**دانشگاه تبریز**
**دانشکده عمران**
**گروه سازه**

**پایان نامه**

**برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران - سازه**

عنوان

# بهینه‌سازی قاب‌ها براساس حداکثر کردن سختی و حداقل کردن تنش

استاد راهنما

**دکتر ناصر تقی‌زادیه**

استاد مشاور

**دکتر کامبیز کوهستانی**

پژوهشگر

**هادی سرمستی**

**بهمن ۱۳۸۹**

**تقدیر و تشکر**

وظیفه خود می دانم از زحمات اساتید ارجمند آقایان، دکتر ناصر تقی‌زادیه و دکتر کامبیز کوهستانی،که با راهنمایی‌های ارزنده خود بنده را در تدوین این پایان نامه یاری نموده اند، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. همچنین از زحمات آقای دکتر یوسف حسین‌زاده به خاطر داوری این پایان نامه تشکر و قدردانی می نمایم.

در پایان از پدر و مادر بزرگوارم که در راه پیشرفت فرزندان شان از هیچ گونه فداکاری دریغ ننموده اند و همواره حامی و یار و یاور من بوده اند بی نهایت سپاسگزارم و این پایان نامه را به ایشان تقدیم می کنم.

**نام‌خانوادگی دانشجو:** سرمستی **نام:** هادی

**عنوان پایان‌نامه:** بهینه‌سازی قابها براساس حداکثر کردن سختی و حداقل کردن تنش

**استاد راهنما:** دکتر ناصر تقی‌زادیه

**استاد مشاور:** دکتر کامبیز کوهستانی

**مقطع تحصیلی:** کارشناسی ارشد **رشته:** عمران **گرایش:** سازه **دانشگاه:** تبریز

**دانشکده:** مهندسی عمران **تاریخ فارغ‌التحصیلی:** بهمن ۱۳۸۹ **تعداد صفحه:** ۸۲

**کلید واژه‌ها:** بهینه‌سازی چندمعیاری، بهینه‌سازی چندموضوعی، بهینه‌سازی برداری، حداکثر کردن سختی، حداقل کردن تنش ماکزیمم، حداکثر کردن مقاومت، سازه‌های پیوسته.

**چکیده:**

در تحلیل و طراحی سازه‌ها، طراحان همواره مقاومت و سختی سازه را مورد تاکید قرار دادند و همواره به دنبال روش‌هایی هستند که بین این دو ویژگی مهم سازه نوعی تعادل و توازن برقرار کنند. در دهه‌های اخیر تلاش‌های بسیاری روی بهینه‌سازی سختی سازه‌ها صورت گرفته است. در این نوع سازه‌ها همواره نمی‌توان از دوام و استحکام آن مطمئن بود. لذا بررسی مقاومت سازه‌ها نیز حائز اهمیت ویژه‌ای است.

برای حداکثرسازی مقاومت سازه لازم است که تنش حداکثر ایجاد شده در بخش‌های مختلف سازه حداقل گردند. در همه‌ی تحقیقات گذشته تنش به عنوان قید بهینه‌سازی قرار گرفته و هرگز به طور مستقیم به عنوان تابع هدف طراحی بررسی نشده است. قید قرار دادن تنش اگرچه کمتر بودن. تنش را از یک مقدار ویژه تضمین می‌کند، ولی نمی‌توان انتظار داشت که تنش را به حداقل مقدارش برساند.

در هر بهینه‌سازی هر دوی این معیارها باید توجه داشت که بهینه کردن یکی از این دو معیار به مفهوم بهینه‌سازی معیار دوم نیست، در نتیجه بهینه‌سازی هر دو معیار همزمان باید مورد توجه قرار گیرد. بدین منظور شاخه‌ای از بهینه‌سازی، تحت عنوان بهینه‌سازی چندمعیاری مطرح می‌شود.

در تحقیق حاضر روش (Evolutionary structural optimization)(ESO) برای بهینه‌سازی همزمان سختی و مقاومت استفاده شده است. برای ایجاد معیار کلی، ضرایب وزن معرفی می‌شوند. و در نهایت ترکیبی خطی از دو معیار، معیار کلی سازه را تشکیل خواهد داد. برای تحلیل سازه‌های مورد بررسی در این تحقیق برنامه‌ای در محیط MATLAB، ایجاد شده است.

