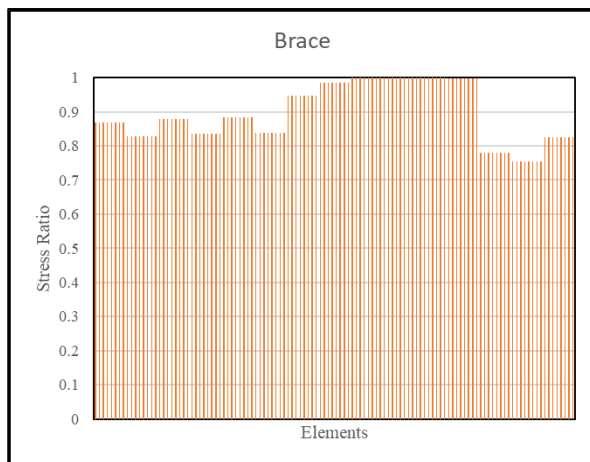
## ۴-۲۹ نتایج قاب ۱۵ طبقه (هشت دهانه و مهاربند هفتی- هشتی)



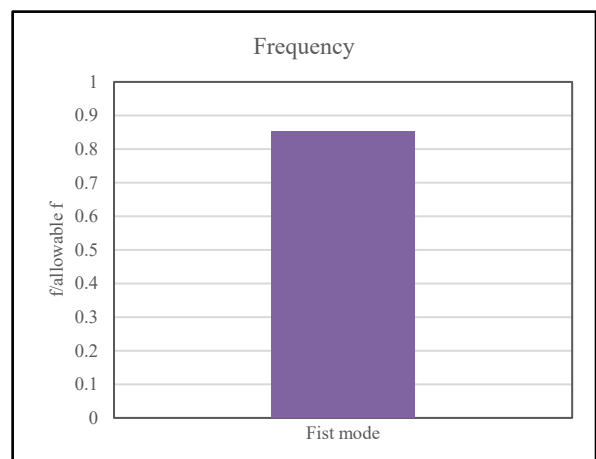
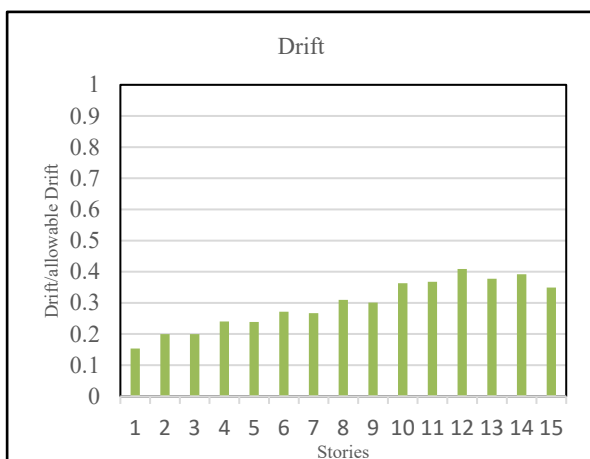
شکل (۴-۲۳): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند هفتی- هشتی در قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه



نمودار (۴-۶۲): تاریخچه همگرایی برای قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه با مهاربند هفتی- هشتی

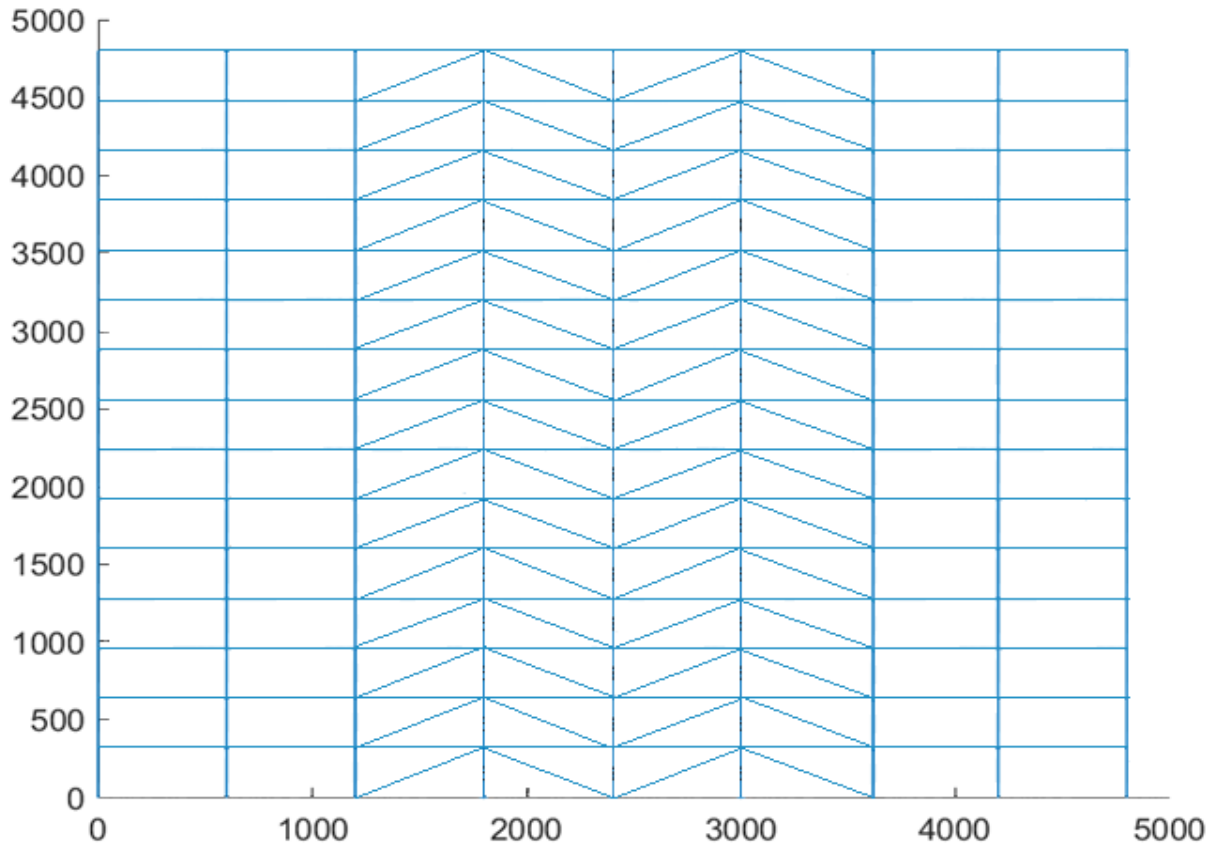


نمودار (۴-۶۳): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه با مهاربند هفتی\_ هشتی

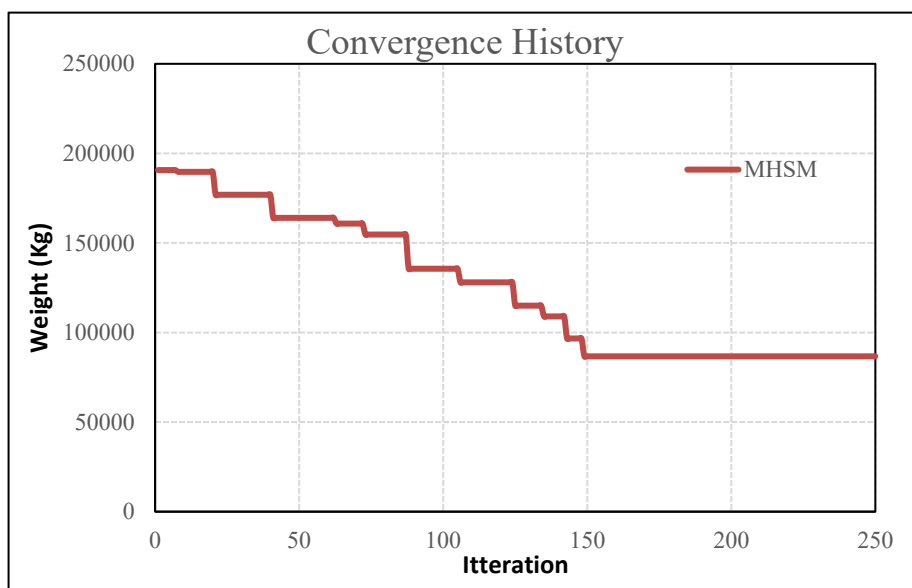


نمودار (۴-۶۴): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه با مهاربند هفتی\_ هشتی

#### ۳۰-۴ نتایج قاب ۱۵ طبقه (هشت دهانه و مهاربند قطری)

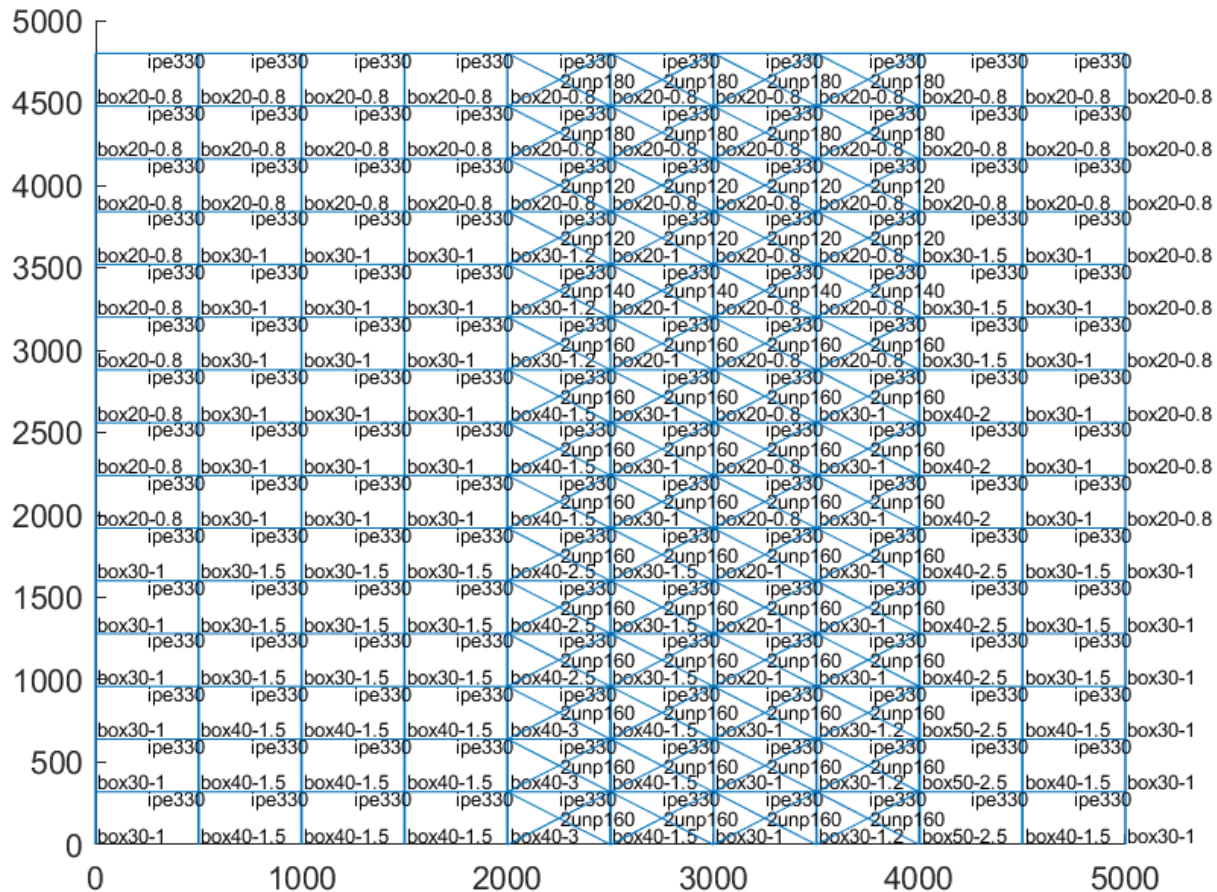


شکل (۴-۲۴): موقعیت بهینه مهاربند قطری در قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه

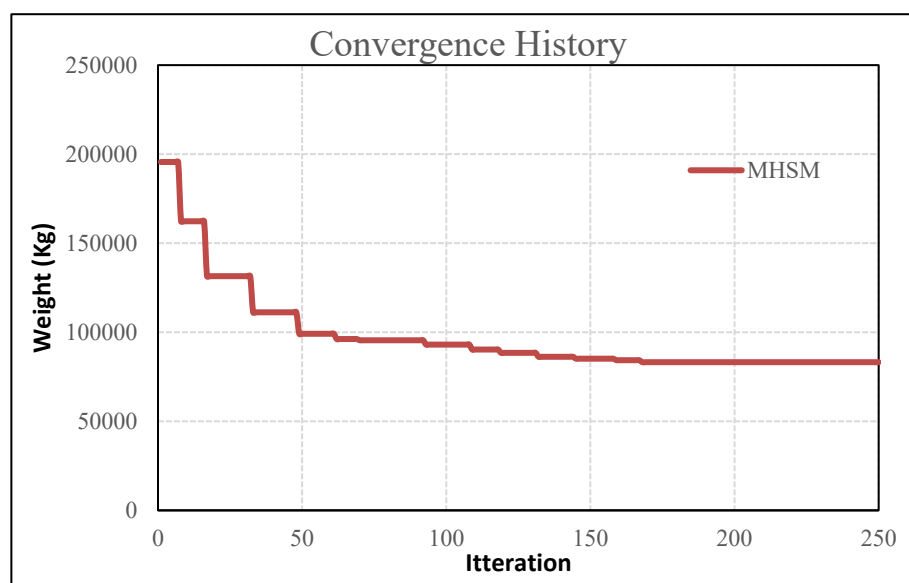


نمودار (۴-۶۵): تاریخچه همگرایی برای قاب ۱۵ طبقه ۸ دهانه با مهاربند قطری

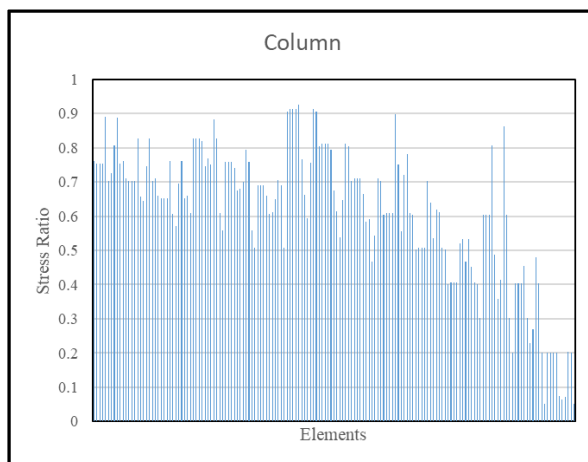
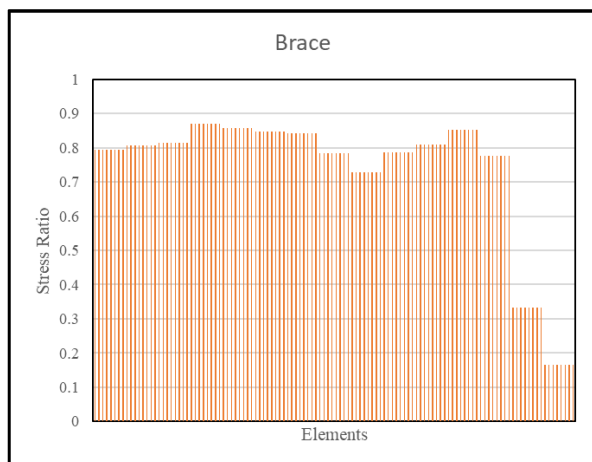
#### ۴-۳۱ نتایج قاب ۱۵ طبقه (ده دهانه و مهاربند ضربدری)



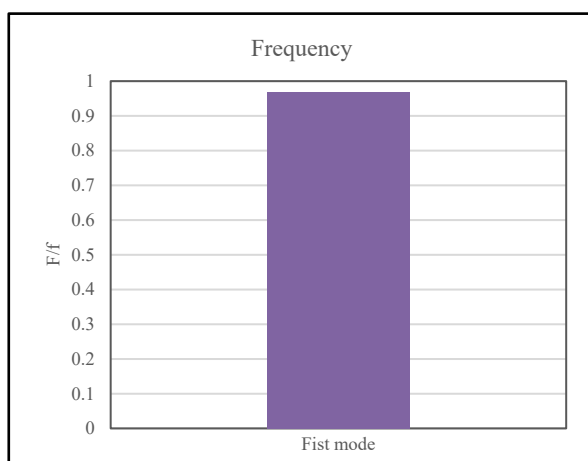
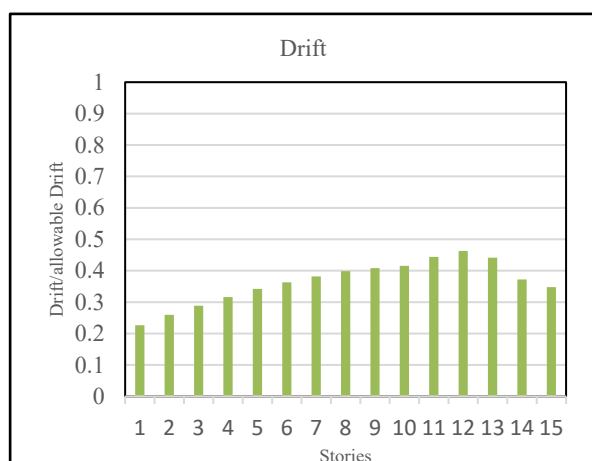
شکل (۴-۲۵): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند ضربدری در قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه



نمودار (۴-۶۶): تاریخچه همگرایی برای قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه با مهاربند ضربدری

