

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک

گروه طراحی کاربردی

پایان نامه کارشناسی ارشد

بهینه‌سازی کمانش صفحات مربعی مرکب با گشودگی‌های مختلف تحت  
بارگذاری حرارتی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

نگارنده:

سجاد مهدوی

اساتید راهنما:

دکتر علیرضا شاطرزاده

دکتر محمد جعفری

بهمن ۹۷

شماره: ۱۵۴ / ۲۸۷ / ۳  
تاریخ: ۹۷ / ۱۱ / ۱۳

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای: سجاد مهدوی با شماره دانشجویی: ۹۵۱۴۶۲۴ رشته: مهندسی مکانیک گرایش: طراحی کاربردی تحت عنوان: بهینه‌سازی کمانش صفحات مربعی مرکب با گشودگی‌های مختلف تحت بارگذاری حرارتی با استفاده از الگوریتم ژنتیک که در تاریخ: ۱۳۹۷/۱۱/۰۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه: عالی) <input checked="" type="checkbox"/> / <input type="checkbox"/> مردود			
نوع تحقیق: نظری <input checked="" type="checkbox"/> / عملی <input type="checkbox"/>			
عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبۀ علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر علیرضا شاطرزاده	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر محمد جعفری	دانشیار	
۳- استاد مشاور	.....	.....	.....
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر محمدباقر نظری	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر حمیدرضا ایبک چی	دانشیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر سید وحید حسینی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: محمد محسن شاه مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می‌تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



تقدیم به؛

خانواده عزیز و مهربانم؛

که در سختی‌ها و دشواری‌های زندگی همواره یوری دلسوز و فداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن  
برایم هستند.

## تقدیر و تشکر:

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم چرا که این دو وجود پس از پروردگار مایه هستی‌ام بوده‌اند، دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب به من آموختند. تقدیر و تشکر شایسته و فراوان از استاد فرهیخته و فرزانه دکتر علیرضا شاطرزاده که با نکته‌های دلاویز و گفته‌های بلند، صحیفه‌های سخن را علم پرور نمود و همواره راهنما و راه‌گشای نگارنده در اتمام و اکمال پایان‌نامه بودند. هم‌چنین از دکتر محمد جعفری به پاس زحمات و راهنمایی‌های ارزشمند، قدردان و سپاسگزارم.

## تعهد نامه

اینجانب **سجاد مهدوی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکانیک طراحی کاربردی دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **بهینه‌سازی کمانش صفحات مربعی مرکب با گشودگی‌های مختلف تحت بارگذاری حرارتی با استفاده از الگوریتم ژنتیک** تحت راهنمایی دکتر علیرضا شاطرزاده و دکتر محمد جعفری متعهد می شوم.

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

### تاریخ

### امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

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

## چکیده

در این پایان‌نامه، بهینه‌سازی کمانش صفحات مربعی مرکب با گشودگی‌های مختلف تحت بارگذاری حرارتی با استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار گرفته است. بارگذاری به صورت افزایش دمای یکنواخت بر کل صفحه اعمال می‌شود. جنس صفحه، کامپوزیت هیبریدی چهار لایه Glass/Epoxy و Boron/epoxy می‌باشد. گشودگی‌هایی که در این تحقیق مورد مطالعه قرار گرفته اند عبارتند از: دایره، شبه مثلثی، شبه مربعی، پنج ضلعی و شش ضلعی که در مرکز صفحه واقع شده‌اند. روش حل به کار رفته در تحلیل این پایان‌نامه، اجزای محدود مبتنی بر روش انرژی می‌باشد. همچنین تئوری به کار رفته در این پایان‌نامه، تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول می‌باشد. در ادامه مقادیر بهینه پارامترهای مؤثر بر کمانش به منظور رسیدن به حداکثر دمای بحرانی کمانش با استفاده از الگوریتم ژنتیک به دست آورده شده است. در الگوریتم ژنتیک، دمای بحرانی کمانش به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. پارامترهای مؤثر بر کمانش حرارتی که در این پایان‌نامه به بهینه‌سازی آن پرداخته شده است عبارتند از: نرمینگی گوشه‌های گشودگی، چرخش گشودگی، زاویه الیاف و نسبت اندازه گشودگی به اندازه صفحه. همچنین اثر شرایط مرزی مختلف و چیدمان متفاوت لایه‌های کامپوزیتی بر دمای بحرانی کمانش بررسی شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود که برخلاف انتظار همواره گشودگی دایروی بهترین هندسه برای افزایش مقاومت صفحه در برابر کمانش حرارتی نیست و در مواردی با انتخاب مناسب نرمینگی گوشه‌های گشودگی و زاویه‌ی چرخش گشودگی می‌توان دمای بحرانی کمانش را در مقایسه با گشودگی دایروی افزایش داد. همچنین با انتخاب مناسب چیدمان لایه‌ها می‌توان مقاومت صفحه را در برابر کمانش حرارتی به میزان قابل توجهی افزایش داد.

**کلید واژگان:** کامپوزیت هیبریدی، گشودگی منتظم، کمانش حرارتی، روش اجزای محدود، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک.

## مقالات

1. Determination of optimum effective parameters on thermal buckling of hybrid composite plates with quasi-square cutout using genetic algorithm. (Engineering Optimization, DOI 10.1080/0305215X.2019.1575965).



## فهرست مطالب

فصل ۱: پیش‌گفتار .....	۱
۱-۱ مقدمه .....	۲
۲-۱ تعریف مسأله .....	۲
۳-۱ مقدمه‌ای بر مواد کامپوزیتی .....	۳
۱-۳-۱ تعریف کامپوزیت .....	۳
۲-۳-۱ تاریخچه کامپوزیت .....	۴
۳-۳-۱ دسته‌بندی کامپوزیت‌ها .....	۵
۴-۳-۱ کاربردهای کامپوزیت .....	۵
۵-۳-۱ مزایا و معایب کامپوزیت‌ها .....	۶
۴-۱ کمانش و پایداری .....	۷
۱-۴-۱ عوامل مؤثر بر کمانش .....	۸
۵-۱ مقدمه‌ای بر بهینه‌سازی .....	۹
۱-۵-۱ انواع مسائل بهینه‌سازی و دسته‌بندی آنها .....	۹
۶-۱ مروری بر کارهای انجام شده .....	۱۲
۱-۶-۱ کمانش .....	۱۲
۲-۶-۱ بهینه‌سازی .....	۱۷
۷-۱ نوآوری پایان‌نامه کنونی .....	۲۰
فصل ۲: تعریف مسأله و حل عددی مسأله کمانش .....	۲۳
۱-۲ مقدمه .....	۲۴
۲-۲ فرضیات حاکم بر مسأله .....	۲۴
۳-۲ جنس و هندسه ورق .....	۲۴
۴-۲ بارگذاری و شرایط مرزی .....	۲۷
۵-۲ معادلات حاکم .....	۲۷

۲۷	..... ۱-۵-۲ رابطه کرنش-جابجایی
۳۰	..... ۲-۵-۲ رابطه تنش-کرنش
۳۳	..... ۶-۲ استخراج فرم اجزای محدود روابط حاکم
۳۳	..... ۱-۶-۲ انرژی پتانسیل کل
۳۵	..... ۲-۶-۲ المان ایزوپارامتریک
۳۷	..... ۳-۶-۲ اعمال اصل حداقل انرژی پتانسیل
۴۱	..... فصل ۳: بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک
۴۲	..... ۱-۳ مقدمه
۴۲	..... ۲-۳ تاریخچه الگوریتم ژنتیک
۴۳	..... ۳-۳ مفاهیم اولیه در الگوریتم ژنتیک
۴۳	..... ۱-۳-۳ کروموزوم
۴۳	..... ۲-۳-۳ جمعیت ژنتیکی و اندازه جمعیت
۴۴	..... ۳-۳-۳ فضای جستجو
۴۴	..... ۴-۳-۳ تابع هدف
۴۴	..... ۴-۳-۳ تابع برازندگی
۴۴	..... ۵-۳ عملگرهای الگوریتم ژنتیک
۴۵	..... ۱-۵-۳ کدگذاری
۴۵	..... ۲-۵-۳ انتخاب
۴۷	..... ۳-۵-۳ ترکیب
۴۸	..... ۴-۵-۳ جهش
۵۰	..... ۶-۳ اختتام الگوریتم ژنتیک
۵۱	..... ۷-۳ مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک
۵۳	..... ۸-۳ مزایای الگوریتم ژنتیک
۵۴	..... ۹-۳ محدودیت‌های الگوریتم ژنتیک
۵۴	..... ۱۰-۳ کاربردهای الگوریتم ژنتیک

فصل ۴: نتایج تحلیل و بهینه‌سازی کمانش صفحه کامپوزیت مربعی حاوی گشودگی‌های مختلف ... ۵۷

۱-۴ مقدمه ..... ۵۸

۲-۴ بررسی همگرایی دمای بحرانی کمانش به‌ازای تعداد المان‌های مختلف ..... ۵۸

۲-۴ اعتبارسنجی نتایج پایان‌نامه کنونی ..... ۵۹

۳-۴ گشودگی شبه مثلثی ..... ۶۱

۱-۳-۴ بررسی متغیرهای مؤثر بر الگوریتم ژنتیک ( $GA$ ) ..... ۶۱

۱-۱-۳-۴ بررسی تأثیر اندازه جمعیت ( $Npop$ ) بر الگوریتم ژنتیک ..... ۶۱

۲-۱-۳-۴ بررسی تأثیر احتمال ترکیب ( $PC$ ) بر الگوریتم ژنتیک ..... ۶۳

۳-۱-۳-۴ بررسی تأثیر احتمال جهش ( $PM$ ) بر الگوریتم ژنتیک ..... ۶۴

۲-۳-۴ بررسی تأثیر پارامترهای طراحی بر بار کمانش حرارتی ..... ۶۴

۱-۲-۳-۴ بررسی تأثیر نرمینگی گوشه‌های گشودگی ( $\mu$ ) ..... ۶۵

۲-۲-۳-۴ بررسی تأثیر زاویه چرخش گشودگی ( $\beta$ ) ..... ۶۶

۳-۲-۳-۴ بررسی تأثیر نسبت اندازه گشودگی به اندازه صفحه ( $D/a$ ) ..... ۶۶

۴-۲-۳-۴ بررسی تأثیر شرایط مرزی ..... ۶۷

۵-۲-۳-۴ بررسی تأثیر چیدمان لایه‌ها ..... ۶۸

۴-۴ گشودگی شبه مربعی ..... ۶۹

۱-۴-۴ بررسی متغیرهای مؤثر بر الگوریتم ژنتیک ..... ۷۰

۱-۱-۴-۴ بررسی تأثیر اندازه جمعیت بر الگوریتم ژنتیک ..... ۷۰

۲-۱-۴-۴ بررسی تأثیر احتمال ترکیب بر الگوریتم ژنتیک ..... ۷۱

۳-۱-۳-۴ بررسی تأثیر احتمال جهش بر الگوریتم ژنتیک ..... ۷۳

۲-۴-۴ بررسی تأثیر پارامترهای طراحی بر بار کمانش حرارتی ..... ۷۴

۱-۲-۴-۴ بررسی تأثیر نرمینگی گوشه‌های گشودگی ..... ۷۴

۲-۲-۴-۴ بررسی تأثیر زاویه چرخش گشودگی ..... ۷۵

۳-۲-۴-۴ بررسی تأثیر نسبت اندازه گشودگی به اندازه صفحه ..... ۷۶

۴-۲-۴-۴ بررسی تأثیر شرایط مرزی ..... ۷۶

۷۷	..... تأثیر چیدمان لایه‌ها
۷۸	..... گشودگی پنج ضلعی و شش ضلعی
۷۹	..... بررسی متغیرهای مؤثر بر الگوریتم ژنتیک
۷۹	..... بررسی تأثیر پارامترهای طراحی بر بار کمانش حرارتی
۸۰	..... بررسی تأثیر نرمینگی گوشه‌های گشودگی
۸۱	..... بررسی تأثیر زاویه چرخش گشودگی
۸۲	..... بررسی تأثیر نسبت اندازه گشودگی به اندازه صفحه
۸۲	..... بررسی تأثیر شرایط مرزی
۸۳	..... تأثیر چیدمان لایه‌ها
۸۵	..... فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۸۶	..... ۱-۵ مقدمه
۸۶	..... ۲-۵ نتیجه‌گیری
۸۷	..... ۳-۵ پیشنهادات
۸۹	..... مراجع

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ دسته‌بندی کامپوزیت‌ها [۲] ..... ۵
- شکل ۲-۱ تقسیم‌بندی مسائل بهینه‌سازی ..... ۱۰
- شکل ۱-۲ تأثیر پارامترهای  $n$  و  $\mu$  بر شکل گشودگی ..... ۲۶
- شکل ۲-۲ هندسه صفحه کامپوزیتی مربعی با گشودگی مرکزی ..... ۲۶
- شکل ۳-۲ هندسه صفحه کامپوزیت هیبریدی حاوی گشودگی مرکزی با مختصات محلی و کلی .... ۳۰
- شکل ۴-۲ نگاشت از المان مربعی به المان چهار گره‌ای دلخواه. (الف) المان مربعی مرجع. (ب) المان نگاشت یافته ..... ۳۶
- شکل ۱-۳ نمایش یک کروموزوم  $n$  بیتی با  $b_n$  ژن ..... ۴۳
- شکل ۲-۳ نمونه‌ای از کدگذاری ارزشی ..... ۴۵
- شکل ۳-۳ چرخ رولت ..... ۴۶
- شکل ۴-۳ مثالی از ترکیب تک نقطه ..... ۴۸
- شکل ۵-۳ جهش: تغییر مقدار ..... ۵۰
- شکل ۶-۳ مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک [۸۴] ..... ۵۲
- شکل ۱-۴ شکل ۴ پیکربندی مش ..... ۵۸
- شکل ۲-۴ همگرایی دمای بحرانی کمانش به‌ازای تعداد المان‌های مختلف ..... ۵۹
- شکل ۳-۴ نمودار همگرایی تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف  $Npop$  ..... ۶۲
- شکل ۴-۴ نمودار همگرایی تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف  $PC$  ..... ۶۳
- شکل ۵-۴ نمودار همگرایی تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف  $PM$  ..... ۶۴
- شکل ۶-۴ تغییر تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف زاویه چرخش گشودگی ..... ۶۶
- شکل ۷-۴ مد اول کمانش صفحه حاوی گشودگی شبه مثلثی واقع در مرکز ..... ۶۸
- شکل ۸-۴ نمودار همگرایی تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف  $Npop$  ..... ۷۱
- شکل ۹-۴ نمودار همگرایی تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف  $PC$  ..... ۷۲
- شکل ۱۰-۴ نمودار همگرایی تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف  $PM$  ..... ۷۳
- شکل ۱۱-۴ تغییر تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف  $\beta$  ..... ۷۵
- شکل ۱۲-۴ مد کمانش صفحه حاوی گشودگی شبه مربعی واقع در مرکز ..... ۷۷
- شکل ۱۳-۴ تغییر تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف  $\beta$  ..... ۸۱
- شکل ۱۴-۴ مد اول کمانش صفحه حاوی گشودگی واقع در مرکز (الف) گشودگی پنج ضلعی (ب) گشودگی شش ضلعی ..... ۸۳

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲ خواص مکانیکی مواد [۷۵] ..... ۲۵
- جدول ۱-۴ مقایسه دمای بحرانی کمانش ( $^{\circ}\text{C}$ ) به دست آمده توسط کار حاضر و مرجع [۳۶]، به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست آمده در این پایان نامه ..... ۶۰
- جدول ۲-۴ مقایسه بهینه سازی کمانش حرارتی یک صفحه کامپوزیت هیبریدی حاوی گشودگی شبه مثلثی با الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات و کلونی زنبور عسل ..... ۶۰
- جدول ۳-۴ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها به ازای مقادیر مختلف اندازه جمعیت ( $PM = 0/03$  و  $PC = 0/8$ ) ..... ۶۲
- جدول ۴-۴ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها به ازای مقادیر مختلف  $PC$  ( $PM = 0/03$  و  $Npop = 100$ ) ..... ۶۳
- جدول ۵-۴ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها به ازای مقادیر مختلف  $PM$  ( $PC = 0/8$  و  $Npop = 100$ ) ..... ۶۴
- جدول ۶-۴ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها به ازای  $\lambda = 20$  و نرمینگی های مختلف ..... ۶۵
- جدول ۷-۴ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی به ازای مقادیر مختلف  $D/a$  ..... ۶۷
- جدول ۸-۴ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها در شرایط مرزی مختلف برای یک صفحه کامپوزیتی حاوی گشودگی شبه مثلثی ..... ۶۸
- جدول ۹-۴ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها در شرایط مرزی  $CCCC$  و چیدمان متفاوت لایه ها ..... ۶۹
- جدول ۱۰-۴ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها به ازای مقادیر مختلف اندازه جمعیت ( $PM = 0/03$  و  $PC = 0/8$ ) ..... ۷۱
- جدول ۱۱-۴ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها به ازای مقادیر مختلف  $PC$  ( $PM = 0/03$  و  $Npop = 100$ ) ..... ۷۲
- جدول ۱۲-۴ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها به ازای مقادیر مختلف  $PM$  ( $PC = 0/8$  و  $Npop = 100$ ) ..... ۷۳
- جدول ۱۳-۴ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها به ازای  $\lambda = 20$  و نرمینگی های مختلف ..... ۷۵
- جدول ۱۴-۴ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی به ازای مقادیر مختلف  $D/a$  ..... ۷۶
- جدول ۱۵-۴ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها در شرایط مرزی مختلف ..... ۷۷

جدول ۴-۱۶ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها در شرایط مرزی *CCCC* و چیدمان متفاوت لایه‌ها ..... ۷۸

جدول ۴-۱۷ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها به‌ازای  $\lambda = 20$  و نرمینگی‌های مختلف ..... ۸۰

جدول ۴-۱۸ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی به‌ازای مقادیر مختلف  $D/a$  ..... ۸۲

جدول ۴-۱۹ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها در شرایط مرزی مختلف .. ۸۳

جدول ۴-۲۰ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها در شرایط مرزی *CCCC* و چیدمان متفاوت لایه‌ها ..... ۸۴

## علائم

اندازه صفحه	$a$
قطر دایره محاط بر گشودگی	$D$
بردار جابجایی گره‌ای	$\{d\}$
مدول‌های الاستیسیته	$E_2$ و $E_1$
بردار نیروی حرارتی	$\{F_T\}$
مدول‌های برشی	$G_{12}$ ، $G_{13}$ و $G_{23}$
ماتریس ژاکوبین	$[J]$
ماتریس سفتی خمشی	$[K_b]$
ماتریس سفتی هندسی	$[K_g]$
ماتریس سفتی هندسی به‌ازای افزایش دمای واحد	$[K'_g]$
ماتریس سفتی برشی	$[K_s]$
ضریب اصلاح برشی	$k_s$
بردار منته‌جه ممان	$\{M\}$
بردار منته‌جه گشتاور حرارتی	$\{M_T\}$
بردار منته‌جه نیرو	$\{N\}$
بردار منته‌جه نیروی حرارتی	$\{N_T\}$
تابع شکل	$N_i$
اندازه جمعیت الگوریتم ژنتیک	$Npop$
پارامتر تعداد اضلاع گشودگی	$N$
درصد احتمال ترکیب	$PC$
درصد احتمال جهش	$PM$
بردار منته‌جه نیروی برشی عرضی	$\{Q\}$
ماتریس سفتی کاهش یافته در حالت تنش صفحه‌ای	$[Q_{ij}]$
ماتریس سفتی کاهش یافته انتقال یافته	$[\bar{Q}_{ij}]$
مختصات محلی	$t$ و $s$
انرژی کرنشی مربوط به قسمت خطی تانسور کرنش	$U$
کار نیروی درون صفحه‌ای در طول انحراف جانبی	$V$
مؤلفه‌های میدان جابجایی	$w$ و $v$ و $u$
مؤلفه‌های جابجایی صفحه میانی	$v_0$ و $u_0$
تغییر شکل عرضی صفحه میانی	$w_0$
مختصات مرز گشودگی	$Y$ و $X$



مختصات کلی	$z, y, x$
زاویه الیاف	$\theta$
اختلاف دما	$\Delta T$
دمای بحرانی کمانش	$\Delta T_c$
چگالی انرژی کرنشی	$\rho$
انرژی پتانسیل کل	$\Pi$
مختصه زاویه‌ای نقاط مرز گشودگی	$\xi$
زاویه چرخش گشودگی	$\beta$
نرمینگی گوشه‌های گشودگی	$\mu$
ضریب بزرگ‌نمایی	$\lambda$
نسبت‌های پواسون	$\nu_{21}$ و $\nu_{12}$
ضرایب انبساط حرارتی در مختصات محلی	$\alpha_{12}$ و $\alpha_2$ ، $\alpha_1$
ضرایب انبساط حرارتی در مختصات کلی	$\alpha_{xy}$ و $\alpha_y$ ، $\alpha_x$
چرخش خط عمود بر صفحه میانی نسبت به محورهای $y$ و $x$	$\psi_y$ و $\psi_x$
کرنش‌های طولی در مختصات کلی	$\varepsilon_z$ و $\varepsilon_y$ ، $\varepsilon_x$
کرنش‌های برشی در مختصات کلی	$\gamma_{xz}$ و $\gamma_{yz}$ ، $\gamma_{xy}$
کرنش‌های طولی در مختصات محلی	$\varepsilon_2$ و $\varepsilon_1$
کرنش‌های برشی در مختصات محلی	$\gamma_{23}$ و $\gamma_{13}$ ، $\gamma_{12}$
بردار کرنش برشی	$\{\varepsilon_3\}$
قسمت خطی و غیرخطی مؤلفه‌های کرنش	$\varepsilon_{NL}$ و $\varepsilon_L$
تنش‌های صفحه‌ای در مختصات کلی	$\sigma_y$ و $\sigma_x$
تنش برشی در مختصات کلی	$\tau_{xz}$ و $\tau_{yz}$ ، $\tau_{xy}$
بردار تنش مکانیکی در مختصات کلی	$\{\sigma_M\}$
بردار تنش حرارتی در مختصات کلی	$\{\sigma_{Th}\}$
تنش صفحه‌ای در مختصات محلی	$\sigma_2$ و $\sigma_1$
تنش برشی در مختصات محلی	$\tau_{23}$ و $\tau_{13}$ ، $\tau_{12}$



## فصل ۱: پیش‌گفتار

## ۱-۱ مقدمه

فصل اول شامل: تعریف مسأله، تعریف کامپوزیت و انواع و کاربردهای آن، تعریف کمانش و عوامل مؤثر بر کمانش، تعریف بهینه‌سازی، مرور تحقیقات پیشین در زمینه کمانش و بهینه‌سازی و در نهایت نوآوری پایان‌نامه کنونی می‌باشد.

## ۱-۲ تعریف مسأله

در صنایع مختلف برای دسترسی آسان به بخش‌های مختلف سیستم‌های مهندسی، بازرسی آسیب دیدگی‌ها، امکان تهویه هوا، انتقال لوله‌های حامل سوخت و همچنین کاهش وزن از صفحات حاوی گشودگی استفاده می‌کنند. این نوع از صفحات در محیط‌های حرارتی مختلف، اغلب در معرض بار حرارتی هستند که در نتیجه می‌تواند باعث کمانش حرارتی شود. بنابراین بررسی رفتار کمانش حرارتی صفحات حاوی گشودگی به‌منظور دستیابی به طراحی مؤثر و کارآمد لازم به نظر می‌رسد. برای یک صفحه تحت بارگذاری حرارتی یکنواخت، میدان تنش پیش‌کمانش در همه جای صفحه یکسان است، در نتیجه حل‌های تحلیلی کمانش به راحتی به دست می‌آیند. حضور گشودگی در صفحه باعث می‌شود که میدان تنش در صفحه غیریکنواخت شود. از این رو برای یک صفحه حاوی گشودگی تحلیل کمانش به شدت سخت و دشوار شده و روش‌های عددی مختلفی برای تحلیل این قبیل صفحات توسعه داده شده است. روش استفاده شده در کار حاضر، روش عددی اجزای محدود بر پایه تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول می‌باشد. استفاده از مواد کامپوزیتی به دلیل برخی از ویژگی‌های منحصر به فرد آنها از قبیل نسبت استحکام به وزن بالا، هزینه تولید و مقاومت در برابر شرایط محیطی مختلف به شدت در حال افزایش است. همچنین می‌توان با تغییر زاویه الیاف و چیدمان لایه‌ها، این خواص را بهبود بخشید. مواد کامپوزیت در صنایع مختلف مانند هوافضا، حمل و نقل و ساخت و ساز مورد استفاده قرار می‌گیرد. زمانی که یک سازه در معرض افزایش دمای یکنواخت قرار می‌گیرد، ممکن است دچار کمانش حرارتی شود.

برای مثال در مهندسی هوافضا، جایی که تابش خورشید و اثرات شرایط مرزی حرارتی ممکن است باعث کمانش حرارتی شود.

الگوریتم ژنتیک می‌تواند در طراحی زاویه الیاف و چیدمان لایه‌های صفحات کامپوزیت هیبریدی به‌منظور افزایش استحکام در برابر کمانش مورد استفاده قرار گیرد. الگوریتم ژنتیک از روش‌های الهام گرفته شده از تکامل بیولوژیکی استفاده می‌کند. لذا جستجوی تصادفی اساس کار آن می‌باشد. بنابراین در پایان‌نامه حاضر، با استفاده از الگوریتم ژنتیک سعی شده است صفحه کامپوزیت هیبریدی حاوی گشودگی به گونه‌ای طراحی شود تا بیشترین مقاومت را در برابر کمانش حرارتی داشته باشد.

### ۳-۱ مقدمه‌ای بر مواد کامپوزیتی

در این بخش ابتدا به تعریف، تاریخچه و دسته‌بندی کامپوزیت‌ها اشاره شده و در ادامه به کاربردها، مزایا و معایب کامپوزیت پرداخته شده است.

#### ۱-۳-۱ تعریف کامپوزیت

کامپوزیت به موادی اطلاق می‌شود که در ساختار آن بیش از یک جزء ماده استفاده شده باشد [۱]. در این مواد، اجزای مختلف خواص فیزیکی و شیمیایی خود را حفظ کرده و در نهایت ماده‌ای حاصل می‌شود که دارای خواص بهینه‌ای می‌باشد. این خواص در تک‌تک مواد شرکت کننده به‌صورت مجزا و در همه‌ی حالت‌ها وجود ندارد.

تعریف جامع کامپوزیت را به‌صورت زیر می‌توان ارائه داد:

دو ماده غیریکسان که در صورت ترکیب، ماده حاصل از تک‌تک مواد قوی‌تر باشد.

## ۱-۳-۲ تاریخچه کامپوزیت

استفاده از مواد کامپوزیت طبیعی، بخشی از تکنولوژی بشر از زمانی که در اولین بناهای باستانی، کاه را برای تقویت کردن آجرهای گلی به کار بردند، بوده است. مغول‌های قرن دوازدهم، کمان‌های پیشرفته‌ای را که کوچک‌تر و قوی‌تر از دیگر وسایل مشابه بودند، ساختند. این کمان‌ها، سازه‌های کامپوزیتی بودند که به وسیله ترکیب زرد پی احشام (تاندون)، شاخ، خیزران (بامبو) و ابریشم ساخته شده بودند و با کلفون طبیعی پیچیده می‌شدند. این کمان‌ها دارای قدرت ۸۰ درصد کمان‌های کامپوزیتی مدرن بودند. در اواخر دهه ۱۸۰۰ میلادی سازندگان قایق‌های کانو، از چسباندن لایه‌های کاغذ محکم کرافت با نوعی لاک به نام شلاک اقدام به ساخت قایق‌های سبک و یک نفره می‌کردند. با وجود این که تئوری حاکم کاملاً صحیح بود ولی به علت عدم وجود مواد مناسب برای ساخت کامپوزیت‌ها این قایق‌ها چندان موفق نبودند.

در سال‌های بین ۱۸۷۰ تا ۱۸۹۰ انقلابی در شیمی به وقوع پیوست. اولین رزین‌های مصنوعی ساخت بشر توسعه یافت. رزین‌های مصنوعی اولیه شامل، سلولوئید، ملامین و باکلیت بودند. در اوایل دهه ۱۹۳۰ دو شرکت شیمیایی *Dupont* و *American Cyanamid*، که روی توسعه رزین‌های پلیمری فعالیت می‌کردند، به‌طور هم‌زمان به تکنولوژی ساخت پلی استر دست یافتند. در همان زمان شرکت *Owens-111 Inois* شروع به ساخت الیاف شیشه به همان صورت بنیادی بافت پارچه نساجی نمود. در طی سال‌های ۱۹۳۴ تا ۱۹۳۶ محققى به‌نام رای گرین<sup>۱</sup> در اوهایو این دو محصول جدید را ترکیب کرد و شروع به قالب‌گیری قایق‌های کوچک نمود. بدین ترتیب اولین کامپوزیت مدرن ساخته شد.

تکنولوژی صنعت کامپوزیت در سال‌های ۱۹۴۰ تا ۱۹۵۰ میلادی با استقبال و پیشرفت زیادی مواجه شد. اکثر روش‌های قالب‌گیری و فرایند انجام کار روی کامپوزیت‌ها در سال ۱۹۵۵ گسترش یافت.

