دانشکده مهندسی عمران

بهینه‌سازی شکل به روش الگوریتم ژنتیک در سازه‌های پیوسته

محمد کامل

استاد راهنمای اول:

دکتر وحیدرضا کلاتجاری

استاد مشاور:

دکتر حسین طالب‌پور

بهمن ۱۳۹۳

تقدیم به

پدر و مادرم ...

بار خدایا، نه می‌توانم موهایشان را که در راه عزت من سفید شد سیاه کنم و نه برای دست‌های پینه بسته‌شان که ثمره تلاش برای افتخار من است، مرهمی دارم. پس توفیقم ده که هر لحظه شکرگزارشان باشم و ثانیه‌های عمرم را در عصای دست بودنشان بگذرانم. باشد که خردترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

تقدیم به

همسرم ...

به پاس قدردانی از قلبی آکنده از عشق و معرفت که محیطی سرشار از سلامت و امنیت و آرامش و آسایش برای من فراهم آورده است. همدلی که با واژه‌ی نجیب و مغرور تلاش، آشنایی دارد و تلاش راستین را می‌شناسد و عطر رویایی آن را استشمام می کند و مرا در راه رسیدن به اهداف عالی یاری می‌رساند؛ همو که حس تعهد و مسؤولیت را در زندگی‌مان تلألویی خدایی داده است.

تشکر و قدردانی

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت و به شکر اندرش مزید نعمت، هر نفسی که فرو می‌رود ممد حیات است و چون برمی‌آید مفرح ذات. پس در نفسی دو نعمت موجود است و بر هر نعمتی شکری واجب.

از دست و زبان که برآید کز عهده شکرش به‌درآید

اکنون که پس از گذران این راه طولانی و طاقت‌فرسا به انتهای را می‌رسم و سختی این دوران را به‌خاطر می‌آورم، به رسم ادب و اخلاق وظیفه‌ی خود می‌دانم که از همه‌ی کسانی که مرا در طی کردن این مسیر بس ناهموار یاری رساندند تشکر نمایم. در ابتدا از دکتر **وحید رضا کلاتجاری** به خاطر زحماتی که در طول این مدت متحمل شدند تشکری دارم.

همچنین از دکتر **محمد حسین طالب‌پور** که در این راه زحمات فراوانی برای بنده کشیدند کمال تشکر را ادرم.

و در آخر از همه‌ی کسانی که به نوعی مرا در به ثمر رساندن این پایان‌نامه یاری رساندند تشکر می‌نمایم.

تعهد نامه

اینجانب محمد کامل دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته سازه دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بهینه سازی شکل به روش الگوریتم ژنتیک در سازه های پیوسته تحت راهنمایی دکتر وحید رضا کلاتجاری 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.

چکیده

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 دسته‌ی روش‌های ریاضی، معیار بهینگی و فرااکتشافی تقسیم‌بندی نمود. در این تحقیق از روش الگوریتم ژنتیک که از جمله روش‌های فرااکتشافی به شمار می‌رود، به‌منظور بهینه-سازی شکل سازه‌های پیوسته سه بعدی الاستیک استفاده شده است.

لازمه‌ی استفاده از روش الگوریتم ژنتیک داشتن توابع هدف و قیدهای مناسب نسبت به متغیرهای طراحی است. در این پایان‌نامه برای تحلیل سازه‌ها از روش المان‌های محدود (FEM) استفاده شده است. در این روش سازه به چندین المان شش وجهی آجری تقسیم می‌شود. بنابراین برای تغییر هندسه در بهینه‌سازی شکل کافیست مختصات گره‌های المان‌ها را تغییر داده و مجدداً مسئله را تحلیل نمود.

در این تحقیق وزن یا مساحت سازه به عنوان تابع هدف و محدودیت‌های تنش و تغییر شکل به‌طور هم‌زمان به عنوان قیدهای مسئله‌ی بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌است. از طرفی بهینه‌سازی در دو جهت به‌صورت هم‌زمان صورت گرفته است. چند مثال سازه سه بعدی پیوسته به همراه مثال-های صحت سنجی با استفاده از برنامه‌ی کامپیوتری تهیه شده در این پایان‌نامه، ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی شکل سازه‌های سه بعدی پیوسته، روش الگوریتم ژنتیک، قید تنش- تغییر مکان، بهینه‌سازی در دو جهت

فهرست مطالب

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ تاریخچه الگوریتم‌های ژنتیک ۴

۱-۳ اهداف کلی پایان‌نامه ۶

۱-۴ برنامه‌ی کامپیوتری نوشته شده ۶

۱-۵ ساختار کلی پایان‌نامه ۷

۲-۱ مقدمه ۸

۲-۲ روابط تنش و کرنش ۹

۲-۳ فرمول‌بندی المان محدود ۱۲

۳-۱ مقدمه ۱۷

۳-۲ پیش‌زمینه‌ی بیولوژیکی ژن‌ها و کروموزوم‌ها ۱۸

۳-۳ بهینه‌یابی با الگوریتم‌های ژنتیک ۲۰

۳-۴-۱ کد کردن مقادیر ۲۲

۳-۴-۱-۱ کد مبنای دو (کد دودویی) ۲۲

۳-۴-۲ شایستگی هر کروموزوم ۲۴

۳-۴-۲-۱ تابع پنالتی ۲۴

۳-۴-۲-۲ تابع شایستگی ۲۶

۳-۴-۳ انتخاب ۲۷

۳-۴-۳-۱ روش رقابتی ۲۸
۳-۴-۳-۲ مفهوم برگزیده (شایسته‌سالاری) ۳۰
۳-۴-۴ پیوند (ادغام) ۳۰
۳-۴-۴-۱ عملگرهای GA ۳۱
۳-۴-۴-۱-۱ عملگر ادغام ۳۲
۳-۴-۴-۱-۲ جهش ۳۵
۳-۴-۵ مفاهیم تکمیلی ۳۷
۳-۴-۵-۱ شرط توقف الگوریتم ۳۸
۳-۵ انواع بهینه‌یابی سازه‌ها ۳۹
۳-۶ مبانی بهینه‌یابی شکل سازه‌های سه بعدی به‌وسیله GA ۴۰
۳-۷ فرمولبندی و روند مسئله‌ی بهینه‌یابی شکل بر اساس GA ۴۳
۳-۷-۱ متغیرهای طراحی ۴۴
۳-۷-۲ تابع هدف ۴۵
۳-۷-۳ قید G ۴۶
۳-۷-۴ مبانی بهینه‌سازی شکل در سازه‌ی سه بعدی ۴۷
۳-۷-۵ انتخاب ۴۸
۳-۷-۶ عملگرهای GA ۴۹
۳-۷-۷ شرط خاتمه ۴۹
۴-۱ مقدمه ۵۱

۴-۲ تعریف متغیرها ۵۲
۴-۳ گرفتن داده‌های ورودی ۵۲
۴-۴ جمعیت اولیه ۵۳
۴-۵ کُدگشایی (برگرداندن کد به مقدار اولیه) ۵۳
۴-۶ محاسبه‌ی تابع هدف، جریمه و شایستگی ۵۴
۴-۶-۱ تحلیل سازه با استفاده از روش المان‌های محدود ۵۴
۴-۶-۲ تابع پنالتی یا جریمه ۵۵
۴-۶-۳ تابع هدف، تابع هدف اصلاح‌شده و شایستگی ۵۵
۴-۷ فرآیند انتخاب، ادغام و جهش ۵۶
۴-۸ شرط خاتمه ۵۷
۴-۹ مثال‌های صحت سنجی ۵۹
۴-۹-۱ مثال ۱: تیر دو سرگیردار سه بعدی ۵۹
۴-۹-۲ مثال ۲: صفحه‌ی یک‌سر مفصل تحت کشش ۶۲
۵-۱ مقدمه ۶۵
۵-۲ مثال (۱) تیر دوسر گیردار سه بعدی ۶۵
۵-۳ مثال (۲) صفحه‌ی یک‌سر مفصل تحت کشش ۶۸
۵-۴ مثال (۳) تیر لانه زنبوری دوسر مفصل ۷۰
۶-۱ مقدمه ۷۴
۶-۲ جمع‌بندی و نتایج ۷۴

۶-۳ پیشنهادها ۷۵

مراجع ۷۷

فهرست شکل‌ها

۲-۱ جسم سه بعدی ۱۰

۲-۲ المان شش وجهی ۱۲

۳-۱ رشته ***DNA*** ۱۸

۳-۲ نمایش کروموزوم‌ها به‌صورت دودویی ۲۳

۳-۳ نمایش شایستگی هر رشته در مثال روش مسابقه ۲۹

۳-۴ نمایش رشته‌های برنده در مثال روش مسابقه ۲۹

۳-۵ روش ادغام دو نقطه‌ای ۳۳

۳-۶ روش ادغام یکنواخت ۳۴

۳-۷ نیاز جمعیت به بیت ۱ ..... ۳۶

۳-۸ تاثیر عملگر جهش ۳۷

۴-۱ فلوچارت برنامه‌ی بهینه‌یابی شکل سازه‌های سه بعدی ۵۸

۴-۲ شکل اولیه‌ی تیر دوسر گیردار ۶۰

۴-۳ روند بهینه‌سازی تیر دوسر گیردار ۶۰

۴-۴ کانتورهای تنش محوری x برای طرح بهینه‌ی تیر سه بعدی ۶۱

۴-۵ طرح بهینه به همراه روند بهینه‌سازی تیر دوسر گیردار ۶۱

۴-۶ شکل اولیه صفحه‌ی یک‌سر مفصل تحت کشش ۶۳
۴-۷ روند بهینه‌سازی صفحه‌ی یک سر مفصل ۶۳
۴-۸ کانتورهای تنش فون میسز طرح بهینه‌ی صفحه ۶۴
۴-۹ طرح بهینه و روند بهینه‌سازی صفحه‌ی تحت کشش ۶۴
۵-۱ طرح بهینه و روند بهینه‌سازی تیر دوسر گیردار ۶۶
۵-۲ کانتورهای تنش فون میسز برای طرح بهینه‌ی تیر دوسر گیردارسه بعدی ۶۷
۵-۳ روند بهینه‌سازی صفحه‌ی یک سر مفصل ۶۹
۵-۴ کانتورهای تنش فون میسز برای طرح بهینه‌ی صفحه‌ی تحت کشش ۶۹
۵-۵ مقطع تیر لانه زنبوری ۷۱
۵-۶ ابعاد سوراخ‌های جان تیر اولیه به همراه فاصله‌ی بین سوراخ‌ها ۷۱
۵-۷ ابعاد و نحوه‌ی بارگذاری تیر لانه زنبوری ۷۲
۵-۸ روند بهینه‌سازی تیر لانه زنبوری ۷۲
۵-۹ کانتورهای تنش فون میسز تیر لانه زنبوری بهینه شده ۷۳

فهرست جدول‌ها

۲-۱ نقاط گوسی و وزن‌ها ۱۵

۳-۱ خلاصه مدل‌های ارائه شده برای مسائل بهینه‌سازی شکل ۴۳

۴-۱ پارامترهای GA در مسئله تیر دو سر گیردار ۵۹

۴-۲ پارامترهای GA در مسئله صفحه‌ی تحت کشش ۶۲

۵-۱ پارامترهای GA در مسئله تیر دو سر گیردار ۶۶

۵-۲ پارامترهای GA در مسئله صفحه‌ی تحت کشش ۶۸

۵-۳ پارامترهای GA در مسئله تیر لانه زنبوری ۷۰

۱-۱ مقدمه

انسان ذاتاً تمام فعالیت‌هایش را به شکلی انجام می‌دهد، که ناراحتی و دردش به حداقل برسد و حتی‌المقدور انرژی را صرفه جویی نماید[1]. این تمایل و اراده باید به نحوی باشد که با توجه به منابع محدود، بیشینه‌ی خروجی یا سود حاصل گردد. اختراعات اولیه‌ی بشر، همچون اهرم، چرخ و ... تمایل وی را به افزایش بازدهی مکانیکی نشان می‌دهد ؛ مثال‌های بی‌شماری از این دست در تاریخ بشر یافت می‌شود. بر اساس مرجع [1] کتاب دوگلاس وایلد[1] مجموعه‌ی جالبی در مورد ریشه کلمه‌ی بهینه و طراحی بهینه است. بر اساس این کتاب طراحی بهینه عبارتست از:

«بهترین طراحی قابل قبول بر اساس یک معیار کیفی وکمی شایستگی از پیش تعریف شده»

به طور کلی انتخاب و طراحی بهینه در بسیاری از مسائل علمی و فنی باعث تولید بهترین محصول یا جواب ممکن در یک شرایط خاص می‌شود. این خواسته در علوم مهندسی بصورت کاهش مصرف مصالح و یا کاهش هزینه‌های اجرایی نمود پیدا می‌کند. برای مثال تولید محصولات در حوزه-های مختلف بهینه سازی وابسته به طراحی دقیق و بهینه شکل، اندازه و قطعات آن محصول می‌باشد. مثلاً برای ساخت بال‌های یک هواپیما، مواد و شکل‌های مختلفی وجود دارد؛ اما کدامیک نتیجه

[1] . Douglas Wilde

مطلوب‌تری را خواهد داشت؟ آیا آلیاژ خاص استفاده شود بهتر است یا از مواد مرکب[1]؟ از طرفی شکل، اندازه و وزن آن با توجه به ماده‌ی به کار رفته چگونه باشد؟ مشاهده می‌شود که در هر حالت متدهای طراحی و تصمیم‌گیری متعددی به‌وجود می‌آید، اما بهترین روش کدام است و چگونه می‌توان آن را پیدا کرد؟ به عنوان مثال دیگر در مهندسی عمران طراحی یک سازه‌ی خرپایی بر حسب سطح مقطع اعضاء و نیز طریقه قرارگیری آن‌ها با توجه به هزینه و شرایط، نیازمند یک طراحی بهینه است. یا در حوزه مهندسی مکاترونیک (روباتیک) می‌توان به مسیر بهینه‌ی حرکت بازوی یک روبات[2] اشاره کرد. در بهینه سازی هندسه‌ی محیط‌های پیوسته ، هدف پیدا کردن شکل مناسب برای محیط مورد نظر می‌باشد.

به طور کلی در همه‌ی مسائل بهترین جواب ممکن حاصل شود، اما از میان این همه راه حل و جواب کدامیک بهینه است؟ از آنجایی که نتیجه‌ی کار با توجه به نوع انتخاب این متدها و روش‌ها حاصل می‌شود، لذا اهمیت موضوع انتخاب بهینه[3] و بهینه‌سازی در همه‌ی مسائل آشکار می‌شود. بنابراین:

«هدف این است که در فضای جواب‌های ممکن، بهترین جواب ممکن یافت شود.»

نکته‌ی مهم در تمامی مسائل بهینه‌سازی، ساخت مسأله به زبان ریاضی می‌باشد تا با کمک روش‌های مختلف آن را حل نمود. در روند تشکیل و حل یک مسئله‌ی بهینه‌سازی موارد زیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند:

۱. متغیرهای طراحی مسأله‌ی بهینه‌سازی
۲. تابع هدف مسأله‌ی بهینه‌سازی
۳. قیود مسأله‌ی بهینه‌سازی
۴. فضای طراحی مسأله‌ی بهینه‌سازی

[1] . Composite
[2] . Robot Trajectory
[3] . Optimum

۵. فرآیند حل مسأله‌ی بهینه‌سازی

به طور کلی مسائل بهینه‌یابی سازه‌ها را می‌توان در چهار رده‌ی مختلف دسته‌بندی نمود که عبارتند از بهینه‌یابی مقطع[۱] ، شکل یا هندسه سازه[۲] ، توپولوژی سازه[۳] و پیکر بندی[۴]. در اکثر مسائل واقعی با ترکیبی از موارد فوق و یا مورد آخر که دربرگیرنده هر سه مورد توپولوژی، مقطع و هندسه است؛ مواجه شده و بهینه یابی آن مورد نظر است.

در این پایان نامه به بهینه‌یابی شکل در سازه های سه بعدی با اعمال قید تنش و قید تغییر شکل پرداخته شده است. در این زمینه دو نوع فرمول‌بندی رایج وجود دارد. دسته اول بهینه یابی بر اساس روش‌های قطعی[۵] و یا به تعبیر رایج‌تر برنامه‌ریزی ریاضی[۶] است. در این دسته دیدگاه غیر احتمالاتی بر فضای مسئله حاکم است. دسته دوم، بهینه‌یابی مبتنی بر روش‌های تصادفی[۷] است، که از تئوری احتمالات در فرمول‌بندی خود بهره می‌برد. در میان این روش‌ها، روش تصادفی هدایت شده‌ی[۸] الگوریتم ژنتیک[۹] از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است و می‌توان آن را به عنوان یکی از روش‌های برتر دانست.

از آن جا که الگوریتم ژنتیک نیازی به مشتق‌گیری و حدس اولیه‌ی خاصی ندارد و نیز یک فرآیند اتفاقی است، قادر است تمامی فضای کاوش را با احتمال بیشتری نسبت به دیگر شیوه‌های معمول جستجو کند. راندمان و انعطاف پذیری بالای الگوریتم‌های ژنتیک سبب شده تا بهینه یابی بر اساس آن در حل مسائل کاربردی مختلف، توسط افراد و مقالات متنوع به اثبات برسد. اما عدم شناخت صحیح از پارامترهای GA همچون تعداد اعضای جمعیت[۱۰] ، تعداد نسل‌ها[۱۱] ، نرخ پیوند و...،

[1] . Sizing Optimization
[2] . Geometrical (Shape) Optimization
[3] . Topological Optimization
[4] . Layout Optimization
[5] . Deterministic
[6] . Mathematical Programing
[7] . Stochastic
[8] . Guided Random Search
[9] . Genetic Algorithm
[10] . Pop-size
[11] . No Of Generation

و نیز عدم آگاهی نسبت به روابط حاکم بر GA از قبیل نوع تابع جریمه و مقادیر دخیل در آن، نوع تابع شایستگی و ... از جمله عواملی است که سبب می‌شود تا GA در برخی مواقع بهینه محلی[1] را بدست آورد.

از دیگر مشکلات بهینه یابی بر اساس GA سرعت فرآیند بهینه یابی می‌باشد. این مهم نیز از جمله مسائلی است که در این پایان نامه مورد توجه قرار گرفته و سعی در بهبود آن شده است.

۱-۲ تاریخچه الگوریتم‌های ژنتیک

ایده‌ی اصلی الگوریتم‌های تکاملی در سال ۱۹۶۰ توسط *ریچنبرگ*[2] مطرح شد که تحقیق وی در مورد استراتژی‌های تکاملی[3] بود[2]. 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 بهینه سازی و بر اساس ساختار ژن[4] ها و کروموزوم[5] ها است که توسط *جان هولند*[6] در سال ۱۹۷۵ در دانشگاه میشیگان مطرح شد[3] و پس از وی توسط جمعی از دانشجویانش مثل *گلدبرگ*[7] و *آنن آربور*[8] توسعه یافت[4].

در سال ۱۹۹۲ *جان کوزا*[9] از الگوریتم ژنتیک برای حل و بهینه سازی مسائل مهندسی پیشرفته استفاده کرد و توانست برای اولین بار روند الگوریتم ژنتیک را به زبان کامپیوتر درآورد و برای آن یک زبان برنامه نویسی ابداع کند که به این روش برنامه نویسی، برنامه نویسی ژنتیک[10] می‌گویند.

---

1. Local Optimim
2. Rechenberg
3. Evolutionary Strategies
4. Gene
5. Chromosome
6. John Holland
7. Goldberg
8. Ann Arbor
9. John Koza
10. Genetic Programming (GP)

نرم افزاری که توسط وی ابداع گردید به نرم افزار LISP مشهور است که هم‌اکنون نیز کاربرد فراوانی در حل و بهینه سازی مسائل مهندسی دارد[5]. از آن پس تا به امروز کتاب‌های متعددی توسط افرادی چون *گلدبرگ*، *دب*[1] و *جنکینز*[2] به رشته‌ی تحریر در آمده است؛ وپس از آن بسیاری از محققین مقالات متنوعی درباره‌ی بسط دامنه کاربرد GA، ارائه نموده‌اند[6] و [7]. بدین‌گونه که این روش را با روش‌های مختلف تحلیل سازه ادغام کرده و یا با تغییر توابعی چون ادغام یا جهش در روند الگوریتم ژنتیک، سعی در بهبود نتایج و افزایش سرعت محاسبات دارند.

با توجه به قابلیت‌ها و انعطاف‌پذیری بالای الگوریتم‌های ژنتیک، این روش در انواع بهینه‌سازی اندازه، شکل و توپولوژی مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجایی‌که در این تحقیق بهینه‌سازی شکل مورد توجه قرار گرفته، در ادامه به کارهایی که در این زمینه‌ی خاص مورد بررسی قرار گرفته می‌پردازیم.

درسال ۱۹۹۷ *کیتا*[3] و *تنی*[4] در رابطه با بهینه‌سازی شکل در سازه‌های پیوسته دو بعدی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، تحقیقی انجام دادند. در این تحقیق برای تحلیل سازه و محاسبه‌ی مقدار شایستگی کروموزوم‌ها از روش المان‌های مرزی استفاده شده است. در ادامه با استفاده از روش تغییر شکل فرم آزاد (FFD)، متغیرهای طراحی، جابه‌جایی مختصات نقاط کنترلی انتخاب شده است [8].

در سال ۱۹۹۹ *آنیچیاریکو*[5] و *سرولازا*[6] در روند بهینه‌سازی شکل در سازه‌های دو بعدی، سه روش بتا-اسپیلاین، اجزای محدود و الگوریتم ژنتیک را با هم ادغام کرده‌اند[9]. در این تحقیق ابتدا با استفاده از یک مش بندی متغیرهای طراحی، منحنی‌های بتا-اسپیلاین مرزی در نظر گرفته شده و در نهایت با استفاده از روش المان‌های محدود (FEM) تابع شایستگی محاسبه می‌گردد.