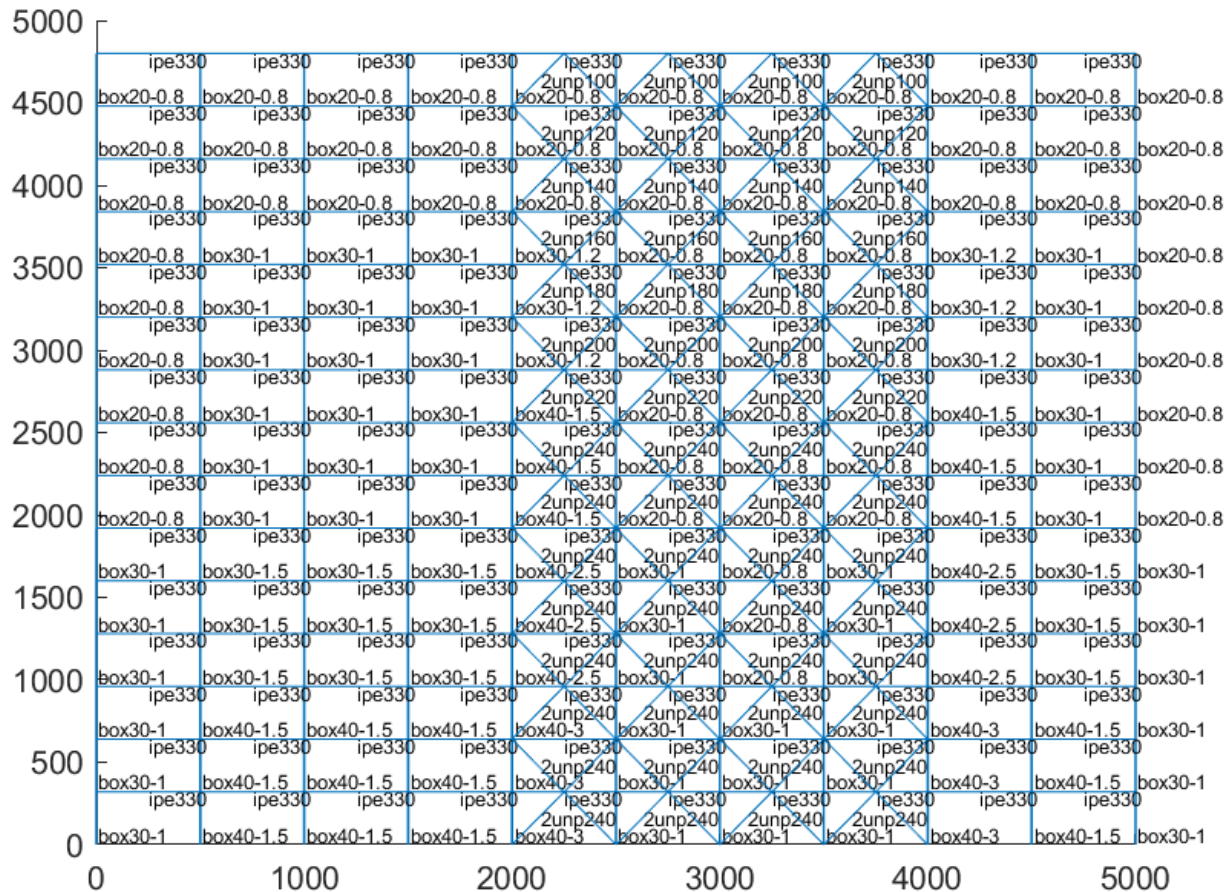


نمودار (۴-۶۷): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه با مهاربند ضربدری

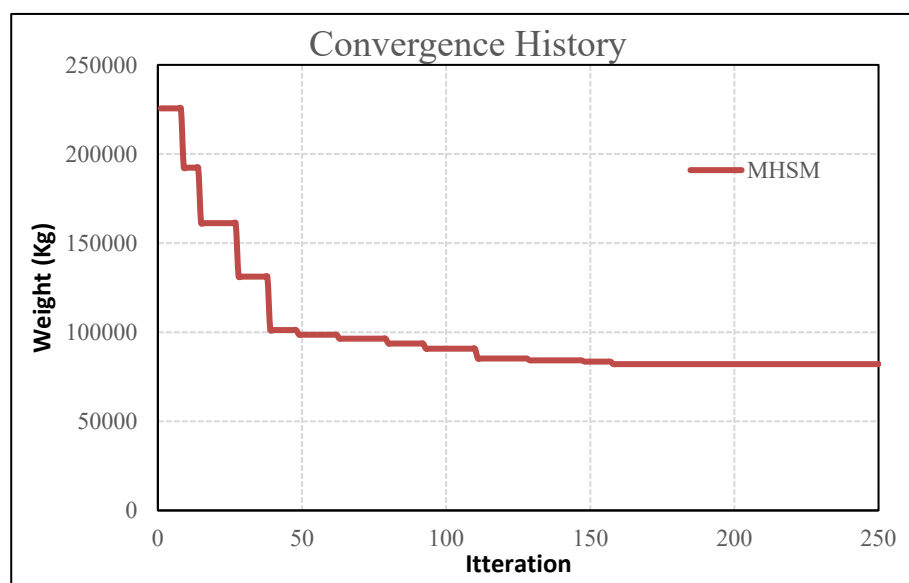


نمودار (۴-۶۸): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه با مهاربند ضربدری

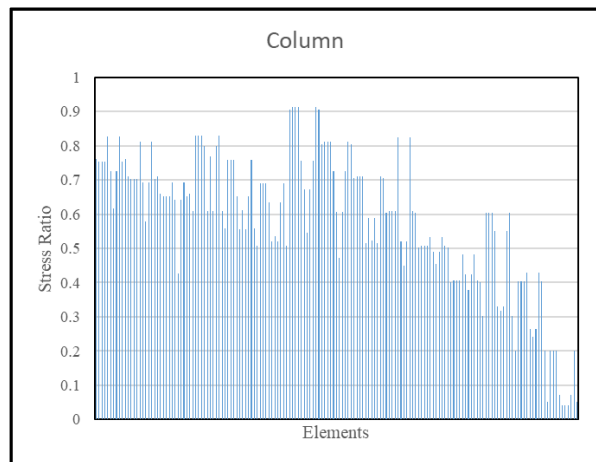
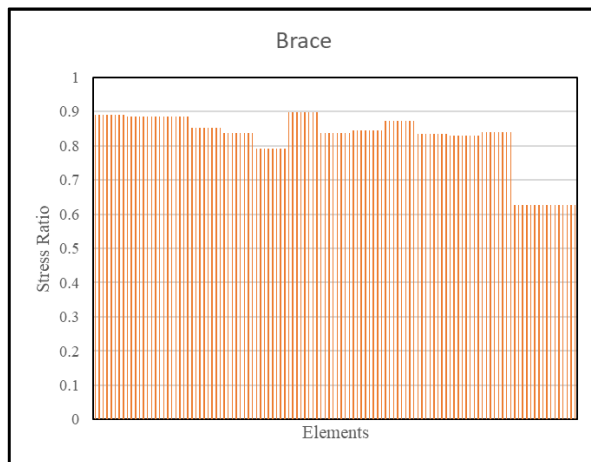
#### ۴-۳ نتایج قاب ۱۵ طبقه (ده دهانه و مهاربند هفتی\_ هشتی)



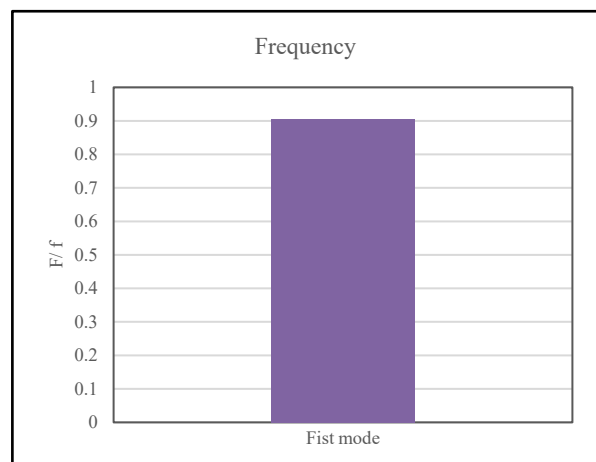
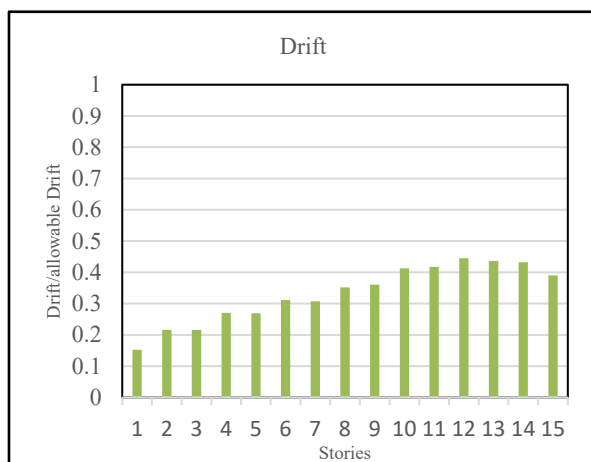
شکل (۴-۲۶): مقاطع و موقعیت بهینه مهاربند هفتی\_ هشتی در قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه



نمودار (۴-۶۹): تاریخچه همگرایی برای قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه با مهاربند هفتی\_ هشتی

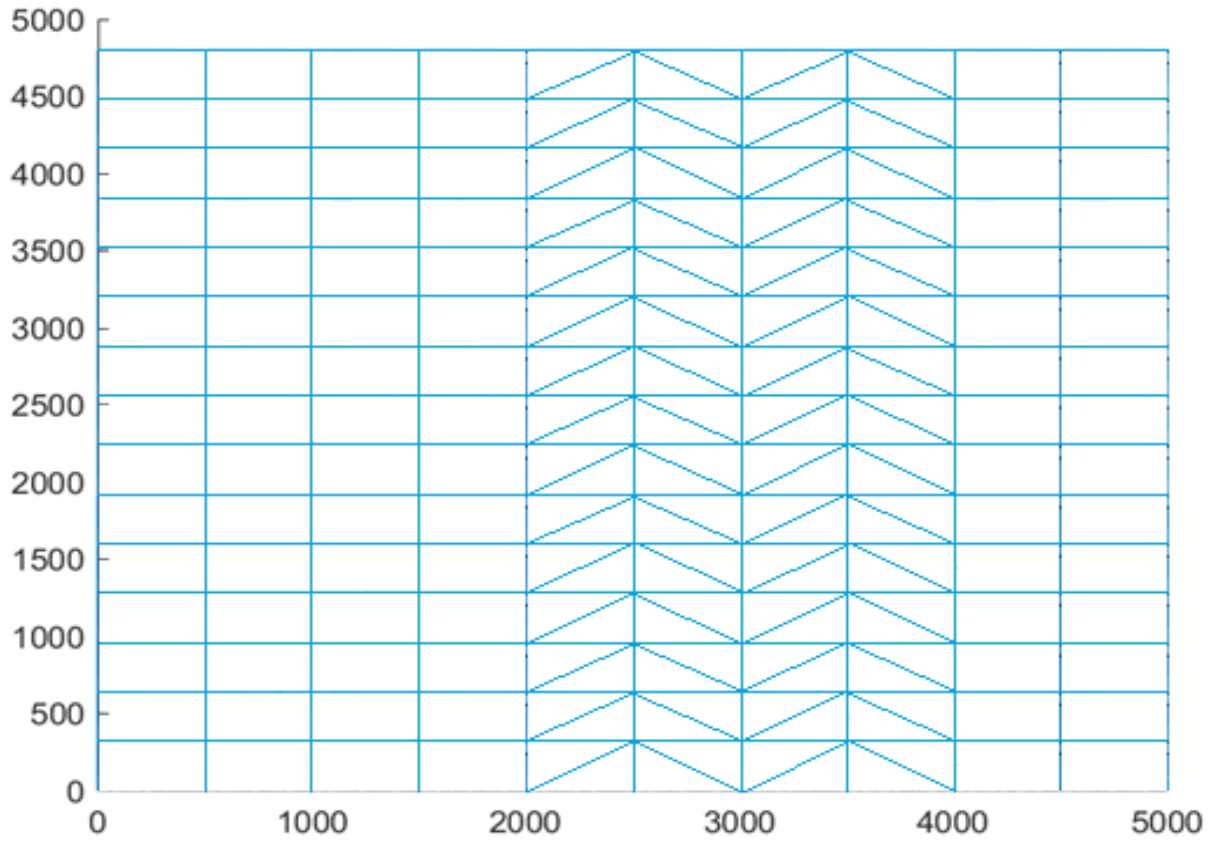


نمودار (۴-۷۰): نسبت تقاضا به ظرفیت در قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه با مهاربند هفتی-هشتی

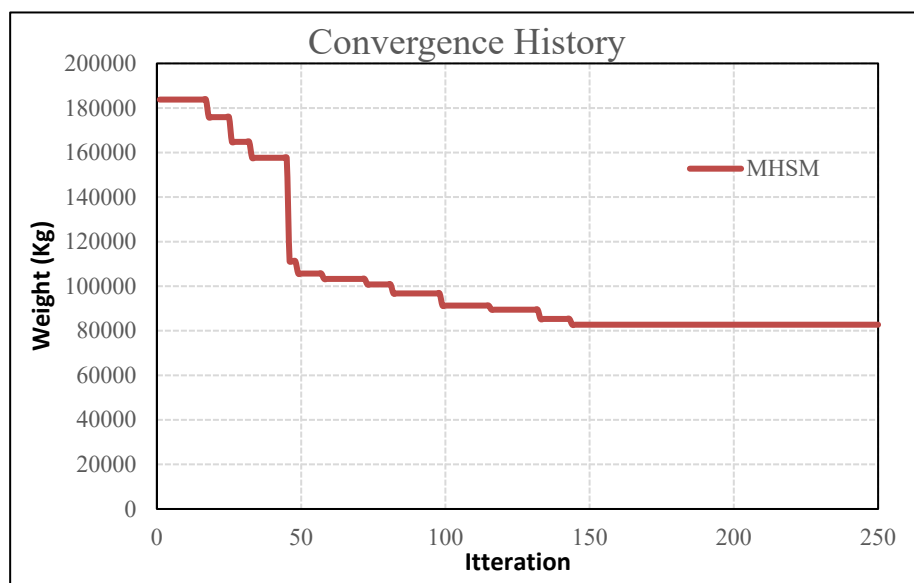


نمودار (۴-۷۱): نسبت فرکانس بار و جابجایی نسبی به فرکانس و جابجایی نسبی مجاز در قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه با مهاربند هفتی-هشتی

### ۳۳-۴ نتایج قاب ۱۵ طبقه (ده دهانه و مهاربند قطری)



شکل (۴-۲۷): موقعیت بهینه مهاربند قطری در قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه



نمودار (۴-۷۲): تاریخچه همگرایی برای قاب ۱۵ طبقه ۱۰ دهانه با مهاربند قطری

## ۴-۳ جمع بندی نتایج

در این قسمت نتایج منتج شده از اشکال و نمودارها در قالب جدول درج میگردد تا در فصل پنجم بررسی جامعی روی آنها صورت بپذیرد. در جدول (۴-۵) عملکرد مطلوب روش کاوش چندفرآبتکاری نسبت به الگوریتم کلونی مورچگان مشاهده می‌گردد. در جدول (۴-۶) عمدتاً عملکرد مناسب سیستم مهاربندی هفتی-هشتی یک در میان به نسبت سیستم مهاربندی ضربدری و قطری در اکثر قابهای پژوهش ملاحظه می‌شود. در جدول (۴-۷) نیز نتایج میانگین قیود در قابها درج گردیده است و نشان دهنده این موضوع می‌باشد که در قابهای بهینه شده نقض قیود مشاهده نمی‌شود.

جدول (۴-۵): مقایسه وزن بهینه قابها در دو الگوریتم MHSM و ACO

| درصد<br>اختلاف وزن | ACO      | MHSM     | تعداد دهانه | تیپ مهاربند           | قاب ۹ طبقه |
|--------------------|----------|----------|-------------|-----------------------|------------|
| ۶/۶۹٪              | ۲۴۷۳۳ kg | ۲۳۱۸۰ kg | چهار دهانه  | مهاربند هفتی-<br>هشتی |            |
| ۷/۸۲٪              | ۲۳۹۳۸ kg | ۲۲۲۰۰ kg | پنج دهانه   |                       |            |
| ۸/۱٪               | ۱۹۹۱۳ kg | ۱۸۴۲۰ kg | شش دهانه    |                       |            |

جدول (۴-۶): مقایسه وزن بهینه قابها با مهاربند ضربدری، مهاربند هفتی-هشتی و مهاربند قطری

| الگوریتم MHSM | تعداد دهانه | مهاربند ضربدری | مهاربند هفتی-هشتی | مهاربند قطری |
|---------------|-------------|----------------|-------------------|--------------|
| قاب ۶ طبقه    | سه دهانه    | ۷۷۱۰ kg        | ۶۸۰۰ kg           | ۷۲۰۰ kg      |
|               | چهار دهانه  | ۶۸۷۰ kg        | ۶۵۰۰ kg           | ۶۵۹۰ kg      |
|               | پنج دهانه   | ۶۲۷۰ kg        | ۶۰۶۰ kg           | ۵۷۵۰ kg      |
| قاب ۹ طبقه    | چهار دهانه  | ۲۵۶۲۰ kg       | ۲۳۱۸۰ kg          | ۲۴۷۰۰ kg     |
|               | پنج دهانه   | ۲۳۸۰۰ kg       | ۲۲۲۰۰ kg          | ۲۲۹۳۰ kg     |
|               | شش دهانه    | ۲۰۹۵۰ kg       | ۱۸۴۲۰ kg          | ۱۹۸۲۰ kg     |
| قاب ۱۵ طبقه   | هفت دهانه   | ۱۰۱۰۰۰ kg      | ۹۸۷۰۰ kg          | ۱۰۳۳۰۰ kg    |
|               | هشت دهانه   | ۹۰۰۰۰ kg       | ۸۵۶۰۰ kg          | ۸۶۷۰۰ kg     |
|               | ده دهانه    | ۸۳۲۰۰ kg       | ۸۲۱۰۰ kg          | ۸۰۰۰۰ kg     |