---

<sup>۱</sup> Ray Green

### ۳-۳-۱ دسته‌بندی کامپوزیت‌ها

کامپوزیت‌ها را با توجه به ساختار، جنس زمینه و الیاف آن می‌توان در دسته‌بندی‌های مختلفی قرار داد. نمایشی از این دسته‌بندی در شکل ۱-۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱ دسته‌بندی کامپوزیت‌ها [۲]

کامپوزیت‌های الیافی آن دسته از کامپوزیت‌ها هستند که زمینه آنها به وسیله الیاف تقویت می‌شوند. الیاف نقش تقویت کننده را در کامپوزیت‌ها ایفا می‌کند و تحمل کننده اصلی بار است. الیاف‌ها از جنس‌های مختلفی ساخته می‌شوند که از جمله آنها می‌توان به کربن، شیشه، برون و آرمید اشاره کرد.

### ۴-۳-۱ کاربردهای کامپوزیت

مواد کامپوزیتی به دلیل خواص منحصر به فردشان از قبیل استحکام، وزن کم، قابلیت طراحی و عمر بالا، نسبت به دیگر مواد بسیار مورد توجه مهندسين و صنعتگران قرار گرفته‌اند. از جمله کاربردهای این مواد می‌توان در صنایع هوافضا، خودروسازی، ساخت لوازم ورزشی، ساخت لوازم خانگی و بسیاری دیگر

از زمینه‌ها اشاره کرد. در حال حاضر صنعت کامپوزیت علی‌رغم جوان بودن در کشورمان، اکثر روش‌های تولید پیشرفته را برای تولیدات مختلفی همانند لوله، قطعات خودرو، پره توربین بادی و غیره شامل می‌شود. توسعه این صنعت نیازمند تلاش متخصصان، اندیشمندان و مسئولان در بسترهای مرتبط با این صنعت می‌باشد. متأسفانه در کشور ما به دلیل عدم شناخت کامل خصوصیات این ترکیبات که خود صنعت در طراحی، تولید و مصرف را دنبال دارد، میزان استفاده این مواد به نسبت کشورهای دیگر ناچیز است. اما با برنامه ریزی دراز مدت و سرمایه‌گذاری در جهت شناساندن هرچه بیشتر این مواد به شرکت‌ها و مؤسسات صنعتی کشور می‌توان این ضعف‌ها را تا حد زیادی جبران نمود.

### ۱-۳-۵ مزایا و معایب کامپوزیت‌ها

استفاده روزافزون کامپوزیت‌ها در ذهن هر خواننده‌ای این مسأله را تداعی می‌کند که چرا این مواد با این سرعت در حال رشد و تکامل هستند. آنچه مسلم است، این مواد نسبت به سایر مواد مهندسی (عموما فلزها) دارای مزایای قابل توجه‌ای هستند که در ذیل تعدادی از آنها نام برده شده است:

- کامپوزیت‌ها از استحکام ویژه (نسبت استحکام به چگالی) و مدول یانگ ویژه (نسبت مدول یانگ به چگالی) بالاتری نسبت به بسیاری از مواد دیگر برخوردار هستند [۳].
- وزن کم و مقاومت بالا در برابر خوردگی.
- انعطاف‌پذیری طراحی؛ کامپوزیت‌ها نسبت به مواد دیگر این مزیت را دارند که می‌توانند با شکل‌های پیچیده با هزینه نسبتاً کم قالب‌گیری شوند. انعطاف‌پذیری در ایجاد شکل‌های پیچیده، به طراحان آزادی عمل می‌دهد که نشان از موفقیت کامپوزیت‌ها می‌باشد. قایق‌ها نمونه‌ای از این توانایی می‌باشند.
- پایداری حرارتی بالا.
- توانایی بالا در جذب انرژی.
- ظرفیت دمپینگ بالا.



- مقاومت بالا در برابر خستگی.
- هزینه پرداخت کاری پایین.
- سهولت فرایند تعمیر و عیب‌یابی.

علی‌رغم مزایای ذکر شده، کامپوزیت‌ها در برخی کاربردها معایبی دارند. از جمله این معایب می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- کامپوزیت‌ها رطوبت را جذب می‌کنند. این موضوع خواص کامپوزیت‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد.
- مشخصات مکانیکی یک کامپوزیت به مراتب پیچیده‌تر از یک ساختار فلزی است. به همین دلیل تحلیل رفتار کامپوزیت‌ها دشوارتر است.
- پیچیدگی کنترل کیفیت قطعات ساخته شده از مواد کامپوزیتی به‌ویژه قطعات حساس و تحت تنش مکانیکی شدید نظیر قطعات هواپیما.
- محدودیت تخصصی و آموزشی در تمام سطوح در عرصه طراحی، ساخت و مصرف کامپوزیت‌ها.

## ۴-۱ کمانش و پایداری

موضوع پایداری ورق‌ها به‌دلیل کاربرد گسترده آنها و نیز تأثیرات مخربی که از دست دادن پایداری ورق بر عملکرد سازه می‌تواند داشته باشد، از اهمیت زیادی برخوردار است. تعاریف مختلفی برای پدیده کمانش ارائه شده‌اند که می‌توان به تعریف، تغییر ناگهانی سفتی سازه در اثر تنش فشاری (مستقیم یا غیر مستقیم) اشاره نمود [۴].

## ۱-۴-۱ عوامل مؤثر بر کمانش

عوامل مهمی که بر بار کمانش، شکل مد و رفتار پس کمانش تأثیر می‌گذارند و در مقالات تأثیر آنها بررسی می‌شود عبارتند از [۵]:

- نسبت ظاهری؛ برای یک ورق مستطیلی، نسبت ظاهری همان نسبت طول به عرض می‌باشد. در حالی که برای یک ورق حلقوی، این نسبت، به صورت نسبت شعاع داخلی به خارجی تعریف می‌شود.
- شرایط مرزی؛ شرایط مرزی تأثیر زیادی بر رفتار ورق دارند و به شکل‌های گوناگونی تعریف می‌شود. از جمله شرایط مرزی، شرایط مرزی ساده، آزاد و گیردار است. هر نوع شرایط مرزی تعدادی از درجات آزادی سیستم را مقید می‌کند.
- شرایط بارگذاری؛ لبه‌های یک ورق ممکن است در معرض بارگذاری فشاری، کششی، برشی و یا ترکیبی از این آنها قرار داشته باشد. این گونه بارگذاری می‌تواند به صورت یکنواخت یا غیریکنواخت، خطی و یا غیرخطی باشد. همچنین بارگذاری می‌تواند به صورت اعمال یک جابجایی مشخص و یا اعمال تنش معلوم در لبه‌های ورق باشد.
- تقارن ماده؛ برای ورق‌های نازک که دارای رفتار ساختاری مشخصی می‌باشند، تقارن ماده تأثیر مهمی بر رفتار کمانشی خواهند داشت.
- رفتار ساختاری؛ رفتار ماده در واکنش به نیروهای اعمالی که وابسته به عوامل مختلفی از جمله جنس ماده، دمای به کارگیری، مدت زمان اعمال بار و... می‌باشد، بر رفتار کمانشی آن تأثیرگذار است. برای مثال، یک ورق می‌تواند دارای رفتار الاستیک خطی، الاستیک غیرخطی، ویسکوالاستیک و یا لاستیک-پلاستیک باشد.
- توزیع تنش حرارتی و تنش رطوبتی؛ ورق‌های نازک معمولاً در معرض تغییرات دما و یا رطوبت قرار می‌گیرند. در صورتی که تغییر شکل ورق محدود شده باشد، این تغییرات دما و یا رطوبت

باعث ایجاد توزیع تنش فشاری محلی در یک ناحیه شده و بنابراین می‌توانند حتی بدون وجود بارگذاری مکانیکی خارجی، باعث کمانش ورق شوند.

- نقص اولیه؛ بسیاری از ورق‌ها به دلیل به کارگیری در شرایط محیطی مختلف و یا به دلیل عدم دقت ساخت، دارای تغییر شکل عرضی اولیه کوچکی بوده و یا ممکن است در معرض بارگذاری عرضی کوچکی قرار داشته باشند. وجود هر کدام از این عوامل نوعی نقص اولیه به شمار می‌روند و می‌توانند تأثیر زیادی بر رفتار کمانشی و پس‌کمانشی ورق، در مقایسه با یک ورق بدون نقص داشته باشند.

## ۱-۵ مقدمه‌ای بر بهینه‌سازی

بهینه‌سازی<sup>۱</sup> هنر یافتن بهترین جواب در بین وضعیت‌های موجود است. بهینه‌سازی در طراحی و نگهداری بسیاری از سیستم‌های مهندسی، اقتصادی و حتی اجتماعی به منظور حداقل کردن هزینه لازم و یا حداکثر کردن سود کاربرد دارد. به طوری که در ریاضیات، مدیریت، صنایع و بسیاری از شاخه‌های علوم مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد و حتی نام‌های متفاوتی از قبیل "برنامه‌ریزی مهندسی"<sup>۲</sup> و "تحقیق در عملیات"<sup>۳</sup> برای اشاره به مباحث بهینه‌سازی به کار می‌رود.

## ۱-۵-۱ انواع مسائل بهینه‌سازی و دسته‌بندی آنها

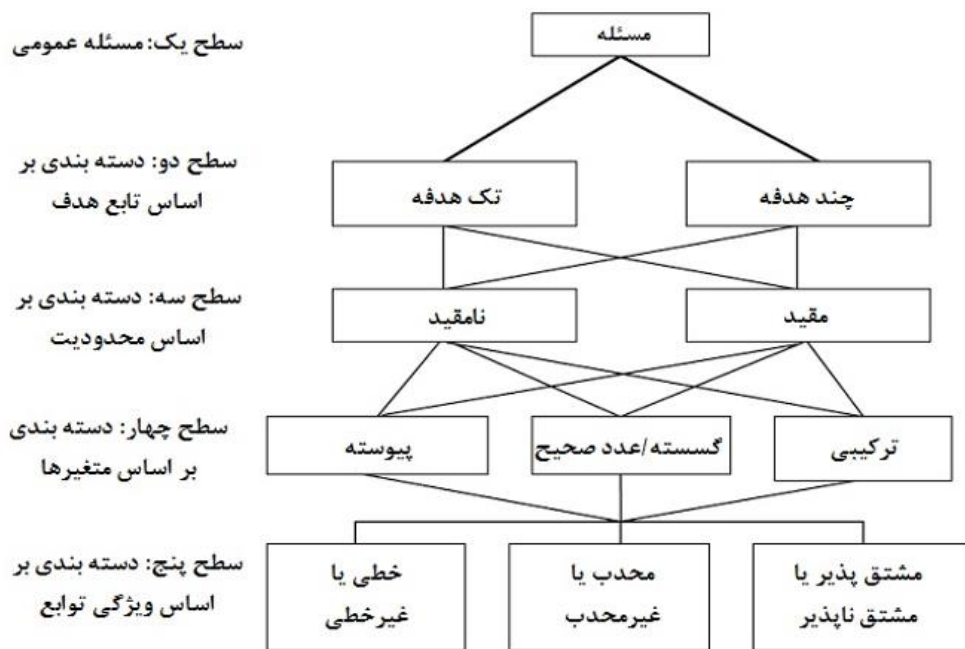
مسائل بهینه‌سازی را می‌توان مطابق شکل زیر تقسیم‌بندی نمود:

---

<sup>1</sup> Optimization

<sup>2</sup> Mathematical Programming

<sup>3</sup> Operation Research



شکل ۱-۲ تقسیم بندی مسائل بهینه سازی

- دسته بندی بر اساس تابع هدف؛ در مسائل چند هدفه عموماً توابع هدف با یکدیگر در تناقض هستند. در غیر این صورت می توان چند هدف را تبدیل به یک هدف نمود.
- دسته بندی بر اساس محدودیت؛ اینکه مسأله دارای محدودیت است یا خیر، نوع دیگری از دسته بندی مسائل را تعریف می کند. برخی از کارشناسان معتقدند که در دنیای واقعی هیچ مسأله ای بدون محدودیت نیست و همه مسائل حداقل دارای یکی از محدودیت های تابعی یا حدی (مرز بالا و پایین متغیر تصمیم) هستند. مطالعه مسائل بدون محدودیت یا به عبارت دیگر مسائل نامقید، از آن جهت اهمیت دارد که بسیاری از الگوریتم های بهینه سازی، مسائل مقید را با تبدیل آنها به یک یا مجموعه ای از مسائل نامقید حل می کنند. علاوه بر این بسیاری از تکنیک های بهینه سازی مسائل مقید بر اثر تغییرات خلاقانه ای که بر تکنیک های بهینه سازی نامقید صورت گرفته، ایجاد شده اند.
- دسته بندی بر اساس متغیرها؛ متغیرهای مسأله را نیز می توان به سه دسته حقیقی، عدد صحیح و یا ترکیبی از هر دو تقسیم نمود. با این حال بسیاری از مدل سازان دسته بندی دیگری با

موضوعات پیوسته، گسسته (مسائل عدد صحیح) و ترکیبی از این دو را بیشتر می‌پسندند. در مسائلی با متغیرهای پیوسته (حقیقی)، اصولاً در پی یافتن مجموعه‌ای از اعداد حقیقی هستیم. مسائل بهینه‌سازی با متغیرهای گسسته یا عدد صحیح را مسائل ترکیبی می‌گویند. در مسائل ترکیبی به دنبال هدف بهینه از بین یک مجموعه محدود و یا غیر محدود هستیم. که می‌تواند یک عدد صحیح، یک مجموعه و یا حتی یک گراف باشد. این دو نوع مسأله ذات کاملاً متفاوتی دارند و روش‌های حل آنها نیز کاملاً متفاوت است.

- دسته‌بندی براساس ویژگی توابع؛ دسته‌بندی براساس توابع اساساً با ویژگی‌های تابع که از منظر شیوه حل بسیار اهمیت دارد، در ارتباط است. توابع هدف و محدودیت‌ها می‌توانند خطی، غیرخطی و یا ترکیبی از هر دو باشند. اگر همه توابع مدل خطی باشند، به آن مدل برنامه‌ریزی خطی می‌گویند. اگر حداقل یکی از توابع مدل خاصیت غیرخطی داشته باشد، مدل را غیرخطی می‌نامند. روش‌های حل مسأله‌های غیرخطی کاملاً متفاوت و پیچیده‌تر از روش‌های حل مسائل خطی است. یک مسأله نامقید تک هدفه از نقطه نظر علم بهینه‌سازی ساده‌ترین نوع مسأله برای حل است. ولی اگر همین مسأله نامقید از نوع غیرخطی باشد، می‌تواند تا بالاترین سطح دشواری مسائل بهینه‌سازی پیش برود. اثبات این ادعا نیز مطالعات و مقالات فراوان است که در رابطه با روش‌های حل این نوع مسأله ارائه شده است. ویژگی محدب بودن یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های بهینه‌سازی کلاسیک است. به‌طوری که بسیاری از تکنیک‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی با این فرض می‌توانند استفاده شوند که توابع محدب هستند. در بهینه‌سازی روش‌های حل را می‌توان در دو گروه اساسی قرار داد: روش مشتق پایه و روش‌های آزاد از مشتق. برای استفاده از تکنیک‌های مشتق پایه، لازم است که توابع مشتق‌پذیر باشند. لازمه مشتق-پذیری تابع نیز پیوستگی آن است.

## ۱-۶ مروری بر کارهای انجام شده

مطالعات وسیعی برای بررسی کمانش صفحاتی که تحت بارهای حرارتی، مکانیکی و ترمومکانیکی قرار دارند، انجام شده است. ولی مطالعات محدودی در زمینه بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر کمانش این قبیل صفحات با الگوریتم‌های مختلف انجام شده است. در این بخش سعی می‌شود تا در ابتدا به تحقیقاتی که در زمینه کمانش انجام شده، اشاره شود. سپس به بیان کارهای انجام شده در زمینه مسائل مربوط به بهینه‌سازی کمانش با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند پرداخته می‌شود.

### ۱-۶-۱ کمانش

بررسی و مطالعه کمانش سازه‌ها، تاریخچه‌ای بسیار طولانی دارد. این تاریخچه با مطالعات اوپلر<sup>۱</sup> در سال ۱۷۴۴ آغاز شد. وی کار خود را روی پایداری ستون‌های در معرض بار فشاری انجام داد و اولین کسی بود که فرمولی برای محاسبه بار کمانش ستون‌ها ارائه نمود. در سال ۱۹۱۰، فن کارمن<sup>۲</sup> معادلات مربوط به کمانش ورق‌های نازک، با رفتار الاستیک خطی را فرمول‌بندی نمود که کار مهمی در بررسی کمانش ورق‌ها به‌شمار می‌رود [۵]. در سال ۱۹۴۵، کویتز<sup>۳</sup> [۶] برای اولین بار، این نکته که وجود نقص اولیه منجر به کاهش شدیدی در بار کمانش یک سازه می‌شود را مورد بررسی قرار داد. وی همچنین یک تئوری عمومی برای پایداری الاستیک ارائه نمود. مباحث مربوط به کمانش صفحات کامپوزیت و غیر همسانگرد توسط نویسندگانی همچون لخنیتسکی<sup>۴</sup> [۷]، امبرتسمیان<sup>۵</sup> [۸]، اشتون<sup>۶</sup> و ویتنی<sup>۷</sup> [۹]، به

---

<sup>1</sup> Euler

<sup>2</sup> Von Karman

<sup>3</sup> Koiter

<sup>4</sup> Lekhnitskii

<sup>5</sup> Ambartsmian

<sup>6</sup> Ashton

<sup>7</sup> Whitney

چاپ رسید. نور<sup>۱</sup> [۱۰]، مقایسه‌ای بین تئوری الاستیک ورق‌ها، تئوری تغییر شکل برشی خطی و یک تئوری سه بعدی در زمینه پایداری الاستیک صفحات کامپوزیتی اورتوتروپیک<sup>۲</sup> انجام داد.

کمانش ورق‌های اورتوتروپیک با شرایط مرزی خارج صفحه‌ای ساده و با در نظر گرفتن قيود داخل صفحه‌ای، توسط هریس<sup>۳</sup> [۱۱] بررسی شد. وی برای مدل‌سازی ورق از تئوری الاستیک استفاده نمود و با استفاده از روش لوی<sup>۴</sup> به حل معادلات پرداخت. تانگاراتنام<sup>۵</sup> و همکاران [۱۲]، کمانش حرارتی ورق‌های کامپوزیتی چندلایه را با استفاده از روش اجزای محدود، مورد تحلیل قرار دادند. شربورن<sup>۶</sup> و پندی<sup>۷</sup> [۱۳]، پایداری ورق‌های کامپوزیتی مستطیلی با قید داخل صفحه‌ای را مورد ارزیابی قرار دادند. کمانش و تحلیل حساسیت ورق‌های کامپوزیت دارای گشودگی دایروی در مرکز که تحت اعمال هم‌زمان بارهای مکانیکی و حرارتی قرار دارند، توسط کیم<sup>۸</sup> و نور<sup>۹</sup> [۱۴] بررسی شد. فلدمن<sup>۱۰</sup> و عبودی<sup>۱۱</sup> [۱۵]، تحلیل کمانش ورق‌های هدفمند تحت بارگذاری تک محوری را با استفاده از تئوری کلاسیک ورق‌ها<sup>۱۲</sup> بررسی کردند. هو<sup>۱۳</sup> و ژنگ<sup>۱۴</sup> [۱۶]، به تحلیل کمانش صفحه چندلایه مورب تحت بار تک محوره داخل صفحه‌ای پرداختند. کمانش الاستیک-پلاستیک یک صفحه کامپوزیتی مسطح تحت فشار یکنواخت در لبه، توسط سوه<sup>۱۵</sup> و همکاران [۱۷] مورد بررسی قرار گرفت. نجفی‌زاده<sup>۱۶</sup> و اسلامی<sup>۱۷</sup> [۱۸]، تحلیل

---

<sup>1</sup> Noor

<sup>2</sup> Orthotropic

<sup>3</sup> Harris

<sup>4</sup> Levy

<sup>5</sup> Thangaratnam

<sup>6</sup> Sherbourne

<sup>7</sup> Pandey

<sup>8</sup> Kim

<sup>9</sup> Noor

<sup>10</sup> Feldman

<sup>11</sup> Aboudi

<sup>12</sup> Classical Plate Theory (CPT)

<sup>13</sup> Hu

<sup>14</sup> Theng

<sup>15</sup> Soh

<sup>16</sup> Najafizadeh

<sup>17</sup> Eslami

کمانش ورق دایروی هدفمند تحت بارگذاری فشاری شعاعی را بررسی کردند. نجفی‌زاده<sup>۱</sup> و حیدری<sup>۲</sup> [۱۹]، کمانش حرارتی صفحه دایروی هدفمند براساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه بالا را مورد ارزیابی قرار دادند. رفتار کمانشی صفحه کامپوزیتی چندلایه متعامد حاوی گشودگی دایره و بیضی، توسط قنادپور<sup>۳</sup> و همکاران [۲۰] بررسی شد. یاپ<sup>۴</sup> و چای<sup>۵</sup> [۲۱]، مطالعه عددی و تحلیلی روی کمانش تیر کامپوزیتی چندلایه را انجام دادند. ژونگ<sup>۶</sup> و چاوگو<sup>۷</sup> [۲۲]، به بررسی کمانش صفحه مستطیلی کامپوزیت متعامد متقارن تحت بار خطی متفاوت داخل صفحه‌ای پرداختند. شریعات<sup>۸</sup> [۲۳]، تحلیل کمانش حرارتی ورق‌های مستطیلی کامپوزیتی با خواص وابسته به دما را با استفاده از تئوری لایه‌ای<sup>۹</sup> انجام داد. کمانش صفحه کامپوزیت جدار نازک حاوی گشودگی‌های مختلف تحت بار کششی، توسط کرمر<sup>۱۰</sup> و شورمن<sup>۱۱</sup> [۲۴] بررسی شد. کالیان<sup>۱۲</sup> و باسکار<sup>۱۳</sup> [۲۵]، کمانش ورق‌های اورتوتروپیک در معرض بار غیریکنواخت را مورد ارزیابی قرار دادند. کومار<sup>۱۴</sup> و سینگ<sup>۱۵</sup> [۲۶ تا ۲۸]، در مقالات خود به بررسی پایداری و شکست ورق‌های کامپوزیتی دارای گشودگی با شکل‌های مختلف را با استفاده از روش اجزای محدود و براساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول پرداختند. ورق‌های مورد بررسی دارای گشودگی‌هایی به شکل دایره، مربع، لوزی، بیضی عمودی و افقی بودند. شریعتی<sup>۱۶</sup> و دادرسی<sup>۱۷</sup> [۲۹]،

---

<sup>1</sup> Najafizadeh

<sup>2</sup> Heydari

<sup>3</sup> Ghannadpour

<sup>4</sup> Yap

<sup>5</sup> Chai

<sup>6</sup> Zhong

<sup>7</sup> Chao gu

<sup>8</sup> Shariyat

<sup>9</sup> Layer wise

<sup>10</sup> Kremer

<sup>11</sup> Schurmann

<sup>12</sup> Kalyan

<sup>13</sup> Bhaskar

<sup>14</sup> Kumar

<sup>15</sup> Singh

<sup>16</sup> Shariati

<sup>17</sup> Dadrasi



اثر عرض بارگذاری بر روی کمانش صفحات مستطیلی دارای گشودگی به شکل مربع و دایره را مورد مطالعه قرار دادند. فرجیان<sup>۱</sup> و همکاران [۳۰]، به بررسی تجربی و عددی رفتار کمانشی و پس‌کمانشی ورق‌های فولادی دارای گشودگی شیاری شکل با ابعاد و جهت‌گیری‌های مختلف پرداختند. راکي<sup>۲</sup> و همکاران [۳۱]، معادلات تعادل و پایداری صفحه مستطیلی ساخته شده از مواد هدفمند تحت بارهای حرارتی براساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه بالا را به‌دست آوردند. کیانی<sup>۳</sup> و اسلامی<sup>۴</sup> [۳۲]، یک حل دقیق برای کمانش حرارتی صفحات هدفمند در محیط الاستیک را ارائه دادند. اویناس<sup>۵</sup> و آچور<sup>۶</sup> [۳۳]، کمانش ورق‌های کامپوزیتی حاوی گشودگی بیضوی را با استفاده از روش اجزای محدود به کمک نرم‌افزار آباکوس بررسی کرده و بار کمانش را برای مقادیر مختلف اندازه سوراخ (نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک بیضی)، جهت‌گیری و موقعیت سوراخ ارائه دادند. فضیلتی<sup>۷</sup> و اویسی<sup>۸</sup> [۳۴]، با استفاده از روش نوار محدود به بررسی ناپایداری دینامیکی و کمانش پنل‌های کامپوزیت دارای گشودگی مربعی تقویت شده در جهت طولی پرداختند. در مرجع [۳۵]، کمانش و ارتعاشات ورق‌های کامپوزیتی دارای گشودگی که در معرض رطوبت و تغییرات دما قرار دارند، مورد مطالعه قرار گرفته است. شاطرزاده<sup>۹</sup> و همکاران [۳۶]، کمانش حرارتی ورق‌های کامپوزیتی چندلایه با گشودگی دایروی را با استفاده از روش اجزای محدود و تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول، تحلیل نمودند. ابوالقاسمی<sup>۱۰</sup> و همکاران [۳۷]، با استفاده از تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول، به تحلیل کمانش ترمودینامیکی ورق‌های مستطیلی هدفمند با گشودگی بیضوی پرداختند. اثر لایه‌چینی بر رفتار کمانش صفحه کامپوزیتی چندلایه شیشه-

---

<sup>1</sup> Faradjian

<sup>2</sup> Raki

<sup>3</sup> Kiani

<sup>4</sup> Eslami

<sup>5</sup> Ouinas

<sup>6</sup> Achour

<sup>7</sup> Fazilati

<sup>8</sup> Ovesy

<sup>9</sup> Shaterzadeh

<sup>10</sup> Abolghasemi

رزین توسط حیدری<sup>۱</sup> و همکاران [۳۸]، بررسی شد. تحلیل پس‌کمانش حرارتی صفحه کامپوزیتی چندلایه وابسته به دما توسط نیکراد<sup>۲</sup> و اسدی<sup>۳</sup> [۳۹]، مورد مطالعه قرار گرفت. رفتار کمانشی صفحات کامپوزیتی چندلایه مورب با شرایط مرزی مختلف تحت بارگذاری خطی متفاوت در لبه توسط آبیناو<sup>۴</sup> و همکاران [۴۰]، بررسی شد. رضایی<sup>۵</sup> و همکاران [۴۱]، کمانش ورق‌های مستطیلی هدفمند دارای گشودگی بیضوی تحت اثر بار حرارتی را با استفاده از روش اجزای محدود و تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول، بررسی کردند. کشمیری<sup>۶</sup> و همکاران [۴۲]، ارتعاشات و کمانش صفحات بیضوی کامپوزیتی چند لایه متقارن بر بستر الاستیک وینکلر<sup>۷</sup> که تحت بار داخل صفحه‌ای اولیه قرار دارند، پرداخته و از روش ریتز برای حل معادلات حاکم استفاده نمودند. تحلیل کمانش صفحه کامپوزیتی با خواص مواد مختلف با استفاده از روش DSC<sup>۸</sup> توسط سیوالک<sup>۹</sup> [۴۳]، مورد مطالعه قرار گرفت. تحلیل پس‌کمانش ورق کامپوزیتی جدار نازک براساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه سوم توسط شکریه<sup>۱۰</sup> و همکاران [۴۴]، انجام شد. طاهری<sup>۱۱</sup> و همکاران [۴۵]، به بررسی تجربی و عددی رفتار کمانش سیلندر کامپوزیتی حاوی گشودگی پرداختند. تحلیل کمانش و پس‌کمانش صفحه کامپوزیتی چندلایه با استفاده از روش کویتز-نیوتون<sup>۱۲</sup> توسط لی‌آنگ<sup>۱۳</sup> و سان<sup>۱۴</sup> [۴۶]، مورد بررسی قرار گرفت. دوروی<sup>۱۵</sup> [۴۷]، کمانش صفحه کامپوزیتی چندلایه مورب با ضخامت متغیر را مورد تحلیل قرار داد. لاکشمی<sup>۱۶</sup> و همکاران [۴۸]، به

---

<sup>1</sup> Heidari

<sup>2</sup> Nikrad

<sup>3</sup> Asadi

<sup>4</sup> Abhinav

<sup>5</sup> Rezae

<sup>6</sup> Keshmiri

<sup>7</sup> Winkler

<sup>8</sup> Discrete Singular Convolution

<sup>9</sup> Civalek

<sup>10</sup> Shokrieh

<sup>11</sup> Taheri

<sup>12</sup> Koiter-Newton

<sup>13</sup> Liang

<sup>14</sup> Sun

<sup>15</sup> Dhurvey

<sup>16</sup> Lakshmi

تحلیل کمانش صفحه کامپوزیتی چندلایه با گشودگی‌های مستطیل و بیضی پرداختند. آنها یک مطالعه عددی با استفاده از روش اجزای محدود برای تعیین اثر گشودگی مستطیل و بیضی بر رفتار کمانش حرارتی انجام دادند. کمانش صفحات کامپوزیتی متعامد تحت بارهای داخل صفحه‌ای خطی مختلف توسط آیدوگدو<sup>۱</sup> و آکسنسر<sup>۲</sup> [۴۹]، مورد مطالعه قرار گرفت. تحلیل کمانش خطی و مطالعه مقایسه‌ای صفحه کامپوزیتی با تقویت کننده و بدون تقویت کننده توسط راوی<sup>۳</sup> و همکاران [۵۰]، انجام شد.