برای بررسی کفایت برنامه‌ی مذکور نتایج حاصل از آن برای یک سازه‌ی کوچک، با نتایج ناشی از تحلیل همان سازه با نرم‌افزار SAP۲۰۰۰ مقایسه شده‌اند. و در نهایت مثال‌هایی برای بهینه‌سازی براساس سختی، مقاومت و هر دو معیار ارائه شده‌اند.

**فهرست مطالب:**


**فصل اول: مقدمه**

**۱ـ۱) مقدمه ..... ۱**

**فصل دوم : بررسی منابع**

**۲ـ۱) مروری بر تحقیقات گذشته ..... ۳**

**فصل سوم : مفاهیم اصلی در بهینه‌سازی چندمعیاری**

**۳ـ۱) متغیرهای طراحی ..... ۷**

**۳ـ۲) دامنه‌ی طراحی ..... ۷**

**۳ـ۳) تابع هدف ..... ۷**

**۳ـ۴) بهینه‌سازی چندمعیاری با روش ..... ۷**

**۳ـ۵) بهین پارتو ..... ۱۰**

**۳ـ۶) تکنیک‌های بهینه‌سازی ..... ۱۰**

۳ـ۶ـ۱) روش وزنی ..... ۱۱

۳ـ۶ـ۲) فرمول‌بندی روش معیار کلی ..... ۱۲

**فصل چهارم : بهینه‌سازی چند معیاری سختی و تنش**

**۴ـ۱) معیار تنش ..... ۱۳**

**۴ـ۲) معیار سختی ..... ۱۳**

**۴ـ۳) ضرایب حساسیت ..... ۱۴**

۴ـ۳ـ۱) سازه تحت یک بار ..... ۱۴

۴ـ۳ـ۱ـ۱) ضریب حساسیت سختی ..... ۱۴

۴ـ۳ـ۱ـ۲) ضریب حساسیت تنش ..... ۱۶

۴ـ۳ـ۲) سازه تحت چند نوع بار ..... ۲۱

۴ـ۳ـ۲ـ۱)حساسیت سختی ..... ۲۱

۴ـ۳ـ۲ـ۲) حساسیت تنش ..... ۲۲

**۴ـ۴) بهینه‌سازی معیارها ..... ۲۲**

**۴ـ۵) روش‌های اصلاح ضخامت المان ..... ۲۴**

۴ـ۵ـ۱) اصلاح ضخامت با کاستن از ضخامت المان‌ها ..... ۲۴
۴ـ۵ـ۲)اصلاح ضخامت با استفاده از جابجایی المان‌ها ..... ۲۵
۴ـ۵ـ۳) بهینه‌سازی با حذف و اضافه کردن المان ( روش BESO ) ..... ۲۷

## فصل پنجم : بررسی روش مورد استفاده

**۵ـ۱) بررسی بخش‌های مختلف برنامه‌ی تحلیل و طراحی سازه‌ها با اندازه و توپولوژی بهینه .....۳۰**
۵ـ۱ـ۱) مش‌بندی سازه ..... ۳۰
۵ـ۱ـ۲) تحلیل المان محدود ..... ۳۱

## فصل ششم. نتایج

**۶ـ۱) تیر عمیق ..... ۳۹**
**۶ـ۲) صفحه‌ی مستطیلی..... ۴۵**
**۶ـ۳) سازه‌ی طره‌ای ..... ۵۱**
**۶ـ۴) سازه تحت دو بارمنفرد ..... ۵۶**
**۶ـ۵) صفحه‌ی مستطیلی با بار متمرکز ..... ۵۹**
**۶ـ۶) بهینه‌سازی توپولوژی..... ۶۴**

## فصل هفتم : نتیجه‌گیری و پیشنهادات

**۷ـ۱) نتیجه‌گیری ..... ۶۹**
**۷ـ۲) پیشنهادات..... ۷۰**
**منابع ..... ۷۱**
**ضمیمه ..... ۷۳**

فهرست اشکال:


شکل ۱.۵. مش‌بندی سازه در کد MATLAB ..... ۳۱

شکل ۲.۵. المان ۲۴ در مختصات محلی ..... ۳۲

شکل ۳.۵. مش‌بندی و یارگذاری سازه صفحه‌ای در نرم‌افزار SAP۲۰۰۰ ..... ۳۳

شکل ۴.۵. مقایسه تغییرمکان‌ها ناشی از نرم‌افزار و کد ..... ۳۷

شکل ۵.۵. مقایسه تنش فون‌مایسس ناشی از نرم‌افزار و کد..... ۳۷

شکل۶.۵. سازه‌ی اولیه..... ۳۸

شکل۷.۵. طرح بهینه برای تنش با استفاده از کد..... ۳۸

شکل ۸.۵. طرح بهینه ارائه شده در مرجع..... ۳۸

شکل۱.۶.مدل المان محدود سازه‌ی اولیه مثال (۶ـ۱)..... ۴۰

شکل۲.۶. چرخه‌ی تکاملی تنش فون‌میزس ماکزیمم مثال (۶ـ۱)..... ۴۱

شکل ۳.۶. چرخه‌ی تکاملی انرژی کرنشی مثال (۶ـ۱)..... ۴۲

شکل۴.۶. تاثیر ضرایب وزن معیار سختی روی معیارهای مختلف مثال (۶ـ۱)..... ۴۳

شکل۵.۶. طرح‌های بهینه براساس معیارهای مختلف مثال (۶ـ۱)..... ۴۴

شکل۶.۶. سازه‌ی اولیه‌ی مثال (۶ـ۲) ..... ۴۶

شکل ۷.۶. چرخه‌ی تکاملی تنش فون‌میزس برای معیارهای مختلف مثال (۶ـ۲)..... ۴۷

شکل ۸.۶. چرخه‌ی تکاملی انرژی کرنشی مثال (۶ـ۲)..... ۴۸

شکل۹.۶. تاثیر ضرایب وزن معیار سختی روی معیارهای مختلف مثال (۶ـ۲)..... ۴۸

شکل ۱۰.۶. طرح‌های بهینه براساس معیارهای مختلف مثال (۶ـ۲) ..... ۵۰

شکل ۱۱.۶. سازه‌ی مثال‌های (۶ـ۳) و (۶ـ۴)..... ۵۱

شکل۱۲.۶. تاثیر ضرایب وزن معیار سختی روی معیارهای مختلف مثال (۶ـ۳)..... ۵۲

شکل۱۳.۶.چرخه‌ی تکاملی برای انرژی کرنشی مثال (۶ـ۳)..... ۵۳

شکل۱۴.۶.چرخه‌ی تکاملی تنش فون‌میزس مثال (۶ـ۳)..... ۵۴

شکل ۱۵.۶.مدل‌های بهینه برای معیارهای مختلف مثال (۶ـ۳) ..... ۵۵

شکل۱۶.۶. چرخه‌ی تکاملی برای انرژی کرنشی مثال (۶ـ۴) .....۵۶

شکل۱۷.۶. چرخه‌ی تکاملی تنش فون‌میزس ماکزیمم مثال (۶ـ۴)..... ۵۷

شکل۱۸.۶. تاثیر ضرایب وزن معیار سختی روی معیارهای مختلف مثال (۶ـ۴)..... ۵۸

شکل ۱۹.۶.مدل‌های بهینه برای معیارهای مختلف مثال (۶ـ۴) ..... ۵۹

شکل۲۰.۶. سازه‌ی اولیه مثال(۶ـ۵)..... ۶۰

شکل۲۱.۶. تاریخچه‌ی تکامل تنش فون‌میزس حداکثر مثال(۶ـ۵)..... ۶۱

شکل۲۲.۶. تاریخچه‌ی تکامل انرژی کرنشی مثال(۶ـ۵)..... ۶۲

شکل۲۳.۶. تاثیر ضرایب وزن معیار سختی روی معیارهای مختلف مثال(۶ـ۵)..... ۶۳

شکل ۲۴.۶.مدل‌های بهینه برای معیارهای مختلف مثال(۶ـ۵) ..... ۶۴

شکل۲۵.۶. سازه‌ی اولیه مثال(۶ـ۶)..... ۶۵

شکل ۲۶.۶. تاریخچه‌ی تکامل تنش فون‌میزس مثال(۶ـ۶)..... ۶۶

شکل ۲۷.۶. تاریخچه‌ی تکامل انرژی کرنشی مثال(۶ـ۶)..... ۶۶

شکل ۲۸.۶. مقادیر معیارها برای ضرایب وزن مختلف سختی مثال(۶ـ۶)..... ۶۷

شکل ۲۹.۶. بهینه‌سازی توپولوژی مثال(۶ـ۶)..... ۶۸

**فهرست جداول:**

**جدول ۱.۵. مقایسه‌ی مقادیر تغییرمکان‌های گرهی حاصل از کد MATLAB و نرم افزار SAP۲۰۰۰ ..... ۳۴**

**جدول ۲.۵. مقایسه‌ی مقادیر تنش‌های گرهی حاصل از کد MATLAB و نرم افزار SAP۲۰۰۰ ..... ۳۵**

**فهرست نمادها**

| | |