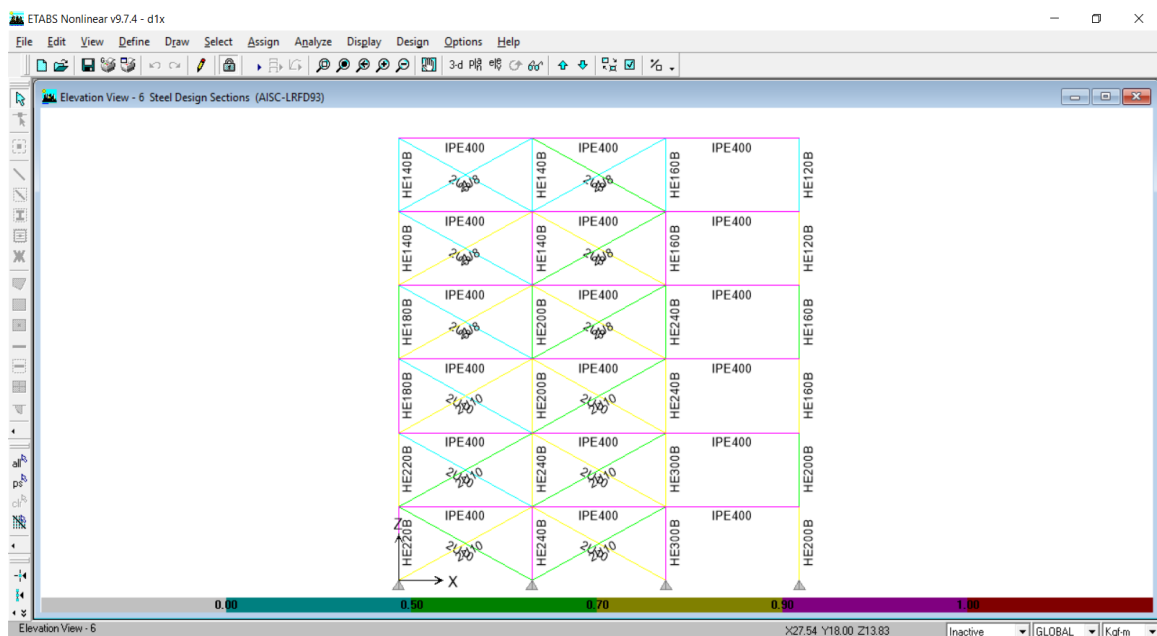
جدول (۷-۴) : میانگین نسبت تنش، میانگین نسبت فرکانس بار به فرکانس قابها و میانگین نسبت جابجایی نسبی به جابجایی مجاز طبقات با مهاربند ضربدری، مهاربند هفتی- هشتی و مهاربند قطری

| مهاربند ضربدری                                           |                                                      |                                     |                                  | مهاربند هفتی- هشتی                                       |                                                      |                                     |                                  | مهاربند قطری                                             |                                                      |                                     |                                  | الگوریتم<br>MHSM |
|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|------------------|
| میانگین<br>نسبت<br>جابجایی<br>نسبی به<br>جابجایی<br>مجاز | میانگین<br>نسبت<br>فرکانس<br>بار به<br>فرکانس<br>قاب | میانگین<br>نسبت<br>تنش<br>مهاربندها | میانگین<br>نسبت<br>تنش<br>ستونها | میانگین<br>نسبت<br>جابجایی<br>نسبی به<br>جابجایی<br>مجاز | میانگین<br>نسبت<br>فرکانس<br>بار به<br>فرکانس<br>قاب | میانگین<br>نسبت<br>تنش<br>مهاربندها | میانگین<br>نسبت<br>تنش<br>ستونها | میانگین<br>نسبت<br>جابجایی<br>نسبی به<br>جابجایی<br>مجاز | میانگین<br>نسبت<br>فرکانس<br>بار به<br>فرکانس<br>قاب | میانگین<br>نسبت<br>تنش<br>مهاربندها | میانگین<br>نسبت<br>تنش<br>ستونها |                  |
| ۰/۶۷                                                     | ۰/۸۱                                                 | ۰/۶۷                                | ۰/۲۱                             | ۰/۶۸                                                     | ۰/۷۷                                                 | ۰/۷۸                                | ۰/۲                              | ۰/۷۶                                                     | ۰/۸۴                                                 | ۰/۷۵                                | ۰/۱۷                             | قاب ۶<br>طبقه    |
| ۰/۶۷                                                     | ۰/۷۷                                                 | ۰/۹۲                                | ۰/۳                              | ۰/۶۷                                                     | ۰/۸۳                                                 | ۰/۸۳                                | ۰/۲۵                             | ۰/۷۳                                                     | ۰/۸۲                                                 | ۰/۹۵                                | ۰/۲۹                             | قاب ۹<br>طبقه    |
| ۰/۶۵                                                     | ۰/۷۸                                                 | ۰/۹۵                                | ۰/۳۳                             | ۰/۶۴                                                     | ۰/۸۵                                                 | ۰/۸۵                                | ۰/۲۹                             | ۰/۷۲                                                     | ۰/۸۶                                                 | ۰/۹۱                                | ۰/۳۲                             | قاب ۱۵<br>طبقه   |

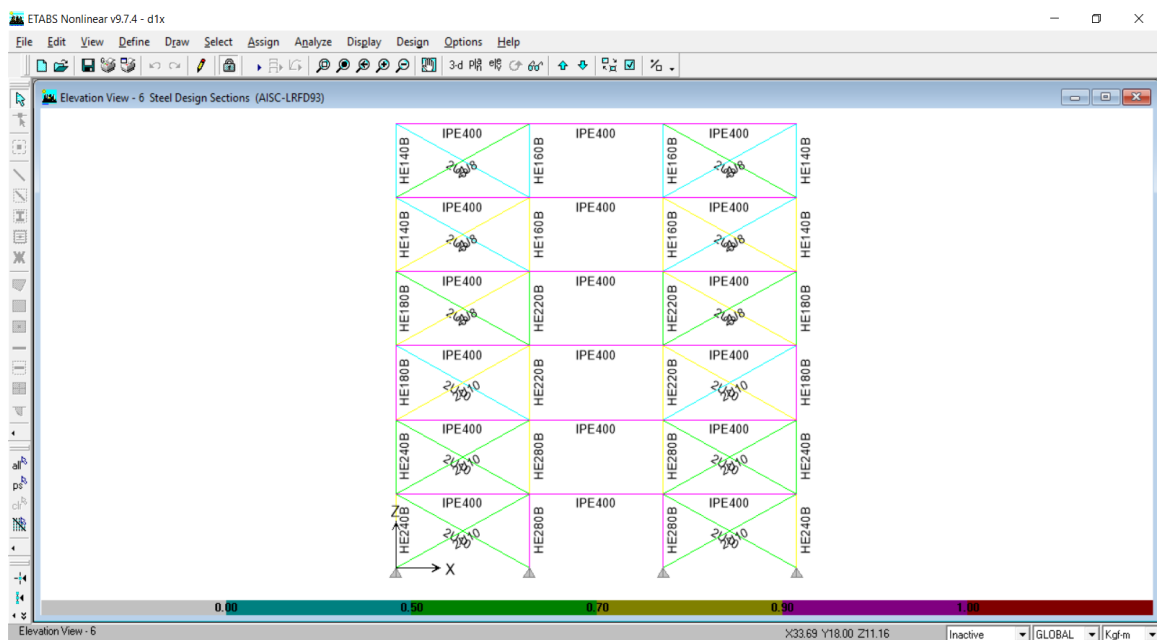
## ۴-۳ مقایسه نتایج حاصل شده با نتایج طراحی به روشهای متداول

در این بخش به بحث و بررسی نتایج طراحی بهینه دو قاب نمونه از تحقیق پرداخته‌ایم تا نشان بدهیم که روش بهینه‌یابی این پژوهش نسبت به روشهای طراحی متداول که توسط مهندسین محاسب به کار گرفته می‌شود از چه اهمیتی برخوردار است. برای این منظور در مرحله اول قابهای شش طبقه سه دهانه و نه طبقه چهار دهانه را با نرم‌افزار مرسوم طراحی (ایتبس) کنترل می‌نمائیم. جهت رسیدن به این هدف ابتدا هندسه دو قاب را در نرم‌افزار ایتبس مدل نموده و سپس مقاطع بهینه شده قابها توسط روش این تحقیق را به المانهای قابها اختصاص داده و نهایتاً با اعمال بارگذاری (مشابه بارهای تحقیق) و تنظیم پارامترهای طراحی ستونها، تیرها، بادبندها و همچنین اعمال آیین نامه طراحی LRFD، به تحلیل و کنترل مجدد قابها می‌پردازیم. در انتهای مرحله اول نیز نتایج نسبت تنش المانها طبق اشکال (۴-۲۸) و (۴-۳۱) ارائه می‌شود. در مرحله دوم هم با جابجایی بادبندها، تغییرات در تعداد بادبندها و اعمال قیود مشخص شده در رساله بر قابهای مذکور مطابق اشکال (۴-۲۹)، (۴-۳۰)، (۴-۳۲) و (۴-۳۳) به تحلیل و طراحی حالتیهای

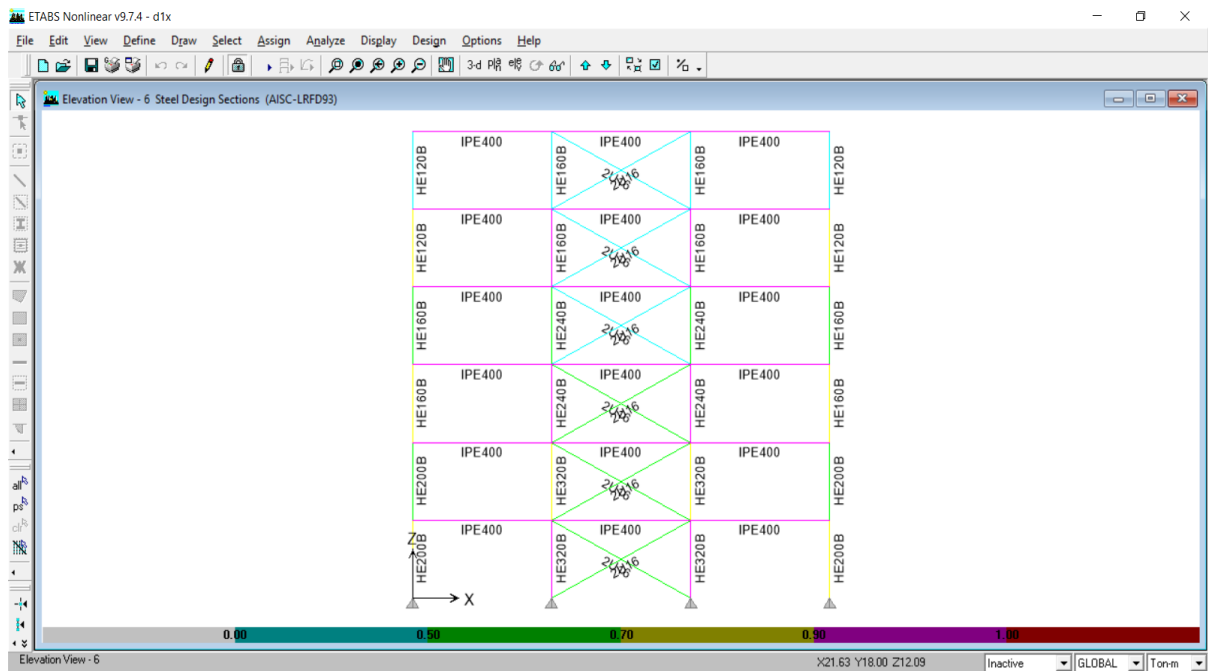
مختلف این دو قاب پرداخته و وزنهای طراحی استخراج می‌گردد. نهایتاً طبق جدول (۴-۸) وزنهای حالت‌های طراحی شده بهینه با ایتبس و اوزان دو قاب بهینه شده به وسیله روش کاوش چندفرایندگرایی قیاس می‌گردد.



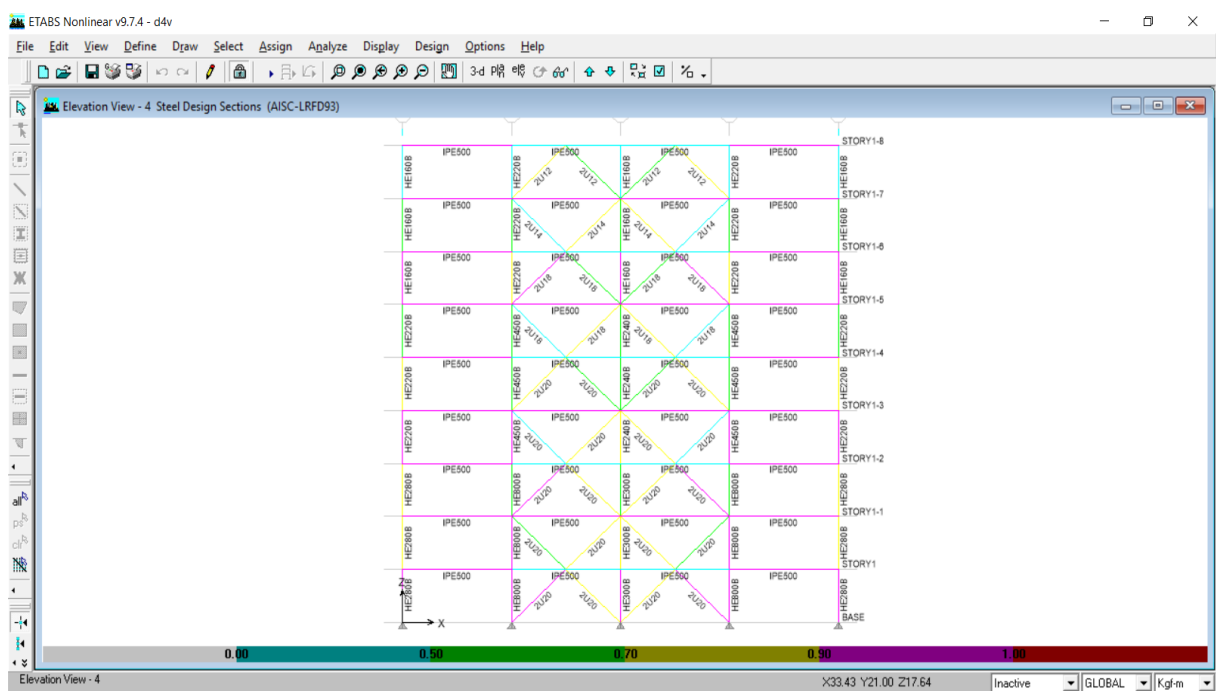
شکل (۴-۲۸): کنترل مقاطع قاب بهینه شده ۶ طبقه با مهاربند ضربدری در نرم افزار ایتبس



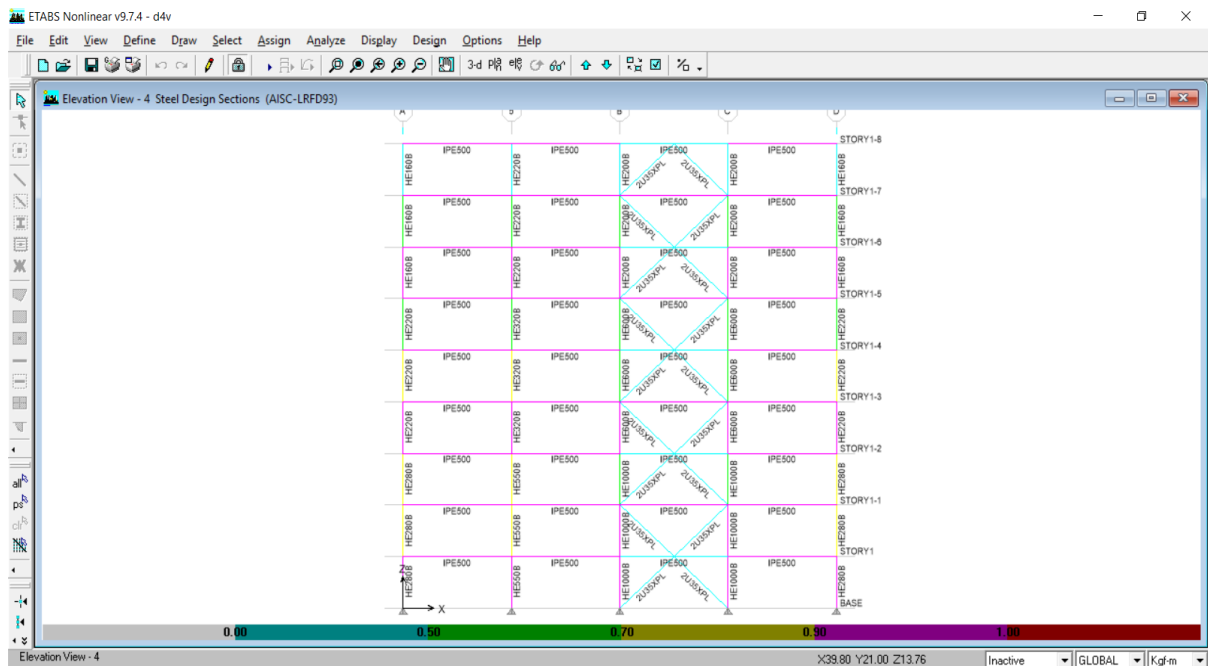
شکل (۴-۲۹): طراحی مقاطع بهینه قاب ۶ طبقه، معرفی شده توسط کاربر در نرم افزار ایتبس (وزن ۸/۱ تن، حالت اول)



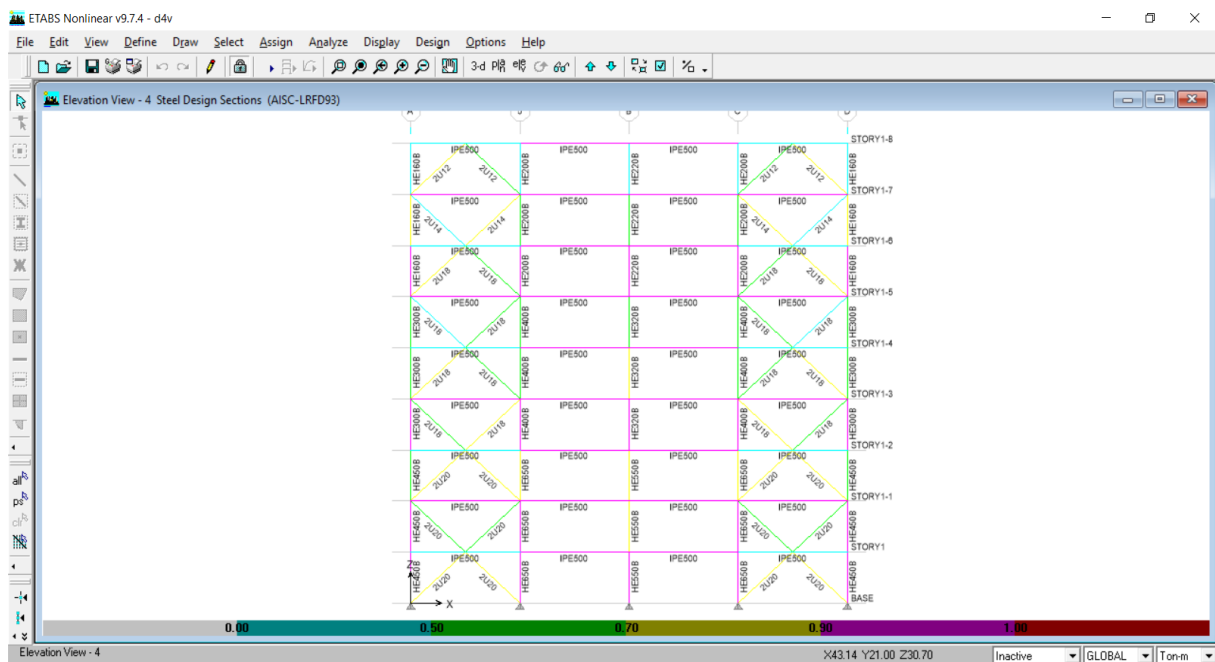
شکل (۴-۳): طراحی مقاطع بهینه قاب ۶ طبقه، معرفی شده توسط کاربر در نرم افزار ایتبس (وزن ۷/۹۷ تن، حالت دوم)



شکل (۴-۳۱): کنترل مقاطع قاب بهینه شده ۹ طبقه با مهاربند هفتی- هشتی در نرم افزار ایتبس



شکل (۴-۳۲): طراحی مقاطع بهینه قاب ۹ طبقه، معرفی شده توسط کاربر در نرم افزار ایتبس (وزن ۳۰ تن، حالت اول)



شکل (۴-۳۳): طراحی مقاطع بهینه قاب ۹ طبقه، معرفی شده توسط کاربر در نرم افزار ایتبس (وزن ۲۵/۸۶ تن، حالت دوم)

جدول (۴-۸) : مقایسه وزن بهینه دو قاب ۶ و ۹ طبقه در حالت بهینه‌یابی با الگوریتم رساله و طراحی بهینه با نرم‌افزار ایتبس

| متد بهینه‌یابی    |          | قاب ۶ طبقه | قاب ۹ طبقه |
|-------------------|----------|------------|------------|
| الگوریتم MHSM     |          | ۷/۶۳ T     | ۲۵/۶۲ T    |
| طراحی با<br>ETABS | حالت اول | ۸/۱ T      | ۳۰ T       |
|                   | حالت دوم | ۷/۹۷ T     | ۲۵/۸۶ T    |

با توجه به نتایج استخراج شده به طور قاطع می‌توان گفت که الگوریتم پیشنهادی این رساله قابها را به شکل ایده‌آل‌تری از نرم‌افزار ایتبس بهینه‌سازی می‌نماید. میانگین دو حالت ذکر شده نیز اختلافی حدود ۵ درصد در قاب ۶ طبقه و حدود ۹ درصد در قاب ۹ طبقه نسبت به قابهای بهینه شده با الگوریتم چندفرابتنکاری را دارند. ضمناً خاطر نشان می‌گردد که در فرآیند بهینه‌یابی با نرم‌افزار ایتبس مکان و تعداد بادبندها باید توسط کاربر و به صورت دستی مشخص شود. بررسی نتایج کنترل طراحی دو قاب بهینه شده رساله (علاوه بر صحت‌سنجی مندرج در فصل سوم) با نرم‌افزار ایتبس نیز نشان از نبود ناهنجاری در کدها و برنامه تحلیلی به کار رفته شده را دارد.