## ۱-۶-۲ بهینه‌سازی

شاخه دیگری از تحقیقات صورت گرفته در زمینه کمانش، مسأله مربوط به بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر کمانش به منظور دستیابی به حداکثر بار کمانش می‌باشد. با توجه به اینکه انواع مختلفی از روش‌های بهینه‌سازی برای حل یک مسأله وجود دارد، انتخاب روش مناسب بستگی به نوع شرایط تعریف مسأله (شامل قیود، تعداد متغیرها، خطی یا غیرخطی بودن و...) دارد. امروزه استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری هوشمند بهینه‌سازی به دلیل عملکرد مطلوب این قبیل الگوریتم که غالباً الهام گرفته از طبیعت می‌باشند در مسائل بهینه‌سازی مهندسی مورد توجه بسیاری از محققین بوده که در این دسته می‌توان به الگوریتم ژنتیک که یکی از قوی‌ترین روش‌های بهینه‌سازی هوشمند می‌باشد، اشاره کرد. هم‌چنین اخیراً از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند مبتنی بر هوش مصنوعی جمعی (دسته ذرات) مانند اجتماع ذرات، کلونی مورچگان و... برای طراحی سازه‌های مهندسی استفاده شده است.

بهینه‌سازی پوسته کامپوزیتی چندلایه با گشودگی و بدون گشودگی به منظور حداکثر کردن بار کمانش توسط هو<sup>۴</sup> و وانگ<sup>۵</sup> [۵۱]، مورد بررسی قرار گرفت. چای<sup>۶</sup> و همکاران [۵۲]، بهینه‌سازی استحکام صفحه کامپوزیتی چند لایه در برابر کمانش را مورد مطالعه قرار دادند. بهینه‌سازی ضخامت صفحه کامپوزیتی

---

<sup>1</sup> Aydogdu

<sup>2</sup> Aksencer

<sup>3</sup> Ravi

<sup>4</sup> Hu

<sup>5</sup> Wang

<sup>6</sup> Chai

چندلایه برای حداکثر کردن بار کمانش توسط جوشی<sup>۱</sup> و بیگز<sup>۲</sup> [۵۳]، انجام شد. هو<sup>۳</sup> و لین<sup>۴</sup> [۵۴]، بهینه‌سازی کمانش صفحه چندلایه متقارن با هندسه‌های مختلف و شرایط مرزی متفاوت را انجام دادند. طراحی بهینه چندلایه‌های متقارن حاوی گشودگی به‌منظور حداکثر کردن بار کمانش توسط والکر<sup>۵</sup> [۵۵]، بررسی شد. اسپالینو<sup>۶</sup> و تیروف<sup>۷</sup> [۵۶]، به بررسی بهینه‌سازی کمانش حرارتی کامپوزیت چندلایه با استفاده از استراتژی تکاملی<sup>۸</sup> پرداختند. بهینه‌سازی پس‌کمانش پنل کامپوزیتی تقویت شده با استفاده از شبکه عصبی توسط بیساگنی<sup>۹</sup> و لانزی<sup>۱۰</sup> [۵۷]، ارزیابی شد. فاریا<sup>۱۱</sup> و المیدا<sup>۱۲</sup> [۵۸]، بهینه‌سازی کمانش صفحه با ضخامت متغیر، تحت بار متغیر غیرخطی را انجام دادند. طراحی و بهینه‌سازی پوسته کروی چندلایه برای دستیابی به بیشترین ظرفیت تحمل بار کمانش توسط گلدفیلد<sup>۱۳</sup> و همکاران [۵۹]، بررسی شد. فدرستون<sup>۱۴</sup> و واتسون<sup>۱۵</sup> [۶۰ و ۶۱]، کمانش بهینه شده صفحه کامپوزیتی مسطح و منحنی، تحت برش و خمش داخل صفحه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند. برمس<sup>۱۶</sup> و کسل<sup>۱۷</sup> [۶۲]، به بررسی بهینه‌سازی ضخامت صفحه حلقوی برای دستیابی به حداکثر بار کمانش پرداختند. بهینه‌سازی لایه-چینی چندلایه‌ها برای حداکثر کردن بار کمانش با استفاده از روش بهینه‌سازی کلونی مورچگان

---

<sup>1</sup> Joshi

<sup>2</sup> Biggers

<sup>3</sup> Hu

<sup>4</sup> Lin

<sup>5</sup> Walker

<sup>6</sup> Spallino

<sup>7</sup> Thierauf

<sup>8</sup> Evolution Strategies

<sup>9</sup> Bisagni

<sup>10</sup> Lanzi

<sup>11</sup> Faria

<sup>12</sup> Almeida

<sup>13</sup> Goldfeld

<sup>14</sup> Featherston

<sup>15</sup> Watson

<sup>16</sup> Bremec

<sup>17</sup> Kosel

(ACO<sup>۱</sup>)، توسط ایمریج<sup>۲</sup> و سرا<sup>۳</sup> [۶۳]، انجام شد. بهینه‌سازی صفحه کامپوزیتی چندلایه به‌منظور حداکثر کردن بار کمانش مکانیکی و حرارتی با استفاده از روش  $MDF$ <sup>۴</sup> توسط توپال<sup>۵</sup> و یوزمان<sup>۶</sup> [۶۴] و [۶۵]، بررسی شد. آنها در مقاله‌ای دیگر [۶۶]، به بررسی تأثیر شرایط مرزی غیریکنواخت بر بار کمانش صفحه کامپوزیتی چندلایه متقارن تحت بارگذاری تک‌محوره و دومحوره پرداختند. هم‌چنین آنها [۶۷]، بهینه‌سازی بار کمانش حرارتی صفحه مورب چند لایه را مورد مطالعه قرار دادند. بهینه‌سازی صفحات هدفمند برای حداکثر کردن بار کمانش با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری<sup>۷</sup> توسط مظفری<sup>۸</sup> و همکاران [۶۸]، مورد مطالعه قرار گرفت. جینگ<sup>۹</sup> و همکاران [۶۹]، بهینه‌سازی لایه‌چینی کامپوزیت چندلایه برای حداکثر کردن بار کمانش با استفاده از الگوریتم جستجوی جایگشت<sup>۱۰</sup> را انجام دادند. بهینه‌سازی لایه‌چینی صفحه کامپوزیتی برای حداکثر کردن بار کمانش با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی<sup>۱۱</sup> توسط المیدا<sup>۱۲</sup> [۷۰]، انجام شد. بهینه‌سازی صفحات مشبک کامپوزیتی چندلایه برای حداکثر کردن بار کمانش با استفاده از الگوریتم ژنتیک توسط احسانی<sup>۱۳</sup> و رضایی‌پژند<sup>۱۴</sup> [۷۱]، مورد مطالعه قرار گرفت. وثوقی<sup>۱۵</sup> و همکاران [۷۲]، با ترکیب روش اجزای محدود و روش الگوریتم ژنتیک بهبود یافته، حداکثر بار کمانش صفحات کامپوزیتی تقویت شده را محاسبه کردند. هم‌چنین آنها در مقاله‌ای دیگر [۷۳]، به بهینه‌سازی لایه‌چینی صفحه کامپوزیتی چندلایه ضخیم برای حداکثر کردن بار

---

<sup>1</sup> Ant Colony Optimization

<sup>2</sup> Aymerich

<sup>3</sup> Serra

<sup>4</sup> Modified Feasible Direction

<sup>5</sup> Topal

<sup>6</sup> Uzman

<sup>7</sup> Imperialist Competitive Algorithm

<sup>8</sup> Mozafari

<sup>9</sup> Jing

<sup>10</sup> Permutation Search Algorithm

<sup>11</sup> Harmony Search Algorithm

<sup>12</sup> Almeida

<sup>13</sup> Ehsani

<sup>14</sup> Rezaeepazhand

<sup>15</sup> Vosoughi

کمانش با استفاده از اجزای محدود و الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک و ازدحام ذرات پرداختند. بهینه‌سازی پنل‌های هدفمند برای استحکام کمانش پنل‌های تقویت شده، تقویت نشده و هم‌چنین پنل‌های حاوی گشودگی مستطیل توسط حسین<sup>۱</sup> و مولانی<sup>۲</sup> [۷۴]، انجام شد.

تاکنون مطالعه‌ای در زمینه کمانش صفحات حاوی گشودگی چند ضلعی منتظم که گوشه‌های گشودگی نرم یا تیز باشد، انجام نشده است. هم‌چنین تحقیقی در مورد اینکه صفحات کامپوزیتی حاوی چه نوع گشودگی و هم‌چنین با چه نوع از آرایش لایه‌ها می‌توانند بار کمانش بیشتری را تحمل کنند، صورت نگرفته است. اهمیت کار حاضر طراحی یک صفحه کامپوزیتی حاوی گشودگی می‌باشد به طوری که این صفحه بیشترین بار کمانش ممکن را تحمل کند. پارامترهای طراحی شامل: زاویه الیاف، نرم‌ینگی گوشه‌های گشودگی، نسبت اندازه گشودگی به اندازه صفحه و آرایش لایه‌ها در شرایط مرزی مختلف هستند. تاکنون هیچ مطالعه‌ای تأثیر هم‌زمان این پارامترها را بررسی و بهینه‌سازی نکرده است. یکی از کاربردهای مهم این پایان‌نامه که می‌توان به آن اشاره کرد این است که به‌جای ساخت چند نوع صفحه کامپوزیت آزمایشی برای دستیابی به صفحه‌ای که بیشترین بار کمانش را تحمل کند می‌توان با مدل‌سازی صفحه کامپوزیتی و بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر کمانش به کمک نرم‌افزار متلب، صفحه‌ای را طراحی کرد که بیشترین بار کمانش ممکن را تحمل کند.

## ۱-۷ نوآوری پایان‌نامه کنونی

نوآوری این پایان‌نامه شامل موارد زیر است:

- استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک در تحلیل کمانش صفحات کامپوزیتی با گشودگی‌های

مختلف

---

<sup>1</sup> Hussein

<sup>2</sup> Mulani

- محاسبه بار کمانش حرارتی صفحه کامپوزیت هیبریدی با گشودگی‌های مختلف با استفاده از روش اجزای محدود و بر اساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول.
- تعیین پارامترهای بهینه از قبیل: زاویه چرخش گشودگی، زاویه الیاف، چیدمان لایه‌ها، نرمینگی گوشه‌های گشودگی و نسبت اندازه گشودگی به اندازه صفحه برای گشودگی‌های مختلف و در شرایط مرزی متفاوت به منظور دستیابی به حداکثر ظرفیت تحمل بار کمانش حرارتی.





## فصل ۲: تعریف مسأله و حل عددی مسأله کمانش

## ۱-۲ مقدمه

در این فصل، فرضیات حاکم بر مسأله، جنس و هندسه ورق، بارگذاری و شرایط مرزی به کار رفته در این پایان نامه تعریف می‌شوند. هم‌چنین به معادلات حاکم بر مسأله کمانش با استفاده از تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول پرداخته می‌شود. سپس با اعمال روش اجزای محدود روابط را بازنویسی کرده و با استفاده از اصل حداقل انرژی پتانسیل، معادله تعادل مسأله کمانش به دست می‌آید.

## ۲-۲ فرضیات حاکم بر مسأله

فرضیات حاکم بر مسأله به صورت زیر است:

- جنس ورق کامپوزیت هیبریدی چهار لایه بوده و ابتدا کاملاً مسطح می‌باشد.
- ورق مربعی بوده و گشودگی در مرکز آن واقع شده است.
- میدان جابجایی ورق براساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول تعریف می‌شود.
- با توجه به اینکه صفحه نازک است، لذا فرض تنش صفحه‌ای برقرار است در نتیجه  $\varepsilon_z = 0$  می‌باشد.
- از روابط غیرخطی فن کامن برای تعریف سینماتیک مسأله استفاده می‌شود.
- بارگذاری به صورت افزایش دمای یکنواخت بر کل ورق اعمال می‌شود.
- شرایط مرزی به صورت چهار طرف گیردار و چهار طرف ساده می‌باشد.

## ۳-۲ جنس و هندسه ورق

به دلیل مزایای فراوان و کاربرد روزافزون مواد کامپوزیتی، جنس ورق مورد مطالعه در این پایان نامه کامپوزیت هیبریدی چهارلایه است که خواص مکانیکی آن در جدول ۱-۲ آورده شده است. در این پایان نامه منظور از  $B$  و  $G$  در چیدمان لایه‌ها به ترتیب برای لایه *Boron/Epoxy* و *Glass/Epoxy* می‌باشد.

جدول ۱-۲ خواص مکانیکی مواد [۷۵]

Material	$E_1(GPa)$	$E_2(GPa)$	$G_{12}(GPa)$	$\nu_{12}$	$\alpha_1(1/^\circ C)$	$\alpha_2(1/^\circ C)$
Glass/Epoxy	15	6	3	0.3	$7.0 \times 10^{-6}$	$2.3 \times 10^{-5}$
Boron/Epoxy	207	19	4.8	0.21	$4.14 \times 10^{-6}$	$1.91 \times 10^{-5}$

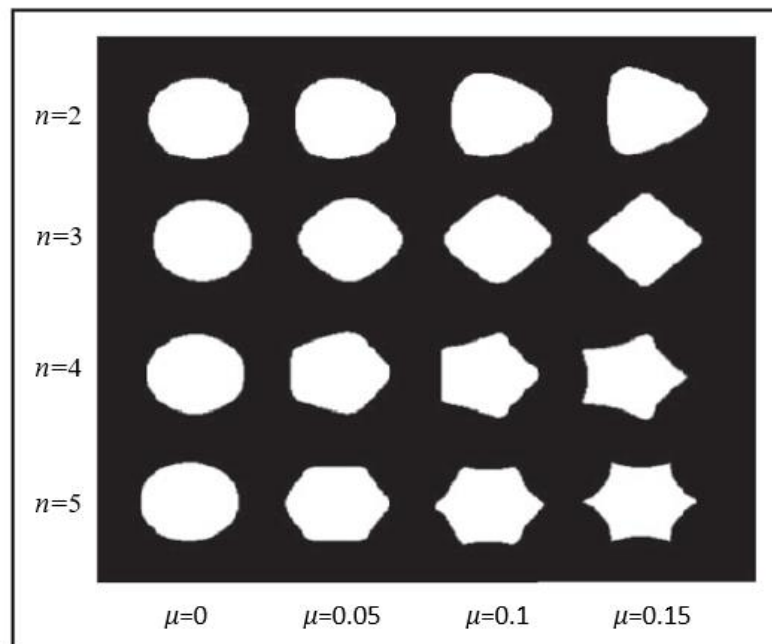
طول ورق ( $a$ ) برابر با  $100 \text{ mm}$  و ضخامت آن  $1 \text{ mm}$  می باشد که در مرکز خود حاوی گشودگی می باشد. نقاط روی مرز گشودگی ( $X, Y$ ) و همچنین قطر دایره محاط بر گشودگی ( $D$ ) مطابق روابط زیر تعیین می شوند [۷۶]:

$$X = \lambda(\cos\xi + \mu \cos(n\xi))$$

$$Y = -\lambda(\sin\xi - \mu \sin(n\xi)) \quad (1-2)$$

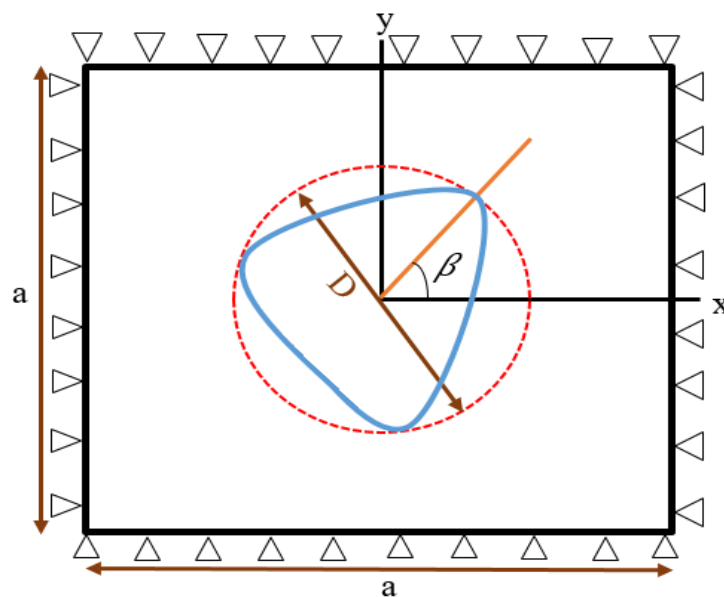
$$D = 2\lambda (1 + \mu)$$

در رابطه بالا، پارامترهای مختلفی وجود دارند که با تغییر آنها می توان گشودگی های مختلف را مدل کرد.  $n$  نشان دهنده نوع هندسه گشودگی است. به طوری که  $n+1$  تعداد اضلاع گشودگی را نشان می دهد. در گشودگی های لبه دار،  $\mu$  معیار تیزی یا نرمی انحنای گشودگی است ( $\mu \geq 0$ ). با تغییر پارامتر  $\mu$  در بازه معین که برای  $n$  های مختلف، متفاوت است، می توان انواع گشودگی با شعاع انحنای متفاوت ایجاد کرد. در شکل ۱-۲ تأثیر پارامتر  $n$  و  $\mu$  بر شکل گشودگی نشان داده شده است. همچنین  $\xi$  مختصه زاویه ای نقاط مرز گشودگی است و مقدار آن صفر تا  $360^\circ$  درجه می باشد.



شکل ۱-۲ تأثیر پارامترهای  $n$  و  $\mu$  بر شکل گشودگی

$\lambda$  ضریب بزرگنمایی گشودگی می باشد که حد بالا و پایین آن به ترتیب ۱ و ۲۵ می باشد.  $D$  قطر دایره محاط بر گشودگی می باشد که تابعی از  $\mu$  و  $\lambda$  می باشد. در این مطالعه منظور از اندازه گشودگی قطر دایره محاط بر گشودگی می باشد که به وسیله پارامترهای  $\lambda$  و  $\mu$  کنترل می شود. همچنین  $\beta$  زاویه چرخش گشودگی می باشد که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲ هندسه صفحه کامپوزیتی مربعی با گشودگی مرکزی

## ۴-۲ بارگذاری و شرایط مرزی

بارگذاری حرارتی می‌باشد و به صورت افزایش دمای یکنواخت بر کل ورق اعمال می‌شود. در این پایان‌نامه دو نوع شرط مرزی چهار طرف گیردار و چهار طرف ساده مورد بررسی قرار گرفته است. شرایط مرزی در لبه‌های یک ورق مربعی به طول  $a$  را می‌توان به صورت زیر نوشت:

الف- شرایط مرزی چهار طرف ساده:

$$x = \pm \frac{a}{2}: w = \psi_y = M_x = 0 \quad (۲-۲)$$

$$y = \pm \frac{a}{2}: w = \psi_x = M_y = 0$$

ب- شرایط مرزی چهار طرف گیردار:

$$x = \pm \frac{a}{2}: u = v = w = \psi_x = \psi_y = 0 \quad (۳-۲)$$

$$y = \pm \frac{a}{2}: u = v = w = \psi_x = \psi_y = 0$$

که در روابط بالا، که در آن  $u$  و  $v$  مؤلفه‌های جابجایی صفحه بوده،  $\psi_x$  و  $\psi_y$  بیانگر چرخش خط عمود بر صفحه میانی به ترتیب نسبت به محورهای  $x$  و  $y$  می‌باشند.  $w$  مربوط به تغییر شکل عرضی صفحه می‌باشد.

## ۵-۲ معادلات حاکم

معادلات حاکم بر سیستم با استفاده از تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول تعریف شده‌اند.

### ۱-۵-۲ رابطه کرنش-جابجایی

بر اساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول، میدان جابجایی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$u(x, y, z) = u_0(x, y) + z \psi_x(x, y)$$

$$v(x, y, z) = v_0(x, y) + z \psi_y(x, y) \quad (۴-۲)$$

$$w(x, y) = w_0(x, y)$$

که در آن  $u_0$  و  $v_0$  مؤلفه‌های جابجایی صفحه میانی ورق بوده،  $w_0$  مربوط به تغییر شکل عرضی صفحه میانی می‌باشد. رابطه کرنش جابجایی براساس تانسور گرین-لاگرانژ به صورت زیر نوشته می‌شود [۷۷]:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right]$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right]$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (۵-۲)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right]$$

$$\varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial z} \right]$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial z} \right]$$

براساس فرض کرنش‌های کوچک<sup>۱</sup>، کلیه جملات مرتبه دو در رابطه (۵-۲) قابل صرف نظر کردن می‌باشند. اما هنگامی که یک ورق مسطح در معرض بار داخل صفحه‌ای قرار می‌گیرد، با افزایش بار نهایتاً ورق پایداری خود را از دست داده و دچار تغییر شکل عرضی (خارج صفحه‌ای) می‌شود. این تغییر شکل با بار داخل صفحه‌ای رابطه غیرخطی دارد. این رفتار نشان می‌دهد که در تحلیل مسأله پایداری، باید جملاتی که بیانگر رابطه غیرخطی بین تغییرات بار و تغییر شکل عرضی می‌باشند، در فرمول‌بندی وارد شوند. تئوری فن کارمن این تأثیرات را در نظر می‌گیرد [۷۸]. براساس این تئوری، چرخش خط عمود بر صفحه میانی در حین تغییر شکل عرضی ملایم بوده (در حدود ۱۰ تا ۱۵ درجه). بنابراین جملات مرتبه دو شامل:  $\frac{\partial w}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial x}$  و  $\left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2$  و  $\left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2$  در مقایسه با جملات مرتبه یک قابل صرف نظر

---

<sup>1</sup> Small Strain

کردن نیستند [۷۷]. همچنین انحراف  $w$  مستقل از  $z$  بوده، در نتیجه  $\frac{\partial w}{\partial z}$  برابر با صفر خواهد بود.

بنابراین رابطه (۵-۲) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2$$

$$\varepsilon_z = 0 \quad (۶-۲)$$

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y}$$

$$\gamma_{xz} = 2\varepsilon_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}$$

$$\gamma_{yz} = 2\varepsilon_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}$$

اکنون با جای‌گذاری میدان جابجایی (۴-۲) در رابطه (۶-۲) مقادیر کرنش‌ها براساس جابجایی‌ها

به صورت رابطه (۷-۲) به دست می‌آیند:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w_0}{\partial x} \right)^2 + z \frac{\partial \psi_x}{\partial x}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w_0}{\partial y} \right)^2 + z \frac{\partial \psi_y}{\partial y}$$

$$\varepsilon_z = 0 \quad (۷-۲)$$

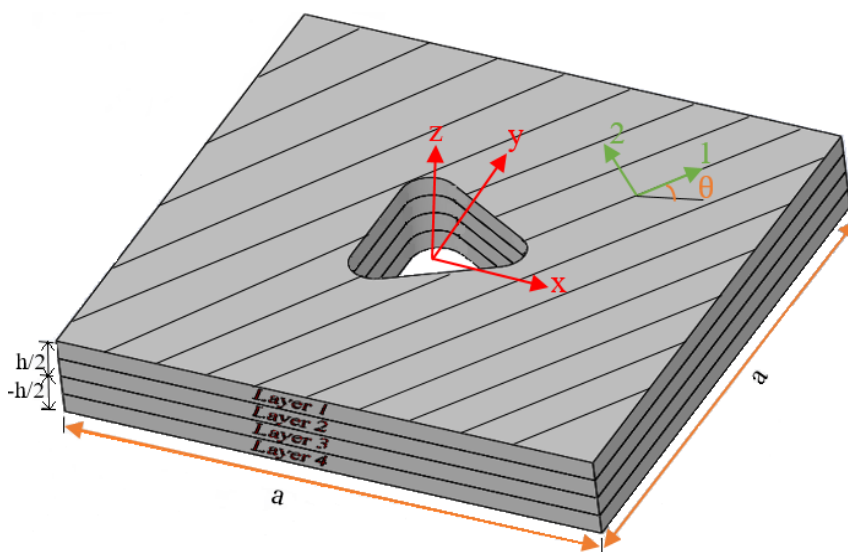
$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} + z \left( \frac{\partial \psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \psi_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial w_0}{\partial y}$$

$$\gamma_{xz} = \psi_x + \frac{\partial w_0}{\partial x}$$

$$\gamma_{yz} = \psi_y + \frac{\partial w_0}{\partial y}$$

## ۲-۵-۲ رابطه تنش- کرنش

برای مواد با رفتار الاستیک، معادلات ساختاری بین مؤلفه‌های تنش و کرنش در مختصات محلی ۱-۲ کامپوزیت (شکل ۳-۲) با در نظر گرفتن تنش‌های حرارتی را می‌توان به صورت زیر نوشت:



شکل ۳-۲ هندسه صفحه کامپوزیت هیبریدی حاوی گشودگی مرکزی با مختصات محلی و کلی

$$\begin{cases} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{cases} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{cases} \varepsilon_1 - \alpha_1 \Delta T \\ \varepsilon_2 - \alpha_2 \Delta T \\ \gamma_{12} \end{cases} \quad (۸-۲)$$

$$\begin{cases} \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{cases} = \begin{bmatrix} Q_{44} & 0 \\ 0 & Q_{55} \end{bmatrix} \begin{cases} \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{cases}$$

$\alpha_1$ ،  $\alpha_2$  و ضرایب انبساط حرارتی در مختصات محلی می‌باشند.  $Q_{ij}$  ماتریس سفتی کاهش یافته برای حالت تنش صفحه‌ای هستند و تابع خواص مکانیکی ماده بوده و به صورت زیر تعریف می‌شوند [۷۸]:



$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{12} = \frac{E_1\nu_{21}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{E_2\nu_{12}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (9-2)$$

$$Q_{66} = G_{12}$$

$$Q_{44} = G_{23}$$

$$Q_{55} = G_{13}$$

این معادلات را می‌توان در مختصات کلی  $x-y$  به صورت زیر نوشت:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x - \alpha_x \Delta T \\ \varepsilon_y - \alpha_y \Delta T \\ \gamma_{xy} - \alpha_{xy} \Delta T \end{Bmatrix} = \{\sigma_M\} - \{\sigma_{Th}\}$$

$$\begin{Bmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{44} & \bar{Q}_{45} \\ \bar{Q}_{54} & \bar{Q}_{55} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = [R]\{\varepsilon_3\} \quad (10-2)$$

$\alpha_x$ ،  $\alpha_y$  و  $\alpha_{xy}$  ضرایب انبساط حرارتی در مختصات کلی هستند که از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\alpha_x = c^2 \alpha_1 + s^2 \alpha_2$$

$$\alpha_y = c^2 \alpha_2 + s^2 \alpha_1 \quad (11-2)$$

$$\alpha_{xy} = 2 c s (\alpha_1 - \alpha_2)$$

همچنین  $\bar{Q}_{ij}$  به صورت زیر تعریف می‌شوند [۷۹]:

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11} c^4 + Q_{22} s^4 + 2 (Q_{12} + 2Q_{66}) s^2 c^2$$

$$\bar{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) s^2 c^2 + Q_{12} (s^4 + c^4)$$

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11} s^4 + Q_{22} c^4 + 2 (Q_{12} + 2Q_{66}) s^2 c^2$$

$$\bar{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) c^3 s - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66}) s^3 c$$

$$\bar{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) s^3 c - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66}) c^3 s$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) s^2 c^2 + Q_{66} (s^4 + c^4)$$

$$\bar{Q}_{44} = Q_{44} c^2 + Q_{55} s^2$$

$$\bar{Q}_{45} = (Q_{55} - Q_{44}) c s$$

$$\bar{Q}_{55} = Q_{55} c^2 + Q_{44} s^2 \quad (۱۲-۲)$$

$c$  و  $s$  در روابط بالا به صورت زیر تعریف می شوند:

$$c = \cos(\theta) \quad (۱۳-۲)$$

$$s = \sin(\theta)$$

بردار تنش داخل صفحه‌ای شامل مؤلفه‌های مکانیکی  $\{\sigma_M\}$  و حرارتی  $\{\sigma_{Th}\}$  به صورت زیر است:

$$\{\sigma_M\} = [q] \{\varepsilon\} \quad (۱۴-۲)$$

$$\{\sigma_{Th}\} = \Delta T [q] \{\alpha\}$$

که:

$$[q] = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}$$

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} \quad (۱۵-۲)$$

$$\{\alpha\} = \begin{Bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{Bmatrix}$$

بردار نیروها و ممان‌های منتهی به صورت رابطه (۱۶-۲) تعریف می شوند:

$$\{N\}, \{M\} = \int \{\sigma_M\} (l, z) dz$$

$$\{Q\} = k_s \int \left\{ \begin{matrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{matrix} \right\} dz \quad (16-2)$$

$$\{N_T\}, \{M_T\} = \int \{\sigma_{Th}\} (l, z) dz$$

$\{N_T\}$ ،  $\{M_T\}$  و  $\{Q\}$  به ترتیب، بردارهای منتجه نیرو، ممان و نیروی برشی عرضی هستند.

به ترتیب، بردارهای منتجه نیرو و گشتاور حرارتی می‌باشند. ضریب اصلاح برشی  $(k_s)$ ،  $\frac{5}{6}$  در نظر گرفته شده است.

## ۶-۲ استخراج فرم اجزای محدود روابط حاکم

در این بخش، روابطی که در بخش قبل به دست آمد را به فرم اجزای محدود بازنویسی می‌کنیم.

