دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه طراحی کاربردی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

بهینه‌سازی صفحات همسانگرد و ناهمسانگرد نامحدود حاوی گشودگی‌های منتظم با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرّات

سید احمد محمودزاده حسینی

استاد راهنما:

دکتر محمّد جعفری

دی ۱۳۹۴

بسم الله الرحمن الرحیم

شماره:
تاریخ:
ویرایش:

بسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۶: صورتجلسه دفاع از پایان نامه تحصیلی 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 احمد محمودزاده حسینی**...... به شماره دانشجویی...**۹۲۱۲۸۱۴**..... .رشته ...**مکانیـک**.... گرایش ...**طراحی کاربردی**.... تحت عنوان ...... **بهینه‌سازی صفحات همسانگرد و ناهمسانگرد نامحدود حاوی گشودگی‌های منتظم با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرّات**.... که در تاریخ ...... **۹۴/۱۰/۲۰**...... با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه : عالی امتیاز ۱۹٫۷۵) ☑	دفاع مجدد ☐	مردود ☐

۱ـ عالی (۲۰ ـ ۱۹)
۲ـ بسیار خوب (۱۸/۹۹ ـ ۱۸)
۳ـ خوب (۱۷/۹۹ ـ۱۶)
۴ـ قابل قبول (۱۵/۹۹ ـ ۱۴)
۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱ـ استادراهنمای اول	دکتر محمد جعفری	استادیار	
۲- استادراهنمای دوم			
۳- استاد مشاور			
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر علیرضا شاطرزاده	استادیار	شاطرزاده
۵- استاد ممتحن اول	دکتر سید وحید حسینی	استادیار	حسینی
۶ـ استاد ممتحن دوم	دکتر محمدباقر نظری	استادیار	محمدباقر

رئیس دانشکده: شاهمرادی

تأیید رئیس دانشکده

گروه [طرّاحی کاربردی]

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد [آقای/خانم نام و نام خانوادگی دانشجو]

تحت عنوان:

[عنوان پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد]

در تاریخ .... توسط کمیته‌ی تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

مورد ارزیابی و با درجه‌ی .... مورد پذیرش قرار گرفت.

اساتید راهنما	امضاء	اساتید مشاور	امضاء
نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی:	
نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی:	

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

تقدیم

تقدیم به پدر بزرگوار و مادر و همسر مهربانم

تشکر و قدردانی

خداوند بزرگ و مهربان را شـاکرم که توفیق کسب علم و دانش را به من عطا فرمود، تا بتوانم این مرحلّه از علم آموزی را با موفّقیّت به پایان برســـانم. از همســـر و خانواده‌ی عزیزم به خاطر محبّت‌های بی‌منّت وحمایت‌های بی‌دریغشـــان در تمامی مراحلّ زندگی‌ام، کمال تشکّر و سپاس را دارم. از استاد ارجمندم، جناب آقای دکتر محمّد جعفری به خاطر راهنمایی‌های ارزشمندشان در کلّیه‌ی مراحل انجام پایان‌نامه تقدیر و تشکر می‌نمایم.

تعهدنامه

اینجانب [نام و نام خانوادگی دانشجو] دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی [مهندسی مکانیک-گرایش طرّاحی کاربردی] دانشکده‌ی [مهندسی مکانیک] دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده‌ی پایان‌نامه‌ی [عنوان پایان‌نامه]، تحت راهنمایی [نام استاد راهنما] متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلّیه حقوق معنوی این اثر متعلّق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به‌دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلّیه مراحلّ انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلّیه‌ی مراحلّ انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه‌ی 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

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

چکیده

در این پایان‌نامه ســعی شــده اســت، تا با در نظر گرفتن پارامترهای موثّر بر توزیع تنش اطراف گشــودگی‌های چندضــلعی منتظم در صــفحات همســانگرد و ارتوتروپیک نامحدود، از روش الگوریتم اجتماع ذرات (PSO)، پارامترهای بهینه جهت دســتیابی به کمترین مقدار تنش در اطراف گشــودگی معرفی شــود. این پارامترها شــامل: هندســه‌ی گشــودگی، شــعاع انحنای گوشــه‌ی گشــودگی، زاویه‌ی چرخش گشــودگی، زاویه‌ی الیاف، زاویه‌ی بار و خواص مکانیکی در مواد ارتوتروپیک می‌باشــند. برای بررســی نتایج حاصــل از حلّ حاضــر، از حل عددی اجزای محدود استفاده شده است. همپوشانی نتایج حاصل از دو روش، صحت حلّ مطالب ارائه شده را تأیید می‌کند.

در مطالعه‌ی حاضــر از روشــی تحلیلی برای محاســبه‌ی تنش در اطراف گشــودگی‌های مختلف اســتفاده شــده اســت. مطابق این روش، از بســط روش حلّ لخنیتســکی که فقط برای گشــودگی‌های دایروی و بیضــوی بود، با اســتفاده از نگاشــت همنوا و متغیّر مختلط به سایر گشودگی‌ها تعمیم یافت. نتایج ارائه شــده در این باره نشــان می‌دهد که با انتخاب شکل مناسب گشودگی و انتخاب پارامترهای بهینه‌ی مربوط به آن در صفحات همسانگرد و ارتوتروپیک می‌توان ضریب تمرکز تنش صفحات دارای گشودگی را به میزان قابل توجهی کاهش داد و حتی در مواردی به ضریب تمرکز تنشی کمتر از تمرکز تنش ناشــی از گشــودگی دایره‌ای دســت یافت. به عبارتی برخلاف انتظار همواره گشــودگی دایروی بهترین هندسه برای کاهش تمرکز تنش نیست و در مواردی با انتخاب انحنا، زاویه‌ی چرخش و زاویه‌ی الیاف مناســب برای یک صفحه‌ی حاوی گشودگی می‌توان تمرکز تنش کمتری در مقایسه با گشودگی دایروی داشت.

واژگــان کلیدی: الگوریتم اجتماع ذرات، حلّ تحلیلی، گشــــودگی چند ضــــلعی منتظم، صــــفحات همسانگرد و ارتوتروپیک نامحدود

مقالات

۱-بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر صفحات همسانگرد حاوی گشودگی‌های چندضلعی منتظم با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات (چاپ شده ، ***ماهنامه‌ی علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرّس***)

مطالب

اشکال

جداول

علائم

a_0	ثابت حقیقی مربوط به رابطه‌ی شوارتز
a_j	ثابت مختلط مربوط به ریشه‌های معادله‌ی مشخّصه
s_i	ریشه‌های معادله‌ی مشخّصه
F_1 و F_2	توابع تحلیلی
ζ	متغیّر مختلط
z_i	تابع نگاشت
γ_{yz} و γ_{xz} و γ_{xy}	کرنش‌های برشی
ε_y و ε_x	کرنش‌های طولی
θ	زاویه‌ی پیرامون گشودگی
λ	پارامتر تعیین‌کننده‌ی اندازه‌ی گشودگی
ϑ_{21} و ϑ_{12}	ضریب پواسون
π	عدد پی (۳/۱۴۱۵۹۳)
ρ	شعاع دایره
σ_y و σ_x	تنش صفحه‌ای
τ_{xy}	تنش برشی صفحه‌ای
β	زاویه‌ی چرخش
γ	زاویه‌ی الیاف
α	زاویه‌ی بار
$[C]$	ماتریس سفتی
$[S]$	ماتریس نرمی
a_{ij}	اعضای ماتریس نرمی کاهش یافته
$U(x,y)$	تابع تنش
$\bar{Q}_{ij}$	ماتریس سفتی کاهش‌یافته
Re	بخش حقیقی
R_0 تا R_5	ثوابت معادله‌ی مشخّصه
C.F.	تابع هزینه مربوط به الگوریتم PSO (تنش بی بعد در اطراف گشودگی)
$V_i(t+1)$	سرعت ذره در تکرار جدید

$X_i(t+1)$	موقعیت ذره در تکرار جدید
$V_i(t)$	سرعت کنونی ذره
$X_i(t)$	موقعیت کنونی ذره
r_1 و r_2	اعداد تصادفی بین بازه‌ی صفر و یک
p_i	بهترین عملکرد خود ذره
p_g	بهترین موقعیت پیش آمده در میان همه‌ی ذرات
ω	ضریب اینرسی
c_1	ضریب یادگیری شخصی (پارامتر ادراکی)
c_2	ضریب یادگیری جمعی (پارامتر اجتماعی)
c	اندازه‌ی گام تصادفی
$\bar{p}_k$	جهت جستجوی تصادفی
$\bar{\xi}$	ضریب مربوط به حالت دینامیکی ضریب وزنی
iter	شماره تکرار فعلی ذره
maxiter	شماره‌ی بیشترین تکرار مجاز

فصل ۱:   مقدّمه

۱-۱ مقدمه

امروزه، در طراحی، ساخت و نگهداری هر سیستم مهندسی، مهندسان باید تصمیمات مدیریتی و فنّی متعددی را در مراحل مختلف اتّخاذ کنند. هدف نهایی چنین تصمیماتی، کمینه‌کردن انرژی لازم در عین بدست آوردن بیشترین سود ممکن خواهد بود. میزان تلاش لازم یا سود مورد نظر در هر وضعیت علمی را می‌توان به صورت تابعی از متغیّرهای تصمیم‌گیری (طراحی) مشخص بیان کرد. بنابراین، می‌توان بهینه‌سازی را به عنوان فرآیند یافتن شرایطی که مقدار بیشینه یا کمینه‌ی یک تابع را به دست می‌آورد، تعریف نمود. اهمیّت 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، به‌جای اینکه مبنای طراحی، هزینه‌ی آن باشد، وزن سازه هدف بهینه‌سازی خواهد بود. اما در دیگر صنایع مربوط به علوم مهندسی، همچون ساختمان، مکانیک 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 نمودن مواد خام و کمبود منابع انرژی از جمله عواملی است که طراحان را به سوی طراحی سازه‌های سبک، ارزان قیمت و در عین حال کارا، وادار می‌سازد. با توجه به این موضوع، ضرورت آگاهی مهندسان از سیستم‌های بهینه‌سازی سازه‌ها و به کار بردن آن‌ها در هنگام طراحی و ساخت روشن خواهد بود.

همانطور که بیان شد، صفحات به دلیل کاربرد وسیع در صنایع مختلف از اهمیت بسیاری برخوردار هستند؛ مواقعی پیش می‌آید که طراح ناچار به ایجاد گشودگی یا سوراخ در سازه است. گشودگی با اشکال مختلف در سازه‌ها برای ارضای نیازهای طراحی به‌وجود می‌آیند. این گشودگی‌ها در بالا بردن تنش‌ها و به‌وجود آوردن شکست‌های فاجعه‌بار مؤثرند. سبک‌سازی وسایل نقلیه با هدف کاهش وزن که منجر به کاهش مصرف سوخت و استفاده از موتورهایی با توان کمتر خواهد شد، انجام می‌شود. ایجاد راه برای دسترسی به تجهیزات و تعمیر آن‌ها، عبور شیلنگ‌های هیدرولیک و عبور کابل‌های برق از جمله دلایل دیگر ایجاد گشودگی‌ها هستند. دیده شده است که در یک هواپیمای جنگی حدود ۴۰۰-۲۵۰ هزار و در یک هواپیمای باری حدود ۲-۱ میلیون سوراخ وجود دارد [۱].

طرّاحان در این موارد برای اســتفاده از کامپوزیت‌ها دچار مشــکل هســتند. بخش عظیمی از ضــوابط شــکست درباره‌ی سازه‌های کامپوزیتی برگرفته از نتایج تجربی است و برای آنالیز شکست این سازه‌ها یک ضـابطه‌ی کلّی وجود ندارد. گشـودگی‌های ایجاد شـده در ساختارها باعث کاهش مقاومت سازه و حتی منجر به شـکسـت سـازه از این نواحی می‌شـوند. لذا به منظور پیش‌بینی رفتار سـازه در حضـور گشـودگی‌ها و ایجاد اطمینان در طرّاحی، بهینه‌سازی این صفحات به منظور کاهش تمرکز تنش امری ضروری به نظر می‌رسد.

ضـریب تمرکز تنش (SCF) ، k_t ، به‌عنوان نسبت ماکزیمم تنش، با وجود سوراخ یا ترک به تنش در همان نقطه بدون وجود گشـودگی تعریف می‌شـود. تجربه نشان داده است که تنش واقعی شکست برای صفحات حاوی گشودگی، اساساً کمتر از استحکام کشش نهایی همان ماده بدون گشودگی است؛ بنابراین برای طراحی دقیق صـفحات حاوی گشودگی دانستن اطلاعات دقیق در مورد تغییر شکل‌ها و توزیع تنش‌ها ضروری است. تمرکز تنش اهمیت ویژه‌ای در ارزیابی قابلیت اطمینان سازه‌های مهندسی دارد. دیده شـده اسـت که ۸۰ درصـد شـکسـت‌های انجام‌شـده در سازه‌های هوایی از محلّ بست‌ها و اتصـالات که تمرکز تنش در آن‌ها اتفاق افتاده روی داده اسـت[۲]. در تحلیل صفحات نامحدود حاوی گشــودگی، هندســه‌ی گشــودگی، شــعاع انحنای گوشــه‌ی گشــودگی، جهت‌گیری(زاویه‌ی چرخش) گشــودگی، زاویه‌ی الیاف و زاویه‌ی بار و خواص مکانیکی در صــفحات ارتوتروپیک از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر میزان تمرکز تنش در اطراف گشــودگی می‌باشــند؛ به گونه‌ای که با انتخاب صـحیح آن‌ها می‌توان تمرکز تنش را به میزان قابل توجّهی کاهش داد. در این پایان نامه، با توجّه به ضــــرورت‌های ذکر شــده، سـعی شــده است تا با استفاده از الگوریتم PSO تأثیر پارامترهای مختلف، به طور کامل بر روی توزیع تنش اطراف گشودگی بررسی شده و در نهایت پارامترهای بهینه جهت دستیابی به کمترین مقدار تابع هزینه[۱] (C.F.) معرفی گردد. لازم به ذکر اســت که در این تحقیق کمینه‌کردن مقدار تنش

[۱] Cost Function

بی‌بعد در اطراف گشـــودگی به عنوان تابع هزینه درنظر گرفته شـــده اســـت. تنش بی‌بعد به صـــورت بیشترین تنش ایجاد شده در اطراف گشودگی به تنش اعمالی تعریف می‌شود.

۱-۲ تبیین پیچیدگی بهینه‌سازی کامپوزیت‌ها

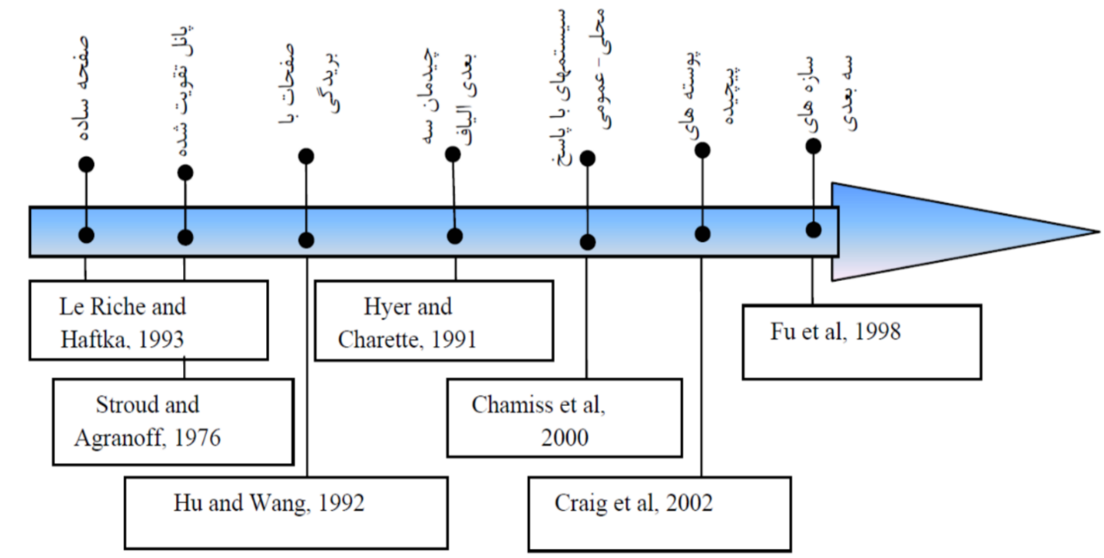
مهمترین دغدغه‌ی طراح در مورد حلّ مسـائل بهینه‌سـازی سـازه‌ها به‌ویژه سـازه‌های کامپوزیتی، تبیین محدوده‌ی پیچیدگی[۱] می‌باشد. بر همین اساس و برای آشکارسازی نوع پیچیدگی، مسائل بر سه محور عمده قابل طرح هستند[۳].

- ✓ پیچیدگی مدل
- ✓ پیچیدگی تحلیل
- ✓ پیچیدگی بهینه‌سازی

۱-۲-۱ پیچیدگی مدل

در مورد کامپوزیت‌ها، به سـه دسته‌ی کلّی از مسائل طرح شده بر حسب پیچیدگی مدل می‌توان اشـاره نمود. مسـائلی که شـامل تک‌لایه‌ها و چندلایه‌ها می‌شـود، مسـائلی که راجع به انواع پانل‌های تقویت شده بحث می‌کند و در نهایت مسائلی که به مخازن، بال‌ها، خودروها و شاتل‌ها می‌پردازد. شکل ۱-۱ شمایی کلی از مدل‌های قابل طرح را ارائه می‌نماید.

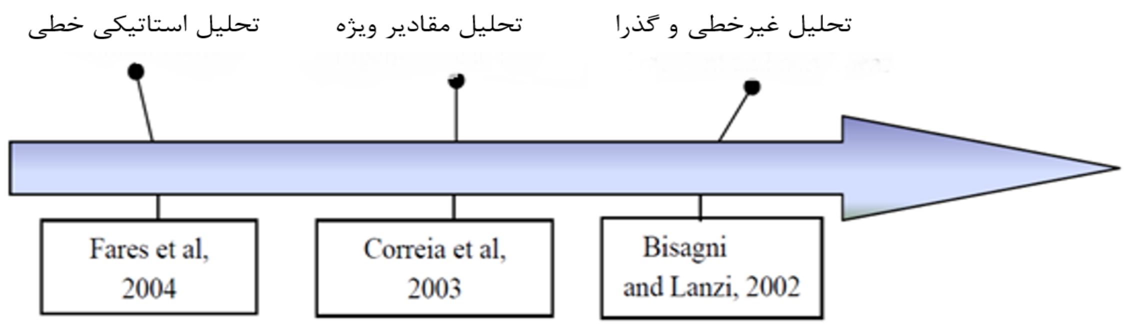
[2] Complexity



شکل ۱-۱ دسته‌بندی مدل‌های معمول کامپوزیتی بر اساس مقدار پیچیدگی [۳]

۱-۲-۲ پیچیدگی تحلیل

یکی دیگر از اضلاع سه‌گانه‌ی ساختارشناسی بررسی پیچیدگی مسأله‌ی بهینه‌سازی سازه‌های کامپوزیتی، مبحث پیچیدگی‌های تحلیل می‌باشد. و همان‌طور که در شکل ۱-۲ می‌توان دید سه محور عمده قابل بررسی هستند که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد.



شکل ۱-۲ دسته‌بندی آنالیز سازه‌های کامپوزیتی بر حسب پیچیدگی [۳]

اولین گروه، تحلیل‌های استاتیکی خطی شامل تنش‌ها و خیزها هستند که به همین دلیل موضوع عمده‌ی مقالات سال‌های دورتر را شامل می‌شوند. مقالات خوت و همکارش [۴] و گوردال و هفتکه [۵] دو نمونه از آثار قدیمی‌تر و پروشازکا [۶]، مارتین [۷] و فارس و همکارانش [۸] از نمونه‌های اخیر می‌باشند. گروه دوم از تحلیل‌ها که در جایگاه متوسطی از پیچیدگی جای دارند مربوط به تحلیل کمانش و مدهای طبیعی سیستم می‌شود. تحقیقات مسکیتا و کمت [۹] در دهه ۸۰ و کوریا و

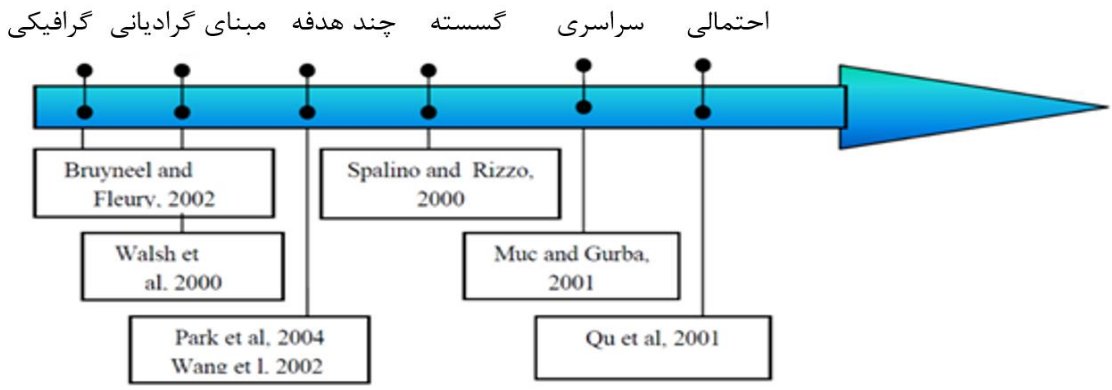
همکارانش در سـال ۲۰۰۳ [۱۰] از جمله مقالات متعدد چاپ شـده در این زمینه هستند. تحلیل‌های حالت گذرا و تحلیل‌های غیرخطی از جمله پس‌کمانش، برخورد و نیز توسعه‌ی ترک در بالاترین سطح پیچیـدگی جـای می‌گیرنـد. چنین تحلیل‌هایی نیازمند تکرارهای متوالی از برآوردهای نموی پاسـخ هسـتند و هزینه‌ی چنین تحلیل‌هایی به زمان و گام بار اعمالی و نیز حداکثر زمانی که جواب‌ها تا آن دوره مد نظر هسـتند بسـتگی دارد. بیزانی و لانزی [۱۱] به کمک شـبکه‌های عصـبی، بهینه‌سـازی محدوده‌ی پس‌کمانشـی پانل‌های تقویت شـده را مورد بررسـی قرار داده و به کاهش وزنی حدود ۱۸ درصـد دسـت یافتند. آن‌ها کد نوشـته شده با MATLAB را با نرم افزار ABAQUS همراه کردند و در پروسه‌ی خود از GA نیز سود جستند [۳].

۱-۲-۳ پیچیدگی بهینه‌سازی

شکل ۱-۳ سطوح مختلف پیچیدگی بهینه‌سازی که سومین و آخرین بعد تحلیل پیچیدگی می‌باشد را به تصویر می‌کشد. ابتدایی‌ترین سطح، بهینه‌سازی نقطه‌ای چیدمان لایه‌ها بر اساس پارامترهای گرافیکی لایه‌ای سازه (عبارت کششی و خمشی که انتگرال خواص تک‌لایه‌ها هستند) می‌باشد که در این حیطه و به‌ویژه در سال‌های دورتر مقالات متعددی به چاپ رسیده است. سطح بعدی، بهینه‌سازی محلّی مبتنی بر روش‌های شیب[۱] می‌باشد که باز هم به‌ویژه در دهه‌ی هفتاد و هشتاد بیشتر به آن‌ها پرداخته شده است. به عنوان مثال در مقاله‌ی اشمیت و فرشی [۱۲] از این روش استفاده شده است. بهینه‌سازی چندهدفه رده‌ی بعدی این ساختار را تشکیل می‌دهد. در دو سطح بعدی، بهینه‌سازی پارامترهای ناپیوسته و بهینه‌سازی کلی[۲] قرار دارند. بهینه‌سازی پارامترهای ناپیوسته اغلب با ورود پارامتر ضخامت لایه‌ها و در مسائل کاربردی‌تر زاویه‌ی الیاف پدیدار می‌گردد و مسأله را به حالت ترکیبی وارد می‌کند. نمونه قابل توجهی از این مسائل، مسائل اسپالینو و ریتزو [۱۳] است [۳].

[۱] Gradient based

[۲] Global



شکل ۱-۳ دسته بندی سطوح بهینه‌سازی بر حسب پیچیدگی [۳]

۱-۳ رهیافت حلّ به کمک رایانه

یکی از جنبه‌های مهم بررسی مسائل بهینه‌سازی سازه‌ها به‌خصوص در مورد صفحات کامپوزیتی که امکان حلّ دستی برای ساده‌ترین مدل‌های آن تقریباً نیز وجود ندارد؛ شناخت روش‌های مختلف تعامل کاربر به عنوان طراح مسأله و رایانه به عنوان ماشین حل‌کننده‌ی آن می‌باشد. در این رهگذر و با توجه به توضیحاتی که در مورد سطوح مختلف پیچیدگی مسائل گذشت، سه رهیافت کلی قابل تمیز از یکدیگر هستند.

۱-۳-۱ کد نویسی مستقیم

در تعداد قابل توجهی از مقالات به واسطه‌ی نبود و یا عمومی نشدن نرم‌افزارهای تجاری تحلیل و بهینه‌سازی، محقق به کمک یکی از زبان‌های مناسب نظیر C^{++}، FORTRAN و یا حتی زبان سطح بالایی چون MATLAB کدی را می‌نویسد. که به طور کامل تبیین وضعیت هندسی تحلیل مدل و راهکار بهینه‌سازی را شامل می‌گردد. بی‌تردید عمده‌ی کاربرد چنین استراتژی در مورد سیستم‌های با پیچیدگی بهینه‌سازی متوسط و با ساختار هندسی ساده و کلاسیک می‌باشد. چنین روشی برای تعیین قابلیت الگوریتم‌های جدید، بهترین روش محسوب می‌شود. مقاله‌ی لی و دیگران [۱۴] نمونه‌ی جدیدی از این رهیافت است.

۱-۳-۲ ادغام کدنویسی و روش‌های FEM

در مورد سیستم‌های با پیچیدگی بهینه‌سازی متوسط و با ساختار هندسی ساده تا نسبتاً پیچیده، مناسب‌ترین استراتژی، استفاده‌ی ترکیبی از نرم‌افزارهای تجاری اجزای محدود و کد رایانه‌ای است. نرم‌افزار اجزای محدود، نقش تحلیلگر و نیز عامل نشان‌دهنده‌ی گرافیکی پارامترها، قبل و بعد از پروسه‌ی تحلیل و بهینه‌سازی را به عهده دارد و توسط رابطی نرم‌افزاری به هسته‌ی حلّگر بهینه‌ساز که کدی خاص و مناسب همان مسأله و یا کدی عمومی، شامل یک یا چند روش کلی بهینه‌سازی می‌باشد متصل می‌گردد. از جمله مقالات در این موضوع می‌توان به مقاله‌ی ماک و گوربا [۱۵] اشاره کرد که کد الگوریتم ژنتیک با نرم افزار NISA ارتباط داده شده است.

۱-۳-۳ استفاده از نرم‌افزارهای بهینه‌سازی خاص

در برخورد با سیستم‌های با ابعاد بزرگ، مشکل همیشگی، تعداد بسیار زیاد پارامترهای تحلیل و بهینه‌سازی است. با این توضیح باید گفت روش کدنویسی مستقیم به‌دلیل سخت بودن امکان تعریف مسأله و کنترل فرآیند تعریف، تحلیل و بهینه‌سازی در ابعاد بزرگ و روش ترکیبی به‌دلیل لزوم تحلیل سیستمی پیچیده و به دفعات مکرّر، کارایی خود را از دست می‌دهند. نرم‌افزارهای بهینه‌سازی - تحلیلی خاصی همچون Genesis، Optisttruct[۱] و Hypersizer[۲] تنها گزینه‌ی قابل اعتنا محسوب می‌شوند. باید توجه داشت این نرم‌افزارها متفاوت از انواع نرم‌افزارهای عمومی بهینه‌سازی کار می‌کنند. نرم افزارهای عمومی از حدود دهه‌ی شصت به بعد به‌صورت مجموعه‌ای از کدها ارائه شدند و توانایی اغلب آن‌ها حلّ مسائل عمومی پژوهش عملیاتی[۳] است. اما آنچه در این بخش مد نظر است نرم‌افزارهای ویژه‌ای هستند که شامل هسته‌ای بهینه‌ساز با توانایی ویژه در حلّ مسائل پیچیده با حداقل تکرار می‌باشند. فضای ارتباطی گرافیکی برای تعریف هندسه‌ی مسأله، نحوه‌ی اعمال قیود و

---

۱ Optistruct Ver.7, Altair Engineering Inc.

۲ Hypersizer Pro, Collier R&D Co.

۳ Operation Research

بارها و نیز نمایش خروجی از شاخصه‌های دیگر آن‌ها است. همچنین امکان تعریف متغیّرهای بسیار زیاد از توانایی آن‌ها محسوب می‌شود.

۱-۴ مروری برکارهای انجام‌شده

در این بخش سعی می‌شود تا در ابتدا به بررسی تحقیقاتی که در زمینه‌ی صفحات حاوی گشودگی انجام شده، پرداخته شود؛ در هر کدام از این کارها هندسه‌ی گشودگی، نوع بارگذاری، خواص مکانیکی مواد استفاده شده و روش حلّ، متفاوت است. بخش دوم شامل مسائل مربوط به بهینه‌سازی سازه‌ها با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمند می‌باشد.

تحقیق در مورد صفحات همسانگرد حاوی گشودگی با روش توابع پتانسیل مختلط و بر پایه‌ی تئوری الاستیک دوبعدی، برای اولین بار توسط موسخلیشیویلی[۱] [۱۶] انجام شد. وی با توسعه‌ی این روش و به کمک یک تابع نگاشت همنوا توانست توزیع تنش در اطراف گشودگی‌های دایره‌ای شکل و ترک را محاسبه نماید. ساوین[۲] [۱۷] با در نظر گرفتن نتایج موسخلیشیویلی، تحقیقات گسترده‌ای بر روی صفحات همسانگرد نامحدودِ حاوی گشودگی‌های مختلف انجام داد. وی همچنین برای ورق غیرهمسانگرد حاوی گشودگی بیضوی و دایره‌ای، مطالعاتی انجام داد. او ناحیه‌ی نامحدود اطراف گشودگی در صفحه‌ی z را با استفاده از تابع نگاشت شوارتز-کریستوفل به ناحیه‌ی داخل دایره‌ای به شعاع واحد نگاشت کرد و با استفاده از انتگرال کوشی توابع تنش را محاسبه نمود. نکته‌ای که در مورد تحقیقات ساوین و بیشتر پژوهشگرانی که در زمینه‌ی تحلیل تنش صفحات حاوی یک گشودگی مشهود می‌باشد؛ استفاده از روش تابع پتانسیل مختلط موسخلیشیویلی و در موارد بسیاری استفاده از روابط کوشی در انتگرال‌گیری توابع مختلط است. توسعه‌ی کامل روش موسخلیشیویلی به مسائل الاستیسته‌ی دوبعدی مواد همسانگرد و غیرهمسانگرد توسط لخنتیسکی[۳] [۱۸] انجام شد. وی تئوری خود را برای

[۱] Muskhelishvili

[۲] Savin

[۳] Lekhnitskii

حلّ عمومی صفحات ناهمسانگرد نامحدود با گشودگی دایروی در اندازه‌های مختلف و برای انواع بارگذاری‌ها ارائه داد. او در ابتدا برای ساده‌سازی، فرمولاسیون خود را برای صفحات ارتوتروپیک که دارای سه صفحه‌ی تقارن مادی عمود بر هم هستند، بیان کرد. هوو[1] [۱۹] میدان تنش در اطراف گشودگی‌های با اشکال مختلف در یک صفحه‌ی الاستیک غیرهمسانگرد تحت بارگذاری در بی‌نهایت را مورد مطالعه قرار داد. توزیع تنش اطراف گشودگی مثلثی در یک صفحه‌ی غیرهمسانگرد با استفاده از روش پتانسیل مختلط توسط دائوست[2] [۲۰] و همکارش ارائه شد؛ اهمیت کار آن‌ها تابع نگاشتی بود که در نظر گرفتند. تابع نگاشت آن‌ها قادر بود مثلث‌هایی با نسبت قاعده به ارتفاع مختلف را به دایره‌ای به شعاع واحد بنگارد. در تحقیق آن‌ها تأثیر شعاع انحنای گوشه‌ی گشودگی نیز مورد مطالعه قرار گرفت. حلّ آن‌ها برای یک صفحه‌ی تک‌لایه با زاویه‌ی الیاف صفر درجه بود. یوکادگائونکر[3] و رائو[4] [۲۱] به تحلیل تنش صفحات همسانگرد و چندلایه‌های متقارن کامپوزیتی حاوی گشودگی پرداختند. آن‌ها بر پایه‌ی روش متغیّر مختلط ساوین، توزیع تنش اطراف گشودگی‌ها با اشکال هندسی مختلف را محاسبه نمودند. نتایج این تحقیق برای بارگذاری درون‌صفحه‌ای ارائه شده است. از پارامترهای موردبررسی توسط آن‌ها انحنای گشودگی و زاویه‌ی الیاف بود. یانگ و همکارانش [۲۲] حلّی عمومی برای محاسبه‌ی تنش یک صفحه‌ی بی‌نهایت حاوی گشودگی ارائه دادند. آن‌ها با استفاده از روش اجزای محدود، معادلات جابه‌جایی را برای این مسأله محاسبه نمودند و با کمک این معادلات مقادیر تمرکز تنش را به‌دست آوردند. رضایی پژند و جعفری [۲۳و۲۴] بر اساس روابط متغیّر مختلط ساوین و لختنیسکی، مطالعاتی بر روی صفحات همسانگرد و غیرهمسانگرد انجام دادند. آن‌ها حلّی تحلیلی برای صفحات حاوی گشودگی‌های مختلف ارائه دادند. تأثیر پارامترهای مختلف از قبیل زاویه‌ی بار، زاویه‌ی الیاف و زاویه‌ی چرخش گشودگی در این تحقیقات مورد بررسی قرار گرفته است. رائو و همکارانش [۲۵] بر مبنای توابع

[1] Hwu
[2] Daoust
[3] Ukadgaonker
[4] Rao

پتانسیل ساوین، روابطی برای تحلیل تنش صفحات همسانگرد و غیرهمسانگرد حاوی گشودگی مستطیلی ارائه دادند. آن‌ها همچنین در مورد استحکام شکست صفحات بر اساس معیارهای تسای هیل[۱] و تسای وو[۲] تحقیق نمودند. در این مطالعه توابع تنش به کمک یک تابع نگاشت عمومی به‌دست آمده است. باتیستا[۳] [۲۶] با اصلاح روش متغیّر مختلط موسخلیشیویلی، توزیع تنش حول گشودگی‌های چندضلعی با هندسه‌های پیچیده درصفحات نامحدود را محاسبه نمود. وی در این تحقیق با ذکر چندین مثال برای گشودگی‌هایی با شکل‌های خاص و مقایسه‌ی آن‌ها با نتایج عددی، حلّ خود را مورد بررسی قرار داد. در این مطالعه از تابع نگاشت شوارتز-کریستوفل برای نگاشت گشودگی‌ها به خارج دایره‌ی واحد استفاده شده است. شارما[۴] [۲۷و۲۸] با محاسبه‌ی دو تابع تنش توانست تمرکز تنش را حول یک گشودگی دایره‌ای، مثلثی و بیضی محاسبه نماید. مطالعات وی در مورد صفحه‌ای تحت تنش‌های دومحوره در مرزهای بی‌نهایت انجام شده است. او با بررسی پارامترهای مختلف همچون زاویه‌ی الیاف، زاویه‌ی بارگذاری و ابعاد گشودگی، نحوه‌ی تغییر تمرکز تنش را مورد بررسی قرار داد. وی همچنین تمرکز تنش را برای صفحات حاوی گشودگی‌های مختلف از جمله هفت‌ضلعی، هشت‌ضلعی و نه‌ضلعی در صفحه‌ی همسانگرد به‌دست آورد. بنرجی[۵] و همکارانش [۲۹] با استفاده از روش عددی، توزیع تنش اطراف گشودگی دایروی در صفحات همسانگرد و اورتوتروپیک را تحت بارگذاری عرضی مطالعه کردند. آن‌ها تأثیر ضخامت صفحه و قطر گشودگی و جنس مواد را در صفحات اورتوتروپیک، بر میزان تمرکز تنش مورد بررسی قرار دادند. جعفری و اردلانی [۳۰] توزیع تنش اطراف گشودگی مثلثی، در ورق همسانگرد محدود تحت بارگذاری درون صفحه‌ای را مطالعه کردند. آن‌ها روش خود را بر پایه‌ی حلّ تحلیلی متغیّر مختلط موسخیلشویلی و نگاشت همنوا با فرض تنش صفحه‌ای ارائه دادند. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق شامل انحنای گوشه‌های گشودگی، نسبت اضلاع ورق، نسبت اندازه‌ی

[۱] Tsai-Hill
[۲] Tsai-Wu
[۳] Batista
[۴] Sharma
[۵] Banerjee

گشودگی به ورق، زاویه چرخش گشودگی و نوع بارگذاری می باشد. جعفری و مشیری اول [۳۱] با توسعه‌ی روش حلّ لختینسکی، از روش متغیّر مختلط توزیع تنش اطراف گشودگی چهارضلعی در چندلایه‌های متقارن کامپوزیتی را مورد بررسی قرار دادند.

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 روش-های بهینه‌سازی برای حلّ یک مسأله وجود دارد، انتخاب روش مناسب بستگی به نوع و شرایط تعریف (شامل قیود، تعداد متغیّرها، 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 درمسائل 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 آقای سیواکومار و همکارانش[۳۲] 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 و رونالدز [۳۳] توانایی الگوریتم ژنتیک را در کمینه‌سازی تمرکزتنش در چندلایه‌های کامپوزیتی حاوی گشودگی نشان دادند. در این تحقیق از 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 مقاله‌ی

فوق دســـتیابی به مقادیر بهینه پارامترهای طراحی برای رســـیدن به کمترین تنش ممکن بود. لیو و همکاران [۳۴] به کمک المان محدود، به بهینه‌ســـازی صـــفحات کامپوزیتی دارای چند گشـــودگی 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 گشـــودگی پرداختند. ســـپس به بررســـی نحوه‌ی قرارگیری لایه‌ها و اثر آن بر معیار شـکسـت تسـای-هیل پرداختند و در آخر هم مقایســه‌ای بین تعامل گشـودگی‌ها در صـفحات شـبه همســـانگرد انجام دادند. شـــارما و همکارانش [۳۵] به طراحی بهینه‌ی چندلایه‌های متقارن دارای گشـودگی بیضـوی با کمک روش الگوریتم ژنتیک پرداختند. هدف آن‌ها بدسـت 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 تـک لایـه‌هـا و چنـدلایـه‌هـای متقـارن در نظر گرفتند. متغیّر طراحی آن‌ها نیز زاویه‌ی الیاف و نحوه چیدمان بود. کلاهان و همکارش [۳۶] از اصول الگوریتم ژنتیک برای طراحی چند لایه‌های کامپوزیتی اســـتفـاده کردنـد، آن‌هـا با در نظر گرفتن جهت چرخش الیاف و چیدمان لایه‌ها به عنوان متغیّرهای طراحی ســـعی در افزایش مقاومت چندلایه با کمترین وزن ممکن را داشـــتند. ماک و گوربا [۱۵] از الگوریتم ژنتیک و المان محدود اسـتفاده کردند تا به چیدمان بهینه یک ورق چندلایه برسـند. ایشان ترتیب قرار گرفتن، شکل و اندازه (ماده و حجم) را به عنوان پارامترهای مطرح برای بهینه‌سازی در نظر گرفتد و حالت بهینه‌ی آن‌ها را به منظور ایجاد کمترین بار کمانش نشـان دادند. نتایج آن‌ها برای ورق با گشـودگی دایروی تحت بار کشـشی گزارش شده است. کواردی نو و همکاران [۳۷] کاربرد الگوریتم ژنتیک را در طراحی بهینه‌ی صفحات کامپوزیتی پیچ شده نشان دادند. ایشان ضخامت صفحه، نحوه‌ی قرارگیری الیاف، محلّ قرارگیری اتصالات، انعطاف‌پذیری پیچ و ابعاد پیچ را به عنوان متغیّرهای طراحی یا پارامترهای بهینه‌سازی جهت دستیابی به کمترین تنش در نظر گرفتند. سورش و همکاران [۳۸] در تحقیقی مشـابه همان مسأله را با مقایسه الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات در یک مسأله‌ی بهینه‌سازی

چندهدفه مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که نه‌تنها نتایج با استفاده از این روش بهتر شده، بلکه استفاده از این روش نسبت به الگوریتم ژنتیک زمان محاسبات را هم به شدّت کاهش داده است. کاتیراوان و همکارش [۳۹] به طراحی بهینه‌ی یک تیر کامپوزیتی قید دار 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. نارایانا نیک و همکاران [۴۰] با استفاده از الگوریتم ژنتیک و مکانیزم شکست، به طراحی بهینه‌ی کامپوزیت‌ها، بر اساس معیار شکست پرداختند. آلمیدا و آوراچ [۴۱] با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تحلیل اجزای محدود به طراحی بهینه‌ی صفحات چندلایه کامپوزیتی پرداختند، ایشان متغیّرهای زاویه‌ی الیاف و ضخامت را به عنوان پارامترهای طراحی در نظر گرفتند و اقدام به بهینه‌سازی خیز و وزن سازه به طور مجزّا و در کنار هم کردند. چو [۴۲] 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[۱] به عنوان متغیّرهای طراحی در این مسأله‌ی بهینه‌سازی در نظر گرفته شده‌اند. همچنین رهیافت حلّ مسأله با آنالیز عددی روش FEA انجام شده تا پاسخ سازه را در یک شرایط زاویه و چیدمان مطمئن به‌دست 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 آقای چانگ و همکاران [۴۳] 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 و همکارانش[۴۴] استفاده شده است. لیمان و همکارش [۴۵] روشی برای دستیابی به چیدمانی بهینه برای چندلایه‌های

[۱] Individual Ply Angles

کـامپوزیتی تحـت بـارگذاری عرضـــی و بار فشـــاری، با اســـتفاده از روش الگوریتم ژنتیک و تحلیل ایزوژئومتریک اجزای محدود ارائه کردند. تابع هدف در این تحقیق دســـتیابی به اســـتحکام و ظرفیت تحمل بار بیشـــینه درنظر گرفته شـــد و تئوری کرنش فون کارمن برای درنظرگرفتن تغییرشـــکل‌های بزرگ و رفتار غیرخطی صـــفحات ناشـــی از خمش و کمانش و پس‌کمانش مورد اســـتفاده قرار گرفت. آلانسو و همکارش [۴۶] به بررسی متغیّرهای الگوریتم اجتماع ذرات مبنی بر حرکت دسته‌ی پرندگان به صورت روش تناوبی برای بهینه‌سازی سازه‌های کامپوزیتی پرداختند. آن‌ها همچنین در مقاله‌ی خود به مقایســه الگوریتم اجتماع ذرات با الگوریتم ژنتیک کلاسـیک اسـتفاده شده در نرم افزار باس‌کاترو[۱] پرداختنـد و در نهـایت روش‌های مختلف به منظور بهبود بخشـــیدن در عملکرد این الگوریتم را ارائه دادند. جیانکیاو و همکارانش[۴۷] توســعه یک روش برای طراحی بهینه‌ی (بر پایه یک قابلیت اعتماد) ســـازه‌های کامپوزیتی بر مبنای ترکیب روش PSO و FEA ارائه دادند. چن و همکارانش [۴۸] یک روش بهینه‌ســازی برای طراحی قابلیت اطمینان ســازه‌های کامپوزیتی بر پایه روش بهینه‌ســازی انبوه ذرات و المان محدود ارائه کردند. این روش دارای ســه مرحله به‌صـورت زیر اسـت: ۱- تحلیل تنش با نرم‌افزار انسـیس ۲- محاسبات قابلیت اطمینان ۳- بهینه‌سازی. در این روش ابتدا یک جمعیت اولیه با موقعیت و سـرعت تصـادفی ایجاد می‌شـوند 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 متلـب منتقـل می‌شـــونـد. در این روش داده‌ها همواره بین انســـیس و متلب در حال تبادل می‌باشـــند. آن‌ها همچنین مثال‌هایی عددی از قبیل چندلایه‌ها، پوســـته‌های اســـتوانه‌ای کامپوزیتی و مخازن تحت فشار کامپوزیتی را برای اثبات مؤثر بودن روش خود ارائه دادند. باربوسا و همکارانش[۴۹] به طراحی یک سازه چند سلولی کامپوزیتی تحت پیچش با بررسی تأثیر بسیاری از مواد و پارامترهای هندســی بر روی رفتار مکانیکی بهینه‌ی ســازه پرداختند. در این کار تکنیک بهینه‌ســازی PSO برای بیشینه‌سازی ثابت پیچشی (G) سازه مورد استفاده قرار گرفته است. ژو و همکارانش [۵۰] بهینه‌سازی

[۱] Boss Quattro

پایه‌ها کامپوزیتی را مورد بررســـی قرار دادند. آن‌ها روش وزنه‌های متغیر چندهدفه الگوریتم ژنتیک را برای به حداقل رسـاندن وزن و ضـریب اینرسی و به حداکثر رساندن بار کمانش ارائه دادند. متغیرهای طراحی آن‌هـا درصـــد حجمی الیـاف در هر لایـه و نوع چیـدمان لایه‌ها بود. همچنین آن‌ها از معیار شکست تسای-وو به عنوان یک محدود کننده طراحی بهینه استفاده کردند.