|---|---|
| $\alpha$ | ضریب حساسیت |
| $C$ | ماتریس نرمی |
| $d$ | بردار جابجایی |
| $E$ | مدول الاستیسیته |
| $f$ | معیار بهینه‌سازی |
| $\tilde{f}$ | بردار نیروهای مجازی |
| $F$ | معیار وزنی |
| $K$ | ماتریس سختی سازه |
| $p$ | بردار نیروهای خارجی |
| $\sigma$ | تنش نرمال |
| $R$ | نسبت ضریب حساسیت |
| $RR$ | نسبت حذف المان‌ها |
| $S$ | نسبت ضریب حساسیت می‌نی‌مم به ضریب حساسیت ماکزیمم |
| $t$ | بردار ضخامت المان‌ها |
| $u$ | بردار جابجایی |
| $\tilde{u}$ | بردار جابجایی مجازی |
| $V$ | حجم سازه |
| $V_0$ | حجم اولیه سازه |
| $\nu$ | ضریب پواسون |
| $w$ | ضریب وزن |

**زیر نویس‌ها**

| | |
|---|---|
| vm | فون مایسس |
| max | ماکزیمم |
| stiff | سختی |
| s | سختی |
| Mean | میانگین |
| σ | تنش نرمال |

# فصل اول: مقدمه

## ۱ـ۱) مقدمه

در اکثر سازه‌های مهندسی سختی و مقاومت دو کمیت قابل توجه و مهم هستند. معمولا طراحان سازه به دنبال روش‌هایی برای ایجاد تعادل بین این دو کمیت هستند. بر این اساس همواره سعی شده است، که روش‌هایی برای ایجاد نوعی تعادل مابین این دو کمیت ارائه شوند، به نوعی که هر دو پارامتر در طرح سازه منظور گردند. بر این اساس بهینه‌سازی سازه برای این دو کمیت مورد توجه بوده است.

در دهه‌های اخیر بهینه‌سازی سازه‌ها براساس سختی به طور قابل ملاحظه‌ای مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیقات نرمی متوسط به عنوان تابع هدف فرمول‌بندی شده است و حجم یا وزن سازه به عنوان قید بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. با این حال همیشه نمی‌توان از دوام و استحکام سازه مطمئن بود مگر اینکه تنش سازه در نقاط مختلف بررسی شود. در تحقیقات بعدی برای اینکه تنش ماکزیمم ایجاد شده در سازه کنترل گردد، معمولا تنش به عنوان قید بهینه‌سازی در نظر گرفته شده است. قید قرار دادن تنش در فرآیند بهینه‌سازی اگرچه کوچک بودن تنش را از یک حد خاصی تضمین می‌کند، ولی نمی‌توان انتظار داشت که تنش ماکزیمم سازه به کمترین مقدار ممکن آن تقلیل یابد. این نکته حائز اهمیت است که حداقل سازی معیار تنش با حداکثر ساختن معیار سختی متفاوت بوده و با سخت‌تر کردن یک سازه نمی‌توان انتظار داشت که مقاومت آن نیز حداکثر شود و برعکس.

خی[1] و همکاران در تحقیقی به این نتیجه رسیدند که، در سازه‌ای که برای تنش طراحی می‌شود هر بخش از سازه سطح تنش مشابهی دارند، ولی همیشه نمی‌توان انتظار داشت که تنش حداکثر سازه به حداقل مقدارش نزدیک شود.

به نظر می‌رسد که در نظر گرفتن تنش و سختی با هم و به طور همزمان به عنوان تابع هدف طراحی امری ضروری است. بهینه‌سازی بدین شیوه شاخه‌ای از بهینه‌سازی تحت عنوان بهینه‌سازی چندموضوعی[۱](چندمعیاری[۲]، بهینه‌سازی برداری[۳]) می‌باشد.