### ۱-۶-۲ انرژی پتانسیل کل

رابطه (۷-۲) که در بخش (۱-۵-۲) به دست آمد را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\left\{ \begin{matrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{matrix} \right\} = \underbrace{\left\{ \begin{matrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{matrix} \right\}}_{\varepsilon_1} + z \underbrace{\left\{ \begin{matrix} \frac{\partial \psi_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \psi_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \psi_x}{\partial y} + \frac{\partial \psi_y}{\partial x} \end{matrix} \right\}}_{\varepsilon_2} + \underbrace{\left\{ \begin{matrix} \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w_0}{\partial x} \right)^2 \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w_0}{\partial y} \right)^2 \\ \frac{\partial w_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial y} \end{matrix} \right\}}_{\varepsilon_{NL}}$$

$$\underbrace{\hspace{15em}}_{\varepsilon_L} \quad (17-2)$$

$$\left\{ \begin{matrix} \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{matrix} \right\} = \underbrace{\left\{ \begin{matrix} \frac{\partial w_0}{\partial x} + \psi_x \\ \frac{\partial w_0}{\partial y} + \psi_y \end{matrix} \right\}}_{\varepsilon_3}$$

که در رابطه بالا،  $\varepsilon_L$  و  $\varepsilon_{NL}$  به ترتیب بیانگر قسمت خطی و غیرخطی مؤلفه‌های کرنش می‌باشند و  $\{\varepsilon_3\}$

بیانگر بردار کرنش برشی می‌باشد. هم‌چنین منتجه‌های تنش که در بخش قبل به دست آمدند را می‌توان

با استفاده از روابط تنش-کرنش به شکل زیر نوشت:

$$\{N\} = [A]\{\varepsilon_1\} + [B]\{\varepsilon_2\}$$

$$\{M\} = [B]\{\varepsilon_1\} + [D]\{\varepsilon_2\}$$

(۱۸-۲)

$$[Q] = k_s [A_s]\{\varepsilon_3\}$$

$$\{N_T\} = \Delta T [A]\{\alpha\}$$

$$\{M_T\} = \Delta T [B]\{\alpha\}$$

که  $[A]$ ،  $[B]$ ،  $[D]$  و  $[A_s]$  به صورت زیر تعریف می شوند:

$$[A], [B], [D] = \int [q] (1, z, z^2) dz$$

(۱۹-۲)

$$[A_s] = \int [R] dz$$

انرژی پتانسیل کل به صورت زیر می باشد:

$$\Pi = U + V$$

(۲۰-۲)

که  $U$  انرژی کرنشی مربوط به قسمت خطی تانسور کرنش و  $V$  نشان دهنده کار نیروی درون صفحه‌ای در طول انحراف جانبی است و مربوط به قسمت غیرخطی تانسور کرنش می باشد.

انرژی کرنشی  $U$  به صورت زیر بیان می شود:

$$U = \iiint \rho dv$$

(۲۱-۲)

که  $\rho$  چگالی انرژی کرنشی می باشد و به صورت زیر تعریف می شود:

$$\rho = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}$$

(۲۲-۲)

با جای گذاری رابطه (۲۲-۲) در (۲۱-۲) خواهیم داشت:

$$U = \frac{1}{2} \iiint \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dv$$

(۲۳-۲)

با در نظر گرفتن تنش حرارتی داریم:

$$U = \frac{1}{2} \iiint (\{\sigma\}^T - \{\sigma_{Th}\}^T) \{\varepsilon\} dv \quad (24-2)$$

اکنون با جای گذاری مؤلفه های تنش حرارتی و مکانیکی در رابطه بالا، رابطه (25-2) حاصل می شود:

$$U = \frac{1}{2} \iiint (\{\sigma_M\}^T \{\varepsilon_L\} + \{\tau_{xz} \ \tau_{yz}\} \{\varepsilon_3\}) dv - \frac{1}{2} \iiint (\{\sigma_{Th}\}^T \{\varepsilon_L\} dv \quad (25-2)$$

با جای گذاری بردار نیروها و ممان های منتهی از روابط (26-2) در معادله بالا خواهیم داشت:

$$U = \frac{1}{2} \iint (\{N\}^T \{\varepsilon_1\} + \{M\}^T \{\varepsilon_2\} + \{Q\}^T \{\varepsilon_3\}) dA - \iint \{N_T\}^T \{\varepsilon_1\} + \{M_T\}^T \{\varepsilon_2\} dA \quad (26-2)$$

با جای گذاری روابط (27-2) در معادله (26-2) و پس از ساده سازی، انرژی کرنشی را می توان به شکل زیر بازنویسی کرد:

$$U = \frac{1}{2} \iint (\{\varepsilon_1^T \ \varepsilon_2^T\} \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \{\varepsilon_1\} + \{\varepsilon_3\}^T [A_s]^T \{\varepsilon_3\}) dA - \Delta T \iint \{\varepsilon_1^T \ \varepsilon_2^T\} \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \{\alpha\} dA \quad (27-2)$$

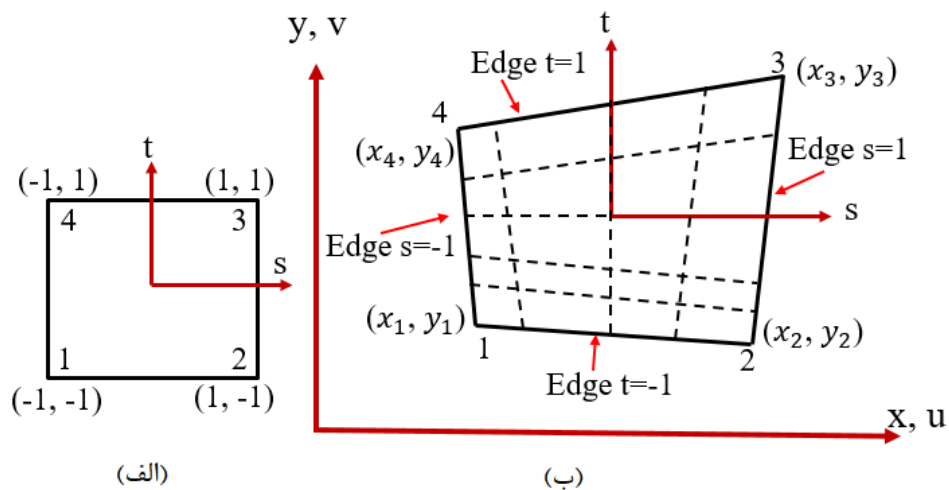
کار نیروهای داخل صفحه ای در حین تغییر شکل عرضی ورق بر حسب تنش های اولیه ناشی از بارگذاری و کرنش های غیرخطی به صورت رابطه زیر بیان می شود [80]:

$$V = \frac{1}{2} \iint (N_x (\frac{\partial w_0}{\partial x})^2 + N_y (\frac{\partial w_0}{\partial y})^2 + 2N_{xy} (\frac{\partial w_0}{\partial x} \frac{\partial w_0}{\partial y})) dA = \frac{1}{2} \iint \begin{bmatrix} \frac{\partial w_0}{\partial x} & \frac{\partial w_0}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_x & N_{xy} \\ N_{xy} & N_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial w_0}{\partial x} \\ \frac{\partial w_0}{\partial y} \end{bmatrix} dA \quad (28-2)$$

## ۲-۶-۲ المان ایزوپارامتریک

اولین مرحله در حل مسأله به کمک روش اجزای محدود، المان بندی دامنه مسأله می باشد. شکل المان ها و نیز اندازه آنها تأثیر زیادی بر دقت جواب نهایی دارد. در مورد شکل المان، یک المان مربعی به دلیل اینکه نسبت ظاهری آن برابر با یک است، بهترین المان می باشد. اما در مورد هندسه های پیچیده مانند یک ورق دارای گشودگی، استفاده از المان های مربعی در تمام دامنه مسأله امکان پذیر نمی باشد.

در این حالت از فرمول بندی ایزوپارامتریک برای محاسبه ماتریس سفتی و بردار نیروی المان‌ها استفاده می‌شود. در این روش با استفاده از توابع شکل مناسب، یک المان مربعی در مختصات محلی  $(s, t)$  به یک المان چهار ضلعی در مختصات کلی  $(x, y)$  نگاشت می‌شود (شکل ۲-۴).



شکل ۲-۴ نگاشت از المان مربعی به المان چهار گره‌ای دلخواه. (الف) المان مربعی مرجع. (ب) المان نگاشت یافته

همچنین در این روش مؤلفه‌های میدان جابجایی  $(u_0, v_0, w, \psi_x, \psi_y)$  در دامنه المان مرجع، به کمک همان توابع شکلی که برای نگاشت المان استفاده شده بود، درونیابی می‌شود. در اینجا هر گره دارای پنج درجه آزادی می‌باشد. بنابراین می‌توان نوشت [۸۱]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^4 N_i \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \\ \psi_x \\ \psi_y \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^4 N_i \begin{bmatrix} u_{0i} \\ v_{0i} \\ w_{0i} \\ \psi_{xi} \\ \psi_{yi} \end{bmatrix} \quad (2-29)$$

که  $(x_i, y_i, u_{0i}, v_{0i}, w_i, \psi_{xi}, \psi_{yi})$  مقدار متغیرهای درونیابی شده در گره‌های المان مرجع می‌باشند.

توابع شکل یاد شده در مختصات المان مرجع  $(s, t)$  به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$N_1 = \frac{(1-s)(1-t)}{4}$$

$$N_2 = \frac{(1+s)(1-t)}{4} \quad (۳۰-۲)$$

$$N_3 = \frac{(1+s)(1+t)}{4}$$

$$N_4 = \frac{(1-s)(1+t)}{4}$$

با استفاده از ماتریس انتقال ژاکوبین، مشتقات نسبت به مختصات کلی  $(x, y)$  به مشتقات نسبت به

مختصات محلی  $(s, t)$  مرتبط شده و به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\cdot)}{\partial s} = \frac{\partial(\cdot)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial s} + \frac{\partial(\cdot)}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial s} \\ \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} = \frac{\partial(\cdot)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial(\cdot)}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} \frac{\partial(\cdot)}{\partial s} \\ \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial(\cdot)}{\partial x} \\ \frac{\partial(\cdot)}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (۳۱-۲)$$

بنابراین نتیجه می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial(\cdot)}{\partial x} \\ \frac{\partial(\cdot)}{\partial y} \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial(\cdot)}{\partial s} \\ \frac{\partial(\cdot)}{\partial t} \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial s} & \frac{\partial y}{\partial s} \\ \frac{\partial x}{\partial t} & \frac{\partial y}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (۳۲-۲)$$

اکنون می‌توان مؤلفه‌های کرنش را به بردار جابجایی‌های گره‌ای مرتبط کرد:

$$\begin{cases} \{\varepsilon_1\} \\ \{\varepsilon_2\} \end{cases} = [B_1]\{d\}, \quad \begin{cases} \{\varepsilon_3\} \\ \{\varepsilon_4\} \end{cases} = [B_3]\{d\}, \quad \begin{cases} \frac{\partial w_0}{\partial x} \\ \frac{\partial w_0}{\partial y} \end{cases} = [B_2]\{d\} \quad (۳۳-۲)$$

که  $\{d\} = \{u_1 \ v_1 \ w_1 \ \psi_{x1} \ \psi_{y1} \ \dots \ \psi_{y4}\}^T$  بردار جابجایی گره‌ای بوده و ماتریس‌های  $[B_1]$ ،  $[B_2]$  و

$[B_3]$  توابعی از هر دو مختصات محلی و کلی می‌باشند.

## ۳-۶-۲ اعمال اصل حداقل انرژی پتانسیل

اکنون می‌توان انرژی پتانسیل کل را بر حسب جابجایی‌های گره‌ای توصیف کرد:

$$U + V = \frac{1}{2} \iint (\{d\}^T [B_1]^T \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} [B_1] \{d\} + \{d\}^T [B_3]^T [A_s]^T [B_3] \{d\} + \{d\}^T [B_2]^T \begin{bmatrix} N_x & N_{xy} \\ N_{xy} & N_y \end{bmatrix} [B_2] \{d\}) |J| dA - \Delta T \iint \{d\}^T [B_1]^T \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \{\alpha\} |J| dA \quad (34-2)$$

مطابق اصل حداقل انرژی پتانسیل کل، مشتق انرژی پتانسیل کل سیستم نسبت به بردار جابجایی‌های گره‌ای باید برابر با صفر باشد. با اعمال این اصل بر رابطه (۳۴-۲) خواهیم داشت:

$$\frac{\partial(U+V)}{\partial\{d\}} = 0 \Rightarrow \left( \iint ([B_1]^T \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} [B_1] + [B_3]^T [A_s]^T [B_3] + [B_2]^T \begin{bmatrix} N_x & N_{xy} \\ N_{xy} & N_y \end{bmatrix} [B_2]) |J| dA \right) \{d\} = \Delta T \iint [B_1]^T \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \{\alpha\} |J| dA \quad (35-2)$$

با ساده‌سازی رابطه (۳۵-۲) می‌توان به رابطه زیر رسید:

$$([K_b] + [K_s] + [K_g]) \{d\} = \Delta T \{F_T\} \quad (36-2)$$

که بردار  $\{F_T\}$ ، نیروی حرارتی محاسبه شده به‌ازای افزایش دمای واحد است. در این رابطه، ماتریس‌های سفتی خمشی، برشی و هندسی و بردار بار حرارتی به‌ترتیب به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} [K_b] &= \iint [B_1]^T \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} [B_1] |J| dA \\ [K_s] &= \iint [B_3]^T [A_s]^T [B_3] |J| dA \\ [K_g] &= \iint [B_2]^T \begin{bmatrix} N_x & N_{xy} \\ N_{xy} & N_y \end{bmatrix} [B_2] |J| dA \\ \{F_T\} &= \iint [B_1]^T \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} \{\alpha\} |J| dA \end{aligned} \quad (37-2)$$

این بردارها و ماتریس‌ها با انتگرال‌گیری عددی برای هر المان محاسبه می‌شوند. برای انتگرال‌گیری، از روش عددی گوس در دامنه المان مرجع استفاده می‌شود. در نهایت ماتریس‌های سفتی و بردار نیروی المان‌ها با توجه به نحوه اتصال المان‌ها، مونتاژ شده و ماتریس سفتی کل به‌دست می‌آید و پس از اعمال شرایط مرزی، بردارها و ماتریس‌های سفتی کاهش یافته به‌دست می‌آیند.



با حذف کردن ماتریس سفتی هندسی از معادله (۳۶-۲) و  $\Delta T=1$ ، معادله پیش‌گمانش برای استخراج بردار جابجایی گره‌ای  $\{d\}$  به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$([K_b] + [K_s])\{d\} = \{F_T\} \quad (38-2)$$

اکنون از بردار جابجایی‌های گره‌ای برای محاسبه ماتریس سفتی هندسی به منظور دستیابی به معادله گمانش حرارتی استفاده می‌شود. در نتیجه خواهیم داشت:

$$([K_b] + [K_s] + \Delta T_c [K'_g])\{d\} = 0 \quad (39-2)$$

که  $[K'_g]$  ماتریس سفتی هندسی به‌ازای افزایش دمای واحد و  $\Delta T_c$  دمای بحرانی گمانش است. رابطه (۳۹-۲)، زمانی جواب بدیهی غیر از صفر دارد که دترمینان ماتریس ضرایب بردار جابجایی برابر با صفر باشد.

$$|[K_b] + [K_s] + \Delta T_c [K'_g]| = 0 \quad (40-2)$$

که در رابطه بالا | | دترمینان ماتریس می‌باشد. با حل مسأله مقدار ویژه، مقدار دمای بحرانی گمانش به دست می‌آید.



## فصل ۳: بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

### ۳-۱ مقدمه

در این فصل ابتدا به تاریخچه الگوریتم ژنتیک پرداخته می‌شود. سپس مفاهیم اولیه و عملگرهای الگوریتم ژنتیک تعریف می‌شوند. در ادامه مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک به تفصیل بیان می‌شوند. در نهایت مزایا، محدودیت‌ها و کاربردهای الگوریتم ژنتیک نام برده می‌شوند.

### ۳-۲ تاریخچه الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک روش آماری برای بهینه‌سازی و جستجو است. الگوریتم ژنتیک جزئی از محاسبات تکاملی است که خود جزئی از هوش مصنوعی می‌باشد. ویژگی‌های خاص این الگوریتم باعث می‌شود که نتوانیم آن را یک جستجوگر تصادفی قلمداد کنیم. اساس این الگوریتم قانون تکامل داروین<sup>۱</sup> (بقاء بهترین) است که می‌گوید: موجودات ضعیف‌تر از بین می‌روند و موجودات قوی‌تر باقی می‌مانند. در واقع قانون انتخاب طبیعی برای بقاء می‌گوید که هرچه امکان تطبیق موجود بیشتر باشد بقای موجود امکان‌پذیرتر است و امکان تولید مثل بیشتری، برایش وجود دارد. ایده محاسبات تکاملی اولین بار در سال ۱۹۶۰ توسط رچنبرگ<sup>۲</sup> که در زمینه استراتژی‌های تکاملی تحقیق می‌کرد به وجود آمد که نظریه او بعدها توسط دیگر محققان توسعه داده شد. اصول اولیه الگوریتم ژنتیک توسط هلند<sup>۳</sup> و همکارانش در دانشگاه میشیگان در سال ۱۹۶۲ ارائه شد [۸۲]. آنان در تحقیقات خود به فرایند سازگاری در سیستم‌های طبیعی توجه نمودند و برای مدل‌سازی آن در سیستم‌های مصنوعی که باید دارای توانایی‌های اصلی سیستم‌های طبیعی باشند، تلاش نمودند. نتیجه این تلاش‌ها پیدایش الگوریتم ژنتیک بود. سپس در سال ۱۹۷۵، مبانی ریاضی آن در کتابی با نام "تطابق در سیستم‌های طبیعی و مصنوعی"<sup>۴</sup> منتشر شد.

---

<sup>1</sup> Darwin

<sup>2</sup> Rechenberg

<sup>3</sup> Holland

<sup>4</sup> Adaptive in Natural and Artificial System

### ۳-۳ مفاهیم اولیه در الگوریتم ژنتیک

قبل از ارائه کردن الگوریتم ژنتیک لازم است مفاهیم اولیه این روش و اجزای اصلی تشکیل دهنده آن بررسی شوند، که در زیر به شرح آنها پرداخته می‌شود.

#### ۳-۳-۱ کروموزوم<sup>۱</sup>

رشته یا دنباله‌ای از بیت‌ها که به‌عنوان شکل کد شده یک جواب ممکن (مناسب یا نامناسب) از مسأله مورد نظر می‌باشد را کروموزوم می‌گویند. در حقیقت بیت‌های یک کروموزوم، نقش ژن‌ها را در طبیعت بازی می‌کنند. هر رشته یا کروموزوم یک نقطه پاسخ در فضای جستجو را نشان می‌دهد. یک کروموزوم دارای  $n$  ژن می‌باشد که در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۳-۱ نمایش یک کروموزوم  $n$  بیتی با  $b_n$  ژن

#### ۳-۳-۲ جمعیت ژنتیکی و اندازه جمعیت

به مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها جمعیت<sup>۲</sup> گفته می‌شود. یکی از ویژگی‌های الگوریتم ژنتیک این است که به‌جای تمرکز بر روی یک نقطه از فضای جستجو یا یک کروموزوم، بر روی جمعیتی از کروموزوم‌ها کار می‌کند. به این ترتیب در هر مرحله، الگوریتم دارای جمعیتی از کروموزوم‌ها بوده که خواص مورد نظر را بیشتر از جمعیت مرحله قبل دارا می‌باشد. هر جمعیت یا یک نسل از کروموزوم‌ها، دارای یک اندازه می‌باشد که به اندازه جمعیت معروف است. اندازه جمعیت معرف تعداد کروموزوم‌های موجود در جمعیت

<sup>1</sup> Chromosome

<sup>2</sup> Population

یا یک نسل است. اگر تعداد کروموزومها (اندازه جمعیت) خیلی کم باشد، تنها قسمت کمی از فضای جستجو مورد کاوش قرار خواهد گرفت. از طرف دیگر، اگر تعداد کروموزومها خیلی زیاد باشد، سرعت الگوریتم بسیار کند خواهد شد.

### ۳-۳-۳ فضای جستجو

موقعی که به جستجوی جواب یک مسأله پرداخته می‌شود، به‌طور معمول در میان همه جواب‌های ممکن، جواب بهتر انتخاب می‌شود. فضای تمام جواب‌های قابل قبول، فضای جستجو نامیده می‌شود.

### ۳-۳-۴ تابع هدف

تابع هدف، هدف و خواسته ما از طرح مسأله است. یعنی، تابع هدف، شاخصی از نحوه عملکرد افراد در فضای مسأله می‌باشد.

### ۳-۴-۴ تابع برازندگی

تابع برازندگی را از اعمال تبدیل مناسب بر روی تابع هدف یعنی تابعی که قرار است بهینه شود به‌دست می‌آورند. این تابع هر رشته را با یک مقدار عددی ارزیابی می‌کند که کیفیت آن را مشخص می‌نماید. هرچه کیفیت رشته جواب بالاتر باشد مقدار برازندگی جواب بیشتر است و احتمال مشارکت برای تولید نسل بعدی نیز افزایش خواهد یافت. بسته به اینکه مسأله مورد نظر بیشینه‌سازی یا کمینه‌سازی باشد، برازندگی بیشتر مترادف با بیشینه یا کمینه بودن تابع هدف خواهد بود. چندین روش برای تبدیل تابع هدف برازندگی وجود دارد. ساده‌ترین حالت مساوی قرار دادن تابع برازندگی با تابع هدف است، که در این پایان‌نامه از این روش استفاده شده است.

### ۳-۵ عملگرهای الگوریتم ژنتیک

به‌طور خلاصه الگوریتم ژنتیک از عملگرهای زیر تشکیل شده است:

### ۳-۵-۱ کدگذاری

الگوریتم ژنتیک به جای این که بر روی پارامترها یا متغیرهای مسأله کار کند، با شکل کد شده آنها سروکار دارد. روش‌های کدگذاری متداول در الگوریتم ژنتیک عبارتند از: کدگذاری دودویی، کدگذاری جهشی، کدگذاری ارزشی و کدگذاری درختی و... .

در این پایان‌نامه از کدگذاری ارزشی استفاده شده است. در این نوع روش کدگذاری، کروموزوم‌ها می‌توانند هر نوع داده مرتبط با مسأله را در رشته خود اختیار نمایند. این داده‌ها از نوع اعداد حقیقی، عبارات منطقی، دستورات جهت‌یابی، داده‌های کد شده به صورت رشته‌های حرفی و... می‌باشند. در شکل زیر نمونه‌ای از کدگذاری ارزشی نشان داده شده است.

1, 2 3 2 4	5, 3 2 4 3	0, 4 5 5 6	2, 3 2 9 3	2, 4 5 4 5	کروموزوم A
ABDJE	IFJDH	DIERJ	FDLDF	LFEGT	کروموزوم B
(Back)	(Back)	(Right)	(Forward)	(Left)	کروموزوم C

شکل ۳-۲ نمونه‌ای از کدگذاری ارزشی

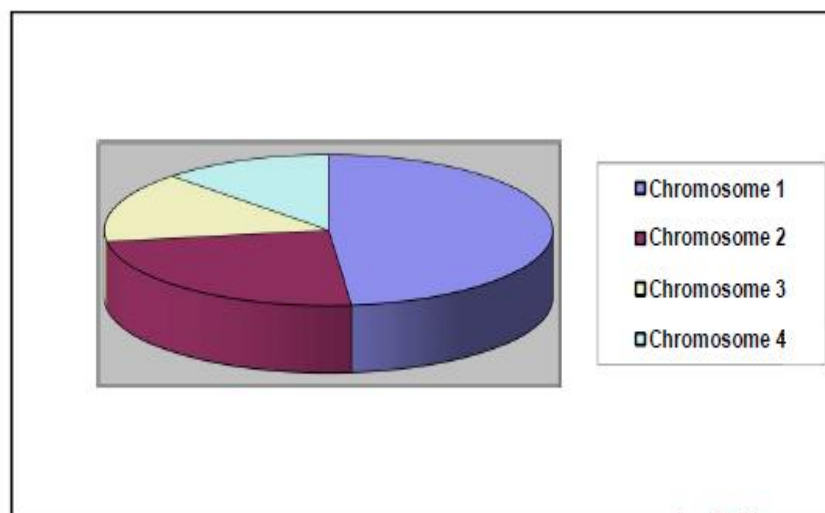
### ۳-۵-۲ انتخاب<sup>۱</sup>

عملگر انتخاب رابط بین دو نسل است و بعضی از اعضای نسل کنونی را به نسل آینده منتقل می‌کند. در مرحله انتخاب، یک جفت از کروموزوم‌ها برگزیده می‌شوند تا با هم ترکیب شوند. شاید انتخاب مستقیم و ترتیبی به این شکل که بهترین اعضاء دوبه‌دو انتخاب شوند در نگاه اول روش مناسبی به نظر برسد. اما باید به این نکته توجه داشت؛ در الگوریتم ژنتیک ما با ژن‌ها روبه‌رو هستیم. یک عضو با برازندگی پایین اگرچه در نسل خودش عضو مناسبی نمی‌باشد اما ممکن است شامل ژن‌های خوب باشد و اگر شانس انتخاب شدنش صفر باشد، این ژن‌های خوب نمی‌توانند به نسل‌های بعدی منتقل شوند.

<sup>1</sup> Selection

پس روش انتخاب باید به گونه‌ای باشد که به این عضو نیز شانس انتخاب شدن داده شود. راه حل مناسب، طراحی روش انتخاب به گونه‌ای است که احتمال انتخاب شدن اعضای با برازندگی بالا بیشتر باشد. انتخاب باید طوری صورت بگیرد که تا جایی که ممکن است هر نسل جدید نسبت به نسل قبلی‌اش میانگین برازندگی بهتری داشته باشد. روش‌های متداول انتخاب عبارتند از: انتخاب چرخ رولت، انتخاب ترتیبی، انتخاب بولتزن، انتخاب حالت پایدار، نخبه سالاری، انتخاب رقابتی، انتخاب قطع سر و... . در این پایان‌نامه از روش انتخاب چرخ رولت استفاده شده است. که در ادامه به تعریف این روش پرداخته می‌شود.

انتخاب چرخ رولت که اولین بار توسط هلند پیشنهاد شد یکی از مناسب‌ترین انتخاب‌های تصادفی بوده که ایده آن، احتمال انتخاب می‌باشد. روش پیاده‌سازی چرخ رولت (شکل ۳-۳) به این شکل است که ما یک دایره را در نظر گرفته و آن را به تعداد کروموزوم‌ها طوری تقسیم می‌کنیم که هر بخش متناظر با مقدار برازندگی کروموزوم مربوط باشد. حال چرخ را چرخانده و هر کجا که چرخ متوقف شد به شاخص چرخ نگاه کرده، کروموزوم مربوط به آن بخش انتخاب می‌گردد.



شکل ۳-۳ چرخ رولت



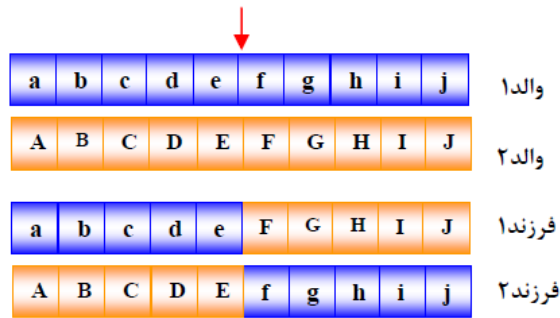
انتخاب چرخ رولت، روشی است که نسبت مقدار برازندگی اعضا را انتخاب می‌کند. این روش یک چرخ رولت را شبیه‌سازی می‌کند تا تعیین کند کدام اعضاء شانس باز تولید را دارند. هر عضو به نسبت برازندگی‌اش، تعدادی از بخش‌های چرخ رولت را به خود اختصاص می‌دهد. سپس در هر مرحله انتخاب یک عضو برگزیده می‌شود و روند آنقدر تکرار می‌شود تا به اندازه کافی، جفت برای تشکیل نسل بعد انتخاب شود.

### ۳-۵-۳ ترکیب<sup>۱</sup>

در طبیعت بقای نسل یکی از مهم‌ترین فاکتورها است و تنها عملگر ممکن برای این امر، آمیزش است. در الگوریتم ژنتیک نیز آمیزش وجود دارد. آمیزش با تعویض ژن‌ها، بین دو کروموزوم انجام می‌گردد و هر کدام از کروموزوم‌ها خصوصیتی از خود را به فرزندان انتقال می‌دهند. بدیهی است کروموزوم‌هایی که دارای برازندگی بیشتری هستند شانس بیشتری برای آمیزش دارند. مهم‌ترین عملگر در الگوریتم ژنتیک، عملگر ترکیب است. ترکیب، فرایندی است که در آن نسل قدیمی کروموزوم‌ها با یکدیگر مخلوط و ترکیب می‌شوند تا نسل تازه‌ای از کروموزوم‌ها به وجود بیاید. جفت‌هایی که در قسمت انتخاب، به‌عنوان والد در نظر گرفته شدند، در این قسمت ژن‌هایشان را با هم مبادله می‌کنند و اعضای جدید به وجود می‌آورند. ترکیب در الگوریتم ژنتیک باعث از بین رفتن پراکندگی یا تنوع ژنتیکی جمعیت می‌شود، زیرا اجازه می‌دهد ژن‌های خوب یکدیگر را بیابند. از متداول‌ترین روش‌های ترکیب می‌توان به جابجایی دودویی، جابجایی حقیقی، ترکیب تک نقطه، ترکیب دو نقطه، ترکیب  $n$  نقطه، ترکیب یکنواخت و... اشاره کرد. ترکیب به کار رفته در پایان‌نامه کنونی، ترکیب تک نقطه است که در ادامه به بیان آن پرداخته می‌شود. ترکیب تک نقطه متداول‌ترین روش ترکیب می‌باشد. در این روش یک نقطه به‌طور تصادفی در کروموزوم‌های والد انتخاب شده و با هم ترکیب می‌شوند. مثالی از ترکیب تک نقطه در شکل ۳-۴ نمایش داده شده است.

