

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه

**تعیین میزان نیروی پیش تنیدگی و آرایش بهینه کابل‌ها در  
قاب‌های فولادی ساده با استفاده از روش‌های فرا ابتکاری**

**نگارنده:**

امیر اقدسی

**استاد راهنما:**

دکتر وحید رضا کلاتجاری

**استاد مشاور:**

دکتر محمدحسین طالب پور

بهمن ۱۳۹۹



دانشکده: مهندسی عمران

گروه: سازه

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای امیر اقدسی به شماره دانشجویی: ۹۷۰۲۸۴۴

تحت عنوان: تعیین میزان نیروی پیش تنیدگی و آرایش بهینه کابل ها در قاب های فولادی ساده با استفاده از روش های فرا ابتکاری

در تاریخ ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	دکتر محمد حسین طالب پور		دکتر وحیدرضا کلات جاری

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم به

پدر بزرگوارم

او که ناتوان شد تا من به توانایی برسم و عاشقانه سوخت تا من به روشنایی برسم

و

مادر عزیزم

دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج است و وجودش برایم همه مهر

## شکر و قدردانی

به ثمر رسیدن این تحقیق مرمون الطاف بی کران الهی است، خداوند را شاکرم که این منت را بر من نهاد. با نهایت سپاس و قدردانی از راهنمایی و

رحمت بی شائبه استاد ارجمند جناب آقای دکتر کلات جاری و آقای دکتر طالب پور و تمام کسانی که در این مسیر با همفکری و راهنمایی های خود وقت

پرازش خود را در اختیار بنده گذاشته و باروی گشاده مریاری نمودند.

## تعهد نامه

اینجانب امیر اقدسی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته سازه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **تعیین میزان نیروی پیش تنیدگی و آرایش بهینه کابل ها در قاب های فولادی ساده با استفاده از روش های فرا ابتکاری** تحت راهنمایی آقای دکتر کلات جاری متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه 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 پایان نامه 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 می باشد 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 پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

### تاریخ

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

## چکیده

در این پژوهش بهینه‌سازی کابل‌های پیش‌تنیده در سازه‌های فولادی مورد ارزیابی قرار گرفت. نوع بهینه‌یابی به صورت مکان‌یابی موقعیت کابل‌ها در طبقات مدنظر می‌باشد. بهینه‌سازی سازه‌ها با در نظر گرفتن شرایط و محدودیت‌های موجود یا همان توابع قید همواره یکی از اهداف مهندسان و طراحان بوده است. تاکنون تحقیقات زیادی بر روی بهینه‌سازی انجام شده و روش‌های مختلفی برای حل پیشنهاد شده است. به طور کلی روش‌های بهینه‌سازی را می‌توان به سه دسته روش‌های ریاضی، معیار بهینگی و فرا اکتشافی تقسیم‌بندی نمود. در این تحقیق از الگوریتم ژنتیک که از جمله روش‌های فرا اکتشافی به شمار می‌رود، استفاده شده است.

لازمه استفاده از روش الگوریتم ژنتیک داشتن توابع هدف و قیدهای مناسب نسبت به متغیرهای طراحی است. در این تحقیق وزن سازه به عنوان تابع هدف و محدودیت‌های تنش و تغییر شکل به طور همزمان به عنوان قیدهای مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. محل بهینه، قطر و مقدار نیروی پیش‌تنیدگی کابل‌ها به عنوان متغیرهای مسئله در نظر گرفته شده است. برای تحلیل سازه‌ها از نرم افزار OpenSees و روش استاتیکی غیرخطی استفاده شده است.

برای پیاده‌سازی این موضوع، سازه‌های سه، هشت و دوازده طبقه با نسبت دهانه‌های مختلف در دو حالت مهاربندی ضربدری روی هم و همچنین مهاربندی ضربدری در دهانه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و مشاهده می‌شود که در ۶۰ درصد مدل‌ها دو دهانه میانی و تنها در ۴۰ درصد دو دهانه کناری بعنوان دهانه بهینه مهاربند گذاری شده‌اند، همچنین مشاهده می‌شود که ضریب رفتار برای سازه‌های ۳ طبقه با یک دهانه مهاربند گذاری در بازه 4/61 تا 5/88، در سازه‌های ۸ طبقه و ۱۲ طبقه با دو دهانه مهاربند گذاری به ترتیب در بازه 3/51 تا ۴/۹ و ۴/۰۴ تا ۵/۳۴ متغییر بوده است، همچنین می‌توان گفت که نیروی پیش‌تنیدگی برای سازه‌های ۳ طبقه در بازه 0/12 تا 0/18، برای سازه‌های ۸ طبقه در بازه ۰/۱ تا ۰/۲۸ و در سازه‌های ۱۲ طبقه در بازه ۰/۱ تا ۰/۳۲ تنش نهایی کابل متغییر بوده است.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم ژنتیک، سازه‌های فولادی، روش استاتیکی غیرخطی، بهینه‌سازی نیروی پیش‌تنیدگی

کابل

## فهرست مطالب

۱	فصل اول مقدمه
۲	۱-۱ پیشگفتار
۳	۲-۱ مروری بر تاریخچه موضوع
۹	۳-۱ روش تحقیق
۹	۴-۱ فرضیات تحقیق
۱۰	۵-۱ نوآوری تحقیق
۱۰	۶-۱ ساماندهی پژوهش
۱۱	فصل دوم معرفی الگوریتم ژنتیک
۱۲	۱-۲ پیشگفتار
۱۲	۲-۲ تاریخچه الگوریتمهای ژنتیک
۱۳	۳-۲ بهینه یابی با الگوریتمهای ژنتیک
۱۵	۱-۳-۲ کد کردن مقادیر
۱۵	۱-۱-۳-۲ کد مبنای دو (کد دودویی)
۱۷	۲-۱-۳-۲ روش کدگذاری مقدار
۱۷	۲-۳-۲ شایستگی هر کروموزوم
۱۸	۱-۲-۳-۲ تابع پناستی
۲۰	۲-۲-۳-۲ تابع شایستگی
۲۱	۳-۳-۲ انتخاب
۲۲	۱-۳-۳-۲ روشهای انتخاب
۲۲	۱-۳-۳-۲ الف روش چرخ گردان
۲۴	۱-۳-۳-۲ ب روش رقابتی
۲۵	۴-۳-۲ عملگرهای GA
۲۶	۱-۴-۳-۲ عملگر ادغام
۲۷	۱-۴-۳-۲ الف روش ادغام تک نقطه‌ای یا مکانی
۲۸	۱-۴-۳-۲ ب روش ادغام دو نقطه‌ای

۲۸.....	۲-۳-۴-۱-ج روش ادغام یکنواخت.....
۲۹.....	۲-۳-۴-۱-د نرخ ادغام.....
۳۰.....	۲-۳-۴-۲ جهش.....
۳۲.....	۲-۳-۴-۲ الف نرخ جهش ( $P_m$ ).....
۳۳.....	۲-۳-۵ شرط توقف الگوریتم.....
۳۵.....	فصل سوم معرفی کابل ها و مهاربند ضربداری.....
۳۶.....	۳-۱ پیشگفتار.....
۳۶.....	۳-۲ پیشینه تاریخی سازه‌های کابلی.....
۳۷.....	۳-۳ واکنش کابل‌ها به بارگذاری با تغییر شکل.....
۳۸.....	۳-۴ پیش تنیدگی.....
۳۹.....	۳-۴-۱ روش پیش کشیده.....
۳۹.....	۲-۳-۴ روش پس کشیده.....
۳۹.....	۳-۵ مزایای استفاده از سازه‌های کابلی.....
۴۰.....	۳-۶ محدودیت‌های استفاده از سازه‌های کابلی.....
۴۰.....	۳-۷ تحلیل کابل‌ها.....
۴۴.....	۳-۸ ساخت سیم‌ها.....
۴۵.....	۳-۹ انواع کابل‌ها از نظر جنس مفتول.....
۴۵.....	۳-۹-۱ مفتول فولادی بدون روکش یا غیر گالوانیزه.....
۴۵.....	۳-۹-۲ مفتول فولادی گالوانیزه.....
۴۶.....	۳-۹-۳ مفتول فولادی ضدزنگ.....
۴۶.....	۳-۱۰ انواع کابل‌ها از نظر هسته کابل.....
۴۷.....	۳-۱۱ انواع کابل‌ها از نظر نحوه بافت.....
۴۷.....	۳-۱۱-۱ بافت سیل.....
۴۷.....	۳-۱۱-۲ بافت وارینگتن.....
۴۷.....	۳-۱۱-۳ بافت فیلر.....
۴۸.....	۳-۱۱-۴ بافت استاندارد.....

۴۸.....	۱۲-۳ نام‌گذاری کابل‌ها بر طبق استاندارد BS انگلستان .....
۴۹.....	۱۳-۳ حلقه انتهایی کابل‌ها .....
۵۰.....	۱-۱۳-۳ پرس دو سر کابل با ایجاد حلقه و اتصال بست گلوبی .....
۵۰.....	۲-۱۳-۳ استفاده از بستهای U شکل .....
۵۰.....	۳-۱۳-۳ ایجاد حلقه توسط دست یا گیس بافت کردن کابل .....
۵۱.....	۱۴-۳ معرفی بادبندهای ضربدری .....
۵۳.....	فصل چهارم مدل سازی نرم افزاری و روش های محاسبه .....
۵۴.....	۱-۴ پیشگفتار .....
۵۴.....	۲-۴ تحلیل استاتیکی غیرخطی .....
۵۵.....	۱-۲-۴ الگوی توزیع بار جانبی .....
۵۵.....	۱-۱-۲-۴ توزیع بار ثابت .....
۵۶.....	۲-۱-۲-۴ توزیع بار متغیر .....
۵۶.....	۳-۴ روش چوپرا و نحوه محاسبه ضریب رفتار .....
۶۱.....	۴-۴ الزامات طراحی مهاربند ناودانی .....
۶۱.....	۱-۴-۴ الزامات طراحی اعضا مهاربندی برای نیروی فشاری .....
۶۲.....	۲-۴-۴ الزامات طراحی اعضا مهاربندی برای نیروی کششی .....
۶۲.....	۳-۴-۴ الزامات طراحی مهاربندی برای کمانش پیچشی-خمشی .....
۶۳.....	۵-۴ معرفی نرم افزار opensees .....
۶۴.....	۶-۴ امکانات نرم افزار opensees .....
۶۵.....	۷-۴ معرفی مصالح فولادی موجود در opensees .....
۶۶.....	۸-۴ نحوه مدل سازی اعضای سازه ای .....
۶۶.....	۱-۸-۴ تعریف مقاطع اعضا .....
۶۷.....	۲-۸-۴ تعریف تیرها و ستون ها .....
۶۷.....	۳-۸-۴ تعریف بادبندها و کابلها .....
۶۷.....	۹-۴ روند لینک متلب و اپنسیس .....
۶۸.....	۱۰-۴ معرفی مدل .....

۶۸.....	۱-۱۰-۴	مشخصات مصالح مورد استفاده
۶۹.....	۲-۱۰-۴	مشخصات کابل های مورد استفاده
۷۰.....	۳-۱۰-۴	بارگذاری ثقلی
۷۰.....	۴-۱۰-۴	لیست مقاطع مورد استفاده
۷۰.....	۱۱-۴	تعریف متغیرها
۷۱.....	۱۲-۴	گرفتن داده های ورودی
۷۱.....	۱۳-۴	روند کلی بهینه یابی با الگوریتم ژنتیک
۷۳.....	۱۴-۴	جمعیت اولیه
۷۴.....	۱۵-۴	کُدگشایی (برگرداندن کد به مقدار اولیه)
۷۵.....	۱۶-۴	تابع پنالتهی یا جریمه
۷۶.....	۱۷-۴	فرآیند انتخاب، ادغام و جهش
۷۷.....	۱۸-۴	شرط خاتمه
۷۷.....	۱۹-۴	پارامترهای GA
۷۷.....	۱-۱۹-۴	پارامترهای GA سه طبقه
۷۸.....	۲-۱۹-۴	پارامترهای GA هشت طبقه
۷۸.....	۳-۱۹-۴	پارامترهای GA دوازده طبقه
۷۸.....	۲۰-۴	صحت سنجی
۷۹.....	۱-۲۰-۴	مثال ۱
۸۱.....	۲-۲۰-۴	مثال ۲
۸۳.....	۳-۲۰-۴	مثال ۳
۸۷.....		فصل پنجم خروجی های نرم افزار و تجزیه و تحلیل داده ها
۸۸.....	۱-۵	پیشگفتار
۸۹.....	۲-۵	معرفی مدل ها
۹۰.....	۳-۵	آرایش بهینه مهاربند گذاری با کابل
۹۵.....	۴-۵	آرایش بهینه مهاربند گذاری با ناودانی
۹۷.....	۵-۵	نتایج مدل های ۳، ۸ و ۱۲ طبقه مهاربندی با کابل با طول دهانه ۴ متر

۹۷.....	۱-۵-۵ نتایج مدل ۳ طبقه با مهاربندی در دهانه های روی هم
۹۸.....	۲-۵-۵ نتایج مدل ۸ طبقه با مهاربندی در دهانه های روی هم
۱۰۰.....	۳-۵-۵ نتایج مدل ۱۲ طبقه با مهاربندی در دهانه های روی هم
۱۰۲.....	۴-۵-۵ نتایج مدل ۳ طبقه با مهاربندی در دهانه های دلخواه
۱۰۳.....	۵-۵-۵ نتایج مدل ۸ طبقه با مهاربندی در دهانه های دلخواه
۱۰۵.....	۶-۵-۵ نتایج مدل ۱۲ طبقه با مهاربندی در دهانه های دلخواه
۱۰۷.....	۶-۵ نتایج مدل های ۳، ۸ و ۱۲ طبقه مهاربندی با ناودانی با طول دهانه ۴ متر
۱۰۷.....	۱-۶-۵ نتایج مدل ۳ طبقه با مهاربندی در دهانه های روی هم
۱۰۸.....	۲-۶-۵ نتایج مدل ۸ طبقه با مهاربندی در دهانه های روی هم
۱۰۹.....	۳-۶-۵ نتایج مدل ۱۲ طبقه با مهاربندی در دهانه های روی هم
۱۱۰.....	۷-۵ مقایسه
۱۱۰.....	۱-۷-۵ مقایسه ضریب رفتارها
۱۱۱.....	۲-۷-۵ مقایسه نسبت تنش ها
۱۱۲.....	۳-۷-۵ مقایسه شماره کابل های مورد استفاده
۱۱۷.....	فصل ششم نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۱۸.....	۱-۶ نتیجه گیری
۱۲۰.....	۲-۶ پیشنهادات
۱۲۱.....	فهرست مراجع

## فهرست شکل ها

- شکل (۱-۱)- آرایش بادبند گذاری پیشنهادی محمدی و همکاران [1] ..... ۳
- شکل (۲-۱)- آرایش مهاربندی ژانگ، ژائو و ژوپون لی [2] ..... ۴
- شکل (۳-۱)- نقاط ایجاد مفصل پلاستیک در قاب خمشی ساده وقاب‌های مهاربندی شده با کابل و بادبند و کابل با استوانه میانی [3] ..... ۶
- شکل (۴-۱)- شکل بادبند گذاری به صورت منفرد و یکپارچه در قاب های ۳ و ۱۰ طبقه [4] ..... ۷
- شکل (۵-۱)- قاب خمشی ساده، قاب خمشی با مهاربند واگرا و قاب خمشی با مهاربند ضربدری [6] ..... ۸
- شکل (۱-۲) - مدلی از چرخ گردان [8] ..... ۲۳
- شکل (۲-۲) - روش ادغام تک نقطه‌ای [14] ..... ۲۷
- شکل (۳-۲) - روش ادغام دو نقطه‌ای [14] ..... ۲۸
- شکل (۴-۲) - روش ادغام یکنواخت [14] ..... ۲۹
- شکل (۵-۲) - نیاز جمعیت به بیت ۱ [14] ..... ۳۱
- شکل (۶-۲) - تاثیر عملگر جهش [14] ..... ۳۱
- شکل (۱-۳) عکس‌العمل‌های رانشی و فشاری نسبت عکس با عمق میزان خیز کابل دارد ..... ۳۸
- شکل (۲-۳) منحنی تنش- کرنش کابل‌ها [17] ..... ۴۵
- شکل (۳-۳) انواع بافت‌ها در کابل‌ها [18] ..... ۴۸
- شکل (۴-۳)- نام‌گذاری انواع کابل فولادی بر اساس استاندارد BS انگلستان [18] ..... ۴۹
- شکل (۵-۳) سه روش موجود جهت درست کردن حلقه [18] ..... ۵۱
- شکل (۶-۳) اجرای صحیح بست های U شکل ..... ۵۱
- شکل (۱-۴) نمودار دو خطی برش پایه-تغییر مکان برای سیستم یک درجه آزادی [30] ..... ۵۷
- شکل (۲-۴) برابر قرار دادن مساحت‌های زیر منحنی دو خطی و منحنی الاستیک [30] ..... ۵۷
- شکل (۳-۴) سطح زیر نمودار الاستیک [30] ..... ۵۹
- شکل (۴-۴) پارامترهای منحنی پوش steel 02 [25] ..... ۶۶
- شکل (۵-۴) نمونه ای از مقاطع رشته ای [26] ..... ۶۶
- شکل (۶-۴) روند لینک متلب و اپنسیس ..... ۶۷
- شکل (۷-۴) کد برنامه مجازی الگوریتم ژنتیک ساده و فلوچارت آن ..... ۷۲
- شکل (۸-۴) روند الگوریتم ژنتیک ..... ۷۳
- شکل (۹-۴) مدل سازه سه طبقه ..... ۸۰
- شکل (۱۰-۴) مدل سازه سه طبقه مقاله ..... ۸۰
- شکل (۱۱-۴) منحنی ظرفیت به دست آمده Matlab ..... ۸۰

۸۰.....	شکل (۱۲-۴) منحنی ظرفیت دو خطی شده مقاله .....
۸۲.....	شکل (۱۳-۴) آرایش مهاربند گذاری به دست آمده Matlab .....
۸۲.....	شکل (۱۴-۴) آرایش مهاربند گذاری و مقاطع به دست آمده SAP2000 .....
۸۳.....	شکل (۱۵-۴) منحنی ظرفیت به دست آمده Matlab .....
۸۳.....	شکل (۱۶-۴) منحنی ظرفیت به دست آمده SAP2000 .....
۸۴.....	شکل (۱۷-۴) حالت بهینه بادیگذاری قاب هندسی تحت بررسی [31] .....
۸۵.....	شکل (۱۸-۴) نمودار تاریخچه کاهش وزن نمونه [31] .....
۸۵.....	شکل (۱۹-۴) حالت بهینه بادیگذاری قاب هندسی شبیه سازی شده .....
۸۵.....	شکل (۲۰-۴) نمودار تاریخچه کاهش وزن .....
۹۱.....	شکل ۵-۱-۱ (model- B-O-3-3) .....
۹۱.....	شکل ۵-۲-۲ (model- B-O-3/5-3) .....
۹۱.....	شکل ۵-۳-۳ (model- B-O-4-3) .....
۹۱.....	شکل ۵-۴-۴ (model- B-O-4/5-3) .....
۹۱.....	شکل ۵-۵-۵ (model- B-O-5-3) .....
۹۱.....	شکل ۵-۶-۶ (model- B-C-3-3) .....
۹۱.....	شکل ۵-۷-۷ (model- B-C-3/5-3) .....
۹۱.....	شکل ۵-۸-۸ (model- B-C-4-3) .....
۹۱.....	شکل ۵-۹-۹ (model- B-C-4/5-3) .....
۹۱.....	شکل ۵-۱۰-۱۰ (model- B-C-5-3) .....
۹۲.....	شکل ۵-۱۱-۱۱ (model- B-O-3-8) .....
۹۲.....	شکل ۵-۱۲-۱۲ (model- B-O-3/5-8) .....
۹۲.....	شکل ۵-۱۳-۱۳ (model- B-O-4-8) .....
۹۲.....	شکل ۵-۱۴-۱۴ (model- B-O-4/5-8) .....
۹۲.....	شکل ۵-۱۵-۱۵ (model- B-O-5-8) .....
۹۲.....	شکل ۵-۱۶-۱۶ (model- B-C-3-8) .....
۹۲.....	شکل ۵-۱۷-۱۷ (model- B-C-3/5-8) .....
۹۲.....	شکل ۵-۱۸-۱۸ (model- B-C-4-8) .....
۹۲.....	شکل ۵-۱۹-۱۹ (model- B-C-4/5-8) .....
۹۲.....	شکل ۵-۲۰-۲۰ (model- B-C-5-8) .....
۹۳.....	شکل ۵-۲۱-۲۱ (model- B-O-3-12) .....
۹۳.....	شکل ۵-۲۲-۲۲ (model- B-O-3/5-12) .....

- شکل ۵-۲۳ (model- B-O-4-12)..... ۹۳
- شکل ۵-۲۴ (model- B-O-4/5-12)..... ۹۳
- شکل ۵-۲۵ (model- B-O-5-12)..... ۹۳
- شکل ۵-۲۶ (model- B-C-3-12)..... ۹۳
- شکل ۵-۲۷ (model- B-C-3/5-12)..... ۹۳
- شکل ۵-۲۸ (model- B-C-4-12)..... ۹۳
- شکل ۵-۲۹ (model- B-C-4/5-12)..... ۹۳
- شکل ۵-۳۰ (model- B-C-5-12)..... ۹۳
- شکل ۵-۳۱ آرایش مهاربندی با ناودانی سازه ۳ طبقه..... ۹۶
- شکل ۵-۳۲ آرایش مهاربندی با ناودانی سازه ۸ طبقه..... ۹۶
- شکل ۵-۳۳ آرایش مهاربندی با ناودانی سازه ۱۲ طبقه..... ۹۶
- شکل ۵-۳۴ نمودار همگرایی الگوریتم بهینه یابی مدل B-O-4-3..... ۹۷
- شکل ۵-۳۵ نمودار برش پایه - جابجایی مدل B-O-4-3..... ۹۷
- شکل ۵-۳۶ نمودار همگرایی الگوریتم بهینه یابی مدل B-O-4-8..... ۹۸
- شکل ۵-۳۷ نمودار برش پایه - جابجایی مدل B-O-4-8..... ۹۹
- شکل ۵-۳۸ نمودار همگرایی الگوریتم بهینه یابی مدل B-O-4-12..... ۱۰۰
- شکل ۵-۳۹ نمودار برش پایه - جابجایی مدل B-O-4-12..... ۱۰۰
- شکل ۵-۴۰ نمودار همگرایی الگوریتم بهینه یابی مدل B-C-4-3..... ۱۰۲
- شکل ۵-۴۱ نمودار برش پایه - جابجایی مدل B-C-4-3..... ۱۰۲
- شکل ۵-۴۲ نمودار همگرایی الگوریتم بهینه یابی مدل B-C-4-8..... ۱۰۳
- شکل ۵-۴۳ نمودار برش پایه - جابجایی مدل B-C-4-8..... ۱۰۴
- شکل ۵-۴۴ نمودار همگرایی الگوریتم بهینه یابی مدل B-C-4-12..... ۱۰۵
- شکل ۵-۴۵ نمودار برش پایه - جابجایی مدل B-C-4-12..... ۱۰۵
- شکل ۵-۴۶ نمودار همگرایی الگوریتم بهینه یابی سازه ۳ طبقه..... ۱۰۷
- شکل ۵-۴۷ نمودار برش پایه - جابجایی مهاربند ۳ طبقه..... ۱۰۷
- شکل ۵-۴۸ نمودار همگرایی الگوریتم بهینه یابی سازه ۸ طبقه..... ۱۰۸
- شکل ۵-۴۹ نمودار برش پایه - جابجایی مهاربند ۸ طبقه..... ۱۰۸
- شکل ۵-۵۰ نمودار همگرایی الگوریتم بهینه یابی سازه ۱۲ طبقه..... ۱۰۹
- شکل ۵-۵۱ نمودار برش پایه - جابجایی مهاربند ۱۲ طبقه..... ۱۰۹

## فهرست جدول ها

۴	جدول (۱-۱) - تغییرات میزان دریافت حالات مختلف مهاربندی [2]
۵	جدول (۲-۱) - تغییرات میزان سختی جانبی حالات مختلف مهاربندی [۲]
۱۶	جدول (۱-۲) - نمایش کروموزومها به صورت باینری
۱۷	جدول (۲-۲) - کدگذاری مقدار
۲۴	جدول (۳-۲) - نمایش شایستگی هر رشته در مثال روش مسابقه [14]
۲۵	جدول (۴-۲) - نمایش رشته‌های برنده در مثال روش مسابقه [14]
۶۸	جدول (۱-۴) - مشخصات مصالح فولادی
۶۹	جدول (۲-۴) - مشخصات کابل های مورد استفاده [20]
۷۰	جدول (۳-۴) - بارگذاری ثقیل قاب ها
۷۰	جدول (۴-۴) - مقاطع مورد استفاده
۷۷	جدول (۵-۴) - پارامتر های GA سه طبقه
۷۸	جدول (۶-۴) - پارامتر های GA هشت طبقه
۷۸	جدول (۷-۴) - پارامتر های GA دوازده طبقه
۷۹	جدول (۸-۴) - مقاطع مورد استفاده
۷۹	جدول (۹-۴) - مشخصات مصالح و بارگذاری
۸۱	جدول (۱۰-۴) - مقاطع مورد استفاده
۸۱	جدول (۱۱-۴) - مشخصات مصالح و بارگذاری
۸۴	جدول (۱۲-۴) - مشخصات مصالح و بارگذاری
۸۴	جدول (۱۳-۴) - مقاطع مورد استفاده
۸۹	جدول (۱-۵) - مدل های بهینه یابی شده
۹۰	جدول (۲-۵) - مشخصات کابل های مورد استفاده [20]
۹۴	جدول ۳-۵ - مقایسه جانمایی بهینه کابل ها
۹۵	جدول ۴-۵ - مشخصات ناودانی UNP
۹۸	جدول ۵-۵ - نتایج خروجی سازه ۳ طبقه مدل B-O-4-3
۹۹	جدول ۶-۵ - نتایج خروجی سازه ۸ طبقه مدل B-O-4-8
۱۰۱	جدول ۷-۵ - نتایج خروجی سازه ۱۲ طبقه مدل B-O-4-12
۱۰۳	جدول ۸-۵ - نتایج خروجی سازه ۳ طبقه مدل B-C-4-3
۱۰۴	جدول ۹-۵ - نتایج خروجی سازه ۸ طبقه مدل B-C-4-8
۱۰۶	جدول ۱۰-۵ - نتایج خروجی سازه ۱۲ طبقه مدل B-C-4-12
۱۱۰	جدول ۱۱-۵ - مقایسه ضریب رفتارها

جدول ۵-۱۲- محدوده نسبت تنش ها..... ۱۱۱

جدول ۵-۱۳- مقایسه شماره کابل های مورد استفاده ..... ۱۱۲

# فصل اول

## مقدمه

## ۱-۱ پیشگفتار

جهت تحمل نیروهای جانبی ناشی از زلزله از سیستم باربر جانبی استفاده می‌شود. از سیستم‌های مرسوم می‌توان به سیستم قاب خمشی تنها، بادبندهای فولادی همگرا یا واگرا و دیوار برشی فولادی یا بتنی در سازه‌های فولادی اشاره کرد.

در زمین لرزه‌های بزرگ که سبب اعمال نیروها و تغییر مکان‌های جانبی بزرگ به سازه می‌شوند استفاده از سیستم مهاربندی به عنوان یک استراتژی جهت مقاوم‌سازی جانبی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از طرفی سیستم‌های مهاربندی سختی الاستیک مناسبی را تامین می‌کنند به گونه‌ای که مانع از تغییر شکل‌های جانبی بزرگ در سازه می‌شوند و در صورت افزودن این سیستم به قاب خمشی تاثیر به سزایی در افزایش سختی کلی قاب خواهند داشت.

اما استفاده از سیستم دوگانه قاب خمشی و مهاربندهای ضربداری همگرا<sup>۱</sup> ایرادهایی از قبیل پدیده کماتش پایدار و اجرای دشوار اتصالات به خصوص در وسط تقاطع دو مهاربند را دارد.

از این رو ما برآن شدیم تا در این پژوهش به ایده استفاده از کابل ضربداری به عنوان سیستم باربر جانبی بپردازیم. هدف استفاده از این سیستم را می‌توان به عواملی همچون بهبود عملکرد سازه حین زلزله، سبک شدن سازه، زیبایی از لحاظ معماری، تحمل نیروی کششی بالا، افزایش سختی جانبی سازه، کماتش ناپذیر بودن کابل‌ها به دلیل اینکه تنها نیروی کششی را تحمل می‌کند، کاهش خطای اجرایی در حین ساخت ناشی از جوشکاری بادبندها، سرعت بالای اجرا و مقاومت کششی<sup>۲</sup> بسیار بالای کابل (که معمولاً ۶ برابر مقاطع فولادی معمولی نیز می‌رسد) در کنار مقاومت بسیار خوب آن در برابر خوردگی، سایش و خستگی اشاره کرد. بعلاوه در این پژوهش برای جلوگیری از شل شدگی کابل‌ها در هنگام اعمال بار زلزله و نیز برای بهبود رفتار لرزه‌ای قاب، بهره‌گیری

---







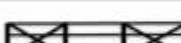

1 X-Bracing

2 Tension

بیشتر از ظرفیت کابل‌ها تحت کشش، از ایده پیش‌تنیده<sup>۱</sup> کردن کابل‌ها استفاده به عمل می‌آید. ضروری است که بدانیم پیش‌تنیدگی زیاد کابل‌ها ممکن است به دلیل افزایش نیروی محوری ستون‌ها احتمال کماتش آن‌ها را زیاد کند بخصوص در سازه‌های میان مرتبه و بلند مرتبه که نیروهای محوری به دلیل بارهای دائمی زیاد هستند لذا لازم است مقدار مطلوب پیش‌تنیدگی کابل‌ها تامین شود تا در کنار آرایش مطلوب مهاربندهای کابل<sup>۲</sup> ضربداری در قاب، به سازه جهت تحمل نیروهای جانبی کمک کرده و نیروی اضافی نیز بر سازه تحمیل نکنیم. بدین منظور برنامه‌ای نوشته شده است تا ضمن تحلیل قاب‌ها در **Opensees**، محل مناسب بادبندی ضربداری و میزان بهینه نیروی پیش‌تنیدگی تعیین گردد. جهت بهینه‌سازی از روش فرا اکتشافی الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

## ۱-۲ مروری بر تاریخچه موضوع

محمدی و همکاران تاثیر افزایش قطر کابل در اتصالات **RBS** در قاب‌های خمشی فولادی را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند افزایش قطر کابل بیشترین تاثیر را در سختی جانبی اولیه دارد ولی کمترین تاثیر را در میزان شکل‌پذیری<sup>۳</sup> داشته ضمن اینکه چرخه هیستریزس را باریک‌تر می‌کند [1].

نمونه	دهانه	موقعیت و نوع آرایش کابل	قطر کابل (mm)	نوع اتصال
Frame-01	۳		۱۶	RBS
Frame-02	۳		۱۴	RBS
Frame-03	۳		۱۶	RBS
Frame-04	۳		۱۴	RBS
Frame-05	۳		۱۶	RBS
Frame-06	۳		۱۴	RBS
Frame-07	۳		۱۶	RBS
Frame-08	3		21	RBS

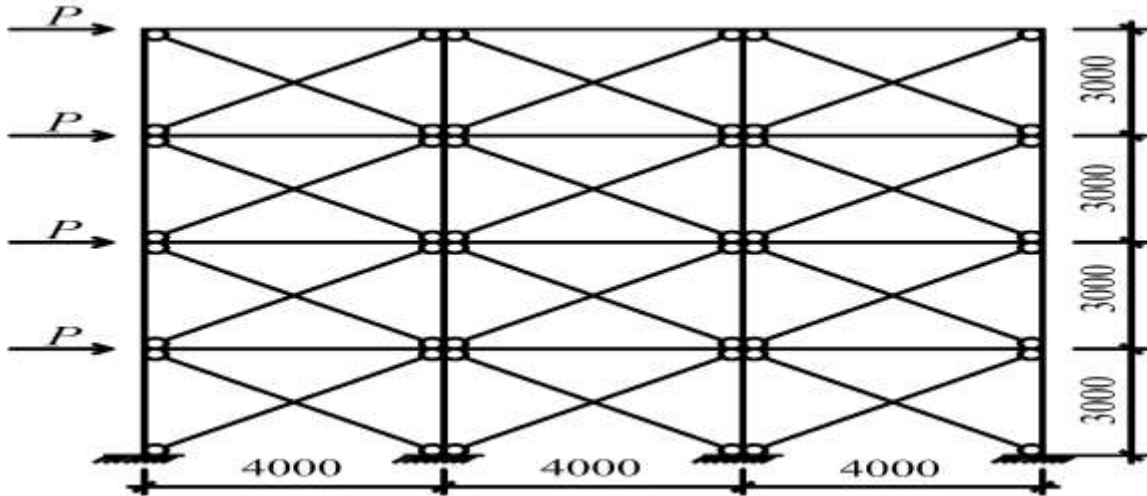
شکل (۱-۱)-آرایش بادبند گذاری پیشنهادی محمدی و همکاران [1]

<sup>1</sup> Pre stress

<sup>2</sup> Cable

<sup>3</sup> Ductility

ژانگ، ژائو و ژوپون لی یک قاب خمشی<sup>۱</sup> چهار طبقه با سه دهانه را در سه حالت بدون وجود مهاربند کابلی (4s3s-N)، با استفاده از مهاربند کابلی بدون نیروی پیش تنیدگی (4s3s-P) و همچنین استفاده از مهاربند کابلی با اعمال نیروی پیش تنیدگی (4s3s-O) را مورد بررسی قرار داده و درصد کاهش دررفت طبقات به نسبت حالات مختلف را مورد بررسی قرار دادند [2].



شکل (۲-۱)-آرایش مهاربندی ژانگ، ژائو و ژوپون لی [2]

در جداول (۱-۱) و (۲-۱) نتایج حاصل ارائه شده است:

جدول (۱-۱)-تغییرات میزان دررفت حالات مختلف مهاربندی [2]

Analysis results of story drift (mm).

Story number	1	2	3	4
4S3S-N	30.35	23.53	15.86	8.14
4S3S-P	11.33	10.51	10.44	8.22
4S3S-O	10.73	10.29	10.21	8.11
Desired story drift	12	12	12	12
4S3S-P / 4S3S-N	37.33%	44.68%	65.81%	101.04%
4S3S-O / 4S3S-P	94.71%	97.86%	97.86%	98.57%

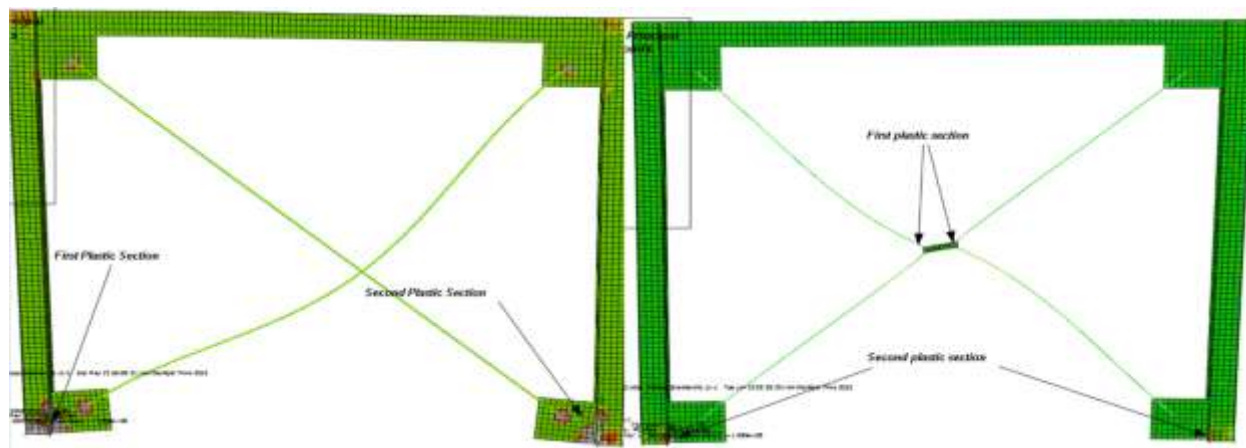
<sup>1</sup> Moment Frame

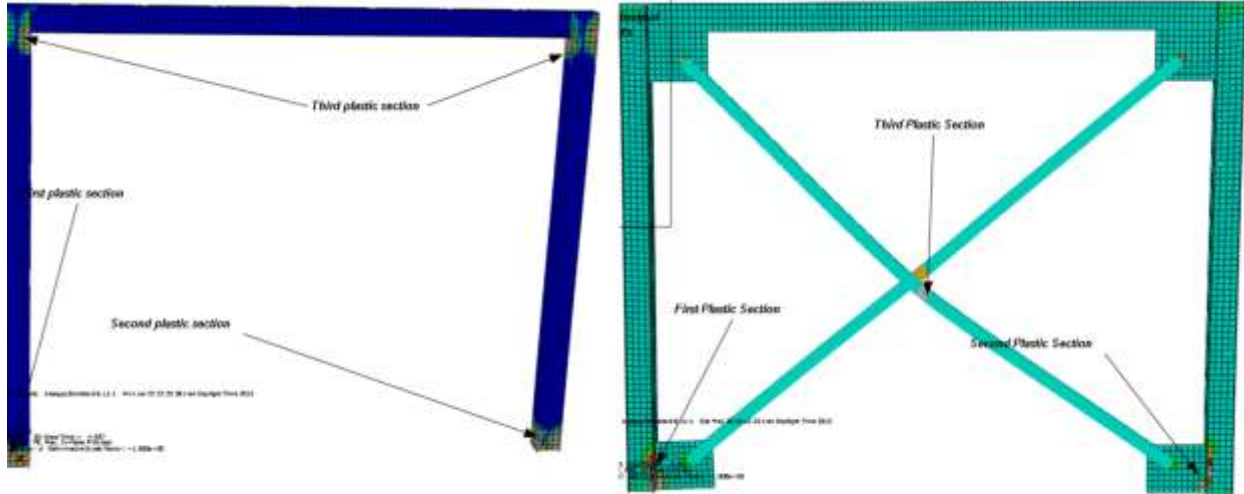
جدول (۲-۱)-تغییرات میزان سختی جانبی حالات مختلف مهاربندی [۲]

Analysis results of lateral stiffness (MPa).

