

طراحی بهینه چند مرحله ای مخازن تحت فشار مرکب

صادق رحمتی¹، علی خانی²
akhany@gmail.com

چکیده

در این مقاله، طراحی بهینه یک مخزن تحت فشار مرکب را در چند سطح بررسی شده است. متغیرهای طراحی مخزن کامپوزیتی شامل شکل کلگی، زاویه پیچش، ضخامت لایه ها، تعداد لایه ها و ترتیب چیدمان می شود. پارامتری با نام « ضریب شکل اصلاح شده » به عنوان تابع هدف معرفی شده است. این پارامتر اثرات فشار و حجم داخلی، وزن مخزن، و خصوصیات ماده کامپوزیت را در نظر می گیرد. الگوریتم پیشنهادی، الگوریتم ژنتیک و تحلیل اجزاء محدود را جهت بهینه سازی پارامترهای طراحی به کار می برد. به عنوان چند مثال، این روند بر اشکال کلگی ئودزیک و بیضوی اعمال شده است. نتایج نشان می دهد که برای شرایط مخزن داده شده، شکل کلگی ئودزیک با زاویه پیچش مارپیچ 9 درجه، عملکرد بهتری دارد.

کلیدواژه:

مخزن الیاف پیچی شده - بهینه سازی - الگوریتم ژنتیک - روش چند سطحی - ترتیب چیدمان - ضریب شکل - ئودزیک.

1- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علامه مجلسی، rahmati@rapidtoolpart.com
2- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک

1- مقدمه

چند سطحی یک روش قدرتمند برای مسائلی است که تعدد متغیرهای طراحی در آن نسبتاً زیاد است. مزیت در آنست که با کاهش تعداد متغیرهای طراحی در هر سطح، همگرایی در الگوریتم ژنتیک سریعتر رخ می‌دهد. روش چند سطحی به ندرت برای بهینه‌سازی سازه‌های پیچیده مانند مخازن الیاف پیچی شده گزارش شده است. به عنوان چند مثال، روش مزبور بر مخازن کامپوزیتی با کَلگی‌های ژئودزیک و بیضوی اعمال شده است. با وجود این، روش مذکور قابل اعمال بر هر مخزن متقارن با هر نوع شکل کَلگی است. این روش بر اساس معیار شکست تسای-وو و مسئله بهینه‌سازی ضریب شکل ضریب شکل اصلاح شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک است. این مطالعه به مخازن کامپوزیتی متقارن با دو کَلگی و شعاع‌های دهنه یکسان محدود شده است. رابطه بین فشار داخلی و معیار شکست تسای-وو از طریق تحلیل اجزاء محدود مدل شده است و شرایط ژئودزیک برای پیشگیری از لغزش الیاف اعمال شده است.

2- الگوی پیچش

طراحی مخزن الیاف پیچی شده شامل طراحی شکل مندرل و محاسبه مسیر لیاف می‌گردد. به طور معمول، شکل مندرل با نیازمندی‌های طراحی نظیر فشار و حجم داخلی و امکان‌پذیری تولید تعیین می‌شود. یافتن الگوهای پیچش ممکن بر روی یک سطح اختیاری یک از نخستین الزامات برای معرفی روش بهینه‌سازی مخازن کامپوزیتی است. از آنجایی که دقت تحلیل اجزاء محدود به طور مستقیم با اطلاعات پیچش وابسته است، نیاز به آن است که الگوی پیچش به صورت واقعی مدل شود. در این مقاله، روش مسیر ژئودزیک پیشنهاد شده است، که در آن تمایل به لغزش بین الیاف و مندرل در نظر گرفته شده است. مسیر الیاف شبه-ژئودزیک برای سازه‌های الیاف پیچی شده عمومی به صورت زیر تعریف شده است:

$$\frac{da}{dz} = \frac{\lambda(A^2 \sin^2 \alpha - \rho \rho' \cos^2 \alpha) - \rho' A^2 \sin \alpha}{\rho A^2 \cos \alpha} \quad (1)$$

که $A = 1 + \rho^2$ رابطه (1) بر روی یک سطح اختیاری تعریف شده است که I, r, q, z, a به ترتیب زاویه پیچش، پارمترهای مختصات محوری، محیطی و شعاعی، و میزان تمایل به لغزش بین الیاف و مندرل هستند. با قرار دادن میزان تمایل به لغزش برابر صفر در معادله (1)، معادله مسیر ژئودزیک به دست می‌آید:

$$\rho \sin \alpha = \text{cte} \quad (2)$$

مخازن تحت فشار بالا به صورت گسترده‌ای در کاربردهای تجاری و هوافضا و نیز وسایل نقلیه به کار می‌روند. مخازن الیاف پیچی شده، که از روش ساخت الیاف پیچی برای ایجاد قطعات پلاستیک تقویت شده سبک و با استحکام بالا بهره می‌برد، نوع مهمی از مخازن تحت فشار است. مخازن تحت فشار به طور معمول شامل دو بخش جداگانه است: بخش استوانه‌ای و کَلگی‌ها. کَلگی‌ها معمولاً مهمترین بخش در طراحی مخزن هستند. پارامترهای مطلوب در طراحی یک شکل کَلگی خوب فشار ترکیدن و حجم داخلی بالاتر و وزن کمتر است. تاکنون کارهای متعددی در زمینه بهینه‌سازی پارامترهای طراحی مخازن تحت فشار الیاف پیچی شده انجام شده است. فوکانگا و چو [1] یک روش بهینه‌سازی چند لایه‌ای برای مخازن تحت فشار استوانه‌ای الیاف پیچی شده تحت قیود استحکام و سفتی ارائه دادند. آدلی و همکاران [2] یک الگوریتم طراحی بهینه برای مخازن تحت فشار استوانه‌ای چندلایه متقارن پیشنهاد کردند. کریکانو [3] و جانکی و همکاران [4] یک رهیافت تحلیلی برای بهینه‌سازی برای مخازن کامپوزیتی تحت فشار تحت قیود سفتی و استحکام ارائه دادند. کارهای گزارش شده به طور عمده بر پایه تحلیل ساده یا روش‌های تجربی هستند و اثرات شکل کَلگی در نظر گرفته نشده است.

طراحی بهینه پروفیل کَلگی برای مخازن تحت فشار موضوع تحقیقات بسیاری بوده است [5-8]. هاف دیتز [5] تحلیل شبکه‌ای و ارتوتروپ را برای حل مسائل طراحی کَلگی به کار برد. حجتی و همکاران [6] تئوری صفحه ارتوتروپ را برای طراحی کَلگی مخازن تحت فشار کامپوزیتی پلیمری به کار برد. لین و هوانگ [7] پارامتری با نام ضریب کارایی را جهت ارزیابی بازده سازه‌های کَلگی مخازن به کار بردند. آنها یک روش طراحی کَلگی بهینه را بر اساس معیار شکست تسای-هیل و تئوری صفحه ارتوتروپ معرفی نمودند. لیانگ و همکاران [8] طراحی بهینه پروفیل کَلگی مخازن تحت فشار الیاف پیچی شده را در معرض محدودیت‌های هندسی، شرایط پیچش و معیار شکست تسای-وو بررسی نمودند. آنها روش مسیر امکان‌پذیر را برای بهینه نمودن ضریب شکل مورد استفاده قرار دادند. در کار حاضر بهینه‌سازی شکل کَلگی و ترتیب چیدمان با هم و در دو سطح متوالی صورت می‌گیرد. به علاوه آنکه کار حاضر به انتخاب در میان اشکال کَلگی شناخته شده می‌پردازد و نه به بهینه‌سازی.

در این مقاله، یک روش چند سطحی جهت بهینه‌سازی مخازن تحت فشار کامپوزیتی با آستر غیر فلزی معرفی شده است. روش

مطالعه به مخازن متقارن محدود می‌شود و بنابراین الگوی پیچش ژئودزیک به کار می‌رود. ضخامت لایه‌های مارپیچ در هر نقطه از کلگی با رابطه زیر به دست آمده است:

$$t = \frac{\rho_0 \cos \alpha_0}{\rho \cos \alpha} t_0 \quad (4)$$

که در آن t و t_0 به ترتیب ضخامت لایه‌های مارپیچ روی هر نقطه کلگی و روی استوانه هستند.

3- انواع اشکال کلگی

شکل کلگی اثرات معینی بر روی حجم داخلی، وزن و فشار ترکیدن مخزن دارد. حجم داخلی مخزن به وسیله حجم داخلی استوانه و دو کلگی مشخص می‌شود. سطح خارجی مخزن بر روی وزن کلی سازه الیاف پیچی شده تأثیر می‌گذارد. هندسه کلگی مخزن نیز بر روی فشار ترکیدن و مقدار معیار شکست تأثیر می‌گذارد.

3-1- اشکال کلگی ژئودزیک

با کاربرد همزمان تئوری شبکه‌ای و معادله (3)، شکل کلگی ژئودزیک را می‌توان به دست آورد [10]. مختصات نقاط تشکیل دهنده (z, ρ) با انتگرال گیری عددی از رابطه زیر به دست می‌آید:

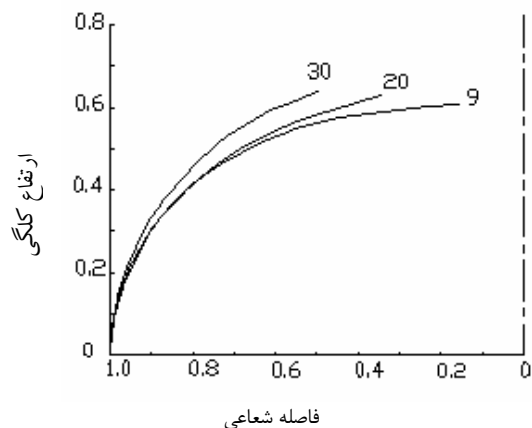
$$z = -\rho_0 \int_{\rho_0}^{\rho} \frac{\cos \alpha_0 t^3}{\sqrt{(1-t^3)[\cos^2 \alpha_0 t^2 (1+t^2) - \sin^2 \alpha]}} dt \quad (5)$$

در این مقاله، انتگرال معادله (5) با استفاده از مقادیر پارامترهای ρ_0 و α_0 که به قسمت استوانه‌ای مربوط می‌شوند، محاسبه می‌گردد. بنابراین برای مقادیر متفاوت فاصله شعاعی، مقادیر مختلفی برای فاصله طولی به دست می‌آید و به این ترتیب شکل کلگی تعریف می‌شود. مقادیر زاویه پیچش (α) برای فواصل طولی متفاوت از محور مرکزی (ρ) با استفاده از معادله (4) به دست می‌آید. شکل (1) انواع اشکال کلگی ژئودزیک و رابطه آنها با مقدار زاویه پیچش در بخش استوانه‌ای (α_0) را نشان می‌دهد.

