

اللَّهُمَّ
الْحَمْدُ لِلَّهِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ



دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی
پایان نامه کارشناسی ارشد

تعیین پارامترهای بهینه جهت کاهش تمرکز تنش در اطراف گشودگی‌های منتظم در
چندلایه‌های متقارن با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات

نگارنده : سید حسن موسویان

استاد راهنما

دکتر محمد جعفری

شهریور ۱۳۹۵

ب

شماره: ۲۹۵۱۹۲
 تاریخ: ۸۵/۷/۱۲
 ویرایش:

بسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۷: صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای سید حسن موسویان به شماره دانشجویی ۹۲۱۳۸۱۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی تحت عنوان "تعیین پارامترهای بهینه جهت کاهش تمرکز تنش در اطراف گشودگی‌های منظم در چندلایه‌های متقارن با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات" که در تاریخ ۱۳۹۵/۰۶/۱۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه): عالی امتیاز: ۱۹/۸۸ دفاع مجدد مردود

نوع تحقیق: نظری عملی

- ۱- عالی (۲۰-۱۹)
 ۲- بسیار خوب (۱۸-۱۸/۹۹)
 ۳- خوب (۱۶-۱۷/۹۹)
 ۴- قابل قبول (۱۴-۱۵/۹۹)
 ۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استادیار	محمد جعفری	۱- استاد راهنمای اول
-	-	-	۲- استاد راهنمای دوم
-	-	-	۳- استاد مشاور
	دانشیار	حمید رضا ایبک چی	۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	دانشیار	مهدی فتاد کھتوئی	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	سید وحید حسینی	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: محمد محسن شاه‌مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم نامہ:

تقدیم بہ حضرت حجت (عج)

وساس از دو وجود مقدس

آنان کہ ناتوان شدند تا بہ توانایی برسم

مویشان سید گشت تا رو سفید شوم

و عاشقان سوختند تا کہ ما بخش وجود و رو سبک را ہم باشند

تقدیم بہ پدر و مادر مہربانم

شکر و قدردانی:

تحت سپاس به درگاه خداوند متعال دارم که هر چه هست از اوست.

در اینجا بر خود لازم می‌دانم که از زحمات استاد ارجمند جناب آقای دکتر محمد جعفری که در تمام مراحل

انجام پایان نامه، بنده را از راه‌نمایی ارزنده‌شان بی‌نصیب ننمودند کمال شکر و قدردانی را به جای

آورم.

از پدر و مادر عزیزم، این دو معلم بزرگوار که در تمام عرصه‌های زندگی یار و یاور بی‌چشم داشت برای من

بودند نهایت تقدیر و شکر را دارم.

سید حسن موسویان

تعهدنامه

اینجانب سید حسن موسویان دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکانیک دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تعیین پارامترهای بهینه جهت کاهش تمرکز تنش در اطراف گشودگی‌های منتظم در چندلایه های متقارن با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات تحت راهنمایی دکتر محمد جعفری متعهد می‌شوم.

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه‌های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد

چکیده

در این پایان نامه سعی شده است، تا با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر توزیع تنش اطراف گشودگی‌های چندضلعی منتظم در صفحات چندلایه متقارن کامپوزیتی، از روش الگوریتم اجتماع ذرات (PSO)، پارامترهای بهینه جهت دستیابی به کمترین مقدار ضریب تمرکز تنش و تنش شکست معرفی شود. این پارامترها شامل: هندسه‌ی گشودگی، شعاع انحنای گوشه‌ی گشودگی، زاویه‌ی چرخش گشودگی، زاویه‌ی الیاف و زاویه‌ی بار می‌باشند. برای بررسی نتایج حاصل از حل حاضر، از حل عددی اجزای محدود استفاده شده است. همپوشانی نتایج حاصل از دو روش، صحت حل مطالب ارائه شده را تأیید می‌کند.

در مطالعه‌ی حاضر از روشی تحلیلی برای محاسبه‌ی تنش در اطراف گشودگی‌های مختلف استفاده شده است. مطابق این روش، روش حل لخنیتسکی که فقط برای گشودگی‌های دایروی و بیضوی بود، با استفاده از نگاشت همنوا و متغیر مختلط به سایر گشودگی‌ها تعمیم یافت. نتایج ارائه شده در این باره نشان می‌دهد که با انتخاب شکل مناسب گشودگی و انتخاب پارامترهای بهینه‌ی مربوط به آن در صفحات چندلایه‌های متقارن می‌توان ضریب تمرکز تنش صفحات دارای گشودگی را به میزان قابل توجهی کاهش داد و حتی در مواردی به ضریب تمرکز تنش کمتری از ضریب تمرکز تنش ناشی از گشودگی دایره‌ای دست یافت. به عبارتی برخلاف انتظار همواره گشودگی دایروی بهترین هندسه برای کاهش ضریب تمرکز تنش نیست و در مواردی با انتخاب انحنای، زاویه‌ی چرخش و زاویه‌ی الیاف مناسب برای یک صفحه‌ی حاوی گشودگی می‌توان ضریب تمرکز تنش کمتری در مقایسه با گشودگی دایروی داشت.

واژگان کلیدی: الگوریتم اجتماع ذرات، حل تحلیلی، گشودگی چند ضلعی منتظم، ضریب

تمرکز تنش ، تنش شکست

مقالات

-
1. Optimum design of laminated composite plates containing a quasi-square cutout. (Struct Multidisc Optim, DOI 10.1007/s00158-016-1481-7)

۲. بهینه‌سازی صفحات چندلایه‌های متقارن کامپوزیتی حاوی گشودگی مربعی به کمک

الگوریتم ژنتیک (سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی

در مهندسی برق، مکانیک و مکاترونیک، تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر)

مطالب

- ۱ فصل ۱: پیشینه پژوهش
- ۲ ۱-۱ مقدمه
- ۳ ۲-۱ مقدمه‌ای بر کامپوزیت‌ها
- ۴ ۱-۲-۱ زمینه (ماتریس)
- ۵ ۲-۲-۱ تقویت کننده
- ۵ ۱-۲-۲-۱ تقویت کننده‌های ذره‌ای
- ۶ ۲-۲-۲-۱ تقویت کننده‌های رشته‌ای (الیافی)
- ۶ ۳-۲-۱ ویژگی‌های مواد کامپوزیتی
- ۸ ۴-۲-۱ کاربرد کامپوزیت‌ها
- ۸ ۱-۴-۲-۱ صنایع هوافضا
- ۹ ۲-۴-۲-۱ ساختمان‌سازی و بازسازی بناها
- ۱۰ ۳-۴-۲-۱ صنایع نفت و گاز
- ۱۰ ۳-۱ مقدمه‌ای بر بهینه‌سازی
- ۱۱ ۱-۳-۱ انواع مسائل بهینه‌سازی
- ۱۱ ۱-۳-۱-۱ بهینه‌سازی با سعی و خطا و بهینه‌سازی روی تابع
- ۱۲ ۲-۳-۱-۲ بهینه‌سازی تک‌بعدی و چندبعدی
- ۱۲ ۱-۳-۱-۱ بهینه‌سازی پویا و بهینه‌سازی ایستا

- ۴-۱-۳-۱ بهینه‌سازی گسسته و بهینه‌سازی پیوسته ۱۲
- ۵-۱-۳-۱ بهینه‌سازی مقید و بهینه‌سازی نامقید ۱۳
- ۶-۱-۳-۱ بهینه‌سازی کمینه‌جو و بهینه‌سازی تصادفی ۱۳
- ۴-۱ مروری بر کارهای انجام شده ۱۳
- فصل ۲: روابط حاکم بر روش حلّ تحلیلی ۲۳
- ۱-۲ مقدمه ۲۴
- ۲-۲ روابط حاکم بر چندلایه‌های متقارن ۲۴
- ۳-۲ تابع نگاشت ۲۸
- ۴-۲ حلّ تحلیلی ۳۰
- ۵-۲ روابط مربوط به چرخش گشودگی ۴۰
- ۶-۲ تنش شکست ۴۱
- فصل ۳: بهینه‌سازی و روش انبوه ذرات ۴۵
- ۱-۳ مقدمه ۴۶
- ۲-۳ الگوریتم‌های فراابتکاری ۴۶
- ۳-۳ تاریخچه‌ی بهینه‌سازی انبوه ذرات ۴۸
- ۴-۳ بهینه‌سازی انبوه ذرات ۴۹
- ۵-۳ پارامترهای الگوریتم انبوه ذرات ۵۲
- ۱-۵-۳ تعداد جمعیت ۵۲
- ۲-۵-۳ ضرایب شتابی ۵۴

- ۳-۵-۳ ضرایب اینرسی ۵۶
- ۳-۶-۳ مزایا و معایب بهینه‌سازی انبوه ذرات ۵۷
- ۳-۶-۱ بهره‌مندی از حافظه ۵۷
- ۳-۶-۲ همکاری و اشتراک‌گذاری اطلاعات بین ذرات ۵۸
- ۳-۶-۳ سرعت همگرایی بالا ۵۸
- ۳-۶-۴ راحتی پیاده‌سازی و اجرا ۵۸
- ۳-۶-۵ همگرایی زودرس ۵۹
- ۳-۶-۶ گرفتار شدن در بهینه محلی ۵۹
- فصل ۴: مطالعه‌های موردی ۶۱
- ۴-۱ مقدمه ۶۲
- ۴-۲ بررسی درستی جواب‌ها ۶۴
- ۴-۳ گشودگی مثلثی ۷۰
- ۴-۳-۱ انحنای گوشه‌ی گشودگی ۷۰
- ۴-۳-۲ زاویه بار ۷۶
- ۴-۳-۳ همه پارامترها ۸۱
- ۴-۴ گشودگی مربعی ۸۲
- ۴-۴-۱ انحنای گوشه‌ی گشودگی ۸۲
- ۴-۴-۲ زاویه بار ۸۸
- ۴-۴-۳ همه پارامترها ۹۴

۹۵.....	۵-۴ گشودگی پنج ضلعی.....
۹۵.....	۱-۵-۴ انحناى گوشه‌ى گشودگى.....
۱۰۱.....	۲-۵-۴ زاویه بار
۱۰۶.....	۳-۵-۴ همه پارامترها
۱۰۷.....	۶-۴ گشودگى شش ضلعى.....
۱۰۷.....	۱-۶-۴ انحناى گوشه‌ى گشودگى.....
۱۱۲.....	۲-۶-۴ زاویه بار
۱۱۸.....	۳-۶-۴ همه پارامترها
۱۱۹.....	فصل ۵: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۱۲۰.....	۱-۵ نتیجه‌گیری.....
۱۲۱.....	۲-۵ پیشنهادها.....
۱۲۲.....	مراجع

اشکال

- شکل ۱-۲ تأثیر پارامترهای n و w در ایجاد گشودگی ۲۸
- شکل ۲-۲ مختصات منحنی الخط ۳۴
- شکل ۳-۲ نمای حلّ مسأله ۳۵
- شکل ۴-۲ چرخش محورها ۴۰
- شکل ۱-۳ چگونگی حرکت ذره در تکرار جدید و به روز رسانی سرعت ۵۰
- شکل ۲-۳ شماتیک کلی بهینه‌سازی انبوه ذرات ۵۲
- شکل ۳-۳ بررسی تأثیر تعداد جمعیت بر مقدار بهینه تنش شکست ۵۴
- شکل ۱-۴ نمایی از هندسه گشودگی و بارگذاری آن ۶۲
- شکل ۲-۴ تأثیر پارامتر w بر گوشه‌های گشودگی‌های مختلف ۶۳
- شکل ۳-۴ نحوه مش‌بندی در نرم‌افزار آباکوس ۶۵
- شکل ۴-۴ نحوه بارگذاری در نرم‌افزار آباکوس ۶۵
- شکل ۵-۴ توزیع تنش اطراف گشودگی مثلثی تحت بارگذاری تک‌محوره افقی ۶۶
- شکل ۶-۴۱ مقایسه تنش اطراف گشودگی مثلثی از دو روش حلّ تحلیلی و اجزای محدود ۶۶
- شکل ۷-۱۴ مقایسه تنش اطراف گشودگی مثلثی از دو روش حلّ تحلیلی و اجزای محدود ۶۷
- شکل ۸-۴ گشودگی بیضوی تحت بارگذاری دو محوری با نسبت قطرهای $0/5$ ۶۸
- شکل ۹-۴ تأثیر انحنای گوشه‌ی گشودگی بر تنش شکست در گشودگی مثلثی ۷۰
- شکل ۱۰-۴ تأثیر انحنای گوشه‌ی گشودگی بر ضریب تمرکز تنش در گشودگی مثلثی ۷۱
- شکل ۱۱-۴ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $[0/90]_s$ در گشودگی مثلثی ۷۳

- شکل ۴-۱۲ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[30^{\circ}/0^{\circ}/-30^{\circ}]}$ در گشودگی مثلثی ۷۴
- شکل ۴-۱۳ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[\pm 45^{\circ}/\pm 30^{\circ}]}$ در گشودگی مثلثی ۷۴
- شکل ۴-۱۴ تأثیر زاویه‌ی بار بر تنش شکست در گشودگی مثلثی ۷۶
- شکل ۴-۱۵ تأثیر زاویه‌ی بار بر ضریب تمرکز تنش در گشودگی مثلثی ۷۷
- شکل ۴-۱۶ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[0^{\circ}/90^{\circ}]}$ و زاویه بار صفر درجه در گشودگی مثلثی ۷۹
- شکل ۴-۱۷ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[30^{\circ}/0^{\circ}/-30^{\circ}]}$ و زاویه بار صفر درجه در گشودگی مثلثی ۷۹
- شکل ۴-۱۸ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[\pm 45^{\circ}/\pm 30^{\circ}]}$ و زاویه بار صفر درجه در گشودگی مثلثی ۸۰
- شکل ۴-۱۹ تأثیر انحنای گوشه‌ی گشودگی بر تنش شکست در گشودگی مربعی ۸۳
- شکل ۴-۲۰ تأثیر انحنای گوشه‌ی گشودگی بر ضریب تمرکز تنش در گشودگی مربعی ۸۴
- شکل ۴-۲۱ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[0^{\circ}/90^{\circ}]}$ در گشودگی مربعی ۸۶
- شکل ۴-۲۲ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[30^{\circ}/0^{\circ}/-30^{\circ}]}$ در گشودگی مربعی ۸۶
- شکل ۴-۲۳ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[\pm 45^{\circ}/\pm 30^{\circ}]}$ در گشودگی مربعی ۸۷
- شکل ۴-۲۴ تأثیر زاویه بار بر تنش شکست در گشودگی مربعی ۸۹
- شکل ۴-۲۵ تأثیر زاویه بار بر ضریب تمرکز تنش در گشودگی مربعی ۹۰
- شکل ۴-۲۶ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[0^{\circ}/90^{\circ}]}$ و زاویه بار صفر درجه در گشودگی مربعی ۹۲
- شکل ۴-۲۷ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[30^{\circ}/0^{\circ}/-30^{\circ}]}$ و زاویه بار صفر درجه در گشودگی مربعی ۹۲
- شکل ۴-۲۸ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[\pm 45^{\circ}/\pm 30^{\circ}]}$ و زاویه بار صفر درجه در گشودگی مربعی ۹۲

- گشودگی مربعی..... ۹۳
- شکل ۴-۲۹ تأثیر انحنای گوشه‌ی گشودگی بر تنش شکست در گشودگی پنج‌ضلعی ۹۶
- شکل ۴-۳۰ تأثیر انحنای گوشه‌ی گشودگی بر ضریب تمرکز تنش در گشودگی پنج‌ضلعی..... ۹۶
- شکل ۴-۳۱ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s [0/90]$ در گشودگی پنج-ضلعی..... ۹۸
- شکل ۴-۳۲ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s [30/0/-30]$ در گشودگی پنج-ضلعی..... ۹۹
- شکل ۴-۳۳ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s [\pm 45/\pm 30]$ در گشودگی پنج-ضلعی..... ۹۹
- شکل ۴-۳۴ تأثیر زاویه بار بر تنش شکست در گشودگی پنج‌ضلعی..... ۱۰۲
- شکل ۴-۳۵ تأثیر زاویه بار بر ضریب تمرکز تنش در گشودگی پنج‌ضلعی..... ۱۰۲
- شکل ۴-۳۶ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s [0/90]$ و زاویه بار صفر درجه در گشودگی پنج‌ضلعی..... ۱۰۴
- شکل ۴-۳۷ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s [30/0/-30]$ و زاویه بار صفر درجه در گشودگی پنج‌ضلعی..... ۱۰۴
- شکل ۴-۳۸ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s [\pm 45/\pm 30]$ و زاویه بار صفر درجه در گشودگی پنج‌ضلعی..... ۱۰۵
- شکل ۴-۳۹ تأثیر انحنای گوشه‌ی گشودگی بر تنش شکست در گشودگی شش‌ضلعی ۱۰۸
- شکل ۴-۴۰ تأثیر انحنای گوشه‌ی گشودگی بر ضریب تمرکز تنش در گشودگی شش-ضلعی..... ۱۰۸
- شکل ۴-۴۱ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s [0/90]$ در گشودگی شش-ضلعی..... ۱۱۰

شکل ۴-۴۲ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[30/0/-30]}$ در گشودگی شش-

ضلعی..... ۱۱۰

شکل ۴-۴۳ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[\pm 45/\pm 30]}$ در گشودگی شش-

ضلعی..... ۱۱۱

شکل ۴-۴۴ تأثیر زاویه بار بر تنش شکست در گشودگی شش ضلعی..... ۱۱۳

شکل ۴-۴۵ تأثیر زاویه بار بر ضریب تمرکز تنش در گشودگی شش ضلعی..... ۱۱۳

شکل ۴-۴۶ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[0/90]}$ و زاویه بار صفر درجه در

گشودگی شش ضلعی..... ۱۱۵

شکل ۴-۴۷ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[30/0/-30]}$ و زاویه بار صفر درجه در

گشودگی شش ضلعی..... ۱۱۶

شکل ۴-۴۸ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[\pm 45/\pm 30]}$ و زاویه بار صفر درجه در

گشودگی شش ضلعی..... ۱۱۶

جداول

- جدول ۴-۱ خواص مکانیکی مواد [۱۷] ۶۳
- جدول ۴-۲ مقایسه نتایج حل تحلیلی با مرجع [۱۷] ۶۹
- جدول ۴-۳ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان $s [0/90]$ در گشودگی مثلثی ۷۲
- جدول ۴-۴ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان $s [30/0/-30]$ در گشودگی مثلثی ۷۲
- جدول ۴-۵ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان $s [\pm 45/\pm 30]$ در گشودگی مثلثی ۷۳
- جدول ۴-۶ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان $s [0/90]$ در گشودگی مثلثی ۷۵
- جدول ۴-۷ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان $s [30/0/-30]$ در گشودگی مثلثی ۷۵
- جدول ۴-۸ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان $s [\pm 45/\pm 30]$ در گشودگی مثلثی ۷۶
- جدول ۴-۹ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s [0/90]$ در گشودگی مثلثی ۷۷
- جدول ۴-۱۰ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s [30/0/-30]$ در گشودگی مثلثی ۷۸
- جدول ۴-۱۱ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s [\pm 45/\pm 30]$ در گشودگی مثلثی ۷۸

- جدول ۴-۱۲ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[0/90]$ در گشودگی مثلثی ۸۰
- جدول ۴-۱۳ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[30/0/-30]$ در گشودگی مثلثی ۸۱
- جدول ۴-۱۴ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[\pm 45/\pm 30]$ در گشودگی مثلثی ۸۱
- جدول ۴-۱۵ مقادیر بهینه همه متغیرهای طراحی و تنش شکست بهینه در گشودگی مثلثی ۸۲
- جدول ۴-۱۶ مقادیر بهینه همه متغیرهای طراحی و ضریب تمرکز تنش بهینه در گشودگی مثلثی ۸۲
- جدول ۴-۱۷ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $s[0/90]$ در گشودگی مربعی ۸۴
- جدول ۴-۱۸ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $s[30/0/-30]$ در گشودگی مربعی ۸۵
- جدول ۴-۱۹ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $s[\pm 45/\pm 30]$ در گشودگی مربعی ۸۵
- جدول ۴-۲۰ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $s[0/90]$ در گشودگی مربعی ۸۷
- جدول ۴-۲۱ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $s[30/0/-30]$ در گشودگی مربعی ۸۸
- جدول ۴-۲۲ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $s[\pm 45/\pm 30]$ در گشودگی مربعی ۸۸

- جدول ۴-۲۳ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[0/90]$ در گشودگی مربعی ۹۰
- جدول ۴-۲۴ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[30/0/-30]$ در گشودگی مربعی ۹۱
- جدول ۴-۲۵ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[\pm 45/\pm 30]$ در گشودگی مربعی ۹۱
- جدول ۴-۲۶ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[0/90]$ در گشودگی مربعی ۹۳
- جدول ۴-۲۷ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[30/0/-30]$ در گشودگی مربعی ۹۴
- جدول ۴-۲۸ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[\pm 45/\pm 30]$ در گشودگی مربعی ۹۴
- جدول ۴-۲۹ مقادیر بهینه همه متغیرهای طراحی و تنش شکست بهینه در گشودگی مربعی ۹۵
- جدول ۴-۳۰ مقادیر بهینه همه متغیرهای طراحی و ضریب تمرکز تنش بهینه در گشودگی مربعی ۹۵
- جدول ۴-۳۱ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $s[0/90]$ در گشودگی پنج ضلعی ۹۷
- جدول ۴-۳۲ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $s[30/0/-30]$ در گشودگی پنج ضلعی ۹۷
- جدول ۴-۳۳ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $s[\pm 45/\pm 30]$ در گشودگی پنج ضلعی ۹۸

- جدول ۴-۳۴ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان $s[0/90]$ در گشودگی پنج‌ضلعی..... ۱۰۰
- جدول ۴-۳۵ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان $s[30/0/-30]$ در گشودگی پنج‌ضلعی..... ۱۰۰
- جدول ۴-۳۶ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان $s[\pm 45/\pm 30]$ در گشودگی پنج‌ضلعی..... ۱۰۱
- جدول ۴-۳۷ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[0/90]$ در گشودگی پنج‌ضلعی..... ۱۰۳
- جدول ۴-۳۸ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[30/0/-30]$ در گشودگی پنج‌ضلعی..... ۱۰۳
- جدول ۴-۳۹ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[\pm 45/\pm 30]$ در گشودگی پنج‌ضلعی..... ۱۰۳
- جدول ۴-۴۰ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[0/90]$ در گشودگی پنج‌ضلعی..... ۱۰۵
- جدول ۴-۴۱ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[30/0/-30]$ در گشودگی پنج‌ضلعی..... ۱۰۶
- جدول ۴-۴۲ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[\pm 45/\pm 30]$ در گشودگی پنج‌ضلعی..... ۱۰۶
- جدول ۴-۴۳ مقادیر بهینه همه متغیرهای طراحی و تنش شکست بهینه در گشودگی پنج-ضلعی..... ۱۰۷
- جدول ۴-۴۴ مقادیر بهینه همه متغیرهای طراحی و ضریب تمرکز تنش بهینه در گشودگی پنج‌ضلعی..... ۱۰۷

- جدول ۴-۴۵ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان $s[0/90]$ در گشودگی شش ضلعی ۱۰۹
- جدول ۴-۴۶ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان $s[30/0/-30]$ در گشودگی شش ضلعی ۱۰۹
- جدول ۴-۴۷ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان $s[\pm 45/\pm 30]$ در گشودگی پنج ضلعی ۱۰۹
- جدول ۴-۴۸ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان $s[0/90]$ در گشودگی شش ضلعی ۱۱۱
- جدول ۴-۴۹ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان $s[30/0/-30]$ در گشودگی شش ضلعی ۱۱۲
- جدول ۴-۵۰ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان $s[\pm 45/\pm 30]$ در گشودگی شش ضلعی ۱۱۲
- جدول ۴-۵۱ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[0/90]$ در گشودگی شش ضلعی ۱۱۴
- جدول ۴-۵۲ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[30/0/-30]$ در گشودگی شش ضلعی ۱۱۴
- جدول ۴-۵۳ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[\pm 45/\pm 30]$ در گشودگی شش ضلعی ۱۱۵
- جدول ۴-۵۴ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[0/90]$ در گشودگی شش ضلعی ۱۱۷
- جدول ۴-۵۵ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[30/0/-30]$ در گشودگی شش ضلعی ۱۱۷

جدول ۴-۵۶ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در

چیدمان_s [±۴۵/±۳۰] در گشودگی شش ضلعی.....۱۱۷

جدول ۴-۵۷ مقادیر بهینه همه متغیرهای طراحی و تنش شکست بهینه در گشودگی

شش ضلعی.....۱۱۸

جدول ۴-۵۸ مقادیر بهینه همه متغیرهای طراحی و ضریب تمرکز تنش بهینه در گشودگی

شش ضلعی.....۱۱۸

علائم

σ و ϵ	کرنش و تنش
C و S	ماتریس نرمی و سفتی ماده
τ و γ	کرنش برشی و تنش برشی
\bar{Q}	ماتریس سفتی کاهش یافته
N_x و N_y و N_z	منجه‌های تنش
h_k	فاصله لایه kام تا لایه میانی چندلایه متقارن
H	ضخامت کل
a	ماتریس نرمی کاهش یافته
n	تعداد اضلاع گشودگی
c	میزان کشیدگی
λ	بزرگی گشودگی
w	انحنای گوشه‌ی گشودگی
ξ	مختصات نگاشته شده متغیر مختلط
ρ	شعاع دایره
θ	زاویه اطراف گشودگی
$w(\xi)$	تابع نگاشت
$U(x, y)$	تابع تنش
$\varphi(z_1)$ و $\psi(z_2)$	توابع تنش برای مسأله صفحه داده شده
$\varphi_1(z_1)$ و $\psi_2(z_2)$	توابع تنش مرحله اول حل
$\varphi_0(z_1)$ و $\psi_0(z_2)$	توابع تنش مرحله دوم حل
p	نیروی کششی واحد سطح
α	زاویه اعمال بار
β	زاویه چرخش گشودگی
X	استحکام کششی در جهت طولی
Y	استحکام کششی در جهت عرضی
S	استحکام برشی
σ_f	تنش شکست
v و x	سرعت و موقعیت ذره

ضرایب شتابی	c_1 و c_2
بهترین تجربه فردی و جمعی	p_i و p_g
ضریب اینرسی	Ω

فصل ۱

پیشینه پژوهش

۱-۱ مقدمه

صفحات به دلیل کاربرد وسیع در صنایع مختلف از اهمیت بسیاری برخوردار هستند. از جمله کاربرد آن‌ها می‌توان انواع مخازن مستطیلی، کوره‌ها، بدنه ماشین‌آلات صنعتی و غیر صنعتی، صنعت ساختمان‌سازی و ... را نام برد. تنوع کاربرد، بسته به نیاز، وجود انواع شیارها و گشودگی‌ها با ابعاد و اشکال مختلف را در صفحات می‌طلبد. گشودگی با اشکال مختلف در سازه‌ها برای ارضا نیازهای طراحی به وجود می‌آیند. این گشودگی‌ها در بالا بردن تنش‌ها و به وجود آوردن شکست‌های فاجعه‌بار مؤثرند. از جمله این موارد، می‌توان به گشودگی درها و پنجره‌ها در بدنه هواپیماها و زیردریایی‌ها، محل اتصال فشارسنج‌ها و دماسنج‌ها در بدنه کوره‌ها، محل اتصال دو ورق به همدیگر توسط پیچ‌ها و پرچ‌ها، وجود گشودگی‌هایی در پره‌های توربین‌ها جهت جریان یافتن سیال خنک‌کننده در پره‌ها و ... اشاره کرد. استفاده از مواد مرکب در صنایع هوافضا و بسیاری از صنایع دیگر به خاطر نسبت تنش به وزن و سفتی بالای این گونه مواد دارای افزایش چشم‌گیری است. با در نظر گرفتن کاربرد وسیع مواد مرکب و ماهیت پیچیده و متفاوت رفتار آن‌ها نسبت به مواد فلزی، مطالعه تنش شکست آن‌ها لازم به نظر می‌رسد.

گاهی اوقات در اثر تغییرات به وجود آمده در برخی نقاط سازه ممکن است سطح مورد نظر به وسیله یک شکاف و یا حفره کاهش یافته باشد که این کاهش سطح ناگهانی به وسیله گشودگی ایجاد شده باعث ایجاد تنش‌های ناخواسته در سازه می‌شود که معمولاً از محل این نواحی سازه با شکست مواجه می‌شود. از این رو تحلیل تنش‌ها در این نواحی برای طراحان اهمیت ویژه‌ای دارد. تنش شکست بیشتر مواد شدیداً به تمرکز تنش ناشی از وجود گشودگی وابسته است. تجربه نشان داده است که تنش واقعی شکست برای صفحات حاوی گشودگی، اساساً کمتر از تنش کشش نهایی همان ماده بدون گشودگی است؛ بنابراین برای طراحی دقیق صفحات حاوی گشودگی دانستن اطلاعات دقیق در مورد تغییر شکل‌ها و توزیع تنش‌ها لازم است. تمرکز تنش اهمیت ویژه‌ای در ارزیابی قابلیت اطمینان سازه‌های مهندسی دارد. دیده شده است که ۸۰ درصد شکست‌های انجام‌شده در سازه‌های

هوایی از محل بست‌ها و اتصالات که تمرکز تنش در آن‌ها اتفاق افتاده روی داده است [۱].

اهمیت بهینه‌سازی برای اولین بار در طراحی سازه‌های هوافضا با وزن کمینه مورد توجه قرار گرفت. در این سازه‌ها با توجه به حساسیت فوق‌العاده‌ی کاربرد آن‌ها، به جای اینکه مبنای طراحی، هزینه‌ی آن باشد، وزن سازه هدف بهینه‌سازی خواهد بود. اما در دیگر صنایع مربوط به علوم مهندسی، همچون ساختمان و صنایع خودرو نیز هزینه در کنار وزن سیستم و عملکرد سازه از عوامل مهم طراحی به شمار می‌آیند. افزایش روزافزون کاربرد سازه‌های مهندسی و محدود بودن مواد خام و کمبود منابع انرژی از جمله عواملی است که طراحان را به سوی طراحی سازه‌های سبک، ارزان‌قیمت و درعین‌حال کارا، وادار می‌سازد. با توجه به این موضوع، ضرورت آگاهی مهندسان از دستگاه‌های بهینه‌سازی سازه‌ها و به کار بردن آن‌ها در هنگام طراحی و ساخت روشن خواهد بود.

در تحلیل صفحات چندلایه کامپوزیتی متقارن حاوی گشودگی، هندسه‌ی گشودگی، شعاع انحنای گوشه‌ی گشودگی، جهت‌گیری (زاویه‌ی چرخش) گشودگی، چیدمان لایه‌ها، زاویه‌ی بار و خواص مکانیکی از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر میزان ضریب تمرکز تنش در اطراف گشودگی می‌باشند؛ به گونه‌ای که با انتخاب صحیح آن‌ها می‌توان ضریب تمرکز تنش را به میزان قابل توجهی کاهش داد. در این پایان‌نامه، با توجه به ضرورت‌های ذکرشده، سعی شده است تا با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات تأثیر پارامترهای مختلف، به‌طور کامل بر روی توزیع تنش اطراف گشودگی بررسی شده و درنهایت پارامترهای بهینه جهت دستیابی به کمترین مقدار تابع هدف معرفی گردد. لازم به ذکر است که در این تحقیق بهینه کردن مقدار تنش شکست در اطراف گشودگی و ضریب تمرکز تنش به عنوان تابع هزینه در نظر گرفته شده است. تنش بی‌بعد به صورت بیشترین تنش ایجادشده در اطراف گشودگی به تنش اعمالی تعریف می‌شود.

۲-۱ مقدمه‌ای بر کامپوزیت‌ها

به ترکیبی از دو یا چند ماده‌ی مختلف در یک محیط جدید کامپوزیت گویند. به طور معمول یک

جزء، به عنوان فاز تقویت کننده و جزء دیگر که فاز تقویت کننده را در بر می گیرد، نقش زمینه یا همان ماتریس را خواهد داشت. فاز تقویت کننده ممکن است به صورت الیاف، ذرات (حبّهای) و پولک باشد، فاز ماتریس از یک ماده‌ی پیوسته تشکیل شده است. به طور معمول چسب یا رزین، نقش ماتریس را در اغلب سازه‌های مرکب به عهده دارد. البته این تعریف کافی نیست و معیارهای دیگری از جمله سه معیار زیر نیز باید در نظر گرفته شود تا بتوان ماده‌ای را به عنوان ماده‌ی کامپوزیت معرفی نمود.

۱. نخست این که هر دو ماده الزاماً باید با یک نسبت قابل ملاحظه‌ای وجود داشته باشند (مثلاً بیشتر از ۵ درصد).

۲. دوم این که فازهای تشکیل دهنده، خواص متفاوتی داشته باشند. از این جهت ممکن است خواص کامپوزیت به طور قابل ملاحظه‌ای با خواص اجزای تشکیل دهنده‌ی آن متفاوت باشد که تحت این شرایط می توان این گونه مواد را کامپوزیت تلقی نمود. به عنوان مثال پلاستیک‌ها گرچه معمولاً دارای مقدار کمی روان ساز، مواد جاذب پرتوهای ماورای بنفش و برخی اجزاء و افزودنی‌های دیگر هستند که به دلیل مسائل تجاری از جمله اقتصادی بودن و سادگی فرایند تولید به آن‌ها اضافه می‌شوند، اما هیچ‌یک از این معیارها را در بر نداشته و در گروه بندی کامپوزیت‌ها قرار نمی‌گیرند.

۳. نهایتاً این که یک کامپوزیت مصنوعی معمولاً توسط مخلوط و ترکیب کردن مناسب اجزای تشکیل دهنده توسط وسایل مکانیکی مختلف تولید می‌شوند. لذا یک آلیاژ ریختگی با ریزساختار دوفازی که محصول فرایند انجماد یک مذاب یکنواخت است که بعداً عملیات حرارتی روی آن انجام می‌شود را نمی‌توان جزو گروه‌های کامپوزیت‌ها محسوب نمود.

۱-۲-۱ زمینه (ماتریس)

جزء تشکیل دهنده‌ای که در ساختار یک ماده کامپوزیت از پیوستگی لازم برخوردار بوده و اغلب (نه همیشه) درصد بیشتری را دارا است زمینه یا ماتریس نامیده می‌شود. نظریه کلی حاکی از این

است که در تولید یک ماده کامپوزیتی، این خاصیت زمینه است که با افزودن اجزای دیگر بهبود می-یابد. یک کامپوزیت ممکن است دارای زمینه سرامیکی (¹CMC)، فلزی (²MMC) و یا پلیمری (³PMC) باشد. خواص مکانیکی این سه گروه از مواد به طور قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر تفاوت دارند. به‌طور کلی می‌توان خواص این سه گروه از مواد را که می‌توانند زمینه‌ی مواد کامپوزیتی را تشکیل دهند به صورت زیر خلاصه نمود:

۱. پلیمرها دارای استحکام و ضریب کشسانی پایین می‌باشند
۲. سرامیک‌ها از استحکام و سختی بالایی برخوردار بوده و ترد و شکننده هستند
۳. فلزات دارای استحکام و ضریب کشسانی متوسط هستند، ضمن این‌که از شکل‌پذیری خوبی نیز برخوردار بوده و ترد و شکننده نمی‌باشند.

۱-۲-۲ تقویت کننده

جزء تشکیل دهنده‌ی دوم به لحاظ این‌که سبب افزایش و یا تقویت خواص مکانیکی زمینه (ماتریس) می‌شود، فاز تقویتی یا تقویت کننده نامیده می‌شود. در بیشتر موارد فاز تقویت کننده، سخت‌تر، مستحکم‌تر و سفت‌تر از زمینه است. البته استثناهایی نیز وجود دارد؛ به‌عنوان مثال می‌توان از فاز تقویت کننده‌ی فلز (شکل‌پذیر) در زمینه سرامیکی نام برد. شکل هندسی فاز تقویت کننده یکی از عوامل اصلی در تعیین شدت تأثیر تقویت‌کنندگی است. به عبارت دیگر خواص مکانیک ماده کامپوزیت تابعی از شکل و ابعاد جزء تقویت کننده می‌باشد. معمولاً اجزای تقویت کننده را برحسب شکل، رشته‌ای یا ذره‌ای توصیف می‌کنند.

۱-۲-۲-۱ تقویت کننده‌های ذره‌ای

ابعاد تقویت کننده‌های ذره‌ای تقریباً در تمام جهات یکسان می‌باشد. شکل ذرات ممکن است

¹ Ceramic Matrix Composite

² Metal Matrix Composite

³ Polimer Matrix Composite

کروی، مکعبی، بشقابی یا هر شکل هندسی منظم یا غیرمنتظم باشد. ترتیب قرارگرفتن ذرات تقویت کننده ممکن است تصادفی و بدون ترتیب و یا دارای جهت ترجیحی باشند.

۱-۲-۲ تقویت کننده‌های رشته‌ای (الیافی)

یک تقویت کننده‌ی الیافی به وسیله‌ی طول زیاد، که به مراتب بیشتر از ابعاد مقطع آن است، مشخص می‌شود. البته نسبت طول به بعد مقطع که نسبت ظاهری نامیده می‌شود، می‌تواند به میزان قابل ملاحظه‌ای تغییر کند.

۱-۲-۳ ویژگی‌های مواد کامپوزیتی

معمولاً کامپوزیت‌ها برای کاربردهایی که کارایی زیاد و وزن کم لازم است، طراحی و ساخته می‌شوند. این مواد دارای مزایای بسیار زیادی نسبت به مواد مهندسی سنتی هستند، که در زیر شرح داده می‌شوند:

۱. مواد کامپوزیتی قابلیت یکپارچه کردن اجزا را دارند، چند جزء فلزی مختلف می‌تواند با یک کامپوزیت جایگزین شود.

۲. با قرار دادن حس‌گرهایی در ساختارهای کامپوزیتی می‌توان آن‌ها را به سرویس‌های ردیابی مجهز کرد. از این امکان برای آشکارسازی آسیب ناشی از خستگی در ساختار هواپیما استفاده می‌شود.

۳. کامپوزیت‌ها دارای سفتی ویژه^۱ (نسبت سفتی به دانسیته) بالایی هستند. مثلاً می‌توان به کامپوزیت‌هایی دارای سفتی فولاد، با یک پنجم وزن آن و دارای سفتی آلومینیوم با یک دوم وزن آن دست یافت.

۴. استحکام ویژه‌ی (نسبت استحکام به چگالی) کامپوزیت‌ها بسیار بالاست. به همین دلیل هواپیماها و اتومبیل‌ها در عین سرعت بیشتر سوخت کمتری مصرف می‌کنند. استحکام ویژه

^۱ Specific Stiffness

- کامپوزیت‌ها ۳ تا ۵ برابر آلیاژهای فولاد و آلومینیوم است.
۵. استحکام خستگی^۱ (حدّ دوام) کامپوزیت‌ها بسیار بالاست. آلیاژهای فولاد و آلومینیوم دارای حد خستگی خوبی در حدود ۵۰٪ استحکام استاتیکی خود هستند. کامپوزیت‌های گرافیت/اپوکسی دارای استحکام خستگی بالایی نزدیک به ۹۰٪ استحکام استاتیکی خود می‌باشند.
۶. کامپوزیت‌ها مقاومت به خوردگی خوبی دارند. آهن و آلومینیوم در حضور آب و هوا خورده می‌شوند لذا احتیاج به پوشش و آلیاژ خاص دارند؛ اما لایه بیرونی کامپوزیت‌های پلیمری از پلاستیک است، لذا مقاومت شیمیایی و مقاومت به خوردگی آن‌ها بسیار خوب است.
۷. ساخت قطعات با شکل‌های پیچیده و طرح‌های خاص که بعضی مواقع توسط فلزات امکان‌پذیر نیست، با استفاده از کامپوزیت‌ها بدون نیاز به پرچ کاری یا جوش کاری اجزای مختلف می‌تواند صورت گیرد. این موضوع ضریب اطمینان قطعه را افزایش داده و زمان تولید را کاهش می‌دهد؛ همچنین عملیات ساخت را عملی‌تر می‌کند.
۸. کامپوزیت‌ها استفاده از روش‌های طراحی برای ساخت (DFM)^۲ و طراحی برای مونتاژ (DFA)^۳ را امکان‌پذیر و عملی می‌کند. این روش‌ها کمک می‌کنند که تعداد اجزای محصول به حداقل برسد و در نتیجه باعث کاهش زمان اتصال و مونتاژ می‌شوند. با کاهش تعداد اتصالات، قطعه با اجزای با استحکام بالا و هزینه کمتر ساخته می‌شود.
۹. ویژگی‌های صوتی، ارتعاشی و زبری کامپوزیت‌ها از فلزات بهتر است. کامپوزیت‌ها ارتعاشات را بهتر از فلزات از بین می‌برند. این ویژگی کاربردهای مختلفی همچون لبه انتهایی هواپیما تا چوب گلف را دارد.
۱۰. کامپوزیت‌ها در فشار و دمای کمتری نسبت به فلزات تولید می‌شوند، لذا قیمت ابزار و تجهیزاتی که برای مراحل ساخت کامپوزیت‌ها لازم است، از ابزار موردنیاز برای ساخت فلزات

^۱ Fatigue Strength

^۲ Design for Manufacturing

^۳ Design for Assembly

ارزان تر است.