---

<sup>1</sup> Crossover



شکل ۳-۴ مثالی از ترکیب تک نقطه

ترکیب لازم نیست در هر نسل اتفاق بیفتد، در واقع ممکن است نسل‌هایی بدون عملگر ترکیب به نسل‌های جدید تبدیل شوند. برای تعیین رخ دادن یا ندادن ترکیب از پارامتری به نام احتمال ترکیب ( $PC^1$ ) استفاده می‌شود که این پارامتر مقداری بین صفر و یک است. از آنجا که ترکیب نقشی اساسی در رشد مقدار میانگین برازندگی جمعیت دارد، مقدار  $PC$  بین  $0/5$  تا  $0/8$  و بیشتر بین  $0/7$  تا  $0/8$  در نظر گرفته می‌شود. اگر ترکیبی صورت نگیرد، فرزندان دقیقاً همانند والدین خواهند بود. اگر ترکیب صورت بگیرد، فرزندان از بخش‌هایی از کروموزوم‌های والدین به‌وجود می‌آیند. اگر احتمال ترکیب  $100$  درصد باشد، در این صورت همه فرزندان در نتیجه ترکیب به‌وجود آمده‌اند. ولی اگر این احتمال صفر درصد باشد، کل نسل جدید در اثر نسخه برداری عینی کروموزوم‌های نسل قدیم به‌وجود آمده است. ترکیب با این امید صورت می‌گیرد که کروموزوم‌های جدید، حاوی بخش‌های مناسب کروموزوم‌های قدیمی است و در نتیجه کروموزوم‌های جدید بهتر خواهد بود. با این حال خوب است که برخی از قسمت‌های نسل قدیم برای نسل بعدی باقی بمانند.

### ۳-۵-۴ جهش<sup>۲</sup>

در طبیعت برخی از عوامل مانند اشعه ماوراء بنفش باعث به‌وجود آمدن تغییرات غیر قابل پیش‌بینی در کروموزوم‌ها می‌شوند. از آنجا که الگوریتم‌های ژنتیکی از قانون تکامل پیروی می‌کنند در این

<sup>1</sup> Probability Crossover

<sup>2</sup> Mutation

الگوریتم‌ها نیز عملگر جهش با احتمال کم اعمال می‌شود. جهش باعث جستجو در فضاهاى دست نخورده مسأله می‌شود. می‌توان استنباط کرد که مهم‌ترین وظیفه جهش اجتناب از همگرایی به بهینه محلی است. در الگوریتم ژنتیک بعد از اینکه جمعیت جدید به وجود آمد، بعضی از کروموزوم‌ها با احتمال جهش، جهش می‌یابند. در جهش ممکن است ژنی از مجموعه ژن‌های جمعیت حذف شود یا ژنی که تا حالا در جمعیت وجود نداشته است به آن اضافه شود. جهش یک ژن به معنای تغییر آن ژن است و وابسته به نوع کدگذاری، روش‌های متفاوت جهش استفاده می‌شود. اگر مرحله جهش صورت نگیرد، فرزندان بلافاصله بعد از ترکیب و بدون هیچ تغییری به وجود می‌آیند. از فواید جهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- از قرار گرفتن الگوریتم ژنتیک در بهینه محلی جلوگیری می‌کند.
- نواحی بیشتری از فضای جستجو را بررسی می‌کند.
- از همگرایی بی‌موقع و زودرس جلوگیری می‌کند.

همان‌طور که گفته شد، هر عضو، بسته به احتمال جهش ( $PM^1$ )، جهش می‌یابد. در الگوریتم ژنتیک بنا به دلایلی مقدار احتمال جهش، بسیار کوچک، مثلاً  $PM = 0.01$  در نظر گرفته می‌شود. در هر حال  $PM$  بین صفر تا یک است و معمولاً عدد کوچکی انتخاب می‌شود. نرخ بالای احتمال جهش باعث بروز مشکلات زیر می‌شود:

- الگوریتم ژنتیک به جستجوی کاملاً تصادفی تبدیل می‌شود.
- باعث تنوع و پراکندگی بیش از حد در جمعیت می‌شود که این پراکندگی ممکن است همگرایی را به تأخیر بیندازد.

از روش‌های پیاده‌سازی جهش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

---

<sup>1</sup> Probability Mutation

- جهش باینری
- جهش حقیقی
- تغییر مقدار
- تغییر ترتیب قرارگیری و...

در این پایان‌نامه از روش تغییر مقدار استفاده شده است. این نوع جهش را نمی‌توان برای کدگذاری باینری یا کدگذاری‌های مشابه که امکان تغییر ژن‌ها وجود ندارد، به کار برد. در این جهش به ژنی که شرایط جهش را دارد، مقداری اضافه یا کم می‌شود. اضافه شدن یا کم شدن می‌تواند به تصادف انتخاب شود. مقداری که به ژن افزوده یا کاسته می‌شود، وابسته به محدوده مقدار ژن است و باز می‌تواند به تصادف انتخاب شود. در شکل زیر نمونه‌ای از جهش نشان داده شده است. این جهش خصوصاً برای کدگذاری‌هایی که در آنها، ژن‌ها به صورت اعداد حقیقی هستند مناسب است.

(1.29, 5.68, 2.86, 4.11, 5.55) → (1.29, 5.68, 2.73, 4.22, 5.55)

شکل ۳-۵ جهش: تغییر مقدار

### ۳-۶ اختتام الگوریتم ژنتیک

برای اینکه تشخیص دهیم چه موقع الگوریتم ژنتیک از اجرا متوقف شود، از شیوه‌های مختلفی می‌توان استفاده کرد، که در ادامه به چند روش اشاره می‌شود:

- همگرا شدن کل جمعیت.
- فاصله برازندگی بهترین فرد جمعیت از جمعیت متوسط برازندگی‌ها را در نظر گرفت که در این حالت باید از حد مشخصی کوچک‌تر باشد.
- مقدار تابع هدف از حد مشخصی بیشتر باشد.

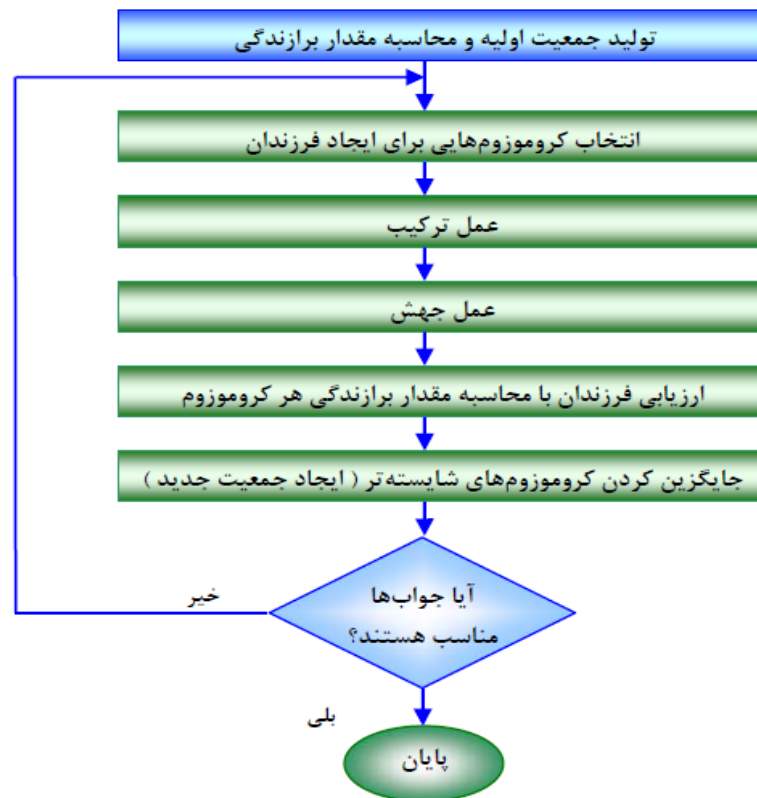
- الگوریتم به تعداد ثابتی از نسل‌ها رسیده باشد که در این پایان‌نامه از این روش استفاده شده است.
- به‌دست آوردن جواب نهایی مورد نظر بعد از چند تکرار کم و قابل قبول بودن جواب به‌ازای خطای خاص.
- اگر با پیش‌روی الگوریتم هیچ نوع بهبودی مشاهده نشد. خواه الگوریتم جواب دلخواه را پیدا کرده باشد و یا اینکه در بهینه محلی گیر کرده باشد.
- اگر مقدار میانگین تابع هدف به‌ازای تعدادی تکرار به مقدار خاصی رسیده باشد.
- بیشترین درجه برازش فرزندان حاصل شود یا دیگر نتایج بهتری حاصل نشود.
- بازرسی دستی.
- ترکیب‌های بالا.

### ۳-۷ مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک

پس از بیان مفاهیم اولیه و عملگرهای الگوریتم ژنتیک، مراحل مختلف در استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا با توجه به‌صورت مسأله، متغیرهایی که باید تعیین شوند، مشخص می‌شوند. سپس این متغیرها به نحو مناسبی کدگذاری شده و به شکل کروموزوم نمایش داده می‌شوند. براساس تابع هدف، یک تابع برازندگی برای کروموزوم‌ها تعریف می‌گردد و یک جمعیت اولیه دلخواه نیز به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود. به دنبال آن، میزان تابع برازندگی برای هر کروموزوم جمعیت اولیه محاسبه می‌شود. سپس مراحل که در شکل ۳-۷ نشان داده شده است به‌ترتیب زیر انجام می‌گیرد. آنچه که تاکنون به‌عنوان ساختار کلی الگوریتم ژنتیک ارائه شده است، به‌وسیله گرفنستت<sup>۱</sup> و بیکر<sup>۲</sup> ارائه گردیده است [۸۳].

<sup>1</sup> Gerfenstet

<sup>2</sup> Baker



شکل ۳-۶ مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک [۸۴]

حال مراحل اجرای الگوریتم ژنتیک را به تفصیل بیان می‌کنیم:

مرحله ۱: در این مرحله تعداد مناسبی از زوج کروموزوم‌ها براساس میزان برازندگی آنها انتخاب می‌شوند تا در مراحل بعدی مورد استفاده قرار گیرند. کروموزوم‌هایی که دارای مقدار برازندگی بالایی هستند، ممکن است چندین بار در مراحل تولید انتخاب شوند، در حالی که کروموزوم‌هایی که مقدار برازندگی آنها کم می‌باشد، ممکن است هیچ‌گاه انتخاب نگردند. ساده‌ترین روش برای اجرای این مرحله، استفاده از چرخ رولت است که در بخش ۳-۵-۲ معرفی گردید.

مرحله ۲: در این مرحله عملگر ترکیب با احتمال ترکیب بر روی کروموزوم‌های والد عمل کرده و با ترکیب آنها کروموزوم‌های جدیدی (فرزندان) را تولید می‌کند.

مرحله ۳: در این مرحله عملگر جهش با احتمال جهش بر روی کروموزوم‌های حاصل از عمل ترکیب انجام شده و با تغییر ژن‌های این کروموزوم‌ها، راهی برای ورود اطلاعات جدید به‌وجود می‌آورد.

مرحله ۴: در این مرحله به منظور ارزیابی فرزندان، مقدار برآزندگی کروموزوم‌های جدید محاسبه می‌گردد.

مرحله ۵: در این مرحله جمعیت جدید برای ورود به مرحله بعدی الگوریتم، انتخاب می‌گردد. این کار با مقایسه مقدار برآزندگی کروموزوم‌ها انجام می‌شود و کروموزوم‌های شایسته‌تر انتخاب می‌شوند.

مرحله ۶: در این مرحله همه افراد جمعیت جدید مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. چنانچه شرایط خاتمه فراهم باشد، الگوریتم پایان می‌پذیرد و در غیر این صورت جمعیت موجود به‌عنوان جمعیت اولیه برای مرحله بعد مورد استفاده قرار می‌گیرد.

### ۳-۸ مزایای الگوریتم ژنتیک

- با متغیرهای پیوسته و هم گسسته می‌تواند عمل بهینه‌سازی را انجام دهد.
- به‌طور هم‌زمان می‌تواند تمامی ناحیه جستجو شونده وسیع تابع هزینه را جستجو کند.
- قادر به بهینه‌سازی مسائل با تعداد متغیرهای زیاد می‌باشد.
- توابع هزینه که بسیار پیچیده می‌باشند نیز از این طریق قابل بهینه‌سازی می‌باشند و الگوریتم در بهینه محلی به دام نمی‌افتد.
- قادر است تا چند جواب بهینه را به‌طور هم‌زمان به‌دست آورد نه فقط یک جواب.
- الگوریتم ژنتیک بر روی مجموعه‌ای از راه‌حل‌ها اعمال می‌شود نه بر روی یک راه‌حل خاص.
- قادر است تا متغیرها را کدبندی نموده و بهینه‌سازی را با متغیرهای کدبندی شده انجام دهد. کدبندی سرعت همگرایی الگوریتم را افزایش می‌دهد.
- به دلیل خصلت موازی بودن و ارزیابی چند رشته به‌طور هم‌زمان، الگوریتم ژنتیک برای مسائلی که فضای راه‌حل بزرگی دارند و غیرخطی هستند، بسیار مفید است.
- الگوریتم ژنتیک هیچ چیزی در مورد مسأله‌ای که حل می‌کند نمی‌داند، به همین دلیل اصطلاحاً به آن الگوریتم کور می‌گویند. الگوریتم ژنتیک برای اجرای جستجوی مؤثر، فقط به مقادیر تابع

هزینه نیاز دارد و دانسته‌های از پیش تعیین شده را نادیده می‌گیرد و کاری به مشتقات و دیگر اطلاعات ندارند. لذا شامل پیچیدگی‌های محاسباتی یا محاسبات اضافی نمی‌شود.

- الگوریتم ژنتیک توانایی تلفیق با دیگر روش‌های بهینه‌سازی را دارد.

### ۳-۹ محدودیت‌های الگوریتم ژنتیک

- مشکل اصلی الگوریتم ژنتیک علی‌رغم سادگی پیاده‌سازی، هزینه اجرای بالای آن است. اغلب حل یک مسأله نیازمند تولید چندین هزار نسل از کروموزوم‌ها است و این مسأله نیاز به زمان زیادی دارد، خصوصاً اگر تعداد جمعیت اولیه هم زیاد بوده و تابع هدف هم تابع پیچیده‌ای باشد.
- مشکل دیگر الگوریتم ژنتیک چگونگی نوشتن عملگر برازندگی یا تابع هدف است، به گونه‌ای که منجر به بهترین راه‌حل برای مسأله گردد. اگر این مورد به خوبی و با قدرت انتخاب نشود ممکن است باعث شود که راه‌حلی برای مسأله پیدا نکنیم یا مسأله‌ای دیگر را به اشتباه حل کنیم.

- الگوریتم ژنتیک یک روش غیر جبری است، بنابراین پاسخ دقیق مسأله را نمی‌یابد و حتی ممکن است برای یک مسأله مشخص با هر بار به کارگیری، پاسخی متفاوت ارائه دهد. اگرچه تمامی این پاسخ‌ها می‌توانند پاسخ‌هایی باشند که دقت مورد نیاز را برآورده کنند.

- مشکل دیگر الگوریتم ژنتیک این است که اگر یک کروموزوم فاصله‌اش با سایر کروموزوم‌های نسل خودش زیاد باشد (خیلی بهتر از بقیه باشد) و خیلی زود دیده شود (ایجاد شود)، ممکن است محدودیت ایجاد کند و راه‌حل را به سوی جواب بهینه محلی سوق دهد. این اتفاق به‌طور معمول در جمعیت‌های کمتر اتفاق می‌افتد.

### ۳-۱۰ کاربردهای الگوریتم ژنتیک

برخی از کاربردهای الگوریتم ژنتیک به شرح زیر است:



- بهینه‌سازی مسائل سخت.
- آنالیز و بهینه‌سازی سیستم‌های دینامیکی غیر خطی.
- پیاده‌سازی ایده‌ها و نقشه‌های مهم و استراتژیک.
- طراحی مسیر حرکت ربات‌ها و مسیر راکت‌ها.
- بهینه‌سازی ساختار مولکولی شیمیایی (شیمی).
- ساخت آنتن‌های خمیده (مهندسی برق).
- حل مسأله فروشنده دوره‌گرد.



فصل ۴: نتایج تحلیل و بهینه‌سازی کمانش صفحه کامپوزیت مربعی

حاوی گشودگی‌های مختلف

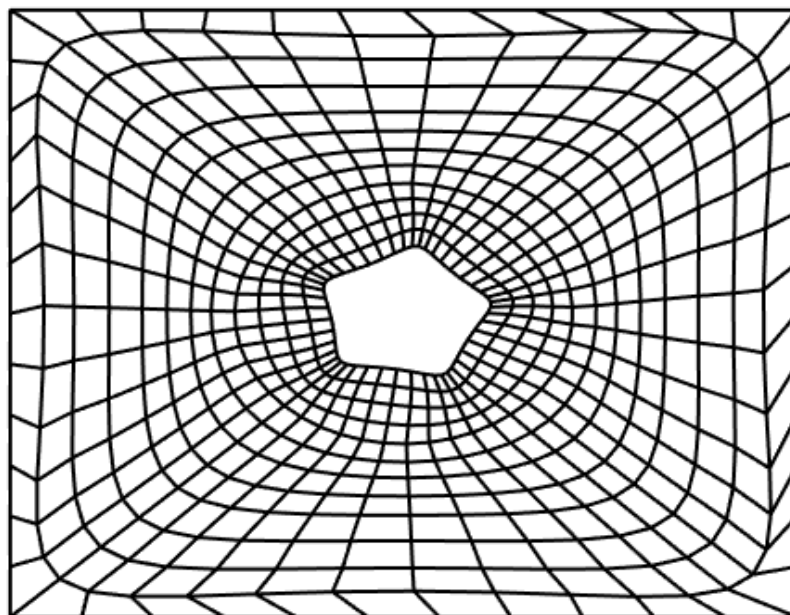
## ۱-۴ مقدمه

در این فصل ابتدا همگرایی تعداد المان‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. سپس به منظور بررسی دقت نتایج حاصل از تحقیق حاضر، نتایج آن با دیگر مطالعات انجام شده در این زمینه، اعتبارسنجی شده است. در نهایت برای گشودگی‌های مختلف، متغیرهای مؤثر بر الگوریتم ژنتیک و همچنین پارامترهای مؤثر بر کماتش حرارتی، به صورت جداگانه مورد بررسی و بهینه‌سازی قرار گرفته است.

## ۲-۴ بررسی همگرایی دمای بحرانی کماتش به ازای تعداد المان‌های

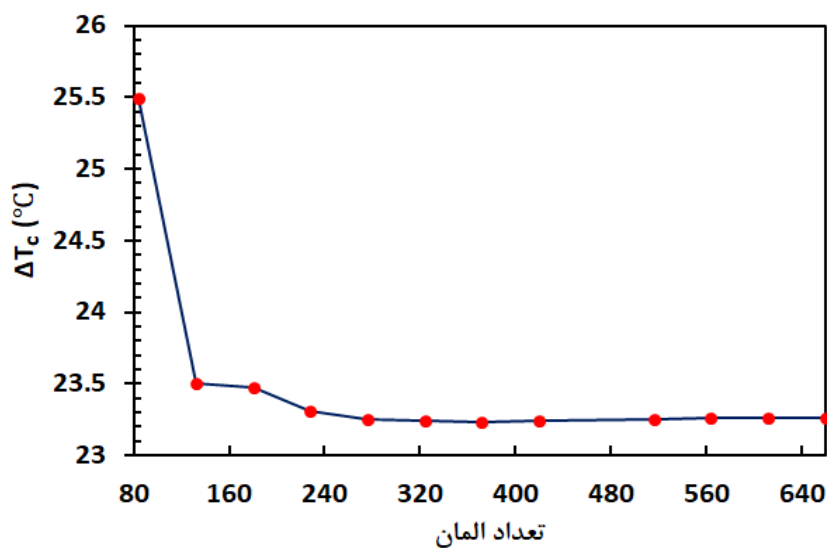
### مختلف

شکل ۱-۴ مش‌بندی اجزای محدود یک صفحه حاوی گشودگی پنج ضلعی به ازای  $\mu = 0.1$  واقع در مرکز صفحه را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۴ شکل ۴ پیکربندی مش

برای مطالعه‌ی حساسیت مش کد اجزای محدود آماده شده، نمودار همگرایی دمای بحرانی کمانش به‌ازای تعداد المان‌های مختلف برای یک صفحه کامپوزیت هیبریدی متقارن با چیدمان لایه‌ها به‌صورت  $[G/B/B/G]$  و با زاویه الیاف  $[90_G / -90_B]_s$  که حاوی گشودگی دایروی در مرکز خود می‌باشد، به‌دست آورده شده است (شکل ۲-۴). قطر گشودگی دایروی برابر با  $20\text{ mm}$  و شرایط مرزی چهار طرف گیردار (CCCC) در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل ۲-۴ دمای بحرانی کمانش با افزایش تعداد المان‌های به بیش از ۵۶۴ تغییری نخواهد کرد. هم‌چنین تعداد المان در کار حاضر بر انتخاب صحیح مد اول کمانش تأثیرگذار است و اگر تعداد المان‌ها کمتر از ۵۶۴ باشد، مد اول کمانش به‌درستی انتخاب نمی‌شود. بنابراین در این تحقیق تعداد کل المان‌ها برابر با ۵۶۴ در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۲-۴ همگرایی دمای بحرانی کمانش به‌ازای تعداد المان‌های مختلف

## ۲-۴ اعتبارسنجی نتایج پایان‌نامه کنونی

به‌منظور اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده، دمای کمانش برای صفحات کامپوزیت هیبریدی مربعی بدون گشودگی و با گشودگی دایروی با چیدمان لایه‌های متقارن و پادمتقارن برای نسبت‌های مختلف قطر به اندازه صفحه  $(D/a)$  با مرجع [۳۶]، مقایسه شده و نتایج حاصل در جدول ۴-۱ آورده شده است.

بالاترین خطای مربوط بین کار حاضر و مرجع [۳۶]، ۳/۰۴ درصد است. این اعتبارسنجی نشان از دقت کد آماده شده در تعیین دمای بحرانی کمانش صفحات کامپوزیتی دارد.

جدول ۴-۱ مقایسه دمای بحرانی کمانش ( $^{\circ}\text{C}$ ) به دست آمده توسط کار حاضر و مرجع [۳۶]، به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست آمده در این پایان نامه

$D/a$	[G/B/B/G]			[G/B/G/B]		
	مرجع [۳۶]	کار حاضر	درصد اختلاف	مرجع [۳۶]	کار حاضر	درصد اختلاف
0	21.67	21.70	0.14	46.29	46.1	0.41
0.1	21.46	21.32	0.65	45.85	44.46	3.04
0.2	23.13	23.26	0.56	48.47	48.54	0.14
0.3	29.58	29.13	1.52	54.15	53.26	1.64
0.4	35	34.87	0.37	63.32	63.43	0.17
0.5	47.71	47.38	0.69	87.34	87.16	0.20

همچنین به منظور اعتبارسنجی بهینه‌سازی پایان نامه کنونی، بهینه‌سازی دمای بحرانی کمانش یک صفحه کامپوزیت هیبریدی چهار لایه متقارن از لحاظ ماده به صورت [G/B/B/G] حاوی گشودگی شبه مثلثی واقع در مرکز صفحه و شرایط مرزی چهار طرف گیردار با دو الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و کلونی زنبور عسل مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده (جدول ۴-۲) حاکی از درستی نتایج به دست آمده توسط الگوریتم ژنتیک می‌باشد.

جدول ۴-۲ مقایسه بهینه‌سازی کمانش حرارتی یک صفحه کامپوزیت هیبریدی حاوی گشودگی شبه مثلثی با الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات و کلونی زنبور عسل

Optimization Algorithms	$\mu$	$\beta^{\circ}$	$D/a$	$\theta^{\circ}$ [G/B/B/G]	$\Delta T_c$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Run time (hr)
Genetic Algorithm	0.33	90	0.665	[-64.80/38.36/38.33/-64.65]	73.13	91.25
Particle Swarm Optimization	0.33	22.5	0.665	[13.39/-54.35/-54.35/13.57]	71.23	85.21
Artificial Bee Colony	0.33	90	0.665	[-10.20/48.56/51.30/-37.25]	71.03	119.3

## ۳-۴ گشودگی شبه مثلثی

در این بخش، بهینه‌سازی دمای بحرانی کمانش یک صفحه کامپوزیت هیبریدی با گشودگی شبه مثلثی واقع در مرکز صفحه مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا متغیرهای مؤثر بر الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی می‌شوند. سپس پارامترهای مؤثر بر کمانش حرارتی به صورت مجزا و کلی مورد بهینه‌سازی قرار می‌گیرند. اگر در رابطه (۱-۲) که برای ایجاد گشودگی‌هایی با هندسه‌های مختلف در فصل ۲ به آن اشاره شد، مقدار  $n=2$  قرار داده شود، به ازای  $0^\circ \leq \gamma \leq 360^\circ$  و برای  $\mu$ های مختلف که برای گشودگی شبه مثلثی در بازه  $0 \leq \mu \leq 0.33$  قرار دارد، مثلث‌هایی با انحنای مختلف ایجاد می‌شود. حد پایین و بالای پارامترهای مؤثر بر کمانش  $[\mu D/a \beta \theta]$  برای گشودگی شبه مثلثی که بهینه‌سازی می‌شوند به ترتیب برابر هستند با  $[0.00 - 90]$  تا  $[0.33 \ 0.665 \ 180 \ 90]$ .

### ۳-۴-۱ بررسی متغیرهای مؤثر بر الگوریتم ژنتیک ( $GA^1$ )

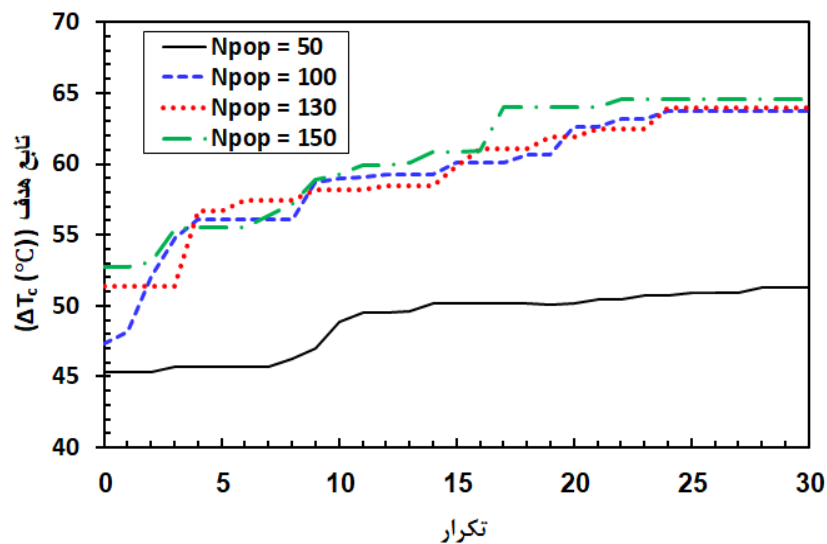
متغیرهای مؤثر بر الگوریتم ژنتیک بر سرعت همگرایی، همگرایی زودرس، مدت زمان حل مسأله و رسیدن به راه حل بهینه تأثیر می‌گذارند. با تغییر این متغیرها و بهینه‌سازی آنها، می‌توان یک الگوریتم با کارایی بالا به دست آورد. متغیرهای مؤثر بر الگوریتم ژنتیک از قبیل تعداد جمعیت، احتمال ترکیب و احتمال جهش برای یک صفحه کامپوزیتی هیبریدی چهار لایه متقارن از لحاظ ماده به صورت  $[G/B/B/G]$  و شرایط مرزی چهار طرف گیردار مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای طراحی  $D/a$ ،  $\theta$ ،  $\beta$  و  $\mu=0.12$  می‌باشند.

### ۳-۴-۱-۱ بررسی تأثیر اندازه جمعیت ( $Npop^2$ ) بر الگوریتم ژنتیک

<sup>1</sup> Genetic Algorithm

<sup>2</sup> Number of Population

نمودار همگرایی تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف جمعیت در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، به‌ازای جمعیت اولیه ۵۰ روند همگرایی دیرتر اتفاق می‌افتد و علاوه بر آن در تکرار ۳۰، مسأله به بهینه مطلق همگرا نشده است. نتایج نشان می‌دهد که برای جمعیت اولیه ۱۰۰، ۱۳۰ و ۱۵۰ می‌توان بهترین همگرایی را به‌دست آورد. باید به این نکته توجه داشت که اگرچه با افزایش جمعیت، الگوریتم ژنتیک فضای طراحی بیشتری را جستجو می‌کند ولی انتخاب جمعیت‌های بزرگ‌تر مدت زمان حل مسأله را به شدت طولانی‌تر می‌کند. بر این اساس مطابق شکل ۳-۴، اندازه جمعیت بهینه برای تمام حالات برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. هم‌چنین جدول ۳-۴ پارامترهای طراحی و مقادیر تابع هدف مربوط به آنها، به‌ازای مقادیر مختلف جمعیت آورده شده است.