[1] . Deb
[2] . Jenkins
[3] . Kita
[4] . Tanie
[5] . Annicchiarico
[6] . Cerrolaza

مجدداً در سال ۲۰۰۱ *آنیچیاریکو* و *سرولازا* مقاله‌ای تحت عنوان بهینه‌سازی شکل سازه مدل‌های اجزا محدود سه بعدی بر اساس الگوریتم ژنتیک و مدل‌سازی هندسی ارایه کردند [22]. در این مقاله نیز با استفاده از یک مش بندی متغیرهای طراحی، منحنی‌های بتا-اسپیلاین مرزی در نظر گرفته و در نهایت با استفاده از روش المان‌های محدود (FEM) تابع شایستگی محاسبه شده است.

همان‌طور که اشاره شد، امروزه الگوریتم ژنتیک در بهینه‌سازی شکل نیز با گذشت زمان در حال پیشرفت بوده و از اهمیت خاصی برخوردار است.

۱-۳ اهداف کلی پایان‌نامه

باتوجه به روش تحلیل و سپس روش بهینه‌یابی در این پایان‌نامه، بخشی به معرفی روش‌های بکار رفته اختصاص داده شده است.

پیدا کردن تابع هدف مناسب و هدایت شده و نیز انتخاب عملگرهای مناسب در الگوریتم ژنتیک از مهمترین اهداف این پایان‌نامه می‌باشد.

در انتها نیز تولید برنامه‌ی کامپیوتری به منظور حل مسائل بهینه‌سازی شکل سازه‌های پیوسته به عنوان یکی از اهداف این پایان‌نامه در نظر گرفته شده است.

۱-۴ برنامه‌ی کامپیوتری نوشته شده

بدون داشتن یک برنامه‌ی کامپیوتری مناسب جهت انجام عملیات تحلیل و بهینه‌سازی، این فرایند امکان‌پذیر نیست. لذا در این پایان‌نامه برنامه‌ای به منظور انجام عملیات مذکور ارایه گردیده که

به زبان ویژوال بیسیک ۶ نوشته شده است. توضیحاتی راجع به این برنامه در فصل چهار ارایه و در انتها مثال‌هایی جهت نمایش کارایی برنامه و روش مورد استفاده در آن بررسی شده است.

۱-۵ ساختار کلی پایان‌نامه

به طور کلی این پایان‌نامه شامل شش فصل می‌باشد. در فصل حاضر به مقدماتی راجع به پایان-نامه اشاره شد. در فصل دوم روش اجزا محدود و فرمولبندی لازم جهت تحلیل مسائل سه بعدی پیوسته به صورت مختصر ارایه شده است.

فصل سوم اختصاص به مبانی بهینه‌یابی هندسه سازه بر اساس GA با فرض ثابت بودن توپولوژی دارد. در این فصل به بررسی فرمولبندی رایج در این زمینه پرداخته شده است. برای این منظور تابع هدف و قیود حاکم بر مسئله در بهینه‌یابی هندسه سازه‌های سه بعدی پیوسته مورد توجه قرار گرفته و با ارائه پیشنهادهایی، روابط و پارامترهای مطرح بهبود یافته است.

فصل چهارم اختصاص به شرح الگوریتم برنامه‌ی نوشته شده برای حل مسائل این پایان‌نامه دارد. در این فصل ماژول‌ها و سابروتین‌های موجود در برنامه، به‌صورت کلی و به ترتیب اجرای برنامه توضیح داده شده است.

فصل پنجم بر اساس نتایج حاصل از این پایان‌نامه، تعدادی مثال متداول در مراجع بهینه‌سازی شکل بررسی و نتایج حاصل از آن‌ها ارایه شده است.

فصل ششم نتایج حاصل از این پایان‌نامه و پیشنهادات لازم برای فعالیت های پژوهشی آتی عنوان شده است.

۲-۱ مقدمه

تقریباً هر پدیده در طبیعت اعم از علوم زیست‌شناسی، زمین‌شناسی، یا مکانیکی را می‌توان با کمک قوانین فیزیک، بر حسب معادلات جبری، دیفرانسیلی یا انتگرالی که ارتباط دهنده‌ی مقادیر مختلف مورد نظر هستند، توصیف نمود. تعیین توزیع تنش در یک مخزن تحت فشار دارای سوراخ-هایی با شکل‌های ناهمگون و تعداد زیادی تقویتی و تحت بارهای مکانیکی، حرارتی یا آیرودینامیک؛ به‌دست آوردن غلظت آلاینده‌ها در آب دریا یا محیط و شبیه‌سازی هوا جهت درک و پیش‌بینی مکانیک تشکیل گردبادها و طوفان‌ها، مثال‌هایی از مسائل متعدد کاربردی مهم می‌باشند.

در شبیه‌سازی عددی یک فرآیند فیزیکی، ما از یک روش عددی و یک رایانه برای ارزیابی مدل ریاضی فرآیند بهره می‌جوییم. روش اجزا محدود، روش عددی قدرتمندی است که برای ارزیابی فرآیندهای پیچیده‌ی فیزیکی ایجاد شده است. این روش توسط سه ویژگی توصیف می‌گردد:

۱. دامنه‌ی مسئله با مجموعه‌ی زیر دامنه‌های ساده، به نام اجزای محدود بیان می‌گردد. مجموعه‌ی اجزای محدود را شبکه‌ی اجزای محدود می‌نامند.

۲. فرآیند فیزیکی روی هر جزء محدود، به‌وسیله‌ی توابع دلخواه (چندجمله‌ای یا نوع دیگر) تقریب زده می‌شود و معادلات جبری ارتباط دهنده‌ی کمیت‌های فیزیکی در نقاط انتخابی به نام گره‌های اجزا به‌دست می‌آید.

۳. معادلات اجزا با استفاده از پیوستگی و یا تعادل مقادیر فیزیکی همبست می‌شوند. عموماً در روش اجزای محدود به دنبال یافتن حل تقریبی u برای معادله‌ی دیفرانسیل به شکل زیر هستیم.

$$\mathrm{u} \approx \sum_{j=1}^{n} u_j \varphi_j + \sum_{j=1}^{m} c_j \emptyset_j$$

که u_j در گره‌ها، φ_j توابع میان یابی، c_j ضرایب غیر گرهی و $\emptyset_j$ توابع تقریب متناسب با آن می-باشند [10].

۲-۲ روابط تنش و کرنش

یک جسم سه بعدی که حجم V را اشغال کرده و دارای سطح S می‌باشد، در شکل (۱-۱) نشان داده شده است.هر نقطه بر روی این جسم توسط مختصات x، y و z تعیین می‌شود. مرز جسم به ناحیه‌ای از فضا که دارای جابجایی معین بوده، محدود می‌باشد. بر روی قسمتی از مرز جسم نیروی گسترده بر واحد سطح T، که بردار کششی نامیده می‌شود، اعمال شده است. تحت اثر این نیرو جسم تغییر شکل می‌یابد. تغییر شکل یک نقطه‌ی $\mathrm{x} = [x, y, z]^T$ برحسب سه مؤلفه‌ی جابجایی آن عبارت است از:

$$\mathbf{u} = [u, v, w]^T \qquad (۱-۲)$$

همانند نیروی وزن بر واحد حجم، بردار f نیز یک نیروی گسترده بر واحد حجم می‌باشد و به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

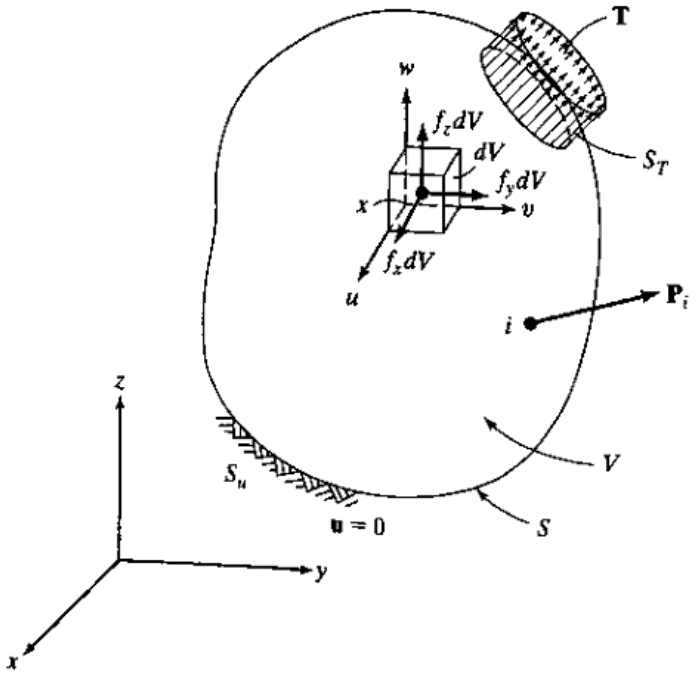
$$\mathbf{f} = [f_x, f_y, f_z]^T \qquad (۲-۲)$$

نیروی حجمی عمل‌کننده بر روی المان حجمی dV در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. کشش سطحی T بر حسب مقادیر مؤلفه‌هایش در نقاط روی سطح به‌صورت زیر ارائه می‌شود:

$$\mathbf{T} = [T_x, T_y, T_z]^T \qquad (۳-۲)$$

نیروی گسترده‌ی تماسی و اعمال فشار، نمونه‌هایی از کشش می‌باشند. بار اعمالی $\mathbf{P}$ در یک نقطه‌ی i توسط سه مؤلفه‌ی خود، به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود.

$$\boldsymbol{P_i} = [P_x, P_y, P_z]_i^T \qquad (۴-۲)$$



شکل ۱-۱ جسم سه بعدی

هر گاه المان حجمی dV به یک نقطه میل کند، تانسور تنش با جایگذاری مؤلفه‌های تنش در یک ماتریس متقارن (۳×۳) نمایش داده می‌شود. به‌هرحال، ما بردار تنش را با شش مؤلفه‌ی مستقل از هم به‌صورت زیر نمایش می‌دهیم.

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}]^T \qquad (۵-۲)$$

درحالی‌که $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ تنش‌های قائم و $\tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{zy}$ تنش‌های برشی می‌باشند. بردار کرنش متناظر با تنش‌های معادله‌ی فوق به‌صورت زیر نمایش داده می‌شود.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}]^T \qquad (۶-۲)$$

درحالی‌که $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ کرنش‌های قائم و $\gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}$ کرنش‌های برشی هستند. در حل مسائل ابتدا تغییر مکان نقاط گرهی محاسبه می‌گردد. پس از محاسبه‌ی تغییر مکان که روش حل آن در ادامه گفته می‌شود، با استفاده از فرمول زیر بردار کرنش محاسبه می‌شود.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}]^T \qquad (۷-۲)$$

برای مواد الاستیک خطی، روابط تنش-کرنش از قانون عمومی هوک به‌دست می‌آید. برای مواد ایزوتوپیک، مدول یانگ E (ضریب ارتجاعی) و نسبت پواسون ν، دو خاصیت وابسته به این مواد می‌باشند. تانسور تنش را با استفاده از رابطه‌ی زیر می‌توان به‌دست آورد.

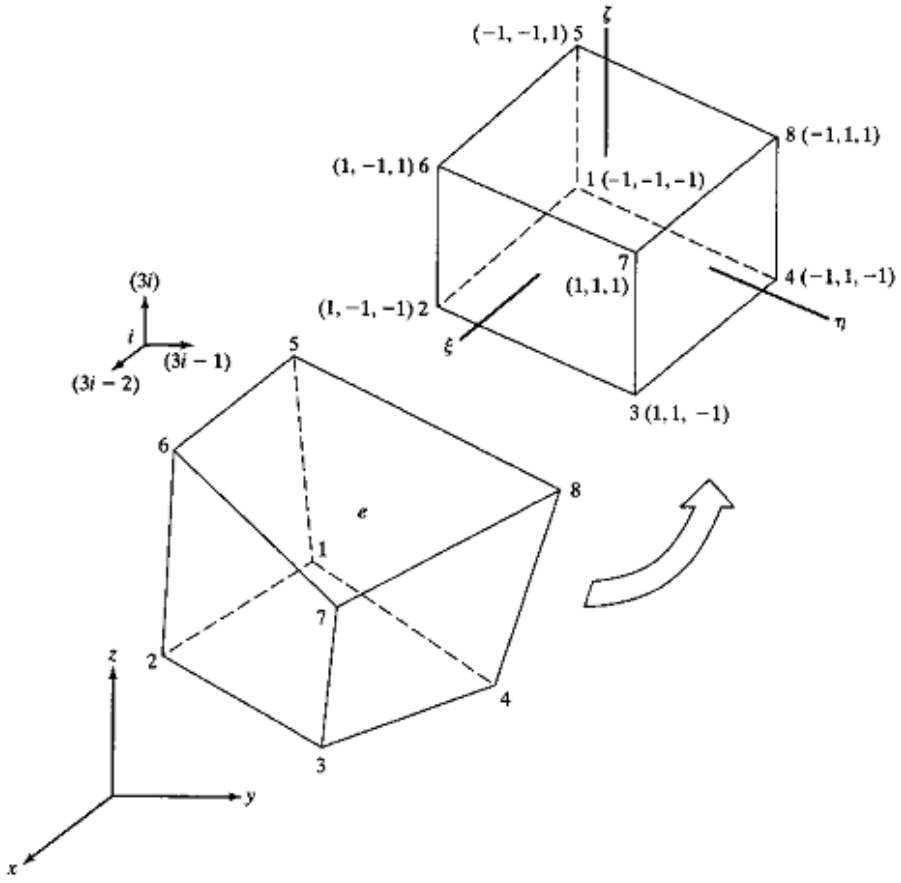
$$\boldsymbol{\sigma} = D\varepsilon \qquad (۸-۲)$$

درحالی‌که $\mathbf{D}$(۶×۶) یک ماتریس متقارن مواد بوده و توسط رابطه‌ی زیر ارائه می‌شود[7].

$$\boldsymbol{D} = \frac{E}{(1+\vartheta)(1-2\vartheta)} \begin{bmatrix} 1-\vartheta & \vartheta & \vartheta & 0 & 0 & 0 \\ \vartheta & 1-\vartheta & \vartheta & 0 & 0 & 0 \\ \vartheta & \vartheta & 1-\vartheta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5-\vartheta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\vartheta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\vartheta \end{bmatrix} \qquad (۹-۲)$$

۲-۳ فرمول‌بندی المان محدود

در المان‌های شش وجهی برای تعریف هم‌بندی، از یک طرح شماره‌گذاری سازگار برای گره استفاده می‌شود. برای یک المان شش وجهی یا المان آجری با هشت گره، مطابق شکل (۲-۱) نگاشت المان بر روی یک مکعب به اضلاع ۲ واحد که به طور متقارن نسبت به مختصات (ξ, η, ζ) - قرار گرفته، در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲-۱ المان شش وجهی

هر المان متناظر در دو بعد معادل یک چهارضلعی با چهار گره می‌باشد. بر روی مکعب مبنا، توابع شکل لاگرانژی به‌صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\mathbf{N_i} = \frac{1}{8}(1+\xi_i\xi)(1+\eta_i\eta)(1+\zeta_i\zeta) \qquad i = 1 \text{ تا } 8 \qquad (۱۰-۲)$$

درحالی‌که (ξ_i, η_i, ζ_i) نشانگر مختصات گره‌ی i از المان در دستگاه مختصات (ξ, η, ζ) می‌باشد. از آن جایی که هر المان دارای هشت گره بوده و هر گره سه درجه آزادی دارد، جابجایی‌های گرهی المان توسط بردار زیر نمایش داده می‌شود.

$$\boldsymbol{q} = [q_1, q_2, \dots, q_{24}]^T \qquad (۱۱-۲)$$

حال با استفاده از توابع شکل $\mathbf{N_i}$، جابجایی‌های هر نقطه‌ی درون المان بر حسب مقادیر گرهی تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{u} &= N_1 q_1 + N_2 q_4 + \cdots + N_8 q_{22} \\ \boldsymbol{v} &= N_1 q_2 + N_2 q_5 + \cdots + N_8 q_{23} \\ \boldsymbol{w} &= N_1 q_3 + N_2 q_6 + \cdots + N_8 q_{24} \end{aligned} \qquad (۱۲-۲)$$

همچنین:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{x} &= N_1 x_1 + N_2 x_2 + \cdots + N_8 x_8 \\ \boldsymbol{y} &= N_1 y_1 + N_2 y_2 + \cdots + N_8 y_8 \\ \boldsymbol{z} &= N_1 z_1 + N_2 z_2 + \cdots + N_8 z_8 \end{aligned} \qquad (۱۳-۲)$$

درحالی‌که ماتریس N به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\boldsymbol{N} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 & N_5 & 0 & 0 & N_6 & 0 & 0 & N_7 & 0 & 0 & N_8 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 & N_5 & 0 & 0 & N_6 & 0 & 0 & N_7 & 0 & 0 & N_8 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 & N_5 & 0 & 0 & N_6 & 0 & 0 & N_7 & 0 & 0 & N_8 \end{bmatrix} \qquad (۱۴-۲)$$

با جایگذاری N_i از معادله‌ی (۲-۱۰) در رابطه‌ی (۲-۱۳) می‌توان ماتریس ۳×۳ ژاکوبین را نیز محاسبه نمود.

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathrm{x}}{\partial \xi} & \frac{\partial \mathrm{y}}{\partial \xi} & \frac{\partial \mathrm{z}}{\partial \xi} \\ \frac{\partial \mathrm{x}}{\partial \eta} & \frac{\partial \mathrm{y}}{\partial \eta} & \frac{\partial \mathrm{z}}{\partial \eta} \\ \frac{\partial \mathrm{x}}{\partial \zeta} & \frac{\partial \mathrm{y}}{\partial \zeta} & \frac{\partial \mathrm{z}}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \qquad (۱۵-۲)$$

در عبارت انرژی پتانسیل انرژی کرنشی المان به‌صورت زیر می‌باشد.

$$\boldsymbol{U_e} = \frac{1}{2}\int_e \ \varepsilon^T D\varepsilon \, dV$$

$$\boldsymbol{U_e} = \frac{1}{2} q^T B^T DBq \int_e \ dV \qquad (۱۶\text{-}۲)$$

$$\boldsymbol{U_e} = \frac{1}{2} q^T k^e q$$

با استفاده از تساوی $dV = |detJ| d\xi d\eta d\zeta$ ماتریس سختی المان $\mathbf{k}^e$ به‌صورت زیر ارائه می‌شود.

$$\mathbf{k}^e = \iiint_{-1}^{+1} B^T DB \ |detJ| \ d\xi d\eta d\zeta \qquad (۱۷_۲)$$

درحالی‌که $\mathbf{J}$ یک ماتریس ژاکوبین (۳×۳) می‌باشد. انتگرال‌گیری در معادله‌ی (۲-۱۷)، با استفاده از روش تربیع گوسی به‌صورت عددی انجام می‌گیرد.

رابطه‌ی کلی محاسبه‌ی انتگرال سه بعدی به روش تربیع گوسی به صورت زیر می‌باشد:

$$\iiint_{-1}^{+1} f(\xi,\eta,\zeta) \ d\xi d\eta d\zeta \approx \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n} w_i w_j w_k f(\xi_i,\eta_i,\zeta_i) \qquad (۱۸_۲)$$

در جدول ۲-۱ مقادیر نقاط گوسی و وزن‌ها نمایش داده شده است.

جدول ۲-۱ نقاط گوسی و وزن‌ها

شماره نقاط، n	موقعیت، ξ_i	وزن‌ها، w_i
1	**0.0**	**2.0**
2	**± 0.5773502692**	**1.0**
3	**± 0.7745966**	**0.5555555556**
	0.0	**0.8888888889**
4	**± 0.8611363116**	**0.3478548451**
	± 0.3399810436	**0.6521451549**
5	**± 0.9061798459**	**0.2369268851**
	± 0.5384693101	**0.4786286705**
	0.0	**0.5688888889**
6	**± 0.9324695142**	**0.1713244924**
	± 0.6612093865	**0.3607615730**
	± 0.2386191861	**0.4679139346**

حال برای توضیح نحوه‌ی کاربرد روش تربیع گوسی در محاسبه‌ی سختی یک المان شش وجهی، رابطه‌ی (۲-۱۷) را در نظر بگیرید؛ درحالی‌که B و $\det \mathbf{J}$ توابعی بر حسب $\boldsymbol{\xi}$ ، $\boldsymbol{\eta}$ و $\boldsymbol{\zeta}$ می‌باشند. در حقیقت انتگرال $\mathbf{k}^e$ برای هر المان شامل انتگرال هر عنصر یک ماتریس (۲۴×۲۴) می‌باشد. لیکن به علت خاصیت تقارن ماتریس $\mathbf{k}^e$ نیازی به انتگرال‌گیری عناصر زیر قطر اصلی نمی‌باشد. هر گاه $\emptyset$ نشانگر عضو ij ام زیر انتگرال باشد، به‌طوری‌که:

$$\emptyset(\xi,\eta,\zeta) = t_e(B^T DB\ det\mathbf{J})_{ij} \qquad (۱۹-۲)$$

آنگاه با استفاده از قاعده‌ی ۳×۳ داریم:

$$k_{ij} \approx \sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=1}^{3} w_i w_j w_k\, \emptyset(\xi_i,\eta_i,\zeta_i) \qquad (20_2)$$

در نهایت پس از محاسبه‌ی ماتریس سختی هر المان با استفاده از ماتریس همبند، سختی‌ها و بارها در موقعیت‌های کلی هم‌گذاری می‌شوند. بارهای نقطه‌ای به موقعیت‌های مناسب بردار نیرو افزوده شده و شرایط مرزی با استفاده از رهیافت جریمه یا رهیافت‌های دیگر در نظر گرفته می‌شوند. در نهایت رهیافت‌های انرژی و گالرکین منجر به معادله‌ی زیر می‌شود.

$$\boldsymbol{KQ = F} \qquad (۲۱\text{-}۲)$$

پس از حل معادله‌ی فوق که در آن $\mathbf{K}$ ماتریس سختی کل سازه، $\mathbf{Q}$ ماتریس جابجایی و $\mathbf{F}$ ماتریس نیرو می‌باشد، جابجایی‌های گرهی المان q به‌دست می‌آید. با در نظر گرفتن $\boldsymbol{\sigma = D\varepsilon}$ و $\boldsymbol{\varepsilon = Bq}$، تنش‌های المان به‌صورت زیر ارائه می‌شود.

$$\sigma = \boldsymbol{DBq} \qquad (۲۲\text{-}۲)$$

در انتها با به‌دست آوردن تانسور تنش می‌توان تنش فن میسز هر المان تشکیل دهنده‌ی سازه را به صورت جداگانه محاسبه نمود[11].