۵-۱ اهداف پایان‌نامه

پارامترهای متعددی از جمله شکل گشودگی، جهت‌گیری گشودگی (زاویه‌ی چرخش گشودگی)، زاویه‌ی بار، زاویه‌ی الیاف، شعاع انحنای گوشه‌ی گشودگی و همچنین خواص مکانیکی ماده در صفحات ارتوتروپیـک بر توزیع تنش اطراف گشـــودگی واقع در صـــفحه‌ای که تحت بارگذاری قرار می‌گیرند، تأثیرگذار هســـتند. در این تحقیق با تکیه بر حلّ تحلیلی لخنتیســـکی و بســـط این حلّ به ســـایر گشـودگی‌های منظم هندسی و ترکیب آن با الگوریتم بهینه‌سازی PSO سعی شده است تا با استفاده از این الگوریتم، مقـادیر بهینـه‌ی پارامترهای فوق جهت دســـتیابی به کمترین تنش ممکن در اطراف گشـــودگی معرفی گردد. در این تحقیق به دلیل نداشـــتن هیچ اطلاعاتی از گرادیان‌های تابع هزینه نسـبت به متغیرهای طراحی در خلال فرآیند از یک روش بهینه‌سازی هوشمند (روش های غیرمبتنی بر محاسبه گرادیان‌ها) استفاده شده است. در این روش جستجو برای رسیدن به نقطه بهینه با مقایسه مقادیر تابع هزینه در نقاط طراحی مختلف انجام می شود.

در این تحقیق با اعمال شرایط مرزی $\tau_{\rho\theta} = \sigma_\rho = ۰$ تنها تنش ایجاد شده در اطراف گشودگی σ_θ اســت. بقیه‌ی تنش‌ها در مقایســه با این تنش کوچک هســتند. بنابراین کمینه‌کردن مقدار تنش بی‌بعد در اطراف گشودگی به عنوان تابع هزینه (C.F.) درنظر گرفته شده است. برای بررسی درستی نتایج حل تحلیلی از روش اجزای محدود کمک گرفته شـده اسـت. نتایج عددی به‌دسـت آمده، تطابق خوبی با نتایج حاصـل از حلّ حاضـر دارند. در نهایت پارامترهای بهینه برای هر نوع گشـودگی معرّفی خواهد شد.

فصل ۲:   روابط حاکم بر روش حلّ تحلیلی (تعریف مسأله)

۲-۱ مقدمه

فرضیه‌های اولیه که در استخراج روابط تحلیلی ارائه شده در این پایان‌نامه مدنظر قرار گرفته شده است، عبارتنداز :

الف) اندازه‌ی گشودگی درمقابل ابعاد صفحه کوچک است (صفحه بی‌نهایت).

ب) ماده دارای رفتار الاستیک خطی است.

پ) صفحه تحت بار تک جهتی کششی قرار گرفته است.

ت) با اعمال شرایط مرزی $\tau_{\rho\theta} = \sigma_{\rho} = ۰$ تنها تنش ایجاد شده در اطراف گشودگی σ_{θ} است. بقیه‌ی تنش‌ها در مقایسه با این تنش کوچک هستند.

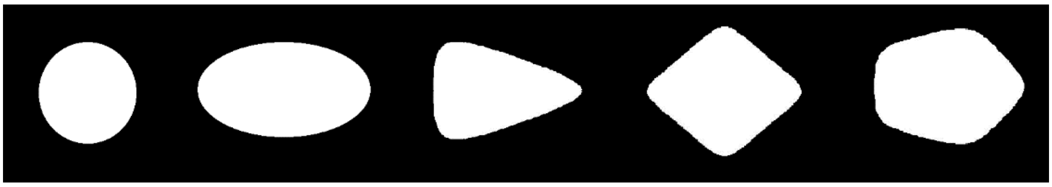
۲-۲ نگاشت هم‌نوا

همانطور که در قسمت قبل اشاره شد، باید روابط ارائه شده برای گشودگی‌های دایره‌ای و بیضوی را به سایر گشودگی‌ها تعمیم داد. برای بسط روش تحلیلی مربوط به گشودگی دایره‌ای به گشودگی‌های مختلف، ابتدا باید با استفاده از یک تابع نگاشت ساده $z_i = (x + s_i y)$ ، گشودگی‌های مختلف را به یک دایره با شعاع واحد تبدیل کرد. که در آن s_i ریشه‌های معادله‌ی مشخصه هستند که به تفصیل در بخش بعد معرفی می‌شوند. x و y در تابع نگاشت مذکور مطابق رابطه‌ی (۲-۱) تعیین می‌شود[۲۳].

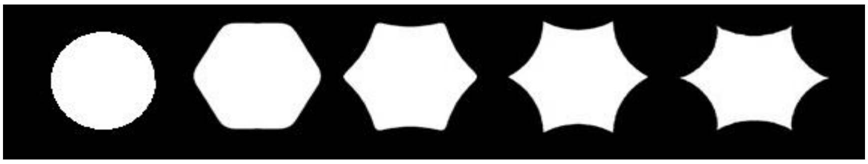
$$x = \lambda(cos\theta + wcos(n\theta))$$
$$y = -\lambda\big(csin\theta - wsin(n\theta)\big) \qquad (۲-۱)$$

در رابطه‌ی بالا، پارامترهای مختلفی وجود دارند که با تغییر آن‌ها، می‌توان گشودگی‌های مختلف را مدل کرد. c و n نشان‌دهنده‌ی نوع هندسه‌ی گشودگی است. به‌طوری که n تعداد اضلاع گشودگی و c میزان کشیدگی شکل گشودگی را مشخص می‌کند. λ بزرگی گشودگی را نشان می‌دهد و در گشودگی‌های لبه‌دار w معیار تیزی یا نرمی و انحنای گشودگی است ($w \geq ۰$)؛ با تغییر این پارامتر می‌توان انواع گشودگی‌های مختلف را با شعاع انحناهای متفاوت ایجاد کرد و در هر مورد مؤلفه‌های

مختلف تنش را مورد بررسی قرار داد. تأثیر پارامترهای مختلف در ایجاد گشودگی در شکل ۲-۱ نشان داده شده است. به عنوان مثال در معادله‌ی مثلثاتی بالا برای گشودگی مثلثی باید n=۲ و c=۱ باشد. برای هر گشودگی وقتی w کاهش می‌یابد، گشودگی ملایم‌تر می‌شود تا اینکه به w=۰ می‌رسد. در این حالت گشودگی به دایره تبدیل می‌شود. مثلاً برای گشودگی شش‌ضلعی (c=۱ ، n=۵) تغییرات w در شکل ۲-۲ ارائه شده است و روند میل‌کردن گشودگی شش‌ضلعی به دایره را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱ تأثیر پارامترهای مختلف بر هندسه‌ی گشودگی



شکل ۲-۲ تأثیر پارامتر انحنای گشودگی بر گوشه‌های گشودگی شش‌ضلعی

رابطه‌ی (۲-۱) تنها نقاط روی مرز گشـــودگی را مدل می‌کند برای بدســـت آوردن نقاط خارج از گشودگی از متغّیر مختلط ζ استفاده می‌شود که به‌صورت رابطه‌ی (۲-۲) تعریف می‌شود.

$$\zeta = \rho e^{i\theta} = \rho(\cos\theta + i\sin\theta) \tag{۲-۲}$$

برای دایره‌ای به شعاع واحد $\rho = 1$ است. از طرفی با استفاده از روابط اویلر می‌توان نوشت:

$$e^{in\theta} = \cos(n\theta) + i\sin(n\theta) \tag{۳-۲}$$
$$e^{-in\theta} = \cos(n\theta) - i\sin(n\theta)$$

که با توجه به روابط (۲-۲) و (۲-۳) و از ترکیب آن‌ها خواهیم داشت :

$$\cos(n\theta) = \frac{1}{2}\left(\zeta^n + \frac{1}{\zeta^n}\right)$$
$$\sin(n\theta) = \frac{-i}{2}\left(\zeta^n - \frac{1}{\zeta^n}\right) \tag{۴-۲}$$

بنابراین می‌توان x و y را به‌صورت زیر بازنویسی کرد:

$$x = \frac{\lambda}{2}\left(\zeta + \frac{1}{\zeta} + w\,\zeta^{n} + \frac{w}{\zeta^{n}}\right) \tag{۵-۲}$$
$$y = \frac{\lambda i}{2}\left(-c\zeta + \frac{c}{\zeta} + w\,\zeta^{n} - \frac{w}{\zeta^{n}}\right)$$

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 کوچک‌تر از یک انتخاب کرد. با استفاده از تابع نگاشت فوق و انتخاب مناسب برای پارامترهای n، c و w می‌توان گشودگی‌های مختلف را مدل کرد[۲۴].

۲-۳ روش حلّ و بدست آوردن معادلات حاکم

با استفاده از قانون هوک تعمیم یافته در حالت سه‌بعدی می‌توان هر مؤلفه‌ی تنش را به تمام مؤلفه‌های تغییر شکل نسبی و هر مؤلفه‌ی تغییر شکل نسبی را به تمام مؤلفه‌های تنش مربوط ساخت.

$$\sigma_i = C_{ij}\varepsilon_i \tag{۶-۲}$$
$$\varepsilon_i = S_{ij}\sigma_j$$

که در آن $[C]$ و $[S]$ به ترتیب ماتریس‌های سفتی و نرمی ماده هستند و مطابق رابطه‌ی (۲-۷) هستند. همچنین در مواد کامپوزیتی روابط تنش کرنش در حالت کلی off-Axis به صورت رابطه‌ی (۲-۸) است:

$$[C] = [S]^{-1} \tag{۷-۲}$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{s_{11}} & \overline{s_{12}} & \overline{s_{13}} & 0 & 0 & \overline{s_{16}} \\ \overline{s_{12}} & \overline{s_{22}} & \overline{s_{23}} & 0 & 0 & \overline{s_{26}} \\ \overline{s_{13}} & \overline{s_{23}} & \overline{s_{33}} & 0 & 0 & \overline{s_{36}} \\ 0 & 0 & 0 & \overline{s_{44}} & \overline{s_{45}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \overline{s_{45}} & \overline{s_{55}} & 0 \\ \overline{s_{16}} & \overline{s_{26}} & \overline{s_{36}} & 0 & 0 & \overline{s_{66}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \tag{۸-۲}$$

که در آن:

$$\begin{aligned}
\overline{s_{11}} &= m^4 s_{11} + m^2 n^2 \left(2s_{12} + s_{66}\right) + n^4 s_{22} \\
\overline{s_{12}} &= m^2 n^2 \left(s_{11} + s_{22} - s_{66}\right) + \left(m^4 + n^4\right) s_{12} \\
\overline{s_{13}} &= m^2 s_{13} + n^2 s_{23} \\
\overline{s_{16}} &= mn\left[m^2 \left(2s_{11} - 2s_{12} - s_{66}\right) + n^2 \left(2s_{12} - 2s_{22} - s_{66}\right)\right] \\
\overline{s_{22}} &= m^4 s_{11} + m^2 n^2 \left(2s_{12} + s_{66}\right) + m^4 s_{22} \\
\overline{s_{13}} &= n^2 s_{13} + m^2 s_{23} \\
\overline{s_{33}} &= s_{33} \\
\overline{s_{26}} &= mn\left[n^2 \left(2s_{11} - 2s_{12} - s_{66}\right) + m^2 \left(2s_{12} - 2s_{22} - s_{66}\right)\right] \\
\overline{s_{36}} &= 2mn\left(s_{13} - s_{23}\right) \\
\overline{s_{44}} &= m^2 s_{44} + n^2 s_{55} \\
\overline{s_{45}} &= mn\left(s_{55} - s_{44}\right) \\
\overline{s_{55}} &= n^2 s_{44} + m^2 s_{55} \\
\overline{s_{66}} &= 4m^2 n^2 \left(s_{11} - 2s_{22} + s_{22}\right) + \left(m^2 - n^2\right)^2 s_{66} \\
m &= \cos\gamma, n = \sin\gamma
\end{aligned} \tag{۹-۲}$$

با فرض تنش صـفحه‌ای ($\sigma_z = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = ۰$) رابطه‌ی (۲-۸) به صورت رابطه‌ی (۲-۱۰) درخواهد آمد که با معکوس کردن این رابطه مطابق رابطه‌ی (۲-۱۱) خواهیم داشت:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{s_{11}} & \overline{s_{12}} & \overline{s_{16}} \\ \overline{s_{12}} & \overline{s_{22}} & \overline{s_{26}} \\ \overline{s_{16}} & \overline{s_{26}} & \overline{s_{66}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \tag{۱۰-۲}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \tag{۱۱-۲}$$

که $\overline{Q_{ij}}$ ماتریس سفتی کاهش یافته انتقالی در حالت کلی off-Axis می‌باشد.

$$\begin{bmatrix} \overline{Q_{11}} & \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{16}} \\ \overline{Q_{12}} & \overline{Q_{22}} & \overline{Q_{26}} \\ \overline{Q_{16}} & \overline{Q_{26}} & \overline{Q_{66}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{s_{11}} & \overline{s_{12}} & \overline{s_{16}} \\ \overline{s_{12}} & \overline{s_{22}} & \overline{s_{26}} \\ \overline{s_{16}} & \overline{s_{26}} & \overline{s_{66}} \end{bmatrix}^{-1} \tag{۱۲-۲}$$

در سیستم مختصات اصلی ماده :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (۱۳\text{-}۲)$$

که مؤلّفه‌های ماتریس سفتی کاهش‌یافته به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11}cos^4\gamma + 2(Q_{12} + 2Q_{66})sin^2\gamma cos^2\gamma + Q_{22}sin^4\gamma$$

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

$$\bar{Q}_{22} = Q_{11}sin^4\gamma + 2(Q_{12} + 2Q_{66})sin^2\gamma cos^2\gamma + Q_{22}cos^4\gamma$$

$$\bar{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})sin\gamma cos^3\gamma + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})sin^3\gamma cos\gamma \quad (۱۴\text{-}۲)$$

$$\bar{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})sin^3\gamma cos\gamma + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})sin\gamma cos^3\gamma$$

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11}cos^4\gamma + 2(Q_{12} + 2Q_{66})sin^2\gamma cos^2\gamma + Q_{22}sin^4\gamma$$

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

در رابطه‌ی (۲-۱۴) γ بیانگر زاویه‌ی الیاف اســـت و مؤلفه‌های ماتریس $[Q]$ با توجه به ثابت‌های مهندسی به‌صورت رابطه‌ی (۲-۱۵) تعریف می‌شوند:

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

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

$$Q_{12} = \frac{v_{12}E_2}{1 - v_{12}v_{21}} \quad (۱۵\text{-}۲)$$

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

در حالت دو بعدی رابطه‌ی سازگاری به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial^2\varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\varepsilon_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2\gamma_{xy}}{\partial x\partial y} \quad (۱۶\text{-}۲)$$

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

$$\varepsilon_x = a_{11}\sigma_x + a_{12}\sigma_y + a_{16}\tau_{xy}$$
$$\varepsilon_y = a_{12}\sigma_x + a_{22}\sigma_y + a_{26}\tau_{xy} \tag{۱۷-۲}$$
$$\gamma_{xy} = a_{16}\sigma_x + a_{26}\sigma_y + a_{66}\tau_{xy}$$

در این رابطه a_{ij} اعضـای ماتریس نرمی‌کاهش یافته اسـت که براساس فرض کرنش صفحه‌ای یا تنش صـفحه‌ای به‌صـورت تابعی از s_{ij} می‌باشـند. از طرفی با تعریف مؤلفه‌های تنش در دسـتگاه مختصـات کارتزین بر حسب تابع تنش $U(x,y)$ مطابق رابطه‌ی (۲-۱۸) خواهیم داشت:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}$$
$$\sigma_y = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \tag{۱۸-۲}$$
$$\tau_{xy} = -\frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y}$$

بنابراین با جایگذاری تابع تنش در رابطه‌ی سازگاری (۲-۱۶) معادله سازگاری برای ماده‌ی غیرهمسانگرد و برحسب تابع تنش به‌صورت زیر می‌باشد[۱۸]:

$$a_{22}\frac{\partial^4 U}{\partial x^4} - 2a_{26}\frac{\partial^4 U}{\partial x^3 \partial y} + (2a_{12} + a_{66})\frac{\partial^4 U}{\partial x^2 \partial y^2} - 2a_{16}\frac{\partial^4 U}{\partial x \partial y^3} + a_{11}\frac{\partial^4 U}{\partial y^4} = 0 \tag{۱۹-۲}$$

معادله‌ی فوق به کمک چهار اپراتور مشتق خطی مرتبه‌ی اول به‌صورت روابط (۲-۲۰) و (۲-۲۱) بیان می‌شـود که s_i جواب معادله مشـخصـه‌ی رابطه‌ی (۲-۲۲) است که ریشه‌های این معادله مشخصه را می‌توان به‌صورت رابطه‌ی (۲-۲۳) نوشت[۱۸].

$$D_1 D_2 D_3 D_4 U = 0 \tag{۲۰-۲}$$

$$D_i(i = 1,2,3,4) = \frac{\partial}{\partial y} - s_i\frac{\partial}{\partial x} \tag{۲۱-۲}$$

$$a_{11}s^4 - 2a_{16}s^3 + (2a_{12} + a_{66})s^2 - 2a_{26}s + a_{22} = 0 \tag{۲۲-۲}$$

$$s_1 = \alpha_1 + i\beta_1, s_2 = \alpha_2 + i\beta_2 \tag{۲۳-۲}$$
$$s_3 = \alpha_1 - i\beta_1, s_4 = \alpha_2 - i\beta_2$$

برای مواد ایزوتروپیک $a_{16} = a_{26} = ۰$ و معادله مشخصه به‌صورت زیر در می‌آید:

$$a_{11}s^4+(2a_{12}+a_{66})s^2+a_{22}=0 \qquad (۲۴-۲)$$

در این حالت $\beta_1=\beta_2$ می‌باشد. لخنیتسکی نشان داد که معادله مشخصه‌ی حاضر دارای چهار ریشه‌ی موهومی می‌باشد که در حالت کلی برای مواد غیرهمسانگرد این چهار ریشه برابر نمی‌باشند. چون این ریشه‌ها دو به دو مزدوج هم هستند؛ بنابراین حلّ معادله‌ی (۲-۲۲) باتوجه به ریشه‌های معادله مشخصه به‌صورت رابطه‌ی (۲-۲۵) خواهد بود، که z_i توسط انتقال ساده‌ی رابطه‌ی (۲-۲۶) به‌دست می‌آید[۱۸].

$$U(x,y)=F_1(z_1)+F_2(z_2)+\overline{F_1(z_1)}+\overline{F_2(z_2)} \qquad (۲۵-۲)$$

$$z_i=x+s_iy \qquad i=1,2 \qquad (۲۶-۲)$$

در رابطه‌ی (۲-۲۵) 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 مرتبه‌ی مشتق از فرض زیر استفاده می‌کنیم:

$$\begin{aligned} &\frac{dF_1}{dz_1}=\varphi(z_1) \quad , \quad \frac{dF_2}{dz_2}=\psi(z_2) \\ &\frac{d\overline{F}_1}{d\overline{z}_1}=\overline{\varphi(z_1)} \quad , \quad \frac{d\overline{F}_2}{d\overline{z}_2}=\overline{\psi(z_2)} \end{aligned} \qquad (۲۷-۲)$$

با توجه به معادلات (۲-۱۸)، (۲-۲۶) و (۲-۲۷) می‌توان نتیجه گرفت که تنش‌های داخل صفحه‌ای به‌صورت تابعی از دو تابع تنش $\varphi(z_1)$ و $\psi(z_2)$ به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} &\sigma_x=\frac{\partial^2U}{\partial y^2}=\frac{\partial^2}{\partial y^2}[F_1(z_1)+F_2(z_2)+\overline{F_1(z_1)}+\overline{F_2(z_2)}]= \\ &\frac{\partial}{\partial y}[\frac{dF_1}{dz_1}\frac{\partial z_1}{\partial y}+\frac{dF_2}{dz_2}\frac{\partial z_2}{\partial y}+\frac{d\overline{F_1}}{d\overline{z_1}}\frac{\partial \overline{z_1}}{\partial y}+\frac{d\overline{F_2}}{d\overline{z_2}}\frac{\partial \overline{z_2}}{\partial y}] \end{aligned} \qquad (۲۸-۲)$$

باتوجه به رابطه‌ی (۲-۲۷) می‌توان رابطه‌ی اخیر را به‌صورت زیر نوشت:

$$\sigma_x=\frac{\partial}{\partial y}[s_1\varphi(z_1)+s_2\psi(z_2)+\overline{s_1\varphi(z_1)}+\overline{s_2\psi(z_2)}] \qquad (۲۹-۲)$$

$$\sigma_x=[s_1^2\varphi'(z_1)+s_2^2\psi'(z_2)+\overline{s_1^2\varphi'(z_1)}+\overline{s_2^2\psi'(z_2)}] \qquad (۳۰-۲)$$

همچنین باتوجه به رابطه‌ی $z+\overline{z}=2\,\mathrm{Re}[z]$ می‌توان نوشت:

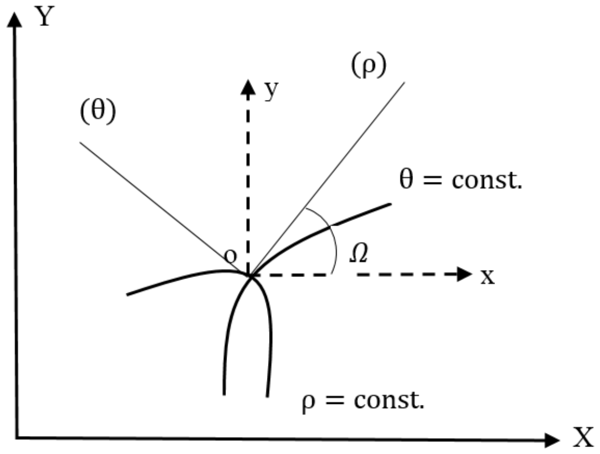
$$\sigma_x = 2\,\mathrm{Re}[s_1^2\varphi'(z_1) + s_2^2\psi'(z_2)] \qquad (۲-۳۱)$$

به همین ترتیب بقیه‌ی تنش‌ها که در رابطه‌ی (۲-۳۲) ارائه شده؛ محاسبه می‌شوند. که در آن $z_i = x + s_i y$ و $i = 1,2$ ؛ و همانطور که می‌دانیم مطابق روابط تبدیل تنش برای یک صفحه که در بی‌نهایت تحت کشش تک‌محوری می‌باشد، مطابق رابطه‌ی (۲-۳۳) خواهیم داشت.

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= P\cos^2\alpha + 2\,\mathrm{Re}[s_1{}^2\varphi'(z_1) + s_2{}^2\psi'(z_2)] \\
\sigma_y &= P\sin^2\alpha + 2\,\mathrm{Re}[\varphi'(z_1) + \psi'(z_2)] \\
\tau_{xy} &= P\sin\alpha\cos\alpha - 2\,\mathrm{Re}[s_1\phi'(z_1) + s_2\psi'(z_2)]
\end{aligned} \qquad (۲-۳۲)$$

$$\sigma_x^\infty = P\cos^2\alpha \quad , \quad \sigma_y^\infty = P\sin^2\alpha \quad , \quad \tau_{xy}^\infty = P\sin\alpha\cos\alpha \qquad (۲-۳۳)$$

P نیروی کششی در واحد سطح و α زاویه‌ی اعـــــمال نیرو نسبت به محور x هاست. $\varphi'(z_1)$ و $\psi'(z_2)$ به ترتیب مشـتق توابع $\varphi(z_1)$ و $\psi(z_2)$نسبت به z_1 و z_2 می‌باشد که بعداً تعریف می‌شوند. برای اینکه از σ_x ، σ_y و τ_{xy} مقادیر σ_ρ ، σ_θ و $\tau_{\rho\theta}$ و برعکس را به‌دســت آوریم از روابط انتقال همنوا استفاده می‌کنیم . مماس منحنی‌های $\rho = const.$ و $\theta = const.$ که در نقطه O کشیده شده اســت در شــکل ۲-۳ نشــان داده شــده است. مشخص است که زاویه‌ی محورهای θ و ρ نسبت به xoy به اندازه Ω چرخیده اســت. مطابق این شکل، Ω زاویه‌ی بین محور x ها و محور منحنی الخط ρ می‌باشد (جهت ρ جهت عمود بر سطح گشودگی است).



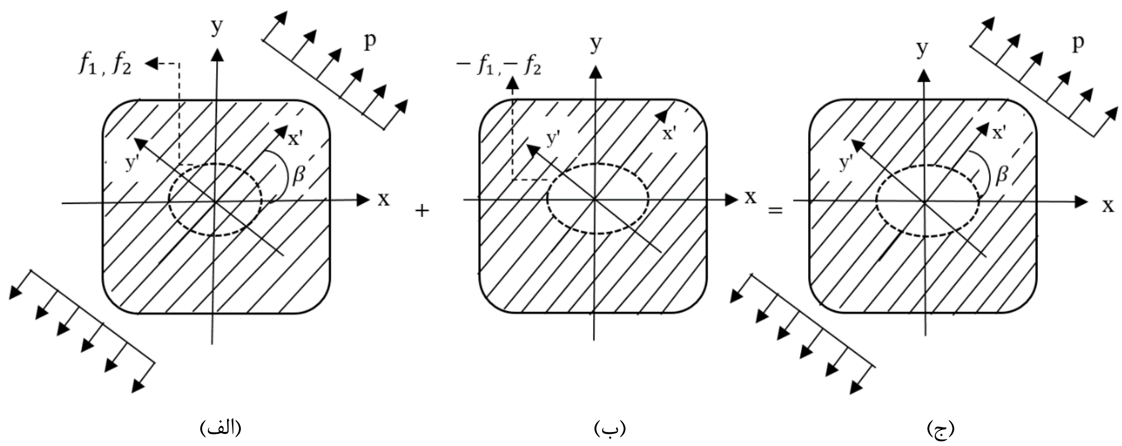
شکل ۲-۳ تبدیل دستگاه مختصات کارتزین به منحنی الخط [۲۱]

با اعمال نگاشــت، تنش‌ها در مختصات کارتزین به مختصات منحنی الخط عمودی (θ و ρ) تبدیل

می‌شوند و داریم:

$$\begin{aligned}\sigma_\theta + \sigma_\rho &= \sigma_y + \sigma_x \\ \sigma_\theta - \sigma_\rho + 2i\,\tau_{\rho\theta} &= (\sigma_y - \sigma_x + 2i\,\tau_{xy})e^{2i\Omega}\end{aligned} \tag{۳۴-۲}$$

توابع تحلیلی $\varphi(z_1)$ و $\psi(z_2)$ در رابطه‌ی (۲-۳۲) به فرم توابع انتگرالی توسط ساوین[۱۷] تعریف شده‌اند. البته توابع فوق به فرم‌های دیگری مثل سری لورنت نیز تعریف می‌شوند. توابع تحلیلی ذکر شده در این رابطه، با جایگذاری z_1 و z_2 به جای ξ در $\phi_0(\xi)$و $\psi_0(\xi)$ به‌دست می‌آیند. متغیّرهای z_1 و z_2 از این واقعیت حـــــاصل می‌شوند که مواد غیرهمسانگرد لزوماً دارای چهار ریشه‌ی s_i خواهند بود؛ (معادلـــــه (۲-۲۳))که وابسته به دو ثابت β_1 و β_2 هستند. تـــــــــوابع تحلیلی برای مواد همسانگرد فقط وابسته به یک متغیر $\beta_2 = \beta_1$ هستند. صفحه‌ی ناهمسانگرد دارای گشودی که تحت بارگذاری در لبه‌های خارجی می‌باشد در شکل ۲-۴ 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 ۲-۴-الف نشان داده شده است، به‌دست می‌آوریم. شرایط مرزی f_1 و f_2 روی گشودگی مجازی از این توابع تنش به‌دست می‌آیند.



شکل ۲-۴ 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 [۲۱]

ســـپس ورق حاوی گشـــودگی در غیاب بارگذاری بیرونی تحت شـــرایط مرزی منفی f_1 و f_2 در مرز

گشـودگی قرار می‌گیرد .(شـکل ۲-۴-ب). برای این مرحله توابع تنش $\varphi_0(z_1)$ و $\psi_0(z_2)$ بر اساس مقاله یوکاجونکر [۲۱] از شـرایط مرزی به‌دسـت می‌آیند. با استفاده از روش جمع آثار مرحله‌ی اول و دوم حل داریم :

$$\begin{aligned}\varphi(z_1) &= \varphi_1(z_1)+\varphi_0(z_1)\\ \psi(z_2) &= \psi_1(z_2)+\psi_0(z_2)\end{aligned} \tag{۲-۳۵}$$

با قرار دادن معادلات (۲-۳۵) در معادلات (۲-۳۲) تنش‌ها به‌دست می‌آیند.

با در نظرگرفتن $\varphi_1'(z_1)=B^*+iC^*$ و $\psi_1'(z_2)=B'^*+iC'^*$ و انتگرال‌گیری، مقدار $\varphi_1(z_1)$ و $\psi_1(z_2)$ به‌دست می‌آید [۱۷]. برای یکتایی جواب C^*=۰ فرض می‌شود. شرایط مرزی روی گشودگی مجازی به‌صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\begin{aligned}f_1 &= 2\,\mathrm{Re}[\varphi_1(z_1)+\psi_1(z_2)]\\ f_2 &= 2\,\mathrm{Re}[s_1\varphi_1(z_1)+s_2\psi_1(z_2)]\end{aligned} \tag{۲-۳۶}$$

حال ورق با گشودگی و شرایط مرزی منفی که تحت بار خارجی نیست را در نظر می‌گیریم. شرایط مرزی روی گشودگی به‌صورت $f_1^0=-f_1$ و $f_2^0=-f_2$ است و داریم:

$$\begin{aligned}f_1^0 &= -2\,\mathrm{Re}[B^*z_1+(B'^*+iC'^*)z_2]\\ f_2^0 &= -2\,\mathrm{Re}[s_1B^*z_1+s_2(B'^*+iC'^*)z_2]\end{aligned} \tag{۲-۳۷}$$

$$B^* = P\frac{\cos^2\alpha+(\alpha_2{}^2+\beta_2{}^2)\sin^2\alpha+\alpha_2\sin 2\alpha}{2\left[(\alpha_2-\alpha_1)^2+(\beta_2{}^2-\beta_1{}^2)\right]} \tag{۲-۳۸}$$

$$B'^* = P\frac{\left[(\alpha_1{}^2-\beta_1{}^2)-2\alpha_1\alpha_2\right]\sin^2\alpha-\cos^2\alpha-\alpha_2\sin 2\alpha}{2\left[(\alpha_2-\alpha_1)^2+(\beta_2{}^2-\beta_1{}^2)\right]} \tag{۲-۳۹}$$

$$C'^* = \frac{p}{2\beta_2\left[(\alpha_2-\alpha_1)^2+(\beta_2{}^2-\beta_1{}^2)\right]}\times \left(\begin{aligned}&(\alpha_1-\alpha_2)\cos^2\alpha+\left[\alpha_2(\alpha_1{}^2-\beta_1{}^2)-\alpha_1(\alpha_2{}^2-\beta_2{}^2)\right]\sin^2\alpha+\\ &\left[\left(\alpha_1{}^2-\beta_1{}^2\right)-(\alpha_2{}^2-\beta_2{}^2)\right]\sin\alpha\cos\alpha\end{aligned}\right) \tag{۲-۴۰}$$

به جای z_1 و z_2 در معادلات فوق به ترتیب مقادیر $z_1=x+s_1y$ و $z_2=x+s_1y$ جایگذاری می‌شود.

به کمک رابطه شوارتز که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F(\xi)=\frac{1}{2\pi i}\int_{\gamma}U(\theta)\frac{\sigma+\xi}{\sigma-\xi}\frac{d\sigma}{\sigma}+i\alpha_0 \qquad (۴۱\text{-}۲)$$

در این انتگرال $U(\theta)$ قسمت حقیقی تابع $F(\xi)$ روی دایره‌ای به شعاع واحد (γ) می‌باشد و α_0 یک ثابت حقیقی است. با استفاده از قضیه شوارتز می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned}\Phi_0(\xi)+\psi_0(\xi)&=\frac{1}{4\pi i}\int -f_1^{\,0}(\theta)\frac{\sigma+\xi}{\sigma-\xi}\frac{d\sigma}{\sigma}+i\alpha_0\\ s_1\Phi_0(\xi)+s_2\psi_0(\xi)&=\frac{1}{4\pi i}\int -f_2^{\,0}(\theta)\frac{\sigma+\xi}{\sigma-\xi}\frac{d\sigma}{\sigma}+i\alpha_0\end{aligned} \qquad (۴۲\text{-}۲)$$

با حلّ معادلات بالا نسبت به $\phi_0(\xi)$ و $\psi_0(\xi)$ توابع تحلیلی زیر حاصل می‌شود:

$$\Phi_0(\xi)=\frac{i}{4\pi(s_1-s_2)}\int(s_2f_1^0-f_2^0)\frac{\sigma+\xi}{\sigma-\xi}\frac{d\sigma}{\sigma} \qquad (۴۳\text{-}۲)$$

$$\psi_0(\xi)=\frac{-i}{4\pi(s_1-s_2)}\int(s_1f_1^{\,0}-f_2^{\,0})\frac{\sigma+\xi}{\sigma-\xi}\frac{d\sigma}{\sigma} \qquad (۴۴\text{-}۲)$$

از طرفی با استفاده از تعریف x و y در معادله‌ی (۲-۱) معادله‌ی (۲-۲۶) به‌صورت زیر خواهد شد:

$$z_i=\lambda\left[(\cos\theta+w\ \cos n\theta)-s_i(c\sin\theta-w\ \sin n\theta)\right] \qquad (۴۵\text{-}۲)$$

z_1 بر حسب ξ با استفاده از معادله‌ی (۲-۵) و (۲-۴۵) به صورت زیر بیان می‌شود:

$$z_1=\frac{\lambda}{2}\left[a_1\xi+\frac{b_1}{\xi}+wc_1\xi^n+\frac{wd_1}{\xi^n}\right] \qquad (۴۶\text{-}۲)$$

که در آن:

$$\begin{aligned}a_1&=1+is_1c\\ b_1&=1-is_1c\\ c_1&=1-is_1\\ d_1&=1+is_1\end{aligned} \qquad (۴۷\text{-}۲)$$

به همین ترتیب برای z_2 خواهیم داشت:

$$z_2 = x + s_2 y \qquad (۴۸-۲)$$

$$z_2 = \frac{\lambda}{2}\left[a_2\xi + \frac{b_2}{\xi} + wc_2\xi^n + \frac{wd_2}{\xi^n}\right]$$

$$a_2 = 1 + is_2c \qquad (۴۹-۲)$$

$$b_2 = 1 - is_2c$$

$$c_2 = 1 - is_2$$

$$d_2 = 1 + is_2$$

با جایگذاری معادله‌ی (۲-۴۶) و (۲-۴۸) داخل معادله‌ی مربوط به شرایط مرزی (۲-۳۷) خواهیم داشت:

$$f_1^{\,0} = -2\,\mathrm{Re}\left[K_1\xi + \frac{K_2}{\xi} + K_3\xi^n + \frac{K_4}{\xi^n}\right] \qquad (۵۰-۲)$$

$$K_1 = \frac{\lambda}{2}\left[B^*a_1 + (B'^* + iC'^*)a_2\right] \qquad (۵۱-۲)$$

$$K_2 = \frac{\lambda}{2}\left[B^*b_1 + (B'^* + iC'^*)b_2\right]$$

$$K_3 = \frac{\lambda}{2}\left[B^*c_1w + (B'^* + iC'^*)wc_2\right]$$

$$K_4 = \frac{\lambda}{2}\left[B^*wd_1 + (B'^* + iC'^*)wd_2\right]$$

$$f_2^{\,0} = -2\,\mathrm{Re}\left[K_5\xi + \frac{K_6}{\xi} + K_7\xi^n + \frac{K_8}{\xi^n}\right] \qquad (۵۲-۲)$$

$$K_5 = \frac{\lambda}{2}\left[s_1B^*a_1 + (B'^* + iC'^*)a_2s_2\right] \qquad (۵۳-۲)$$

$$K_6 = \frac{\lambda}{2}\left[s_1B^*b_1 + (B'^* + iC'^*)b_2s_2\right]$$

$$K_7 = \frac{\lambda}{2}\left[s_1B^*c_1w + (B'^* + iC'^*)wc_2s_2\right]$$

$$K_8 = \frac{\lambda}{2}\left[s_1B^*wd_1 + (B'^* + iC'^*)wd_2s_2\right]$$

در اینجا رابطه‌ی دیگر شوارتز که از آن استفاده می‌شود انتگرال زیر است :

$$\frac{i}{4\pi(s_1 - s_2)}\int_\gamma 2a.\mathrm{Re}\left(K_1\sigma^N + \frac{K_2}{\sigma^N}\right)\frac{\sigma+\xi}{\sigma-\xi}\frac{d\sigma}{\sigma} = \frac{-a}{s_1 - s_2}\left(K_1 + \overline{K}_2\right)\xi^N \qquad (۵۴-۲)$$

با جایگذاری معادلات (۲-۵۰) و (۲-۵۲) در روابط (۲-۴۳) و (۲-۴۴) و استفاده از قضیه‌ی بالا:

$$\Phi_0(\xi)=\frac{\xi}{s_1-s_2}\left(s_2\left(K_1+\overline{K}_2\right)-\left(K_5+\overline{K}_6\right)\right)+\frac{\xi^n}{s_1-s_2}\left(s_2(K_3+\overline{K}_4)-(K_7+\overline{K}_8)\right) \tag{۵۵-۲}$$

$$\Psi_0(\xi)=\frac{\xi}{s_2-s_1}\left(s_1\left(K_1+\overline{K}_2\right)-\left(K_5+\overline{K}_6\right)\right)+\frac{\xi^n}{s_2-s_1}\left(s_1(K_3+\overline{K}_4)-(K_7+\overline{K}_8)\right) \tag{۵۶-۲}$$

در این رابطه $\overline{K}$ مزدوج K می‌باشد. حال آخرین مرحله محاسبه‌ی $\phi_0'(z_1)$ و $\psi_0'(z_2)$ است. برای به‌دست آوردن مشتق‌ها از تعریف مشتق به‌صورت زیر استفاده می‌شود:

$$\varphi_0'(z_1)=\frac{d\varphi_0(z_1)}{dz_1}=\frac{d\Phi_0(\xi)}{d\xi}\cdot\frac{d\xi}{dz_1}=\frac{d\Phi_0(\xi)}{d\xi}\cdot\frac{1}{dz_1/d\xi} \tag{۵۷-۲}$$

و به همین ترتیب برای محاسبه‌ی $\psi_0'(z_2)$ داریم:

$$\psi_0'(z_2)=\frac{d\Psi(\xi)}{d\xi}\cdot\frac{d\xi}{dz_2}=\frac{d\Psi(\xi)}{d\xi}\cdot\frac{1}{dz_2/d\xi} \tag{۵۸-۲}$$

با توجه به معادلات (۲-۴۶) و (۲-۴۸)، روابط (۲-۵۹)و (۲-۶۰) به‌دست می‌آید:

$$\frac{dz_1}{d\xi}=\frac{\lambda}{2}\left[a_1-\frac{b_1}{\xi^2}+wc_1n\xi^{n-1}-wd_1\,n/\xi^{n+1}\right] \tag{۵۹-۲}$$

$$\frac{dz_2}{d\xi}=\frac{\lambda}{2}\left[a_2-\frac{b_2}{\xi^2}+wc_2n\xi^{n-1}-wd_2\,n/\xi^{n+1}\right] \tag{۶۰-۲}$$

$$\varphi_0'(z_1)=\left[\begin{array}{l}\frac{1}{s_1-s_2}\left(s_2\left(K_1+\overline{K}_2\right)-(K_5+\overline{K_6})\right)+\\ \frac{n\xi^{n-1}}{s_1-s_2}\left(s_2\left(K_3+K_4\right)-\left(K_7+\overline{K}_8\right)\right)\end{array}\right]\times\left(\frac{1}{dz_1/d\xi}\right) \tag{۶۱-۲}$$

$$\psi_0'(z_2)=\left[\begin{array}{l}\frac{1}{s_2-s_1}\left(s_1\left(K_1+\overline{K}_2\right)-(K_5+\overline{K_6})\right)+\\ \frac{n\xi^{n-1}}{s_2-s_1}\left(s_1\left(K_3+K_4\right)-\left(K_7+\overline{K}_8\right)\right)\end{array}\right]\times\left(\frac{1}{dz_2/d\xi}\right) \tag{۶۲-۲}$$

برای مدل کردن زاویه‌ی چرخش گشودگی از انتقال زیر استفاده می‌شود:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\beta & \cos\beta \\ -\cos\beta & \sin\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \tag{۶۳-۲}$$

که در آن β زاویه‌ی چرخش گشودگی است. با جایگذاری رابطه‌ی (۲-۵) در رابطه‌ی (۲-۶۳) نتیجه می‌شود:

$$X = \frac{\lambda}{2}\Bigg[(\cos\beta - ic\sin\beta)\zeta + (\cos\beta + ic\sin\beta)\frac{1}{\zeta} + \omega(\cos\beta + i\sin\beta)\zeta^{n} + \frac{w(\cos\beta - i\sin\beta)}{\zeta^{n}}\Bigg] \tag{۶۴-۲}$$

$$Y = \frac{-\lambda}{2}\Bigg[(\sin\beta + ic\cos\beta)\zeta - (\sin\beta - ic\cos\beta)\frac{1}{\zeta} - \omega(\sin\beta - i\cos\beta)\zeta^{n} + \frac{w(\sin\beta + i\cos\beta)}{\zeta^{n}}\Bigg] \tag{۶۵-۲}$$

درنهایت با جایگذاری X وY در رابطه‌ی (۲-۲۶) تابع نگاشت به فرم زیر تبدیل می‌شود:

$$z_j = \frac{\lambda}{2}\left(a_j\zeta + \frac{b_j}{\zeta} + c'_j\omega\zeta^{n} + \frac{d'_j\omega}{\zeta^{n}}\right) \tag{۶۶-۲}$$

که در آن a_j، b_j، c'_j و d'_j برابرند با:

$$\begin{aligned} a_j &= (1 - ics_j)\cos\beta + (-ic - s_j)\sin\beta \\ b_j &= (1 + ics_j)\cos\beta + (ic - s_j)\sin\beta \\ c'_j &= (1 + is_j)\cos\beta + (i - s_j)\sin\beta \\ d'_j &= (1 - is_j)\cos\beta + (-i - s_j)\sin\beta \end{aligned} \tag{۶۷-۲}$$

فصل ۳: بهینه‌سازی و روش الگوریتم اجتماع ذرات

۳-۱ مقدمه

بهینه‌سازی کاربردهای زیادی در زمینه‌ی تخصیص منابع، زمان بندی‌ها، تصمیم گیری‌ها و . . . دارد. امروزه تکنیک بهینه‌سازی به‌عنوان یکی از ابزار مهم تصمیم‌گیری در طراحی سازه‌ها نقش مهمی را ایفا می‌کند. در دهه‌های گذشته تعداد زیادی از تکنیک‌های بهینه‌سازی برای حلّ مسائل مختلط ذاتی در طراحی سازه‌ها پیشنهاد شده است که حوزه‌ی وسیع تغییرات آن بستگی به نوع مسأله دارد. با این حال امروزه در بسیاری از مسائل سازه‌ها عملاً بررسی محدب بودن فضای طراحی غیرممکن است. بر این اساس روش‌های بر مبنای کلی غیرگرادیانی که در گذشتن از مسائل با فضای طراحی غیرمحدب و غیرخطی که در پیدا کردن بهترین حلّ کلّی تواناتر هستند، پیشنهاد می‌شود.