[1] Y.M.Xie

این تحقیق در هفت فصل ارائه می‌شود. مختصری از محتوای این فصل‌ها در این بخش آورده می‌شود. در فصل دوم تحقیق حاضر به بررسی تحقیقات گذشته انجام یافته در زمینه‌ی بهینه‌سازی تنش و سختی و همچنین بهینه‌سازی چندمعیاری می‌پردازیم. فصل سوم به بیان مفاهیم اصلی در بهینه‌سازی چندمعیاری اختصاص داده شده است. فصل چهارم، بهینه‌سازی چندمعیاری تنش و سختی را ارئه می‌دهد. در این فصل روابط مورد نیاز برای بهینه‌سازی آورده شده‌اند. فصل پنجم به بررسی صحت نتایج حاصل از برنامه ارائه شده در این تحقیق و مقایسه‌ی آن‌ها با نتایج نرم‌افزار SAP۲۰۰۰ می‌باشد. همچنین در این فصل قسمت‌های مختلف برنامه تا حدودی توضیح داده شده است. در این فصل سازه‌ای صفحه‌ای با ۲۵ گره، توسط برنامه و نرم‌افزار تحلیل شده است و جابجایی‌های گرهی و تنش‌های المان‌ها با هم مقایسه شده‌اند. در فصل ششم به بررسی مثال‌هایی از بهینه‌سازی سختی و تنش می‌پردازیم. در فصل هفتم نتیجه‌گیری حاصل از این تحقیق و همچنین پیشنهادات برای تحقیقات آتی آورده شده است.

[1] Multiobjective optimization
[2] Multicriteria optimization
[3] Vector optimization

## فصل دوم : بررسی منابع

### ۲ـ۱) مروری بر تحقیقات گذشته

تحقیق روی بهینه کردن سختی و تنش سازه طی تحقیقی که در سال ۱۹۸۹ توسط رزوانی و همکاران [۱] صورت گرفت آغاز شد، که نتیجه‌ی این تحقیق ابداع روش کانتینم[1] بود. در سال ۱۹۹۵ رزوانی و بیرکر[۲] یک مسئله‌ی حداقل‌سازی وزن را تحت شرایط تنش و تغییرمکان حل نمودند. در همین سال هافتکا[۳] مسئله‌ی مشابهی با روش معیارهای گسسته را بررسی نمود. یانگ و چن[۴] یک تابع وزنی خطی از تنش و سختی متناسب با وزن مخصوص هر المان محدود را تشکیل دادند.

پاتنایک[۵] در سال ۱۹۹۸ روش MFUD را توسعه دادند. این روش شامل دو گام اساسی است، در گام اول یک FSD تولید می‌شود و سپس در گام دوم یک تقسیم‌بندی یکنواخت روی SDF برای بدست آوردن FUD انجام می‌شود. در این روش نیز وزن سازه بعنوان یک تابع هدف انتخاب شده است و سختی و تنش هر دو به عنوان قید مسئله انتخاب شده‌اند. در سال ۱۹۹۸ شیمودا [۶] مسائل مین‌ـماکز[2] را برای معیار تنش و تغییرمکان مورد مطالعه قرار داد، اما هر دوی این موضوعات جدا از دیگری در نظر گرفته شده بودند.

از مروری که بر تحقیقات گذشته که در مورد بهینه‌سازی معیارهای سختی و تنش انجام گرفته بودند مشخص می‌شود که در همه‌ی این تحقیقات تنش به عنوان یک قید در نظر گرفته شده است و بعنوان یک تابع هدف مدنظر نبوده است. به نظر می‌رسد که در نظر گرفتن این دو معیار به صورت همزمان در بهینه‌سازی یک سازه امری ضروری است. دلیلی که برای این موضوع می‌توان بیان نمود این است که بررسی تنش به عنوان یک تابع هدف ممکن است نتایج متفاوتی از بررسی آن به صورت قید داشته باشد. در ادامه تاریخچه‌ای از بهینه‌سازی چندمعیاری بیان می‌شود.

---

[1] Continuum
[2] Min_max

بهینه‌سازی چند معیاری[1] در اوایل سال ۱۹۴۴، توسط جان ون نیومن[2] و اسکار مورگنسترن[3] [نقل از منبع شماره ۷] برای یک مسئله‌ی بهینه سازی در ارتباط با معاملات اقتصادی مطرح گردید. این مسئله ترکیبی نامتداول و عجولانه از چندین مسئله‌ی متضاد بود،که در ریاضیات کلاسیک چنین مسئله‌ی مطرح نشده بود.

