

طراحی بهینه چند مرحله ای مخازن تحت فشار مرکب

صادق رحمتی^۱، علی خانی^۲

۱- استادیار عضو هیات علمی گروه مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی مجلسی

۲- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک

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 ۹ درجه، عملکرد بهتری دارد.

واژه های کلیدی

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

۱- مقدمه

آدلی و همکاران [۲] یک الگوریتم طراحی بهینه برای مخازن تحت فشار استوانه ای چندلایه متقارن پیشنهاد کردند. کریکانو [۳] و جانکی و همکاران [۴] یک رهیافت تحلیلی برای بهینه سازی 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 کلگی در نظر گرفته نشده است.

طراحی بهینه پروفیل کلگی برای مخازن تحت فشار موضوع تحقیقات بسیاری بوده است [۵-۸]. هاف دیتز [۵] تحلیل شبکه ای و ارتوتروپ را برای حل مسائل طراحی کلگی به کار برد. حجتی و همکاران [۶] تئوری صفحه ارتوتروپ را برای طراحی کلگی مخازن تحت فشار کامپوزیتی پلیمری به کار برد. لین و هوانگ [۷] پارامتری با نام ضریب کارایی را جهت ارزیابی بازده سازه ای کلگی مخازن به کار بردند. آنها یک روش طراحی کلگی بهینه را بر اساس معیار شکست تسای- هیل و تئوری صفحه ارتوتروپ معرفی نمودند.

مخازن تحت فشار بالا به صورت گسترده ای در کاربردهای تجاری و هوافضا و نیز وسایل نقلیه به کار می روند. مخازن الیاف پیچی شده، که از روش ساخت الیاف پیچی برای ایجاد قطعات پلاستیک تقویت شده سبک و با استحکام بالا بهره می برد، نوع مهمی از مخازن تحت فشار است. مخازن تحت فشار به طور معمول شامل دو بخش جداگانه است: بخش استوانه ای و کلگی ها. کلگی ها معمولاً مهمترین بخش در طراحی مخزن هستند. پارامترهای مطلوب در طراحی یک شکل کلگی خوب فشار ترکیدن و حجم داخلی بالاتر و وزن کمتر است.

تاکنون کارهای متعددی در زمینه بهینه سازی پارامترهای طراحی مخازن تحت فشار الیاف پیچی شده انجام شده است. فوکانگا و چو [۱] یک روش بهینه سازی چند لایه ای برای مخازن تحت فشار استوانه ای الیاف پیچی شده تحت قیود استحکام و سفتی ارائه دادند.

شده است. مسیر الیاف شبه-ژئودزیک برای سازه های الیاف پیچی شده عمومی به صورت زیر تعریف شده است:

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

$$A = 1 + \rho^2$$

رابطه (۱) بر روی یک سطح اختیاری تعریف شده است که α, z, ρ, θ و λ 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 (۱)، معادله مسیر ژئودزیک به دست می آید:

$$\rho \sin \alpha = cte \quad (2)$$

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 می شود. برای به دست آوردن زاویه پیچش در هر نقطه، داریم:

$$\rho \sin \alpha = \rho_0 \sin \alpha_0 = \rho_{b1} \sin 90 = \rho_{b2} \sin 90 \quad (3)$$

که ρ_0 و α_0 به ترتیب زاویه پیچش و شعاع مخزن در قسمت استوانه ای 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 می رود. این مطالعه به مخازن متقارن محدود می شود و بنابراین الگوی پیچش ژئودزیک به کار می رود. ضخامت لایه های 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 لایه های مارپیچ روی هر نقطه کلگی و روی استوانه هستند.

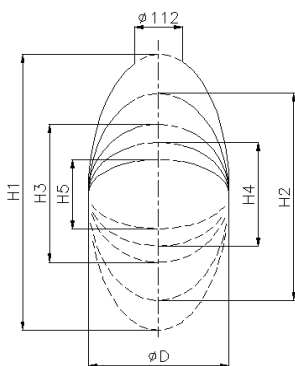
لیانگ و همکاران [۸] طراحی بهینه پروفیل کلگی مخازن تحت فشار الیاف پیچی شده را در معرض محدودیتهای هندسی، شرایط پیچش و معیار شکست تسای-وو بررسی نمودند. آنها روش مسیر امکان پذیر را برای بهینه نمودن ضریب شکل مورد استفاده قرار دادند. در کار حاضر بهینه سازی شکل کلگی و ترتیب چیدمان با هم و در دو سطح متوالی صورت می گیرد. به علاوه آنکه کار حاضر به انتخاب در میان اشکال کلگی شناخته شده می پردازد و نه به بهینه سازی.