۱-۲-۴ 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، ساختمان‌سازی، صنایع دریایی، صنعت برق، صنعت راه‌آهن و ریل‌سازی، ساخت لوازم ورزشی و وسایل خانگی و بسیاری دیگر از زمینه‌ها اشاره کرد. در ادامه به‌طور مختصر درباره‌ی کاربرد این مواد در برخی زمینه‌ها اشاره شده است.

۱-۲-۴-۱ صنایع هوافضا

کامپوزیت‌ها به دلیل برخی خصوصیات، از قبیل سبکی و پایداری گرمایی این امکان را فراهم می‌سازند تا کارایی و عملکرد ساختارها در صنایع هوافضا بهبود یابد. استحکام ویژه‌ی کامپوزیت‌ها بیشتر از آلیاژهای فلزی به کار رفته در صنعت هوافضا است. این موضوع باعث کاهش وزن و حداکثر شدن کارایی و قابلیت تحمل بارهای بیشتر و مصرف سوخت کمتر می‌شود [۲]. با توجه به اینکه کاهش وزن یکی از اولویت‌های تولیدکننده‌های هوافضا و حمل‌ونقل هوایی محسوب می‌شود؛ بنابراین انتظار است که آلومینیوم در این صنایع عرصه را به کامپوزیت‌ها واگذار کند [۳]. در کامپوزیت‌ها زمینه، نقش نگهداری الیاف در کنار هم و انتقال تنش به آن‌ها را دارد.

کامپوزیت‌های به کار گرفته شده در صنعت هوافضا می‌توانند با توجه به جنس زمینه‌ی آن‌ها از نوع کامپوزیت‌هایی با زمینه‌ی اورگانیک (مواد آلی^۱ OMC)، زمینه‌ی فلزی و زمینه‌ی سرامیکی باشند. این کامپوزیت‌ها به منظور ساخت موتور جت و قطعات بدنه‌ی هواپیما به کار گرفته می‌شوند. به‌عنوان مثال در موتور جت بخش سرد موتور ترکیبی از کامپوزیت‌های OMC و MMC می‌باشد در حالی که بخش‌های گرم موتور مثل محفظه‌ی احتراق و آگزوز یا مجرای خروجی توربین نیاز به

¹ Organic Matrix Composite

قابلیت تحمل دمای بالا دارد. کامپوزیت‌های CMC از این ویژگی برخوردارند و در این بخش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. قطعاتی که با استفاده از کامپوزیت در صنعت هوافضا ساخته می‌شوند عبارت‌اند از بال و قسمت‌هایی از بدنه‌ی هواپیما، قاب‌ها، گیره‌ها، درها، دم و ستون‌ها از جمله ستون حمل که شامل سازه‌ی بال میانی و بخش زیرین بدنه‌ی هواپیما می‌شود.

۱-۲-۴-۲ ساختمان‌سازی و بازسازی بناها

مواد کامپوزیت عمدتاً در ساختمان کاربرد وسیعی دارند. این مواد به صورت لوازم بهداشتی داخل ساختمان مثل وان، دستشویی و همچنین در و پنجره برای جلوگیری از انتقال حرارت کار گذاشته می‌شوند. در حالت دیگر این مواد در سازه‌ی ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ به طوری که می‌توان از آن‌ها به جای تیرآهن یا میلگرد داخل بتن استفاده کرد. تقویت خارجی و داخلی سازه‌های بتنی هم‌اکنون یک تجارت بسیار مهم در جهان امروز است. تقویت خارجی ستون‌های موجود با استفاده از کامپوزیت‌ها، برای افزایش ظرفیت‌های برشی، فشاری، خمشی و مقاومت در برابر ضربه، به طور گسترده‌ای در صنعت ساختمان به کار گرفته می‌شود. این روش برای اصلاح مقاومت لرزه‌ای ستون‌های پل‌ها و ساختمان‌ها در کشورهای گوناگون از جمله آمریکا، کانادا و ژاپن گسترش داده شده و به اثبات رسیده است. این روش برای افزایش ظرفیت باربری ستون‌های پارکینگ‌ها نیز به کار گرفته شده است. مواد کامپوزیتی به‌طور خاص در ساخت پل‌های ماشین‌رو و پل‌های عابر پیاده به کار می‌روند. هم‌اکنون نمونه‌های زیادی از پل‌های تمام کامپوزیتی در سرتاسر جهان موجود است. مواد کامپوزیتی در ابرسازه‌ها نیز کاربردهای متنوعی دارند. در ساخت سقف مساجد و برج‌های مسکونی و تجاری، مقادیر بالایی از این مواد استفاده می‌شود که بدون کاهش مقاومت سازه، وزن آن را بسیار کاهش می‌دهند.

علاوه بر این توانایی کامپوزیت‌ها در بازسازی شکل‌ها و قطعات پیچیده در هر اندازه‌ای، طراحان را قادر می‌سازد به راحتی شکل و ظاهر بناهای قدیمی را بازآفرینی کنند و مرمت ساختمان‌های قدیمی

و بناهای باستانی- بدون اینکه مشخص شود بخش ترمیمی از جنس ماده اصلی نیست- با همان رنگ و همان شکل امکان پذیر می شود.

۱-۲-۴-۳ صنایع نفت و گاز

یکی از زمینه های عمده ی استفاده از کامپوزیت ها، تولید لوله های با اقطار مختلف برای انتقال محصولات در صنعت نفت و گاز است. لوله های کامپوزیتی ساختار محکم، مقاوم به خوردگی و سبکی را فراهم می کنند که به عنوان جایگزین بسیار مناسبی برای لوله های فلزی و بتونی مطرح می شوند و از دیدگاه نحوه ی انتقال سیال حاوی به دو گروه عمده ی گرانشی و فشاری تقسیم می شوند.

در لوله های گرانشی سیال به وسیله نیروی گرانشی و یا با فشار خیلی کم برای تداوم حرکت، جابه جا می شود و به همین دلیل ویژگی سفتی عامل مهمی در طراحی این لوله ها می باشد. جهت قرارگیری الیاف در این لوله ها به شیوه ای است که سفتی لوله در جهت های محیطی و محوری باعث کاهش تغییر شکل های خمشی در مسیر می شود و لوله در برابر نیروهای ناشی از بار مرده و رفت و آمد روی آن، مقاومت می نماید. این لوله ها در عمق زیاد نسبت به سطح زمین قرار می گیرند. لوله های فاضلاب نمونه ای از لوله های گرانشی می باشند.

عمده ی مصرف لوله های فشاری در انتقال آب، صنایع نفت و گاز و دریایی می باشد. جهت الیاف در این لوله ها بر اساس میزان فشار طراحی، در زوایای مختلفی نسبت به محور لوله صورت می گیرد. از دیگر ویژگی های لوله های کامپوزیتی مقاومت به پدیده ی خوردگی ناشی از سیالات (مایعات و گازها) در هر دو جداره ی داخلی و خارجی است. حذف هزینه های سنگین تعمیر و نگهداری لوله های خورده شده ی انتقال دهنده ی نفت یا گاز و خسارات ایجاد شده از قطع سرویس به مراکز صنعتی، مهم ترین عواملی است که باعث شده تا لوله های کامپوزیتی گوی سبقت را از سایر رقبای سنتی خود برابند.

۱-۳ مقدمه های بر بهینه سازی

بهینه سازی فرآیندی است که برای بهتر کردن چیزی دنبال می شود. فکر، ایده و یا طرحی که

به وسیله یک دانشمند یا یک مهندس مطرح می‌شود، طی روال بهینه‌سازی بهتر می‌شود. در هنگام بهینه‌سازی، شرایط اولیه با روش‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد و اطلاعات به دست آمده، برای بهبود بخشیدن به یک فکر یا روش مورد استفاده قرار می‌گیرند. بهینه‌سازی ابزاری ریاضی است که برای یافتن پاسخ بسیاری از پرسش‌ها در خصوص چگونگی راه‌حل مسائل مختلف به کار می‌رود [۵،۴].

در بهینه‌سازی از یافتن بهترین جواب برای یک مسأله صحبت به میان می‌آید. لفظ بهترین به طور ضمنی بیان می‌کند که بیش از یک جواب برای مسأله مورد نظر وجود دارد که البته دارای ارزش یکسانی نیستند. تعریف بهترین جواب، به مسأله مورد بررسی، روش حل و همچنین میزان خطای مجاز وابسته است. بنابراین نحوه فرمول‌بندی مسأله نیز بر چگونگی تعریف بهترین جواب تأثیر مستقیم دارد. برخی از مسائل جواب‌های مشخصی دارند؛ بهترین بازیکن یک‌رشته‌ی ورزشی، طولانی‌ترین روز سال و پاسخ یک معادله‌ی دیفرانسیل معمولی درجه اول از مثال‌هایی هستند که می‌توان از آن‌ها به عنوان مسائل ساده نام برد. در مقابل، برخی از مسائل دارای جواب‌های پیشینه یا کمینه‌ی متعددی هستند؛ که به نام نقاط بهینه یا اکسترمم شناخته می‌شوند. بهترین اثر هنری، زیباترین منظره و گوش‌نوازترین قطعه‌ی موسیقی از مثال‌هایی هستند که می‌توان برای این‌گونه مسائل بیان کرد [۹-۴].

۱-۳-۱ انواع مسائل بهینه‌سازی

می‌توان مسائل بهینه‌سازی را از دیدگاه‌های مختلف به دسته‌های متعددی تقسیم‌بندی کرد. نمونه‌ای از این تقسیم‌بندی‌ها در ادامه توضیح داده شده‌اند.

۱-۳-۱-۱ بهینه‌سازی با سعی و خطا و بهینه‌سازی روی تابع

سعی و خطا فرآیندی است که در آن متغیرهای ورودی تغییر داده می‌شوند در این مورد اطلاعات دقیق در خصوص نحوه تأثیر هر متغیر بر خروجی در دست نیست. به عنوان مثال نحوه تنظیم آنتن

گیرنده‌ی تلویزیونی یک بهینه‌سازی با سعی و خطا است. حتی یک مهندس آنتن، تنها توانایی حدس زدن نحوه عملکرد آنتن در جهات مختلف را ندارد. بسیاری از کشفیات مهم بشر، نتیجه‌ی بهینه‌سازی-های توأم با سعی و خطا بوده است. به عنوان مثال می‌توان به کشف و تصفیه پنی‌سیلین به عنوان یک آنتی‌بیوتیک اشاره نمود. در مقابل نوع دیگری از بهینه‌سازی وجود دارد که در آن ماهیت مسأله، به صورت فرمول دقیق در دست است و می‌توان با روش‌های ریاضی به سراغ این‌گونه مسائل رفت [۴].

۱-۳-۱-۲ بهینه‌سازی تک‌بعدی و چند بعدی

اگر فقط یک متغیر در مسأله بهینه‌سازی وجود داشته باشد، بهینه‌سازی تک بعدی نامیده می‌شود. در مقابل مسائلی که دارای بیش از یک متغیر باشند، مسائل بهینه‌سازی چندبعدی خوانده می‌شوند [۴-۶، ۸].

۱-۳-۱-۳ بهینه‌سازی پویا و بهینه‌سازی ایستا

اگر تابع یا فرآیندی که مورد بهینه‌سازی واقع می‌شود، تابعی از زمان باشد و با گذشت زمان تغییر یابد بهینه‌سازی را پویا می‌نامند. در مقابل بهینه‌سازی روی مسائلی که گذشت زمان تغییری روی آن-ها به وجود نمی‌آورد، بهینه‌سازی ایستا خوانده می‌شود. به عنوان مثال، پیدا کردن بهترین مسیر برای رانندگی در شهر برای رسیدن از یک هدف به یک مقصد معین، می‌تواند یک مسأله بهینه‌سازی ایستا باشد. می‌توان با استفاده از یک نقشه، بهترین مسیر ممکن را به دست آورد. اما این مسأله در عمل به این سادگی نیست. در عمل می‌بایست عوامل دیگری نیز در نظر گرفته شوند. در ساعات مختلف شبانه‌روز میزان ازدحام متغیر است و لذا بهترین مسیر ممکن است در زمان‌های مختلف تغییر پیدا کند [۴-۶ و ۹].

۱-۳-۱-۴ بهینه‌سازی گسسته و بهینه‌سازی پیوسته

اگر ماهیت متغیرهای مسأله بهینه‌سازی پیوسته باشد، آن را پیوسته می‌نامند. در مقابل اگر

مقادیری که متغیرهای مسأله اختیار می‌کنند، مقادیر محدود و شمارا باشند، مسأله را گسسته می‌نامند. یک نوع بسیار مهم از مسائل گسسته، مسایل جایگشت هستند. هدف از حل این نوع از مسائل، انجام یک انتخاب از بین یک مجموعه از گزینه‌های قابل انتخاب است که ترتیب انتخاب نیز مهم است [۵،۴].

۱-۳-۱-۵ بهینه‌سازی مقید و بهینه‌سازی بدون قید

در برخی مسائل متغیرها نمی‌توانند هر مقداری را اختیار کنند و می‌بایست مقادیر متغیرها یک مجموعه از شرایط را برآورده کنند. این شرایط را قید و مسائل توأم با قید را مقید می‌نامند. هر مسأله که قیدی در آن وجود نداشته باشد، بدون قید خوانده می‌شود [۹-۴].

۱-۳-۱-۶ بهینه‌سازی کمینه‌جو و بهینه‌سازی تصادفی

برخی از روش‌ها از یک نقطه مشخص در فضای جستجو شروع می‌کنند و با استفاده از قوانینی که پایه در ریاضیات و هندسه دارند، جواب‌های بهتری به دست می‌آورند. این نوع الگوریتم‌ها سرعت بسیار بالایی در همگرایی دارند، اما به راحتی در کمینه‌ها یا بیشینه‌های محلی گرفتار می‌شوند. در این روش‌ها نحوه ایجاد جواب‌های بعدی از روی جواب‌های فعلی، روندی مشخص و معلوم دارد. در مقابل روش‌های تصادفی، از الگوهای احتمالی برای ایجاد جواب‌های بهتر استفاده می‌کنند و به این ترتیب پیش‌بینی عملکرد الگوریتم ساده نیست. سرعت همگرایی این نوع از الگوریتم‌ها در مقایسه با الگوریتم‌های کمینه‌جو، کمتر است اما احتمال گرفتار شدن در نقاط بهینه‌ی محلی نیز کمتر می‌شود و امید بیشتری برای یافته شدن نقطه‌ی بهینه‌ی سراسری وجود دارد [۴، ۱۰].

۴-۱-۴ مروری بر کارهای انجام‌شده

در این بخش سعی می‌شود تا در ابتدا به بررسی تحقیقاتی که در زمینه‌ی صفحات حاوی گشودگی انجام شده، پرداخته می‌شود؛ در هر کدام از این کارها هندسه گشودگی، نوع بارگذاری،

خواص مکانیکی مواد استفاده شده و روش حل، متفاوت است. بخش دوم شامل مسائل مربوط به بهینه‌سازی سازه‌ها با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند می‌باشد.

در مورد تحلیل تنش صفحات دارای گشودگی، تحقیقات بسیار وسیعی از روش‌های مختلف عددی، تجربی و تحلیلی انجام شده است. با توجه به گستردگی تحقیقات انجام شده در این زمینه، سعی می‌شود تا به مروری بر تحلیل تنش صفحات حاوی گشودگی با استفاده از روش حل تحلیلی بر پایه استفاده از تابع پتانسیل مختلط پرداخته شود. استفاده از روش متغیر مختلط در حل مسائل مقدار مرزی در الاستیسیته دوبعدی اولین بار توسط موشخلیشویلی^۱ [۱۱] برای مواد الاستیک همسانگرد ارائه شد. کاربردهایی از روش ارائه شده توسط او در مطالعات ساوین^۲ [۱۲] بر روی صفحات همسانگرد نامحدود حاوی گشودگی‌های مختلف و تحت کشش دیده می‌شود. همچنین ساوین برای مواد غیرهمسانگرد فقط برای گشودگی دایره‌ای و بیضوی مطالعاتی را انجام داد. توسعه کامل روش موشخلیشویلی به مسائل الاستیسیته دوبعدی مواد غیرهمسانگرد توسط اشلبای^۳ [۱۳]، اشترو^۴ [۱۴] و لخنیتسکی^۵ [۱۵] انجام شد. بعدها پژوهشگران متعددی با استفاده از روابط ارائه شده توسط آن‌ها به مطالعه صفحات غیرهمسانگرد حاوی گشودگی پرداختند.

رضایی پزند و جعفری [۱۶] با تعریف تابع تنشی که معادلات سازگاری را ارضا می‌کند؛ حل تحلیلی صفحات غیرهمسانگرد دارای گشودگی‌های مختلف را ارائه کردند. یوکاجونکر^۶ و رائو^۷ [۱۷] صفحه حاوی گشودگی مثلثی را که تحت بارگذاری کشش تک‌محوره، دومحوره با نسبت تنش مختلف و تنش برشی قرار داشت؛ را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها تحلیل خود را برای مواد همسانگرد، ارتوتروپیک و چندلایه‌های متقارن ارائه کردند. از پارامترهای مورد بررسی توسط آن‌ها انحنای

¹ Muskhelishvili

² Savin

³ Eshelby

⁴ Stroh

⁵ Lekhnitskii

⁶ Ukadgaonker

⁷ Rao

گشودگی و زاویه الیاف بود. اسمر^۱ و جتور^۲ [۱۸] با همین روش، توزیع تنش اطراف گشودگی شبه مستطیلی را در یک صفحه غیرهمسانگرد و تحت کشش به دست آوردند. آن‌ها تأثیر انحنای گشودگی و زاویه بار را به طور مجزا بر روی تمرکز تنش مورد بررسی قرار دادند. رضایی پزند و جعفری [۱۹] به بررسی توزیع تنش اطراف گشودگی شبه‌مربعی در صفحات غیرهمسانگرد پرداختند. آن‌ها تأثیر پارامترهای مختلفی از قبیل زاویه بار، زاویه الیاف و زاویه چرخش گشودگی را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین هارمندرا^۳ [۲۰] تمرکز تنش اطراف گشودگی‌های دایره‌ای، بیضوی و مثلثی را برای صفحات چندلایه ارتوتروپیک و غیرهمسانگرد با استفاده از حلّ موشخلیشیولی ارائه کرد. او فرض کرد که ابعاد صفحه در مقابل اندازه گشودگی بزرگ است، طوری که بتوان صفحه را بی‌نهایت در نظر گرفت. در مقاله‌ای توسط رائو و همکارانش [۲۱] توزیع تنش اطراف گشودگی مستطیلی و مربعی در چندلایه‌های متقارن به دست آمد. آن‌ها مطالعات خود را بر روی کامپوزیت‌های گرافیت/اپوکسی و شیشه/اپوکسی متمرکز کردند. بارگذاری عمده در این تحقیق بارگذاری دومحوره و برشی بود. به خاطر تابع نگاشتی که توسط آن‌ها استفاده شد، امکان بررسی شعاع انحنای گوشه گشودگی به صورت تابعی پیوسته بسیار مشکل بود؛ زیرا آن‌ها با تغییر این پارامتر باید مجدد تابع نگاشت را برای گشودگی جدید محاسبه می‌کردند. آن‌ها در این تحقیق زاویه چرخش گشودگی را بررسی نکردند. جعفری و مشیری اول [۲۲] با توسعه روش حلّ لختینسکی، از روش متغیر مختلط توزیع تنش اطراف گشودگی چهار ضلعی در چندلایه‌های متقارن تحت کشش را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها تأثیر پارامترهایی مانند جنس و نوع چیدمان لایه‌ها، زاویه‌ی بار، زاویه‌ی چرخش گشودگی، نسبت طول به عرض و شعاع انحنای گشودگی را بر توزیع تنش اطراف گشودگی مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق نشان داده شد که ملایم‌تر شدن گوشه‌های گشودگی تنها راه کاهش تنش بی‌بعد نیست، بلکه انتخاب زاویه چرخش گشودگی مناسب هم در این کاهش تنش مؤثر است. هافنباخ^۴ [۲۳]، با استفاده از روش تحلیلی بر پایه تئوری

¹ Asmar

² Jabbour

³ Dharmendra

⁴ Hufenbach

کلاسیک چندلایه‌ها و استفاده از تابع پتانسیل به شکل متغیر مختلط، میدان تنش و کرنش در اطراف گشودگی برای کامپوزیت‌های تقویت‌شده را تعیین کرد. آن‌ها برای نگاشت نقاط روی مرز گشودگی بیضوی به دایره‌ای به شعاع واحد از تابع نگاشت هم‌نوا استفاده کردند. همچنین از ترکیب روش حداقل مربعات و روش هم‌مکانی^۱ برای مدل‌سازی مرز خارجی صفحه استفاده کردند.

شاخه‌ی دیگری از تحقیقات صورت گرفته در زمینه‌ی سازه‌های مهندسی، مسأله‌ی مربوط به بهینه‌سازی این سازه‌ها به منظور انتخاب صحیح پارامترهای بهینه می‌باشد. با توجه به اینکه انواع مختلفی از روش‌های بهینه‌سازی برای حل یک مسأله وجود دارد، انتخاب روش مناسب بستگی به نوع و شرایط تعریف (شامل قیود، تعداد متغیرها، خطی یا غیرخطی بودن و ...) مسأله دارد. امروزه استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری هوشمند در بهینه‌سازی، به دلیل عملکرد مطلوب در فضاهای جستجوی نامعین و استفاده‌ی مستقیم از مقادیر تابع و عدم نیاز به مشتق آن، که غالباً الهام گرفته از طبیعت می‌باشند در مسائلی بهینه‌سازی مهندسی مورد توجه و استفاده‌ی بسیاری از محققین بوده که در این دسته می‌توان به الگوریتم ژنتیک که یکی از قدیمی‌ترین روش‌های بهینه‌سازی هوشمند می‌باشد، اشاره کرد. همچنین اخیراً از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند مبتنی بر هوش جمعی (دسته‌ی ذرات) مانند اجتماع ذرات، کلونی مورچگان و ... برای طراحی سازه‌های مهندسی استفاده شده است. از تحقیقات صورت گرفته در این زمینه می‌توان به کار سیواکومار^۲ و همکارانش [۲۴] اشاره داشت که به بهینه‌سازی صفحات کامپوزیتی چندلایه حاوی گشودگی بیضوی با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند؛ آن‌ها در تحقیق خود جهت‌گیری گشودگی، نسبت طول به عرض گشودگی، زاویه‌ی الیاف، ضخامت لایه‌ها، و جنس لایه‌ها را به عنوان پارامترهای طراحی و فرکانس طبیعی را به عنوان قید طراحی در این الگوریتم مورد بررسی قرار دادند. چو^۳ و روالدز^۴ [۲۵] توانایی الگوریتم ژنتیک را در کمینه‌سازی تمرکز تنش در چندلایه‌های کامپوزیتی حاوی گشودگی نشان دادند. در این تحقیق از

¹ Collocation Method

² Sivakumar

³ Cho

⁴ Rowlands

الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ی المان محدود توسعه یافته‌ی ویژه‌ای استفاده شد. روش المان محدود برای تعیین تابع هزینه به منظور کمینه‌سازی تمرکز تنش اطراف گشودگی استفاده شد. هدف اصلی مقاله-ی فوق دستیابی به مقادیر بهینه پارامترهای طراحی برای رسیدن به کمترین تنش ممکن بود. لیو^۱ و همکاران [۲۶] به کمک المان محدود، به بهینه‌سازی صفحات کامپوزیتی دارای چند گشودگی پرداختند. آن‌ها ابتدا تأثیر تعداد گشودگی را مورد بررسی قرار دادند و به مقایسه‌ی بین معیار شکست تسای-هیل برای یک صفحه کامپوزیتی دارای یک گشودگی، دو گشودگی نزدیک به هم، دو گشودگی دور از هم و چهار گشودگی پرداختند. سپس به بررسی نحوه‌ی قرارگیری لایه‌ها و اثر آن بر معیار شکست تسای-هیل پرداختند و در آخر هم مقایسه‌ای بین تعامل گشودگی‌ها در صفحات شبه همسانگرد انجام دادند. شارما^۲ و همکارانش [۲۷] به طراحی بهینه‌ی چندلایه‌های متقارن دارای گشودگی بیضوی با کمک روش الگوریتم ژنتیک پرداختند. هدف آن‌ها بدست آوردن بهترین زاویه الیاف در چندلایه‌های متقارن کامپوزیتی دارای گشودگی بیضوی تحت شرایط مختلف بارگذاری درون صفحه‌ای بود. آن‌ها معیار تسای-هیل و معیار شکست مرتبه دوم را به عنوان تابع هدف به ترتیب برای تک لایه‌ها و چندلایه‌های متقارن در نظر گرفتند. متغیر طراحی آن‌ها نیز زاویه‌ی الیاف و نحوه چیدمان بود. کلاهان^۳ و همکارش [۲۸] از اصول الگوریتم ژنتیک برای طراحی چند لایه‌های کامپوزیتی استفاده کردند، آن‌ها با در نظر گرفتن جهت چرخش الیاف و چیدمان لایه‌ها به عنوان متغیرهای طراحی سعی در افزایش مقاومت چندلایه با کمترین وزن ممکن را داشتند. ماک^۴ و گوربا^۵ [۲۹] از الگوریتم ژنتیک و المان محدود استفاده کردند تا به چیدمان بهینه یک ورق چندلایه برسند. ایشان ترتیب قرار گرفتن، شکل و اندازه (ماده و حجم) را به عنوان پارامترهای مطرح برای بهینه‌سازی در نظر گرفتند و حالت بهینه‌ی آن‌ها را به منظور ایجاد کمترین بار کماتش نشان دادند. نتایج آن‌ها برای

¹ Liu

² Sharma

³ Callahan

⁴ Muc

⁵ Gurba

ورق با گشودگی دایروی تحت بار کششی گزارش شده است. کواردی نو^۱ و همکاران [۳۰] کاربرد الگوریتم ژنتیک را در طراحی بهینه‌ی صفحات کامپوزیتی پیچ شده نشان دادند. ایشان ضخامت صفحه، نحوه‌ی قرارگیری الیاف، محل قرارگیری اتصالات، انعطاف‌پذیری پیچ و ابعاد پیچ را به عنوان متغیرهای طراحی یا پارامترهای بهینه‌سازی جهت دستیابی به کمترین تنش در نظر گرفتند. سورش^۲ و همکاران [۳۱] در تحقیقی مشابه همان مسأله را با مقایسه الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات در یک مسأله‌ی بهینه‌سازی چندهدفه مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که نه تنها نتایج با استفاده از این روش بهتر شده، بلکه استفاده از این روش نسبت به الگوریتم ژنتیک زمان محاسبات را هم به شدت کاهش داده است. کاتیراوان^۳ و همکارش [۳۲] به طراحی بهینه‌ی یک تیر کامپوزیتی مقید که به عنوان عضو اصلی در حمل بار در یک تیغه روتور بالگرد مورد استفاده قرار گرفته، با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات پرداختند. همچنین نتایج این روش با روش الگوریتم گرادیانی مورد بررسی قرار گرفته که حکایت از طراحی بهتری با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات در حالت کلی دارد. نارایانانیک^۴ و همکاران [۳۳] با استفاده از الگوریتم ژنتیک و مکانیزم شکست، به طراحی بهینه‌ی کامپوزیت‌ها، بر اساس معیار شکست پرداختند.

آلمیدا^۵ و آوراچ^۶ [۳۴] با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تحلیل اجزای محدود به طراحی بهینه‌ی صفحات چندلایه کامپوزیتی پرداختند، ایشان متغیرهای زاویه‌ی الیاف و ضخامت را به عنوان پارامترهای طراحی در نظر گرفتند و اقدام به بهینه‌سازی خیز و وزن سازه به طور مجزاً و در کنار هم کردند. چو^۷ [۳۵] یک پانل ساندویچی با پوسته‌های چندلایه کامپوزیتی و با هسته‌ی شش‌گوشه را با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات بهینه کرد. چیدمان لایه‌ها از سه ماده‌ی مختلف و زاویه‌ی الیاف در هر لایه به عنوان متغیرهای طراحی در این مسأله‌ی بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین

¹ Kradinov

² Suresh

³ Kathiravan

⁴ Narayana Nai

⁵ Almeida

⁶ Awruch

⁷ Cho

رهیافت حلّ مسأله با آنالیز عددی روش^۱ FEA انجام شده تا پاسخ سازه را در یک شرایط زاویه و چیدمان مطمئن به دست آورد. روش اجتماع ذرات تابع هدف را برای رسیدن به مقدار حداکثر کلی با استفاده از روش جستجوی تصادفی هدایت می‌کند. استفاده از روش الگوریتم اجتماع ذرات اصلاح شده در بهینه‌سازی نحوه‌ی قرار گرفتن کامپوزیت‌های چندلایه توسط چانگ^۲ و همکاران [۳۶] مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها در تحقیقاتشان به بهینه‌سازی با این الگوریتم در فضای گسسته پرداختند، که نتایج از بهبود بازده محاسبات نشان می‌دهد. الگوریتم کلونی مورچه‌ها در بهینه‌سازی چند هدفه پانل‌های ساندویچی کامپوزیتی کف وسایل نقلیه ریلی توسط هادسون^۳ و همکارانش [۳۷] استفاده شده است. لیمان^۴ و همکارش [۳۸] روشی برای دستیابی به چیدمانی بهینه برای چندلایه‌های کامپوزیتی تحت بارگذاری عرضی و بار فشاری، با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک و تحلیل ایزوژئومتریک اجزای محدود ارائه کردند. تابع هدف در این تحقیق دستیابی به استحکام و ظرفیت تحمل بار بیشینه در نظر گرفته شد و تئوری کرنش فون کارمن برای در نظر گرفتن تغییرشکل‌های بزرگ و رفتار غیرخطی صفحات ناشی از خمش و کمانش و پس‌کمانش مورد استفاده قرار گرفت. آلانسون^۵ و همکارش [۳۹] به بررسی متغیرهای الگوریتم اجتماع ذرات مبنی بر حرکت دسته‌ی پرندگان به صورت روش تناوبی برای بهینه‌سازی سازه‌های کامپوزیتی پرداختند. آن‌ها همچنین در مقاله‌ی خود به مقایسه الگوریتم اجتماع ذرات با الگوریتم ژنتیک کلاسیک استفاده شده در نرم افزار باس-کاترو^۶ پرداختند و در نهایت روش‌های مختلف به منظور بهبود بخشیدن در عملکرد این الگوریتم را ارائه دادند. جیانکیاو^۷ و همکارانش [۴۰] توسعه یک روش برای طراحی بهینه‌ی (بر پایه یک قابلیت اعتماد) سازه‌های کامپوزیتی بر مبنای ترکیب روش PSO^۸ و FEA ارائه دادند. چن^۹ و همکارانش [۴۱]

^۱ Finite Element Analysis

^۲ Chang

^۳ Hudson

^۴ Le-Manh

^۵ Alonso

^۶ Boss Quattro

^۷ Jianqiao

^۸ Particle Swarm Optimization

^۹ Chen

یک روش بهینه‌سازی برای طراحی قابلیت اطمینان سازه‌های کامپوزیتی بر پایه روش بهینه‌سازی انبوه ذرات و المان محدود ارائه کردند. این روش دارای سه مرحله به صورت زیر است: ۱- تحلیل تنش با نرم‌افزار انسیس ۲- محاسبات قابلیت اطمینان ۳- بهینه‌سازی. در این روش ابتدا یک جمعیت اولیه با موقعیت و سرعت تصادفی ایجاد می‌شوند و این داده‌ها برای محاسبه تنش سازه به نرم‌افزار انسیس داده می‌شوند و پس از آن داده‌های خروجی از نرم‌افزار برای محاسبه قابلیت اطمینان و بهینه‌سازی به نرم‌افزار متلب منتقل می‌شوند. در این روش داده‌ها همواره بین انسیس و متلب در حال تبادل می‌باشند. آن‌ها همچنین مثال‌هایی عددی از قبیل چندلایه‌ها، پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی و مخازن تحت فشار کامپوزیتی را برای اثبات مؤثر بودن روش خود ارائه دادند. باربوسا^۱ و همکارانش [۴۲] به طراحی یک سازه چند سلولی کامپوزیتی تحت پیچش با بررسی تأثیر بسیاری از مواد و پارامترهای هندسی بر روی رفتار مکانیکی بهینه‌ی سازه پرداختند. در این کار تکنیک بهینه‌سازی PSO برای پیشینه‌سازی ثابت پیچشی (G) سازه مورد استفاده قرار گرفته است. ژو^۲ و همکارانش [۴۳] بهینه‌سازی سازی پایه‌ها کامپوزیتی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها روش وزنه‌های متغیر چندهدفه الگوریتم ژنتیک را برای به حداقل رساندن وزن و ضریب اینرسی و به حداکثر رساندن بار کمانش ارائه دادند. متغیرهای طراحی آن‌ها درصد حجمی الیاف در هر لایه و نوع چیدمان لایه‌ها بود. همچنین آن‌ها از معیار شکست تسای-وو به عنوان یک محدود کننده طراحی بهینه استفاده کردند. وثوقی و گریست^۳ [۴۴] یک روش ترکیبی جدید از بهینه‌سازی انبوه ذرات، المان محدود و الگوریتم ژنتیک پیوسته برای تشخیص خسارت تیرهای کامپوزیتی چندلایه ارائه دادند. آن‌ها در ابتدا معادلات تعادل حاکم بر تیرهای کامپوزیتی چندلایه را با استفاده از تئوری تغییر شکل برشی اول به دست آوردند و سپس با کمک روش المان محدود، معادلات تعادل به دست آمده را با شرایط مرزی مرتبط حل کردند و سپس برای حل مشکل تشخیص خسارت روش ترکیبی خود را ارائه دادند. در این روش در ابتدا هر

¹ Ines Barbosa

² Zhu

³ Gerist

فرد با توجه به رابطه به روزرسانی سرعت در الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات به روزرسانی می‌شود. سپس در الگوریتم ژنتیک پیوسته جمعیت بهبود می‌یابد. آن‌ها برای اثبات کارایی روش خود به تأثیر پارامترهایی از جمله نسبت خسارت، تعداد المان‌های خسارت دیده، زاویه الیاف تیرهای چندلایه و تعداد لایه‌ها بر تشخیص خسارت تیرهای کامپوزیتی چندلایه پرداختند. جعفری و محمودزاده [۴۵] با در نظر گرفتن پارامترهای موثر بر توزیع تنش اطراف گشودگی‌های چندضلعی منتظم در صفحات همسانگرد و ارتوتروپیک نامحدود، از روش الگوریتم اجتماع ذرات، پارامترهای بهینه جهت دستیابی به کمترین مقدار تنش در اطراف گشودگی را معرفی کردند. این پارامترها شامل: هندسه‌ی گشودگی، شعاع انحنای گوشه‌ی گشودگی، زاویه‌ی چرخش گشودگی، زاویه‌ی الیاف، زاویه‌ی بار و خواص مکانیکی در مواد ارتوتروپیک می‌باشند.

پارامترهای متعددی از جمله شکل گشودگی، جهت‌گیری گشودگی (زاویه‌ی چرخش گشودگی)، زاویه‌ی بار، چیدمان لایه‌ها، شعاع انحنای گوشه‌ی گشودگی و همچنین خواص مکانیکی ماده در صفحات چندلایه متقارن بر توزیع تنش اطراف گشودگی و تنش شکست واقع در صفحه‌ای که تحت بارگذاری قرار می‌گیرند، تأثیرگذار هستند. در این تحقیق با تکیه بر حلّ تحلیلی لخنیتیسکی و بسط این حلّ به سایر گشودگی‌های منتظم هندسی و ترکیب آن با الگوریتم بهینه‌سازی PSO سعی شده است تا با استفاده از این الگوریتم، مقادیر بهینه‌ی پارامترهای فوق جهت دستیابی به کمترین تنش ممکن در اطراف گشودگی و تنش شکست معرفی گردد. در این تحقیق کمینه کردن مقدار تنش بی-بعد در اطراف گشودگی و تنش شکست به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده‌اند. تنش بی‌بعد به صورت بیشترین تنش ایجاد شده در اطراف گشودگی به تنش اعمالی تعریف می‌شود.

فصل ۲

روابط حاکم بر روش حل تحلیلی

۲-۱- مقدمه

حلّ تحلیلی حاضر بر پایه‌ی تئوری الاستیسیته مواد ناهمسانگرد ارائه شده توسط لخنیتسکی [۱۵] استوار می‌باشد. در این تئوری ابتدا تابع تنش به صورت عبارتی تحلیلی بر حسب متغیر مختلط نوشته می‌شود. سپس با ارائه معادله‌ی سازگاری بر حسب تابع تنش و حلّ آن از روش معادله‌ی مشخصه و اعمال شرایط مرزی، می‌توان مؤلفه‌های تنش را به دست آورد. فرضیه‌های اولیه که در استخراج روابط ارائه شده در این پایان نامه مدنظر قرار گرفته شده است، عبارتند از:

الف) اندازه گشودگی در مقابل ابعاد صفحه کوچک است (صفحه بی‌نهایت).

ب) ماده دارای رفتار الاستیک خطی است.

پ) صفحه‌ی مورد مطالعه چندلایه متقارن در نظر گرفته شده است.

۲-۲ روابط حاکم بر چندلایه‌های متقارن

با استفاده از قانون هوک تعمیم یافته در حالت سه بعدی می‌توان هر مؤلفه تنش را به تمام

مؤلفه‌های تغییر شکل نسبی و هر مؤلفه تغییر شکل نسبی را به تمام مؤلفه‌های تنش مربوط ساخت:

$$\sigma_i = C_{ij} \varepsilon_j$$

$$\varepsilon_i = S_{ij} \sigma_j \quad (1-2)$$

که در آن $[C]$ و $[S]$ به ترتیب ماتریس‌های سختی و نرمی ماده هستند همان طور که می‌دانیم:

$$[C] = [S]^{-1} \quad (2-2)$$

همان طور که می‌دانیم برای مواد کامپوزیتی تک لایه روابط تنش کرنش در حالت کلی به صورت

زیر است:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{13} & 0 & 0 & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{23} & 0 & 0 & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{13} & \bar{S}_{23} & \bar{S}_{33} & 0 & 0 & \bar{S}_{36} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{S}_{44} & \bar{S}_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{S}_{45} & \bar{S}_{55} & 0 \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{36} & 0 & 0 & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3-2)$$

که با فرض حالت تنش صفحه‌ای ($\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0$) رابطه‌ی (۳-۲) به صورت زیر

در خواهد آمد:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4-2)$$

با معکوس کردن رابطه‌ی (۴-۲) رابطه‌ی زیر به دست خواهد آمد:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (5-2)$$

در سیستم مختصات اصلی ماده:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (6-2)$$

مؤلفه‌های ماتریس $[Q]$ با توجه به ثابت‌های مهندسی به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشند:

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

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad (7-2)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

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

رابطه بین مؤلفه‌های \bar{Q}_{ij} و Q_{ij} نیز به صورت زیر است:

$$\begin{aligned}
 \bar{Q}_{11} &= m^4 Q_{11} + 2m^2 n^2 (Q_{12} + 2s_{66}) + n^4 Q_{22} \\
 \bar{Q}_{12} &= m^2 n^2 (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66}) + (m^4 + n^4) Q_{12} \\
 \bar{Q}_{22} &= n^4 Q_{11} + 2m^2 n^2 (Q_{12} + 2Q_{66}) + m^4 Q_{22} \\
 \bar{Q}_{16} &= m^3 n (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) + mn^3 (Q_{12} - Q_{22} - 2Q_{66}) \\
 \bar{Q}_{26} &= mn^3 (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66}) + nm^3 (Q_{12} - Q_{22} - 2Q_{66}) \\
 \bar{Q}_{66} &= m^2 n^2 (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66}) + (m^4 + n^4) Q_{66} \\
 m &= \cos(\theta), n = \sin(\theta)
 \end{aligned} \tag{۸-۲}$$

که در آن θ مختصه منحنی الخط در دستگاه قطبی است.