۳-۲ دسته‌بندی الگوریتم‌های بهینه‌سازی

به طور کلی الگوریتم‌های بهینه‌سازی را می‌توان در دو دسته‌ی الگوریتم‌های دقیق[۱] و الگوریتم‌های تقریبی[۲] تقسیم‌بندی کرد. الگوریتم‌های دقیق قادر به یافتن جواب بهینه به صورت دقیق هستند اما در مورد مسائل بهینه‌سازی سخت کارایی ندارند و زمان حلّ آن‌ها در این مسائل به صورت نمایی افزایش می‌یابد. الگوریتم‌های تقریبی قادر به یافتن جواب‌های خوب (نزدیک به بهینه) در زمان حلّ کوتاه برای مسائل بهینه‌سازی سخت هستند. امروزه بسیاری از مسائل بهینه‌سازی ترکیبی که اغلب از جمله مسائل با درجه‌ی غیر چندجمله‌ای[۳] هستند، به صورت تقریبی با کامپیوترهای موجود قابل حلّ می‌باشند. از جمله راه‌حلّ‌های موجود در برخورد با این گونه مسائل، استفاده از الگوریتم‌های تقریبی است. این الگوریتم‌ها تضمینی نمی‌دهند که جواب به دست آمده بهینه باشد و تنها با صرف زمان بسیار می‌توان جواب نسبتاً دقیقی به‌دست آورد و در حقیقت بسته به زمان صرف شده، دقّت جواب تغییر می‌کند. روشن است که شیوه‌ی شمارش کامل، نهایتاً به جواب دقیق مسأله منجر می‌شود؛ اما در عمل به دلیل

[۱] Exact
[۲] Approximate Algorithms
[۳] NP-Hard

زیاد بودن تعداد جواب‌های امکان‌پذیر و مدّت زمان حلّ مسأله، استفاده از آن بی‌نتیجه است. در سال‌های اخیر توجه بیشتری بر روش‌های فراابتکاری[1] برگرفته از طبیعت که شباهت‌هایی با سیستم‌های اجتماعی یا طبیعی دارد، صورت گرفته است و نتایج بسیار خوبی در حلّ مسائل بهینه‌سازی ترکیبی به دنبال داشته است. در این الگوریتم‌ها هیچ ضمانتی برای آنکه جواب به‌دست آمده بهینه باشد، وجود ندارد و تنها با صرف زمان بسیار می‌توان جواب نسبتاً دقیقی به‌دست آورد؛ در حقیقت با توجه به زمان صرف شده، دقّت جواب تغییر می‌کند. برای روش‌های فراابتکاری نمی‌توان تعریفی جامع ارائه کرد. با این وجود، در اینجا سعی می‌شود تعریفی تا حد امکان مناسب برای آن عنوان شود.

روش جستجوی فراابتکاری، روشی است که می‌تواند جوابی خوب (نزدیک به بهینه) در زمانی محدود برای یک مسأله ارائه کند. هیچ تضمینی برای بهینه‌بودن جواب وجود ندارد و متأسفانه نمی‌توان میزان نزدیکی جواب به دست آمده به جواب بهینه را تعیین کرد.

۳-۳ روش‌های فراابتکاری برگرفته از طبیعت

رویکردهای فراابتکاری امروزه کاربرد بسیاری در شاخه‌های مختلف علم بهینه‌سازی پیدا کرده‌اند. مبنای این رویکردها عمدتاً بر اساس نظم یا قواعد موجود در ارگانیسم‌های طبیعی یا برگرفته از دیگر شاخه‌های علوم است. رویکردهای فوق بر خلاف روش‌های دقیق بهینه‌سازی، به‌دنبال نقاط تا حد ممکن نزدیک به بهینه‌ی سراسری می‌باشند به‌طوریکه نظر تصمیم‌گیرنده را تا سطح قابل قبولی برآورده سازد. به عبارت دیگر، روش‌های فراابتکاری روش‌هایی هستند که حلّ‌های نزدیک به بهینه را با یک هزینه‌ی محاسباتی قابل قبول جستجو می‌کنند ولی تضمینی برای رسیدن به حلّ بهینه نمی‌دهند. به روش‌های فراابتکاری اصطلاحاً روش‌های غیردقیق یا تقریبی نیز گفته می‌شود چرا که مکانیزم‌های تصادفی در ایجاد ساختار آن‌ها نقش مهمّی را ایفا می‌کنند. چنین الگوریتم‌هایی دارای راهکارهای برون‌رفت از بهینه‌ی محلّی می‌باشند و قابل کاربرد در طیف گسترده‌ای از مسائل هستند[۵۱]. در اینجا به‌صورت

[1] Metaheuristic

کلّی معیارهای مختلفی که می‌تواند برای طبقه‌بندی الگوریتم‌های فراابتکاری مورد استفاده قرار گیرد، بیان می‌گردد[۵۲].

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 ازدحام 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 حلّ می‌کند. اما در الگوریتم‌های فراابتکاری احتمالی نظیر تبرید شبیه‌سازی شده، یک سری قوانین احتمالی در حین جستجو مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۳-۴ تاریخچه‌ی بهینه‌سازی گروه ذرات

همانطور که قبلاً بیان شد الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات، برای اولین بار توسط کندی و ابرهارت [۵۳] 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 [۵۴] 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 گرادیانی مرتبه‌ی اول یا مرتبه‌ی دوم تابع هزینه ندارند. این ویژگی، الگوریتم‌های تکاملی را مناسب برای حلّ مسائل می‌کند، که در آن‌ها تابع هزینه یا قیود مسأله نسبت به متغیّرهای کنترلی مشتق‌پذیر نیستند.

۳-۵ استراتژی الگوریتم بهینه‌سازی گروه ذرات

الگوریتم اجتماع ذرات نیز با یک ماتریس جمعیت تصادفی اولیه، شروع می‌شود. همانند الگوریتم-های بهینه‌سازی تکاملی دیگر نظیر الگوریتم شبیه‌ساز تبرید و یا کلونی مورچه‌ها جستجو بر مبنای یک فرآیند تکراری صورت می‌گیرد. هر عنصر جمعیت، یک **ذره** نامیده می‌شود که به طور تصادفی، مقدار اولیه می‌گیرند. برای هر ذره دو مقدار وضعیت و سرعت، تعریف می‌شود که به ترتیب با یک بردار مکان و یک بردار سرعت، مدل می‌شوند. این ذرات، به‌صورت تکرارشونده‌ای در فضای n بعدی مسأله حرکت می‌کنند تا با محاسبه‌ی مقدار بهینگی به عنوان یک ملاک سنجش، گزینه‌های ممکن جدید را جستجو کنند. بُعد فضای مسأله، برابر تعداد پارامترهای موجود در تابع مورد نظر برای بهینه‌سازی می‌باشد. همچنین برای مدل‌سازی نظم موجود در حرکت جمعی این ذرات دو دیدگاه در نظر گرفته شده است، دیدگاه اول تعاملات اجتماعی موجود بین اعضای گروه است و دیدگاه دوم امتیازات فردی است، که

ممکن است هر یک از اعضای گروه واجد آن‌ها باشند؛ یا به عبارتی یک حافظه به ذخیره‌ی بهترین موقعیت هر ذره در گذشته و یک حافظه به ذخیره‌ی بهترین موقعیت پیش‌آمده در میان همه‌ی ذرات، اختصاص می‌یابد. با تجربه‌ی حاصل از این حافظه‌ها، ذرات تصمیم می‌گیرند که در نوبت بعدی، چگونه حرکت کنند. در بُعد اول همه‌ی اعضای گروه موظف‌اند همواره موقعیت خود را با تبعیت از بهترین فرد گروه تغییر دهند. و در بُعد دوم لازم است تک‌تک اعضا بهترین موقعیت را که شخصاً تجربه کرده‌اند و در حافظه‌ی خود نگهداری کرده و تمایلی نیز به سمت بهترین موقعیت درک شده‌ی گذشته‌ی خود داشته باشند. زیرا ممکن است هر یک از اعضا خود رهبر گروه شوند به طوری که بقیه‌ی اعضا وظیفه‌ی تبعیت از آن‌ها را داشته باشند[۵۵]. در هر بار تکرار، همه‌ی ذرات در فضای n بعدی مسأله حرکت می‌کنند تا بالاخره نقطه‌ی بهینه‌ی سراسری، پیدا شود. در واقع در یک مسأله‌ی N_{var} بعدی، یک ذره یک آرایه سطری با N_{var} درایه است. این آرایه به صورت رابطه‌ی (۳-۱) قابل تعریف می‌باشد. برای شروع الگوریتم، باید تعدادی از این ذرات (تعداد ذرات اولیه‌ی الگوریتم) ایجاد شوند. بنابراین ماتریس کل ذرات به‌صورت تصادفی مطابق رابطه‌ی (۳-۲) تشکیل می‌شوند. همچنین هزینه‌ی یک ذره (C.F.) با ارزیابی تابع f به ازای متغیّرهای $p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_{var}}$ مطابق رابطه‌ی (۳-۳) به دست می‌آید.

$$\text{particle} = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_{var}}] \tag{۳-۱}$$

$$\text{particles} = \begin{bmatrix} \text{particle}_1 \\ \text{particle}_2 \\ \text{particle}_3 \\ \vdots \\ \text{particle}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{1,1}, p_{2,1}, p_{3,1}, \dots, p_{N_{var,1}} \\ p_{1,2}, p_{2,2}, p_{2,3}, \dots, p_{N_{var,2}} \\ p_{1,3}, p_{2,3}, p_{3,3}, \dots, p_{N_{var,3}} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ p_{1,N}, p_{2,N}, p_{3,N}, \dots, p_{N_{var,N}} \end{bmatrix} \tag{۳-۲}$$

$$C.F._i = f(p_1, p_2, p_3, \dots, p_{N_{var}}) \tag{۳-۳}$$

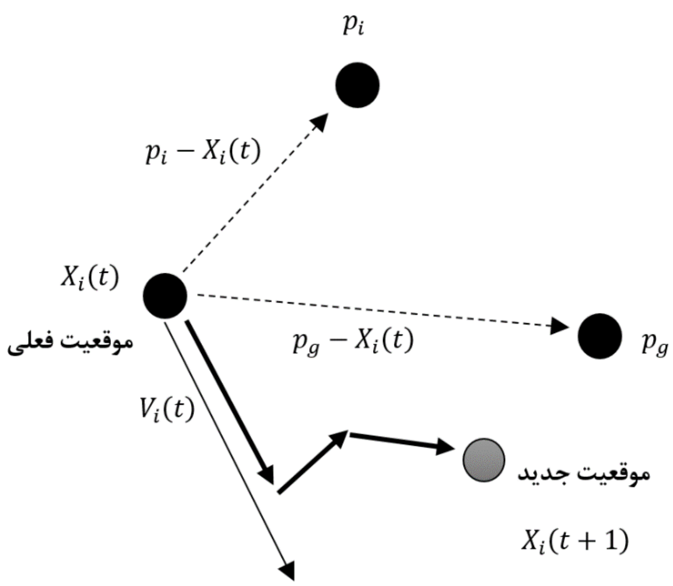
در واقع ذره‌ای که دارای کمترین مقدار هزینه باشد به عنوان بهترین فرد گروه (بهترین تجربه) در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که سرعت هر ذره در تکرار اول به صورت تصادفی مطابق رابطه‌ی (۳-۴) تشکیل می‌گردد.

$$V = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{1,1}, V_{2,1}, V_{3,1}, \dots, V_{N_{var,1}} \\ V_{1,2}, V_{2,2}, V_{2,3}, \dots, V_{N_{var,2}} \\ V_{1,3}, V_{2,3}, V_{3,3}, \dots, V_{N_{var,3}} \\ . \\ . \\ . \\ V_{1,N}, V_{2,N}, V_{3,N}, \dots, V_{N_{var,N}} \end{bmatrix} \quad (۴-۳)$$

در این الگوریتم، ذرات سرعت‌هایشان و موقعیتشان را بر حسب بهترین جواب‌های مطلق و محلّی به‌صورت روابط (۳-۵) و (۳-۶)، مطابق شکل ۳-۱ به‌روز می‌کنند [۵۵].

$$V_i(t+1) = \omega V_i(t) + r_1 c_1 \big(p_i - X_i(t)\big) + r_2 c_2 (p_g - X_i(t)) \quad (۵-۳)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (۶-۳)$$



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

که در آن $V_i(t+1)$ و $X_i(t+1)$ به‌ترتیب سرعت و موقعیت ذره در تکرار جدید می‌باشد. $V_i(t)$ و $X_i(t)$ به‌ترتیب سرعت و موقعیت کنونی ذره، r_1 و r_2 اعداد تصادفی بین بازه‌ی صفر و یک می‌باشند. p_i بهترین عملکرد خود ذره و p_g بهترین موقعیت پیش آمده در میان همه‌ی ذرات می‌باشند. ω، c_1 و c_2 به ترتیب ضریب اینرسی[۱]، ضریب یادگیری شخصی (پارامتر ادراکی[۲]) و ضریب

[۱] Inertia Weight Coefficient

[۲] Cognitive learning Parameter

یادگیری جمعی (پارامتر اجتماعی[1]) می‌باشند. این ضرایب مربوط به پارامترهای ساختاری الگوریتم PSO بوده که نقش مهمی را در همگرایی این الگوریتم ایفا می‌کنند. هر ذره بر اساس بهترین عملکرد خودش مطابق با شرط رابطه‌ی (۳-۷) به‌روز می‌شود. علاوه بر این، به‌روزکردن سرعت و موقعیت بر اساس بهترین موقعیت پیش‌آمده در بین ذرات، با شرط رابطه‌ی (۳-۸) به‌روز می‌شود[۵۶].

$$if\ \ f(X_i) < f(p_i) \qquad then \qquad p_i = X_i \tag{۳-۷}$$
$$if\ f(X_i) < f(p_g) \qquad then \qquad p_g = X_i \tag{۳-۸}$$

از این رو در هر تکرار، هر ذره موقعیتش بر طبق بهترین عملکرد خود ذره و همچنین بر اساس بهترین موقعیت پیش‌آمده در بین کل ذرات تغییر می‌کند. انتخاب مقدار مناسب برای ضرایب c_1 و c_2 منجر به تسریع همگرایی و یافتن بهینه‌ی مطلق و جلوگیری از همگرایی زودرس در بهینه‌های محلّی می‌شود. این الگوریتم، بردار سرعت هر ذره را به‌روز کرده و سپس مقدار سرعت جدید را به موقعیت و یا مقدار ذره می‌افزاید. همان‌طور که مشاهده می‌شود به‌روز کردن‌های سرعت، تحت تأثیر هر دو مقدار بهترین جواب محلّی و بهترین جواب مطلق قرار می‌گیرند. بهترین عملکرد خود ذره و بهترین موقعیت پیش‌آمده در میان همه‌ی ذرات، بهترین جواب‌هایی هستند که تا لحظه‌ی جاری اجرای الگوریتم، به ترتیب توسط یک ذره و در کل جمعیت به‌دست آمده‌اند. در حالت کلی الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات را می‌توان به صورت رابطه‌ی (۳-۹) بیان کرد[۵۶].

Random initialization of the whole swarm;
Repeat
Evaluate $f(X_i)$
For all particle i
Update velocities:
$$V_i(t+1) = \omega V_i(t) + r_1 c_1\big(p_i - X_i(t)\big) + r_2 c_2(p_g - X_i(t)) \tag{۳-۹}$$
move to the new position: $X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1)$
if $f(X_i) < f(p_i)$ *then* $p_i = X_i$
if $f(X_i) < f(p_g)$ *then* $p_g = X_i$
update (X_i, V_i)
end for
until stopping criteria

---
[1] Social learning Parameter

۳-۶ آنالیز الگوریتم و معیار همگرایی

با جایگزین کردن معادلات به‌روز شدن سرعت در معادلات به‌روز شدن موقعیت مطابق روابط (۳-۱۰) و (۳-۱۱) خواهیم داشت.

$$X_i(t+1) = X_i(t) + \omega V_i(t) + r_1 c_1\big(p_i(t) - X_i(t)\big) + r_2 c_2(p_g(t) - X_i(t)) \quad (۳\text{-}۱۰)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + \omega V_i(t) + (r_1 c_1 + r_2 c_2)(\frac{r_1 c_1 p_i(t) + r_2 c_2 p_g(t)}{r_1 c_1 + r_2 c_2} - X_i(t)) \quad (۳\text{-}۱۱)$$

ملاحظه می‌شود که معادلات بالا دارای ساختار یکسانی به‌صورت جستجوی خطی گرادیانی[۱] مورد استفاده در بهینه‌سازی بدون قید محدبی[۲] ($X_i(t+1) = \bar{x}_i(t) + c\bar{p}_k$) هستند، که در آن مطابق روابط (۳-۱۲) تا (۳-۱۴) خواهیم داشت [۵۷].

$$\bar{x}_i(t) = X_i(t) + \omega V_i(t) \quad (۳\text{-}۱۲)$$

$$c = r_1 c_1 + r_2 c_2 \quad (۳\text{-}۱۳)$$

$$\bar{p}_k = \frac{r_1 c_1 p_i(t) + r_2 c_2 p_g(t)}{r_1 c_1 + r_2 c_2} - X_i(t) \quad (۳\text{-}۱۴)$$

بنابراین رفتار هر ذره در اجتماع می‌تواند به عنوان یک روش جستجوی خطی عادی[۳] وابسته به اندازه‌ی گام تصادفی[۴] (c) و جهت جستجوی تصادفی[۵] ($\bar{p}_k$) بیان شود. همانطور که مشخص است انتخاب هر دو پارامتر c و $\bar{p}_k$ وابسته به ضرایب c_1 و c_2 می‌باشد. بعلاوه رفتار جهت جستجوی تصادفی وابسته به بهترین موقعیت فضای طراحی پیدا شده توسط هر ذره (p_i) و همچنین به‌وسیله‌ی اجتماع کل ذرات (p_g) است. می‌دانیم که $r_1, r_2 \in [۰,۱]$، بنابراین اندازه‌ی گام در محدوده‌ی $[۰, c_1 + c_2]$ با مقدار متوسط $\frac{c_1+c_2}{2}$ خواهد بود؛ و به طور مشابه جهت جستجوی تصادفی در بازه‌ی $[-X_i(t), \frac{c_1 . p_i(t) + c_2 . p_g(t)}{c_1+c_2} - X_i(t)]$ خواهد بود. حال دو سؤال ممکن است از تحلیل بالا به‌وجود آید؛

---

۱ Gradient Line-search

۲ Convex Unconstrained Optimization

۳ Traditional Line-search

۴ Stochastic Step Size

۵ Stochastic Search Direction

اولین سؤال اینکه چه نوع رفتار همگرایی را برای الگوریتم خواهیم داشت؟ و دوم اینکه مقادیر پارامترهای c_1 و c_2 را چه مقداری بگیریم تا همگرایی را تضمین کند. برای پاسخ به این سؤال‌ها اجازه دهید تا با مرتب کردن معادله‌ی موقعیت و همچنین معادله‌ی سرعت مطابق روابط (۳-۱۵) و (۳-۱۶) به یک فرم کلی برای ذره در تکرار جدید برسیم.

$$X_i(t+1) = X_i(t)(1 - r_1c_1 - r_2c_2) + \omega V_i(t) + r_1c_1p_i(t) + r_2c_2p_g(t) \tag{۳-۱۵}$$

$$V_i(t+1) = -X_i(t)(r_1c_1 + r_1c_2) + \omega V_i(t) + r_1c_1p_i(t) + r_2c_2p_g(t) \tag{۳-۱۶}$$

با ترکیب معادلات (۳-۱۵) و (۳-۱۶) و بیان آن به صورت ماتریسی مطابق رابطه‌ی (۳-۱۷) خواهیم داشت [۵۷].

$$\begin{bmatrix} X_i(t+1) \\ V_i(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - r_1c_1 - r_2c_2 & \omega \\ -(r_1c_1 + r_2c_2) & \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i(t) \\ V_i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1c_1 & r_2c_2 \\ r_1c_1 & r_2c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_i(t) \\ p_g(t) \end{bmatrix} \tag{۳-۱۷}$$

در اینجا یک سیستم دینامیکی گسسته[۱] برای الگوریتم PSO محاسبه گردیده است. که در آن $\begin{bmatrix} X_i(t) \\ V_i(t) \end{bmatrix}$ بیانگر حالتی است که در ارتباط با ورودی خارجی[۲] $\begin{bmatrix} p_i(t) \\ p_g(t) \end{bmatrix}$ می‌باشد؛ و اولین و دومین ماتریس ضرایب به‌ترتیب بیانگر ماتریس دینامیکی[۳] و ماتریس ورودی[۴] می‌باشند. اگر برای یک ذره ورودی خارجی ثابت فرض شود؛ (زمانی که هیچ فرد یا موقعیت بهتر اشتراکی یافت نشود) در این حالت رفتار همگرایی می‌تواند برقرار باشد، با شرط اینکه هیچ آشفتگی در سیستم دینامیکی وجود نداشته باشد. به عبارتی دیگر با افزایش تکرارها به سمت بی‌نهایت سرعت و موقعیت به‌روز شده یکنواخت خواهد شد و از k^{th} به k^{th+1} سیستم به صورت رابطه‌ی (۳-۱۸) کاهش یابد[۵۷].

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(r_1c_1 + r_2c_2) & \omega \\ -(r_1c_1 + r_2c_2) & \omega - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i(t) \\ V_i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1c_1 & r_2c_2 \\ r_1c_1 & r_2c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_i(t) \\ p_g(t) \end{bmatrix} \tag{۳-۱۸}$$

رابطه‌ی بالا در صورتی صحیح خواهد بود که هر دو پارامتر $X_i(t)$ و $p_i(t)$ بر $p_g(t)$ منطبق

---

۱ Discrete-dynamic System

۲ External Input

۳ Dynamic Matrix

۴ Input Matrix

شـوند. بنابراین در اینجا یک نقطه‌ی تعادل برای متمایل شدن ذرات به سمت همگرایی به صورت یک فرآیند تکراری خواهیم داشـــت. حال با در نظر گرفتن دوباره‌ی روابط (۳-۵) و (۳-۶) مطابق رابطه‌ی (۳-۱۹) خواهیم داشت [۵۵].

$$\begin{cases} c = r_1c_1 + r_2c_2 \\ P = \frac{r_1c_1p_i + r_2c_2p_g}{r_1c_1 + r_2c_2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_i(t+1) = \omega V_i(t) + c(P - X_i(t)) \\ X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \end{cases} \quad (۳-۱۹)$$

هـدف اصـــلی این اســـت کـه ببینیم در چه مدّت طولانی P ثابت رخ می‌دهد. بنابراین با فرض Y=P-X و نوشتن آن به فرم ماتریس، سیستم به صورت رابطه‌ی (۳-۲۰) خواهد شد.

$$\begin{Bmatrix} V_i(t+1) \\ Y_i(t+1) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega & c \\ -\omega & 1-c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_i(t) \\ Y_i(t) \end{Bmatrix} = C \begin{Bmatrix} V_i(t) \\ Y_i(t) \end{Bmatrix} \quad (۳-۲۰)$$

ما در حال حاضر یک سیستم عادی دینامیکی[۱] داریم، که رفتارش به طور کامل وابسته به مقادیر ویژه‌ی ماتریس C اســت. پایداری و رفتار دینامیکی ســیســـتم با بدســت آوردن مقادیر ویژه از ماتریس دینامیکی ارائه شده در رابطه‌ی (۳-۲۰) مطابق روابط (۳-۲۱) و (۳-۲۲) بدست می‌آید.

$$\begin{vmatrix} \omega - \lambda & c \\ -\omega & 1 - c - \lambda \end{vmatrix} = \lambda^2 + (c - \omega - 1)\lambda + \omega = 0 \quad (۳-۲۱)$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{1 + \omega - r_1c_1 - r_2c_2 \pm \sqrt{(1 + \omega - r_1c_1 - r_2c_2)^2 - 4\omega}}{2} \quad (۳-۲۲)$$

اجازه دهید یادآور شویم، که در اینجا همگرایی به این معناست که ذرات تمایل به حرکت به سمت موقعیتی پایدار دارند (تمایل سرعت به صفر شدن)، و هیچ تضمینی هم وجود ندارد که این موقعیت همان موقعیت بهینه‌ی مطلوب است. در واقع این فقط بستگی به تعاملات (روابط) بین ذرات دارد، که به طور قابل توجهی امکان دارد افزایش شانس را در یک مورد بالا ببرد [۵۵].

یک شـرط لازم و کافی برای پایداری سیستم می‌تواند این باشد که مقادیر ویژه‌ی بدست آمده از ماتریس دینامیکی در داخل دایره‌ای به شـعاع واحد در یک صفحه‌ی مختلط[۲] ($|\lambda_{i=1,\dots,n}| < 1$) قرار بگیرنـد. (یـا به عبارتی مقادیر ویژه‌ی ماتریس دو عدد مختلط با مدول (قدر مطلق) کمتر از یک یا دو

[۱] Traditional Dynamic System

[۲] Complex Plane

عدد حقیقی با مقادیر مطلق[1] کمتر از یک باشند). بنابراین همگرایی برای الگوریتم در صورتی تضمین داده خواهد شد که مجموعه‌ی رابطه‌ی (۳-۲۳) را برای شرایط پایداری داشته باشیم [۵۷].

$$r_1c_1 + r_2c_2 > 0 \ , \qquad \frac{r_1c_1 + r_2c_2}{2} - \omega < 1 \ , \quad \omega < 1 \qquad (۲۳\text{-}۳)$$

براین اساس روابط بالا که در آن پارامترهای ابتکاری تضمین همگرایی را برای الگوریتم PSO دارند به صورت رابطه‌ی (۳-۲۴) خواهد شد[۵۷].

$$0 < c_1 + c_2 < 4 \quad , \quad \frac{c_1 + c_2}{2} - 1 < \omega < 1 \qquad (۲۴\text{-}۳)$$

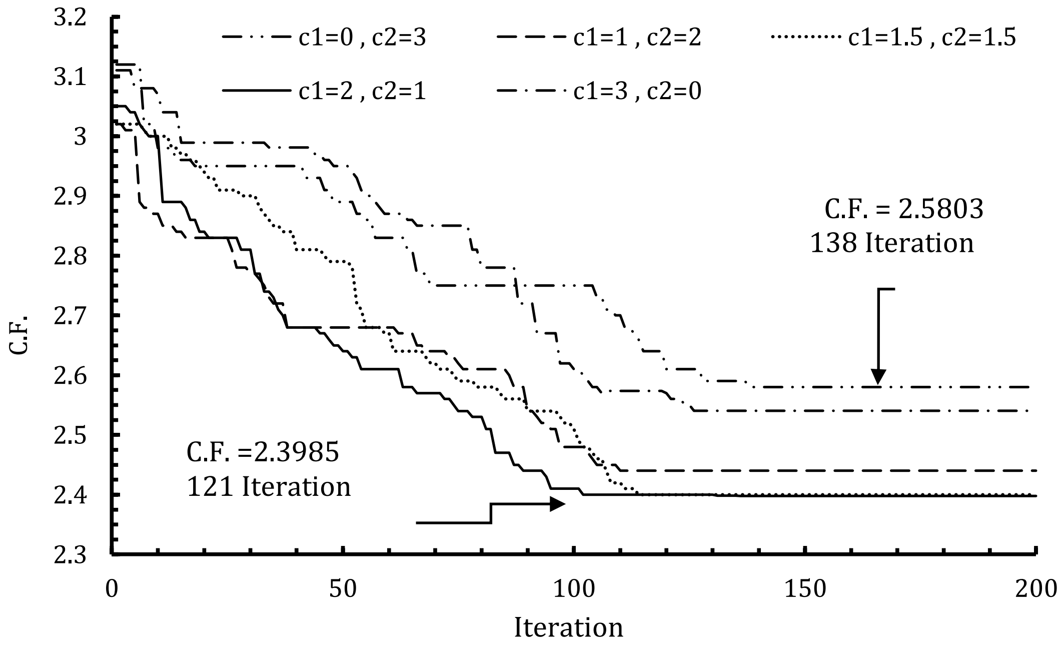
همانطور که در رابطه‌ی بالا مشاهده شد باید یک ارتباطی بین مقادیر c_1، c_2 و ω وجود داشته باشد، تا رسیدن به جواب بهینه را تضمین کند. چون در غیر این صورت یک امکان وجود دارد که ذرات بر اثر یک سری از رفتارها واگرا شوند. بنابراین در هر مسأله‌ی بهینه‌سازی، آنالیز تأثیر پارامترهای مختلف به منظور تعیین حساسیت این چنین پارامترها در روش بهینه‌سازی کلی امری ضروری می‌باشد.

۳-۶-۱ تعیین ضرایب سرعت

c_1 و c_2 با ضرایب r_1 و r_2 در مؤلفه‌های اجتماعی و شناختی سرعت ذره نقش بسیار زیادی را در راندمان ذره دارند. اگر $c_1 = c_2 = ۰$ باشد، ذرات فقط با سرعت خاصی بدون هدف در فضا حرکت می‌کنند، و آنقدر حرکت می‌نمایند تا به مرز فضای جستجو برسند. اگر $c_2 = ۰$ و $c_1 > ۰$ باشد، آنگاه ذرات فقط به تجربه‌ی قبلی خود توجه می‌نمایند و اگر $c_1 = ۰$ و $c_2 > ۰$ باشد، ذرات فقط به بهترین فرد گروه توجه می‌نمایند. معمولاً در بسیاری از الگوریتم‌ها c_1 و c_2 را ثابت در نظر می‌گیرند. با توجه به شکل ۳-۲ که نمودار همگرایی را برای ماده‌ی Glass/Epoxy و گشودگی چهارضلعی با در نظر گرفتن چهار پارامتر انحنای گشودگی، زاویه‌ی الیاف، زاویه‌ی بار و زاویه‌ی چرخش گشودگی به عنوان

[1] Absolute Values

متغیّر طراحی نشان می‌دهد، می‌توان مشاهده کرد که وقتی فقط c_2 را در نظر بگیریم و $c_1 = ۰$ باشد، الگوریتم به بهینه‌ی محلّی در ۲۰۰ تکرار (Iteration) همگرا شده است. همچنین می‌توان این قضیه را فهمید که با تأکید بر روی افزایش پارامتر c_1 و کاهش پارامتر c_2 حلّ‌های بهتری در تکرارهای مشخص شده به‌دست خواهد آمد. این نتایج به این دلیل می‌تواند باشد که ذرات بیشتر بر روی جستجوی خودشان متمرکز شده، بنابراین از جهش اضافه و دور شدن از مناطق فضای دارای طراحی بهتر جلوگیری می‌شود. با این حال میزان افزایش اکتشاف محلّی باید در محدوده‌ی کافی باشد، به طوری که همانطور که در این شکل نشان داده شده با در نظر گرفتن $c_2 = ۰$ و $c_1 = ۳$ الگوریتم دوباره در بهینه‌ی محلّی به دام افتاده است.



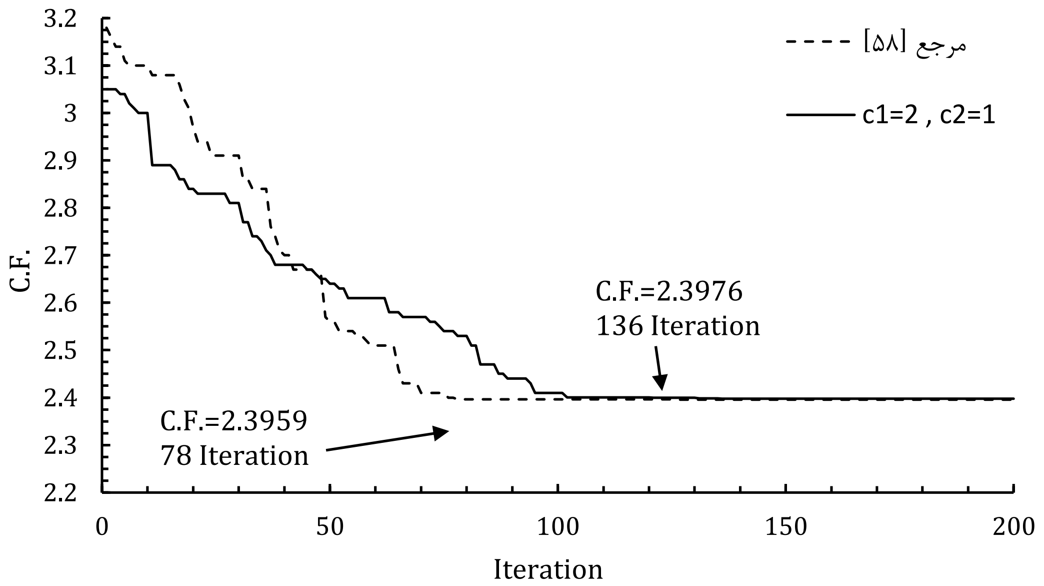
شکل ۳-۲ تأثیر تغییرات ضرایب c_1 و c_2

در مرجع [۵۸] 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 شخصی (محلّی) ذرات در فضای جستجو در ابتدای الگوریتم تاکید دارد. و در انتهای الگوریتم به جستجوی عمومی (سراسری) ذرات اهمیت داده و ذرات به سمت بهترین موقعیت ملاقات شده‌ی گروه جذب می‌شوند. در این استراتژی پارامترها به‌صورت روابط (۳-۲۵) و (۳-۲۶) به روز می‌گردند.

$$c_1(t) = (c_{1,f} - c_{1,i})\frac{iter}{maxiter} + c_{1,i} \tag{۲۵-۳}$$

$$c_2(t) = (c_{2,f} - c_{2,i})\frac{iter}{maxiter} + c_{2,i} \tag{۲۶-۳}$$

که در آن $iter$ برابر شماره‌ی تکرار فعلی ذره و $maxiter$ شماره‌ی بیشترین تکرار مجاز می‌باشد. $c_{1,f}$ ، $c_{2,f}$، $c_{1,i}$ و $c_{2,i}$ مقادیر ثابتی می‌باشند. بر این اساس شکل ۳-۳ روش‌های به‌روز کردن ضرایب c_1 و c_2 را با استفاده از روش ذکر شده در مرجع [۵۸] در مقابل ضرایب ثابت c_1 و c_2 برای ماده‌ی Glass/Epoxy و گشودگی چهارضلعی با در نظر گرفتن هر چهار متغیّر طراحی انحنای گشودگی، زاویه‌ی الیاف، زاویه‌ی بار و زاویه‌ی چرخش گشودگی (شرایط قبلی) نشان می‌دهد. تمام حالات برای ω=۰/۶۵ و به ازای یک جمعیت ثابت بررسی شده‌اند. با توجه به نمودار واضح است که تأثیر به‌روز کردن ضرایب c_1 و c_2 با استفاده از روش ذکر شده در مرجع [۵۸] در مقابل ضرایب ثابت c_1 و c_2 نرخ همگرایی سریع‌تری دارد.