از آن‌جایی‌که در این پایان‌نامه قید استفاده‌شده در الگوریتم ژنتیک تنش فن میسز و تغییر شکل‌ها می‌باشد؛ با به‌دست آوردن تنش و تغییر شکل گره‌های تمامی المان‌های سازه، درصورت تجاوز آن‌ها از حد مجاز، شکل بهینه‌ی به‌وجود آمده به تناسب مقدار تجاوز قیدها جریمه می‌شود. در ادامه این مطلب به‌صورت مفصل توضیح داده خواهد شد.

۳-۱ مقدمه

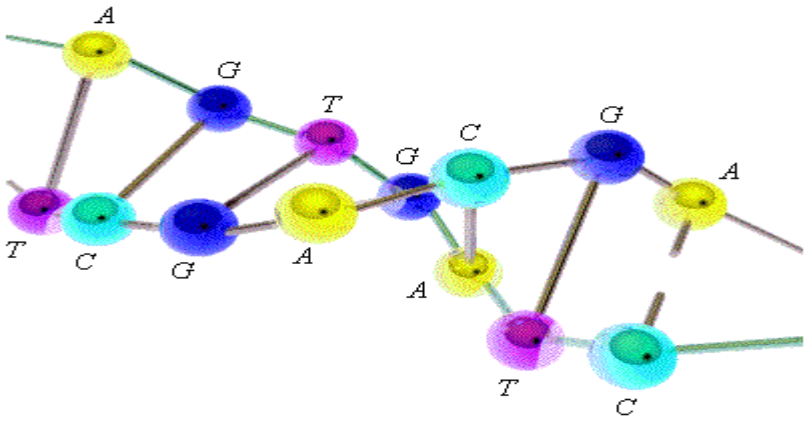
الگوریتم ژنتیک یکی از زیرمجموعه الگوریتم‌های تکاملی[1] است که رابطه‌ی مستقیمی با مبحث هوش مصنوعی دارد. الگوریتم ژنتیک یا به اختصار GA، یک روش جستجوی مؤثر در فضاهای طراحی بسیار وسیع و بزرگ است که در نهایت منجر به جهت‌گیری به سمت یافتن یک جواب بهینه می‌گردد. الگوریتم‌های ژنتیک را می‌توان یک روش جستجوی 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[2] تبدیل شود؛ لذا می‌بایست متغیرهای طراحی به‌صورت 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، درحالی‌که روش‌های قدیمی بهینه‌سازی تنها برای یک نقطه‌ی خاص عمل می‌نمایند؛ به‌عبارت‌دیگر، 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

[1] . Evolutionary Algorithm
[2] . Genetic Space

تصادفی[1] است. درحالی‌که با نگاهی عمیق می‌توان مشاهده نمود کـه GA، یـک جسـتجوی تصـادفی هدایت‌شده در راستای طرح بهینه است.

۳-۲ پیش‌زمینه‌ی بیولوژیکی ژن‌ها و کروموزوم‌ها

بدن موجودات زنده از سلول تشکیل شده است. در هر سلول مجموعه‌ای از کرومـوزوم‌هـا بـه شکل رشته‌ای از DNA وجود دارند. به هر بلوک DNA یک ژن می‌گویند و هر ژن نیز از یک پروتئین خاص و منحصربه‌فرد تشکیل شده است. این مطلب در شکل (۳-۱) نشان داده شده است.



شکل (۳-۱) رشته DNA

هر ژن یک الگوی خاص را رمزگشایی[2] می‌کند؛ به‌عبارت‌دیگر هر ژن یک صفت[3] را مشخص می‌نماید. مثلاً رنگ چشم یک فرد به‌عنوان یک صفت است. مجموعه‌ای از این صفت‌ها آلل[4] نامیده می‌شـود. از سوی دیگر هر ژن دارای موقعیت مشخص در کروموزوم است که به این موقعیت لوکاس[5] می‌گوینـد.

[1] . Random Search
[2] . Decode
[3] . Trait
[4] . Alleles
[5] . Locus

مجموعه‌ی کامل ماده‌ی ژنتیکی ژنوم[۱] نامیده شده و هر مجموعه‌ی خاصی از ژن‌ها را در ژنوم، ژنوتیپ[۲] می‌نامند که این ژنوتیپ اساس فنوتیپ[۳] بوده و ویژگی فیزیکی و فکری مثل رنگ چشم، هوش و ... را به وجود می‌آورد.

در یک نگاه کلی اصطلاحاتی که از مباحث زیست‌شناسی به مبحث الگوریتم ژنتیک وارد شده است را می‌توان به شرح زیر دسته‌بندی نمود:

۱- تولیدمثل[۴] که به تولید کروموزوم‌های جدید با ویژگی‌های والدین خود، منجر می‌شود.

۲- جهش[۵] که سبب ایجاد تغییرات ناگهانی در DNA می‌شود.

۳- مناسب بودن[۶] که برای یک موجود زنده میزان شایستگی آن در ادامه‌ی حیات است.

در هنگام تولید سلول‌های جدید یک تلفیق[۷] توسط عمل ادغام صورت می‌گیرد. در این فرآیند ژن‌های والد، کروموزوم‌های جدید را تشکیل می‌دهند. احتمال دارد این مولودهای جدید جهش یابند؛ یعنی DNA آن‌ها دستخوش تحول و تغییرات شود. این تغییرات ممکن است همراه با خطا در کپی شدن ژن‌های والد صورت بگیرد. معیار مناسب بودن یک ارگانیسم با توجه به موفقیت این ارگانیسم در ادامه‌ی حیات آن تعیین می‌شود. در ادامه با توضیحات ارائه‌شده به بررسی نحوه‌ی خودنمایی و جایگاه هر یک از مطالب بالا در الگوریتم ژنتیک پرداخته شده است.

[1] . Genome
[2] . Genotype
[3] . Phenotype
[4] . Cross Over
[5] . Mutation
[6] . Fitness
[7] . Recombination

۳-۳ بهینه‌یابی با الگوریتم‌های ژنتیک

الگوریتم ژنتیک با الهام از نظریه‌ی *داروین*[1] درباره‌ی حیات بهترین‌ها شکل گرفته است که بر اساس آن بهترین‌ها حق بقا دارند، بنابراین می‌توان گفت [2]:

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

این روش هوشمند به طور موفقیت‌آمیزی طرح بهینه‌ی عمومی[2] را بدون در نظر گرفتن فرضیات محدودکننده‌ای 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[3] 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 استفاده‌شده با توجه به مناسب بودن آن‌ها صورت گرفته است. پس بهترین‌ها شانس بیشتری برای تولیدمثل و ادامه‌ی 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 مرحله‌ی اساسی انجام می‌پذیرد[12]:

۱. تولید تصادفی مجموعه‌ای از طرح‌ها که بدان جمعیت اولیه گفته می‌شود. هر عضو این جمعیت یک کروموزوم هست که به‌صورت کد[4] بوده و رشته[5] نامیده می‌شود. هر رشته

[1] . Darwin
[2] . Global Optimum
[3] . Population
[4] . Code
[5] . String

متناسب با تعداد متغیرهای طراحی، به چندین زیررشته[1] تقسیم می‌شود. زیررشته مجموعه‌ای از بیت می‌باشد که به‌صورت زنجیر در کنار هم چیده شده‌اند. هر بیت هم ارز 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 به‌دست آورد.

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

۳. مسئله‌ی بهینه‌یابی مقید با تعریف تابع پنالتی[2] و ترکیب آن با تابع هدف و ایجاد تابع هدف اصلاح‌شده[3]، به یک مسئله‌ی 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[4] برای نسل[5] بعد به‌کار گرفته می‌شود. این مراحل تا ارضای شرط خاتمه و یا به تعداد نسل های پیش‌بینی‌شده برای کسب بهینه عمومی تکرار می‌شود.

اساساً برای پیاده‌سازی مراحل GA به شکلی صحیح می‌بایست سه مفهوم زیر مشخص شود:

۱- تعریف تابع هدف به شکلی صحیح

۲- تعریف فضای ژنتیک بر اساس قیود مسئله

[1] . Substring
[2] . Penalty Function
[3] . Modified Objective Function
[4] . Offspring
[5] . Generation

۳- تعریف و پیاده‌سازی صحیح عملگرهای GA

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

۳-۴-۱ کد کردن مقادیر

بر اساس تعریف *هولند*، روش‌های متعددی برای نمایش ژن‌های منفرد وجود دارد. مثلاً می‌توان آن‌ها را به‌صورت رشته، آرایه[۱]، درخت[۲] یا لیست[۳] نشان داد؛ اما درهرصورت، یک سیستم کدگذاری خوب باید دارای خواص زیر باشد[12]:

۱- تبدیل بین عناصر کد شده و کد نشده، یک تبدیل یک به یک باشد.

۲- کروموزوم‌هایی که هم ارز 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.

۳-۴-۱-۱ کد مبنای دو (کد دودویی[۴])

یک مثال: مسئله‌ی کوله‌پشتی

[1] . Array
[2] . Tree
[3] . List
[4] . Binary Code

در این مسئله فرض می‌شود که اشیایی با مقدار و اندازه مشخص وجود دارد و قرار است کـه در یـک کوله‌پشتی با ظرفیت مشخص قرار داده شوند. نحوه‌ی انتخاب اشیاء با توجـه بـه حـداقل فضـایی کـه اشغال می‌کنند و استفاده بهینه از فضای کوله‌پشتی صورت می‌گیرد.

برای حل این مسئله فرض شده است، هر بیت بیانگر حضور یا عدم حضور اشیاء در کوله‌پشتی باشـد. روش مذکور از روش‌های متداول در حل مسائل GA به شمار می رود. شکل (۳-۲) کروموزوم‌هایی را به‌صورت دوتایی[1] نشان می‌دهد:

Chromosome A	101101100011
Chromosome B	010011001100

شکل (۳-۲) – نمایش کروموزوم‌ها به‌صورت دوتایی

برای حل مسائل بهینه‌یابی در GA باید متغیرهای مجهول به‌صورت یک رشته بیان شـود. طـول ایـن رشته با توجه به محدوده‌ی متغیرهای طراحی و دقت مسئله مشخص می‌شود. برای مثال با رشـته‌ای به طول ۴ بیت می‌توان ۱۶ عدد را نمایش داد. به طور کلی اگر یک تابع دو متغیـره را کـد شـود، بـا فرض طول رشته‌ی ۴ بیتی برای هر متغیر و نمایش متغیرها با X_1 و X_2 به‌صورت $(0110\ \ 1011)$، یک کروموزوم ۸ بیتی به شرح زیر شکل می‌گیرد[3]:

$\text{Chromosome} \Rightarrow 10110110$

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

$$X_i^L \le X_i \le X_i^U \qquad (۱-۳)$$

$$(0000\ \ 0000)\ ,\ (1111\ 1111) \ \Leftrightarrow\ \left(X_1^{\mathrm{L}}, X_2^L\right),\ \left(X_1^U, X_2^U\right) \qquad (۲-۳)$$

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

[1] . Binary

روش رمز کردن دودویی مرسوم‌ترین روش در GA، برای نمایش رشته‌ای متغیرهای طراحی می‌باشد. ویژگی اصلی این شیوه نمایش، انطباق آن با ذات عملگر های GA می‌باشد. از سوی دیگر قضیه الگو[1] نیز بر اساس این شیوه نمایش مطرح می‌شود که در جای خود بحث خواهد شد. این شیوه نمایش، خصوصیات مناسب برای یک سیستم کدگذاری را دارا می‌باشد.

۳-۴-۲ شایستگی هر کروموزوم

همان طور که پیش‌تر بیان شد، GA، مسئله‌ی بهینه‌یابی مقید را با تعریف تابع پنالتی که وابسته به میزان نقض قیود است و ترکیب آن با تابع هدف و ایجاد تابع هدف اصلاح‌شده، به یک مسئله بهینه یابی نامقید تبدیل می‌نماید. در ادامه با کمک مقادیر تابع هدف اصلاح‌شده 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 محاسبه‌ی 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.

۳-۴-۲-۱ تابع پنالتی

تابع پنالتی یا جریمه، همان طور که از نامش مشخص است، مقداری است که به‌عنوان جریمه به تابع هدف اعمال می‌شود؛ این جریمه به دلیل نقض قیود می‌باشد. در واقع به‌واسطه تعریف تصادفی متغیر یا متغیرهای طراحی قیود مسئله نقض می‌شود، بنابراین کروموزوم ناقض قیود جریمه می‌شود.

[1] . Schema Theorem

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 می‌شود.

محققین و متصدیان GA، روابط متعددی را برای تابع پنالتی و چگونگی محاسبه مقدار جریمه ارائه نموده‌اند. در ذیل به بررسی تابعی که در این پایان‌نامه استفاده شده پرداخته شده است.

راجیو و کریشنامورتی[1] تابع پنالتی را به شرح زیر پیشنهاد می‌نمایند[7].

$$f_{Penalty} = F(X) * K * C \qquad (۳-۳)$$

که

$$C = \sum_{q=1}^{Q} \max\left[0, g_q(X)\right] \qquad (۳-۴)$$

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 می‌شود.

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 اصلاح‌شده و در پی آن تابع شایستگی محاسبه شود؛ هر کدام از این توابع نیز بر اساس دیدگاه‌های مختلف به

[1]. S.Rajeev & C.S.Krishnamoorthy

طرق گوناگون مطرح شده است که در ذیل به شرح اهم این دیدگاه‌ها بر حسب کاربردشان پرداخته شده است.

۳-۴-۲-۲ تابع شایستگی[1]

تابع شایستگی معمولاً بر اساس تابع هدف اصلاح‌شده تعریف می‌شود و بایستی مقدار آن مثبت باشد. تابع هدف اصلاح‌شده نیز عموماً بر اساس مقادیر تابع جریمه و تابع هدف تنظیم می‌شود. تابع هدف اصلاح‌شده و تابع شایستگی استفاده شده در این پایان‌نامه به‌صورت زیر تعریف شده است:

راجیو و کریشنا مورتی، تابع هدف اصلاح‌شده و تابع شایستگی را به شرح زیر پیشنهاد می‌نمایند[7]:

$$\phi(X) = F(X) + f_{Penalty} \qquad (۳-۵)$$

$$R(X) = [\phi_{\max}(X) + \phi_{\min}(X)] - \phi(X) \qquad (۳-۶)$$

در روابط فوق

$\phi(X)$: تابع هدف اصلاح‌شده

$R(X)$: تابع شایستگی

$f_{Penalty}$: تابع جریمه

$F(X)$: تابع هدف

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

$\phi_{\max}(X)$: حداقل مقادیر تابع هدف اصلاح‌شده در جمعیت حاضر

است.

[1] . Fitness Function

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

۱-در مسئله کمینه‌سازی، کروموزومی با کمترین مقدار تابع هدف اصلاح‌شده، 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 به‌دست 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.

۳-۴-۳ انتخاب[1]

در فرآیند انتخاب کروموزوم‌های شایسته از میان جمعیت به‌عنوان والد انتخاب و سپس بر اساس فرآیند پیوند، کروموزوم‌های جدید به نام فرزندان تولید می‌شوند.

روش‌های متنوعی در GA برای انتخاب کروموزوم های شایسته وجود دارد، اما هدف اصلی در همه‌ی آن‌ها انتخاب کروموزوم‌هایی (طرح‌هایی) با میزان شایستگی بالا از جمعیت جاری و تکثیر آن‌ها، طی قرارگیری در مکانی به نام استخر تولیدمثل[2] است. کروموزوم های با مقدار شایستگی بالاتر، از شانس بیشتری برای حضور در استخر تولیدمثل برخوردار خواهند بود. عکس این مطلب نیز صادق است، یعنی کروموزوم‌هایی با مقدار شایستگی کمتر، احتمال کمتری برای انتقال در استخر تولیدمثل خواهند داشت. نحوه انتخاب در روش های مختلف، متفاوت است؛ اما معیار تمامی روش های انتخاب،

[1] . Selection(Reproduction)
[2] . Mating Pool

میزان شایستگی برای هر کروموزوم می‌باشد؛ یعنی هر کروموزومی که شایستگی بیشتری دارد، بالطبع شانس بیشتری برای حضور در استخر تولیدمثل پیدا می‌کند.

در ادامه به تفصیل و شرح روش‌های انتخاب که در این پایان‌نامه مورد استفاده قرار گرفته، پرداخته شده است:

یکی از مهم‌ترین و رایج‌ترین روش‌هایی که برای انتخاب کروموزوم‌ها و قرار دادن آن‌ها در استخر تولیدمثل وجود دارد عبارت‌اند از:

۱. روش مسابقه[1]

۲. مفهوم برگزیده[2] (شایسته‌سالاری)

۳-۴-۳-۱ 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. روش رتبه‌بندی نیز به دلیل آهستگی همگرایی و مشکلاتی از این قبیل، برای جمعیت های بزرگ زیاد مناسب نیست. برای گریز از این معایب، معمولاً از روش دیگری به‌نام روش رقابتی استفاده می‌شود. این روش نخستین بار توسط *گلدبرگ* و دب در سال ۱۹۹۱ ارائه شده است[4].

در روش رقابتی که شبیه رقابت در طبیعت است، یک زیرمجموعه کوچک از کروموزوم‌ها به‌صورت تصادفی انتخاب‌شده و به رقابت می‌پردازند. معیار رقابت، میزان شایستگی هر کروموزوم است. سرانجام در این رقابت یکی از کروموزوم‌ها به پیروزی رسیده و به‌عنوان والد جدید انتخاب می‌شود.

[1] . Tournament
[2] . Elitism

این فرآیند تا انتخاب همه‌ی والدها در جمعیت جدید، تکرار می‌شود؛ به‌عبارت‌دیگر، عملیات فوق به تعداد اعضای جمعیت تکرار می‌شود.

به‌عنوان مثال جمعیتی با شایستگی‌های شکل (۳-۳) را در نظر بگیرید[2]:

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

شکل (۳-۳) نمایش شایستگی هر رشته در مثال روش مسابقه

در ابتدا موارد ۲ و ۴ به‌صورت 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[1] مثل کپی می‌شود.

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

شکل (۳-۴) نمایش رشته‌های برنده در مثال روش مسابقه

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 به‌عنوان بهترین روش شناخته می‌شود. مقدار کروموزوم منتخب برای رقابت به تعداد اعضای جمعیت بستگی دارد و تحت عنوان سایز رقابت[2] به عهده کاربر گذاشته می‌شود؛ اما عموماً دو یا سه کروموزوم برای رقابت انتخاب می‌شوند. *یانگ و همکارانش*[3] نخستین افرادی بودند که روش رقابتی را در مهندسی عمران جهت بهینه‌سازی سازه‌ها بکار گرفتند[13].

[1] . Mating pool
[2] . Size Tournament
[3] . Yang, J. et al

۳-۴-۳-۲ مفهوم برگزیده (شایسته‌سالاری)

استراتژی نخبه‌گرایی یا مفهوم برگزیده، نخستین بار توسط فردی به نام دی *جانگ*[1] در سال ۱۹۷۵ مطرح شد[14]. بر اساس این روش بهترین کروموزوم‌ها (یک کروموزوم) بر مبنای شایستگی در جمعیت جدید بدون آنکه وارد استخر تولیدمثل شود؛ کپی می‌شوند. این کار برای آن است تا بهترین کروموزوم نسل حاضر، در نسل بعدی حضور داشته باشند.

به کمک استراتژی فوق اطمینان حاصل می‌گردد که بهترین فرزند هر نسل نسبت به بهترین فرزند نسل‌های گذشته دارای نمره شایستگی پایین تری نخواهد بود. این روش اغلب به‌صورت ترکیبی با سایر روش های انتخابی ارائه می‌شود. استفاده از مفهوم برگزیده باعث افزایش کارایی GA می‌گردد، زیرا مانع از گم شدن جواب های خوب به‌دست آمده می‌شود. راهبُرد نخبه‌گرایی تأثیر بسزایی در همگرایی الگوریتم داشته و استفاده از آن در مقالات گوناگون، بررسی و توصیه شده است [14].

۳-۴-۴ پیوند (ادغام)

در بخش پیشین چگونگی انتخاب کروموزوم‌ها مورد بررسی قرار گرفت. به‌نحوی‌که کروموزوم-های منتخب به‌عنوان والد برگزیده می‌شوند. در این قسمت به بررسی روش‌های مختلف برای تولید فرزندان[2] پرداخته می‌شود.