با توجه به روابط چندلایه‌ها داریم:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{16} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \tag{۹-۲}$$

که در آن درایه‌های ماتریس A به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$A_{ij} = \sum_k [(\bar{Q}_{ij})]_k (h_k - h_{k-1}) \quad i, j = 1, 2, 6 \tag{۱۰-۲}$$

h_k فاصله لایه k ام تا لایه میانی چندلایه متقارن است.

برای چندلایه‌های متقارن می‌توان ثابت کرد درایه‌های ماتریس B برابر صفر هستند.

همچنین داریم:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} dz \tag{۱۱-۲}$$

$$\int_{h_{k-1}}^{h_k} dz = (h_k - h_{k-1}) = t_k \tag{۱۲-۲}$$

$$\sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} dz = \sum_{k=1}^n (h_k - h_{k-1}) = H \tag{۱۳-۲}$$

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{1}{H} \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} \quad (۱۴-۲)$$

H ضخامت کل می باشد.

در نتیجه برای به دست آوردن مؤلفه‌های ماتریس نرمی کاهش یافته برای مواد کامپوزیتی چندلایه

از روابط زیر استفاده می کنیم [۲۱]:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (۱۵-۲)$$

که در آن:

$$[a] = [\bar{b}_{ij}]^{-1} \quad \bar{b}_{ij} = \frac{1}{H} [A]$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= \frac{(\bar{b}_{22}\bar{b}_{66} - \bar{b}_{26}^2)}{B} \\ a_{12} &= \frac{(\bar{b}_{16}\bar{b}_{26} - \bar{b}_{12}\bar{b}_{66})}{B} \\ a_{22} &= \frac{(\bar{b}_{11}\bar{b}_{66} - \bar{b}_{16}^2)}{B} \\ a_{16} &= \frac{(\bar{b}_{16}\bar{b}_{26} - \bar{b}_{12}\bar{b}_{66})}{B} \\ a_{26} &= \frac{(\bar{b}_{12}\bar{b}_{16} - \bar{b}_{11}\bar{b}_{26})}{B} \\ a_{66} &= \frac{(\bar{b}_{11}\bar{b}_{22} - \bar{b}_{12}^2)}{B} \end{aligned} \quad (۱۶-۲)$$

$$B = (\bar{b}_{11}\bar{b}_{22}\bar{b}_{66} - 2\bar{b}_{11}\bar{b}_{26}^2 + 2\bar{b}_{12}\bar{b}_{26}\bar{b}_{16} - \bar{b}_{66}\bar{b}_{12}^2 - \bar{b}_{22}\bar{b}_{16}^2) \quad (۱۷-۲)$$

که در آن H ضخامت کل لایه‌های یک چندلایه متقارن نسبت به لایه میانی و t_k ضخامت لایه

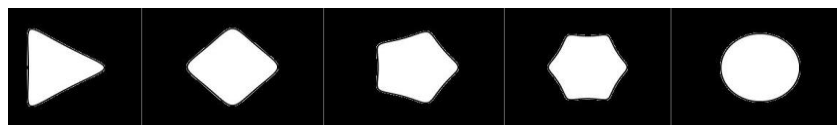
k ام این چندلایه می باشد.

۳-۲ تابع نگاشت

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، توزیع تنش اطراف گشودگی دایره‌ای توسط ساوین و لخنیتسکی با استفاده از روش تحلیلی مورد بحث، بررسی شد. برای بسط روش حل آن‌ها به سایر گشودگی‌ها ابتدا باید با استفاده از یک تابع نگاشت ساده $z = x + sy$ نقاط روی هر گشودگی با شکل خاص (کانتور) را به دایره به شعاع واحد تبدیل کرد که x و y آن از رابطه‌ی زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{cases} x = \lambda(\cos\theta + w\cos(n\theta)) \\ y = -\lambda(c\sin\theta - w\sin(n\theta)) \end{cases} \quad (18-2)$$

در رابطه‌ی بالا، پارامترهای مختلفی وجود دارند که با تغییر آن‌ها، می‌توان گشودگی‌های مختلف را مدل کرد. c و n نشان‌دهنده نوع هندسه گشودگی است. به طوری که n تعداد اضلاع شکل گشودگی و c میزان کشیدگی و یا نسبت اضلاع شکل گشودگی را مشخص می‌کند. λ بزرگی گشودگی را نشان می‌دهد و در گشودگی‌های لبه‌دار w معیار تیزی یا نرمی و انحنای گشودگی است ($w \geq 0$). با تغییر این پارامتر (w) می‌توان انواع گشودگی‌های مختلف را با شعاع انحنای متفاوت ایجاد کرد و در هر مورد تنش در جهت‌های مختلف را مورد بررسی قرار داد. تأثیر پارامترهای مختلف در ایجاد گشودگی در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. به عنوان مثال در معادله مثلثاتی بالا برای گشودگی مثلث متساوی‌الاضلاع باید $n = 2$ و $c = 1$ باشد. برای هر گشودگی وقتی w کاهش می‌یابد گشودگی ملایم‌تر می‌شود تا اینکه w به کمترین مقدار خود، یعنی $w = 0$ می‌رسد. در این حالت گشودگی به دایره تبدیل می‌شود. مثلاً برای گشودگی شش‌ضلعی ($n = 5, c = 1$) تغییرات w در شکل زیر ارائه شده است و روند میل کردن گشودگی شش‌ضلعی به دایره را نشان می‌دهد. در این شکل انواع گشودگی‌ها برای $c = 1$ می‌باشد.



$n=2$
 $w=0.3$

$n=3$
 $w=0.15$

$n=4$
 $w=0.1$

$n=5$
 $w=0.08$

$n=1$
 $w=0$

شکل ۱-۲ تأثیر پارامترهای n و w در ایجاد گشودگی

رابطه‌ی فوق تنها نقاط روی مرز گشودگی را مدل می‌کند برای به‌دست آوردن نقاط خارج از گشودگی از متغیر ξ استفاده می‌کنیم که آن را به‌وسیله پارامترهای ρ و θ به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$\xi = \rho e^{i\theta} = \rho(\cos\theta + i \sin\theta) \quad (19-2)$$

با توجه به رابطه اویلر خواهیم داشت:

$$e^{in\theta} = \cos(n\theta) + i \sin(n\theta) \quad (20-2)$$

$$e^{-in\theta} = \cos(n\theta) - i \sin(n\theta)$$

با جایگذاری $\rho = 1$ در رابطه (۱۹-۲) می‌توان دایره‌ای به شعاع واحد را به صورت زیر مدل کرد:

$$\xi = e^{i\theta} = (\cos\theta + i \sin\theta) \quad (21-2)$$

که با توجه به روابط (۲۰-۲) و (۲۱-۲) و از ترکیب آن‌ها خواهیم داشت:

$$\cos(n\theta) = \frac{1}{2} \left[\zeta^n + \frac{1}{\zeta^n} \right] \quad (22-2)$$

$$\sin(n\theta) = -\frac{i}{2} \left[\zeta^n - \frac{1}{\zeta^n} \right]$$

برای نگاشتن هر نوع گشودگی، به دایره‌ای به شعاع واحد می‌توان از تابع انتقال $w(\xi)$ که به صورت زیر تعریف می‌شود استفاده کرد:

$$w(\xi) = x + iy \quad (23-2)$$

با جایگذاری x و y از رابطه (۱۸-۲) در رابطه (۲۳-۲) به رابطه زیر خواهیم رسید:

$$w(\xi) = \frac{\lambda}{2} \left[\left(\left(\xi + \frac{1}{\xi} \right) + w \left(\xi^n + \frac{1}{\xi^n} \right) \right) - c \left(\xi - \frac{1}{\xi} \right) + w \left(\xi^n - \frac{1}{\xi^n} \right) \right] \quad (24-2)$$

که اگر آن را ساده کنیم به صورت زیر خواهد شد:

$$w(\xi) = \frac{\lambda}{2} \left[(1-c)\xi + \frac{(1+c)}{\xi} + 2w\xi^n \right] \quad (25-2)$$

با توجه به تابع نگاشت فوق اگر $\rho = 1$ باشد نقاط روی مرز گشودگی مشخص می‌شوند اما برای

نگاشتن نقاط خارج گشودگی کافی است مقدار ρ را کوچک تر از یک انتخاب کرد. با استفاده از تابع نگاشت فوق و انتخاب مناسب برای پارامترهای n ، C و W می توان گشودگی های مختلف را مدل کرد [۱۶].

۲-۴ حل تحلیلی

در حالت دوبعدی رابطه ی سازگاری به صورت زیر بیان می شود:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \quad (26-2)$$

رابطه ی تنش و کرنش برای ماتریس نرمی کاهش یافته به صورت زیر است:

$$\varepsilon_x = a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{16}\tau_{xy} \quad (27-2)$$

$$\varepsilon_y = a_{12}\sigma_x + a_{22}\sigma_y + a_{26}\tau_{xy}$$

$$\gamma_{xy} = a_{16}\sigma_x + a_{26}\sigma_y + a_{66}\tau_{xy}$$

از طرفی اگر تابع تنش را به صورت $U(x, y)$ تعریف کنیم خواهیم داشت:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}$$

$$\sigma_y = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \quad (28-2)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y}$$

بنابراین با جایگذاری تابع تنش در رابطه ی سازگاری (۲۶-۲) معادله سازگاری برای ماده

غیرهمسانگرد و برحسب تابع تنش به صورت زیر می باشد:

$$a_{22} \frac{\partial^4 U}{\partial x^4} - 2a_{26} \frac{\partial^4 U}{\partial x^3 \partial y} + (2a_{12} + a_{66}) \frac{\partial^4 U}{\partial x^2 \partial y^2} - 2a_{16} \frac{\partial^4 U}{\partial x \partial y^3} + a_{11} \frac{\partial^4 U}{\partial y^4} = 0 \quad (29-2)$$

در این رابطه a_{ij} اعضاء ماتریس نرمی کاهش یافته یک ورق چندلایه متقارن است که بر اساس

فرض کرنش صفحه ای یا تنش صفحه ای به صورت تابعی از S_{ij} مطابق رابطه (۱۶-۲) قابل محاسبه

می باشند. معادله فوق به کمک چهار اپراتور مشتق خطی مرتبه اول به صورت زیر بیان می شود:

$$D_1 D_2 D_3 D_4 U = 0 \quad (30-2)$$

$$D_i (i = 1, 2, 3, 4) = \frac{\partial}{\partial y} - S_i \frac{\partial}{\partial x} \quad (31-2)$$

که S_i جواب معادله مشخصه زیر است:

$$a_{11}s^4 - 2a_{16}s^3 + (2a_{12} + a_{66})s^2 - 2a_{26}s + a_{22} = 0 \quad (32-2)$$

ریشه‌های این معادله مشخصه را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$s_1 = \alpha_1 + i\beta_1, s_3 = \alpha_2 + i\beta_2 \quad (33-2)$$

$$s_2 = \alpha_1 - i\beta_1, s_4 = \alpha_2 - i\beta_2$$

لخنیتسکی [۱۵] نشان داد که معادله‌ی مشخصه حاضر دارای چهار ریشه مختلط می‌باشد که در حالت کلی برای مواد غیرهمسانگرد این چهار ریشه برابر نمی‌باشند. چون این ریشه‌ها دوجه‌دو مزدوج هم هستند؛ بنابراین حل معادله (۲-۲۹) با توجه به ریشه‌های معادله مشخصه به صورت زیر خواهد بود:

$$U(x, y) = F_1(z_1) + F_2(z_2) + \overline{F_1(z_1)} + \overline{F_2(z_2)} \quad (34-2)$$

که z_i توسط انتقال ساده زیر به دست می‌آید:

$$z_i = x + s_i y \quad i = 1, 2 \quad (35-2)$$

در رابطه‌ی (۲-۳۴) F_1 و F_2 دو تابع تحلیلی هستند و $\overline{F_1}$ و $\overline{F_2}$ به ترتیب مزدوج آن‌ها می‌باشند.

برای ساده‌سازی و پایین آوردن مرتبه مشتق از فرض زیر استفاده می‌شود:

$$\frac{dF_1}{dz_1} = \varphi(z_1) \quad , \quad \frac{dF_2}{dz_2} = \psi(z_2) \quad (36-2)$$

$$\frac{d\overline{F_1}}{d\overline{z_1}} = \overline{\varphi(z_1)} \quad , \quad \frac{d\overline{F_2}}{d\overline{z_2}} = \overline{\psi(z_2)}$$

با توجه به معادلات (۲-۲۸)، (۲-۳۴) و (۲-۳۶) می‌توان نتیجه گرفت که تنش داخل صفحه‌ای

σ_x بر حسب تابعی از دو تابع تنش $\varphi(z_1)$ و $\psi(z_2)$ به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = \frac{\partial^2}{\partial y^2} [F_1(z_1) + F_2(z_2) + \overline{F_1(z_1)} + \overline{F_2(z_2)}] =$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{dF_1}{dz_1} \frac{\partial z_1}{\partial y} + \frac{dF_2}{dz_2} \frac{\partial z_2}{\partial y} + \frac{d\overline{F_1}}{d\overline{z_1}} \frac{\partial \overline{z_1}}{\partial y} + \frac{d\overline{F_2}}{d\overline{z_2}} \frac{\partial \overline{z_2}}{\partial y} \right]$$
(۳۷-۲)

با توجه به رابطه ۲-(۳۶) می‌توان رابطه اخیر را به صورت زیر نوشت:

$$\sigma_x = \frac{\partial}{\partial y} [s_1 \varphi(z_1) + s_2 \psi(z_2) + \overline{s_1 \varphi(z_1)} + \overline{s_2 \psi(z_2)}]$$
(۳۸-۲)

حاصل $\frac{\partial \overline{z_1}}{\partial y}$ به این صورت محاسبه می‌شود که اگر فرض کنیم $s_1 = \alpha + i\beta$ آنگاه

$z_1 = x + (\alpha + i\beta)y$ در نتیجه $\overline{z_1} = x + \alpha y - i\beta y$ پس $\frac{\partial \overline{z_1}}{\partial y} = \alpha - i\beta$ به همین ترتیب می‌توان

نتیجه گرفت که $\frac{\partial \overline{z_2}}{\partial y} = \overline{\alpha - i\beta}$. بنابراین حاصل مشتق بعدی و مقدار تنش σ_x به صورت زیر محاسبه

می‌شود:

$$\sigma_x = [s_1^2 \varphi'(z_1) + s_2^2 \psi'(z_2) + \overline{s_1^2 \varphi'(z_1)} + \overline{s_2^2 \psi'(z_2)}]$$
(۳۹-۲)

با توجه به رابطه $z + \overline{z} = 2Re[z]$ می‌توان نوشت:

$$\sigma_x = 2Re[s_1^2 \varphi'(z_1) + s_2^2 \psi'(z_2)]$$
(۴۰-۲)

به همین ترتیب بقیه مولفه‌های تنش‌ها که در رابطه زیر ارائه شده؛ محاسبه می‌شوند:

$$\sigma_x = \sigma_x^\infty + 2Re[s_1^2 \varphi'(z_1) + s_2^2 \psi'(z_2)]$$

$$\sigma_y = \sigma_y^\infty + 2Re[\varphi'(z_1) + \psi'(z_2)]$$
(۴۱-۲)

$$\tau_{xy} = \tau_{xy}^\infty - 2Re[s_1 \varphi'(z_1) + s_2 \psi'(z_2)]$$

که در آن $z_i = x + s_i y$ و $i = 1, 2$

مطابق مرجع [۱۷] داریم:

$$\sigma_x^\infty = \frac{\sigma}{2} [(\lambda + 1) + (\lambda - 1)\cos 2\alpha]$$

$$\sigma_y^\infty = \frac{\sigma}{2} [(\lambda + 1) - (\lambda - 1)\cos 2\alpha]$$
(۴۲-۲)

$$\tau_{xy}^\infty = \frac{\sigma}{2} [(\lambda - 1)\sin 2\alpha]$$

که در آن:

$$1. \text{ کشش تک محوره: } \lambda = 0, \alpha \neq 0 \quad 2. \text{ فشار هیدرواستاتیک: } \lambda = 1, \alpha \neq 0$$

$$\text{الف) کشش در جهت محور } x: \lambda = 0, \alpha = \frac{\pi}{2} \quad \text{الف) کشش دو محوره: } \lambda = 1, \alpha = 0$$

$$\text{ب) کشش در جهت محور } y: \lambda = 0, \alpha = 0 \quad 3. \text{ بار برشی: } \lambda = -1, \alpha = \frac{\pi}{4} \text{ or } \frac{3\pi}{4}$$

σ نیروی کششی در واحد سطح و همان طور که قبلاً نیز اشاره شد α زاویه اعمال نیرو نسبت به محور x هاست. $\varphi'(z_1)$ و $\psi'(z_2)$ به ترتیب مشتق توابع $\varphi(z_1)$ و $\psi(z_2)$ نسبت به z_1 و z_2 می-باشد که بعداً تعریف می شوند.

برای این که از σ_x, σ_y و τ_{xy} مقادیر $\sigma_\rho, \sigma_\theta$ و $\tau_{\rho\theta}$ برعکس را به دست آوریم از روابط انتقال هم‌نوا استفاده می کنیم. مماس منحنی‌های $\rho = cte$ و $\theta = cte$ در نقطه c کشیده شده است و در جهت افزایش ρ و θ با نمادهای (ρ) و (θ) در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. مشخص است که زاویه محورهای θ و ρ نسبت به oxy به اندازه α چرخیده است.

با اعمال نگاشت، تنش‌ها در مختصات کارتزین به مختصات منحنی الخط عمودی تبدیل می شوند

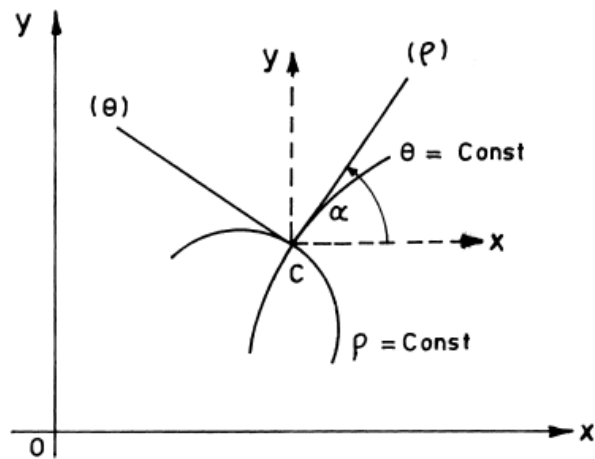
و داریم:

$$\sigma_\theta + \sigma_\rho = \sigma_y + \sigma_x \quad (2-43)$$

$$\sigma_\theta - \sigma_\rho + 2i\tau_{\rho\theta} = (\sigma_y - \sigma_x + 2i\tau_{xy})e^{2i\alpha}$$

مطابق شکل ۲-۲، α زاویه بین محور x ها و محور منحنی الخط ρ می باشد (جهت ρ جهت عمود

بر سطح گشودگی است).



شکل ۲-۲ مختصات منحنی الخط

توابع تحلیلی $\varphi(z_1)$ و $\psi(z_2)$ به فرم توابع انتگرالی توسط ساوین تعریف شده‌اند. البته توابع

فوق به شکل‌های دیگری مثل سری لورنت نیز تعریف می‌شوند.

توابع تحلیلی ذکرشده در معادلات (۲-۴۱)، با جایگذاری ξ به جای z_1 و z_2 در $\varphi(z_1)$ و

$\psi(z_2)$ به دست می‌آیند. متغیرهای z_1 و z_2 از این واقعیت حاصل می‌شوند که مواد غیرهمسانگرد

لزوماً دارای چهار ریشه S_i خواهند بود؛ (معادله ۲-۳۳) که وابسته به دو ثابت β_1 و β_2 هستند.

صفحه‌ی دارای گشودگی که تحت بارگذاری در لبه‌های خارجی می‌باشد در شکل ۲-۳ نشان داده

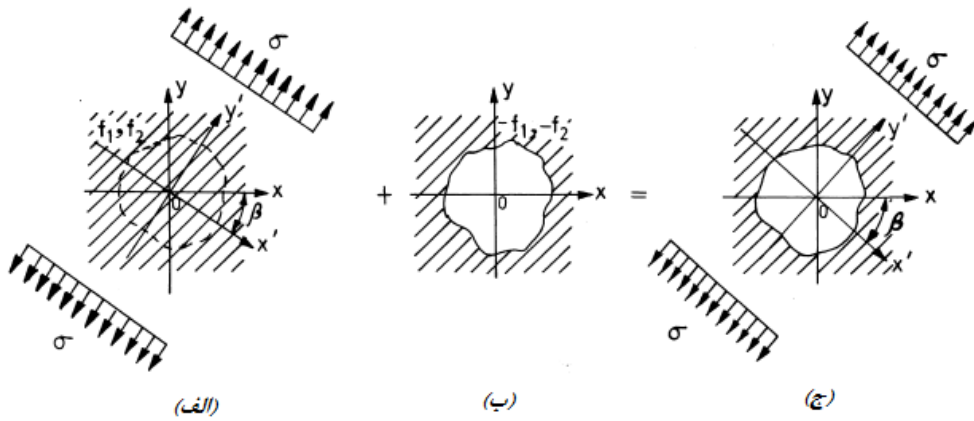
شده است. در لبه‌های گشودگی باری اعمال نمی‌شود. برای حل ابتدا از صفحه‌ی بدون گشودگی تحت

تنش محوری، تابع تنش‌های $\varphi_1(z_1)$ و $\psi_1(z_2)$ که در شکل ۲-۳-الف نشان داده شده است به دست

می‌آوریم. شرایط مرزی f_1 و f_2 روی گشودگی مجازی از این توابع تنش به دست می‌آیند. سپس

ورق حاوی گشودگی در غیاب بارگذاری بیرونی تحت شرایط مرزی منفی f_1 و f_2 در مرز گشودگی

قرار می‌گیرد. (شکل ۲-۳-ب).



شکل ۳-۲ نمای حلّ مسأله: (الف): بار خارجی در لبه‌های بیرونی، شرایط مرزی f_1 و f_2 روی گشودگی مجازی. (ب): بار معکوس روی مرز گشودگی: $-f_1$ و $-f_2$ (ج): شرایط تمرکز تنش برای مرز داخلی بدون بار و مرز خارجی تحت بارگذاری

برای این مرحله توابع تنش $\psi_0(z_2)$ و $\varphi_0(z_1)$ بر اساس مقاله یوکاجونکر [۴۶] از شرایط مرزی

به دست می‌آیند.

با استفاده از روش جمع آثار مرحله اول و دوم حل داریم:

$$\varphi(z_1) = \varphi_1(z_1) + \varphi_0(z_1) \quad (۴۴-۲)$$

$$\psi(z_2) = \psi_1(z_2) + \psi_0(z_2)$$

با قرار دادن معادلات (۴۴-۲) در معادلات (۴۳-۲) تنش‌ها به دست می‌آیند.

با قرار دادن $\varphi'_1(z_1) = B^* + iC^*$ و $\psi'_1(z_2) = B'^* + iC'^*$ و انتگرال‌گیری مقدار $\varphi_1(z_1)$ و

$\psi_1(z_2)$ به دست می‌آید. برای یکتایی جواب $C^* = 0$ فرض می‌شود.

شرایط مرزی روی گشودگی مجازی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$f_1 = 2\text{Re}[\varphi_1(z_1) + \psi_1(z_2)] \quad (۴۵-۲)$$

$$f_2 = 2\text{Re}[s_1\varphi_1(z_1) + s_2\psi_1(z_2)]$$

حال ورق با گشودگی و شرایط مرزی منفی که تحت بار خارجی نیست را در نظر می‌گیریم.

شرایط مرزی روی گشودگی به صورت $f_1^0 = -f_1$ و $f_2^0 = -f_2$ است و داریم:

$$f_1^0 = -2\text{Re}[B^* z_1 + (B'^* + iC'^*)z_2] \quad (۴۶-۲)$$

$$f_2^0 = -2\text{Re}[s_1 B^* z_1 + s_2 (B'^* + iC'^*)z_2]$$

که در آن:

$$B^* = \frac{\sigma_x^\infty + (\alpha_2^2 + \beta_2^2)\sigma_y^\infty + 2\alpha_2\tau_{xy}^\infty}{2[(\alpha_2 - \alpha_1)^2 + (\beta_2^2 - \beta_1^2)]} \quad (۴۷-۲)$$

$$B'^* = \frac{(\alpha_1^2 - \beta_1^2 - 2\alpha_1\alpha_2)\sigma_y^\infty - \sigma_x^\infty - 2\alpha_2\tau_{xy}^\infty}{2[(\alpha_2 - \alpha_1)^2 + (\beta_2^2 - \beta_1^2)]} \quad (۴۸-۲)$$

$$C'^* = \frac{\{(\alpha_2 - \alpha_1)\sigma_x^\infty + [\alpha_2(\alpha_1^2 - \beta_1^2) - \alpha_1(\alpha_2^2 - \beta_2^2)]\sigma_y^\infty + [(\alpha_1^2 - \beta_1^2) - (\alpha_2^2 - \beta_2^2)]\tau_{xy}^\infty\}}{\{2\beta_2[(\alpha_2 - \alpha_1)^2 + (\beta_2^2 - \beta_1^2)]\}} \quad (۴۹-۲)$$

به جای z_1 و z_2 در معادلات فوق به ترتیب مقادیر $z_1 = x + s_1 y$ و $z_2 = x + s_2 y$ جایگذاری

می‌شود. به کمک رابطه شوارتز که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F(\xi) = \frac{1}{2\pi i} \int U(\theta) \frac{\sigma + \xi d\sigma}{\sigma - \xi d\xi} + i\alpha_0 \quad (۵۰-۲)$$

در این انتگرال $U(\theta)$ قسمت حقیقی تابع $F(\xi)$ روی دایره‌ای به شعاع واحد (γ) می‌باشد و α_0

یک ثابت حقیقی است.

می‌توان نوشت:

$$\Phi_0(\xi) + \Psi_0(\xi) = \frac{1}{4\pi i} \int -f_1^0(\theta) \frac{\sigma + \xi d\sigma}{\sigma - \xi d\xi} + i\alpha_0 \quad (۵۱-۲)$$

$$s_1 \Phi_0(\xi) + s_2 \Psi_0(\xi) = \frac{1}{4\pi i} \int -f_2^0(\theta) \frac{\sigma + \xi d\sigma}{\sigma - \xi d\xi} + i\alpha_0$$

با حل معادلات بالا نسبت به $\Phi_0(\xi)$ و $\Psi_0(\xi)$ توابع تحلیلی زیر حاصل می‌شود: [۱۲]

$$\Phi_0(\xi) = \frac{i}{4\pi(s_1 - s_2)} \int (s_2 f_1^0 - f_2^0) \frac{\sigma + \xi d\sigma}{\sigma - \xi d\xi} \quad (۵۲-۲)$$

$$\Psi_0(\xi) = \frac{-i}{4\pi(s_1 - s_2)} \int (s_1 f_1^0 - f_2^0) \frac{\sigma + \xi d\sigma}{\sigma - \xi d\xi} \quad (۵۳-۲)$$

که Z_i به صورت زیر قابل محاسبه می باشد:

$$z_i = x + s_i y, \quad i = 1, 2 \quad (54-2)$$

با استفاده از تعریف x و y در معادله (۲-۱۸) معادله (۲-۵۴) به صورت زیر خواهد شد:

$$z_i = \lambda [r(\cos\theta + w \cos n\theta) - s_i(c \sin\theta - w \sin n\theta)] \quad (55-2)$$

Z_i برحسب ξ با استفاده از معادلات (۲-۲۱) و (۲-۵۵) به صورت زیر بیان می شود:

$$z_1 = \frac{\lambda}{2} \left[a_1 \xi + \frac{b_1}{\xi} + w c_1 \xi^n + \frac{w d_1}{\xi^n} \right] \quad (56-2)$$

که برای حالت روی مرز دایره ($r = 1$):

$$a_1 = 1 + i s_1 c$$

$$b_1 = 1 - i s_1 c$$

$$c_1 = 1 - i s_1$$

$$d_1 = 1 + i s_1$$

(۲-۵۷)

به همین ترتیب برای Z_2 خواهیم داشت:

$$z_2 = x + s_2 y$$

$$z_2 = \frac{\lambda}{2} \left[a_2 \xi + \frac{b_2}{\xi} + w c_2 \xi^n + \frac{w d_2}{\xi^n} \right] \quad (58-2)$$

$$a_2 = 1 + i s_2 c$$

$$b_2 = 1 - i s_2 c$$

$$c_2 = 1 - i s_2$$

$$d_2 = 1 + i s_2$$

(۲-۵۹)

با جایگذاری معادلات (۲-۵۵) و (۲-۵۷) داخل معادله مربوط به شرایط مرزی (۲-۴۵) خواهیم

داشت:

$$f_1^0 = -2 \operatorname{Re} \left[K_1 \xi + \frac{K_2}{\xi} + K_3 \xi^n + \frac{K_4}{\xi^n} \right] \quad (60-2)$$

که در آن:

$$\begin{aligned}
 K_1 &= \frac{\lambda}{2} [B^* a_1 + (B'^* + iC'^*) a_2] \\
 K_2 &= \frac{\lambda}{2} [B^* b_1 + (B'^* + iC'^*) b_2] \\
 K_3 &= \frac{\lambda}{2} [B^* w c_1 + (B'^* + iC'^*) w c_2] \\
 K_4 &= \frac{\lambda}{2} [B^* w d_1 + (B'^* + iC'^*) w d_2]
 \end{aligned}
 \tag{۶۱-۲}$$

به طور مشابه:

$$f_2^0 = -2Re \left[K_5 \xi + \frac{K_6}{\xi} + K_7 \xi^n + \frac{K_8}{\xi^n} \right]
 \tag{۶۲-۲}$$

$$\begin{aligned}
 K_5 &= \frac{\lambda}{2} [s_1 B^* a_1 + (B'^* + iC'^*) a_2 s_2] \\
 K_6 &= \frac{\lambda}{2} [s_1 B^* b_1 + (B'^* + iC'^*) b_2 s_2] \\
 K_7 &= \frac{\lambda}{2} [s_1 B^* w c_1 + (B'^* + iC'^*) w c_2 s_2] \\
 K_8 &= \frac{\lambda}{2} [s_1 B^* w d_1 + (B'^* + iC'^*) w d_2 s_2]
 \end{aligned}
 \tag{۶۳-۲}$$

برای حل معادلات (۵۱-۲) و (۵۲-۲) از رابطه شوارتز استفاده شد. رابطه دیگر شوارتز که از آن

استفاده می‌شود انتگرال زیر است:

$$\begin{aligned}
 \frac{i}{4\pi(s_1 - s_2)} \int 2a \cdot Re \left(K_1 \sigma^N + \frac{K_2}{\sigma^N} \right) \frac{\sigma + \xi}{\sigma - \xi} \frac{d\sigma}{d\xi} \\
 = \frac{-a}{s_1 - s_2} (K_1 + \bar{K}_2) \xi^N
 \end{aligned}
 \tag{۶۴-۲}$$

با جایگذاری معادلات (۶۰-۲) و (۶۲-۲) در روابط (۴۱-۲) و (۴۲-۲) و استفاده از قضیه بالا:

$$\begin{aligned}
 \Phi_0(\xi) &= \frac{\xi}{s_1 - s_2} (s_2(K_1 + \bar{K}_2) - (K_5 + \bar{K}_6)) \\
 &\quad + \frac{\xi^n}{s_1 - s_2} (s_2(K_3 + \bar{K}_4) - (K_7 + \bar{K}_8))
 \end{aligned}
 \tag{۶۵-۲}$$

$$\Psi_0(\xi) = \frac{\xi}{s_2 - s_1} (s_1(K_1 + \bar{K}_2) - (K_5 + \bar{K}_6)) \quad (66-2)$$

$$+ \frac{\xi^n}{s_2 - s_1} (s_1(K_3 + \bar{K}_4) - (K_7 + \bar{K}_8))$$

در این رابطه \bar{K} مزدوج K می‌باشد. حال آخرین مرحله محاسبه $\varphi'_0(z_1)$ و $\psi'_0(z_2)$ است. برای

به دست آوردن مشتق‌ها از تعریف مشتق به صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\varphi'_0(z_1) = \frac{d\varphi_0(z_1)}{dz_1} = \frac{d\Phi_0(\xi)}{d\xi} \cdot \frac{d\xi}{dz_1} = \frac{d\Phi_0(\xi)}{d\xi} \cdot \frac{1}{dz_1/d\xi} \quad (67-2)$$

و به همین ترتیب برای محاسبه $\psi'_0(z_2)$ داریم:

$$\psi'_0(z_2) = \frac{d\Psi_0(z_1)}{dz_1} = \frac{d\Psi_0(\xi)}{d\xi} \cdot \frac{d\xi}{dz_2} = \frac{d\Psi_0(\xi)}{d\xi} \cdot \frac{1}{dz_2/d\xi} \quad (68-2)$$

با توجه به معادلات (65-2) و (66-2) و به کمک روابط (67-2) و (68-2) خواهیم داشت:

$$\frac{dz_1}{d\xi} = \frac{\lambda}{2} \left[a_1 - \frac{b_1}{\xi^2} + wc_1 N \xi^{n-1} - \frac{wd_1 n}{\xi^{n+1}} \right] \quad (69-2)$$

$$\frac{dz_2}{d\xi} = \frac{\lambda}{2} \left[a_2 - \frac{b_2}{\xi^2} + wc_2 N \xi^{n-1} - \frac{wd_2 n}{\xi^{n+1}} \right] \quad (70-2)$$

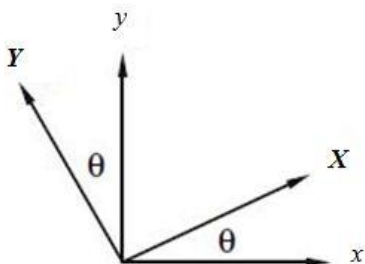
$$\varphi'_0(z_1) = \left[\frac{1}{s_1 - s_2} (s_2(K_1 + \bar{K}_2) - (K_5 + \bar{K}_6)) + \frac{n\xi^{n-1}}{s_1 - s_2} (s_2(K_3 + \bar{K}_4) - (K_7 + \bar{K}_8)) \right] \times \left(\frac{dz_1}{d\xi} \right) \quad (71-2)$$

$$\psi'_0(z_2) = \left[\frac{1}{s_2 - s_1} (s_1(K_1 + \bar{K}_2) - (K_5 + \bar{K}_6)) + \frac{n\xi^{n-1}}{s_2 - s_1} (s_1(K_3 + \bar{K}_4) - (K_7 + \bar{K}_8)) \right] \times \left(\frac{dz_2}{d\xi} \right) \quad (72-2)$$

۵-۲ روابط مربوط به چرخش گشودگی

برای بررسی حالت چرخش گشودگی نیاز است که در روابط (۲-۵۵) تا (۲-۶۰) تغییراتی به شکل

زیر اعمال کنیم:



شکل ۴-۲ چرخش محورها

با توجه به تعریف Z_i در مختصات جدید $X - Y$ داریم:

$$z_i = X + s_i Y \quad (۷۳-۲)$$

که مختصات $X - Y$ جدید با توجه به مختصات $x - y$ مرجع و اگر زاویه چرخش گشودگی را β

در نظر بگیریم به صورت زیر تعریف می شود:

$$\begin{cases} X = x \cos\beta - y \sin\beta \\ Y = x \sin\beta + y \cos\beta \end{cases} \quad (۷۴-۲)$$

که در آن:

$$\begin{cases} x = \lambda(\cos\theta + w \cos(n\theta)) \\ y = -\lambda(c \sin\theta - w \sin(n\theta)) \end{cases} \quad (۷۵-۲)$$

با جایگذاری رابطه (۲-۷۵) در (۲-۷۴) و سپس در رابطه (۲-۷۳) خواهیم داشت:

$$z_i = (x \cos\beta - y \sin\beta) + s_i(x \sin\beta + y \cos\beta) \quad (۷۶-۲)$$

$$z_i = \lambda \left[\begin{array}{l} (\cos\theta + w \cos(n\theta)) \cos\beta - (c \sin\theta - w \sin(n\theta)) \sin\beta \\ + s_i (-(\cos\theta + w \cos(n\theta)) \sin\beta - (c \sin\theta - w \sin(n\theta)) \cos\beta) \end{array} \right] \quad (۷۷-۲)$$

$$z_i = \lambda \left[\begin{array}{l} \cos\theta \cos\beta + w \cos(n\theta) \cos\beta - c \sin\theta \sin\beta + \\ w \sin(n\theta) \sin\beta - s_i \cos\theta \sin\beta - s_i w \cos(n\theta) \sin\beta - \\ s_i c \sin\theta \cos\beta + s_i w \sin(n\theta) \cos\beta \end{array} \right] \quad (۷۸-۲)$$

$$z_i = \frac{\lambda}{2} \left[\begin{array}{l} \left(\xi + \frac{1}{\xi}\right) \cos\beta + w \left(\xi^n + \frac{1}{\xi^n}\right) \cos\beta - ic \left(\xi - \frac{1}{\xi}\right) \sin\beta + \\ iw \left(\xi^n - \frac{1}{\xi^n}\right) \sin\beta + s_i \left(\xi + \frac{1}{\xi}\right) \sin\beta + s_i w \left(\xi^n + \frac{1}{\xi^n}\right) \sin\beta + \\ is_i c \left(\xi - \frac{1}{\xi}\right) \cos\beta - is_i w \left(\xi^n + \frac{1}{\xi^n}\right) \cos\beta \end{array} \right] \quad (79-2)$$

پس بنابراین خواهیم داشت:

$$z_i = \frac{\lambda}{2} \left[a\xi + \frac{b}{\xi} + cw\xi^n + \frac{dw}{\xi^n} \right] \quad (80-2)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} a &= \cos\beta - ic \sin\beta + s_i \sin\beta + is_i c \cos\beta \\ b &= \cos\beta + ic \sin\beta + s_i \sin\beta - is_i c \cos\beta \\ c &= \cos\beta + i \sin\beta + s_i \sin\beta - is_i \cos\beta \\ d &= \cos\beta - i \sin\beta + s_i \sin\beta + is_i \cos\beta \end{aligned} \quad (81-2)$$

سپس روند حل از معادله (81-2) به بعد همانند قبل می‌باشد.

۲-۶ تنش شکست

تنش شکست در تک‌لایه ناهمسانگرد دارای اهمیت بالایی در توضیح مشخصات سفتی آن است. یک طراحی موفق سازه نیازمند استفاده کارآمد و امن از مواد می‌باشد. نظریه‌های تنش که صحتشان با انجام آزمایش‌های تجربی اثبات شده‌اند، برای بررسی وجود تنش‌ها در محدوده‌ی امن تنش باید در مقام مقایسه به کار بروند.

استحکام یک چندلایه، وابسته به استحکام تک تک لایه‌ها است. این موضوع رسیدن به روشی اقتصادی و ساده برای تشخیص استحکام چندلایه را محقق می‌سازد.

نظریه‌های مختلفی تا امروز برای مطالعه‌ی تنش شکست لایه‌ها ارائه شده‌اند که عموماً بر پایه استحکام محوری و برشی در تک لایه‌های تک جهتی هستند. یک نظریه استحکام ساده برای مواد همسانگرد بر پایه‌ی پیدا کردن تنش‌های نرمال و بیشترین تنش‌های برشی اصلی شکل می‌گیرد؛ اما برای یک تک‌لایه ناهمسانگرد، این‌طور نیست. به این صورت که در تک‌لایه‌های ناهمسانگرد نظریه‌ها

بر پایه تنش‌ها در ماده یا محورهای محلی ساخته می‌شوند، چون تک‌لایه‌ها ناهمسانگرد هستند و برعکس مواد همسانگرد، خواص در زوایای مختلف، متفاوت می‌باشند. در مورد تک‌لایه‌های تک‌جهتی، دو محور جنس ماده وجود دارد: یکی موازی با الیاف و دیگری عمود بر راستای الیاف. در نتیجه چهار پارامتر استحکام نرمال وجود دارد، در هر یک از دو محور جنس ماده، یکی در جهت کششی و دیگری در جهت فشاری. پارامتر پنجم استحکام مربوط به استحکام برشی در تک‌لایه ناهمسانگرد تک‌جهتی می‌شود. مقدار تنش‌های برشی چه منفی باشد چه مثبت، تأثیری در نتیجه استحکام برشی ندارد؛ اما در تک‌لایه زاویه‌ای، علامت تنش‌های برشی تأثیرگذار خواهند بود [۴۷].

$$X = (\sigma_1^T)_{ult} \rightarrow \text{if } (\sigma_1 > 0)$$

$$X = (\sigma_1^C)_{ult} \rightarrow \text{if } (\sigma_1 < 0)$$

$$Y = (\sigma_2^T)_{ult} \rightarrow \text{if } (\sigma_2 > 0) \quad (۸۲-۲)$$

$$Y = (\sigma_2^C)_{ult} \rightarrow \text{if } (\sigma_2 < 0)$$

$$S = (\tau_{12})_{ult}$$

که X بیان‌کننده استحکام کششی در جهت طولی، Y بیان‌کننده استحکام در جهت عرضی و S

استحکام برشی است.