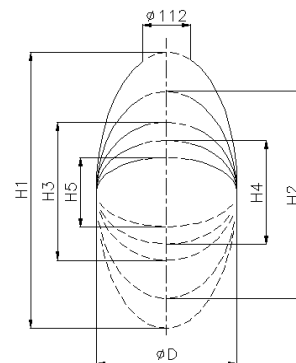
3-2- اشکال کلگی بیضوی

اشکال کلگی بیضوی بر اساس نسبت منظری (e) که نسبت قطر بیضی در راستای محور مرکزی مخزن به قطر عمود بر آن است، وجود دارد (شکل 2). هندسه کلگی به وسیله زاویه پیچش الیاف نیز از طریق تغییر قطر دهنه متأثر می‌شود.

زاویه پیچش بر روی استوانه



شکل (1): انواع اشکال کلگی ژئودزیک با زوایای پیچش مختلف



شکل (2): انواع اشکال کلگی بیضوی

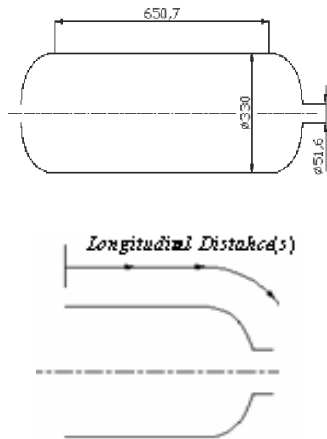
مسیر ژئودزیک کوتاه‌ترین مسیر بین دو نقطه روی یک سطح است. بنابراین، مسیر الیاف ژئودزیک نوع خاصی از مسیر شبه-ژئودزیک است که در آن میزان لغزش برابر صفر است. در ادبیات، این نوع پیچش پیچش به روش یکسان بودن کشش نامیده می‌شود. برای به دست آوردن زاویه پیچش در هر نقطه، داریم:

$$r \sin a = r_0 \sin a_0 = r_{b1} \sin 90 = r_{b2} \sin 90 \quad (3)$$

که α_0 و ρ_0 به ترتیب زاویه پیچش و شعاع مخزن در قسمت استوانه‌ای است. همچنین ρ_{b1} و ρ_{b2} به ترتیب نشانگر دو شعاع دهنه کلگی چپ و راست هستند. بنابر این برای پیچش ژئودزیک، دو کلگی بایستی شعاع‌های دهنه کاملاً مشابهی داشته باشند. زمانی که دو دهنه مشابه نیستند، مسیر شبه-ژئودزیک به کار می‌رود. این

جدول (1): مشخصات مکانیکی ماده کامپوزیت (استحکامها به MPa و ضرایب الاستیک به GPa هستند).

E_{xx}	۱۱۰/۳	σ_{xt}^f	۱۹۱۸
E_{yy}	۱۵/۲	σ_{xc}^f	۱۵۶۹
E_{zz}	۸/۹۷	σ_{yt}^f	۲۴۷
G_{xy}	۴/۹	σ_{yc}^f	۱۲۴۵
G_{xz}	۴/۹	σ_{zt}^f	۲۴۷
G_{yz}	۳/۲۸	σ_{zc}^f	۱۲۴۵
ν_{xy}	۰/۲۵	σ_{xy}	۶۸/۹
ν_{xz}	۰/۲۵	σ_{yz}	۳۴/۵
ν_{yz}	۰/۳۶۵	σ_{xz}	۳۴/۵



شکل (3): ابعاد مخزن (به میلیمتر) زمانی که زاویه پیچش ماریچ در قسمت استوانه ای برابر $9^\circ \pm$ باشد (بالا) فاصله طولی (s) (پایین)

سطح، روند برای یک ترتیب چیدمان و تعداد لایه‌های مشخصی که ممکن است بهینه نباشد، انجام می‌شود. در سطح دوم، ترتیب چیدمان و تعداد لایه‌های بهینه انتخاب می‌شوند. این روند دو سطحی تا جایی ادامه می‌یابد که بهبود محسوس در تابع هدف مشاهده نشود. دیاگرام شماتیک روش بهینه‌سازی چند سطحی برای اشکال کُلگی متفاوت در شکل 5 نشان داده شده است.