[1] . Kenneth De Jong
[2] . Offspring

۳-۴-۴-۱ عملگر های GA

عملگرهای وراثتی[۱] 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 انتخاب‌شده 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[۲]
۳. عمل حذف و کپی کردن[۳]
۴. عمل حذف و تولید مجدد[۴]
۵. عمل جداسازی[۵]
۶. عمل نقل‌مکان[۶]
۷. عمل بخش‌بندی[۷]
۸. عمل غالب شدن یا تسلط[۸]
۹. عمل ادغام و معکوس سازی[۹]
۱۰. روش تکثیر میانی
۱۱. عملگرهای بیتی[۱۰]
۱۲. عملگر جهش[۱]

[1] . Inheritance Oprator
[2] . Inversion
[3] . Deletion And Duplication
[4] . Deletion And Regeneration
[5] . Segregation
[6] . Migration
[7] . Sharing
[8] . Dominance
[9] . Cross Over And Inversion
[10] . Bite-Wise Operator

که معمولاً در یک الگوریتم ژنتیک ساده[2] تنها از دو عملگر اصلی زیر پس از فرآیند انتخاب استفاده می‌شود:

۱. ادغام

۲. جهش

۳-۴-۴-۱-۱ عملگر ادغام

در مرحله‌ی 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، به‌قصد 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 به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شود. در مرحله دوم یک زیررشته، از کروموزوم‌ها به طور تصادفی در طول رشته انتخاب 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.

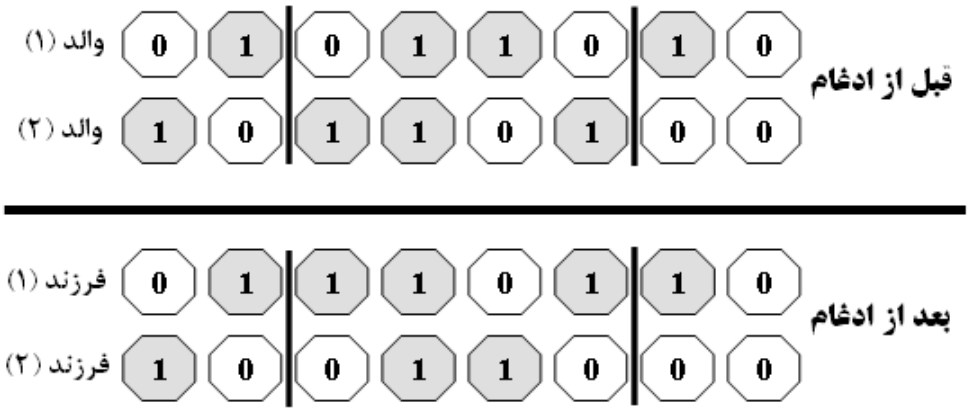
روش‌های مختلف و متنوعی برای عمل ادغام وجود دارد. بر اساس نظریه دب[3] نمی‌توان گفت که کدامیک از روش‌های ادغام بهتر است[2]. در هر حال در این پایان‌نامه از روش ادغام دو نقطه‌ای به شرح زیر استفاده شده است:

---

[1] . Mutation
[2] . Simple Genetic Algorithm
[3] . Deb

۳-۴-۴-۱-۱-۱ روش ادغام دو نقطه‌ای[1]

روش ادغام دو نقطه‌ای توسط *اشلمن و همکارانش*[2] در سال ۱۹۸۹ ارائه شد[15]. عملگر پیوند دو نقطه‌ای، تقریباً مشابه روش ادغام تک نقطه‌ای است. با این تفاوت که در این روش دو مکان را به‌صورت تصادفی در طول رشته‌ها انتخاب کرده و اطلاعات بین این دو نقطه جابجا می‌شود. در شکل (۳-۵) روش ادغام دو نقطه‌ای نشان داده شده است.

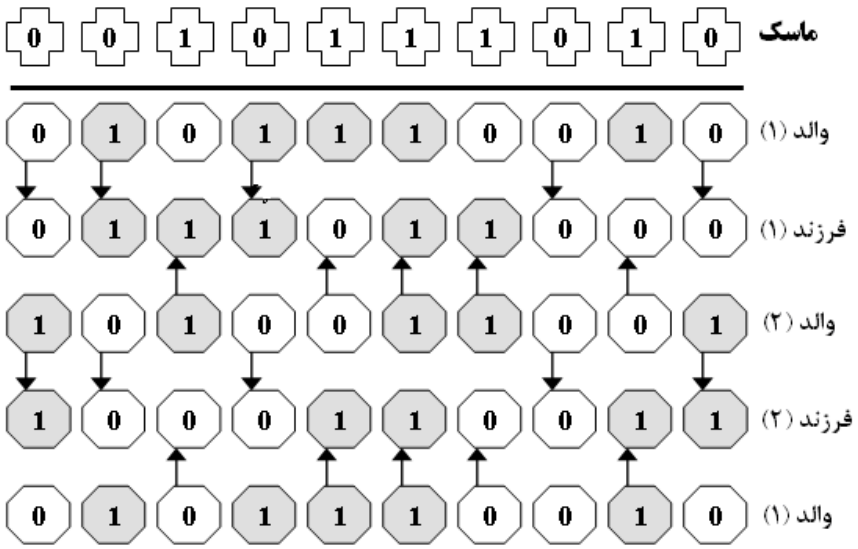


شکل (۳-۵) روش ادغام دو نقطه‌ای

۳-۴-۴-۱-۱-۲ روش ادغام یکنواخت[3]

این روش حالت پیشرفته ادغام چند نقطه‌ای است. در این روش هر بیت بر اساس یک احتمال پنجاه در صدی از والدهایش انتخاب شده و جابجا می‌شوند. برای این منظور از یک الگوی ادغام تصادفی به نام ماسک[4] استفاده می‌شود. طول رشته ماسک، برابر طول کروموزوم‌های جمعیت است. هنگامی که در ماسک مقدار بیت هم ارز، صفر (0) باشد، ژن از والد اول و اگر مقدار یک (1) باشد، ژن از والد دوم کپی می‌شود. روش ادغام چند نقطه‌ای در شکل زیر نشان داده شده است[9].

---
[1] . Two-Point Cross Over
[2] . Eshelman, et al.
[3] . Uniform Cross Over
[4] . Mask



شکل (۳-۶) روش ادغام یکنواخت

۳-۴-۴-۱-۱-۳ نرخ ادغام[1]

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 به‌کاررفته‌اند و $100*(1-P_C)$ درصد از جمعیت باقی می مانند.

نحوه‌ی 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.

[1] . Cross Over Rate

انتخاب نرخ ادغام مناسب نیز، اغلب مشکل‌ساز است. اگر این مقدار خیلی زیاد باشد، باعث می‌شود تا فرصت تطابق در کروموزوم از دست برود و همچنین اگر این مقدار خیلی کم باشد، تعداد فرزندان تولیدشده کافی نخواهد بود.

۳-۴-۴-۱-۲ جهش

از دیگر مراحل رایج در عملیات GA که تکامل جمعیت برای نسل بعد را به دنبال خواهد داشت، استفاده از عملگر 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. بدین‌سان با استعانت از عملگر جهش از همگرایی زودرس الگوریتم ژنتیک و کسب جواب‌های بهینه محلی جلوگیری می‌شود؛ به‌عبارت‌دیگر در یک کلام می‌توان گفت عملگر جهش، سبب جستجوی بهتر فضای طراحی می‌شود.

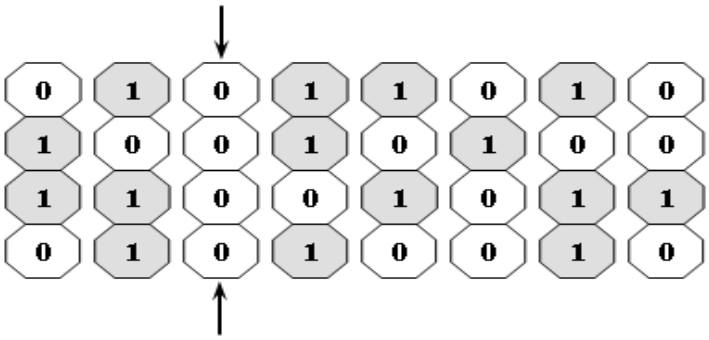
۳-۴-۴-۱-۲-۱ عمل جهش در کدگذاری دودویی

عمل جهش یک بیت، شامل تبدیل عدد صفر (0) به یک (1) و بالعکس است که بر اساس یک احتمال کوچک مثل P_m به‌صورت بیت به بیت صورت می‌گیرد. عمل جهش به‌این‌ترتیب است که یک عدد تصادفی بین صفر (0) تا یک (1) تولید می‌شود؛ اگر عدد تولیدشده کوچک‌تر از P_m باشد مقدار خروجی را برابر درست[1] وگرنه برابر غلط[2] در نظر گرفته می‌شود. اگر برای هر بیت مقدار خروجی درست باشد، بیت تغییر می‌کند وگرنه بیت بدون تغییر باقی خواهد ماند.

[1] . True
[2] . False

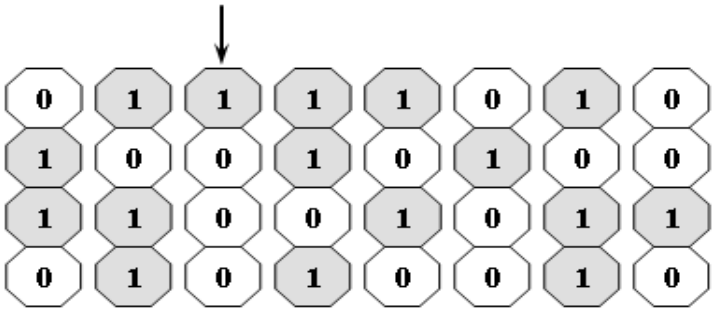
بیت های یک رشته به‌صورت مستقل جهش می‌یابند، به این معنا که جهش یک بیت بر روی احتمال جهش سایر بیت‌ها تأثیر نمی‌گذارد. این عمل در یک الگوریتم ژنتیک ساده به منزله‌ی یک عملگر ثانویه و به‌منظور حفظ اطلاعاتی که در حال از دست رفتن است، تلقی می‌گردد. به کمک این عملگر می‌توان امید داشت که کروموزوم های خوب که در مراحل انتخاب و یا تکثیر حذف‌شده‌اند، 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.

از دیگر مزایای عملگر جهش، متفاوت و متمایز نمودن کروموزوم‌ها در یک جمعیت است؛ به‌عبارت‌دیگر با استعانت از عملگر جهش می‌توان تحرک شگرفی در یک جمعیت ایجاد نمود. به‌عنوان مثال اگر جمعیت زیر را در نظر موجود باشد:



شکل (۳-۷) نیاز جمعیت به بیت ۱

همان طور که ملاحظه می‌شود، همه‌ی بیت های ستون سوم جمعیت حاضر صفر است. اگر راه حل بهینه نیاز به یک در این موقعیت داشته باشد، در این صورت هیچ‌کدام 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 به‌صورت زیر در می‌آید:



شکل (۳-۸) تأثیر عملگر جهش

۳-۴-۴-۱-۲-۲ نرخ جهش[1] (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. درحالی‌که 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. درصورتی‌که در فرآیند GA مفهوم نخبه‌گرایی وجود داشته باشد؛ پیشنهاد می‌شود نرخ جهش از حد معمول و متعارف بیشتر انتخاب شود.

۳-۴-۵ مفاهیم تکمیلی

پارامترهایی همچون اندازه‌ی جمعیت[2]، نرخ عملگرهای GA، به‌عنوان پارامترهای کنترلی[3] هستند که باید قبل از اجرای الگوریتم مشخص شوند. همچنین تعریف یک معیار برای تصمیم‌گیری در مورد خاتمه عملیات GA ضرورت دارد. این معیار تحت عنوان شرط خاتمه معرفی می‌شود. شرط

[1]. Mutation Rate
[2] . Population Size
[3] . Control Parameter

خاتمه بیانگر آن است که الگوریتم می‌بایستی به جواب بهینه دست یافته باشد. یا اصطلاحاً عملیات GAبه نقطه بهینه همگرا شده است.

۳-۴-۵-۱ شرط توقف الگوریتم

برخی از شرط های متداول توقف عملیات GA عبارت‌اند از [16]:

۱. رسیدن به جواب[1]: 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[2]: یعنی الگوریتم GA پس از nبار تکرار با همان کروموزوم های 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[3]: اگر انحراف ف از معیار[4] مقادیر شایستگی جمعیت به یک مقدارم شخصی رسید، الگوریتم متوقف می‌شود. این بدان مفهوم است که مقادیر شایستگی جمعیت با یکدیگر تفاوت چندانی نداشته باشند.
۴. تعداد تکرارها[5]: اگر با هیچ‌کدام از موارد فوق جواب نداد، شرط توقف بر اساس تعداد تکرار بنا می‌شود.

درهرصورت باید اذعان داشت که ممکن است GA نیز، همانند دیگر روش‌های بهینه‌سازی، به جواب بهینه نرسد و یا در نقطه کمینه نسبی گرفتار شود. درهرصورت اگر الگوریتم به یک حل بهینه همگرا

[1] . Correct Answer
[2] . No Improvement
[3] . Statistics
[4] . Standard Deviation
[5] . Number Of Iterations

نشود، می‌بایست پارامترهای آن را تغییر داده و مجدداً الگوریتم را اجرا شود. این پارامترها نقش به‌سزایی در رسیدن به جواب بهینه دارند.

۳-۵ انواع بهینه‌یابی سازه‌ها

یکی از هنرهای مهندسی به‌دست آوردن بیشترین بازده، با انتخاب یک سیستم مناسب و صرف کمترین مصالح است. در مهندسی سازه وظیفه سیستم‌های سازه تحمل بارهای مؤثر و معمولاً انتقال نیرو به تکیه‌گاه‌ها است. این سیستم‌ها، علاوه بر آن که باید ایمن و کارا باشند، درعین‌حال بایستی از کمترین هزینه و به نوعی از کمترین مصرف مصالح برخوردار باشند.

در این راستا طرح بهینه‌ی سازه‌های سه بعدی همچون تیر، قاب و ... به چهار دسته‌ی عمده تقسیم می‌شود:

۱- بهینه‌یابی مقطع[1] که دربرگیرنده تعیین سطح مقطع بهینه‌ی اعضا می‌باشد.

۲- بهینه‌یابی شکل یا هندسه[2] که در آن مختصات بهینه‌ی گرهی هر المان موجود در اعضای قاب نسبت به حالت اولیه تعیین می‌شود.

۳- بهینه‌یابی توپولوژی[3] که مشتمل بر تعیین بهترین آرایش اعضا در فضای مفروض مختصات گرهی است.

۴- بهینه‌یابی پیکربندی[4] که در برگیرنده سه مورد قبل به‌صورت توأم می‌باشد.

در بهینه‌یابی مقطع، طرح بهینه به ازای کمترین مقدار سطح مقطع با مختصات ثابت گرهی (هندسه ثابت) و همبندی ثابت قاب (توپولوژی ثابت) انجام می‌پذیرد (*گلدبرگ و سمتانی ۱۹۸۶*[5]).

[1] . Sizing Optimization
[2] . Geometrical (Shape) Optimization
[3] . Topological Optimization
[4] . Layout Optimization
[5] . GoldBerg And Samtani, 1986

معمولاً در مسائل کاربردی مهندسی از مقاطع استاندارد موجود در بازار استفاده می‌شود. در این راستا بهینه‌یابی مقاطع منفصل[1]، با اتخاذ اعضا از لیست پروفیل‌های موجود، توسعه و گسترش یافت. (*راجیو و کریشنامورتی ۱۹۹۲* [7]).

در بهینه‌یابی شکل یا هندسه، مختصات گرهی تک‌تک المان‌های اعضا جهت طراحی بهینه بررسی می‌شود. (*ایمای و اسچمیت ۱۹۸۱*[2] [17]). این مهم در اغلب مقالات الگوریتم ژنتیک ، به‌صورت توأماً با توپولوژی بهینه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در بهینه‌یابی توپولوژی، همبندی بهینه اعضا در قاب تعیین می‌گردد (*رینگرتز* ۱۹۸۵ و *کریش* ۱۹۸۹[3]). بهینه‌یابی توپولوژی، امروزه در اکثر مقالات علمی ، همزمان با بهینه‌یابی سطح مقطع انجام می‌گیرد. این مطلب با فرض ثابت بودن هندسه‌ی سازه انجام می‌پذیرد.

۳-۶ مبانی بهینه‌یابی شکل سازه‌های سه بعدی به‌وسیله GA

بهینه‌سازی شکل با توسعه‌ی تحقیقات بر روی مسئله‌ی یافتن مرزهای بهینه‌ی سازه به وجود آمد. به‌عنوان نمونه می‌توان به یافتن مرزهای یک سازه‌ی مدل شده با استفاده از فرضیات تنش صفحه‌ای یا یافتن محل اتصالات یک سازه‌ی اسکلتی و یا یافتن مقادیر بهینه‌ی پارامترهایی که متوسط یک سازه‌ی پوسته‌ای را تعریف می‌کنند اشاره کرد. به این دسته از مسائل، مسائل بهینه‌سازی شکل می‌گویند. در این‌گونه مسائل شکل حوزه ثابت نیست. ولی توپولوژی حوزه ثابت است. بهینه-سازی شکل را می‌توان به‌عنوان کاربرد بهینه‌سازی در مرحله‌ی طراحی اولیه در نظر گرفت.

[1] . Discrete Variable Optimization
[2] . Imai And Schmit, 1981
[3] . Ringertz, 1985 ; Krish, 1989

در دو دهه‌ی اولیه‌ی بهینه‌سازی عددی سازه‌ها، تمرکز بر روی متغیرهای طراحی به‌اصطلاح ابعادی بود. متغیرهایی از قبیل ضخامت صفحه و سطح مقطع میله از آن جمله هستند که تغییر در آن‌ها نیازی به تغییر در مدل اجزای محدود ندارد. مسائل بهینه‌سازی که در آن‌ها پارامترهای ابعادی متغیر طراحی هستند، ساده‌تر از مسائلی هستند که در آن‌ها شکل، متغیر طراحی است و هندسه‌ی سازه را کنترل می‌کند و معمولاً نیاز به مدل اجزای محدودی دارند که در طول بهینه‌سازی تغییر می‌کند. اما با این وجود در مسائل زیای بهینه‌سازی شکل بسیار مؤثرتر از بهینه‌سازی ابعادی است، به‌عنوان مثال در مسئله‌ی تمرکز تنش در مرزهای یک صفحه‌ی سوراخ‌دار، بهینه‌سازی ابعادی، ضخامت صفحه در اطراف سوراخ را تغییر می‌دهد درحالی‌که در بهینه‌سازی شکل منجر به تغییر در مرزهای شکل سوراخ می‌شود.

در مسائل بهینه‌سازی شکل با دو دسته مشکل مواجه هستیم:

۱. به دلیل تغییر مداوم مدل اجزای محدود مشکل است بتوانیم مطمئن شویم که صحت تحلیل اجزای محدود در طول روال طراحی در حد قابل‌قبول می‌ماند.

۲. به‌دست آوردن مشتقات برحسب متغیرهای طراحی شکل گران‌تر از حالتی است که آن‌ها را بر حسب متغیرهای ابعادی به‌دست آوریم.

دو دسته قید در شکل کلی فرمول‌بندی مسائل بهینه‌سازی شکل وجود دارند. یک دسته قید-های صریح هستند که به طور صریح و مستقیم بر حسب متغیرهای طراحی بیان می‌شوند و یک دسته قیدهای ضمنی هستند که به طور ضمنی و غیرمستقیم بر حسب متغیرهای طراحی بیان می‌شوند.

فرآیند بهینه‌سازی شکل شامل سه قسمت اصلی است: نمایش هندسی مسئله، تحلیل سازه و الگوریتم بهینه‌سازی. ابتدا باید نمایش هندسی مناسب برای شکل مرزها را انتخاب کنیم و مقادیر اولیه‌ای برای متغیرهای طراحی در نظر بگیریم، سپس یک مدل تحلیلی مناسب مانند اجزای محدود

یا اجزای مرزی برای تحلیل سازه انتخاب می‌کنیم. به‌عنوان مثال یک الگوریتم معمولی بهینه‌سازی مرتبه‌ی اول به مقادیر توابع قید و حساسیت قیدها بر حسب هر متغیر طراحی نیاز دارد.

پس از انجام مرحله‌ی تحلیل الگوریتم بهینه‌سازی مقادیر جدیدی برای متغیرهای طراحی به ما می‌دهد. در نتیجه یک مدل طراحی جدید ساخته شده و به قسمت تحلیل برده می‌شود. از تحلیل مجدد مقادیر تابع و نتایج بررسی قیدها برای طراحی جدید استفاده می‌شود. اگر معیار لازم برای خاتمه‌ی محاسبات ارضا شده بود، محاسبات متوقف می‌شود. در غیر این صورت بهینه‌سازی، نقاط طراحی جدیدی به ما می‌دهد.

در مسائل بهینه‌سازی شکل معمولاً تمرکز بر روی کاهش تنش در مرز با تغییر آن می‌باشد. اگر در انتخاب متغیرهای طراحی دقت نکنیم ممکن است مدل تحلیل در طول بهینه‌سازی خراب شود و به طراحی بینجامد که مفید نیست. در این پایان‌نامه با تعریف فضای طراحی مناسب این امکان به وجود آمده که المان‌ها تحدب خود را برای تحلیل از دست ندهند و همچنین المان‌ها باهم تداخل پیدا نکنند که در ادامه تشریح خواهد شد.