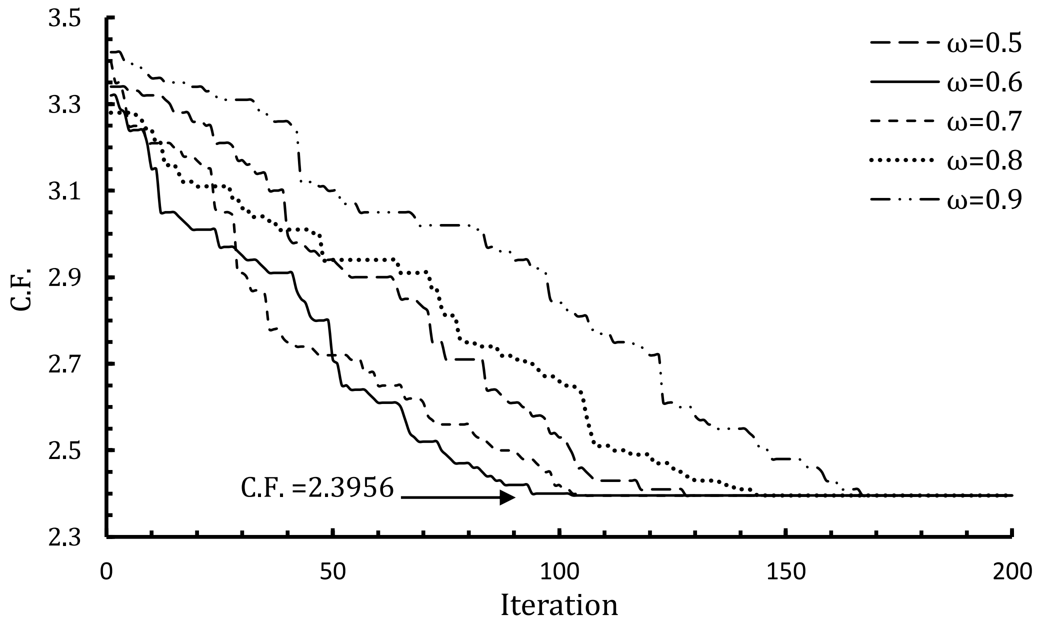


شکل ۳-۳ مقایسه همگرایی در ضرایب ثابت و کاهش خطی

۳-۶-۲ تعیین ضریب اینرسی

این ضریب در واقع به نوعی حافظه‌ی پیشین هر عضو را تبیین می‌کند یا به عبارتی درصدی از سرعت قبلی ذره را در محاسبه‌ی سرعت جدید تأثیر می‌دهد تا قدرت اکتشاف دسته‌ی ذرات را به

عنوان مقیاسی در مقدار سرعت فعلی تأثیرگذار بر بردار سرعت به روزشده کنترل کند. به روش مشابهی مطابق تحلیل بالا برای ضرایب c_1 و c_2، با در نظر گرفتن همان شرایط قبلی برای یک حالت خاص از مسأله، شکل ۳-۴ تأثیر تغییرات ضریب اینرسی ثابت را در محدوده‌ی به‌دست آمده نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص می‌باشد که با کنترل این ضریب در بازه‌ی ۰/۶ تا ۰/۷ نرخ همگرایی سریعتری اتّفاق خواهد افتاد. به عبارتی انتخاب این بازه برای ضریب اینرسی، جنبش هر ذره را از متمایل شدن به جهت‌های خاص در فضای جستجو کنترل می‌کند. باید یادآور این نکته شد که در این مرحله انتخاب صحیح پارامترهای PSO به طور کامل بستگی به مسأله‌ی مورد بررسی دارد. با این حال، نتایج به‌دست آمده برای مسأله‌ی ما انتظار ما را از تحلیل تئوری الگوریتم PSO و تعیین صحیح پارامترهای آن تأمین می‌کند. به طور کلی مقادیر بزرگ ضریب اینرسی باعث به‌روز شدن سرعت‌های بزرگتر شده و اجازه می‌دهد تا الگوریتم به کشف فضای طراحی سراسری بپردازد.



شکل ۳-۴ بررسی تغییرات ضریب اینرسی

در مقابل مقادیر کوچک ضریب اینرسی باعث می‌شود تا به روز شدن سرعت در مناطق نزدیک فضای طراحی متمرکز شود. الگوریتم بهینه‌سازی خوب است که تعادلی را بین این دو گونه‌ی جستجو برقرار نماید. بنابراین بهتر است اثر این ضریب طوری وارد معادلات شود تا در تکرارهای آخر، ذره بیشتر

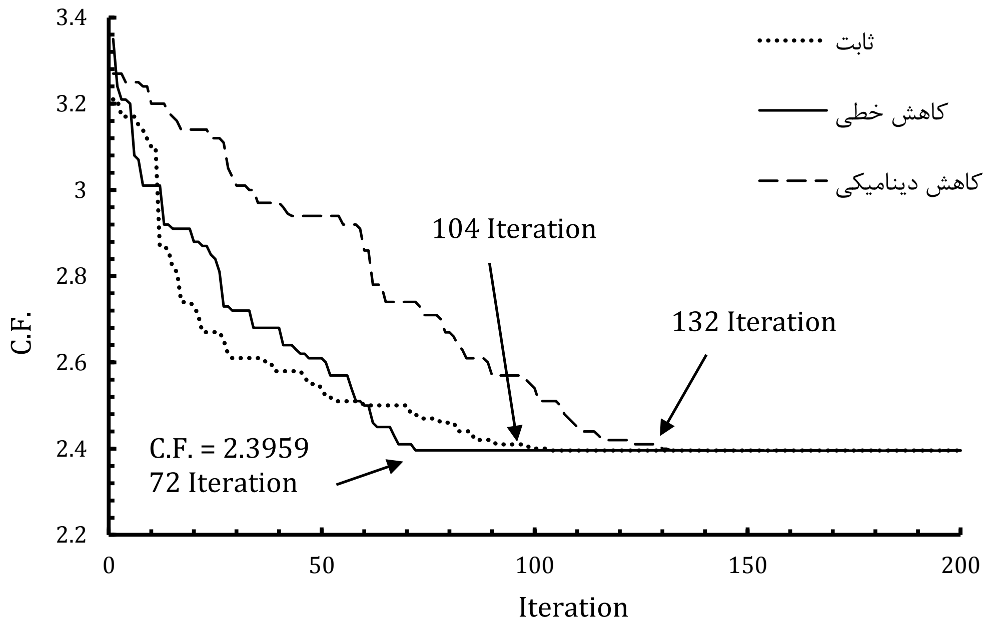
تمـایل حرکت به ســـمت بهترین عملکرد خود و بهترین موقعیت پیش آمده در میان همه‌ی ذرات را داشــته باشد. در بعضی از مراجع دیده شده که این ضریب را به صورت کاهشی(خطی) در هر تکرار، و به صورت رابطه‌ی (۳-۲۷) در نظر می‌گیرند [۵۸].

$$\omega = (\omega_i - \omega_f)\left(\frac{maxiter - iter}{maxiter}\right) + \omega_f \qquad (۳-۲۷)$$

که در آن ω_i و ω_f به ترتیب مقادیر اولیه و نهایی ضـریب وزنی می‌باشــند. $iter$ برابر شــماره‌ی تکرار فعلی ذره و $maxiter$ شماره‌ی بیشترین تکرار می‌باشد. شی و ابرهارت [۵۹] مشاهده کردند که پاسخ بهینه می‌تواند با تغییر دادن مقدار ضریب اینرسی از ۰/۹ تا ۰/۴ بهبود یابد. در رهیافتی، می‌توان ضریب اینرسی را به طور دینامیکی کاهش داد؛ این امر باعث می‌شود که ذره در فضای طراحی، بیشتر جستجوی عمومی داشته باشد. در مرجع[۶۰] از رابطه‌ی (۳-۲۸) جهت کاهش دینامیکی ضریب وزنی استفاده شده است.

$$\omega(t+1) = \bar{\xi}\omega(t)\,, \qquad \bar{\xi} \in [0,1] \qquad (۳-۲۸)$$

شکل ۳-۵ روش‌های به روزکردن ضریب وزنی با استفاده از روش‌های ذکر شده در مقابل ضریب اینرســی ثابت را برای ماده‌ی Glass/Epoxy و گشـودگی چهارضـلعی با در نظر گرفتن همان شرایط قبلی برای متغیّرهای طراحی نشـان می‌دهد. در حالت ضـریب ثابت مقدار ضریب اینرسی ω=۰/۶۵ و برای حالت کاهش دینامیکی ۰/۹۷۵= $\bar{\xi}$ استفاده شده است. در تمام حالات c_1 و c_2 ثابت و برابر ۱/۵ در نظر گرفته شده‌اند. همچنین نتایج برای یک جمعیت ثابت بررسی شده‌اند. با توجه به نمودار واضح اســـت که تأثیر به‌روز کردن ضــــریب وزنی به روش کاهش خطی از دو روش دیگر در حالت کلی نرخ همگرایی سریع‌تری دارد.

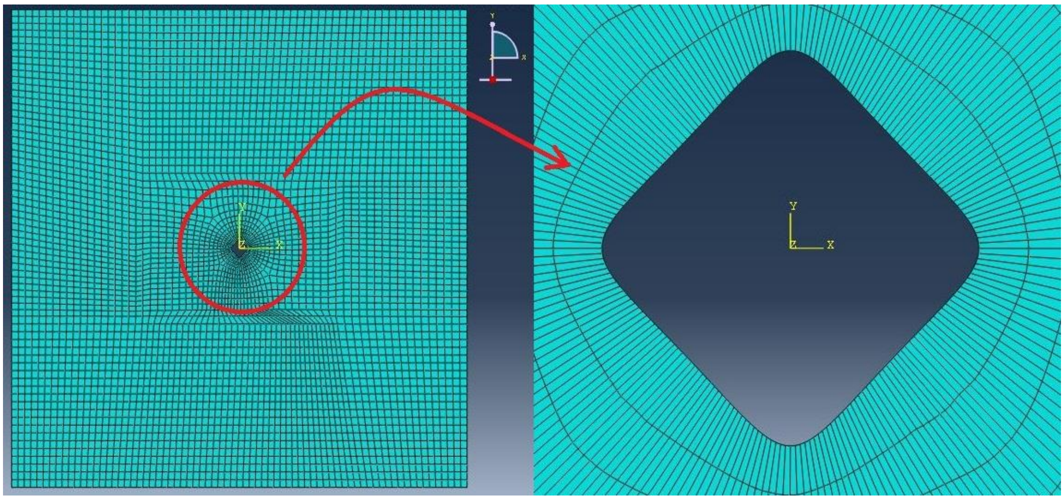


شکل ۳-۵ تأثیر استراتژی به‌روز کردن ضرایب وزنی مختلف

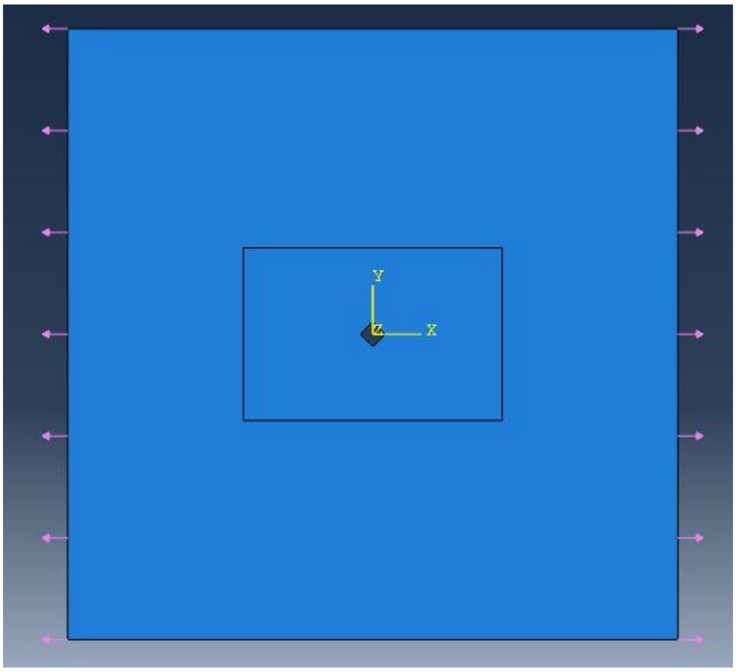
۳-۷ بررسی درستی نتایج

برای بررسی نتایج حاصل از روش تحلیلی حاضر، از روش اجزای محدود (نرم افزار آباکوس) کمک گرفته شده است. بدین منظور ابتدا یک خروجی از کد برنامه‌ی بهینه‌سازی نوشته شده در متلب برای تعیین مقادیر بهینه‌ی یک گشودگی خاص گرفته شده است. سپس مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مختلف که از این روش به‌دست آمده عیناً وارد نرم افزار آباکوس گردید تا هندسه‌ی گشودگی کاملاً مطابق با حلّ تحلیلی حاضر باشد. به منظور تعیین تعداد شبکه‌ی بهینه، ناحیه‌ی اطراف گشودگی با اندازه‌های مختلف شبکه‌بندی مطالعه شد. در این ناحیه تعداد المان‌ها از ۴۰ تا ۱۸۰ عدد افزایش داده شد و مشاهده گردید از این عدد به بعد با افزایش تعداد المان‌ها نتایج تقریباً ثابت می‌ماند. بنابراین این تعداد المان‌ها به عنوان تعداد المان شبکه‌ی بهینه در نظر گرفته شد و نتایج در این حالت به‌دست آمد. نحوه‌ی مش‌بندی و اعمال بارگذاری در شکل ۳-۶ و شکل ۳-۷ نشان داده شده است. به‌منظور کاهش زمان حل و حجم محاسبات، مش‌بندی در اطراف گشودگی ریزتر از نقاط دور از گشودگی صورت گرفته است. بر این اساس شکل ۳-۸ مقادیر تابع هزینه حول گشودگی چهارضلعی برای ماده‌ی همسانگرد با در نظر گرفتن همزمان سه متغیّر طراحی انحنای گشودگی، زاویه‌ی بار و زاویه‌ی چرخش در حالت بهینه شده

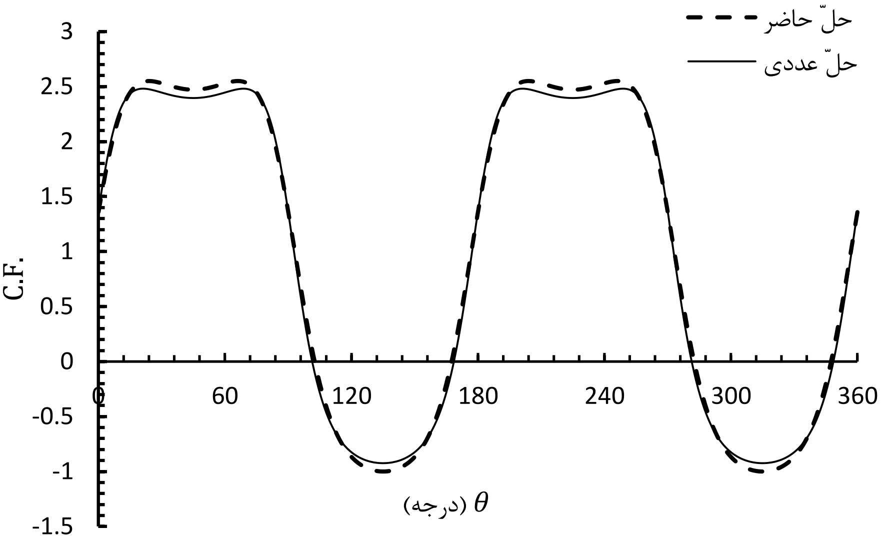
($|\alpha-\beta|$ =۱۳۵° ، w=۰/۰۵۱) حاصل از روش بهینه‌سازی و مقایسه‌ی آن با حلّ عددی را نشان می‌دهد. زاویه‌ی θ، زاویه‌ی نقاط روی مرز گشودگی را نسبت به محور افقی مشخص می‌کند. همچنین شکل ۳-۹ نتایج حاصل از روش بهینه‌سازی و مقایسه‌ی آن با حلّ عددی را برای همین گشودگی در انحناهای مختلف برای یک حالت بهینه‌ی به‌دست‌آمده ($|\alpha-\beta|$ =۱۳۵°) نشان می‌دهد.



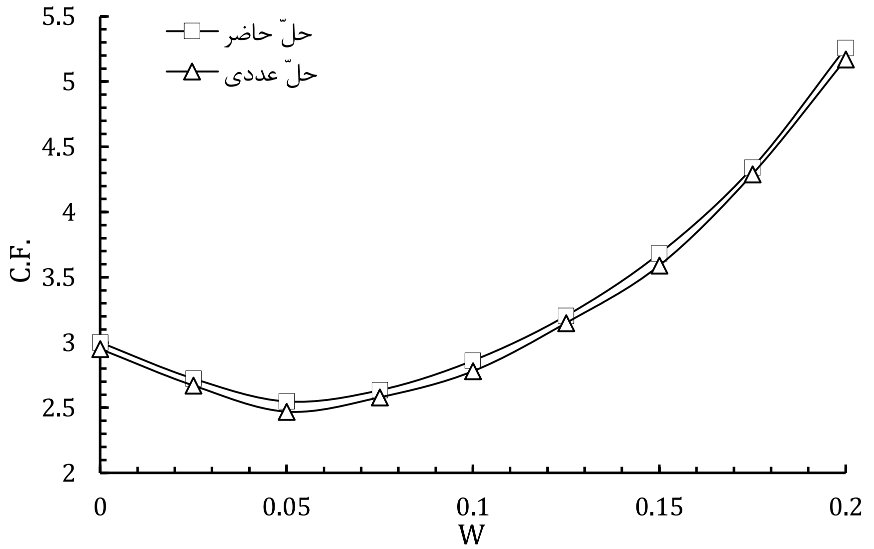
شکل ۳-۶ نحوه مش‌بندی در نرم افزار اجزای محدود



شکل ۳-۷ نحوه‌ی بارگذاری در نرم‌افزار اجزای محدود



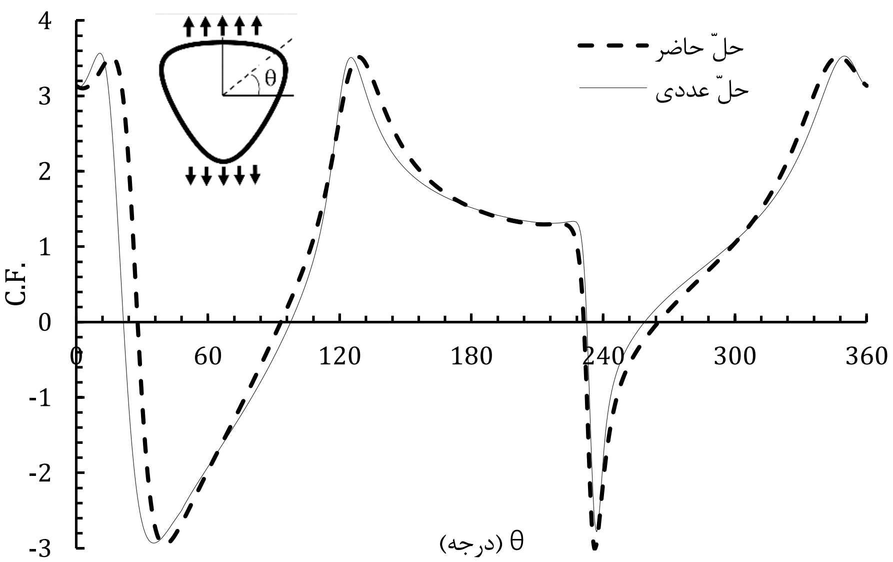
شکل ۳-۸ مقایسه‌ی حلّ المان محدود و حلّ حاضر برای گشودگی چهارضلعی



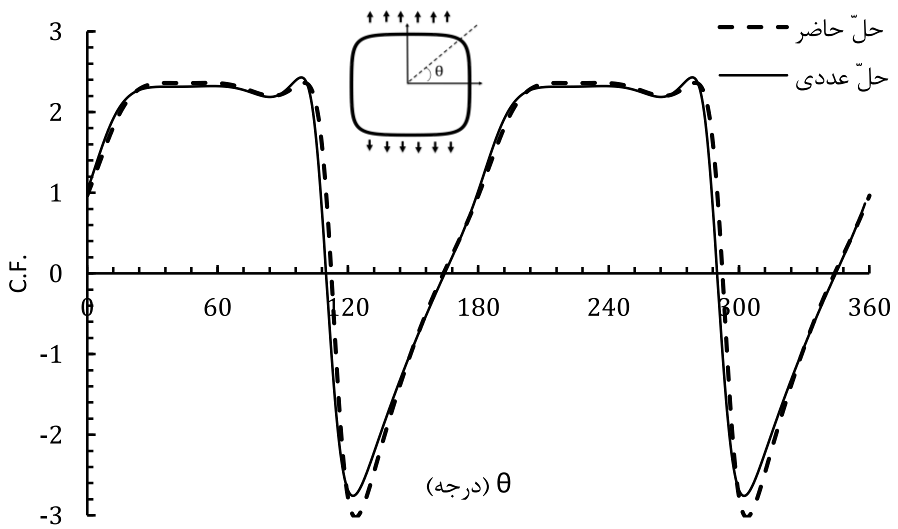
شکل ۳-۹ مقایسه‌ی حلّ المان محدود و حلّ حاضر در حالت $|\alpha - \beta| = 135°$

همپوشانی این دو روش، نشان دهنده‌ی اعتبار و درستی جواب‌های ارائه شده در این تحقیق می‌باشد. علاوه بر این همان‌طور که می‌دانیم تمرکز تنش در مواد همسانگرد مستقل از جنس ماده بوده و برای صفحه‌ی نامحدود حاوی گشودگی دایره‌ای تحت بار کشش تک‌محوری این مقدار برابر ۳ می‌باشد. که مطابق شکل ۳-۹ در حالتی که $w = 0$ می‌باشد (گشودگی دایره‌ای)، درستی این مطلب تأیید می‌شود. شکل ۳-۱۰ مقایسه‌ی نتایج حاصل از روش حلّ حاضر و حلّ عددی را برای گشودگی

سه‌ضلعی در صفحه‌ای از جنس Boron/Epoxy بادرنظرگرفتن مقادیر بهینه‌ی به‌دست آمده از اجرای برنامه (γ=۲۰/۴ β=۱۵۷ α=۹۰) نشان می‌دهد. همچنین مقایسه‌ی نتایج حاصل از روش حلّ حاضر و حلّ عددی برای گشودگی چهارضلعی در صفحه‌ای از جنس Boron/Epoxy با درنظرگرفتن مقادیر بهینه (γ=۱۸/۸ w=۰/۰۴۳۵ β=۵۲/۱ α=۹۰) در شکل ۳-۱۱ نشان نشان داده شده است. همپوشانی این دو روش، نشان دهنده اعتبار و درستی حلّ تحلیلی حاضر می‌باشد.



شکل ۳-۱۰ مقایسه‌ی حلّ المان محدود و حلّ حاضر در w=۰/۱۵ برای گشودگی سه‌ضلعی



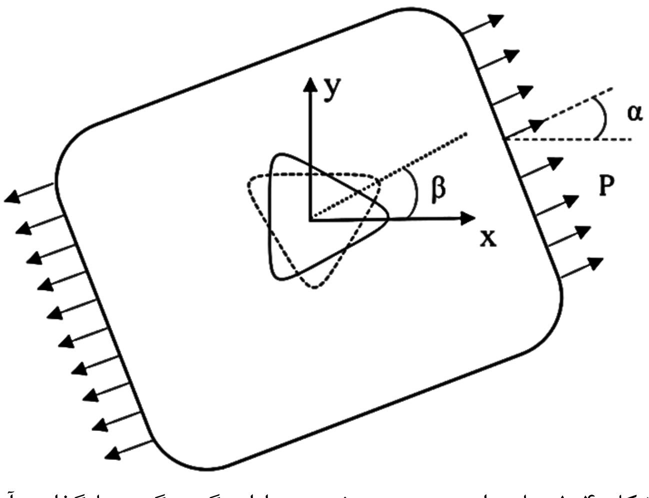
شکل ۳-۱۱ مقایسه‌ی حلّ المان محدود و حلّ حاضر برای گشودگی چهارضلعی

فصل ۴:   نتایج بهینه در صفحات حاوی گشودگی از جنس مواد همسانگرد

۴-۱ مقدمه

پارامترهای متعددی از جمله شکل گشودگی، جهت‌گیری گشودگی، زاویه‌ی بار و شعاع انحنای گوشه‌ی گشودگی بر توزیع تنش اطراف گشودگی واقع در صفحه‌ی همسانگرد نامحدود که تحت بارگذاری قرار می‌گیرد، تأثیرگذار است. در این تحقیق با تکیه بر حلّ تحلیلی لخنتیسکی و بسط این حلّ به سایر گشودگی‌های منظم هندسی و ترکیب آن با الگوریتم بهینه‌سازیPSO سعی شده است تا با استفاده از این الگوریتم بهینه‌ساز، مقادیر بهینه‌ی پارامترهای فوق جهت دستیابی به کمترین تنش ممکن در اطراف گشودگی معرفی گردد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، کمینه کردن مقدار تنش بی‌بعد در اطراف گشودگی به عنوان تابع هزینه (C.F.) برای این الگوریتم درنظر گرفته شده است و تنش بی‌بعد به صورت بیشترین تنش ایجاد شده در اطراف گشودگی به تنش اعمالی تعریف می‌شود.

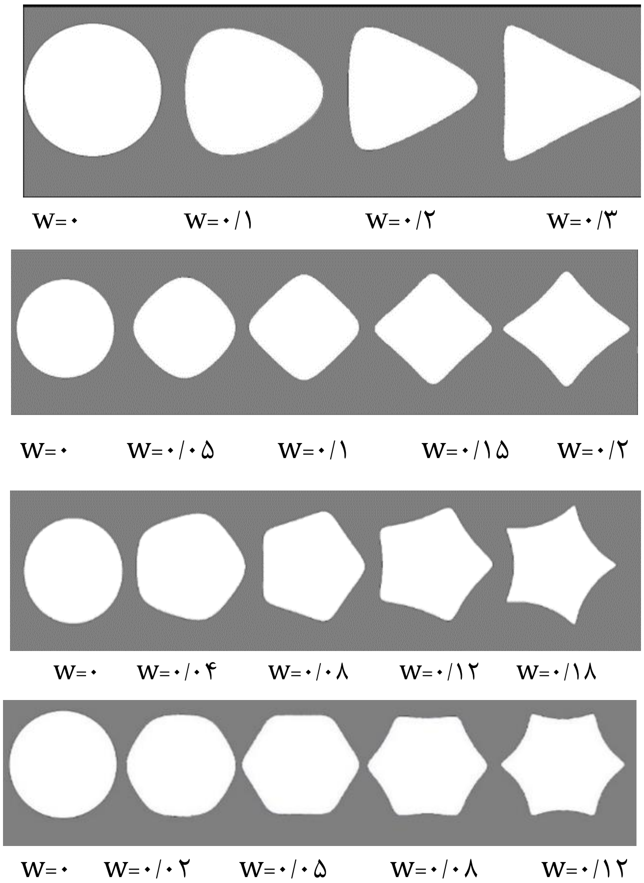
مسأله‌ی مورد بررسی در این فصل صفحه‌ای همسانگرد نامحدود حاوی گشودگی می‌باشد. این صفحه مطابق شکل ۴-۱ (برای مثال صفحه حاوی گشودگی شبه‌مثلثی) تحت بارگذاری کشش تک‌محوری با زاویه‌ی α نسبت به محور x و زاویه‌ی چرخش گشودگی با β که بیانگر نحوه‌ی قرارگیری آن نسبت به افق است، نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱ نمایی از هندسه‌ی صفحه‌ی دارای گشودگی و بارگذاری آن

همچنین شکل ۴-۲ تأثیر پارامتر w بر شعاع انحنای گوشه‌های گشودگی‌های مختلف را نشان می‌دهد. با کاهش w، شعاع انحنای گوشه‌های گشودگی مطابق آنچه در شکل می‌بینید، افزایش می‌یابد

تا در نهایت در w=۰ شــکل گشــودگی به دایره تبدیل می‌شــود. در این فصــل نتایج بهینه مربوط به گشودگی‌های مختلف در صفحه‌ای از جنس ماده‌ی همسانگرد برای دو بارگذاری کشش تک‌محوری و برشــی ارائه شــده اســت. همچنین از آنجایی که تمرکز تنش در صـفحات همســانگرد حاوی گشودگی مســتقل از جنس و خواص مکانیکی ماده می‌باشــد؛ بنابراین نتایج ارائه شــده در این بخش را می‌توان برای صفحات همسانگرد از سایر جنس‌ها نیز استفاده کرد.



شکل ۴-۲ تأثیر پارامتر w برگوشه‌های گشودگی‌های مختلف

بر این اساس مشخصات ماده‌ی همسانگرد به کار رفته در این تحقیق مطابق جدول ۴-۱ می‌باشد.

در تمام گشودگی‌ها ($\lambda = c = ۱$) در نظر گرفته شده است و حالت بهینه‌ی متغیّرهای حاکم بر مسأله جهت دستیابی به کمترین مقدار تابع هزینه معرفی می‌گردد.

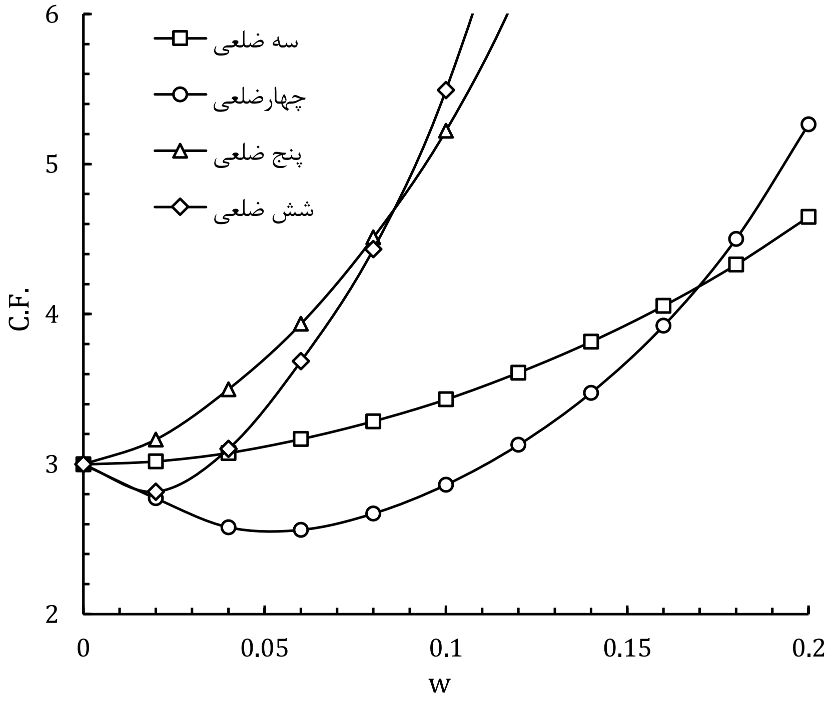
جدول ۴-۱ خواص ماده‌ی به کار رفته در صفحه‌ی همسانگرد حاوی گشودگی[۲۴]

ماده	ν	G(GPa)	E(GPa)
فولاد	۰/۳	۷۹/۳	۲۰۷

۴-۲ نتایج بهینه به ازای بارگذاری کشش تک‌محوری

شکل ۴-۳ تغییرات مقادیر تابع هزینه برحسب انحنای گشودگی را برای گشودگی‌های مختلف نشان می‌دهد. در واقع در این شکل به بررسی تغییرات تابع هزینه بر حسب انحنای گشودگی در زاویه‌ی چرخش و زاویه‌ی بار بهینه، حاصل از الگوریتم PSO پرداخته شده است؛ مقادیر بهینه‌ی زاویه‌ی بار و زاویه‌ی چرخش مربوط به هر گشودگی در ادامه در جداول مربوطه آورده شده است.

جدول ۴-۲ نتایج بهینه‌ی مربوط به گشودگی سه‌ضلعی را نشان می‌دهد. برای هر گشودگی ابتدا فرآیند بهینه‌سازی به ازای سه متغیّر طراحی یعنی انحنای گشودگی، زاویه‌ی بار و زاویه‌ی چرخش صورت می‌گیرد تا مقدار بهینه‌ی انحنای گشودگی در زوایای بار و چرخش بهینه مشخص شود؛ همانطور که قابل مشاهده می‌باشد برای گشودگی سه‌ضلعی در w=۰ که بیان کننده‌ی گشودگی دایروی می‌باشد کمترین مقدار تابع هزینه را خواهیم داشت که این مقدار برابر ۳ می‌باشد.

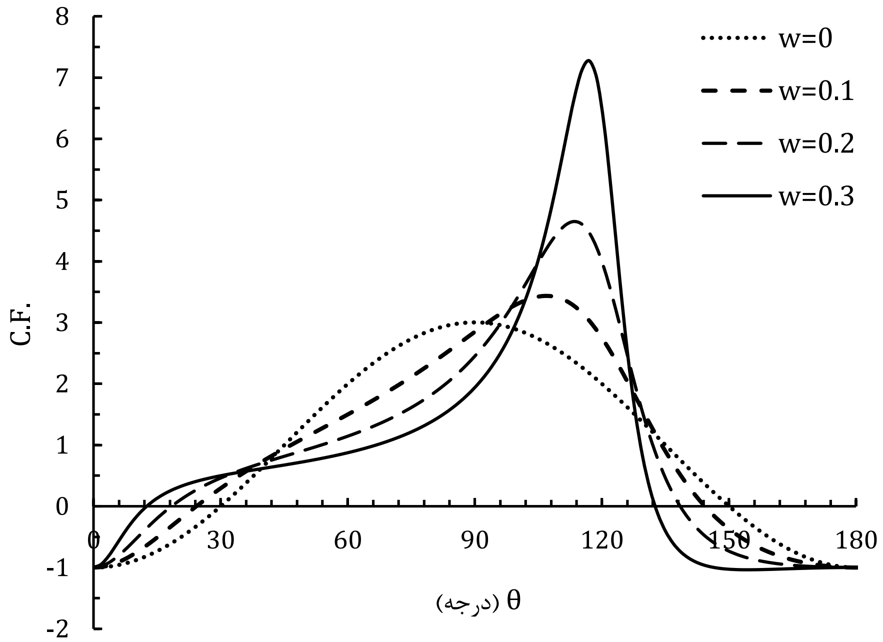


شکل ۴-۳ تغییرات تابع هزینه نسبت به انحنای گشودگی (کشش تک‌محوری)

جدول ۴-۲ نتایج بهینه برای گشودگی سه‌ضلعی

w	تعداد اجرای برنامه	α	β	C.F.	$\lvert\alpha-\beta\rvert$
۰ (بهینه)	۱	–	–	۳/۰۰۲۲	–
۰/۱	۱	۰	۱۸۰	۳/۴۳۲۶	۱۸۰
	۲	۱۳۳/۲۴	۷۳/۱۸	۳/۴۳۰۸	۶۰
	۳	۴۲/۱	۴۲/۱	۳/۴۳۲۶	۰
	۴	۴۵	۱۰۵	۳/۴۳۷۴	۶۰
	۵	۰	۱۲۰	۳/۴۳۲۶	۱۲۰
۰/۲	۱	۰	۱۸۰	۴/۶۴۷۲	۱۸۰
	۲	۶۰	۰	۴/۶۴۷۲	۶۰
	۳	۵۲	۱۷۲	۴/۶۴۷۲	۱۲۰
	۴	۰	۰	۴/۶۴۷۴	۰
	۵	۸۷	۲۷	۴/۶۴۷۸	۶۰

در حالت بعدی نتایج ارائه شده برحسب دو انحنای خاص از همان گشودگی مرتّب شده تا رابطه‌ی بین زاویه‌ی بار و زاویه‌ی چرخش برای این نوع گشــودگی مشــخص گردد. در این حالت برای این نوع گشــودگی به ازای هر بار اجرای الگوریتم PSO مقادیر متفاوتی برای زاویه‌ی بار و چرخش به دســت آمده است. اگرچه این زوایا متفاوت می‌باشند اما قدرمطلق تفاضل زاویه‌ی چرخش گشودگی از زاویه‌ی بار مقادیری مشخصی را نشان می‌دهد. به عبارتی با توجه به جدول ۴-۲ برای این گشودگی، قدرمطلق تفاضــل در زوایای ۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ درجه کمترین مقدار تابع هزینه را به خود اختصــاص داده‌اند، یعنی این روند با دوره‌ی تناوب ۶۰ درجه برای این گشــودگی تکرار می‌شــود. روند تغییرات تابع هزینه برای این گشودگی در انحناهای مختلف و در حالتی که قدرمطلق تفاضل زاویه‌ی چرخش از زاویه‌ی بار ۱۸۰ درجه می‌باشد(نسبت زوایا در یک حالت بهینه) در شکل ۴-۴ نشان داده شده است. جدول ۴-۳ نتایج بهینه‌ی مربوط به گشــودگی چهارضــلعی را نشــان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول قابل مشــاهده می‌باشــد، برای این نوع گشــودگی در w=۰/۰۵۱ که بیان کننده‌ی هندســه‌ی خاصــی از این گشودگی می‌باشد کمترین مقدار تابع هزینه را خواهیم داشت که این مقدار برابر ۲/۵۴۸۱ می‌باشد.



شکل ۴-۴ روند تغییرات تابع هزینه برای گشودگی سه‌ضلعی در حالت بهینه $|\alpha - \beta| = ۱۸۰^\circ$

همچنین قدرمطلق تفاضـل زاویه‌ی چرخش گشودگی از زاویه‌ی بار برای این گشودگی در زوایای ۴۵ و۱۳۵ درجه کمترین مقدار تابع هزینه را به خود اختصـاص داده‌اند. نمودار تغییرات تابع هزینه در انحناهای دیگر در حالتی که قدرمطلق تفاضـــل زاویه‌ی چرخش از زاویه‌ی بار ۱۳۵ درجه می‌باشـــد (نسـبت زوایا در یک حالت بهینه) در شـکل ۴-۵ نشـان داده شـده اسـت. جدول ۴-۴ نتایج بهینه‌ی مربوط به پارامترهای طراحی و مقدار تابع هزینه مربوط به گشـودگی‌های پنج‌ضـلعی و شـش‌ضلعی را نشـان می‌دهد. نمودار تغییرات تابع هزینه در انحناهای دیگر برای گشـودگی پنج ضلعی در حالتی که قدرمطلق تفاضـل زاویه‌ی چرخش از زاویه‌ی بار ۳۶ درجه و برای گشـودگی شـش‌ضـلعی زاویه‌ی ۶۰ درجه می‌سازد، (نسبت زوایا در یک حالت بهینه) به ترتیب در شکل ۴-۶ و شکل ۴-۷ نشان داده شده اسـت. نتایج ارائه شـده در این بخش برای گشودگی‌هایی با تعداد اضلاع بیشتر از شش‌ضلعی نیز قابل حصـول اسـت، منتها برای جلوگیری از تکرار مطالب اضـافی و با توجه به اینکه با افزایش تعداد اضلاع گشـــودگی نتایج بهینه به گشـــودگی دایره بســـیار نزدیک می‌شـــود، فقط به ارائه‌ی نمودار کلی برای گشـودگی هفت‌ضـلعی و هشـت‌ضـلعی که در شـکل ۴-۸ قابل مشـاهده می‌باشـد، بسنده شده است. همچنین جدول ۴-۵ نتایج بهینه مربوط به این گشودگی‌ها را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۳ نتایج بهینه برای گشودگی چهارضلعی

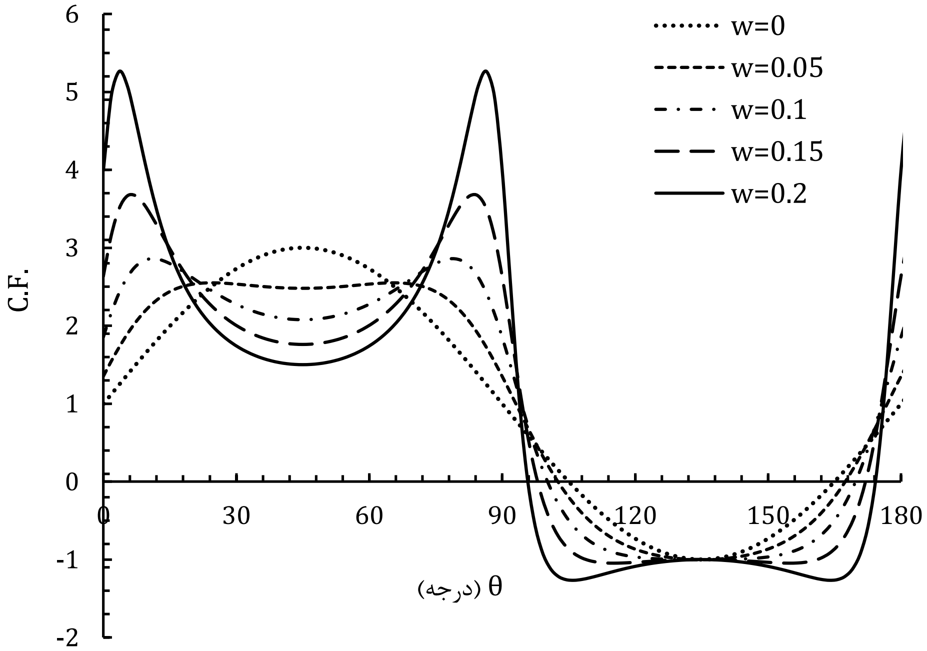
w	تعداد اجرای برنامه	α	β	C.F.	|α − β|
۰/۰۵۱	۱	۳۹/۶۱	۱۷۴/۵۹	۲/۵۴۸۱	۱۳۴/۹۸
(بهینه)	۲	۰	۱۳۵	۲/۵۴۹۸	۱۳۵
	۳	۱۸/۳۲	۶۳/۲۸	۲/۵۴۹۲	۴۴/۹۶
	۴	۴۵	۱۸۰	۲/۵۴۸۰	۱۳۵
	۵	۷۴/۱۶	۲۹/۲۰	۲/۵۴۹۳	۴۴/۹۶
۰/۱۵	۱	۰/۲	۱۳۵/۲	۳/۶۸۲۱	۱۳۵
	۲	۲۸/۸	۱۶۳/۷۴	۳/۶۸۲۴	۱۳۴/۹۴
	۳	۳۸/۱۵	۱۷۳/۱	۳/۶۸۳۱	۱۳۴/۹۵
	۴	۸۷/۴۴	۱۳۲/۴۷	۳/۶۸۱۹	۴۵/۰۳
	۵	۳۷/۴۶	۱۷۲/۴۲	۳/۶۸۲۱	۱۳۴/۹۶

جدول ۴-۴ نتایج بهینه برای گشودگی پنج‌ضلعی و شش‌ضلعی

تعداد اضلاع	w	تعداد اجرای برنامه	α	β	C.F.	|α − β|
پنج‌ضلعی	۰ (بهینه)	۱	–	–	۲/۹۹۷۳	–
	۰/۰۸	۱	۴۱/۱	۷۷/۰۸	۴/۴۹۱۱	۳۵/۹۷
		۲	۴۵/۵۱	۹/۵۶	۴/۴۹۱۱	۳۵/۹۵
		۳	۶۳/۹۱	۱۰۰	۴/۴۹۲۸	۳۶/۰۹
		۴	۴۲/۱۲	۴۲/۰۹	۴/۴۹۳۶	۰/۰۳
		۵	۴۴/۸۷	۴۴/۸۵	۴/۴۹۷۵	۰/۰۳
شش‌ضلعی	۰/۰۱۴۱	۱	۵۷/۹۶	۱۷۸/۰۲	۲/۷۸۳۸	۱۲۰/۰۶
	(بهینه)	۲	۵۷/۴۹	۱۷۷/۵۵	۲/۷۸۳۶	۱۲۰/۰۶
		۳	۰	۰	۲/۷۸۵۴	۰
		۴	۸۴/۹۴	۲۴/۹۶	۲/۷۸۳۶	۵۹/۹۸
		۵	۰	۱۸۰	۲/۷۸۳۷	۱۸۰
	۰/۰۶	۱	۰	۱۸۰	۳/۶۸۴۹	۱۸۰
		۲	۰	۰	۳/۶۸۵۴	۰
		۳	۴/۹۳	۱۲۴/۸۸	۳/۶۸۳۸	۱۱۹/۹۵
		۴	۸۸	۱۴۸	۳/۶۸۴۵	۶۰
		۵	۶۶/۰۶	۶۶/۱۳	۳/۶۸۴۸	۰/۰۷

با توجه به این جدول، برای گشودگی هفت‌ضلعی و هشت‌ضلعی قدرمطلق تفاضل زاویه‌ی بار از زاویه‌ی چرخش گشودگی طی تکرارهای مختلف مشخص شد، که این اختلاف برای گشودگی هفت‌ضلعی با دوره تناوب ۲۵/۵ درجه تکرار می‌شود و برای گشودگی هشت‌ضلعی مقدار این تفاضل در

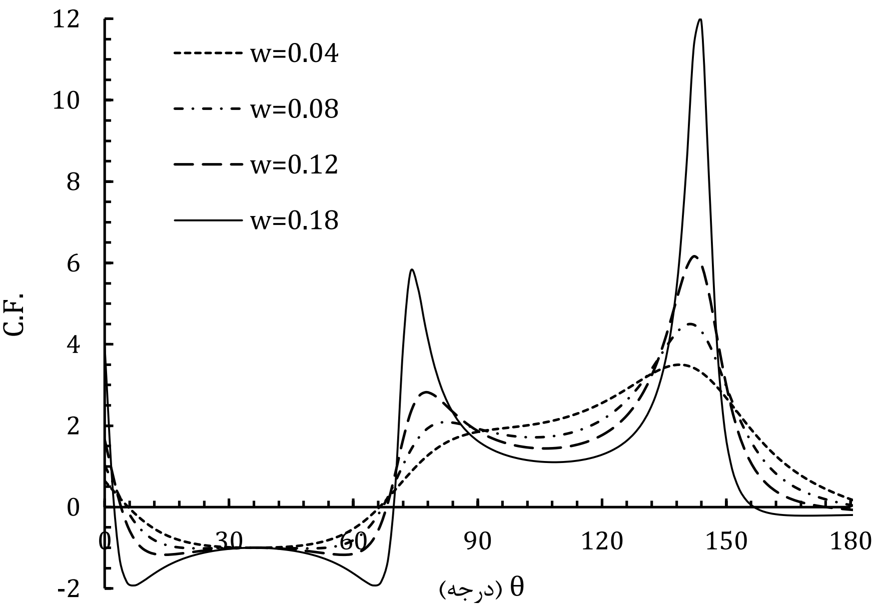
زوایای ۲۲/۵ و ۱۵۷/۵ درجه کمترین مقدار تابع هزینه را به خود اختصــاص داده‌اند. در نهایت شــکل ۴-۹ روند تغییرات تابع هزینه را در اطراف گشودگی‌های مختلف در حالت بهینه‌ی به‌دست آمده نشان می‌دهد. لازم به ذکر اســت که برای گشــودگی‌های با تعداد اضــلاع فرد و گشودگی هشت‌ضلعی نتایج بهینه در یک انحنای خاص که بیان‌کننده هندســه‌ی خاصــی از همان نوع گشودگی است و نه انحنای بهینه، نشان داده شده است.