در این مقاله، یک روش چند سطحی جهت بهینه سازی مخازن تحت فشار کامپوزیتی با آستر غیر فلزی معرفی شده است. روش 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 می دهد. روش چند سطحی به ندرت برای بهینه سازی سازه های پیچیده مانند مخازن الیاف پیچی شده گزارش شده است. به عنوان چند مثال، روش مزبور بر مخازن کامپوزیتی با کلگی های ژئودزیک و بیضوی اعمال شده است. با وجود این، روش مذکور قابل اعمال بر هر مخزن متقارن با هر نوع شکل کلگی است. این روش بر اساس معیار شکست تسای-وو و مسئله بهینه سازی ضریب شکل ضریب شکل اصلاح شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک است. این مطالعه به مخازن کامپوزیتی متقارن با دو کلگی 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.

۲- الگوی پیچش

طراحی مخزن الیاف پیچی شده شامل طراحی شکل مندرل و محاسبه مسیر الیاف می گردد. به طور معمول، شکل مندرل با نیازمندی های طراحی نظیر فشار و حجم داخلی و امکان پذیری تولید تعیین می شود. یافتن الگوهای پیچش ممکن بر روی یک سطح اختیاری یک از نخستین الزامات برای معرفی روش بهینه سازی 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

دارد (شکل ۲). هندسه کلگی به وسیله زاویه پیچش الیاف نیز از طریق تغییر قطر دهانه متأثر می شود.



شکل (۲): انواع اشکال کلگی بیضوی

۴- مدل اجزاء محدود

روش اجزاء محدود برای تحلیل مدل سه بعدی مخزن به کار رفته است. تمرکز تنش در محل اتصال استوانه و کلگی 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 پیش بینی شکست در مواد مرکب وجود دارد. در معیار تنش و کرنش بیشینه، اثرات متقابل بین مؤلفه های تنش و کرنش متفاوت در نظر گرفته نشده است. در معیار تسای-هیل، تفاوت بین مؤلفه های 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:

تشریح تنشهای اعمالی، استحکام تنشی و استحکام فشاری هستند. C_{xy} و C_{xz} و C_{yz} ضرایب کوپلینگ در تئوری تسای-وو هستند که همگی برابر ۱ انتخاب شده اند. اندیسهای x, y, z به ترتیب جهت الیاف و جهت عمود بر آن در داخل و خارج از صفحه المان را نشان می دهد. جزئیات مشخصات مکانیکی ماده کامپوزیت کربن-اپوکسی به کار رفته در این تحقیق در جدول ۱ نشان داده شده است. چگالی جرمی ماده کامپوزیت برابر 1565 kg/m^3 انتخاب شده است.

۳- انواع اشکال کلگی

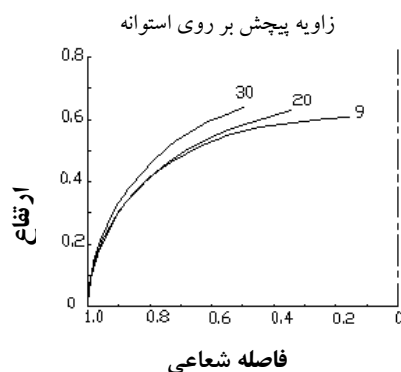
شکل کلگی اثرات معینی بر روی حجم داخلی، وزن و فشار ترکیدن مخزن دارد. حجم داخلی مخزن به وسیله حجم داخلی استوانه و دو کلگی مشخص می شود. سطح خارجی مخزن بر روی وزن کلی سازه الیاف پیچی شده تأثیر می گذارد. هندسه کلگی مخزن نیز بر روی فشار ترکیدن و مقدار معیار شکست تأثیر می گذارد.