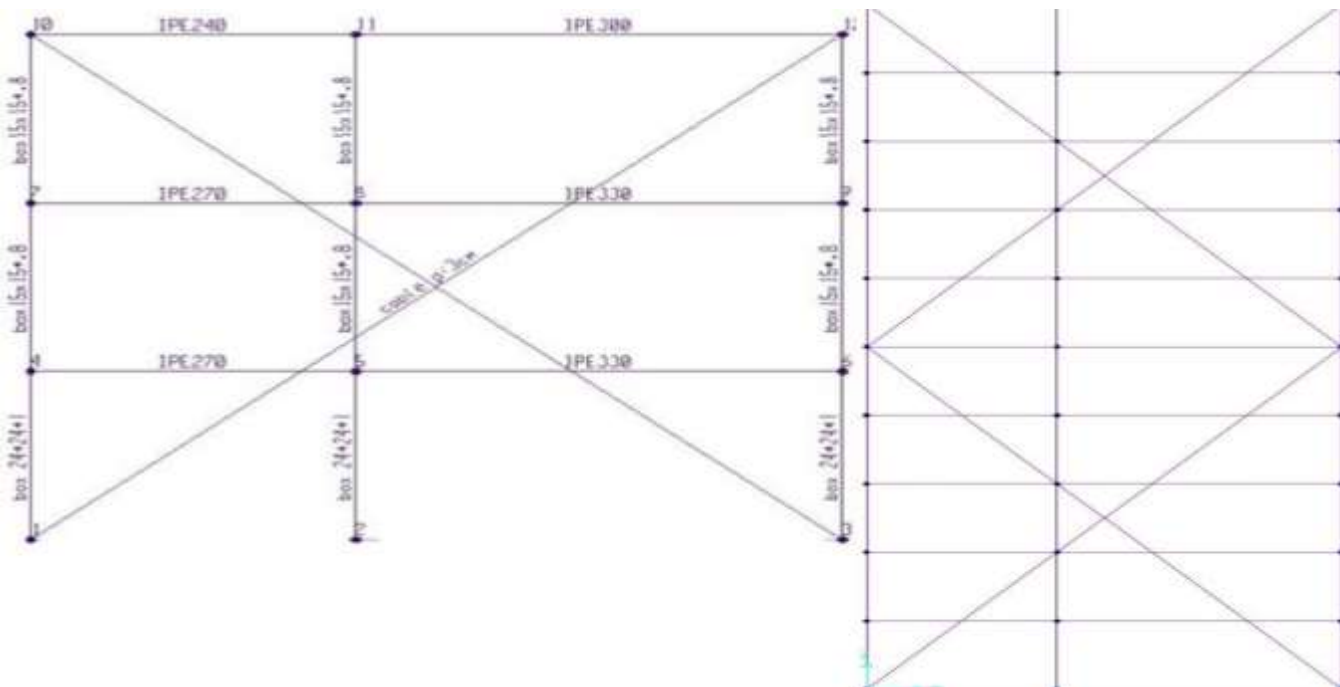
Story number	1	2	3	4
4S3S-N	15816.89	15301.47	15133.11	14744.64
4S3S-P	42374.00	34249.82	22994.34	14593.06
4S3S-O	44743.13	34999.53	23496.55	14804.27
4S3S-P /4S3S-N	267.90%	223.83%	151.95%	98.97%
4S3S-O /4S3S-P	105.59%	102.19%	102.18%	101.45%

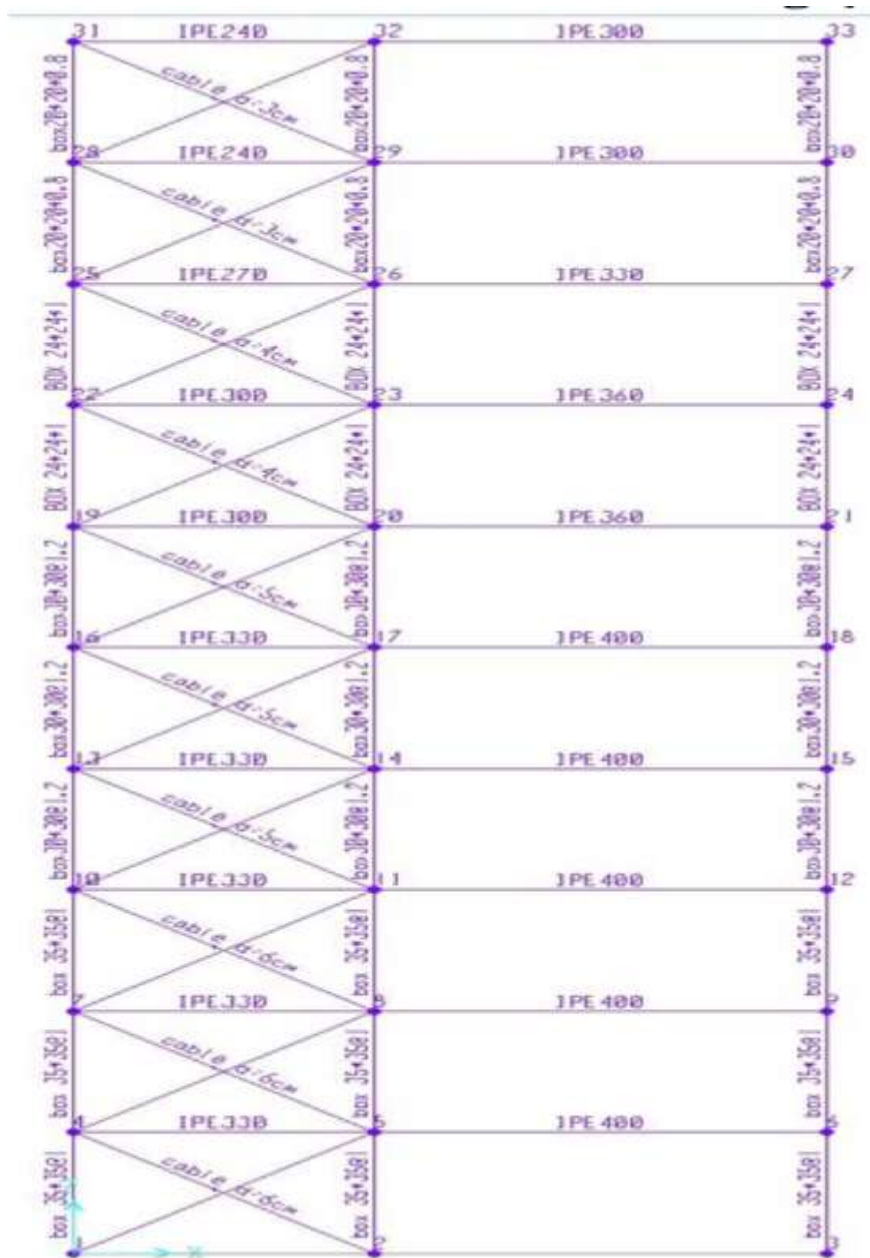
محمد نقوی به بازسازی یک قاب خمشی فولادی کابل و ناودانی پرداخت. او در آزمایش خود یک بار قاب خمشی را با ناودانی و بار دیگر با کابل ضربدری و یک بار دیگر هم با کابل ضربدری که وسط آن یک غلاف استوانه‌ای است بازسازی کرد. او در این آزمایش محل مفاصل پلاستیک را در حالات مختلف نشان داد و به این نتیجه رسید که مهاربند کابلی با غلاف استوانه‌ای علاوه بر افزایش سختی اولیه قاب به شکل پذیری آن هم نسبت به حالات دیگر کمک می‌کند [3].





شکل (۱-۳)- نقاط ایجاد مفصل پلاستیک در قاب خمشی ساده وقاب‌های مهاربندی شده با کابل و بادبند و کابل با استوانه میانی [3] بهرامی و حسینی به بررسی نحوه آرایش کابل‌ها در بهبود عملکرد قاب خمشی فولادی پرداختند. آن‌ها در تحقیق خود سازه‌های سه و ده طبقه را با آرایش‌های مختلف و قطر کابل‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که سازه‌ها با بهره‌گیری از کابل یکپارچه نسبت به کابل‌های ضربدری دارای ضریب رفتار بالاتر، حجم کابل مصرفی کمتر و شکل‌پذیری بیشتری هستند [4].





شکل (۱-۴)- شکل بادبند گذاری به صورت منفرد و یکپارچه در قاب های ۳ و ۱۰ طبقه [4]

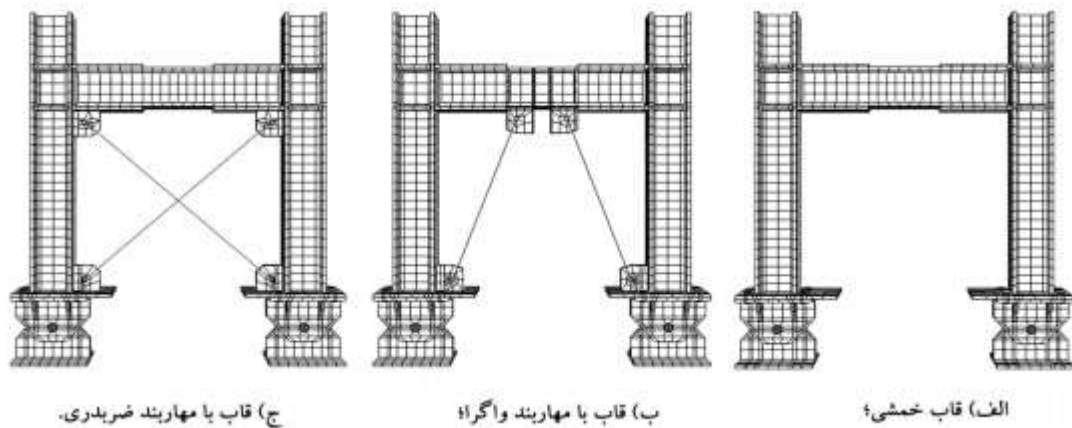
هو و تاگاوا طی پژوهشی آزمایشگاهی سعی کردند با افزودن یک استوانه فولادی<sup>۱</sup> به سیستم مهاربندی با آرایش ضربدری و عبور کابل ها از درون آن سبب شوند کابل ها به صورت همزمان در کشش<sup>۲</sup> کار کنند، آن ها جهت مقایسه

<sup>1</sup> Steel cylinder

<sup>2</sup> Tension

نتایج پژوهش خود علاوه بر قاب خمشی، قاب خمشی مهاربندی شده با کابل و آرایش ضربدري را نیز مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها نشان دادند با سیستم پیشنهادی کابل‌های عبوری از لوله فولادی استوانه‌ای، می‌توان ضمن حفظ شکل‌پذیری، ظرفیت استهلاک انرژی و مقاومت جانبی طبقات را افزایش داد. افزون بر آن، این تحقیق نشان داد که سیستم مهاربندی پیشنهادی تاثیر اندکی روی افزایش نیروی محوری ستون‌های مجاور مهاربندهای کابلی دارد [5].

حسین زاده و برقیان یک قاب خمشی فولادی را در سه حالت قاب خمشی ساده، قاب خمشی با مهاربند ضربدري و قاب خمشی با مهاربند واگرا<sup>1</sup> در نرم افزار آباکوس مدل‌سازی و مورد بررسی قرار دادند [6].



شکل (۱-۵)- قاب خمشی ساده، قاب خمشی با مهاربند واگرا و قاب خمشی با مهاربند ضربدري [6]

آن‌ان به این نتیجه رسیدند که:

در صورت استفاده از قاب خمشی با مهاربند واگرا سختی قاب بیشتر می‌شود و نیروی محوری ستون‌ها هم افزایش می‌یابد بر اساس مدل‌سازی در نرم‌افزار ABAQUS نسبت سختی قاب خمشی با مهاربند واگرا به قاب خمشی ساده برابر  $1/17$  و برای قاب خمشی با مهاربند ضربدري نسبت به قاب خمشی ساده برابر  $1/23$  است. از نظر شکل‌پذیری دریافتند که قاب خمشی با مهاربند واگرا شکل‌پذیری بیشتری نسبت به قاب خمشی با مهاربند

<sup>1</sup> Divergent moment frame

ضربداری دارد و نیروی محوری ستون‌ها در قاب خمشی واگرا نسبت به قاب خمشی ساده 10 درصد بیشتر شده و در قاب خمشی ضربداری به قاب خمشی ساده نیروی محوری ستون‌ها 33 درصد بیشتر شده است [6].

محمدیان، صبحی و لطف‌اللهی یقین بر پایه تحقیقات هو و تاگاوا با قرار دادن صفحه فولادی مثلثی و دایره‌ای در وسط بادبندهای کابلی (به جای لوله فولادی استوانه‌ای)، تحت بارگذاری هیستریزیس و پوش‌آور عملکرد لرزه‌ای از جمله شکل‌پذیری و امکان استهلاک انرژی قاب فولادی را مورد بررسی قرار دادند [7].

### ۱-۳ روش تحقیق

در این تحقیق بر اساس فرایند بی‌بعدسازی، سازه‌هایی با دهانه مختلف ۳، 3/5، ۴، 4/5 و ۵ متر مورد بررسی قرار گرفته است. بعلاوه سازه‌هایی با تعداد طبقات سه، هشت و دوازده طبقه که می‌توانند به عنوان سازه‌های کوتاه مرتبه، میان مرتبه و بلند مرتبه محسوب شوند، مورد مطالعه قرار گرفته اند. در این پژوهش ابتدا سازه‌ها توسط نرم افزار Opensees تحلیل و سپس توسط ارتباط دادن این برنامه به نرم‌افزار Matlab و استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری ژنتیک<sup>۱</sup> مدل‌ها بهینه‌یابی شده است تا بدین ترتیب نیروی پیش‌تنیدگی بهینه کابل‌ها، قطر و نوع کابل (کابل‌های ۹، ۱۱ و ۱۳ رشته‌ای) و همچنین آرایش بهینه آن جهت مهاربندی به دست آورده شود.

### ۱-۴ فرضیات تحقیق

- مهاربند به صورت مهاربند همگرای ضربداری در نظر گرفته شده است.
- بارگذاری به صورت یک‌طرفه در نظر گرفته شده است.
- ساختمان با پلان و مهاربندی منظم در نظر گرفته شده است.
- تحلیل انجام شده استاتیکی غیرخطی می‌باشد.
- تحلیل غیرخطی قاب‌ها به صورت دویعدی انجام شده است.
- پاسخ سازه با در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مصالح و رفتار غیرخطی هندسی تحت اثر زلزله مشخص تعیین می‌شود.

---

<sup>1</sup> Genetic Algorithm

از اتساع الاستیک کابل تحت بارگذاری صرف نظر می‌شود.

## ۱-۵ نوآوری تحقیق

- مدل سازی و تحلیل مدل ها توسط نرم افزار Opensees و بهینه یابی آن ها توسط نرم افزار Matlab
- استفاده همزمان از دو نرم افزار در روند پایان نامه
- بی بعد سازی پلان ها
- استفاده از کابل های پیش تنیده به جای مهاربند های مرسوم
- استفاده از الگوریتم فراابتکاری ( الگوریتم ژنتیک ) در روند پایان نامه
- مهاربند گذاری در دهانه های دلخواه

## ۱-۶ ساماندهی پژوهش

این پایان نامه در شش فصل تدوین شده است. فصل اول به مروری بر تحقیقات پیشین و روش انجام پایان نامه اختصاص یافته است. در فصل دوم به معرفی کلی الگوریتم ژنتیک و توابع مورد استفاده در آن پرداخته شده است. در فصل سوم به معرفی کابل ها، پیش تنیده کردن آن ها، و مزایای کابل ها پرداخته شده است. در فصل چهارم به روش تحلیلی مورد استفاده در این پایان نامه، نحوه مدل سازی مدل ها در نرم افزار اپنسیس، تعریف مقاطع و بارگذاری مورد استفاده، شرح روند بهینه یابی با الگوریتم ژنتیک و نحوه ارتباط دادن این نرم افزار ها با هم پرداخته شده است، در فصل پنجم نتایج خروجی کار اعم از آرایش بهینه، نیروی های پیش تنیدگی و قطر کابل ها در مدل های مورد بررسی و همچنین ضریب رفتار ها شرح داده شده است و در فصل ششم به نتیجه گیری از این تحقیق و پیشنهادات اشاره شده است.

## فصل دوم

# معرفی الگوریتم ژنتیک

## ۱-۲ پیشگفتار

الگوریتم ژنتیک یا به اختصار GA، یک روش جستجوی مؤثر در فضاهای طراحی بسیار وسیع و بزرگ است که در نهایت منجر به جهت‌گیری به سمت یافتن یک جواب بهینه می‌گردد. الگوریتم‌های ژنتیک را می‌توان یک روش جستجوی کلی نامید، که از قوانین تکامل بیولوژیکی طبیعی تقلید می‌کند. الگوریتم‌های ژنتیک تفاوت‌های زیادی با روش‌های بهینه‌سازی قدیمی دارند. در این الگوریتم‌ها باید فضای طراحی به فضای ژنتیک تبدیل شود؛ لذا می‌بایست متغیرهای طراحی به صورت کد مطرح گردند، تا بیانگر طرح مورد نظر در فضای طراحی و فضای ژنتیک باشند. تفاوت اصلی الگوریتم ژنتیک با روش‌های قدیمی در آن است که GA در یک لحظه خاص با مجموعه‌ای از نقاط کار می‌کند، در حالی که روش‌های قدیمی بهینه‌سازی تنها برای یک نقطه خاص عمل می‌نمایند. به عبارت دیگر، GA در هر تکرار و نسل مجموعه‌ای از طرح‌های ممکن را مورد پردازش قرار می‌دهد. در نگاه اول ممکن است به نظر برسد که این پردازش، یک جستجوی تصادفی است. در حالی که با نگاهی عمیق می‌توان مشاهده نمود که GA، یک جستجوی تصادفی هدایت شده در راستای طرح بهینه است.

## ۲-۲ تاریخچه الگوریتم‌های ژنتیک

نظر اصلی الگوریتم‌های تکاملی در سال ۱۹۶۰ توسط ریچنبرگ<sup>۱</sup> مطرح شد، که تحقیق وی در مورد استراتژی‌های تکاملی<sup>۲</sup> بود. بعدها نظریه وی توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفت تا منجر به طرح الگوریتم ژنتیک شد. الگوریتم‌های ژنتیک در حقیقت، روش جستجوی کامپیوتری بر پایه الگوریتم‌های بهینه‌سازی و بر اساس ساختار ژن‌ها<sup>۳</sup> و کروموزوم‌ها<sup>۴</sup> است که توسط جان هولند<sup>۵</sup> در سال ۱۹۷۵ در دانشگاه میشیگان مطرح شد [8] و پس از وی توسط جمعی از دانشجویانش مثل گلدبرگ<sup>۶</sup> و آنز آرپور<sup>۷</sup> توسعه یافت [9]. در سال ۱۹۹۲ جان کوزا<sup>۸</sup> از

---

1. Rechenberg

2. Evolutionary Strategies

3. Gene

4. Chromosome

5. John Holland

6. Goldberg

7. Ann Arbor

8. John Koza

الگوریتم ژنتیک برای حل و بهینه‌سازی مسائل مهندسی پیشرفته استفاده کرد و توانست برای اولین بار روند الگوریتم ژنتیک را به زبان کامپیوتر درآورد و برای آن یک زبان برنامه‌نویس ابداع کند که به این روش برنامه‌نویسی، برنامه‌نویسی ژنتیک<sup>۱</sup> می‌گویند. نرم‌افزاری که توسط وی ابداع گردید به نرم‌افزار LISP مشهور است که هم‌اکنون نیز کاربرد فراوانی در حل و بهینه‌سازی مسائل مهندسی دارد [10]. از آن پس تا به امروز کتاب‌های متعددی توسط افرادی چون گلدبرگ، دب<sup>۲</sup> [11] و جنکینز<sup>۳</sup> [12] به رشته تحریر در آمده است و پس از آن بسیاری از محققین مقالات متنوعی درباره، بسط دامنه کاربرد GA، بهبود نتایج و افزایش سرعت محاسبات، ارائه نموده‌اند. این الگوریتم امروزه به دلیل کاربرد فراوان، از جایگاه ویژه‌ای در میان روش‌های بهینه‌سازی برخوردار است.

## ۲-۳ بهینه‌یابی با الگوریتم‌های ژنتیک

الگوریتم ژنتیک با الهام از نظریه د/روین<sup>۴</sup> درباره بقای بهترین‌ها شکل گرفته است که بر اساس آن بهترین‌ها شانس بقای بیشتری دارند، بنابراین می‌توان گفت [8]:

« GA بر اساس اصل " ادامه حیات بهترین‌ها " و " تکثیر نوع برتر " پی‌ریزی شده است.»

این روش هوشمند به‌طور موفقیت‌آمیزی طرح بهینه عمومی<sup>۵</sup> را بدون در نظر گرفتن فرضیات محدود کننده‌ای از قبیل پیوسته بودن فضای جستجو و یا وجود مشتقات پیدا می‌کند. فرآیند GA بر روی متغیرهای طراحی رمز شده که رشته‌ای از کاراکترها با طول محدود هستند، انجام می‌گیرد. مزیت کار با متغیرهای کد شده در این است که اصولاً کدها قابلیت تبدیل فضای پیوسته به فضای گسسته را دارند.

الگوریتم GA در ابتدا با مجموعه‌ای از جواب‌های تصادفی (کروموزوم‌ها) که به آن جمعیت<sup>۶</sup> گفته می‌شود، آغاز می‌گردد. از این جواب‌ها برای ساخت جمعیت بعدی استفاده می‌شود، به این امید که جمعیت‌های جدید بهتر از جمعیت‌های قدیم باشند. زیرا روش‌هایی که برای انتخاب جمعیت جدید استفاده شده با توجه به مناسب بودن

---

1 . Genetic Programming (GP)

2 . Deb

3 . Jenkins

4 . Darwin

5 . Global Optimum

6 . Population

آن‌ها صورت گرفته است. پس بهترین‌ها شانس بیشتری برای تولید مثل و ادامه حیات خواهند داشت. این فرآیند آن‌قدر تکرار می‌شود تا بر اساس معیار همگرایی طرح نزدیک به بهینه حاصل شود.

در بهینه‌یابی از طریق GA چهار مرحله اساسی انجام می‌پذیرد:

۱. تولید تصادفی مجموعه‌ای از طرح‌ها، که بدان جمعیت اولیه گفته می‌شود. هر عضو این جمعیت یک کروموزوم می‌باشد که به صورت کد<sup>۱</sup> بوده و رشته<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. هر رشته متناسب با تعداد متغیرهای طراحی، به چندین زیررشته<sup>۳</sup> تقسیم می‌شود. زیررشته مجموعه‌ای از بیت‌ها<sup>۴</sup> می‌باشد که به صورت زنجیر در کنار هم چیده شده‌اند. هر بیت هم‌ارز با یک ژن در الفبای ژنتیک می‌باشد. تعداد بیت‌های هر زیررشته به نحوی تعیین می‌شوند تا بتوان کلیه اطلاعات متغیر طراحی را مابین حدود بالا و پایین در مرحله رمزگشایی به دست آورد.

۲. با رمزگشایی، مقدار متغیرهای طراحی در هر زیررشته ارزیابی و مقادیر تابع هدف تعیین می‌گردد.

۳. مسئله بهینه‌یابی مقید با تعریف تابع پناستی<sup>۵</sup> و ترکیب آن با تابع هدف و ایجاد تابع هدف اصلاح شده<sup>۶</sup>، به یک مسئله بهینه‌یابی نامقید تبدیل می‌شود. در ادامه با تعریف تابع شایستگی، به هر کروموزوم، یک مقدار شایستگی اختصاص داده می‌شود. سپس با الهام از قوانین تکامل طبیعی و روش‌هایی که در ادامه ارائه می‌شود، بهترین کروموزوم‌ها بر مبنای میزان شایستگی انتخاب می‌شوند.

۴. در این مرحله، جمعیت جدید بر مبنای عملگرهای GA که در ادامه به شرح تفصیلی آن پرداخته شده است، تشکیل می‌شود. پس از آن جمعیت فرزندان<sup>۷</sup> برای نسل<sup>۸</sup> بعد به کار گرفته می‌شود. این مراحل تا ارضای شرط خاتمه و یا به تعداد نسل‌های پیش‌بینی شده برای کسب بهینه عمومی تکرار می‌شود.

---

1. Code

2. String

3. Substring

4. Bite

5. Penalty Function

6. Modified Objective Function

7. Offspring

8. Generation

در فرآیندهای به ظاهر ساده فوق ، نکات عمیق و مهمی نهفته است که در بخش‌های بعد به طور اجمالی بحث شده است.

## ۲-۳-۱ کد کردن مقادیر

بر اساس تعریف هولند، روش‌های متعددی برای نمایش ژن‌های منفرد وجود دارد. مثلاً می‌توان آن‌ها را به صورت رشته، آرایه<sup>۱</sup>، درخت<sup>۲</sup> یا لیست<sup>۳</sup> نشان داد. اما در هر صورت، یک سیستم کدگذاری خوب باید دارای خواص زیر باشد [13]:

- ۱- تبدیل بین عناصر کد شده و کد نشده ، یک تبدیل یک به یک باشد.
  - ۲- کروموزوم‌هایی که هم‌ارز با هیچ متغیر طراحی نیستند، قابل ترمیم باشند.
  - ۳- هر نقطه در فضای طراحی قابل تبدیل به یک کروموزوم باشد.
  - ۴- خواص خوب والدین قابل انتقال به فرزندان باشد.
  - ۵- تغییر اندک در متغیرهای کد شده باعث ایجاد تغییرات کوچک در متغیرهای کد نشده گردد.
- شیوه‌های مختلفی برای کدگذاری وجود دارد ؛ که در اینجا به شرح برخی از آن‌ها پرداخته شده است.

## ۲-۳-۱-۱ کد مبنای دو (کد دودویی<sup>۴</sup>)

یک مثال : مسئله کوله پستی در این مسئله فرض می‌شود که اشیایی با مقدار و اندازه مشخص وجود دارد و قرار است که در یک کوله پستی با ظرفیت مشخص قرار داده شوند. نحوه انتخاب اشیاء با توجه به حداقل فضای که اشغال می‌کنند و استفاده بهینه از فضای کوله پستی صورت می‌گیرد.

برای حل این مسئله فرض شده است ، هر بیت بیانگر حضور یا عدم حضور اشیاء در کوله پستی باشد. روش مذکور از روش‌های متداول در حل مسائل GA به شمار می‌رود. جدول (1-2) کروموزوم‌هایی را به صورت باینری<sup>۵</sup> نشان می‌دهد:

---

<sup>1</sup> . Array  
<sup>2</sup> . Tree  
<sup>3</sup> . List  
<sup>4</sup> . Binary Code  
<sup>5</sup> . Binary

جدول (۱-۲) - نمایش کروموزوم‌ها به صورت باینری

Chromosome A	101101100011
Chromosome B	010011001100

برای حل مسائل بهینه یابی در GA باید متغیرهای مجهول به صورت یک رشته بیان شود. طول این رشته با توجه به محدوده متغیرهای طراحی و دقت مسئله مشخص می‌شود. برای مثال با رشته‌ای به طول ۴ بیت می‌توان ۱۶ عدد را نمایش داد. به طور کلی اگر یک تابع دو متغیره بایستی کد شود، با فرض طول رشته ۴ بیتی برای هر متغیر و نمایش متغیرها با  $X_1$  و  $X_2$  به صورت (0110 1011)، یک کروموزوم ۸ بیتی به شرح زیر شکل می‌گیرد:

Chromosome  $\Rightarrow$  10110110

که هر متغیر آن دارای حدود بالا و پایینی به شرح زیر می‌باشد:

$$X_i^L \leq X_i \leq X_i^U \quad (1-2)$$

$$(0000 \ 0000), (1111 \ 1111) \Leftrightarrow (X_1^L, X_2^L), (X_1^U, X_2^U) \quad (2-2)$$

در واقع 0000 و 1111 مقادیر کد شده کمینه و بیشینه می‌باشند.

پس با توجه به اینکه یک رشته  $n$  بیتی، اعداد 0 تا  $2^n - 1$  را کد می‌نماید؛ لذا مقدار عددی هر زیررشته برابر است با:

$$\sum_{k=0}^{k=n_i-1} 2^k S_k \quad (3-2)$$

که هر بیت  $S$  می‌تواند اعداد 0 و 1 را اختیار نماید و به صورت رشته زیر نمایش داده می‌شود:

$$S_{n-1} \dots S_3 S_2 S_1 S_0 \quad (4-2)$$

روش رمز کردن دودویی مرسوم‌ترین روش در GA برای نمایش رشته‌ای متغیرهای طراحی می‌باشد. ویژگی اصلی این شیوه نمایش، انطباق آن با ذات عملگرهای GA می‌باشد.

## ۲-۱-۳-۲ روش کدگذاری مقدار<sup>۱</sup>

در این روش هر کروموزوم به صورت رشته‌ای از مقادیر است که این مقادیر می‌توانند هر چیز مرتبط با مسئله باشند. مثلاً اعداد اعشاری و یا اشیاء کد شده که در جدول (۲-۲) مثالی از این روش‌ها نشان داده شده است.

جدول (۲-۲) - کدگذاری مقدار

Chromosome A	1.5642	7.486	1.3	0.768
Chromosome B	(Up)	(Down)	(Left)	
Chromosome C	abcdefghijklmnopq...			

امروزه از این شیوه نمایش در مسائل بهینه‌سازی سازه‌ها نیز استفاده می‌شود که متناسب با زوایای دید مختلف دارای معایب و محاسن گوناگونی بوده و مقالات متعددی در این باب مطرح شده است. در این شیوه دقت مورد نیاز در اعداد حفظ شده و طول کروموزوم نسبت به روش کدگذاری دودویی، کوتاه‌تر است؛ اما از سوی دیگر این شیوه نمایش نیاز به متدهای خاصی برای اعمال عملگرهای GA بر روی کروموزوم‌ها دارد. در ادامه چگونگی ارزیابی شایستگی یک متغیر طراحی کد شده (کروموزوم) مطرح می‌شود.

## ۲-۳-۲ شایستگی هر کروموزوم

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، GA، مسئله بهینه‌یابی مقید را با تعریف تابع پنالتی که وابسته به میزان نقض قیود است و ترکیب آن با تابع هدف و ایجاد تابع هدف اصلاح شده، به یک مسئله بهینه‌یابی نامقید تبدیل می‌نماید. در ادامه با کمک مقادیر تابع هدف اصلاح شده تابع شایستگی تعریف می‌گردد. سپس با توجه به تابع شایستگی، به هر کروموزوم یک مقدار شایستگی اختصاص می‌یابد. اما آنچه که در روند فوق حائز اهمیت است؛ چگونگی محاسبه تابع پنالتی و تابع هدف اصلاح شده است تا با کمک این توابع، تابع شایستگی تعریف شود. بنابراین در ادامه به بررسی توابع فوق‌الذکر پرداخته می‌شود.

<sup>۱</sup> . Value Encoding

## ۲-۳-۱-۲ تابع پنالتی

تابع پنالتی یا جریمه ، همان طور که از نامش مشخص است، مقداری است که به عنوان جریمه به تابع هدف اعمال می شود ؛ این جریمه به دلیل نقض قیود می باشد. در واقع به واسطه تعریف تصادفی متغیر یا متغیرهای طراحی قیود مسئله نقض می شود، بنابراین کروموزوم ناقض قیود جریمه می شود. طبیعی است که هر کروموزومی قیود مسئله را بیشتر نقض نماید، مقدار تابع پنالتی متناظر آن بیشتر است و بالطبع جریمه بیشتری به مقدار تابع هدف مربوط به این کروموزوم اعمال می شود.

محققین و دست اندرکاران GA ، روابط متعددی را برای تابع پنالتی و چگونگی محاسبه مقدار جریمه ارائه نموده اند که در ذیل به بررسی تعدادی از آن ها بر حسب اهمیت و کاربردشان پرداخته شده است.

۱ . راجیو و کریشنامورتی<sup>۱</sup> تابع پنالتی را به شرح زیر پیشنهاد می نمایند.

$$f_{Penalty} = F(X) * K * C \quad (۵-۲)$$

که

$$C = \sum_{q=1}^Q \max[0, g_q(X)] \quad (۶-۲)$$

در روابط فوق:

$X$ : بردار متغیر طراحی

$Q$ : تعداد کل قیود حاکم بر مسئله

$f_{Penalty}$ : تابع جریمه

$F(X)$ : تابع هدف

$g_q(X)$ : میزان نقض سازه در ارتباط با هر یک از قیود

و ثابت  $K=10$  در نظر گرفته می شود.

۲ . راجان<sup>۲</sup> تابع پنالتی را به صورت زیر تعریف می نماید.

<sup>1</sup>. S.Rajeev & C.S.Krishnamoorthy

<sup>2</sup>. S.D.Rajan

$$f_{Penalty} = r * C \quad (7-2)$$

در روابط فوق

$$r = K' * F_{\min} \quad \& \quad C = \sum_{q=1}^Q \max[0, g_q(X)] \quad (8-2)$$

می باشد.  $C$  مشابه رابطه (۶-۲) می باشد و  $K'$  عددی ثابت که با نظر طراح انتخاب می شود.  $F_{\min}$  حداقل مقدار شایستگی برای کلیه طرح های قابل قبول نسل قبلی می باشد و مقدار  $r$  در نسل اول، یک مقدار فرضی و تخمینی در نظر گرفته می شود.

۳. ارتباطات و همکاران<sup>۱</sup> یک تابع پنالیتی پویا به شرح زیر ارائه می دهند

$$f_{Penalty} = (r_0 * g_c)^2 \sum_{q=1}^Q [g_q(X) * K] \quad (9-2)$$

که در آن

$g_q(X)$ : میزان نقض سازه در ارتباط با هر یک از قیود

$g_c$ : شماره نسل و ثابت  $K=10$  و  $r_0=0.5$  پیشنهاد شده است.

۴. کلات جاری تابع پنالیتی پویای زیر را پیشنهاد می نماید:

$$f_{Penalty} = F(X) * K * C \quad (10-2)$$

در رابطه فوق

$$C_g = \sum_{j=1}^{nlc} \sum_{q=1}^Q \max[0, g_q(X)] \quad (11-2)$$

$$K = K_j + \ln(j') \quad (12-2)$$

$$j = 1, \dots, nk \quad j' = 1, \dots, ng$$

می باشد. که در آن

$C_g$ : مجموع کل نقض های صورت گرفته توسط سازه با کروموزوم مربوطه

<sup>1</sup>. Erbatur et al

$g_q(X)$ : مشخصه میزان نقض برای هر کروموزوم

$nlc$ : کل تعداد وضعیت‌های بارگذاری

$Q$ : تعداد کل قیود حاکم بر مسئله

$K_j$ : مقدار ثابت وابسته به حلقه تکرار  $j$  ام (به تعداد کل  $nk$ )

$j'$ : شمارنده حلقه تکرار مربوط به هر نسل به تعداد کل  $ng$

$K$ : ثابت تابع پنالتی پویا

هر یک از روابط پیشنهادی برای تابع پنالتی به نحوی مقدار جریمه را متناسب با میزان نقض قیود محاسبه می‌نماید که این مطلب وجه اشتراک تمامی روابط فوق می‌باشد.

در گام بعدی برای رسیدن به مقدار شایستگی هر کروموزوم می‌بایست تابع هدف اصلاح شده و در پی آن تابع شایستگی محاسبه شود؛ هر کدام از این توابع نیز بر اساس دیدگاه‌های مختلف به طرق گوناگون مطرح شده است که در ذیل به شرح اهم این دیدگاه‌ها برحسب کاربردشان پرداخته شده است.

## ۲-۲-۳-۲ تابع شایستگی<sup>۱</sup>

تابع شایستگی معمولاً بر اساس تابع هدف اصلاح شده تعریف می‌شود و بایستی مقدار آن مثبت باشد. تابع هدف اصلاح شده نیز عموماً براساس مقادیر تابع جریمه و تابع هدف تنظیم می‌شود. محققین GA روابط متنوع و گوناگونی را برای تابع هدف اصلاح شده و تابع شایستگی ارائه داده‌اند که برخی از آن‌ها عبارتند از:

۱- گلد برگ در کتاب خود، تابع هدف اصلاح شده را مطابق رابطه (۲-۱۳) محاسبه می‌نماید؛ اما برای تابع شایستگی پیشنهاد می‌کند که تابع هدف اصلاح شده هر کروموزوم از یک مقدار بزرگ کم شود تا مقدار شایستگی هر کروموزوم به صورت مثبت محاسبه گردد. وی این مقدار ثابت بزرگ را به عهده طراح می‌گذارد.

$$\phi(X) = F(X) + f_{Penalty} \quad (2-13)$$

۲- راجیو و کریشنا مورتی، تابع هدف اصلاح شده و تابع شایستگی را به شرح زیر پیشنهاد می‌نمایند

---

<sup>۱</sup> . Fitness Function

$$\phi(X) = F(X) + f_{Penalty} \quad (۱۴-۲)$$

$$R(X) = [\phi_{\max}(X) + \phi_{\min}(X)] - \phi(X) \quad (۱۵-۲)$$

در روابط فوق

$\phi(X)$ : تابع هدف اصلاح شده

$R(X)$ : تابع شایستگی

$f_{Penalty}$ : تابع جریمه

$F(X)$ : تابع هدف

$\phi_{\max}(X)$ : حداکثر مقادیر تابع هدف اصلاح شده در جمعیت حاضر

$\phi_{\min}(X)$

:حداقل مقادیر تابع هدف اصلاح شده در جمعیت حاضر

در هر صورت مطلب زیر در تمامی روابط و نظریات مربوط به تابع شایستگی حاکم است:

۱- در مسئله کمینه‌سازی، کروموزومی با کمترین مقدار تابع هدف اصلاح شده، بیشترین مقدار

شایستگی را به خود اختصاص می‌دهد؛ لذا شانس بیشتری برای حضور در جمعیت بعدی دارد.

۲- مقادیر تابع شایستگی، همواره مقداری مثبت است.

در نهایت امر تابع شایستگی به ازای هر کروموزوم محاسبه و میزان شایستگی هر کروموزوم به دست می‌آید. حال

زمان آن فرا رسیده است، تا با کمک مقادیر تابع شایستگی بهترین‌ها برای نسل بعد برگزیده شوند. این مهم در

فرآیند کلی به نام انتخاب به شرح زیر تبلور می‌یابد.

### ۲-۳-۳ انتخاب<sup>۱</sup>

در فرآیند انتخاب کروموزوم‌های شایسته از میان جمعیت به عنوان والد انتخاب و سپس براساس فرآیند پیوند،

کروموزوم‌های جدید به نام فرزندان تولید می‌شوند.

روش‌های متنوعی در GA برای انتخاب کروموزوم‌های شایسته وجود دارد، اما هدف اصلی در همه آن‌ها انتخاب

کروموزوم‌هایی (طرح‌هایی) با میزان شایستگی بالا از جمعیت جاری و تکثیر آن‌ها، طی قرارگیری در مکانی به

<sup>۱</sup>. Selection(Reproduction)

نام استخر تولید مثل<sup>۱</sup> است. کروموزوم‌های با مقدار شایستگی بالاتر، از شانس بیشتری برای حضور در استخر تولید مثل برخوردار خواهند بود. عکس این مطلب نیز صادق است، یعنی کروموزوم‌هایی با مقدار شایستگی کمتر، احتمال کمتری برای انتقال در استخر تولید مثل خواهند داشت. نحوه انتخاب در روش‌های مختلف، متفاوت است؛ اما معیار تمامی روش‌های انتخاب، میزان شایستگی برای هر کروموزوم می‌باشد. یعنی هر کروموزومی که شایستگی بیشتری دارد، بالطبع شانس بیشتری برای حضور در استخر تولید مثل پیدا می‌کند.