## فصل پنجم : نتیجه گیری و پیشنهادات

## ۵-۱ مقدمه

در فصل پیشین تمام قابهای این پژوهش توسط الگوریتم چندفراابتکاری مورد بهینه‌یابی قرار گرفتند و در نتیجه مقاطع بهینه، موقعیت بهینه و تعداد دهانه‌های مهاربندی (تحت قیود فرکانس، جابجایی نسبی و مقاومت طراحی) به کمک الگوریتم فوق‌الذکر مشخص گردیدند. سپس جزئیات نتایج تحلیل و بهینه‌یابی به تفصیل برای هر قاب در چارچوبی مشخص ارائه شد. همچنین نمودار مقایسه تاریخچه همگرایی الگوریتم کلونی مورچگان با الگوریتم چندفراابتکاری (الگوریتم بهینه‌یابی این تحقیق) نیز جهت نشان دادن کارایی الگوریتم مذکور در بهینه‌یابی برای هر قاب در فصل قبل ارائه گردید.

اکنون در این فصل نتایج به دست آمده در قابهای بهینه‌یابی شده، مورد بحث و بررسی قرار گرفته و مقایسه می‌شوند. در قسمت انتهایی فصل نیز پیشنهاداتی برای ادامه پژوهش ارائه می‌گردد.

## ۵-۲ مقایسه نتایج بهینه در قابهای ۹ طبقه با الگوریتم MHSM و

### الگوریتم ACO

همانگونه که در جدول (۴-۵) مشخص می‌باشد قابهای نه طبقه با مهاربندی مهاربندی هفتی-هشتی تحت الگوریتم بهینه‌سازی چندفراابتکاری (MHSM) در مقابل الگوریتم ACO وزن کمتری دارند. این موضوع نشان می‌دهد که الگوریتم پژوهش از عملکرد مناسبی در زمینه بهینه‌سازی نسبت به الگوریتم فراابتکاری ACO برخوردار است.

همچنین می‌توان با مقایسه نمودارهای همگرایی فصل چهارم، میزان برتری همگرایی الگوریتم MHSM را در مقابل الگوریتم ACO مشاهده نمود. در این قابها، الگوریتم ACO با میانگین ۸۶ تکرار بیشتر از الگوریتم MHSM به همگرایی رسیده است. (میانگین همگرایی برابر با ۱۳۶ تکرار برای

الگوریتم MHSM و ۲۲۲ تکرار برای الگوریتم ACO) همچنین به طور متوسط وزن قابها در شروع بهینه- سازی با الگوریتم ACO ۵۱ درصد بیشتر از الگوریتم MHSM می‌باشد.

## ۳-۵ مقایسه نتایج بهینه در قابها با آرایش مهاربندی ضربدری،

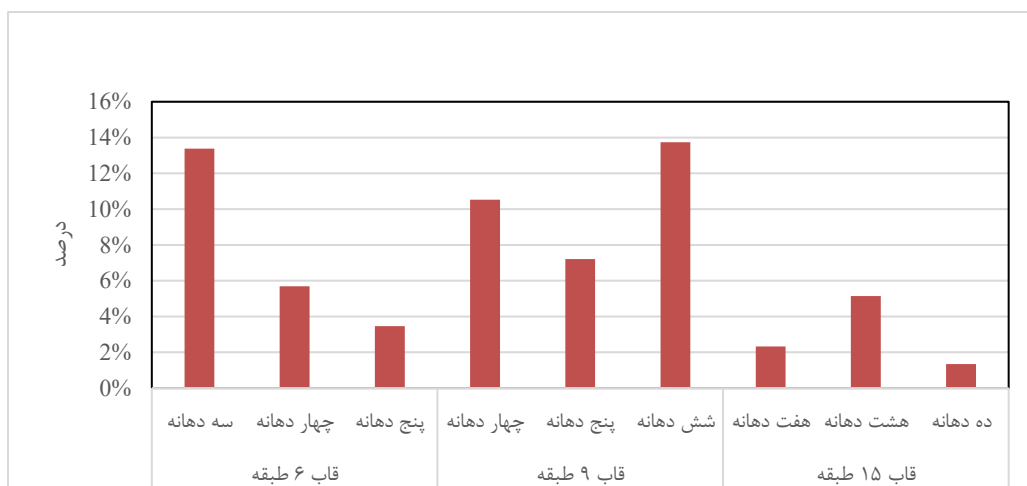
### هفتی- هشتی و قطری

با انجام بهینه‌یابی به روش الگوریتم نوآورانه چندفرابتنکاری و مطابق جدول (۴-۶) در مرتبه اول مهاربندهای هفتی و هشتی برای اکثر قابهای مورد مطالعه در این تحقیق عملکرد بهتری از جهت مقدار وزن (اقتصادی بودن طرح) و به تبع آن کاهش وزن لرزه‌ای داشتند. قابل ذکر است که در قابهای کوتاه مرتبه و بلند مرتبه‌ای که تعداد دهانه زیاد (۵ دهانه به بالا در قاب کوتاه مرتبه و ۱۰ دهانه به بالا در قاب بلند مرتبه) و طول دهانه کمی دارند سیستم مهاربندی قطری بهتر عمل نموده است.

در مرتبه دوم سیستم مهاربندی قطری در قابهای کوتاه، میان و بلند مرتبه نسبت به قابها با سایر مهاربندهای دیگر بهتر عمل نموده است و نتیجتاً اولویت دوم استفاده از سیستم مهاربندی قطری در قابها می‌باشد. البته مورد استثنا استفاده از این تیپ مهاربند در قابهای بلند مرتبه با تعداد دهانه کم (تا ۷ دهانه) و طول دهانه زیاد می‌باشد که باعث افزایش وزن بیشتر نسبت به قاب با مهاربندی ضربدری و مهاربندی هفتی- هشتی می‌گردد.

در نمودار (۵-۱) درصد اختلاف وزن قابهای مورد مطالعه با مهاربند ضربدری نسبت به مهاربند هفتی- هشتی، در نمودار (۵-۲) درصد اختلاف وزن قابهای مورد مطالعه با مهاربند قطری نسبت به مهاربند هفتی- هشتی و در نمودار (۵-۳) درصد اختلاف وزن قابهای مورد مطالعه با مهاربند ضربدری نسبت به مهاربند قطری نشان داده شده است. با بررسی جزئیات نتایج استخراج شده می‌توان دریافت که سهم وزنی اختلاف در قابهای بلند، کوتاه و میان مرتبه بین سه گروه مهاربندی، اول ناشی از کمتر شدن وزن ستونها و

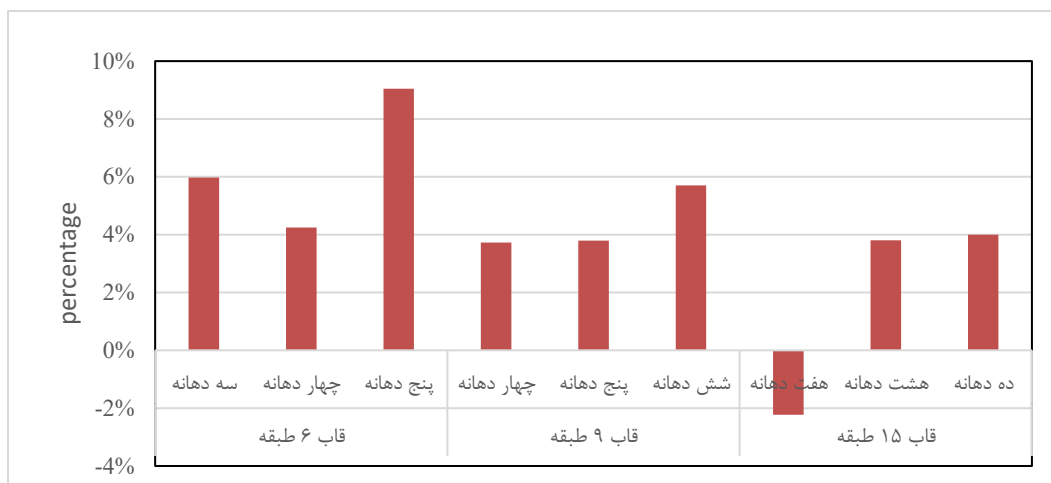
سپس کمتر شدن وزن مهاربندها در قابهای مهاربندی هفتی\_ هشتی نسبت به قابهای با مهاربندی ضربدری و مهاربندی قطری است به عبارت دیگر تاثیر کاهش وزن ستونها در اختلاف ذکر شده بیشتر از تاثیر کاهش وزن در مهاربند قابها است.



نمودار (۵-۱): درصد اختلاف وزن قابها با مهاربند ضربدری نسبت به مهاربند هفتی\_ هشتی



نمودار (۵-۲): درصد اختلاف وزن قابها با مهاربند قطری نسبت به مهاربند هفتی\_ هشتی



نمودار (۳-۵): درصد اختلاف وزن قابها با مهاربند ضربدری نسبت به مهاربند قطری

## ۴-۵ بررسی و تفسیر نمودارهای نتیجه از قیود اعمالی بر قابها

چنانکه در نمودارهای فصل پیشین مشخص است تمام قیود ارضاء شده‌اند و نسبت‌ها نیز تماماً کوچکتر از یک می‌باشند. در جدول (۷-۴) نیز میانگین نسبت تنش ستونها، مهاربندها، میانگین نسبت فرکانس بار به فرکانس قابها و همچنین میانگین نسبت جابجایی نسبی به جابجایی مجاز طبقات قابها نمایش داده شده است. محدوده نسبت تنش المانها در هر دو گروه مهاربندی عموماً بین ۰/۶۵ الی ۰/۸۵ می‌باشد که نشانگر است طرحها از نظر اقتصادی قابل توجیه می‌باشند. علت کم بودن نسبت جابجایی نسبی به جابجایی مجاز طبقات نیز به خاطر این موضوع است که با در نظر گرفتن قید فرکانس، برنامه بهینه‌سازی تعداد دهانه بیشتری را بابدندگذاری می‌نماید تا قید فرکانس ارضاء گردد و نتیجتاً نیروی زلزله بین المانهای بیشتری توزیع می‌شود و به تبع آن وزن قاب نیز بهینه می‌گردد. در نهایت نیز مقادیر نسبت فرکانس بار به فرکانس قابها بیانگر این موضوع است که محدودیت فرکانس ارتعاشی سازه به همراه قیود تعریف شده دیگر منجر به طرح اصولی‌تری شده است. البته همانگونه که مشخص است این نسبت در قابهای کوتاه مرتبه کمتر از نسبت به دست آمده در قابهای بلند مرتبه است و بیانگر صلبیت بیشتر قابهای کوتاه مرتبه می‌باشد.

## ۵-۵ خلاصه و نتیجه گیری

در این رساله طرح بهینه قابهای فولادی ساده کوتاه، میان و بلند مرتبه با تعداد دهانه های مختلف و سه نوع آرایش مهاربندی (مهاربندی ضربدری، مهاربندی هفتی - هشتی و مهاربندی قطری) با استفاده از الگوریتم چندفرآینتکاری (MHSM) به دست آمد و مقایسه ای نیز با الگوریتم کلونی مورچگان (ACO) انجام پذیرفت. استفاده و انتخاب از سیستم مهاربند هفتی- هشتی در این رساله به خاطر این موضوع بود که این سیستم از نظر لرزه ای دارای محاسنی نسبت به، مهاربندی هفتی و مهاربندی هشتی می باشد. چون در قاب با مهاربندی هفتی- هشتی نیروی عمودی نامتوازن از طرف مهاربندهای فشاری و کششی به تیر وجود ندارد (یا ناچیز است) و نتیجتاً تشکیل طبقه نرم به علت انهدام تیر و خرابی طبقه امکان پذیر نیست، در حالی که در مهاربندی هفتی و مهاربندی هشتی به علت وجود این نیرو نامتعادل کننده قائم خرابی تیر در طبقه محتمل است.

✿ با توجه به نتایج بدست آمده برای وزن بهینه قابها تحت الگوریتم چندفرآینتکاری و مقایسه جوابها با وزن بهینه همان قابها تحت الگوریتم کلونی مورچگان و همچنین بررسی این الگوریتم با الگوریتم مقاله صحت سنجی فصل سوم و نیز طراحی بهینه انجام شده با نرم افزار ایتبس مندرج در فصل چهارم مشاهده می گردد که الگوریتم چندفرآینتکاری استفاده شده در این رساله دارای جوابهای ایده آل تری می باشد.

✿ با بررسی نمودارهای همگرایی الگوریتم کلونی مورچگان در قابهای مذکور مشاهده می گردد که الگوریتم چندفرآینتکاری از روند همگرایی مطلوب تری نسبت به الگوریتم فرآینتکاری منتخب برخوردار است.

✿ در مواردی که به خاطر فراوان بودن شمار پارامترهای طراحی و گسترده شدن پهنه جستجو، نقش مقادیر ورودی در الگوریتمهای فرآینتکاری تاثیر اساسی را ایفا می نماید، الگوریتم چندفرآینتکاری باعث کمتر شدن نقش این مقادیر و رابطه های موثر بر محاسبات می شود و به طور مؤثر فضای طراحی را مورد کاوش قرار می دهد تا در نهایت جوابهای مناسب ارائه گردد. توضیح بیشتر برای نشان دادن تعداد بالای

متغیرهای طراحی مسائل این پژوهش آنکه مثلاً در قاب ۱۵ طبقه با ده دهانه فضای طراحی ۴ بعدی می‌شود که دو بعد اول مربوط به مقاطع ستون و مهاربندها است و دو بعد بعدی مربوط به تعداد دهانه‌های مهاربندی و محل قرارگیری آنها می‌باشد. پس می‌توان گفت که بعد سوم در محدوده ۱ تا ۱۱ (تعداد دهانه) می‌باشد و بعد چهارم تمام جایگشت‌های امکان پذیر برای قرارگیری مهاربندها با توجه به تعداد دهانه‌های مهاربندی (بعد سوم) می‌باشد. به عنوان مثال فقط بعد چهارم قاب مذکور با ۴ دهانه مهاربندی برابر با  $\left[\frac{10!}{(4! \times 6!)}\right]$  حالت است.

ضمناً خاطر نشان می‌گردد به دلیل ماهیت این روش بهینه‌سازی، شانس قرار گرفتن در بهینه محلی نیز کاهش می‌یابد.

☞ با توجه به نتایج این رساله به کارگیری سیستم مهاربندی هفتی-هشتی در قابهای ساده، نسبت به استفاده از سیستم مهاربندی ضربدری و مهاربندی قطری دارای اولویت اقتصادی و فنی (مهندسی) می‌باشد. (وزن کمتر در این سیستم باعث کاهش نیروی وارده به جوشهای اتصالات و وصله‌های ستون، کاهش جابجایی طبقات، کاهش لنگر واژگونی سازه، کاهش برش پایه و کاهش نیروی بالابرنده در ستون‌های دهانه-های مهاربندی شده نسبت به قاب با مهاربندی ضربدری و قطری می‌گردد.) همچنین سیستم مهاربندی قابل توصیه بعدی قاب ساده با مهاربندی قطری (به غیر از قابهای بلند مرتبه با طول دهانه زیاد) و نهایتاً سیستم قاب ساده با مهاربندی ضربدری می‌باشد.

☞ با نگرش به این موضوع که رخ دادن پدیده رزونانس در ساختمان در زمان یکی گردیدن فرکانس های ساختمان و فرکانس غالب بار لرزه‌ای ایجاد می‌شود، مقید نمودن فرکانس های ساختمان در طرح قادر خواهد بود از آسیب‌های محتمل سازه هنگام زلزله جلوگیری نماید. ولو در یک زلزله با قدرت کم که اتفاقاً فرکانسش با فرکانس ساختمان دلخواه یکی باشد، با به وجود آمدن پدیده رزونانس در ساختمان و سرانجام رخ دادن جابجایی‌های افقی زیاد که در محدوده توانایی مصالح به کار رفته نباشد، از بین رفتن ساختمان آنچنان دور از ذهن نیست. مجموعاً پایش فرکانس و مقید نمودن آن به محدوده‌ای برگزیده در قابهای مورد

مطالعه، باعث شد تا میزان ارتعاش قابها خفیفتر شده و نهایتاً، جابجایی المانها و تنشها در ساختمان به کمترین حالت خود برسد.