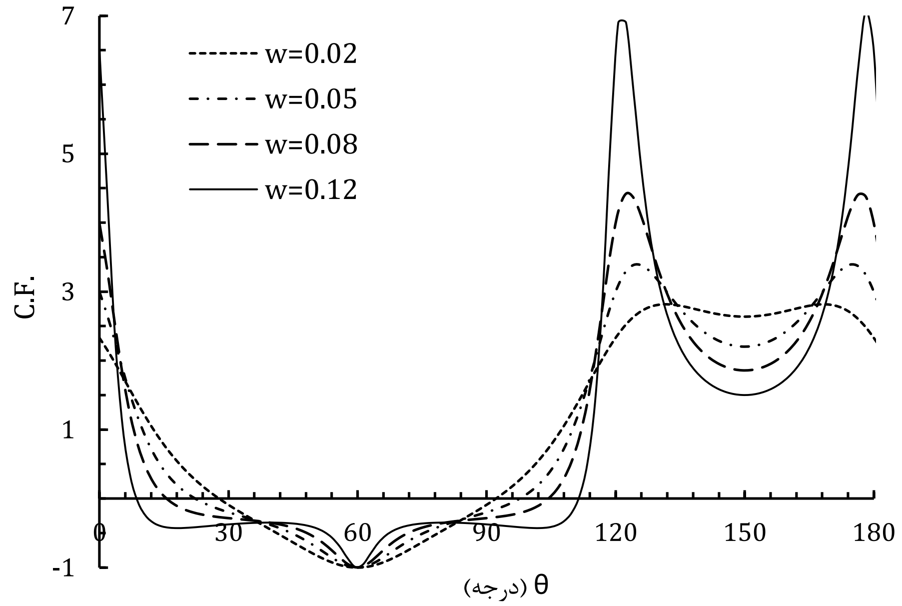
شکل ۴-۵ روند تغییرات تابع هزینه برای گشودگی چهارضلعی در حالت بهینه $|\alpha-\beta|$ =۱۳۵°

جدول ۴-۵ نتایج بهینه برای گشودگی هفت‌ضلعی و هشت‌ضلعی

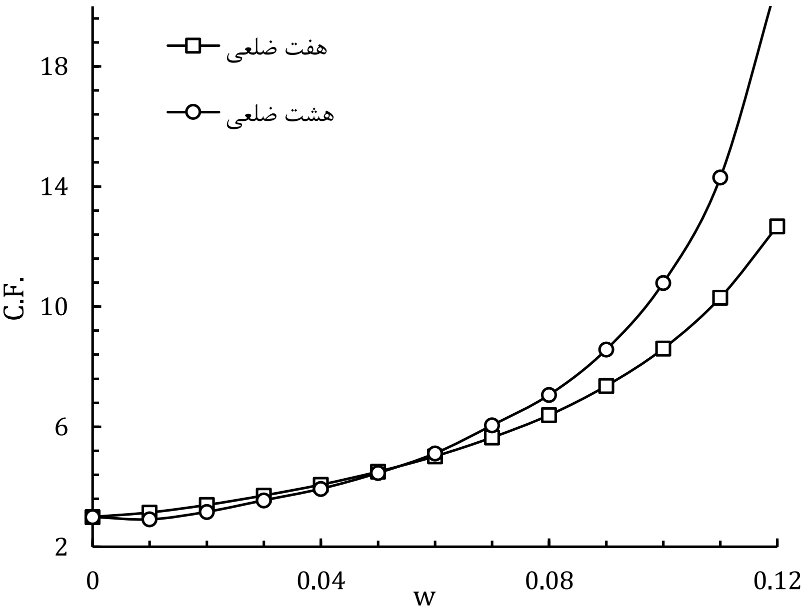
تعداد اضلاع	w	C.F.	$\lvert\alpha-\beta\rvert$	تناوب (درجه)
هفت‌ضلعی	۰ (بهینه)	۳/۰۰۲۱	–	–
	۰/۰۴	۴/۰۷۰۱	۰ -۲۵/۵ -۵۱ -۷۶/۵ -۱۰۲ - . . . -۱۷۸/۵	۲۵/۵
هشت‌ضلعی	۰/۰۰۶(بهینه)	۲/۸۷۵۱	۲۲/۵ ،۱۵۷/۵	۱۳۵
	۰/۰۴	۳/۹۳۸۰	۲۲/۵ ،۱۵۷/۵	



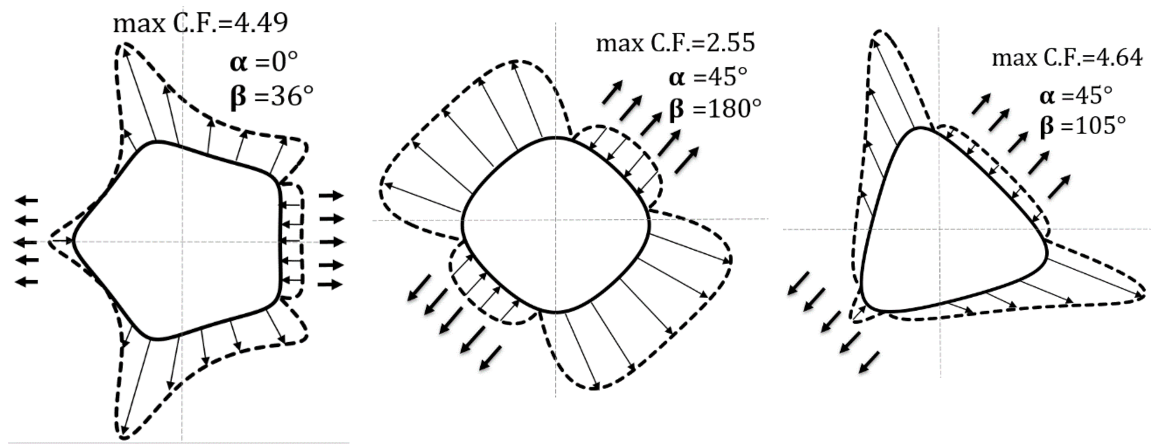
شکل ۴-۶ روند تغییرات تابع هزینه برای گشودگی پنج‌ضلعی در حالت بهینه $|\alpha-\beta| = ۳۶°$



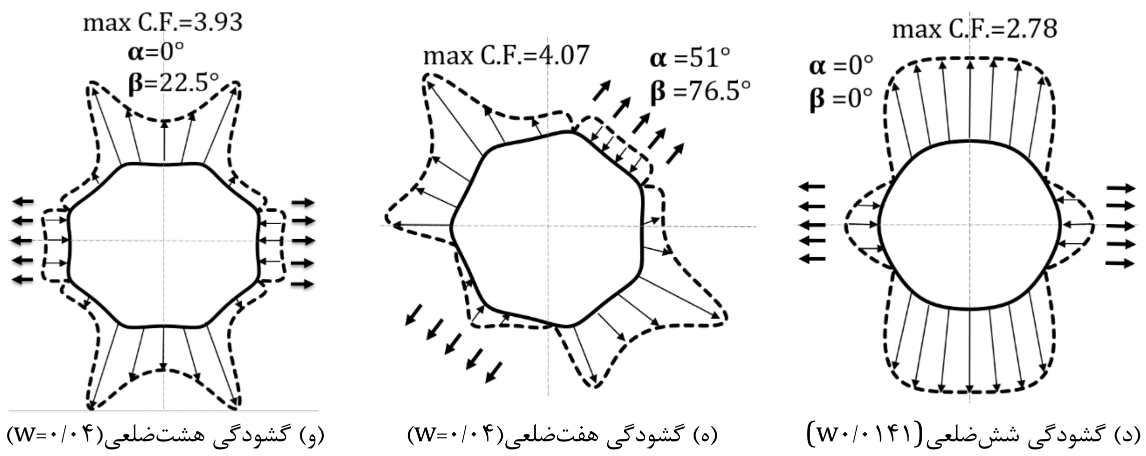
شکل ۴-۷ روند تغییرات تابع هزینه برای گشودگی شش‌ضلعی در حالت بهینه $|\alpha-\beta| = ۶۰°$



شکل ۴-۸ تأثیر انحنای گشودگی بر روی تابع هزینه (کشش تک‌محوری)



(الف) گشودگی سه‌ضلعی(w=۰/۲) (ب) گشودگی چهارضلعی(w=۰/۰۵) (ج) گشودگی پنج‌ضلعی (w=۰/۰۸)

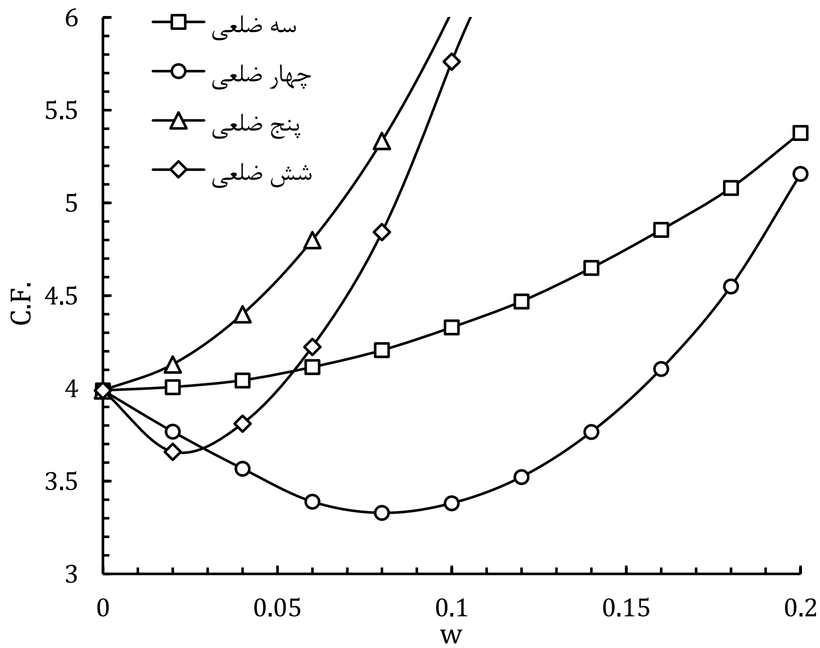


(د) گشودگی شش‌ضلعی(w۰/۰۱۴۱) (ه) گشودگی هفت‌ضلعی(w=۰/۰۴) (و) گشودگی هشت‌ضلعی(w=۰/۰۴)

شکل ۴-۹ تغییرات تابع هزینه اطراف گشودگی‌های مختلف در حالت بهینه شده (کشش تک‌محوری)

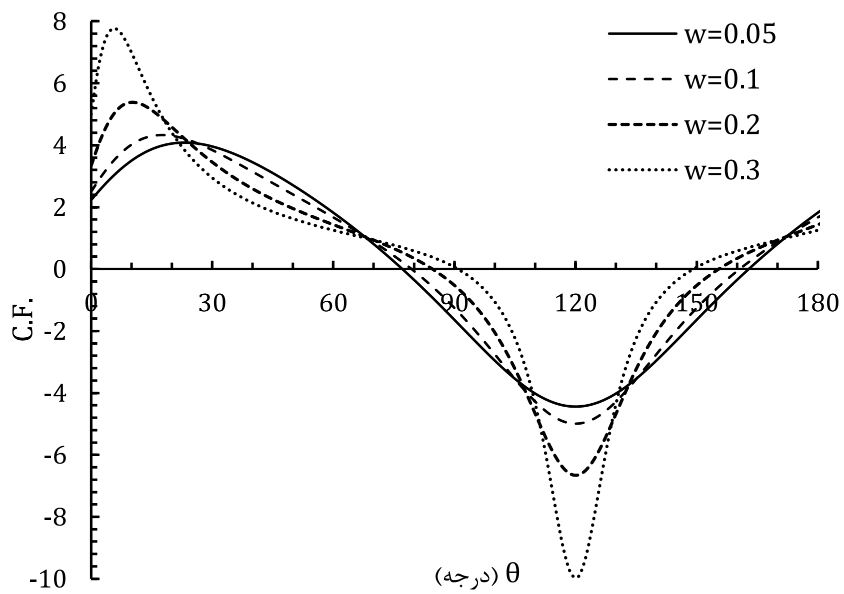
۴-۳ نتایج بهینه به ازای بارگذاری برشی

مشـابه بخش قبلی، شـکل ۴-۱۰ تغییرات مقادیر تابع هزینه برحسـب انحنای گشـودگی را برای گشـودگی‌های مختلف نشـان می‌دهد. در واقع در این شـکل به بررسـی تغییرات تابع هزینه بر حسب انحنای گشودگی در زاویه‌ی چرخش بهینه، حاصل از الگوریتم PSO پرداخته شده است. مطابق شکل، برای گشودگی‌های سه‌ضلعی و پنج‌ضلعی همان‌طور که انتظار می‌رود با کاهش w و نرم‌تر شدن انحنای گوشـه‌ی گشـودگی مقدار تابع هزینه کاهش می‌یابد تا جایی که برای w=۰ گشـودگی شـکل خود را ازدسـت داده و به دایره تبدیل می‌شـود. در این حالت مقدار تابع هزینه هم به کمترین مقدار ممکن می‌رسـد. اما بر خلاف انتظار این وضع برای گشودگی‌های با تعداد اضلاع زوج متفاوت است؛ و در ابتدا با افزایش مقدار w روندی نزولی را شاهد خواهیم بود، که این روند برای گشودگی چهارضلعی تا مقدار w=۰/۰۷۸۲ و برای گشودگی شش‌ضلعی تا مقدار w=۰/۰۲۳۹ ادامه خواهد داشت و در ادامه با افزایش این مقدار شاهد روند صعودی مقدار تابع هزینه خواهیم بود. مقادیر بهینه‌ی زاویه‌ی چرخش مربوط به هر گشودگی و مقدار تابع هزینه‌ی متناظر با آن در ادامه در جدول ۴-۶ آورده شده است.



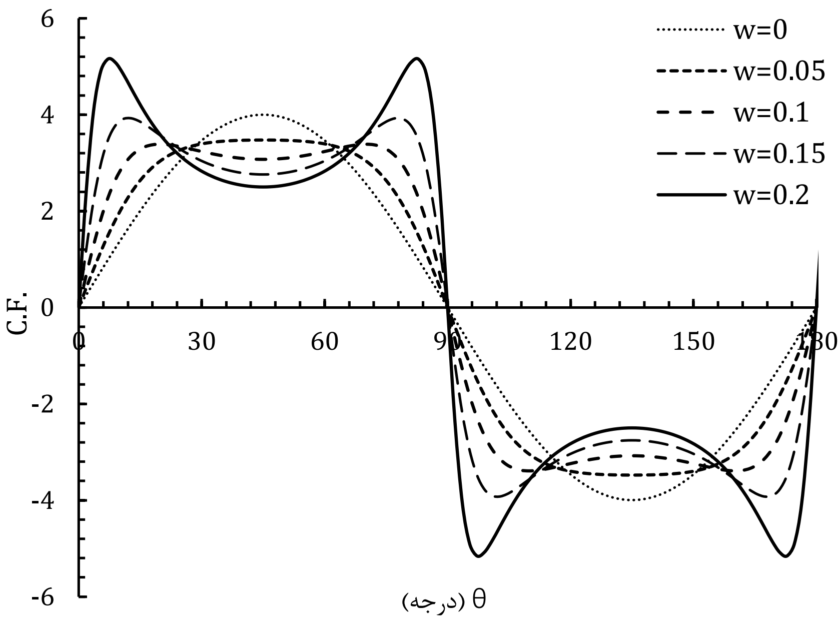
شکل ۴-۱۰ تغییرات تابع هزینه نسبت به انحنای گشودگی (بارگذاری برشی)

برای هر گشــودگی ابتدا فرآیند بهینه‌ســازی به ازای دو متغیّر طراحی یعنی انحنای گشــودگی و زاویه‌ی چرخش صــورت می‌گیرد. مطابق جدول ۴-۶ برای گشــودگی ســه‌ضــلعی در w=۰ که بیان کننده‌ی گشـودگی دایروی می‌باشـد کمترین مقدار تابع هزینه را خواهیم داشت که این مقدار برابر ۴ می‌باشد. چرخش گشودگی در این حالت هیچ مفهومی ندارد. در حالت بعدی نتایج ارائه شده برحسب دو انحنای خاص از همان گشــودگی مرتّب شــده تا زاویه‌ی چرخش بهینه برای این نوع گشــودگی مشـخص گردد. همانطور که قابل مشـاهده می‌باشـد برای گشـودگی سـه‌ضلعی به ازای هر بار اجرای الگوریتم PSO مقادیر متفاوتی برای زاویه‌ی چرخش به دســت آمده اســت. اگرچه این زوایا متفاوت می‌باشــند اما این تغییر با روند منظمی تکرار می‌شــود، به عبارتی با توجه به این جدول، گشــودگی سه‌ضلعی در زوایای چرخش ۱۵، ۷۵ و ۱۳۵ درجه کمترین مقدار تابع هزینه را به خود اختصاص داده اسـت، یعنی این روند با دوره‌ی تناوب °۶۰ برای این گشودگی تکرار می‌شود. روند تغییرات تابع هزینه مربوط به این گشودگی در انحناهای مختلف در حالت $\beta = ۱۵°$ (یکی از حالت‌های بهینه) در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۱ روند تغییرات تابع هزینه برای گشودگی سه‌ضلعی در یک حالت بهینه (بارگذاری برشی)

مطابق جدول ۴-۶ برای گشـودگی چهارضلعی در w=۰/۰۷۸۲ که بیان کننده‌ی هندسه‌ی خاصی از این گشــودگی می‌باشــد کمترین مقدار تابع هزینه را خواهیم داشـــت که این مقدار برابر ۳/۳۲۷۹ می‌باشـد. همچنین این مقدار از تابع هزینه در زوایای چرخش ۰، ۹۰ و ۱۸۰ درجه اتفاق افتاده است. نمودار تغییرات تابع هزینه برای گشــودگی چهارضــلعی در انحناهای دیگر در حالت $\beta = ۰°$ (یکی از حالت‌های بهینه) در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۲ تغییرات تابع هزینه برای گشودگی چهارضلعی در حالت بهینه (بارگذاری برشی)

نمودار تغییرات تابع هزینه در انحناهای مختلف برای گشــودگی پنج ضلعی در حالت $\beta = ۱۳۵°$ و برای گشودگی شش‌ضلعی در حالت $\beta = ۷۵°$ (یکی از حالت‌های بهینه) به ترتیب در شکل ۴-۱۳ و شـکل ۴-۱۴نشـان داده شده است. در ادامه‌ی نتایج، همانند بخش قبلی فقط به ارائه‌ی نمودار کلی برای گشودگی هفت‌ضلعی و هشت‌ضلعی که در شکل ۴-۱۵ قابل مشاهده می‌باشد، بسنده شده است. همچنین جدول ۴-۷ نتایج بهینه مربوط به گشودگی‌های هفت‌ضلعی و هشت‌ضلعی را نشان می‌دهد.

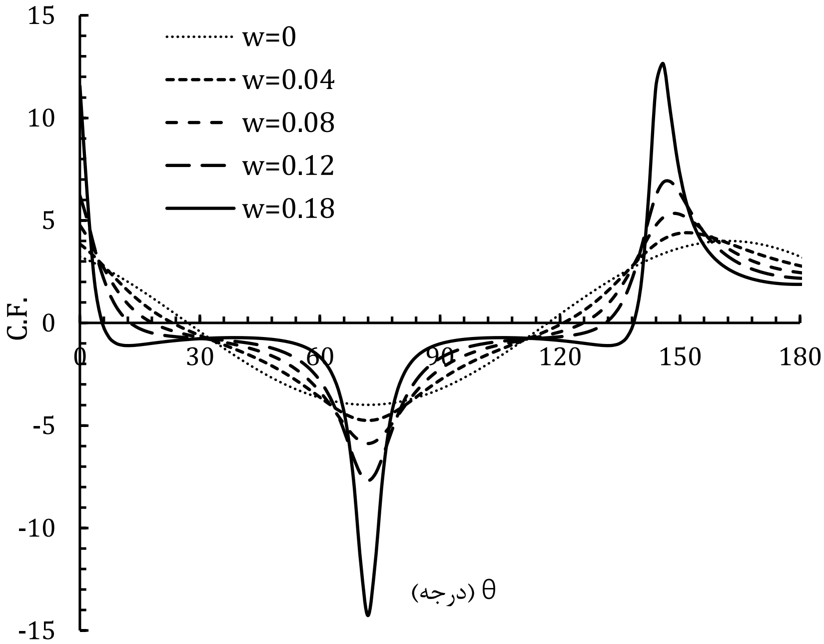
لازم به ذکر اســت که در تمام حالات ضرایب ω، c_1 و c_2 در الگوریتم PSO به منظور رسیدن به بهترین جواب ممکن، در کمترین زمان به صورت کاهش خطی در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۴-۶ نتایج بهینه برای گشودگی‌های مختلف

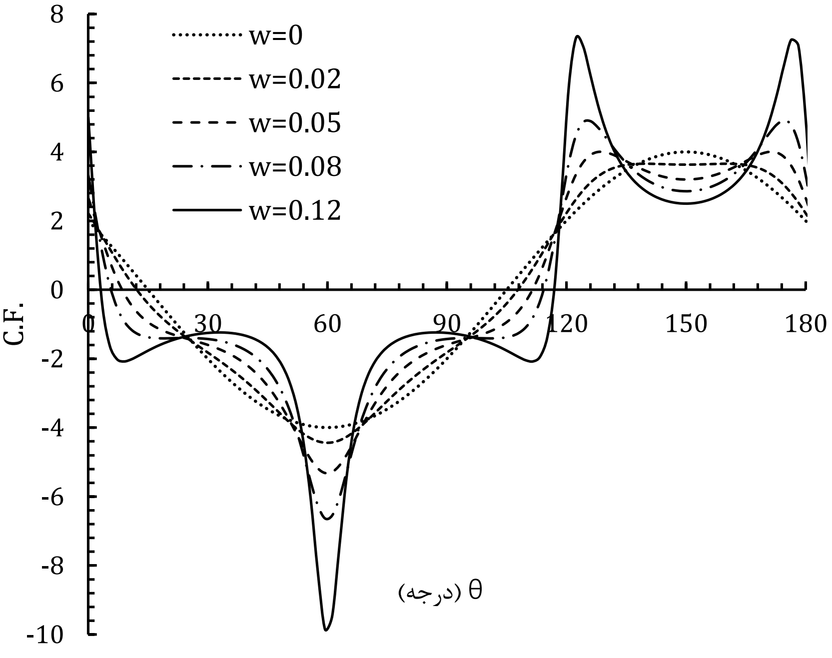
نوع گشودگی	w	تعداد اجرای برنامه	β	دوره تناوب (درجه)	C.F.
سه ضلعی	۰ (بهینه)	۱	-		۳/۹۹۹۶
	۰/۱	۱	۱۵	۶۰	۴/۳۲۱۱
		۲	۱۳۵		۴/۳۲۱۱
		۳	۱۵		۴/۳۲۰۸
		۴	۷۵		۴/۳۲۱۰
	۰/۲	-	۷۵-۱۳۵-۱۵		۵/۳۷۸۸
چهارضلعی	۰/۰۷۸۲ (بهینه)	۱	۰	۹۰	۳/۳۲۷۹
		۲	۹۰		۳/۳۲۷۸
		۳	۱۸۰		۳/۳۲۷۶
		۴	۹۰		۳/۳۲۷۸
	۰/۱۵	-	۰-۹۰-۱۸۰		۳/۹۲۱۲
پنج‌ضلعی	۰ (بهینه)	۱	-		۳/۹۹۸۱
	۰/۰۴	۱	۶۳	۳۶	۴/۴۰۰۵
		۲	۱۳۵		۴/۴۰۰۴
		۳	۹۹		۴/۴۰۰۶
		۴	۱۷۱		۴/۴۰۰۷
		۵	۲۷		۴/۴۰۰۵
شش‌ضلعی	۰/۰۲۳۹ (بهینه)	۱	۱۳۵	۶۰	۳/۶۵۲۸
		۲	۷۵		۳/۶۵۲۷
		۳	۱۵		۳/۶۵۲۵
		۴	۱۳۵		۳/۶۵۲۷
	۰/۰۵	-	۷۵-۱۳۵-۱۵		۳/۹۹۹۴

جدول ۴-۷ نتایج بهینه برای گشودگی هفت‌ضلعی و هشت‌ضلعی

تعداد اضلاع	w	β	تناوب (درجه)	C.F.
هفت‌ضلعی	۰ (بهینه)	-		۳/۹۹۸۷
	۰/۰۴	۱۶۱-۱۳۵ -۱۰۹ -۸۴ -۵۸ -۳۲ -۶	۲۶	۴/۹۶۱۴
هشت‌ضلعی	۰/۰۰۹۲(بهینه)	۱۵۷/۵- ۱۱۲/۵- ۶۷/۵- ۲۲/۵	۴۵	۳/۷۸۵۷
	۰/۰۴	۱۵۷/۵- ۱۱۲/۵- ۶۷/۵- ۲۲/۵		۴/۶۱۸۹

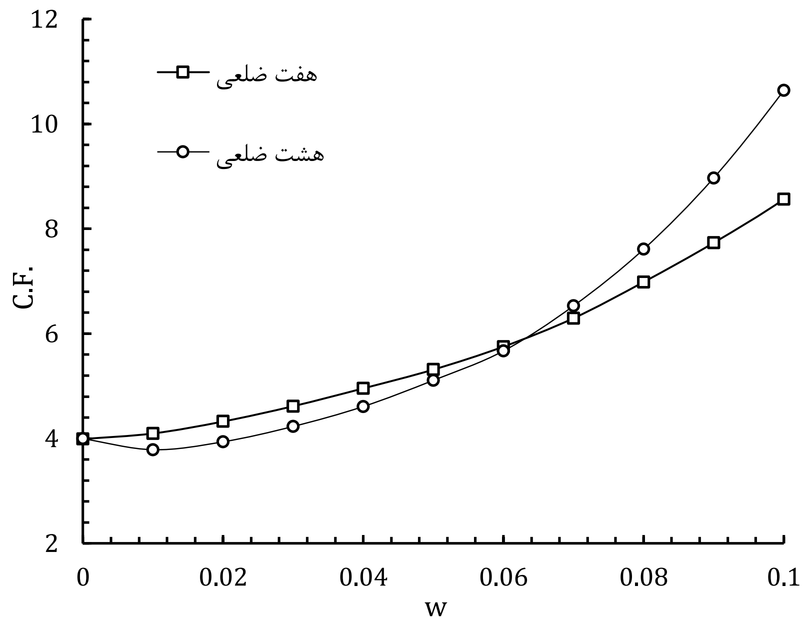


شکل ۴-۱۳ روند تغییرات تابع هزینه برای گشودگی پنج‌ضلعی در حالت بهینه (بارگذاری برشی)

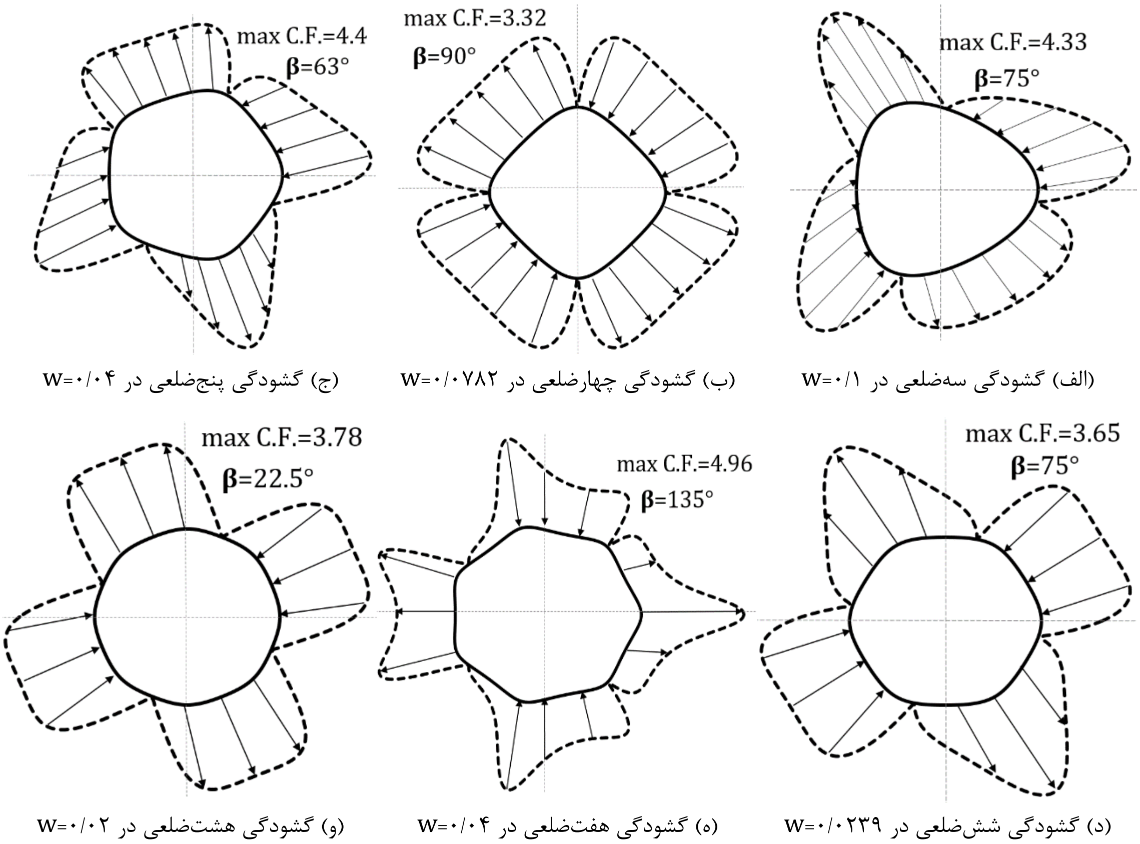


شکل ۴-۱۴ روند تغییرات تابع هزینه برای گشودگی شش‌ضلعی در حالت بهینه (بارگذاری برشی)

در نهایت شکل ۴-۱۶ روند تغییرات تابع هزینه را در اطراف گشودگی‌های مورد بررسی در حالت بهینه‌ی به‌دست آمده نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که برای گشودگی‌های با تعداد اضلاع فرد و گشودگی هشت‌ضلعی نتایج بهینه در یک انحنای خاص که بیان‌کننده هندسه‌ی خاصی از همان نوع گشودگی است، نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۵ تغییرات تابع هدف نسبت به انحنای گشودگی



(الف) گشودگی سه‌ضلعی در w=۰/۱
(ب) گشودگی چهارضلعی در w=۰/۰۷۸۲
(ج) گشودگی پنج‌ضلعی در w=۰/۰۴
(د) گشودگی شش‌ضلعی در w=۰/۰۲۳۹
(ه) گشودگی هفت‌ضلعی در w=۰/۰۴
(و) گشودگی هشت‌ضلعی در w=۰/۰۲

شکل ۴-۱۶ روند تغییرات تابع هزینه اطراف گشودگی‌های مختلف در حالت بهینه شده (برشی)

فصل ۵: نتایج بهینه برای صفحه‌ی حاوی گشودگی از جنس ماده‌ی ارتوتروپیک

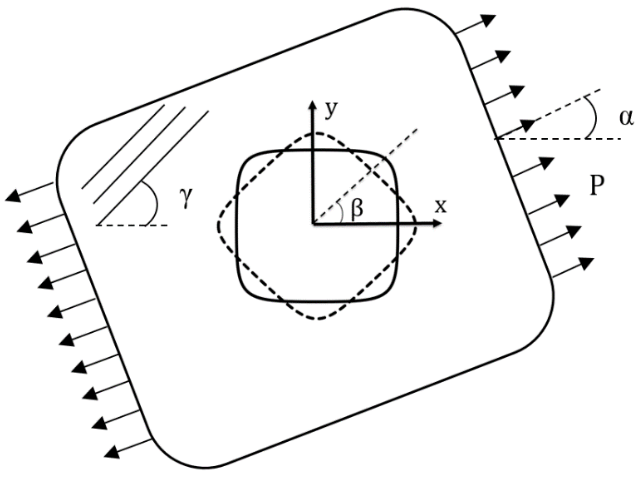
۵-۱ مقدمه

پارامترهای متعددی از جمله شکل گشودگی، جهت‌گیری گشودگی، زاویه‌ی بار، زاویه‌ی الیاف، شعاع انحنای گوشه‌ی گشودگی و خواص مکانیکی ماده در صفحات ارتوتروپیک بر توزیع تنش اطراف گشودگی واقع در صفحه‌ای که تحت بارگذاری قرار می‌گیرند، تأثیرگذار است. مشابه فصل گذشته در این فصل با استفاده از نتایج حلّ تحلیلی لخنتیسکی و بسط این حلّ به سایر گشودگی‌های منظم هندسی و ترکیب آن با الگوریتم PSO سعی می‌شود تا با استفاده از این الگوریتم، مقادیر بهینه‌ی پارامترهای فوق جهت دستیابی به کمترین تابع هزینه در اطراف گشودگی واقع در صفحه‌ی ارتوتروپیک نامحدود معرفی گردد. برای این منظور از سه نوع ماده‌ی مختلف استفاده شده است. خواص مکانیکی این مواد در جدول ۵-۱ ارائه شده است.

جدول ۵-۱ خواص مواد صفحه دارای گشودگی[۲۰]

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}	Material
۴۷/۴	۱۶/۲	۷	۰/۲۶	Ce9000 Glass/Epoxy
۲۹۴	۶/۴	۴/۹	۰/۲۳	GY-70/934 Carbon/Epoxy
۲۰۴	۱۸/۵	۵/۵۹	۰/۲۳	Boron/Epoxy

مسأله‌ی مورد بررسی در این بخش صفحه‌ی ارتوتروپیک نامحدود حاوی گشودگی می‌باشد. این صفحه مطابق شکل ۵-۱ تحت بارگذاری کشش تک‌محوری با زاویه‌ی α نسبت به محور x قرار دارد.



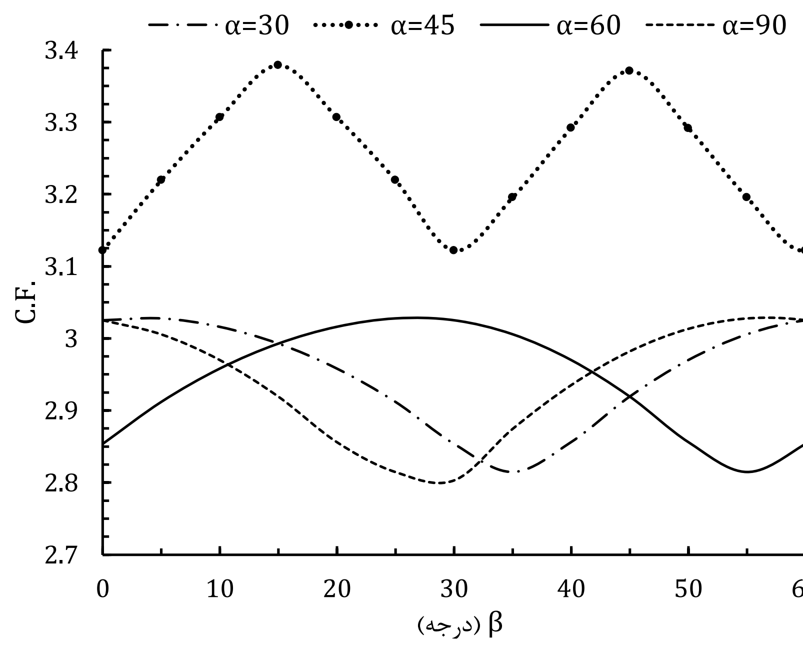
شکل ۵-۱ نمایی از هندسه گشودگی و بارگذاری آن

در این شکل زاویه‌ی چرخش گشودگی که بیانگر نحوه‌ی قرارگیری آن نسبت به افق است، با β و زاویه‌ی الیاف با γ نمایش داده شده است. بر این اساس ابتدا سعی می‌شود تا برای یک صفحه‌ی ارتوتروپیک نامحدود حاوی یک گشودگی خاص، برای مقدار خاصی از هریک از متغیرهای مورد بحث در این مقاله، مقدار بهینه برای دیگر متغیّرهای طراحی در w=۰/۰۵ معرفی شود. سپس با در نظر گرفتن تمامی متغیّرهای طراحی، به بررسی تأثیر همه‌ی پارامترهای اصلی در کنار هم بر توزیع تنش پرداخته و بهترین حالت گشودگی و مقادیر بهینه‌ی پارامترهای آن که منجر به کمترین مقدار تابع هزینه می‌شود؛ مشخص می‌گردد.