پایه ریزی فرمولبندی ریاضی این نوع بهینه‌سازی به سال‌های ۱۸۹۵ تا ۱۹۰۶ برمی‌گردد. در طول این مدت، جورج کانتور[4] و فلیکس هاوزدورف[5] [نقل از منبع شماره ۷] پایه‌های فضاهای با ابعاد نامحدود را پی‌ریزی کردند. همچنین کانتور شرایط کافی برای وجود جواب عمومی را معرفی کرد. هاوزدورف نیز اولین مثال با مرتبه‌ی کامل را معرفی کرد. هارولد کان[6] و آلبرت تاکر[7] [نقل از منبع شماره ۷] مسئله‌ی بردار ماکزیمم که در آن بهینه‌سازی چندمعیاری به صورت یک مسئله‌ی ریاضی بیان می‌شود را معرفی کردند.

با همه‌ی این‌ها، تئوری بهینه‌سازی چندمعیاری تا دهه‌ی ۱۹۵۰ پیشرفت چندانی نداشت. در دهه‌ی ۱۹۶۰ اصول بهینه‌سازی چند معیاری خیلی جدی توسط ریاضیدانان مورد بررسی قرار گرفت تا اینکه لئونید هارویچ[8] [نقل از منبع شماره ۷] نتایج کارهای کان و تاکر را برای فضاهای برداری توپولوژیکی تعمیم داد. بهینه‌سازی چندمعیاری توسط مارگلین[9] [نقل از منبع شماره ۷] برای طراحی مخازن آب استفاده شد. اولین کاربرد مهندسی این نوع بهینه‌سازی در اوایل دهه‌ی۱۹۶۰ از زِیده[10] [نقل از منبع شماره ۷] گزارش شده است. به هر حال تا دهه‌ی ۱۹۷۰ استفاده از بهینه‌سازی چندمعیاری تعمیم داده شد.

---

[1] Multicritera Optimization
[2] John von Numann
[3] Oskar Morgenstern
[4] Georg Cantor
[5] Felix Housdorff
[6] Harold w.Kuhn
[7] Albert w. Tucker
[8] Leonid Hurwicz
[9] Marglin
[10] Zadeh

با معرفی شدن الگوریتم‌های تکاملی، روزنبرگ[1] [نقل از منبع شماره ۷] اولین کسی بود که به قابلیت این روش در بهینه‌سازی چندمعیاری اشاره کرد. در اواسط دهه‌ی ۱۹۸۰ اسکافر[2] کاربرد عملی این روش را بسط داد.

در بهینه‌سازی چند معیاری معمولا از دو روش الگوریتم ژنتیک[3] و ESO[4] استفاده می‌گردد. کوئلو[5] و کریستین[6] در سال ۱۹۹۹ با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی چندمعیاری خرپاها پرداخته‌اند. در این تحقیق روشی برای بهنه کردن چندمعیاری خرپاها آورده شده است. در این تحقیق، معیارهای وزن و تغییرمکان ماکزیمم و تنش استفاده شده‌اند.

با ارائه‌ی روش ESO که در سال ۱۹۹۲ توسط استیون[7] و خی[8] صورت گرفت ، بهینه سازی دچار تحولی اساسی شد، مخصوصا بهینه کردن سازه‌های پیوسته با این روش بسیار ساده‌تر گردید. روش ESO روشی ساده برای بهینه‌سازی است و براساس حذف مصالح از قسمت‌های غیرضروری سازه و اضافه نمودن به قسمت‌های مهم و حیاتی کار می‌کند. این روش به مدت یک دهه برای بهینه‌سازی تک معیاری استفاده شد و بعدا بدلیل سهولتی که در اجرای این روش وجود دارد از آن برای بهینه‌سازی چندمعیاری در تحقیقات بعدی استفاده شده است. در سال ۲۰۰۱ کوئرین و همکاران [۸] اولین کسانی بوده‌اند که از روش ESO برای بهینه‌سازی چندمعیاری در سازه‌های صفحه‌ای استفاده کردند. معیارهای مورد استفاده در این تحقیق سختی و فرکانس طبیعی مد اول ارتعاش سازه هستند. در تحقیق ارائه شده توسط این دو اصول و نحوه‌ی رابطه‌بندی روش ESO چندمعیاری به طور کامل تشریح شده است و از آن به عنوان مرجع اصلی بهینه‌سازی چندمعیاری با ESO می‌توان نام برد. به

[1] Rosenberg
[2] Schaffer
[3] Genetic Algorithm
[4] Evolutionary Structural Optimization
[5] C.A. Coello
[6] A.D. Christiansen
[7] G.p.steven
[8] Y.M.Xie

دلیل محدودیت منابع در این ارتباط در این پایان‌نامه از مرجع [۱۷] برای رابطه‌بندی معیار تنش و از مرجع [۸] برای رابطه‌بندی سختی استفاده شده است.