روند بهینه‌سازی چند سطحی برای کاهش تعداد تحلیل‌های اجزاء محدود مورد نیاز مورد استفاده قرار گرفته است. برای نمونه اشکال کُلگی بیضوی ممکن زیادی برای زوایای پیچش و نسبت‌های هندسی متفاوت وجود دارند. به عنوان مثال، اگر 10 نسبت هندسی متفاوت بین 0/2 تا 2 و 10 زاویه پیچش مختلف بین 5 تا 50 درجه

4- مدل اجزاء محدود

روش اجزاء محدود برای تحلیل مدل سه بعدی مخزن به کار رفته است. تمرکز تنش در محل اتصال استوانه و کُلگی به خاطر تغییر ناگهانی انحناء در این ناحیه بالاست. به این دلیل، المان‌های پوسته در این ناحیه در مقایسه با سایر مکان‌ها کوچکتر مدل شده است. علاوه بر این، از آنجایی که سازه متقارن است، تنها نیمی از مخزن مدل شده است.

معیارهای شکست متعددی برای پیش‌بینی شکست در مواد مرکب وجود دارد. در معیار تنش و کرنش بیشینه، اثرات متقابل بین مؤلفه‌های تنش و کرنش متفاوت در نظر گرفته نشده است. در معیار تسای-هیل، تفاوت بین مؤلفه‌های کششی و فشاری استحکام قابل تشخیص نیست. در معیار تسای-وو این دو مشکل حل شده است. در این مقاله از معیار تسای-وو سه بعدی استفاده شده است که به صورت زیر تعریف شده است:

s_x, s_y, s_z و s_{xy}, s_{yz}, s_{xz} به ترتیب معیار تسای-وو سه بعدی، تنش‌های اعمالی، استحکام تنشی و استحکام فشاری هستند. c_{xy}, c_{yz}, c_{xz} و ضرایب کوپلینگ در تئوری تسای-وو هستند که همگی برابر یک انتخاب شده‌اند. اندیس‌های x, y, z به ترتیب جهت الیاف و جهت عمود بر آن در داخل و خارج از صفحه المان را نشان می‌دهد. جزئیات مشخصات مکانیکی ماده کامپوزیت کربن-اپوکسی به کار رفته در این تحقیق در جدول (1) نشان داده شده است. چگالی جرمی ماده کامپوزیت برابر 1565 kg/m^3 انتخاب شده است.

قطر خارجی قسمت استوانه‌ای 330 میلیمتر و طول آن برابر 650 میلیمتر است (شکل 3). مخزن تعریف شده یک مخزن گاز طبیعی با آستر غیر فلزی است. فشار کاری، فشار تست و فشار ترکیدن بر اساس استاندارد ISO1439 به ترتیب برابر 200، 300 و 470 بار است. در مدل اجزاء محدود، یک فشار یکنواخت 470 بار اعمال شده است. نتایج تحلیل اجزاء محدود در مقابل فاصله طولی روی یال مخزن از مقطع میانی مخزن نشان داده شده است.

5- روش بهینه‌سازی چند سطحی

متغیرهای طراحی شامل شکل کُلگی، زاویه لایه‌های ماریچ (α) ، ضخامت لایه‌ها (t) ، تعداد لایه‌ها (NL) و ترتیب چیدمان است. ضخامت تمام لایه‌ها به خاطر طبیعت پیوسته فرآیند الیاف پیچی برابر 1 میلیمتر انتخاب شده است. روند بهینه‌سازی برای مخازن تحت فشار کامپوزیتی به دو سطح تقسیم شده است: 1. انتخاب شکل کُلگی و زاویه پیچش و 2. بهینه‌سازی وزن چند لایه.

در نخستین سطح، اشکال شناخته شده با زوایای پیچش مختلف بر اساس بیشینه تابع هدف با هم مقایسه می‌شوند. در این

دیگر معیارها دارد. در روش دو سطحی مذکور، ضریب شکل اصلاح شده برای اشکال کُلگی و زوایای پیچش متفاوت مقایسه شده است.

5-2- بهینه سازی وزن چند لایه با استفاده از الگوریتم ژنتیک

روند برای بهینه‌سازی تعداد لایه‌ها و ترتیب چیدمان با استفاده از الگوریتم ژنتیک بر روی شکل کُلگی و زاویه پیچش معینی اعمال شده است. الگوریتم بهینه‌سازی چند لایه برای یافتن ترتیب چیدمان و تعداد لایه‌ای که دارای کمترین وزن با معیار شکست زیر یک است، سازماندهی شده است. بنابراین، مسأله به صورت زیر فرمولبندی شده است:

Min W

subject to Tsai_Wu < 1

به خاطر وابستگی شکل کُلگی با زاویه پیچش، لازم است یک کُلگی جدید برای هر زاویه پیچش مدل شود. بنابراین در هر مدل متغیرهای طراحی زاویه پیچش به مقادیر گسسته $+\alpha$ و $-\alpha$ برای لایه‌های مارپیچ و 90 برای لایه‌های محیطی محدود می‌گردد. بنابراین، متغیرهای طراحی برای فرایند بهینه‌سازی وزن برای هر مدل مخزن تحت فشار کامپوزیتی شامل تعداد و ترتیب چیدمان لایه‌ها می‌شود. جزئیات شماتیک روند کمینه‌سازی وزن در شکل (4) نشان داده شده است. در این روند، ترتیب چیدمان بهینه با استحکام بیشینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای تعداد لایه ثابتی به دست می‌آید و تعداد لایه‌ها برای رسیدن به تعداد لایه‌های کمینه با تسای-وو زیر یک از طریق یک روند تکراری کم یا زیاد می‌شود. به عنوان نخستین حدس برای تعداد لایه‌ها، تئوری شبکه‌ای قابل استفاده است. در حقیقت، دو متغیر طراحی تعداد لایه‌ها و ترتیب چیدمان اثر یکسانی بر روی وزن و استحکام ندارند. به عبارت دقیق‌تر، تعداد لایه‌ها اثر بیشتری نسبت به ترتیب چیدمان دارد. از سوی دیگر بعضی متغیرها مانند تعداد لایه‌ها اثر خطی و قابل پیش بینی بر روی رفتار سازه دارد، در حالیکه بعضی مانند ترتیب چیدمان اثری غیرخطی دارند. به همین دلیل دو متغیر از طرق متفاوت بهینه می‌شوند.

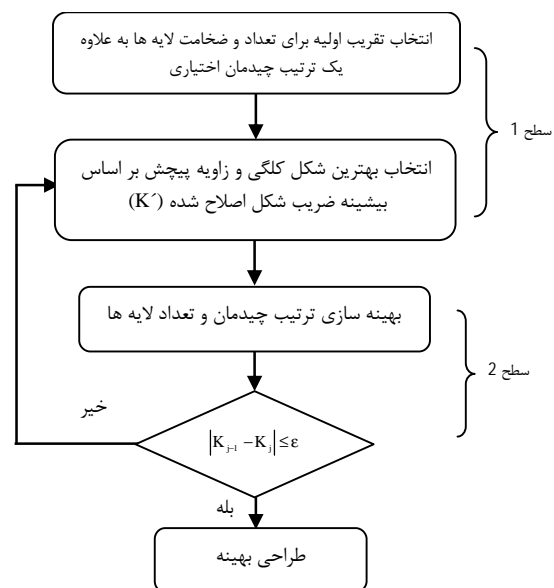
بهینه‌سازی ترتیب چیدمان یک زیر مسئله در کمینه‌سازی وزن است. این مسأله که برای بیشینه‌سازی استحکام تعداد مشخصی لایه فرمول‌بندی شده است، به صورت زیر تعریف شده است:

$$\text{Min}_{SS} \text{Max}_{LN,S} \text{Tsai} - \text{Wu} (SS; LN, S)$$

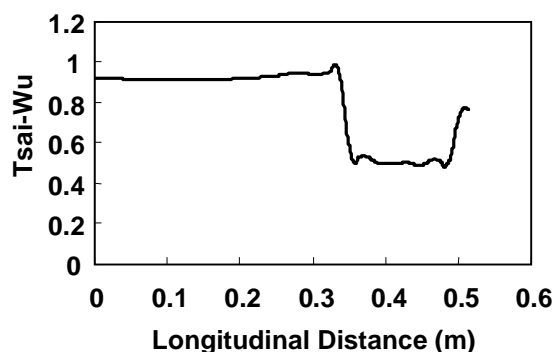
Subject to: Number of layers = NL

Layer thickness = 1 mm

Layer angles = 90, a, -a



شکل (4): دیاگرام شماتیک روند بهینه‌سازی دو سطحی برای مخازن کامپوزیتی



شکل (5): تسای-وو برای پوسته کامپوزیت 9 لایه ای با کُلگی ژئودزیک و زاویه پیچش مارپیچ $\pm 9^\circ$

برای کُلگی‌های بیضوی در نظر بگیریم، 100 مورد متفاوت وجود خواهد داشت. با استفاده از روش چند سطحی تنها یک حالت انتخاب و الگوریتم ژنتیک بر آن مورد اعمال می‌شود.

5-1- انتخاب شکل کُلگی و زاویه پیچش

معیار شکست تسای-وو اثرات فشار داخلی، مشخصات مخزن و ویژگی‌های ماده را به حساب می‌آورد. بنابر این عبارات فشار و استحکام در تابع هدف را می‌توان به وسیله معیار شکست تسای-وو جایگزین نمود. بنابراین فاکتور جدید با نام ضریب شکل اصلاح شده به صورت زیر تعریف شده است:

علاوه بر این با اعمال این فاکتور ارزیابی، هیچ نیازی به اعمال قیود نیست. معیار شکست تسای-وو مزایای متعددی نسبت به

جدول (2) ترتیب چیدمان بهینه برای پوسته های کامپوزیتی با زاویه پیچش 9°

وزن مخزن (kg)	مقدار بیشینه معیار شکست تسای - وو	ترتیب چیدمان بهینه	تعداد لایه ها
5.977	1.145	[90,9,-9,90,90,-9,9,90]	8
6.833	0.955	[90,9,-9,90,9,-9,90,9,90]	9

جدول (3): ترتیب چیدمان بهینه برای پوسته های کامپوزیتی 9° لایه ای

مقدار بیشینه معیار شکست تسای - وو	ترتیب چیدمان بهینه	زاویه پیچش (درجه)
0.955	[90,9,-9,90,9,-9,90,9,90]	9
6.871	[20,90,-20,20,20,-20,-20,20,20]	20
11.105	[90,30,-30,30,-30,30,-30,90,90]	30