شکل ۳-۴ نمودار همگرایی تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف  $N_{pop}$

جدول ۳-۴ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها به‌ازای مقادیر مختلف اندازه جمعیت ( $PM = 0.03$  و  $PC = 0.1$ )

$N_{pop}$	$\beta^\circ$	$D/a$	$\theta^\circ [G/B/B/G]$	$\Delta T_c$ ( $^\circ C$ )	Run time (hr)
50	112.5	0.52	[-34.32/39.11/27.63/53.89]	51.33	57.10
100	67.5	0.55	[-29.53/49.89/51.50/-23.19]	63.71	81.23
130	67.5	0.55	[-37.08/54.60/52.26/-14.18]	63.95	105.51
150	67.5	0.55	[26.59/-55.55/-53.26/19.37]	64.61	163.44

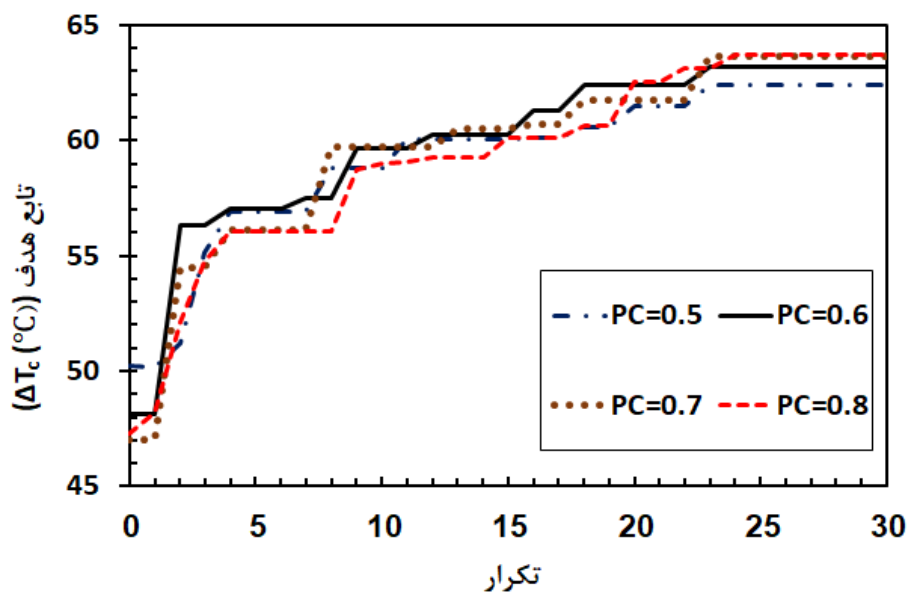


### ۲-۱-۳-۴ بررسی تأثیر احتمال ترکیب (PC) بر الگوریتم ژنتیک

نمودار همگرایی تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف احتمال ترکیب در شکل ۴-۴ نشان داده شده است. هم‌چنین در جدول ۴-۴ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و مقدار تابع هدف مربوط به آنها، به‌ازای مقادیر مختلف احتمال ترکیب آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۴-۴ دیده می‌شود، به‌ازای  $PC = 0.5$  مسأله به بهینه مطلق همگرا نشده است. ولی با تغییر این پارامتر در محدوده ۰/۶ تا ۰/۸ تأثیر قابل توجهی بر پاسخ نهایی و سرعت همگرایی دیده نمی‌شود. در نتیجه مقدار احتمال ترکیب برابر با ۰/۸ در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۴-۴ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها به‌ازای مقادیر مختلف  $PC$  ( $N_{pop} = 100$ ) و  $(PM = 0.3)$

$PC$	$\beta^\circ$	$D/a$	$\theta^\circ [G/B/B/G]$	$\Delta T_c$ ( $^\circ C$ )	Run time (hr)
0.5	112.5	0.55	[-36.93/35.34/35.45/-44.11]	62.44	70.50
0.6	90	0.55	[18.88/-55.73/-51.26/18.04]	63.22	77.36
0.7	135	0.55	[26.95/-54.97/-48.22/27.21]	63.63	84.12
0.8	67.5	0.55	[-29.53/49.89/51.50/-23.19]	63.71	81.23



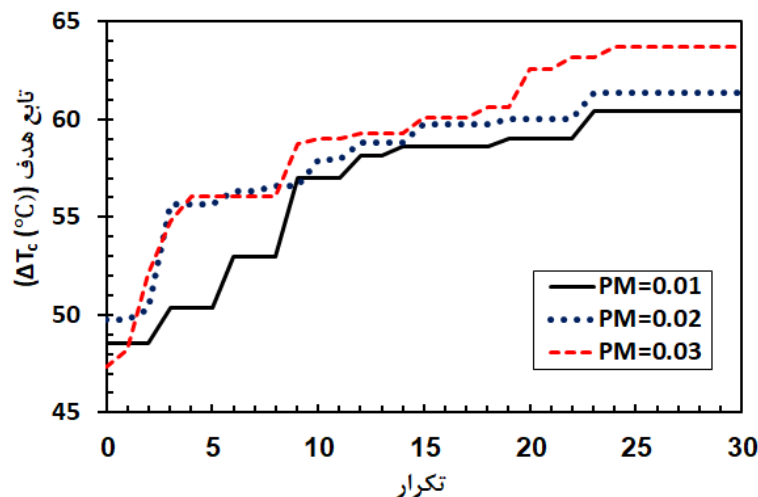
شکل ۴-۴ نمودار همگرایی تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف  $PC$

### ۳-۱-۳-۴ بررسی تأثیر احتمال جهش ( $PM$ ) بر الگوریتم ژنتیک

شکل ۵-۴ تأثیر مقادیر مختلف احتمال جهش بر تابع هدف را نشان می‌دهد. هم‌چنین در جدول ۵-۴ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و مقادیر تابع هدف مربوط به آنها، به‌ازای مقادیر مختلف احتمال جهش آورده شده است. با توجه به شکل ۵-۴ این پارامتر تأثیر قابل توجهی بر پاسخ نهایی و سرعت همگرایی ندارد. بنابراین مقدار احتمال جهش برابر با ۰/۰۳ در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۵-۴ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها به‌ازای مقادیر مختلف  $PM$  ( $Npop = 100$ ) و  $(PC = 0.8)$

$PM$	$\beta^\circ$	$D/a$	$\theta^\circ [G/B/B/G]$	$\Delta T_c$ ( $^\circ C$ )	Run time (hr)
0.01	67.50	0.54	[38.26/-44.23/-45.14/7.01]	60.45	81.11
0.02	90	0.55	[3.96/-59.56/-59.31/-6.71]	61.38	80.47
0.03	67.5	0.55	[-29.53/49.89/51.50/-23.19]	63.71	81.23



شکل ۵-۴ نمودار همگرایی تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف  $PM$

### ۲-۳-۴ بررسی تأثیر پارامترهای طراحی بر بار کمانش حرارتی

هدف از بررسی تأثیر پارامترهای طراحی بر بار کمانش حرارتی، مشخص کردن اهمیت هر یک از پارامترهای طراحی بر تغییرات بار کمانش حرارتی بهینه است. برای این منظور، به‌ازای چند مقدار خاص

از پارامترهای طراحی مقادیر بهینه سایر پارامترها و تابع هدف مربوط به آنها برای شرایط مرزی چهار طرف گیردار و چیدمان لایه‌های متقارن از لحاظ نوع ماده به صورت  $[G/B/B/G]$  محاسبه شده است. در نهایت، با در نظر گرفتن تمام پارامترهای طراحی در شرایط مرزی مختلف و چیدمان متفاوت لایه‌ها سعی می‌شود، مقادیر بهینه تمام پارامترهای طراحی، برای دستیابی به بیشترین مقدار تابع هدف محاسبه شود.

### ۴-۳-۲-۱ بررسی تأثیر نرمینگی گوشه‌های گشودگی ( $\mu$ )

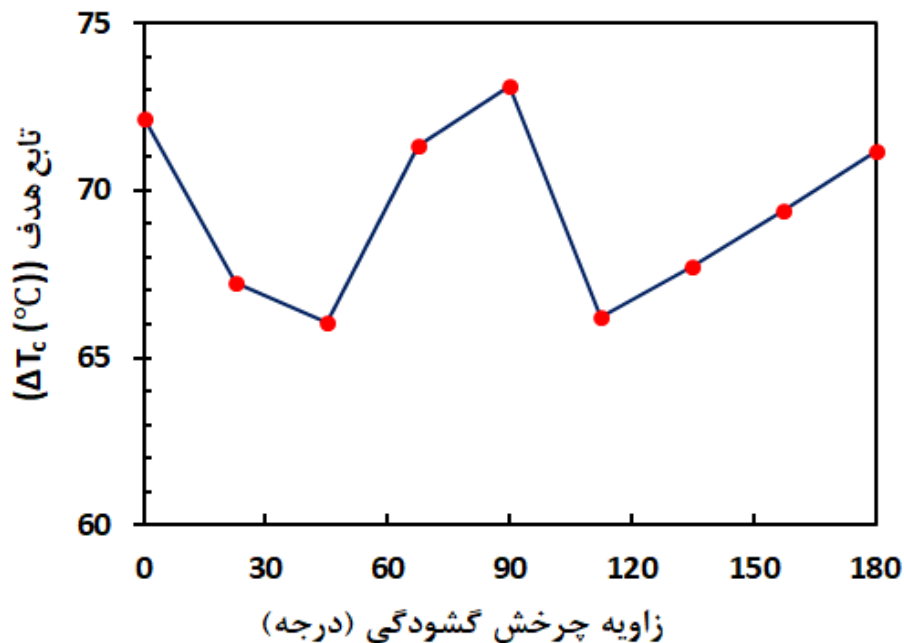
در این بخش تأثیر نرمینگی گوشه‌های گشودگی بر دمای بحرانی کمانش بررسی شده است. برای بهتر نشان داده شدن این تأثیر، فاکتور بزرگ‌نمایی ( $\lambda$ ) ۲۰ در نظر گرفته شده است. به‌ازای نرمینگی‌های مختلف، سایر پارامترهای طراحی از قبیل زاویه الیاف، زاویه چرخش گشودگی، نسبت اندازه گشودگی به اندازه صفحه، بهینه‌سازی شده و در جدول ۴-۶ آورده شده است. در این بررسی مشخص شد که با افزایش نرمینگی گوشه‌های گشودگی دمای بحرانی کمانش نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۴-۶ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها به‌ازای  $\lambda=20$  و نرمینگی‌های مختلف

$\mu$	$\beta^\circ$	$D/a$	$\theta^\circ [G/B/B/G]$	$\Delta T_c$ (°C)	Run time (hr)
0	22.5	0.40	[-29.14/55.00/55.00/-29.14]	42.50	93.03
0.05	22.5	0.42	[-28.73/55.23/55.23/-28.73]	42.6	91.26
0.1	22.5	0.44	[-27.55/56.05/56.05/-27.55]	43.03	87.39
0.15	22.5	0.46	[-10.96/70.94/70.94/-10.96]	43.49	97.56
0.2	22.5	0.48	[-14.16/68.53/68.53/-14.16]	44.73	100.13
0.25	22.5	0.50	[-15.84/67.78/67.78/-15.84]	46.01	76.51
0.3	135	0.52	[-29.96/59.56/59.56/-29.95]	47.95	83.19

#### ۲-۲-۳-۴ بررسی تأثیر زاویه چرخش گشودگی ( $\beta$ )

در این بخش، تأثیر مقادیر پارامترهای طراحی بهینه بر تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف زاویه چرخش گشودگی بررسی شده است. برای مقادیر خاصی از زاویه چرخش گشودگی، مقدار بار کمانش حرارتی بهینه به‌ازای سایر مقادیر پارامترهای طراحی بهینه در شکل ۴-۶ آورده شده است. با توجه به شکل ۴-۶ می‌توان مشاهده کرد که زاویه چرخش  $45^\circ$  به حداقل دمای بحرانی کمانش و زاویه چرخش  $90^\circ$  به بالاترین دمای بحرانی کمانش منتهی می‌شود.



شکل ۴-۶ تغییر تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف زاویه چرخش گشودگی

#### ۳-۲-۳-۴ بررسی تأثیر نسبت اندازه گشودگی به اندازه صفحه ( $D/a$ )

نسبت اندازه گشودگی به اندازه صفحه تأثیر زیادی بر دمای بحرانی کمانش دارد. به‌منظور نشان دادن تأثیر این پارامتر، به‌ازای مقادیر خاصی از  $D/a$ ، مقادیر بهینه سایر پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط

به آنها در جدول ۴-۷ آورده شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش  $D/a$ ، دمای بحرانی کمانش نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۴-۷ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی به‌ازای مقادیر مختلف  $D/a$

$D/a$	$\mu$	$\beta^\circ$	$\theta^\circ$ [G/B/B/G]	$\Delta T_c$ (°C)	Run time (hr)
0.133	0.33	0	[-52.56/61.79/61.79/-52.56]	24.68	75.44
0.266	0.33	112.5	[-45.24/44.15/44.15/-45.24]	26.55	90.23
0.399	0.33	45	[-0.20/-90/-90/-90]	32.58	88.46
0.532	0.33	135	[-30.46/60.36/60.36/-30.47]	49.32	82.24
0.665	0.33	90	[-64.80/38.36/38.33/-64.65]	73.13	91.25

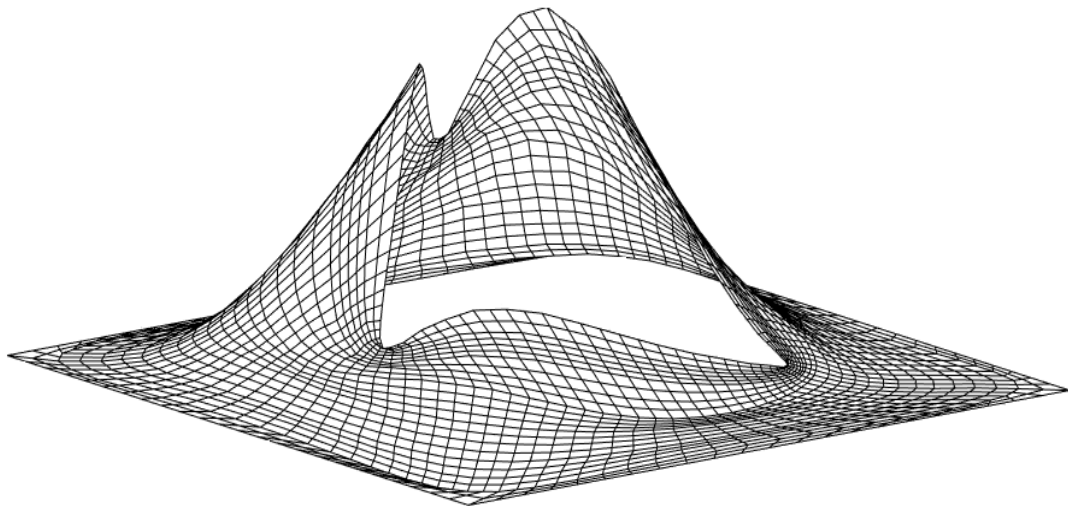
#### ۴-۳-۲-۴ بررسی تأثیر شرایط مرزی

شرایط مرزی لبه‌های یک صفحه کامپوزیت هیبریدی که تحت بار حرارتی قرار دارد، اثر قابل توجهی بر دمای بحرانی کمانش دارند. در این بخش، تأثیر شرایط مرزی ساده و گیردار روی چهار لبه صفحه کامپوزیت هیبریدی با چیدمان لایه‌ها به‌صورت [G/B/B/G]، بر بار کمانش حرارتی بررسی شده است. مقادیر بهینه تابع هدف به‌ازای تمامی مقادیر پارامترهای طراحی بهینه شده در شرایط مرزی مختلف در جدول ۴-۸ آورده شده است. با توجه به جدول ۴-۸ می‌توان نتیجه گرفت که صفحه با شرایط مرزی چهار طرف گیردار (CCCC) در مقایسه با صفحه با شرایط مرزی چهار طرف ساده (SSSS) مقاومت بیشتری در برابر کمانش حرارتی دارد.

جدول ۴-۸ مقادیر بهینه پارمترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها در شرایط مرزی مختلف برای یک صفحه کامپوزیتی حاوی گشودگی شبه مثلثی

Boundary conditions	$\mu$	$\beta$	$D/a$	$\theta$ [G/B/B/G]	$\Delta T_c$ (°C)	Run time (hr)
CCCC	0.33	90	0.665	[-64.80/38.36/38.33/-64.65]	73.13	91.25
SSSS	0.33	0	0.665	[45.65/-43.41/-43.41/45.65]	20.52	86.41

شکل مد اول کمانش صفحه با گشودگی شبه مثلثی واقع در مرکز با شرایط مرزی چهار طرف گیردار که مشخصات آن نیز در جدول ۴-۸ آمده است، در شکل ۴-۷ نشان داده شده است.



شکل ۴-۷ مد اول کمانش صفحه حاوی گشودگی شبه مثلثی واقع در مرکز

#### ۴-۳-۵ بررسی تأثیر چیدمان لایه‌ها

در این بخش سعی شده تا تأثیر چیدمان لایه‌ها بر دمای بحرانی کمانش در شرایط مرزی چهار طرف گیردار نشان داده شود. برای این منظور مقدار بهینه دمای بحرانی کمانش، به‌ازای تمامی پارامترهای طراحی بهینه در جدول ۴-۹ آورده شده است. با توجه به جدول ۴-۹ می‌توان نتیجه گرفت که خواص مکانیکی و چیدمان لایه‌ها، تأثیر قابل توجهی بر کمانش حرارتی دارند. نتایج نشان داد که کامپوزیت هیبریدی متقارن از لحاظ نوع ماده با چیدمان لایه‌ها به‌صورت [B/G/G/B] حاوی گشودگی شبه مثلثی

نسبت به دیگر چیدمان لایه‌ها مقاومت بیشتری در برابر کمانش حرارتی دارد و کامپوزیت هیبریدی با چیدمان لایه‌ها به صورت [G/B/B/G] حاوی گشودگی شبه مثلثی کمترین مقاومت را در برابر کمانش حرارتی دارد. هم‌چنین می‌توان نتیجه گرفت که در تمام چیدمان لایه‌ها، صفحه کامپوزیتی با گشودگی شبه مثلثی نسبت به گشودگی دایروی بار کمانش حرارتی بیشتری دارد.

جدول ۴-۹ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها در شرایط مرزی CCCC و چیدمان متفاوت لایه‌ها

Stacking sequences	$\mu$	$\beta^\circ$	$D/a$	$\theta^\circ$	$\Delta T_c$ ( $^\circ C$ )	Run time (hr)
[B/G/G/B]	0.33	180	0.665	[90/90/-90/90]	152.16	92.33
[B/B/B/B]	0.33	180	0.665	[90/-7.98/-90/-10.38]	148.10	89.54
[G/B/G/B]	0.33	180	0.665	[8.81/-80.62/90/-80.54]	106.89	97.01
[B/G/B/G]	0.33	0	0.665	[90/90/-85.74/-90]	94.55	95.16
[G/G/G/G]	0.33	180	0.665	[20.14/-60.56/29.63/-50.50]	85.14	90.53
[G/G/B/B]	0.33	0	0.665	[59.18/90/-36.53/-42.65]	82.70	90.58
[B/B/G/G]	0.33	180	0.665	[37.67/34.27/90/-90]	80.17	94.34
[G/B/B/G]	0.33	90	0.665	[-64.80/38.36/38.33/-64.65]	73.13	91.25

#### ۴-۴ گشودگی شبه مربعی

در این بخش، بهینه‌سازی دمای بحرانی کمانش یک صفحه کامپوزیت هیبریدی با گشودگی شبه مربعی واقع در مرکز صفحه مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابتدا متغیرهای مؤثر بر الگوریتم ژنتیک مورد بهینه‌سازی قرار می‌گیرند. سپس پارامترهای مؤثر بر کمانش حرارتی به صورت مجزا و کلی بهینه‌سازی می‌شوند. اگر در رابطه (۱-۲) که برای ایجاد گشودگی‌هایی با هندسه‌های مختلف در فصل ۲ به آن اشاره شد، مقدار  $n=3$  قرار داده شود، برای  $\mu$ های مختلف که برای گشودگی شبه مربعی در بازه  $0 \leq \mu \leq 0.3$  قرار دارد، به ازای  $0^\circ \leq \gamma \leq 360^\circ$ ، شبه مربع‌هایی با انحنای مختلف ایجاد می‌شود. حد پایین و بالای

پارامترهای مؤثر بر کمانش  $[\mu D/a \beta \theta]$  برای گشودگی شبه مربعی که بهینه‌سازی می‌شوند به ترتیب برابر هستند با  $[0.00 - 90]$  تا  $[0.13 \ 0.65 \ 180 \ 90]$ .

#### ۴-۴-۱ بررسی متغیرهای مؤثر بر الگوریتم ژنتیک

مشابه گشودگی شبه مثلثی که در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفت، برای گشودگی شبه مربعی، متغیرهای مؤثر بر الگوریتم ژنتیک از قبیل تعداد جمعیت، احتمال ترکیب و احتمال جهش برای یک صفحه کامپوزیتی هیبریدی چهار لایه متقارن از لحاظ ماده به صورت  $[G/B/B/G]$  و شرایط مرزی چهار طرف گیردار مورد بررسی قرار گرفته است. پارامترهای طراحی  $D/a, \beta, \theta$  و  $\mu=0.12$  می‌باشند.

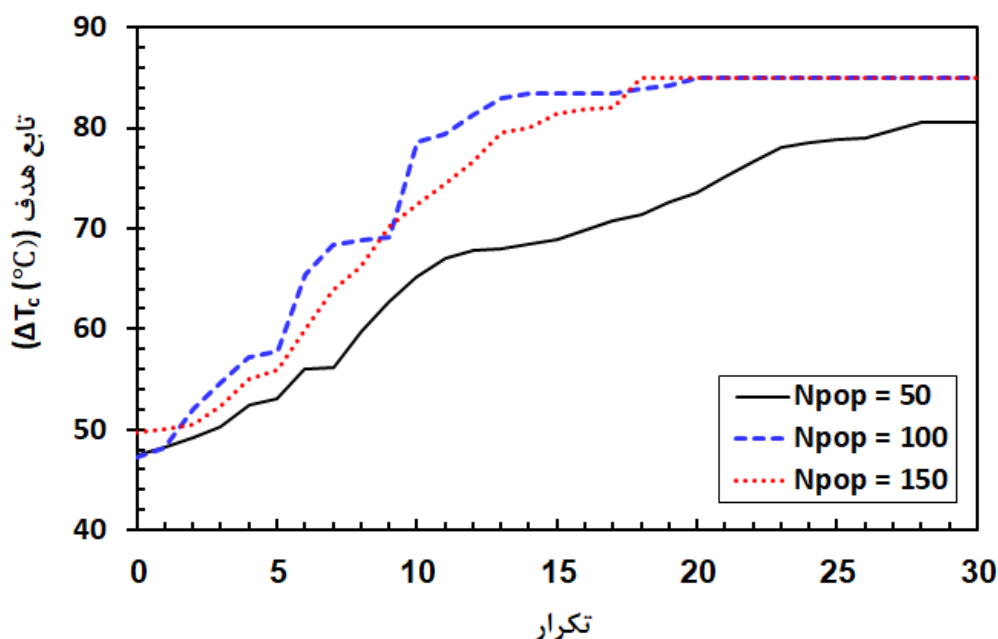
#### ۴-۴-۱-۱ تأثیر اندازه جمعیت بر الگوریتم ژنتیک

نمودار همگرایی تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف جمعیت در شکل ۴-۸ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، به‌ازای جمعیت اولیه ۵۰ روند همگرایی دیرتر اتفاق می‌افتد و علاوه بر آن در تکرار ۳۰، مسأله به بهینه مطلق همگرا نشده است. نتایج نشان می‌دهد که برای جمعیت اولیه ۱۰۰ و ۱۵۰، می‌توان بهترین همگرایی را به‌دست آورد. باید به این نکته توجه داشت که اگر چه با افزایش جمعیت، الگوریتم ژنتیک فضای طراحی بیشتری را جستجو می‌کند ولی انتخاب جمعیت‌های بزرگ‌تر مدت زمان حل مسأله را به شدت طولانی‌تر می‌کند. بر این اساس مطابق شکل ۴-۸، اندازه جمعیت بهینه برای تمام حالات برابر با ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. هم‌چنین جدول ۴-۱۰ پارامترهای طراحی و مقادیر تابع هدف مربوط به آنها، به‌ازای مقادیر مختلف جمعیت آورده شده است.



جدول ۴-۱۰ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها به‌ازای مقادیر مختلف اندازه جمعیت  
( $PM=0.3$  و  $PC=0.8$ )

$N_{pop}$	$\beta^\circ$	$D/a$	$\theta^\circ$ [G/B/B/G]	$\Delta T_c$ ( $^\circ\text{C}$ )	Run time (hr)
50	67.5	0.60	[-67.18/22.55/22.94/-58.49]	80.62	82.35
100	135	0.60	[16.02/90/-90/-8.45]	85.04	101.03
150	135	0.60	[14.96/89.68/-89.29/-10.47]	85.06	136.15



شکل ۴-۸ نمودار همگرایی تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف  $N_{pop}$

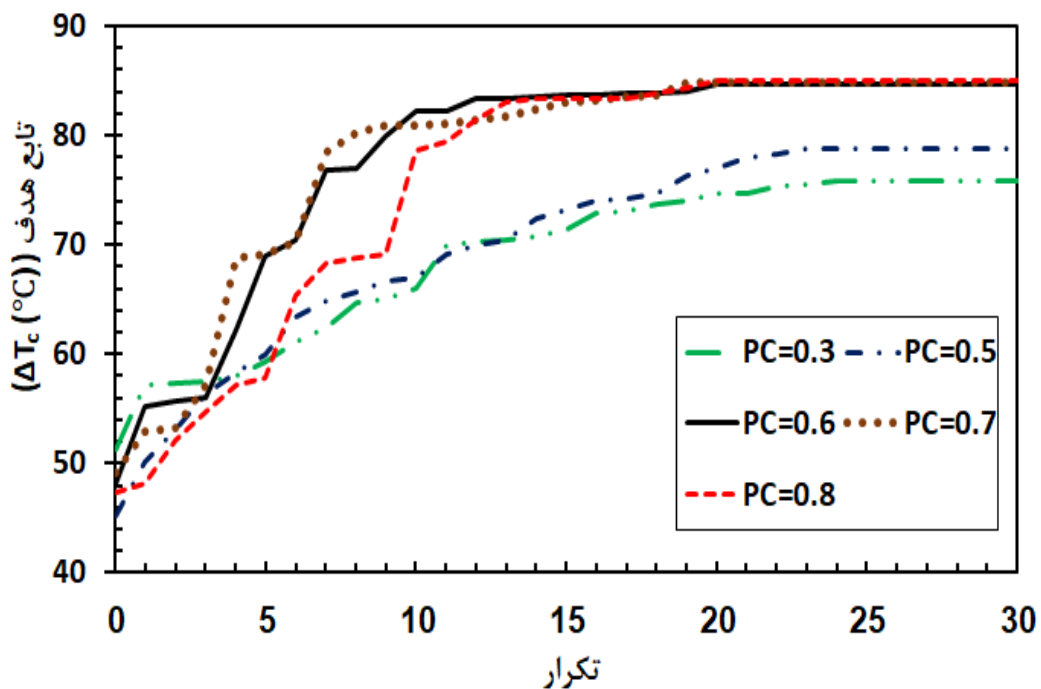
#### ۴-۱-۲ بررسی تأثیر احتمال ترکیب بر الگوریتم ژنتیک

نمودار همگرایی تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف احتمال ترکیب در شکل ۴-۹ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۴-۱۱ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و مقدار تابع هدف مربوط به آنها، به‌ازای مقادیر مختلف احتمال ترکیب آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۴-۹ دیده می‌شود، به‌ازای  $PM=0.3$  و  $PC=0.5$  مسأله به بهینه مطلق همگرا نشده است. ولی با تغییر این پارامتر در محدوده  $0.6$  تا

۰/۸ تأثیر قابل توجهی بر پاسخ نهایی و سرعت همگرایی دیده نمی‌شود. در نتیجه مقدار احتمال ترکیب برابر با ۰/۸ در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۴-۱۱ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها به‌ازای مقادیر مختلف  $PC$  ( $Npop = 100$ ) و  $PM = 0.3$

$PC$	$\beta^\circ$	$D/a$	$\theta$ [G/B/B/G]	$\Delta T_c$ ( $^\circ C$ )	Run time (hr)
0.3	22.5	0.58	[18.26/57.72/61.01/-18.53]	75.81	46.55
0.5	67.5	0.60	[-55.93/28.63/31.16/-58.15]	78.56	59
0.6	135	0.60	[10.17/91.26/-92.20/-13.34]	84.71	99.40
0.7	135	0.60	[7/87.32/-86.35/-9.02]	84.83	100.37
0.8	135	0.60	[16.02/90/-90/-8.45]	85.04	101.03



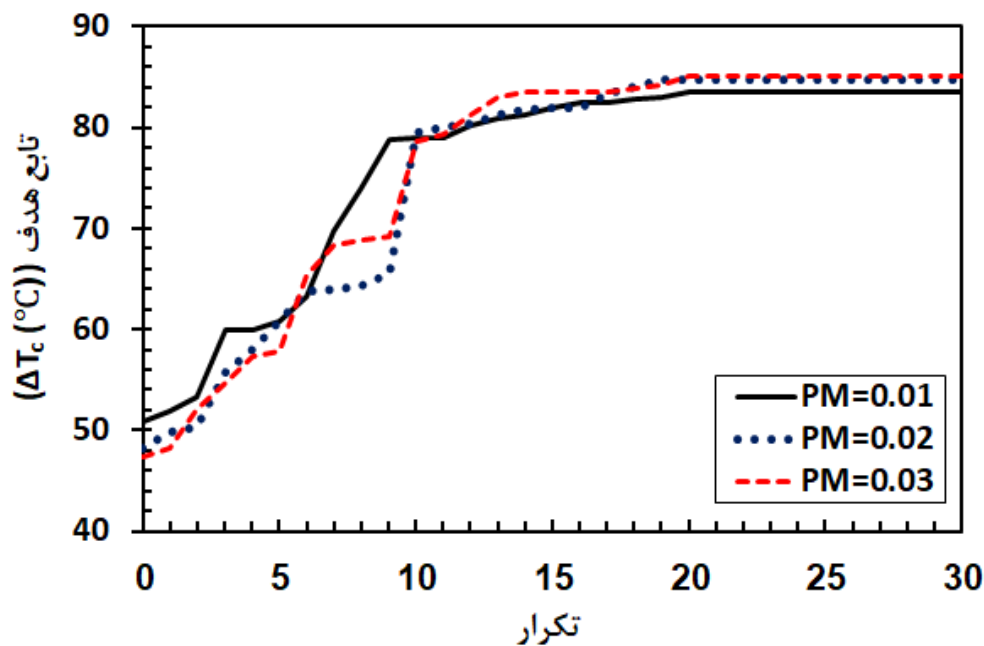
شکل ۴-۹ نمودار همگرایی تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف  $PC$

### ۳-۱-۳-۴ بررسی تأثیر احتمال جهش بر الگوریتم ژنتیک

شکل ۱۰-۴ تأثیر مقادیر مختلف احتمال جهش بر تابع هدف را نشان می‌دهد. همچنین در جدول ۴-۱۲ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و مقدار تابع هدف مربوط به آنها، به‌ازای مقادیر مختلف احتمال جهش آورده شده است. با توجه به شکل ۱۰-۴ این پارامتر تأثیر قابل توجهی بر پاسخ نهایی و سرعت همگرایی ندارد. بنابراین مقدار احتمال جهش برابر با ۰/۰۳ در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۴-۱۲ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها به‌ازای مقادیر مختلف  $PM$  ( $Npop = 100$ ) و  $(PC = 0/8)$

$PM$	$\beta^\circ$	$D/a$	$\theta^\circ$ [G/B/B/G]	$\Delta T_c$ ( $^\circ C$ )	Run time (hr)
0.01	135	0.60	[-3.01/-95.62/93.22/6.12]	83.60	87.35
0.02	135	0.60	[-8.30/-89.23/90.31/17.05]	84.78	93.54
0.03	135	0.60	[16.02/90/-90/-8.45]	85.04	101.03



شکل ۱۰-۴ نمودار همگرایی تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف  $PM$

## ۴-۴-۲ بررسی تأثیر پارامترهای طراحی بر بار کمانش حرارتی

مشابه بخش ۴-۳-۲ که تأثیر پارامترهای طراحی بر بار کمانش حرارتی مورد بررسی قرار گرفت، در این بخش نیز تأثیر همان پارامترها بر بار کمانش حرارتی صفحه کامپوزیت هیبریدی با گشودگی شبه مربعی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، به‌ازای چند مقدار خاص از پارامترهای طراحی مقادیر بهینه سایر پارامترها و تابع هدف مربوط به آنها برای شرایط مرزی چهار طرف گیردار و چیدمان لایه‌های متقارن از لحاظ نوع ماده به‌صورت  $[G/B/B/G]$  محاسبه شده است. در نهایت، با در نظر گرفتن تمام پارامترهای طراحی در شرایط مرزی مختلف و چیدمان متفاوت لایه‌ها سعی می‌شود، مقادیر بهینه تمام پارامترهای طراحی، برای دستیابی به بیشترین بار کمانش حرارتی محاسبه شود.