معیارهای شکست موجود، توانایی ارائه مکانیزم شکست را ندارند و فقط با توجه به رفتار ماده وقوع شکست را نشان می‌دهند. در این پایان‌نامه معیارهای ارائه شده در حقیقت بیشترین تنش مجاز اعمال شده به چندلایه‌های دارای گشودگی را به ما نشان می‌دهند. کمترین مقدار تنش شکست محاسبه شده در اطراف گشودگی همان تنش شکست صفحه دارای گشودگی خواهد بود. برای محاسبه‌ی تنش شکست در تک‌لایه از معیارهای مختلفی استفاده می‌شود.

برای لایه‌های مختلف چندلایه، تنش شکست را با توجه به معیارهای شکست محاسبه می‌کنیم و کمترین مقدار بدست آمده با توجه به اصل شکست اولین لایه (FPF^1)، به عنوان تنش شکست چندلایه در نظر می‌گیریم.

¹ First Ply Fail

در این پایان نامه معیار شکست Tsai-Hill برای محاسبه تنش شکست استفاده شده است و به

صورت رابطه (۸۳-۲) به دست می آید [۴۸]:

$$\sigma_f^2 = \frac{1}{\left(\frac{\sigma_1}{\sigma}\right)^2 \frac{1}{X^2} + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma}\right)^2 \frac{1}{Y^2} + \left(\frac{\tau_6}{\sigma}\right)^2 \frac{1}{S^2} - \left(\frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma^2}\right) \frac{1}{X^2}} \quad (۸۳-۲)$$

که در آن σ_1 ، σ_2 و τ_6 تنش های انتقال یافته σ_x ، σ_y و τ_{xy} در راستای الیاف هستند.

فصل ۳

بهینه‌سازی و روش انبوه ذرات

۱-۳ مقدمه

بدست آوردن بهترین نتیجه ممکن برای یک مسأله با توجه به شرایط حاکم بر آن را بهینه‌سازی گویند. مشخصه ذاتی انسان‌ها و حتی دیگر موجودات، تمایل به انجام کارها و فعالیت‌ها با کمترین زحمت و نائل شدن به بیشترین سود و منفعت می‌باشد که همین مشخصه، دلیل اصلی دغدغه بشر در افزایش بهره‌وری و بازدهی فعالیت‌های خود در برابر منابع نسبتاً محدود طبیعت بوده است. فلسفه پیدایش اهرم‌های مکانیکی و قرقره‌ها مؤید همین ویژگی است.

امروزه، در طراحی، ساخت و نگهداری هر سیستم مهندسی، مهندسان باید تصمیمات مدیریتی و تکنولوژیکی متعددی را در مراحل مختلف اتخاذ کنند. هدف نهایی چنین تصمیماتی، کمینه کردن انرژی لازم، در عین بدست آوردن بیشترین سود ممکن خواهد بود. میزان تلاش لازم یا سود مورد نظر در هر وضعیت عملی را می‌توان به صورت تابعی از متغیرهای تصمیم‌گیری (طراحی) مشخص بیان کرد. بنابراین، می‌توان بهینه‌سازی را به عنوان فرایند یافتن شرایطی که مقدار کمینه یا بیشینه یک تابع را به دست می‌دهد، تعریف نمود. از آنجایی که برای حل مناسب همه مسائل موجود در بهینه‌سازی روش یکتایی وجود ندارد، روش‌های متنوعی از بهینه‌سازی برای حل مسائل مختلف بهینه‌سازی پدید آمده‌اند.

۲-۳ الگوریتم‌های فراابتکاری^۱

به طور کلی الگوریتم‌های بهینه‌سازی را می‌توان در دو دسته‌ی الگوریتم‌های دقیق^۲ و الگوریتم‌های تقریبی^۳ تقسیم‌بندی کرد. الگوریتم‌های دقیق قادر به یافتن جواب بهینه به صورت دقیق هستند اما در مورد مسائل بهینه‌سازی سخت کارایی ندارند و زمان حل آن‌ها در این مسائل به صورت نمایی افزایش می‌یابد. الگوریتم‌های تقریبی قادر به یافتن جواب‌های خوب (نزدیک به بهینه) در زمان حل کوتاه برای مسائل بهینه‌سازی پیچیده هستند.

^۱ Metaheuristic

^۲ Exact

^۳ Approximate Algorithms

رویکردهای فراابتکاری امروزه کاربرد بسیاری در شاخه‌های مختلف علم بهینه‌سازی پیدا کرده‌اند. مبنای این رویکردها عمدتاً بر اساس نظم یا قواعد موجود در ارگانسیم‌های طبیعی یا برگرفته از دیگر شاخه‌های علوم است. رویکردهای فوق بر خلاف روش‌های دقیق بهینه‌سازی، به دنبال نقاط تا حد ممکن نزدیک به بهینه‌ی سراسری می‌باشند به طوری که نظر تصمیم‌گیرنده را تا سطح قابل قبولی برآورده سازد. به عبارت دیگر، روش‌های فراابتکاری روش‌هایی هستند که حل‌های نزدیک به بهینه را با یک هزینه‌ی محاسباتی قابل قبول جستجو می‌کنند ولی تضمینی برای رسیدن به حل بهینه نمی‌دهند. به روش‌های فراابتکاری اصطلاحاً روش‌های غیردقیق یا تقریبی نیز گفته می‌شود چرا که مکانیزم‌های تصادفی در ایجاد ساختار آنها نقش مهمی را ایفا می‌کنند. چنین الگوریتم‌هایی دارای راهکارهای برون‌رفت از بهینه‌ی محلی می‌باشند و قابل کاربرد در طیف گسترده‌ای از مسائل هستند [۴۹]. در اینجا به صورت کلی معیارهای مختلفی که می‌تواند برای طبقه‌بندی الگوریتم‌های فراابتکاری مورد استفاده قرار گیرد، بیان می‌گردد [۵۰].

مبتنی بر یک جواب و مبتنی بر جمعیت: الگوریتم‌های مبتنی بر یک جواب در حین فرآیند جستجو یک جواب را تغییر می‌دهند، در حالی که در الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت، یک جمعیت از جواب‌ها در نظر گرفته می‌شوند. از الگوریتم‌های متداول فراابتکاری مبتنی بر یک جواب می‌توان الگوریتم جستجوی ممنوعه و الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده را نام برد و از الگوریتم‌های شناخته شده‌ی فراابتکاری بر پایه جمعیت می‌توان الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی کلونی مورچگان، کلونی زنبورها، روش بهینه‌سازی انبوه ذرات، الگوریتم رقابت استعماری، و الگوریتم چکه آب‌های هوشمند را نام برد.

الهام گرفته شده از طبیعت و بدون الهام از طبیعت: بسیاری از الگوریتم‌های فراابتکاری از طبیعت الهام گرفته شده‌اند، در این میان برخی از الگوریتم‌های فراابتکاری نیز از طبیعت الهام گرفته نشده‌اند.

با حافظه و بدون حافظه: برخی از الگوریتم‌های فراابتکاری فاقد حافظه می‌باشند، به این معنا که، این نوع الگوریتم‌ها از اطلاعات به‌دست آمده در حین جستجو استفاده نمی‌کنند (مثلاً تبرید شبیه‌سازی شده) این در حالی است که در برخی از الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر جستجوی ممنوعه از حافظه استفاده می‌کنند؛ که در این حافظه، اطلاعات به‌دست آمده در حین جستجو را در خود ذخیره می‌کند.

قطعی و احتمالی: یک الگوریتم فراابتکاری قطعی نظیر جستجوی ممنوعه، مسأله را با استفاده از تصمیمات قطعی حل می‌کند. اما در الگوریتم‌های فراابتکاری احتمالی نظیر تبرید شبیه‌سازی شده، یک سری قوانین احتمالی در حین جستجو مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳-۳ تاریخچه بهینه‌سازی انبوه ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات، برای اولین بار توسط کندی و ابره‌ارت [۵۱] در سال ۱۹۹۵ مطرح شد. این الگوریتم، یک الگوریتم محاسبه‌ای تکاملی الهام گرفته از طبیعت و هوش جمعی و براساس تکرار می‌باشد. که در آن منظور از هوش جمعی یک سیستم هوش مصنوعی است که بر اساس رفتار جمعی سیستم‌های خود سازماندهی غیرمتمرکز عمل می‌کند. این بحث اولین بار توسط بانی و وانگ [۵۲] در سال ۱۹۹۸ در زمینه‌ی سیستم‌های رباتیک سلولی معرفی شد. منبع الهام این الگوریتم، رفتار اجتماعی حیوانات، همانند حرکت دسته‌جمعی پرندگان و ماهی‌ها می‌باشد. یک سیستم مبتنی بر هوش جمعی شامل جمعیتی از عامل‌های ساده است، که در یک محیط قرار گرفته و با هم در تعامل هستند، با اینکه این عامل‌ها عملکرد ساده‌ای داشته و از یک سیستم کنترل مرکزی پیروی نمی‌کنند، ولی همین تعامل ساده باعث بروز رفتارهای پیچیده در کل سیستم می‌شود. وجه مشترک روش‌های تکاملی آن است که بر خلاف روش‌های ریاضی مرسوم، برای حرکت به سوی پاسخ بهینه نیازی به اطلاعات گرادینانی مرتبه‌ی اول یا مرتبه‌ی دوم تابع هزینه ندارند. این ویژگی، الگوریتم‌های تکاملی را مناسب برای حل مسائل می‌کند، که در آن‌ها تابع هزینه یا قیود مسأله نسبت به

متغیرهای کنترلی مشتق‌پذیر نیستند.

۳-۴ بهینه‌سازی انبوه ذرات

برای برخی از حیوانات که به صورت گروهی زندگی می‌کنند از جمله دسته‌های ماهی، رفتارهای پیچیده‌ای به هنگام حرکت قابل مشاهده هستند. این در حالی است که هر کدام از اعضای جمع به اطلاعات محدودی دسترسی دارند و فقط از موقعیت عده‌ی اندکی از همسایگان‌شان خبر دارند. در چنین مجموعه‌ای هر کدام از حیوانات فقط از چند قانون ساده تبعیت می‌کنند و رفتارهای پیچیده‌ای که در کل جمع قابل مشاهده هستند، چیزی جز ترکیب این قوانین ساده نیست. این رفتارها با اصلی به نام خود-ترتیبی^۱ شناخته می‌شوند [۵۳]. این اصطلاح در علوم مختلف، همچون فیزیک و زیست-شناسی، تعاریف جداگانه دارد. یک تعریف دقیق آن به این صورت است [۵۴]:

خود-ترتیبی فرایندی است که در آن الگوی کلی یک سیستم پیچیده، فقط در اثر تعداد زیادی از تعاملات مرتبه-پایین و درونی شکل می‌گیرد. علاوه بر این، قوانینی که بر تعامل بین عناصر تشکیل-دهنده‌ی سیستم حاکم هستند فقط از اطلاعات محلی استفاده می‌کنند و هیچ وقت از اطلاعات سراسری بهره نمی‌برند.

روش بهینه‌سازی انبوه ذرات یک روش سراسری کمینه‌سازی است که با استفاده از آن می‌توان با مسائلی که جواب آن‌ها یک نقطه یا سطح در فضای n بعدی می‌باشد، برخورد نمود. الگوریتم اجتماع ذرات از تعداد مشخصی از ذرات تشکیل می‌شود که به طور تصادفی، مقدار اولیه می‌گیرند. برای هر ذره دو مقدار وضعیت و سرعت مطابق رابطه‌ی (۳-۱)، تعریف می‌شود که به ترتیب با یک بردار مکان و یک بردار سرعت در فضای n بعدی مدل می‌شوند.

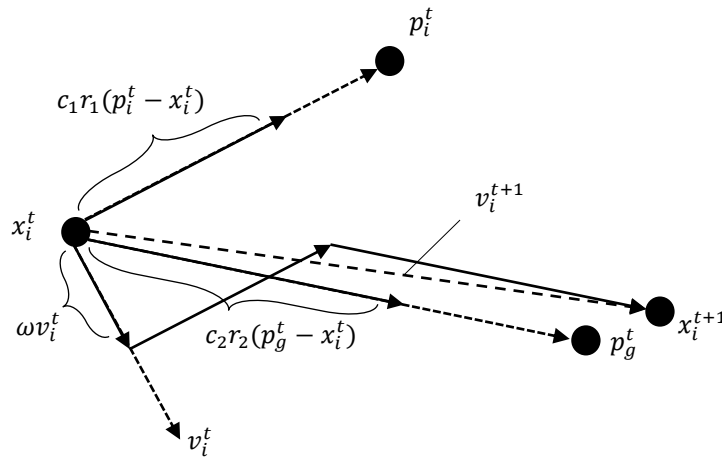
$$x_i = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

$$v_i = (v_1, v_2, v_3, \dots, v_n) \quad (1-3)$$

که در روابط فوق x_i و v_i نشان دهنده مکان و سرعت ذره i ام است.

¹ Self-organization

این ذرات، به صورت تکرارشونده‌ای در فضای n بعدی مسأله حرکت می‌کنند تا با محاسبه مقدار بهینگی به عنوان یک ملاک سنجش، گزینه‌های ممکن جدید را جستجو کنند. بعد فضای مسأله، برابر تعداد متغیرهای طراحی موجود در تابع هزینه است. یک حافظه به ذخیره بهترین موقعیت هر ذره در گذشته و یک حافظه به ذخیره بهترین موقعیت پیش آمده در میان همه ذرات، اختصاص می‌یابد. با تجربه حاصل از این حافظه‌ها، ذرات تصمیم می‌گیرند که در نوبت بعدی، چگونه حرکت کنند. در هر بار تکرار، همه ذرات در فضای n بعدی مسأله حرکت می‌کنند تا بالاخره نقطه بهینه عام، پیدا شود. ذرات، سرعت‌هایشان و موقعیت‌هایشان را بر حسب بهترین جواب‌های مطلق و محلی به‌روز می‌کنند. شکل ۱-۳ نشان دهنده نحوه حرکت ذره است. در این شکل ذره دارای یک موقعیت و سرعت اولیه است. ذره با توجه به بهترین تجربه فردی و بهترین تجربه جمعی حرکت می‌کند به نحوی که هم موقعیت و سرعت فعلی خود، هم بهترین تجربه فردی و هم بهترین تجربه جمعی را مدنظر می‌گیرد و سپس مقداری در جهت فعلی خود، مقداری در جهت بهترین تجربه فردی و مقداری هم در جهت بهترین تجربه جمعی حرکت می‌کند تا موقعیت و سرعت خود را به‌روزرسانی کند.



شکل ۱-۳ چگونگی حرکت ذره در تکرار جدید و به‌روزرسانی سرعت

رابطه (۲-۳) نحوه به‌روزرسانی سرعت و موقعیت را نشان می‌دهد:

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + c_1 r_1 (p_i^t - x_i^t) + c_2 r_2 (p_g^t - x_i^t)$$

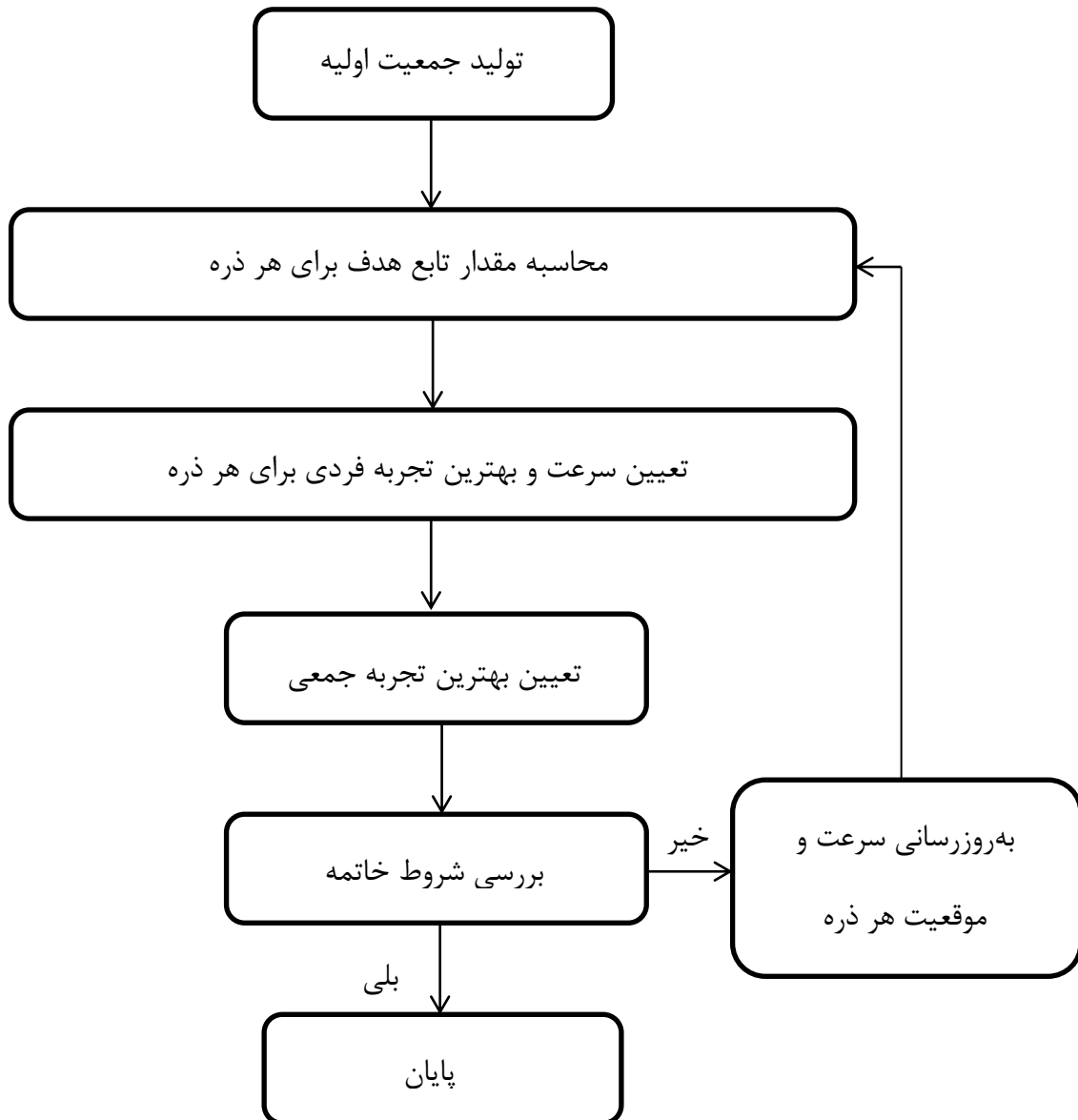
$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (2-3)$$

در رابطه فوق v_i^{t+1} و x_i^{t+1} به ترتیب سرعت و موقعیت به‌روز شده و v_i^t و x_i^t به ترتیب سرعت و موقعیت فعلی ذره می‌باشند. ω بیانگر ضریب اینرسی است. مقادیر c_1 و c_2 نیز به ترتیب ضرایب شتابی شناختی و اجتماعی هستند. r_1 و r_2 اعدادی تصادفی بین صفر و یک می‌باشند. و در آخر p_i^t و p_g^t به ترتیب بهترین تجربه فردی و جمعی می‌باشند.

باید توجه داشت که زمانی که سرعت ذرات به‌روزرسانی می‌شوند این امکان وجود دارد که مقدار سرعت بیش از حد زیاد باشد که سبب می‌شود ذرات غیرقابل کنترل شوند و از فضای جستجو خارج شوند، لذا مقدار سرعت متوسط رابطه (3-3) محدود می‌شود به طوری که اگر مقدار سرعت از حداکثر آن بیشتر باشد مقدار حداکثر محاسبه می‌شود [55].

$$\text{if } |v_i| > v_{max}, \quad \text{then } v_i = \text{sign}(v_i)v_{max} \quad (3-3)$$

مطابق شکل 3-1 و با توجه به رابطه (3-2)، تمایل حرکت ذره به سمت موقعیت به‌روز شده به سرعت فعلی (v_i^t)، بهترین تجربه فردی (c_1) و بهترین تجربه جمعی (c_2) بستگی دارد. شکل 3-2 شماتیک کلی الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات را نشان می‌دهد.



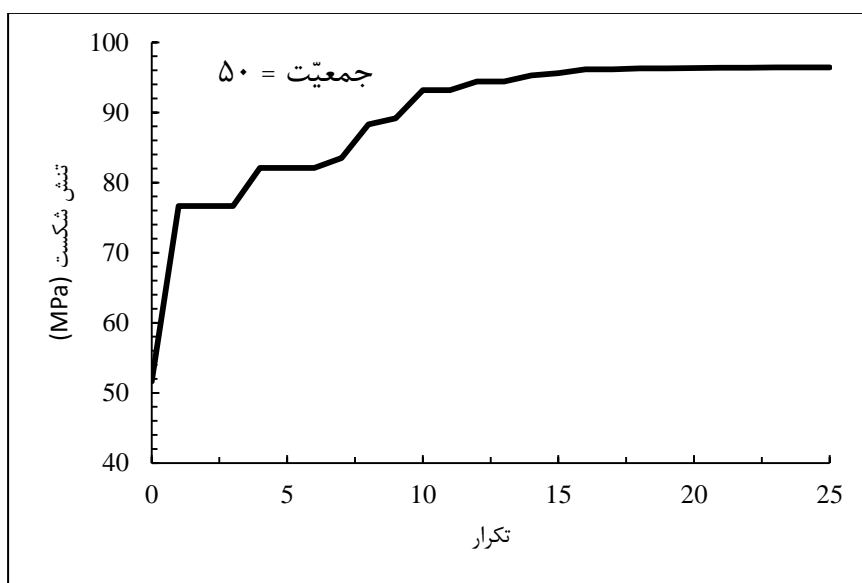
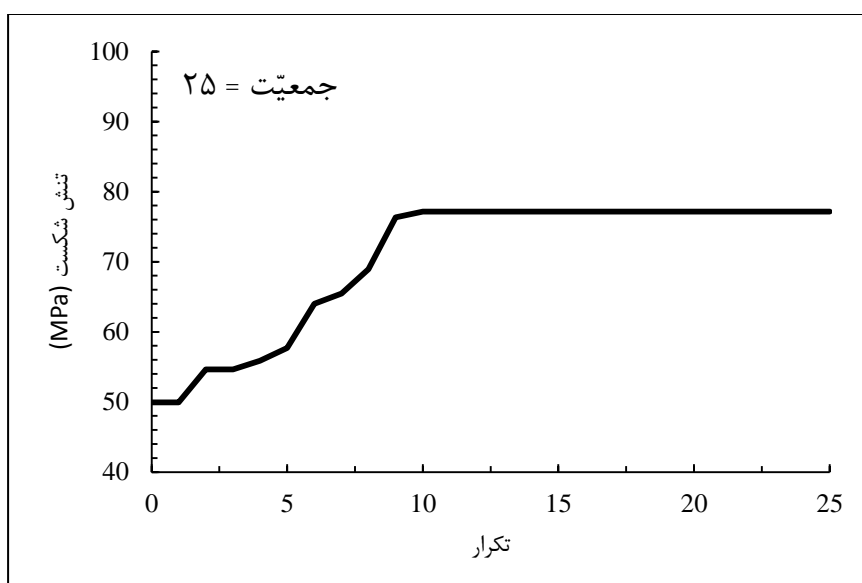
شکل ۲-۳ شماتیک کلی الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات

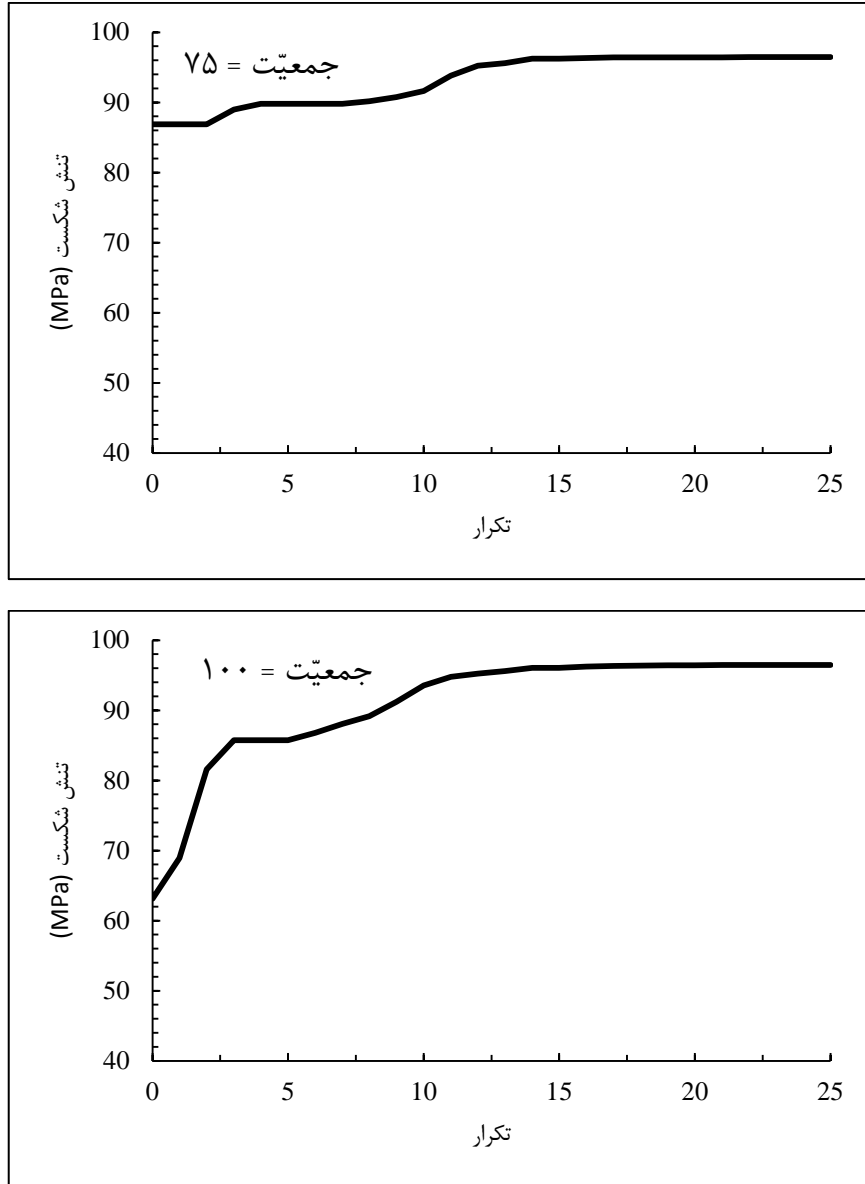
۳-۵ پارامترهای الگوریتم انبوه ذرات

۳-۵-۱ تعداد جمعیت

تعداد جمعیت تأثیر زیادی بر کارایی الگوریتم دارد. کم بودن جمعیت سبب همگرایی الگوریتم به بهینه محلی می‌شود و همچنین زیاد بودن آن باعث طولانی شدن زمان الگوریتم می‌گردد. مقدار خاصی برای جمعیت در مقالات و کتاب‌های مختلف وجود ندارد اما آنچه که واضح است این است که

با افزایش ابعاد مسأله، مقدار جمعیت هم بایستی افزایش یابد [۵۵]. شکل ۳-۳ به بررسی تأثیر جمعیت بر مقدار تنش شکست بهینه یک هشت‌لایه متقارن برای گشودگی مثلثی پرداخته است. همانطور که مشاهده می‌شود در جمعیت ۲۵ به دلیل کم بودن تعداد ذرات، الگوریتم در بهینه محلی گرفتار می‌شود. اما در جمعیت‌های نشان داده شده دیگر الگوریتم به مقدار بهینه تابع هدف همگرا می‌شود و تفاوت آن‌ها در زمان همگرا شدن می‌باشد. لذا در تمام نتایج ارائه شده در این پایان‌نامه جمعیت برابر ۵۰ در نظر گرفته شده است.





شکل ۳-۳ بررسی تأثیر تعداد جمعیت بر مقدار بهینه تنش شکست

۳-۵-۲ ضرایب شتابی

ضرایب شتابی نشان‌دهنده تمایل حرکت ذرات به سمت بهترین تجربه فردی و جمعی می‌باشند. اگر این ضرایب بیش از حد زیاد باشند، ذرات به صورت ناگهانی حرکت می‌کنند و احتمال رسیدن به بهینه‌ی محلی را افزایش می‌دهند اما در مقابل اگر این ضرایب خیلی کم باشند، ذرات آهسته حرکت می‌کنند لذا زمان محاسبات به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و در نتیجه این احتمال وجود دارد که الگوریتم همگرا نشود. زمانی که مقدار c_1 افزایش یابد ذرات تمایل به حرکت به سمت بهترین تجربه

شخصی را دارند و حرکت آن‌ها به سمت بهترین تجربه‌ی جمعی کاهش می‌یابد در حالی که اگر c_2 افزایش یابد ذرات به سمت بهترین تجربه‌ی جمعی حرکت می‌کنند لذا حرکت به سمت بهترین تجربه‌ی شخصی کاهش می‌یابد.

اگر الگوریتم بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های سرعت اجرا شود، در عرض چندین تکرار، سرعت ذرات به شدت افزایش می‌یابد و به مقادیر غیر قابل قبول می‌رسد. کندی^۱ [۵۱] ضمن تحقیقات خود دریافت که برای ذرات تک-بعدهی که به صورت غیرتصادفی حرکت می‌کنند، اگر مقدار $c_1 + c_2$ بین صفر و ۴ باشد، مسیرهایی که ذرات طی می‌کنند قابل قبول‌تر است. با تحلیل‌هایی که بر روی سیستم حرکت ذرات انجام شد، راهبردی برای تعیین ضرایب شتابی ایجاد شده است که الف) از ناپایدار شدن سیستم حرکتی ذرات جلوگیری می‌کند، ب) همگرایی ذرات را تضمین می‌کند و پ) نیازی به تعریف پارامتر v_{max} وجود ندارد. کلرک^۲ و کندی [۵۶] به این نتیجه رسیدند که راه‌های زیادی برای تعیین مقادیر ضرایب شتابی وجود دارد. یکی از ساده‌ترین روش‌ها برای تعیین مقادیر مناسب ضرایب شتابی به این ترتیب است.

$$c_1 = \chi \varphi_1$$

$$c_2 = \chi \varphi_2 \quad (۴-۳)$$

که در آن φ_1 و φ_2 اعدادی مثبت هستند و به نحوی انتخاب می‌شوند که $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \geq 4$ باشد. χ نیز از روی رابطه (۳-۵) تعیین می‌شود.

$$\chi = \frac{2}{\varphi - 2 + \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}} \quad (۵-۳)$$

کلرک مقدار $\varphi_1 = \varphi_2 = 2.05$ را پیشنهاد داد که به این ترتیب داریم: $c_1 = c_2 = 1.4962$ با استفاده از روابط فوق، ذرات بدون نیاز به کمیت محدود کننده v_{max} همگرا می‌شوند. با این همه، معمولاً برای ایجاد تعادل در حرکت ذرات ضرایب شتابی به صورت $c_1 = c_2 = 2$ در نظر گرفته می‌-

^۱ Kennedy

^۲ Clerc

شوند [۵۵].

همچنین در مرجع [۵۷] سعی شده است که به صورت خطی پارامترها را تغییر دهند. با این تفاوت که c_1 کاهش و c_2 افزایش داده شوند. این استراتژی بر روی جستجوی محلی ذرات در فضای جستجو در ابتدای الگوریتم تاکید دارد و در انتهای الگوریتم به جستجوی سراسری ذرات اهمیت داد و ذرات به سمت بهترین موقعیت ملاقات شده گروه جذب می‌شوند. در این استراتژی پارامترها به صورت روابط (۶-۳) و (۷-۳) به روز می‌شوند.

$$c_1(t) = (c_{1,f} - c_{1,i}) \frac{iteration}{maxiteration} + c_{1,i} \quad (۶-۳)$$

$$c_2(t) = (c_{2,f} - c_{2,i}) \frac{iteration}{maxiteration} + c_{2,i} \quad (۷-۳)$$

که در آن $iteration$ برابر شماره تکرار فعلی ذره و $maxiteration$ شماره بیشترین تکرار مجاز است. $c_{1,i}$ و $c_{1,f}$ مقادیر ابتدایی و انتهایی ضرایب شتابی شناختی و $c_{2,i}$ و $c_{2,f}$ مقادیر ابتدایی و انتهایی ضرایب شتابی اجتماعی هستند.

۳-۵-۳ ضریب اینرسی

ضریب اینرسی بر روی همگرایی الگوریتم تأثیر مستقیمی دارد. در واقع می‌توان به واسطه ضریب اینرسی، تأثیر سرعت‌های گذشته را بر سرعت‌های زمان حال کنترل نمود. می‌توان برای برقراری موازنه بهتر میان جستجوی سراسری و جستجوی محلی مقدار ضریب اینرسی را تغییر داد. مقدار زیاد برای ضریب اینرسی باعث می‌شود که ذرات موجود در الگوریتم، به جستجوی مناطق جدیدتر روی بیاورند و یک جستجوی سراسری را انجام دهند. در مقابل یک مقدار کم برای ضریب اینرسی باعث می‌شود که ذرات در منطقه محدودی بمانند و در واقع یک جستجوی محلی را انجام دهند. جستجوی محلی برای دقیق‌تر کردن جواب‌های فعلی مناسب است و جستجوی سراسری برای یافتن جواب‌های بهتری که احتمالاً در جاهای ناشناخته از فضای جستجو وجود دارند، به کار می‌رود. روش‌های مختلفی برای تنظیم مقدار ضریب اینرسی وجود دارد از جمله ضریب اینرسی ثابت،

تطبیقی فازی، کاهش خطی، افزایش خطی، غیرخطی، تصادفی، نمایی و گوسی ارائه شده است. مقایسه‌ای بین روش‌های مختلف توسط هان^۱ و همکارانش [۵۵] انجام شد. آن‌ها روش کاهش خطی را به عنوان بهترین روش معرفی کردند. این مقادیر به صورت $\omega_{min} = 0.4$ و $\omega_{max} = 0.9$ است. در مرجع [۵۷] این ضریب به صورت کاهش خطی در هر تکرار و به صورت رابطه ۳-۸ بیان شده است.

$$\omega = (\omega_{max} - \omega_{min}) \left(\frac{maxiteration - iteration}{maxiteration} \right) + \omega_{min} \quad (۸-۳)$$

گاهی می‌توان ضریب اینرسی را به صورت دینامیکی کاهش داد. این امر سبب می‌شود که ذره در فضای طراحی، جستجوی عمومی بیشتری داشته باشد. در مرجع [۵۸] از رابطه (۳-۹) جهت کاهش دینامیکی ضریب اینرسی استفاده شده است.

$$\omega(t+1) = \bar{\xi} \omega(t), \quad \bar{\xi} \in [0,1] \quad (۹-۳)$$

که در آن $\omega(t)$ و $\omega(t+1)$ به ترتیب ضریب اینرسی تکرار بعدی و فعلی می‌باشند.

۳-۶ مزایا و معایب بهینه‌سازی انبوه ذرات

هر الگوریتمی دارای نقاط قوت و ضعفی می‌باشد و الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات نیز از این امر مستثنی نیست. در ادامه برخی از مزایا و معایب این الگوریتم را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۳-۶-۱ بهره‌مندی از حافظه

الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات دارای حافظه است به گونه‌ای که دانش راه‌حل‌های خوب توسط همه‌ی ذرات حفظ می‌شود. به عبارتی در الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات هر ذره از اطلاعات گذشته خود سود می‌برد، در حالی که چنین رفتار و خصیصه‌ای در سایر الگوریتم‌های تکاملی وجود ندارد، به عنوان مثال در الگوریتم ژنتیک چنین حافظه‌ای وجود ندارد و دانش قبلی مسأله یکباره با تغییر جمعیت از بین می‌رود.

¹ Han

۳-۶-۲ همکاری و اشتراک گذاری اطلاعات بین ذرات

در الگوریتم انبوه ذرات هر عضو جامعه موقعیت خود را با توجه به تجربیات شخصی و تجربیات کل جامعه تغییر می‌دهد. اشتراک اجتماعی اطلاعات بین اعضای یک جامعه یکسری مزیت‌های تکاملی را در پی دارد و این فرضیه پایه و اساس الگوریتم بهبودسازی انبوه ذرات و توسعه آن محسوب می‌شود و در نتیجه همکاری سودمند بین ذرات وجود دارد و ذرات در گروه، اطلاعاتشان را با همدیگر به اشتراک می‌گذارند.

۳-۶-۳ سرعت همگرایی بالا

این الگوریتم که اعضای جمعیت با هم ارتباط دارند و از طریق تبادل اطلاعات، به حل مسئله می‌رسند، از سرعت همگرایی بالایی برخوردار است. حرکت جمعی ذرات یک تکنیک بهبودسازی است که هر یک از ذرات سعی می‌کنند به سمتی حرکت کنند که بهترین تجربه‌های شخصی و گروهی در آن نقاط روی داده است.

۳-۶-۴ راحتی پیاده‌سازی و اجرا

پیاده‌سازی این الگوریتم از الگوریتم‌های ژنتیک و بهبودسازی کلونی مورچگان ساده‌تر است. همچنین اندازه جمعیت این الگوریتم کمتر از الگوریتم ژنتیک می‌باشد. بنابراین مقدار دهی اولیه جمعیت در به‌کارگیری این الگوریتم، ساده‌تر از سایر الگوریتم‌های بهبودسازی هوشمند است. الگوریتم بهبودسازی انبوه ذرات به آسانی قابل اجرا است و در حل بسیاری از مسائل بهبودسازی گسسته و غیرخطی پیوسته مورد استفاده قرار گرفته است. نکته جالب این است که این الگوریتم فقط عملگرهای اصلی ریاضی را به کار می‌برد و نتایج خوبی را فراهم می‌کند. به علت وجود مزایایی همچون موارد ذکر شده این الگوریتم کاربردهای وسیعی در زمینه‌های مختلف دارد. علاوه بر مزایا، این الگوریتم دارای یکسری محدودیت‌ها و معایب می‌باشد که در ادامه به برخی از آن‌ها اشاره می‌کنیم.

۳-۶-۵ همگرایی زودرس

عمده‌ترین مسأله الگوریتم انبوه ذرات همگرایی زودرس می‌باشد. در این الگوریتم ذرات به تدریج در فضای جستجو در نزدیکی نقطه‌ی بهینه عمومی سیر می‌کنند و بقیه فضا را مورد کاوش قرار نمی‌دهند، و به عبارتی ذرات خیلی سریع همگرا می‌شوند. چرا که سرعت ذرات با افزایش تکرار کاهش می‌یابد و بنابراین الگوریتم مجبور است تا به بهترین موقعیتی که تا کنون کشف کرده، همگرا شود و تضمینی نیست که بهترین راه حلّ سراسری باشد. این مسأله حاصل مکانیزم نامناسب تعادل میان جستجوی عمومی و محلی می‌باشد. در الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات، در تکرارهای اول جستجوی عمومی، ترجیح داده می‌شود و به بهبود عملکرد کمک می‌کند و در تکرارهای آخر، جستجوی عمومی کاهش، و جهت بهره‌گیری بیشینه از اطلاعات به دست آمده جستجوی محلی ترجیح داده می‌شود.

۳-۶-۶ گرفتار شدن در بهینه محلی

در طول فرایند جستجو ممکن است برخی ذرات در جمعیت در بهینه محلی گرفتار شوند و در اکتشاف بعدی شرکت نکنند. این مسأله در بهینه‌سازی توابع چند هدفه با ابعاد بالا کاملاً رایج است. ذرات گیر افتاده در بهینه محلی موجب همگرایی زودرس و راه‌حلّ ضعیف می‌شوند.