اشکال کلگی ژئودزیک

با کاربرد همزمان تئوری شبکه ای و معادله (۳)، شکل کلگی ژئودزیک را می توان به دست آورد [۱۰]. مختصات نقاط تشکیل دهنده ρ (و z) با انتگرالگیری عددی از رابطه زیر به دست می آید:

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

در این مقاله، انتگرال معادله (۵) با استفاده از مقادیر پارامترهای ρ_0 و α_0 که به قسمت استوانه ای مربوط می شوند، محاسبه می گردد. بنابراین برای مقادیر متفاوت فاصله شعاعی، مقادیر مختلفی برای فاصله طولی به دست می آید و به این ترتیب شکل کلگی تعریف می شود. مقادیر زاویه پیچش (α) برای فواصل طولی متفاوت از محور مرکزی ρ (با استفاده از معادله (۴) به دست می آید. شکل ۱ انواع اشکال کلگی ژئودزیک و رابطه آنها با مقدار زاویه پیچش در بخش استوانه ای α_0 را نشان می دهد.



شکل (۱): انواع اشکال کلگی ژئودزیک با زوایای پیچش مختلف

اشکال کلگی بیضوی

اشکال کلگی بیضوی بر اساس نسبت منطری (e) که نسبت قطر بیضی در راستای محور مرکزی مخزن به قطر عمود بر آن است، وجود

ضعامت تمام لایه ها به خاطر طبیعت پیوسته فرآیند الیاف پیچی برابر ۱ میلیتر انتخاب شده است. روند بهینه سازی برای مخازن تحت فشار کامپوزیتی به دو سطح تقسیم شده است: ۱. انتخاب شکل کلگی و زاویه پیچش و ۲. بهینه سازی وزن چند لایه.

در نخستین سطح، اشکال شناخته شده با زوایای پیچش مختلف بر اساس بیشینه تابع هدف با هم مقایسه می شوند. در این سطح، روند برای یک ترتیب چیدمان و تعداد لایه های مشخصی که ممکن است بهینه نباشد، انجام می شود. در سطح دوم، ترتیب چیدمان و تعداد لایه های بهینه انتخاب می شوند. این روند دو سطحی تا جایی ادامه می یابد که بهبود محسوسی در تابع هدف مشاهده نشود. دیاگرام شماتیک روش بهینه سازی چند سطحی برای اشکال کلگی متفاوت در شکل ۵ نشان داده شده است.

روند بهینه سازی چند سطحی برای کاهش تعداد تحلیل‌های اجزاء محدود مورد نیاز مورد استفاده قرار گرفته است. برای نمونه اشکال کلگی بیضوی ممکن زیادی برای زوایای پیچش و نسبت‌های هندسی متفاوت وجود دارند. به عنوان مثال، اگر ۱۰ نسبت هندسی متفاوت بین ۰/۲ تا ۲ و ۱۰ زاویه پیچش مختلف بین ۵ تا ۵۰ درجه برای کلگی های بیضوی در نظر بگیریم، ۱۰۰ مورد متفاوت وجود خواهد داشت. با استفاده از روش چند سطحی تنها یک حالت انتخاب و الگوریتم ژنتیک بر آن مورد اعمال می شود.

انتخاب شکل کلگی و زاویه پیچش

معیار شکست تسای- و اثرات فشار داخلی، مشخصات مخزن و ویژگی‌های ماده را به حساب می آورد. بنابر این عبارات فشار و استحکام در تابع هدف را می توان به وسیله معیار شکست تسای- و جایگزین نمود. بنابر این 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- و مزایای متعددی نسبت به دیگر معیارها دارد. در روش دو سطحی مذکور، ضریب شکل اصلاح شده برای اشکال کلگی و زوایای پیچش متفاوت مقایسه شده است.