در مورد محل بهینه مهاربندها در قابها به طور قطع می‌توان گفت که بهترین محل جایگذاری مهاربندها در دهانه‌های مرکزی و مجاور هم می‌باشد. علت نیز به این دلیل می‌باشد که چنانکه دهانه‌ها با فاصله از هم مهاربندگذاری شوند وزن اسکلت به خاطر ارضاء شدن قید فرکانس بالاتر می‌رود. همچنین مطابق بر نتایج این پژوهش توصیه می‌گردد در قابهای کوتاه و میان مرتبه حداقل دو دهانه و در قابهای بلند مرتبه نیز حداقل چهار دهانه مهاربندگذاری گردد.

## ۵-۶ پیشنهادات

- برای تحقیقات آینده، پیشنهادات ذیل در جهت ادامه مسیر این تحقیق به شرح زیر ارائه می‌شود.
۱. استفاده از تحلیل غیرخطی و دینامیکی در روند بهینه‌سازی قابهای معرفی شده جهت مقایسه جوابها با نتایج مندرج در این رساله و انتخاب تحلیل موثر و بهینه.
  ۲. بررسی انواع دیگر مهاربندها، خصوصاً قابهای مهاربندی شده زیپدار و مهاربندهای برون محور برای انتخاب اقتصادی‌ترین (با ملاک وزن) قاب مهاربندی.
  ۳. طراحی بهینه قابهای رساله بر مبنای قابلیت اطمینان [این روش در جستجو یافتن بهترین توازن مابین ایمنی و هزینه (با درنظر گرفتن عدم قطعیت‌های سازه و بار) است.] با استفاده از الگوریتم‌های به کار گرفته شده در این تحقیق و مقایسه نتایج حاصل شده با نتایج موجود.
  ۴. استفاده از ترکیب الگوریتم‌ها (به عنوان مثال ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک، کلونی مورچگان، جستجو هارمونی یا ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات) برای پیاده‌سازی جزیره‌های روش الگوریتم چندفرابتنکاری و مقایسه با نتایج موجود رساله جهت انتخاب نوع تیپ جزایر (مبتنی بر استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی یا تک الگوریتم‌ها) برای رسیدن به بهینه ترین جواب ممکن.

پیوست‌ها

## الف: برنامه تحلیل در اپنسیس

```
wipe;
#-----

for {set k 1} {$k <= 3} {incr k 1} {
model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3

set coorx [open "coordinate.x.out" "w"]
set coory [open "coordinate.y.out" "w"]
set xx [open "x.out" "w"]
set yy [open "y.out" "w"]

# Read details of model from file
source INPUT.tcl
source section.tcl
set h [expr 1.0*$H/$nS]

# dead and live and seismic load-----
set DEAD [expr 550.0/10000.0]
set LIVE [expr 200.0/10000.0]
set D [expr $DEAD*$b]
set L [expr $LIVE*$b]
set T [expr 0.0488*$H**(0.75)]
if {$T <= 0.5} {
    set kk 1
} elseif {$T >= 2.5} {
    set kk 2
} else {
    set kk 2
}
set C [expr (2/3.0)*1.0/6.0]
set W [expr $nB*$b*$nS*($D+0.2*$L)]

set Fb [expr $C*$W]
set m [expr $nB*$b*($D+0.2*$L)]
set mz 0
for {set j 1} {$j <= $nS} {incr j 1} {
    set mz [expr $mz+$m*($h*$j)**$kk]
}
for {set j 1} {$j <= $nS} {incr j 1} {
    lappend f [expr $Fb*$m*($h*$j)**$kk)/($mz*1.0)]
}

# Create nodes columns-----
for {set j 1} {$j <= [expr $nB+1]} {incr j 1} {
    for {set i 1} {$i <= [expr $nS+1]} {incr i 1} {
        set nn [expr ($j-1)*($nS+1)+$i]
        set x [expr ($j-1)*$b]
        set y [expr ($i-1)*$h]
        node $nn $x $y

puts $xx $x
puts $yy $y

}
}

for {set j 1} {$j <= [expr $nS]} {incr j 1} {
    for {set i 1} {$i <= [expr $nB+1]} {incr i 1} {

set x [expr ($i-1)*$b]
set y [expr ($j-1)*$h]

puts $coorx $x
puts $coory $y
```

```

puts $coorx $x
puts $coory [expr $y+$h]

}
}

# Create nodes beam-----
for {set j 1} {$j <= [expr $nS]} {incr j 1} {
  for {set i 1} {$i <= [expr $nB]} {incr i 1} {
    set nn1 [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($j-1)*($nB)+3*($i-1)+1]
    set nn2 [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($j-1)*($nB)+3*($i-1)+2]
    set nn3 [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($j-1)*($nB)+3*($i-1)+3]
    set x [expr ($i-1)*$b]
    set y [expr ($j)*$h]

    puts $xx $x
    puts $yy $y

    puts $xx [expr $x+$b]
    puts $yy $y

#beam
node $nn1 $x $y
node $nn2 [expr $x+$b/2.0] $y
node $nn3 [expr $x+$b] $y

puts $coorx $x
puts $coory $y
puts $coorx [expr $x+$b]
puts $coory $y

}
}

# Set the boundary conditions
for {set j 1} {$j <= [expr $nB+1]} {incr j 1} {
  set nn [expr ($nS+1)*($j-1)+1]

  fix $nn 1 1 0
}

# Define geometric transformations for beam-column elements
geomTransf Linear 1;
geomTransf Linear 2;
geomTransf Linear 3;

# Define the Columns
for {set j 1} {$j <= [expr $nB+1]} {incr j 1} {
  for {set i 1} {$i <= [expr $nS]} {incr i 1} {
    set n1 [expr ($j-1)*($nS+1)+$i]
    set n2 [expr $n1+1]
    set elen [expr ($i-1)*($nB+1)+$j]
    set elet $elen
    element elasticBeamColumn $elen $n1 $n2 [lindex $A [expr $elet-1]] $E [lindex $I [expr $elet-1]] 1
  }
}

# Define the beam
for {set j 1} {$j <= [expr $nS]} {incr j 1} {
  for {set i 1} {$i <= [expr $nB]} {incr i 1} {
    set n1 [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($j-1)*($nB)+($i-1)*3+1]
    set n2 [expr $n1+1]
    set n3 [expr $n1+2]
    set elen [expr ($nB+1)*$nS+2*($j-1)*($nB)+2*($i-1)+1]
    set elet [expr ($nB+1)*$nS+($j-1)*($nB)+$i]

    element elasticBeamColumn $elen $n1 $n2 [lindex $A [expr $elet-1]] $E [lindex $I [expr $elet-1]] 2
    element elasticBeamColumn [expr $elen+1] $n2 $n3 [lindex $A [expr $elet-1]] $E [lindex $I [expr $elet-1]] 2
  }
}

```

```

}

# Define the brace
set t 1
for {set j 1} {$j <= [expr $nobj]} {incr j 1} {
set jj [lindex $btob [expr $j-1]]
set ii [lindex $stob [expr $j-1]]

set bt [lindex $bctype [expr [lindex $stob [expr $j-1]]-1]]

set nn [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($nB)*($nS)+$t]

set x [expr ($jj-1)*$b]
set y [expr ($ii)*$h]

if {$bt == 1} {
#brace
node [expr $nn] [expr $x+$b/2.0] $y
node [expr $nn+1] [expr $x+$b/2.0] $y
node [expr $nn+2] [expr $x] [expr $y-$h]
node [expr $nn+3] [expr $x+$b] [expr $y-$h]

puts $xx [expr $x+$b/2.0]
puts $yy $y

puts $xx [expr $x+$b/2.0]
puts $yy $y

puts $xx $x
puts $yy [expr $y-$h]

puts $xx [expr $x+$b]
puts $yy [expr $y-$h]

puts $coorx $x
puts $coory [expr $y-$h]

puts $coorx [expr $x+$b/2.0]
puts $coory $y

puts $coorx [expr $x+$b/2.0]
puts $coory $y

puts $coorx [expr $x+$b]
puts $coory [expr $y-$h]

incr t 4

set n1 [expr $nn]
set n2 [expr $nn+1]
set n3 [expr $nn+2]
set n4 [expr $nn+3]
set elen [expr ($nB+1)*$nS+2*($nB)*($nS)+2*($j-1)+1]
set elet [expr ($nB+1)*$nS+($nB)*($nS)+$j]

#equaldof beam
set nbl [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($ii-1)*($nB)+($jj-1)*3+1]
set nbm [expr $nbl+1]

equalDOF $nbm $n1 1 2
equalDOF $nbm $n2 1 2
#equaldof column
set ncd [expr ($jj-1)*($nS+1)+$ii]
set ncu [expr $ncd+1]
set ncd1 [expr ($jj)*($nS+1)+$ii]
set ncu1 [expr $ncd1+1]

equalDOF $ncd $n3 1 2
equalDOF $ncd1 $n4 1 2

```

```

#element truss $elen $n3 $n1 [lindex $A [expr $elet-1]] 1
#element truss [expr $elen+1] $n2 $n4 [lindex $A [expr $elet-1]] 1
element elasticBeamColumn $elen $n3 $n1 [lindex $A [expr
$elet-1]] $E [lindex $I [expr $elet-1]] 3
element elasticBeamColumn [expr $elen+1] $n2 $n4 [lindex $A [expr $elet-1]] $E
[lindex $I [expr $elet-1]] 3

} elseif {$bt == 2} {
#brace
node [expr $nn] [expr $x+$b/2.0] [expr $y-$h]
node [expr $nn+1] [expr $x+$b/2.0] [expr $y-$h]
node [expr $nn+2] [expr $x] $y
node [expr $nn+3] [expr $x+$b] $y
incr t 4

puts $xx [expr $x+$b/2.0]
puts $yy [expr $y-$h]

puts $xx [expr $x+$b/2.0]
puts $yy [expr $y-$h]

puts $xx $x
puts $yy $y

puts $xx [expr $x+$b]
puts $yy $y

puts $coorx [expr $x+$b/2.0]
puts $coory [expr $y-$h]

puts $coorx [expr $x]
puts $coory $y

puts $coorx [expr $x+$b/2.0]
puts $coory [expr $y-$h]

puts $coorx [expr $x+$b]
puts $coory $y

set n1 [expr $nn]
set n2 [expr $nn+1]
set n3 [expr $nn+2]
set n4 [expr $nn+3]
set elen [expr ($nB+1)*$nS+2*($nB)*($nS)+2*($j-1)+1]
set elet [expr ($nB+1)*$nS+($nB)*($nS)+$j]

#equaldof beam
if {$i==1} {
fix $n1 1 1 0
fix $n2 1 1 0
} else {
set nbld [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($i-2)*($nB)+($jj-1)*3+1]
set nbmd [expr $nbld+1]
equalDOF $nbmd $n1 1 2
equalDOF $nbmd $n2 1 2
}
#equaldof column
set ncd [expr ($jj-1)*($nS+1)+$ii]
set ncu [expr $ncd+1]
set ncd1 [expr ($jj)*($nS+1)+$ii]
set ncu1 [expr $ncd1+1]
equalDOF $ncu $n3 1 2
equalDOF $ncu1 $n4 1 2

#element truss $elen $n3 $n1 [lindex $A [expr $elet-1]] 1
#element truss [expr $elen+1] $n2 $n4 [lindex $A [expr $elet-1]] 1
element elasticBeamColumn $elen $n3 $n1 [lindex $A [expr
$elet-1]] $E [lindex $I [expr $elet-1]] 3

```

```

        element elasticBeamColumn [expr $elen+1]      $n2 $n4 [lindex $A [expr $elet-1]]      $E
        [lindex $I [expr $elet-1]]      3

} else {
    #brace
    node      [expr $nn]      [expr $x]      $y
    node      [expr $nn+1]    [expr $x+$b]    $y
    node      [expr $nn+2]    [expr $x+$b]    [expr $y-$h]
    node      [expr $nn+3]    [expr $x]      [expr $y-$h]
    incr t 4

    puts $xx [expr $x+$b/2.0]
    puts $yy $y

    puts $xx [expr $x+$b/2.0]
    puts $yy $y

    puts $xx $x
    puts $yy [expr $y-$h]

    puts $xx [expr $x+$b]
    puts $yy [expr $y-$h]

    puts $coorx $x
    puts $coory $y

    puts $coorx [expr $x+$b]
    puts $coory [expr $y-$h]

    puts $coorx [expr $x]
    puts $coory [expr $y-$h]

    puts $coorx [expr $x+$b]
    puts $coory $y

    set n1      [expr $nn]
    set n2      [expr $nn+1]
    set n3      [expr $nn+2]
    set n4      [expr $nn+3]
    set elen    [expr ($nB+1)*$nS+2*($nB)*($nS)+2*($j-1)+1]
    set elet    [expr ($nB+1)*$nS+($nB)*($nS)+$j]

    #equalDOF column
    set ncd      [expr ($j-1)*($nS+1)+$ii]
    set ncu      [expr $ncd+1]
    set ncd1     [expr ($j)*($nS+1)+$ii]
    set ncu1     [expr $ncd1+1]
    equalDOF $ncd $n4 1 2
    equalDOF $ncd1 $n3 1 2
    equalDOF $ncu $n1 1 2
    equalDOF $ncu1 $n2 1 2

    #element truss $elen $n3 $n1 [lindex $A [expr $elet-1]] 1
    #element truss [expr $elen+1] $n2 $n4 [lindex $A [expr $elet-1]] 1
    element elasticBeamColumn $elen      $n3 $n1 [lindex $A [expr
$elet-1]]      $E      [lindex $I [expr $elet-1]]      3
    element elasticBeamColumn [expr $elen+1]      $n2 $n4 [lindex $A [expr $elet-1]]      $E
    [lindex $I [expr $elet-1]]      3
}
}

#node-----
for {set j 1} {$j <= [expr $nS]} {incr j 1} {
    for {set i 1} {$i <= [expr $nB]} {incr i 1} {
        set ncl [expr ($i-1)*($nS+1)+$j+1]
        set ncr [expr ($i)*($nS+1)+$j+1]
        set nbl [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($j-1)*($nB)+3*($i-1)+1]
        set nbr [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($j-1)*($nB)+3*($i-1)+3]
        equalDOF $ncl $nbl 1 2
        equalDOF $ncr $nbr 1 2
    }
}

```

```

}

for {set j 1} {$j <= $nS} {incr j 1} {
set nn [expr ($j)+1]
for {set i 1} {$i <= $nB} {incr i 1} {
set n1 [expr ($nS+1)*($nB+1)+3*($i-1)+1]
set n2 [expr ($nS+1)*($nB+1)+3*($i-1)+2]
set n3 [expr ($nS+1)*($nB+1)+3*($i-1)+3]

set nnn [expr ($nn)+$i*($nS+1)]
set nnnn [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($j-1)*($nB)+3*($i-1)+2]
#set nnnn1 [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($j-1)*($nB)+3*($i-1)+1]
#set nnnn2 [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($j-1)*($nB)+3*($i-1)+3]
equalDOF $nn $nnn 1
equalDOF $nn $nnnn 1
#equalDOF $nn $nnnn1 1
#equalDOF $nn $nnnn2 1
}
}

close $coorx
close $coory
close $xx
close $yy
#####

if {$k == 1} {
#-----
# Define DEAD loads for Gravity Analysis
# -----
timeSeries Linear 1

pattern Plain 1 1 {
for {set j 1} {$j <= $nS} {incr j 1} {
for {set i 1} {$i <= $nB} {incr i 1} {
set eleN [expr ($nB+1)*$nS+2*($j-1)*($nB)+2*($i-1)+1]
eleLoad -ele $eleN -type -beamUniform -$D
eleLoad -ele [expr $eleN+1] -type -beamUniform -$D
}
}
}
system BandSPD
numberer RCM
constraints Plain
integrator LoadControl 1.0
test NormDispIncr 1.0e-10 6
algorithm Newton
analysis Static
# -----
# Create Recorder
# -----

recorder Element -file dColumnforce.out -ele -eleRange 1
[expr $nS*($nB+1)] localForce
recorder Element -file dBeamforce.out -ele -eleRange [expr $nS*($nB+1)+1]
[expr $nS*($nB+1)+2*$nS*$nB] localForce
recorder Element -file dBraceforce.out -ele -eleRange [expr $nS*($nB+1)+2*$nS*$nB+1]
[expr $nS*($nB+1)+2*$nS*$nB+$nobc*2] localForce
analyze 1
}
#####
if {$k == 2} {
#-----
# Define LIVE loads for Gravity Analysis
# -----
#loadConst -time 0.0
timeSeries Linear 2

pattern Plain 2 2 {

```

```

for {set j 1} {$j <= $nS} {incr j 1} {
for {set i 1} {$i <= $nB} {incr i 1} {
set eleN [expr ($nB+1)*$nS+2*($j-1)*($nB)+2*($i-1)+1]
eleLoad -ele $eleN -type -beamUniform -$L
eleLoad -ele [expr $eleN+1] -type -beamUniform -$L
}
}
}

system BandSPD
numberer RCM
constraints Plain
integrator LoadControl 1.0
test NormDispIncr 1.0e-10 6
algorithm Newton
analysis Static
# -----
# Create Recorder
# -----
recorder Element -file lColumnforce.out -ele -eleRange 1
[expr $nS*($nB+1)] localForce
recorder Element -file lBeamforce.out -ele -eleRange [expr $nS*($nB+1)+1]
[expr $nS*($nB+1)+2*$nS*$nB] localForce
recorder Element -file lBraceforce.out -ele -eleRange [expr $nS*($nB+1)+2*$nS*$nB+1]
[expr $nS*($nB+1)+2*$nS*$nB+$nbc*2] localForce
analyze 1
}

#####
if {$k == 3} {
# -----
# Define Lateral
# -----
timeSeries Linear 3
pattern Plain 3 3 {
for {set j 1} {$j <= $nS} {incr j 1} {
set nn [expr ($j)+1]
load $nn [expr [lindex $f [expr $j-1]]] 0.0 0.0
}
}

system BandSPD
numberer RCM
constraints Plain
integrator LoadControl 1.0
test NormDispIncr 1.0e-10 6
algorithm Newton
analysis Static
# -----
# Create Recorder
# -----
recorder Element -file eColumnforce.out -ele -eleRange 1
[expr $nS*($nB+1)] localForce
recorder Element -file eBeamforce.out -ele -eleRange [expr $nS*($nB+1)+1]
[expr $nS*($nB+1)+2*$nS*$nB] localForce
recorder Element -file eBraceforce.out -ele -eleRange [expr $nS*($nB+1)+2*$nS*$nB+1]
[expr $nS*($nB+1)+2*$nS*$nB+$nbc*2] localForce

recorder Node -file nodesD.out -node -nodeRange 0 [expr ($nS+1)] -dof 1 disp

analyze 1
}
wipe
}