## ۴-۴-۲-۱ بررسی تأثیر نرمینگی گوشه‌های گشودگی

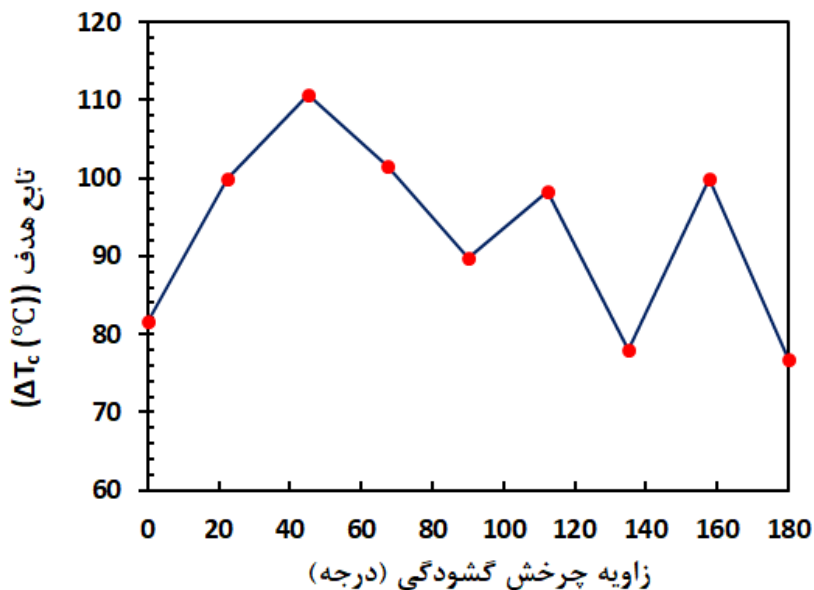
در این بخش تأثیر نرمینگی گوشه‌های گشودگی شبه مربعی بر دمای بحرانی کمانش بررسی شده است. برای بهتر نشان داده شدن این تأثیر، فاکتور بزرگ‌نمایی  $(\lambda)$  ۲۰ در نظر گرفته شده است. به‌ازای نرمینگی‌های مختلف، سایر پارامترهای طراحی از قبیل زاویه الیاف، زاویه چرخش گشودگی، نسبت اندازه گشودگی به اندازه صفحه، بهینه‌سازی شده و در جدول ۴-۱۳ آورده شده است. در این بررسی مشخص شد که با افزایش نرمینگی گوشه‌های گشودگی دمای بحرانی کمانش نیز افزایش می‌یابد. همچنین به‌ازای  $\mu$ های مختلف و  $\lambda=20$ ، ورق با زاویه چرخش گشودگی  $45^\circ$  بیشترین مقاومت را در برابر کمانش حرارتی دارد.

جدول ۴-۱۳ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به بهازای  $\lambda=20$  و نرمینگی های مختلف

$\mu$	$\beta^\circ$	$D/a$	$\theta$ [G/B/B/G]	$\Delta T_c$ ( $^\circ C$ )	Run time (hr)
0.1	45	0.44	[90/-0.28/-0.28/-89.82]	46.06	75.53
0.15	45	0.46	[-90/-0.23/-0.23/90]	46.81	99.46
0.2	45	0.48	[-90/-0.14/-0.14/-90]	50.06	96.13
0.25	45	0.50	[90/-0.12/-12/90]	52.11	91.11
0.3	45	0.52	[90/-0.10/-0.10/-90]	56.94	89.71

#### ۴-۲-۲-۲ بررسی تأثیر زاویه چرخش گشودگی

در این بخش، تأثیر مقادیر پارامترهای طراحی بهینه بر تابع هدف بهازای مقادیر مختلف زاویه چرخش گشودگی بررسی شده است. برای مقادیر خاصی از زاویه چرخش گشودگی، مقدار بار کمانش حرارتی بهینه بهازای سایر مقادیر پارامترهای طراحی بهینه در شکل ۴-۱۱ آورده شده است. با توجه به شکل ۴-۱۱ می توان مشاهده کرد که زاویه چرخش  $45^\circ$  به بالاترین دمای بحرانی کمانش و زاویه چرخش  $180^\circ$  به پایین ترین دمای بحرانی کمانش منتهی می شود.



شکل ۴-۱۱ تغییر تابع هدف بهازای مقادیر مختلف  $\beta$

#### ۴-۲-۴-۳ بررسی تأثیر نسبت اندازه گشودگی به اندازه صفحه

نسبت اندازه گشودگی به اندازه صفحه تأثیر زیادی بر دمای بحرانی کمانش دارد. به منظور نشان دادن تأثیر این پارامتر، به ازای مقادیر خاصی از  $D/a$ ، مقادیر بهینه سایر پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها در جدول ۴-۱۴ آورده شده است. نتایج نشان دهنده این است که با افزایش  $D/a$ ، دمای بحرانی کمانش نیز افزایش می‌یابد.

جدول ۴-۱۴ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی به ازای مقادیر مختلف  $D/a$

$D/a$	$\mu$	$\beta^\circ$	$\theta$ [G/B/B/G]	$\Delta T_c$ (°C)	Run time (hr)
0.13	0.3	67.5	[39.53/-27.76/-27.76/39.53]	24.74	75.55
0.26	0.3	157.5	[-40.90/45.39/45.39/-40.90]	26.25	80.41
0.39	0.3	112.5	[80.27/-13.67/-13.67/80.27]	34.10	67.35
0.52	0.3	45	[90/-0.10/-0.10/-90]	56.94	98.05
0.65	0.3	45	[-90/-0.23/-0.23/-90]	110.71	90.46

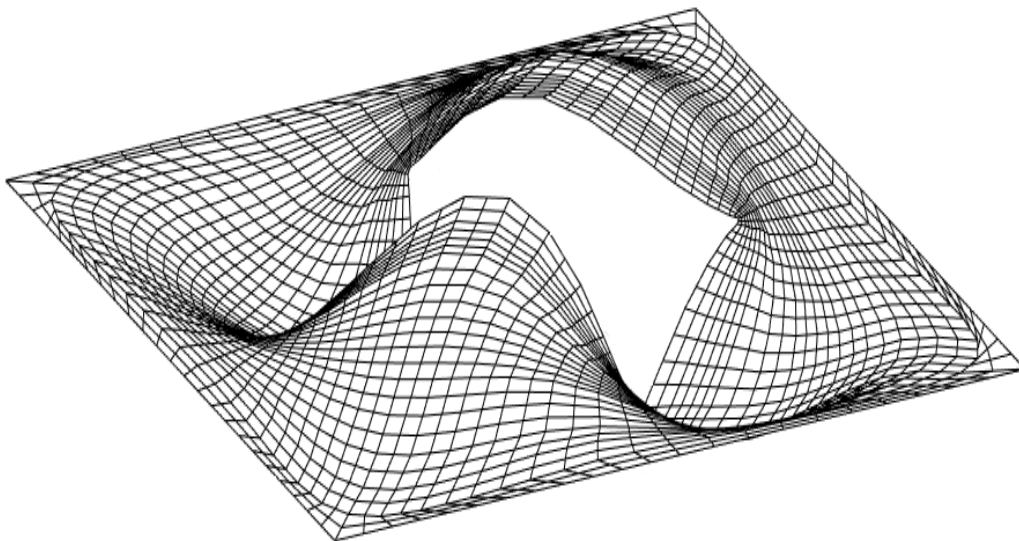
#### ۴-۲-۴-۴ بررسی تأثیر شرایط مرزی

شرایط مرزی لبه‌های یک صفحه کامپوزیت هیبریدی که تحت بار حرارتی قرار دارد، تأثیر قابل توجهی بر دمای بحرانی کمانش دارند. در این بخش، تأثیر شرایط مرزی ساده و گیردار روی چهار لبه صفحه کامپوزیت هیبریدی با چیدمان لایه‌ها به صورت [G/B/B/G]، بر بار کمانش حرارتی بررسی شده است. مقادیر بهینه تابع هدف به ازای تمامی مقادیر پارامترهای طراحی بهینه شده در شرایط مرزی مختلف در جدول ۴-۱۵ آورده شده است. با توجه به جدول ۴-۱۵ می‌توان نتیجه گرفت که صفحه با شرایط مرزی چهار طرف گیردار (CCCC) در مقایسه با صفحه با شرایط مرزی چهار طرف ساده (SSSS) مقاومت بیشتری در برابر کمانش حرارتی دارد که مشابه نتیجه به دست آمده با گشودگی شبه مثلثی می‌باشد.

جدول ۴-۱۵ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها در شرایط مرزی مختلف

Boundary conditions	$\mu$	$\beta^\circ$	$D/a$	$\theta$ [G/B/B/G]	$\Delta T_c$ ( $^\circ\text{C}$ )	Run time (hr)
CCCC	0.3	45	0.65	[-90/-0.23/-0.23/-90]	110.71	90.46
SSSS	0.3	0	0.65	[45.10/-45.32/-45.32/45.10]	23.98	96.36

شکل مد کمانش صفحه با گشودگی شبه مربعی واقع در مرکز با شرایط مرزی چهار طرف گیردار که مشخصات آن نیز در جدول ۴-۱۵ آمده است، در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۲ مد کمانش صفحه حاوی گشودگی شبه مربعی واقع در مرکز

#### ۴-۲-۵ بررسی تأثیر چیدمان لایه‌ها

در این بخش سعی شده تا تأثیر چیدمان لایه‌ها بر دمای بحرانی کمانش در شرایط مرزی چهار طرف گیردار نشان داده شود. برای این منظور مقدار بهینه دمای بحرانی کمانش، به‌ازای تمامی پارامترهای طراحی بهینه در جدول ۴-۱۶ آورده شده است. با توجه به جدول ۴-۱۶ می‌توان نتیجه گرفت که

خواص مکانیکی و چیدمان لایه‌ها، تأثیر قابل توجه‌ای بر دمای بحرانی کمانش دارند. نتایج نشان داد که کامپوزیت هیبریدی متقارن از لحاظ نوع ماده با چیدمان لایه‌ها به صورت  $[B/G/G/B]$  نسبت به دیگر چیدمان لایه‌ها مقاومت بیشتری در برابر کمانش حرارتی دارد و کامپوزیت هیبریدی با چیدمان لایه‌ها به صورت  $[G/G/G/G]$  کمترین مقاومت را در برابر کمانش حرارتی دارد.

جدول ۴-۱۶ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها در شرایط مرزی  $CCCC$  و چیدمان متفاوت لایه‌ها

<i>Stacking sequences</i>	$\mu$	$\beta^\circ$	$D/a$	$\theta^\circ$	$\Delta T_c$ ( $^\circ C$ )	<i>Run time (hr)</i>
[B/G/G/B]	0.3	135	0.65	[90/-89.96/90/90]	214.99	103.87
[B/B/B/B]	0.3	135	0.65	[90/90/-90/-90]	165.66	97.49
[B/G/B/G]	0.3	45	0.65	[90/90/-90/-0.03]	163.31	101.02
[G/B/G/B]	0.3	135	0.65	[-90/-90/-0.3/-90]	144.13	87.57
[B/B/G/G]	0.3	45	0.65	[90/-0.05/-90/-90]	123.91	85.05
[G/B/B/G]	0.3	45	0.65	[-90/-0.23/-0.23/-90]	110.71	90.46
[G/G/B/B]	0.3	45	0.65	[-90/-0.26/-90/-90]	107.95	106.27
[G/G/G/G]	0.3	157.5	0.65	[-90/-57.63/21.50/5.14]	94.48	94.02

#### ۴-۵ گشودگی پنج ضلعی و شش ضلعی

در این بخش همانند بخش‌های ۳-۴ و ۴-۴، بهینه‌سازی کمانش حرارتی صفحه کامپوزیت هیبریدی با این تفاوت که گشودگی مورد نظر پنج ضلعی و شش ضلعی می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. شرایط حاکم بر گشودگی پنج ضلعی و شش ضلعی مشابه شرایط حاکم در بخش‌های ۳-۴ و ۴-۴ می‌باشد. اگر در رابطه (۱-۲) که برای ایجاد گشودگی‌هایی با هندسه‌های مختلف که در فصل ۲ به آن اشاره شد، برای گشودگی پنج ضلعی و شش ضلعی به ترتیب، مقدار  $n=4$  و  $n=5$  قرار داده شود، به‌ازای



$0^\circ \leq \epsilon \leq 360^\circ$  و برای  $\mu$ های مختلف که برای گشودگی پنج ضلعی در بازه  $0/2 \leq \mu \leq 0$  و برای گشودگی شش ضلعی در بازه  $0/15 \leq \mu \leq 0$  قرار دارد، پنج ضلعی و شش ضلعی‌هایی با انحنای مختلف ایجاد می‌شود. حد پایین و بالای پارامترهای مؤثر بر کمانش  $[\mu D/a \beta \theta]$  که بهینه‌سازی می‌شوند برای گشودگی پنج ضلعی به ترتیب برابر هستند با  $[0 \ 0 \ 0 - 90]$  تا  $[0/2 \ 0/6 \ 180 \ 90]$  و برای گشودگی شش ضلعی به ترتیب برابر هستند با  $[0 \ 0 \ 0 - 90]$  تا  $[0/15 \ 0/575 \ 180 \ 90]$ .

#### ۴-۵-۱ بررسی متغیرهای مؤثر بر الگوریتم ژنتیک

با توجه به این که برای گشودگی‌های شبه مثلثی و شبه مربعی، متغیرهای مؤثر بر الگوریتم ژنتیک که در بخش‌های قبلی مورد بررسی قرار گرفت و مقادیر این متغیرها برای گشودگی‌های شبه مثلثی و شبه مربعی مشابه هم شد و با استناد به این که تفاوت این بخش با بخش‌های ۴-۳ و ۴-۴ فقط نوع گشودگی می‌باشد، لذا مقادیر متغیرهای مؤثر بر الگوریتم ژنتیک را همان مقادیری که در بخش‌های ۴-۳ و ۴-۴ به دست آمد در نظر می‌گیریم. در نتیجه مقادیر متغیرهای مؤثر بر الگوریتم ژنتیک را برای گشودگی‌های پنج ضلعی و شش ضلعی خواهیم داشت:  $Npop = 100$ ،  $PC = 0/8$  و  $PM = 0/03$

#### ۴-۵-۲ بررسی تأثیر پارامترهای طراحی بر بار کمانش حرارتی

مشابه بخش‌های ۴-۳-۲ و ۴-۴-۲ که تأثیر پارامترهای طراحی بر بار کمانش حرارتی صفحه کامپوزیت هیبریدی با گشودگی شبه مثلثی و شبه مربعی مورد بررسی قرار گرفت، در این بخش نیز تأثیر همان پارامترها بر بار کمانش حرارتی صفحه کامپوزیت هیبریدی برای گشودگی‌های پنج ضلعی و شش ضلعی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، به‌ازای چند مقدار خاص از پارامترهای طراحی، مقادیر بهینه سایر پارامترها و تابع هدف مربوط به آنها برای شرایط مرزی چهار طرف گیردار و چیدمان لایه‌های متقارن از لحاظ نوع ماده به‌صورت  $[G/B/B/G]$  محاسبه شده است. در نهایت، با در نظر گرفتن تمام

پارامترهای طراحی در شرایط مرزی مختلف و چیدمان متفاوت لایه‌ها سعی می‌شود، مقادیر بهینه تمام پارامترهای طراحی، برای دستیابی به بیشترین بار کمانش حرارتی محاسبه شود.

#### ۴-۵-۲-۱ بررسی تأثیر نرمینگی گوشه‌های گشودگی

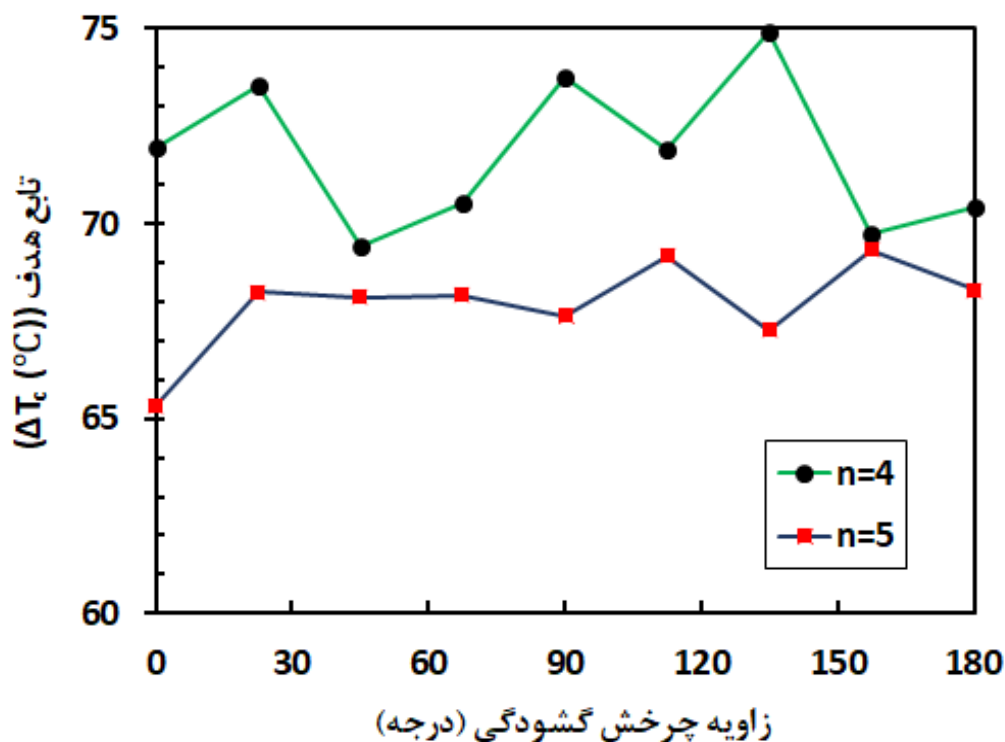
در این بخش تأثیر نرمینگی گوشه‌های گشودگی بر دمای بحرانی کمانش بررسی شده است. برای بهتر نشان داده شدن این تأثیر، فاکتور بزرگ‌نمایی ( $\lambda$ ) ۲۰ در نظر گرفته شده است. به‌ازای نرمینگی‌های مختلف، سایر پارامترهای طراحی از قبیل زاویه الیاف، زاویه چرخش گشودگی، نسبت اندازه گشودگی به اندازه صفحه، بهینه‌سازی شده و در جدول ۴-۱۷ آورده شده است. در این بررسی مشخص شد که با افزایش نرمینگی گوشه‌های گشودگی پنج ضلعی و شش ضلعی، دمای بحرانی کمانش نیز افزایش می‌یابد. همچنین برای گشودگی پنج و شش ضلعی مقدار بهینه تابع هدف به‌ازای  $\mu=0$  که شکل هر دو گشودگی را به دایره نگاشت می‌دهد، تقریباً برابر شده است که این نتیجه دلیلی بر درستی بهینه‌سازی می‌باشد.

جدول ۴-۱۷ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها به‌ازای  $\lambda=20$  و نرمینگی‌های مختلف

$n$	$\mu$	$\beta^\circ$	$D/a$	$\theta$ [G/B/B/G]	$\Delta T_c$ (°C)	Run time (hr)
4	0	22.5	0.4	[-29.14/55/55/-29.14]	42.50	83.13
4	0.05	157.5	0.42	[90/-9.86/-9.86/-90]	42.92	94.41
4	0.1	0	0.44	[-3.43/80.72/80.72/-3.43]	44.20	82.29
4	0.15	0	0.46	[-2.87/81.06/81.06/-2.88]	44.44	94.22
4	0.2	0	0.48	[-87.98/7.73/7.68/90]	46.85	100.03
5	0	90	0.4	[-28.98/-54.92/-54.93/28.99]	42.48	91.39
5	0.05	0	0.42	[-86.81/10.13/10.06/90]	43.44	88.32
5	0.1	0	0.44	[-88.20/9.50/9.46/90]	44.71	76.18
5	0.15	0	0.46	[-90/7.97/7.97/90]	44.77	88.43

#### ۲-۲-۵-۴ بررسی تأثیر زاویه چرخش گشودگی

در این بخش، مانند بخش‌های ۲-۲-۳-۴ و ۲-۲-۴-۴، تأثیر مقادیر پارامترهای طراحی بهینه بر تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف زاویه چرخش گشودگی بررسی شده است. برای مقادیر خاصی از زاویه چرخش گشودگی پنج و شش ضلعی، مقدار بار کمانش حرارتی بهینه به‌ازای سایر مقادیر پارامترهای طراحی بهینه در شکل ۱۳-۴ آورده شده است. با توجه به شکل ۱۳-۴ می‌توان مشاهده کرد که با افزایش تعداد اضلاع گشودگی تأثیر زاویه چرخش گشودگی بر کمانش حرارتی کمتر می‌شود. همچنین برای گشودگی پنج ضلعی، زاویه چرخش  $135^\circ$  و  $157/5^\circ$  و برای گشودگی شش ضلعی، زاویه چرخش  $0^\circ$  و  $157/5^\circ$  به ترتیب منجر به بالاترین و پایین‌ترین دمای بحرانی کمانش می‌شود.



شکل ۱۳-۴ تغییر تابع هدف به‌ازای مقادیر مختلف  $\beta$

#### ۴-۵-۲-۳ بررسی تأثیر نسبت اندازه گشودگی به اندازه صفحه

در این بخش، نسبت اندازه گشودگی به اندازه صفحه مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور نشان دادن تأثیر نسبت اندازه گشودگی به اندازه، به ازای مقادیر خاصی از  $D/a$ ، مقادیر بهینه سایر پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها در جدول ۴-۱۸ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش  $D/a$ ، دمای بحرانی کماتش افزایش می‌یابد.

جدول ۴-۱۸ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی به ازای مقادیر مختلف  $D/a$

$n$	$D/a$	$\mu$	$\beta^\circ$	$\theta^\circ [G/B/B/G]$	$\Delta T_c (^\circ C)$	Run time (hr)
4	0.12	0.2	112.5	[-52.20/61.77/61.77/-52.19]	24.57	69.55
4	0.24	0.2	157.5	[44.80/-45.43/45.43/44.79]	25.58	92.51
4	0.36	0.2	112.5	[-45/4 5.70/45.70/-45]	31.94	84.34
4	0.48	0.2	0	[-87.98/7.73/7.68/90]	46.85	100.03
4	0.60	0.2	135	[-68.65/31.75/31.84/-66.53]	74.93	93.51
5	0.115	0.15	112.5	[-36.39/27.98/27.98/-36.37]	24.50	75.31
5	0.218	0.09	90	[-45.69/45.26/45.04/-44.57]	25.28	87.11
5	0.345	0.15	135	[47.14/-43.28/-43.29/47.06]	30.89	90.28
5	0.46	0.15	0	[-88.20/9.50/9.46/90]	43.77	88.43
5	0.575	0.15	157.5	[-64.92/28.24/27.44/90]	69.32	98.12

#### ۴-۵-۲-۴ بررسی تأثیر شرایط مرزی

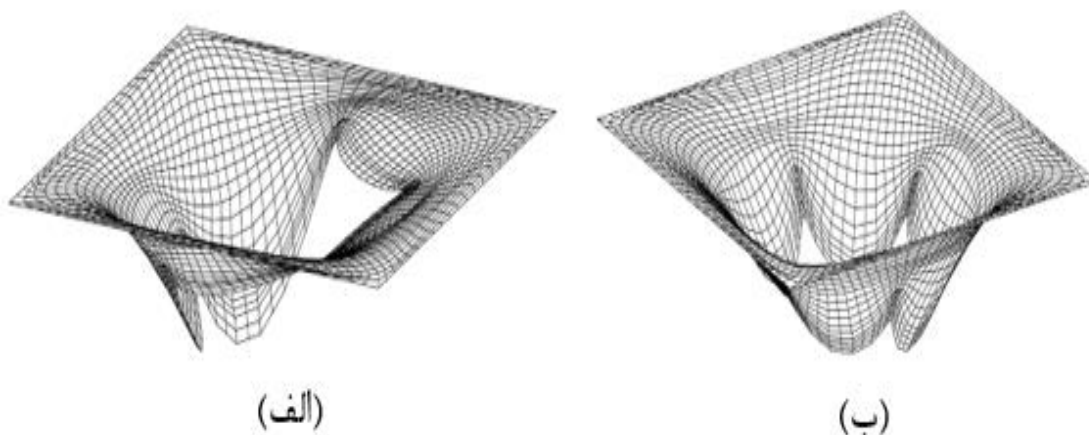
در این بخش، تأثیر شرایط مرزی ساده و گیردار روی چهار لبه صفحه کامپوزیت هیبریدی با چیدمان لایه‌ها به صورت  $[G/B/B/G]$ ، بر بار کماتش حرارتی بررسی شده است. مقادیر بهینه تابع هدف به ازای تمامی مقادیر پارامترهای طراحی بهینه شده در شرایط مرزی مختلف در جدول ۴-۱۹ آورده شده است.

با توجه به جدول ۴-۱۹ می‌توان نتیجه گرفت که صفحه با شرایط مرزی چهار طرف گیردار (CCCC) در مقایسه با صفحه با شرایط مرزی چهار طرف ساده (SSSS) مقاومت بیشتری در برابر کمانش حرارتی دارد که مشابه نتیجه به دست آمده با سایر گشودگی‌ها می‌باشد.

