

بهینه سازی وزنی یک پوسته کامپوزیتی در مخازن تحت فشار نوع ۴ به روش الگوریتم ژنتیک

علی خانی^۱، عباس وفايي صفت^۲ و صادق رحمتي^۳

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده علوم و مهندسی، دانشگاه امام حسین (ع)

چکیده

هدف اصلی در این تحقیق، ارائه الگوریتمی برای یافتن وزن کمینه مخازن تحت فشار کامپوزیتی با آستر غیر فلزی است. مخازن کامپوزیتی تحت فشار داخلی به صورت گسترده در صنایع هوافضا و به صورت تجاری، مانند مخازن قابل حمل ذخیره اکسیژن، مخازن ذخیره سوخت و غیره به کار می رود. کاهش وزن در این مخازن علاوه بر صرفه جویی در مقدار و هزینه مواد به کار رفته باعث کاهش مصرف سوخت، هزینه های حمل و نقل و نیز افزایش نسبت برد وسیله نقلیه به وزن آن می شود. مطالعات قبلی [۱] نشان می دهد که شکل کُلگی ژئودزیک بهترین عملکرد را در مقایسه با انواع اشکال کُلگی شناخته شده دارد. به این ترتیب، در این تحقیق بهینه سازی ترتیب چیدمان در هر زاویه پیچش برای تعداد لایه های مختلف صورت گرفته است. این کار با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تحلیل اجزای محدود انجام شده و در نهایت پوسته کامپوزیتی که کمترین تعداد لایه را داشته باشد و در عین حال مقدار معیار شکست آن زیر عدد یک باشد، به عنوان سبک ترین چند لایه انتخاب شده است. مقایسه بین زوایای پیچش مختلف نشان می دهد که مخازن با زاویه پیچش الیاف ۹ درجه، عملکرد بهتری نسبت به مخازن با زوایای پیچش ۲۰ و ۳۰ درجه دارد. مقایسه مخازن طراحی شده شانزده لایه ای با یک مخزن نمونه موجود نشان می دهد که علاوه بر استحکام بالاتر، در انتخاب ترتیب چیدمان بهینه فرآیند ساخت نیز بایستی مورد توجه قرار گیرد.

واژه های کلیدی: مخازن تحت فشار کامپوزیتی، یکسان بودن کشش، کُلگی ژئودزیک، بهینه سازی وزنی، الگوریتم ژنتیک.

Weight Optimization of a Composite Shell in Type 4 Pressure Vessels Using Genetic Algorithm

A. Khani, A. Vafaeesefat, and S. Rahmati

Mech. Eng. Group, School of Science and Eng., Imam Hossein Univ.

ABSTRACT

The main aim of this work is to present an algorithm to find the minimum weight for the composite high-pressure vessels with non-metallic liner. Composite pressure vessels are widely used in aerospace and commercial industries such as in rocket motor cases, in portable oxygen storage, and in fuel tanks. Weight minimization in these vessels (in addition to large savings in amount and cost of material) results in reducing fuel consumption and transportation costs; and increasing the ratio of travel range to weight. Previous studies [1] show that geodesic head has the best performance among different known head shapes. The stacking sequence optimization at each winding angle is performed for different number of layers. This is done through using genetic algorithm and finite element analysis. Finally, the composite shell with minimum number of layers whose Tsai-Wu failure criterion is below one is selected as the laminate with minimum weight. A comparison between different winding angles shows that winding angle of 9 degrees has better performance than 20 and 30 degrees. With performing a comparison between existing vessel and optimized 16 layered vessels, it is seen that, in addition to maximum strength, manufacturing conditions should be considered for the best stacking sequence selection.

Key Words: Composite Pressure Vessels, Isotensoid, Geodesic Head, Weight Optimization, Genetic Algorithm.