## ۲-۳-۱ روش‌های انتخاب

مهم‌ترین و رایج‌ترین روش‌هایی که برای انتخاب کروموزوم‌ها و قرار دادن آن‌ها در استخر تولید مثل وجود دارد عبارتند از:

۱. روش چرخ گردان<sup>۲</sup>
۲. روش رتبه‌بندی<sup>۳</sup>
۳. روش حالت پایدار<sup>۴</sup>
۴. روش مسابقه<sup>۵</sup>
۵. روش میانگین
۶. مفهوم برگزیده<sup>۶</sup> (شایسته سالاری)

## ۲-۳-۱-الف روش چرخ گردان

یکی از روش‌های متداول در فرآیند انتخاب، روش چرخ گردان است. در این روش رشته  $i$ ام با یک احتمال  $P_i$  (که از مقدار تابع شایستگی آن سرچشمه می‌گیرد) انتخاب می‌شود طبعاً حاصل جمع این احتمال‌ها برای کل اعضای جمعیت بایستی برابر یک شود. احتمال هر رشته (کروموزوم)  $i$ ام برابر است با [8]:

---

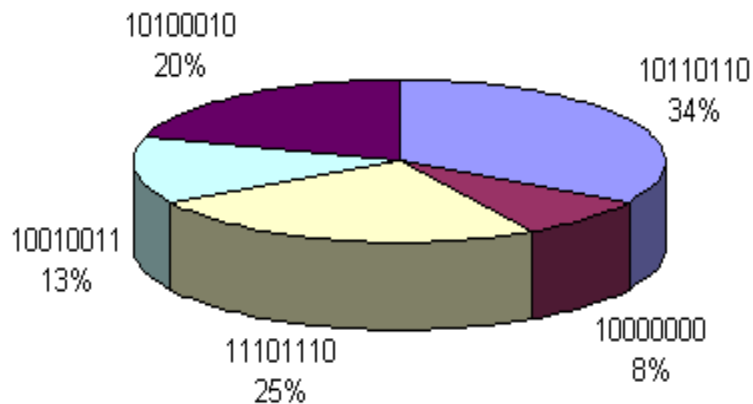
1 . Mating Pool  
 2 . Roulette Wheel  
 3 . Rank  
 4 . Steady State  
 5 . Tournament  
 6 . Elitism

$$P_i = \frac{F_i}{\sum_{j=1}^n F_j} \quad (16-2)$$

که  $n$  تعداد اعضای جمعیت و  $F$  مقدار تابع شایستگی هر رشته است.

حال اگر درصد احتمال این مقادیر به صورت یک چرخ گردان نشان داده شود. مقادیر  $P_i$  ها، قطاع‌های چرخ گردان را تشکیل می‌دهد. با تولید یک عدد تصادفی بین صفر و یک، کروموزومی با قطاع بزرگ‌تر یا شایستگی بیشتر، شانس بیشتری برای حضور در جمعیت بعد می‌یابد. به این ترتیب انتظار می‌رود که مکانیزم چرخ گردان به تعداد  $F_i/\bar{F}$  کپی از رشته  $i$  ام را تولید نماید. مقدار میانگین شایستگی‌های یک جمعیت از رابطه (17-2) تعیین می‌شود.

$$\bar{F} = \sum_{i=1}^n F_j / n \quad (17-2)$$



شکل (1-2) - مدلی از چرخ گردان [8]

برای اجرای این روش، می‌بایست در ابتدا مجموع مقادیر تابع شایستگی برای رشته‌های جمعیت مورد نظر را بدست آورد. آنگاه براساس رابطه (18-2) مقدار  $P_i$  برای هر کروموزوم محاسبه می‌شود. در ادامه مقدار  $\bar{P}_j$  بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{P}_j = \sum_{i=1}^m P_i \quad j = 1, \dots, n \quad (18-2)$$

که در آن  $n$  تعداد اعضای جمعیت و  $m$  شماره جمعیت یا کروموزوم موردنظر در جمعیت حاضر است. حال به تعداد اعضای جمعیت، اعداد تصادفی یکنواخت در محدوده صفر و یک تولید می‌شود. اگر عدد تصادفی تولید شده کوچک‌تر یا مساوی با  $\bar{P}_j$  نظیر کروموزوم  $j$  ام باشد؛ آن کروموزوم برای تکثیر انتخاب می‌شود و در استخر تولید مثل قرار می‌گیرد.

## ۲-۳-۱-۳-ب روش رقابتی

در روش چرخ گردان الگوریتم گاهی با مشکلاتی از قبیل کندی و همگرایی ناگهانی به خاطر کوچک شدن سریع فضای جستجو مواجه می‌شود. برای گریز از این معایب، معمولاً از روش دیگری به نام روش رقابتی استفاده می‌شود. این روش نخستین بار توسط گلدبرگ و دب در سال ۱۹۹۱ ارائه شده است [14].

در روش رقابتی که شبیه رقابت در طبیعت است، یک زیر مجموعه کوچک از کروموزوم‌ها به صورت تصادفی انتخاب شده و به رقابت می‌پردازند. معیار رقابت، میزان شایستگی هر کروموزوم است. سرانجام در این رقابت یکی از کروموزوم‌ها به پیروزی رسیده و به عنوان والد جدید انتخاب می‌شود. این فرآیند تا انتخاب همه‌ی والدها در جمعیت جدید، تکرار می‌شود. به عبارت دیگر، عملیات فوق به تعداد اعضای جمعیت تکرار می‌شود. به عنوان مثال جمعیتی با شایستگی‌های جدول (۲-۳) را در نظر بگیرید [14].

جدول (۲-۳) - نمایش شایستگی هر رشته در مثال روش مسابقه [14]

	1	2	3	4	5	6	7	8
Fitness	1	2.10	3.11	4.01	4.66	1.91	1.93	4.55

در ابتدا موارد ۲ و ۴ به صورت تصادفی برای رقابت انتخاب می‌شوند که در این مرحله مورد ۴ برنده می‌شود (به خاطر شایستگی بیشتر) و رشته آن (کروموزوم مربوطه) از جمعیت اولیه انتخاب و در استخر تولید مثل<sup>۱</sup> کپی می‌شود.

<sup>1</sup> Mating Pool

جدول (۲-۴) - نمایش رشته‌های برنده در مثال روش مسابقه [14]

موارد	(2, 4)	(3, 8)	(1, 3)	(4, 5)	(1, 6)	(1, 2)	(4, 2)	(8, 3)
برنده	4	8	3	5	6	2	4	8

این روند تا انتخاب تمامی کروموزوم‌ها ادامه می‌یابد. در نهایت همان طور که در جدول مشاهده می‌شود کروموزوم‌های ۲ و ۳ و ۵ و ۶ هر کدام یک کپی و مقادیر ۴ و ۸ دو کپی دارند و مقادیر ۱ و ۷ نیز حذف شده‌اند. این روش در جمعیت‌های بسیار بزرگ به عنوان بهترین روش شناخته می‌شود. مقدار کروموزوم منتخب برای رقابت به تعداد اعضای جمعیت بستگی دارد و تحت عنوان سائز رقابت<sup>۱</sup> به عهده کاربر گذاشته می‌شود. اما عموماً دو یا سه کروموزوم برای رقابت انتخاب می‌شوند یانگ و همکارانش<sup>۲</sup> نخستین افرادی بودند که روش رقابتی را در مهندسی عمران جهت بهینه‌سازی سازه‌ها بکار گرفتند [14].

### ۲-۳-۴ عملگرهای GA

در بخش پیشین چگونگی انتخاب کروموزوم‌ها مورد بررسی قرار گرفت. به نحوی که کروموزوم‌های منتخب به عنوان والد برگزیده می‌شوند. در این قسمت به بررسی روش‌های مختلف برای تولید فرزندان<sup>۳</sup> پرداخته می‌شود. عملگرهای وراثتی<sup>۴</sup> متعددی برای تولید رشته‌های بهتر وجود دارد که هدف این عملگرها جستجوی فضای طراحی و تا حد امکان حفظ اطلاعات نهفته در رشته‌ها است. چرا که این والدها بهترین موارد انتخاب شده توسط عملگرهای فاز انتخاب هستند و نباید از دست بروند. از مهم‌ترین عملگرهای GA می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. عمل جفت‌گیری یا ادغام

۲. عمل معکوس کردن<sup>۵</sup>

۳. عمل حذف و کپی کردن<sup>۶</sup>

1 . Size Tournament

2 . Yang, J. et al

3 . Offspring

4 . Inheritance Operator

5 . Inversion

6 . Deletion And Duplication

۴. عمل حذف و تولید مجدد<sup>۱</sup>
۵. عمل جداسازی<sup>۲</sup>
۶. عمل نقل مکان<sup>۳</sup>
۷. عمل بخش‌بندی<sup>۴</sup>
۸. عمل غالب شدن یا تسلط<sup>۵</sup>
۹. عمل ادغام و معکوس سازی<sup>۶</sup>
۱۰. روش تکثیر میانی
۱۱. عملگرهای بیتی<sup>۷</sup>
۱۲. عملگر جهش<sup>۸</sup>

که معمولاً در یک الگوریتم ژنتیک ساده<sup>۹</sup> تنها از دو عملگر اصلی زیر پس از فرآیند انتخاب استفاده می‌شود:

۱. ادغام
۲. جهش

## ۲-۳-۴-۱ عملگر ادغام

در مرحله انتخاب جمعیتی از بهترین کروموزوم‌ها شکل می‌گیرد. در فرآیند ادغام، هدف تولید رشته‌های بهتر و جدید (تولید فرزندان) می‌باشد. فرآیند ادغام، با هدف تعویض ویژگی طرح‌ها در میان اعضای جمعیت، به قصد بهبود شایستگی نسل بعد انجام می‌شود. این مشابه با انتقال صفات ژنتیکی در فرآیندهای زایش موجودات زنده است که توسط DNA و RNA صورت می‌پذیرد. پیوند سبب جستجوی بیشتر در فضای طراحی می‌گردد.

عملگر ادغام یک عملگر ترکیبی است که شامل سه مرحله است. در مرحله اول یک جفت رشته به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. در مرحله دوم یک زیررشته، از کروموزوم‌ها به طور تصادفی در طول رشته انتخاب

---

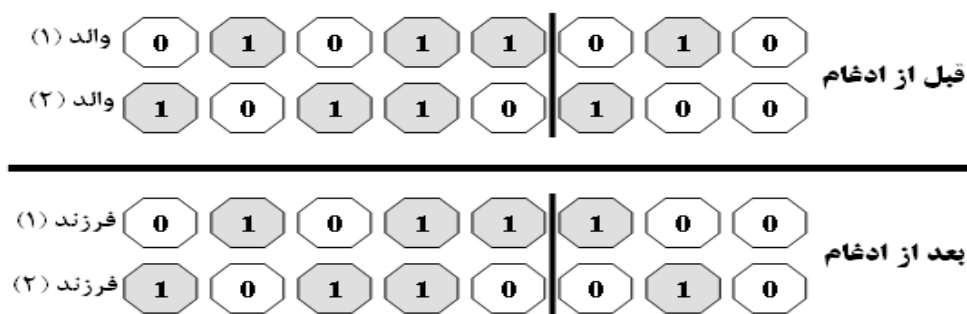
- 1 . Deletion And Regeneration
- 2 . Segregation
- 3 . Migration
- 4 . Sharing
- 5 . Dominance
- 6 . Cross Over And Inversion
- 7 . Bite-Wise Operator
- 8 . Mutation
- 9 . Simple Genetic Algorithm

خواهد شد. بایستی توجه داشت که طول زیررشته در هردو کروموزوم، ثابت باشد. سرانجام در سومین مرحله زیررشته منتخب در دو رشته والد جابه‌جا می‌شود.

روش‌های مختلف و متنوعی برای عمل ادغام وجود دارد. بر اساس نظریه دب<sup>۱</sup> نمی‌توان گفت که کدامیک از روش‌های ادغام بهتر است [14]. در هر حال مشهورترین روش‌های ادغام به شرح زیر خلاصه می‌شوند:

## ۲-۳-۴-۱-الف روش ادغام تک نقطه‌ای یا مکانی<sup>۲</sup>

در روش ادغام تک نقطه‌ای، یک مکان به‌طور تصادفی در طول رشته‌ها انتخاب می‌شود و بیت‌های بعد از این مکان جابجا می‌شوند. شکل (۲-۲) نمونه‌ای از روش ادغام تک نقطه‌ای را نشان می‌دهد. در این شکل کلیه بیت‌ها پس از خط ادغام (سه بیت) بین دو رشته جابجا شده و فرزندان تولید می‌شوند.



شکل (۲-۲) - روش ادغام تک نقطه‌ای [14]

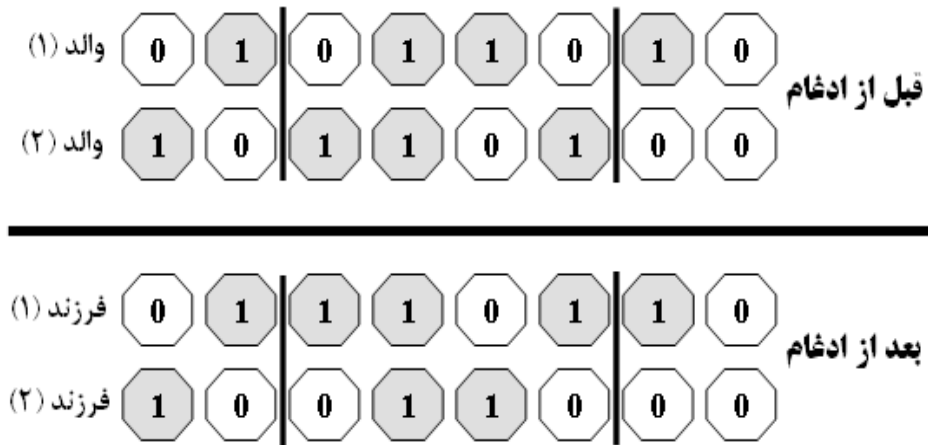
از آنجایی که مکان جابجایی به صورت تصادفی انتخاب شده است لذا از مناسب بودن این مکان اطلاعی در دست نیست. اگر این نقطه مکان مناسبی باشد منجر به تولید فرزندان مناسبی می‌شود در غیر این صورت باعث از بین رفتن کیفیت رشته‌های والد و حذف آن‌ها در نسل بعدی می‌گردد.

<sup>۱</sup> . Deb

<sup>۲</sup> . Single-Sight Cross Over

## ۲-۳-۴-۱-ب روش ادغام دو نقطه‌ای<sup>۱</sup>

روش ادغام دو نقطه‌ای توسط اشلمن وهمکارانش<sup>۲</sup> در سال ۱۹۸۹ ارائه شد عملگر پیوند دو نقطه‌ای ، تقریباً مشابه روش ادغام تک نقطه‌ای است. با این تفاوت که در این روش دو مکان را به صورت تصادفی در طول رشته‌ها انتخاب کرده و اطلاعات بین این دو نقطه جابجا می‌شود. در شکل (۲-۳) روش ادغام دو نقطه‌ای نشان داده شده است.



شکل (۲-۳) - روش ادغام دو نقطه‌ای [14]

## ۲-۳-۴-۱-ج روش ادغام یکنواخت<sup>۳</sup>

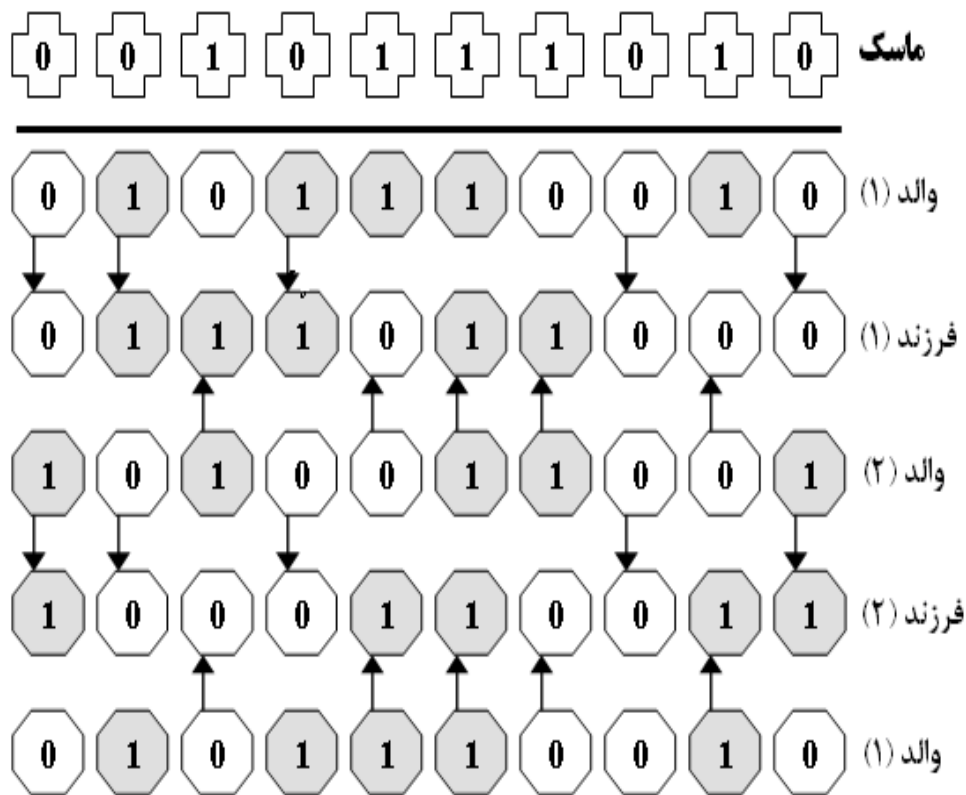
این روش حالت پیشرفته ادغام چند نقطه‌ای است. در این روش هر بیت بر اساس یک احتمال پنجاه درصدی از والد‌هایش انتخاب شده و جابجا می‌شوند. برای این منظور از یک الگوی ادغام تصادفی به نام ماسک<sup>۴</sup> استفاده می‌شود. طول رشته ماسک ، برابر طول کروموزوم‌های جمعیت است. هنگامی که در ماسک مقدار بیت هم‌ارز ، صفر (0) باشد ، ژن از والد اول و اگر مقدار یک (1) باشد ، ژن از والد دوم کپی می‌شود. روش ادغام یکنواخت در شکل زیر نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> . Two-Point Cross Over

<sup>۲</sup> . Eshelman, et al.

<sup>۳</sup> . Uniform Cross Over

<sup>۴</sup> . Mask



شکل (۲-۴) - روش ادغام یکنواخت [14]

## ۲-۳-۴-۱-د نرخ ادغام<sup>۱</sup>

در انجام فرآیند ادغام با تعریف ثابتی به نام نرخ ادغام (پیوند) ، شانس حضور کروموزوم در فرآیند ادغام بررسی می‌شود. نرخ ادغام بیانگر احتمال ادغام است که آن را با  $P_C$  نشان می‌دهند و مقدار آن بین 0 و 1 است. با فرض احتمال ادغام  $P_C$  می‌توان گفت که  $100 * P_C$  درصد از رشته‌های موجود در استخر تولیدمثل در عملیات ادغام به کار رفته‌اند و  $100 * (1 - P_C)$  درصد از جمعیت باقی می‌مانند. نحوه انجام کار به این صورت است که، با انتخاب مقدار نرخ پیوند ، برای هر کروموزوم یک عدد تصادفی در محدوده صفر تا یک تولید می‌شود. اگر عدد تصادفی تولید شده از نرخ ادغام کمتر باشد ، این کروموزوم برای آمیزش با کروموزوم بعدی که شرایط فوق را دارد، انتخاب می‌شود.

<sup>۱</sup> . Cross Over Rate

انتخاب نرخ ادغام مناسب نیز ، اغلب مشکل ساز است. اگر این مقدار خیلی زیاد باشد ، باعث می شود تا فرصت تطابق در کروموزوم از دست برود و همچنین اگر این مقدار خیلی کم باشد، تعداد فرزندان تولید شده کافی نخواهد بود.

## ۲-۳-۴-۲ جهش

از دیگر مراحل رایج در عملیات GA که تکامل جمعیت برای نسل بعد را به دنبال خواهد داشت، استفاده از اپراتور جهش است. پس از عمل ادغام رشته‌ها، نوبت به عمل جهش یا موتاسیون می‌رسد. نقش جهش در الگوریتم ژنتیک ، بازگرداندن مواد ژنتیکی گم شده و یا پیدا نشده به داخل جمعیت است. بدین سان با استعانت از اپراتور جهش از همگرایی زودرس الگوریتم ژنتیک و کسب جواب‌های بهینه محلی جلوگیری می‌شود. به عبارت دیگر در یک کلام می‌توان گفت اپراتور جهش، سبب جستجوی بهتر فضای طراحی می‌شود.

عمل جهش یک بیت، شامل تبدیل عدد صفر (0) به یک (1) و بالعکس است که بر اساس یک احتمال کوچک مثل  $P_m$  به صورت بیت به بیت صورت می‌گیرد. عمل جهش به این ترتیب است که یک عدد تصادفی بین صفر (0) تا یک (1) تولید می‌شود؛ اگر عدد تولید شده کوچکتر از  $P_m$  باشد مقدار خروجی را برابر درست<sup>۱</sup> وگرنه برابر غلط<sup>۲</sup> در نظر گرفته می‌شود. اگر برای هر بیت مقدار خروجی درست باشد، بیت تغییر می‌کند وگرنه بیت بدون تغییر باقی خواهد ماند.

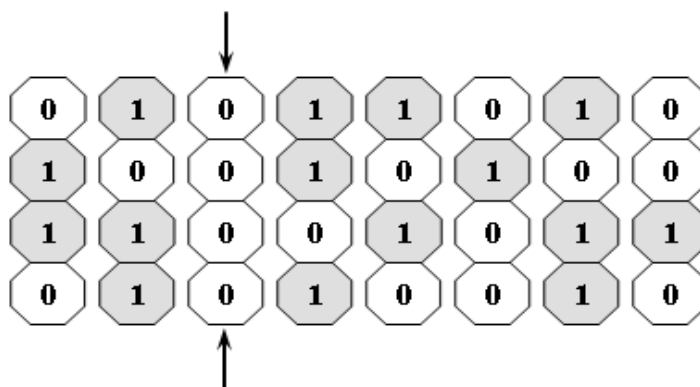
بیت‌های یک رشته به صورت مستقل جهش می‌یابند ، به این معنا که جهش یک بیت بر روی احتمال جهش سایر بیت‌ها تأثیر نمی‌گذارد. این عمل در یک الگوریتم ژنتیک ساده به منزله‌ی یک عملگر ثانویه و به منظور حفظ اطلاعاتی که در حال از دست رفتن است، تلقی می‌گردد. به کمک این عملگر می‌توان امید داشت که کروموزوم‌های خوب که در مراحل انتخاب و یا تکثیر حذف شده‌اند ، دوباره احیا شوند. این عملگر همچنین تضمین می‌کند که بدون توجه به پراکندگی جمعیت اولیه ، احتمال جستجوی هر نقطه از فضای مسئله هیچ‌گاه صفر نشود.

---

<sup>1</sup> . True

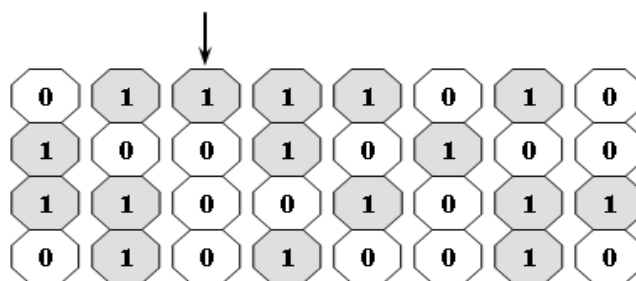
<sup>2</sup> . False

از دیگر مزایای عملگر جهش ، متفاوت و متمایز نمودن کروموزومها در یک جمعیت است. به عبارت دیگر با استعانت از عملگر جهش می توان تحرک شگرفی در یک جمعیت ایجاد نمود. به عنوان مثال اگر جمعیت زیر را در نظر گرفته شود:



شکل (۲-۵) - نیاز جمعیت به بیت ۱ [14]

همان طور که ملاحظه می شود، همه ی بیت های ستون سوم جمعیت حاضر صفر است. اگر راه حل بهینه نیاز به یک در این موقعیت داشته باشد، در این صورت هیچ کدام از عملیات ادغام و تولیدمثل قادر به این کار نخواهد بود. اما عمل جهش این کار را برای ما انجام خواهد داد و جمعیت پس از این عمل با توجه به یک احتمال مشخص به صورت زیر در می آید:



شکل (۲-۶) - تاثیر عملگر جهش [14]

## ۲-۳-۴-۲-الف نرخ جهش<sup>۱</sup> ( $P_m$ )

این نرخ بیانگر احتمال جهش و تغییر برای هر بیت است. مقدار مناسب نرخ جهش در کیفیت نتایج تأثیر بسزایی دارد. نرخ جهش پایین سبب همگرایی سریع و عدم تحرک در فضای جستجو می‌شود. در حالیکه نرخ جهش بالا سبب می‌شود که عملیات GA به سمت روند جستجوی تصادفی میل نماید. این نرخ برای یک جمعیت با اندازه‌ی ۲۰ تا ۲۰۰ مقداری بین 0.005 تا 0.05 پیشنهاد می‌شود. در صورتی که در فرآیند GA مفهوم نخبه‌گرایی وجود داشته باشد؛ پیشنهاد می‌شود نرخ جهش از حد معمول و متعارف بیشتر انتخاب شود. نرخ جهش را می‌توان ثابت در نظر گرفت و یا پیشنهاد می‌شود آن را متناسب با تعداد نسل‌های تولید شده قرار داد. در این صورت دو حالت وجود دارد که به شرح زیر است:

۱- در این حالت نرخ جهش به صورت افزایشی می‌باشد. یعنی در ابتدا جهش با احتمال کمی اعمال شده و در خلال عملیات GA، متناسب با نسبت شماره نسل به تعداد کل نسل‌ها، افزایش می‌یابد. یعنی:

$$P_m = P_m^{Min} + (P_m^{Max} - P_m^{Min}) \frac{t}{T} \quad (19-2)$$

۲- در این حالت نرخ جهش به صورت کاهشی می‌باشد. یعنی در ابتدا جهش با بیشترین احتمال اعمال می‌شود و در خلال فرآیند GA، رشد نزولی خود را متناسب با نسبت شماره نسل به تعداد کل نسل‌ها، در پیش می‌گیرد. یعنی:

$$P_m = P_m^{Max} - (P_m^{Max} - P_m^{Min}) \frac{t}{T} \quad (20-2)$$

در روابط (۱۹-۲) و (۲۰-۲) متغیرها عبارت‌اند از:

$P_m$ : مقدار نرخ جهش در هر نسل

$P_m^{Max}$ : حداکثر مقدار نرخ جهش در فرآیند GA

$P_m^{Min}$ : حداقل مقدار نرخ جهش در فرآیند GA

$t$ : شماره نسل حاضر

$T$ : تعداد کل نسل سازی

<sup>۱</sup>. Mutation Rate

## ۲-۳-۵ شرط توقف الگوریتم

برخی از شرط‌های متداول توقف عملیات GA عبارت‌اند از:

۱. رسیدن به جواب<sup>۱</sup>: این ساده‌ترین فکر برای همگرایی است. به این معنی که اگر تصور شد الگوریتم به مقدار کروموزوم مناسب رسیده است، الگوریتم متوقف شود.
  ۲. عدم پیشرفت<sup>۲</sup>: یعنی الگوریتم GA پس از  $n$  بار تکرار با همان کروموزوم‌های قبلی ادامه پیدا کند؛ در این صورت الگوریتم متوقف شود. در این حالت ممکن است الگوریتم در یک نقطه کمینه نسبی، به دام افتاده باشد.
  ۳. روش آماری<sup>۳</sup>: اگر انحراف از معیار<sup>۴</sup> مقادیر شایستگی جمعیت به یک مقدار مشخصی رسید، الگوریتم متوقف می‌شود. این بدان مفهوم است که مقادیر شایستگی جمعیت با یکدیگر تفاوت چندانی نداشته باشند.
  ۴. تعداد تکرارها<sup>۵</sup>: اگر با هیچ‌کدام از موارد فوق جواب نداد، شرط توقف بر اساس تعداد تکرار بنا می‌شود.
- در هر صورت باید اذعان داشت که ممکن است GA نیز، همانند دیگر روش‌های بهینه‌سازی، به جواب بهینه نرسد و یا در نقطه کمینه نسبی گرفتار شود. در هر صورت اگر الگوریتم به یک حل بهینه همگرا نشود، می‌بایست پارامترهای آن را تغییر داده و مجدداً الگوریتم را اجرا نمود. این پارامترها نقش بسزایی در رسیدن به جواب بهینه دارند [15].

---

<sup>1</sup> . Correct Answer  
<sup>2</sup> . No Improvement  
<sup>3</sup> . Statistics  
<sup>4</sup> . Standard Deviation  
<sup>5</sup> . Number Of Iterations



فصل سوم  
معرفی کابل‌ها و  
مه‌ار بند ضربداری

## ۳-۱ پیشگفتار

سیستم‌های کابلی از جمله پربازده‌ترین سیستم‌های سازه‌ای<sup>۱</sup> موجود هستند. از بسیاری جهات تنش کششی<sup>۲</sup> ساده‌ترین و شاید مهم‌ترین نوع تنش باشد. جریان نیروهای داخلی سیستم‌های کابلی به‌طور مستقیم قابل مشاهده است. هرچند فشار، خمش و برش نیز ممکن است در بعضی سازه‌های کششی وجود داشته باشد، اما کشش در آن‌ها مشهودتر است. برای مثال ممکن است در سیستم کابلی تیر یا تیرچه‌ای مقاوم در برابر خمش باشد، اما این موارد نسبت به کابل‌ها یا کابل‌های اصلی، اهمیت کمتری دارند. در مقایسه با خمش و فشار، عناصر کششی مؤثرتر هستند و از تمامی ظرفیت مصالح مصرفی استفاده می‌کنند. عناصر خمشی فقط از نیمی از ظرفیت مصالح استفاده مؤثر می‌کنند؛ زیرا تنش خمشی از فشار تا کشش متغیر است، به‌علاوه تنش صفر در تار خنثی. اعضای فشاری با افزایش ضریب لاغری در معرض کماتش قرار می‌گیرند. به‌علاوه بعضی عناصر کششی، مانند کابل‌های فولادی مقاومت بیشتری نسبت به ستون‌ها یا تیرهای فولاد نرم دارند، زیرا طی ساخت برای افزایش مقاومت کشیده شده‌اند.

## ۳-۲ پیشینه تاریخی سازه‌های کابلی

بهترین نمونه‌های سیستم‌های کابلی تار عنکبوت است. هر شبکه تار عنکبوت در نوع خود منحصر به فرد بوده و پاسخگوی همان بارگذاری است. این شبکه در سه بعد پایدار بوده و به‌طور قابل ملاحظه‌ای مقرون به صرفه، سبک و مقاوم است. بهره‌برداری انسان از این کابل‌سازان بزرگ حتی با ظهور فولاد، همچنان محدود است. در مقیاس کوچک، آلات موسیقی مانند چنگ برای طراحی سازه‌های کابلی نمونه‌های موثری هستند.

بیشتر اصطلاحات، نظریه‌های عملیاتی و دانش اولیه در مسیر تکامل سازه‌های کابلی<sup>۳</sup> بر پایه مجهز کردن کشتی‌های اولیه به بادبان بود. پل‌های اولیه، نردبان‌ها و مکانیزم بالابرها در دوران پیش از تاریخ همه از ریسمان با الیاف

<sup>1</sup> Structural system

<sup>2</sup> Tensile Stress

<sup>3</sup> Cable structures

طبیعی ساخته شده بودند. بعدها در دوران صنعتی، سازه‌های کابلی فولادی برای ساخت پل‌ها<sup>۱</sup> در دهانه‌های بزرگ استفاده شدند. یکی از قابل توجه‌ترین سازه‌های کابلی در دنیای قدیم چادرها و پوشش‌های موقت فضاهای عمومی و عبادی و نیز پوشش دور آمفی‌تئاترها در روم باستان بود.

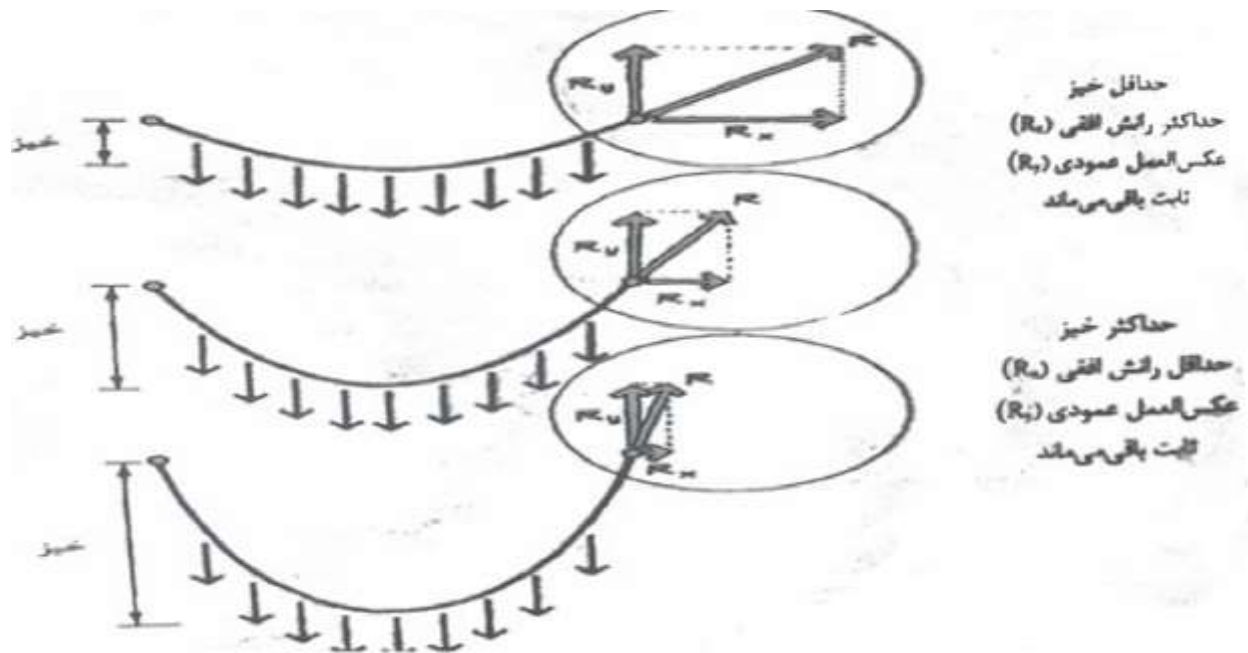
### ۳-۳ واکنش کابل‌ها به بارگذاری با تغییر شکل

نکته مهم در سازه‌های کابلی این است که با کاهش خیز کابل<sup>۲</sup>، مؤلفه عمودی عکس‌العمل ثابت مانده و مؤلفه افقی افزایش می‌یابد. همچنین هنگامی که خیز در کابل زیاد می‌شود، تنش کششی در کابل کاهش می‌یابد. کشش فزاینده در هر دو انتهای کابل سبب می‌شود که خیز کم و شکل کابل به یک خط افقی نزدیک شود. دست‌یابی کامل به این شرایط هرگز در دنیای واقعی امکان‌پذیر نیست، زیرا کشش در کابل باید به بی‌نهایت برسد که در نتیجه کابل گسیخته خواهد شد. سیستم‌های کابلی به تغییرات در بارگذاری و عکس‌العمل‌ها با تغییر شکل پاسخ می‌دهند. بنابراین سازه‌های کابلی به‌طور ذاتی ناپایدارند. عواملی که بر شکل یک سیستم کابلی تحت بارگذاری تأثیر دارند عبارت‌اند از: میزان و موقعیت بارهای وارده، خیز و کشش در کابل و بزرگی نیروهای عکس‌العمل وارده بر آن، هنگامی که کابل به‌طور یکنواخت بارگذاری شود، شکل یک زنجیرواره یا منحنی طنابی سهمی‌گون به خود می‌گیرد. این اشکال ایده‌آل کابل منحنی طنابی<sup>۳</sup> نامیده می‌شوند. هنگام بارگذاری یک کابل، منحنی مطلوب منحنی‌ای است که کمترین مصالح و کمترین هزینه را داشته باشد. حجم مصالح موردنیاز ناشی از دو عامل طول کابل و ضخامت کابل است. هنگامی که خیز کم می‌شود، طول کابل هم کاهش می‌یابد، هرچند، تنش کششی در کابل زیاد می‌شود شکل (۳-۱). به عبارت دیگر با کاهش طول کابل قطر آن باید افزایش یابد.

<sup>۱</sup> bridges

<sup>۲</sup> Cable Deflection

<sup>۳</sup> طناب مانند



شکل (۱-۳) عکس العمل های رانشی و فشاری نسبت عکس با عمق میزان خیز کابل دارد

### ۳-۴ پیش تنیدگی

ناپایداری سیستم های کابلی سبب می شود سازه های کابلی در برابر باد ناپایدار باشند. کابل ها که سبک، نازک و قابل انعطاف هستند، در معرض حرکت رو به بالا، لرزش و حرکات جانبی هستند. به منظور پایداری سیستم های کابلی از پیش تنیدگی<sup>۱</sup> استفاده می شود [16].

هنگامی که یک کابل را تحت کشش قرار داده، سپس آن را به وسیله ای اتصالاتی در همان حالت تحت کشش مهار می کنیم، به واسطه قانون تعادل نیروها، در کابل نیروی کششی و در اتصال نیروی فشاری به گیره های نگهدارنده ی کابل تحت کشش وارد می شود و در نهایت این نیروی فشاری از طریق گیره ها به عضو فولادی مورد نظر منتقل می گردد. ما این نیرو را به دو روش پیش کشیده و پس کشیده اعمال می کنیم:

<sup>۱</sup> Pre Tension

### ۳-۴-۱ روش پیش کشیده<sup>۱</sup>

در این روش کابل قبل از عملیات بتن‌ریزی تحت نیروی کششی قرار می‌گیرد. ابتدا کابل توسط گیره مهار می‌گردد و در انتهای دیگر توسط جک کشیده می‌شود. سپس عملیات بتن‌ریزی روی کابل انجام می‌گردد. پس از گیرش اولیه بتن و رسیدن به مقاومت مورد نظر آن، کابل پیش‌تنیدگی به تدریج رها شده و نیروی فشاری پیش‌تنیدگی به عضو منتقل می‌گردد [16].