می شود. ترتیب چیدمان، معیار تسای - وو و وزن پوسته های بهینه 8، 9 و 10 لایه ای در جدول (2) نشان داده شده است. کمترین تعداد لایه ای که مقدار معیار شکست تسای - وو آن زیر یک است، مربوط به یک پوسته 9 لایه ای است. بنابراین سبک ترین پوسته کامپوزیتی 9 لایه در قسمت استوانه ای دارد. از این نه لایه، چهار تا مارپیچ و پنج تا محیطی اند. از میان ترتیب چیدمان های مختلف پوسته های 9 لایه ای، بهترین آنها که مقدار تسای - وو آن زیر یک است به کمک الگوریتم ژنتیک به دست آمده و در جدول (2) نشان داده شده است. برای تعداد لایه های کمینه، امکان جایگزینی لایه های مارپیچ با محیطی برای به دست آوردن یک چند لایه سبکتر امتحان می شود. شکل (5) معیار شکست تسای - وو ترتیب چیدمان بهینه برای کلگی ژئودزیک و زاویه پیچش 9° را نشان می دهد. این شکل، بیشینه تسای - وو (که 0/955 در جدول 2 است) و در محل اتصال قسمت استوانه ای و کلگی قرار گرفته است را نشان می دهد. بعد از این نقطه، قسمت استوانه ای بالاترین مقدار معیار شکست تسای - وو را دارد.

ترتیب چیدمان بهینه برای 3 مدل پوسته 9 لایه ای با زاویه پیچش مارپیچ 9، 20 و 30 درجه در جدول (3) مقایسه شده اند. نتایج نشان می دهد که ترتیب چیدمان های بهینه پوسته های کامپوزیتی با کلگی های ژئودزیک با زوایای پیچش (و قطرهای دهنه متفاوت) 9، 20 و 30 درجه، به ترتیب کمترین تا بالاترین مقادیر تسای - وو را دارند. بنابراین تعداد لایه ها برای زاویه پیچش مارپیچ 9° مناسب است، حال آنکه برای 20 و 30 درجه این عدد برای رسیدن به تسای - وو قابل قبول بایستی افزایش یابد. نتایج نشان می دهند که زاویه پیچش مارپیچ $9^\circ \pm$ عملکرد بهتری نسبت به $20^\circ \pm$ و $30^\circ \pm$ دارد.

که DV مجموعه متغیرهای طراحی شامل ترتیب چیدمان زوایای الیاف، LN شماره لایه با معیار شکست بیشینه، S فاصله طولی (بخش 4) که در آن معیار شکست بیشینه در طول یال مخزن اتفاق می افتد و NL تعداد لایه ها است.

متغیرهای طراحی در بهینه سازی ترتیب چیدمان (زاویه پیچش الیاف) پیوسته نیستند. به عنوان مثال، اگر زاویه پیچش مارپیچ برابر $9^\circ \pm$ باشد و کلگی ژئودزیک بر اساس این زاویه اعمال شود، ترتیب زوایا به 9° ، -9° و 90° محدود می شود. برای اعمال این گسستگی و جلوگیری از انتخاب زوایای دیگر، ترتیب چیدمان زاویه لایه ها به صورت یک مجموعه دودویی کدبندی می شود. هر دو رقم این مجموعه دودویی به عنوان یک زاویه نشان داده شده است. بر اساس تعریف ما، ترکیبات متفاوت صفر و یک به صورت زیر ترجمه می شوند:

$$[0,0] = 90, [1,1] = -90, [1,0] = 9, [0,1] = -9$$

برنامه الگوریتم ژنتیک با مجموعه مقادیر دودویی کار می کند. به عنوان مثال، ترتیب چیدمان برای یک کامپوزیت 9 لایه ای به صورت زیر تعریف شده است:

$$[0,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0,1,0]$$

برای اعمال بر کد المان محدود، ترتیب چیدمان به صورت زیر ترجمه شده است (زوایای 90° و -90° برای الیاف یکسان است).
[-9,90,90,9,-9,9,90,9]

در این رهیافت، پارامترهای الگوریتم ژنتیک از طریق آزمون و خطا انتخاب شده اند. جمعیت اولیه و بیشینه تعداد نسل ها به ترتیب برابر 50 و 100 هستند. تفاوت قابل قبول بین افراد جمعیت در دو نسل متوالی برابر $1E-6$ است. اگر این تفاوت کمتر از مقدار مذکور شود، برنامه متوقف خواهد شد. اپراتورهای جهش و تقاطع به ترتیب دودویی و منطقی انتخاب شده اند. روند بهینه سازی برای تعداد لایه های متفاوتی در مدلی با زاویه پیچش مارپیچ $9^\circ \pm$ انجام

6- نتایج

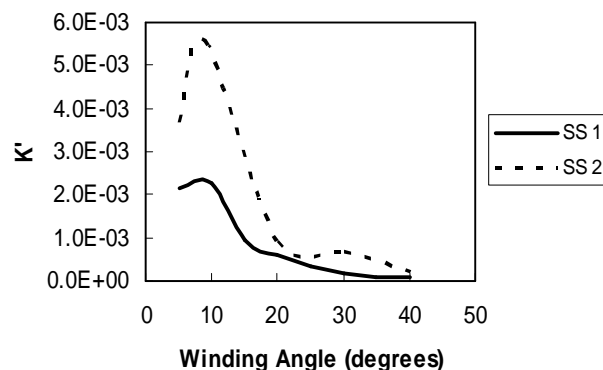
کلیه جداول به عنوان دو مثال عملی، روش بهینه‌سازی دو سطحی برای مخازن با کَلگی‌های ژئودزیک (شکل 1) در سطح نخست تنها زاویه پیچش بایستی بهینه شود، حال آنکه برای کَلگی های بیضوی (شکل 2) نسبت منظری علاوه بر زاویه پیچش بایستی بهینه شود.