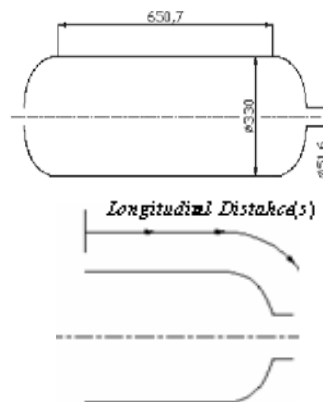
بهینه سازی وزن چند لایه با استفاده از الگوریتم ژنتیک

روند برای بهینه سازی تعداد لایه ها و ترتیب چیدمان با استفاده از الگوریتم ژنتیک بر روی شکل کلگی و زاویه پیچش معینی اعمال شده است. الگوریتم بهینه سازی چند لایه برای یافتن ترتیب چیدمان و

جدول (۱): 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 |
| V_{xy} | ۰/۲۵ | σ_{xy} | ۶۸/۹ |
| V_{xz} | ۰/۲۵ | σ_{yz} | ۳۴/۵ |
| V_{yz} | ۰/۳۶۵ | σ_{xz} | ۳۴/۵ |

قطر خارجی قسمت استوانه ای ۳۳۰ میلیتر و طول آن برابر ۶۵۰ میلیتر است (شکل ۳). 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 ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۷۰ بار است. در مدل اجزاء محدود، یک فشار یکنواخت ۴۷۰ بار اعمال شده است. نتایج تحلیل اجزاء محدود در مقابل فاصله طولی روی یال مخزن از مقطع میانی مخزن نشان داده شده است.



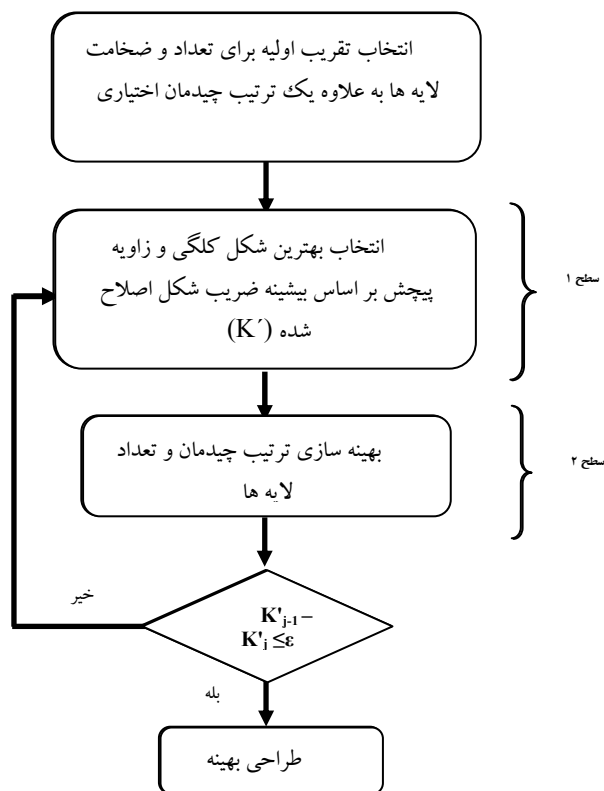
شکل (۳): ابعاد مخزن (به میلیتر) زمانی که زاویه پیچش مارپیچ در قسمت

استوانه ای برابر $\pm 9^\circ$ باشد (بالا)

فاصله طولی (s) (پایین)

۵- روش بهینه سازی چند سطحی

متغیرهای طراحی شامل شکل کلگی، زاویه لایه های مارپیچ (α)، ضخامت لایه ها (t)، تعداد لایه ها (NL) و ترتیب چیدمان است.



شکل (۴): دیاگرام شماتیک روند بهینه سازی دو سطحی برای مخازن کامپوزیتی

متغیرهای طراحی در بهینه سازی ترتیب چیدمان (زاویه پیچش الیاف) پیوسته نیستند. به عنوان مثال، اگر زاویه پیچش مارپیچ برابر $\pm 9^\circ$ باشد و کلگی ژئودزیک بر اساس این زاویه اعمال شود، ترتیب زوایا به $+9^\circ$ ، -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 ۹ لایه ای به صورت زیر تعریف شده است:

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

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

تعداد لایه ای که دارای کمترین وزن با معیار شکست زیر یک است، سازماندهی شده است. بنابراین، مسأله به صورت زیر فرمولبندی شده است:

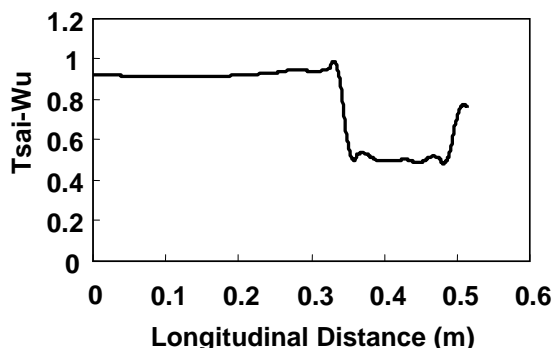
$$\begin{aligned} & \text{Min } W \\ & \text{subject to } Tsai_Wu < 1 \end{aligned}$$

به خاطر وابستگی شکل کلگی با زاویه پیچش، لازم است یک کلگی جدید برای هر زاویه پیچش مدل شود. بنابراین در هر مدل متغیرهای طراحی زاویه پیچش به مقادیر گسسته $+\alpha$ و $-\alpha$ برای لایه های محیطی محدود می گردد. بنابراین، متغیرهای طراحی برای فرایند بهینه سازی وزن برای هر مدل مخزن تحت فشار کامپوزیتی شامل تعداد و ترتیب چیدمان لایه ها می شود. جزئیات شماتیک روند کمینه سازی وزن در شکل ۴ نشان داده شده است. در این روند، ترتیب چیدمان بهینه با استحکام بیشینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای تعداد لایه ثابتی به دست می آید و تعداد لایه ها برای رسیدن به تعداد لایه های کمینه با تسای-وو زیر یک از طریق یک روند تکراری کم یا زیاد می شود. به عنوان نخستین حدس برای تعداد لایه ها، تئوری شبکه ای قابل استفاده است. در حقیقت، دو متغیر طراحی تعداد لایه ها و ترتیب چیدمان اثر یکسانی بر روی وزن و استحکام ندارند. به عبارت دقیقتر، تعداد لایه ها اثر بیشتری نسبت به ترتیب چیدمان دارد. از سوی دیگر بعضی متغیرها مانند تعداد لایه ها اثر خطی و قابل پیش بینی بر روی رفتار سازه دارد، در حالیکه بعضی مانند ترتیب چیدمان اثری غیر خطی دارند. به همین دلیل دو متغیر از طرق متفاوت بهینه می شوند.

بهینه سازی ترتیب چیدمان یک زیر مسئله در کمینه سازی وزن است. این مسأله که برای بیشینه سازی استحکام تعداد مشخصی لایه فرمولبندی شده است، به صورت زیر تعریف شده است:

$$\begin{aligned} & \text{Min}_{SS} \text{ Max}_{LN,S} Tsai - Wu(SS; LN, S) \\ & \text{subject to: } \text{Number of layers} = NL \\ & \text{Layer thickness} = 1 \text{ mm} \\ & \text{Layer angles} = 90, \alpha, -\alpha \end{aligned}$$

که DV مجموعه متغیرهای طراحی شامل ترتیب چیدمان زوایای الیاف، LN شماره لایه با معیار شکست بیشینه، S فاصله طولی (بخش ۴) که در آن معیار شکست بیشینه در طول یال مخزن اتفاق می افتد و NL تعداد لایه هاست.



شکل (۵): تسای-وو برای پوسته کامپوزیت ۹ لایه ای با کلگی ژئودزیک و زاویه پیچش مارپیچ $\pm 9^\circ$

ترتیب چیدمان بهینه برای ۳ مدل پوسته ۹ لایه ای با زاویه پیچش مارپیچ ۹، ۲۰ و ۳۰ درجه در جدول ۳ مقایسه شده اند.

جدول (۳): ترتیب چیدمان بهینه برای پوسته های کامپوزیتی ۹ لایه ای

| زاویه پیچش (درجه) | ترتیب چیدمان بهینه | مقدار بیشینه معیار شکست تسای-وو |
|-------------------|---|---------------------------------|
| 9 | [90, 9, -9, 90, 9, -9, 90, 9, 90] | 0.955 |
| 20 | [0, 90, -20, 20, 20, -20, -20, 20, 20] | 6.871 |
| 30 | [90, 30, -30, 30, -30, 30, -30, 90, 90] | 11.105 |

نتایج نشان می دهد که ترتیب چیدمانهای بهینه پوسته های کامپوزیتی با کلگی های ژئودزیک با زوایای پیچش (و قطرهای دهنه متفاوت) ۹، ۲۰ و ۳۰ 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 ۲۰ و ۳۰ 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.