۱- دانشجوی کارشناس ارشد (نویسنده پاسخگو): Akhany@gmail.com

۲- استادیار: Abbas_v@yahoo.com

۳- استادیار: Rahmati@rapidtoolpart.com

۱ - مقدمه

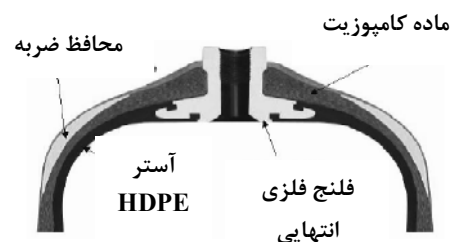
همانگونه که دیده می شود، این مخزن از یک آستر غیر فلزی از جنس پلی اتیلن با چگالی بالا^۲، کامپوزیت کربن-اپوکسی، دو فلنج انتهایی فلزی و بخشی به عنوان محافظ ضربه در قسمت حساس کلگی تشکیل شده است.

یکی از مواردی که به کمک آن می توان از مزایای مواد کامپوزیت از جمله سفتی و استحکام ویژه بالا استفاده نمود، طراحی مخازن تحت فشار است. استفاده از مواد کامپوزیت، عملکرد مخزن را بهبود می بخشد و باعث صرفه جویی قابل توجهی در مواد به کار رفته می شود. علاوه بر این مخازن کامپوزیتی مزیت قابل توجهی را به خصوص در ذخیره مایعات پرخطر در صنایع شیمیایی، نسبت به مخازن فولادی ارائه می دهد. یک مخزن گاز طبیعی فشرده از جنس کامپوزیت کربن/اپوکسی با آستر غیرفلزی حدوداً ۶۰٪ از مخزن آلومینیومی با ابعاد و هندسه و شرایط کاری مشابه، سبک تر است. برای خودروهای مسافری، مخازن کامپوزیتی گاز طبیعی فشرده، در موقعیت ترکیدن رفتار بسیار ایمن تری نسبت به مخزن فلزی از خود نشان می دهند [۲].

فرآیند الیاف پیچی^۳، یک روش عمومی در ساخت پوسته های کامپوزیتی متقارن محوری است. در این فرآیند، باند الیاف به صورت پیوسته بر روی یک مندرل^۴ در حال چرخش قرار می گیرد. سازه های الیاف پیچی شده متقارن محوری تحت بار داخلی، علاوه بر مخازن ذخیره CNG، موارد دیگری مانند مخازن سوخت فضایی، مخازن ذخیره مواد اکسید کننده^۵، بدنه های موتور و لوله ها را نیز در بر می گیرد. مخازن تحت فشار کامپوزیتی معمولاً برای وزن کمینه تحت قیود استحکام طراحی می شوند. باید قیود سفتی را نیز ارضا کنند. کاهش وزن در این مخازن علاوه بر صرفه جویی در مقدار و هزینه مواد به کار رفته در مخزن، باعث کاهش مصرف سوخت، هزینه های حمل و نقل و افزایش نسبت برد وسیله نقلیه به وزن آن می شود.

تاکنون در زمینه طراحی بهینه سازه های ساده از قبیل صفحات و یا استوانه های کامپوزیتی کارهای متعددی صورت

محدودیت در میزان سوخت های مایع موجود در کره زمین، آلاینده گی زیاد خودروهای استفاده کننده از این منابع و مشکلات فراوان آن، باعث گسترش استفاده از خودروهای با نیروی محرکه خورشیدی، الکتریکی و گاز طبیعی، به عنوان خودروهای بدون آلودگی شده است. استفاده از گاز طبیعی به عنوان سوخت جایگزین، باعث شده است که طراحی و تولید مخازن گاز طبیعی فشرده^۱ اهمیت زیادی پیدا کند. مخازن گاز طبیعی در چهار نوع ساخته می شوند. نوع اول مخازن تمام فلزی است که معمولاً از جنس فولاد یا آلومینیوم است. نوع دوم، مخازن با آستر فلزی هستند که قسمت استوانه ای آنها با استفاده از روش الیاف پیچی تقویت شده اند. نوع سوم مخازن گاز طبیعی فشرده دارای یک آستر فلزی هستند که در تمام قسمت ها از جمله در دو کلگی به وسیله کامپوزیت تقویت شده اند. در مخازن نوع چهارم که مخازن تمام کامپوزیتی نیز نامیده می شوند، برخلاف سه نوع قبلی آستر، غیر فلزی است و نقشی در تحمل فشار داخلی ندارد. نقش آستر در این مخازن، تنها جلوگیری از خروج و نشت گاز است. در این مخازن آستر در همه جا به وسیله الیاف کامپوزیتی تقویت شده است و نقش اصلی تحمل بار بر عهده کامپوزیت است. این نوع مخزن در میان انواع مخازن، کمترین وزن را دارد. شکل ۱ نمایش شماتیکی از یک نمونه مخزن نوع چهارم را نشان می دهد.