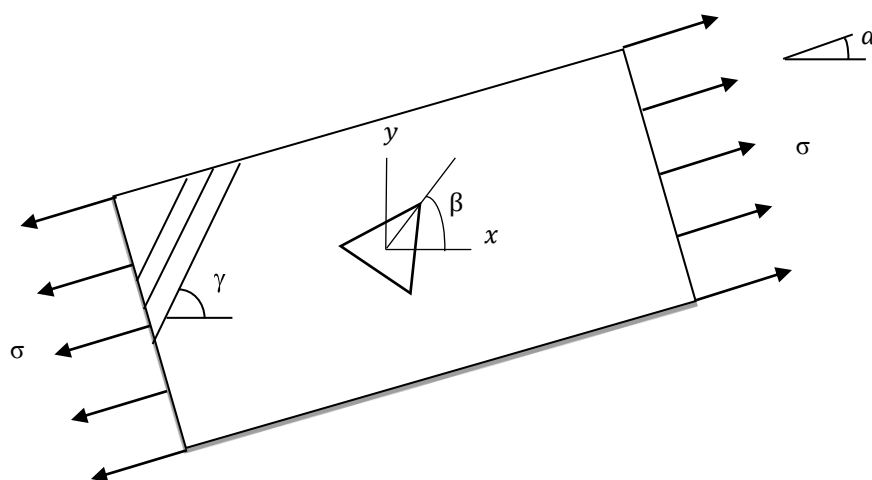
فصل ۴

مطالعه‌های موردی

۱-۴ مقدمه

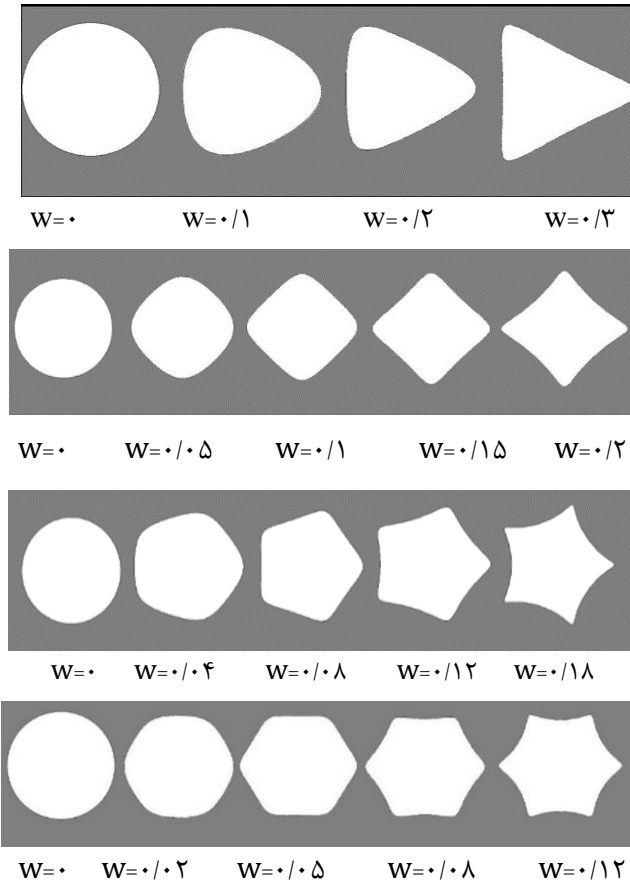
پارامترهای متعددی از جمله شکل گشودگی، جهت‌گیری گشودگی، زاویه‌ی بار، شعاع انحنای گوشه‌ی گشودگی و نحوه‌ی چیدمان لایه‌ها بر توزیع تنش اطراف گشودگی و تنش شکست واقع در صفحات چندلایه متقارن کامپوزیتی که تحت بارگذاری قرار می‌گیرند، تأثیرگذار است. در این تحقیق با تکیه بر حلّ تحلیلی لختیسی و بسط این حل به سایر گشودگی‌های منظم هندسی و ترکیب آن با الگوریتم PSO سعی شده است تا با استفاده از این الگوریتم بهینه‌ساز، مقادیر بهینه‌ی پارامترهای فوق جهت دستیابی به کمترین تنش شکست ممکن در اطراف گشودگی معرفی گردد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، کمینه کردن مقدار تنش شکست و ضریب تمرکز تنش به عنوان تابع هدف برای این الگوریتم در نظر گرفته شده است.

در این مقاله یک صفحه‌ی چندلایه‌ی کامپوزیتی حاوی انواع گشودگی مورد مطالعه قرار گرفته شده است. صفحه حاوی گشودگی چنان در نظر گرفته شده است که اندازه گشودگی در مقابل ابعاد صفحه کوچک باشد. مطابق شکل ۱-۴ صفحه در بی‌نهایت تحت بارگذاری کششی با زاویه α نسبت به محور x قرار دارد. همچنین زاویه چرخش گشودگی که بیان‌گر نحوه قرارگیری آن نسبت به افق است، با β نمایش داده شده است و γ نیز زاویه الیاف می‌باشد.



شکل ۱-۴ نمایی از هندسه گشودگی و بارگذاری آن

تأثیر انحنای گوشه‌ی گوشه‌ی گشودگی بر شکل گشودگی را در شکل ۲-۴ مشاهده می‌کنیم. با کاهش مقدار w ، شعاع انحنای گوشه‌های گشودگی مطابق آنچه در شکل ملاحظه می‌شود، افزایش می‌یابد تا در نهایت در $w=0$ شکل گشودگی به دایره تبدیل می‌شود.



شکل ۲-۴ تأثیر پارامتر w بر گوشه‌های گشودگی‌های مختلف

ماده به کار رفته در این تحقیق گرافیت/اپوکسی می‌باشد که خواص مکانیکی آن در جدول ۱-۴

آورده شده است.

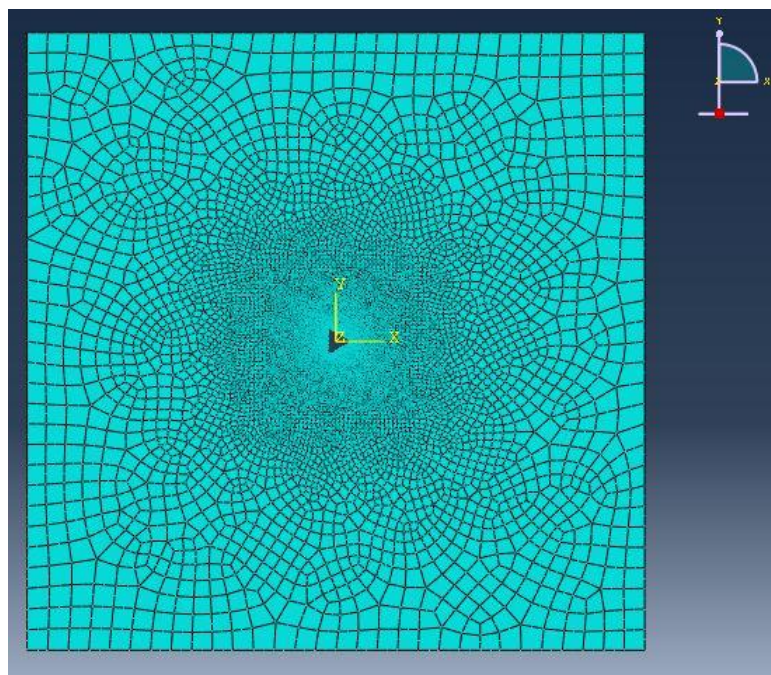
جدول ۱-۴ خواص مکانیکی [۱۷]

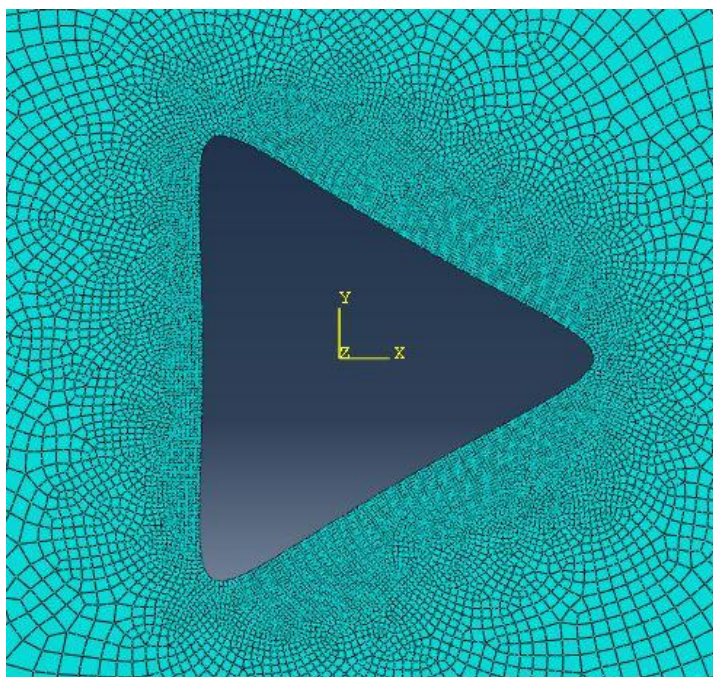
E_1	E_2	G_{12}	ν_{12}	X	X'	Y	Y'	S
(GPa)	(GPa)	(GPa)		(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
۱۸۱	۱۰/۳	۷/۱۷	۰/۲۸	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۲۴۶	۶۸

که در آن X و X' تنش شکست در جهت طولی در کشش و فشار، Y و Y' تنش شکست در جهت عرضی در کشش و فشار و S تنش شکست برشی است.

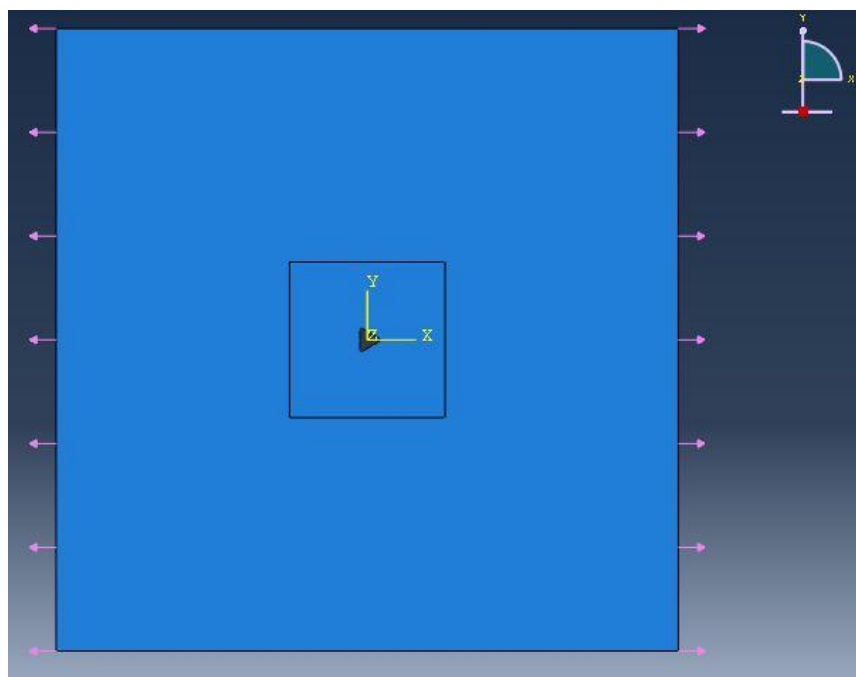
۴- بررسی درستی جواب‌ها

در این بخش از روش اجزای محدود (نرم‌افزار آباکوس) برای بررسی درستی نتایج حاصل از حلّ تحلیلی استفاده شده است. در اینجا چیدمان لایه‌ای $[0/90]_s$ مدلی از مسأله‌ی حاوی گشودگی مثلثی تحت بارگذاری کششی در نرم‌افزار آباکوس رسم و نتایج حاصل با نتایج حلّ تحلیلی ارائه شده در این تحقیق مقایسه شده است. ابتدا در مورد نحوه بارگذاری و المان بندی در محیط آباکوس توضیح داده می‌شود. برای مش‌بندی از المان quadratic که منطبق با هندسه و فیزیک مسأله است، استفاده شده است. برای اینکه صفحه بی‌نهایت به نظر برسد، کافی است نسبت قطر دایره محیط بر گشودگی به ابعاد صفحه، بیشتر از یک به ۲۰ باشد. شکل ۴-۳ و ۴-۴ نحوه مش‌بندی و بارگذاری صفحه را نشان می‌دهد. به منظور کاهش زمان حل و حجم محاسبات، مش‌بندی در اطراف گشودگی ریزتر از نقاط دور از گشودگی صورت گرفته است. تعداد المان‌های بررسی شده اطراف گشودگی در این نرم‌افزار ۳۶۰ است.





شکل ۳-۴ نحوه‌ی مش‌بندی در نرم افزار آباکوس

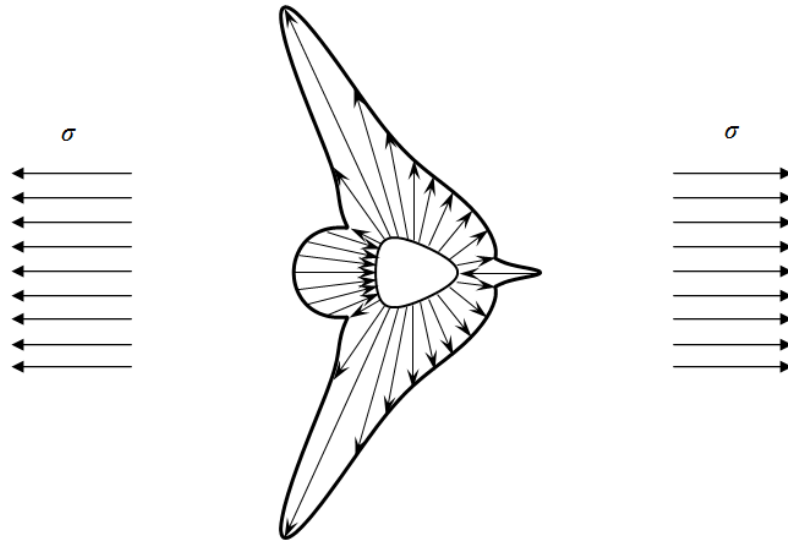


شکل ۴-۴ نحوه‌ی بارگذاری در نرم افزار آباکوس

شکل ۴-۵ نشان‌دهنده توزیع تنش اطراف گشودگی مثلثی می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۴-۵

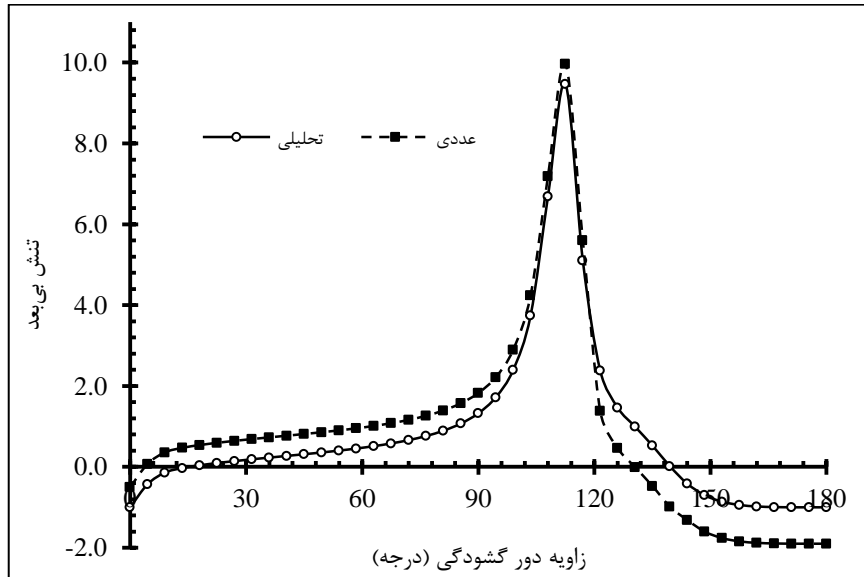
دید می‌شود زمانی که بارگذاری در جهت افق می‌باشد (زاویه بار صفر درجه)، بیشترین مقدار تنش در دو رأس مثلث که با محور بارگذاری زاویه‌دار هستند اتفاق می‌افتد. لازم به توضیح است که در این

شکل ۰/۱۵ w است.



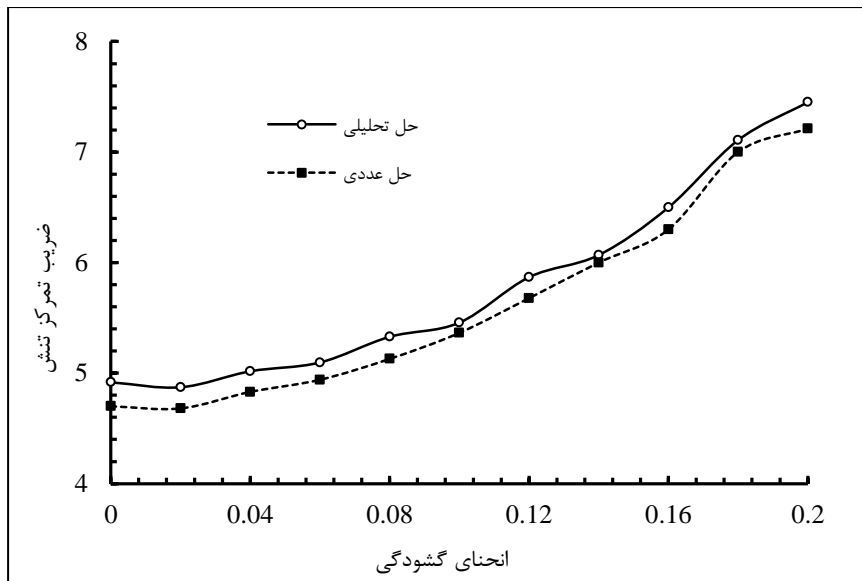
شکل ۴-۵ توزیع تنش اطراف گشودگی مثلثی تحت بارگذاری تک‌محوره افقی اشکال ۴-۶ و ۴-۷ نشان‌دهنده تطابق مناسبی بین حل عددی و حل تحلیلی در این مسأله

می‌باشند. این شکل برای $\beta = 0$ و $w = 0.3$ می‌باشد.



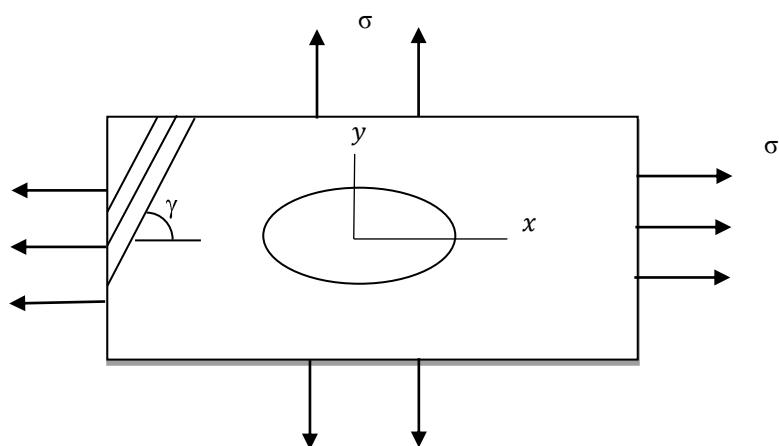
شکل ۴-۶ مقایسه‌ی تنش اطراف گشودگی مثلثی از دو روش حل تحلیلی و اجزای محدود برای زوایای دور گشودگی شکل ۴-۶ نشان‌دهنده مقدار تنش بی‌بعد اطراف گشودگی مثلثی می‌باشد؛ که در این شکل این

توزیع تنش، توسط دو روش حل عددی و حل تحلیلی با یکدیگر مقایسه شده است و نتیجه آن در قالب نمودار فوق گزارش شده است.



شکل ۴-۷ مقایسه تنش اطراف گشودگی مثلثی از دو روش حل تحلیلی و اجزای محدود برای انحنای مختلف در شکل ۴-۷ نیز به مقایسه بین نتایج حاصل از دو روش حل عددی و تحلیلی پرداخته شده است. در این شکل ماکزیمم ضریب تمرکز تنش اطراف گشودگی مثلثی یک چهارلایه متقارن [۹۰ / ۰]s برحسب Wهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. زاویه چرخش گشودگی در این حالت صفر درجه می‌باشد. نتایج ارائه شده در شکل ۴-۷ برای $W=0.1$ است. نزدیکی نتایج دو روش تأکیدی بر درستی حل تحلیلی حاضر است.

در ادامه نیز به بررسی درستی تنش شکست پرداخته شده است. در این بخش برای گشودگی بیضوی با نسبت قطرهای ۰/۵ مطابق شکل ۴-۸، مقدار تنش شکست با حل تحلیلی یوکاجونکر [۱۷] مقایسه شده است. در این بخش نتایج برای یک تک‌لایه با زاویه چرخش صفر و زاویه‌ی الیاف ۶۰ درجه و تحت بارگذاری کششی دو محوره برای زاویه‌های دور گشودگی ارائه شده است. جدول ۲-۲ نشان دهنده همپوشانی مناسب بین حل تحلیلی این پایان‌نامه با مرجع [۱۷] است.



شکل ۴-۸ گشودگی بیضوی تحت بارگذاری دو محوری با نسبت قطرهای ۰/۵

مطالعه‌های موردی

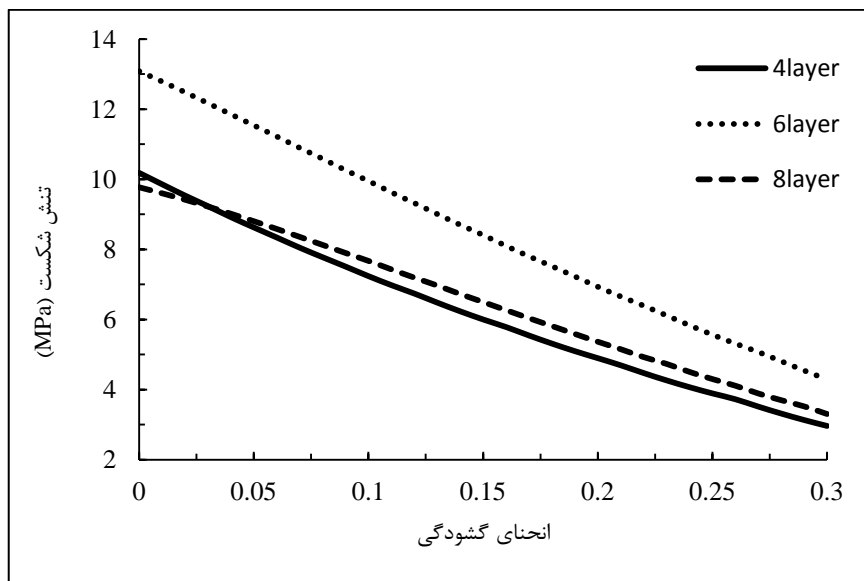
جدول ۲-۲ مقایسه نتایج حلّ تحلیلی با مرجع [۱۷]

یوکاجونکر [۱۷]	حلّ تحلیلی	زاویه دور گشودگی (درجه)	یوکاجونکر [۱۷]	حلّ تحلیلی	زاویه دور گشودگی (درجه)
۳۵/۷	۳۵/۷۳	۹۵	۳۲/۶	۳۲/۵۵	۰
۳۳/۱	۳۳/۰۹۱	۱۰۰	۴۰/۶	۴۰/۶۴	۵
۳۰/۸	۳۰/۷۵۶	۱۰۵	۵۸	۵۸/۰۴۵	۱۰
۲۸/۷	۲۸/۶۷۶	۱۱۰	۱۸۵/۳	۱۸۵/۲۸	۱۵
۲۶/۸	۲۶/۸۱۳	۱۱۵	۱۶۶/۲	۱۶۶/۱۸	۲۰
۲۵/۱	۲۵/۱۴	۱۲۰	۱۸۱/۸	۱۸۱/۷۹	۲۵
۲۳/۶	۲۳/۶۴	۱۲۵	۱۹۸/۵	۱۹۸/۵۱	۳۰
۲۲/۳	۲۲/۳۲	۱۳۰	۱۸۱/۲	۱۸۱/۲	۳۵
۲۱/۲	۲۱/۱۸	۱۳۵	۱۵۰/۹	۱۵۰/۹۳	۴۰
۲۰/۲	۲۰/۲۳	۱۴۰	۱۲۳/۴	۱۲۳/۴۲	۴۵
۱۹/۵	۱۹/۵۲	۱۴۵	۱۰۲/۱	۱۰۲/۰۷	۵۰
۱۹/۱	۱۹/۱۲	۱۵۰	۸۶	۸۶/۰۲۷	۵۵
۱۹/۱	۱۹/۱۰۸	۱۵۵	۷۳/۹	۷۳/۹	۶۰
۱۹/۶	۱۹/۶۴	۱۶۰	۶۴/۵	۶۴/۵۵	۶۵
۲۰/۹	۲۰/۹۳	۱۶۵	۵۷/۲	۵۷/۱۷۷	۷۰
۲۳/۳	۲۳/۲۷	۱۷۰	۵۱/۲	۵۱/۲۳۴	۷۵
۲۷	۲۷	۱۷۵	۴۶/۳	۴۶/۳۴۳	۸۰
۳۵/۷	۳۵/۷۳	۱۸۰	۴۲/۲	۴۲/۲۴۴	۸۵
			۳۸/۸	۳۸/۷۵۱	۹۰

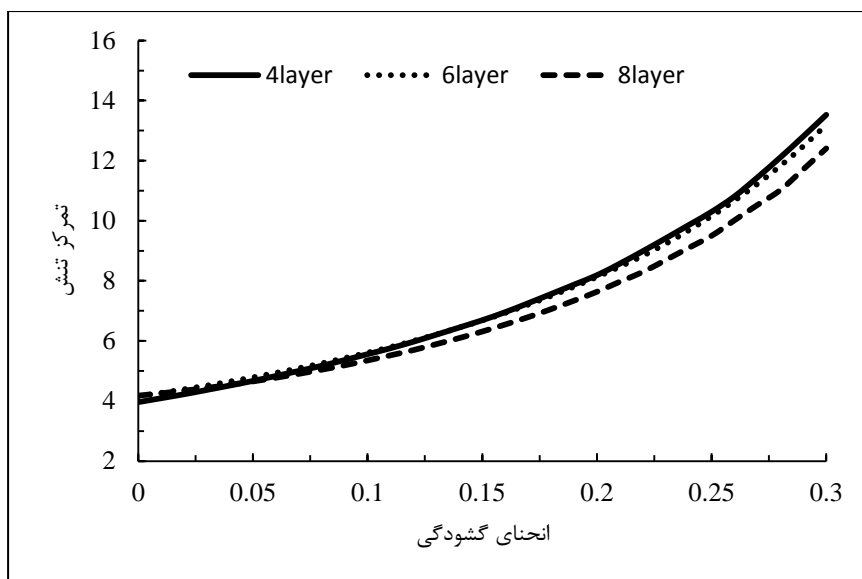
۲-۴ گشودگی مثلثی

۱-۲-۴ انحناى گوشه‌ی گشودگی

شکل ۹-۴ تأثیر انحناى گوشه‌ی گشودگی بر مقدار تنش شکست را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار تنش شکست با افزایش مقدار انحناى گوشه‌ی گشودگی، کاهش می‌یابد در صورتی که با توجه به شکل ۱۰-۴، که به بررسی انحناى گوشه‌ی گشودگی بر ضریب تمرکز تنش پرداخته است، با افزایش میزان انحناى گوشه‌ی گشودگی، ضریب تمرکز تنش افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۹-۴ کمترین مقدار تنش شکست ایجاد شده در لایه‌های مختلف در $w=0/3$ رخ می‌دهد و مقدار آن برای چیدمان چهارلایه ۲/۹۶ مگاپاسکال است در حالی برای چیدمان‌های شش و هشت‌لایه به ترتیب ۴/۲۸ و ۳/۳ مگاپاسکال است. و با توجه به شکل ۱۰-۴ کمترین مقدار ضریب تمرکز تنش ایجاد شده در $w=0$ رخ می‌دهد و مقدار آن برای چهارلایه ۳/۹۶ و برای شش و هشت‌لایه نیز به ترتیب ۴/۱۵ و ۴/۱۷ است. مقادیر زاویه بار و زاویه چرخش گشودگی به ترتیب ۳۰ و ۴۵ درجه می‌باشد. همچنین نحوه چیدمان در چهارلایه به صورت $[0/90]_s$ و در شش و هشت‌لایه به ترتیب $[30/0-30/0/30/0]$ و $[45/0/45/0]$ است.



شکل ۹-۴ تأثیر انحناى گوشه‌ی گشودگی بر تنش شکست در گشودگی مثلثی



شکل ۴-۱۰ تأثیر انحنای گوشه‌ی گشودگی بر ضریب تمرکز تنش در گشودگی مثلثی پس از بررسی تأثیر انحنای گوشه‌ی گشودگی بر مقدار تنش شکست در حالتی خاص، در ادامه به بررسی مقدار بهینه پارامترهای زاویه بار، زاویه چرخش و نحوه چیدمان و مقدار بهینه تنش شکست در انحنای گوشه‌ی گشودگی مختلف می‌پردازیم. جدول ۳-۴ مقدار بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه را برای چیدمان $s_{[0/90]}$ نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۳-۴ به عنوان مثال برای $w=0/1$ مقدار زاویه‌ی بار و زاویه‌ی چرخش گشودگی بهینه به ترتیب $48/14$ و $130/06$ است و مقدار تنش شکست بهینه نیز $11/39$ مگاپاسکال می‌باشد. جدول ۴-۴ و ۴-۵ نیز به بررسی مقدار بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه را برای چیدمان‌های $s_{[30/0/-30]}$ و $s_{[\pm 45/\pm 30]}$ می‌پردازد. در چیدمان $s_{[30/0/-30]}$ برای $w=0/1$ مقدار زاویه‌ی بار و زاویه‌ی چرخش گشودگی بهینه $3/98$ و $13/38$ و همچنین در چیدمان $s_{[\pm 45/\pm 30]}$ نیز مقادیر بهینه زاویه‌ی بار، زاویه‌ی چرخش گشودگی به ترتیب 90 ، 180 می‌باشد. مقادیر بهینه‌ی تنش شکست برای چیدمان $s_{[30/0/-30]}$ و $s_{[\pm 45/\pm 30]}$ نیز به ترتیب $17/2$ و $12/55$ مگاپاسکال است.

مطالعه‌های موردی

جدول ۳-۴ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $s[0/90]$ در گشودگی مثلثی

انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۴۵/۰۱	۶۰/۵۸	۱۳/۸۴
۰/۰۵	۴۶/۷۶	۶۹/۶۲	۱۲/۸۴
۰/۱	۴۸/۱۴	۱۳۰/۰۶	۱۱/۳۹
۰/۱۵	۴۹/۱۷	۷۰/۱۶	۹/۷۳
۰/۲	۴۰/۱۲	۸۷/۷۹	۸/۰۳
۰/۲۵	۳۹/۷۱	۱۳۹/۹۶	۶/۳۹
۰/۳	۵۰/۷۵	۶۹/۸۱	۴/۸۶

جدول ۴-۴ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $s[30]$ در گشودگی مثلثی

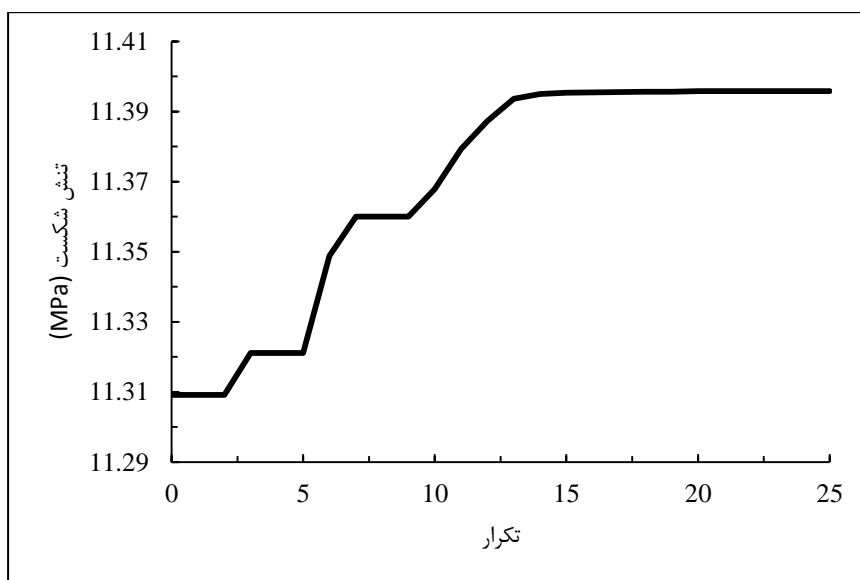
انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۰	۱۸۰	۲۱/۵
۰/۰۵	۹۰	۱۸۰	۱۹/۲۷
۰/۱	۳/۹۸	۱۳/۳۸	۱۷/۲
۰/۱۵	۹۰	۰	۱۴/۶۵
۰/۲	۵/۴۷	۷۴/۰۴	۹/۷
۰/۲۵	۶/۰۱	۱۴/۳۲	۷/۴۴
۰/۳	۹۰	۱۸۰	۲۶/۹۸

جدول ۴-۵ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $s_{[±۴۵/±۳۰]}$ در گشودگی مثلثی

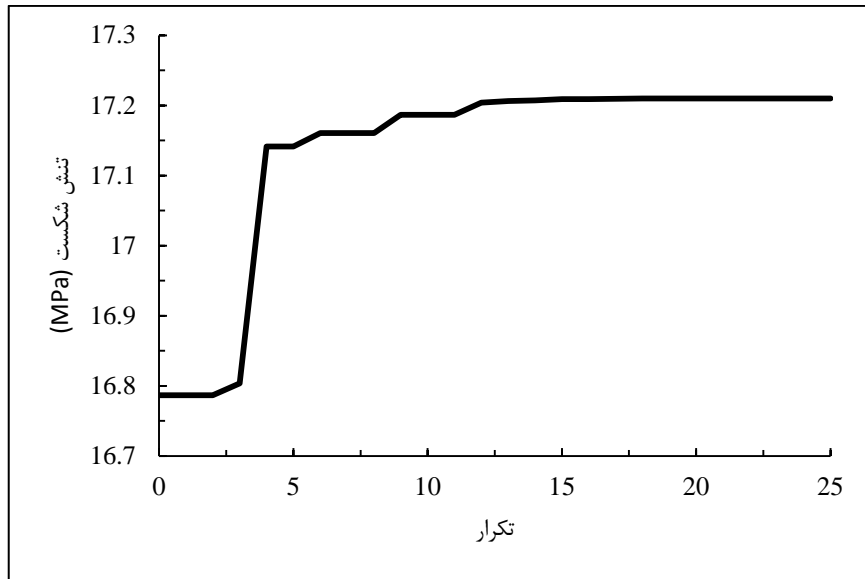
انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۰	۴/۰۵	۱۵/۶۸
۰/۰۵	۲/۴۵	۱۳۹/۸۷	۱۴/۲۹
۰/۱	۹۰	۱۸۰	۱۲/۵۵
۰/۱۵	۹۰	۱۸۰	۱۰/۷۸
۰/۲	۹۰	۱۸۰	۸/۹۷
۰/۲۵	۹۰	۱۸۰	۷/۱۶
۰/۳	۹۰	۰	۵/۴۶

شکل‌های ۴-۱۱، ۴-۱۲ و ۴-۱۳ به ترتیب نشان‌دهنده نرخ همگرایی برای چیدمان‌های $s_{[۰/۹۰]}$ ،

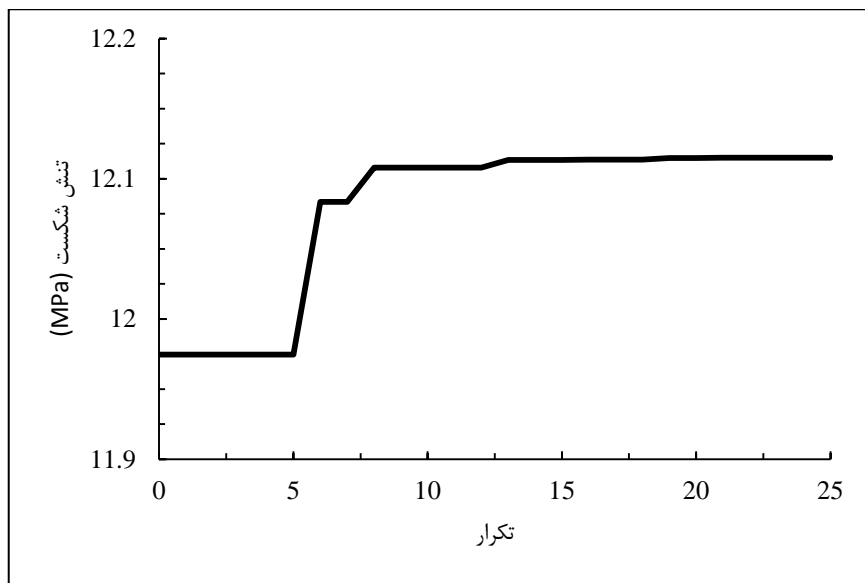
$s_{[۳۰/۰/-۳۰]}$ و $s_{[±۴۵/±۳۰]}$ در $w=۰/۱$ است.



شکل ۴-۱۱ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[۰/۹۰]}$ در گشودگی مثلثی



شکل ۴-۱۲ نرخ همگرایی تنش شکست برای در چیدمان $s_{[30/0/-30]}$ در گشودگی مثلثی



شکل ۴-۱۳ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[45/\pm 30]}$ در گشودگی مثلثی در ادامه مقادیر بهینه ضریب تمرکز تنش برای چیدمان‌های مختلف در w های مختلف بررسی می‌شود. جدول ۴-۶ مقدار بهینه ضریب تمرکز تنش برای چیدمان $s_{[0/90]}$ را نشان می‌دهد. مقادیر بهینه ضریب تمرکز تنش با افزایش انحنای گشودگی افزایش می‌یابد. جداول ۴-۷ و ۴-۸ نیز به ترتیب برای چیدمان‌های $s_{[30/0/30]}$ و $s_{[45/\pm 30]}$ ارائه شده است.