در روش‌های ریاضی عموماً در بخش تحلیل از اجزا محدود و اخیراً از روش آیزوژئومتریک استفاده می‌شود که روش آیزوژئومتریک نیز دارای مشکلاتی از قبیل محدودیت در ترکیب بارها می‌باشد. از آنجایی که در بهینه‌سازی به روش الگوریتم ژنتیک نیازی به مشتقات ضمنی ندارد در این پایان‌نامه برای تحلیل سازه از روش اجزا محدود استفاده شده است. هر چند در بعضی مقالات در کنار اجزا محدود از روش اسپلاین‌ها و یا المان‌های مرزی استفاده شده است[18].

در جدول (۳-۱) خلاصه‌ای از انواع مدل‌های ارائه شده برای حل مسائل بهینه‌سازی شکل آمده است.

جدول ۳-۱: خلاصه مدل‌های ارائه شده برای مسائل بهینه‌سازی شکل

ارائه کنندگان مدل	مدل هندسی مرز	روش تحلیل	متغیرهای
زینکویچ[۱] و کمبل[۲]	شبکه اجزا محدود	اجزا محدود	مختصات گره‌های مرزی
بیهویکاتی[۳] و راماکریشنان[۴]	توابع چند جمله‌ای	اجزا محدود	ضرایب چندجمله‌ای
براینت[۵] و همکاران	توابع اسپلاین	اجزا محدود	مختصات نقاط کنترلی
اسکرم[۶] و پیلکی[۷]	توابع نربز	اجزا محدود	مختصات نقاط کنترلی
وال[۸] و همکاران	توابع نربز	آیزوژئومتریک	مختصات نقاط کنترلی

۳-۷ فرمول‌بندی و روند مسئله‌ی بهینه‌یابی شکل بر اساس GA

در این پایان‌نامه فرمول‌بندی مسئله‌ی بهینه‌سازی شکل سازه‌های سه بعدی بر اساس الگـوریتم ژنتیک به شرح زیر تعریف می‌شود:

یافتن:

$$A=[a_1,a_2,\ldots,a_N]^T \quad ; \quad 0>a_i>L \quad ; \quad N=Nof \qquad (۷-۳)$$

[1] . Zienkiewicz
[2] . Campbel
[3] . Bhavikatti
[4] . Ramakrishnan
[5] . Braibent
[6] . Schramm
[7] . Pilkey
[8] . Wall

$$X_i = X_{iMin} + \frac{(X_{iMax} - X_{iMin}) \times a_i}{X_{iMax} - X_{iMin} - 1} \qquad (۸-۳)$$

جهت کمینه‌سازی تابع $f(A)$ که در معرض قیود زیر می‌باشد[19]:

$$^{۱}G1 = \begin{cases} g_{i1}(A) = 0 \quad if \quad \frac{\sigma_{iVon}}{\sigma_{all(Ten)}} - 1 \le 0 \quad ; \quad i = 1,\ldots,Net \\ g_{i1}(A) = \frac{\sigma_{iVon}}{\sigma_{all(Von)}} - 1 \quad if \quad \frac{\sigma_{iVon}}{\sigma_{all(Von)}} - 1 > 0 \quad ; \quad i = 1,\ldots,Net \end{cases} \qquad (۹-۳)$$

$$^{۲}G2 = \begin{cases} g_{i2}(A) = 0 \quad if \quad \frac{\Delta_i}{\Delta_i^{all}} - 1 \le 0 \quad ; \quad i = 1,\ldots,Ndof \\ g_{i2}(A) = \frac{\Delta_i}{\Delta_i^{all}} - 1 \quad if \quad \frac{\Delta_i}{\Delta_i^{all}} - 1 > 0 \quad ; \quad i = 1,\ldots,Ndof \end{cases} \qquad (۱۰-۳)$$

هر یک از موارد فوق به شرح زیر قابل تفسیر می‌باشند.

۳-۷-۱ متغیرهای طراحی

رابطه (۳-۷) بردار متغیرهای طراحی را نشان می‌دهد. در این رابطه:

A : حاوی مجموعه‌ای از اعداد صحیح است که به‌عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته می‌شود. با اضافه کردن این اعداد طبق فرمولی خاص که در ادامه گفته شده، مختصات گره‌ی المان‌ها در محدوده‌ای مجاز به‌نحوی که المان‌ها تداخل پیدا نکنند، به‌دست می‌آید.

L : طول ضلعی از المان‌ها است که با تغییر آن طراحی بهینه صورت می‌گردد.

a_i : یک عدد صحیح است که می‌تواند هر مقداری بین ۰ تا L را اختیار نماید.

Nof : تعداد گره‌هایی که در بهینه‌سازی سازه شرکت دارند.

[1] . Constraint Von Mises Stress
[2] . Constraint Displacement

رابطه‌ی (۳-۸) مختصات گره‌های هر المان را با استفاده از اعداد صحیح موجود در مجموعه‌ی A به‌دست می‌آورد. در این رابطه:

X_i : مختصات گرهی المان‌ها است.

X_{iMax} : ماکزیکمم مختصاتی که گره‌ی i می‌تواند داشته باشد.

X_{iMin} : مینیمم مختصاتی که گره‌ی i می‌تواند داشته باشد.

a_i : مقادیر موجود در رابطه‌ی (۳-۷) است.

۳-۷-۲ تابع هدف

از آن جایی که هدف کمینه نمودن وزن سازه به ازای بهترین آرایش گرهی المان‌های محدود است؛ بنابراین می‌توان تابع هدف را به شرح زیر تعریف نمود:

$$F(A)=\sum_{i=1}^{Ne}(\rho_i V_i) \qquad (۱۱-۳)$$

که در آن

Ne : تعداد المان‌های سازه است.

ρ_i : وزن مخصوص مصالح[1] هر المان از سازه است که در اغلب اوقات برای تمامی المان‌ها یکسان فرض می‌شود.

V_i : حجم هر المان از سازه است.

با تغییر مختصات گرهی هر المان در سازه حجم آن تغییر کرده و مجدد وزن سازه محاسبه می‌شود. در سازه‌های دو بعدی به‌جای تابع هدف وزن از مساحت المان‌ها استفاده می‌کنند. آنگاه تابع هدف به شرح زیر تعریف می‌شود:

[1] . Density

$$F(A)=\sum_{i=1}^{Ne}(A_i) \qquad (۱۲-۳)$$

که در آن تعاریف A_i مساحت هر المان بوده و Ne مشابه رابطه (۳-۱۰) تعریف می‌شود.

۳-۷-۳ قید G

برای یک سازه با شکل بهینه، همواره می‌بایست تنش ناشی از بارگذاری در تمامی المان‌ها، در محدوده‌ی مجاز و قابل قبول قرار داشته باشد. این مقدار مجاز بر اساس جنس مصالح المان‌های سازه تعیین می‌شود. بنابراین در روند بهینه‌سازی شکل از طریق GA، تنش تک‌تک المان‌های سازه محاسبه می‌شود. در صورت نقض قیود بر اساس روابط (۳-۹) و (۳-۱۰) جریمه‌ای به کروموزوم مربوطه تعلق می‌گیرد. باید توجه داشت که رابطه‌ی (۳-۹) مقدار نقض قیود ناشی از تنش فن میسز المان‌های سازه و رابطه‌ی (۳-۱۰) نقض قید ناشی از جابه‌جایی گره‌ها را محاسبه می‌نماید. پارامترهای روابط (۳-۹) و (۳-۱۰) به شرح ذیل تعریف می‌شود:

$g_{i1}(A)$: میزان جریمه نقض قید تنش فنمیسز المان سازه

σ_{iVon} : تنش فنمیسز المان iام

$\sigma_{all(Von)}$: تنش مجاز الاستیک که با توجه به مواد به‌کار رفته در المان‌ها تعیین می‌شود.

Net : تعداد المان‌های سازه

$g_{i2}(A)$: میزان جریمه نقض قید جابه‌جایی

Δ_i : جابه‌جایی هر گره

Δ_i^{all} : میزان جابه‌جایی مجاز هر گره

$Ndof$: تعداد گره‌ها

در مقاله‌های مختلف از قیود دیگری مانند تغییر مکان گره‌ها یا تداخل المان‌ها نیز استفاده می‌شود. در ای پایان‌نامه با توجه به فضای طراحی که در نظر گرفته و تابع هدفی که تعریف شده، میزان

تغییر مکان گره‌ها در محدوده‌ی مشخصی می‌باشد و با استفاده از رابطه‌ی (۳-۸) امکان اینکه المان‌ها تداخل داشته باشند نیز وجود ندارد؛ بنابراین نیازی به قیدهای ذکر شده نیست.

۳-۷-۴ مبانی بهینه‌سازی شکل در سازه‌ی سه بعدی

GA نیز همانند سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری با یک جمعیت اولیه‌ی تصادفی شروع می‌شود. از آنجا که این روش با متغیرهای طراحی رمز شده کار می‌کند، لذا ضروری است متغیرهای طراحی به‌صورت یک رشته‌ی رمز شده بیان شوند. درمیان شیوه‌های متنوع رمز کردن، در این پایان‌نامه از شیوه‌ی رمز کردن دودویی که پیشتر توضیح داده شد، استفاده شده است. بنابراین برای تولید جمعیت اولیه، به تعداد زیررشته‌های متناظر با متغیرهای طراحی، اعداد تصادفی دودویی تولید می‌شود.تمامی متغیرهای طراحی بایستی از مجموعه‌ی A در رابطه‌ی (۳-۷) انتخاب شده و مختصات جدید گره‌هایی که در بهینه‌سازی شرکت دارند با استفاده از رابطه‌ی (۳-۸) محاسبه گردد. پس از تولید جمعیت اولیه، باید مقدار تابع هدف به ازای هر طرح تولیدی طبق رابطه‌ی (۳-۱۱) محاسبه شود. هر رشته عملاً بیانگر طرحی در فضای جستجو و هر زیررشته بیانگر مقدار تغییر مختصات یک گره است. بنابراین با توجه به آنکه یک زیررشته‌ی LS بیتی اعداد صفر تا $2^{LS}-1$ را کد می‌کن. مقدار صحیح متناظر با زیررشته‌ی iام به شرح زیر محاسبه می‌شود [5].

$$b_{LS-1}.....b_2b_1b_0 \quad \Leftrightarrow \quad IR_i=\sum_{j=0}^{LS-1}2^j b_j \qquad (۱۳-۳)$$

در رابطه‌ی فوق هر بیت b می‌تواند اعداد صفر تا یک را انتخاب نماید و به‌صورت رشته نمایش داده شود. IR_i عدد صحیح متناظر با زیررشته‌ی iام است. حال برای آن‌که IR_i به مختصات گره‌های

شرکت کننده ارتباط داده شود از رابطه‌ی (۳-۸) استفاده می‌شود. بر اساس رابطه‌ی (۳-۸) هر زیررشته مختصات یک گره را تغییر می‌دهد.

پس از مشخص شدن مختصات هر گره، می‌بایست میزان تابع هدف ارزیابی شود. برای این منظور از رابطه‌ی (۳-۱۱) استفاده می‌شود. سپس با توجه به اینکه GA برای مسائل نامقید بسیار مناسب می‌باشد، ضروری است مسئله‌ی بهینه‌یابی مقید به یک مسئله‌ی بهینه‌یابی نامقید تبدیل شود. این عمل با استفاده از تابع پنالتی و تابع هدف اصلاح شده صورت می‌پذیرد. برای محاسبه‌ی تابع پنالتی و تابع هدف اصلاح شده به ترتیب از روابط (۳-۳) و (۳-۵) استفاده می‌شود.

حال با در نظر گرفتن تابع پنالتی و تابع هدف اصلاح شده، تابع شایستگی تعریف می‌گردد تا به هر عضو از جمعیت یک شایستگی اختصاص یابد. برای این منظور از رابطه‌ی (۳-۶) استفاده شده است [5].

۳-۷-۵ انتخاب

پس از محاسبه‌ی میزان شایستگی هر طرح، می‌بایست فرآیند انتخاب اجرا شود. در فرآیند انتخاب، رشته‌های شایسته از میان جمعیت به‌عنوان والد انتخاب می‌شود. روش‌های متنوعی در GA برای انتخاب رشته‌های شایسته وجود دارد، اما هدف اصلی در انتخاب همه‌ی آن‌ها انتخاب رشته‌هایی با میزان شایستگی بالا از جمعیت جاری و تکثیر آن‌ها طی قرارگیری در مکانی به نام استخر تولیدمثل است. در این پایان‌نامه از روش رقابتی به همراه مفهوم شایسته سالاری که به‌ترتیب در بخش‌های ۳-۴-۳-۱ و ۳-۴-۳-۲ آمده، جهت فرآیند انتخاب استفاده شده است.

۳-۷-۶ عملگرهای GA

پس از تکمیل فرآیند انتخاب، نوبت به اعمال فرآیند پیوند بر روی جمعیت منتخب جهت تولید جمعیت فرزندان می‌رسد. در این پایان‌نامه از پیوند دو نقطه‌ای که در بخش ۳-۴-۴-۱-۱-۱ معرفی شده استفاده کرده‌ایم. انتخاب نرخ پیوند مناسب از دو جهت اهمیت زیادی در روند بهینه‌سازی GA دارد. اول اینکه در صورت انتخاب نرخ پیوند نامناسب مسئله را دچار هم‌گرایی محلی می‌کند؛ از طرفی مقدار نرخ پیوند در سرعت هم‌گرایی تأثیرگذار است. نرخ پیوند نیز در این پایان‌نامه ۰,۸ در نظر گرفته شده است.

از دیگر مراحل رایج در عملیات GA که تکامل جمعیت برای نسل بعد را به دنبال خواهد داشت، استفاده از اوپراتور جهش است. هدف از به‌کارگیری اوپراتور جهش، کاوش بهتر فضای جستجو و ایجاد پراکندگی بیشتر در محدوده‌ی کاوش فضای طراحی است. در غیاب عملگر اوپراتور جهش، درصورتی‌که تنها از اوپراتور پیوند استفاده شود، پس از طی چندین نسل، رشته‌ی برتر به تعداد اعضای جمعیت تکثیر یافته و فرآیند پیوند دیگر نمی‌تواند هیچ‌گونه تغییری در کیفیت جمعیت فرزندان یا به‌عبارت‌دیگر نتایج طرح بهینه ایجاد کند. انتخاب نرخ جهش همانند نرخ پیوند تأثیر زیادی در سرعت هم‌گرایی بهینه‌سازی دارد. نرخ جهش در این پایان‌نامه ۰,۰۰۵ در نظر گرفته شده است.

۳-۷-۷ شرط خاتمه

در نهایت شرط خاتمه بررسی می‌شود. در صورت برقراری شرط خاتمه، الگوریتم بهترین رشته را به‌عنوان طرح بهینه معرفی می‌کند؛ در غیر این صورت فرآیند فوق تا برقراری شرط خاتمه ادامه

می‌یابد. در این پایان‌نامه، شرط خاتمه با تکمیل تعداد مراحل تکرار کنترل می‌شود. به‌عبارت‌دیگر الگوریتم مراحل فوق را تا تکمیل تعداد دفعات پیش‌بینی شده تکرار می‌کند. زمانی که شرط خاتمه محقق شود، الگوریتم، بهترین طرح را به‌عنوان طرح بهینه معرفی می‌نماید.

۴-۱ مقدمه

از آن جایی که عملیات بهینه‌سازی دارای مراحل و محاسبات پیچیده‌ای چه در بحث تحلیل سازه و چه در بحث تهیه و تولید طرح بهینه می‌باشد، بدون نوشتن یک برنامه‌ی کامپیوتری عملاً رسیدن به یک طرح بهینه امکان‌پذیر نیست. از طرفی امروزه باوجود زبان‌های برنامه‌نویسی کاربردی در علوم مختلف و رایانه‌های با سرعت پردازش بالا عامل محکمی جهت سوق دادن محققین برای استفاده از کد نویسی در عملیات بهینه‌سازی حتی در روش‌های دقیق ریاضی می‌باشد. در بهینه‌سازی به روش GA، این مهم از اهمیت بیشتری برخوردار است. چرا که در همان ابتدا معمولاً رشته‌های موجود در هر نسل به‌صورت کد دودویی تعریف می‌شوند. در ادامه به‌صورت اجمالی الگوریتم برنامه‌ی نوشته‌شده در این پایان‌نامه را تشریح می‌کنیم.

۴-۲ تعریف متغیرها

در تمامی زبان‌های برنامه‌نویسی ابتدا باید تمامی متغیرهای بکار رفته در برنامه را معرفی نمود. در این برنامه یک ماجول مختص تعریف تمامی متغیرها اعم از برداری و تانسورها، به همراه فایل‌های خروجی به نام DefineVariable در نظر گرفته شده است.

۴-۳ گرفتن داده‌های ورودی

برای ورود داده‌های مورد نیاز یک مسئله در این برنامه دو ماجول جداگانه تعریف شده که عبارت‌اند از:

۱. GetData
۲. GetData_GA

۱- GetData: در این ماجول 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 ماده‌ی سازنده‌ی المان مربوطه (در صورت یکسان نبودن ساختار المان‌های تشکیل‌دهنده‌ی سازه)، درجاتی که بارگذاری شده‌اند و مقدار بار وارده را ثبت می‌کند.

۲- GetData_GA: این ماجول داده‌هایی مثل تعداد زیررشته‌های هر کروموزوم، تعداد تکرار برنامه، نرخ ادغام، نرخ جهش و این قبیل اطلاعات مربوط به فرآیند GA را دریافت می‌کند.

۴-۴ جمعیت اولیه

همان طور که در فصل قبل گفته شد برای بهینه‌یابی به روش GA ابتدا نیاز به تولید تصادفی یک جمعیت اولیه داریم. تعداد کروموزوم‌های وجود در این جمعیت اختیاری است و هر چه تعداد بیشتری در نظر بگیریم، فضای جستجو گسترده‌تر و امکان رسیدن به طرح بهینه‌ی مطلوب بیشتر خواهد بود. البته هر چه جمعیت یک نسل بیشتر باشد روند بهینه‌یابی کندتر می‌شود.

برای تولید یک کروموزوم تصادفی در این برنامه ابتدا به تعداد زیررشته‌های تشکیل‌دهنده‌ی آن عدد تصادفی در محدوده‌ی ۰ تا L طبق رابطه‌ی (۳-۷) تولید می‌کنیم. سپس هر یک از اعداد به‌دست آمده را به مبنای دو می‌آوریم. عدد جدید که به‌صورت ۰ و ۱ نوشته می‌شود یک زیررشته از کروموزوم مورد نظر محسوب می‌شود. با کنار هم گذاشتن این زیررشته‌ها یک کروکوزوم کامل تشکیل می‌شود. حال با تکرار این فرآیند می‌توان تعداد کروموزوم مورد نیاز برای جمعیت اولیه را به وجود آورد.

۴-۵ کُدگشایی (برگرداندن کد به مقدار اولیه)

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

۴-۶ محاسبه‌ی تابع هدف، جریمه و شایستگی

در ماجول کُدگشایی پس از تولید مقادیر زیررشته‌های هر کروموزوم، با استفاده از رابطه‌ی (۳-۸) گره‌های مربوط به المان‌های سازه در مختصات جدید خود جانمایی می‌شوند. در نتیجه آرایش اولیه‌ی المان‌ها در این لحظه تغییر کرده و یک طرح بهینه‌ی تصادفی تولید می‌شود. حال با توجه به شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری که در طول روند بهینه‌یابی ثابت فرض می‌شوند، باید طرح تولیدشده را از نظر قیود مسئله بررسی نمود. از آن جایی که در این پایان‌نامه قید تنش به همراه قید تغییر شکل مورد بررسی قرار می‌گیرد، باید تنش‌های فون میسز المان‌ها و جابه‌جایی گره‌های سازه‌ی جدید را محاسبه نمود. در ادامه به شرح مختصری از ساب روتین‌های نوشته‌شده برای تحلیل سازه می‌پردازیم.

۴-۶-۱ تحلیل سازه با استفاده از روش المان‌های محدود

برای رسیدن به رابطه‌ی کلی $\boldsymbol{KQ} = \boldsymbol{F}$ و محاسبه‌ی تانسور نیروها باید مراحل زیر را یک به یک پشت سر بگذاریم.

ابتدا ماتریس بارگذاری و مقادیر مورد نیاز برای انتگرال عددی از روش تربیع گوسی را که در فصل دوم بیان شد را فراخوانی می‌کنیم. سپس ماتریس D را با استفاده از داده‌های مسئله طبق رابطه‌ی (۲-۹) در یک ساب روتین جداگانه تشکیل می‌دهیم. درگام بعد باید ماتریس ژاکوبین و ماتریس B را تشکیل دهیم. با به‌دست آوردن دترمینان ماتریس ژاکوبین و دو ماتریس B و D، با استفاده از رابطه‌ی (۲-۲۰) به سراغ ماتریس سختی هر المان می‌رویم.

در نهایت پس از محاسبه ماتریس سختی ۲۴×۲۴ مربوط به هر المان، با استفاده از ماتریس همبند، می‌توان ماتریس سختی کل که همان K در رابطه‌ی $\boldsymbol{KQ} = \boldsymbol{F}$ می‌باشد را تشکیل دهیم. با استفاده از حل دستگاه به روش نواری مقادیر مجهول ماتریس‌های $\mathbf{Q}$ و $\mathbf{F}$ را محاسبه می‌کنیم. که تانسور $\mathbf{Q}$ همان بردار جابه‌جایی گره ها می‌باشد. سپس با کمک رابطه‌ی $\sigma = \boldsymbol{DBq}$ تانسور تنش مختص هر المان را به‌دست آورده و با جایگذاری تنش‌های موجود در المان مورد نظر در رابطه‌ی زیر مقادیر تنش فن میسز محاسبه می‌گردد**[9]**.

$$\sigma_{\text{von}} = \left[\left(\sigma_x - \sigma_y\right)^2 + \left(\sigma_y - \sigma_z\right)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 3\left({\tau_{xy}}^2 + {\tau_{yz}}^2 + {\tau_{zx}}^2\right)\right]^{1/2} \qquad (۱-۴)$$

۴-۶-۲ تابع پنالتی یا جریمه

در این بخش از برنامه، پس از محاسبه‌ی تنش‌های مربوط به هر المان، تمامی تنش‌ها را با تنش تسلیم سازه مقایسه و مقدار جریمه‌ی هر کروموزوم را طبق روابطه (۳-۹) و (۳-۱۰) محاسبه می‌کنیم.