شکل ۱: سطح برش خورده مخزن تمام کامپوزیتی با اجزاء.

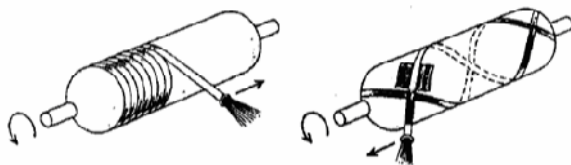
2-High Density Poly Ethylene (HDPE)
3-Filament Winding
4-Mandrel
5-Oxidizer

1-Compressed Natural Gas (CNG)

۱. پیچش مارپیچی^۱: در این الگوی پیچش پوسته استوانه‌ای و دو درپوش مخزن توسط الیاف پیچیده می‌شوند (شکل ۲). زاویه پیچش الیاف (α) همان زاویه بین دسته الیاف و محور طولی مخزن است. در پیچش مارپیچ، زاویه الیاف بین ۰ تا ۹۰ درجه می‌تواند متغیر باشد ($0 < \alpha < 90^\circ$). الیاف در محل دهانه (سوراخ) درپوش مخزن بر لبه این دهانه مماس می‌گردد و زاویه آن به ۹۰ درجه می‌رسد ($\alpha = 90^\circ$). انواع این پیچش عبارتند از: پیچش به روش یکسان بودن کشش، صفحه‌ای^۲ و لغزش ثابت^۳. توضیحات بیشتر در مورد این روش‌ها در مرجع [۱۲] آمده است.

۲. پیچش محیطی^۴: این پیچش تنها بر روی پوسته استوانه‌ای قابل اعمال است. در این روش الیاف عمود بر محور پیچش هستند ($\alpha \cong 90^\circ$) (شکل ۲). به خاطر وجود لغزش الیاف، بر روی درپوش‌ها از این نوع پیچش استفاده نمی‌شود.

۳. پیچش طولی^۵: در این نوع پیچش، الیاف در راستای محور استوانه قرار می‌گیرند ($\alpha \cong 0^\circ$). به خاطر هندسه مخازن، از این نوع پیچش در ساخت مخازن استفاده نمی‌شود.



شکل ۲: انواع روش‌های پیچش الیاف (راست) پیچش مارپیچی و (چپ) پیچش محیطی.

گرفته است [۵-۳]، با این وجود در زمینه طراحی بهینه سازه‌هایی با هندسه پیچیده تر مانند مخازن تحت فشار تحقیقات اندکی گزارش شده است. علاوه بر این بیشتر کارهای گزارش شده در این زمینه بر پایه روابط ساده تحلیلی و یا روش‌های طراحی تجربی مانند مطالعه پارامتریک استوار است [۱۱-۶]. بنابراین تاکنون روش‌های طراحی که شرایط خاص این سازه‌ها را در نظر بگیرد و روشهای اجزای محدود را با الگوریتم‌های سازمان یافته بهینه‌سازی ترکیب نماید، کمتر گزارش شده است. علت اصلی آن است که برای طراحی چنین سازه‌هایی محدودیت‌های خاص در مورد مسیر الیاف پیچی و سطح پیچیده شده روی آن وجود دارد. این محدودیت‌ها به گونه‌ای است که پایداری الیاف پیچیده شده و نیز جلوگیری از لغزش آن و ناپایداری سازه را تضمین نماید. مشکل دیگر، در ایجاد ارتباط صحیح، مؤثر و با راندمان بالا بین روش‌های اجزای محدود و الگوریتم‌های بهینه‌سازی است. در این تحقیق سعی شده ضمن در نظر گرفتن شرایط خاص پیچش به نحوی که پایداری سازه تضمین شود، شیوه مؤثری برای ایجاد ارتباط بین الگوریتم ژنتیک و روش‌های اجزای محدود به کار گرفته شود. کارآیی این روش در مقایسه نتایج با مخازن موجود نشان داده شده است.