مطالعه‌های موردی

جدول ۴-۶ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان $s[0/90]$ در گشودگی مثلثی

انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	ضریب تمرکز تنش
۰	۴۵	۱۷۸/۴۴	۲/۹۵۸۲
۰/۰۵	۴۵/۹۲	۶۹/۱۸	۳/۱۹۰۹
۰/۱	۴۸/۳۷	۶۹/۶۴	۳/۵۹۱۸
۰/۱۵	۴۹/۳۹	۶۹/۸۵	۴/۱۹۵
۰/۲	۵۰/۰۱	۶۹/۹۱	۵/۰۶۶۶
۰/۲۵	۵۰/۵	۱۲۹/۸۴	۶/۳۵۲۱
۰/۳	۸۵.۵۰	۹/۶۵	۸/۳۱۵۲

جدول ۴-۷ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان $s[30/0]$ در گشودگی مثلثی

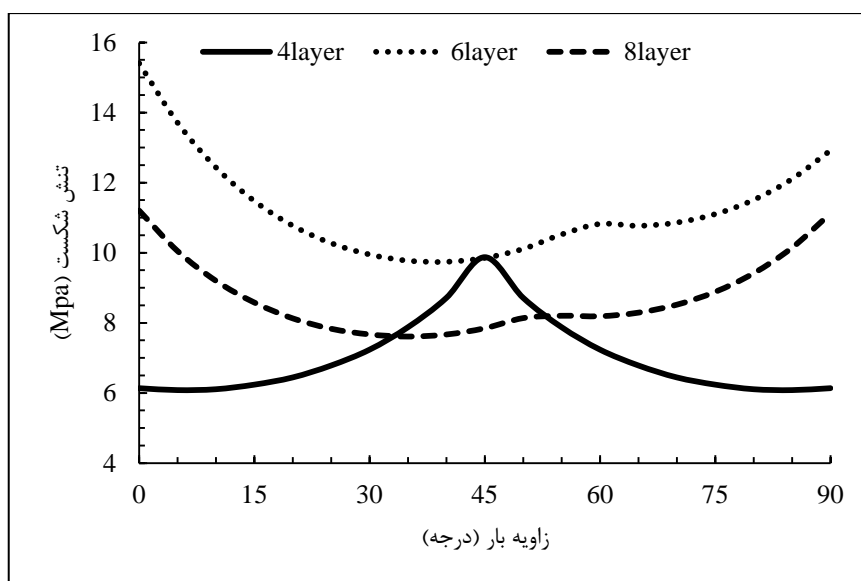
انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	ضریب تمرکز تنش
۰	۹۰	۱۵۰/۷۵	۲/۳۸۴۶
۰/۰۵	۹۰	۰	۲/۵۱۸۵
۰/۱	۹۰	۱۸۰	۲/۷۹۹۱
۰/۱۵	۹۰	۰	۳/۲۲۵۹
۰/۲	۹۰	۱۸۰	۳/۸۴
۰/۲۵	۹۰	۰	۴/۷۴۲۲
۰/۳	۹۰	۰	۶/۱۴۲۹

جدول ۴-۸ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $[±۴۵/±۳۰]_s$ در گشودگی مثلثی

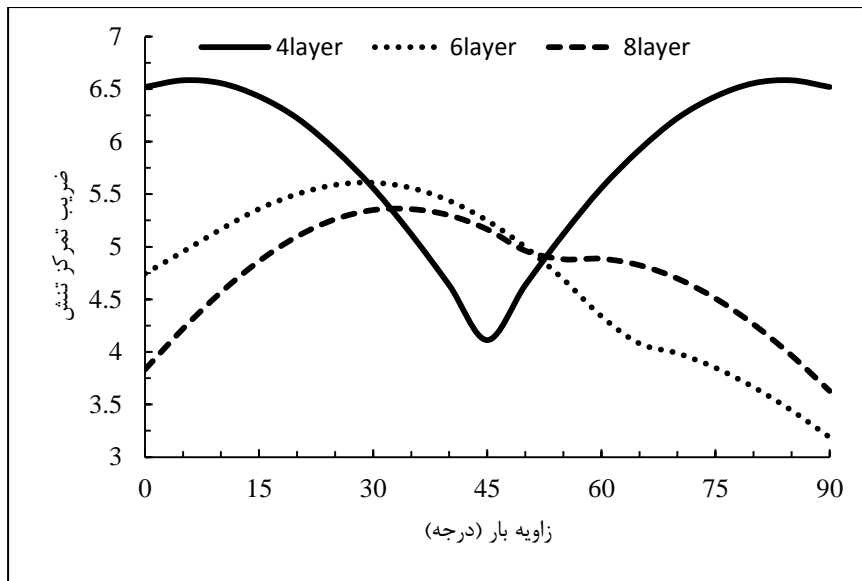
انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	ضریب تمرکز تنش
۰	۹۰	۱۷۵/۹۵	۲/۶۵۵۳
۰/۰۵	۸۱/۳۱	۱۲۴/۴۶	۲/۸۴۰۲
۰/۱	۸۷/۰۶	۳/۹۳	۳/۱۷۷۶
۰/۱۵	۹۰	۱۸۰	۳/۷۳۸۷
۰/۲	۸۵/۶	۶۳/۵	۴/۴۳۴۲
۰/۲۵	۸۵/۱۳	۳/۴۸	۵/۵۲۵۱
۰/۳	۹۰	۱۸۰	۷/۳۷۲۶

۴-۲-۲ زاویه‌ی بار

شکل ۴-۱۴ و ۴-۱۵ به ترتیب نشان‌دهنده تأثیر زاویه‌ی بار بر روی تنش شکست و ضریب تمرکز تنش است. این نتایج برای $w=۰/۱$ ، زاویه‌ی چرخش ۴۵ درجه و چیدمان‌های $[۰/۹۰]_s$ ، $[۳۰/۰/-۳۰]_s$ و $[±۴۵/±۳۰]_s$ است.



شکل ۴-۱۴ تأثیر زاویه‌ی بار بر تنش شکست در گشودگی مثلثی



شکل ۴-۱۵ تأثیر زاویه‌ی بار بر ضریب تمرکز تنش در گشودگی مثلثی

جدول ۴-۹ مقادیر بهینه زاویه‌ی چرخش و تنش شکست بهینه را برای چیدمان $s[0/90]$ نشان

می‌دهد. جدول ۴-۱۰ و ۴-۱۱ نیز به ترتیب نتایج را برای چیدمان $s[30/0/-30]$ و چیدمان

$s[\pm 45/\pm 30]$ ارائه می‌کند. این نتایج برای $w=0/1$ بیان شده است.

جدول ۴-۹ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[0/90]$ در گشودگی مثلثی

زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۰	۷/۱۷
۳۰	۷۴/۰۹	۹/۰۲
۴۵	۷۵/۰۱	۱۱/۲۴
۶۰	۱۳۵/۸۹	۹/۰۲
۹۰	۱۵۰/۰۲	۷/۱۷

مطالعه‌های موردی

جدول ۴-۱۰ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s_{[30/0/-30]}$ در گشودگی مثلثی

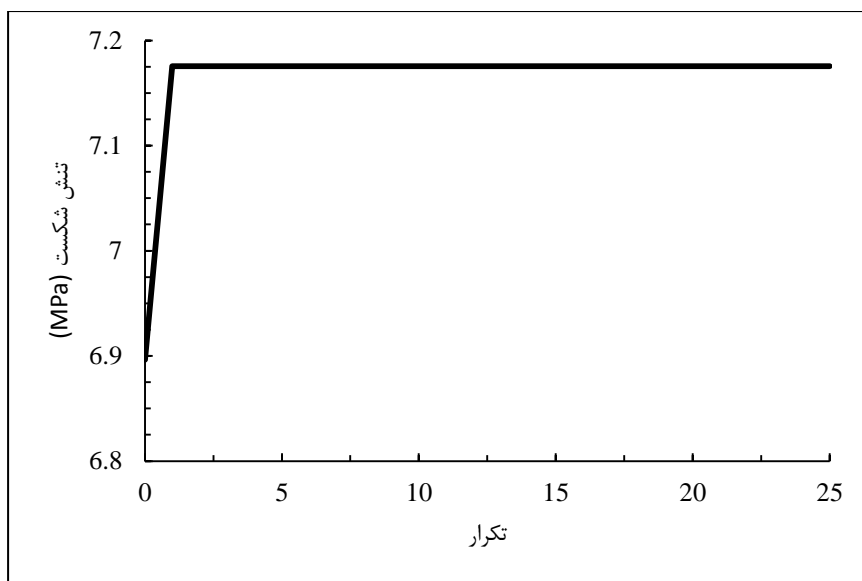
زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۵۹/۹۵	۱۶/۷۱
۳۰	۸۸/۸۹	۱۱/۵۶
۴۵	۳۷/۴	۱۰/۷۲
۶۰	۴۶/۰۸	۱۰/۹۶
۹۰	۱۸۰	۱۴/۳۷

جدول ۴-۱۱ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s_{[±45/±30]}$ در گشودگی مثلثی

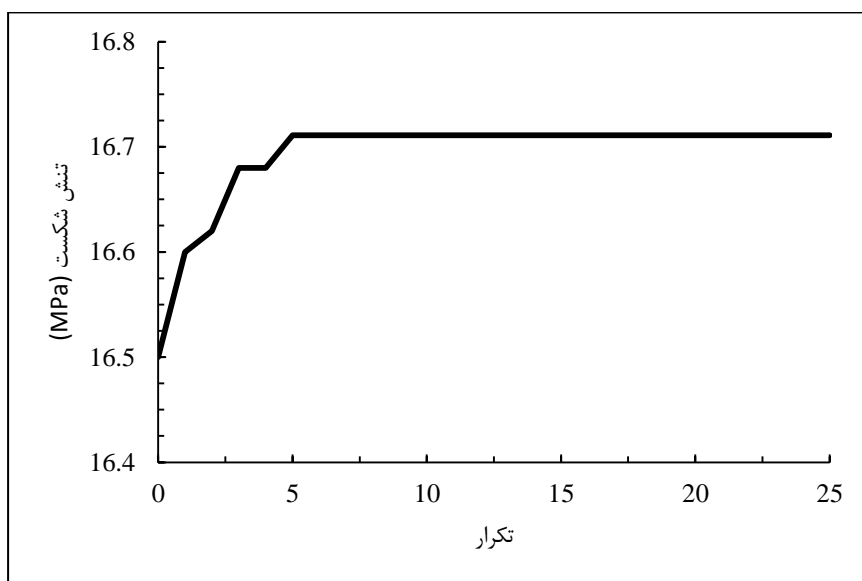
زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۹۰	۱۲/۱۲
۳۰	۹۴/۱۵	۸/۶۳
۴۵	۴۱/۶۴	۸/۱۷
۶۰	۱۰۹/۱۲	۸/۶۲
۹۰	۰	۱۲/۵۵

شکل‌های ۴-۱۶، ۴-۱۷ و ۴-۱۸ به ترتیب نشان‌دهنده نرخ همگرایی برای چیدمان‌های $s_{[0/90]}$ ،

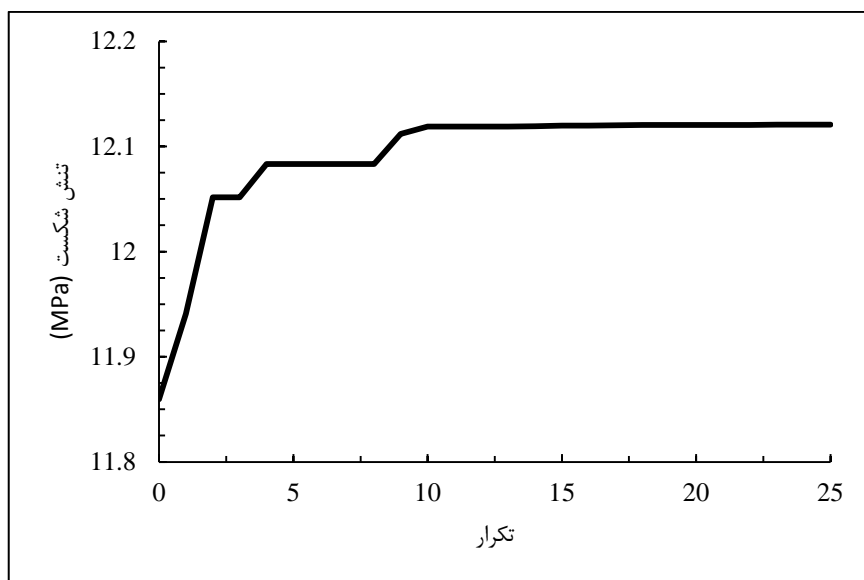
$s_{[30/0/-30]}$ و $s_{[±45/±30]}$ در $w=0/1$ و زاویه‌ی بار صفر درجه است.



شکل ۴-۱۶ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s[0/90]$ و زاویه‌ی بار صفر درجه در گشودگی مثلثی



شکل ۴-۱۷ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s[30/0/-30]$ و زاویه‌ی بار صفر درجه در گشودگی مثلثی



شکل ۴-۱۸ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان_s [±۳۰/±۴۵] و زاویه‌ی بار صفر درجه در گشودگی مثلثی جدول ۴-۱۲ بررسی ضریب تمرکز تنش بهینه برای چیدمان_s [۰/۹۰] پرداخته است. همچنین جداول ۴-۱۳ و ۴-۱۴ نیز ضریب تمرکز تنش برای چیدمان‌های_s [۳۰/۰/-۳۰] و_s [±۳۰/±۴۵] را نشان می‌دهند.

جدول ۴-۱۲ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان_s [۰/۹۰] در گشودگی مثلثی

زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	ضریب تمرکز تنش
۰	۰	۵/۵۷۶۷
۳۰	۱۴/۳۴	۴/۴۶۸۹
۴۵	۱۹/۴۳	۳/۷۲۳۸
۶۰	۷۵/۶۵	۴/۴۶۸۹
۹۰	۹۰	۵/۵۷۶۷

مطالعه‌های موردی

جدول ۴-۱۳ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s [30/-/0/30]$ در گشودگی مثلثی

ضریب تمرکز تنش	زاویه‌ی چرخش (درجه)	زاویه‌ی بار (درجه)
۴/۱۹۱۱	۰	۰
۴/۷۲۰۱	۲۵/۳۲	۳۰
۴/۷۲۵۴	۳۱/۳۲	۴۵
۴/۲۳۰۱	۴۳/۱۴	۶۰
۲/۷۹۹۱	۰	۹۰

جدول ۴-۱۴ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s [30/\pm 45/\pm 30]$ در گشودگی مثلثی

ضریب تمرکز تنش	زاویه‌ی چرخش (درجه)	زاویه‌ی بار (درجه)
۳/۶۰۸۹	۳۰	۰
۴/۷۲۸	۹۳/۵۸	۳۰
۴/۹۲۰۶	۳۸/۷۵	۴۵
۴/۶۴۱۶	۴۹/۰۳	۶۰
۳/۲۰۶۱	۰	۹۰

۴-۲-۳ همه پارامترها

حال به بررسی مقدار بهینه‌ی تنش شکست و ضریب تمرکز تنش در حالت کلی می‌پردازیم. جدول ۴-۱۵ مقادیر بهینه تنش شکست را در چیدمان‌های مختلف نشان می‌دهد. همچنین جدول ۴-۱۶ نیز مقادیر بهینه ضریب تمرکز تنش را نشان می‌دهد. همانطور که نشان داده شده است مقدار تنش شکست و ضریب تمرکز تنش در کمترین مقدار انحنای گوشه‌ی گشودگی بهینه می‌شوند و مقدار بهینه‌ی آن‌ها در گشودگی مثلثی، دایره است.

جدول ۴-۱۵ مقادیر بهینه همه متغیرهای طراحی و تنش شکست بهینه در گشودگی مثلثی

تنش شکست (MPa)	چیدمان	زاویه‌ی چرخش (درجه)	زاویه‌ی بار (درجه)	انحنای گوشه‌ی گشودگی
۹۶/۴۲	[۹۰ / ۹۰] _s	۱۸۰	۹۰	۰
۹۶/۴۵	[۹۰ / ۹۰ / ۹۰] _s	۰/۴۵	۹۰	۰
۹۶/۴۵	[۹۰ / ۹۰ / ۹۰ / ۹۰] _s	۰/۴۵	۹۰	۰

جدول ۴-۱۶ مقادیر بهینه همه متغیرهای طراحی و ضریب تمرکز تنش بهینه در گشودگی مثلثی

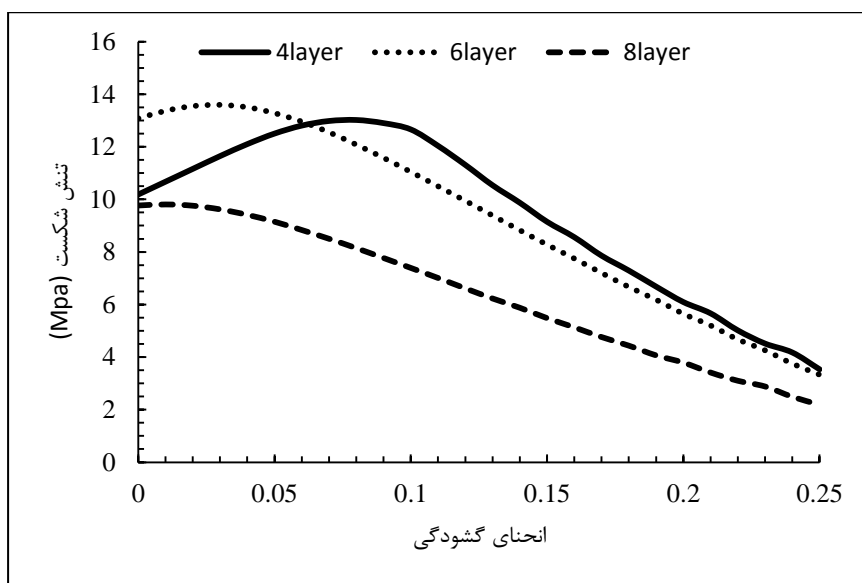
ضریب تمرکز تنش	چیدمان	زاویه‌ی چرخش (درجه)	زاویه‌ی بار (درجه)	انحنای گوشه‌ی گشودگی
۲/۱۵۸۸	[-۸۵.۲۱ / -۶۴.۵۱] _s	۳۸/۱	۱۵/۱۳	۰
۲/۱۶۰۳	[-۲۹.۱۴ / ۸۴.۷۷ / -۱۵.۹] _s	۴۱/۲۵	۴۸/۱۳	۰
۲/۱۵۹۹	[۸۲.۱۸ / -۸۲.۰۴ / ۸۳.۶۶ / -۷۲.۶۳] _s	۸۴/۵۲	۳/۷۹	۰

۴-۳ گشودگی مربعی

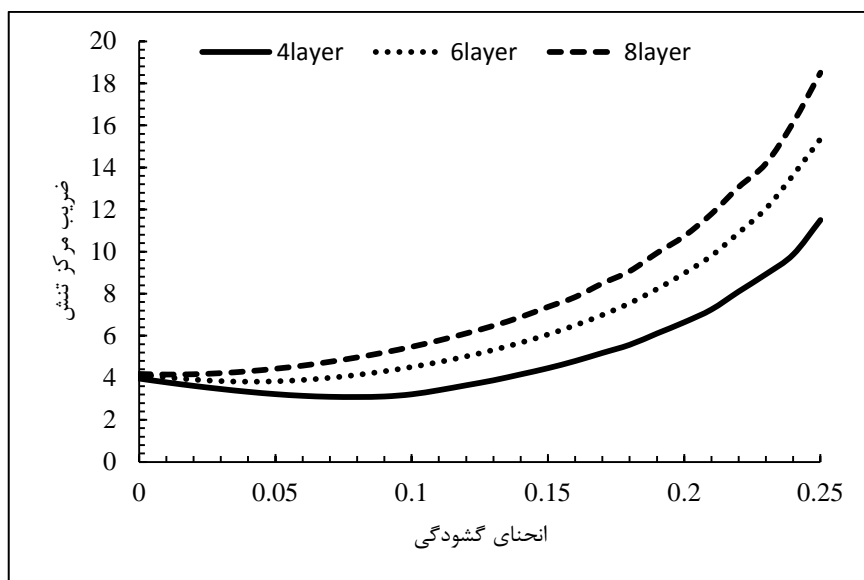
۴-۳-۱ انحنای گوشه‌ی گشودگی

در این بخش در ابتدا بررسی تأثیر انحنای گوشه‌ی گشودگی بر مقدار تنش شکست و ضریب تمرکز تنش می‌پردازیم. شکل ۴-۱۹ تأثیر انحنای گوشه‌ی گشودگی بر مقدار تنش شکست را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار تنش شکست با افزایش مقدار انحنای گوشه‌ی گشودگی، در ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. شکل ۴-۲۰ نیز به بررسی تأثیر انحنای گوشه‌ی گشودگی بر ضریب تمرکز تنش پرداخته است. در این حالت نیز مقدار تمرکز تنش ابتدا کاهش و سپس افزایش

می‌یابد. این نتایج برای زاویه‌ی بار ۳۰ درجه و چرخش گشودگی ۶۰ درجه رخ داده است. پس از بررسی تأثیر انحنای گوشه‌ی گشودگی بر مقدار تنش شکست در حالتی خاص، در ادامه به بررسی مقدار بهینه پارامترهای زاویه‌ی بار، زاویه‌ی چرخش و مقدار بهینه‌ی تنش شکست در انحنای گوشه‌ی گشودگی مختلف می‌پردازیم. جدول ۴-۱۷ مقدار بهینه متغیرهای طراحی و تنش شکست بهینه را برای چیدمان $s_{[0/90]}$ نشان می‌دهد. به عنوان مثال برای حالت $w=0/25$ مقدار زاویه‌ی بار و زاویه‌ی چرخش گشودگی به ترتیب $62/2$ و $31/08$ است و مقدار تنش شکست بهینه نیز $3/85$ مگاپاسکال است. جداول ۴-۱۸ و ۴-۱۹ به ترتیب مقدار بهینه متغیرهای طراحی و تنش شکست بهینه را برای چیدمان $s_{[30/0/30]}$ و چیدمان $s_{[\pm 45/\pm 30]}$ نشان می‌دهد. با توجه به این جداول مقدار تنش شکست بهینه در $w=0/05$ رخ می‌دهد.



شکل ۴-۱۹ تأثیر انحنای گوشه‌ی گشودگی بر تنش شکست در گشودگی مربعی



شکل ۴-۲۰ تأثیر انحنای گوشه‌ی گشودگی بر ضریب تمرکز تنش در گشودگی مربعی

جدول ۴-۱۷ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $[0/90]_s$ در گشودگی مربعی

انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۴۵	۰	۱۳/۸۳
۰/۰۵	۳۵/۸۸	۵۷/۱۳	۱۴/۳۲
۰/۱	۶۱/۶۸	۱۲۳/۸۲	۱۳/۸۴
۰/۱۵	۲۶/۶۶	۱۴۶/۶۶	۱۰/۴۷
۰/۲	۲۶/۷۴	۱۴۷/۶۲	۶/۹
۰/۲۵	۶۲/۲	۳۱/۰۸	۳/۸۵

مطالعه‌های موردی

جدول ۴-۱۸ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $[30/0/-30]_s$ در گشودگی مربعی

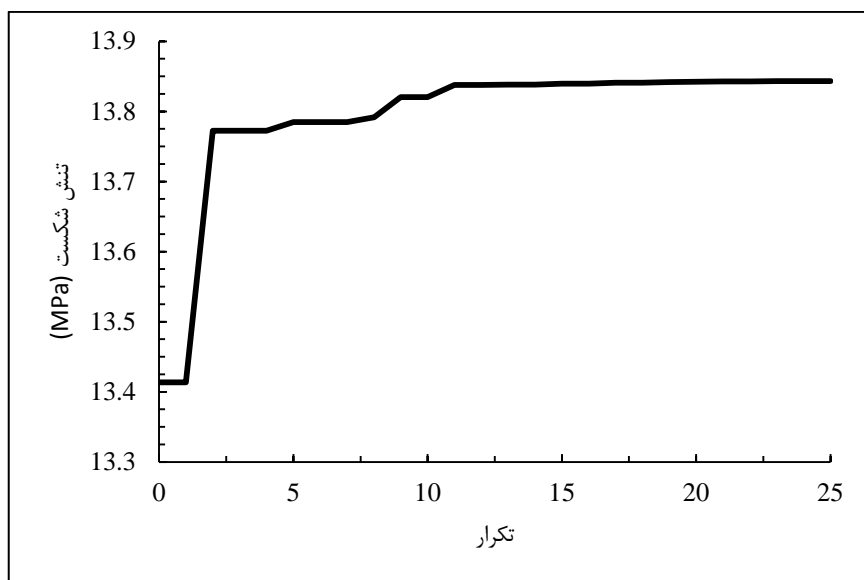
انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۰	۰	۲۱/۵
۰/۰۵	۶/۷۵	۶۰/۳۲	۲۲/۹۶
۰/۱	۱۲/۲	۱۵۴/۱۸	۲۱/۱۱
۰/۱۵	۱۲/۹۸	۶۴/۱۹	۱۵/۹۲
۰/۲	۱۲/۶۶	۶۳/۶۶	۱۰/۷
۰/۲۵	۱۲/۳۳	۱۵۲/۹۵	۶/۱۵

جدول ۴-۱۹ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $[\pm 45/\pm 30]_s$ در گشودگی مربعی

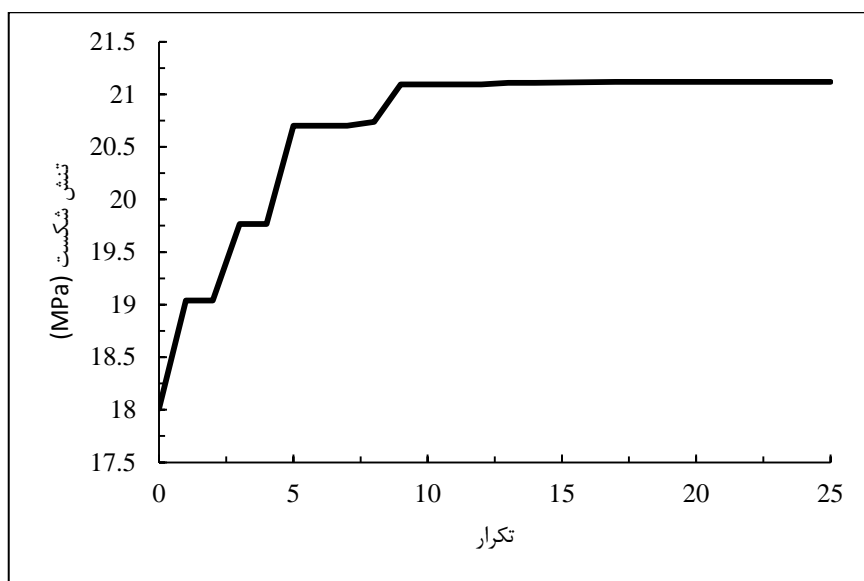
انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۰	۷/۶۵	۱۵/۶۸
۰/۰۵	۹/۲۹	۱۶۰/۹۲	۱۶/۰۳
۰/۱	۱۵/۴	۱۶۲/۱۸	۱۵/۱۴
۰/۱۵	۱۶/۵۳	۱۶۲/۵۸	۱۱/۵۱
۰/۲	۷۰/۹	۱۰۰/۳۷	۷/۵۷
۰/۲۵	۱۵/۷۸	۷۱/۱۴	۴/۳۸

شکل‌های ۴-۲۱، ۴-۲۲ و ۴-۲۳ به ترتیب نشان‌دهنده نرخ همگرایی برای چیدمان‌های $[0/90]_s$ ،

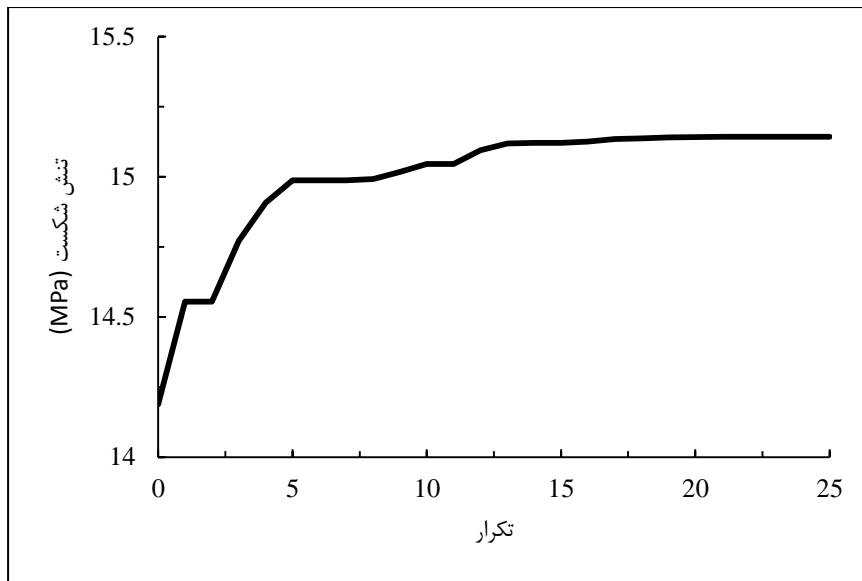
$[30/0/-30]_s$ و $[\pm 45/\pm 30]_s$ در $w=0/1$ است.



شکل ۴-۲۱ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[0/90]}$ در گشودگی مربعی



شکل ۴-۲۲ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[30/0/-30]}$ در گشودگی مربعی



شکل ۴-۲۳ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[±۴۵/±۳۰]}$ در گشودگی مربعی در ادامه نیز مقدار بهینه ضریب تمرکز تنش را بررسی می‌کنیم. بر خلاف گشودگی مثلثی، در این گشودگی با افزایش شعاع انحنا گشودگی مقدار ضریب تمرکز تنش بهینه ابتدا کاهش می‌یابد و سپس افزایش می‌یابد و دیگر حالت بهینه دایره نیست. جداول ۴-۲۰، ۴-۲۱ و ۴-۲۲ نیز به ترتیب برای چیدمان‌های $s_{[۰/۹۰]}$ ، $s_{[-۳۰/۰/۳۰]}$ و $s_{[±۴۵/±۳۰]}$ نشان داده شده است. مقدار بهینه ضریب تمرکز تنش در این گشودگی در انحنای غیر صفر رخ می‌دهد.

جدول ۴-۲۰ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $s_{[۰/۹۰]}$ در گشودگی مربعی

انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	ضریب تمرکز تنش
۰	۴۵	۱۴۰/۱۵	۲/۹۵۸۲
۰/۰۵	۵۴/۵۸	۱۲۲/۰۵	۲/۸۶۶۴
۰/۱	۲۸/۲	۵۶/۹۳	۲/۹۹۴۵
۰/۱۵	۲۶/۵۷	۱۴۷/۱۷	۳/۹۲۰۲
۰/۲	۲۶/۶۵	۵۷/۸۷	۵/۸۹۴۶
۰/۲۵	۲۷/۵۴	۵۸/۹۵	۱۰/۴۹۶۸

جدول ۴-۲۱ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $[30/-30]_s$ در گشودگی مربعی

انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	ضریب تمرکز تنش
۰	۹۰	۰	۲/۳۸۴۸
۰/۰۵	۷۹/۹۵	۹۸/۶	۲/۳۱۵۲
۰/۱	۷۴/۱۴	۹۷/۸۹	۲/۶۲۷۲
۰/۱۵	۷۲/۰۶	۶/۹۸	۳/۳۷۰۵
۰/۲	۷۱/۳۵	۹۶/۴۶	۴/۸۷۲
۰/۲۵	۷۱/۳۱	۶/۳۷	۸/۴۲۷۸

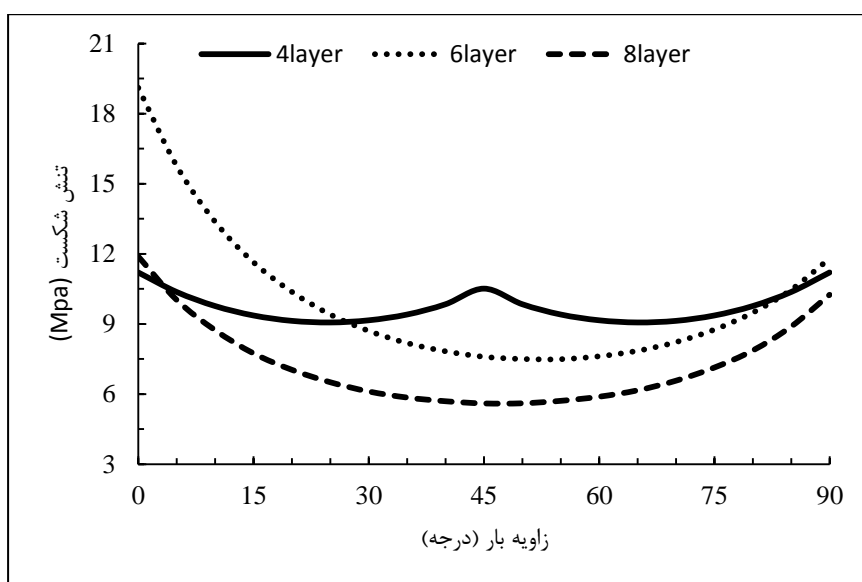
جدول ۴-۲۲ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $[45/\pm 30]_s$ در گشودگی مربعی

انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	ضریب تمرکز تنش
۰	۹۰	۱/۳۵	۲/۶۵۵۳
۰/۰۵	۸۰/۱۵	۱۰۰/۶۸	۲/۵۶۸۷
۰/۱	۱۵/۶۲	۷۰/۸۶	۲/۹۱۲۸
۰/۱۵	۷۱/۲۲	۱۰۰/۰۲	۳/۶۱۲۷
۰/۲	۷۰/۷۷	۱۰/۲۷	۵/۳۱۹۵
۰/۲۵	۷۱/۱۱	۱۰۰/۹۴	۹/۳۰۵۳

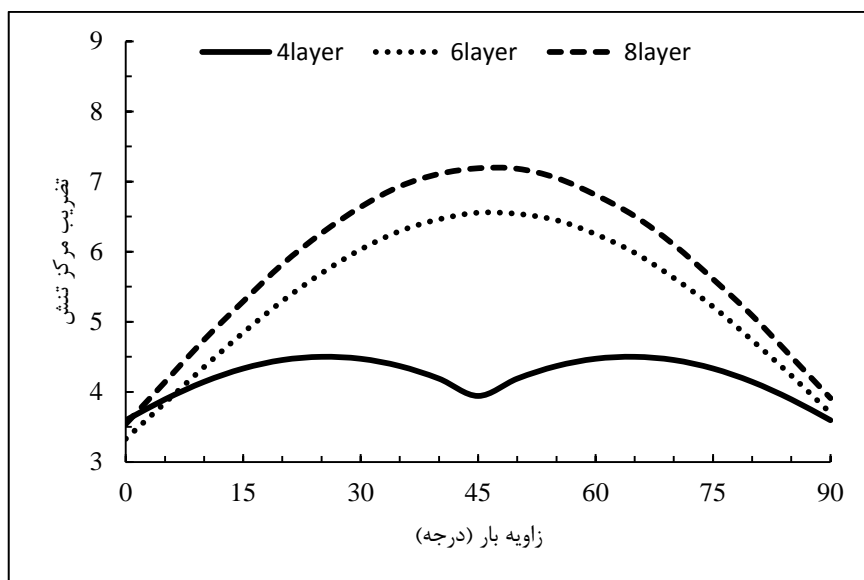
۴-۳-۲ زاویه‌ی بار

حال به بررسی تأثیر زاویه‌ی بار بر روی تنش شکست و ضریب تمرکز تنش می‌پردازیم. شکل ۴-۲۴ تأثیر زاویه‌ی بار بر روی تنش شکست را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار تنش شکست در چیدمان چهارلایه در زاویه بار صفر و ۹۰ درجه رخ می‌دهد و مقدار

آن ۱۱/۲ مگاپاسکال است. این مقدار در چیدمان شش و هشت‌لایه نیز در صفر درجه رخ می‌دهد و مقدار آن به ترتیب ۱۹/۱ و ۱۱/۸۸ مگاپاسکال است. شکل ۴-۲۵ نیز نشان دهنده تأثیر زاویه‌ی بار بر روی ضریب تمرکز تنش است. مطابق شکل ۴-۱۹ بیشترین ضریب تمرکز تنش در چیدمان چهارلایه در زاویه‌ی بار ۲۵ و ۶۵ درجه رخ می‌دهد و مقدار آن ۴/۴۹ است ولی این مقدار در چیدمان‌های شش و هشت‌لایه در زاویه بار ۴۵ درجه است و مقدار آن به ترتیب ۶/۵۵ و ۷/۱۸ است. شایان ذکر است که این نتایج برای $w=0/1$ و زاویه‌ی چرخش گشودگی ۴۵ درجه است و چیدمان‌های چهارلایه، شش‌لایه و هشت‌لایه به ترتیب $[0/90]_s$ ، $[30/0/30-]_s$ و $[±45/±30]_s$ است.



شکل ۴-۲۴ تأثیر زاویه بار بر تنش شکست در گشودگی مربعی



شکل ۴-۲۵ تأثیر زاویه بار بر ضریب تمرکز تنش در گشودگی مربعی در ادامه به بهینه‌سازی تنش شکست در زاویه بارهای مختلف می‌پردازیم. جدول ۴-۲۳، ۴-۲۴ و ۴-۲۵ به ترتیب برای چیدمان‌های $[0/90]_s$ ، $[30/0/-30]_s$ و $[±45/±30]_s$ بیان شده است. این نتایج برای $w=0/1$ ارائه شده است.

جدول ۴-۲۳ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $[0/90]_s$ در گشودگی مربعی

زاویه بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۱۳۵	۱۱/۲
۳۰	۱۴۴/۹۶	۱۳/۰۹
۴۵	۱۳۵	۱۰/۵
۶۰	۳۵/۰۳	۱۳/۰۹
۹۰	۴۵	۱۱/۲

مطالعه‌های موردی

جدول ۲۴-۴ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان s [۳۰/۰/-۳۰] در گشودگی مربعی

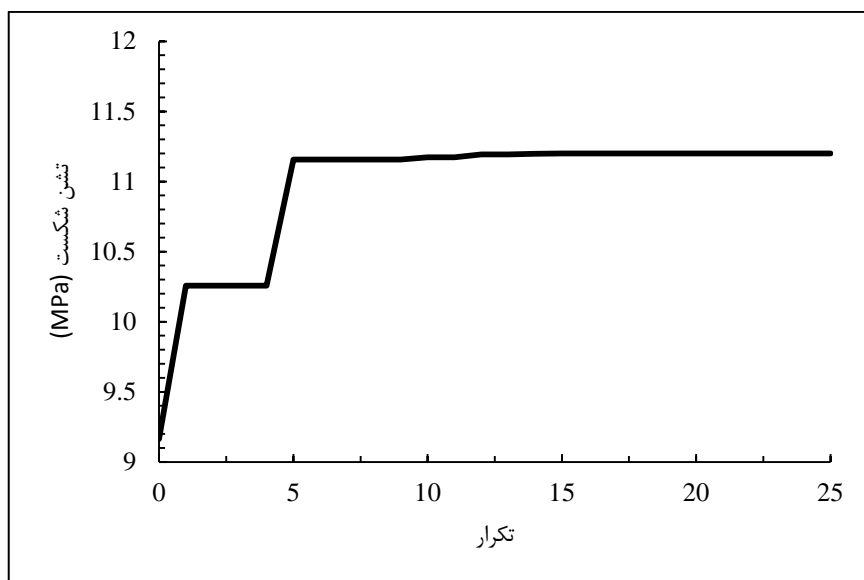
زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۴۵	۱۹/۱
۳۰	۱۶۴/۰۷	۱۶/۳۸
۴۵	۸۲/۲۸	۱۴/۸۸
۶۰	۱/۰۶	۱۴/۸۸
۹۰	۰	۱۳/۲۳

جدول ۲۵-۴ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان s [$\pm ۴۵/\pm ۳۰$] در گشودگی مربعی

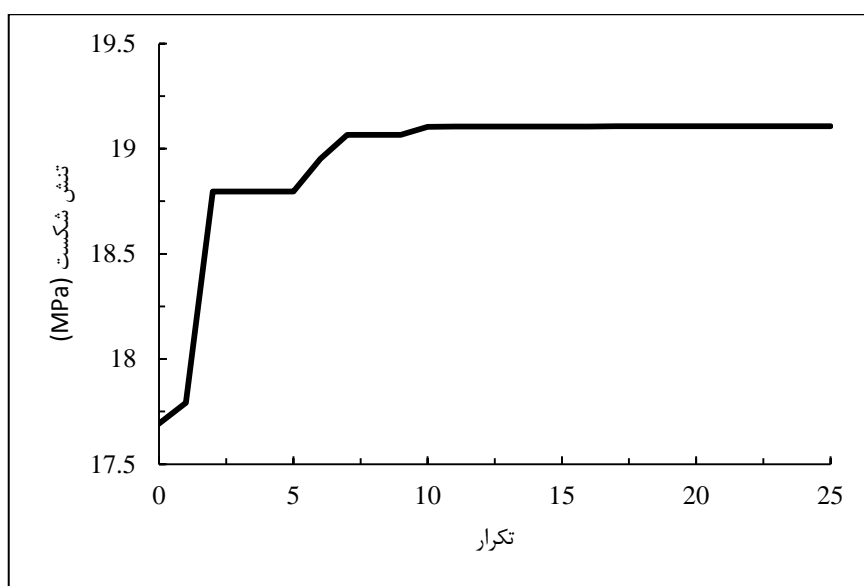
زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۴۵	۱۱/۸۸
۳۰	۱۶۹/۶۶	۱۲/۸۶
۴۵	۱۷۶/۲۴	۱۲/۱۹
۶۰	۲/۹۳	۱۲/۹۱
۹۰	۰	۱۲/۰۳

شکل‌های ۲۶-۴، ۲۷-۴ و ۲۸-۴ به ترتیب نشان‌دهنده نرخ همگرایی برای چیدمان‌های s [۰/۹۰]،

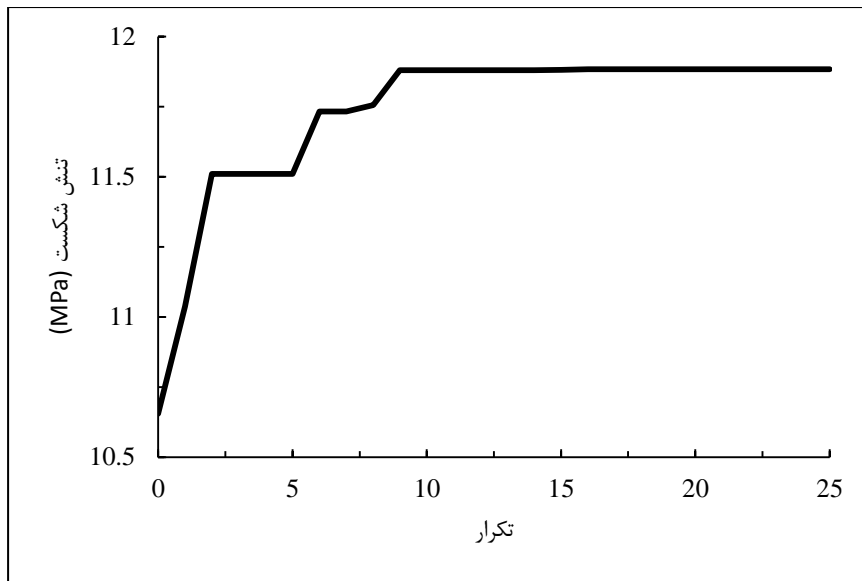
s [۳۰/۰/-۳۰] و s [$\pm ۴۵/\pm ۳۰$] در $w=۰/۱$ و زاویه بار صفر درجه است.