### ۳-۴-۲ روش پس کشیده<sup>۲</sup>

در این روش، کشش کابل پس از بتن‌ریزی و گیرش آن انجام می‌شود. در ابتدا غلاف‌هایی<sup>۳</sup> داخل عضو بتنی کار گذاشته می‌شود که کابل در داخل آن قرار می‌گیرد. پس از گیرش بتن، کابل در یک انتها توسط گیره به عضو بتنی مهار و در انتهای دیگر توسط جک کشیده می‌شود و تا حصول نیروی پس کشیده‌گی مورد نظر عملیات کشش ادامه یافته و در نهایت، انتهای دیگر نیز توسط گیره<sup>۴</sup> به عضو بتنی مهار می‌گردد. لازم به ذکر است که عموماً روش پس کشیده‌گی دارای کاربرد و مزایای بیشتری است [16].

### ۳-۵ مزایای استفاده از سازه‌های کابلی

سازه‌های کابلی از لحاظ استفاده از مصالح و هزینه‌های ساخت و نگهداری اقتصادی هستند و اتصالات آن‌ها ساده است. دهانه‌های بزرگی که سیستم‌های کابلی توانایی پوشش آن را دارند، اغلب این سازه‌ها را تنها انتخاب سازه‌ای

---

<sup>1</sup> Pre Tension

<sup>2</sup> Post Tension

<sup>3</sup> Conduits

<sup>4</sup> Anchorage

طراح قرار می‌دهند. هر سازه کابلی یک فضای عملکردی وسیع، کاملاً آزاد از اعضای سازه‌ای مانند ستون در اختیار طراح قرار می‌دهد.

### ۳-۶ محدودیت‌های استفاده از سازه‌های کابلی

علاوه بر ناپایداری سیستم‌های کابلی، نمی‌توان آن‌ها را برای ایجاد کف مسطح استفاده کرد و اغلب فقط برای پوشش سقف نهایی ساختمان (بام) استفاده می‌شوند. دال‌های متکی بر کابل، تیرهای اصلی، خرپاها و تیرهای فرعی برای حل این مشکل استفاده می‌شوند. کابل‌ها در برابر آتش بسیار آسیب‌پذیرند و ضدآتش کردن آن‌ها سخت است. خیز بزرگی که از نظر سازه‌ای مناسب است، به‌طور معمول از نظر عملکردی مناسب نیست، زیرا اگر محصور باشد به مقدار زیادی گرما، تهویه و تهویه مطبوع نیاز دارد. اگر راه رفتن روی پوشش نهایی بام برای تعمیر و نگهداری منظم ضروری است، سازه‌های کابلی برای این منظور مناسب نیستند.

### ۳-۷ تحلیل کابل‌ها

در تحلیل سختی سازه‌های الاستیک، تغییرمکان‌های سازه معمولاً نسبت به هندسه تغییر نیافته اولیه<sup>۱</sup> تعریف می‌شود.

یک کابل ایده آل شده، بدون وزن، را در نظر بگیرید که از چند اتصال زنجیره‌ای با اتصال مفصلی تشکیل شده است. لازم است که تغییرمکان‌ها را به یک حالت تعادل تحت بارهای خاصی نسبت دهیم. طول‌های کشیده نشده قطعات اولیه لازمه‌شان این است که نیروهای محوری آنها در اثر بارهای خارجی محاسبه شوند. داریم:

$$K\Delta = F$$

(۱-۳)

---

<sup>۱</sup> geometry unstrained initially

در اینجا معادلات سختی خطی هستند که  $K$  بستگی به  $\Delta$  و  $F$  ندارد، اما در

$$K' \Delta' = F \quad (2-3)$$

معادلات سختی الاستیک غیرخطی هستند که  $K'$  تابعی از  $\Delta'$  بوده و مستقل از  $F$  است. در معادله

$$K'' \Delta'' = F \quad (3-3)$$

معادلات سختی الاستیک غیر خطی هستند که  $K''$  تابعی از  $\Delta''$  و  $F$  است.

$$K'' = K' + K^c \quad (\text{corrected} \leftarrow c) \quad (4-3)$$

در اینجا  $K^c$  تصحیح  $K'$  است، برای اینکه بتوان اثرات نیروی محوری در قطعات کابل را وارد کرد واضح است که نیروهای محوری در قطعات کابل تابعی از نیروی اعمالی  $F$  (نیروهای خارجی) هستند .

اگر  $L$  طول کشیده شده اولیه (طول اولیه) قطعه کابل باشد، طول تغییر یافته  $L'$  برابر است با:

$$(L')^2 = \Delta X^2 + \Delta Z^2$$

$$2L' \delta L' = 2\Delta X \delta X + 2\Delta Z \delta Z$$

که از آن مشتق گرفته :

$$\delta L' = \left( \frac{\Delta X}{L'} \right) \delta X + \left( \frac{\Delta Z}{L'} \right) \delta Z \quad (5-3)$$

$$P = \frac{EA}{L} (L' - L) = \frac{EA}{L} e \quad (6-3)$$

$e$  تغییر طول قطعه است. از رابطه بالا مشتق میگیریم:

$$\delta P = \frac{EA}{L} \delta L' \quad (7-3)$$

را از رابطه (5-3) در رابطه (7-3) قرار می دهیم:

$$\delta P = \frac{EA}{L} \left( \frac{\Delta X}{L'} \delta X + \frac{\Delta Z}{L'} \delta Z \right)$$

$$\delta P = \frac{EA}{L} \left( \frac{\Delta X}{L'} \right) \delta X + \frac{EA}{L} \left( \frac{\Delta Z}{L'} \right) \delta Z \quad (8-3)$$

نیروی محوری p را روی محور های X و Z تصویر می کنیم، داریم:

$$\bar{F}_x = P \frac{\Delta X}{L'} \quad \bar{F}_z = P \frac{\Delta Z}{L'} \quad (9-3)$$

تاثیر اعمال تغییر مکان های سیکلی X<sub>1</sub> و Z<sub>1</sub> در پایان دوره ۱ ، X<sub>2</sub> و X<sub>2</sub> در انتهای دوره ۲ قطعه کابل مولفه های  $\bar{F}_x, \bar{F}_z$  را به وسیله  $\delta \bar{F}_x, \delta \bar{F}_z$  به صورت زیر تغییر خواهد داد:

از رابطه قبل مشتق میگیریم:

$$\delta \bar{F}_x = \frac{P}{L'} \delta x + \frac{\Delta x}{L'} \delta P - \frac{P \Delta x}{L'^2} \delta L \quad (10-3)$$

$$\delta \bar{F}_z = \frac{P}{L'} \delta z + \frac{\Delta z}{L'} \delta P - \frac{P \Delta z}{L'^2} \delta L \quad (11-3)$$

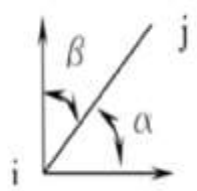
با جای گذاری روابط (۵-۳) و (۶-۳) در معادلات (۱۰-۳) و (۱۱-۳) داریم:

$$\delta \bar{F}_x = \left[ \frac{EA}{L} \left( \frac{\Delta x}{L'} \right)^2 + \frac{EA}{L} \frac{e}{L'} \left( 1 - \left( \frac{\Delta x}{L'} \right)^2 \right) \right] \delta x + \left[ \frac{EA}{L} \left( \frac{\Delta x}{L'} \right) \left( \frac{\Delta z}{L'} \right) - \frac{EA}{L} \frac{e}{L'} \left( \frac{\Delta x}{L'} \right) \left( \frac{\Delta z}{L'} \right) \right] \delta z \quad (12-3)$$

$$\delta \bar{F}_z = \left[ \frac{EA}{L} \left( \frac{\Delta z}{L'} \right)^2 + \frac{EA}{L} \frac{e}{L'} \left( 1 - \left( \frac{\Delta z}{L'} \right)^2 \right) \right] \delta z + \left[ \frac{EA}{L} \left( \frac{\Delta x}{L'} \right) \left( \frac{\Delta z}{L'} \right) - \frac{EA}{L} \frac{e}{L'} \left( \frac{\Delta x}{L'} \right) \left( \frac{\Delta z}{L'} \right) \right] \delta x \quad (13-3)$$

اگر سینوس های هادی را با C و S نشان دهیم:

$$c = \cos \alpha = \frac{\Delta x}{L'}$$

$$s = \cos \beta = \frac{\Delta z}{L'}$$


$$\alpha - 90^\circ = \beta$$

روابط (12-3) و (13-3) را می توان به صورت ماتریس به شکل زیر نوشت:

$$\underbrace{\left\{ \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} c^2 & cs \\ cs & s^2 \end{bmatrix} + \frac{EA}{L} \frac{e}{L'} \begin{bmatrix} 1-c^2 & -cs \\ -cs & 1-s^2 \end{bmatrix} \right\}}_{K = K + K^e} \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \bar{F}_x \\ \delta \bar{F}_z \end{bmatrix}$$

عضو کابلی دو بعدی

$$K \Delta = F \quad \text{یا} \quad K \delta \Delta = \delta F$$

$$K = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} c^2 & cs & -c^2 & -cs \\ cs & s^2 & -cs & -s^2 \\ -c^2 & -cs & c^2 & cs \\ -cs & -s^2 & cs & s^2 \end{bmatrix} + \frac{EA}{L} \frac{e}{L'} \begin{bmatrix} c^2 - 1 & cs & 1 - c^2 & -cs \\ cs & s^2 - 1 & -cs & 1 - s^2 \\ 1 - c^2 & -cs & c^2 - 1 & cs \\ -cs & 1 - s^2 & cs & s^2 - 1 \end{bmatrix}$$

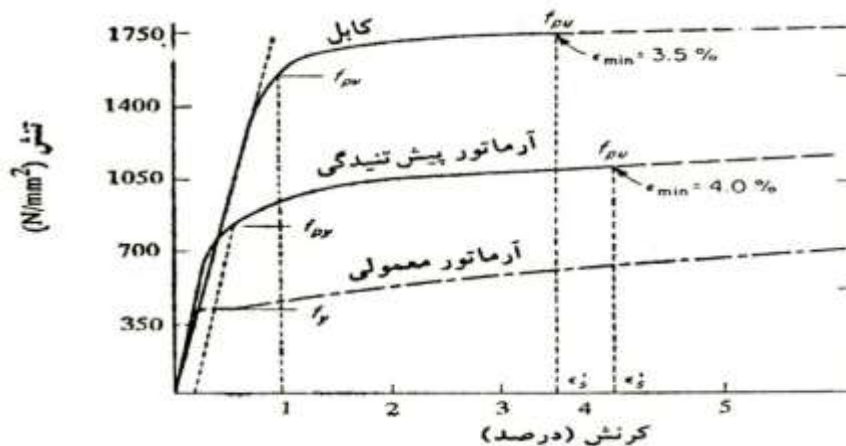
ماتریس بالا برای حالتی نوشته شده است که نیروی کششی منفی فرض شده است. در استاتیک نیروی کششی مثبت در نظر گرفته می شود. در این صورت K به صورت زیر نوشته می شود:

$$K = \frac{EA}{L} \begin{bmatrix} c^2 & cs & -c^2 & -cs \\ cs & s^2 & -cs & -s^2 \\ -c^2 & -cs & c^2 & cs \\ -cs & -s^2 & cs & s^2 \end{bmatrix} + \frac{EA}{L} \frac{e}{L'} \begin{bmatrix} 1-c^2 & -cs & c^2-1 & cs \\ -cs & 1-s^2 & cs & s^2-1 \\ c^2-1 & cs & 1-c^2 & -cs \\ cs & s^2-1 & -cs & 1-s^2 \end{bmatrix}$$

### ۳-۸ ساخت سیمها

برای ساخت سیمها، میلههای فولادی در یک فرآیند گرمایی قرار گرفته و گامهایی بهوسیله نورد یا کشش سرد، قطرشان کم می شود. در گام اول در کورهی آستنیت تا  $900\text{C}$  گرما دادن انجام می شود. سپس دما به صورت ناگهانی به  $500\text{C}$  کاهش می یابد و سیمها درون حمام مخصوصی که دمای نرمال احاطه می شود، این فرآیند تکرار پذیر است. البته اخیراً این روال به کشش یا نورد میله در حین سردسازی در چندین گام عوض شده است و به عنوان مثال سطح مقطع میله در ۷ گام از ۶ میلی متر به ۲ میلی متر کاهش می یابد. با کاهش سطح مقطع بهوسیله کشش انجام می شود، مقاومت سیم افزایش و شکل پذیری کاهش می یابد. به گونه ای که برای الیاف با قطر کمتر از  $0/8$  میلی متر می توان مقاومت  $4000\text{Mpa}$  دست یافت. این عدد برای الیافت ضخیم تر در حدود

$2500\text{Mpa}$  است [17].



شکل (۳-۲) منحنی تنش-کرنش کابل‌ها [17]

### ۳-۹ انواع کابل‌ها از نظر جنس مفتول

به‌طور کلی کابل‌ها از یکی از سه نوع ماده اولیه زیر ساخته می‌شوند.

#### ۳-۹-۱ مفتول فولادی بدون روکش یا غیر گالوانیزه

این نوع مفتول‌ها معمولاً برای کابل‌هایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، که عامل فرسایش در تعیین طول عمر مفید آنها، نقش مهم‌تری دارد و کابل‌ها کمتر در معرض عوامل ایجادکننده زنگ‌زدگی قرار می‌گیرند. هنگام مقایسه اثرات فرسایش و از هم گسیختگی<sup>۱</sup> با اثرات زنگ‌زدگی، باید به خاطر داشت که حتی یک کابل با مفتول‌های بدون روکش را نیز می‌توان تا اندازه‌ای با روغن کاری کافی، مناسب و در فواصل زمانی منظم در مقابل زنگ‌زدگی محافظت کرد [18].

#### ۳-۹-۲ مفتول فولادی گالوانیزه

این نوع مفتول‌ها که دارای روکش یکنواختی از فلز روی (Zn) می‌باشند، در برابر زنگ‌زدگی بر اثر آب دریا، هوا، رطوبت و سایر عوامل مشابه مقاوم هستند. از این رو کابل‌های فولادی گالوانیزه در صنایع نفت، کشتیرانی، شیلات و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند.

<sup>۱</sup> Failure

### ۳-۹-۳ مفتول فولادی ضدزنگ<sup>۱</sup>

کابل‌هایی که از این نوع مفتول‌ها ساخته می‌شوند، علاوه بر مقاومت بسیار بالا در برابر زنگ‌زدگی، در مقابل حرارت نیز تا ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد مقاوم هستند. این نوع کابل‌ها، به‌طور عمده در صنایع فولادسازی، صنایع شیمیایی و دارویی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در ضمن مقاومت این نوع کابل‌ها در برابر اثرات مخرب آب دریا بسیار بالا می‌باشد.

### ۳-۱۰-۳ انواع کابل‌ها از نظر هسته کابل

هسته کابل، بخش مرکزی کابل است که رشته‌ها به دور آن تابیده می‌شوند. نقش هسته، نگهداری رشته‌های کابل می‌باشد. بنابراین باید قطر آن به‌اندازه کافی بزرگ باشد تا در مواقعی که کابل تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، مانع تماس بین رشته‌ها شود.

هسته کابل می‌تواند فولادی یا الیافی باشد. خود هسته فولادی ممکن است، یک کابل فولادی مستقل باشد که در این صورت به آن هسته کابل فولادی مستقل ( $IWRC^2$ ) می‌گویند و یا یک رشته مفتول فولادی ( $WSC^3$ ) باشد که بیشتر برای کابل‌هایی با قطر کمتر از ۱۰ میلی‌متر استفاده می‌شود. هسته الیافی (FC) از الیاف مصنوعی یا الیاف طبیعی ساخته می‌شود، اگرچه هنوز استفاده از کف طبیعی در ساخت کابل‌های فولادی متداول است، با این حال، الیاف مصنوعی مانند پلی پروپیلین به‌طور روزافزون به‌عنوان هسته کابل فولادی مورد استفاده قرار می‌گیرند [18].

لازم به ذکر است که از هسته فولادی در مواقعی استفاده می‌شود که نیروی کششی و استحکام کابل بیشتر از عوامل دیگر مدنظر باشد. بنابراین اگر قابلیت انعطاف کابل نسبت به مقاومت کششی آن از اهمیت بیشتری برخوردار باشد، بهتر است از کابل‌هایی با هسته الیافی استفاده شود [18].

<sup>1</sup> Stainless Steel

<sup>2</sup> Independent wire rope core

<sup>3</sup> wire strand core

## ۱۱-۳ انواع کابل‌ها از نظر نحوه بافت

کابل‌های فولادی معمولاً دارای یکی از چهار نوع بافت مشروح در زیر هستند:

### ۱-۱۱-۳ بافت سیل<sup>۱</sup>

در این نوع بافت، در هر رشته کابل، تعداد مفتول‌های هر ردیف که دور مفتول مرکزی قرار می‌گیرند باهم برابر هستند. قطر مفتول‌های ردیف بیرونی بیشتر از قطر مفتول‌های ردیف درونی است ولی در هر ردیف، قطر کلیه مفتول‌ها یکسان می‌باشد. به علت ضخیم بودن مفتول‌های بیرونی، این نوع کابل‌ها دارای مقاومت سایشی بالایی هستند.

### ۲-۱۱-۳ بافت وارینگتن<sup>۲</sup>

در این بافت، هر رشته کابل در ردیف بیرونی، به‌طور متناوب و یک در میان، دارای مفتول‌های ضخیم و نازک می‌باشد که باعث انعطاف بیشتر آن‌ها نسبت به کابل‌های سیل می‌شود.

### ۳-۱۱-۳ بافت فیلر<sup>۳</sup>

در بافت فیلر، قطر مفتول‌ها در تمامی ردیف‌ها مساوی هستند. در فضای خالی بین مفتول‌های ردیف بیرونی و ردیف درونی، مفتول‌های نازکی بنام فیلر قرار می‌گیرند. کابل‌های فیلر سطح فلزی بیشتری دارند و از قابلیت انعطاف و مقاومت سایشی بالاتری برخوردار هستند.

---

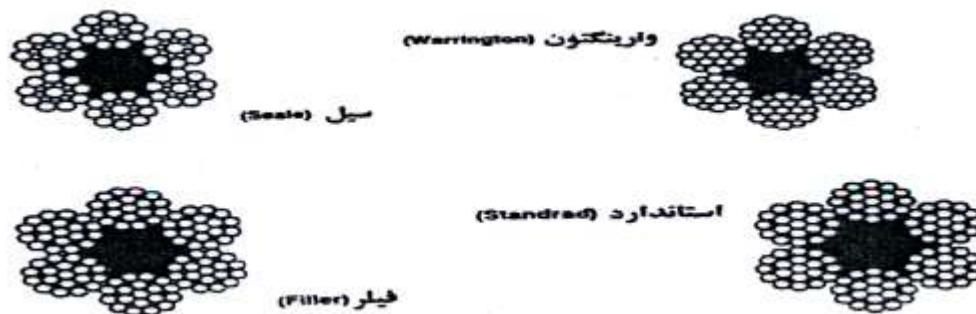
<sup>1</sup> Seale Texture

<sup>2</sup> Warrington Texture

<sup>3</sup> Filler Texture

### ۳-۱۱-۴ بافت استاندارد<sup>۱</sup>

در این نوع بافت، قطر کلیه مفتول‌های تشکیل دهنده هر رشته، یکسان هستند. این نوع کابل‌ها به علت قابلیت انعطاف بالا، کاربردهای بسیاری در رشته‌های گوناگون صنعتی دارند [18].

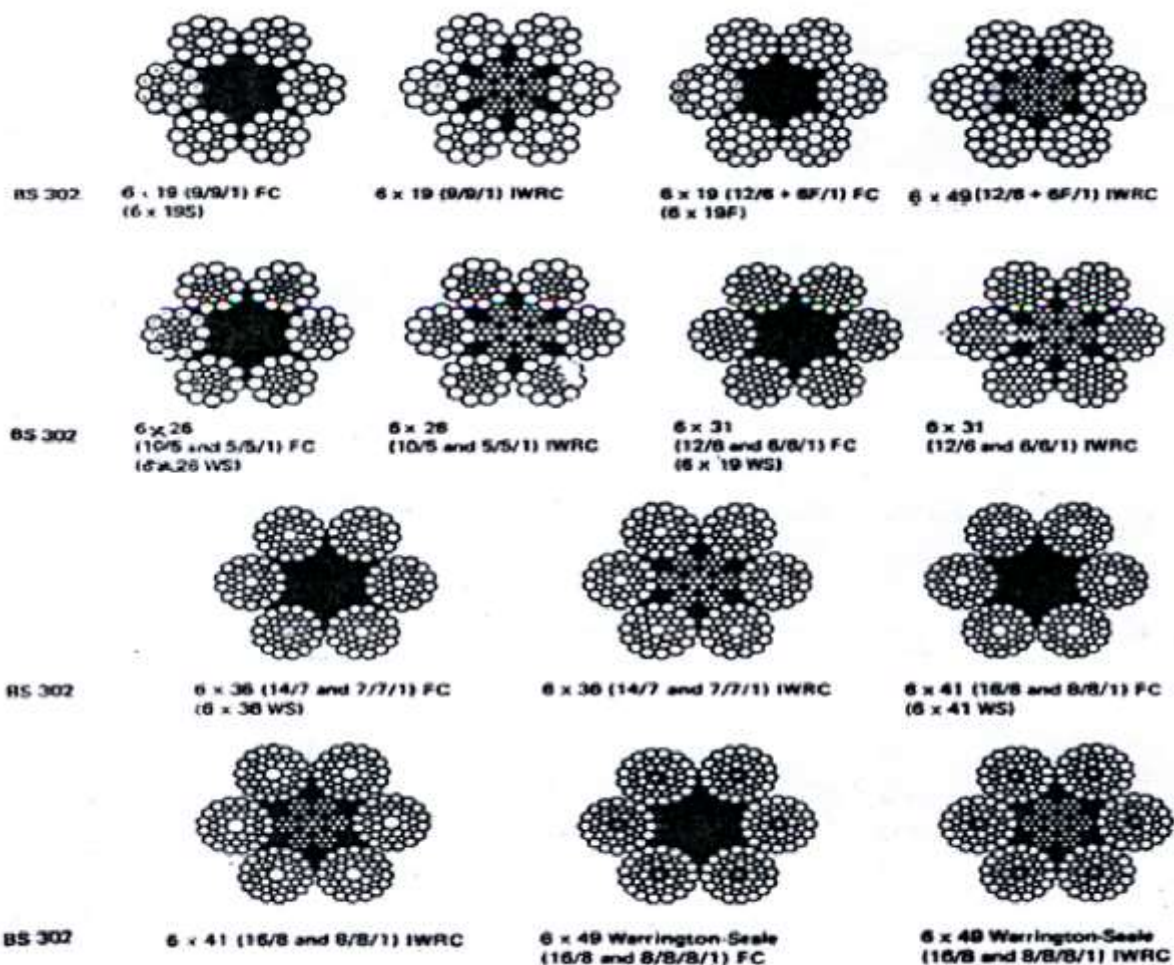


شکل (۳-۳) انواع بافت‌ها در کابل‌ها [18]

### ۳-۱۲ نام‌گذاری کابل‌ها بر طبق استاندارد BS انگلستان

همان‌طور که گفته شد، هر کابل از یک هسته و ترکیب چندین رشته فولادی تشکیل می‌شود. هر رشته نیز از بافت مفتول‌های فولادی به یکی از روش‌های چهارگانه بافت تهیه می‌شود. از این رو، برای مشخص کردن بافتار فولادی و نام‌گذاری مناسب آن، باید نوع هسته، تعداد رشته‌ها، تعداد مفتول‌های بکار رفته در هر رشته و نیز نوع بافت بکار رفته در رشته‌ها مشخص شود. با توجه به این موضوع نحوه نام‌گذاری کابل‌ها طبق استاندارد انگلستان در شکل زیر آورده شده است [18].

<sup>1</sup> Filler Texture



شکل (۳-۴)- نام گذاری انواع کابل فولادی بر اساس استاندارد BS انگلستان [18]

### ۳-۱۳ حلقه انتهایی کابل ها

یکی از متداول ترین انواع اتصالات کابل ها، درست کردن حلقه در دو انتهای کابل است که اسلینگ<sup>۱</sup> نامیده می شود و مطابق یکی از سه روش زیر تهیه می گردد [18].

<sup>1</sup> Sling

### ۳-۱۳-۱ پرس دو سر کابل با ایجاد حلقه و اتصال بست گلویی<sup>۱</sup>

در این روش، حلقه ایجاد شده توسط پرس کردن بست گلویی فلزی به آن، با استفاده از دستگاه پرس مخصوص، محکم می‌شود. کابل دو سر پرس، در صورت اتصال صحیح و کیفیت مناسب بست گلویی، یکی از مطمئن‌ترین و متداول‌ترین انواع اسلینگ‌ها می‌باشد که می‌تواند بیش از ۹۰ درصد نیروی کششی کابل را حفظ کند. (شکل ۳-۵)

### ۳-۱۳-۲ استفاده از بست‌های U شکل<sup>۲</sup>

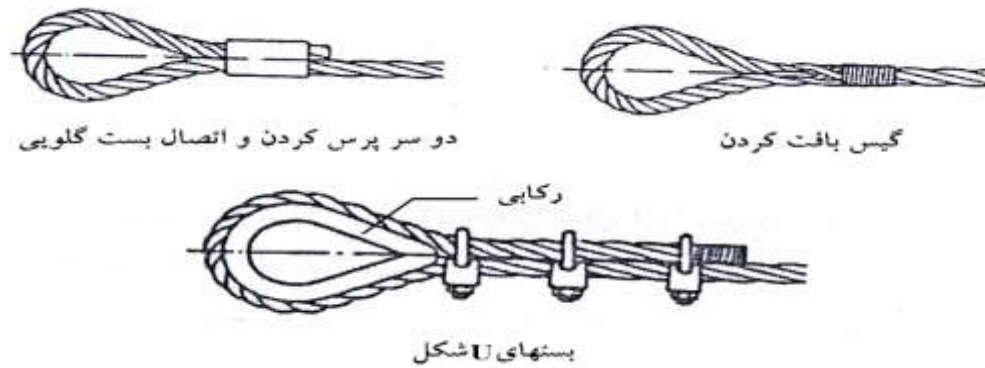
هنگام استفاده از این بست‌ها باید نهایت دقت در بستن صحیح آن‌ها به عمل آید. بدین ترتیب که گردی U آن‌ها بر روی بخش انتهایی کابل قرار گیرد و حداقل از سه بست برای هر حلقه استفاده شود. در شکل (۳-۵) این نوع حلقه و نحوه اجرای صحیح آن نشان داده شده است. برحسب لزوم بست‌ها باید پس از محکم کردن اولیه، به‌طور منظم محکم شوند. بست‌های U شکل در صورت استفاده صحیح تا ۸۰ درصد نیروی کششی کابل را حفظ می‌کنند (شکل ۳-۵) و (شکل ۳-۶).

### ۳-۱۳-۳ ایجاد حلقه توسط دست یا گیس بافت کردن کابل

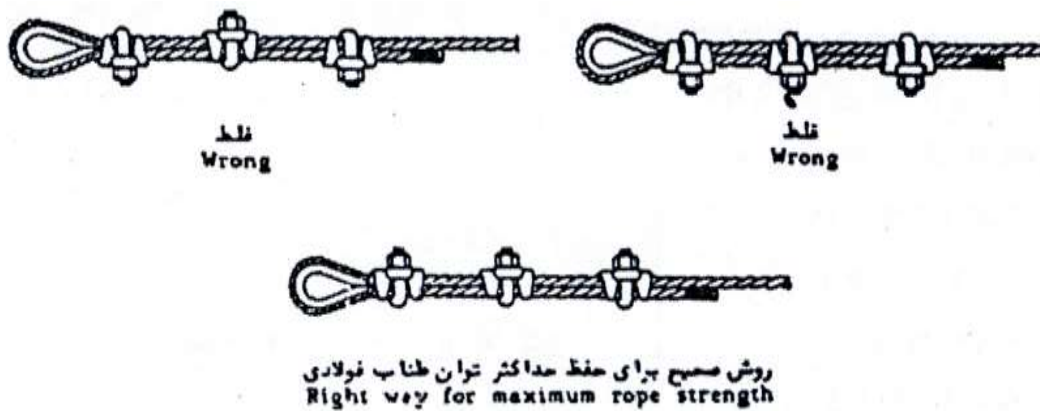
این روش که توسط اشخاص ماهر و با تجربه بکار گرفته می‌شود، در موارد خاص و یا هنگام در دسترس نبودن کابل دو سر پرس مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای جلوگیری از آسیب رساندن مفتول‌هایی که احتمالاً در انتهای قسمت گیس بافت شده، شکسته باشند بهتر است این قسمت توسط بستن سیستم پوشاننده شود. حلقه گیس بافت شده در صورت بافت صحیح بین ۷۵ تا ۹۰ درصد نیروی کششی کابل را حفظ می‌کند. در هر یک از سه روش فوق برای جلوگیری از آسیب دیدن کابل، بهتر است از رکابی استفاده شود. به این ترتیب که رکابی درون حلقه قرار می‌گیرد و کابل از شیار دور آن عبور می‌کند [18].

<sup>1</sup> Ferrule

<sup>2</sup> Wire rope grips



شکل (۳-۵) سه روش موجود جهت درست کردن حلقه [18]



شکل (۳-۶) اجرای صحیح بست های L شکل

### ۳-۱۴ معرفی بادبندهای ضربدري

شاید متداولترین نوع بادبندهای همگرا، شکل بادبندی ضربدري یا X شکل است. این نوع شکل بادبند که در حالت‌های مختلف طرح و اجرا می‌شود، نسبت به شکل بادبندی قطری، دارای مزیت‌ها و احتمالاً معایبی می‌باشد که باید به دقت مورد مطالعه قرار گیرد. عمده مزیت بادبندهای X شکل از اتصال وسط دو بادبند به یکدیگر ناشی می‌شود، که بادبند کششی به صورت قید در وسط بادبند فشاری عمل می‌کند و اتکای جانبی قابل توجهی به وجود می‌آورد و در نتیجه رفتار غیر ارتجاعی<sup>۱</sup> بادبند فشاری و مکانیسم تشکیل مفصل پلاستیک<sup>۲</sup> را تحت تأثیر

<sup>1</sup> Inelastic Behavior

<sup>2</sup> Plastic Hinge

قرار می‌دهد. همچنین با کاهش طول آزاد بادبند در این حالت و افزایش بار بحرانی آن‌ها در فشار، مقاومت جانبی بادبندهای X شکل نسبت به بادبندهای قطری افزایش چشمگیری می‌کند [19].

اطلاعات فنی و مهندسی موجود در آیین‌نامه‌ها و ادبیات فنی، رفتار لرزه‌ای و پارامترهای غیر ارتجاعی (k ضریب کمانش، R ضریب رفتار، C<sub>d</sub> ضریب تغییر شکل پلاستیک و ... ) بادبندهای X شکل را بر مبنای رفتار و عملکرد مهاربندی قطری قرار می‌دهد. در حالی که این رفتارها و معیارها برای هر دو نوع شکل بادبندی متفاوت از هم بوده و بسته به مقدار سختی انتقالی و سختی خمشی که بادبند مکمل (کششی) برای بادبند فشاری تأمین می‌کند منحنی هیستریزیس جذب انرژی<sup>۱</sup> کاملاً تغییر می‌یابد. رفتار سیکیلی سیستم بادبندی X شکل، علاوه بر اینکه به رفتار بادبندهای انفرادی بستگی دارد بلکه به‌طور جدی به اندرکنش میان دو عضو بادبندی که به هم متصل‌اند، وابسته است. نوع و مقدار سختی که توسط اتصال وسط فراهم می‌شود، تأثیر مستقیم در رفتار بادبند می‌گذارد [19].

همان‌طور که ذکر شد، یک سیستم مقاوم لرزه‌ای باید دو خصوصیت کلی زیر را داشته باشد:

الف - در زلزله‌های خفیف و متوسط، سازه بدون خسارت در محدوده الاستیک باقی بماند.

ب - در زلزله‌های شدید سازه با قبول خرابی تا یک سطح مشخص، نباید به مرز انهدام برسد.

برای تأمین خصوصیت اول، مقاومت و سختی سازه نقش اساسی دارد و برای تأمین خصوصیت دوم، شکل‌پذیری<sup>۲</sup> و ظرفیت جذب انرژی لازم است تا از انهدام کلی سازه جلوگیری شود. قاب‌های همگرا CBF مقاومت و سختی بالایی دارند که استفاده از آن‌ها هدف اول را به خوبی تأمین می‌کند. اما در مورد شکل‌پذیری و در زلزله‌های شدید اگر بادبند فشاری، کمانش غیر ارتجاعی<sup>۳</sup> نکند یا کمانش غیر ارتجاعی ناپایداری داشته باشد، در اثر بارهای سیکیلی، با کاهش سریع سختی و زوال مقاومت، جذب انرژی صورت نگرفته و در نتیجه شکل‌پذیری سیستم کاهش می‌یابد.

<sup>1</sup> absorbing energy

<sup>2</sup> Ductility

<sup>3</sup> Inelastic Buckling

فصل چهارم  
مدل سازی نرم افزاری  
و  
روش های محاسبه

## ۴-۱ پیشگفتار

اغلب مسائل جستجو و بهینه یابی در دنیای واقعی، ماهیتاً شامل چندین هدف می‌باشند و در واقع بین اهداف مختلف تبادل‌هایی وجود دارد. یکی از این مسائل، بحث طراحی ساختمان‌ها می‌باشد. عموماً یک مهندس سازه هنگام طراحی و محاسبه مقاطع اعضای یک ساختمان به دنبال دو هدف عمده می‌باشد. یکی از این اهداف طرح یک ساختمان مقاوم بوده که بتواند در مقابل بارهای وارده عملکرد مناسبی داشته باشد و هدف دیگر ارائه یک طرح اقتصادی به کارفرما می‌باشد. از آنجا که از میان بارهای وارده به ساختمان، بارهای جانبی و خصوصاً بار زلزله نقش مهم‌تری داشته و عمده خرابی ساختمان‌ها در سال‌های اخیر، ناشی از عملکرد نامناسب آن‌ها در برابر زلزله بوده است، بنابراین ساختمان‌ها بایستی عملکرد لرزه‌ای مناسبی داشته و در عین حال اقتصادی طرح شده باشند. در این فصل جزئیات و نحوه مدل‌سازی و تحلیل سازه در نرم افزار Opensees و بهینه یابی در Matlab تشریح می‌شود. بدین منظور برای بارگذاری لرزه‌ای از ضوابط آیین‌نامه ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) [20] و برای بارگذاری ثقلی از آیین‌نامه مبحث ششم (ویرایش ۱۳۹۲) [21] استفاده شده است. همچنین برای تحلیل استاتیکی غیرخطی<sup>۱</sup>، ضوابط FEMA<sup>2</sup> 356 [22] مبنا قرار گرفته است.

## ۴-۲ تحلیل استاتیکی غیرخطی

تحلیل استاتیکی غیرخطی یک شیوه‌ی متداول و مطلوب جهت ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه‌های مختلف می‌باشد. در طی این تحلیل فرض می‌شود که یک مود ارتعاشی بر رفتار کل سازه حاکم بوده و شکل این مود در طول تاریخچه زمانی ثابت می‌ماند. اما انتظار می‌رود که این آنالیز اطلاعاتی درباره‌ی بسیاری از خصوصیات پاسخ فراهم کند که آنالیزهای خطی استاتیکی یا دینامیکی قادر به دست آوردن آن‌ها نباشد. برای نمونه پاره‌ای از این موارد در ذیل ارائه می‌شود [۱۷].

<sup>1</sup> Pushover

<sup>2</sup> Federal Emergency Management Agency

۱. تخمین تغییر شکل در اعضای که به‌طور غیر الاستیک تغییر شکل دهند تا انرژی اعمالی زمین‌لرزه را تلف کنند.

۲. پیامدهای از بین رفتن مقاومت اعضا در رفتار سیستم.

۳. شناسایی نواحی بحرانی که تغییر شکل زیاد برای آن‌ها پیش‌بینی می‌شود.

۴. شناسایی ناپیوستگی در پلان یا ارتفاع.

لازم به تأکید است که آنالیز استاتیکی غیرخطی<sup>۱</sup> دارای طبیعت تقریبی و یک آنالیز استاتیکی است بنابراین چنین آنالیزی نمی‌تواند با درجه بالایی از دقت بیانگر پدیده دینامیکی باشد. بعلاوه شاید قادر به نمایش تمام مودهای انهدام در سازه نباشد. لیکن تحت شرایطی می‌توان با استفاده از آنالیزهای استاتیکی افزایشی غیرخطی به تقریب‌های بسیار خوبی از رفتار و نیازهای سازه‌ای دست یافت. از مهم‌ترین عوامل در دقت این آنالیز می‌توان به تعیین تغییر مکان هدف و الگوی بار جانبی اشاره کرد. در ادامه به توضیح این دو عامل پرداخته می‌شود [23].

#### ۴-۲-۱ الگوی توزیع بار جانبی

اما نکته‌ی دومی که در دقت نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی موثر می‌باشد، نحوه‌ی توزیع بار جانبی در ارتفاع طبقه است. برای ارزیابی عملکرد سازه انتخاب الگوی بار جانبی مناسب مهم می‌باشد، این الگو نشان دهنده‌ی نحوه‌ی توزیع نیروهای اینرسی بر حسب شدت زلزله (گسترش تغییر شکل‌های ارتجاعی) و زمان می‌باشد. به طور کلی دو نوع توزیع بار در تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی استفاده می‌شود [23].

#### ۴-۲-۱-۱ توزیع بار ثابت

در این الگوی بار فرض بر این است که نیروهای اینرسی به طرز منطقی در حین زلزله ثابت می‌باشد. تعدادی از توزیع بارهای ثابت مورد استفاده عبارت‌اند از:  
الف. نیروهای افقی متمرکز منفرد در بالاترین طبقه.

---

<sup>1</sup> Nonlinear Cable

ب. توزیع بار مثلثی وارونه و پیشنهاد شده توسط آیین نامه.

پ. توزیع بار متناسب با بردار جرم و شکل مود اصلی.

ت. توزیع بار جانبی براساس آنالیز دینامیکی خطی یا آنالیز طیف پاسخ سازه.

#### ۴-۲-۱-۲ توزیع بار متغیر

تعدادی از محققین الگوی بار متغیر را برای استفاده در آنالیز استاتیکی افزایشی غیرخطی ارائه داده اند تعدادی از این توزیع بارها عبارت اند از:

الف. ابتدا از توزیع متناسب با بردار جرم و شکل مود استفاده می شود تا اولین مفصل در سازه شکل گیرد، سپس با افزایش بار نیروها طوری تنظیم می شوند که با شکل تغییر شکل یافته سازه سازگار باشند. به عبارت دیگر در هر گام آنالیز توزیع بار بر اساس جرم ها و تغییر مکان های آن گام در طبقه تصحیح می شود [23].

ب. توزیع بار بر اساس شکل های مود مشتق شده از سختی های سکانت در تمام مراحل آنالیز.