```

## ب: برنامه تحلیل مودال در اپنسیس

```
wipe;
#-----

model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3

# Read details of model from file
source INPUT.tcl
source section.tcl
set h [expr 1.0*$H/$nS]

# dead and live and seismic load-----
set DEAD [expr 550.0/10000.0]
set LIVE [expr 200.0/10000.0]
set D [expr $DEAD*$b]
set L [expr $LIVE*$b]
set T [expr 0.0488*$H**(0.75)]
if {$T <= 0.5} {
    set kk 1
} elseif {$T >= 2.5} {
    set kk 2
} else {
    set kk 2
}
set C [expr (2/3.0)*1.0/6.0]
set W [expr $nB*$b*$nS*($D+0.2*$L)]

set Fb [expr $C*$W]
set m [expr $nB*$b*($D+0.2*$L)]
set mz 0
for {set j 1} {$j <= $nS} {incr j 1} {
    set mz [expr $mz+$m*($h*$j)**$kk]
}
for {set j 1} {$j <= $nS} {incr j 1} {
    lappend f [expr $Fb*$m*($h*$j)**$kk)/($mz*1.0)]
}
# Create nodes columns-----
for {set j 1} {$j <= [expr $nB+1]} {incr j 1} {
    for {set i 1} {$i <= [expr $nS+1]} {incr i 1} {
        set nn [expr ($j-1)*($nS+1)+$i]
        set x [expr ($j-1)*$b]
        set y [expr ($i-1)*$h]
        node $nn $x $y
    }
}

for {set j 1} {$j <= [expr $nS]} {incr j 1} {
    for {set i 1} {$i <= [expr $nB+1]} {incr i 1} {

        set x [expr ($i-1)*$b]
        set y [expr ($j-1)*$h]

    }
}

# Create nodes beam-----
for {set j 1} {$j <= [expr $nS]} {incr j 1} {
    for {set i 1} {$i <= [expr $nB]} {incr i 1} {
        set nn1 [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($j-1)*($nB)+3*($i-1)+1]
        set nn2 [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($j-1)*($nB)+3*($i-1)+2]
        set nn3 [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($j-1)*($nB)+3*($i-1)+3]
```

```

set x [expr ($i-1)*$b]
set y [expr ($j)*$h]

#beam
node $nn1 $x $y
node $nn2 [expr $x+$b/2.0] $y
node $nn3 [expr $x+$b] $y

}
}

# Set the boundary conditions
for {set j 1} {$j <= [expr $nB+1]} {incr j 1} {
set nn [expr ($nS+1)*($j-1)+1]

fix $nn 1 1 0
}

# Define geometric transformations for beam-column elements
geomTransf Linear 1;
geomTransf Linear 2;
geomTransf Linear 3;

# Define the Columns
for {set j 1} {$j <= [expr $nB+1]} {incr j 1} {
for {set i 1} {$i <= [expr $nS]} {incr i 1} {
set n1 [expr ($j-1)*($nS+1)+$i]
set n2 [expr $n1+1]
set elen [expr ($i-1)*($nB+1)+$j]
set elet $elen
element elasticBeamColumn $elen $n1 $n2 [lindex $A [expr $elet-1]] $E [lindex $I [expr $elet-1]]
}
}

# Define the beam
for {set j 1} {$j <= [expr $nS]} {incr j 1} {
for {set i 1} {$i <= [expr $nB]} {incr i 1} {
set n1 [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($j-1)*($nB)+($i-1)*3+1]
set n2 [expr $n1+1]
set n3 [expr $n1+2]
set elen [expr ($nB+1)*$nS+2*($j-1)*($nB)+2*($i-1)+1]
set elet [expr ($nB+1)*$nS+($j-1)*($nB)+$i]

element elasticBeamColumn $elen $n1 $n2 [lindex $A [expr $elet-1]] $E
[lindex $I [expr $elet-1]] 2
element elasticBeamColumn [expr $elen+1] $n2 $n3 [lindex $A [expr $elet-1]] $E
[lindex $I [expr $elet-1]] 2

}
}

# Define the brace
set t 1
for {set j 1} {$j <= [expr $nobc]} {incr j 1} {
set jj [lindex $btob [expr $j-1]]
set ii [lindex $stob [expr $j-1]]

set bt [lindex $bctype [expr [lindex $stob [expr $j-1]]-1]]

set nn [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($nB)*($nS)+$t]

set x [expr ($jj-1)*$b]
set y [expr ($ii)*$h]

if {$bt == 1} {
#brace
node [expr $nn] [expr $x+$b/2.0] $y
node [expr $nn+1] [expr $x+$b/2.0] $y
node [expr $nn+2] [expr $x] [expr $y-$h]
node [expr $nn+3] [expr $x+$b] [expr $y-$h]
}
}

```

```

incr t 4

set n1      [expr $nn]
set n2      [expr $nn+1]
set n3      [expr $nn+2]
set n4      [expr $nn+3]
set elen    [expr ($nB+1)*$nS+2*($nB)*($nS)+2*($j-1)+1]
set elet    [expr ($nB+1)*$nS+($nB)*($nS)+$j]

#equaldof beam
set nbl     [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($ii-1)*($nB)+($jj-1)*3+1]
set nbm     [expr $nbl+1]

equalDOF $nbm $n1 1 2
equalDOF $nbm $n2 1 2
#equaldof column
set ncd     [expr ($jj-1)*($nS+1)+$ii]
set ncu     [expr $ncd+1]
set ncd1    [expr ($jj)*($nS+1)+$ii]
set ncu1    [expr $ncd1+1]

equalDOF $ncd $n3 1 2
equalDOF $ncd1 $n4 1 2

#element truss $elen $n3 $n1 [lindex $A [expr $elet-1]] 1
#element truss [expr $elen+1] $n2 $n4 [lindex $A [expr $elet-1]] 1
element elasticBeamColumn $elen $n3 $n1 [lindex $A [expr $elet-1]] $E [lindex $I [expr $elet-1]] 3
element elasticBeamColumn [expr $elen+1] $n2 $n4 [lindex $A [expr $elet-1]] $E [lindex $I [expr $elet-1]] 3
} elseif {$bt == 2} {
#brace
node [expr $nn] [expr $x+$b/2.0] [expr $y-$h]
node [expr $nn+1] [expr $x+$b/2.0] [expr $y-$h]
node [expr $nn+2] [expr $x] $y
node [expr $nn+3] [expr $x+$b] $y
incr t 4

set n1      [expr $nn]
set n2      [expr $nn+1]
set n3      [expr $nn+2]
set n4      [expr $nn+3]
set elen    [expr ($nB+1)*$nS+2*($nB)*($nS)+2*($j-1)+1]
set elet    [expr ($nB+1)*$nS+($nB)*($nS)+$j]

#equaldof beam
if {$ii==1} {
fix $n1 1 1 0
fix $n2 1 1 0
} else {
set nbld    [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($ii-2)*($nB)+($jj-1)*3+1]
set nbmd    [expr $nbld+1]
equalDOF $nbmd $n1 1 2
equalDOF $nbmd $n2 1 2
}
#equaldof column
set ncd     [expr ($jj-1)*($nS+1)+$ii]
set ncu     [expr $ncd+1]
set ncd1    [expr ($jj)*($nS+1)+$ii]
set ncu1    [expr $ncd1+1]
equalDOF $ncu $n3 1 2
equalDOF $ncu1 $n4 1 2

#element truss $elen $n3 $n1 [lindex $A [expr $elet-1]] 1
#element truss [expr $elen+1] $n2 $n4 [lindex $A [expr $elet-1]] 1
element elasticBeamColumn $elen $n3 $n1 [lindex $A [expr $elet-1]] $E [lindex $I [expr $elet-1]] 3

```

```

        element elasticBeamColumn [expr $elen+1]      $n2 $n4 [lindex $A [expr $elet-1]]      $E
        [lindex $I [expr $elet-1]]      3

    } else {
        #brace
        node      [expr $nn]      [expr $x]      $y
        node      [expr $nn+1]      [expr $x+$b]      $y
        node      [expr $nn+2]      [expr $x+$b]      [expr $y-$h]
        node      [expr $nn+3]      [expr $x]      [expr $y-$h]
        incr t 4

        set n1      [expr $nn]
        set n2      [expr $nn+1]
        set n3      [expr $nn+2]
        set n4      [expr $nn+3]
        set elen    [expr ($nB+1)*$nS+2*($nB)*($nS)+2*($j-1)+1]
        set elet    [expr ($nB+1)*$nS+($nB)*($nS)+$j]

        #equaldof column
        set ncd      [expr ($j-1)*($nS+1)+$ii]
        set ncu      [expr $ncd+1]
        set ncd1     [expr ($j)*($nS+1)+$ii]
        set ncu1     [expr $ncd1+1]
        equalDOF $ncd $n4 1 2
        equalDOF $ncd1 $n3 1 2
        equalDOF $ncu $n1 1 2
        equalDOF $ncu1 $n2 1 2

        #element truss $elen $n3 $n1 [lindex $A [expr $elet-1]] 1
        #element truss [expr $elen+1] $n2 $n4 [lindex $A [expr $elet-1]] 1
        element elasticBeamColumn $elen      $n3 $n1 [lindex $A [expr
$elet-1]]      $E      [lindex $I [expr $elet-1]]      3
        element elasticBeamColumn [expr $elen+1]      $n2 $n4 [lindex $A [expr $elet-1]]      $E
        [lindex $I [expr $elet-1]]      3
    }
}

#node-----
for {set j 1} {$j <= [expr $nS]} {incr j 1} {
    for {set i 1} {$i <= [expr $nB]} {incr i 1} {
        set ncl [expr ($i-1)*($nS+1)+$j+1]
        set ncr [expr ($i)*($nS+1)+$j+1]
        set nbl [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($j-1)*($nB)+3*($i-1)+1]
        set nbr [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($j-1)*($nB)+3*($i-1)+3]
        equalDOF $ncl $nbl 1 2
        equalDOF $ncr $nbr 1 2
    }
}

# -----PeriodFreq&Damping.tcl-----
# determine Natural Period, Frequency & damping parameters for SDOF

set m [expr ($D+0.2*$L)*$b/981]
for {set j 1} {$j <= [expr $nS]} {incr j 1} {
    for {set i 1} {$i <= [expr $nB]} {incr i 1} {
        set nn1 [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($j-1)*($nB)+3*($i-1)+1]
        set nn2 [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($j-1)*($nB)+3*($i-1)+2]
        set nn3 [expr ($nB+1)*($nS+1)+3*($j-1)*($nB)+3*($i-1)+3]
        #mass $nn1 [expr $m/3.] [expr $m/3.] 0.
        mass $nn2 [expr $m] 0. 0.
        #mass $nn3 [expr $m/3.] [expr $m/3.] 0.
    }
}
set lambda [eigen 1]
set omega [expr pow($lambda,0.5)]
set fe [expr pow($lambda,0.5)/(2.0*3.141593)]
set Tperiod [expr (2.0*3.141593)/sqrt($lambda)]; # period (sec.)
set fp [open "frequency.out" "w"]

```

```
puts -nonewline $fp $fe
close $fp
```

## پ: برنامه تابع هدف در متلب

```
function [z, colm, brm, difm, fm, anss]=Fun(n,nomm,tb)
load 'eshtal.mat'
```

```
if nomm==11 || 10
    bunp=UNPt;
else
    bunp=unp;
end
```

```
INPUT
```

```
m=1;
%1- 8
%2- 7
%3- X;
```

```
pob=find(n(1,end-ns-nb+1:end-ns)==2);
nobc=size(pob,2);
tob=tb;
stob=ones(1,nobc);
btob=pob;
for i=2:ns
    btob=[btob pob];
    stob=[stob i*ones(1,nobc)];
end
```

```
fid = fopen('INPUT.tcl', 'w');
fprintf(fid, 'lappend bctype ');
fprintf(fid, '%d ',tob);
fprintf(fid, '\n');
fprintf(fid, 'lappend pob ');
fprintf(fid, '%d ',pob);
fprintf(fid, '\n');
fprintf(fid, 'lappend stob ');
fprintf(fid, '%d ',stob);
fprintf(fid, '\n');
fprintf(fid, 'lappend btob ');
fprintf(fid, '%d ',btob);
fprintf(fid, '\n');
```

```
fprintf(fid, 'set H %d\n', h*ns);
fprintf(fid, 'set nS %d\n', ns);
fprintf(fid, 'set nB %d\n', nb);
fprintf(fid, 'set b %d\n', b);
fprintf(fid, 'set E %d\n', E);
fprintf(fid, 'set nobc %d\n', nobc*ns);
fclose(fid);
```

```
fid = fopen('section.tcl', 'w');
```

```

noc=(nb+1)*ns;
nob=nb*ns;

for i=1:noc
    fprintf(fid, 'lappend eleTag %6.1f\n', i);
    fprintf(fid, 'lappend A %6.1f\n', ipb(n(1,Ref(i)),9));
    fprintf(fid, 'lappend I %6.1f\n', ipb(n(1,Ref(i)),11));
end

Mmaxd=D*b^2/8;
Mmaxl=L*b^2/8;
Mmax=(1.2*Mmaxd+Mmaxl)/0.9;
Z=Mmax/Fy/0.9;
S=Z/1.12;
temp=find(ipe(:,12)>S);
anss=temp(1);
for i=noc+1:noc+nob
    fprintf(fid, 'lappend eleTag %6.1f\n', i);
    fprintf(fid, 'lappend A %6.1f\n', ipe(anss,9));
    fprintf(fid, 'lappend I %6.1f\n', ipe(anss,11));
end
k=0;
for ii=1:ns
    for i=1:nobc
        k=k+1;
        fprintf(fid, 'lappend eleTag %6.1f\n', noc+nob+k);
        fprintf(fid, 'lappend A %6.1f\n', 2*bunp(n(1,Ref(end-ns+ii)),9));
        fprintf(fid, 'lappend I %6.1f\n', bunp(n(1,Ref(end-ns+ii)),end));
    end
end
fclose(fid);
!OpenSees.exe framT.tcl
!OpenSees.exe framf.tcl

% BEAMS
dead_beamforce=dlmread('dBeamforce.out');
live_beamforce=dlmread('lBeamforce.out');

beamforce(1,:)=1.2*dead_beamforce+1.6*live_beamforce;

bem=[];
Fb=0;
for i=1:nob
    Fb=Fb+ipe(anss,10)*b/100.0;
end

% BRACE
dead_braceforce=dlmread('dBraceforce.out');
live_braceforce=dlmread('lBraceforce.out');
quack_braceforce=dlmread('eBraceforce.out');

braceforce(1,:)=1.2*dead_braceforce+live_braceforce+quack_braceforce;
braceforce(2,:)=0.9*dead_braceforce+quack_braceforce;
braceforce(3,:)=1.2*dead_braceforce+live_braceforce-quack_braceforce;
braceforce(4,:)=0.9*dead_braceforce-quack_braceforce;

```

```

brm=[];
Fbr=0;
kk=0;
for i=1:ns
    for ii=1:nobc
        kk=kk+1;
        bracee1(kk,1)=max(abs(braceforce(:,12*(kk-1)+1))); %P
        bracee2(kk,1)=max(abs(braceforce(:,12*(kk-1)+4))); %P
        bracee3(kk,1)=max(abs(braceforce(:,12*(kk-1)+7))); %P
        bracee4(kk,1)=max(abs(braceforce(:,12*(kk-1)+10))); %P
    end

    brace(i,1)=max(max([abs(bracee1(kk,1)) abs(bracee2(kk,1))
abs(bracee3(kk,1)) abs(bracee4(kk,1)) ]));
    g(m)= max(max([abs(bracee1(kk,1)) abs(bracee2(kk,1)) ]))/ brace(i,1)-
0.5;m=m+1
    rxb(i)=bunp(n(1,Ref(end-ns+i)),13);
    ryb(i)=bunp(n(1,Ref(end-ns+i)),20);
    if tob(stob(i))==3
        l(i)=sqrt(b^2+h^2);
        k=1;
        klrxb=0.5*k*l(i)/rxb(i);
        klryb=0.67*k*l(i)/ryb(i);
    else
        l(i)=sqrt((b/2)^2+h^2);
        k=1;
        klrxb=k*l(i)/rxb(i);
        klryb=l(i)/ryb(i);
    end
    klr=max(klrxb,klryb);
    Fbr=Fbr+2*bunp(n(1,Ref(end-ns+i)),10)*l(i)/100.0;

    g(m)=klr/200;m=m+1;
    Fe(i)=pi^2*E/klr^2;
    Iy= bunp(n(1,Ref(end-ns+i)),14);
    Ix= bunp(n(1,Ref(end-ns+i)),11);
    H= bunp(n(1,Ref(end-ns+i)),2);
    t= bunp(n(1,Ref(end-ns+i)),5);
    cw=Iy*(H-t)^2/4;
    G=E/2.6;
    b= bunp(n(1,Ref(end-ns+i)),3);
    s= bunp(n(1,Ref(end-ns+i)),4);
    J=b*t^3+(1/3)*H*s^3;
    Fe1(i)=(pi^2*E*cw)/l(i)^2+G*J)/(Iy+Ix);
    if Fy/Fe(i)<=2.25
        Fcrt1(i)=0.658^(Fy/Fe(i))*Fy;
    else
        Fcrt1(i)=0.877*Fe(i);
    End
    if Fy/Fe1(i)<=2.25
        Fcrt2(i)=0.658^(Fy/Fe(i))*Fy;
    else
        Fcrt2(i)=0.877*Fe(i);
    end
    Fcr(i)=min(Fcrt1(i), Fcrt2(i));
    Pn1(i)=2*bunp(n(1,Ref(end-ns+i)),9)*Fcr(i);
    Pn2(i)=2*bunp(n(1,Ref(end-ns+i)),9)*Fy;