جدول ۴-۱۹ مقادیر بهینه پارمترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها در شرایط مرزی مختلف

$n$	Boundary conditions	$\mu$	$\beta^\circ$	$D/a$	$\theta$ [G/B/B/G]	$\Delta T_c$ (°C)	Run time (hr)
4	CCCC	0.2	135	0.6	[-68.65/31.75/31.84/-66.53]	74.93	93.51
4	SSSS	0.2	67.5	0.6	[-52.67/38.17/43.13/44.61]	21.34	72.48
5	CCCC	0.15	157.5	0.575	[-64.92/28.24/27.44/90]	69.32	98.12
5	SSSS	0.15	22.5	0.575	[-45.38/43.85/43.86/-45.40]	18.47	71.18

شکل مد اول کمانش صفحه با گشودگی پنج ضلعی و شش ضلعی واقع در مرکز با شرایط مرزی چهار طرف گیردار که مشخصات آن نیز در جدول ۴-۱۹ آمده است، در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۴ مد اول کمانش صفحه حاوی گشودگی واقع در مرکز (الف) گشودگی پنج ضلعی (ب) گشودگی شش ضلعی

#### ۴-۲-۵ بررسی تأثیر چیدمان لایه‌ها

در این بخش، تأثیر چیدمان لایه‌ها بر دمای بحرانی کمانش در شرایط مرزی چهار طرف گیردار نشان داده شده است. به‌منظور نشان دادن این تأثیر، مقدار بهینه دمای بحرانی کمانش، به‌ازای تمامی پارامترهای طراحی بهینه در جدول ۴-۲۰ آورده شده است. با توجه به جدول ۴-۲۰ می‌توان نتیجه گرفت که خواص مکانیکی و چیدمان لایه‌ها، تأثیر قابل توجه‌ای بر دمای بحرانی کمانش دارند. نتایج نشان داد که برای گشودگی پنج ضلعی و شش ضلعی چیدمان لایه به‌صورت [B/B/B/B] بیشترین مقاومت را در برابر کمانش حرارتی دارد. هم‌چنین چیدمان لایه به‌صورت [G/B/B/G] کمترین مقاومت را در برابر کمانش حرارتی دارد.

جدول ۴-۲۰ مقادیر بهینه پارامترهای طراحی و تابع هدف مربوط به آنها در شرایط مرزی CCC و چیدمان متفاوت لایه‌ها

$n$	Stacking sequences	$\mu$	$\beta^\circ$	$D/a$	$\theta$	$\Delta T_c$ (°C)	Run time (hr)
4	[B/B/B/B]	0.2	0	0.6	[-90/3.33/90/3.59]	161.88	103.14
4	[B/G/G/B]	0.2	0	0.6	[-90/90/90/90]	154.82	98.43
4	[B/G/B/G]	0.2	180	0.6	[-90/-2.73/-90/-0.03]	110.18	94.21
4	[G/B/G/B]	0.2	180	0.6	[-90/-90/90/-90]	96.32	79.49
4	[G/G/G/G]	0.2	0	0.6	[6.36/90/3.84/-90]	84.79	77.19
4	[B/B/G/G]	0.2	180	0.6	[-31.22/-29.45/-90/90]	80.35	99.45
4	[G/G/B/B]	0.2	180	0.6	[-2.60/-90/90/-90]	77.75	83.53
4	[G/B/B/G]	0.2	135	0.6	[-68.65/31.75/31.84/-66.53]	74.93	93.51
5	[B/B/B/B]	0.15	67.5	0.575	[-90/7.34/-90/7.81]	158.31	102.43
5	[B/G/G/B]	0.15	0	0.575	[-90/90/90/-90]	149.36	99.21
5	[B/G/B/G]	0.15	180	0.575	[90/0.03/-90/2.57]	103.49	86.35
5	[G/B/G/B]	0.15	157.5	0.575	[-1.88/-90/-90/-90]	102.07	89.17
5	[G/G/G/G]	0.15	0	0.575	[-90/-2.17/90/-7.71]	82.81	95.38
5	[G/G/B/B]	0.15	67.5	0.575	[15.52/90/-59.89/-59.14]	79.94	88.56
5	[B/B/G/G]	0.15	157.5	0.575	[-35.28/-29.05/-74.82/59.53]	76.92	79.23
5	[G/B/B/G]	0.15	157.5	0.575	[-64.92/28.24/27.44/90]	69.32	98.12

## فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

## ۵-۱ مقدمه

در این فصل به ارائه نتایج به دست آمده در پایان نامه حاضر پرداخته شده است. هم چنین جهت ادامه تحقیقات بر روی بهینه سازی کمانش صفحات با گشودگی های مختلف، پیشنهادهایی شده است.

## ۵-۲ نتیجه گیری

در این پایان نامه بهینه سازی کمانش حرارتی صفحه کامپوزیت هیبریدی چهار لایه با گشودگی های مختلف با استفاده از الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار گرفته است. دمای بحرانی که منجر به کمانش صفحه کامپوزیتی می شود از روش اجزای محدود با استفاده از کد متلب توسعه یافته محاسبه شده و دقت آن با نتایج مطالعات دیگر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده تطابق خوبی باهم داشتند. هم چنین به منظور درستی کارکرد بهینه سازی الگوریتم ژنتیک در پایان نامه کنونی، برای یک حالت خاص، کمانش حرارتی صفحه کامپوزیت هیبریدی با گشودگی شبه مثلثی با استفاده از الگوریتم های ازدحام ذرات و کلونی زنبور عسل مورد بهینه سازی قرار گرفت، که نتایج قابل قبولی به همراه داشت. به منظور دستیابی به حداکثر دمای بحرانی کمانش، برای معرفی تابع هدف از روش اجزای محدود استفاده شده است. چیدمان لایه ها، نرمینگی گوشه های گشودگی، گشودگی های مختلف، زاویه الیاف، زاویه چرخش گشودگی، نسبت اندازه گشودگی به اندازه صفحه و شرایط مرزی مختلف از جمله پارامترهایی بودند که تأثیر آنها بر دمای بحرانی کمانش مورد بررسی و بهینه سازی قرار گرفت. نتایج به دست آمده از این پایان نامه به شرح زیر می باشد:

- صفحه کامپوزیتی با گشودگی شبه مثلثی، شبه مربعی، پنج ضلعی، شش ضلعی واقع در مرکز صفحه مقاومت بیشتری در برابر کمانش حرارتی نسبت به گشودگی دایروی دارند.
- برای گشودگی های مختلف با افزایش نسبت اندازه گشودگی به اندازه صفحه دمای بحرانی کمانش نیز افزایش می یابد.
- هرچه لبه های ورق مقیدتر باشد، دمای بحرانی کمانش نیز افزایش می یابد.



- برای صفحه کامپوزیتی با گشودگی شبه مثلثی، شبه مربعی، پنج ضلعی، شش ضلعی واقع در مرکز صفحه، با افزایش نرمینگی گوشه‌های گشودگی دمای بحرانی کمانش نیز افزایش می‌یابد.
- با انتخاب مناسب زاویه چرخش گشودگی، می‌توان دمای بحرانی کمانش را افزایش داد. به عبارتی برای هر گشودگی زاویه چرخش مطلوبی وجود دارد که در آن بیشترین مقدار دمای بحرانی کمانش اتفاق می‌افتد. بنابراین بهتر است هنگام طراحی همواره این نکته مورد توجه قرار گیرد و اشکال در زاویه چرخش مطلوب خود ایجاد گردند.
- هرچه تعداد اضلاع گشودگی بیشتر شود زاویه چرخش گشودگی تأثیر کمتری بر کمانش حرارتی دارد.
- چیدمان لایه‌ها و شرایط مرزی بیشترین تأثیر را بر کمانش حرارتی یک صفحه کامپوزیت هیبریدی حاوی گشودگی را دارند.
- برای تمام گشودگی‌ها، صفحه کامپوزیت هیبریدی حاوی گشودگی در مرکز با چیدمان لایه‌ها به صورت  $[B/B/B/B]$  و  $[B/G/G/B]$  و شرایط مرزی چها طرف گیردار بیشترین مقاومت را در برابر کمانش حرارتی دارند.
- با در نظر گرفتن تمام حالت‌های چیدمان لایه‌ها، صفحه کامپوزیت هیبریدی به ترتیب با گشودگی شبه مربعی، پنج ضلعی، شش ضلعی، شبه مثلثی و دایره بیشترین مقاومت را در برابر کمانش حرارتی دارند.

## ۳-۵ پیشنهادها

- موارد زیر جهت ادامه تحقیقات بر روی بهینه‌سازی کمانش صفحه کامپوزیتی حاوی گشودگی پیشنهاد می‌گردد.
- بهینه‌سازی کمانش حرارتی یک صفحه کامپوزیت هیبریدی حاوی گشودگی‌های مختلف با استفاده از دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری.

- بهینه‌سازی کمانش مکانیکی یک صفحه کامپوزیت هیبریدی حاوی گشودگی‌های مختلف با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری.
- بهینه‌سازی ضخامت و تعداد لایه‌های یک صفحه کامپوزیت هیبریدی برای دستیابی به بیشترین مقدار کمانش حرارتی و مکانیکی با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری.
- بهینه‌سازی کمانش حرارتی و مکانیکی یک صفحه کامپوزیت هیبریدی حاوی چند گشودگی مختلف و محل قرارگیری گشودگی‌ها با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری.

## مراجع

- [1] Kaw. A. K., (2006), “**Mechanics of Composite Materials**”, Eds. 2th, CRC Press, USA.
- [۲] آشوری ح، (۱۳۹۳)، پایان‌نامه ارشد: "مطالعه توزیع تنش در اطراف گشودگی‌های غیر دایروی در صفحات چند لایه نامتقارن"، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [3] Campbell. F. C., (2010), “**Structural Composite Materials**”, ASM International.
- [۴] عاصمی آ. ک، (۱۳۹۳)، رساله‌ی دکتری: "تحلیل پس از کمانش ورق‌های قطاعی شکل ساخته شده از مواد هدفمند روی بستر الاستیک"، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.
- [5] Bloom F. and Coffin D., (2000), “**Handbook of Thin Plate Buckling and Postbuckling**”, CRC Press, New York.
- [6] Koiter W. T., (1945), “Over de Stabiliteit van het Elastisch Evenwicht”, Ph.D. Thesis, Technische Hooge School at Delft, Amsterdam, English translation: Riks E. (1969), “The Stability of Elastic Equilibrium”.
- [7] Lekhnitskii S. G., (1963), “**Theory of Elasticity of an Anisotropic Elastic Bode**”, Holden-Dey.
- [8] Ambartsmian S. A., (1970), “**Theory of Anisotropic Plate: Strength, Stability, Vibration**”, Technomic Pub. Co.
- [9] Ashton J. E. and Whitney J. M., (1970), “**Theory of Laminated Plates**”, CRC Press, New York.
- [10] Noor A. K., (1975), “**Stability of Multilayered Composite Plate**”, Fibre Science and Technology, Vol. 8, No. 2, pp. 81-89.
- [11] Harris G., (1975), “The Buckling of Orthotropic Rectangular Plate, Including The Effect of Lateral Edge Restraint”, **International Journal of Solids and Structures**, Vol. 11, No. 7, pp. 877-885.
- [12] Thangaratnam K. R., Palaninathan and Ramachandran j., (1989), “Thermal Buckling of Composite Laminated Plates”, **Computers & Structures**, Vol. 32, No. 5, pp. 1117-1124.
- [13] Sherboune A. N. and Pandey M. D., (1992), “Effects of In-Plane Restraints on the Stability of Laminated Composite plates”, **Composite Structures**, Vol. 20, No. 2, pp. 73-81.

- [14] Kim Y. H. and Noor A. K., (1996), ‘‘Buckling and Postbuckling of Composite Panels with Cutouts Subjected to Combined Loads’’, **Finite Elements in Analysis and Design**, Vol. 22, No. 2, pp. 163-185.
- [15] Feldman E. and Aboudi J., (1997), ‘‘Buckling Analysis of Functionally Graded Plates Subjected to Uniaxial Loading’’, **Composite Structures**, Vol. 38, No. 4, pp. 29-36.
- [16] Hu H. T. and Tzeng W. L., (2000), ‘‘Buckling Analysis of Skew Laminate Plates Subjected to Uniaxial In-Plane Loads’’, **Thin-Walled Structures**, Vol. 38, No. 1, pp. 53-77.
- [17] Soh A. K., Bian L. C. and Chakrabarty J., (2000), ‘‘Elastic/Plastic Buckling of a Composite Flat Plate Subjected to Uniform Edge Compression’’, **Thin-walled structures**, Vol. 38, No. 3, pp. 247-265.
- [18] Najafizadeh M. M and Eslami M. R., (2002), ‘‘Buckling Analysis of Circular Plate of Functionally Graded Materials Under Uniform Radial Compression’’, **International Journal of Mechanical Sciences**, Vol. 44, No. 12, pp. 2479-2493.
- [19] Najafizadeh M. M. and Heydari H. R., (2004), ‘‘Thermal Buckling of Functionally Graded Circular Plates Based on Higher Order Shear Deformation Plate Theory’’, **European Journal of Mechanics-A/Solids**, Vol. 23, No. 6, pp. 1085-1100.
- [20] Ghannadpour S. A. M., Najafi A. and Mohammadi B., (2006), ‘‘On the Buckling Behavior of Cross-Ply Laminated Composite Plates Due to Circular/Elliptical Cutouts’’, **Composite Structures**, Vol. 75, No. 4, pp. 3-6.
- [21] Yap C. W. and Chai G. B., (2007), ‘‘Analytical and Numerical Studies on the Buckling of Delaminated Composite Beams’’, **Composite structures**, Vol. 80, No. 2, pp. 307-319.
- [22] Zhong H. and Gu C., (2007), ‘‘Buckling of Symmetrical Cross-Ply Composite Rectangular Plates Under a Linearly Varying In-Plane Load’’, **Composite structures**, Vol. 80, No. 1, pp. 42-48.
- [23] Shariyat M., (2007), ‘‘Thermal Buckling Analysis of Rectangular Composite Plates with Temperature-Dependent Properties Based on a Layerwise Theory’’, **Thin-Walled Structures**, Vol. 45, No. 4, pp. 439-452.
- [24] Kremer T. and Schurmann H., (2008), ‘‘Buckling of Tension-Loaded Thin-Walled Composite Plates with Cut-outs’’, **Composites Science and Technology**, Vol 68, No. 1, pp. 90-97.

- [25] Kalyan J. B. and Bhaskar K., (2008), “An Analytical Parametric Study on Buckling of Non-Uniformly Compressed Orthotropic Rectangular Plates”, **Composite Structures**, Vol. 82, No. 1, pp. 10-18.
- [26] Kumar D. and Singh S. B., (2013), “Effects of Flexural Boundary Conditions on failure and Stability of Composite Laminate with Cutouts Under Combined In-Plane Loads”, **Composites Part B: Engineering**, Vol. 45, No. 1, pp. 657-665.
- [27] Kumar D. and Singh S. B., (2012), “Stability and Failure of Composite Laminates with Various Shaped Cutouts Under Combined In-Plane Loads”, **Composites Part B: Engineering**, Vol. 43, No. 2, pp. 142-149.
- [28] Kumar D. and Singh S. B., (2010), “Effects of Boundary Conditions on Buckling and Postbuckling Responses of Composite Laminate with Various Shaped Cutouts”, **Composite Structures**, Vol. 92, No. 3, pp. 769-779.
- [29] Shariati M. and Dadrasi A., (2012), “Numerical and Experimental Investigation of Loading Band on Buckling of Perforated Rectangular Steel Plates”, **Research Journal of Recent Sciences**, Vol. 10, No. 1, pp. 63-71.
- [30] Faradjian Y., Taheri kahn mouei J., Shariati M. and Behjat B., (2012), “Experimental and Numerical Investigation of Buckling in Rectangular Steel Plates with Groove-Shaped Cutouts”, **Journal of Zhejiang University-Science A: Applied Physics and Engineering**, Vol. 13, No. 6, pp. 469-480.
- [31] Raki M., Alipour R. and Kamanbedast A., (2012), “Thermal Buckling of Thin Rectangular FGM Plate”, **World Applied Sciences Journal**, Vol. 16, No. 1, pp. 52–62.
- [32] Kiani Y. and Eslami M. R., (2013), “An Exact Solution for Thermal Buckling of Annular FGM Plates on an Elastic Medium”, **Composites Part B: Engineering**, Vol. 45, pp. 101-110.
- [33] Ouinas D. and Achour B., (2013), “Buckling Analysis of Laminated Composite Plates  $[(\theta/-\theta)]$  Containing an Elliptical Notch”, **Composites Part B: Engineering**, Vol. 55, pp. 575-579.
- [34] Fazilati J. and Ovesy H. R., (2013), “Parametric Instability of Laminated Longitudinally Stiffened Curved Panels with Cutout Using Higher Order FSM”, **Composite Structures**, Vol. 95, pp. 691-696.
- [35] Natarajan S., Deogekar P. S., Manickam G. and Belouettar S., (2014), “Hygrothermal Effects on the Free Vibration and Buckling of Laminated composites with Cutouts”, **Composite Structures**, Vol. 108, pp. 848-855.

[36] Shaterzadeh A. R., Abolghasemi S. and Rezaei R., (2014), "Finite Element Analysis of Thermal Buckling of Rectangular Laminated Composite Plates with Circular Cut-Out", **Journal of Thermal Stresses**, Vol. 37, No. 5, pp. 604-623.

[37] Abolghasemi S., Shaterzadeh A. R. and Rezaei R., (2014), "Thermo-Mechanical Buckling Analysis of Functionally Graded Plates with an Elliptic Cutout", **Aerospace Science and Technology**, Vol. 39, pp. 250-259.

[38] Heidari-Rarani M., Khalkhali-Sharifi S. S. and Shokrieh M. M., (2014), "Effect of Ply Stacking Sequence on Buckling Behavior of E-Glass/Epoxy Laminated Composites", **Computational Materials Science**, Vol. 89, pp. 89-96.

[39] Nikrad S. F. and Asadi H., (2015), "Thermal Postbuckling Analysis of Temperature Dependent Delaminated Composite Plates", **Thin-Walled Structures**, Vol. 97, pp. 296-307.

[40] Kumar A., Panda S. K. and Kumar R., (2015), "Buckling Behaviour of Laminated Composite Skew Plates with Various Boundary Conditions Subjected to Linearly Varying In-plane Edge Loading", **International Journal of Mechanical Sciences**, Vol. 100, pp. 136-144.

[41] Rezaei R., Shaterzadeh A. R. and Abolghasemi S., (2015), "Buckling Analysis of Rectangular Functionally Graded Plates with an Elliptic Hole Under Thermal Loads", **Journal of Solid Mechanics**, Vol. 7, No. 1, pp. 41-57.

[۴۲] کشمیری ع.، قاهری ع.، طاهرى بهروز ف.، (۱۳۹۳)، "ارتعاشات و کمانش صفحات بیضوی کامپوزیتی چندلایه متقارن بر بستر الاستیک وینکلر تحت بار داخل صفحه‌ای اولیه"، **مجله مهندسی مکانیک مدرس**، دوره ۱۴، شماره ۱، صفحات ۱۹-۲۶.

[43] Civalek O., (2016), "Buckling Analysis of Composite Panels and Shells with Different Material Properties by Discrete Singular Convolution (DSC) Method", **Composite Structures**, Vol. 161, pp. 93-110.

[44] Shokrieh M. M. and Parkestani A. N., (2017), "Post Buckling Analysis of Shallow Composite Shells Based on the Third Order Shear Deformation Theory", **Aerospace Science and Technology**, Vol. 66, pp. 332-341.

[45] Taheri-Behrooz F., Omid M. and Shokrieh M. M., (2017), "Experimental and Numerical Investigation of Buckling Behavior of Composite Cylinders with Cutout", **Thin-Walled Structures**, Vol. 116, pp. 136-144.

- [46] Liang K. and Sun Q., (2017), “Buckling and Post-Buckling Analysis of the Delaminated Composite Plates Using the Koiter–Newton Method”, **Composite Structures**, Vol. 168, pp. 266-276.
- [47] Dhurvey P., (2017), “Buckling Analysis of Composite Laminated Skew Plate of Variable Thickness”, **Materials Today: Proceedings**, Vol. 4, No. 9, pp.9732-9736.
- [48] Lakshmi Narayana A., Kumar R. V. and Rao G. K. (2018), “Thermal Buckling Analysis of Laminated Composite Plate with Square/Rectangular, Elliptical/Circular Cutout”, **Materials Today: Proceedings**, Vol. 5, No. 2, pp. 5354-5363.
- [49] Aydogdu M. and Aksencer T., (2018), “Buckling of Cross-Ply Composite Plates with Linearly Varying In-Plane Loads”, **Composite Structures**, Vol. 183, pp. 221-231.
- [50] Kumar P. R., Gupta G., Shamili G. K. and Anitha D., (2018), “Linear Buckling Analysis and Comparative Study of Un-stiffened and Stiffened Composite Plate”, **Materials Today: Proceedings**, Vol. 5, No. 2, pp. 6059-6071.
- [51] Hu H. T. and Wang S., (1992), “Optimization for Buckling Resistance of Fiber-Composite Laminate Shells with and without Cutouts”, **Composite Structures**, Vol. 22, No. 1, pp. 3-13.
- [52] Chai G. B., Ooi K. T. and Khong P. W., (1993), “Buckling Strength Optimization of Laminated Composite Plates”, **Computers & Structures**, Vol. 46, No. 1, pp. 77-82.
- [53] Joshi M. G. and Biggers S. B., (1996), “Thickness Optimization for Maximum Buckling Loads in Composite Laminated Plates”, **Composites Part B: Engineering**, Vol. 27, No. 2, pp. 105-114.
- [54] Hu H. T. and Lin B. H., (1995), “Buckling Optimization of Symmetrically Laminated Plates with Various Geometries and End Conditions”, **Composites Science and Technology**, Vol. 55, No. 3, pp. 277-285.
- [55] Walker M., (1999), “Optimal Design of Symmetric Laminates with Cut-Outs for Maximum Buckling Load”, **Computers & Structures**, Vol. 70, No. 3, pp. 337-343.
- [56] Spallino R. and Thierauf G., (2000), “Thermal Buckling Optimization of Composite Laminates by Evolution Strategies”, **Computers & Structures**, Vol. 78, No. 5, pp. 691-697.
- [57] Bisagni C. and Lanzi L., (2002), “Post-Buckling Optimization of Composite Stiffened Panels Using Neural Networks”, **Composite Structures**, Vol. 58, No. 2, pp. 237-247.

- [58] De Faria A. R. and De Almeida S. F. M., (2003), “Buckling Optimization of Plates with Variable Thickness Subjected to Nonuniform Uncertain Loads”, **International journal of solids and structures**, Vol. 40, No. 15, pp. 3955-3966.
- [59] Goldfeld Y., Arbocz J. and Rothwell A., (2005), “Design and Optimization of Laminated Conical Shells for Buckling”, **Thin-Walled Structures**, Vol. 43, No. 1, pp. 107-133.
- [60] Featherston C. A. and Watson A., (2005), “Buckling of Optimised Flat Composite Plates Under Shear and In-Plane Bending”, **Composites Science and Technology**, Vol. 65, No. 6, pp. 839-853.
- [61] Featherston C. A. and Watson A., (2006), “Buckling of Optimised Curved Composite Panels Under Shear and In-Plane Bending”, **Composites Science and Technology**, Vol. 66, No. 15, pp. 2878-2894.
- [62] Bremec B. and Kosel F., (2006), “Thickness Optimization of Circular Annular Plate at Buckling”, **Thin-Walled Structures**, Vol. 44, No. 1, pp. 74-81.
- [63] Aymerich F. and Serra M., (2008), “Optimization of Laminate Stacking Sequence for Maximum Buckling Load Using the Ant Colony Optimization (ACO) Metaheuristic”, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Vol. 39, No. 2, pp. 262-272.
- [64] Topal U. and Uzman U., (2007), “Optimum Design of Laminated Composite Plates to Maximize Buckling Load Using MFD Method”, **Thin-Walled Structures**, Vol. 45, No. 7-8, pp. 660-669.
- [65] Topal U. and Uzman U., (2008), “Thermal Buckling Load Optimization of Laminated Composite Plates” **Thin-Walled Structures**, Vol. 46, No. 6, pp. 667-675.
- [66] Topal U. and Uzman U., (2009), “Effects of Nonuniform Boundary Conditions on the buckling Load Optimization of Laminated Composite Plates”, **Materials & Design**, Vol. 30, No. 3, pp. 710-717.
- [67] Topal U. and Uzman U., (2009), “Thermal Buckling Load Optimization of Laminated Skew Plates”, **Materials & Design**, Vol. 30, No. 7, pp. 2569-2575.
- [68] Mozafari H., Ayob A. and Kamali F., (2012), “Optimization of Functional Graded Plates for Buckling Load by Using Imperialist Competitive Algorithm”, **Procedia Technology**, Vol. 1, pp. 144-152.



- [69] Jing Z., Fan X. and Sun Q., (2015), “Stacking Sequence Optimization of Composite Laminates for Maximum Buckling Load Using Permutation Search Algorithm”, **Composite Structures**, Vol. 121, pp. 225-236.
- [70] de Almeida F. S., (2016), “Stacking Sequence Optimization for Maximum Buckling Load of Composite Plates Using Harmony Search Algorithm”, **Composite Structures**, Vol. 143, pp. 287-299.
- [71] Ehsani A. and Rezaeepazhand J., (2016), “Stacking Sequence Optimization of Laminated Composite Grid Plates for Maximum Buckling Load Using Genetic Algorithm”, **International Journal of Mechanical Sciences**, Vol. 119, pp. 97-106.
- [72] Vosoughi A. R., Darabi A., Anjabin N. and Topal U., (2017), “A Mixed Finite Element and Improved Genetic Algorithm Method for Maximizing Buckling Load of Stiffened Laminated Composite Plates”, **Aerospace Science and Technology**, Vol. 70, pp. 378-387.
- [73] Vosoughi A. R., Darabi A. and Forkhorji H. D., (2017), “Optimum Stacking Sequences of Thick Laminated Composite Plates for Maximizing Buckling Load Using FE-GAs-PSO”, **Composite Structures**, Vol. 159, pp. 361-367.
- [74] Hussein O. S. and Mulani S. B., (2018), “Optimization of In-Plane Functionally Graded Panels for Buckling Strength: Unstiffened, Stiffened Panels, and Panels with Cutouts”, **Thin-Walled Structures**, Vol. 122, pp. 173-181.
- [75] Sahin O. S., (2005), “Thermal Buckling of Hybrid Angle-Ply Laminated Composite Plates with a Hole”, **Composites Science and Technology**, Vol. 65, No. 11-12, pp. 1780-1790.
- [76] Abuelfoutouh N. M., (1993), “Preliminary Design of Unstiffened Composite Shells”, In Proceeding of Symposium of Seventh Technical Conference of ASC, pp. 786–793.
- [77] Reddy J. N., (2006), “**Theory and Analysis of Elastic Plates and Shells**”, Eds. 2th, CRC Press.
- [78] Nemeth M. P., (1984), Ph. D. Thesis, “Buckling Behavior of Orthotropic Composite Plates with Centrally Located Cutouts”, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [79] Reddy J. N., (2004), “**Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis**”, Eds. 2th, CRC press, New York.

[80] Vinson J. R., (2012), “**The Behavior of Thin Walled Structures: Beams, Plates, and Shells**”, Springer Science & Business Media.

[81] Logan D. L., (2011), “**A First Course in the Finite Element Method**”, Cengage Learning, US.

[82] Coley D. A., (1999), “**An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers**”, World Scientific Publishing Company.

[۸۳] مطیع قادر ح، لطفی ش و سید اسفهلان م. م، (۱۳۸۹)، "مروری بر بخشی از روش‌های

بهینه‌سازی هوشمند"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی، شبستر.

[۸۴] مطیع قادر ح، (۱۳۸۷)، پایان‌نامه ارشد: "کاربرد آتوماتای یادگیر در زمان‌بندی ایستای گراف

وظایف بر روی سکوه‌های کاری همگن و ناهمگن"، دانشکده فنی مهندسی کامپیوتر، دانشگاه آزاد

اسلامی واحد شبستر.

## **Abstract**

In this thesis, Optimization of buckling of square composite plates with different cutouts under thermal loading using genetic algorithm was investigated. Loading as uniform temperature rise applies to the entire plate. The material plate is hybrid composites of four layers of Glass / Epoxy and Boron / Epoxy. The cutout studied in this research consists of circular, quasi-triangular, quasi-square, pentagonal, and hexagonal located in the center of the plate. The solving method used to analyze this thesis is the finite element based on the energy method. Also, the theory used in this thesis is the first-order shear deformation theory. In the continue, the optimal values of effective parameters on buckling are obtained in order to achieve the maximum critical buckling temperature using the genetic algorithm. In the genetic algorithm, the critical buckling temperature is considered as objective function. The effective parameters on the thermal buckling that have been optimized in this thesis include bluntness of cutout corners, cutout orientation, fiber angle and cutout size to plate size ratio. Also, the effect of different boundary conditions and various stacking sequences of composite layers on critical buckling temperature has been investigated. According to the results, it can be seen that, contrary to expectation, the circular cutout is not the best geometry for increasing plate resistance against thermal buckling and in some cases, with the proper selection of bluntness of cutout corners and the angle of cutout orientation, the critical buckling temperature can be increased in comparison with the circular cutout. Also, with proper selection of stacking sequences, the plate's resistance to thermal buckling can be greatly increased.

**Keywords:** Hybrid Composite; Regular Cutout; Thermal Buckling; Finite Element Method; Optimization; Genetic Algorithm.





**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering**

**M. Sc. Thesis in Applied Mechanics Engineering**

**Optimization of buckling of square composite plates with  
different cut-outs under thermal loading using genetic  
algorithm**

By: Sajad Mahdavi

Supervisors:

Dr. Alireza Shaterzadeh

Dr. Mohammad Jafari

January 2019