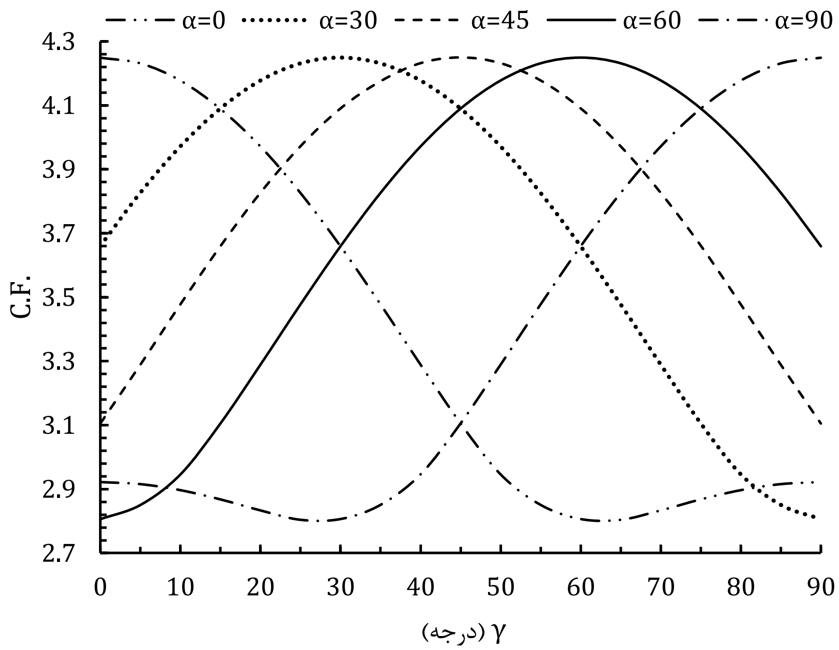
۵-۲ گشودگی شبه‌مثلثی

مواقعی که نحوه‌ی قرار گرفتن هندسه‌ی گشودگی محدودیتی برای طراح ایجاد نکند می‌توان با انتخاب زاویه‌ی چرخش مناسب سعی کرد تا مقدار تنش در اطراف گشودگی را به کمترین مقدار خود رساند. بر این اساس در w=۰/۰۵ و فقط برای ماده‌ی Glass/Epoxy، تأثیر زاویه‌ی چرخش گشودگی بر مقدار تابع هزینه در زوایای بار مختلف در شکل ۵-۲ نشان داده شده است؛ در این حالت مقادیر تابع هزینه در زاویه‌ی الیاف بهینه حاصل از الگوریتم PSO ارائه شده است. به عبارتی زاویه‌ی الیاف به عنوان متغیّر طراحی در این حالت در نظر گرفته شده است. باتوجه به این شکل، تغییرات مقدار تابع هزینه نسبت به زاویه‌ی چرخش در زوایای بار مختلف با دوره تناوب °۶۰ تکرار می‌شود. قابل ذکر است که در این شکل به دلیل رفتار تناوبی با دوره‌ی تناوب °۶۰، نتایج فقط تا زاویه‌ی چرخش °۶۰ نشان داده شده است. اگرچه این نتایج فقط برای ماده‌ی Glass/Epoxy ارائه شده است ولی برای سایر مواد نیز این رفتار تناوبی دیده می‌شود. شکل ۵-۳ نیز فقط برای Glass/Epoxy تأثیر زاویه‌ی الیاف بر مقدار تابع هزینه در زوایای بار مختلف را نشان می‌دهد. مقدار زاویه‌ی چرخش گشودگی به عنوان متغیّر طراحی در هر زاویه‌ی الیاف از الگوریتم PSO محاسبه می‌شود. باتوجه به این شکل، بیشترین و کمترین مقدار تابع هزینه برای زوایای بار مختلف (به جز زاویه‌ی °۴۵) یکسان است که در زوایای

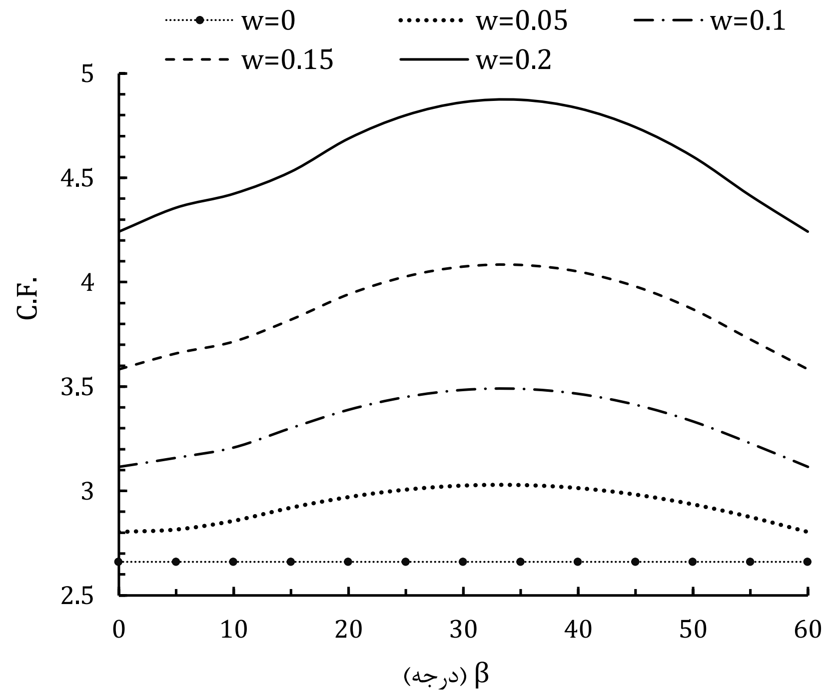
الیاف مختلف رخ می‌دهد. همچنین شکل ۵-۴ تأثیر زاویه‌ی چرخش گشودگی در انحناهای مختلف را بر روی تابع هزینه نشـان می‌دهد. این شـکل با در نظر گرفتن زاویه‌ی الیاف به عنوان متغیّر طراحی و $\alpha = ۰$ ارائه شـده اسـت. همان‌طور که انتظار می‌رود با کاهش w و نرم‌تر شـدن انحنای گوشـه‌ی گشودگی مقدار تابع هزینه کاهش می‌یابد تا جایی که برای $w = ۰$ گشودگی شبه‌مثلثی شکل خود را از دسـت داده و به دایره تبدیل می‌شود، در این حالت زاویه‌ی چرخش گشودگی دیگر تأثیری بر روی تابع هزینه ندارد. در نهایت شـکل ۵-۵ تأثیر زاویه‌ی بار بر مقدار تابع هزینه با در نظر گرفتن همزمان زوایای الیاف و چرخش گشـودگی به عنوان متغیّرهای طراحی برای سـه نوع ماده‌ی مورد بحث را در w=۰/۰۵ نشان می‌دهد. مقادیر زوایای الیاف و چرخش گشودگی در این حالت، مقادیر بهینه‌ی حاصل از الگوریتم PSO هستند. باتوجه به این شکل، برای هر سه ماده بیشترین مقدار تابع هزینه در زاویه‌ی بار °۴۵ رخ می‌دهد، و ماده‌ی Carbon/Epoxy در این زاویه نسبت به دو ماده‌ی دیگر بیشترین مقدار تـابع هزینه را دارد. کمترین مقدار تابع هزینه نیز برای همه‌ی مواد در زاویه‌ی بار صـــفر و °۹۰ اتفاق می‌افتد.



شکل ۵-۲ تغییرات تابع هدف نسبت به زاویه‌ی چرخش گشودگی (Glass/Epoxy)

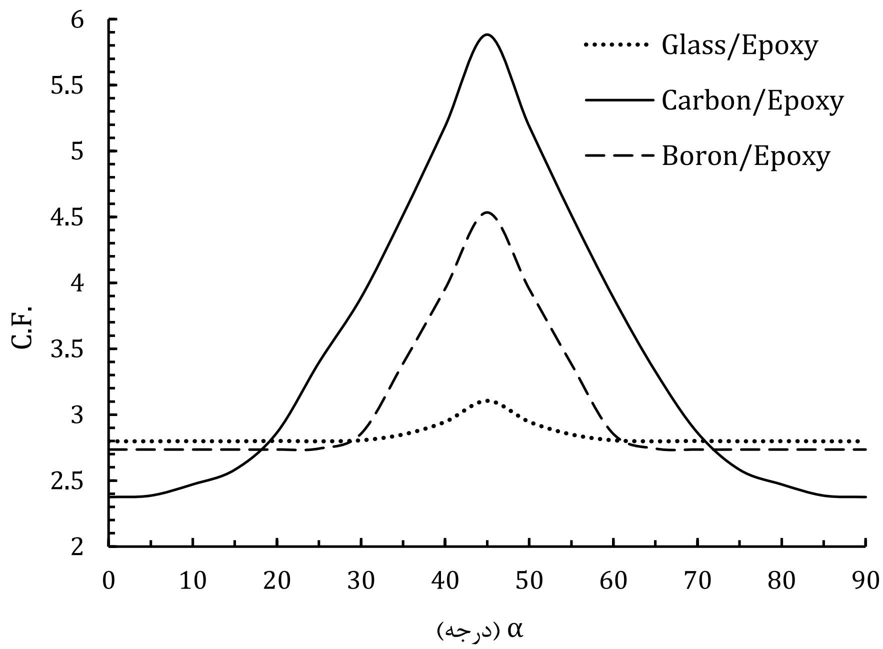


شکل ۵-۳ تغییرات تابع هدف نسبت به زاویه‌ی الیاف (Glass/Epoxy)



شکل ۵-۴ تأثیر زاویه‌ی چرخش بر تابع هزینه در انحناهای مختلف (Glass/Epoxy)

جدول ۵-۲ نتایج بهینه مربوط به شکل ۵-۲ تا شکل ۵-۵ در انحناها و زوایای بار مختلف برای ماده‌ی Glass/Epoxy را نمایش می‌دهد. در ادامه نیز سعی می‌شود تا در مورد Glass/Epoxy نتایج به طور مفصل ارائه شده و برای دیگر مواد تنها به معرفی جواب‌های بهینه‌ی اکتفا شود.



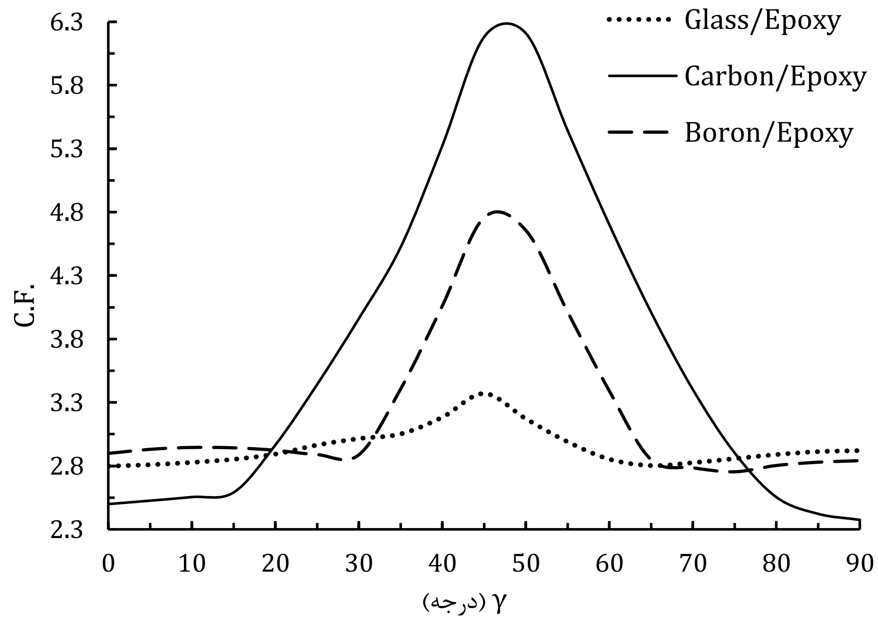
شکل ۵-۵ تغییرات تابع هزینه نسبت به زاویه‌ی بار به ازای سه ماده‌ی مورد بحث

جدول ۵-۲ مقادیر بهینه در انحناها و زوایای بار مختلف (Glass/Epoxy)

W=۰/۰۵				W=۰			
C.F.	β	γ	α	C.F.	β	γ	α
۲/۸۰۶۰	۰-۶۰-۱۲۰-۱۸۰	۶۲/۷	۰	۲/۶۵۹۵	–	۵۹/۴	۰
۲/۸۰۶۰	۳۳/۵-۹۳/۵-۱۵۳/۵	۹۰	۳۰	۲/۶۵۹۵	–	۸۹/۳	۳۰
۳/۱۰۵۱	۳۰-۹۰-۱۵۰	۰	۴۵	۲/۹۹۱۴	–	۹۰	۴۵
	۰-۶۰-۱۲۰-۱۸۰	۹۰			–	۰	
۲/۸۰۶۰	۵۶/۵-۱۱۶/۵-۱۷۶/۵	۰	۶۰	۲/۶۵۹۵	–		۶۰
۲/۸۰۶۰	۳۰-۹۰-۱۵۰	۲۷/۵	۹۰	۲/۶۵۹۵	–	۰/۶	۹۰
						۳۰/۵	
W=۰/۱۵				W=۰/۱			
C.F.	β	γ	α	C.F.	β	γ	α
۳/۵۸۲۱	۰-۶۰-۱۲۰-۱۸۰	۶۸/۸	۰	۳/۱۱۴۷	۰-۶۰-۱۲۰-۱۸۰	۶۶/۳	۰
۳/۶۶۴۷	۳۵/۵-۹۵/۵-۱۵۵/۵	۹۰	۳۰	۳/۱۵۴۰	۳۵-۹۵-۱۵۵	۹۰	۳۰
۳/۹۲۸۹	۳۱-۹۱-۱۵۱	۰	۴۵	۳/۴۲۲۶	۳۰-۹۰-۱۵۰	۰	۴۵
	۵۹-۱۱۹-۱۷۹	۹۰			۰-۶۰-۱۲۰-۱۸۰	۹۰	
۳/۶۶۳۸	۵۴/۵-۱۱۴/۵-۱۷۴/۵	۰	۶۰	۳/۱۵۳۷	۵۵/۵-۱۱۵/۵-۱۷۵/۵	۰	۶۰
۳/۵۷۹۰	۳۰-۹۰-۱۵۰	۲۲	۹۰	۳/۱۱۴۵	۳۰-۹۰-۱۵۰	۲۴	۹۰

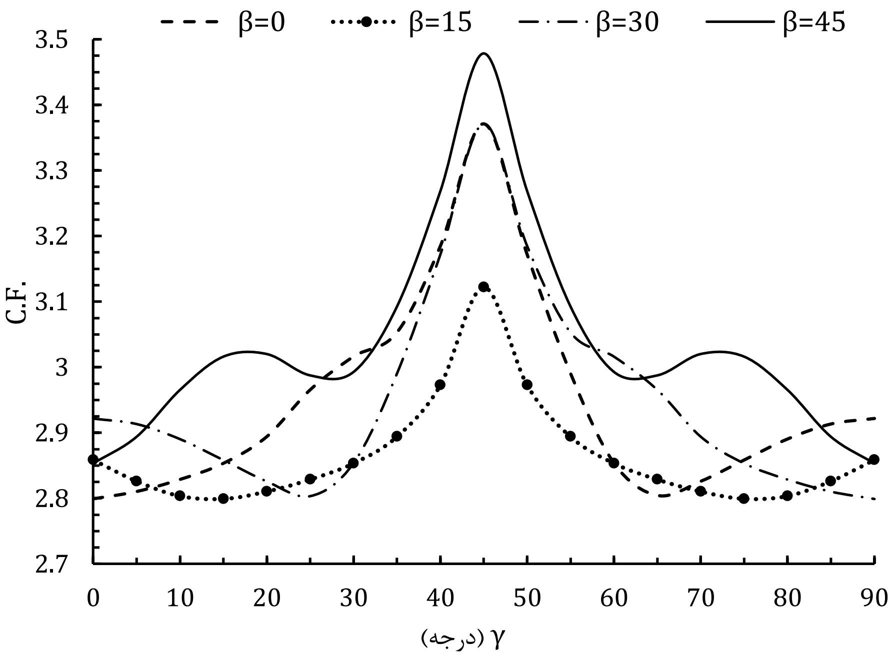
شکل ۵-۶ تغییرات تابع هزینه برحسب زاویه‌ی الیاف را نشان می‌دهد، با این تفاوت که در هر زاویه‌ی الیاف، مقدار زاویه‌ی بار، مقدار بهینه‌ی حاصل از الگوریتم PSO است. نتایج این شکل برای

$\beta = ۰$ و w=۰/۰۵ ارائه شـده اسـت. با توجه به این شکل می‌توان نتیجه گرفت که در زوایای خاصی که برای مواد مختلف متفاوت اسـت؛ مقدار تابع هزینه کمترین و بیشـترین مقدار را داراسـت. بنابراین برای گشـودگی سـه‌ضلعی در یک انحنای خاص و زاویه‌ی چرخش مشخص ($\beta = ۰$)، می‌توان مقادیر بهینه‌ی زوایای بار و الیاف را که منجر به کمینه شـدن تابع هزینه می‌شـود تعیین کرد. شـکل ۵-۷ مقادیر تابع هزینه را برحسـب زاویه‌ی الیاف در زوایای چرخش مختلف در w=۰/۰۵ نشـان می‌دهد. متغیّر طراحی در این حالت زاویه‌ی بار اسـت که با اسـتفاده از الگوریتم PSO تعیین می‌شود؛ لازم به ذکر اسـت که زاویه‌ی چرخش °۶۰ منجر به همان نتایج زاویه‌ی صـفر درجه می‌شـود. مقادیر بهینه مربوط به زوایای بار متناظر با زوایای چرخش مختلف در جدول ۵-۳ ارائه گردیده است.



شکل ۵-۶ تغییرات تابع هزینه نسبت به زاویه‌ی الیاف در $\beta = ۰$ و w=۰/۰۵

شـکل ۵-۸ تغییرات مقدار تابع هزینه برحسب زاویه‌ی بار در انحناهای مختلف و $\beta = ۰$ را نشان می‌دهد. پارامتر زاویه‌ی الیاف در این شـکل به عنوان متغیّر طراحی در نظر گرفته شـده است. در این شکل به جز حالت دایره‌ای (w=۰)، در سایر انحناها مقدار بیشینه تابع هزینه در نزدیکی زاویه‌ی بار ۵۰ درجه رخ می‌دهد. زاویه‌ی بار صفر درجه نیز منجر به دستیابی به کمترین مقدار تابع هزینه می‌شود.



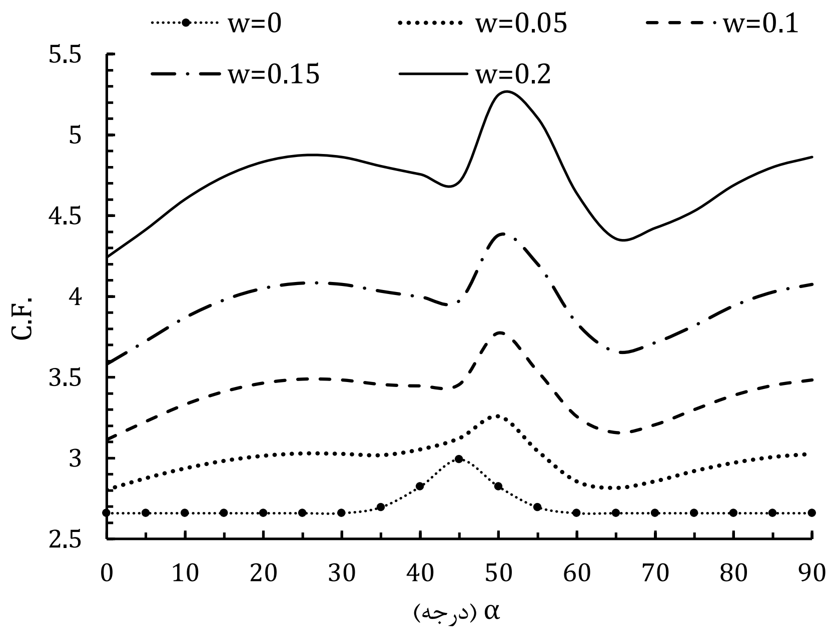
شکل ۵-۷ تأثیر زاویه چرخش بر روی زاویه الیاف (Glass/Epoxy)

جدول ۵-۳ مقادیر بهینه در زوایای چرخش مختلف (w=۰/۰۵)

β	γ	α	$\lvert\alpha-\gamma\rvert$	C.F.	β	γ	α	$\lvert\alpha-\gamma\rvert$	C.F.
				Glass/Epoxy					
۰	۰	۶۱/۸	۶۱/۸	۲/۷۹۹۱	۳۰	۲۵/۱	۹۰	۶۴/۹	۲/۸۰۳۱
	۶۴/۸۵	۰	۶۴/۸۵	۲/۷۹۹۱		۹۰	۲۸/۲	۶۱/۸	۲/۸۰۳۱
۱۵	۷۶/۵۴	۱۳/۸۵	۶۲/۶۹	۲/۷۹۸۳	۴۵	۰	۵۴/۷۵	۵۴/۷۵	۲/۸۵۳۲
	۱۳/۷۵	۷۶/۲۷	۶۲/۵۲	۲/۷۹۸۳		۹۰	۳۵/۲۵	۵۴/۷۵	۲/۸۵۳۲
				Carbon/Epoxy					
β	γ	α	$\lvert\alpha-\gamma\rvert$	C.F.	β	γ	α	$\lvert\alpha-\gamma\rvert$	C.F.
۰	۹۰	۰	۹۰	۲/۳۷۴۶	۳۰	۰	۹۰	۹۰	۲/۳۷۴۷
۱۵	۰	۸۲/۴۵	۸۲/۴۵	۲/۴۱۱۲	۴۵	۰	۹۰	۹۰	۲/۴۹۸۲
	۹۰	۷/۵۶	۸۲/۴۴	۲/۴۱۱۲		۹۰	۰	۹۰	۲/۴۹۸۲
				Boron/Epoxy					
β	γ	α	$\lvert\alpha-\gamma\rvert$	C.F.	β	γ	α	$\lvert\alpha-\gamma\rvert$	C.F.
۰	۷۳/۴۲	۸/۲۸	۶۵/۱۴	۲/۷۳۴۶	۳۰	۱۶/۵۷	۸۱/۷۲	۶۵/۱۵	۲/۷۳۵۰
	۲۹/۵۵	۹۰	۶۰/۴۵	۲/۸۴۱۵		۹۰	۲۵/۷۳	۶۴/۲۷	۲/۸۹۰۱
۱۵	۱/۵۷	۶۶/۷۲	۶۵/۱۵	۲/۷۳۵۰	۴۵	۲۶/۳۴	۹۰	۶۳/۶۶	۲/۷۹۳۳
	۲۳/۲۸	۸۸/۴۲	۶۵/۱۴	۲/۷۳۴۶		۶۳/۶۲	۰	۶۳/۶۲	۲/۷۹۲۸

جدول ۵-۴ نتایج بهینه مربوط به این حالت را نمایش می‌دهد. قابل توضیح است که در w=۰ طی اجراهای مختلف برنامه مشـخص شـد که کمترین مقدار تابع هزینه در زوایای بار و الیاف مختلفی رخ

می‌دهد اما در تمام اجراها قدرمطلق تفاضل زاویه‌ی بار از زاویه‌ی الیاف مقدار °۶۰ می‌باشد.

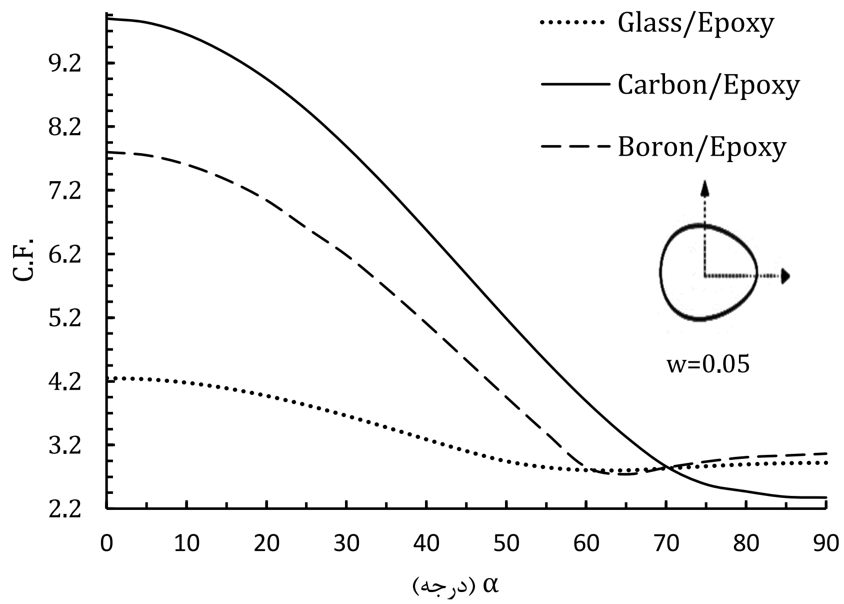


شکل ۵-۸ تأثیر انحنای گشودگی بر روی زاویه بار در $\beta = ۰$ (Glass/Epoxy)

جدول ۵-۴ نتایج بهینه در انحناهای مختلف و $\beta = ۰$ (Glass/Epoxy)

C.F.	$\lvert\alpha-\gamma\rvert$	γ	α	w
۲/۶۵۹۵	۶۰/۲۲	۹۰	۲۹/۷۸	۰
	۵۹/۳۷	۵۹/۳۷	۰	
	۵۹/۳۸	۱۷/۵۸	۷۶/۹۶	
۲/۷۹۹۱	–	۰	۶۱/۸۰	۰/۰۵
		۶۴/۸۵	۰	
۳/۱۳۱۳	–	۰	۶۲/۴	۰/۱
		۶۶/۳۱	۰	
۴/۳۲۱۴	–	۰	۶۳/۳۵	۰/۲
		۹۰	۰	

شـــکل ۵-۹ تغییرات مقادیر تابع هزینه برحســـب زاویه‌ی بار را برای ســـه ماده‌ی مورد بحث در w=۰/۰۵ و γ=۰ نشان می‌دهد. در این شکل با درنظرگرفتن زاویه‌ی چرخش به عنوان متغیّر طراحی، به بررسی تغییرات تابع هزینه برحسب زاویه‌ی بار در زاویه‌ی چرخش بهینه‌ی حاصل از الگوریتم PSO پرداخته شده است. جدول ۵-۵ نتایج بهینه مربوط به این حالت را نشان می‌دهد.



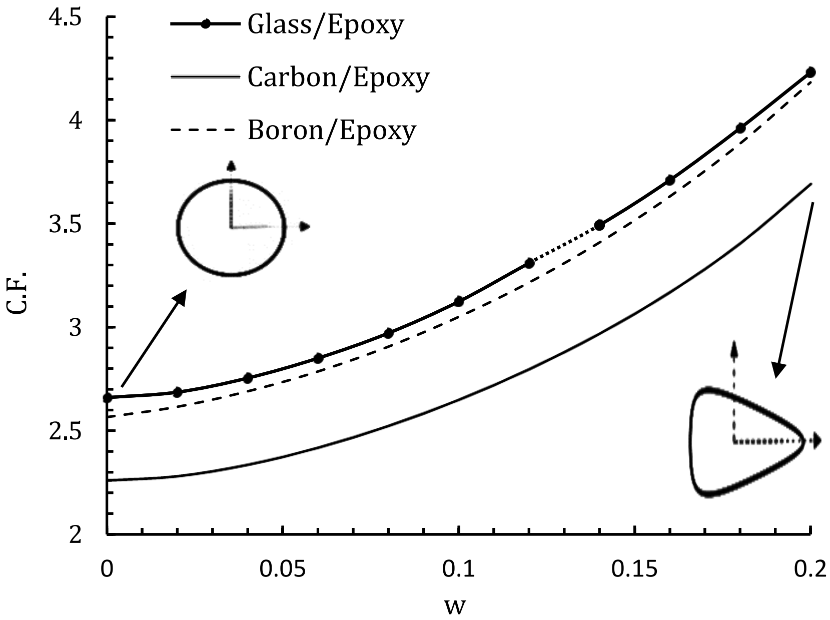
شکل ۵-۹ تغییرات تابع هزینه برحسب زاویه‌ی بار در $\gamma=$ ۰ و w=۰/۰۵

جدول ۵-۵ مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مختلف در $\gamma=$ ۰ و w=۰/۰۵

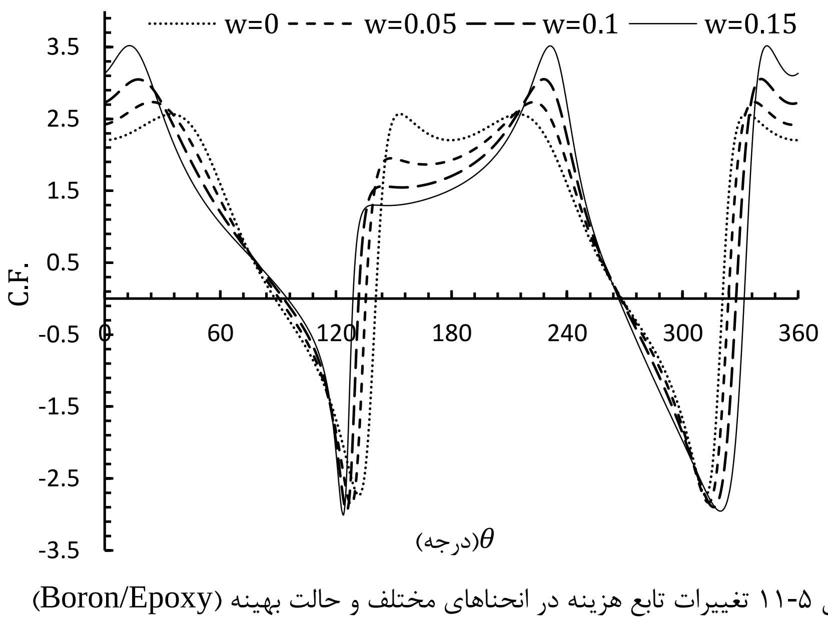
C.F.	β	α	ماده
۲/۷۹۹۱	۰-۶۱-۱۲۲	۶۲/۷۱	Glass/Epoxy
۲/۳۷۴۷	۳۰-۹۰-۱۵۰	۹۰	Carbon/Epoxy
۲/۷۳۴۶	۱۳/۴۲-۷۳/۴۲-۱۳۳/۴۳	۶۵/۱۴	Boron/Epoxy

در نهایت شکل ۵-۱۰ تغییرات مقدار تابع هزینه برحسب پارامتر w با در نظر گرفتن مقادیر بهینه‌ی سه متغیّر طراحی زاویه‌ی بار، زاویه‌ی الیاف و زاویه‌ی چرخش گشودگی حاصل از الگوریتم PSO برای سه ماده‌ی مورد بحث را نشان می‌دهد. مطابق شکل، همان‌طور که انتظار می‌رود با کاهش w و نرم‌تر شدن انحنای گوشه‌ی گشودگی مقدار تابع هزینه برای همه‌ی مواد کاهش می‌یابد تا جایی که در w=۰ گشودگی شبه‌مثلثی، شکل خود را ازدست داده و به دایره تبدیل می‌شود. در این حالت مقدار تابع هزینه هم به کمترین مقدار ممکن می‌رسد. مقادیر بهینه‌ی متغیّرهای زوایای بار، الیاف و چرخش گشودگی با استفاده از الگوریتم PSO، در wهای مختلف و برای تمامی مواد در جدول ۵-۶ ارائه شده است. برای این حالت ابتدا فرآیند بهینه‌سازی به ازای چهار متغیّر طراحی یعنی انحنای گشودگی، زاویه‌ی بار، زاویه‌ی الیاف و زاویه‌ی چرخش صورت می‌گیرد تا مقدار بهینه‌ی انحنای گشودگی در زوایای بار و چرخش بهینه مشخص شود؛ همانطور که قابل مشاهده می‌باشد برای این

گشـودگی در $w=0$ که بیان کننده‌ی گشـودگی دایروی می‌باشـد کمترین مقدار تابع هزینه را خواهیم داشـت. در حالت بعدی نتایج ارائه شده برحسب چند انحنای دیگر از همان ماده مرتّب شده تا مقادیر بهینه در انحناهای دیگر مشخص گردد. شکل ۵-۱۱روند تغییرات تابع هزینه در اطراف گشودگی برای ماده‌ی Boron/Epoxy و در انحناهای مورد بررسی (حالت بهینه) را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۰ تغییرات تابع هزینه نسبت به انحنای گشودگی

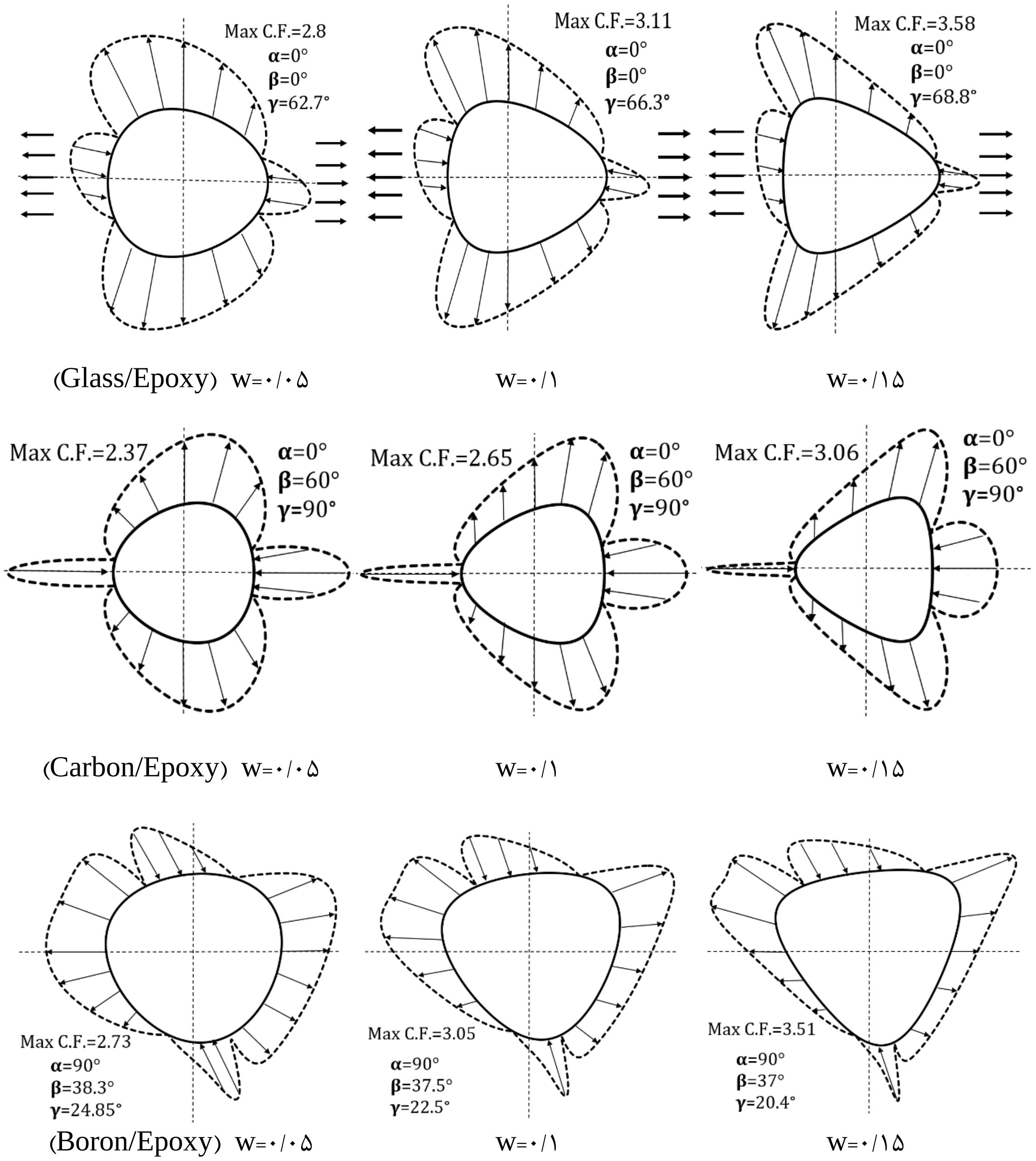


شکل ۵-۱۱ تغییرات تابع هزینه در انحناهای مختلف و حالت بهینه (Boron/Epoxy)

در نهایت شـکل ۵-۱۲ نحوه‌ی توزیع تنش بی‌بعد اطراف گشودگی در یکی از حالت‌های بهینه را برای مواد مورد بررسی در سه انحنای مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۵-۶ مقادیر بهینه به ازای سه ماده‌ی مورد بررسی در wهای مختلف

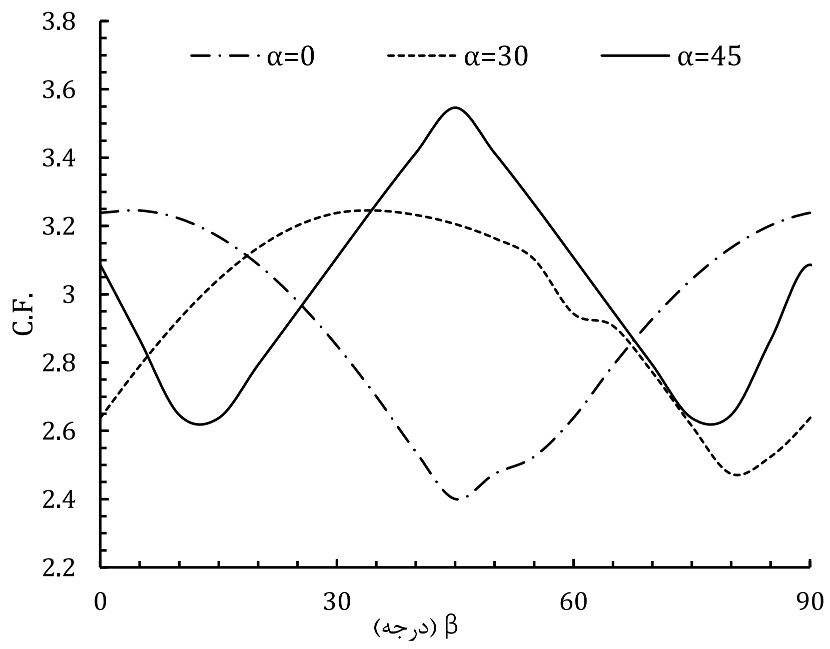
w	α	γ	β	C.F.
		Glass/Epoxy		
۰(بهینه)	۰	۵۹/۴	–	۲/۶۵۹
	۹۰	۳۰/۵	–	
۰/۰۵	۰	۶۲/۷	۰-۶۰-۱۲۰-۱۸۰	۲/۷۹۸
	۹۰	۲۷/۵	۳۰-۹۰-۱۵۰	
۰/۱	۰	۶۶/۳	۰-۶۰-۱۲۰-۱۸۰	۳/۱۱۴
	۹۰	۲۴	۳۰-۹۰-۱۵۰	
۰/۱۵	۰	۶۸/۸	۰-۶۰-۱۲۰-۱۸۰	۳/۵۷۸
	۹۰	۲۲	۳۰-۹۰-۱۵۰	
		Carbon/Epoxy		
w	α	γ	β	C.F.
۰(بهینه)	۹۰	۰	–	۲/۲۶۱
	۰	۹۰	–	
۰/۰۵	۰	۹۰	۰-۶۰-۱۲۰-۱۸۰	۲/۳۷۴
	۹۰	۰	۳۰-۹۰-۱۵۰	
۰/۱	۰	۹۰	۰-۶۰-۱۲۰-۱۸۰	۲/۶۵۰
	۹۰	۰	۳۰-۹۰-۱۵۰	
۰/۱۵	۰	۹۰	۰-۶۰-۱۲۰-۱۸۰	۳/۰۶۵
	۹۰	۰	۳۰-۹۰-۱۵۰	
		Boron/Epoxy		
w	α	γ	β	C.F.
۰(بهینه)	۰	۶۲	–	۲/۵۶۵
	۹۰	۲۸	–	
۰/۰۵	۰	۶۵/۱۵	۵۱/۷-۱۱۱/۷-۱۷۱/۷	۲/۷۳۴
	۹۰	۲۴/۸۵	۳۸/۳-۹۸/۳-۱۵۸/۳	
۰/۱	۰	۶۷/۵۵	۵۲/۵-۱۱۲/۵-۱۷۲/۵	۳/۰۴۸
	۹۰	۲۲/۵	۳۷/۵-۹۷/۵-۱۵۷/۵	
۰/۱۵	۰	۶۹/۶	۵۳-۱۱۳-۱۷۳	۳/۵۱۶
	۹۰	۲۰/۴	۳۷-۹۷-۱۵۷	



شکل ۵-۱۲ نحوه‌ی توزیع تنش بی‌بعد بهینه اطراف گشودگی در سه انحنای مختلف

۵-۳ گشودگی چهارضلعی

مشـابه بخش قبل، در ابتدا سعی می‌شود برای مقدار خاصی از هریک از متغیّرهای مورد بحث در این مقاله، مقدار بهینه برای دیگر متغیّرهای طراحی در w=۰/۰۵ معرفی می‌شـــود. ســـپس با در نظر گرفتن تمامی متغیّرهای طراحی، به بررســی تأثیر همه‌ی پارامترهای اصلی در کنار هم بر توزیع تنش پرداختــه و بهترین حالت گشـــودگی و مقادیر بهینه‌ی پارامترهای آن که منجر به کمترین مقدار تابع هزینه می‌شـود؛ مشـخص می‌گردد. تأثیر زاویه‌ی چرخش گشودگی بر مقدار تابع هزینه در زوایای بار مختلف در w=۰/۰۵ و فقط برای ماده‌ی Glass/Epoxy در شـکل ۵-۱۳ نشان داده شده است. در این حالت مقادیر تابع هزینه در زاویه‌ی الیاف بهینه حاصل از الگوریتم PSO ارائه شده است. باتوجه به این شـــکل، برای این نوع گشـــودگی تغییرات مقدار تابع هزینه نســـبت به زاویه‌ی چرخش در زوایای بار مختلف با دوره تناوب °۹۰ تکرار می‌شـــود. قابل ذکر اســـت که در این شـــکل به دلیل رفتار تناوبی با دوره‌ی تناوب °۹۰، نتایج فقط تا زاویه‌ی چرخش °۹۰ نشـــان داده شـــده اســـت. اگرچه این نتایج فقط برای ماده‌یGlass/Epoxy ارائه شده است ولی برای سایر مواد نیز این رفتار تناوبی دیده می‌شود.