## فصل سوم : مفاهیم اصلی در بهینه‌سازی چندمعیاری

### ۳ـ۱) متغیرهای طراحی[1]

اولین گام در بحث بهینه‌سازی تعیین متغیرهای طراحی است. در واقع متغیر طراحی ویژگی از سازه است که در فرآیند بهینه‌سازی، بهینه می‌شود.

### ۳ـ۲) دامنه‌ی طراحی[2]

در واقع محدوده‌ای از سازه‌ی کل است که بهینه‌سازی روی آن انجام می‌گیرد. قسمت‌هایی از سازه بدلیل داشتن شرایط خاصی مانند نقاط اعمال بار و یا نقاط اتصال به تکیه‌گاه از دامنه‌ی طراحی جدا می‌شوند و از ابتدا ضخامت ثابتی دارند.

### ۳ـ۳) تابع هدف

بهینه‌سازی معیارهای مختلف با استفاده از روشی خاص روی تابعی که تابع هدف خوانده می‌شود، انجام می‌گیرد. بعبارتی هدف از بهینه‌سازی حداقل کردن تابع هدف است. متغیرهای تابع هدف متغیرهای طراحی هستند. در بهینه‌سازی چندمعیاری تابع هدف ترکیبی خطی از متغیرهای مختلف است.

### ۳ـ۴) بهینه‌سازی چندمعیاری با روش ESO

بهینه‌سازی را در دو حالت کلی تک‌معیاری و چندمعیاری می‌توان بررسی نمود. در بهینه‌سازی تک‌معیاری که متداول‌ترین نوع بهینه‌سازی است، تابع هدف فقط یک متغیر دارد. این متغیر در واقع مهم‌ترین پارامتر سازه است و پارامترها و ویژگی‌های دیگر سازه را به نوعی دربردارد. برای مثال در بهینه‌سازی خرپاها معمولا وزن بعنوان متغیر بهینه‌سازی انتخاب می‌شود. در بسیاری از مسائل بهینه‌سازی تعیین یک پارامتر بعنوان مهم‌ترین پارامتر یک سازه دشوار و گاه غیرممکن است. برای بهینه کردن چنین مسائلی از بهینه‌سازی چندمعیاری استفاده می‌کنیم. در بهینه‌سازی چندمعیاری

[1] Design variables
[2] Design domain

تابع هدف را به دو صورت می‌توان تعریف نمود. در حالت اول هر پارامتر به عنوان یک تابع هدف انتخاب می‌شود و حل دستگاه معادلات حاصل از توابع هدف بهترین حل مسئله خواهد بود. در حالت دوم پارامترهای مسئله با استفاده از ضرایب وزن که اهمیت هر پارامتر را مشخص می‌کند، ترکیبی خطی را تشکیل می‌دهند[۹]. حالت دوم بدلیل اینکه ساده‌تر است دارای محبوبیت بیشتری است، و در این تحقیق از این روش برای تشکیل تابع هدف استفاده خواهد شد.

در بهینه‌سازی چندمعیاری از روش‌های متداول بهینه‌سازی مانند الگوریتم ژنتیک، ESO و... می‌توان استفاده کرد. با توجه به اینکه ESO روشی ساده و مناسب برای بهینه‌سازی سازه‌ها است، در تحقیق حاضر به معرفی این روش و نحوه‌ی استفاده از آن خواهیم پرداخت. در مطالعات سال‌های اخیر طراحان برای بهینه‌سازی توپولوژی بدنبال روش‌هایی بوده‌اند که بدون اینکه آرایش گره‌های سازه به‌هم بخورد توپولوژی آن را اصلاح بکند. ایده اصلی این روش‌ها این است که قسمت‌های غیرموثر سازه پیدا و حذف شوند. بدین منظور دو نوع روش وجود دارند (۱) روش‌های طراحی با متغیرهای پیوسته برای مثال روش همگن‌سازی جز این دسته می‌باشد و (۲) روش‌های طراحی با متغیرهای گسترده که روش بهینه‌سازی تکاملی سازه (ESO) جز این روش‌ها می‌باشد. در روش ESO، در ابتدا معیاری برای بهینه‌سازی سازه تعریف می‌شود و سپس براساس این معیار قسمت‌های غیرمفید سازه طی چندین تکرار حذف می‌شوند، در نتیجه تعیین معیار بهینه‌سازی سازه نقش اساسی در بهینه‌سازی دارد. در بدو پیدایش این روش برای فرموله کردن آن از معیار تنش فون‌میزس استفاده شده است. سپس محققین از معیار سختی نیز برای بهینه‌سازی بهره گرفتند، بدین صورت که در تحقیقات‌شان ضریب حساسیت سختی براساس تغییرات نرمی، ناشی از حذف المان تعریف شد [۱۰].