۶- نتایج

کلید جداول به عنوان دو مثال عملی، روش بهینه سازی دو سطحی برای مخازن با کلگی های ژئودزیک (شکل ۱) در سطح نخست تنها

در این رهیافت، پارامترهای الگوریتم ژنتیک از طریق آزمون و خطا انتخاب شده اند. جمعیت اولیه و بیشینه تعداد نسلها به ترتیب برابر ۵۰ و ۱۰۰ 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.

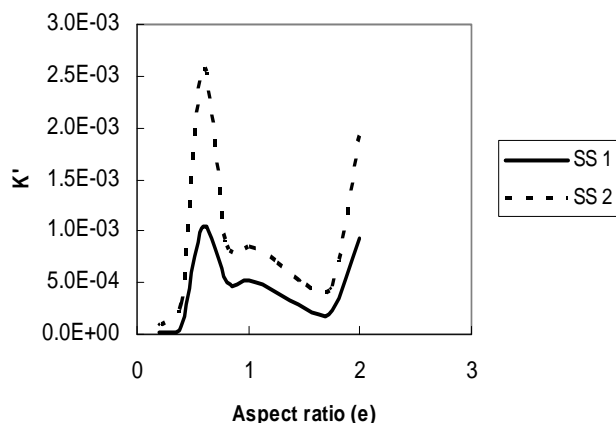
روند بهینه سازی برای تعداد لایه های متفاوتی در مدلی با زاویه پیچش مارپیچ $9^\circ \pm$ انجام می شود. ترتیب چیدمان، معیار تسای-وو و وزن پوسته های بهینه ۸، ۹ و ۱۰ لایه ای در جدول ۲ نشان داده شده است. کمترین تعداد لایه ای که مقدار معیار شکست تسای-وو آن زیر یک است، مربوط به یک پوسته ۹ لایه ای است. بنابراین سبکترین پوسته کامپوزیتی ۹ لایه در قسمت استوانه ای دارد. از این نه لایه، چهار تا مارپیچ و پنج تا محیطی اند. از میان ترتیب چیدمانهای مختلف پوسته های ۹ لایه ای، بهترین آنها که مقدار تسای-وو آن زیر یک است به کمک الگوریتم ژنتیک به دست آمده و در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول (۲): ترتیب چیدمان بهینه برای پوسته های کامپوزیتی با زاویه پیچش مارپیچ $9^\circ \pm$

| تعداد لایه ها | ترتیب چیدمان بهینه | مقدار بیشینه معیار شکست تسای-وو | وزن مخزن (kg) |
|---------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------|
| 8 | [90, 9, -9, 90, 90, -9, 9, 90] | 1.145 | 5.977 |
| 9 | [0, 9, -9, 90, 9, -9, 90, 9, 90] | 0.955 | 6.833 |

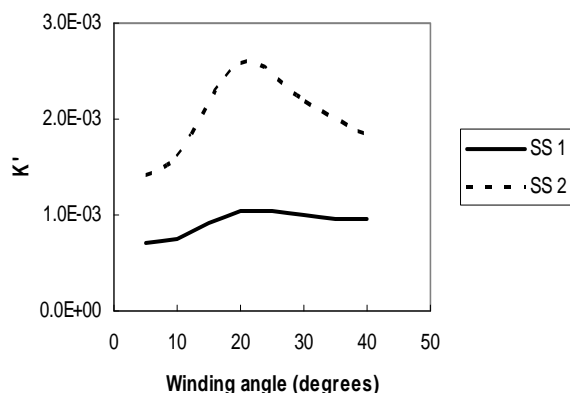
برای تعداد لایه های کمینه، امکان جایگزینی لایه های مارپیچ با محیطی برای به دست آوردن یک چند لایه سبکتر امتحان می شود. شکل ۵ معیار شکست تسای-وو ترتیب چیدمان بهینه برای کلگی ژئودزیک و زاویه پیچش مارپیچ $9^\circ \pm$ را نشان می دهد. این شکل، بیشینه تسای-وو (که $0.955/$ در جدول ۲ است) و در محل اتصال قسمت 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.