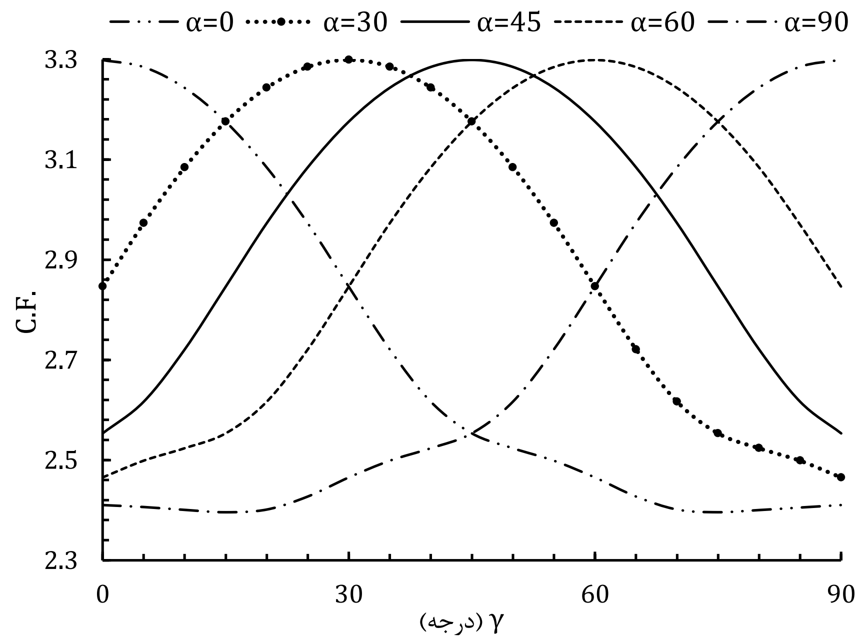


شکل ۵-۱۳ تغییرات تابع هزینه نسبت به چرخش گشودگی (Glass/Epoxy)

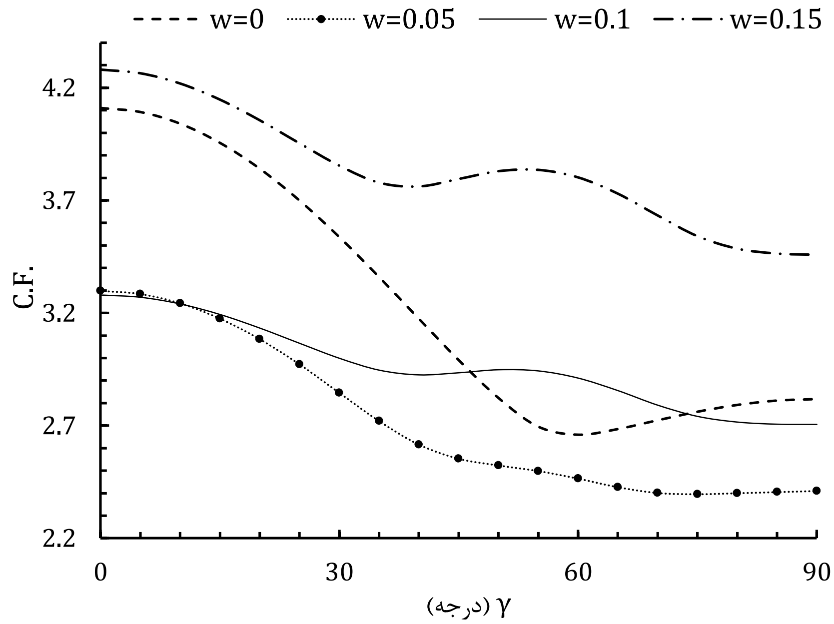
شـــکل ۵-۱۴ نیز فقط برای Glass/Epoxy تأثیر زاویه‌ی الیاف بر مقدار تابع هزینه در زوایای بار

مختلف را نشان می‌دهد. مقدار زاویه‌ی چرخش گشودگی به عنوان متغیّر طراحی در هر زاویه‌ی الیاف از الگوریتم PSO محاسـبه می‌شـود. باتوجه به این شـکل، بیشـترین و کمترین مقدار تابع هزینه برای زوایای بار مختلف (به جز زاویه‌ی °۴۵) یکسـان اسـت که در زوایای الیاف مختلف رخ می‌دهد. نتایج مربوط به این حالت در زاویه‌ی بار °۰ و در انحناهای مختلف در شکل ۵-۱۵ نشان داده شده است.

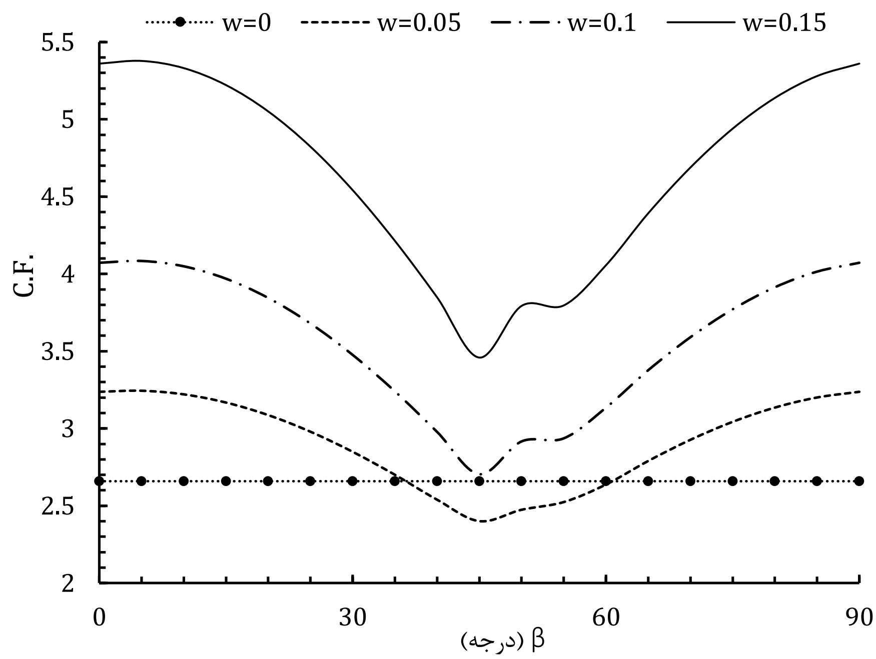
همچنین شـکل ۵-۱۶ تأثیر زاویه‌ی چرخش گشودگی در انحناهای مختلف را بر روی تابع هزینه نشـان می‌دهد. این شـکل با در نظر گرفتن زاویه‌ی الیاف به عنوان متغیّر طراحی و $\alpha = ۰$ ارائه شده اسـت. همان‌طور که انتظار می‌رود با کاهش w و نرم‌تر شـدن انحنای گوشـه‌ی گشـودگی مقدار تابع هزینه کاهش می‌یابد تا جایی که برای $w = ۰$ گشودگی شکل خود را از دست داده و به دایره تبدیل می‌شود، در این حالت زاویه‌ی چرخش گشودگی دیگر تأثیری بر روی تابع هزینه ندارد.



شکل ۵-۱۴ تأثیر زاویه‌ی الیاف بر روی تابع هزینه در زوایای بار مختلف (Glass/Epoxy)

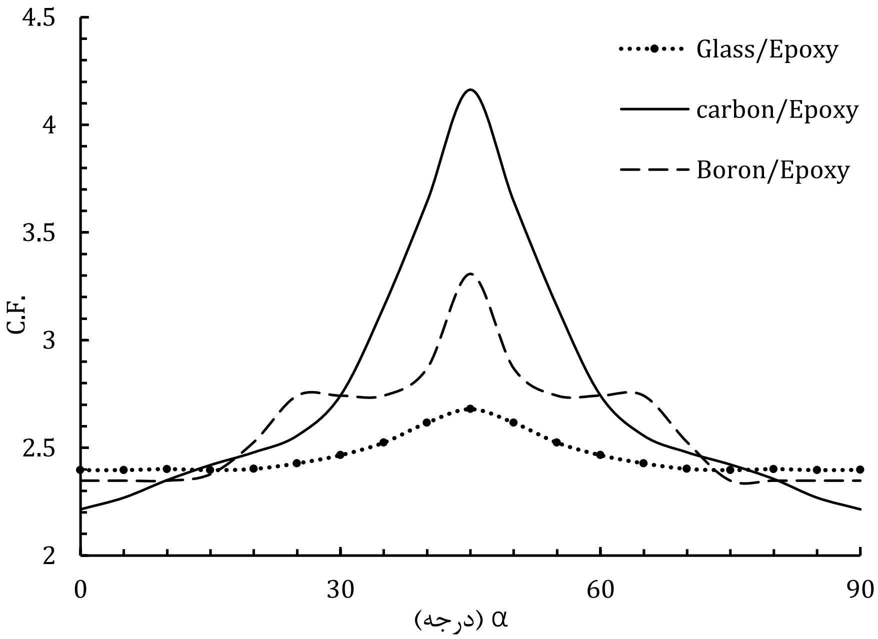


شکل ۵-۱۵ تأثیر زاویه‌ی الیاف بر تابع هزینه در انحناهای مختلف (Glass/Epoxy)



شکل ۵-۱۶ تأثیر چرخش گشودگی بر تابع هزینه در انحناهای مختلف (Glass/Epoxy)

شکل ۵-۱۷ تأثیر زاویه‌ی بار بر مقدار تابع هزینه با در نظر گرفتن همزمان زوایای الیاف و چرخش گشودگی به عنوان متغیّرهای طراحی برای سه ماده‌ی مورد بحث در w=۰/۰۵ را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۷ تغییرات تابع هزینه نسبت به زاویه‌ی بار به ازای سه ماده‌ی مورد بحث

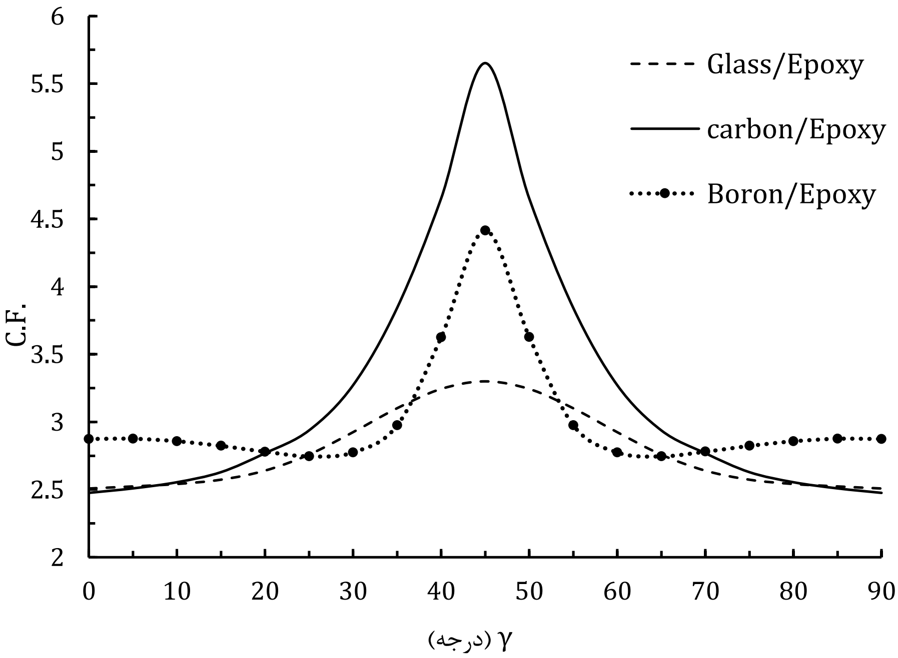
مقادیر زوایای الیاف و چرخش گشودگی در این حالت، مقادیر بهینه‌ی حاصل از الگوریتم PSO هستند. باتوجه به شکل اشاره شده، برای هر سه ماده بیشترین مقدار تابع هزینه در زاویه‌ی بار °۴۵ رخ می‌دهد، و ماده‌ی Carbon/Epoxy در این زاویه نسبت به دو ماده‌ی دیگر بیشترین مقدار تنش را دارد. در نهایت جدول ۵-۷ نتایج بهینه مربوط به شکل ۵-۱۳ تا شکل ۵-۱۷را برای ماده‌ی Glass/Epoxy نمایش می‌دهد. در ادامه نیز سعی می‌شود تا در مورد Glass/Epoxy نتایج به طور مفصل ارائه شده و برای دیگر مواد تنها به معرفی جواب‌های بهینه‌ی اکتفا شود.

تأثیر مقدار تابع هزینه برحسب زاویه‌ی الیاف در زوایای بار بهینه به ازای سه ماده‌ی مورد بحث در شکل ۵-۱۸نشان داده شده است. نتایج این حالت در $\beta = ۰$ و w=۰/۰۵ می‌باشد. شکل ۵-۱۹مقادیر تابع هزینه را برحسب زاویه‌ی الیاف و در زوایای چرخش مختلف برای ماده‌ی Glass/Epoxy در w=۰/۰۵ نشان می‌دهد. متغیّر طراحی در این حالت زاویه‌ی بار است که با استفاده از الگوریتم PSO تعیین می‌شود. از شکل ۵-۱۸ و شکل ۵-۱۹می‌توان نتیجه گرفت که در زوایای خاصی که برای مواد مختلف متفاوت است؛ مقدار تابع هزینه کمترین و بیشترین مقدار را داراست. بنابراین برای گشودگی چهارضلعی در یک انحنای خاص و زاویه‌ی چرخش مشخص، می‌توان مقادیر بهینه‌ی زوایای بار و الیاف

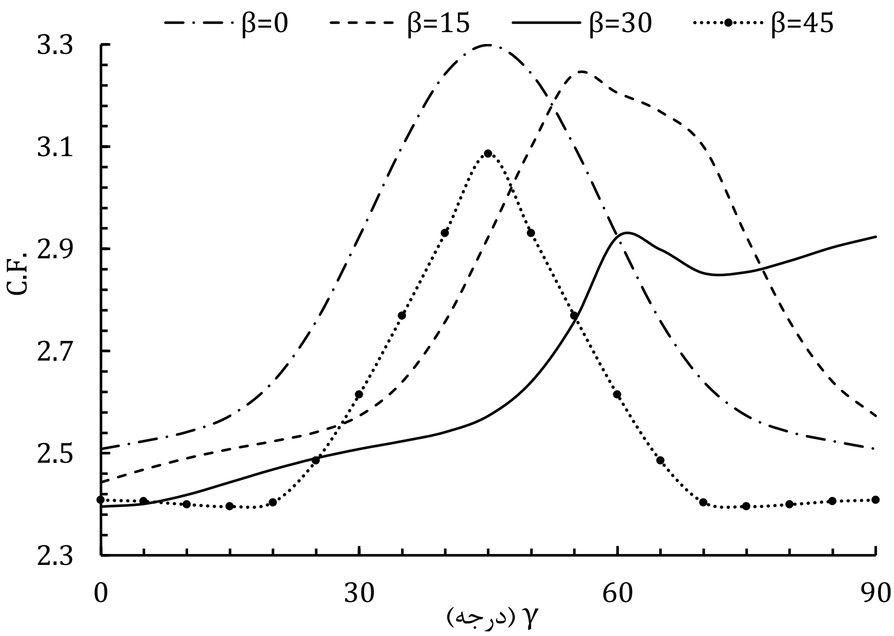
را که منجر به کمینه شـدن تابع هزینه می‌شود تعیین کرد. مقادیر بهینه مربوط به زوایای بار و الیاف متناظر با زوایای چرخش مختلف در جدول ۵-۸ ارائه گردیده است.

جدول ۵-۷ نتایج بهینه در زوایای بار و انحناهای مختلف (Ce9000 Glass/Epoxy)

w=۰				w=۰/۰۵			
α	γ	β	C.F.	α	γ	β	C.F.
۰	۵۹/۵	–	۲/۶۵۹۵	۰	۷۴	۴۵-۱۳۵	۲/۳۹۵۶
۳۰	۸۹/۵	–	۲/۶۵۹۵	۳۰	۹۰	۷۹/۵-۱۶۹/۵	۲/۴۶۵۱
۴۵	۰	–	۲/۹۹۱۵	۴۵	۰	۷۷/۵-۱۶۷/۵	۲/۵۷۸۶
	۹۰	–			۹۰	۱۲/۳-۱۰۲/۳	
۶۰	۰/۵	–	۲/۶۵۹۵	۶۰	۰	۱۰/۶-۱۰۰/۶	۲/۴۶۵۰
۹۰	۳۰/۵	–	۲/۶۵۹۵	۹۰	۱۶	۴۵/۵-۱۳۵/۵	۲/۳۹۵۵
w=۰/۱				w=۰/۱۵			
α	γ	β	C.F.	α	γ	β	C.F.
۰	۸۸/۵	۴۵-۱۳۵	۲/۷۰۶۶	۰	۹۰	۴۵-۱۳۵	۳/۴۵۷۵
۳۰	۹۰	۸۰-۱۷۰	۲/۹۱۹۴	۳۰	۶۹	۸۶-۱۷۶	۳/۷۵۸۷
۴۵	۵	۸۰-۱۷۰	۲/۹۲۷۵	۴۵	۸۶/۵	۱۰/۶-۱۰۰/۶	۳/۷۶۳۲
	۸۵	۱۱-۱۰۱			۶/۵	۷۹-۱۶۹	
۶۰	۰	۱۰-۱۰۰	۲/۹۰۹۵	۶۰	۲۱	۴-۹۴-۱۷۴/۵	۳/۷۵۸۵
۹۰	۰	۴۵-۱۳۵	۲/۷۰۳۵	۹۰	۰	۴۵-۱۳۵	۳/۴۵۷۱



شکل ۵-۱۸ تغییرات تابع هزینه نسبت به زاویه‌ی الیاف در $\beta = ۰$ و w=۰/۰۵



شکل ۵-۱۹ تأثیر زاویه‌ی الیاف بر تابع هزینه در زوایای چرخش مختلف (Glass/Epoxy)

جدول ۵-۸ مقادیر بهینه در زوایای چرخش مختلف (w=۰/۰۵)

(Glass/Epoxy)

β	γ	α	$\lvert\alpha-\gamma\rvert$	C.F.	β	γ	α	$\lvert\alpha-\gamma\rvert$	C.F.
۰	۰	۵۳/۲	۵۳/۲	۲/۵۰۸۰	۳۰	۰	۷۴/۵	۷۴/۵	۲/۳۹۵۵
	۹۰	۳۶/۸	۵۳/۲	۲/۵۰۸۰					
۱۵	۰	۶۲/۸۴	۶۲/۸۴	۲/۴۴۳۰	۴۵	۰	۹۰	۹۰	۲/۴۰۸۴
						۹۰	۰	۹۰	۲/۴۰۸۴

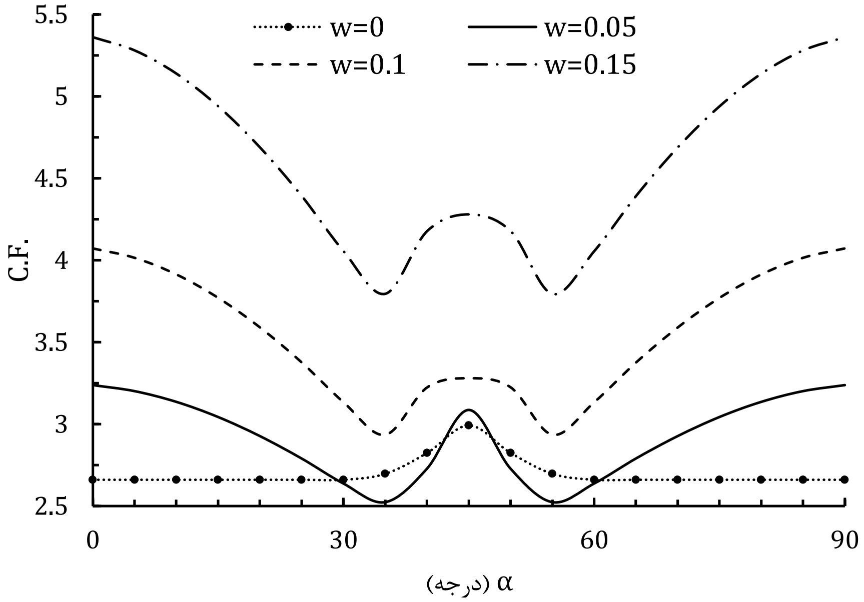
(Carbon/Epoxy)

β	γ	α	$\lvert\alpha-\gamma\rvert$	C.F.	β	γ	α	$\lvert\alpha-\gamma\rvert$	C.F.
۰	۰	۷۰/۳	۷۰/۳	۲/۴۷۵۶	۳۰	۹۰	۰	۹۰	۲/۴۷۷۳
	۹۰	۱۹/۷	۷۰/۳						
۱۵	۰	۷۷/۵	۷۷/۵	۲/۳۹۰۵	۴۵	۰	۹۰	۹۰	۲/۲۱۴۱
						۹۰	۰	۹۰	۲/۲۱۴۱

(Boron/Epoxy)

β	γ	α	$\lvert\alpha-\gamma\rvert$	C.F.	β	γ	α	$\lvert\alpha-\gamma\rvert$	C.F.
۰	۲۶/۶	۷۸/۱	۵۱/۵	۲/۷۴۲۲	۳۰	۰	۷۱/۴	۷۱/۴	۲/۴۲۵۹
	۶۳/۴	۱۱/۹۶	۵۱/۵	۲/۷۴۲۲					
۱۵	۷۷/۸۱	۲۶/۳۲	۵۱/۵	۲/۷۴۲۷	۴۵	۱۱/۳۶	۸۳/۷۵	۷۲/۴	۲/۳۴۷۹
						۶/۲۴	۷۸/۶۴	۷۲/۴	۲/۳۴۷۹

شکل ۵-۲۰ تغییرات مقدار تابع هزینه برحسب زاویه‌ی بار در انحناهای مختلف و $\beta = ۰$ را نشان می‌دهد. پارامتر زاویه‌ی الیاف در این شـکل به عنوان متغیّر طراحی در نظر گرفته شـده است. در این شکل مقدار بیشینه تابع هزینه در زوایای ۰ و ۹۰ درجه رخ می‌دهد. جدول ۵-۹ نتایج بهینه مربوط به این حالت را نمایش می‌دهد. قابل توضـیح است که در w=۰ طی اجراهای مختلف برنامه مشخص شد کـه کمترین مقدار تابع هزینه در زوایای بار و الیاف مختلفی رخ می‌دهد اما در تمام اجراها قدر مطلق تفاضل زاویه‌ی بار از زاویه‌ی الیاف مقدار مشخصی می‌باشد.

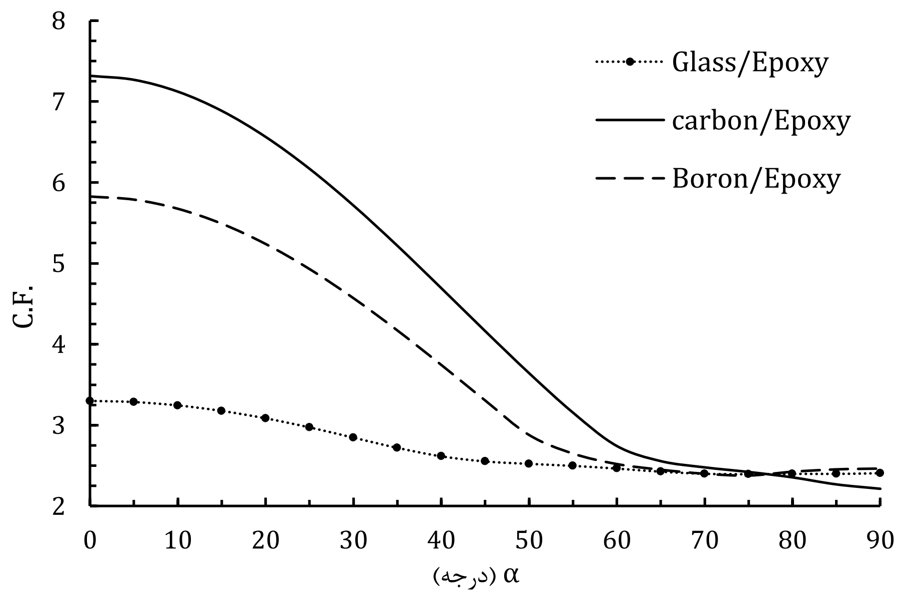


شکل ۵-۲۰ تأثیر زاویه‌ی بار بر تابع هزینه در $\beta = ۰$ (Glass/Epoxy)

جدول ۵-۹ نتایج بهینه در انحناهای مختلف و $\beta = ۰$ (Glass/Epoxy)

C.F.	$\|\alpha - \gamma\|$	γ	α	w
۲/۶۵۹۵	۵۹/۳۷	۱۸/۷۵	۷۸/۱۲	۰
	۵۹/۳۷	۵۹/۳۷	۰	
	۵۹/۳۹	۶۶/۲۵	۶/۸۶	
۲/۵۰۸۱	–	۰	۵۳/۲	۰/۰۵
		۹۰	۳۶/۸	
۲/۹۲۷۱	–	۹۰	۳۷/۳	۰/۱
		۱۲/۴	۵۵/۵	
۳/۷۵۴۴	–	۱۷/۵	۵۵/۸۵	۰/۱۵
		۷۰	۳۴/۲	

شکل ۵-۲۱ تغییرات مقادیر تابع هزینه برحسب زاویه‌ی بار را برای سه ماده‌ی مورد بحث در w=۰/۰۵ و γ=۰ نشان می‌دهد. در واقع در این شکل با درنظرگرفتن زاویه‌ی چرخش به عنوان متغیّر طراحی، به بررسی تغییرات تابع هزینه برحسب زاویه‌ی بار در زاویه‌ی چرخش بهینه‌ی حاصل از الگوریتم PSO پرداخته شده است. جدول ۵-۱۰ نتایج بهینه مربوط به این حالت را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۲۱ تغییرات تابع هزینه برحسب زاویه‌ی بار در $\gamma = ۰$ و w=۰/۰۵

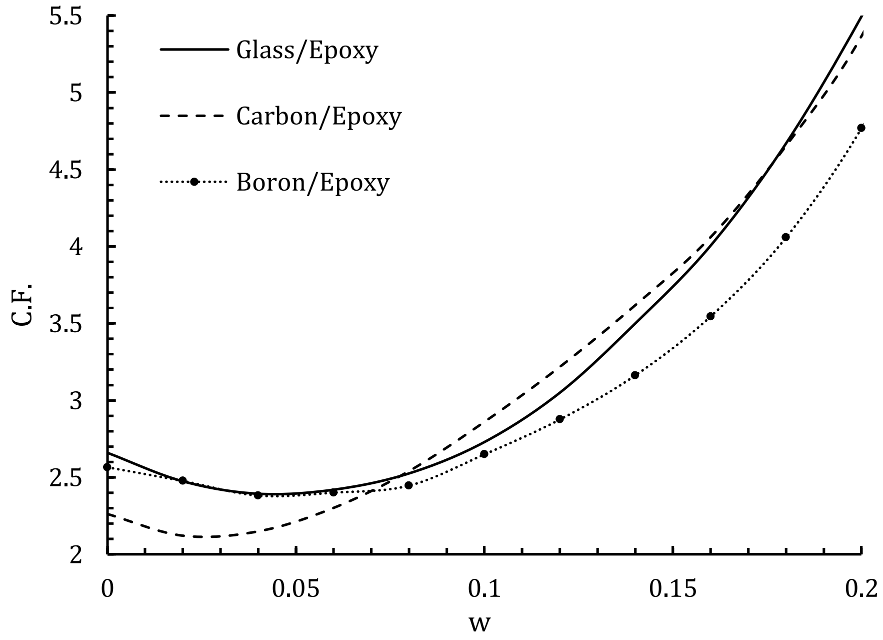
جدول ۵-۱۰ نتایج بهینه در حالت $\gamma = ۰$ و w=۰/۰۵

C.F.	$\lvert\alpha - \beta\rvert$	β	α	ماده
۲/۳۹۵۴	۴۴/۳-۴۵/۷	۳۰-۱۲۰	۷۴/۳	Glass/Epoxy
۲/۲۱۹۲	۴۵	۴۵-۱۳۵	۹۰	Graphite/Epoxy
۲/۲۱۴۰	۴۵	۴۵-۱۳۵	۹۰	Carbon/Epoxy
۲/۳۴۷۹	۳۸/۸-۵۱/۲	۳۳/۶-۱۲۳/۶	۷۲/۴	Boron/Epoxy

علاوه بر زاویه‌ی بار، زاویه‌ی چرخش و زاویه‌ی الیاف، مقدار w نیز در توزیع تنش اطراف گشودگی تأثیر مستقیمی دارد. با در نظر گرفتن تأثیر این متغیّر، شکل ۵-۲۲ تغییرات مقدار تابع هزینه برحسب پارامتر w با در نظر گرفتن مقادیر بهینه‌ی سه متغیّر طراحی زاویه‌ی بار، زاویه‌ی الیاف و زاویه‌ی چرخش گشودگی حاصل از الگوریتم PSO برای سه ماده‌ی مورد بحث را نشان می‌دهد. در این حالت کمترین مقدار تابع هزینه برای تمامی مواد بررسی شده در انحنایی مخالف صفر ($w \neq ۰$) رخ می‌دهد.

بنابراین با انتخاب پارامترهای بهینه برای گشـودگی شبه‌مربعی می‌توان به مقادیر تنش کمتری نسبت به حتی گشـــودگی دایره‌ای (w=۰) دســـت یافت. جدول ۵-۱۱ مقادیر بهینه‌ی متغیّرهای زوایای بار، الیاف و چرخش گشودگی را با استفاده از الگوریتم PSO، در wهای مختلف و برای تمامی مواد بررسی شـده نشـان می‌دهد. مطابق این جدول مقدار تنش بی‌بعد کمینه به شـدت به مقدار w وابســته است. شـــکـل ۵-۲۳ رونـد تغییرات تـابع هزینــه در انحنــاهــای مختلف و در حــالــت بهینه به ازای ماده‌ی Boron/Epoxy نشان می‌دهد.

در نهایت پارامترهای بهینه‌ی کلی برای گشـودگی چهارضـلعی در جدول ۵-۱۲ آورده شده است. در این جدول درصــد اختلاف بین تنش کمینه‌ی مربوط به گشـــودگی چهارضـــلعی با حالت بهینه‌ی گشـودگی دایره‌ای با (٪ اختلاف) نشــان داده شــده اســت. همچنین شـکـل ۵-۲۴ روند تغییرات تنش بی‌بعـد اطراف گشـــودگی در یکی از حالت‌های بهینه برای ماده Boron/Epoxy و در ســـه انحنای مختلف را نشــان می‌دهد. شکل ۵-۲۵ با در نظر گرفتن انحنای بهینه، شکل گشودگی بهینه و نحوه‌ی توزیع تنش اطراف آن را نشان می‌دهد.



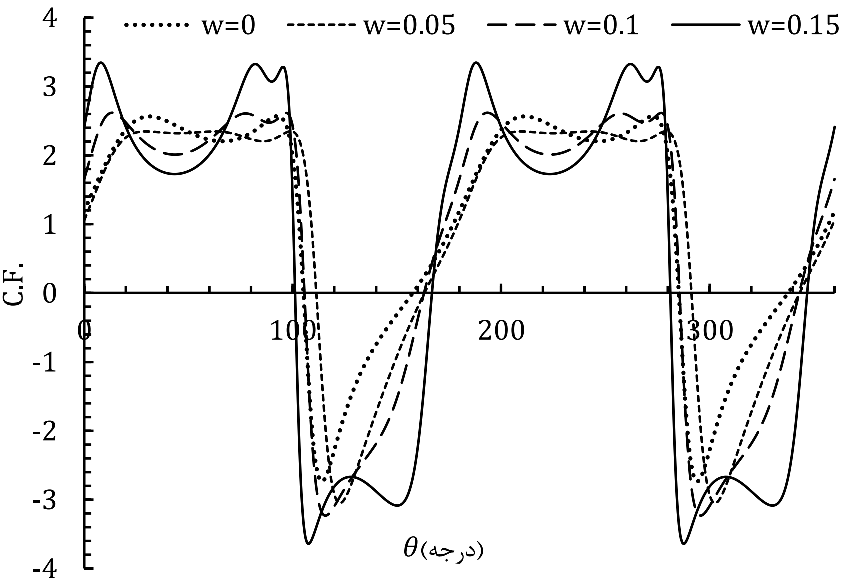
شکل ۵-۲۲ تغییرات تابع هزینه نسبت به انحنای گشودگی

جدول ۵-۱۱ مقادیر بهینه در wهای مختلف (گشودگی چهارضلعی)

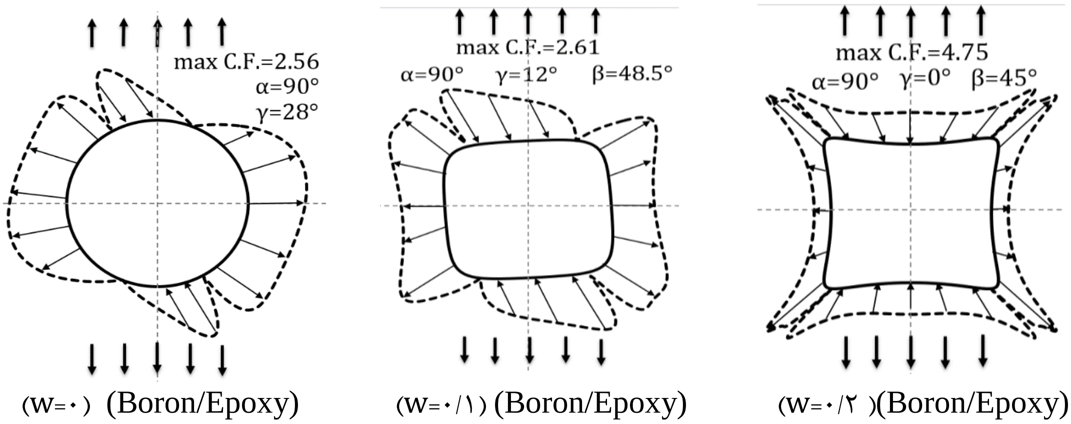
w	تعداد اجرای برنامه	α	γ	β	C.F.	$\|\alpha - \gamma\|$
			Glass/Epoxy			
۰	۱	۱۷/۸۵	۷۷/۲	–	۲/۶۵۹۵	۶۰
	۲	۳۰/۴	۹۰	–		۶۰
۰/۰۵	۱	۰	۷۰	۴۵–۱۳۵	۲/۳۹۵۶	–
	۲	۹۰	۲۰			–
۰/۱	۱	۰	۹۰	۴۵–۱۳۵	۲/۷۰۳۷	–
	۲	۹۰	۰			–
۰/۱۵	۱	۰	۹۰	۴۵–۱۳۵	۳/۷۰۴۰	–
	۲	۹۰	۰			–
			Carbon/Epoxy			
w	تعداد اجرای برنامه	α	γ	β	C.F.	$\|\alpha - \gamma\|$
۰	۱	۹۰	۰	–	۲/۲۶۱	۹۰
	۲	۰	۹۰	–		۹۰
۰/۰۵	۱	۰	۹۰	۴۵–۱۳۵	۲/۲۱۱	–
	۲	۹۰	۰			–
۰/۱	۱	۰	۹۰	۴۵–۱۳۵	۲/۸۶۱	–
	۲	۹۰	۰			–
۰/۱۵	۱	۶۸/۲	۲	۸۷/۸–۱۷۷/۸	۳/۸۱۰	۶۶/۲
	۲	۹۰	۲۴	۱۹–۱۰۹	۳/۸۱۰	۶۶
	۳	۷۰/۴	۴/۲	۰–۹۰–۱۸۰	۳/۸۱۰	۶۶/۲
	۴	۵/۵	۷۰/۶	۷۶/۷–۱۶۶/۷	۳/۸۱۰	۶۵/۱
			Boron/Epoxy			
w	تعداد اجرای برنامه	α	γ	β	C.F.	$\|\alpha - \gamma\|$
۰	۱	۰	۶۲	–	۲/۵۶۵	۶۲
	۲	۹۰	۲۸	–		۶۲
	۳	۶۲	۰	–		۶۲
۰/۰۵	۱	۷/۷	۸۰/۱	۴۶/۵–۱۳۶/۵	۲/۳۴۷	۷۲/۴
	۲	۱۵/۱	۸۷/۵	۵۴–۱۴۴		۷۲/۴
	۳	۱۰/۳	۸۲/۷	۴۹–۱۳۹		۷۲/۴
	۴	۸۹/۵	۱۷/۱	۵۰/۷–۱۴۰/۷		۷۲/۴
۰/۱	۱	۲/۵	۸۰/۵	۴۴–۱۳۴	۲/۶۱۱	۷۸
	۲	۰	۷۸	۴۱/۵–۱۳۱/۵		۷۸
	۳	۹۰	۱۲	۴۸/۵–۱۳۸/۵		۷۸
۰/۱۵	۱	۸۱/۴	۰	۳۹–۱۲۹	۳/۳۳۸	۸۱/۴
	۲	۹۰	۸/۵	۴۷/۵–۱۳۷/۵		۸۱/۵

جدول ۵-۱۲ مقادیر بهینه در حالت کلی (گشودگی چهارضلعی)

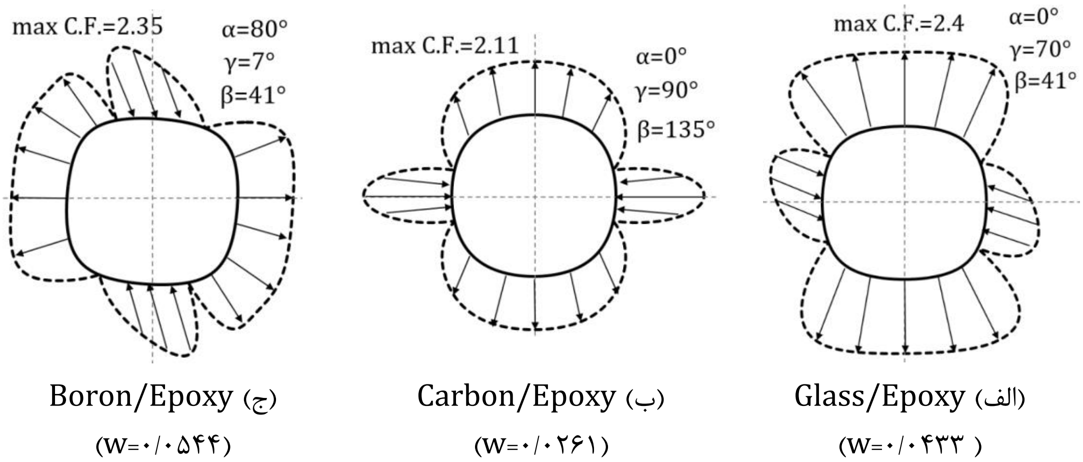
تعداد اجرا	w	α	γ	β	C.F.	$\lvert\alpha-\gamma\rvert$	$\lvert\gamma-\beta\rvert$	٪ اختلاف
Glass/Epoxy								
۱	۰/۰۴۳۳	۰	۷۰	۴۵-۱۳۵	۲/۳۹۸۵	۷۰	۲۵-۶۵	۱۰
۲	۰۴۳۳	۹۰	۲۰	۴۵-۱۳۵	۲/۳۹۸۵	۷۰	۲۵-۱۱۵	
۳	۰/۰۴۳۳	۸۳/۵	۱۲/۸۵	۳۹-۱۲۹	۲/۳۹۵۰	۷۰/۶۵	۲۶/۱۵-۱۱۶/۱۵	
۴	۰/۰۴۳۳	۱۳/۴	۸۴/۵	۵۸-۱۴۸	۲/۳۹۳۳	۷۱/۱	۲۶/۵-۶۳/۵	
۵	۰/۰۴۳۳	۷۹/۹۴	۹/۱۸	۳۵/۳-۱۲۵/۳	۲/۳۹۱۵	۷۰/۷۶	۲۶/۱۶-۱۱۶/۱۶	
Carbon/Epoxy								
۱	۰/۰۲۶۱	۰	۹۰	۴۵-۱۳۵	۲/۱۰۸۱	۹۰	۴۵	۶/۸
۲		۹۰	۰	۴۵-۱۳۵	۲/۱۰۸۱	۹۰	۴۵	
Boron/Epoxy								
۱	۰/۰۴۳۵	۸۷/۲۳	۱۶	۴۹/۳-۱۳۹/۳	۲/۳۶۲۳	۷۱/۲۳	۳۳/۳-۱۲۳/۳	۸
۲	۰/۰۵۴۴	۸۰	۷	۴۱-۱۳۱	۲/۳۴۷۸	۷۳	۳۴-۱۲۴	
۳	۰/۰۵۱۷	۷۵	۲	۳۶/۱۶-۱۲۵/۱۶	۲/۳۴۷۰	۷۲/۷	۳۴/۷۵-۱۲۳/۷۵	
۴	۰/۰۵۲۷	۷۳/۷	۰/۸۵	۳۴/۶۵-۱۲۴/۶۵	۲/۳۴۷۱	۷۲/۸۵	۳۳/۸-۱۲۳/۸	
۵	۰/۰۴۳۵	۹۰	۱۸/۸	۵۲/۱-۱۴۲/۱	۲/۳۶۳۴	۷۱/۲	۳۳/۳-۱۲۳/۳	



شکل ۵-۲۳ تغییرات تابع هزینه در انحناهای مختلف و یک حالت بهینه (Boron/Epoxy)



شکل ۵-۲۴ روند تغییرات تابع هزینه در سه انحنای مختلف در حالت بهینه



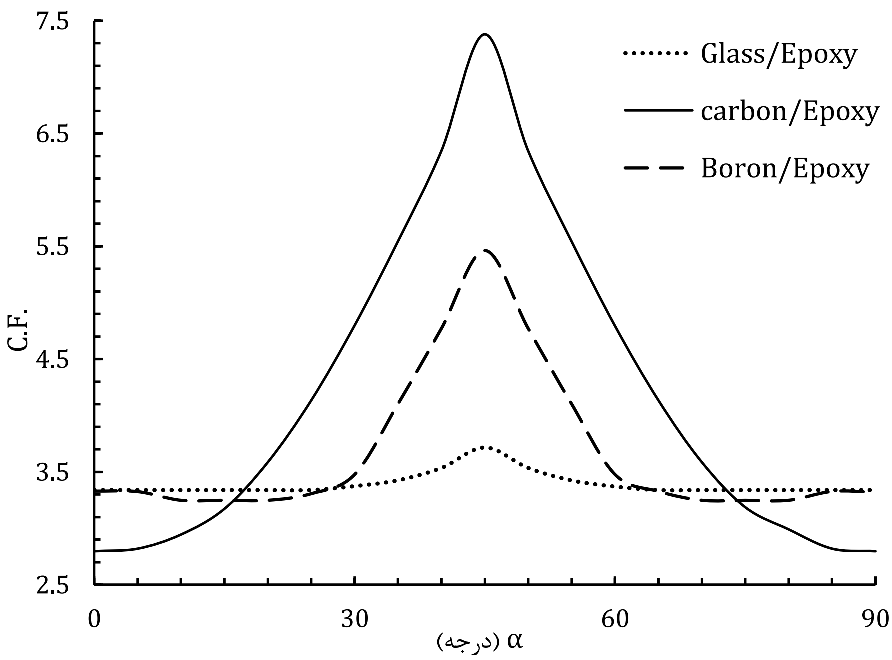
شکل ۵-۲۵ شکل گشودگی بهینه و نحوه‌ی توزیع تنش اطراف آن

۵-۴ گشودگی چندضلعی

در بخش‌های قبل به توزیع تنش بهینه اطراف گشودگی‌های سه‌ضلعی و چهارضلعی پرداخته شد. در این بخش سعی می‌شود تا با در نظرگرفتن تأثیر همان پارامترها به عنوان متغیّر طراحی و تنش بی‌بعد به عنوان تابع هزینه به بررسی توزیع تنش اطراف گشودگی‌های چندضلعی پرداخته شود. در این حالت با در نظر گرفتن تمامی متغیّرهای اشاره شده، با استفاده از الگوریتم PSO به بررسی تأثیر همه‌ی پارامترهای اصلی در کنار هم بر توزیع تنش پرداخته و بهترین حالت گشودگی و مقادیر بهینه‌ی پارامترهای آن که منجر به کمترین مقدار تمرکز تنش شود؛ مشخص می‌گردد. نتایج این فصل فقط تا گشودگی شش‌ضلعی مورد بررسی قرار گرفته شده است. برای گشودگی‌های بیشتر از شش‌ضلعی رفتار به گشودگی دایره‌ای نزدیک می‌شود که از آوردن نتایج صرف‌نظر شده است.