ESO چندمعیاری[1] دنباله‌ای از ESO معمولی است، که در آن معیارهای مختلف طراحی با هم ترکیب می‌شوند. در این روش دو، سه یا هر تعداد از معیارها را می‌توان با هم ترکیب نمود. روش کار در ESO بدین شکل است که یک مدل المان محدود از سازه‌ی مورد نظر ساخته می‌شود و پس از

[1] Multicriteria Evolutionary Structural Optimization

تحلیل‌های المان محدودی که روی سازه انجام می‌شود، مصالح از جایی که بدان نیاز کمتری وجود دارد و یا کلا نیازی به وجود آن‌ها احساس نمی‌شود حذف شده یا به نواحی که در آن‌ها به وجود این مصالح نیاز است انتقال داده می‌شوند. این روند تا رسیدن به بهترین سازه تکرار می‌شود. برای تشخیص اینکه المانی ضخامت زائد دارد یا نه از اعدادی موسوم به ضرایب حساسیت استفاده می‌شود. این اعداد میزان اهمیت المان را مشخص می‌کنند. بعبارت دیگر هرچقدر این عدد کوچک باشد المان مربوطه دارای اهمیت کمتری بوده و برای تغییر در ضخامت گزینه‌ی مناسبی می‌باشد و برعکس هرچه این عدد بزرگ باشد المان مذکور، المان مهمی در سازه به شمار می‌آید و بسته به روش تغییر ضخامت، ضخامت آن ثابت نگهداشته شده و یا بدان افزوده می‌شود. این اعداد برای هر معیار به صورت جداگانه تعریف می‌شوند و سپس ترکیب خطی آن‌ها ضریب حساسیت کل را تشکیل می‌دهد[۱۱].

در روش ESO بازتوزیع مصالح یا با تغییر ضخامت المان‌های مستعد و یا با تغییر تصادفی ضخامت برخی از المان‌ها صورت می‌پذیرد. در هر دوی این روش‌ها متغیرهای طراحی به صورت گسسته تعریف می‌شوند. در این تحقیق طراحی براساس ضخامت متغیر المان‌ها انجام می‌شود $t_s = \{t_1, t_2, ..., t_r, t_{r+1}, ..., t_m\}^T$. لازم به توضیح است که در بردار ضخامت $t_s = \{t_1, t_2, ..., t_r, t_{r+1}, ..., t_m\}^T$ شرط $t_r > t_{r+1} (r = 1, 2, ..., m-1)$ برقرار است. بعبارتی ضخامت از بزرگترین مقدار به کوچکترین آن مرتب شده‌اند. البته این توزیع ضخامت به هر صورتی می‌تواند انجام پذیرد و الزامی به توزیع یکنواخت وجود ندارد. در تحقیق حاضر برای ضخامت توزیع یکنواخت انتخاب شده است به طوری که اختلاف دو ضخامت متوالی در این مجموعه $\Delta t$ می‌باشد.

در طراحی به روش ضخامت متغیر دو شیوه برای تغییر ضخامت المان‌ها وجود دارد. شیوه‌ی اول به این ترتیب است که در ابتدای طراحی ضخامت همه‌ی المان‌ها حداکثر مقدار در مجموعه‌ی ضخامت‌های تعریف شده انتخاب می‌شود و سپس با پیشرفت بهینه‌سازی برای اصلاح ضخامت، از ضخامت‌های المان‌ها کاسته می‌شود. روش دیگر اصلاح ضخامت بدین ترتیب است که در ابتدا ضخامت المان‌ها مقدار متوسط انتخاب می‌شود سپس المان‌هایی که نیازمند افزایش یا کاهش