دو قسمت اعمال می شود. نخست، تنها اثر هندسه کَلگی بررسی می شود و تمام متغیرهای دیگر ثابت در نظر گرفته شده اند. ترتیب چیدمان زاویه در بخش استوانه ای به عنوان نقطه ابتدایی برای فرآیند بهینه سازی مورد استفاده قرار می گیرد. از شکل ۷ مشاهده می شود که برای نسبتهای هندسی متفاوت ($0.2 < e < 2$) کَلگی های بیضوی، بیشینه ضریب شکل اصلاح شده به $e=0.6$ متعلق است.



شکل (۷): مقدار K' برای نسبتهای منطری متفاوت بیضوی ها

در قسمت بعدی، تنها اثر زاویه پیچش بر روی نسبت منطری ($e=0.6$) منتخب از قسمت قبل مورد بررسی قرار می گیرد و تمام متغیرهای دیگر ثابت در نظر گرفته می شوند. همانگونه که در شکل ۸ مشاهده می شود، بیشینه ضریب شکل اصلاح شده برای زاویه ۲۱ درجه اتفاق می افتد. اگر دامنه زاویه پیچش لایه های مارپیچ بین ۵ و ۴۰ درجه، با مقادیر ۵ درجه تقسیم بندی شوند، زاویه پیچش ۲۰ درجه در این سطح انتخاب می شود.

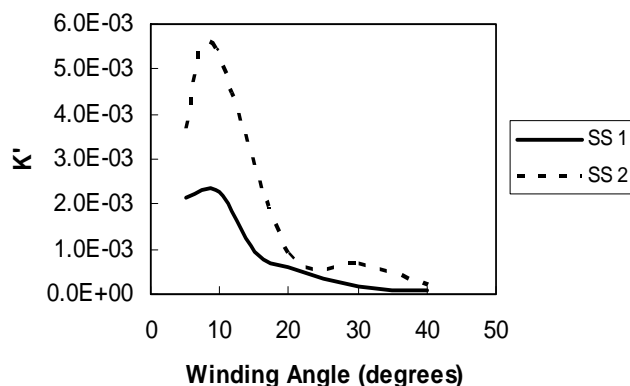


شکل (۸): مقدار K' برای زوایای پیچش متفاوت

زاویه پیچش بایستی بهینه شود، حال آنکه برای کَلگی های بیضوی (شکل ۲) نسبت منطری علاوه بر زاویه پیچش بایستی بهینه شود.

کَلگی های ژئودزیک

برای هر یک از این اشکال کَلگی ژئودزیک که در شکل ۱ نشان داده شده اند، تحلیل عددی برای ترتیب چیدمانهای مشابه انجام شده است. ترتیب چیدمان اختیاری زاویه $[90,90, \alpha, -\alpha, \alpha, -\alpha, \alpha, 90,90]$ و ضخامت $[1,1,0.5,0.5,0.5,0.5,1,1]$ در قسمت استوانه ای به عنوان نقطه نخست در روند بهینه سازی مورد استفاده قرار گرفته است. مقایسه بین مقادیر ضریب شکل اصلاح شده برای زوایای پیچش متفاوت صورت گرفته است. همانگونه که از شکل ۶ قابل مشاهده است، زاویه پیچش ۹ درجه بهترین عملکرد را دارد. در سطح بعدی، بهینه سازی ترتیب چیدمان و تعداد لایه ها برای بهترین زاویه پیچش (۹ درجه) جهت یافتن وزن کمینه در معرض قید معیار شکست تسای- و و صورت گرفته است. بنابراین ترتیب چیدمان بهینه $[90,9, -9,9,90,90,9,90,90]$ به دست آمده است.



شکل (۶): مقدار K' برای زوایای پیچش متفاوت

کل روند دو سطحی مذکور باید تا جایی ادامه یابد که هیچگونه بهبود محسوسی در تابع هدف دیده نشود. همانگونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، در تکرار دوم ترتیب چیدمان بهینه برای زوایای پیچش متفاوت امتحان شده است و زاویه ۹ درجه بهترین عملکرد را دارد. بنابراین روند در اینجا خاتمه می یابد.