```

```

Pnbr(i)=min(Pn1(i),Pn2(i));

g(m)=brace(i,1)/Pnbr(i)/0.9;m=m+1;
brm=[brm max(g(m-1))];
[brace(i,1) Pnbr(i)];
g(m-1);
end
Fbr=Fbr*nobc;
brace;
% COLUMNS
Fc=0;
dead_colforce=dlmread('dColumnforce.out');
live_colforce=dlmread('lColumnforce.out');
quack_colforce=dlmread('eColumnforce.out');

colforce(1,:)=1.2*dead_colforce+live_colforce+quack_colforce;
colforce(2,:)=0.9*dead_colforce+quack_colforce;
colforce(3,:)=1.2*dead_colforce+1.6*live_colforce;
colforce(4,:)=1.2*dead_colforce+live_colforce-quack_colforce;
colforce(5,:)=0.9*dead_colforce-quack_colforce;
colm=[];
lm=[];
for i=1:noc
    Fc=Fc+ipb(n(1,Ref(i)),10)*h/100.0;
    %fx fy M
    col(i,1)=max(max(abs(colforce(:,[6*(i-1)+1 6*(i-1)+4]))));%P
    col(i,2)=max(max(abs(colforce(:,[6*(i-1)+2 6*(i-1)+5]))));%V
    col(i,3)=max(max(abs(colforce(:,[6*(i-1)+3 6*(i-1)+6]))));%M

    Mn(i)=1.12*ipb(n(1,Ref(i)),12)*Fy;

    rc(i)=ipb(n(1,Ref(i)),16);
    l(i)=h;
    klr=l(i)/rc(i);

    Fe(i)=pi^2*E/klr^2;

    Iy= ipb(n(1,Ref(i)),14);
    Ix= ipb(n(1,Ref(i)),11);
    H= ipb(n(1,Ref(i)),2);
    t= ipb(n(1,Ref(i)),5);
    cw=Iy*(H-t)^2/4;
    G=E/2.6;
    b= ipb(n(1,Ref(i)),3);
    s= ipb(n(1,Ref(i)),4);
    J=b*t^3+(1/3)*H*s^3;
    Fel(i)=(pi^2*E*cw)/l(i)^2+G*J)/(Iy+Ix);

    if Fy/Fe(i)<=2.25
        Fcr1(i)=0.658^(Fy/Fe(i))*Fy;
    else
        Fcr1(i)=0.877*Fe(i);
    End
    if Fy/Fe(i)<=2.25
        Fcr2(i)=0.658^(Fy/Fel(i))*Fy;
    else
        Fcr2(i)=0.877*Fel(i);
    End
end

```

```

else
    Fcr2(i)=0.877*Fe1(i);
end
Fcr(i)=min( Fcr1 Fcr2);
Pnc(i)=ipb(n(1,Ref(i)),9)*Fcr(i);
g(m)=col(i,1)/Pnc(i)/0.9;m=m+1;
colm=[colm g(m-1)];

end
[col(:,1) Pnc(:)];
% Drift
dis=dlmread('nodesD.out');
delta=dis-[0 dis(1,1:end-1)];
difm=[];
for i=2:ns+1
    g(m)=5*delta(i)/0.02/h;m=m+1;
    difm=[difm g(m-1)];
end

fe=dlmread('frequency.out');
g(m)=ff/fe;m=m+1;
fm=g(m-1);
fid = fopen('G.out', 'w');
fprintf(fid, '%1.2f ', g);
fclose(fid);
fid = fopen('F.out', 'w');
fprintf(fid, '%1.2f ', [Fb Fc Fbr]);
fclose(fid);
g(g>=1);
find(g>=1);
F=Fb+Fc+Fbr;
G=10000000000*sum(max((g-1),0).^2);
z=F+G;
gg=G;
g;
colm;
lm;
brm;
difm;
fm;
end

```

## ت: برنامه الگوریتم ازدحام ذرات

```

dx=xmax-xmin;
vmax=floor(0.5*dx);
vmin=floor(-vmax);
maxit=maxitv;

c1=2;
c2=2;
wmin=0.4;
wmax=0.9;

```

```

w=wmax-(wmax-wmin)/maxit;

empty_particle.position=[];
empty_particle.velocity=[];
empty_particle.cost=[];
empty_particle.pbest=[];
empty_particle.pbestcost=[];
particle= repmat(empty_particle, npop, 1);

gbest=zeros(maxit, nvar);
gbestcost=zeros(maxit, 1);
%% ANALYSIS
for it=1:maxit
    if it==1
        for i=1:npop

            for u=1:nvar
                particle(i).velocity(u)=randi([vmin(u) vmax(u)]);
                particle(i).position(u)=randi([xmin(u) xmax(u)]);
            end
            particle(i).position(nvar-ns-nb+1:nvar-ns)=1;
            particle(i).position(nvar-ns-nb+randperm(nb, ceil(nb/2)))=2;

            Gheyd;
            particle(i).pbest=particle(i).position;
            gbest(it,:)=particle(i).pbest;
            particle(i).pbestcost=inf;
            gbestcost(it)=inf;

        end
    else
        gbest(it,:)=gbest(it-1,:);
        gbestcost(it)=gbestcost(it-1);
        for i=1:npop
            particle(i).velocity=w*particle(i).velocity...
                +c1*rand*(particle(i).pbest-particle(i).position)...
                +c2*rand*(gbest(it,:)-particle(i).position);
            particle(i).velocity=min(max(particle(i).velocity,-vmax),vmax);

            particle(i).position=floor(particle(i).position+particle(i).velocity);
            particle(i).position=min(max(particle(i).position,xmin),xmax);

            particle(i).position(nvar-ns-nb+1:nvar-ns)=1;
            particle(i).position(nvar-ns-nb+randperm(nb, ceil(nb/2)))=2;

            Gheyd;
            A=particle(i).position;
            particle(i).cost=Fun(A,noModel,tb);

            if particle(i).cost<particle(i).pbestcost
                particle(i).pbest=particle(i).position;
                particle(i).pbestcost=particle(i).cost;

                if particle(i).pbestcost<gbestcost(it)
                    gbest(it,:)=particle(i).pbest;

```

```

                                gbestcost(it)=particle(i).pbestcost;
                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
            clc
            disp(name)
            disp(['Iteration ' num2str(it) ': Best Cost = '
num2str(gbestcost(it))]);
            w=wmax-(wmax-wmin)*it/maxit;
            gbest(it,:);
        end
        gbest(end,:);

```

## ث: برنامه الگوریتم جستجو ذرات باردار

```

xmax(1,1:Ref((nb+1)*ns))=24;
xmax(1,Ref((nb+1)*ns+1:(nb+1)*ns+nb*ns))=18;
xmax=[xmax 3 ones(1,ns)*21 ones(1,ns)*(nb)];

dx=xmax-xmin;
vmax=0.5*dx;
vmin=-vmax;

empty_particle.positionsort=[];
empty_particle.position=[];
empty_particle.velocity=[];
empty_particle.p=[];
empty_particle.r=[];
empty_particle.q=[];
empty_particle.F=[];
empty_particle.cost=[];
empty_particle.costsort=[];
particle= repmat(empty_particle, npop, 1);

for i=1:npop
    particle(i).position=floor(xmin+(xmax-xmin).*rand(1,nvar));
    particle(i).velocity=particle(i).position/dt;
    particle(i).cost=Fun(particle(i).position,noModel);
end
[~,in]=sort([particle.cost]);
for i=1:npop
    particle(i).positionsort=particle(in(i)).position;
    particle(i).costsort=particle(in(i)).cost;
end

Bestcost(1)=particle(1).costsort;
Best(1,:)=particle(1).positionsort;
Worstcost(1)=particle(end).costsort;
Worst(1,:)=particle(end).positionsort;

for i=1:npop
    particle(i).q=(particle(i).cost-Worstcost(1))/(Bestcost(1)-
Worstcost(1));

```

```

end

for it=1:maxit
    for i=1:npop
        particle(i).F=zeros(1,nvar);
        for j=1:npop
            if j~=i
                if particle(j).cost<particle(i).cost
                    particle(i).p(j)=1;
                else
                    particle(i).p(j)=0;
                end
                particle(i).r(j)= sqrt(sum([particle(i).position-
particle(j).position]...
.^2))/sqrt(sum([particle(i).position+
particle(j).position]./2-...
Best(it,:).^2))/e;
                if particle(i).r(j)>=a
                    i1=0;i2=1;
                else
                    i1=1;i2=0;
                end

                particle(i).F=(particle(i).q*(particle(j).q*particle(i).r(j)*i1/a^3+...
particle(j).q/particle(i).r(j)^2*i2)*particle(i).p(j))*(particle(i)...
position- particle(j).position)+particle(i).F;
            end
        end
        m(i)=particle(i).q;
        kv=0.5*(1-it/maxit);
        ka=0.5*(1+it/maxit);
        Xold=particle(i).position;

        particle(i).position=floor(det(rand)*ka*particle(i).F/m(i)*dt^2+det(rand)*.
..
        kv*particle(i).velocity*dt+Xold);
        particle(i).position=min(max(particle(i).position,xmin),xmax);
        particle(i).velocity=(particle(i).position-Xold)/dt;

        particle(i).cost=Fun(particle(i).position,noModel);
    end
    [~,in]=sort([particle.cost]);
    for i=1:npop
        particle(i).positionsort=particle(in(i)).position;
        particle(i).costsort=particle(in(i)).cost;
    end
    if particle(1).costsort<Bestcost(it)
        Bestcost(it+1)=particle(1).costsort;
        Best(it+1,:)=particle(1).positionsort;
        Worstcost(it+1)=particle(1).costsort;
        Worst(it+1,:)=particle(1).positionsort;
    else
        Bestcost(it+1)=Bestcost(it);
        Best(it+1,:)=Best(it,:);
        Worstcost(it+1)=Worstcost(it);
    end
end

```

```

        Worst(it+1,:)=Worst(it,:);
    end
    disp(['Iteration ' num2str(it) ': Best Cost = '
num2str(Bestcost(it))]);
end
Best(end,:)

```

## ج: برنامه الگوریتم ژنتیک

```

%% initialization
empty.par=[];
empty.fit=[];

pop= repmat(empty,npop,1);

for i=1:npop

    pop(i).par=floor(xmin+rand(1,nvar).*(xmax-xmin));
    pop(i).fit=Fun(pop(i).par,noModel);
end
%% main loop

BEST=zeros(maxit,1);
MEAN=zeros(maxit,1);
for iter=1:maxit

    % crossover

    crosspop=repmat(empty,ncross,1);
    crosspop=crossover(crosspop,pop,ncross,noModel);

    % mutation
    mutpop=repmat(empty,nmut,1);
    mutpop=mutation(mutpop,pop,nmut,npop,xmin,xmax,nvar,noModel);

    % merged
    [pop]=[pop;crosspop;mutpop];

    % select
    [value,index]=sort([pop.fit]);
    pop=pop(index);
    pop=pop(1:npop);

    gpop=pop(1); % global pop

```

```

BEST(iter)=gpop.fit;
MEAN(iter)=mean([pop.fit]);

gbestcost(iter)=BEST(iter);
disp(['Iteration ' num2str(iter) ': Best Cost = ' num2str(BEST(iter))]);
end
%% results

gpopt.par

function mutpop=mutation(mutpop,pop,nmut,npop,lb,ub,nvar,noModel)

for n=1:nmut

    i=randi([1 npop]);

    sol=pop(i).par;
    j=randi([1 nvar]);
    d=0.1*unifrnd(-1,1)*(ub(j)-lb(j));

    sol(j)=sol(j)+d;

    sol=min(sol,ub);
    sol=max(sol,lb);

    mutpop(n).par=sol;
    mutpop(n).fit=Fun(floor(sol),noModel);

end

end

function crosspop=crossover(crosspop,pop,ncross,noModel)

f=[pop.fit];
f=f./sum(f);
f=cumsum(f);

for n=1:2:ncross

```

```

i1=find(rand<=f,1,'first');
i2=find(rand<=f,1,'first');

p1=pop(i1).par;
p2=pop(i2).par;

R=rand(size(p1));

o1=floor((p1.*R)+(p2.*(1-R)));
o2=floor((p2.*R)+(p1.*(1-R)));

crosspop(n).par=o1;
crosspop(n).fit=Fun(o1,noModel);

crosspop(n+1).par=o2;
crosspop(n+1).fit=Fun(o2,noModel);

end

```

## چ: برنامه الگوریتم بیگ بنگ - بیگ کرانچ

```

dx=xmax-xmin;
vmax=0.5*dx;
vmin=-vmax;
maxit=50;

c1=2;
c2=2;
wmin=0.4;
wmax=0.9;
w=wmax-(wmax-wmin)/maxit;

empty_mass.position=[];
empty_mass.cost=[];

mass= repmat(empty_mass, npop, 1);

gbest=zeros(maxit,nvar);
gbestcost=zeros(maxit,1);

%% ANALYSIS
for it=1:maxit
    if it==1
        for i=1:npop
            mass(i).position=floor(xmin+(xmax-xmin).*rand(1,nvar));
            A=mass(i).position;
            mass(i).cost=Fun(A,noModel);

```

```

        incost(it,:)=zeros(nvar,1);
        incost(it,:)=(1/mass(i).cost).*mass(i).position+incost(it,:);
    end
    Bestcost(it)=inf;
    Best(it,:)=mass(1).position;
    masscenter(it,:)=incost(it,:)./sum(1./[mass.cost]);
else
    for i=1:npop
        mass(i).position=floor(masscenter(it-1,:)+rand*(xmax-
xmin)/(it+1));
        mass(i).position=min(max(mass(i).position,xmin),xmax);
        A=mass(i).position;
        mass(i).cost=Fun(A,noModel);
        incost(it,:)=zeros(nvar,1);
        incost(it,:)=(1/mass(i).cost).*mass(i).position+incost(it,:);
        if mass(i).cost<Bestcost(it-1)
            Bestcost(it)=mass(i).cost;
            Best(it,:)=mass(i).position;
        else
            Bestcost(it)=Bestcost(it-1);
            Best(it,:)=Best(it-1,:);
        end
    end
    masscenter(it,:)=incost(it,:)./sum(1./[mass.cost]);
end

    disp(['Iteration ' num2str(it) ': Best Cost = '
num2str(Bestcost(it))]);
    w=wmax-(wmax-wmin)*it/maxit;
end
Best(end,:)

```

## مراجع:

۱. پاز، ماریو، ۱۳۷۴، تئوری و روش‌های محاسبه دینامیک سازه، ترجمه حسن مقدم، موسسه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.
۲. صفرخانی، محیا، ۱۳۹۴، پایان نامه کارشناسی ارشد، تعیین بهینه محل بادبندها در سازه‌های فولادی با روش سیستم ذرات و برنامه‌نویسی ژنتیک، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تبریز.
۳. سیداخوانی، امیرحسین، ۱۳۹۶، پایان نامه کارشناسی ارشد، طراحی بهینه ستون‌های صلیبی فولادی با استفاده از روش بهبود یافته جستجو سیستم باردار (CSS)، پردیس خودگردان دانشگاه تبریز.
۴. اردلانی، ش، ۱۳۹۸، طراحی بهینه قاب‌های بتنی مسلح با در نظر گرفتن اثرات زیست محیطی با استفاده از الگوریتم برخورد ذرات، چاپ اول، انتشارات بامک، تهران.
۵. دهقان، فهیمه، ۱۳۹۵، پایان نامه کارشناسی ارشد، طرح بهینه قاب خمشی و مهاربند فولادی با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شیراز.
۶. باوی، ا و صالحی، م، ۱۳۸۷، الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی سازه‌های مرکب، چاپ اول، انتشارات عابد، تهران.
۷. محمدرحیمی، م، زندیه، م و عالم تبریز، ا، ۱۳۹۲، الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌سازی ترکیبی، چاپ اول، انتشارات صفار، تهران.
۸. شهریاری، زهرا، حمیدرضا ناصری و محسن خطیبی نیا، ۱۳۹۴، طرح بهینه سازه‌های فولادی بر اساس طراحی عملکردی با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه، دومین کنفرانس بین المللی و ششمین کنفرانس ملی زلزله و سازه، کرمان، جهاد دانشگاهی استان کرمان.

۹. قاسمی، ابراهیم، حسین شهرکی و وهاب شرافت خواه، ۱۳۹۸، کاربرد الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) در طراحی بهینه قابهای خمشی بتن مسلح، سومین کنفرانس بین المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت، تهران، دانشگاه صنعتی شریف.

۱۰. حسنی مقدم، غلامرضا و مجتبی حنطه، ۱۳۹۸، بهینه‌سازی قاب‌های فولادی دارای اتصالات صلب با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، سومین کنفرانس بین المللی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت، تهران، دانشگاه صنعتی شریف.

۱۱. شمس، آرش، ۱۳۹۷، طراحی بهینه عملکرد لرزه‌ای قاب‌های فولادی مهاربندی در نواحی لرزه خیز، سومین کنفرانس بین المللی عمران، معماری و طراحی شهری، تبریز، دبیرخانه دائمی کنفرانس، دانشگاه میعاد با همکاری دانشگاه هنر اسلامی تبریز، دانشگاه خوارزمی، دانشگاه شهرکرد.

۱۲. قادری، بهروز، محمدجواد سلمانیان و علی قیامی باجگیرانی، ۱۳۹۷، مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری گروه ذرات و گرگ خاکستری بهبود یافته در بهینه‌سازی سازه‌ها، کنگره بین المللی علوم مهندسی و توسعه شهری پایدار، دانشگاه پلی تکنیک دانمارک، دبیرخانه دائمی کنفرانس.

۱۳. عسگری، جعفر و مسعود سامی، ۱۳۹۷، تعیین آرایش بهینه مهاربندها با خروج از محوریت در سازه‌های میان‌مرتبه فولادی مبتنی بر الگوریتم چندهدفه سنجاقک، کنفرانس بین المللی عمران، معماری و مدیریت توسعه شهری در ایران، تهران، دانشگاه صنعتی مراغه با همکاری دانشگاه تبریز، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان.

۱۴. خدای، حمیدرضا و مصطفی مشایخی، ۱۳۹۷، تعیین موقعیت بهینه مهاربندهای ضربدری شکل در قابهای مهاربندی شده همگرا، با استفاده از الگوریتم خفاش BA، کنفرانس بین المللی عمران، معماری و مدیریت توسعه شهری در ایران، تهران، دانشگاه صنعتی مراغه با همکاری دانشگاه تبریز، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان.

۱۵. عسگری، جعفر و مسعود سامی، ۱۳۹۷، تاثیر تکیه گاه بر آرایش بهینه مهاربندها در سازه‌های بلند مرتبه فولادی مبتنی بر الگوریتم چندهدفه سنجاکک، کنفرانس بین المللی عمران، معماری و مدیریت توسعه شهری در ایران، تهران، دانشگاه صنعتی مراغه با همکاری دانشگاه تبریز، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان.

۱۶. مشارم‌وحد، مسعود و حمید محرمی، ۱۳۹۷، بررسی و مقایسه کارایی و سرعت روش معیار بهینگی در مقایسه با الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه‌سازی سازه‌ها، کنفرانس بین المللی عمران، معماری و مدیریت توسعه شهری در ایران، تهران، دانشگاه صنعتی مراغه با همکاری دانشگاه تبریز، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان.

۱۷. ابراهیمی، معین و سید محمد سیدپور، ۱۳۹۶، بهینه‌سازی توپولوژی و اندازه سازه‌های فضا کار با استفاده از الگوریتم فرا اکتشافی تکامل تفاضلی، کنفرانس بین المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر، تهران، دانشگاه اسوه، تهران، دانشگاه شهید بهشتی.