۴-۶-۳ تابع هدف، تابع هدف اصلاح‌شده و شایستگی

با استفاده از مختصات جدید به‌دست آمده برای نقاط گرهی ابتدا حجم المان‌ها و سپس طبق رابطه‌ی (۳-۱۱) تابع هدف را محاسبه می‌کنیم. پس از آن با استفاده از مقادیر تابع پنالتی و تابع هدف و به کمک رابطه‌ی (۳-۵) تابع هدف اصلاح‌شده برای هر کروموزوم محاسبه می‌شود.

پس از محاسبه‌ی تابع هدف اصلاح‌شده برای هر کروموزوم، در این مرحله ابتدا بیشینه و کمینه مقدار تابع هدف اصلاح‌شده بین کروموزوم‌های موجود در نسل حاضر را پیدا کرده و سپس میزان شایستگی هر کروموزوم را با استفاده از رابطه‌ی (۳-۶) محاسبه می‌کنیم.

۴-۷ فرآیند انتخاب، ادغام و جهش

با تعیین میزان شایستگی کروموزوم‌های جمعیت حاضر، نوبت به انتخاب کروموزوم‌های برتر فرا می‌رسد. همان طور که پیش‌تر در قسمت۳-۴-۳-۱و ۳-۴-۳-۲ توضیح داده شد، در این پایان‌نامه از روش رقابتی به همراه مفهوم شایسته‌سالاری در فرآیند انتخاب استفاده کرده‌ایم. به این صورت که ابتدا تعداد کروموزوم‌هایی که در هر تکرار باهم رقابت می‌کنند را تعیین می‌کنیم. سپس در یک حلقه-ی تکرار به‌صورت تصادفی به همان تعداد کروموزوم را انتخاب کرده و کروموزومی که شایستگی بیشتری داشته باشد وارد استخر تولیدمثل می‌شود. تعداد دفعات تکرار این حلقه به اندازه‌ی جمعیت حاضر منهای یک می‌باشد. در انتها کروموزوم‌های انتخاب شده اصطلاحاً وارد استخر تولیدمثل می-شوند.

در این مرحله نوبت به فرآیند ادغام می‌رسد. ابتدا بایستی در یک حلقه برای تمامی کروموزوم‌های انتخاب‌شده یک عدد تصادفی بین صفر و یک انتخاب کرده و با نرخ ادغام مقایسه نمود. درصورتی‌که عدد تصادفی به‌دست آمده کوچک‌تر از نرخ ادغام باشد، آن کروموزوم وارد فرآیند ادغام می‌شود. همان طور که در قسمت ۳-۴-۴-۱-۱-۱ بیان شد، سپس به تعداد اعضای جمعیت، با توجه طول رشته‌ها دو نقطه‌ی تصادفی انتخاب کرده و کروموزوم‌های والد را دو به دو وارد فرآیند ادغام می-کنیم.

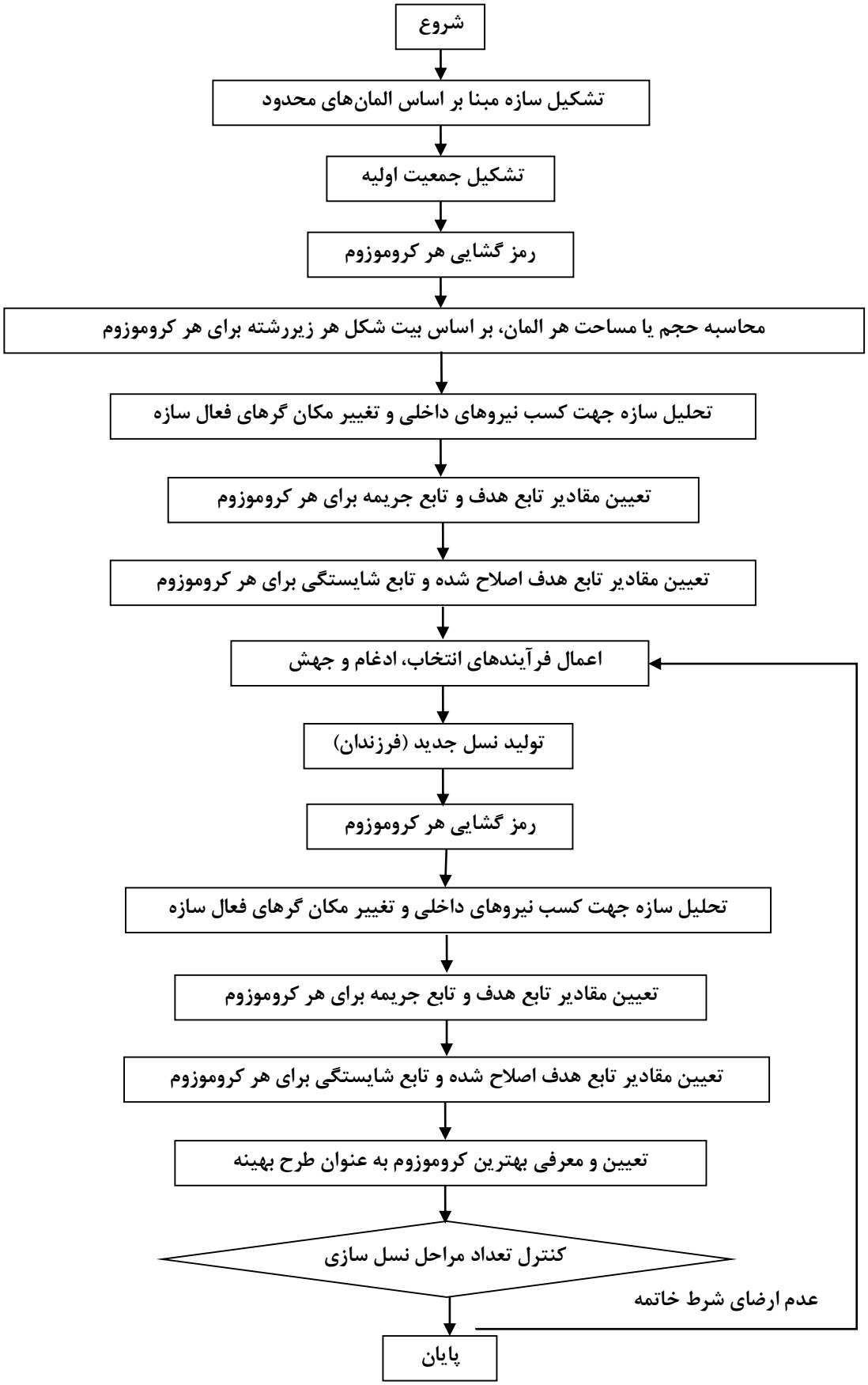
در انتها وارد فرآیند جهش می‌شویم. به این صورت که در یک حلقه، برای تک‌تک بیت‌های هر کروموزوم به‌صورت جداگانه یک عدد تصادفی انتخاب کرده و با نرخ جهش مقایسه می‌کنیم، در

صورتی عدد تصادفی از نرخ جهش کوچک‌تر باشد، آن بیت تغییر کرده و در غیر این صورت بدون تغییر باقی می‌ماند. پس از اتمام فرآیند جهش جمعیت فرزندان کامل می‌شود.

۴-۸ شرط خاتمه

با تکمیل فرآیند عملگرهای GA کروموزوم‌های فرزند تولیدشده را مجدداً کُدگشایی کرده و طرح بهینه‌ی مربوط به هر رشته را تولید می‌کنیم. با تعیین مختصات گره‌های مربوط به هر رشته دوباره روند تعیین تابع پنالتی تا شایستگی را تکرار کرده و بهترین کروموزوم موجود در میان فرزندان را شناسایی می‌کنیم. در بخش پایانی برنامه، مختصات گره‌ها و تانسور تنش مربوط به هر المان کروموزوم برتر را به‌عنوان طرح بهینه‌ی جمعیت حاضر به نمایش می‌گذاریم.

درصورتی‌که شرط خاتمه (در این پایان‌نامه تعداد دفعات تکرار روند بهینه‌یابی) ارضا شده باشد. روند برنامه متوقف شده و آخرین طرح به‌عنوان طرح بهینه معرفی می‌گردد؛ در غیر این صورت برنامه به مرحله‌ی ۴-۷ برمی‌گردد و این روند تا ارضا شدن شرط خاتمه ادامه پیدا می‌کند. در شکل ۴-۱ فلوچارت برنامه در یک قالب کلی به نمایش گذاشته شده است. در ادامه نیز دو مثال به منظور صحت‌سنجی و مقایسه با مراجع مختلف آورده شده است.



شکل (۴-۱) فلوچارت برنامه بهینه‌یابی شکل سازه‌های سه بعدی

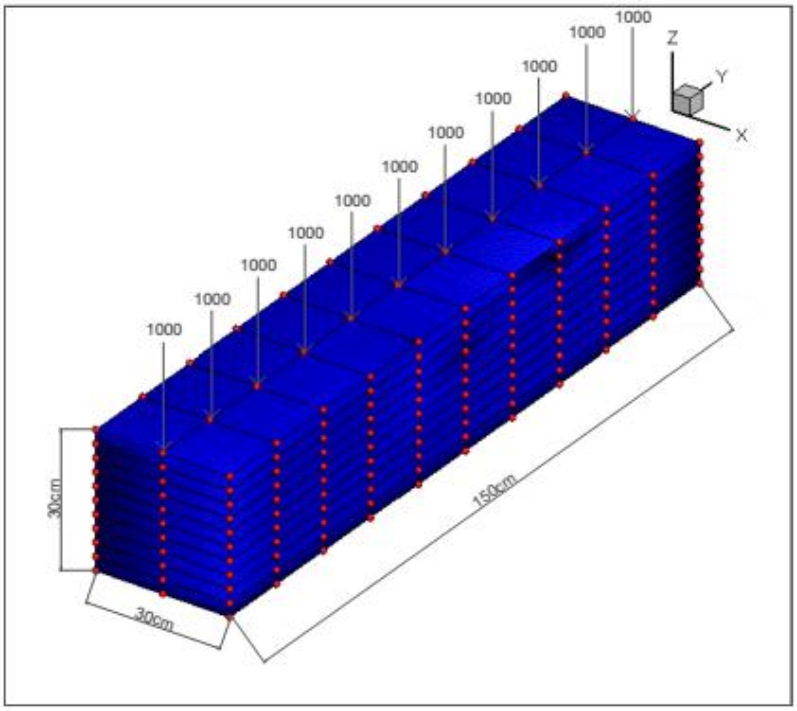
۴-۹ مثال‌های صحت سنجی

۴-۹-۱ مثال ۱: تیر دو سرگیردار سه بعدی

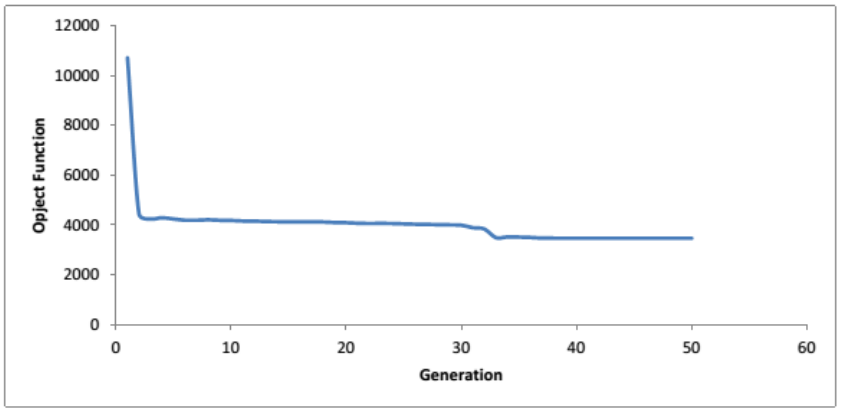
این مثال شامل یک تیر دو سر گیردار سه بعدی با سطح اولیه‌ی مستطیلی خواهد بود. طول، عرض و ارتفاع تیر به ترتیب ۱۵۰، ۳۰ و ۳۰ سانتیمتر می‌باشد. ضریب پواسون و مدول الاستیسیته به ترتیب ۰/۳ و N/cm^2 ۱۵۰۰ در نظر گرفته شده است. بار یک‌نواخت قائمی طبق شکل (۴-۲) و به مقدار ۱۰۰۰ نیوتن بر روی گره‌های میانی بالای تیر اعمال می‌گردد. وزن به عنوان تابع هدف و تنش محوری در راستای X حداکثری به مقدار N/cm^2 ۶۰۰ به عنوان قید فرض می‌شود. تمام نقاط گرهی در وجه جلو و عقب تیر می‌توانند در راستای X حرکت کنند و بقیه‌ی نقاط ثابت می‌باشد. تعداد متغیرهای طراحی برابر با ۳۱ می‌باشد.

جدول ۴-۱ پارامترهای GA در مسئله تیر دو سر گیردار

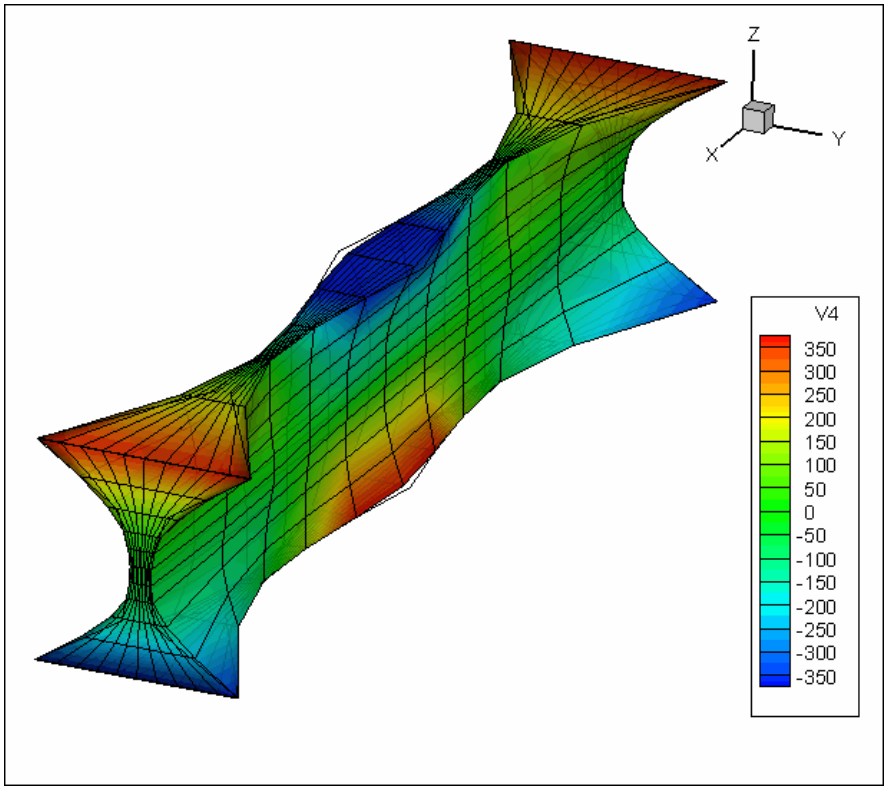
اندازه جمعیت	۱۰۰
تعداد تکرار برنامه	۵۰
نوع انتخاب	رقابتی و شایسته سالاری
عملگر ادغام	دونقطه‌ای
نرخ ادغام	۰,۸
نرخ جهش	۰,۰۰۵



شکل ۴-۲ شکل اولیه‌ی تیر دوسر گیردار

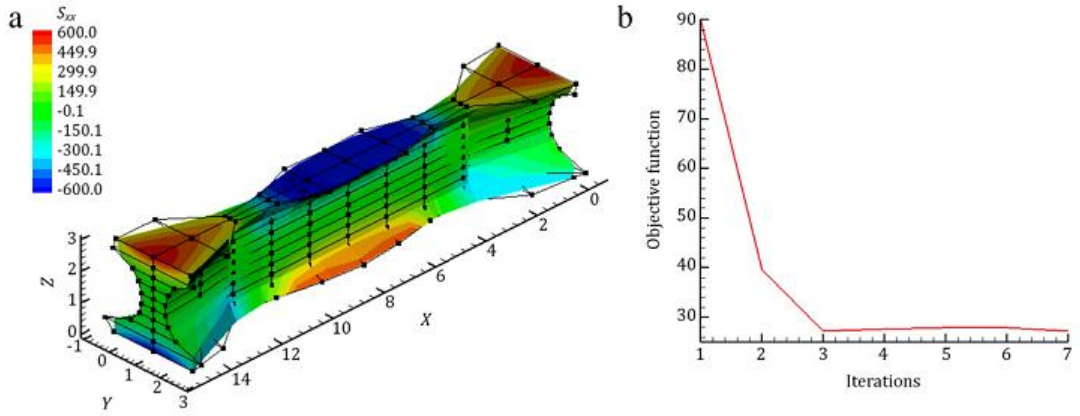


شکل ۴-۳ روند بهینه‌سازی



شکل ۴-۴ کانتورهای تنش محوری x برای طرح بهینه‌ی تیر سه بعدی

نتایج حاصل از تحلیل در مثال مرجع به شکل زیر می‌باشد که جهت مقایسه آورده شده است [20].



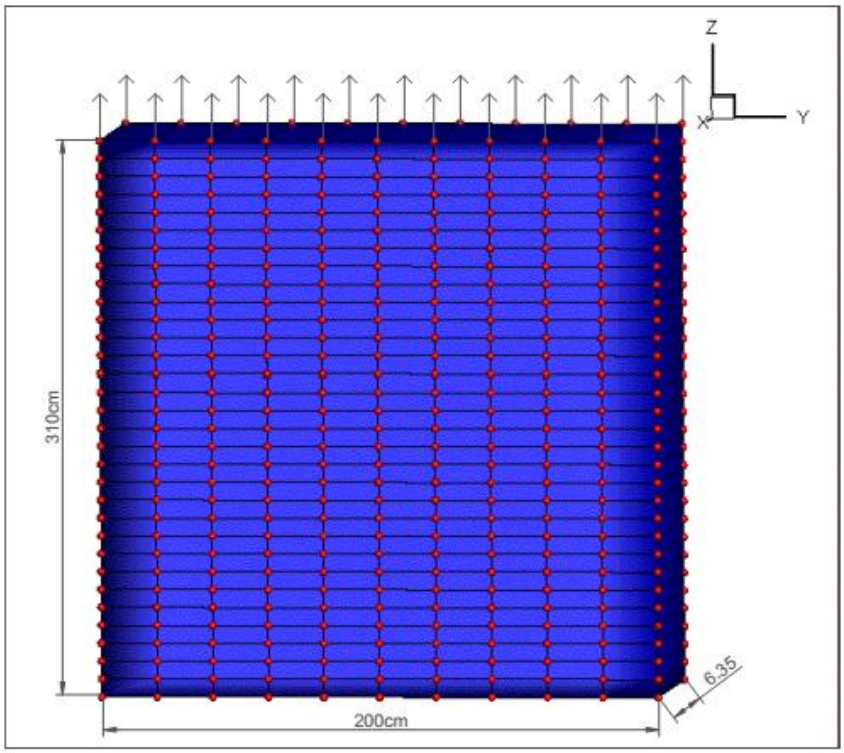
شکل ۴-۵ طرح بهینه به همراه روند بهینه‌سازی

۴-۹-۲ مثال ۲: صفحه‌ی یک‌سر مفصل تحت کشش

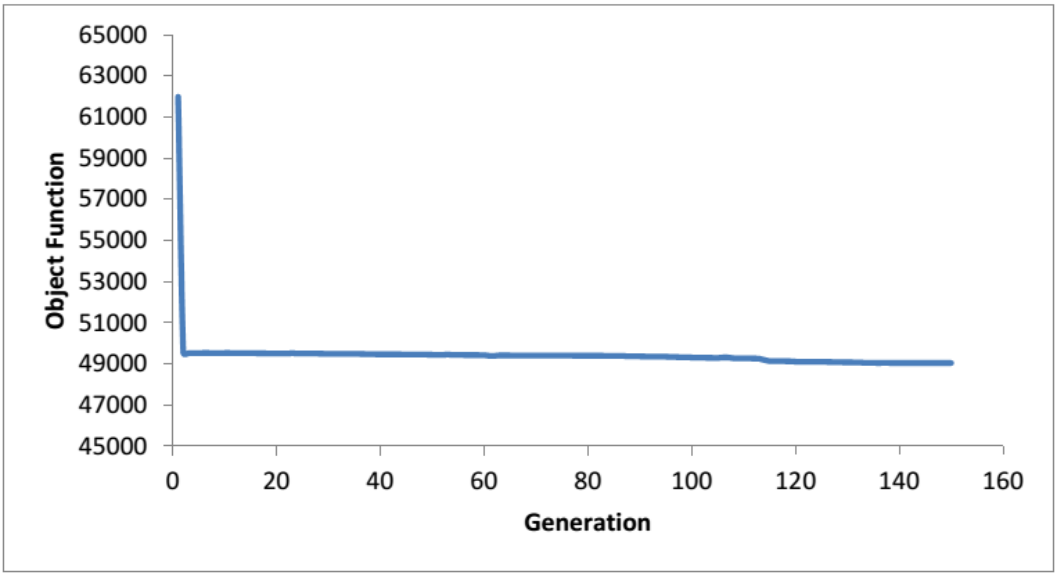
این مثال شامل یک صفحه‌ی یک‌سر مفصل با ضخامت ناچیز و با سطح اولیه‌ی مستطیلی خواهد بود. طول، عرض و ضخامت صفحه به ترتیب ۳۱۰، ۲۰۰ و ۶,۳۵ سانتیمتر می‌باشد. ضریب پواسون و مدول الاستیسیته به ترتیب ۰/۳ و $۲۰۶۸۵۰^{N/cm^2}$ در نظر گرفته شده است. بار یک‌نواخت قائمی طبق شکل (۴-۶) و به مقدار ۹۹۵ نیوتن بر روی گره‌های طرفین بالای تیر اعمال می‌گردد. مساحت صفحه به عنوان تابع هدف و تنش فون میسز حداکثری به مقدار $۳۴/۵^{N/cm^2}$ به عنوان قید فرض می‌شود. نقاط گرهی میانی می‌توانند در راستای y حرکت کنند و بقیه‌ی نقاط ثابت می‌باشد. تعداد متغیرهای طراحی برابر با ۱۹ می‌باشد.