کَلگی های بیضوی

روش بهینه سازی پیشنهاد شده بر روی اشکال کَلگی بیضوی با نسبتهای منطری گوناگون نیز اعمال شده است. سطح نخست، خود در

۹- مراجع

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.

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.

A.A. Krikanov, "Composite Pressure Vessels with Higher Stiffness", Composite Structures, Vol. 48 (2000), pp. 119-27.

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.

J.T. Hofeditz, "Structural Design Considerations for Glass Pressure Vessels", 18th Annual Meeting of the Reinforced Plastics Division (1963).

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.

Y.C. Lin, W.C. Hwang, "Design of Dome Contour for Filament-Wound Rocket Motor Cases", Trans Aeronautical and Astronaut Soc Republic of China (Taiwan), Vol. 27 (1995), pp. 61-70.

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.

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.

M.Z. Kabir, "Finite Element Analysis of Composite Pressure Vessels with a Load Sharing Metallic Liner", Composite Structures, Vol. 49 (2000), pp. 247-255.

سطح دوم به نهنه سازی ترتیب چیدمان و تعداد لایه ها مربوط می شود، در حالیکه نسبت منظری و زاویه پیچش به دست آمده از سطح قبلی ثابت در نظر گرفته می شوند. ترتیب چیدمان از طریق کاربرد الگوریتم ژنتیک به دست می آید.

روش دو سطحی مذکور تا جایی ادامه می یابد که هیچگونه بهبود قابل توجهی در تابع هدف مشاهده نشود. از اشکال ۷ و ۸ مشاهده می شود که نتایج قبلی (نسبت منظری ۰/۶ و زاویه پیچش ۲۰ درجه) تکرار می شوند. بنابراین هیچ بهبود محسوسی در مقدار ضریب شکل اصلاح شده مشاهده نمی شود و روند پس از ۲ تکرار خاتمه می یابد.

۷- نتیجه

در این مقاله، یک روش بهینه سازی چند سطحی که با ترکیب با الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی مخازن تحت فشار کامپوزیتی با انواع اشکال کلگی شناخته شده مانند ژئودزیک و بیضوی به کار می رود، معرفی شده است. مزیت اصلی این فرایند در آنست که یک تعداد کمینه برای تحلیل‌های اجزاء محدود در مقایسه با کاربرد الگوریتم ژنتیک به هر یک از مدل‌های کلگی جداگانه مورد نیاز است. به عنوان چند مثال، روش دو و سه سطحی به ترتیب بر روی کلگی های ژئودزیک و بیضوی به کار رفته است. در میان زوایای پیچش برای شکل کلگی ژئودزیک، زاویه پیچش ۹ درجه بهترین عملکرد را دارد. در عین حال نشان داده شده است که کلگی های بیضوی عموماً عملکرد ضعیفتری نسبت به انواع ژئودزیک دارند. مخازن کامپوزیت غیر متقارن را نیز می توان به این روش بهینه نمود، ولی تعداد سطوح در هر مسئله می تواند متفاوت باشد.

۸- تقدیر و تشکر

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

ISO 11439:2000(E), Gas cylinders-High pressure cylinders for the on-board storage on natural gas as a fuel for automotive vehicles. [۱۱]

Archive of SID

Archive of SID

MULTI-STAGE OPTIMUM DESIGN FOR COMPOSITE PRESSURE VESSELS

S.Rahmati¹, A.Khani²

1. Assistant Professor, Mech. Eng. Group, Majelisi Islamic Azad University

2. M.Sc. Graduate Student (Corresponding Author)

ABSTRACT

In this paper, multi-stage optimum design of composite pressure vessels is presented. The design variables for composite vessels include the head shape, the winding angle, the layer thickness, the number of layers, and the stacking sequence. A parameter called modified shape factor is introduced as an objective function. This parameter takes into account the effects of the internal pressure and volume, the vessel weight, and the composite material properties. The proposed algorithm uses genetic algorithm and finite element analysis to optimize the design parameters. As a few examples, this procedure is implemented on geodesic and ellipsoidal heads. The results show that for the given vessel conditions, the geodesic head shape with helical winding angle of nine degrees has the better performance.

KEYWORDS

Filament Wound Vessel - Optimization - Genetic Algorithm - Multi-stage Strategy – Stacking Sequence - Shape factor - Geodesic.