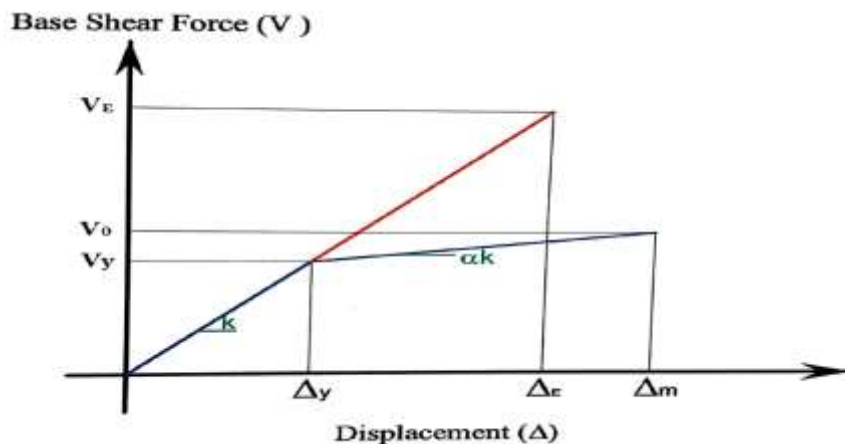
پ. توزیع بار متناسب با برش طبقه در هر مرحله.

اما این توزیع بارها به تلاش محاسباتی بیشتری نیاز دارند و برتری آنها نسبت به توزیع بارهای ثابت اثبات نشده است. بدیهی است که انتخاب دقیق الگوی بار باعث بهبود نتایج می شود. در این پایان نامه برای تحلیل استاتیکی افزایشی غیرخطی از بار ثابت به شکل مثلثی وارونه مطابق آیین نامه زلزله استفاده شده است [24].

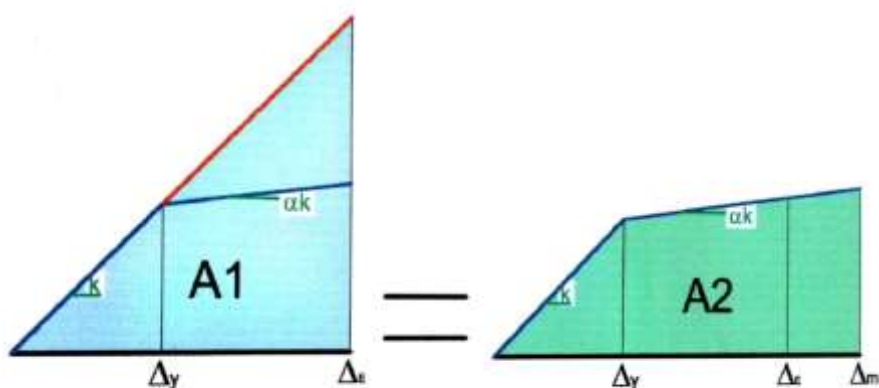
#### ۴-۳ روش چوپرا و نحوه محاسبه ضریب رفتار

پس از تحلیل استاتیکی غیرخطی پوش آور نمودار برش پایه- تغییرمکان آن را استخراج می کنیم سپس با استفاده از روش پرایستلی و پاولی نمودار پوش آور را دو خطی کرده و با روش چوپرا ضریب رفتار آن را بدست می آوریم.

چوپرا برای سیستم های یک درجه آزادی که نمودار برش پایه- تغییرمکان آنها دو خطی ایده آل سازی شده (شکل ۴-۱) روابط و نمودارهایی برای ارتباط نسبت شکل پذیری و ضریب رفتار ناشی از شکل پذیری ارائه نمود.



شکل (۱-۴) نمودار دو خطی برش پایه-تغییر مکان برای سیستم یک درجه آزادی [30]



شکل (۲-۴) برابر قرار دادن مساحت‌های زیر منحنی دو خطی و منحنی الاستیک [30]

طبق روش چوپرا باید مساحت سطح زیر نمودار دو خطی با سطح زیر نمودار منحنی الاستیک برابر باشد که از آن ضریب ناشی از شکل پذیری و در نهایت ضریب رفتار بدست می‌آید. مراحل بدست آوردن ضریب رفتار به صورت ذیل می‌باشد:

ابتدا برای دو خطی کردن منحنی پوش آور از رابطه موجود استفاده می‌کنیم. به ازای  $\alpha = 0$  مقدار آن به صورت ذیل تبدیل می‌شود:

$$K_1 = \alpha K_0 = \frac{V_0 - V_y}{\Delta_m - \Delta_y} \xrightarrow{\alpha=0} V_0 = V_y \quad (۱-۴)$$

سپس با استفاده از شکل (۱-۴) و رابطه (۱-۴) می‌توان شیب یا سختی اولیه منحنی دو خطی را بدست آورد. لازم به ذکر است در روش پرایستلی و پاولی سختی اولیه منحنی پوش آور ( $K_e$ ) با سختی اولیه منحنی دو خطی (شیب منحنی دو خطی) یکی نیست.

$$\begin{cases} K_0 = \frac{V_y}{\Delta_y} \\ V_0 = V_y \end{cases} \Rightarrow K_0 = \frac{V_0}{\Delta_y} \quad (۲-۴)$$

طبق این روش  $V_0 = V_y$  می‌شود که در نتیجه  $0/75V_y = 0/75V_0$  خواهد شد. همانطور که در شکل قبل مشخص می‌باشد نمودارهای دو خطی و پوش آور در یک نقطه همدیگر را قطع می‌کنند که عملاً در آن نقطه تغییرمکان متناظر با هر دو نمودار با هم برابر می‌باشد. همچنین می‌توان از طریق  $0/75V_0$  تغییرمکان متناظر با آن را که در این مقاله  $\Delta_1$  نام گذاری می‌شود، شیب نمودار دو خطی را بدست آورد. مقدار برش پایه ماکزیمم ( $V_0$ ) از تحلیل استاتیکی غیرخطی بدست آمده است و با محاسبه  $0/75V_0$  می‌توانیم تغییرمکان متناظر ( $\Delta_1$ ) را بدست آوریم. حال می‌توان  $K_0$  را بدست آورد.

$$\begin{cases} K_0 = \frac{0.75V_y}{\Delta_1} \\ V_0 = V_y \end{cases} \Rightarrow K_0 = \frac{0.75V_0}{\Delta_1} \quad (۳-۴)$$

با بدست آمدن  $K_0$  می‌توان  $\Delta_y$  را بدست آورد.

$$\begin{cases} K_0 = \frac{V_0}{\Delta_y} \\ K_0 = \frac{0.75V_0}{\Delta_1} \end{cases} \Rightarrow \frac{0.75V_0}{\Delta_1} = \frac{V_0}{\Delta_y} \Rightarrow \Delta_y = \frac{4\Delta_1}{3} \quad (۴-۴)$$

طبق روش چوپرا ضریب ناشی از شکل پذیری، نسبت شکل پذیری، سطح زیر نمودار دو خطی ( $A_2$ ) و سطح

زیر نمودار الاستیک ( $A_1$ ) به ترتیب از روابط (۵-۴)، (۶-۴)، (۷-۴) و (۸-۴) بدست می‌آید:

$$R_\mu = \frac{V_E}{V_y} = \frac{\Delta_E}{\Delta_y} \quad (۵-۴)$$

در رابطه (5-4)  $V_E$  نیروی برش پایه هنگامی که سازه فقط رفتار الاستیک داشته باشد،  $V_y$  نیروی برش پایه الاستیک منحنی دو خطی،  $\Delta_E$  تغییرمکان متناظر با  $V_E$  و  $\Delta_y$  تغییرمکان متناظر با  $V_y$  می‌باشد.

$$\mu = \frac{\Delta_m}{\Delta_y} \quad (6-4)$$

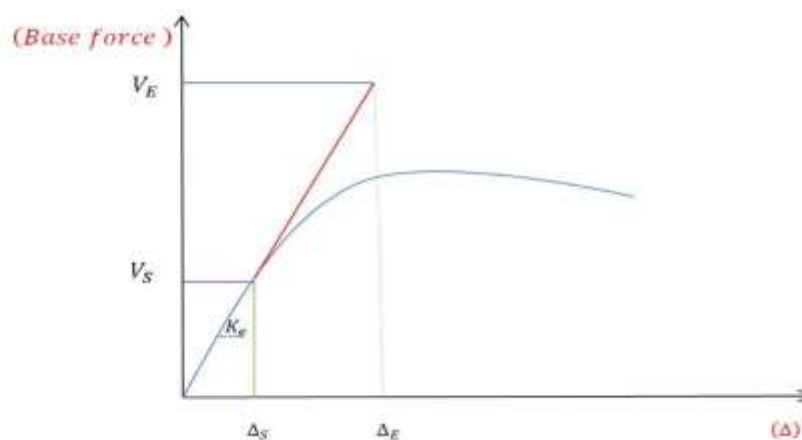
$$A_1 = \frac{V_E \times \Delta_E}{2} \quad (7-4)$$

$$A_2 = \frac{V_y \times \Delta_y}{2} + \frac{(V_y + V_0) \times (\Delta_m - \Delta_y)}{2} \quad (8-4)$$

به علت برابر بودن  $V_0 = V_y$  رابطه (8-4) به صورت ذیل تبدیل می‌شود:

$$A_2 = \frac{V_0 \times \Delta_y}{2} + (V_0 \times (\Delta_m - \Delta_y)) \quad (9-4)$$

برای بدست آوردن  $V_E$  و  $\Delta_E$  از اصل برابر بودن سطح زیر نمودارهای دو خطی و الاستیک استفاده می‌کنیم به عبارتی با محاسبه  $A_2$  مقادیر فوق را از طریق روابط ریاضی بدست می‌آوریم.



شکل (3-4) سطح زیر نمودار الاستیک [30]

از نمودار فوق روابط زیر بدست می‌آید:

$$K_e = \frac{V_S}{\Delta_S} = \frac{V_E}{\Delta_E} \quad (10-4)$$

بر اساس نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی مقادیر  $V_S$  و  $\Delta_S$  به راحتی با تشخیص اولین خرابی در نمودار پوش آور بدست می‌آید که می‌توان در نهایت  $K_e$  را بدست آورد. با استفاده از رابطه (4-10) و (4-7) و مساوی بودن سطح زیر نمودارهای دو خطی و الاستیک مقادیر  $V_E$  و  $\Delta_E$  بدست می‌آید.

$$V_E = K_0 \Delta_E \quad (11-4)$$

$$\begin{cases} A_1 = A_2 \\ A_1 = \frac{1}{2} V_E \Delta_E \end{cases} \Rightarrow A_2 = \frac{1}{2} V_E \Delta_E$$

از روابط بالا داریم:

$$A_2 = \frac{1}{2} K_e \Delta_E^2 \quad (12-4)$$

با استفاده از رابطه (4-12)  $\Delta_E$  بدست می‌آید.

$$\Delta_E = \sqrt{\frac{2A_2}{K_e}} \quad (13-4)$$

با بدست آمدن  $\Delta_E$  می‌توان با استفاده از رابطه (4-13)  $V_E$  را نیز بدست آورد. سپس از رابطه (4-5) ضریب ناشی از شکل‌پذیری ( $R_\mu$ ) بدست خواهد آمد. همچنین ضریب اضافه مقاومت بر اساس موارد گفته شده و برابر بودن  $V_0 = V_y$  از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$R_S = \frac{V_0}{V_S} \quad (14-4)$$

به علت آنکه ضریب نامعینی و ضریب میرایی در اکثر موارد واحد فرض می‌شود و بر اساس روابط فوق ضریب رفتار در نهایت از رابطه (4-15) بدست خواهد آمد.

$$R = R_{\mu} R_S$$

(۱۵-۴)

## ۴-۴ الزامات طراحی مهاربند ناودانی

### ۴-۴-۱ الزامات طراحی اعضا مهاربندی برای نیروی فشاری

مقاومت فشاری طراحی مساوی  $\phi_c P_n$  می‌باشد که در آن،  $\phi_c$  ضریب کاهش مقاومت برابر 0/9 و  $P_n$  مقاومت فشاری اسمی می‌باشد که برای اعضای فشاری با مقطع بدون اجزای لاغر، باید برابر کوچکترین مقدار محاسبه شده براساس حالت‌های حدی کمانش خمشی، کمانش پیچشی و کمانش خمشی- پیچشی در نظر گرفته شود. اعضایی که تحت اثر نیروی محوری فشاری قرار دارند، ضریب لاغری حداکثر آنها،  $(\frac{KL}{r})_{max}$ ، نباید از ۲۰۰ تجاوز کند.

مقاومت فشاری اسمی اعضای فشاری،  $p_n$ ، با مقطع بدون اجزای لاغر بر اساس کمانش خمشی با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود.

$$p_n = F_{cr} A_g$$

(۱۶-۴)

که در آن:

$A_g$ : سطح مقطع کلی عضو

$F_{cr}$ : تنش فشاری ناشی از کمانش خمشی که از روابط زیر بدست می‌آید.

الف) اگر  $\frac{F_y}{F_e} \leq 2/25$  یا  $\frac{KL}{r} \leq 4/71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$  باشد:

$$F_{cr} = \left[ 0/658 \frac{F_y}{F_e} \right]$$

(۱۷-۴)

ب) اگر  $\frac{F_y}{F_e} > 2/25$  یا  $\frac{KL}{r} > 4/71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$  باشد:

$$F_{cr} = 0/877 F_e$$

(۱۸-۴)

در روابط فوق:

$F_y$ : تنش تسلیم فولاد

$E$ : مدول الاستیسیته فولاد

$\frac{KL}{r}$ : ضریب لاغری حداکثر عضو

$K$ : ضریب طول موثر

$L$ : طول فاقد مهار جانبی عضو

$r$ : شعاع ژیراسیون مقطع عضو

$F_e$ : تنش کمانش الاستیک که مقدار آن عبارت است از:

(۱۹-۴)

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{kl}{r}\right)^2}$$

#### ۴-۴-۲ الزامات طراحی اعضا مهاربندی برای نیروی کششی

مقاومت کششی طراحی مساوی  $\phi_t P_n$  می‌باشد که در آن،  $\phi_t$  ضریب کاهش مقاومت برابر ۰/۹ و  $P_n$  مقاومت کششی اسمی می‌باشد.

اعضایی که تحت اثر نیروی محوری کششی قرار دارند، ضریب لاغری حداکثر آنها،  $(\frac{KL}{r})_{max}$ ، نباید از ۳۰۰ تجاوز کند.

مقاومت کششی اسمی اعضای کششی،  $p_n$ ، با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود.  
(۴-۲۰)

$$p_n = F_y A_g$$

که در آن:

$A_g$ : سطح مقطع کلی عضو

$F_y$ : تنش تسلیم فولاد

#### ۴-۴-۳ الزامات طراحی مهاربندی برای کمانش پیچشی-خمشی

مقاومت فشاری اسمی اعضای فشاری با مقاطع بدون اجزای لاغر بر اساس کمانش پیچشی-خمشی از رابطه زیر تعیین می‌شود:

(۴-۲۱)

$$p_n = F_{cr} A_g$$

که در آن تنش بحرانی  $F_{cr}$ ، به شرح زیر تعیین می‌شود:

الف) اگر  $\frac{F_y}{F_e} \leq 2/25$  یا  $\frac{KL}{r} \leq 4/71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$  باشد:

$$F_{cr} = \left[ 0/658 \frac{F_y}{F_e} \right] \quad (۴-۲۲)$$

ب) اگر  $\frac{F_y}{F_e} > 2/25$  یا  $\frac{KL}{r} > 4/71 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$  باشد:

$$F_{cr} = 0/877 F_e \quad (۴-۲۳)$$

در روابط فوق:

$F_y$ : تنش تسلیم فولاد

$E$ : مدول الاستیسیته فولاد

$\frac{KL}{r}$ : ضریب لاغری حداکثر عضو

$K$ : ضریب طول موثر

$L$ : طول فاقد مهار جانبی عضو

$r$ : شعاع ژیراسیون مقطع عضو

$F_e$ : تنش کمانش الاستیک بر اساس حالت کمانش پیچشی-خمشی که مقدار آن عبارت است از:

(۲۴-۴)

$$F_e = \left( \frac{F_{ey} + F_{ez}}{r_H} \right) \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{r F_{ey} F_{ez} H}{(F_{ey} + F_{ez})^2}} \right]$$

که در رابطه (۲۴-۴)  $F_{ey}$  تنش کمانشی خمشی الاستیک حول محور اصلی  $y$  که از رابطه زیر تعیین می شود:

$$F_{ey} = \frac{\pi^2 E}{\left( \frac{K_y L}{r_y} \right)^2}$$

(۲۵-۴)

و  $F_{ez}$  تنش کمانش پیچشی الاستیک طبق رابطه زیر :

$$F_{ez} = \left[ \frac{\pi^2 E C_w}{(K_z L)^2} + GJ \right] \frac{1}{A_g r_o^2}$$

(۲۶-۴)

در رابطه فوق:

$L$ : ثابت پیچشی

$G$ : مدول الاستیسیته برشی

$C_w$ : ثابت تابیدگی

$r_o$ : شعاع ژیراسیون قطبی

#### ۴-۵ معرفی نرم افزار opensees

<sup>1</sup>opensees یک نرم افزار شیءگرا برای کاربردهای شبیه سازی در مهندسی زلزله با استفاده از روش های اجزا محدود است. نرم افزار opensees توسط اعضای دانشگاه کالیفرنیا (PEER center) تهیه و پخش شده است و به صورت رایگان قابل دانلود می باشد. هدف از تهیه نرم افزار opensees پیشبرد هر چه بیشتر تحقیقات در زمینه مهندسی زلزله می باشد [25].

این نرم افزار توسط زبان برنامه نویسی شیءگرای ++C توسعه داده شده است، همچنین از زبان <sup>2</sup>TCL نیز برای وارد کردن دستورات و پروسیجرها توسط کاربر استفاده شده است. مهمترین ویژگی opensees کدباز بودن آن است که از این طریق کاربر می تواند به اصل سیستم نرم افزاری دسترسی داشته باشد. از طریق تایپ دستورات که به

<sup>1</sup> Open System for Earthquake Engineering Simulation

<sup>2</sup>Tool Command Language

زبان TCL نوشته شده‌اند، کاربر می‌تواند هندسه مدل، بارگذاری، ساختار کمی مواد استفاده شده، روش آنالیز و... را تعریف کند. TCL یک زبان اسکریپتی بر مبنای رشته است که دارای ویژگی‌های زیر می‌باشد:

❖ متغیرها و جایگزینی مقادیر آن‌ها

❖ انجام محاسبات ریاضی

❖ استفاده از ساختارهای شرطی (if, while, for, foreach)

❖ استفاده از زیربرنامه‌ها (Procedures)

❖ ساخت فایل و عملیات بر روی فایل‌ها

برای استفاده بهینه از زبان برنامه‌نویسی TCL، باید این زبان با روش اجزا محدود همگرا شود که طبقه‌بندی زیر پس از این همگرا شدن به دست خواهد آمد:

۱- مدلسازی<sup>۱</sup>: تعریف گره‌ها، المان‌ها، بارگذاری‌ها، مواد و قیود.

۲- آنالیز<sup>۲</sup>: مشخص کردن روش آنالیز

۳- تعیین خروجی‌ها<sup>۳</sup>: انتخاب خروجی‌ها برای نمایش پس از آنالیز

در opensees واحد خاصی برای تعریف اعداد وجود ندارد، واحد را از اول یک مقدار تعیین می‌کنیم و مقادیر را بر حسب واحد انتخابی وارد کرده و در انتها تمامی نتایج برنامه بر اساس واحدهای داده شده ارائه می‌شود.

#### ۴-۶ امکانات نرم افزار opensees

نرم افزار ذکر شده دارای یک آرشیو کامل از انواع رفتارهای خطی و غیرخطی درخصوص تعریف مصالح، المان‌های فولادی و بتنی و تعریف المان‌های مختلف درخصوص مدل‌سازی می‌باشد. بجز عناصری که در آرشیو موجود می‌باشد، کاربر می‌تواند بصورت اختیاری نیز نوعی از مواد و مصالح و المان‌ها را برای مدلسازی خود تعریف کند. نرم افزار opensees قادر به تحلیل انواع مدل‌های خطی و غیرخطی سازه‌ای و ژئوتکنیکی می‌باشد. تحلیل‌ها بصورت انواع تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی در حالت خطی و غیر خطی انجام می‌شود.

---

<sup>1</sup> Modeling

<sup>2</sup> Analysis

<sup>3</sup> Output specification

- تحلیل استاتیکی غیرخطی<sup>۱</sup>
- تحلیل استاتیکی سیکلی<sup>۲</sup>
- تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی<sup>۳</sup>
- تحلیل مدل سازی تحریک یکنواخت پایه<sup>۴</sup>
- تحلیل مدل سازی تحریک چند تایی پایه<sup>۵</sup>

در حالت کلی به عنوان یک معرفی کلی می توان گفت که تحلیل استاتیکی به فرم  $ku=R$  بدون ماتریس جرم و میرایی مطرح می شود و حل این مسأله خود به تنهایی تحلیل استاتیکی را انجام می دهد.

آنالیزهای وابسته به زمان به دو صورت مطرح می شوند، نوع اول آنالیز وابسته به زمان با گام ثابت است و نوع دوم آنالیز وابسته به زمان با گام زمانی متغیر است. نرم افزار opensees قادر به مدلسازی انواع قسمت های یک المان سازه ای می باشد. می توان گفت نرم افزار فوق تمام قسمت های یک سازه از هر نوعی با هر مصالحی را مدل می کند. میلگردهای موجود در سطح مقطع یک عنصر، بتن اطراف میلگردها با پوشش حداقل و حداکثر، خستگی در المان ها تحت اثر هر نوع بارگذاری، رفتار هیستریزیسی بصورت منحنی نیرو - تغییرمکان، گسیختگی برشی، گسیختگی محوری، کاهش مقاومت و نزول سختی تحت اثر بارهای سیکلی، اندرکنش خاک و سازه و ... از جمله مسائلی هستند که نرم افزار قادر به مدل کردن و تحلیل آنها می باشد.

#### ۷-۴ معرفی مصالح فولادی موجود در opensees

با توجه به اینکه در این پایان نامه سازه ها فولادی هستند، از مصالح Steel02 برای اعضای تیر، ستون و بادبند های غیر کابلی استفاده شده است. شکل (۴-۴) پارامترهای منحنی پوش Steel02 را نشان می دهند. برای مدلسازی بادبندهای کابلی از مصالح Elastic و برای پیاده سازی نیروی پیش تنیدگی کابل ها از دو مصالح ElasticPP و InitStressMaterial استفاده شده است [25].

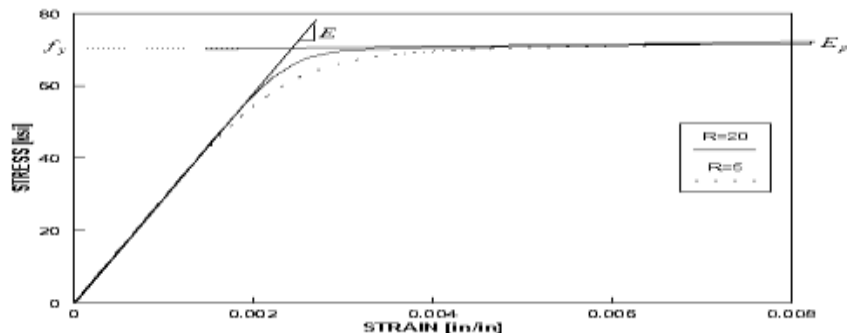
<sup>1</sup> static pushover Analysis

<sup>2</sup> static reversed-cyclic Analysis

<sup>3</sup> Dynamic time-series Analysis

<sup>4</sup> Uniform-support Excitation

<sup>5</sup> Multi support Excitation



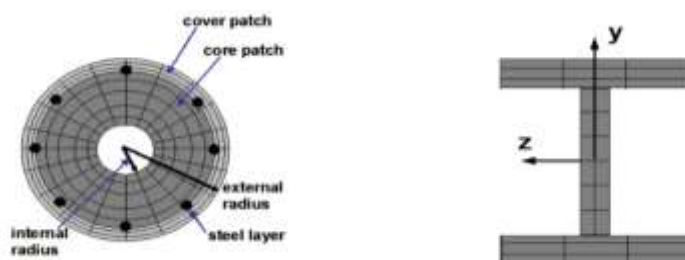
شکل (۴-۴) پارامترهای منحنی پوش steel 02 [25]

#### ۸-۴ نحوه مدل سازی اعضای سازه ای

در این قسمت نحوه استفاده از المان‌های کتابخانه ای opensees برای مدل کردن تیرها، ستون‌ها، کابل‌ها و بادبندها همچنین مقطع اختصاص داده شده به آنها، شرح داده می‌شود.

#### ۴-۸-۱ تعریف مقاطع اعضا

برای ایجاد شکل سطح مقطع کابل‌ها از مقاطع رشته‌ای<sup>۱</sup> استفاده شده است. این روش توانایی ساخت مقاطع مختلف را فراهم می‌آورد و این امکان را برای نرم‌افزار فراهم می‌کند تا بتواند مقادیر متفاوت نیرو و تغییر شکل نقاط مختلف سطح مقطع را بر اساس هندسه مقطع، رفتار چرخه‌ای مفروض برای مصالح و چگونگی پخش کرنش در طول عضو را به دست آورد. در این روش شکل سطح مقطع با تقسیم به چند شکل هندسی متداول تشکیل و هریک از این قسمت‌ها نیز به تعداد رشته‌های مطلوب تقسیم می‌گردد. نمونه‌ای از مقاطع رشته ای در شکل (۴-۵) آورده شده است [26].



شکل (۴-۵) نمونه ای از مقاطع رشته ای [26]

<sup>1</sup> Fier Section

#### ۴-۸-۲ تعریف تیرها و ستون ها

برای تعریف این اعضا از المان تیر-ستون غیرخطی، `dispBeamColumn` با پلاستیسیته گسترده<sup>۱</sup> استفاده شده است.

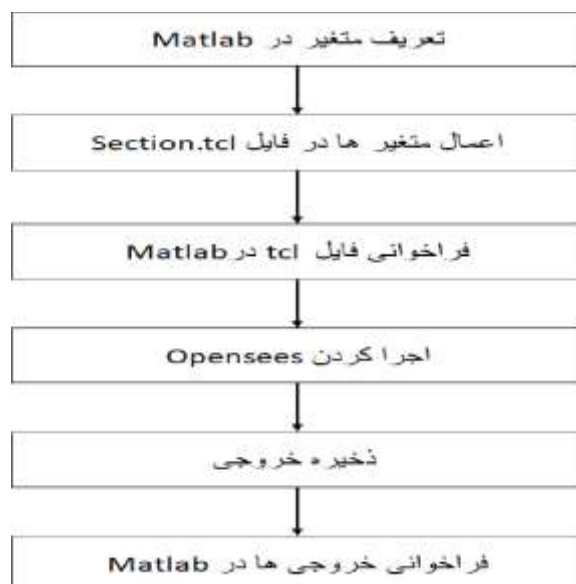
#### ۴-۸-۳ تعریف بادبندها و کابلها

با استفاده از دستور `Element Truss`، اعضای بادبندی ایجاد می شود.

از آنجاییکه اتصالات، ساده هستند برای مدلسازی از فنرهایی با سختی بالا در دو جهت انتقالی و سختی در حد صفر در جهت دورانی استفاده شده است.

#### ۴-۹ روند لینک متلب و اپنسیس

به منظور لینک دو نرم افزار `Matlab` و `Opensees` تعریف متغیر شامل (موقعیت، سطح مقطع و نیروی پیش تنیدگی) در این دو نرم افزار مطابق فلوجارت زیر صورت می پذیرد که این روند تا رسیدن به شرط پایان الگوریتم ادامه میابد.



شکل (۴-۶) روند لینک متلب و اپنسیس

<sup>1</sup> Extensive plasticity

## ۴-۱۰ معرفی مدل

در این پایان نامه قاب های فولادی ساده با استفاده از کابل های پیش تنیده و تعداد دهانه ۴ و با طول دهانه های ۳، ۳/۵، ۴، ۴/۵ و ۵ متری و همچنین تعداد طبقات ۳، ۸ و ۱۲ مهاربندی می شود. این سازه ها خود نماینده سازه های کوتاه مرتبه، میان مرتبه و بلند مرتبه هستند. در این پژوهش ابتدا سازه ها توسط نرم افزار Opensees تحلیل شده و سپس توسط ارتباط دادن این برنامه به نرم افزار بهینه یابی Matlab و استفاده از الگوریتم فراابتکاری<sup>۱</sup> ژنتیک مدل ها بهینه یابی می شوند. به این ترتیب نیروی پیش تنیدگی بهینه کابل ها، قطر بهینه و همچنین آرایش بهینه آن ها در سازه های منتخب بدست می آید. لازم به ذکر است که در این پایان نامه حالات بهینه بادبند گذاری را در دو حالت بادبند گذاری در دهانه روی هم (از باب اجرایی) و همچنین بادبند گذاری در دهانه های دلخواه (بهترین آرایش ممکن) مورد بررسی و بهینه یابی قرار داده شده است. برای پیاده سازی این روند لازم است مصالح کابل، مقطع و وجود یا عدم وجود کابل در دهانه به صورت پارامتری تعریف شود. همچنین خروجی اپنسیس نیز در یک فایل جداگانه ذخیره شود و از طریق متلب فراخوانی شود.

## ۴-۱۰-۱ مشخصات مصالح مورد استفاده

مشخصات مصالح فولادی مورد استفاده مطابق جدول زیر می باشد:

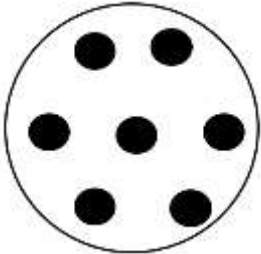
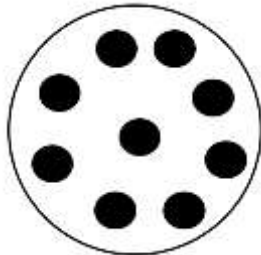
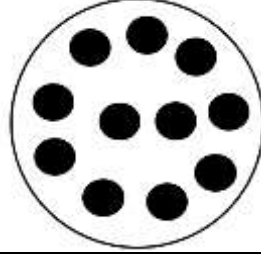
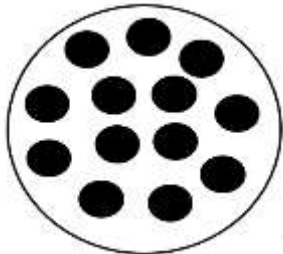
جدول (۴-۱) مشخصات مصالح فولادی

فاکتور مصالح	مقدار	واحد
$E_s$	$2 \times 10^6$	$\text{Kg/cm}^2$
$W$	۷۸۵۰	$\text{Kg.f/m}^3$
$m$	۸۰۰	$\text{Kg / m}^3$
$\nu$	0/3	--
$f_y$	۲۴۰۰	$\text{Kg / cm}^2$
$f_u$	۳۷۰۰	$\text{Kg / cm}^2$

<sup>۱</sup> Genetic Algorithm

## ۴-۱۰-۲ مشخصات کابل های مورد استفاده

جدول (۴-۲) مشخصات کابل های مورد استفاده [20]

Type of Cable	Tendons	Initial Stress	E	
	7#32	1480 N/mm <sup>2</sup>	210000 N/mm <sup>2</sup>	کابل شماره ۱
	9#32	1530 N/mm <sup>2</sup>	210000 N/mm <sup>2</sup>	کابل شماره ۲
	11#32	1680 N/mm <sup>2</sup>	210000 N/mm <sup>2</sup>	کابل شماره ۳
	13#32	1740 N/mm <sup>2</sup>	210000 N/mm <sup>2</sup>	کابل شماره ۴

## ۴-۱۰-۳ بارگذاری ثقلی

جدول (۳-۴) بارگذاری ثقلی قاب ها

بار زنده	اجزاء	بار مرده
kg/m <sup>2</sup>		kg/m <sup>2</sup>
۲۰۰	طبقات	۵۰۰
	دیوار	۱۰۰

## ۴-۱۰-۴ لیست مقاطع مورد استفاده

جدول (۴-۴) مقاطع مورد استفاده

	مقاطع ستون	مقاطع تیر
۳ طبقه	Box 280*280*16	IPE 300
	Box 260*260*12.5	IPE 270
	Box 220*220*10	IPE 240
۸ طبقه	Box 380*380*20	IPE 330
	Box 320*320*17.5	IPE 300
	Box 260*260*16	IPE 270
	Box 220*220*12	IPE 240
۱۲ طبقه	Box 450*450*25	IPE 400
	Box 450*450*20	IPE 360
	Box 380*380*20	IPE 330
	Box 380*380*17.5	IPE 300

## ۴-۱۱ تعریف متغیرها

در تمامی زبان های برنامه نویسی ابتدا باید تمامی متغیرهای بکار رفته در برنامه را معرفی نمود. در این برنامه

یک ماژول مختص تعریف تمامی متغیرها اعم از برداری و تانسورها، به همراه فایل های خروجی به نام

DefineVariable در نظر گرفته شده است.

## ۴-۱۲ گرفتن داده های ورودی

برای ورود داده های مورد نیاز یک مسئله در این برنامه دو ماژول جداگانه تعریف شده که عبارت اند از:

GetData-۱

GetData-GA -۲

GetData-۱ در این ماژول ابتدا اطلاعات مربوط به سازه اعم از تعداد گرهها، المانها، تعداد درجات آزادی هر گره و ... را دریافت میکند. پس از آن در ساب روتینهای جداگانه مختصات تمامی گرهها شامل  $x, y$  و  $z$  ماتریس همبند هر المان به همراه نوع ماده ی سازنده ی المان مربوطه (در صورت یکسان نبودن ساختار المانهای تشکیل دهنده ی سازه)، درجاتی که بارگذاری شده اند و مقدار بار وارده را ثبت میکند.

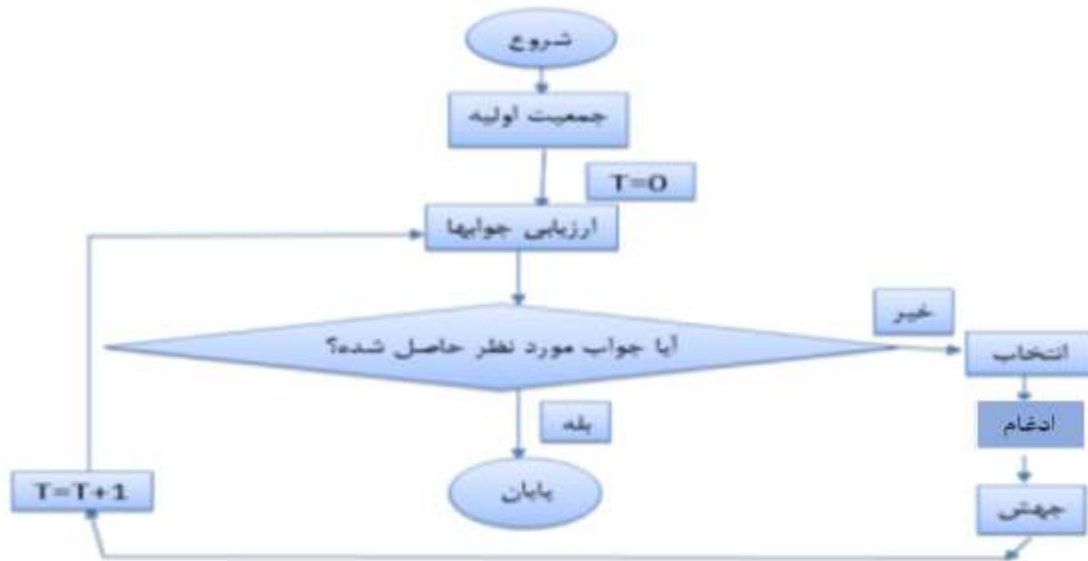
GetData-GA -۲ این ماژول داده هایی مثل تعداد زیررشته های هر کروموزوم، تعداد تکرار برنامه، نرخ ادغام، نرخ جهش و این قبیل اطلاعات مربوط به فرآیند GA را دریافت می کند.

## ۴-۱۳ روند کلی بهینه یابی با الگوریتم ژنتیک

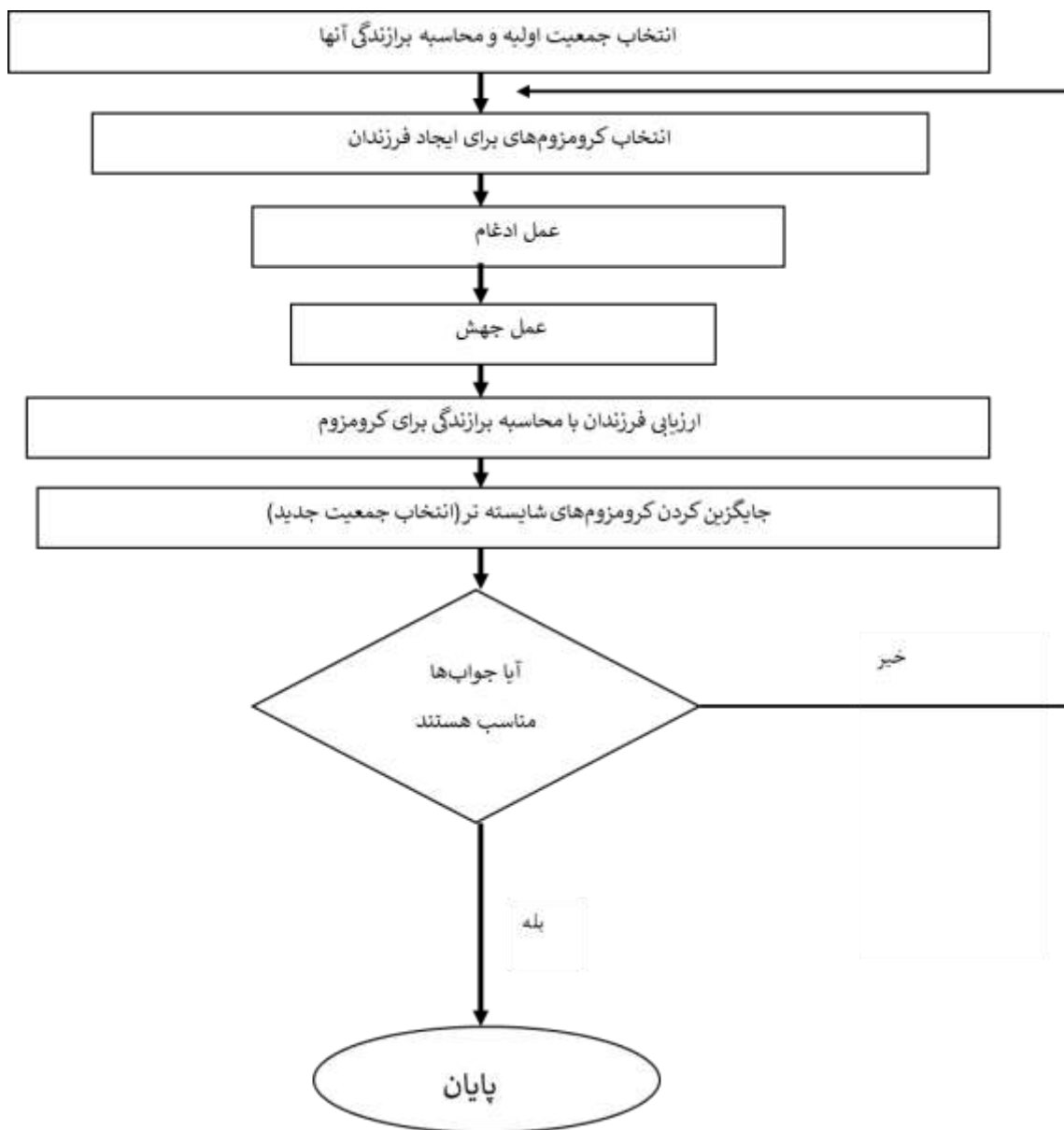
قبل از این که یک الگوریتم ژنتیکی بتواند اجرا شود ابتدا باید کدگذاری (یا نمایش) مناسبی برای مسئله مورد نظر پیدا شود. معمولی ترین شیوه نمایش کروموزومها در الگوریتم ژنتیک به شکل رشته های دودویی است. هر متغیر تصمیم گیری به صورت دودویی درآمده و سپس با کنار هم قرار گرفتن این متغیرها کروموزوم ایجاد می شود. گرچه این روش گسترده ترین شیوه کدگذاری است اما شیوه های دیگری مثل نمایش با اعداد حقیقی در حال گسترش هستند. همچنین یک تابع شایستگی نیز باید ابداع شود تا به هر راه حل کدگذاری شده ارزشی را نسبت دهد.