جدول ۴-۲ پارامترهای GA در مسئله صفحه‌ی تحت کشش

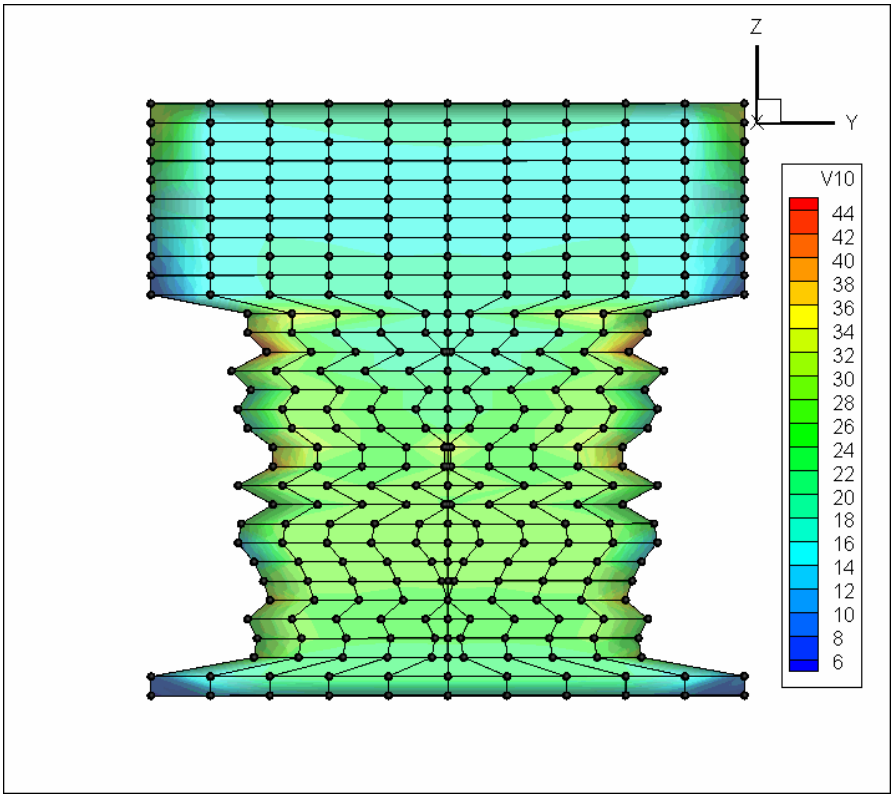
اندازه جمعیت	۵۰
تعداد تکرار برنامه	۱۵۰
نوع انتخاب	رقابتی و شایسته سالاری
عملگر ادغام	یک‌نواخت
نرخ ادغام	۰,۸
نرخ جهش	۰,۰۰۵



شکل ۴-۶ شکل اولیه صفحه‌ی یک‌سر مفصل

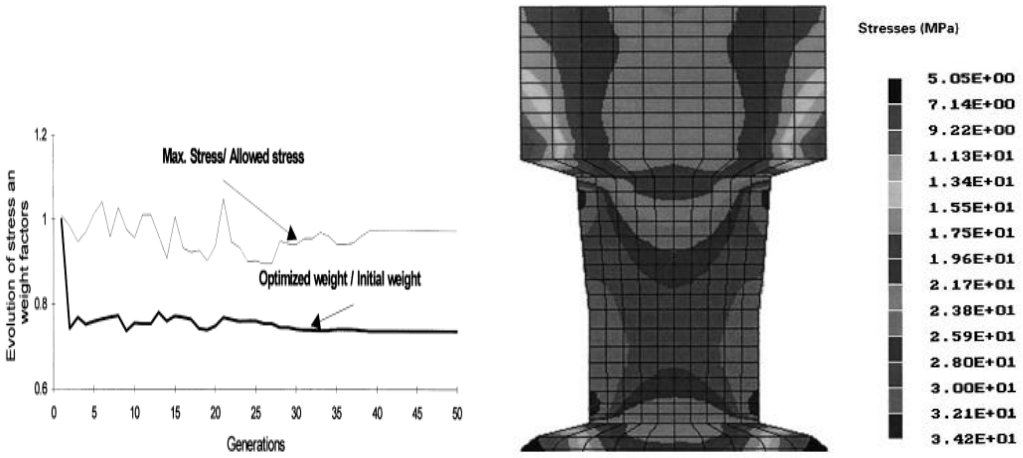


شکل ۴-۷ روند بهینه‌سازی



شکل ۴-۸ کانتورهای تنش فون میسز طرح بهینه‌ی صفحه

در این مثال طرح بهینه نسبت به مساحت اولیه ۲۰/۸٪ کاهش یافته است. نتایج حاصل از تحلیل در مثال مرجع به شکل زیر می‌باشد که جهت مقایسه آورده شده است [9].



شکل ۴-۹ طرح بهینه و روند بهینه‌سازی

۵-۱ مقدمه

در این فصل جهت بررسی توانمندی الگوریتم ژنتیک، مثال‌های متداول و کاربردی در دنیای GA مورد ارزیابی قرار گرفته است. در بررسی های به عمل آمده سعی شده است تا کارآمدی و ویژگی‌های این تحقیق مورد ارزیابی قرار گیرد.

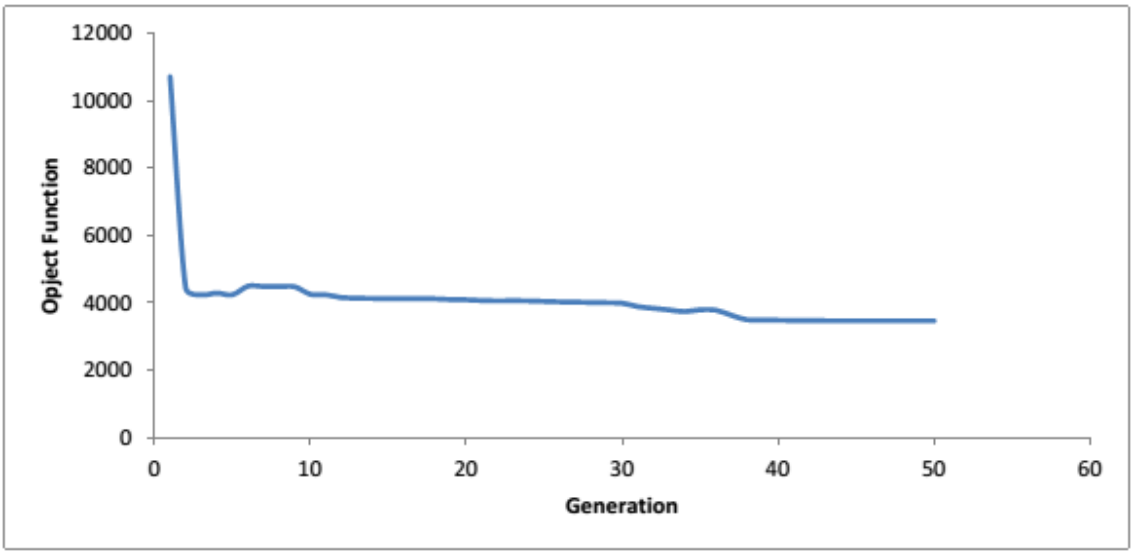
۵-۲ مثال (۱) تیر دوسر گیردار سه بعدی

این مثال شامل یک تیر دو سر گیردار سه بعدی با سطح اولیه‌ی مستطیلی خواهد بود. طول، عرض و ارتفاع تیر به ترتیب ۱۵۰، ۳۰ و ۳۰ سانتیمتر می‌باشد. ضریب پواسون و مدول الاستیسیته به ترتیب ۰/۳ و N/cm^2 ۱۵۰۰ در نظر گرفته شده است. بار یک‌نواخت قائمی طبق شکل (۴-۲) و به مقدار ۱۰۰۰ نیوتن بر روی گره‌های میانی بالای تیر اعمال می‌گردد. وزن به عنوان تابع هدف و تنش فون میسز حداکثری به مقدار N/cm^2 ۶۰۰ به همراه میزان تغیر شکل cm ۴ به عنوان قید فرض می-

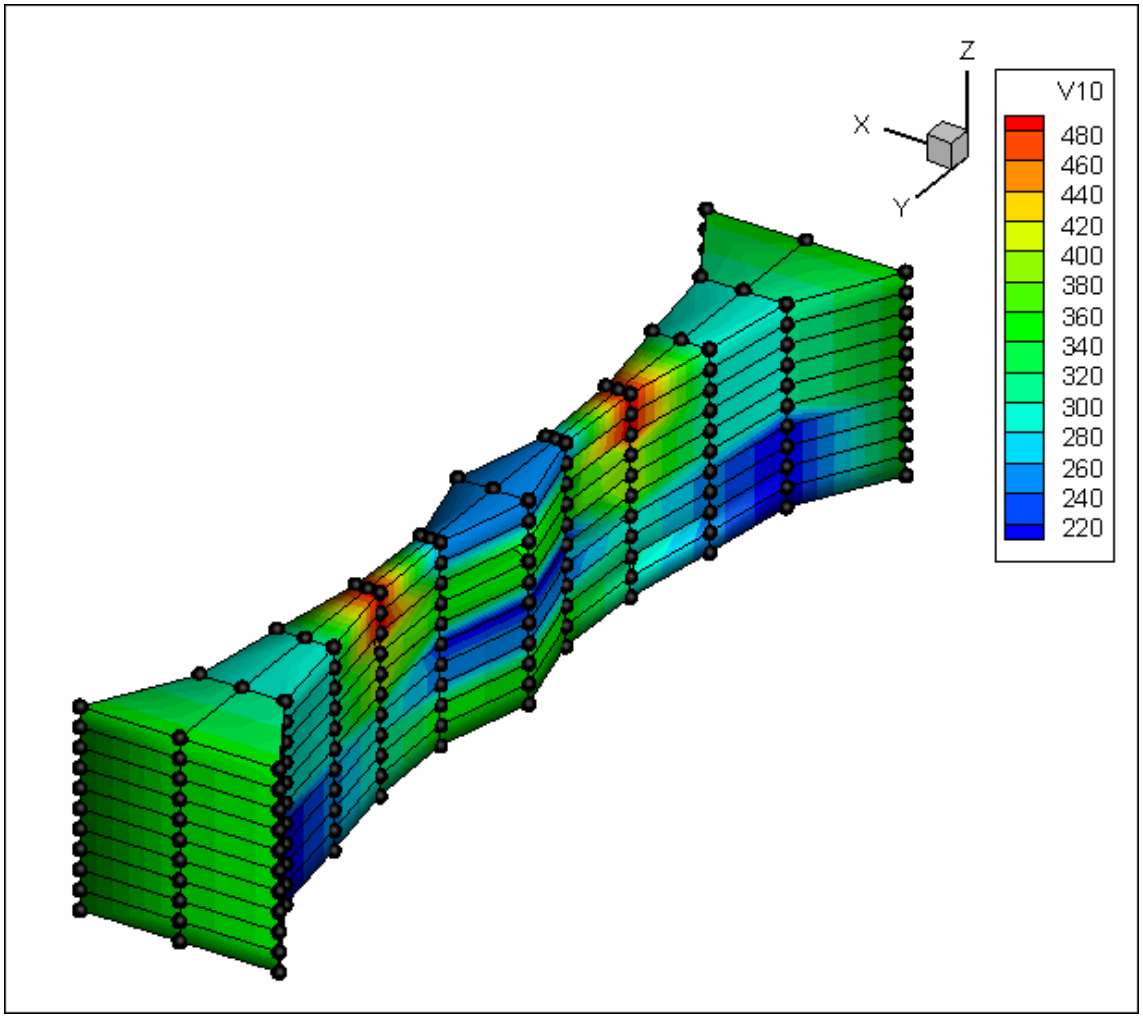
شود. تمام نقاط گرهی در وجه جلو و عقب تیر می‌توانند در راستای X حرکت کنند و بقیه‌ی نقاط ثابت می‌باشد. تعداد متغیرهای طراحی برابر با ۵ می‌باشد.

جدول ۵-۱ پارامترهای GA در مسئله تیر دو سر گیردار

اندازه جمعیت	۱۰۰
تعداد تکرار برنامه	۵۰
نوع انتخاب	رقابتی و شایسته سالاری
عملگر ادغام	دونقطه‌ای
نرخ ادغام	۰,۸
نرخ جهش	۰,۰۰۵



شکل ۵-۱ روند بهینه‌سازی



شکل ۵-۲ کانتورهای تنش فون میسز برای طرح بهینه‌ی تیر دوسر گیردارسه بعدی

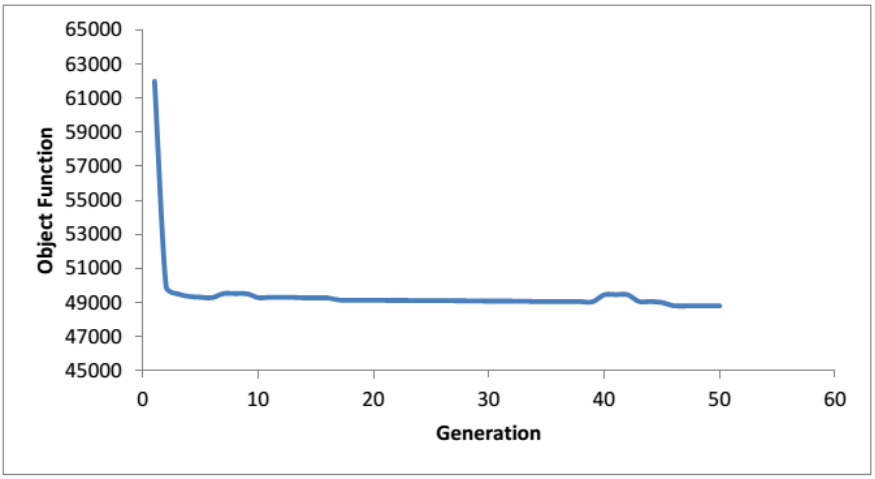
در این مثال حجم اولیه برابر با 10720^{cm^3} بوده که در نهایت به 3478^{cm^3} می‌رسد؛ یعنی ٪۶۷ کاهش حجم پیدا کرده است.

۵-۳ مثال (۲) صفحه‌ی یک‌سر مفصل تحت کشش

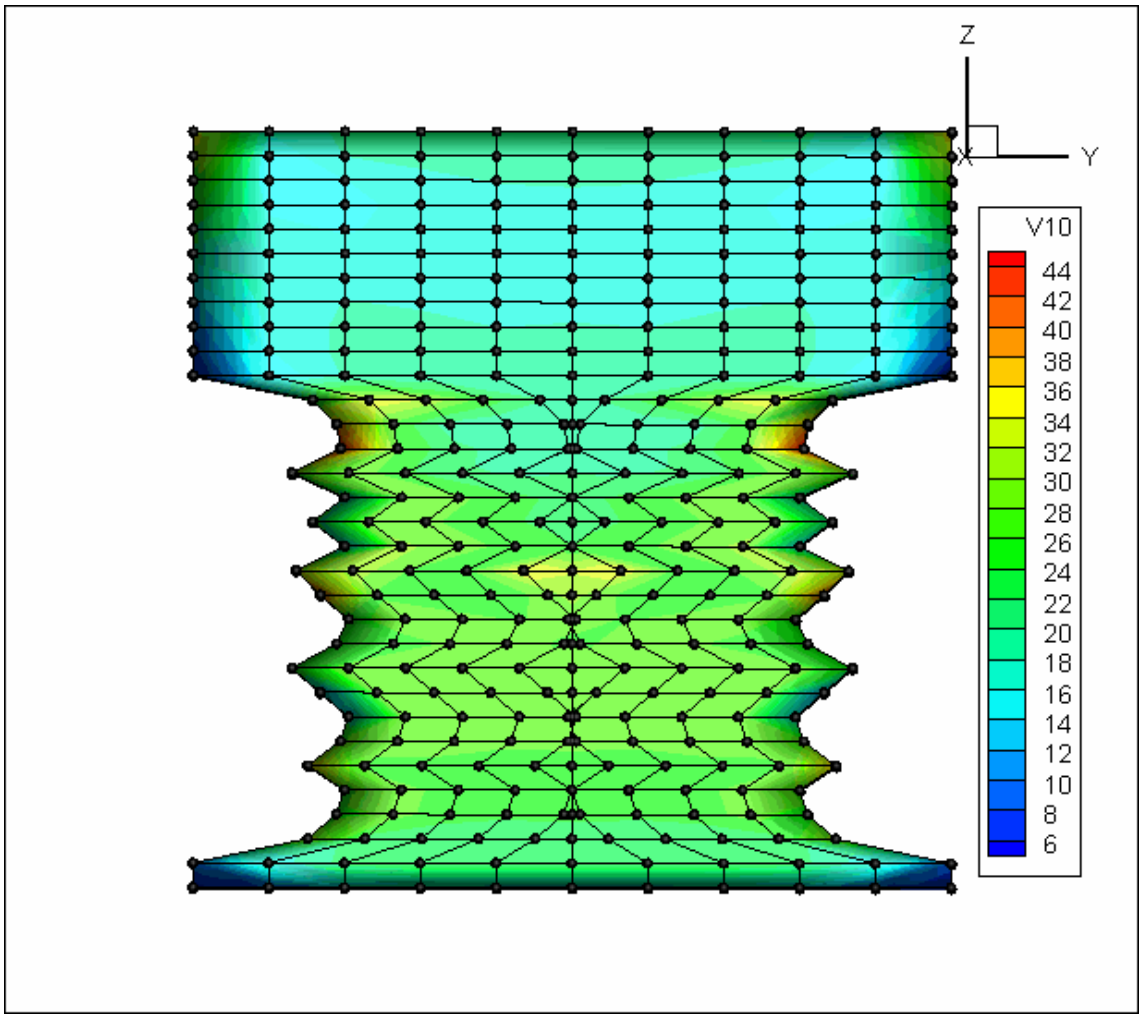
این مثال شامل یک صفحه‌ی یک‌سر مفصل با ضخامت ناچیز و با سطح اولیه‌ی مستطیلی خواهد بود. طول، عرض و ضخامت صفحه به ترتیب ۳۱۰، ۲۰۰ و ۶/۳۵ سانتیمتر می‌باشد. ضریب پواسون و مدول الاستیسیته به ترتیب ۰/۳ و $۲۰۶۸۵۰^{N/cm^2}$ در نظر گرفته شده است. بار یک‌نواخت قائمی طبق شکل (۴-۶) و به مقدار ۹۹۵ نیوتن بر روی گره‌های طرفین بالای تیر اعمال می-گردد[21]. مساحت صفحه به عنوان تابع هدف و تنش فون میسز حداکثری به مقدار $۳۴/۵^{N/cm^2}$ به همراه میزان تغیر شکل 4^{cm} به عنوان قید فرض می‌شود. نقاط گرهی میانی می‌توانند در راستای y حرکت کنند و بقیه‌ی نقاط ثابت می‌باشد. تعداد متغیرهای طراحی برابر با ۱۹ می‌باشد. در این مثال مساحت اولیه برابر با ۶۲۰۰۰^{cm^2} بوده که در نهایت به ۴۸۸۱۴^{cm^2} می‌رسد؛ یعنی ۲۱/۲٪ کاهش پیدا کرده است.