6-1- کَلگی های ژئودزیک

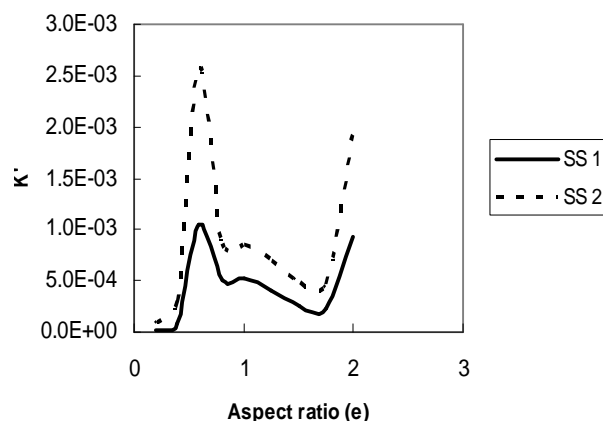
برای هر یک از این اشکال کَلگی ژئودزیک که در شکل (1) نشان داده شده‌اند، تحلیل عددی برای ترتیب چیدمان‌های مشابه انجام شده است. ترتیب چیدمان اختیاری زاویه [90, 90, α, α - α, α , - α, α , 90, 90] و ضخامت [1, 1, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 1, 1] در قسمت استوانه‌ای به عنوان نقطه نخست در روند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. مقایسه بین مقادیر ضریب شکل اصلاح شده برای زوایای پیچش متفاوت صورت گرفته است. همانگونه که از شکل (6) قابل مشاهده است، زاویه پیچش 9 درجه بهترین عملکرد را دارد. در سطح بعدی، بهینه‌سازی ترتیب چیدمان و تعداد لایه‌ها برای بهترین زاویه پیچش (9 درجه) جهت یافتن وزن کمینه در معرض قید معیار شکست تسای- وو صورت گرفته است. بنابراین ترتیب چیدمان بهینه [90, 9, -9, 9, 90, 90, 9, 90, 90] به دست آمده است. کل روند دو سطحی مذکور باید تا جایی ادامه یابد که هیچ‌گونه بهبود محسوسی در تابع هدف دیده نشود. همان‌گونه که در شکل (6) نشان داده شده است، در تکرار دوم ترتیب چیدمان بهینه برای زوایای پیچش متفاوت امتحان شده است و زاویه 9 درجه بهترین عملکرد را دارد. بنابراین روند در اینجا خاتمه می‌یابد.

6-2- کَلگی های بیضوی

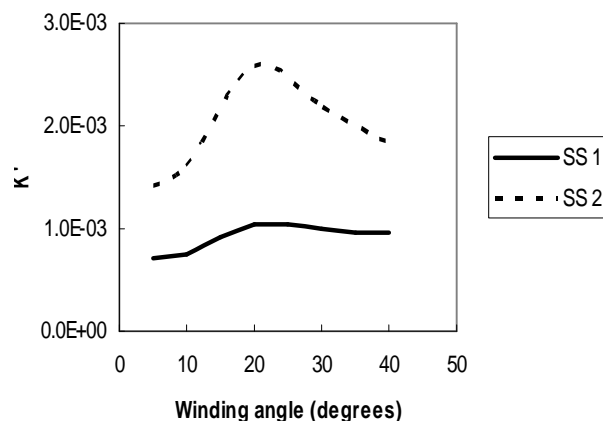
روش بهینه‌سازی پیشنهاد شده بر روی اشکال کَلگی بیضوی با نسبت‌های منظری گوناگون نیز اعمال شده است. سطح نخست، خود در دو قسمت اعمال می‌شود. نخست، تنها اثر هندسه کَلگی بررسی می‌شود و تمام متغیرهای دیگر ثابت در نظر گرفته شده‌اند. ترتیب چیدمان زاویه در بخش استوانه‌ای به عنوان نقطه ابتدایی برای فرآیند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از شکل (7) مشاهده می‌شود که برای نسبت‌های هندسی متفاوت ($0.2 < e < 2$) کَلگی‌های بیضوی، بیشینه ضریب شکل اصلاح شده به $e=0.6$ متعلق است. در قسمت بعدی، تنها اثر زاویه پیچش بر روی نسبت منظری ($e=0.6$) منتخب از قسمت قبل مورد بررسی قرار می‌گیرد و تمام متغیرهای دیگر ثابت در نظر گرفته می‌شوند. همان‌گونه که در