شکل ۴-۲۶ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $[0/90]_s$ و زاویه بار صفر درجه در گشودگی مربعی



شکل ۴-۲۷ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $[30/0/-30]_s$ و زاویه بار صفر درجه در گشودگی مربعی



شکل ۴-۲۸ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{\pm 45/\pm 30}$ و زاویه بار صفر درجه در گشودگی مربعی در ادامه نیز مقدار بهینه ضریب تمرکز تنش را بررسی می‌کنیم. جداول ۴-۲۶، ۴-۲۷ و ۴-۲۸ نیز به ترتیب برای چیدمان‌های $s_{[0/90]}$ ، $s_{[30/0/30]}$ و $s_{\pm 45/\pm 30}$ نشان داده شده است. جدول ۴-۲۶ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s_{[0/90]}$ در گشودگی مربعی

زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	ضریب تمرکز تنش
۰	۴۵	۳/۵۹۴۴
۳۰	۱۴۵/۵۲	۳/۱۷۴۷
۴۵	۴۸/۳۹	۳/۸۵۱
۶۰	۳۴/۴۷	۳/۱۷۴۷
۹۰	۴۵	۳/۵۹۴۴

جدول ۴-۲۷ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[30/-30/0]$ در گشودگی مربعی

ضریب تمرکز تنش	زاویه‌ی چرخش (درجه)	زاویه‌ی بار (درجه)
۳/۲۹۹۴	۱۳۵	۰
۳/۳۳۷۳	۱۵۹/۸	۳۰
۳/۳۰۲۱	۷۵/۷۳	۴۵
۲/۹۷۸۳	۱۷۷/۸۱	۶۰
۳/۰۲۲۷	۰	۹۰

جدول ۴-۲۸ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[30/\pm 45]$ در گشودگی مربعی

ضریب تمرکز تنش	زاویه‌ی چرخش (درجه)	زاویه‌ی بار (درجه)
۳/۵۴۰۲	۴۵	۰
۳/۲۳۲۶	۷۸/۷۶	۳۰
۳/۳۳۲	۸۷/۸۷	۴۵
۳/۱۳۹۱	۹۳/۰۷	۶۰
۳/۴۴۳۶	۰	۹۰

۴-۳-۳ همه پارامترها

در ادامه برای گشودگی مربعی همه متغیرها را به عنوان متغیر طراحی در نظر می‌گیریم و به بهینه‌سازی تنش شکست و ضریب تمرکز تنش می‌پردازیم. همانطور که در جداول ۴-۲۹ و ۴-۳۰ نشان داده شده است مقدار بهینه تنش شکست و ضریب تمرکز تنش برای هر سه نوع چیدمان در انحنای گشودگی غیر صفر انفاق می‌افتند. درگشودگی مثلثی حالت بهینه دایره بود، اما در گشودگی مربعی حالت بهینه دیگر دایره نیست.

جدول ۴-۲۹ مقادیر بهینه همه متغیرهای طراحی و تنش شکست بهینه در گشودگی مربعی

تنش شکست (MPa)	چیدمان	زاویه‌ی	زاویه‌ی	انحنای گوشه‌ی گشودگی
		چرخش (درجه)	بار (درجه)	
۹۲/۰۸	[۹۰ / ۹۰] _s	۰/۳۱	۹۰	۰/۰۱
۹۲/۰۸	[۹۰ / ۹۰ / ۹۰] _s	۰/۳۱	۹۰	۰/۰۱
۱۰۰/۶۳	[۹۰ / ۹۰ / ۹۰ / ۹۰] _s	۱۳۵	۹۰	۰/۰۱

جدول ۴-۳۰ مقادیر بهینه همه متغیرهای طراحی و ضریب تمرکز تنش بهینه در گشودگی مربعی

ضریب تمرکز تنش	چیدمان	زاویه‌ی	زاویه‌ی	انحنای گوشه‌ی گشودگی
		چرخش (درجه)	بار (درجه)	
۲/۱۴۶۸	[۹۰ / -۷۴.۹۷] _s	۱۴۲/۵۱	۷/۵۱	۰/۰۱
۲/۱۴۶۸	[-۸۰.۴۱ / -۸۲.۲۵ / -۸۳.۳۴] _s	۱۴۰/۲۴	۳/۲۳	۰/۰۱
۲/۱۴۶۸	[-۱۷.۹۷ / -۹.۱۹ / -۳۰.۰۱ / -۲۲.۹۱] _s	۱۱۴/۰۲	۶۹/۸۹	۰/۰۱

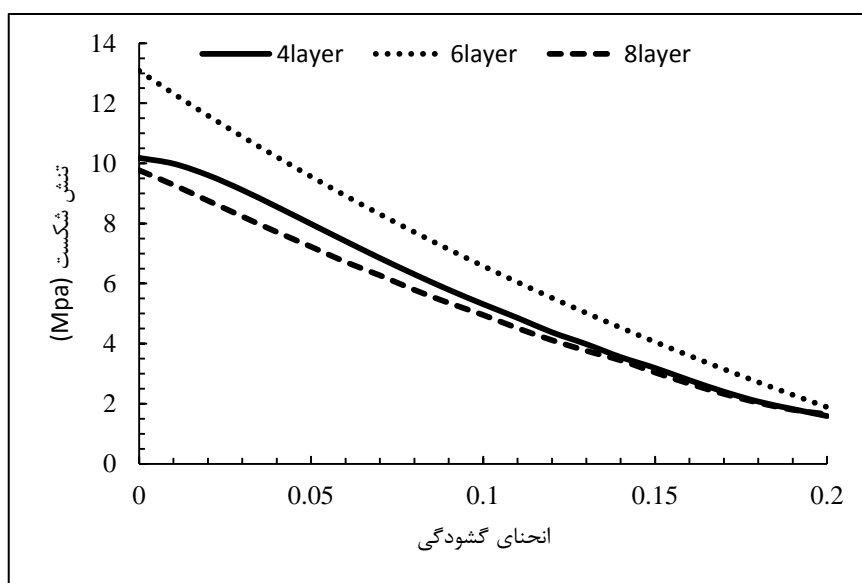
۴-۴ گشودگی پنج‌ضلعی

۴-۴-۱ انحنای گوشه‌ی گشودگی

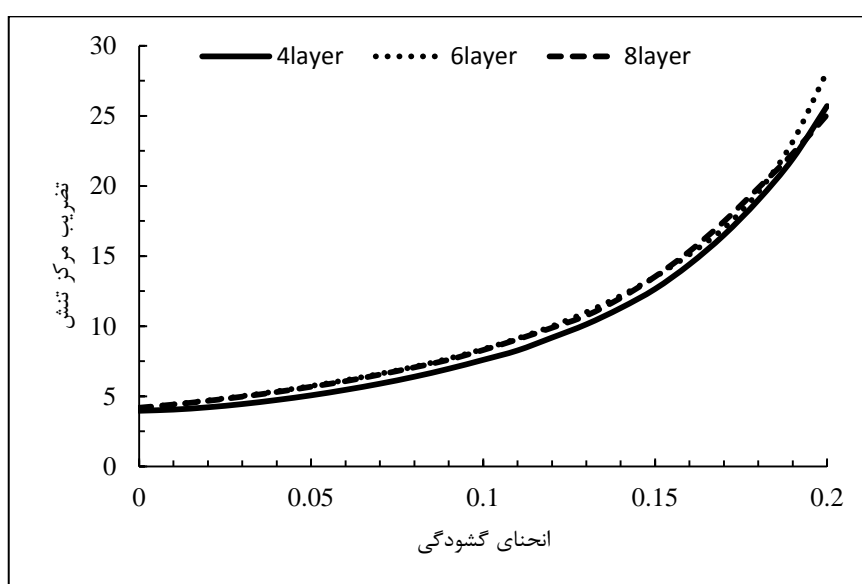
حال به بررسی تأثیر انحنای گوشه‌ی گشودگی بر تنش شکست و ضریب تمرکز تنش می‌پردازیم. مشابه گشودگی‌های مثلثی و مربعی مقدار تنش شکست در همه چیدمان‌ها، با افزایش شعاع انحنای گوشه‌ی گشودگی، کاهش می‌یابد. این رفتار نیز برای گشودگی پنج‌ضلعی در شکل ۴-۲۹ نیز قابل مشاهده است. اما به مانند گشودگی مثلثی، مقدار ضریب تمرکز تنش با افزایش شعاع انحنای گوشه‌ی

گشودگی افزایش می‌یابد و مطابق شکل ۴-۳۰ کترین مقدار ضریب تمرکز تنش در شعاع انحنای گوشه‌ی گشودگی صفر رخ می‌دهد که بیان‌گر این است که حالت بهینه گشودگی در پنج‌ضلعی دایره است.

این نتایج برای زاویه بار ۳۰ درجه و زاویه چرخش گشودگی ۴۵ درجه است و همچنین چیدمان-های چهارلایه، شش‌لایه و هشت‌لایه به ترتیب $s_{[0/90]}$ ، $s_{[30/0/30]}$ و $s_{[30/0/30]}$ است.



شکل ۴-۲۹ تأثیر انحنای گوشه‌ی گشودگی بر تنش شکست در گشودگی پنج‌ضلعی



شکل ۴-۳۰ تأثیر انحنای گوشه‌ی گشودگی بر ضریب تمرکز تنش در گشودگی پنج‌ضلعی

جدول ۴-۳۱ مقادیر بهینه زاویه‌ی بار و زاویه‌ی چرخش گشودگی را برای چیدمان $[0/90]_s$ نمایش می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار بهینه تنش شکست در کمترین انحنای گشودگی رخ می‌دهد. همچنین جداول ۴-۳۲ و ۴-۳۳ نیز مقدار تنش شکست بهینه را به ترتیب برای چیدمان $[30/0/-30]_s$ و $[±45/±30]_s$ نشان می‌دهد.

جدول ۴-۳۱ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان $[0/90]_s$ در گشودگی پنج‌ضلعی

انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۴۴/۹۸	۱۰۸/۶۱	۱۳/۸۴
۰/۰۵	۴۷/۵۳	۰	۱۰/۴۱
۰/۱	۴۷/۸۵	۱۸۰	۷/۰۴
۰/۱۵	۴۶/۸۵	۱۷۷/۳	۴/۳۲
۰/۲	۴۹/۴۷	۱۳۱/۷۴	۲/۲۱

جدول ۴-۳۲ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان $[30/0/-30]_s$ در گشودگی پنج‌ضلعی

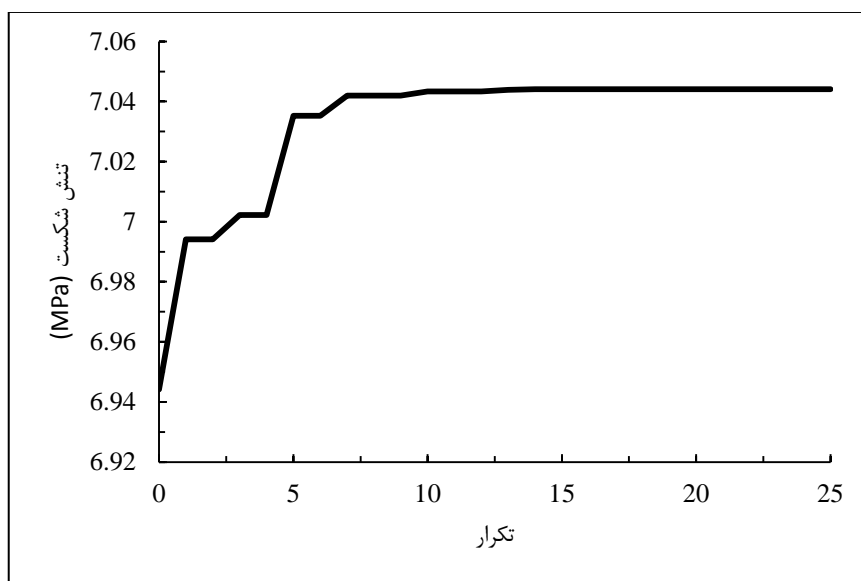
انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۰	۹/۴۵	۲۱/۵
۰/۰۵	۲/۲۴	۱۳/۷۵	۱۶/۴۶
۰/۱	۲/۶۵	۱۵۷/۱۵	۱۱/۱۲
۰/۱۵	۰	۱۸	۶/۶۵
۰/۲	۲/۸۳	۸۳/۵۸	۳/۲۷

جدول ۴-۳۳ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $[\pm 45/\pm 30]_s$ در گشودگی پنج‌ضلعی

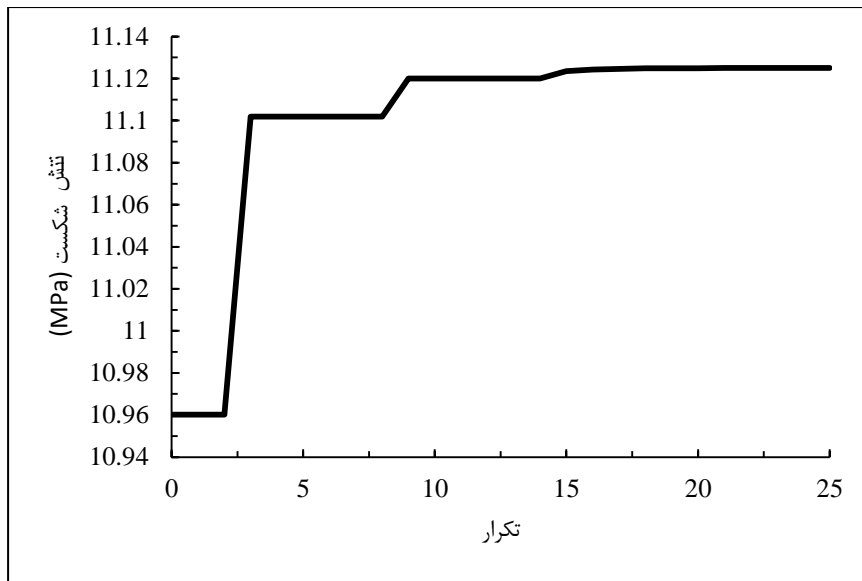
انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۰	۳۴/۶۵	۱۵/۶۸
۰/۰۵	۰	۱۶۲	۱۲/۲۷
۰/۱	۰	۱۸	۸/۴۶
۰/۱۵	۰	۱۸	۵/۲۴
۰/۲	۱/۵۶	۲۴/۰۸	۲/۳۸

شکل‌های ۴-۳۱، ۴-۳۲ و ۴-۳۳ به ترتیب نشان‌دهنده نرخ همگرایی برای چیدمان‌های $[\pm 45/\pm 30]_s$ ، $[0/90]_s$ ،

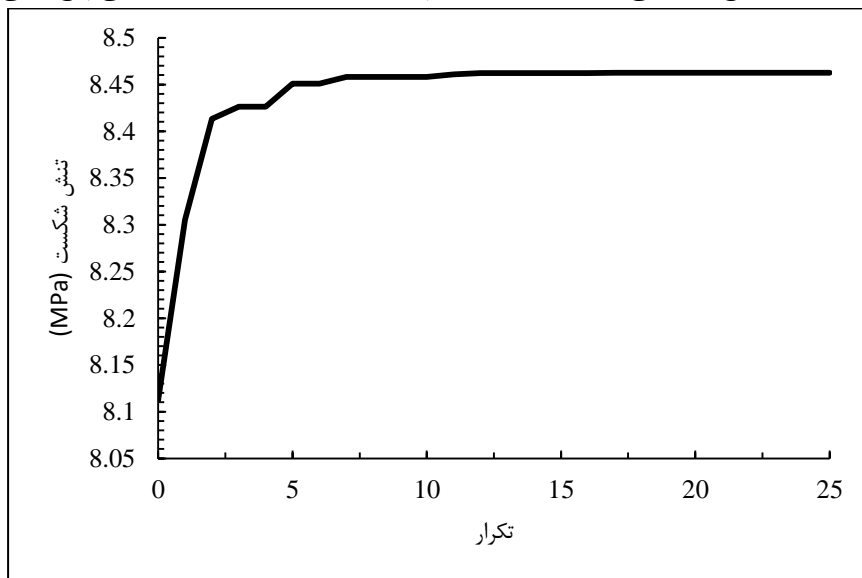
$[30/0/-30]_s$ و $[\pm 45/\pm 30]_s$ در $w=0/1$ است.



شکل ۴-۳۱ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $[\pm 45/\pm 30]_s$ در گشودگی پنج‌ضلعی



شکل ۴-۳۲ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[30/0/-30]}$ در گشودگی پنج‌ضلعی



شکل ۴-۳۳ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[\pm 45/\pm 30]}$ در گشودگی پنج‌ضلعی

در ادامه نیز مقدار بهینه ضریب تمرکز تنش را برای انحنای مختلف بررسی می‌کنیم. مطابق

گشودگی مثلثی، مقدار ضریب تمرکز تنش بهینه در این گشودگی نیز با افزایش انحنای گشودگی

افزایش می‌یابد و حالت بهینه نیز دایره است. جداول ۴-۳۴، ۴-۳۵ و ۴-۳۶ نیز به ترتیب برای

چیدمان‌های $s_{[0/90]}$ ، $s_{[30/0/30-]}$ و $s_{[\pm 45/\pm 30]}$ نشان داده شده است.

مطالعه‌های موردی

جدول ۴-۳۴ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان s [۰/۹۰] در گشودگی پنج‌ضلعی

انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	ضریب تمرکز تنش
۰	۴۵	۹/۶۵	۲/۹۵۸۲
۰/۰۵	۴۷/۹۳	۱۰۸/۷۴	۳/۸۶۶
۰/۱	۴۲/۵۹	۹۲/۰۵	۵/۷۰۰۷
۰/۱۵	۴۴/۲	۲۶/۲۲	۹/۲۶۷
۰/۲	۴۶/۸۷	۵۹/۸۴	۱۸/۶۰۸۶

جدول ۴-۳۵ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان s [۳۰/۰/۳۰] در گشودگی پنج‌ضلعی

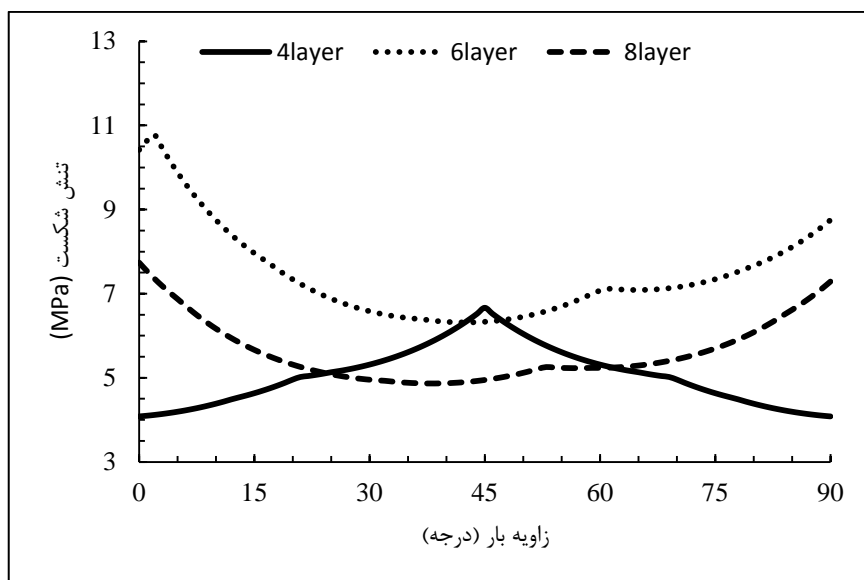
انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	ضریب تمرکز تنش
۰	۹۰	۲/۲۵	۲/۳۸۴۶
۰/۰۵	۹۰	۱۲۶	۳/۰۹۰۱
۰/۱	۸۷/۳۵	۵۷/۳۵	۴/۵۱۵۳
۰/۱۵	۸۷/۰۴	۱۲۹/۹۲	۷/۵۶۷۱
۰/۲	۸۶/۰۸	۹۶/۹۶	۱۶/۴۱۲۳

جدول ۴-۳۶ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان $[±۴۵/±۳۰]_s$ در گشودگی پنج‌ضلعی

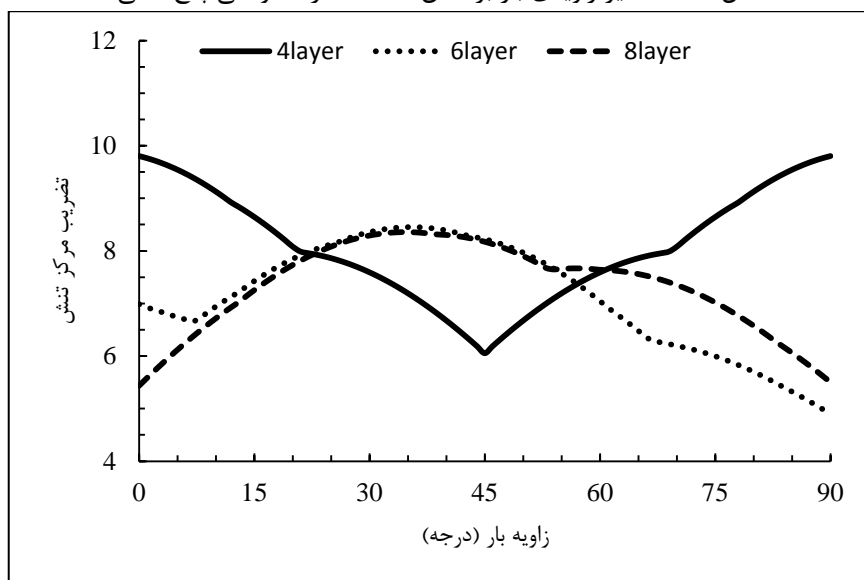
انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	ضریب تمرکز تنش
۰	۹۰	۱۷۷/۷۵	۲/۶۵۵۳
۰/۰۵	۰	۱۸	۳/۴۴۸۳
۰/۱	۸۶/۶۳	۹۷/۵۲	۵/۰۸۳۴
۰/۱۵	۸۷/۰۲	۱۳۴/۹۳	۸/۴۲۱۱
۰/۲	۹۰	۱۸۰	۱۶/۲۹۸۳

۴-۴-۲ زاویه‌ی بار

در این بخش تأثیر زاویه‌ی بار بر روی تنش شکست و ضریب تمرکز تنش مورد مطالعه قرار می‌دهیم. کمترین مقدار تنش شکست در چیدمان چهارلایه، مطابق شکل ۴-۳۴، در زاویه‌ی بار صفر و ۹۰ درجه رخ می‌دهد و مقدار آن ۴/۰۸ مگاپاسکال است. همچنین برای چیدمان‌های شش و هشت-لایه کمترین مقدار تنش شکست به ترتیب در زاویه‌ی بار ۴۲ و ۳۸ درجه است و کمترین مقدار تنش شکست آن به ترتیب ۶/۳۱ و ۴/۸۶ مگاپاسکال است. همچنین کمترین ضریب تمرکز تنش در چیدمان چهارلایه، مطابق شکل ۴-۳۵، در زاویه‌ی بار ۴۵ درجه رخ می‌دهد و مقدار آن ۶/۰۵ است. در مورد شش و هشت‌لایه نیز کمترین مقدار ضریب تمرکز تنش در زاویه‌ی بار به ترتیب ۹۰ و صفر درجه رخ می‌دهد و مقدار کمترین ضریب تمرکز تنش نیز به ترتیب ۴/۸۹ و ۵/۴۳ است. این نتایج برای زاویه‌ی چرخش گشودگی ۴۵ درجه است و همچنین چیدمان‌های چهارلایه، شش‌لایه و هشت-لایه به ترتیب $[۰/۹۰]_s$ ، $[۳۰/۰/۳۰-]_s$ و $[±۴۵/±۳۰]_s$ است.



شکل ۳۴-۴ تأثیر زاویه‌ی بار بر تنش شکست در گشودگی پنج‌ضلعی



شکل ۳۵-۴ تأثیر زاویه‌ی بار بر ضریب تمرکز تنش در گشودگی پنج‌ضلعی

جدول ۳۷-۴ بیان‌گر مقدار بهینه تنش شکست در چیدمان $[0/90]_s$ است. جدول ۳۸-۴ و ۳۹-۴

برای چیدمان $[30/0/-30]_s$ و $[\pm 45/\pm 30]_s$ ارائه شده است. با افزایش تعداد لایه‌ها مقدار بهینه تنش شکست کاهش می‌یابد.

شکل‌های ۳۶-۴، ۳۷-۴ و ۳۸-۴ به ترتیب نشان‌دهنده نرخ همگرایی برای چیدمان‌های $[0/90]_s$ ،

$[30/0/-30]_s$ و $[\pm 45/\pm 30]_s$ در $w=0/1$ و زاویه بار صفر درجه است.

مطالعه‌های موردی

جدول ۴-۳۷ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s [0/90]$ در گشودگی پنج‌ضلعی

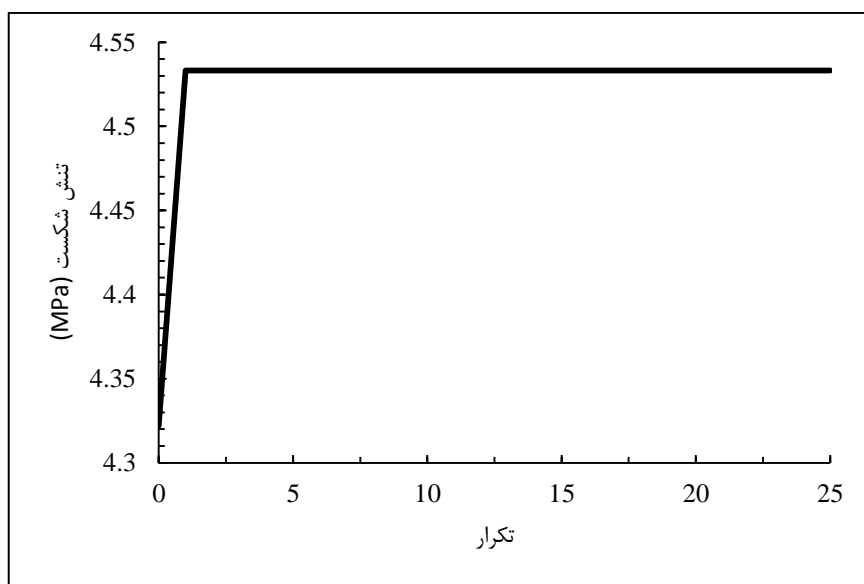
زاویه بار (درجه)	زاویه چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۱۸۰	۴/۵۳
۳۰	۸۴/۹۵	۵/۶۳
۴۵	۱۷۱	۶/۸۹
۶۰	۱۴۹/۰۴	۵/۶۳
۹۰	۱۸	۴/۵۳

جدول ۴-۳۸ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s [30/0/-30]$ در گشودگی پنج‌ضلعی

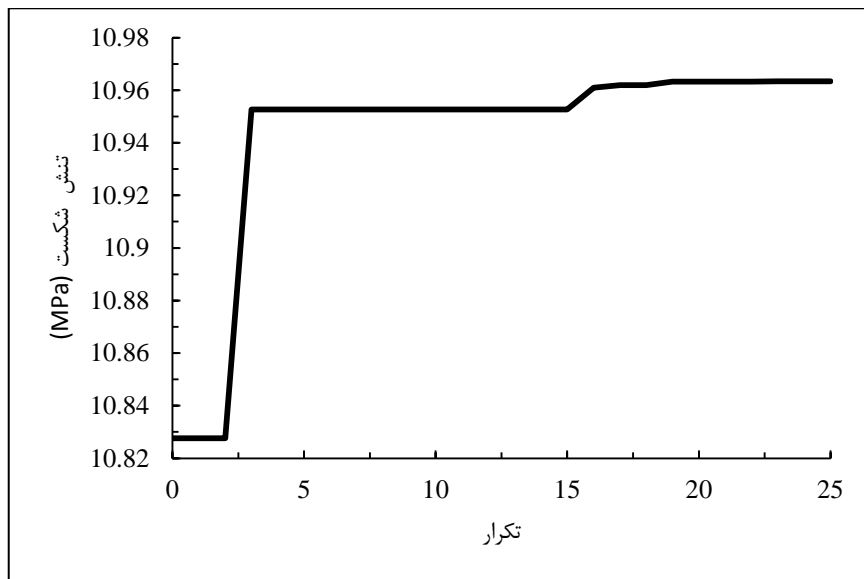
زاویه بار (درجه)	زاویه چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۱۸	۱۰/۹۶
۳۰	۱۷۲/۶۶	۷/۴۱
۴۵	۳۶/۵۶	۶/۹
۶۰	۱۱۶/۶۳	۷/۰۹
۹۰	۵۴	۹/۱۱

جدول ۴-۳۹ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s [\pm 45/\pm 30]$ در گشودگی پنج‌ضلعی

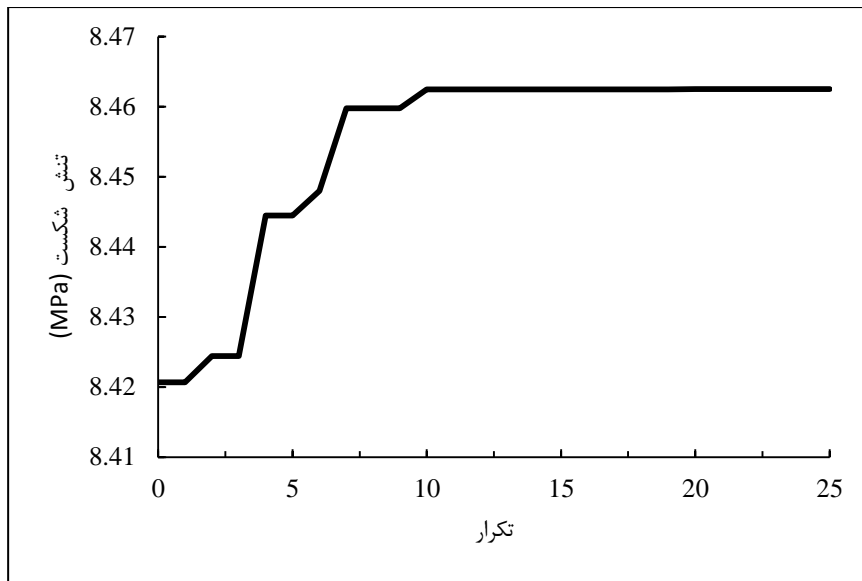
زاویه بار (درجه)	زاویه چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۱۸	۸/۴۶
۳۰	۱۴۲/۳۶	۵/۴۸
۴۵	۱۴۹/۴۶	۵/۱۸
۶۰	۴۸/۴۶	۵/۴۸
۹۰	۵۴	۷/۵۷



شکل ۴-۳۶ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $0/90_s$ و زاویه بار صفر درجه در گشودگی پنج‌ضلعی



شکل ۴-۳۷ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $30/0/-30_s$ و زاویه بار صفر درجه در گشودگی پنج‌ضلعی



شکل ۴-۳۸ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{\pm 45/\pm 30}$ و زاویه بار صفر در گشودگی پنج‌ضلعی

در ادامه نیز مقدار بهینه ضریب تمرکز تنش را برای انحنای مختلف بررسی می‌کنیم. جداول

۴-۴۰، ۴-۴۱ و ۴-۴۲ نیز به ترتیب برای چیدمان‌های $s_{0/90}$ ، $s_{30/0/30-}$ و $s_{\pm 45/\pm 30}$ نشان داده شده‌اند. این نتایج برای $w=0/1$ ارائه شده است.

جدول ۴-۴۰ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s_{0/90}$ در گشودگی پنج‌ضلعی

زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۱۸۰	۸/۸۲۳۹
۳۰	۱۲۱/۱۱	۷/۱۳۰۸
۴۵	۱۷۱	۵/۸۳۷۴
۶۰	۱۴۸/۸۸	۷/۱۳۰۸
۹۰	۵۴	۸/۸۲۳۹

جدول ۴-۴۱ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[-30/0/30]$ در گشودگی پنج‌ضلعی

زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۱۸۰	۶/۵۳۷۹
۳۰	۶۰/۹	۷/۴۳۲۵
۴۵	۳۳/۳۱	۷/۳۸۳۲
۶۰	۴۱/۴۳	۶/۷۳۴۷
۹۰	۱۶۲	۴/۵۶۶۱

جدول ۴-۴۲ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[±۳۰/±۴۵]$ در گشودگی پنج‌ضلعی

زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۱۲۶	۴/۹۲۹۸
۳۰	۱۰۵/۷۹	۷/۴۴۸۱
۴۵	۵/۱۴۵۶	۷/۷۸۴۲
۶۰	۸۴/۳	۷/۳۱۵۹
۹۰	۱۸۰	۵/۲۹۹

۴-۴-۳ همه پارامترها

در نهایت به بررسی همه متغیرهای طراحی می‌پردازیم. مقدار بهینه تنش شکست و ضریب تمرکز تنش همانطور که پیش‌بینی می‌شد در کمترین شعاع انحنا رخ می‌دهند. این واقعیت را می‌توان در جداول ۴-۴۳ و ۴-۴۴ نیز ملاحظه کرد.

جدول ۴-۴۳ مقادیر بهینه همه متغیرهای طراحی و تنش شکست بهینه در گشودگی پنج‌ضلعی

تنش شکست (MPa)	چیدمان	انحنای گوشه‌ی گشودگی	
		زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)
۹۶/۴۵	[۹۰ / ۹۰] _s	۹۰	۷/۶۵
۹۶/۴۲	[۹۰ / ۹۰ / ۹۰] _s	۹۰	۱۸۰
۹۶/۴۲	[۹۰ / ۹۰ / ۹۰ / ۹۰] _s	۹۰	۱۸۰

جدول ۴-۴۴ مقادیر بهینه همه متغیرهای طراحی و ضریب تمرکز تنش بهینه در گشودگی پنج‌ضلعی

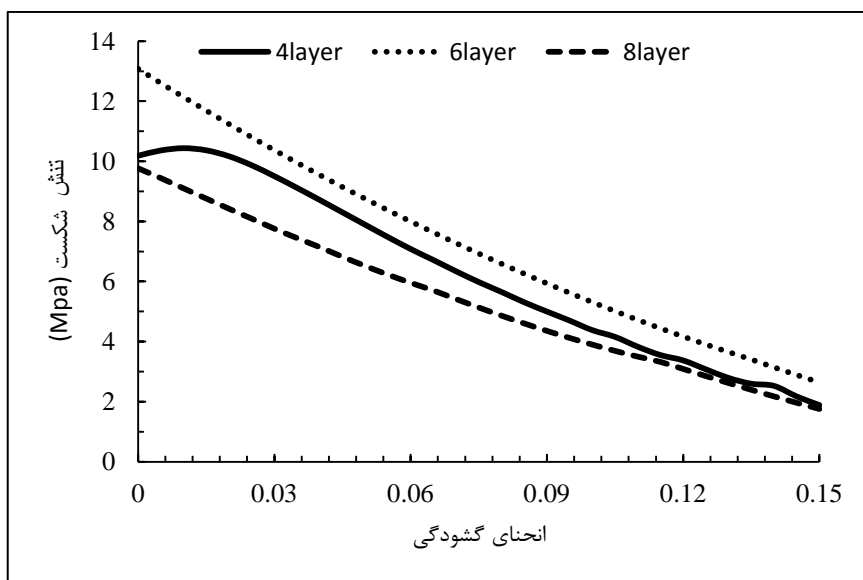
ضریب تمرکز تنش	چیدمان	انحنای گوشه‌ی گشودگی	
		زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)
۲/۱۵۸۸	[-۶۹.۳۷ / ۹۰] _s	۱۰/۳۱	۶۶/۳
۲/۱۶۰۷	[-۷۳.۰۳ / -۸۰.۶۹ / ۸۱.۹۳] _s	۴/۴۶	۱۸۰
۲/۱۶۶۱	[-۳۵.۸۷ / -۴۶.۸۵ / -۱۴.۳۹ / -۳۰.۵۷] _s	۰	۵۹/۳۲

۴-۵ گشودگی شش‌ضلعی

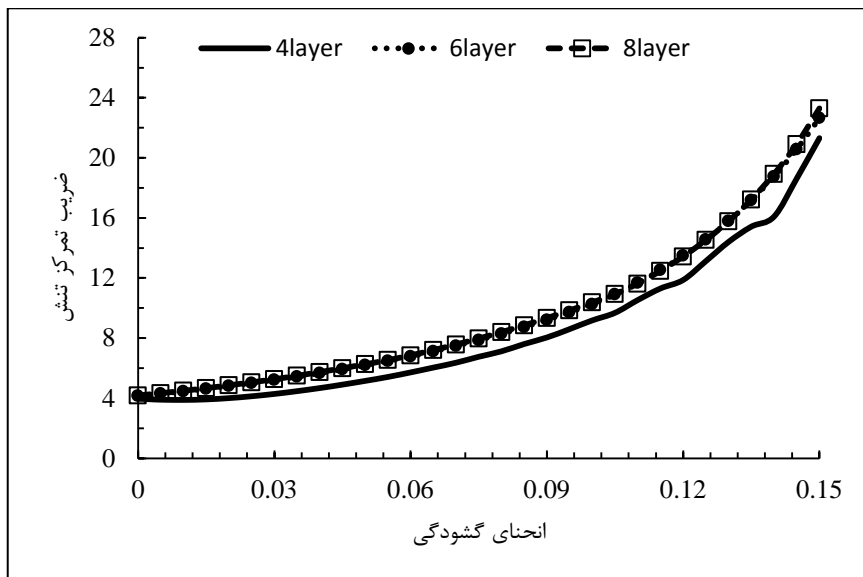
۴-۵-۱ انحنای گوشه‌ی گشودگی

در این بخش ابتدا به بررسی انحنای گشودگی بر تنش شکست و ضریب تمرکز تنش می‌پردازیم. شکل ۴-۳۹ تأثیر انحنای گشودگی را بر تنش شکست نشان می‌دهد. میزان تنش شکست با افزایش شعاع انحنای، ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. شکل ۴-۴۰ نشان دهنده رفتار ضریب تمرکز تنش با تغییر انحنای گشودگی است. این نتایج برای زاویه بار ۳۰ درجه و زاویه چرخش گشودگی ۴۵

درجه است و همچنین چیدمان‌های چهارلایه، شش لایه و هشت لایه به ترتیب $[0/90]_s$ ، $[30/0/30]_s$ و $[±45/±30]_s$ است.



شکل ۴-۳۹ تأثیر انحنای گوشه‌ی گشودگی بر تنش شکست در گشودگی شش‌ضلعی



شکل ۴-۴۰ تأثیر انحنای گوشه‌ی گشودگی بر ضریب تمرکز تنش در گشودگی شش‌ضلعی در ادامه مقادیر بهینه تنش شکست را برای مقادیر مختلف انحنای گشودگی می‌پردازیم. جدول ۴-۴۵ مقدار تنش شکست بهینه را برای انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $[0/90]_s$ نشان می‌دهد. مقدار بهینه تنش شکست با افزایش شعاع انحنای گشودگی، کاهش می‌یابد. جداول ۴-۴۶ و ۴-۴۷

۴۷ نیز مقدار بهینه تنش شکست را به ترتیب برای چیدمان $[۳۰/۰/-۳۰]_s$ و $[±۴۵/±۳۰]_s$ نشان می‌دهند.