جدول ۵-۲ پارامترهای GA در مسئله صفحه‌ی تحت کشش

اندازه جمعیت	۵۰
تعداد تکرار برنامه	۵۰
نوع انتخاب	رقابتی و شایسته سالاری
عملگر ادغام	یک‌نواخت
نرخ ادغام	۰/۸
نرخ جهش	۰/۰۰۵



شکل ۵-۳ روندبهینه‌سازی



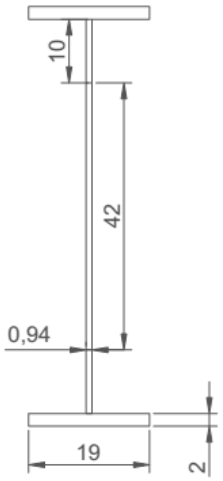
شکل ۵-۴ کانتورهای تنش فون میسز برای طرح بهینه‌ی صفحه‌ی تحت کشش

۵-۴ مثال (۳) تیر لانه زنبوری دوسر مفصل

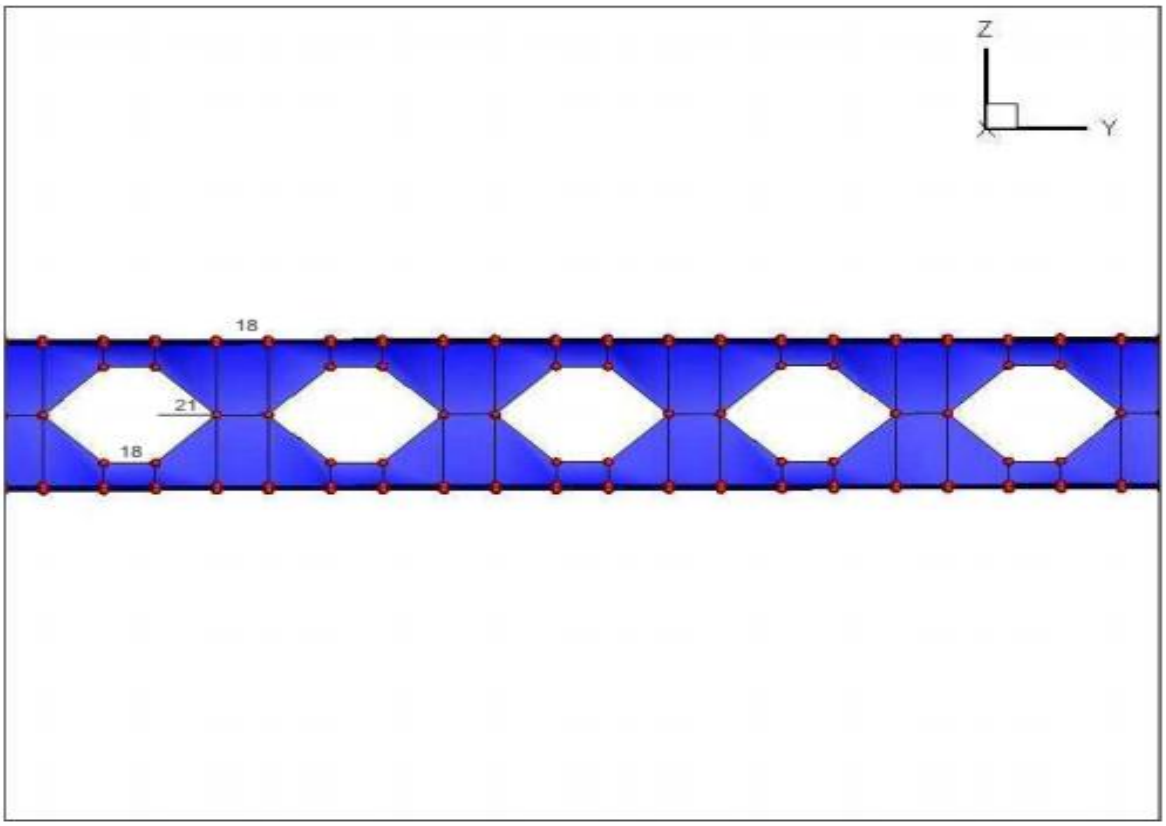
این مثال شامل یک تیر لانه‌زنبوری دو سر مفصل سه بعدی با مقطع I شکل خواهد بود. طول دهانه‌ی تیر برابر ۴۰۰ سانتیمتر بوده و دیگر مشخصات اولیه‌ی تیر در شکل‌های (۵-۴) و (۵-۵) مشخص شده است. ضریب پواسون و مدول الاستیسیته به ترتیب ۰/۳ و $۲۱۰۰۰۰ \ N/mm^2$ در نظر گرفته شده است. بار یک‌نواخت قائمی طبق شکل (۵-۶) و به مقدار ۷۰۰ نیوتن بر روی گره‌های طرفین بال بالای تیر به گونه‌ای که در راستای جان قرارگیرد، اعمال می‌گردد. وزن به عنوان تابع هدف و حداکثر تنش‌های خمشی اولیه و ثانویه به میزان $۰/۶F_y$، به همراه حد اکثر تنش برشی مقطع به میزان $۰/۴F_y$، به عنوان قید فرض می‌شود. تمام نقاط گرهی مربوط به سوراخ‌های جان تیر در راستای y و گره‌های موجود در بالا و پایین این سوراخ‌ها در راستای z می‌توانند حرکت کنند و بقیه‌ی نقاط ثابت می‌باشد. تعداد متغیرهای طراحی برابر با ۶ می‌باشد.

جدول ۵-۳ پارامترهای GA در مسئله تیر لانه زنبوری

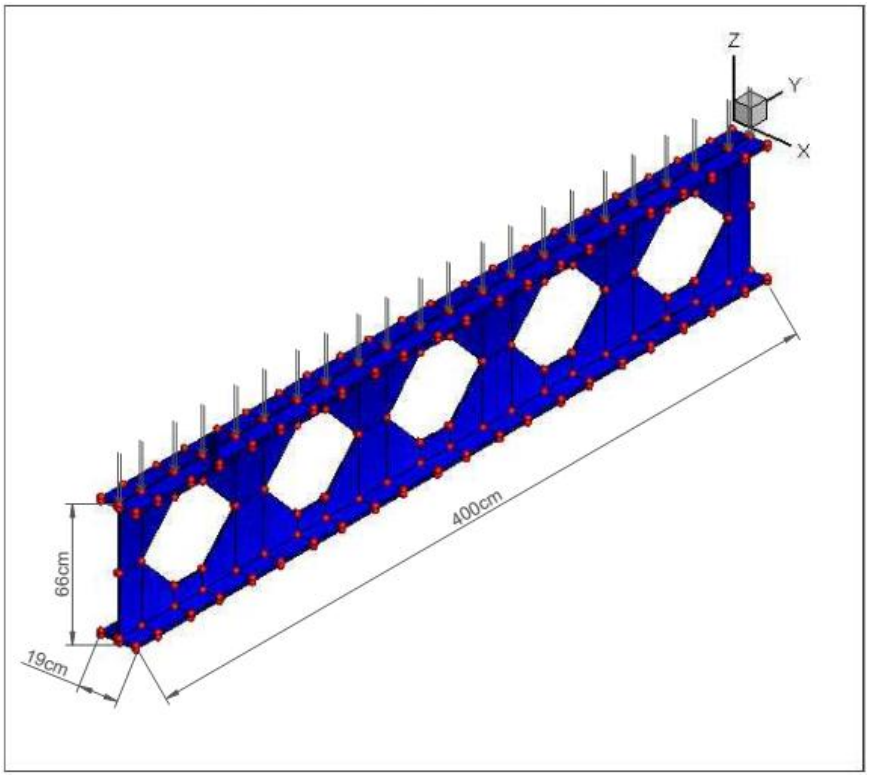
اندازه جمعیت	۱۰۰
تعداد تکرار برنامه	۵۰
نوع انتخاب	رقابتی و شایسته سالاری
عملگر ادغام	یکنواخت
نرخ ادغام	۰/۸
نرخ جهش	۰/۰۰۵



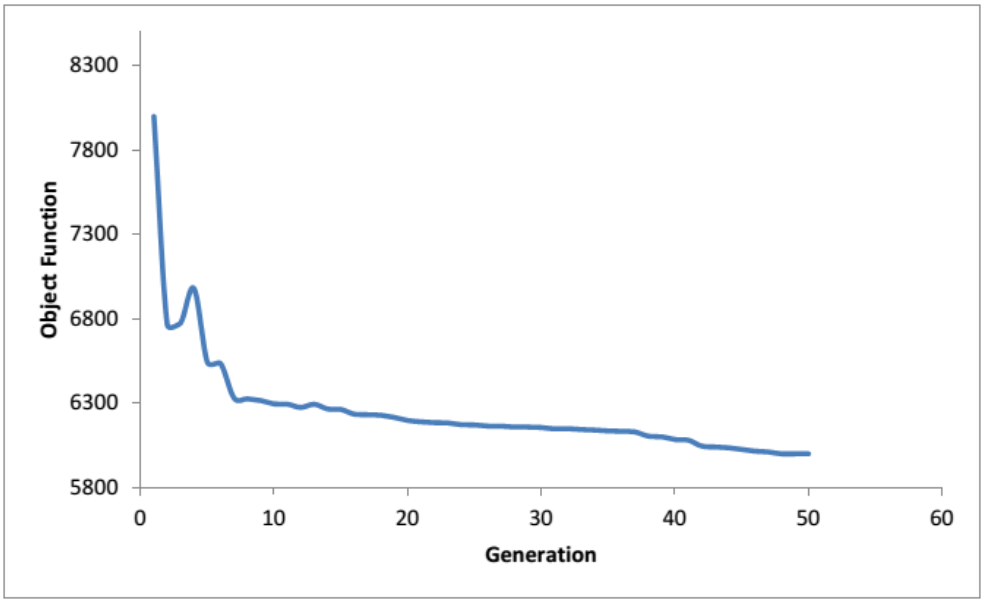
شکل ۵-۵ مقطع تیر لانه زنبوری



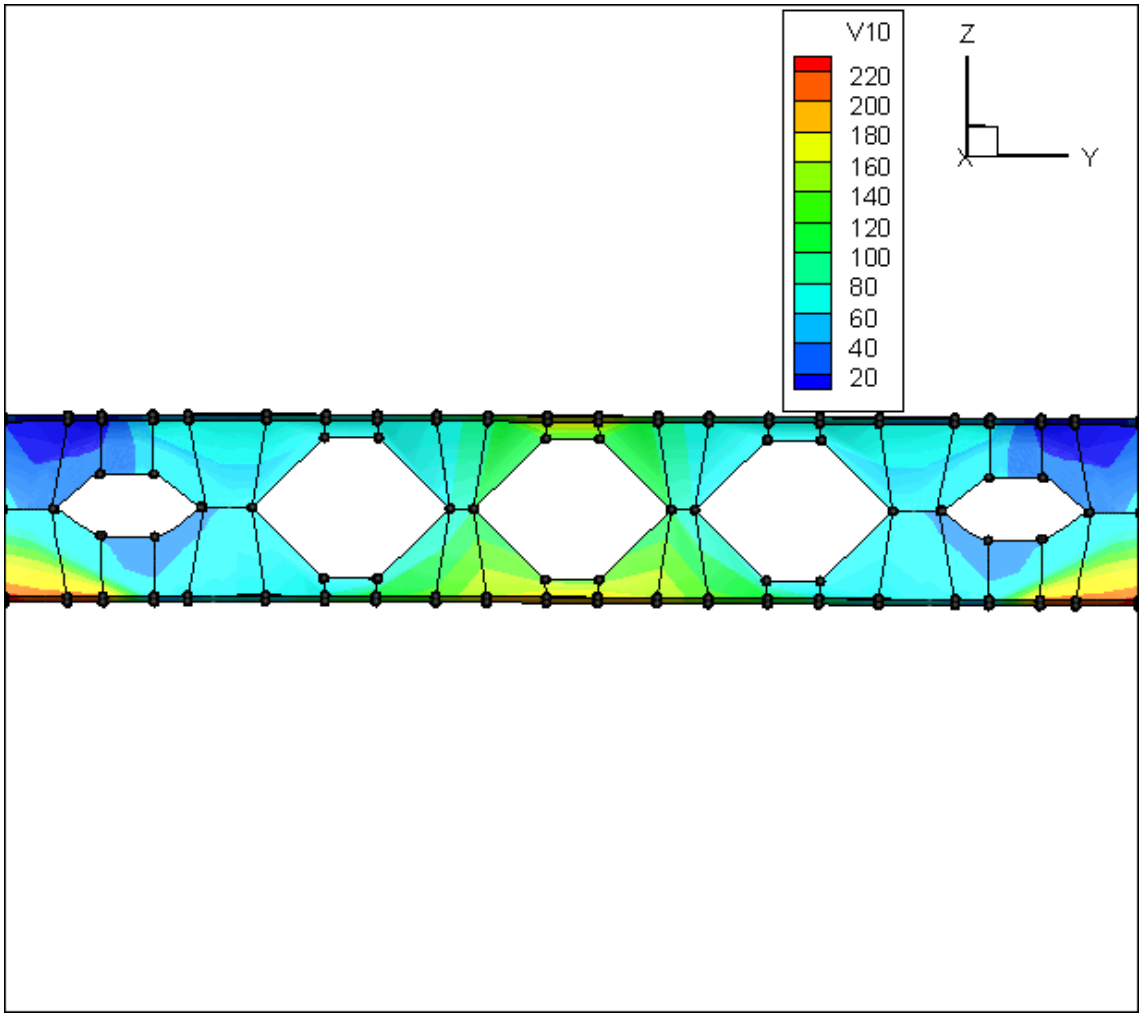
شکل ۵-۶ ابعاد سوراخ‌های جان تیر اولیه به همراه فاصله‌ی بین سوراخ‌ها



شکل ۵-۷ ابعاد و نحوه‌ی بارگذاری تیر لانه زنبوری



شکل ۵-۸ روند بهینه سازی



شکل ۵-۹ کانتورهای تنش فون میسز تیر لانه زنبوری بهینه شده

در این مسئله مقدار تابع هدف از ۸۰۰۰ به ۶۲۲۵ یعنی به میزان ۲۲٪ کاهش یافته است.

۶-۱ مقدمه

روش تحلیل اجزای محدود، بهینه‌سازی شکل و روش‌های مناسب برای آن در فصل‌های قبل مورد بررسی قرار گرفت. در فصل چهارم و پنجم نیز مثال‌هایی برای صحت‌سنجی و کارایی روش مورد استفاده نشان داده شد. در پایان نتایج حاصل از این پژوهش به صورت خلاصه ذکر و همچنین پیشنهاداتی نیز برای مطالعات بعدی ارائه می‌گردد.

۶-۲ جمع‌بندی و نتایج

- در روش اجزای محدود به راحتی می‌توان با استفاده از یک ساب‌روتین تولید مش، هندسه‌ی اکثر سازه‌های پیوسته‌ی سه بعدی را تولید کرد. از طرفی اجزای محدود روشی کارآمد و مناسب و اثبات شده جهت فرآیند محاسبات و تحلیل سازه با تقریب بسیار قابل قبول می‌باشد. از سری مشکلات روش المان‌های محدود در ایجاد هندسه‌ی مرز سازه‌ی مورد نظر، نزدیک شدن بیش از حد گره‌های مجاور یک المان می‌باشد که این مسئله نیز با تعریف قیدها مناسب و یا حدود تغییرات گره‌ها که در این تحقیق استفاده شده، برطرف می‌گردد.
- در روش ژنتیک الگوریتم نیز بر خلاف روش‌های ریاضی نیازی به محاسبات پیچیده و مشتقات توابع نیست و تنها با تعریف یک تابع هدف مناسب و قیدهای مطلوب با جابه‌جایی گره‌های المان‌ها به حل مسئله پرداخت. همچنین امروزه در روش‌های

ریاضی مواردی چون روش آیزوژئومتریک مورد قرار گرفته که این روش نیز دارای محدودیت‌هایی از قبیل ترکیب بارگذاری خاص می‌باشد ولی در بهینه‌سازی به روش GA هیچ‌گونه محدودیتی در انتخاب نوع بارگذاری و یا نوع هندسه‌ی سازه نداریم.

- برای افزایش سرعت همگرایی و جلوگیری از رسیدن مسئله به بهینه‌ی محلی در روش ژنتیک الگوریتم انتخاب عملگرها، نرخ جهش و نرخ ادغام اهمیت فروانی دارد. برای برطرف کردن این مهم در صورتی که تحقیقات قبلی در این زمینه یافت نشود، باز هم با استفاده از روش جزیره‌ای در این زمینه مشکلی وجود نخواهد داشت. انتخاب نو ع هندسه‌ی مرز نیز تأثیر به‌سزایی در تعداد المان‌ها و در نتیجه سرعت بهینه‌سازی دارد. انتخاب المان‌های محدود برای هندسه مرز موجب افزایش تعداد المان‌ها و در نتیجه کاهش سرعت بهینه‌سازی می‌شود.
- از ویژگی‌های این تحقیق می‌توان به بهینه‌یابی در دو جهت و استفاده‌ی هم‌زمان دو قید تنش و تغییر شکل اشاره کرد.

۶-۳ پیشنهادها

در ادامه برای تحقیقات آتی به چند موضوع اشاره می‌شود که می‌تواند مفید باشد:

- پیدا کردن روش سیستماتیک برای عدم تداخل و یا نزیک شدن بیش از حد گره‌ها برای رسیدن به جواب مطلوب‌تر
- تعیین روشی برای رسیدن به تمامی قیدهای مورد نیاز یک مسئله‌ی بهینه‌سازی
- انتخاب توابعی چون اسپیلاین و غیره در تولید هندسه‌ی مرز

- کار کردن بر روی مثال ۳ فصل پنجم برای رسیدن به نتایج مطلوب‌تر، به عنوان یک مثال کاربردی

مراجع

[1] Wilde.D.J, Beightler.Ch.S, (1967), “Fundation of optimizaion”, New Jersey, 1 October 1967.

[2] Rechenberg.I, “Optimierung technischer systeme nach prinzipien der biologischen evolution: Evolutionsstrategie, Frommann-Holzboog, Stuttgart, 1973.

[3] Holland.J.H, Miller.J.H (1975), “The American Economic Review”, Vol. 81, No. 2, Michigan.

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

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

[6] Jenkins. W. M, (1991), “Towards structural optimization via the Genetic algotirthm”, Computer and Structures 40, pp. 1321-1327.

[7] Rajeev.S, Krishnamoorthy.C.S, (1992), “Discrete Optimization Of Strucrutes Using Genetic Algorithm”, ASCE, Journal of Structural Engineering. 118 (5), pp. 1233-1250.

[8] Kita.E, Tanie.H (1997), “Shape optimization of continuum structures by genetic algorithm and boundary element method”, vol 19, march 1997, pp. 129-136.

[9] Annicchiarico.W, Cerrolaza.M, “Finite elements, genetic algorithms and β-splines: a combined technique for shape optimization”, Vol 33, September 1999, pp 125-141

[10] Reddy.J.N, “An Introduction to the Finite Element Method”, 2008, N.Soltani, A.Rastgou, University of Tehran, 2nd Edition, vol 1, pp 1-10.

[11] T.R.Chandrupatla, A.D.Belegundu, “Introduction to Finite Elements in Engineering”, 3nd Edition, pp 275-286.

[12] کلات‌جاری. و. ر، طالب‌پور. م. ح، (۱۳۹۰)، "بهینه‌یابی سطح مقطع و توپولوژی سازه‌ها از طریق الگوریتم ژنتیک و بررسی روش‌های گوناگون فرآیند انتخاب در روند بهینه‌یابی"، مجموعه مقالات ششمین کنگره‌ی ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، ۷-۶ اردیبهشت.

[13] Yang. J, Soh. C. K, (1997), “Structural Optimization by Genetic Algorithms With Tournament Selection”, ASCE, Journal of Computing in Civil Engineering. 11 (3), pp. 195-200.

[14] De Jong. K. A, (1975), “An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems”, University of Michigan.

[15] Eshelman. L. J, Caruana.A, Schaffer. J. D, (1989), “Biases in the Crossover Landscape”.

[16] Kochenberger. G. A, Glover. F, (2003), “Handbook of metaheuristics”, Kluwer Academic Publishers.

[17] Imai. K, Schmit Jr. L. A, (1981), “Configuration optimization of trusses. J. Structural Division”, ASCE 107(st5).

[18] عرب یار محمدی. ا، (۱۳۹۳)، پایان‌نامه ارشد، "بهینه‌سازی آیزوژئومتریک شکل سازه‌های سه بعدی با تابع هدف وزن و قید تنش با روش مجانب‌های متحرک"، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شاهرود.

[19] کلات‌جاری. و. ر، طالب‌پور. م. ح، (۱۳۹۰)، "بهینه‌یابی سطح مقطع و توپولوژی سازه‌های خرپایی توسط روش اصلاحی چند منظوره"، نشریه‌ی تخصصی مهندسی عمران- نقشه‌برداری- دانشکده فنی، دوره ۴۵و شماره ۳.

[20] Hasani. B, Khanzadi. M, Tavakkoli. S. M. and Moghada. N. Z, (2009), “Isogeometric Shape Optimization of Three Dimentional Problems”, 8th World Congress on structural and Multidisciplinary Optimization, June 1-5, Lisbon, Porugal.

[21] طاحونی. ش، (۱۳۷۵)، "طراحی سازه‌های فولادی"، چ پنجم، ص ۸۳۹-۸۵۳

[22] Annicchiarico.W, Cerrolaza.M, (2001), “Structural shape optimization 3D finite-element models based on genetic algorithms and geometric modeling”, Vol 37, May 2001, pp 403-415

Abstract

Structural optimizations which include conditions and available limits or constrain function have been always one of the engineers and designers object. So far, many researches have been constructed on optimization and a lot of different ways of solving it have been suggested. Totally, methods of optimization can be divided into 3 basic types, mathematical method, optimality criterion and meta-heuristic.

In this research we use Genetic Algorithm which is one of the meta-heuristic-method, in regard to shape optimization of 3D elastic structures. If we want to use this method, having objective functions and optimal constrains into design variable is needed.

In this thesis we use finite element (FEM) for construction analysis. In this method construction is divided into some hexagonal brick elements. Therefore, for changing geometry in shape optimization, we should verify the coordinate of element nods and analysis the problem again.

In this research weight or surface are considered as objective function and stress limits and displacement of shapes as constrains of optimization problem, respectively. On the other hand optimization in two directions has occurred at the same time. We bring some 3D example with validation examples in this thesis, which is provided from computer program.

***Key Words**: Shape optimization of 3D continuum structures, Genetic algorithm method, Constrain of stress-dispalcement, Optimization in two directions.*

Shahrood University

Department of Structural Engineering

M.Sc.Thesis

Shape Optimization of Continuum Structures by Genetic Algorithm

M.kamel

Supervisor:

Dr.V.R.Kalatjari

Advisor:

Dr.M.H.Talebpour

Date: February 2014