شکل (6): مقدار K' برای زوایای پیچش متفاوت



شکل (7): مقدار K' برای نسبت‌های منظری متفاوت بیضوی‌ها



شکل (8): مقدار K' برای زوایای پیچش متفاوت

شکل (8) مشاهده می‌شود، بیشینه ضریب شکل اصلاح شده برای زاویه 21 درجه اتفاق می‌افتد. اگر دامنه زاویه پیچش لایه‌های مارپیچ بین 5 و 40 درجه، با مقادیر 5 درجه تقسیم‌بندی شوند، زاویه پیچش 20 درجه در این سطح انتخاب می‌شود. سطح دوم به بهینه‌سازی ترتیب چیدمان و تعداد لایه‌ها مربوط می‌شود، در حالیکه نسبت منطری و زاویه پیچش به دست آمده از سطح قبلی ثابت در نظر گرفته می‌شوند. ترتیب چیدمان از طریق کاربرد الگوریتم ژنتیک به دست می‌آید. روش دو سطحی مذکور تا جایی ادامه می‌یابد که هیچ‌گونه بهبود قابل توجهی در تابع هدف مشاهده نشود. از اشکال (7) و (8) مشاهده می‌شود که نتایج قبلی (نسبت منطری 0/6 و زاویه پیچش 20 درجه) تکرار می‌شوند. بنابراین هیچ بهبود محسوسی در مقدار ضریب شکل اصلاح شده مشاهده نمی‌شود و روند پس از 2 تکرار خاتمه می‌یابد.

7- نتیجه

در این مقاله، یک روش بهینه‌سازی چند سطحی که با ترکیب با الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی مخازن تحت فشار کامپوزیتی با انواع اشکال کُلگی شناخته شده مانند ژئودزیک و بیضوی به کار می‌رود، معرفی شده است. مزیت اصلی این فرایند در آنست که یک تعداد کمینه برای تحلیل‌های اجزاء محدود در مقایسه با کاربرد الگوریتم ژنتیک به هریک از مدل‌های کُلگی جداگانه مورد نیاز است. به عنوان چند مثال، روش دو و سه سطحی به ترتیب بر روی کُلگی های ژئودزیک و بیضوی به کار رفته است. در میان زوایای پیچش برای شکل کُلگی ژئودزیک، زاویه پیچش 9 درجه بهترین عملکرد را دارد. در عین حال نشان داده شده است که کُلگی‌های بیضوی عموماً عملکرد ضعیفتری نسبت به انواع ژئودزیک دارند. مخازن کامپوزیت غیر متقارن را نیز می‌توان به این روش بهینه نمود، ولی تعداد سطوح در هر مسئله می‌تواند متفاوت باشد.

8- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند که از معاونت پژوهش دانشگاه آزاد اسلامی واحد مجلسی، به خاطر فراهم آوردن امکانات انجام این تحقیق، تشکر کنند.

9- مراجع

- [1] H. Fukunaga, T.W. Chou, "Simplified Design Techniques for Laminated Cylindrical Pressure Vessels under Stiffness and Strength Constraints", *Composite Materials*, Vol. 22 (1988), pp. 1156-69.
- [2] S. Adali, E.B. Summers, V.E. Verijenko, "Optimization of Laminated Cylindrical Pressure Vessels under Strength Criterion", *Composite Structures*, Vol. 25 (1993), pp. 305-12.
- [3] A.A. Krikanov, "Composite Pressure Vessels with Higher Stiffness", *Composite Structures*, Vol. 48 (2000), pp. 119-27.
- [4] N. Jaunky, Jr. Knight, D.R. Ambur, "Optimal design of general stiffened composite circular cylinders for global buckling with strength constraints", *Composite Structures*, Vol. 41 (2000), pp. 243-52.
- [5] J.T. Hofeditz, "Structural Design Considerations for Glass Pressure Vessels", 18th Annual Meeting of the Reinforced Plastics Division (1963).
- [6] M. Hojjati, A.V. Safavi, S.V. Hoa., "Design of Dome for Polymeric Composite Pressure Vessel", *Composite Engineering Journal*, Vol. 5 (1995), pp. 51-9.
- [7] Y.C. Lin, W.C. Hwang, "Design of Dome Contour for Filament-Wound Rocket Motor Cases", *Trans Aeronautical and Astronaut Soc Republic of China*
- [8] C.C. Liang, H.W. Chen, C.H. Wang, "Optimum Design of Dome Contour for Filament Wound Composite Pressure Vessels Based on a Shape Factor", *Composite Structures*, Vol. 58 (2002), pp. 469-482.
- [9] J.S. Park, C.S. Hong, C.G. Kim, C.U. Kim, "Analysis of Filament Wound Composite Structures Considering the Change of Winding Angles Through the Thickness Direction", *Composite Structures*, Vol. 55 (2002), pp. 63-71.
- [10] M.Z. Kabir, "Finite Element Analysis of Composite Pressure Vessels with a Load Sharing Metallic Liner", *Composite Structures*, Vol. 49 (2000), pp. 247-255.
- [11] ISO 11439:2000(E), Gas cylinders-High pressure cylinders for the on-board storage on natural gas as a fuel for automotive vehicles.