۱۸. محمدی فرسام، مهدی، محمدرضا عدل پرور و مسعود محمودآبادی، ۱۳۹۶، بهینه‌سازی قاب‌های فولادی با الگوریتم ژنتیک و تحلیل LRFD، کنفرانس بین المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر، تهران، دانشگاه اسوه، تهران، دانشگاه شهید بهشتی.

۱۹. حیدری پهلویان، محسن، عطاءاله حاجتی مدارایی و رحمت مدندوست، ۱۳۹۶، بررسی کارایی مهاربندهای فولادی در مقاوم سازی ساختمان‌های بتن آرمه موجود با توجه به تعداد و چیدمان آنها، کنفرانس بین المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر، تهران، دانشگاه اسوه، تهران، دانشگاه شهید بهشتی.

۲۰. اسدیان، حجت و جمشید صبوری، ۱۳۹۶، بهینه‌سازی قاب خمشی فولادی با استفاده از الگوریتم‌های تصادفی، چهارمین همایش بین المللی مهندسی سازه، تهران، انجمن مهندسی سازه ایران.

۲۱. قیاسی، رامین، محمد رضا قاسمی، یاسر بینایی و حمید رضا غفاری، ۱۳۹۴، مقایسه الگوریتم‌های فراابتکاری بهینه‌ساز در عیب یابی سازه‌ها، کنفرانس بین المللی انسان، معماری، عمران و شهر، تبریز، مرکز مطالعات راهبردی معماری و شهرسازی.

۲۲. محمدی، رضا، محمد امامی کورنده و مسعود شفیعی سرتشتیزی، ۱۳۹۴، بررسی سیستم‌های مهاربندی بر بهینه شدن طراحی سازه‌های فلزی، دومین کنفرانس بین المللی عمران، معماری و توسعه اقتصاد شهری، شیراز، موسسه آموزشی مدیران خبره نارون.

۲۳. مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، طرح و اجرای ساختمانهای فولادی، تهیه کننده دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، تاریخ انتشار ۱۳۹۲

۲۴. طالب پور، محمدحسین، ۱۳۹۲، رساله دکتری، بهینه‌یابی سازه‌ها با استفاده از روش‌های فراابتکاری ترکیباتی، دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود.

25. James N. Richardson, Guy Nordenson, Rebecca Laberene, Rajan Filomeno Coelho, Sigrid Adriaenssens, 2013, Flexible optimum design of a bracing system for façade design using multiobjective Genetic Algorithms, **Automation in Construction**.
26. M. Akif Kutuk, Ibrahim Gov, 2014, Optimum bracing design under wind load by using topology optimization, **Wind and Structures**.
27. Juraj Králik, 2013, Deterministic and Probabilistic Analysis of Steel Frame Bracing System Efficiency, **Advanced Materials Research**, 390, pp. 172-177.
28. Mohammad Bazzaz, Ali Kheyroddin, Mohammad Ali Kafi, 2012, Evaluation of the seismic performance of off-centre bracing system with ductile element in steel frames, **Steel & Composite structures**.
29. AISC, Specifications for structural steel building, Chicago, USA: American Institute of Steel Construction, 2010.
30. R. Montuori, E. Nastri, V. Piluso, 2017, Influence of the bracing scheme on seismic performances of MRF-EBF dual systems, **Journal of Constructional Steel Research**.
31. Taichiro Okazaki, Michael D. Engelhardt, 2007, Cyclic loading behavior of EBF links constructed of ASTM A992 steel, **Journal of Constructional Steel Research**.

32. F. Perotti, A. De Amici, P. Venturini, 1996, Numerical analysis and design implications of the seismic behaviour of one-storey steel bracing systems, **Engineering Structures**.
33. Lorenzo De Stefani, Roberto Scotta, Massimiliano Lazzari, 2014, Optimal design of seismic retrofitting of RC frames with eccentric steel bracing, **Bulletin of Earthquake Engineering**.
34. Bazaraa. M, Jarvis. J, 2010, Linear Programming and Network Flows. Fourth Edition, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, USA.
35. Yang. x, 2010, Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications, First Edition, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, USA.
36. Rao. S, 2019, Engineering Optimization: Theory and Practice, Fifth Edition, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, USA.
37. Hojjat Adeli, Prasad Vishnubhotla, 2008, Parallel Processing, **Computer-Aided Civil and Infrastructure**.
38. N. K. Cauvery, K. V. Viswanatha, 2009, Routing Algorithm using mobile agents and Genetic Algorithm, **International Journal of Computer and El**.
39. Parneet Kaur, Manpreet Singh, Gurpreet Singh Josan, 2016, Comparative analysis of Rank Aggregation techniques for metasearch using genetic algorithm, **Education and Information Technologies**.
40. Kaveh. A, Farhoodi. N. 2010, Layout Optimization for X-bracing of Planar Steel Frames Using Ant System, **International Journal of Civil Engineering**.
41. Baldock. R, Shea. K, 2006, Structural Topology Optimization of Braced Steel Frameworks Using Genetic Programming, **Computer Science**, 4200:54-61.
42. Wang. H, Ohmori. H. 2013, Elasto-plastic analysis based truss optimization using genetic algorithm, **Engineering Structures**, 50:1-12.
43. Lagaros. N, Psarras. L, Papadrakakis. M. 2008, Optimum design of steel structures with web openings, **Engineering Structures**, 30(9):2528-2537.
44. Kaveh. A, Farhoudi. N, 2011, A unified approach to parameter selection in metaheuristic algorithms for layout optimization, **Journal of Constructional Steel Research**, 67(10), 1453–1462.
45. T. Hagishita, M. Ohsaki, 2008, Optimal placement of braces for steel frames with semi-rigid joints by scatter search, **Journal Of Computers and Structures**.

46. Saka M, Kameshki E, Topping B, 1998, Optimum design of multi-storey sway steel frames to BS 5950 using a genetic algorithm, In: **Proceeding of the advances in engineering computational technology**, pp 135–142.
47. Ghiasi. R, Fathnejat. H, Torkzadeh. P, 2019, A three-stage damage detection method for large-scale space structures using forward substructuring approach and enhanced bat optimization algorithm, **Engineering with Computers**, 35(3), 857-874.
48. Kaveh. A, Farhoodi. N. 2015, Layout Optimization of Braced Frames Using Differential Evolution Algorithm and Dolphin Echolocation Optimization, **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, 59(3).
49. Hasançeb. O, Çarbaş. S, Doğan. E, Erdal. F, Saka. M, 2010, Comparison of non-deterministic search techniques in the optimum design of real size steel frames, **Computers And Structures**, 88(17-18).
50. Bazzaz. M, Kafi. M. A, Kheyroddin. A, Andalib. Z, Esmaili. H, 2014, Evaluating the seismic performance of off-centre bracing system with circular element in optimum place, **International Journal of Steel Structures**, 14(2).
51. Barman. S, Mishra. M, Kumar. D, Maity. D, 2021, Vibration-based damage detection of structures employing Bayesian data fusion coupled with TLBO optimization algorithm, **Structural and Multidisciplinary Optimization**, 64.
52. Nabavi. S, Gholampour. S, 2021, Damage detection in frame elements using Grasshopper Optimization Algorithm (GOA) and time-domain responses of the structure, **Evolving Systems**.
53. Andalib .Z, Kafi. M. A, Kheyroddin. A, Bazzaz. M, 2014, Experimental investigation of the ductility and performance of steel rings constructed from plates, **Journal of Constructional Steel Research**, 103.
54. Hayalioglu. M, S. Degertekin, 2005, Minimum cost design of steel frames with semi-rigid connections and column bases via genetic optimization, **Computers and Structures**, 83(21).
55. Talatahari. S, Azizi. M, 2020, Optimal design of real-size building structures using quantum-behaved developed swarm optimizer, **The Structural Design of Tall and Special Buildings**, 29(2).
56. Kaveh. A, Eslamlou. A, Khodadadi. N, 2020, Dynamic Water Strider Algorithm for Optimal Design of Skeletal Structures, **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, 64(3).
57. McGee O.G, Phan K.F. A, 1991, robust optimality criteria procedure for cross-sectional

- optimization of frame structures with multiple frequency limits, **Computers & Structures**, Vol. 38, 485-500.
58. Gholizadeh S, Salajegheh E, Torkzadeh P, 2008, Structural optimization with frequency constraints by genetic algorithm using wavelet radial basis function neural network, **Sound and Vibration**, 312, 316 – 331.
59. Lingyun. W, Guangming. W. 2005, Truss optimization on shape and sizing with frequency constraints based on genetic algorithm, **Computational Mechanics**, 35(5):361-368.
60. Wenjie Zuo, Tao Xu, Hao Zhang, Tianshuang Xu, 2011, Fast structural optimization with frequency constraints by genetic algorithm using adaptive eigenvalue reanalysis methods , **Struct Multidisc Optim** 43:799–810.
61. R. V. Grandhi, V. B. Venkayyaf, 1987, Structural optimization with frequency constraints, Flight Dynamics Laboratory, Wright-Palterson Air Force Base, Wright State University , Dayton ,Ohio.
62. Lieu. Q. X, Do. D. T, & Lee. J, 2018, An adaptive hybrid evolutionary firefly algorithm for shape and size optimization of truss structures with frequency constraints, **Computers & Structures**, 195, 99-112.
63. Ghazi. A, Banan. M.R., Ashrafizadeh. M, 2003, Optimum Design of Space Truss Structures Using Parallel Genetic Algorithm, 6th Int. Conf. Civil Eng, ICCE, Isfahahn – Iran.
64. Tanimura, Y, Hiroyasu. T, Miki. M , 2001, Discussion on Distributed Genetic Algorithms for Designing Truss Structures, The 5th Int. Conf. Exhibition on High Performance Comput. Asia-Pacific Region ,Queensland Australia.
65. Goldberg D. E,1989, Genetic Algorithm in Search, **Optimization and Machine Learning**, Addison-Wesley Publishing Co.
66. Rajeev. S, Krishnamoorthy. C, 1992, Discrete Optimization of Structures Using Genetic Algorithms, **Journal of Structural Engineering**, 118(5).
67. Hajela. P, Lee. E, 1995, Genetic Algorithms in Truss Topological Optimization, **International Journal of Solids and Structures**, 32(22).
68. Grierson D.E, Pak W.H, 1993, Optimal sizing,geometrical and topological design using genetic algorithm, **Structural Optimization**, Vol.6.
69. Christensen, P. W, Klarbring. A, 2009, **An Introduction to Structural Optimization**, Springer, pp 5.

70. Bonabeau. E, Dorigo. M, Theraulaz. G ,1999, Swarm Intelligence: From Natural To Artificial Systems, Oxford University Press, Oxford.
71. Erol. O.K, Eksin I, 2006 , New optimization method: Big Bang-Big Crunch, **Advances in Engineering Software**, 37:106-111.
72. Kaveh. A, Talatahari. S, 2010, Charged System Search For Optimum Grillage System Design Using The LRFD-AISC Code, **Journal Of Constructional Steel Research**, 66, pp767\_771.
73. Haupt. R.L, Haupt. E, 2004, **Practical Genetic Algorithms**, Second Edition, John Wiley and Sons, New York.
74. Miki. M, Hiroyasu. T, Kaneko. M, Hatanaka. K , 1999, A parallel genetic algorithm with distributed environment scheme, in: Proc. of the IEEE Conf. of Systems, Man and Cybernetics, IEEE Press, pp. 695–700.
75. Kalatjari. V.R, Talebpour. M.H., 2011, Sizing and topology optimization of truss structures by modified multi-search method, **Journal of Civil and Surveying Engineering**, 45(3), 351.
76. OpenSees (Version 3.2.2): Open system for earthquake engineering simulation. <http://opensees.berkeley.edu>, (2020)
77. Standard SEI/ASCE 7-10, 2010, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. ASCE, 1801 Alexander Bell Drive, Reston, Virginia 20191, USA.
78. Safari. D, Maheri. Mahmoud R, 2006, Genetic algorithm search for optimal brace positions in steel frames, **Advanced Steel Construction**, pp. 378–393.
79. G.S. Tong, Y. Ji, 2007, Buckling of frames braced by flexural bracing, **Journal of Constructional Steel Research**.
80. C. M. Chan, A.N. Sherbourne, D.E. Grierson, 1994, Stiffness optimization technique for 3D tall steel building frameworks under multiple lateral loadings, **Engineering Structures**.
81. Emilio Rosenblueth, 1986, Optimum reliabilities and optimum design, **Structural Safety**.
82. Rajan. S. D, Nguyen. D.T, 2004, Design optimization of discrete structural systems using genetic algorithm, **Structural and Multidisciplinary Optimization**, 28, pp. 340–348.
83. Kaveh. A, Talatahari. S, 2009, Particle Swarm Optimizer, Ant Colony Strategy And Harmony Search Scheme Hybridized For Optimization of Truss Structures, **Computers & Structures**, 87(5–6), pp. 267–28.

84. Geem. Z.W, Kim. J.H, Loganathan. G.V, 2001, A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search, **Simulation**, 76(2), 60–68.
85. Kaveh. A, Talatahari. S, 2010, A novel heuristic optimization method: charged system search, **Acta Mechanica**, 213(3-4), 267–289.
86. Kaveh. A, Khayatazad. M, 2012, A new meta-heuristic method: Ray Optimization, **Computers & Structures**, 112, 283–294.
87. Kaveh. A, Mahdavi. V. R, 2014, Colliding bodies optimization: A novel metaheuristic method, **Computers & Structures**, 139, 18–27.
88. Kaveh. A, Mahdavi. V.R, 2013, Optimal design of structures with multiple natural frequency constraints using a hybridized BB-BC/Quasi-Newton algorithm, **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, 57(1), 27–38.
89. Kaveh. A, Javadi. S.M, 2014, An efficient hybrid particle swarm strategy , ray optimizer , and harmony search algorithm for optimal design of truss structures, **Periodica Polytechnica Civil Engineering**, 58(2).
90. McCormac. J, 2008, Structural Steel Design , Pearson International Edition; UK.
91. E. Aydin, M..H. Boduroglu, 2004, Optimal placement of steel diagonal braces for upgrading the seismic capacity of existing structures and its comparison with optimal dampers, **Journal of Constructional Steel Research**.
92. Moghaddam, H, Hajirasouliha.I , 2004, Optimum seismic design of concentrically braced steel frames: concepts and design procedures, **Journal of Constructional Steel Research**.
93. Jármai. K., J. Farkas, Y. Kurobane, 2006, Optimum seismic design of a multi-storey steel frame, **Engineering structures**, 28(7), p. 1038-1048.
94. Ghosh, Ashish, 2004, Evolutionary Algorithms for Multi-Criterion Optimization: A survey, **international journal of computing and information science**, Vol. 2, pp. 38-57.
95. Sharma. G, Martin. J, 2009, MATLAB: a language for parallel computing, **International Journal of Parallel Programming**, 37(1): 3-36.
96. Narasimha. M.K, Darshan. S.K, Karthik. A.S, Santosh. R, Shiva Kumar. K.S, 2016, Effective Study of Bracing Systems for Irregular Tall Steel Structures, **International Journal of Scientific & Engineering Research**.

97. Xiaoye. Y, Tianjian. J, Tianxin. Zh, 2017, Relationships between internal forces, bracing patterns and lateral stiffnesses of a simple frame, **Journal of Scientific & Engineering Research**, 147-161.
98. Kaveh. A, Kalatjari. V.R, Talebpour. M.H, Torkamanzadeh. J. 2013, Configuration optimization of trusses using a multi heuristic based search method, **International Journal of Optimization in Civil Engineering**, 3(1), 151–178.
99. Kaveh. A, Kalatjari. V.R, 2002, Genetic Algorithm for Discrete-Sizing Optimal Design of Trusses Using the Force Method, **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, Vol. 55, PP. 55-72.
100. Kaveh. A, Kalatjari. V.R, 2003, Topology Optimization of trusses using genetic algorithm, force method and graph theory, **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, Vol. 58, No. 3, PP. 771-791.

# Abstract

The issue of optimization and analysis of structures has been discussed in structural engineering societies for many years. And the interest of engineers and designers has always been on the optimal use of materials such as structural materials and maximum safety. This study aims to optimize the weight of steel frames (as the objective function). The ultimate goal was to select an optimal arrangement and coordinate the Three types of convergent bracing (multi-story X-bracing, Diagonal-bracing and X-bracing) in low, mid, and high-rise simple steel frames with specific dimensions and spans. In the end, an optimal weight design will be presented for the frames under the design constraints (by LRFD method), frequency, drift, and position of braces in frame height, and the amount of the tensile force of braces. In this research, the frames have been optimized using the connection between two software OPENSEES and MATLAB based on a multi meta-heuristic optimization algorithm with discrete variables (a new, mixed-method based on parallel island model with four islands). The findings of this research include the optimal position of braces, sections, and convergence history for the frames under a multi meta-heuristic optimization algorithm. The diagrams of convergence history were also provided for the ant colony algorithm in mid-rise frames with multi-story X-bracing. The results show the superiority of the multi meta-heuristic search algorithm in the convergence speed and the quality of the optimal response compared to the ant colony optimization algorithm. It should be noted that the weight of the frames at the onset of optimization with the ant colony algorithm is 51% higher than the algorithm of this research and While the average convergence in multi meta-heuristic search algorithm is 136 iterations, In all mid-rise frames studied in this research, the ant colony algorithm has converged with the average 86 iterations more than the multi meta-heuristic search algorithm. Finally, multi meta-heuristic search algorithm has designed more optimal mid-rise frames than ant colony algorithm with an average weight difference of 7.5%. Also, according to the results of optimization with multi meta-heuristic search algorithm, the optimal weight belongs to the first the multi-story X-bracing frames (the combination of inverted V- Bracing and V-Bracing) Then for Diagonal-bracing and finally is for the frames with the X-bracing. More precisely, the average optimum weight of the frames with multi-story X-bracing was 6.8% less than the average weight of the frames with the X-bracing and the average weight of the frames with Diagonal-bracing was 4.2% less than the average weight of the frames with X-bracing. Regarding the optimum location of braces, the results of the proposed algorithm showed that the braces were located in central and adjacent to each other.

**Keywords:** optimization; multi meta-heuristic algorithm; simple steel frame; optimal position and topology of convergent braces; frequency constraint; parallel-island processing



Shahrood University of  
Technology

Kharazmi International Campus

Ph.D. Thesis in Structural Engineering

# **Optimization of location, topology and number of bracing spans in steel structures using multi meta-heuristic based search method and dynamic constraints**

By: Amirhosein Mohajer

Supervisor:  
Dr. Vahidreza kalatjari

Advisor:  
Dr. Mohammadhosein Talebpour

February 2022