در طی اجرا والدین برای تولید مثل انتخاب می شوند و با استفاده از عملگرهای ادغام و جهش با هم ترکیب می شوند تا فرزندان جدیدی تولید شوند. این فرآیند چندین برابر تکرار می شود تا نسل بعدی جمعیت

تولید شود. سپس این جمعیت بررسی می‌شود و در صورتی که ضوابط همگرایی آورده شوند، فرآیند فوق خاتمه می‌یابد. شکل (۷-۴) و (۸-۴) روند کلی الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهد.



شکل (۷-۴) کد برنامه مجازی الگوریتم ژنتیک ساده و فلوجارت آن



شکل (۴-۸) روند الگوریتم ژنتیک

#### ۴-۱۴ جمعیت اولیه

همان طور که در فصل دوم اشاره شد برای بهینه یابی به روش GA ابتدا نیاز به تولید تصادفی یک جمعیت اولیه داریم. تعداد کروموزوم‌های موجود در این جمعیت اختیاری است و هر چه تعداد بیشتری در نظر بگیریم، فضای جستجو گسترده تر و امکان رسیدن به طرح بهینه ی مطلوب بیشتر خواهد بود. البته هر چه جمعیت اولیه بیشتر باشد روند بهینه یابی کندتر می شود.

برای تولید یک کروموزوم تصادفی در این برنامه ابتدا به تعداد زیررشته ی تشکیل دهنده ی آن عدد تصادفی طبق رابطه (۴-۲۷) تولید می کنیم.

$$[A] = [a_1, a_2, \dots, a_N] ; a_i \in S ; i=1, \dots, N \quad (27-4)$$

$$F_1 = \sum \rho A_i L_i ; F_2 = \sum \rho_i ; F(X) = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 \quad (28-4)$$

$\rho_i$ : نیروی پیش تنیدگی کابل

$\rho$ : وزن مخصوص کابل

$\alpha_1$  و  $\alpha_2$ : ضرایب وزنی

$F_1$ : تابع وزن ;  $F_2$ : تابع نیروی پیش تنیدگی

$F(X)$ : تابع هدف

$A_i$ : سطح مقطع کابل

$L_i$ : طول کابل

$A$ : حاوی مجموعه ای از اعداد صحیح است که به عنوان متغیرهای طراحی (نیروی پیش تنیدگی و آرایش بهینه) در نظر گرفته می شود.

#### ۴-۱۵ گدشایی (برگرداندن کد به مقدار اولیه)

پس از تشکیل جمعیت اولیه، برای تعیین مقادیر تابع هدف، جریمه، تابع هدف اصلاح شده و در نهایت میزان شایستگی مربوط به هر کروموزوم، باید زیررشته های آن کروموزوم را به عددی در مبنای ده بازگردانیم تا مقادیر توابع فوق برای هر رشته را محاسبه کنیم.

#### ۴-۱۶ تابع پنالنتی یا جریمه

در یک سازه، تنش اعضا ناشی از بارگذاری باید در محدوده مجاز و قابل قبول قرار داشته باشد. این مقادیر بر اساس آیین نامه های طراحی تعیین می شوند. در روند بهینه یابی در صورتی که تنش عضو در محدوده مجاز قرار نداشته باشد بر اساس رابطه (۴-۲۹) جریمه به آن اعمال می شود.

پس از تحلیل سازه، تغییر مکان گره های سازه محاسبه می شود. در صورتی که تغییر مکان عضو  $i$  ام در محدوده مجاز نباشد، بر اساس رابطه (۴-۳۰) جریمه به آن اعمال می شود.

$$G1 = \begin{cases} g_{i1}(A) = 0 & \text{if } \frac{p_{iu}}{\Phi p_{in}} - 1 \leq 0 ; i = 1, \dots, Net \\ g_{i1}(A) = \frac{p_{iu}}{\Phi p_{in}} - 1 & \text{if } \frac{p_{iu}}{\Phi p_{in}} > 0 ; i = 1, \dots, Net \end{cases} \quad (۴-۲۹)$$

$$(۴-۳۰)$$

$$G2 = \begin{cases} g_{i2}(A) = 0 & \text{if } \frac{\Delta_i}{\Delta_i^{all}} - 1 \leq 0 ; i = 1, \dots, Ne \\ g_{i2}(A) = \frac{\Delta_i}{\Delta_i^{all}} - 1 & \text{if } \frac{\Delta_i}{\Delta_i^{all}} - 1 > 0 ; i = 1, \dots, Ne \end{cases}$$

$g_{i1}$ : میزان نقض تنش ستون

$p_{iu}$ : تنش عضو  $i$  ام

$$\Phi = 0/9$$

$p_{in}$ : تنش مجاز

$g_{i2}$ : میزان نقض قید تغییر مکان

$\Delta_i$ : مقدار تغییر مکان گره  $i$  ام

$\Delta_i^{all}$ : مقدار تغییر مکان مجاز درجه  $i$  ام  $0/025h$

$h$ : ارتفاع طبقه

$Ne$ : تعداد گره های سازه

مقدار تغییر مکان هدف را می توان از روابط موجود در FEMA 360 بدست آورد. برای فرض اولیه در نرم افزار SAP2000 مقدار آن را ۰/۰۴ ارتفاع ساختمان در نظر می گیرند. در این پایان نامه مقدار تغییر مکان هدف ۰/۰۵ ارتفاع ساختمان در نظر گرفته شده است.

در نهایت تابع هدف اصلاح شده و شایستگی به صورت زیر خواهند بود:

(32-4)

$$\Phi(X) = F(X) + \beta(G1 + G2)$$

$$F_{fitness}(X) = [\Phi_{max}(X) + \Phi_{min}(X)] - \Phi(X) \quad (32-4)$$

$\beta$ : ضرایب وزنی

$\Phi(X)$ : تابع هدف اصلاح شده

$F(X)$ : تابع هدف

$G1$  و  $G2$ : توابع پناستی

$F_{fitness}$ : مقدار شایستگی هر عضو

$\Phi_{max}$ : حداکثر مقدار تابع هدف اصلاح شده در جمعیت جاری

$\Phi_{min}$ : حداقل مقدار تابع هدف اصلاح شده در جمعیت جاری

#### ۴-۱۷ فرآیند انتخاب، ادغام و جهش

در این پایان نامه برای انتخاب از روش چرخ گردان استفاده شده است. به این صورت که ابتدا یک رشته با یک احتمال انتخاب شده و با تقسیم بر احتمال کل مقدار تابع شایستگی هر رشته مشخص می شوند و با توجه به شایستگی هر رشته احتمال انتخاب آنها معلوم می شود به این معنا که هر رشته که قطاع بزرگتری را در دایره به خود اختصاص دهد احتمال انتخاب شدن آن هم بیشتر می شود. در انتها کروموزوم های انتخاب شده اصطلاحاً وارد استخر تولیدمثل می شوند. در این مرحله نوبت به فرآیند ادغام می رسد. ابتدا بایستی در یک حلقه برای تمامی کروموزوم های انتخاب شده یک عدد تصادفی بین صفر و یک انتخاب کرده و با نرخ ادغام مقایسه نمود. در صورتیکه عدد تصادفی به دست آمده کوچکتر از نرخ ادغام باشد، آن کروموزوم وارد فرآیند ادغام می شود. سپس

به تعداد اعضای جمعیت، با توجه طول رشته ها تک نقطه ی تصادفی انتخاب کرده و کروموزوم های والد وارد فرآیند ادغام می شوند، در انتها وارد فرآیند جهش می شویم. به این صورت که در یک حلقه، برای یکایک بیت های هر کروموزوم به صورت جداگانه یک عدد تصادفی انتخاب کرده و با نرخ جهش مقایسه می کنیم، در صورتی عدد تصادفی از نرخ جهش کوچکتر باشد، آن بیت تغییر کرده و در غیر این صورت بدون تغییر باقی می ماند. پس از اتمام فرآیند جهش جمعیت فرزندان کامل می شود.

#### ۴-۱۸ شرط خاتمه

با تکمیل فرآیند عملگرهای GA کروموزوم های فرزند تولید شده را مجدداً رمزگشایی کرده و طرح بهینه ی مربوط به هر رشته تولید می شود. با تعیین جواب های بهینه روند تعیین تابع پناستی تا شایستگی را تکرار کرده و بهترین کروموزوم موجود در میان فرزندان شناسایی می شود. در بخش پایانی برنامه، آرایش کابل ها و نیروی پیش تنیدگی و شماره کابل مربوط به هر المان کروموزوم برتر را به عنوان طرح بهینه ی جمعیت حاضر به نمایش گذاشته می شود. در صورتیکه شرط خاتمه (در این پایان نامه تعداد دفعات تکرار روند بهینه یابی) ارضا شده باشد. روند برنامه متوقف شده و آخرین طرح به عنوان طرح بهینه معرفی می شود [28].

#### ۴-۱۹ پارامترهای GA

#### ۴-۱۹-۱ پارامترهای GA سه طبقه

جدول (۴-۵) پارامترهای GA سه طبقه

۱۰۰	اندازه جمعیت
۵۰	تعداد تکرار برنامه
0/9	نرخ ادغام
0/005	نرخ جهش
تک نقطه ای	عملگر ادغام
چرخ گردان	روش انتخاب
۸	$\beta$

## ۴-۱۹-۲ پارامترهای GA هشت طبقه

جدول (۴-۶) پارامترهای GA هشت طبقه

۱۰۰	اندازه جمعیت
۱۵۰	تعداد تکرار برنامه
0/9	نرخ ادغام
0/005	نرخ جهش
تک نقطه ای	عملگر ادغام
چرخ گردان	روش انتخاب
۸	$\beta$

## ۴-۱۹-۳ پارامترهای GA دوازده طبقه

جدول (۴-۷) پارامترهای GA دوازده طبقه

۱۰۰	اندازه جمعیت
۲۰۰	تعداد تکرار برنامه
0/9	نرخ ادغام
0/005	نرخ جهش
تک نقطه ای	عملگر ادغام
چرخ گردان	روش انتخاب
۸	$\beta$

## ۴-۲۰ صحت سنجی

قبل از هرگونه مدلسازی لازم است در ابتدا برای اطمینان از صحیح بودن مدل ها و قابل اعتماد بودن آن ها؛ مدل سازی را مطابق با خصوصیات و جزئیات یک مقاله و یا نرم افزار دیگر مورد بررسی قرار داده و خروجی آن ها را با هم بررسی و مقایسه نمود. چنان چه اختلاف بین آن ها اندک باشد مدل های آینده نیز دارای اعتبار خواهد بود. از آنجایی که یکی از خروجی های مد نظر منحنی های ظرفیت می باشد، چنانچه تطابق بین منحنی های مدل سازی و مدل استخراجی مطلوب بوده و بعلاوه اختلاف سطح زیر منحنی ها ناچیز باشد، مدل سازی مطلوب ارزیابی

شده و دارای اعتبار است. برای این منظور دو مثال زیر مورد ارزیابی قرار گرفته است که مثال ۱ به یک مقاله اختصاص داشته و مثال ۲ مدل سازی یکی از مدل ها در نرم افزار SAP2000 و بررسی خروجی های دو نرم افزار SAP2000 و matlab با یکدیگر است که مشاهده می شود از دو نرم افزار مختلف خروجی های نزدیک به یکدیگر گرفته شده است.

#### ۴-۲۰-۱ مثال ۱

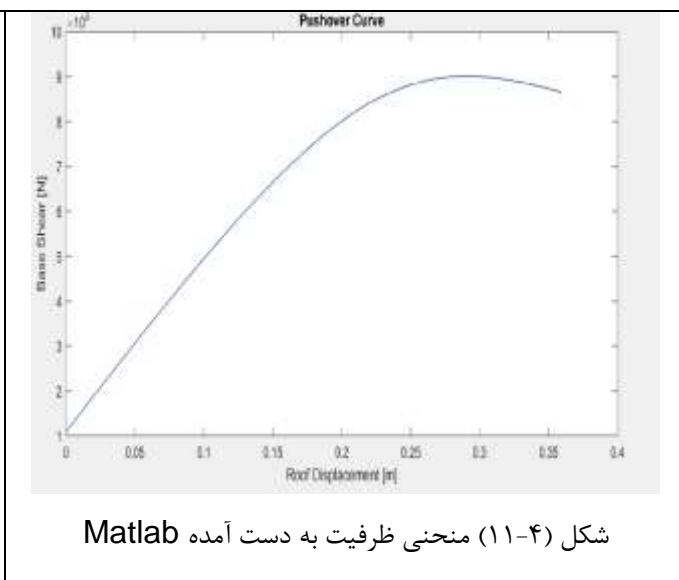
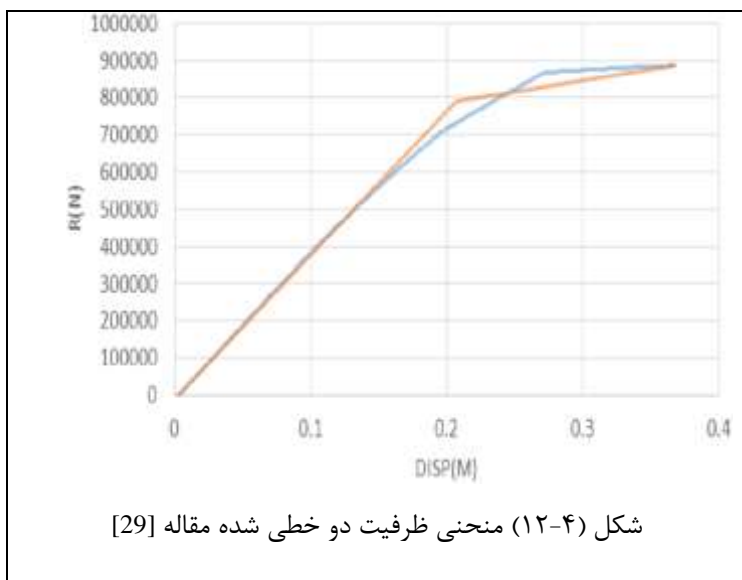
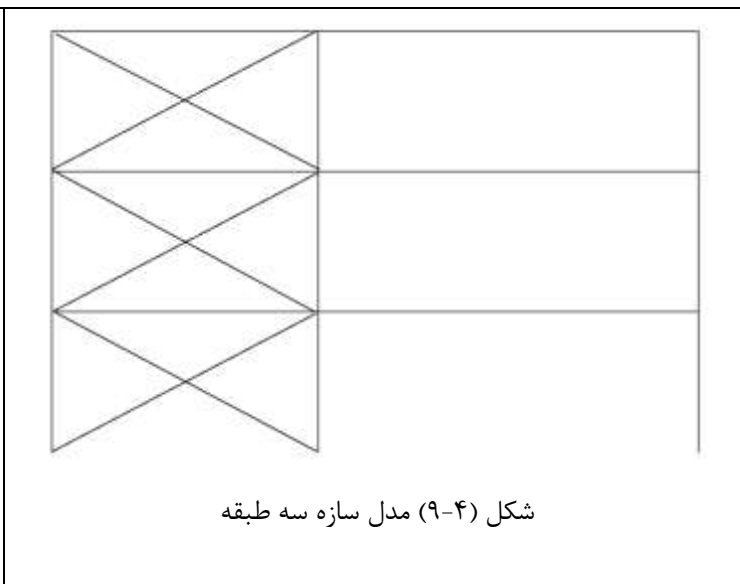
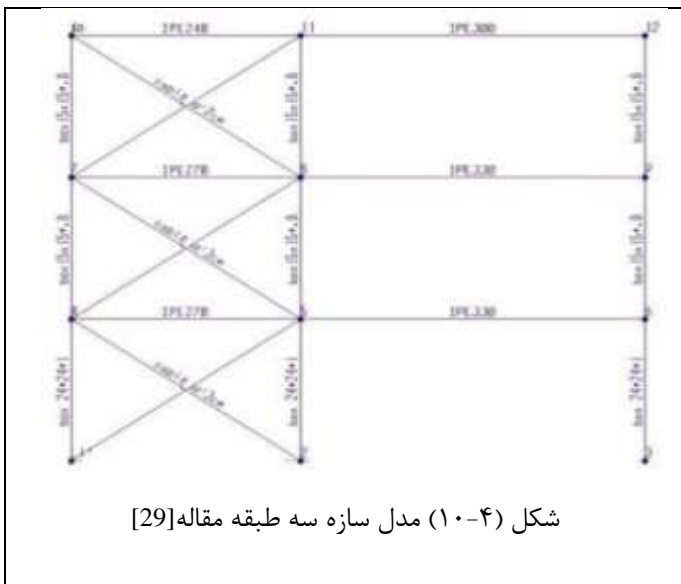
در این مثال قاب فولادی دو دهانه، سه طبقه دو بعدی با طول دهانه های سه و پنج متر را مطابق با خصوصیات مصالح، مقاطع و بارگذاری و ابعاد هندسی مرجع [29] مدلسازی کرده و منحنی ظرفیت به دست آمده را با منحنی ظرفیت مقاله مورد نظر بررسی و مشاهده می شود درصد اختلاف منحنی ها بسیار اندک بوده و لذا مدل ها مورد اعتبار هستند.

جدول (۴-۸) مقاطع مورد استفاده

مقاطع بادبند	مقاطع ستون	مقاطع تیر
کابل شماره ۱	Box 150*150*8	IPE 240
	Box 240*240*10	IPE 270
		IPE 300
		IPE 330

جدول (۴-۹) مشخصات مصالح و بارگذاری

پارامتر	مقدار عددی
مدول الاستیسیته	230 Gpa
تنش تسلیم فولاد	420Mpa
بار مرده	30KN/m
بار زنده	20KN/m



به کمک برنامه Arean سطح زیر منحنی شکل های (۴-۱۱) و (۴-۱۲) پس از محاسبه، برای منحنی اصلی و منحنی مدل شده؛ به ترتیب 1963/72 و 2056/20 می باشد. در نتیجه اختلاف سطح زیر منحنی ها برابر 4/45 درصد بوده که کمتر از ۵ درصد مجاز است و مدل ساخته شده ارای اعتبار است.

## ۴-۲۰-۲ مثال ۲

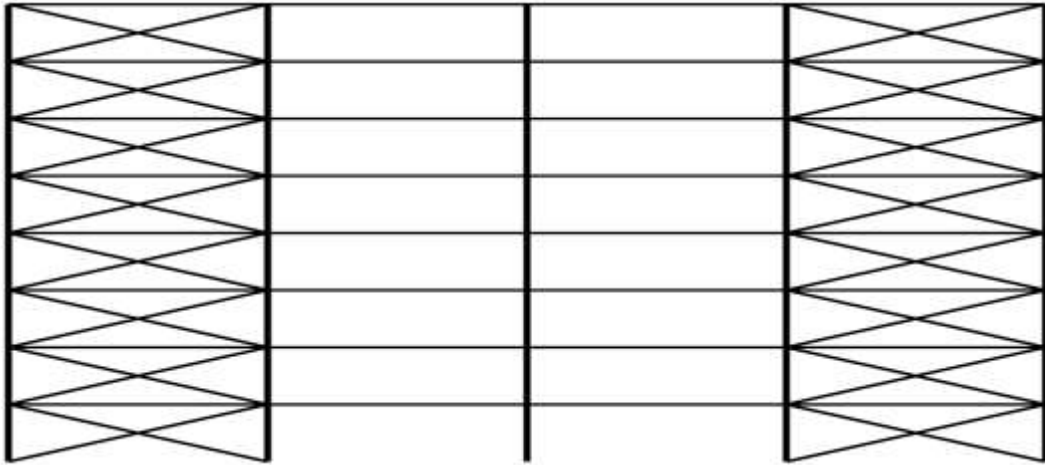
در این مثال مدل B-O-8-5 را که به مهاربند گذاری روی هم در سازه ۸ طبقه اختصاص دارد را مطابق مقاطع و بارگذاری این مدل در نرم افزار SAP2000 مدل سازی کرده و منحنی ظرفیت به دست آمده از این نرم افزار را با منحنی خروجی به دست آمده از Matlab مورد مقایسه و مشاهده می شود که منحنی حاصل از هر دو حالت به یک دیگر نزدیک و مدل ها مورد اعتبار هستند.

جدول (۴-۱۰) مقاطع مورد استفاده

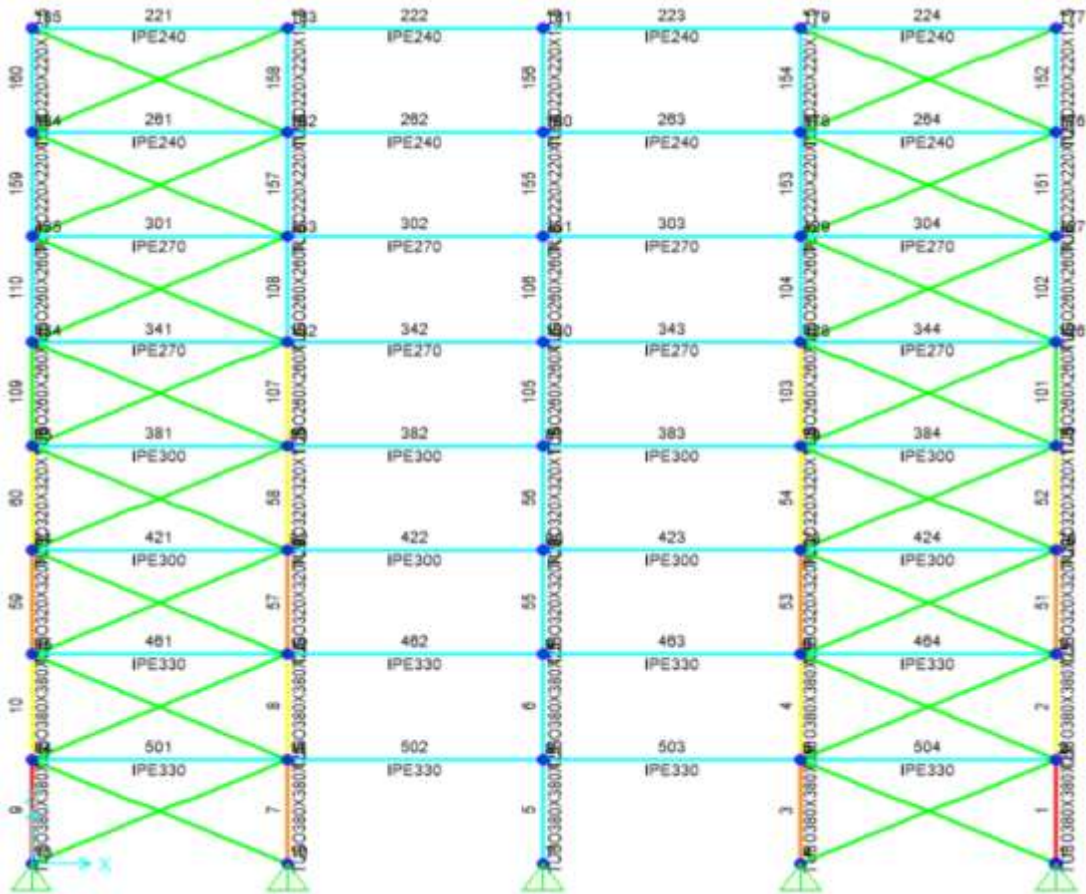
مقاطع بادبند	مقاطع ستون	مقاطع تیر
کابل شماره ۱	Box 380*380*20	IPE 330
کابل شماره ۲	Box 320*320*17.5	IPE 300
کابل شماره ۳	Box 260*260*16	IPE 270
کابل شماره ۴	Box 220*220*12	IPE 240

جدول (۴-۱۱) مشخصات مصالح و بارگذاری

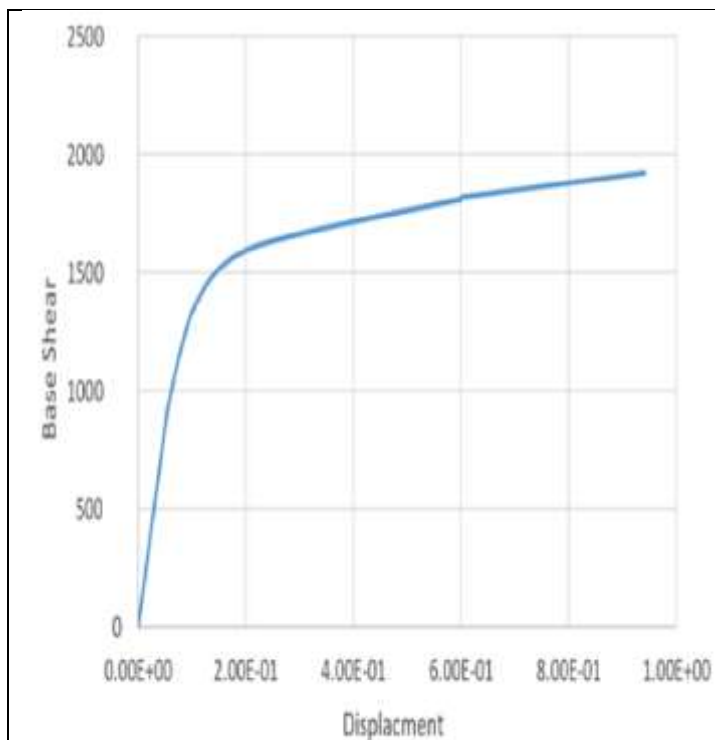
پارامتر	مقدار عددی
مدول الاستیسیته	230 Gpa
تنش تسلیم فولاد	420Mpa
بار مرده	500kg/m <sup>2</sup>
بار زنده	200kg/m <sup>2</sup>
بار دیوار	100kg/cm <sup>2</sup>



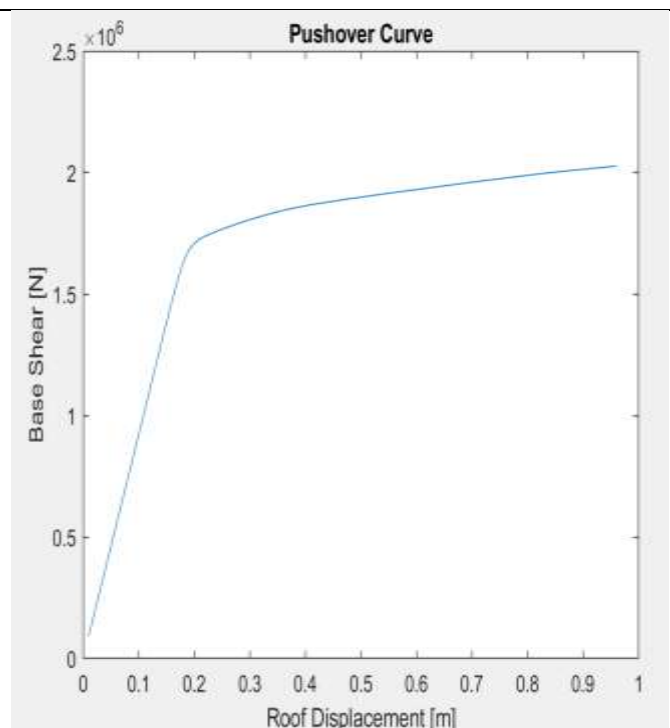
شکل (۴-۱۳) آرایش مهاربند گذاری به دست آمده Matlab



شکل (۴-۱۴) آرایش مهاربند گذاری و مقاطع به دست آمده SAP2000



شکل (۴-۱۶) منحنی ظرفیت به دست آمده SAP2000



شکل (۴-۱۵) منحنی ظرفیت به دست آمده Matlab

به کمک برنامه Arean سطح زیر منحنی شکل های (۴-۱۵) و (۴-۱۶) پس از محاسبه، برای منحنی اصلی و منحنی مدل شده؛ به ترتیب  $1711/83$  و  $1648/24$  می باشد. در نتیجه اختلاف سطح زیر منحنی ها برابر  $3/85$  درصد بوده که کمتر از ۵ درصد مجاز است و مدل ساخته شده ارای اعتبار است.

### ۴-۲۰-۳ مثال ۳

در این مثال قاب فولادی چهار دهانه پنج طبقه دو بعدی را مطابق با خصوصیات مصالح، مقاطع و بارگذاری و ابعاد هندسی مرجع [31] مدلسازی کرده و نمودار تاریخچه کاهش وزن و حالت بهینه بادبند گذاری را رسم کرده و با هم مقایسه می کنیم. جدول (4-12) مشخصات مصالح و بارگذاری و جدول (4-۱۳) مقاطع مورد استفاده را نشان می دهد.

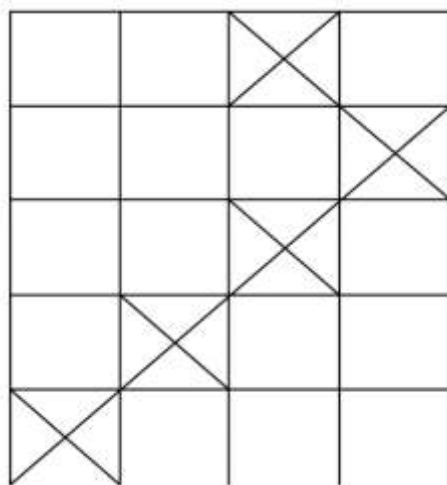
شکل (۴-۱۷) نیز حالت بهینه بادبند گذاری قاب هندسی تحت بررسی را نمایش می دهد.

جدول (۴-۱۲) مشخصات مصالح و بارگذاری

پارامتر	مقدار عددی
نرخ ادغام	۱
نرخ جهش	۰/۰۰۵
مدول الاستیسیته	230 Gpa
تنش تسلیم فولاد	420Mpa
بار مرده	30KN/m
بار زنده	20KN/m

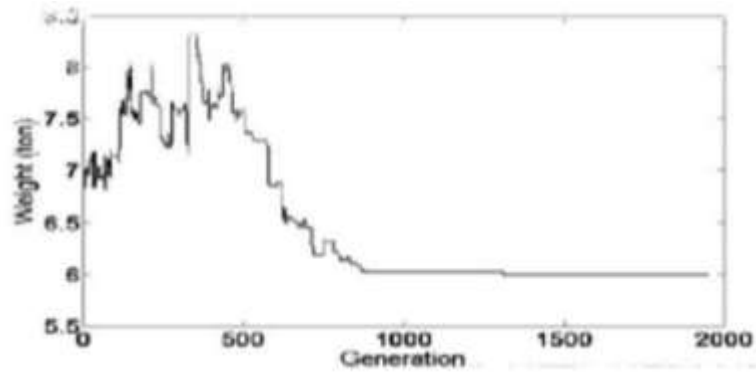
جدول (۴-۱۳) مقاطع مورد استفاده

مقاطع ستون	مقاطع بادبند
Box 280*280*20	2UNP140
Box 300*300*18	2UNP160
Box 320*320*18	



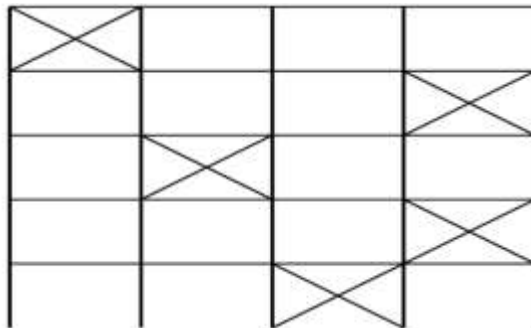
شکل (۴-۱۷) حالت بهینه بادبندگذاری قاب هندسی تحت بررسی [31]

در شکل (۴-۱۸) نمودار تاریخچه کاهش وزن نمونه بررسی شده در مقاله مورد نظر نمایش داده شده است.

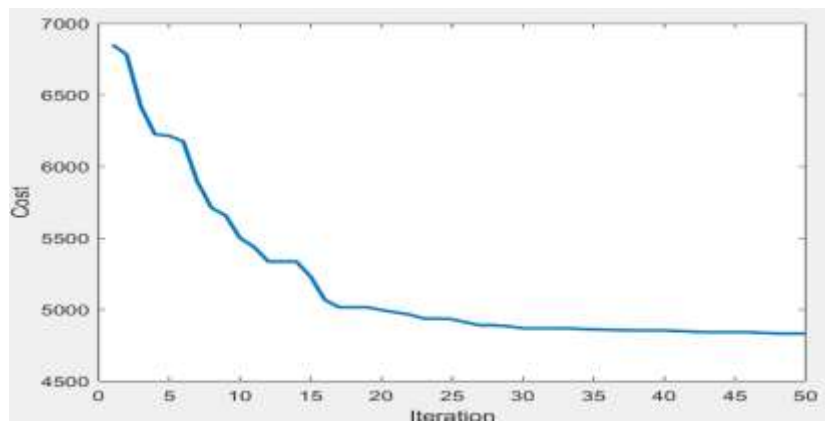


شکل (۴-۱۸) نمودار تاریخچه کاهش وزن نمونه [31]

حال قاب موجود را در کد موجود شبیه سازی کردیم که نمودار تاریخچه کاهش وزن و حالت بهینه بادبندگذاری زیر به دست آمد.



شکل (۴-۱۹) حالت بهینه بادبندگذاری قاب هندسی شبیه سازی شده



شکل (۴-۲۰) نمودار تاریخچه کاهش وزن

همانطور که مشاهده می شود؛ قاب بهینه شده در کد موجود توانسته وزن نهایی سازه را به شکل بهتری کاهش

دهد.



# فصل پنجم

## خروجی‌های نرم‌افزار

و

## تجزیه و تحلیل داده‌ها

## ۵-۱ پیشگفتار

بهینه یابی سازه های مسئله ای مهم در طراحی مهندسی است که در دهه های اخیر مورد توجه قرار گرفته است و تکنیک ها و الگوریتم های متفاوتی ایجاد و مورد استفاده قرار گرفته است. غالباً هدف طراحی بهینه قاب های فولادی، کمینه کردن وزن قاب با تعیین سبک ترین مقاطع ممکن است به طوری که طرح بهینه قیود آیین نامه ای را ارضا کند.

سازه های ساختمانی تحت اثر نیروهای ناشی از زلزله دچار تغییر مکان می شوند. متداول ترین روش کنترل تغییر مکان در سازه های فولادی که معمولاً از نوع جانبی هستند، مهاربندها می باشند که به شکل های گوناگون اجرا می شوند.

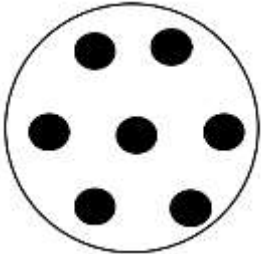
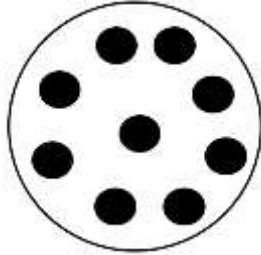
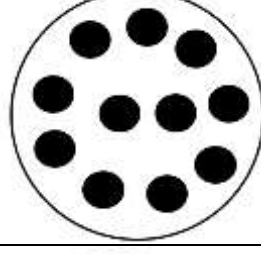
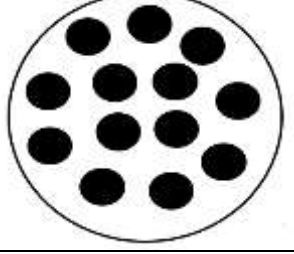
در سیستم مهاربندی هم محور، بادبندها از محل تقاطع تیر و ستون عبور می نمایند. این سیستم دارای سختی جانبی بسیار بالایی بوده و به علت اینکه نیروهای جانبی توسط اعضا به صورت محوری منتقل می شوند، سیستمی اقتصادی هست. انتخاب طرح مناسبی برای جانمایی بادبندها در ارتفاع مسئله ی مهمی است که مورد توجه مهندسان قرار می گیرد و معمولاً با توجه به تجربه انتخاب می شود، در این پژوهش با نوشتن برنامه بهینه یابی ضمن تعیین قطر و نیروی پیش تنیدگی مناسب مهاربندی کابلی، موقعیت بهینه آن نیز مورد مطالعه قرار گرفته است.