جدول ۴-۴۵ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $[۰/۹۰]_s$ در گشودگی شش ضلعی

انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۴۵/۰۱	۱۷۹/۳۸	۱۳/۸۴
۰/۰۵	۴۷/۶۶	۱۳۴/۱۵	۱۳/۹۳
۰/۱	۳۹/۵	۱۷/۲۸	۷/۳۲
۰/۱۵	۵۳/۲۴	۵/۶۵	۳/۰۸

جدول ۴-۴۶ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $[۳۰/۰/۳۰]_s$ در گشودگی شش ضلعی

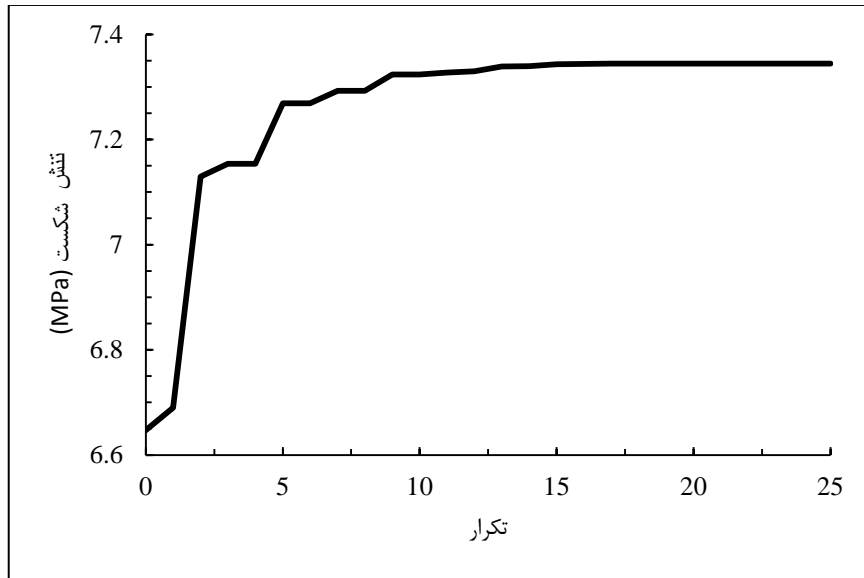
انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۰	۱۸۰	۲۱/۵
۰/۰۵	۸/۶۵	۱۳۷/۸	۱۷/۶۸
۰/۱	۷/۹۹	۱۶/۵۱	۱۰/۲
۰/۱۵	۴/۸۶	۱۳/۶۵	۴/۶۳

جدول ۴-۴۷ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $[±۴۵/±۳۰]_s$ در گشودگی شش ضلعی

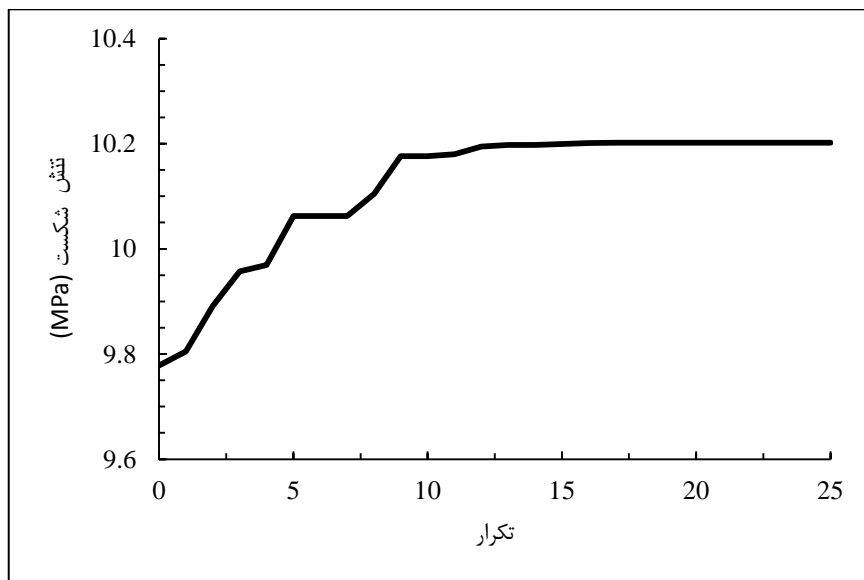
انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۰	۲/۲۵	۱۵/۶۸
۰/۰۵	۹۰	۰	۱۴/۰۴
۰/۱	۹۰	۱۸۰	۸/۱
۰/۱۵	۹۰	۶۰/۴۵	۳/۳۸

شکل‌های ۴-۴۱، ۴-۴۲ و ۴-۴۳ به ترتیب نشان‌دهنده نرخ همگرایی برای چیدمان‌های $[0/90]_s$ ،

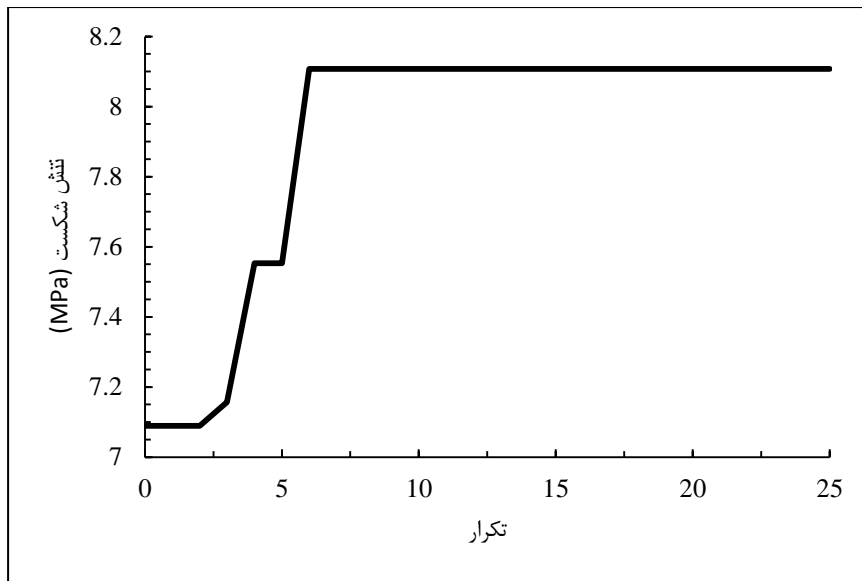
$[30/0/-30]_s$ و $[\pm 45/\pm 30]_s$ در $w=0/1$ است.



شکل ۴-۴۱ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $[0/90]_s$ در گشودگی شش ضلعی



شکل ۴-۴۲ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $[30/0/-30]_s$ در گشودگی شش ضلعی



شکل ۴-۴۳ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $s_{[45/\pm 30]}$ در گشودگی شش ضلعی در ادامه مقدار ضریب تمرکز تنش بهینه را برای انحنای مختلف بررسی می‌کنیم. همانند گشودگی مربعی در این گشودگی نیز با افزایش شعاع انحنای گشودگی مقدار ضریب تمرکز تنش بهینه ابتدا کاهش می‌یابد و سپس افزایش می‌یابد و دیگر حالت بهینه دایره نیست. جداول ۴-۴۸، ۴-۴۹ و ۴-۵۰ مقدار ضریب تمرکز تنش بهینه را به ترتیب برای چیدمان‌های $s_{[0/90]}$ ، $s_{[-30/0/30]}$ و $s_{[45/\pm 30]}$ نشان می‌دهد.

جدول ۴-۴۸ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحنای گشودگی مختلف در چیدمان $s_{[0/90]}$ در گشودگی شش ضلعی

انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	ضریب تمرکز تنش
۰	۴۵	۱۱۱/۸۴	۲/۹۵۸۲
۰/۰۵	۴۸/۹	۱۳/۵۲	۳/۱۰۷۵
۰/۱	۳۹/۳۷	۱۳۷/۵۱	۵/۶۱۸۷
۰/۱۵	۳۹/۲۷	۱۳۹/۴	۱۳/۴۷۰۹

جدول ۴-۴۹ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در چیدمان s]-
در گشودگی شش ضلعی [۳۰/۰/۳۰]

انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	ضریب تمرکز تنش
۰	۹۰	۱۸۰	۲/۳۸۴۸
۰/۰۵	۹۰	۱۸۰	۲/۶۷۹۲
۰/۱	۹۰	۱۸۰	۴/۲۵۶۴
۰/۱۵	۹۰	۰	۹/۷۳۲۶

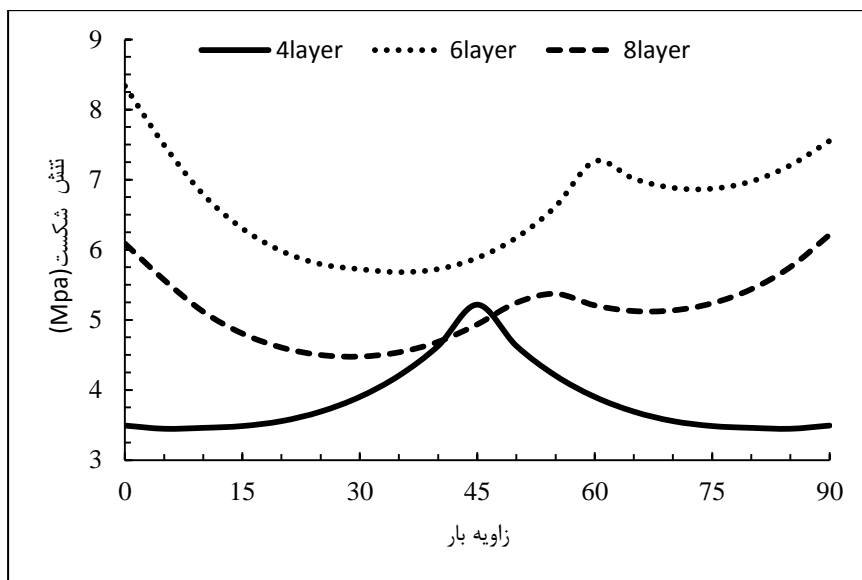
جدول ۴-۵۰ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در انحناهای گشودگی مختلف در
چیدمان s] [±۴۵/±۳۰] در گشودگی شش ضلعی

انحنای گشودگی	زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	ضریب تمرکز تنش
۰	۹۰	۱۶۱/۵۵	۲/۶۵۵۳
۰/۰۵	۹۰	۱۸۰	۲/۸۷۷۱
۰/۱	۹۰	۱۸۰	۴/۹۴۶۲
۰/۱۵	۸۲/۳۴	۱۲۳/۹	۱۱/۴۴۷

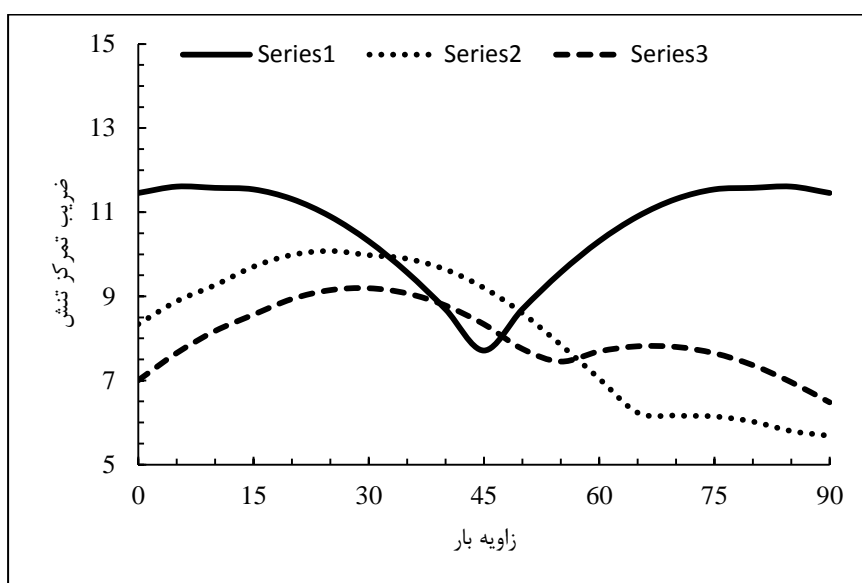
۴-۵-۲ زاویه‌ی بار

در این بخش ابتدا به بررسی تأثیر زاویه‌ی بار بر تنش شکست و ضریب تمرکز تنش می‌پردازیم. با توجه به شکل ۴-۴۴ کمترین مقدار تنش شکست در چیدمان چهارلایه در زاویه‌ی بار ۵ و ۸۵ درجه رخ می‌دهد. مقدار آن ۳/۴۴ مگاپاسکال است و بیشترین مقدار آن ۵/۲۱ مگاپاسکال است که در زاویه‌ی بار ۴۵ درجه رخ می‌دهد. در چیدمان‌های شش و هشت‌لایه نیز کمترین مقدار تنش شکست به ترتیب در زاویه‌ی بار ۳۵ و ۳۰ درجه رخ می‌دهد و مقادیر آن ۵/۶۸ و ۴/۴۷ مگاپاسکال است. همچنین بیشترین مقدار تنش شکست در شش و هشت‌لایه ۸/۳۳ و ۶/۲۱ مگاپاسکال است که در

زوایای بار صفر و ۹۰ درجه رخ می‌دهد. شکل ۴-۴۵ مقدار ضریب تمرکز تنش را در انحنای گشودگی مختلف نشان می‌دهد. کمترین مقدار ضریب تمرکز تنش در چیدمان چهارلایه در زاویه‌ی بار ۴۵ درجه است و مقدار آن ۷/۷۱ می‌باشد. در چیدمان‌های شش و هشت‌لایه نیز کمترین مقدار ضریب تمرکز تنش در زاویه‌ی بار ۹۰ درجه رخ می‌دهد و مقدار آن به ترتیب ۵/۶۸ و ۶/۴۸ است



شکل ۴-۴۴ تأثیر زاویه بار بر تنش شکست در گشودگی شش‌ضلعی



شکل ۴-۴۵ تأثیر زاویه بار بر ضریب تمرکز تنش در گشودگی شش‌ضلعی

جدول ۴-۵۱، ۴-۵۲ و ۴-۵۳ نشان دهنده مقدار تنش شکست بهینه می‌باشد شکل ۴-۳۲ نیز نشان دهنده نرخ همگرایی تنش شکست بهینه است. نتایج برای $w=0/1$ است. نمودار همگرایی برای چیدمان‌های مختلف و زاویه‌ی بار صفر درجه است.

جدول ۴-۵۱ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[0/90]$ در گشودگی شش ضلعی

زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۱۲۰/۱۸	۴/۷۱
۳۰	۱۳۳/۱۷	۶/۰۸
۴۵	۱۴/۹۹	۷/۱۴
۶۰	۱۳۶/۸۲	۶/۰۸
۹۰	۱۴۹/۸۱	۴/۷۱

جدول ۴-۵۲ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s[30/0/-30]$ در گشودگی شش ضلعی

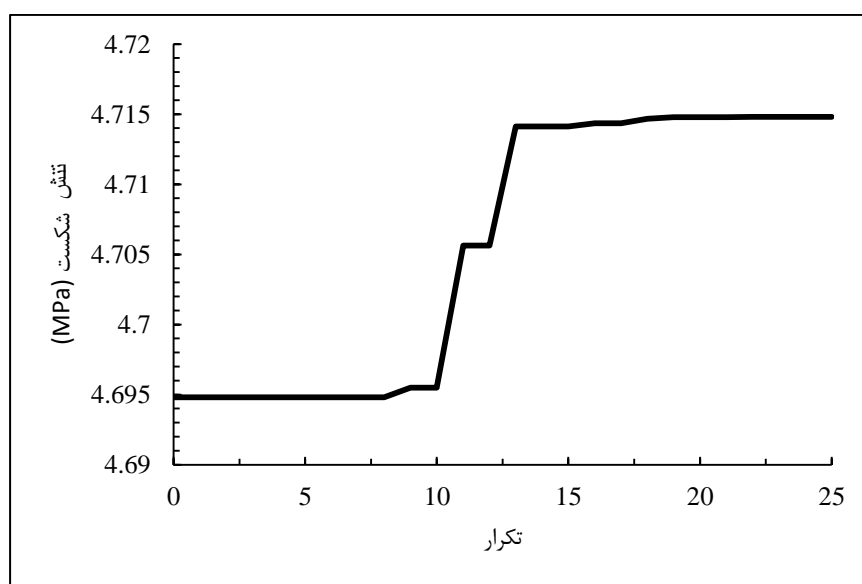
زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۰	۹/۴۴
۳۰	۱۴۰/۶۸	۹/۰۲
۴۵	۹۶/۹۲	۷/۰۶
۶۰	۴۵/۰۲	۲/۲۶
۹۰	۱۸۰	۹/۳۹

جدول ۴-۵۳ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان s $[\pm 45/\pm 30]$ در گشودگی شش ضلعی

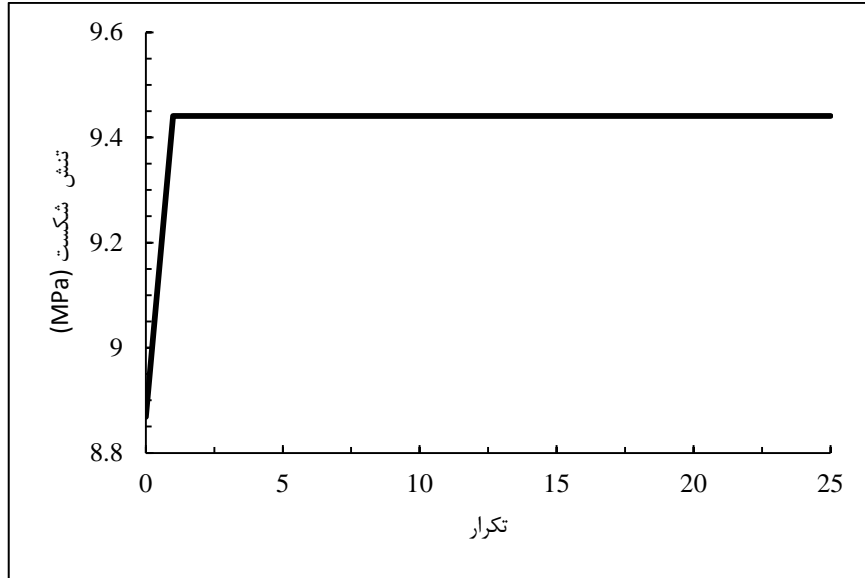
زاویه بار (درجه)	زاویه چرخش (درجه)	تنش شکست (MPa)
۰	۲۹/۸۶	۷/۱۲
۳۰	۹۴/۵۶	۵/۶۷
۴۵	۱۰۱/۵۵	۵/۳۷
۶۰	۱۰۸/۵۳	۵/۷۲
۹۰	۰	۸/۱

شکل‌های ۴-۴۶، ۴-۴۷ و ۴-۴۸ به ترتیب نشان‌دهنده نرخ همگرایی برای چیدمان‌های s $[0/90]$ ،

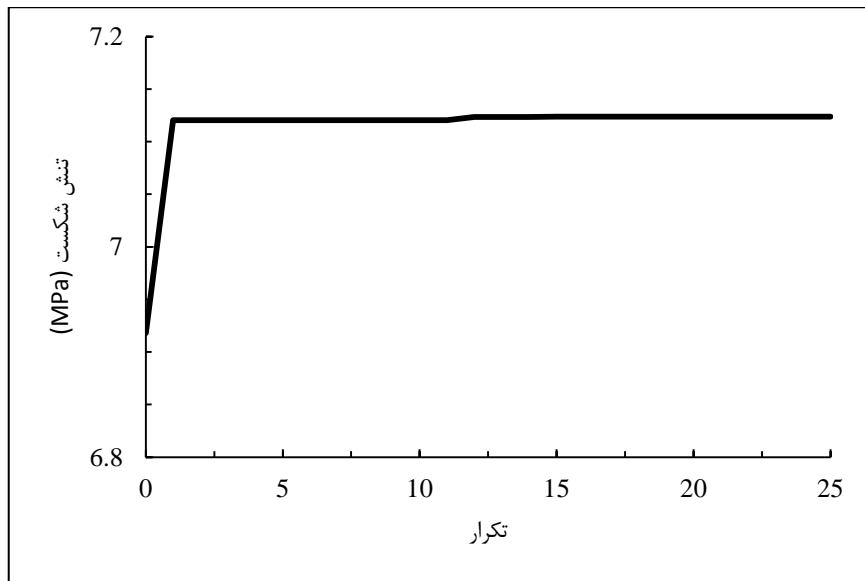
s $[30/0/-30]$ و s $[\pm 45/\pm 30]$ در $w=0/1$ و زاویه بار صفر درجه است.



شکل ۴-۴۶ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان s $[0/90]$ و زاویه بار صفر درجه در گشودگی شش ضلعی



شکل ۴-۴۷ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $[30/0/-30]_s$ و زاویه بار صفر درجه در گشودگی شش ضلعی



شکل ۴-۴۸ نرخ همگرایی تنش شکست برای چیدمان $[±45/±30]_s$ و زاویه بار صفر درجه در گشودگی شش ضلعی

جداول ۴-۵۴، ۴-۵۵ و ۴-۵۶ مقدار ضریب تمرکز تنش یهینه را به ترتیب برای چیدمان‌های

$[0/90]_s$ ، $[30/0/-30]_s$ و $[±45/±30]_s$ نشان می‌دهد.

مطالعه‌های موردی

جدول ۴-۵۴ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s_{[0/90]}$ در گشودگی شش ضلعی

زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	ضریب تمرکز تنش
۰	۱۸۰	۸/۵۵۶۵
۳۰	۱۳۳/۴۳	۶/۶۳۶۸
۴۵	۷۴/۹۵	۵/۷۶۰۹
۶۰	۱۳۶/۵۶	۶/۶۳۶۸
۹۰	۳۰/۱۶	۸/۵۱۶۳

جدول ۴-۵۵ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s_{[-30/30]}$ در گشودگی شش ضلعی

زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	ضریب تمرکز تنش
۰	۱۸۰	۶/۷۹۰۶
۳۰	۸۴/۸۲	۷/۳۱۴
۴۵	۳۳/۲۸	۷/۱۹۴۲
۶۰	۱۶۱/۶۷	۶/۴۸۹
۹۰	۰	۴/۲۵۶۴

جدول ۴-۵۶ مقادیر بهینه متغیرهای طراحی و تابع هدف بهینه در زاویه بارهای مختلف در چیدمان $s_{[±45/±30]}$ در گشودگی شش ضلعی

زاویه‌ی بار (درجه)	زاویه‌ی چرخش (درجه)	ضریب تمرکز تنش
۰	۹۰	۶/۱۲۳
۳۰	۱۵۳/۸۵	۷/۲۱۹۳
۴۵	۱۶۱/۰۲	۷/۵۴۴۵
۶۰	۱۶۸/۱۲	۷/۰۷۲۷
۹۰	۰	۴/۹۴۶۲

۴-۵-۳ همه پارامترها

در انتها نیز مقدار تنش شکست بهینه و ضریب تمرکز تنش بهینه برای همه متغیرهای طراحی در گشودگی شش ضلعی در جداول ۴-۵۷ و ۴-۵۸ ارائه شده است. مقدار بهینه تنش شکست و ضریب تمرکز تنش بهینه همانند گشودگی مربعی در انحنای غیر صفر رخ می‌دهند و حالت بهینه آن‌ها دایره نمی‌باشد.

جدول ۴-۵۷ مقادیر بهینه همه متغیرهای طراحی و تنش شکست بهینه در گشودگی شش ضلعی

تنش شکست (MPa)	چیدمان	زاویه		
		چرخش (درجه)	زاویه بار (درجه)	انحنای گوشه‌ی گشودگی
۹۸/۶۹	[۹۰ / ۹۰] _s	۱۵۰/۰۲	۹۰	۰/۰۰۶
۹۲/۹۷	[۹۰ / ۹۰ / ۹۰] _s	۰	۹۰	۰/۰۰۶
۹۲/۹۷	[۹۰ / ۹۰ / ۹۰ / ۹۰] _s	۰	۹۰	۰/۰۰۶

جدول ۴-۵۸ مقادیر بهینه همه متغیرهای طراحی و ضریب تمرکز تنش بهینه در گشودگی شش ضلعی

ضریب تمرکز تنش	چیدمان	زاویه		
		چرخش (درجه)	زاویه بار (درجه)	انحنای گوشه‌ی گشودگی
۲/۱۱۴۹	[-۵۵.۹ / -۸۳.۰۶] _s	۱۱۰/۵۱	۲۰/۵۱	۰/۰۰۶
۲/۱۲۲۷	[۲.۴ / ۱۷.۴۹ / -۱۷.۴۸] _s	۱۱۹/۲۵	۹۰	۰/۰۰۶
۲/۱۲۸۲	[-۳۵.۲۱ / -۳۷.۰۱ / -۱۰.۷۹ / -۵۲.۹۷] _s	۳۰/۰۸	۵۸/۱۲	۱/۰۰۶

فصل ۵

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه با کمک حلی تحلیلی بر پایه‌ی روش متغیر مختلط لختیسی و با استفاده از تابع نگاشتی هم‌نوا به بهینه‌سازی توزیع تنش در صفحات چندلایه متقارن کامپوزیتی دارای گشودگی‌های غیردایروی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) پرداخته شد. برای بررسی درستی نتایج، حل حاضر با حل اجزای محدود مقایسه گردید. نتایج به‌دست‌آمده از دو روش تطابق خوبی با هم داشتند. همچنین به کمک معیار تسای-هیل مقدار تنش شکست برای این صفحات مورد بررسی قرار گرفت و به کمک الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات مقدار بهینه آن محاسبه شد. برای بررسی تنش شکست نیز مقایسه‌ای با مرجع [۱۷] انجام شد.

در این مطالعه به خوبی نشان داده شد که پارامترهای متعددی بر توزیع تنش اطراف گشودگی و تنش شکست تأثیرگذار هستند. این پارامترها شامل: شعاع انحنای گوشه‌های گشودگی، زاویه‌ی چرخش گشودگی، زاویه‌ی بار و نحوه چیدمان لایه‌ها می‌باشند. با انتخاب صحیح این پارامترها می‌توان به کمترین مقدار تنش بی‌بعد در اطراف گشودگی و تنش شکست دست یافت. بدین منظور تأثیر هر پارامتر به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفت و سپس تأثیر همه‌ی پارامترها در کنار یکدیگر و در نهایت مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مورد بحث که منجر به کمترین ضریب تمرکز تنش می‌شود؛ برای هر نوع گشودگی با شکل‌های مختلف بررسی و معرفی شد.

در یک بررسی جامع، تأثیر پارامتر انحنای گوشه‌ی گشودگی برای گشودگی‌های مختلف مشاهده شد که نتایج به دو دسته‌ی کلی تقسیم می‌شوند. برای گشودگی‌هایی که تعداد اضلاع آن‌ها فرد است؛ گشودگی دایروی بهترین هندسه برای کاهش ضریب تمرکز تنش بوده و با افزایش انحنای گوشه‌ی این گشودگی‌ها مقادیر ضریب تمرکز تنش نیز افزایش می‌یابد. اما در گشودگی‌هایی با تعداد اضلاع زوج لزوماً چنین رفتاری وجود ندارد؛ به‌گونه‌ای که برای هر یک از این گشودگی‌ها با انتخاب انحنای مناسب می‌توان به تنش بی‌بعد کمتری نسبت به گشودگی دایروی رسید و برخلاف انتظار در این گشودگی‌ها مشاهده می‌شود که دایره دارای کمترین تنش بی‌بعد نیست. اما در مورد تنش شکست

بهینه با افزایش میزان انحنای گوشه‌ی گشودگی، مقدار تنش شکست بهینه کاهش می‌یابد و کمترین مقدار تنش شکست بهینه در بیشترین انحنا رخ می‌دهد. این کاهش در همه گشودگی‌ها رخ می‌دهد. همچنین نتایج نشان داد که شعاع انحنای گوشه‌های گشودگی تنها پارامتر موثر بر کاهش تابع هدف نیست، بلکه زاویه‌ی بار و انتخاب چیدمان مناسب هم در این کاهش، تأثیر بسزایی دارد که با انتخاب مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مذکور در یک انحنای خاص می‌توان ضریب تمرکز تنش را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. در مورد تنش شکست بهینه نیز می‌توان بیان کرد که در همه گشودگی‌ها مقدار آن با افزایش چیدمان، کاهش می‌یابد.

۵-۲ پیشنهادها

- ۱- تحلیل تنش و بررسی تنش شکست و بهینه‌سازی صفحات چندلایه متقارن کامپوزیتی دارای گشودگی تحت بارگذاری محوری و برشی به صورت هم‌زمان.
- ۲- تحلیل تنش و بررسی تنش شکست و بهینه‌سازی صفحات چندلایه متقارن کامپوزیتی دارای چند گشودگی تحت بارگذاری محوری.
- ۳- تحلیل تنش و بررسی تنش شکست و بهینه‌سازی صفحات چندلایه متقارن کامپوزیتی دارای گشودگی تحت بارگذاری حرارتی و محوری به صورت هم‌زمان.
- ۴- تحلیل تنش و بررسی تنش شکست و بهینه‌سازی صفحات چندلایه متقارن کامپوزیتی دارای گشودگی تحت گشتاورهای خارجی.
- ۸- تحلیل تنش و بررسی تنش شکست و بهینه‌سازی صفحات چندلایه متقارن کامپوزیتی دارای گشودگی تحت بارگذاری داخل گشودگی (پین لود).
- ۹- تحلیل تنش و بررسی تنش شکست و بهینه‌سازی صفحات چندلایه متقارن کامپوزیتی دارای چند گشودگی خارج از محور تقارن صفحه تحت بارگذاری داخل گشودگی (پین لود).

مراجع

- [1] Gao C. Y., Xiao J. Z., Ke Y. L., (2014), "FE analysis of stress concentrations in composite plates with multiple holes for zigzag multi-fastened joints", *Materials Science Forum*, Vol. 770, pp.17-20.
- [2] Campbell F. C., (2011), "*Manufacturing technology for aerospace structural materials*", Elsevier.
- [۳] فصلنامه کامپوزیت، مؤسسه‌ی کامپوزیت ایران، (۱۳۸۷)، شماره‌ی سی و یکم.
- [۴] سید اسفهلان م. (۱۳۸۷)، "کاربردهای الگوریتم‌های تکاملی برای تحلیل مسایل آنتن و مایکروویو" جلد اول، چاپ اول، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد شبستر، شبستر، ص ۱.
- [4] Haupt R. L. and Haupt S. E. (2004), "Practical Genetic Algorithms", Vol. 2, John Wiley & Sons Inc, New York.
- [5] Pedregal P. (2004), "Introduction to Optimization", Springer, New York.
- [6] Vandenberghe S. B. L. (2004), "Convex Optimization", Cambridge University Press.
- [7] Chong E. K. P. and Žak S. H. (2001), "An Introduction to Optimization", John Wiley & Sons Inc, New York.
- [8] Sun W. and Yuan Y. (2006), "Optimization Theory and Methods: Nonlinear Programming", Springer Science Business Media, LLC Press.
- [9] Nocedal J. and Wright S. J. (2006), "Numerical Optimization ", Vol. 2, Springer Science Business Media, LLC Press.
- [۱۰] مطیع قادر ح، ۱۳۸۷، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، کاربرد اتوماتای یادگیر در زمان‌بندی ایستای گراف وظایف بر روی سکوه‌های کاری همگن ناهمگن، دانشکده فنی مهندسی کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد شبستر.
- [11] Muskhelishvili N. I. (1962), "Some Basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity ", Springer, New York.

- [12] Savin G. N. (1961), "Stress Concentration Around Holes", Pergamon Press, New York.
- [13] Eshelby J. D., Read W. T., Shockley W. (1953) "Anisotropic elasticity with applications to dislocation theory", *Acta Metallurgica*, Vol. 1, No. 3, pp. 251–259.
- [14] Stroh A. N. (1958) "Dislocations and cracks in anisotropic elasticity". *Philosophical Magazine*, Vol. 3, No. 30, pp. 625–646.
- [15] Lekhnitskii S. G. (1968) "Anisotropic Plates", Vol 2, Gordon and Breach Science, New York.
- [16] Rezaeepazhand J., Jafari M. (2005) "Stress analysis of perforated composite plates", *Composite Structures*, Vol. 71, No. 4, pp. 463-468.
- [17] Ukadgaonker V. G., Rao D. K. N. (2000) "A general solution for stresses around holes in symmetric laminates under inplane loading", *Composite Structures*, Vol. 49, No. 3, pp. 339–354.
- [18] Asmar G. H., Jabbour T.G. (2007) "Stress analysis of anisotropic plates containing rectangular holes", *International Journal of Mechanics and Solids*, Vol. 2, No. 1, pp. 59-84.
- [19] Rezaeepazhand J., Jafari M. (2010) "Stress analysis of composite plates with quasi-square cut out subjected to uniaxial tension", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 29, No. 13, pp. 2015-2026.
- [20] Dharmendra S. (2011) "Stress Concentration around Circular/Elliptical/Triangular Cutouts in Infinite Composite Plate" Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol. 3 London, U.K.
- [21] Rao D. K. N., Babu M. R., Reddy K.R. N., Sunil D. (2010) "Stress around square and rectangular cutouts in symmetric laminates", *Composite Structures*, Vol. 92, No. 12, pp. 2845-2859.
- [۲۲] جعفری م، مشیری اول ب، (۱۳۹۳)، "تحلیل تنش چندلایه‌های کامپوزیتی متقارن با گشودگی شبه‌مستطیلی تحت بارگذاری درون‌صفحه‌ای"، *ماهنامه‌ی علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس*، دوره ۱۴، شماره ۱۵، صص ۳۹۵-۴۰۴.
- [23] Hufenbach W., Grüber B., Gottwald R., Lepper M., Zhou B. (2013) "An analytical method for the determination of stress and strain concentrations in textile-reinforced GF/PP composites with elliptical cutout and a finite outer boundary and

- its numerical verification”, *Archive of Applied Mechanics*, Vol. 83, No. 1, pp. 125–135
- [24] Sivakumar K., Iyengar N. G. R., Deb K., (1998), "Optimum design of laminated composite plates with cutout using a genetic algorithm", *Composite Structures*, Vol. 42, pp. 265-279.
- [25] Cho H. K., Rowlands R. E., (2007), "Reducing tensile stress concentration in perforated hybrid laminate by genetic algorithm", *Composites Science and Technology*, Vol. 67, pp. 2877–2883.
- [26] Liu Y., Jin F., Li Q. A., (2006), "Strength-based multiple cutout optimization in composite plates using fixed grid finite element method. *Composite Structures*, Vol. 73, pp.403–12.
- [27] Sharma D. S., Patel N. P., Trivedi R. R., (2014), "Optimum design of laminates containing an elliptical hole", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 85, pp. 76–87.
- [28] Callahan J.K., Weeks E.G., (1992), "Optimum design of composite laminates using genetic algorithms", *Composites Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 149-160.
- [29] Muc A., Gurba W., (2001), "Genetic algorithms and finite element analysis in optimization of composite structures", *Composite Structures*, Vol. 54, pp. 275-281.
- [30] Kradinov V., Madenci E., Ambur, D. R., (2007), "Application of genetic algorithm for optimum design of bolted composite lap joints", *Composite Structures*, Vol. 77, pp. 148-159.
- [31] Suresh S., Sujit P. B., Rao A. K., (2007), "Particle swarm optimization approach for multi-objective composite box-beam design", *Composite Structures*, Vol. 81, pp. 598-605.
- [32] Kathiravan R. Ganguli R., (2007), "Strength design of composite beam using gradient and particle swarm optimization", *Composite Structures*, Vol. 81, pp. 471-479.
- [33] Narayana Nai, G., Gopalakrishnan S., Ganguli R., (2008), "Design optimization of composites using genetic algorithms and failure mechanism based failure criterion", *Composite Structures*, Vol. 83, pp. 354-367.
- [34] Almeida F. S., Awruch A. M., (2009), "Design Optimization of composite laminated structures using genetic algorithms and finite element analysis", *Composite Structures*, Vol. 88, pp. 443-454.

- [35] Cho H. K., (2009), "Maximizing structure performances of a sandwich panel with hybrid composite skins using particle swarm optimization algorithm", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, pp. 3143-3152.
- [36] Chang N., Wang W., Yang W., Wang J., (2010), "Ply stacking sequence optimization of composite laminate by permutation discrete particle swarm optimization", *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 41, pp. 179-187.
- [37] Hudson C., Carruthers J., Robinson M., (2010), " Multiple objective optimization of composite sandwich structures for rail vehicle floor panels", *Composite Structures*, Vol. 92, No. 9, pp. 2077-2082.
- [38] Le-Manh T., Lee J., (2014), "Stacking sequence optimization for maximum strengths of laminated composite plates using genetic algorithm and isogeometric analysis", *Composite Structures*, Vol. 116, pp. 357–363.
- [39] Alonso M.G., Duysinx p., (2013), "Particle swarm optimization (PSO): an alternative method for composite optimization", *10th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*, Orlando, Florida, USA, May 19 -24.
- [40] Jianqiao C., Yuanfu T., Rui G., Qunli A., Xiwei G., (2013), "Reliability design optimization of composite structures based on PSO together with FEA, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 26, No. 2, pp. 343-349.
- [41] Chen J., Yuanfu T., Rui G., Qunli A., Xiwei G., (2013), Reliability design optimization of composite tructures based on PSO together with FEA, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 26, No. 2, pp. 343- 349.
- [42] Ines B. C. J., Maria A. R. Loja, (2014), " Design of a laminated composite multi-c structure subjected to torsion", *29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, St. Petersburg, Russia, September 7-12.
- [43] Zhu X., He R., Lu X., Ling X., Zhu L., Liu B., (2015), "A optimization technique for the composite strut using genetic algorithms", *Materials and Design*, Vol. 65, pp.482–8.
- [44] Vosoughi A. R., Gerist S. (2014) "New hybrid FE-PSO-CGAs sensitivity base technique for damage detection of laminated composite beams," *Composite Structures*, Vol. 118, pp. 68–73.

[۴۵] محمودزاده حسینی الف، (۱۳۹۴)، پایان نامه کارشناسی ارشد، بهینه‌سازی صفحات همسانگرد و ناهمسانگرد نامحدود حاوی گشودگی‌های منتظم با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[46] Hwu C. (1990) "Anisotropic plates with various openings under uniform loading or pure bending", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 57, No. 3, pp. 700-706.

[47] Jones R. M. (1999), "*Mechanics of Composite Materials*", second edition, Taylor & Francis.

[48] Aurtar K. Kaw. (2006), "*Mechanics of Composite Materials*", second edition, Taylor & Francis.

[۴۹] یقینی م، اخوان کاظم زاده م. ر، "*الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری*" جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیر کبیر

[50] Talbi, El-Ghazal, (2009), "*Metaheuristics: From Design to Impelementation*", John Wiley & sons.

[51] Kennedy J., Eberhart R., (1995), "Particle Swarm Optimization, *Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks*", USA, Vol. 5, pp. 1942-1948.

[52] Beni G., Wang J., (1989), "Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems", *Proceed. NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems*, Tuscany, Italy, June, pp.26–30.

[53] Siarry P., (2006) "*Metaheuristics for Hard Optimizations*", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

[54] Bullnheimer B., Hartel R., Strauss C., (1997) "An improved ant system algorithm for the vehicle routing problem", Technical Report, University of Vienna.

[55] Rezaee Jordehi A., Jasni J., (2013) "Parameter selection in particle swarm optimization: a survey", *Taylor and Francis*, Vol. 25, No. 4, pp. 527-542.

[56] Clerc M., Kennedy J., (2002) "The Particle Swarm: Explosion, Stability and Convergence in multi-dimensional complex space", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol 20, No. 6, pp. 58-73.

- [57] Ratnaweera A., Halgamuge S. K., Watson H., (2004), "Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol.8, No.3, pp. 240-255.
- [58] Venter G., Haftka R.T., Sobieszczanski-Sobieski J., (2002), "Multidisciplinary Optimization of a Transport Aircraft Wing using Particle Swarm Optimization", *In Ninth AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization*.

Abstract

In this thesis an attempt has been tried to consider the effective parameters on the stress distribution around a regular polygon hole in symmetric laminated composite plates by particle swarm optimization (PSO) to introduce the optimum parameters to achieve the lowest value of stress around the hole. Design variables include the geometry of cutout, bluntness, rotation angle of cutout, fiber angle, load angle and material properties in symmetric laminated plates. The finite element method has been used to verify the accuracy of analytical results. Comparison of two methods demonstrates the accuracy of present analytical solution. In this study, an analytical method is used to calculate the stress components around of various shape hole. According to this method using conformal mapping, the development of Lekhnitskii method that was just for the circular and elliptical hole was used the other holes.

The results presented in this study show that by selecting appropriate shape of hole and optimal parameters related to perforated symmetric laminated plates, stress concentration factor can be significantly reduced and even achieved to less stress concentration factor from stress concentration caused by a circular cutout.

Keywords: Particle swarm optimization (PSO), Complex variable method, Normalized stress, Failure strength.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical & Mechatronics Engineering
MSc thesis Mechanical Engineering Applied Mechanics

**Determining optimum parameters to minimize stress concentration
around regular holes in symmetric laminates by PSO algorithm**

By:
Seyyed Hassan Moussavian

Supervisor:
Dr. Mohammad Jafari

September 2016