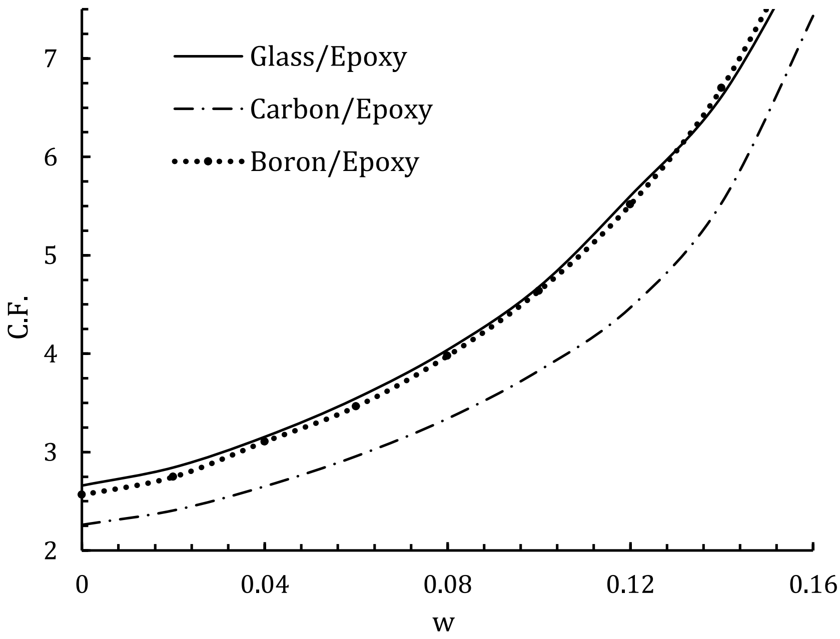
۵-۴-۱ گشودگی پنج‌ضلعی

صـفحه‌ی مطالعه شـده در این بخش دارای گشودگی پنج‌ضلعی بوده و ابعاد آن در مقابل اندازه‌ی گشـودگی چنان اسـت که بتوان صـفحه را بی‌نهایت فرض کرد. شکل ۵-۲۶ تأثیر زاویه‌ی بار بر مقدار تابع هزینه با در نظر گرفتن همزمان زوایای الیاف و چرخش گشودگی به عنوان متغیّرهای طراحی در w=۰/۰۵ را نشـان می‌دهد. همچنین شـکل ۵-۲۷ تغییرات مقدار تابع هزینه برحسـب پارامتر w با در نظر گرفتن مقادیر بهینه‌ی سـه متغیّر طراحی زاویه‌ی بار، زاویه‌ی الیاف و زاویه‌ی چرخش گشــودگی حاصـل از الگوریتم PSO برای سه ماده‌ی مورد بحث نشان می‌دهد. مطابق شکل، همان‌طور که انتظار می‌رود با کاهش w و نرم‌تر شدن انحنای گوشه‌ی گشودگی مقدار تابع هزینه برای همه‌ی مواد کاهش می‌یابد تا جایی که در w=۰ شـکل گشـودگی به دایره تبدیل می‌شود. در این حالت مقدار تابع هزینه هم به کمترین مقدار ممکن می‌رسد.



شکل ۵-۲۶ تغییرات تابع هزینه نسبت به زاویه‌ی بار به ازای سه ماده مورد بحث

مقادیر بهینه‌ی متغیّرهای زوایای بار، الیاف و چرخش گشـودگی با اسـتفاده از الگوریتم PSO، در wهـای مختلف و برای تمامی مواد در جدول ۵-۱۳ ارائه شـــده اســـت. برای این حالت ابتدا فرآیند بهینه‌سازی به ازای چهار متغیّر طراحی انحنای گشودگی، زاویه‌ی بار، زاویه‌ی الیاف و زاویه‌ی چرخش صورت گرفته تا مقدار بهینه‌ی انحنای گشودگی در زوایای بار و چرخش بهینه مشخص شود. در حالت بعدی نتایج ارائه شده برحسب چند انحنای دیگر از همان ماده مرتّب شده تا مقادیر بهینه در انحناهای دیگر مشخص گردد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که برای این گشودگی چرخش گشودگی با دوره‌ی تناوب ۳۶ درجه تکرار می‌شود. در نهایت شکل ۵-۲۸ نحوه‌ی توزیع تنش بهینه شده اطراف گشودگی به ازای ماده‌ی Glass/Epoxy و در سه انحنای مختلف نشان می دهد.



شکل ۵-۲۷ تغییرات تابع هزینه نسبت به انحنای گشودگی

جدول ۵-۱۳ مقادیر بهینه شده در wهای مختلف (گشودگی پنج‌ضلعی)

Glass/Epoxy

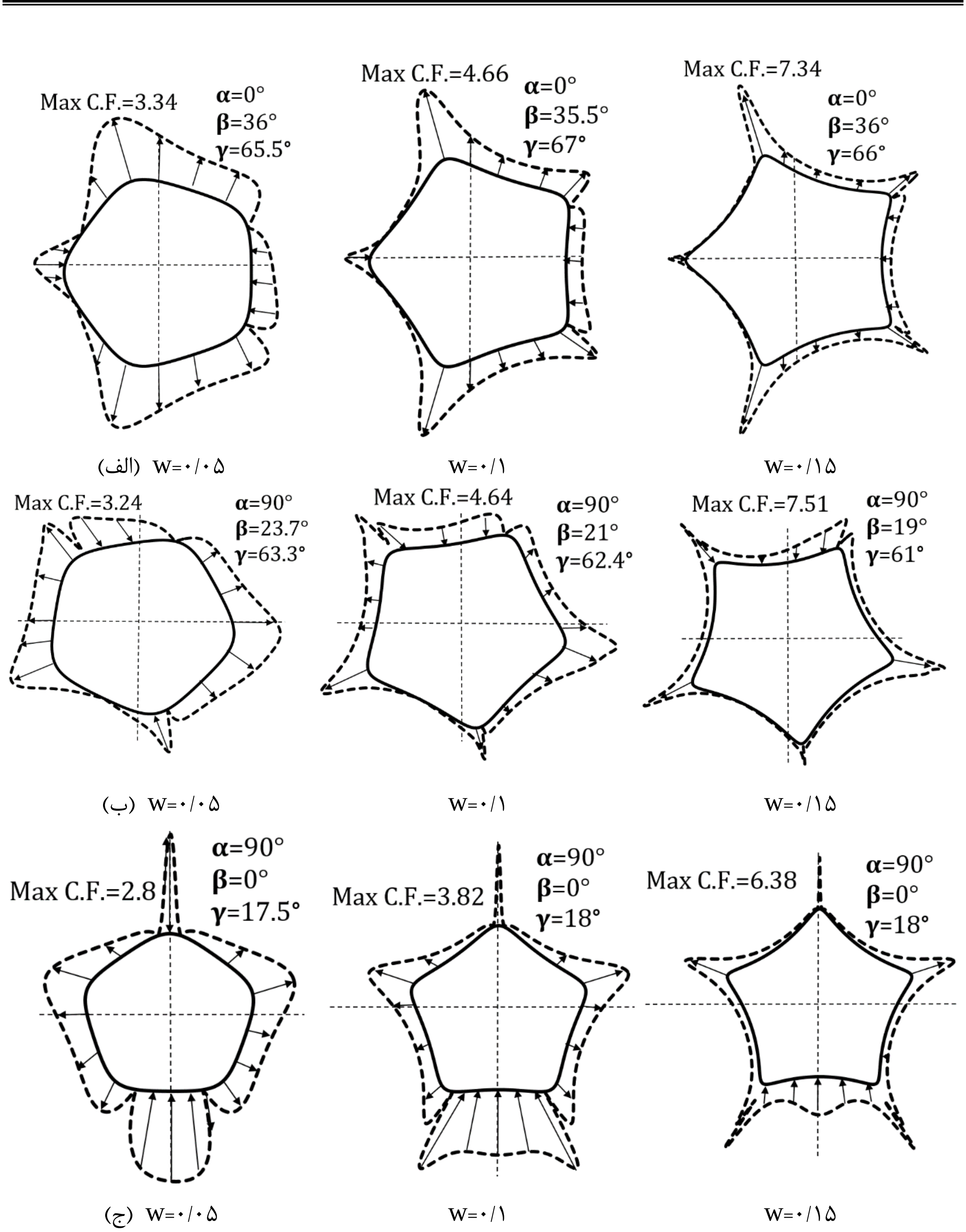
w	α	γ	β	C.F.
۰(بهینه)	۰	۵۹/۴	–	۲/۶۵۹
	۹۰	۳۰/۶	–	
۰/۰۵	۰	۶۵/۵	۰-۳۶-۷۲- . . .	۳/۳۳۹
	۹۰	۲۵	۱۷/۵-۵۳/۵- . . .	
۰/۱	۰	۶۷	۳۵/۵-۷۱/۵- . . .	۴/۶۶۴
	۹۰	۲۳/۳	۱۸/۵-۵۴/۵- . . .	
۰/۱۵	۰	۶۶	۰-۳۶-۷۲- . . .	۷/۳۳۸
	۹۰	۲۳/۵	۱۸-۵۴- . . .	

Carbon/Epoxy

w	α	γ	β	C.F.
۰(بهینه)	۹۰	۰	–	۲/۲۶۱۴
	۰	۹۰	–	
۰/۰۵	۰	۹۰	۰-۳۶-۷۲- . . .	۲/۷۹۷
	۹۰	۰	۱۷/۵-۵۳/۵- . . .	
۰/۱	۰	۹۰	۰-۳۶-۷۲- . . .	۳/۸۲۷
	۹۰	۰	۱۸-۵۴- . . .	
۰/۱۵	۰	۹۰	۰-۳۶-۷۲- . . .	۶/۳۷۸
	۹۰	۰	۱۸-۵۴- . . .	

Boron/Epoxy

w	α	γ	β	C.F.
۰(بهینه)	۰	۶۲	–	۲/۵۶۵۶
	۹۰	۲۸	–	
۰/۰۵	۰	۶۶/۳	۲۶/۵-۶۲/۵- . . .	۳/۲۴۶
	۹۰	۲۳/۷	۲۷/۳-۶۳/۳- . . .	
۰/۱	۰	۶۹	۲۷/۵-۶۳/۵- . . .	۴/۶۳۷
	۹۰	۲۱	۲۶/۴-۶۲/۴- . . .	
۰/۱۵	۰	۷۱/۵	۲۸/۵-۶۴/۵- . . .	۷/۵۱۱
	۹۰	۱۹	۲۵-۶۱- . . .	

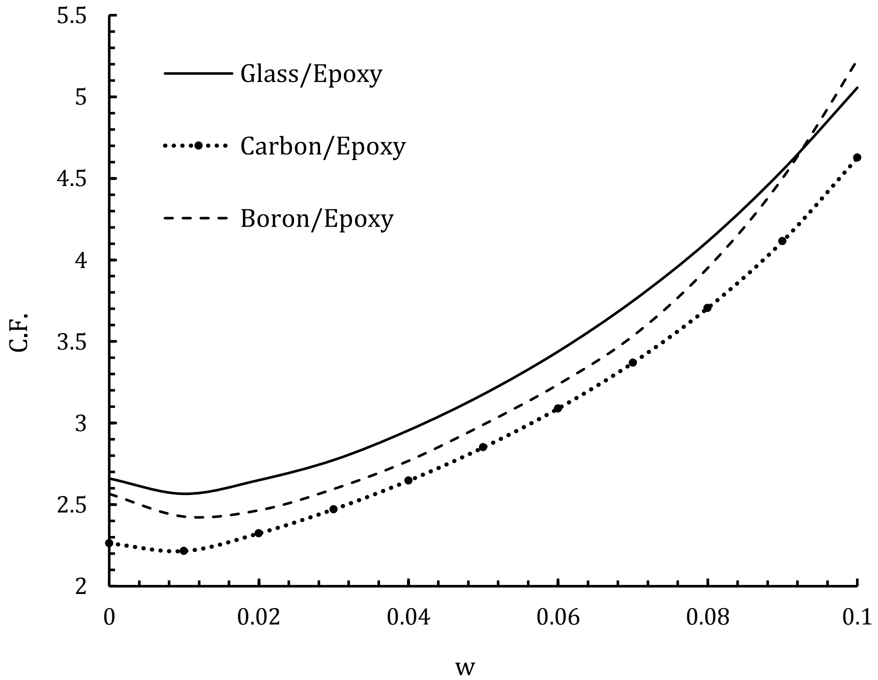


شکل ۵-۲۸ تغییرات تابع هزینه اطراف گشودگی (الف) Glass/Epoxy (ب) Boron/Epoxy (ج) Carbon/Epoxy

۵-۴-۲ گشودگی شش‌ضلعی

شکل ۵-۲۹ تغییرات مقدار تابع هزینه برحسب پارامتر w با در نظر گرفتن مقادیر بهینه‌ی سه متغیّر طراحی زاویه‌ی بار، زاویه‌ی الیاف و زاویه‌ی چرخش گشودگی حاصل از الگوریتم PSO برای سه ماده‌ی مورد بحث را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است برای این گشودگی در $w \neq ۰$ کمترین مقدار تابع هزینه رخ می‌دهد.

مقادیر بهینه‌ی متغیّرهای انحنای گشودگی، زوایای بار، الیاف و چرخش گشودگی با استفاده از الگوریتم PSO، در wهای مختلف و برای تمامی مواد در جدول ۵-۱۴ ارائه شده است. برای این حالت هم مطابق حالت‌های گذشته ابتدا فرآیند بهینه‌سازی به ازای چهار متغیّر طراحی یعنی انحنای گشودگی، زاویه‌ی بار، زاویه‌ی الیاف و زاویه‌ی چرخش صورت می‌گیرد تا مقدار بهینه‌ی انحنای گشودگی در زوایای بار و چرخش بهینه مشخص شود.

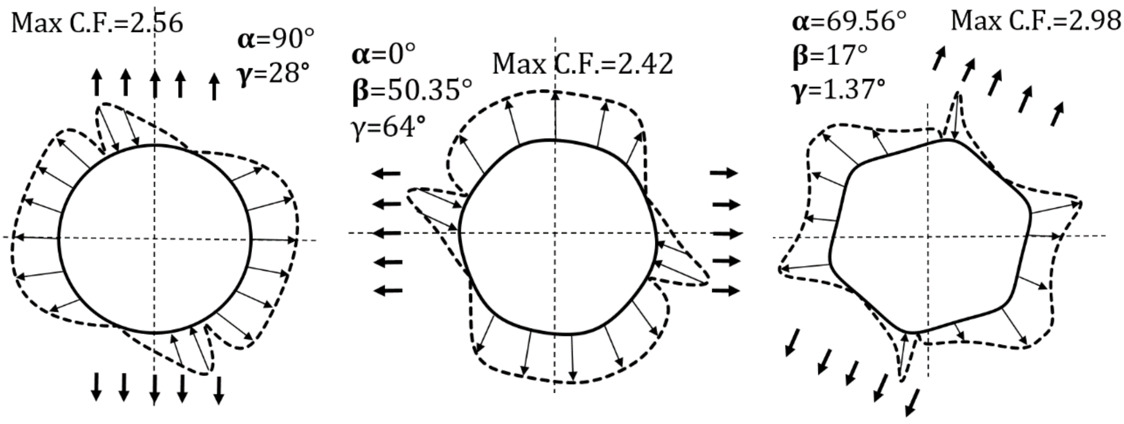


شکل ۵-۲۹ تغییرات تابع هدف نسبت به انحنای گشودگی

جدول ۵-۱۴ پارامترهای بهینه شده در wهای مختلف (گشودگی شش‌ضلعی)

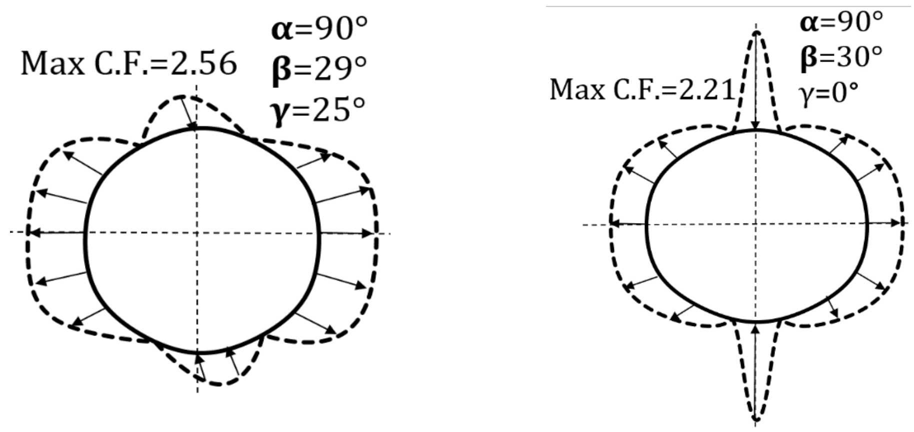
w	تکرار	α	γ	β	C.F.	$\lvert\alpha-\gamma\rvert$	$\lvert\alpha-\beta\rvert$
				Glass/Epoxy			
۰	۱	۶۰/۳	۰/۸۵	–	۲/۶۵۹۵	۵۹/۴۵	–
	۲	۲۹/۷۵	۸۹/۲	–		۵۹/۴۵	–
	۳	۷۷/۴۵	۱۸	–		۵۹/۴۵	–
۰/۰۱(بهینه)	۱	۰	۶۴	۶۱/۲-۱۲۱/۲ – ...	۲/۵۶۱	۶۴	۶۱/۲-۱۲۱/۲ – ...
	۲	۹۰	۲۵	۲۹-۸۹ – ...		۶۵	۱-۶۱ – ...
	۳	۷/۵۷	۷۲/۵	۸/۲-۶۸/۲ – ...		۶۴/۹۳	۰/۶-۶۰/۶ – ...
۰/۰۵	۱	۹۰	۰	۳۰-۹۰-...	۳/۱۷۴	۹۰	۰-۶۰ – ...
	۲	۰	۹۰	۰-۶۰-...		۹۰	۰-۶۰ – ...
	۳	۰	۷۹/۶۵	۵۹/۳-۱۱۹/۳-...		۷۹/۶۵	۵۹/۳-۱۱۹/۳-...
	۴	۹۰	۱۰/۵	۳۰/۶۶-۹۰/۶۶-...		۷۹/۵	۰/۶۶-۵۹/۳۴-...
	۵	۱۱/۷	۹۰	۱۱-۷۱-...		۷۸/۳	۰/۷-۵۹/۳- ...
				Carbon/Epoxy			
w	تکرار	α	γ	β	C.F.	$\lvert\alpha-\gamma\rvert$	$\lvert\alpha-\beta\rvert$
۰	۱	۰	۹۰	–	۲/۲۶۱۴	۹۰	–
	۲	۹۰	۰	–		۹۰	–
۰/۰۱(بهینه)	۱	۹۰	۰	۳۰-۹۰-۱۵۰	۲/۲۱۴	۹۰	۰-۶۰
	۲	۰	۹۰	۰-۶۰-۱۲۰		۹۰	۰-۶۰-۱۲۰
۰/۰۵	۱	۰	۹۰	۰-۶۰-۱۲۰	۲/۸۴۹	۹۰	۰-۶۰-۱۲۰
	۲	۹۰	۰	۳۰-۹۰-۱۵۰		۹۰	۰-۶۰
				Boron/Epoxy			
w	تکرار	α	γ	β	C.F.	$\lvert\alpha-\gamma\rvert$	$\lvert\alpha-\beta\rvert$
۰	۱	۸۷	۲۵	–	۲/۵۶۵۶		–
	۲	۳/۳	۶۵/۳	–			–
	۳	۹۰	۲۸	–			–
۰/۰۱۵	۱	۰	۶۴	۵۰/۳۵-۱۱۰/۳۵	۲/۴۲۵	۶۴	۵۰/۳۵-۱۱۰/۳۵
(بهینه)	۲	۱۷/۳	۸۱/۳	۶۷/۶۶-۱۲۷/۶۶		۶۴	۵۰/۳۵-۱۱۰/۳۵
	۱	۶۹/۵۶	۱/۳۷	۱۷-۷۷-۱۳۷	۲/۹۷۷۶	۶۸/۱۹	۷/۴۴-۵۲/۵۶
۰/۰۵	۲	۱۴/۲۵	۸۲/۴	۶/۷-۶۶/۷ – ...		۶۸/۱۵	۷/۵۵-۵۲/۴۵
	۳	۹/۳	۷۷/۴۵	۱/۸-۶۱/۸ – ...		۶۸/۱۵	۷/۵-۵۲/۵

در حالت بعدی نتایج ارائه شده برحسب چند انحنای دیگر از همان ماده مرتّب شده تا مقادیر بهینه در انحناهای دیگر مشخص گردد. شکل ۵-۳۰ نحوه‌ی توزیع تنش بهینه در اطراف گشودگی به ازای ماده‌ی Boron/Epoxy و در سه انحنای متفاوت نشان می‌دهد. همچنین شکل نحوه‌ی توزیع تنش بهینه را اطراف گشودگی به ازای دو ماده‌ی Glass/Epoxy و Boron/Epoxy نشان می‌دهد.



W=۰ (حالت بهینه) W =۰/۰۱۵ W=۰/۰۵

شکل ۵-۳۰ روند تغییرات تابع هزینه اطراف گشودگی (Boron/Epoxy)



Glass/Epoxy (حالت بهینه) W =۰/۰۱ Carbon/Epoxy (حالت بهینه) W =۰/۰۱

شکل ۵-۳۱روند تغییرات تابع هزینه اطراف گشودگی در حالت بهینه

فصل ۶: نتیجه‌گیری

۶-۱ نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه با کمک حلّی تحلیلی بر پایه‌ی روش متغیّر مختلط لخنتیسکی و با استفاده از تابع نگاشتی همنوا به بهینه‌سازی توزیع تنش در صفحات همسانگرد و ارتوتروپیک نامحدود دارای گشودگی‌های غیردایروی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) پرداخته شد. برای بررسی درستی نتایج، حلّ حاضر با حلّ اجزای محدود مقایسه گردید و نتایج به‌دست‌آمده تطابق خوبی با نتایج فوق داشت.

در این مطالعه به خوبی نشان داده شد که پارامترهای متعددی بر توزیع تنش اطراف گشودگی تأثیرگذار هستند. این پارامترها شامل: شعاع انحنای گوشه‌های گشودگی، زاویه‌ی چرخش گشودگی، زاویه‌ی بار، زاویه‌ی الیاف و جنس صفحه در صفحات ارتوتروپیک می‌باشند. با انتخاب صحیح این پارامترها می‌توان به کمترین تنش بی‌بعد در اطراف گشودگی دست یافت. بدین منظور تأثیر هر پارامتر به صورت مجزّا مورد بررسی قرار گرفت و سپس تأثیر همه‌ی پارامترها در کنار یکدیگر و در نهایت مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مورد بحث که منجر به کمترین تمرکز تنش می‌شود؛ برای هر نوع گشودگی بررسی و معرّفی شد.

در یک بررسی جامع، تأثیر پارامتر انحنای گوشه‌ی گشودگی برای گشودگی‌های مختلف مشاهده شد که نتایج به دو دسته‌ی کلّی تقسیم می‌شوند. برای گشودگی‌هایی که تعداد اضلاع آن‌ها فرد است؛ گشودگی دایروی بهترین هندسه برای کاهش تابع هزینه بوده و با افزایش انحنای گوشه‌ی این گشودگی‌ها مقادیر تابع هزینه نیز افزایش می‌یابد. امّا 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.

همچنین نتایج نشان داد که شعاع انحنای گوشه‌های گشودگی تنها پارامتر موثّر بر کاهش تابع

هزینه نیســت، بلکه چرخش گشــودگی و انتخاب زاویه‌ی الیاف مناســب هم در این کاهش تنش، تأثیر بسزایی دارد که با انتخاب مقادیر بهینه‌ی پارامترهای مذکور در یک انحنای خاص می‌توان تمرکز تنش را به مقدار قابل توجهی کاهش داد.

کمترین تنش بی‌بعد به‌دســت آمده برای دو حالت صــفحه‌ی همســانگرد و ارتوتروپیک و از میان تمامی اشــکال گشــودگی که مورد بررســی قرار گرفت مطابق جدول ۶-۱ می‌باشــد. که بر این اساس، کمترین مقدار تابع هزینه متعلّق به گشــودگی چهارضلعی می‌باشد که حالت بهینه‌ی این گشودگی در صــفحه‌ی همســانگرد نسبت به گشودگی دایره‌ای دارای تمرکزتنش کمتری در حدود ۱۵ درصد و در صــفحه‌ی ارتوتروپیک در حدود ۶/۶ درصــد می‌باشد. بنابراین بر خلاف تصوّر می‌توان با بهینه‌سازی به تمرکز تنش کمتر از تمرکز تنش گشودگی دایره‌ای دست یافت.

جدول ۶-۱ کمترین تنش بی‌بعد به‌دست آمده

صفحه‌ی همسانگرد حاوی گشودگی چهارضلعی

تعداد اجرای برنامه	w	α	β	C.F.	$\|\alpha-\beta\|$	٪ اختلاف
۱	۰/۰۵۱	۳۹/۶۱	۱۷۴/۵۹	۲/۵۴۸۱	۱۳۴/۹۸	۱۵
۲	(بهینه)	۰	۱۳۵	۲/۵۴۹۸	۱۳۵	
۳		۱۸/۳۲	۶۳/۲۸	۲/۵۴۹۲	۴۴/۹۶	
۴		۴۵	۱۸۰	۲/۵۴۸۰	۱۳۵	
۵		۷۴/۱۶	۲۹/۲۰	۲/۵۴۹۳	۴۴/۹۶	

صفحه‌ی ارتوتروپیک حاوی گشودگی چهارضلعی (Carbon/Epoxy)

تعداد اجرای برنامه	w	α	γ	β	C.F.	$\|\alpha-\gamma\|$	$\|\gamma-\beta\|$	٪ اختلاف
۱	۰/۰۲۶۱	۰	۹۰	۴۵-۱۳۵	۲/۱۰۸۱	۹۰	۴۵	۶/۶
۲		۹۰	۰	۴۵-۱۳۵	۲/۱۰۸۱	۹۰	۴۵	

اگرچــه برای زاویه‌ی بار و زاویه‌ی چرخش دو پارامتر مجزا تعریف شـــد اما باید مطالعه‌ی این دو پارامتر در کنار هم بررسی شود، چون در مسأله‌ی بهینه‌سازی صفحه‌ی حاوی گشودگی، رابطه‌ی میان زاویه‌ی بار و چرخش گشــودگی در هر بار تکرار عددی متفاوت را نشــان می‌دهد، اما قدرمطلق تفاضل این دو کمیت همواره مقدار مشــخصــی را داشت که بیان کننده‌ی هندسه‌ی مشخص مربوط به حالت

بهینه می‌باشد.

چون در مسأله‌ی بهینه‌سازی حاضر، مقدار بهینه‌ی کلی مشخص نمی‌باشد، برنامه بهینه‌سازی به‌کار رفته چندین بار برای نسل‌های متوالی تکرار شد. الگوریتم اجتماع ذرات در حفظ تنوع ازدحام کارآمدتر می‌باشد، زیرا تمامی ذرات از اطلاعات مربوط به موفق‌ترین ذره برای بهبود خود استفاده می‌کنند حال آنکه این ویژگی در الگوریتم‌های دیگر وجود ندارد.

در آنالیز نمودارهای همگرایی مربوط به الگوریتم PSO نشان داده شد که در همگرایی این الگوریتم کشف نقاط بهینه‌ی (محلی و کلی) با تنظیم پارامترهای c_1 و c_2 تأثیر می‌پذیرد؛ در حالی که رابطه‌ی سرعت همگرایی به وسیله‌ی پارامتر ضریب وزنی قابل تعیین و تغییر می‌باشد. در روش اول تعیین ضریب اینرسی به صورت ثابت برای ω=۰/۶ تا ω=۰/۷ سرعت همگرایی متوسط است. اما در حالت تعیین این ضریب به صورت کاهش خطی سرعت همگرایی بالایی دارد. به طور کلّی کارایی این روش‌ها به نوع مسأله از لحاظ تعداد نقاط بهینه‌ی کلّی وابسته می‌باشد. بنابراین توصیه می‌شود در حل مسائل زمان‌بر از روش دوم یعنی کاهش خطی استفاده گردد.

۶-۲ پیشنهادها

۱- تحلیل تنش و بهینه‌سازی صفحات همسانگرد و ناهمسانگرد دارای گشودگی تحت بارگذاری محوری و برشی به‌صورت هم‌زمان.

۲- تحلیل تنش و بهینه‌سازی صفحات همسانگرد و ناهمسانگرد دارای چند گشودگی تحت بارگذاری محوری.

۳- تحلیل تنش و بهینه‌سازی صفحات همسانگرد و ناهمسانگرد دارای گشودگی تحت بارگذاری حرارتی و محوری به‌صورت هم‌زمان.

۴- تحلیل تنش و بهینه‌سازی صفحات همسانگرد و ناهمسانگرد دارای گشودگی تحت گشتاورهای خارجی.

۸- تحلیل تنش و بهینه‌سازی صفحات همسانگرد و ناهمسانگرد دارای گشودگی تحت بارگذاری داخل گشودگی (پین لود).

۹- تحلیل تنش و بهینه‌سازی صفحات همسانگرد و ناهمسانگرد دارای چند گشودگی خارج از محور تقارن صفحه تحت بارگذاری داخل گشودگی (پین لود).

مراجع

[۱] نشریه‌ی کامپوزیت، مؤسّسه‌ی کامپوزیت ایران، (۱۳۸۷)، شماره‌ی سی و یکم.

[2] 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.

[۳]طهانی م.، عباچی‌زاده م.، (۱۳۸۵)، بررسی روش‌های مختلف بهینه‌سازی سازه‌های کامپوزیتی، ***چهاردهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک***، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، http://www.civilica.com/Paper-ISME14-ISME14_226.html

[4] Khot N. S., Venkaya V. B., and Berke L., (1976), "Optimum design of composite structures with stress and displacement constraints", ***AIAA***, Vol. 14, No. 2, PP. 131-132.

[5] Gurdal Z., Haftka R. T., (1988), "Automated design of composite plates for improved damage tolerance", ***Composite Materials***, PP. 5-22.

[6] Prochazka P. P., (2003), "Deterministic and stochastic optimization of composite cylindrical laminates", ***International journal of solids and structures***, Vol. 40, PP. 7109-7127.

[7] Martin P. M. J. W., (1988), "Computer automated optimal design of laminates", ***Lecture notes in engineering***, Springer- Verlag.

[8] Fares M. E., Youssif Y. G., Alamir A. E., (2004), "Design and control optimization of composite laminated truncated conical shells for minimum dynamic response including transverse shear deformation," ***Composite Structures***, Vol. 64, No. 2, PP. 139-150.

[9] Mesquita L., Kamat M. P., (1987), "Optimization of stiffened laminated composite plates with frequency constraints," ***Engineering Optimization***, Vol. 11, PP. 77-88.

[10] Franco Correia, V. M., Mota Soares, C. M., Mota Soares, C. A., (2003), "Buckling optimization of composite laminated adaptive structures," ***Composite Structures***, Vol. 62, PP. 315-321.

[11] Bissagni C., Lanzi L., (2003), "Postbuckling optimization of composite stiffened

panels using neural networks," ***Composite Structures***, Vol. 58, PP. 237-247.

[12] Schmit L. A., Farshi B., (1997), "Optimum design of laminated fiber composite plates", ***International journal of Numerical Methods in Engineering***, Vol. 11, PP. 623-640.

[13] Spallino R., Rizzo S., (2002), "Multiobjective discrete optimization of laminated structures", ***Mechanics Research Communications***, Vol. 29, PP. 17-25.

[14] Lee H., Jiang K., Li K., (2003), "Optimizing parameters of CVI process for manufacturing carbon-carbon composites by genetic algorithms", ***Materials Letters***, Vol. 57, PP. 2366-2370.

[15] Muc A., Gurba W., (2001), "Genetic algorithms and finite element analysis in optimization of composite structures", ***Composite Structures***, Vol. 54, PP. 275-281.

[16] Muskhelishvili N. I., (1962), "***Some Basic Problems of the Mathematical Theory of Elasticity***", Second edition, Netherlands, Noordhooff.

[17] Savin G. N., (1961), "***Stress concentration around holes***", New York, Pergamon Press.

[18] Lekhnitskii S. G., (1968), "***Anisotropic Plates***", Second edition, New York, Gordon and Breach Science.

[19] 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.

[20] Daoust J., Hoa S. V., (1991), “An analytical solution for anisotropic plates containing triangular holes”, ***Composite Structures***, Vol. 19, No. 2, PP. 107-130.

[21] 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.

[22] Yang Y., Liu J., Cai C., (2008), "Analytical solutions to stress concentration rectangular holes", ***International Journal of Mechanics and Solids***, Vol. 2, No.1, PP. 59-84.

[23] Rezaeepazhand J., Jafari M., (2008), "Stress analysis of composite plates with non circular cutout", ***Key Engineering Materials***, Vol. 385, PP. 365-368.

[24] Rezaeepazhand J., Jafari M., (2010), "Stress concentration in metallic plates with special shaped cutout", ***International Journal of Mechanical Sciences,*** Vol. 52, No. 1, PP. 96-102.

[25] 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.

[26] Batista M., (2011), "On the stress concentration around a hole in an infinite plate subject to auniform load at infinity", ***International Journal of Mechanical Sciences***, Vol 53, No. 4, PP. 254-261.

[27] Sharma D. S., (2011), “Stress concentration around circular / elliptical / triangular cutouts in infinite composite plate”, ***Proceedings of the World Congress on Engineering***, Vol. 3, PP. 6-11.

[28] Sharma D. S., (2012), "Stress distribution around polygonal holes", ***International Journal of Mechanical Science***, Vol. 65, NO.1, PP. 115-124.

[29] Banerjee M., Jain N. K., Sanyal S., (2013), "Stress concentration in isotropic and orthotropic composite plates with center circular hole subjected to transverse static loading", ***International Journal of Mechanical and Industrial Engineering***, Vol.3, Iss-1, PP. 109-113.

[۳۰] جعفری م.، اردلانی ا، (۱۳۹۳)، " حل تحلیلی محاسبه توزیع تنش اطراف گشودگی مثلثی برای صفحات همسانگرد محدود تحت بارگذاری درون صفحه‌ای"، ***ماهنامه‌ی علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس***، دوره‌ی ۱۵، شماره‌ی ۵، ص ص ۱۶۵-۱۷۵.

[۳۱] جعفری م، مشیری اوّل ب، (۱۳۹۳)، " تحلیل تنش چندلایه‌های کامپوزیتی متقارن با گشودگی شبه‌مستطیلی تحت بارگذاری درون‌صفحه‌ای"، ***ماهنامه‌ی علمی پژوهشی مهندسی مکانیک مدرس***، دوره ۱۴، شماره ۱۵، ص ص ۳۹۵-۴۰۴.

[32] Sivakumar K., Iyengar NGR., Deb K., (1998), "Optimum design of laminated composite plates with cutout using a genetic algorithm", ***Composite Structures***, Vol. 42, PP. 265-279.

[33] Cho HK., Rowlands RE., (2007), "Reducing tensile stress concentration in perforated hybrid laminate by genetic algorithm", ***Composites Science and Technology***,

Vol. 67, PP.2877–2883.

[34] 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.

[35] Sharma DS., Patel NP., Trivedi RR., (2014), "Optimum design of laminates containing an elliptical hole ***International Journal of Mechanical Sciences***, Vol. 85, PP.76–87.

[36] Callahan JK., Weeks EG., (1992), "Optimum design of composite laminates using genetic algorithms", ***Composites Engineering***, Vol. 2, NO. 3, PP. 149-160, 1992.

[37] 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.

[38] 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.

[39] Kathiravan R. Ganguli R., (2007), "Strength design of composite beam using gradient and particle swarm optimization", ***Composite Structures***, Vol. 81, PP. 471-479.

[40] 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.

[41] 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.

[42] 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.

[43] 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.

[44] Hudson C., Carruthers J., (2010), "Robinson M., Multiple objective optimization of composite sandwich structures for rail vehicle floor panels", ***Composite Structures***, Vol. 92, No. 9, PP. 2077-2082.

[45] 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.

[46] 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.

[47]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.

[48] 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.

[49] Ines Barbosa C.J., Maria Amélia 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.

[50] 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.

[۵۱] یقینی م.، اخوان کاظم زاده م. ر.، ***الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری***، تالیف. جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیر کبیر ISBN ۹۷۸-۹۶۴-۲۱۰-۰۷۸-۱.

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

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

[54] Beni Gerardo, Wang Jing, (1989), "Swarm Intelligence in Cellular Robotic

Systems", ***Proceed. NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems***, Tuscany, Italy, June, PP.26–30.

[55] Clerc M., (2006), "***Particle Swarm Optimization***", ISTE Ltd, United States.

[56] El-ghazali T., (2009), "***Metaheuristics: from design to implementation***", John Wiley &sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

[57] F. T.S.chan, M.K. Tiwari, (2007), "***swarm intelligence: Focus on ant and particle swarm optimization***", I-teach education and publishing, vienna, austria.

[58] Ratnaweera A., Halgamuge S. K., C.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.

[59] Shi Y., Eberhart R. C., (1999), "Empirical study of particle swarm optimization", ***IEEE International Congeress Evolutionary Computation***, Vol. 3, PP. 101–106.

[60]Venter G., Haftka R.T., Sobieszczanski-Sobieski J., (2002), "Multidisciplinary Optimization of a Transport Artificial Wing using Particle Swarm Optimization", ***In Ninth AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization***.

Abstract

In this thesis has been tried to consider the effective parameters on the stress distribution around of regular polygon cutout in the infinite isotropic and orthotropic plates with particle swarm algorithm (PSO) introduced the optimum parameters to achieve the least amount of stress around the cutout. Design variables include the geometry of cutout, bluntness, rotation angle of cutout, fiber angle, load angle and material properties in orthotropic 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 has been used from analytical method for calculating of the stress components around of various cutout. According to this method using conformal mapping, the development of Lekhnitskii method that was just for the circular and elliptical cutout was used the other cutouts.

The results presented in this case shows that by selecting appropriate form of cutout and choice of optimal parameters of the isotropic and orthotropic plates can be significantly reduced stress concentration factor in the plate with cutout and even achieved to less stress concentration factor from stress concentration caused by a circular cutout. In other words contrary to expectations, with the circular cutout is not the best geometry for reduction of stress concentration and in some cases by selecting bluntness, rotation angle and suitable fiber angle for a plate with cutout can be less stress concentration compared with a circularly cutout.

Keywords: Particle swarm algorithm (PSO), Complex variable method, Regular polygon cutout, Infinite isotropic and orthotropic plates.

Shahrood University of thechnology

Faculty of mechanics

Optimization of infinite isotropic and anisotropic plates with regular cutout by PSO algorithm

Seyed Ahmad Mahmodzade Hoseyni

Supervisor:

Dr. Mohammad Jafari

January 2016