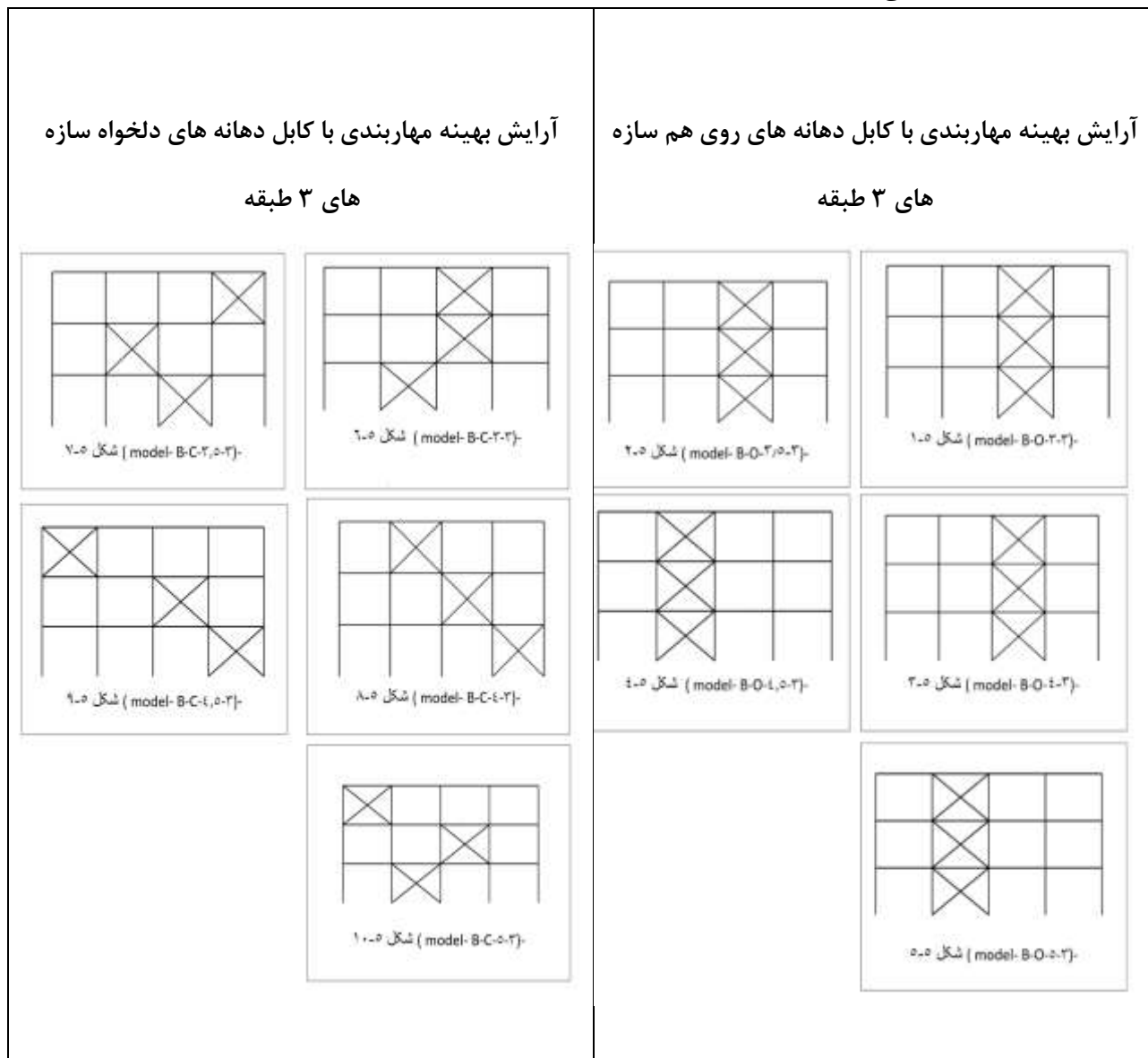
### ۳-۵ آرایش بهینه مهاربند گذاری با کابل

همانطور که در بخش ۴-۱۰-۲ نیز اشاره شد برای بهینه یابی از کابل های ۷، ۹، ۱۱ و ۱۳ رشته ای استفاده است که مشخصات آن ها مجددا یادآوری می شود:

جدول (۲-۵) مشخصات کابل های مورد استفاده [20]

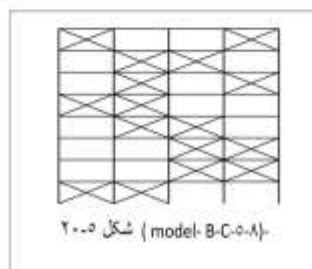
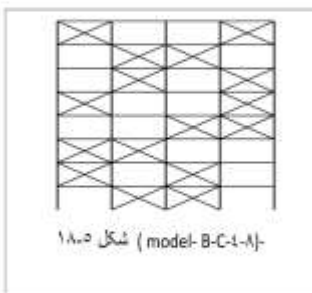
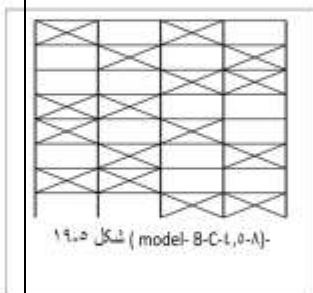
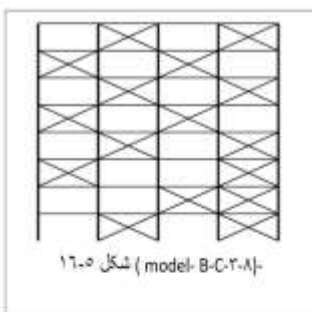
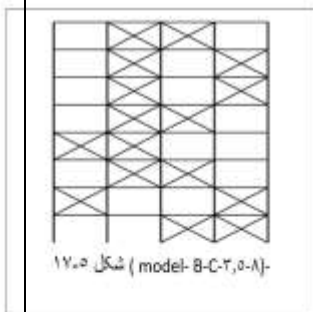
Type of Cable	Tendons	Initial Stress	E	
	7#32	1480 N/mm <sup>2</sup>	210000 N/mm <sup>2</sup>	کابل شماره ۱
	9#32	1530 N/mm <sup>2</sup>	210000 N/mm <sup>2</sup>	کابل شماره ۲
	11#32	1680 N/mm <sup>2</sup>	210000 N/mm <sup>2</sup>	کابل شماره ۳
	13#32	1740 N/mm <sup>2</sup>	210000 N/mm <sup>2</sup>	کابل شماره ۴

آنچنان که در فصول گذشته نیز اشاره شد، در این پایان نامه ابتدا سازه ها توسط نرم افزار Opensees طراحی و سپس با ارتباط دادن این نرم افزار به نرم افزار Matlab مقاطع کابل ها، نیروی پیش تنیدگی آن ها همچنین آرایش مطلوب بهینه یابی شده است، که در این بخش آرایش بهینه بدست آمده برای سازه های ۳، ۸ و ۱۲ طبقه در دهانه های متفاوت ۳، ۳/۵، ۴، ۴/۵ و ۵ متر نمایش داده می شود.



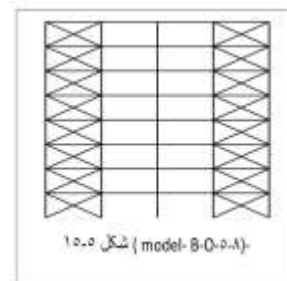
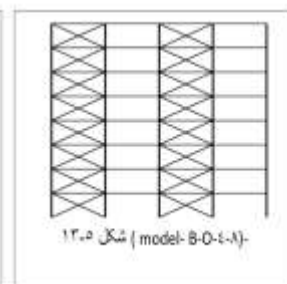
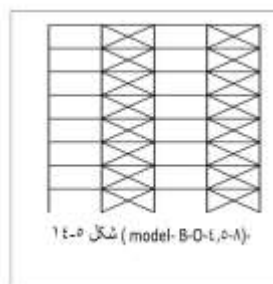
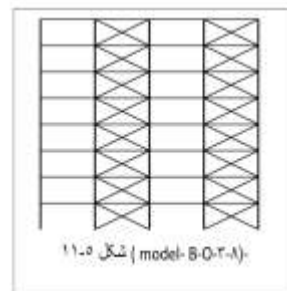
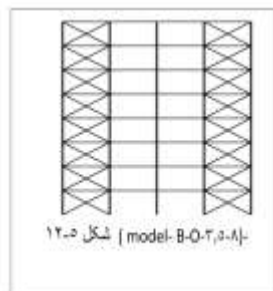
آرایش بهینه مهاربندی با کابل دهانه های دلخواه سازه های

### ۸ طبقه



آرایش بهینه مهاربندی با کابل دهانه های روی هم سازه

### های ۸ طبقه

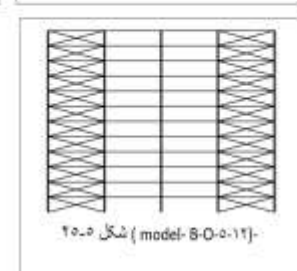
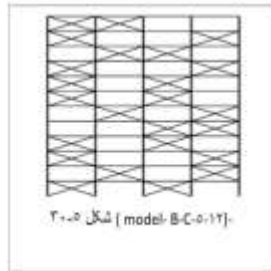
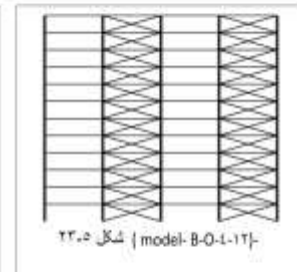
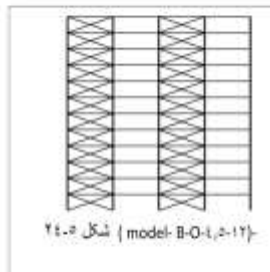
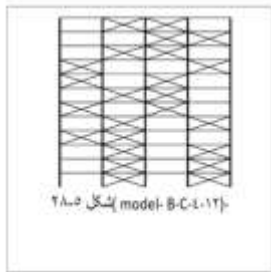
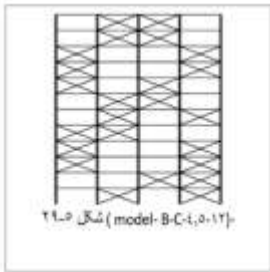
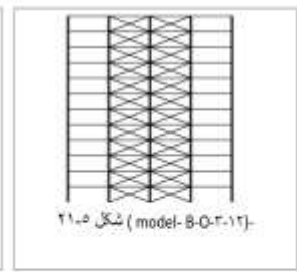
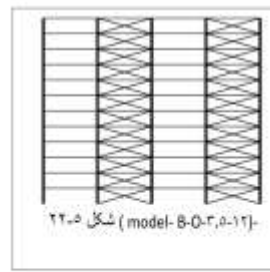
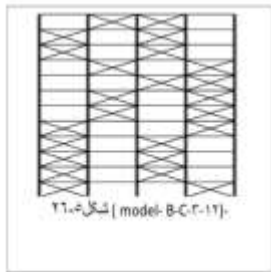
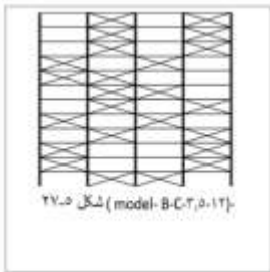


آرایش بهینه مهاربندی با کابل دهانه های دلخواه سازه های

آرایش بهینه مهاربندی با کابل دهانه های روی هم سازه

۱۲ طبقه

های ۱۲ طبقه



با نمایش آرایش بهینه مهاربند گذاری کابلی برای سازه های مورد بررسی درصد استفاده هر یک از دهانه ها برای مدل های مختلف در جدول زیر ارائه شده است:

➤ بررسی جانمایی بهینه کابل ها در سازه های سه طبقه

جدول ۵-۳- مقایسه جانمایی بهینه کابل ها

مهاربندی در دهانه های متفاوت	مهاربندی در دهانه های روی هم	
۱۰۰ در صد در دودخانه میانی	دهانه شماره ۳	دهانه ۳ متر
۶۶ در صد در دو دهانه میانی	دهانه شماره ۳	دهانه 3/5 متر
۶۶ در صد در دو دهانه میانی	دهانه شماره ۲	دهانه ۴ متر
۳۳ در صد در دو دهانه میانی	دهانه شماره ۳	دهانه 4/5 متر
۶۶ در صد در دو دهانه میانی	دهانه شماره ۲	دهانه ۵ متر

➤ بررسی جانمایی بهینه کابل ها در سازه های هشت طبقه

مهاربندی در دهانه های متفاوت	مهاربندی در دهانه های روی هم	
۴۳ در صد در دو دهانه میانی	دهانه شماره ۲ و ۴	دهانه ۳ متر
۶۲ در صد در دو دهانه میانی	دهانه شماره ۱ و ۴	دهانه 3/5 متر
۵۰ در صد در دو دهانه میانی	دهانه شماره ۱ و ۳	دهانه ۴ متر
۵۰ در صد در دو دهانه میانی	دهانه شماره ۲ و ۴	دهانه 4/5 متر
۵۶ در صد در دو دهانه میانی	دهانه شماره ۱ و ۴	دهانه ۵ متر

➤ بررسی جانمایی بهینه کابل ها در سازه های دوازده طبقه

مهاربندی در دهانه های متفاوت	مهاربندی در دهانه های روی هم	
۴۶ در صد در دو دهانه میانی	دهانه شماره ۲ و ۳	دهانه ۳ متر
۵۰ در صد در دو دهانه میانی	دهانه شماره ۲ و ۴	دهانه 3/5 متر
۵۸ در صد در دو دهانه میانی	دهانه شماره ۱ و ۳	دهانه ۴ متر
۴۶ در صد در دو دهانه میانی	دهانه شماره ۱ و ۳	دهانه 4/5 متر
۴۶ در صد در دو دهانه میانی	دهانه شماره ۱ و ۴	دهانه ۵ متر

همانطور که در جدول ۵-۳ مشاهده شد، در سازه های ۳ طبقه تنها یک دهانه برای مهاربند گذاری کفایت کرده است، اما در سازه های ۸ و ۱۲ طبقه دو دهانه برای مهاربند گذاری نیاز بوده است، ضمن آنکه در مهاربندی سازه های ۸ و ۱۲ طبقه با دهانه های روی هم با طول دهانه ۵ متر دو دهانه کناری به عنوان دهانه های بهینه مهاربندی انتخاب شده اند، اما در مدل های سه طبقه با مهاربندی در دهانه های روی هم هیچ یک از دهانه های کناری بعنوان دهانه بهینه مهاربندی انتخاب نشده اند.

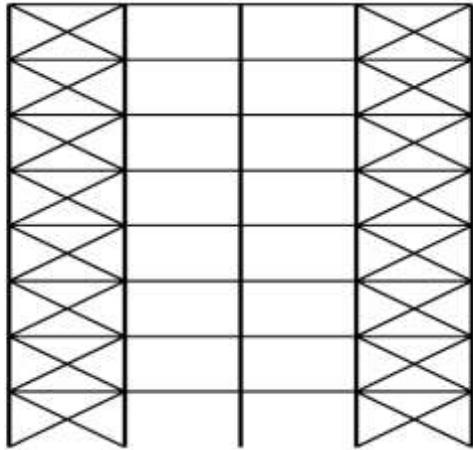
#### ۵-۴ آرایش بهینه مهاربند گذاری با ناودانی

برای اثبات مزیت مهاربندی با کابل پیش تنیده بر مهاربند های مرسوم اقدام به مهاربندی با ناودانی برای سازه های ۳، ۸ و ۱۲ طبقه با طول دهانه ۴ متری شد، که در این فرآیند نیز همانند بخش های قبلی ابتدا سازه ها توسط نرم افزار Opensees طراحی و سپس توسط نرم افزار Matlab بهینه یابی شدند، برای این منظور از ناودانی های با مقاطع زیر استفاده شده است، سایر شرایط قاب مشابه قاب دارای کابل می باشد.

جدول ۵-۴- مشخصات ناودانی UNP

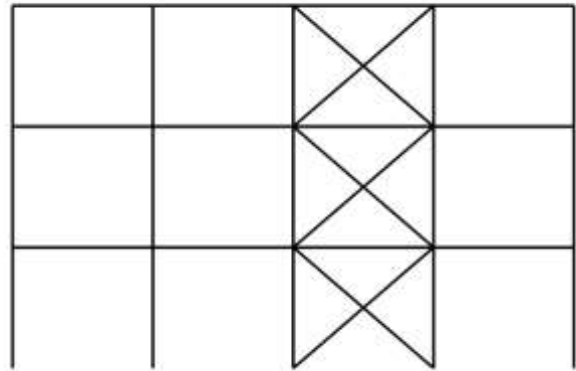
نام مقطع	UPN80	UPN100	UPN120	UPN140	UPN160	UPN180	UPN200	UPN220	UPN240
مساحت	11/36	13/84	17/45	20/9	24/63	28/64	32/96	38/33	43/27
طبقه	۳ طبقه	۳ طبقه	۳ طبقه	۸ طبقه	۸ طبقه	۸ طبقه	۱۲ طبقه	۱۲ طبقه	۱۲ طبقه

آرایش بهینه مهاربندی با ناودانی سازه ۸ طبقه



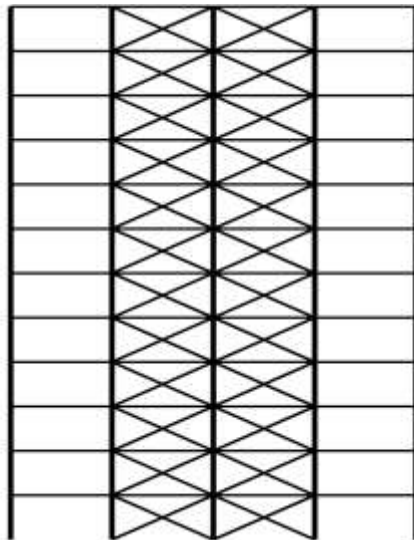
شکل ۵-۳۲- آرایش مهاربندی با ناودانی سازه ۸ طبقه

آرایش بهینه مهاربندی با ناودانی سازه ۳ طبقه



شکل ۵-۳۱- آرایش مهاربندی با ناودانی سازه ۳ طبقه

آرایش بهینه مهاربندی با ناودانی سازه ۱۲ طبقه

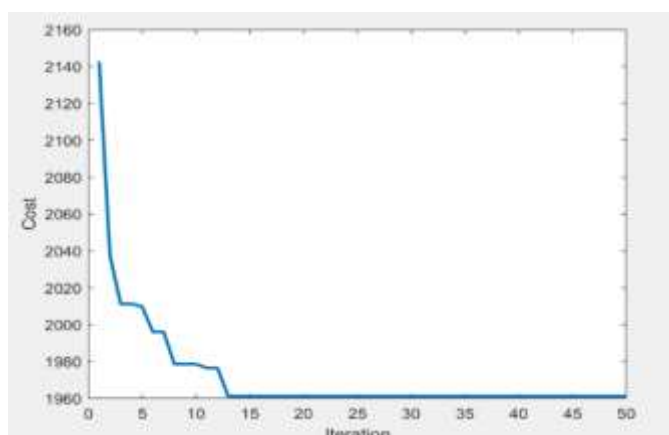


شکل ۵-۳۳- آرایش مهاربندی با ناودانی سازه ۱۲ طبقه

## ۵-۵ نتایج مدل های ۳، ۸ و ۱۲ طبقه مهاربندی با کابل با طول دهانه ۴ متر

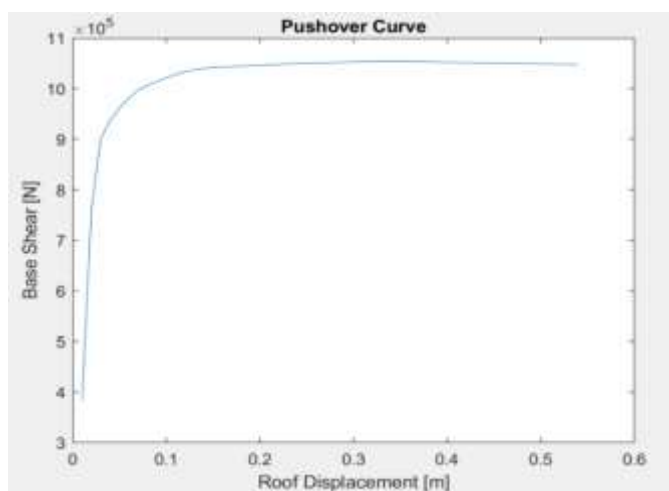
با مشاهده آرایش بهینه مهاربندی با کابل در دهانه های روی هم، مهاربندی با کابل در دهانه های دلخواه و مهاربندی با ناودانی اکنون در این بخش به ارائه نتایج بدست آمده از مدل های مختلف با دهانه ۴ متر اعم از نمودار همگرایی، نمودار برش پایه-جابجایی و جدول نیروی پیش تنیدگی پرداخته می شود و نتایج سایر مدل ها به اختصار در جداول بخش ۵-۳۶-۳ ارائه شده است.

## ۵-۵-۱ نتایج مدل ۳ طبقه با مهاربندی در دهانه های روی هم



شکل ۵-۳۴- نمودار همگرایی الگوریتم بهینه یابی مدل B-O-4-3

طبق شکل ۵-۳۴- ملاحظه می شود وزن بهینه قاب ۳ طبقه با مهاربندی در دهانه های روی هم در تکرار سیزدهم به میزان ۱۹۶۰ کیلوگرم حاصل شده است.



شکل ۵-۳۵- نمودار برش پایه - جابجایی مدل B-O-4-3

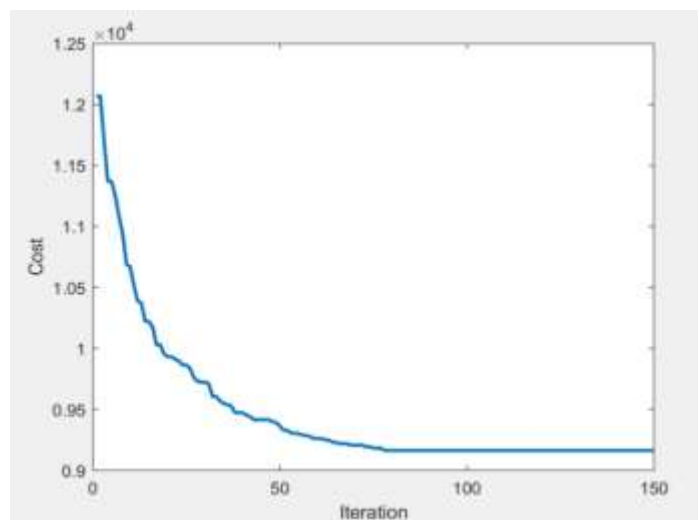
طبق شکل ۵-۳۵- مشاهده می شود سازه پس از تشکیل مفصل پلاستیک در نیروی برشی ۹۰۰ کیلونیوتن توانسته حالت ارتجاعی و به تبع آن پایداری خود را حفظ کند و پس از مدتی با اعمال نیرو با پیش روی در ناحیه غیر خطی از حالت ارتجاعی خارج شده است و بر اساس روش چوپرا که در بخش ۴-۳- توضیح داده شد ضریب رفتار بدست آمده برابر ۵/۰۹ است.

جدول ۵-۵- نتایج خروجی سازه ۳ طبقه مدل B-O-4-3

ردیف	1	2	3
شماره دهانه	11	7	3
شماره مقطع کابل	3	2	3
تنش اولیه کابل	1965	2346	2847
نسبت تنش موجود به تنش تسلیم	0/12	0/15	0/16

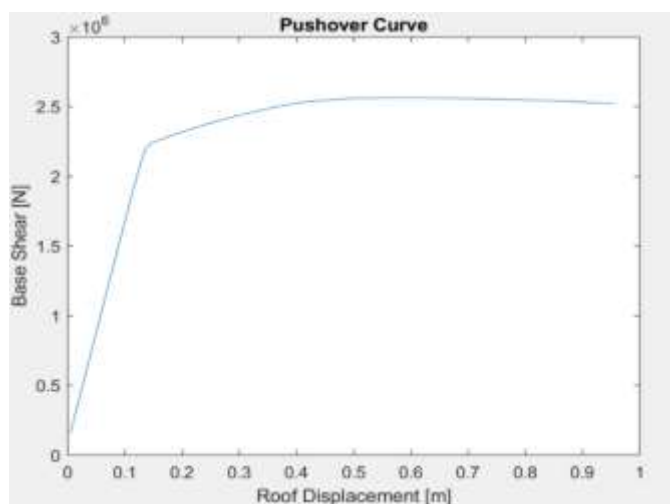
طبق جدول ۵-۵- مشاهده می شود که محدوده نسبت تنش کابل ها بین 0/12 - 0/16 تنش نهایی کابل است و همچنین با افزایش ارتفاع تنش اولیه کابل ها کمتر شده است.

### ۵-۵-۲ نتایج مدل ۸ طبقه با مهاربندی در دهانه های روی هم



شکل ۵-۳۶- نمودار همگرایی الگوریتم بهینه یابی مدل B-O-4-8

طبق شکل ۵-۳۶- ملاحظه می شود وزن بهینه قاب ۸ طبقه با مهاربندی در دهانه های روی هم در تکرار هفتادوپنجم به میزان ۹۳۲۰ کیلوگرم حاصل شده است.



شکل ۵-۳۷- نمودار برش پایه - جابجایی مدل B-O-4-8

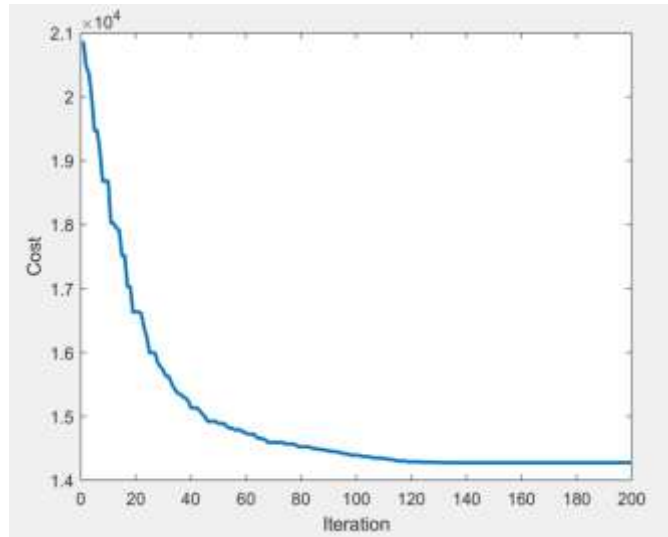
طبق شکل ۵-۳۷- مشاهده می شود سازه پس از تشکیل مفصل پلاستیک در نیروی برشی 2200 کیلونیوتن توانسته حالت ارتجاعی و به تبع آن پایداری خود را حفظ کند و پس از مدتی با اعمال نیرو با پیش روی در ناحیه غیر خطی از حالت ارتجاعی خارج شده است و بر اساس روش چوپرا که در بخش ۴-۳- توضیح داده شد ضریب رفتار بدست آمده برابر 4/3 است.

جدول ۵-۶- نتایج خروجی سازه ۸ طبقه مدل B-O-4-8

ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
شماره دهانه	۱	۱۵	۱۷	۱۱	۹	۲۵	۲۷	۷	۳	۲۹	۲۱	۲۳	۵	۱۹	۳۱	۱۳
شماره مقطع کابل	3	1	1	1	3	3	4	3	4	2	1	2	4	1	2	2
تنش اولیه کابل	4497	3801	3603	4425	4173	2376	2133	4335	4125	1635	2934	2808	3246	2907	1659	3735
نسبت تنش موجود به تنش تسلیم	0/26	0/25	0/24	0/2	0/25	0/14	0/12	0/26	0/24	0/11	0/2	0/18	0/2	0/19	0/11	0/23

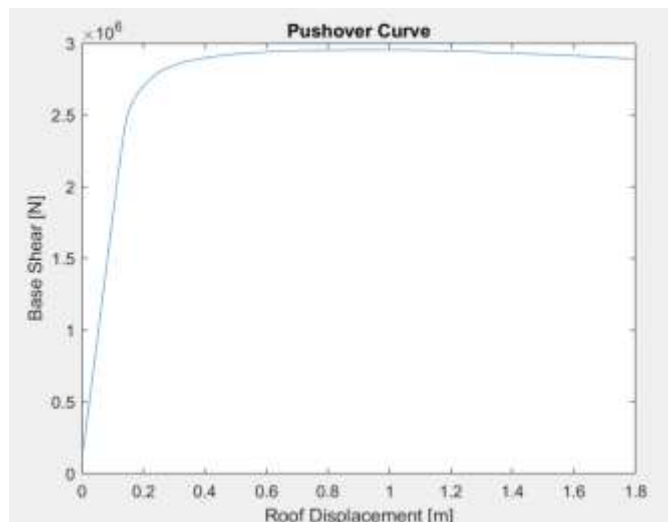
طبق جدول ۵-۶- مشاهده می شود که محدوده نسبت تنش کابل ها بین 0/26 - 0/11 تنش نهایی کابل است و همچنین با افزایش ارتفاع تنش اولیه کابل ها کمتر شده است.

### ۵-۵-۳ نتایج مدل ۱۲ طبقه با مهاربندی در دهانه های روی هم



شکل ۵-۳۸- نمودار همگرایی الگوریتم بهینه یابی مدل B-O-4-12

طبق شکل ۵-۳۸- ملاحظه می شود وزن بهینه قاب ۱۲ طبقه با مهاربندی در دهانه های روی هم در تکرار یکصد و بیستم به میزان ۱۴۲۵۰ کیلوگرم حاصل شده است.



شکل ۵-۳۹- نمودار برش پایه - جابجایی مدل B-O-4-12

طبق شکل ۵-۳۹- مشاهده می شود سازه پس از تشکیل مفصل پلاستیک در نیروی برشی 2500 کیلونیوتن توانسته حالت ارتجاعی و به تبع آن پایداری خود را حفظ کند و پس از مدتی با اعمال نیرو با پیش روی در ناحیه غیر خطی از حالت ارتجاعی خارج شده است و بر اساس روش چوپرا که در بخش ۴-۳- توضیح داده شد ضریب رفتار بدست آمده برابر 4/47 است.

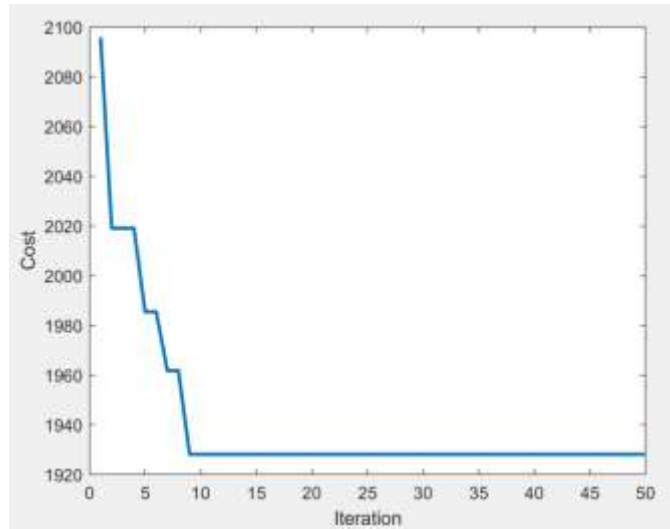
جدول ۵-۷- نتایج خروجی سازه ۱۲ طبقه مدل B-O-4-12

ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
شماره دهانه	۲۰	۳۰	۲۶	۱۴	۶	۱۰	۳۲	۴۴	۱۸	۸	۳۶	۲۲	۲	۲۸	۱۲	۴۰
شماره مقطع کابل	3	4	2	4	4	1	2	1	4	3	2	4	3	2	4	3
تنش اولیه کابل	۳۶۹۶	۳۲۷۰	۳۶۵۶	۴۱۰۰	۴۵۲۷	۲۹۷۲	۲۹۷۳	۱۹۷۳	۳۹۹۶	۴۷۳۲	۲۲۳۴	۳۵۸۷	۴۸۹۸	۳۷۵۲	۴۳۵۴	۱۷۲۵
نسبت تنش موجود به تنش تسلیم	0/22	0/19	0/24	0/23	0/26	0/2	0/19	0/13	0/23	0/28	0/15	0/21	0/32	0/24	0/25	0/1

ردیف	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
شماره دهانه	۳۸	۲۴	۱۶	۳۴	۴۲	۴۶	۴	۴۸
شماره مقطع کابل	4	3	3	3	3	1	2	1
تنش اولیه کابل	۱۹۲۳	۴۰۹۲	۴۳۵۹	۲۶۶۸	۲۱۹۴	۱۹۹۳	۴۸۷۴	۱۶۲۸
نسبت تنش موجود به تنش تسلیم	0/11	0/24	0/26	0/16	0/13	0/13	0/32	0/11

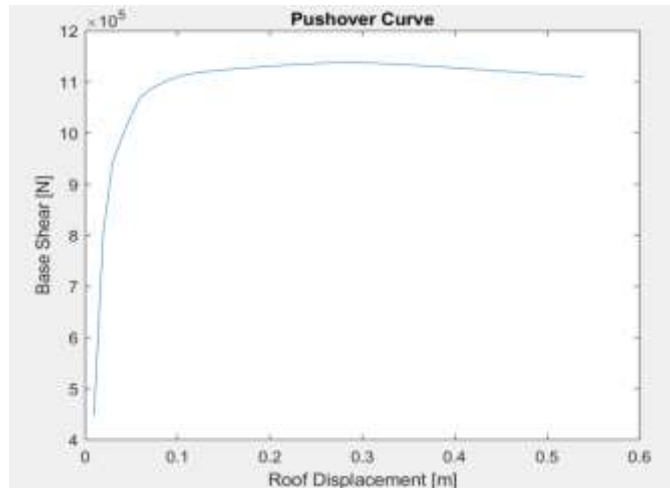
طبق جدول ۵-۷- مشاهده می شود که محدوده نسبت تنش کابل ها بین 0/1 - 0/32 تنش نهایی کابل است و همچنین با افزایش ارتفاع تنش اولیه کابل ها کمتر شده است.

### ۵-۵-۴ نتایج مدل ۳ طبقه با مهاربندی در دهانه های دلخواه



شکل ۵-۴۰- نمودار همگرایی الگوریتم بهینه یابی مدل B-C-4-3

طبق شکل ۵-۴۰- ملاحظه می شود وزن بهینه قاب ۳ طبقه با مهاربندی در دهانه های دلخواه در تکرار نهم به میزان ۱۹۳۰ کیلوگرم حاصل شده است.



شکل ۵-۴۱- نمودار برش پایه - جابجایی مدل B-C-4-3

طبق شکل ۵-۴۱- مشاهده می شود سازه پس از تشکیل مفصل پلاستیک در نیروی برشی 920 کیلونیوتن توانسته حالت ارتجاعی و به تبع آن پایداری خود را حفظ کند و پس از مدتی با اعمال نیرو با پیش روی در ناحیه غیر خطی از

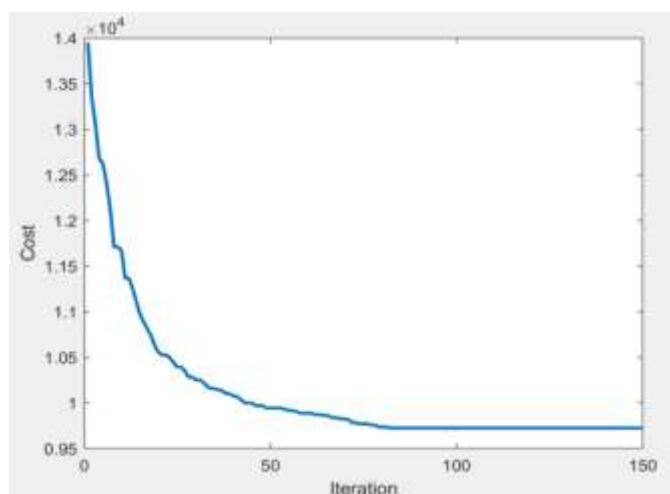
حالت ارتجاعی خارج شده است و بر اساس روش چوپرا که در بخش ۴-۳- توضیح داده شد ضریب رفتار بدست آمده برابر ۵/۲۴ است.

جدول ۵-۸- نتایج خروجی سازه ۳ طبقه مدل B-C-4-3

ردیف	1	2	3
شماره دهانه	4	10	7
شماره مقطع کابل	1	2	1
تنش اولیه کابل	۲۴۱۳	۱۹۶۱	۲۳۰۲
نسبت تنش موجود به تنش تسلیم	0/14	0/12	0/15

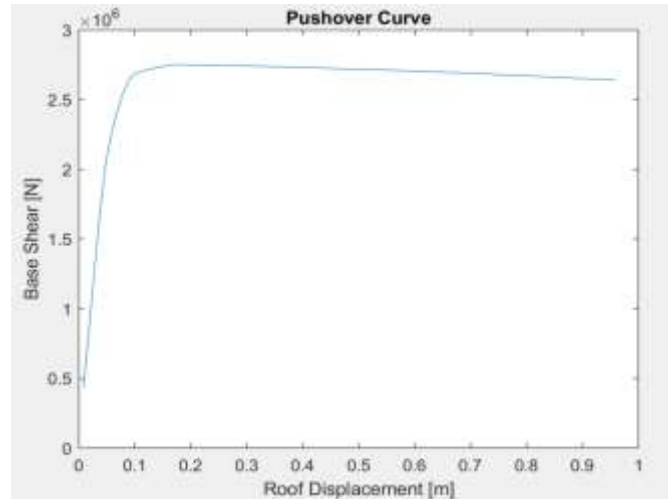
طبق جدول ۵-۸- مشاهده می شود که محدوده نسبت تنش کابل ها بین 0/12 - 0/15 تنش نهایی کابل است و همچنین با افزایش ارتفاع تنش اولیه کابل ها کمتر شده است.

### ۵-۵-۵ نتایج مدل ۸ طبقه با مهاربندی در دهانه های دلخواه



شکل ۵-۴۲- نمودار همگرایی الگوریتم بهینه یابی مدل B-C-4-8

طبق شکل ۵-۴۲- ملاحظه می شود وزن بهینه قاب ۸ طبقه با مهاربندی در دهانه های دلخواه در تکرار هشتمادم به میزان ۹۹۵۰ کیلوگرم حاصل شده است.



شکل ۵-۴۳- نمودار برش پایه - جابجایی مدل B-C-4-8

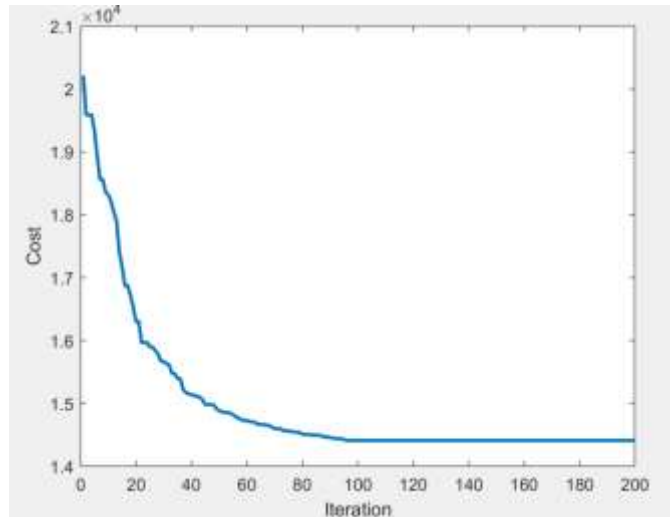
طبق شکل ۵-۴۳- مشاهده می شود سازه پس از تشکیل مفصل پلاستیک در نیروی برشی 2700 کیلونیوتن توانسته حالت ارتجاعی و به تبع آن پایداری خود را حفظ کند و پس از مدتی با اعمال نیرو با پیش روی در ناحیه غیر خطی از حالت ارتجاعی خارج شده است و بر اساس روش چوپرا که در بخش ۴-۳- توضیح داده شد ضریب رفتار بدست آمده برابر 4/9 است.

جدول ۵-۹- نتایج خروجی سازه ۸ طبقه مدل B-C-4-8

ردیف	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
شماره دهانه	32	5	20	17	16	24	29	9	15	27	22	10	3	26	7	2
شماره مقطع کابل	2	3	3	2	3	1	1	4	1	1	1	1	3	4	4	4
تنش اولیه کابل	۱۶۳۰	۳۹۰۴	۲۹۷۲	۲۹۹۵	۲۹۰۱	۲۳۱۴	۱۹۰۳	۳۵۷۶	۲۴۴۵	۲۰۷۴	۲۲۸۴	۳۳۱۱	۳۹۰۱	۲۷۷۸	۳۶۱۳	۳۹۲۱
نسبت تنش موجود به تنش تسلیم	0/11	0/23	0/18	0/19	0/17	0/16	0/13	0/21	0/16	0/14	0/15	0/22	0/23	0/16	0/21	0/22

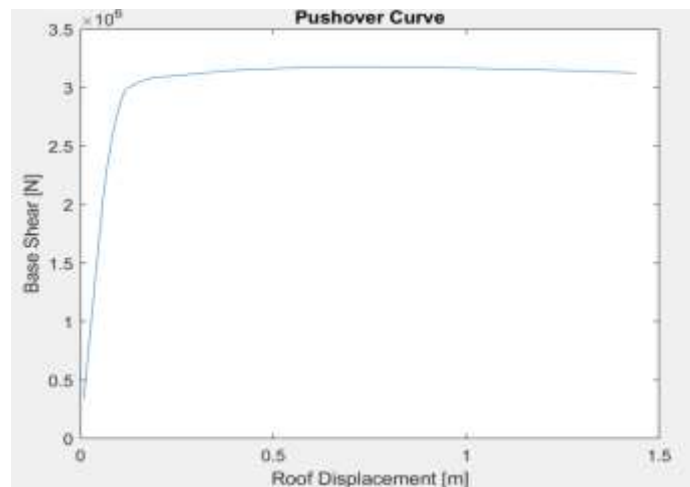
طبق جدول ۵-۹- مشاهده می شود که محدوده نسبت تنش کابل ها بین 0/11 - 0/23 تنش نهایی کابل است و همچنین با افزایش ارتفاع تنش اولیه کابل ها کمتر شده است.

### ۵-۵-۶ نتایج مدل ۱۲ طبقه با مهاربندی در دهانه های دلخواه



شکل ۵-۴۴- نمودار همگرایی الگوریتم بهینه یابی مدل B-C-4-12

طبق شکل ۵-۴۴- ملاحظه می شود وزن بهینه قاب ۱۲ طبقه با مهاربندی در دهانه های دلخواه در تکرار یکصدم به میزان ۱۴۲۰۰ کیلوگرم حاصل شده است.



شکل ۵-۴۵- نمودار برش پایه - جابجایی مدل B-C-4-12

طبق شکل ۵-۴۵- مشاهده می شود سازه پس از تشکیل مفصل پلاستیک در نیروی برشی 3000 کیلونیوتن توانسته حالت ارتجاعی و به تبع آن پایداری خود را حفظ کند و پس از مدتی با اعمال نیرو با پیش روی در ناحیه غیر خطی از

حالت ارتجاعی خارج شده است و بر اساس روش چوپرا که در بخش ۳-۴- توضیح داده شد ضریب رفتار بدست آمده برابر 5/13 است.

جدول ۵-۱۰- نتایج خروجی سازه ۱۲ طبقه مدل B-C-4-12

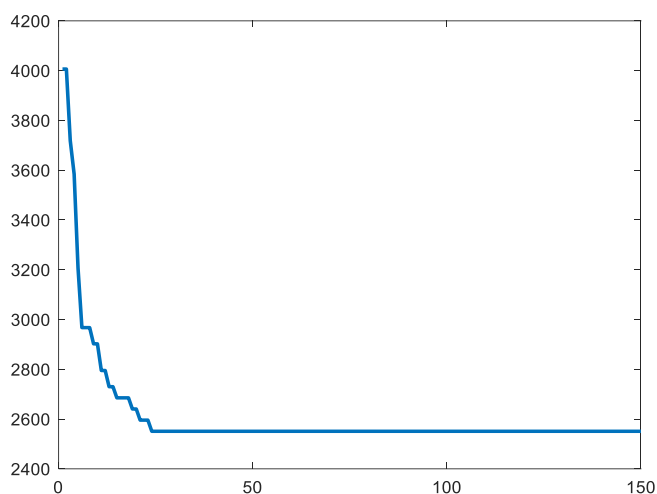
ردیف	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
شماره دهانه	10	8	38	36	13	21	46	27	33	29	6	4	47	44	23	20
شماره مقطع کابل	4	2	2	3	4	2	2	4	2	1	3	2	1	3	4	3
تنش اولیه کابل	۴۱۴۳	۴۳۴۱	۲۱۵۳	۲۱۸۵	۳۸۹۳	۳۲۸۲	۱۶۹۲	۳۷۶۷	۲۶۹۸	۲۷۹۳	۴۵۳۹	۴۶۹۱	۱۶۶۱	۱۶۸۳	۳۲۰۰	۳۴۱۷
نسبت تنش موجود به تنش تسلیم	0/24	0/28	0/14	0/13	0/22	0/21	0/11	0/22	0/18	0/19	0/27	0/31	0/11	0/1	0/18	0/2

ردیف	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
شماره دهانه	14	26	2	18	39	12	43	31
شماره مقطع کابل	4	2	3	2	2	2	1	2
تنش اولیه کابل	۳۸۹۹	۳۱۸۴	۴۶۹۶	۳۸۸۷	۱۹۲۷	۴۰۹۷	۱۸۸۹	۲۶۲۶
نسبت تنش موجود به تنش تسلیم	0/22	0/21	0/28	0/25	0/13	0/26	0/13	0/17

طبق جدول ۵-۱۰- مشاهده می شود که محدوده نسبت تنش کابل ها بین 0/1-0/31 تنش نهایی کابل است و همچنین با افزایش ارتفاع تنش اولیه کابل ها کمتر شده است.

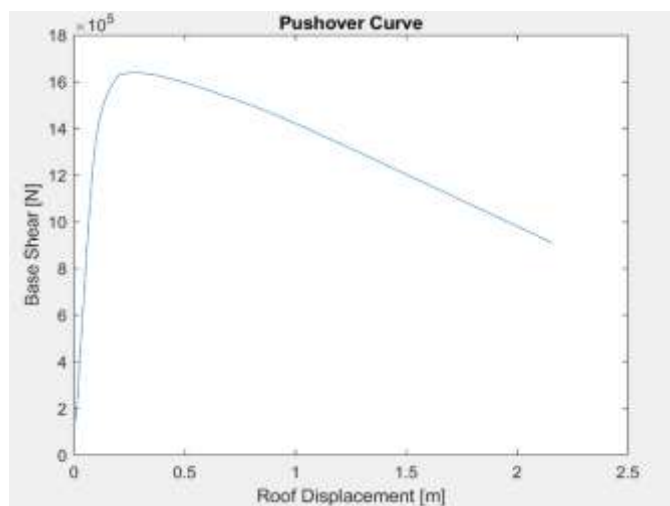
۵-۶ نتایج مدل های ۳، ۸ و ۱۲ طبقه مهاربندی با ناودانی با طول دهانه ۴ متر

۵-۶-۱ نتایج مدل ۳ طبقه با مهاربندی در دهانه های روی هم



شکل ۵-۴۶- نمودار همگرایی الگوریتم بهینه یابی سازه ۳ طبقه

طبق شکل ۵-۴۶- ملاحظه می شود وزن بهینه قاب ۳ طبقه با مهاربندی ناودانی در تکرار بیست و پنجم به میزان ۲۵۷۰ کیلوگرم حاصل شده است.

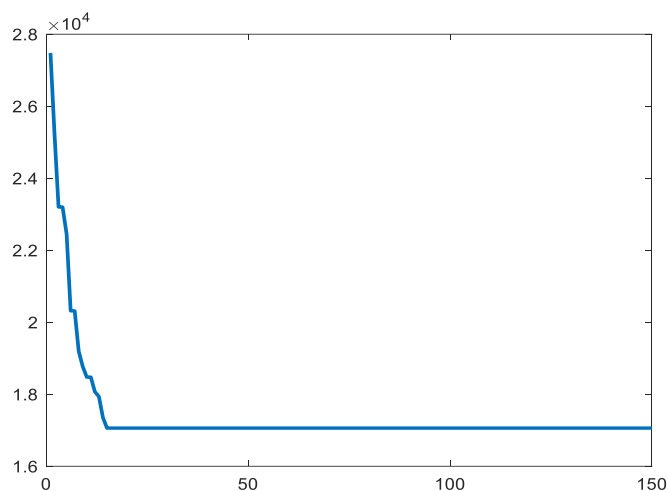


شکل ۵-۴۷- نمودار برش پایه - جابجایی مهاربند ۳ طبقه

طبق شکل ۵-۴۷- مشاهده می شود سازه پس از تشکیل مفصل پلاستیک در نیروی برشی 1600 کیلونیوتن توانسته حالت ارتجاعی و به تبع آن پایداری خود را حفظ کند و پس از مدتی با اعمال نیرو با پیش روی در ناحیه غیر خطی از

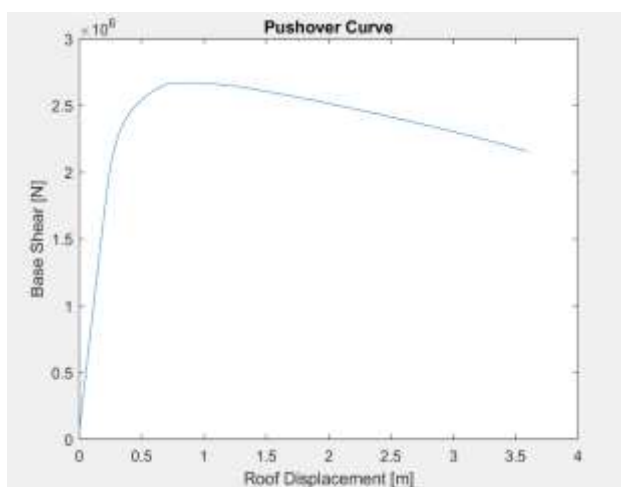
حالت ارتجاعی خارج شده است و بر اساس روش چوپرا که در بخش ۴-۳- توضیح داده شد ضریب رفتار بدست آمده برابر 3/24 است.

### ۵-۶-۲ نتایج مدل ۸ طبقه با مهاربندی در دهانه های روی هم



شکل ۵-۴۸- نمودار همگرایی الگوریتم بهینه یابی سازه ۸ طبقه

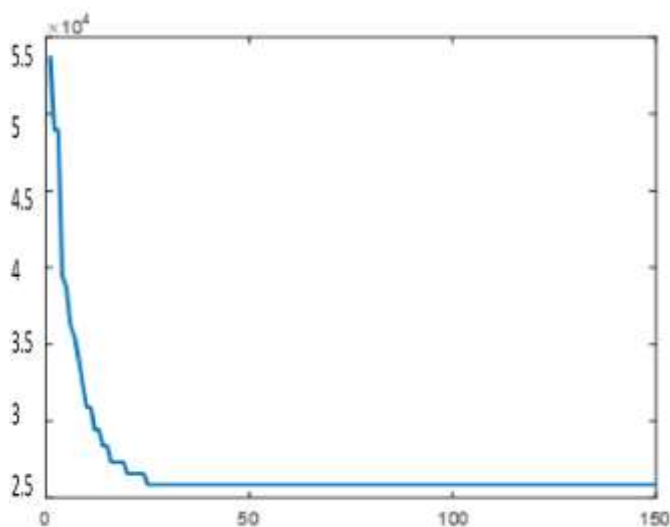
طبق شکل ۵-۴۸- ملاحظه می شود وزن بهینه قاب ۸ طبقه با مهاربندی ناودانی در تکرار بیست و سوم به میزان ۱۷۳۰۰ کیلوگرم حاصل شده است.



شکل ۵-۴۹- نمودار برش پایه - جابجایی مهاربند ۸ طبقه

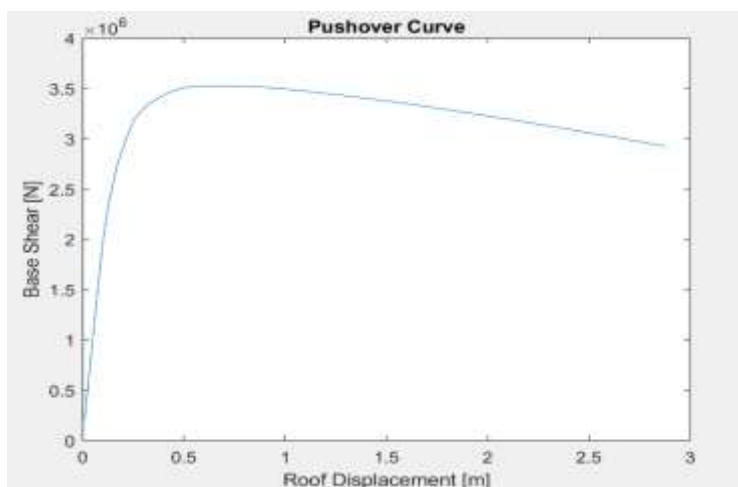
طبق شکل ۵-۴۹- مشاهده می شود سازه پس از تشکیل مفصل پلاستیک در نیروی برشی 2730 کیلونیوتن توانسته حالت ارتجاعی و به تبع آن پایداری خود را حفظ کند و پس از مدتی با اعمال نیرو با پیش روی در ناحیه غیر خطی از حالت ارتجاعی خارج شده است و بر اساس روش چوپرا که در بخش ۴-۳- توضیح داده شد ضریب رفتار بدست آمده برابر 3/2 است.

### ۵-۶-۳ نتایج مدل ۱۲ طبقه با مهاربندی در دهانه های روی هم



شکل ۵-۵۰- نمودار همگرایی الگوریتم بهینه یابی سازه ۱۲ طبقه

طبق شکل ۵-۵۰- ملاحظه می شود وزن بهینه قاب ۱۲ طبقه با مهاربندی ناودانی در تکرار سی ام به میزان ۲۶۱۰۰ کیلوگرم حاصل شده است.



شکل ۵-۵۱- نمودار برش پایه - جابجایی مهاربند 12 طبقه

طبق شکل ۵-۵۱- مشاهده می شود سازه پس از تشکیل مفصل پلاستیک در نیروی برشی 3490 کیلونیوتن توانسته حالت ارتجاعی و به تبع آن پایداری خود را حفظ کند و پس از مدتی با اعمال نیرو با پیش روی در ناحیه غیر خطی از حالت ارتجاعی خارج شده است و بر اساس روش چوپرا که در بخش ۴-۳- توضیح داده شد ضریب رفتار بدست آمده برابر 3/56 است.

## ۵-۷ مقایسه

با بررسی تفصیلی نتایج بدست آمده برای سازه های ۳، ۸ و ۱۲ طبقه با طول دهانه ۴ متر در بخش های گذشته، در این بخش برای جلوگیری از حجیم شدن پایان نامه به اختصار در جداول زیر ضریب رفتار، نسبت تنش ها و درصد استفاده از هر کابل در مدل های مختلف ارائه شده است.

## ۵-۷-۱ مقایسه ضریب رفتارها

➤ مهاربند کابلی

جدول ۵-۱۱- مقایسه ضریب رفتارها

مهار بندی در دهانه های دلخواه		مهاربندی در دهانه های روی هم		۳ طبقه
$W_{opt}(ton)$	R	$W_{opt}(ton)$	R	
1/61	5/88	1/62	5/39	طول دهانه ۳ متر
1/69	5/51	1/77	5/23	طول دهانه ۳/۵ متر
1/93	5/24	1/96	5/09	طول دهانه ۴ متر
1/88	5/18	1/95	4/74	طول دهانه ۴/۵ متر
2/10	4/61	2/10	4/65	طول دهانه ۵ متر

مهار بندی در دهانه های دلخواه		مهاربندی در دهانه های روی هم		۸ طبقه
$W_{opt}(ton)$	R	$W_{opt}(ton)$	R	
8/55	4/8	8/50	4/38	طول دهانه ۳ متر
9/40	4/75	9/56	4/35	طول دهانه ۳/۵ متر
9/97	4/9	9/32	4/30	طول دهانه ۴ متر
10/01	4/45	10/02	4/06	طول دهانه ۴/۵ متر
10/07	4/35	10/08	3/51	طول دهانه ۵ متر

مهار بندی در دهانه های دلخواه		مهاربندی در دهانه های روی هم		۱۲ طبقه
$W_{opt}(ton)$	R	$W_{opt}(ton)$	R	
12/85	5/34	12/90	4/48	طول دهانه ۳ متر

۱۳/۶۰	۵/۱۶	13/۶0	۴/۶۰	طول دهانه ۳/۵ متر
۱۴/۲۰	۵/۱۳	14/2۰	۴/۴۷	طول دهانه ۴ متر
۱۵/۶۰	۴/۹۵	15/۵0	۴/۲۶	طول دهانه ۴/۵ متر
۱۶/۰۰	۴/۷۲	16/10	۴/۰۴	طول دهانه ۵ متر

### ➤ مهاربند ناودانی

$W_{opt}(ton)$	R	طول دهانه ۴ متر
2/57	3/24	3 طبقه
17/3	3/20	۸ طبقه
۲۶/۱	3/56	۱۲ طبقه

با بررسی جدول ۵-۱۱- مشاهده می شود، برای قاب های فولادی ۳، ۸ و ۱۲ طبقه با طول دهانه های متفاوت، در حالت بهینه شده با مهاربندی کابلی پیش تنیده، ضریب رفتار در محدوده ۴-۵ بدست آمده است، اما در حالت مهاربندی با ناودانی ضریب رفتار در محدوده ۳-۴ بدست آمده که خود نشان مزیت کابل نسبت به مهاربندی های مرسوم دارد، همچنین در سازه ها با تعداد طبقات یکسان با افزایش طول دهانه ضریب رفتار کمتر شده است و همچنین حالت مهاربندی در دهانه های دلخواه که حالت بهینه مطلق است، ضریب رفتار بالاتری نسبت به حالت مهاربندی در دهانه های روی هم دارد.

### ۵-۷-۲ مقایسه نسبت تنش ها

#### ➤ محدوده نسبت تنش موجود به تنش نهایی در سازه های سه طبقه

جدول ۵-۱۲-محدوده نسبت تنش ها

مهاربندی در دهانه های متفاوت	مهاربندی در دهانه های روی هم	
0/12 – 0/13	0/12 – 0/13	دهانه ۳ متر
0/15 – 0/16	0/13 – 0/14	دهانه 3/5 متر
0/12 – 0/15	0/12 – 0/16	دهانه ۴ متر
0/14 – 0/18	0/17 - 0/2	دهانه 4/5 متر
0/13 – 0/18	0/15 – 0/17	دهانه ۵ متر

#### ➤ محدوده نسبت تنش موجود به تنش نهایی در سازه های هشت طبقه

مهاربندی در دهانه های متفاوت	مهاربندی در دهانه های روی هم	
0/11 – 0/24	0/1 – 0/28	دهانه ۳ متر
0/1 – 0/26	0/11 – 0/27	دهانه 3/5 متر
0/11 – 0/23	0/11 – 0/26	دهانه ۴ متر
0/1 – 0/22	0/12 – 0/25	دهانه 4/5 متر
0/1 – 0/27	0/12 – 0/28	دهانه ۵ متر

➤ محدوده نسبت تنش موجود به تنش نهایی در سازه های دوازده طبقه

مهاربندی در دهانه های متفاوت	مهاربندی در دهانه های روی هم	
0/11 – 0/3	0/12 – 0/31	دهانه ۳ متر
0/1 – 0/31	0/11 – 0/31	دهانه 3/5 متر
0/1 – 0/31	0/1 – 0/32	دهانه ۴ متر
0/1 – 0/31	0/1 – 0/31	دهانه 4/5 متر
0/11 – 0/31	0/1 – 0/32	دهانه ۵ متر

۵-۷-۳ مقایسه شماره کابل های مورد استفاده

➤ بررسی شماره کابل های مورد استفاده در سازه های سه طبقه

جدول ۵-۱۳-مقایسه شماره کابل های مورد استفاده

مهاربندی در دهانه های متفاوت	مهاربندی در دهانه های روی هم	
کابل شماره ۱ : 66%	کابل شماره ۱ : ۳۳٪	دهانه ۳ متر
کابل شماره ۲ : 0	کابل شماره ۲ : ۳۳٪	
کابل شماره ۳ : ۳۳٪	کابل شماره ۳ : ۳۳٪	

کابل شماره ۴ : ۰	کابل شماره ۴ : ۰	
کابل شماره ۱ : ۳۳٪	کابل شماره ۱ : ۰	دهانه 3/5 متر
کابل شماره ۲ : 66%	کابل شماره ۲ : ۳۳٪	
کابل شماره ۳ : ۰	کابل شماره ۳ : ۳۳٪	
کابل شماره ۴ : ۰	کابل شماره ۴ : ۳۳٪	
کابل شماره ۱ : 66%	کابل شماره ۱ : ۰	دهانه ۴ متر
کابل شماره ۲ : 33%	کابل شماره ۲ : ۳۳٪	
کابل شماره ۳ : ۰	کابل شماره ۳ : ۶۶٪	
کابل شماره ۴ : ۰	کابل شماره ۴ : ۰	
کابل شماره ۱ : 33%	کابل شماره ۱ : ۳۳٪	دهانه 4/5 متر
کابل شماره ۲ : 33%	کابل شماره ۲ : ۳۳٪	
کابل شماره ۳ : ۳۳٪	کابل شماره ۳ : ۰	
کابل شماره ۴ : ۰	کابل شماره ۴ : ۰	
کابل شماره ۱ : 66%	کابل شماره ۱ : ۰	دهانه ۵ متر
کابل شماره ۲ : ۰	کابل شماره ۲ : ۳۳٪	
کابل شماره ۳ : 33%	کابل شماره ۳ : 66%	
کابل شماره ۴ : ۰	کابل شماره ۴ : ۰	

➤ بررسی شماره کابل های مورد استفاده در سازه های هشت طبقه

مهاربندی در دهانه های متفاوت	مهاربندی در دهانه های روی هم	
کابل شماره ۱ : 50%	کابل شماره ۱ : 37%	دهانه ۳ متر
کابل شماره ۲ : 19%	کابل شماره ۲ : 44%	
کابل شماره ۳ : 13%	کابل شماره ۳ : 6%	

کابل شماره ۴ : 19 %	کابل شماره ۴ : 13 %	
کابل شماره ۱ : 38 % کابل شماره ۲ : 25 % کابل شماره ۳ : 25 % کابل شماره ۴ : 12 %	کابل شماره ۱ : 44 % کابل شماره ۲ : 25 % کابل شماره ۳ : 19 % کابل شماره ۴ : 13 %	دهانه 3/5 متر
کابل شماره ۱ : 37 % کابل شماره ۲ : 13 % کابل شماره ۳ : 25 % کابل شماره ۴ : 25 %	کابل شماره ۱ : 32 % کابل شماره ۲ : 25 % کابل شماره ۳ : 25 % کابل شماره ۴ : 19 %	دهانه ۴ متر
کابل شماره ۱ : 31 % کابل شماره ۲ : 31 % کابل شماره ۳ : 19 % کابل شماره ۴ : 19 %	کابل شماره ۱ : 19 % کابل شماره ۲ : 19 % کابل شماره ۳ : 38 % کابل شماره ۴ : 25 %	دهانه 4/5 متر
کابل شماره ۱ : 32 % کابل شماره ۲ : 19 % کابل شماره ۳ : 19 % کابل شماره ۴ : 32 %	کابل شماره ۱ : 25 % کابل شماره ۲ : 19 % کابل شماره ۳ : 25 % کابل شماره ۴ : 31 %	دهانه ۵ متر

➤ بررسی شماره کابل های مورد استفاده در سازه های دوازده طبقه

مهاربندی در دهانه های متفاوت	مهاربندی در دهانه های روی هم	
کابل شماره ۱ : 17 % کابل شماره ۲ : 33 % کابل شماره ۳ : 33 %	کابل شماره ۱ : 13 % کابل شماره ۲ : 25 % کابل شماره ۳ : 32 %	دهانه ۳ متر

کابل شماره ۴ : 17 %	کابل شماره ۴ : 29 %	
کابل شماره ۱ : 17 % کابل شماره ۲ : 33 % کابل شماره ۳ : 21 % کابل شماره ۴ : 29 %	کابل شماره ۱ : 29 % کابل شماره ۲ : 29 % کابل شماره ۳ : 13 % کابل شماره ۴ : 29 %	دهانه 3/5 متر
کابل شماره ۱ : 13 % کابل شماره ۲ : 45 % کابل شماره ۳ : 20 % کابل شماره ۴ : 20 %	کابل شماره ۱ : 17 % کابل شماره ۲ : 32 % کابل شماره ۳ : 50 % کابل شماره ۴ : 31 %	دهانه ۴ متر
کابل شماره ۱ : 20 % کابل شماره ۲ : 30 % کابل شماره ۳ : 30 % کابل شماره ۴ : 20 %	کابل شماره ۱ : 17 % کابل شماره ۲ : 29 % کابل شماره ۳ : 29 % کابل شماره ۴ : 38 %	دهانه 4/5 متر
کابل شماره ۱ : 30 % کابل شماره ۲ : 25 % کابل شماره ۳ : 17 % کابل شماره ۴ : 30 %	کابل شماره ۱ : 13 % کابل شماره ۲ : 29 % کابل شماره ۳ : 25 % کابل شماره ۴ : 33 %	دهانه ۵ متر



## فصل ششم

# نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۶-۱ نتیجه گیری

- هدف این تحقیق، بهینه‌سازی کابل‌های پیش‌تنیده در سازه های فولادی، تحت تحلیل استاتیکی به کمک الگوریتم ژنتیک می‌باشد. به این منظور یک برنامه کد نویسی شده در Matlab و OpenSees تدوین گردیده، که بخش تحلیل سازه در نرم‌افزار OpenSees و بخش طراحی و بهینه‌سازی سازه در Matlab بیان شده است. نتایج حاصل از پس از انجام تحقیق مذکور به شرح زیر است:
- با مقایسه وزن بهینه بین مهاربند ناودانی در دهانه ۴ متری و همچنین مهاربند کابلی پیش‌تنیده در دهانه ۴ متری و حالت بادبند گذاری روی هم مشاهده می‌شود که وزن سازه در حالت مهاربند پیش‌تنیده نسبت به مهاربند ناودانی برای سازه ۳ طبقه ۲۶ درصد، برای سازه ۸ طبقه ۵۲ درصد و همچنین در سازه ۱۲ طبقه ۵۸ درصد کمتر شده است که نشان از مزیت کابل نسبت به مهاربند مرسوم ناودانی مبنی بر سبک تر بودن و قابلیت پیش‌تنیده کردن آن دارد.
- با مقایسه ضریب رفتار بین مهاربند ناودانی در دهانه ۴ متری و همچنین مهاربند کابلی پیش‌تنیده در دهانه ۴ متری و حالت بادبند گذاری روی هم مشاهده می‌شود که ضریب رفتار سازه در حالت مهاربند پیش‌تنیده نسبت به مهاربند ناودانی برای سازه ۳ طبقه ۴۴ درصد، برای سازه ۸ طبقه ۲۳ درصد و همچنین در سازه ۱۲ طبقه ۲۸ درصد بیشتر شده است که نشان از مزیت کابل نسبت به مهاربند مرسوم ناودانی مبنی بر سبک تر بودن و قابلیت پیش‌تنیده کردن آن دارد.
- با مقایسه بین مهاربندی در دهانه های دلخواه و دهانه های آزاد مشاهده می‌شود که مهاربند گذاری در دهانه دلخواه وزن سازه بهینه تر و ضریب رفتار در سازه های سه طبقه کمتر اما در سازه های هشت و دوازده طبقه بیشتر از مهاربند گذاری در دهانه روی هم است.
- با مقایسه بین مهاربند گذاری روی هم و مهاربند گذاری در دهانه های دلخواه مشاهده می‌شود که وزن بهینه در سازه های ۳ طبقه برای مهاربند گذاری در دهانه های دلخواه ۹ درصد، در سازه های ۸ طبقه

۵ درصد و در سازه های ۱۲ طبقه ۷ درصد نسبت به مهاربند گذاری روی هم کمتر بوده که این نشان از بهینه مطلق بودن آرایش مهاربندی دلخواه است.

➤ با مقایسه بین مهاربند گذاری روی هم و مهاربند گذاری در دهانه های دلخواه مشاهده می شود که ضریب رفتار در سازه های ۳ طبقه برای مهاربند گذاری در دهانه های دلخواه ۵ درصد، در سازه های ۸ طبقه ۱۲ درصد و در سازه های ۱۲ طبقه ۱۳ درصد نسبت به مهاربند گذاری روی هم بیشتر بوده که این نشان از بهینه مطلق بودن آرایش مهاربندی دلخواه است.

➤ با توجه به خروجی ها مشاهده می شود که در ۶۰ درصد مدل ها دو دهانه میانی در آرایش بهینه بابدنگذاری حضور دارند و تنها در ۴۰ درصد مدل ها دو دهانه انتهایی در آرایش بهینه حضور دارند که نشان از بهینه تر بودن دهانه های میانی قاب برای مهاربندی نسبت به دهانه های کناری است.

➤ با توجه به خروجی ها مشاهده می شود که ضریب رفتار برای سازه های ۳ طبقه در بازه 4/61 تا 5/88 ، در سازه های ۸ طبقه در بازه 3/51 تا ۴/۹ و در سازه های ۱۲ طبقه در بازه ۴/۰۴ تا ۵/۳۴ تغییر کرده، که با توجه به اینکه سازه های ۳ طبقه در یک دهانه مهاربند گذاری شده اند توانسته اند ضریب رفتار بالاتری نسبت سازه های ۸ و ۱۲ طبقه بدست آورند.

➤ با مقایسه بین خروجی ها مشاهده می شود که نیروی پیش تنیدگی کابل ها در سازه های ۳ طبقه در بازه 0/12 تا 0/18 ، برای سازه های ۸ طبقه در بازه ۰/۱ تا ۰/۲۸ و در سازه های ۱۲ طبقه در بازه ۰/۱ تا ۰/۳۲ نیروی نهایی کابل متغییر بوده است، که این نشان می دهد با افزایش طبقات نیروی پیش تنیدگی هم بیشتر شده است.

➤ با مقایسه بین خروجی ها مشاهده می شود که سازه های سه طبقه در ۶۲/۷ درصد از حالات کابل های شماره ۱ و ۲ و تنها در ۳۷/۳ درصد از کابل های شماره ۳ و ۴ بعنوان مقطع بهینه مورد استفاده قرار گرفته اند، که این درصد ها برای سازه های ۸ طبقه به ترتیب ۵۸/۴ درصد برای کابل های ۱ و ۲ و ۴۱/۶ درصد

برای کابل های شماره ۴۰۳ می باشد، همچنین برای سازه های ۱۲ طبقه به ترتیب ۴۹/۶ درصد کابل های ۲۰۱ و ۵۰/۴ درصد کابل های ۴۰۳ به عنوان مقطع بهینه انتخاب شده اند، که نشان از این دارد با افزایش طبقات اسفاده از کابل های با مقطع بزرگتر بیشتر شده است.

## ۶-۲- پیشنهادات

- پیشنهاد می شود که این فرآیند بر روی سازه های سه بعدی شبیه سازی و مطالعه شود.
- در این پژوهش از پلان ساختمانی منظم استفاده شد. بررسی نامنظمی هندسی در پلان خود موضوع تحقیق مناسبی خواهد بود.
- می توان این پژوهش را عیناً برای سازه های بتنی انجام داد و نتایج را به عنوان تحقیق مناسب گزارش نمود.
- تعیین ضریب رفتار و همچنین مهاربندی با لوله استوانه ای فولادی خود می تواند پژوهشی مناسب در این زمینه باشد.
- مقایسه رفتار لرزه ای سازه مهاربندی شده غیر کابلی با حالت استفاده از کابل
- مقایسه رفتار لرزه ای دو حالت با و بدون پیش تنیدگی کابل
- بررسی سیستم مهاربندی یکپارچه و مقایسه آن با بادبندی کابلی مورد استفاده در هر طبقه

## فهرست مراجع

[1] محمدی س.نقی پور م.(۲۰۱۶). "بررسی تاثیر افزایش قطر کابل بر رفتار قاب خمشی با بادبند کابلی و اتصال

RBS در تیرها" Architecture and urban cityscape Istanbul university turkey

[2] Ailin Zhang Liang Zhao and Xuechun Liu 2015 "Study on Wire Rope Brace Method of Prestressed Braced Steel Moment Frame

[3]Naghavi M.(2019). "retrofitting steel moment frames using cablebracing".Jornal of building material science

[4]بهرامی ب.حسینی ح.(۱۳۹۴). "بررسی نحوه آرایش کابل ها در بهبود عملکرد قاب خمشی فولادی".دومین

کنفرانس ملی زلزله

[5]Hou x.and Tagawa H.(2009)"Displacement-resraint bracing for sesmic retrofit of steel moment frame" J.of Constructional steel research ,65,pp1096-1104

[6] حسین زاده ،برقیان (۱۳۹۳) "بررسی تجربی و تئوری کاربرد مهاربند کابلی در مقاوم سازی قاب خمشی فولادی" مهندسان عمران شریف

[7]محمدیان صبحی م.رحمانی دباغ و ،(۱۳۹۲)، "بررسی عملکرد بادبند کابلی با قراردادن صفحه فولادی مثلثی و دایره ای شکل در وسط بادبند، تحت بارگذاری هیسترسیس و پوش آور".چهارمین کنفرانس ملی زلزله و سازه.کرمان

[8] Holland, J . H .,(1992),:"Adaptation in Natural and Artificial System" , The University of Michigan (1975) and MIT Press, Cambridge, MA.

[9] Goldberg.D.E, (1989), "Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning", Addison Wesley, Reading, MA.

[10] Koza.J.R, (1992), "Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection", A Bradford Book Publisher.

[11] Jenkins. W. M, (1991), "Towards structural optimization via the Genetic algoritrhm", Computer and Structures 40, pp. 1321-1327.

[12] Jenkins, W . M., (1991), "Towards structural optimization via the Genetic algorithm" Computer and Structures 40, pp. 1321-1327

[13] کلات جاری. و. ر، طالب پور. م. ح، (۱۳۹۰) "بهینه یابی سطح مقطع و توپولوژی سازه ها از طریق الگوریتم ژنتیک و بررسی روشهای گوناگون فرآیند انتخاب در روند بهینه یابی"، مجموعه مقالات ششمین کنگره ی ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، 6-7 اردیبهشت.

[14] میلانی زاده ع. (۱۳۸۶). "مقدمه ای بر الگوریتم های ژنتیک و کاربردهای آن ". چاپ دوم، شرکت ناقوس اندیشه ، تهران.

[15] طالب پور م. ح. (۱۳۸۷) رساله کارشناسی ارشد، "بهینه یابی سطح مقطع و توپولوژی خرپاها با استفاده از روش های نوین الگوریتم ژنتیک" دانشکده عمران و معماری ، دانشگاه صنعتی شاهرود

[16] اکبر ح. ا. (۱۳۹۲)، "بتن پیش تنیده"، چاپ دوم، انتشارات سیمای دانش ، تهران ، ص ۱-۲۸

[17] Feyrer K. (2007), "wire ropes", springer , Germany , pp 1-89

[18] قاسمی، حسین، ۱۳۸۳، طناب های فولادی، پیام ارک، شماره ۱۱: ۳-۱۹.

[19] Web site, [WWW.icivil.ir](http://WWW.icivil.ir)

[20] "آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله-استاندارد ۲۸۰۰" (۱۳۹۳) ، ویرایش چهارم، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران

[21] دفتر مقررات ملی ساختمان، (۱۳۹۲) ، "مقررات ملی ساختمان ایران-مبحث ششم-بارهای وارد بر ساختمان"، چاپ دوم، انتشارات نشر توسعه ایران، تهران

[22] FEMA-356, Prestandard And Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Building, Prepared By American Society Of Civil Engineers, Reston, Virginia, Prepared For Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. November 2000.

[23] kravinkler H. static pushover analysis , the developing structural engineers of Northern California , Sanfrancisco , November 1994.

[24] تسنیمی ، عباسعلی - معصومی ، علی، "محاسبه ضریب رفتار قاب های خمشی بتن مسلح" - تهران-مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ، ۱۳۸۵

[25] Mazzoni, Silvia, McKenna, Frank , Scott, Michael H. , Fenves, Gregory L., al, et , 2006 , Opensees command language manual , PEER center.

[26] Standard Of ASTM-A416, Reapproved 2005.

[27] Kochenberger. G. A, Glover. F, (2003), "Handbook of metaheuristics", Kluwer Academic Publishers.

[28] Kochenberger ,G .A., F., (1997), "Handbook of Metaheuristics" , Kluwer Academic Publishers.

[29] بهنامی ، بهنام - حسینی ، میر حمید، "بررسی نحوه آرایش کابل ها در بهبود عملکرد قاب خمشی

فولادی" دومین کنفرانس ملی زلزله -دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) قزوین

[30] Chopra, Anil K ; Chintanapakdee, Chatpan; "Inelastic deformation ratios for design and evaluation of structures ( single degree freedom bilinear systems)"; Report no. EERC 2003-09 AT Earthquake Engineering Research; University of Berkeley, 2003

[۳۱] اشتری ، پیام - برزگر ، فرشید، "بهینه یابی موقعیت بادبند ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک" کنفرانس

بین المللی سبک سازی زلزله-جهاد دانشگاهی استان کرمان،

## **Abstract**

In this study, the optimization of prestressed cables in steel structures was evaluated. The type of optimization is considered as locating the position of the cables in the floors. Optimizing structures by considering the existing conditions and constraints or the same constraint functions has always been one of the goals of engineers and designers. So far, a lot of research has been done on optimization and various methods have been proposed to solve it. In general, optimization methods can be divided into three categories: mathematical methods, optimization criteria and meta-exploratory methods. In this research, genetic algorithm, which is one of the meta-heuristic methods, has been used.

It is necessary to use the genetic algorithm method to have appropriate objective functions and constraints relative to the design variables. In this research, the weight or area of the structure as the objective function and the stress and deformation constraints at the same time are considered as constraints of the optimization problem. The optimal location, diameter and amount of prestressing force of the cables are considered as problem variables. OpenSees software and nonlinear static method were used to analyze the structures.

To implement this issue, three-, eight- and twelve-story structures with different span ratios in two modes of cross-bracing on top of each other as well as cross-bracing in different spans are examined and it is observed that in 60% of the models two The middle spans and only 40% of the two side spans are braced as the optimal spans, it is also observed that the coefficient of behavior for 3-story structures with one bracing span in the range of  $4/61$  to  $5/88$ , in 8-story structures and 12-story with two bracing openings varied in the range of  $3/51$  to  $4/9$  and  $4/04$  to  $5/34$  respectively. It can also be said that the prestressing force for 3-story structures in the range of  $0/12$  to  $0/18$ , for 8-storey structures in the range of  $0/1$  to  $0/28$  and in 12-storey structures in the range of  $0/1$  to  $0/32$  the final cable tension varied.

**Key Words:** Genetic algorithm, steel structures, nonlinear static method, cable prestressing optimization



**Faculty of Civil Engineering**  
**M.Sc. Thesis in Structural Engineering**

**Determination of pre-stress force and optimum arrangement  
of cables in simple steel frames using meta-heuristic methods**

**By: Amir Aghdassi**

**Supervisor:**

**Dr.V.R.Kalatjari**

**Advisor:**

**Dr.M.H.Talebpour**

**February 2021**