۲- تئوری

در این بخش، پیچش الیاف، به خصوص به روش یکسان بودن کشش مورد بحث قرار می‌گیرد.

۲-۱- پیچش الیاف و انواع روش‌های آن

الیاف پیچی، روش مؤثری در ساخت سازه‌های کامپوزیتی متقارن محوری است. در این روش باندهای الیاف به صورت پیوسته بر روی مندرل در حال چرخش پیچیده می‌شوند. این فناوری، روشی با سرعت و دقت بالا برای قرار دادن لایه‌های کامپوزیتی بر روی مندرل ارائه می‌کند. سه روش را می‌توان برای الیاف پیچی در این سازه‌ها در نظر گرفت. این سه نوع پیچش عبارتند از:

1-Helical
2-Plannar
3- Stability
4-Hoop
5-Longitudinal

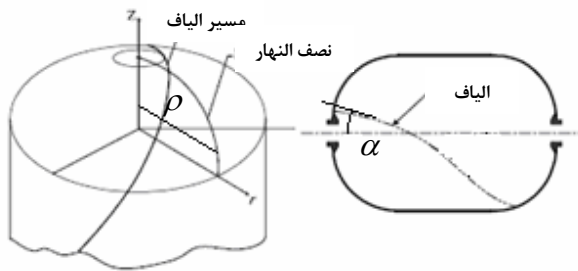
۲-۲- پیچش به روش یکسان بودن کشش

هنگامی که الیاف بر روی یک سطح پیچیده می شوند و بین دو نقطه تحت کشش قرار می گیرند، تمایل به قرار گرفتن روی مسیر منحنی را دارند که دارای کوتاه ترین فاصله بین آن دو نقطه است. این منحنی، مسیر ژئودوزیک^۱ نام دارد. به طور طبیعی الیاف تحت کشش، تمایل به قرار گرفتن بر روی چنین مسیری در سطح را دارند. در این پیچش الیاف هیچ گونه تمایلی به لغزش ندارند. بنابراین می توان پیچش را بر روی سطحی با ضریب اصطکاک پایین و بدون نگرانی از ناپایداری و لغزش الیاف انجام داد. در این روش ممکن است نیاز به هندسه درپوشی متفاوت با آنچه که در دیگر پیچش ها به کار می رود، باشد. روش به دست آوردن شکل در پوش ها و قوانین پیچش برای روش پیچش یکسان بودن کشش به تفصیل در مرجع [۱۲] آمده است. دو شرط اساسی حاکم بر پیچش به روش یکسان بودن کشش، به صورت زیر بیان می شود:

۱. الیاف به تنهایی تنش های حاصل از فشار داخلی را تحمل می کنند (تحلیل شبکه ای) و
 ۲. تنش در سرتاسر طول الیاف ثابت است (یکسان بودن کشش).
- با تحلیل غشایی پوسته، شرط اول به صورت رابطه زیر به دست می آید:

$$2 + \frac{\rho \rho''}{1 + \rho'^2} = tg^2 \alpha, \quad (1)$$

که در آن، ρ فاصله شعاعی هر نقطه روی پوسته تا محور مرکزی آن و α زاویه پیچش الیاف در آن نقطه نسبت به محور مرکزی است (شکل ۳).

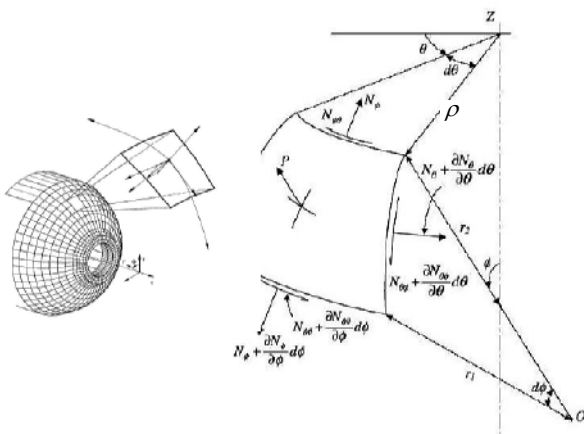


شکل ۳- مسیر ژئودوزیک برای الیاف در روی درپوش.

شرط دوم یعنی ثبوت تنش در سرتاسر الیاف، از رابطه زیر به دست می آید:

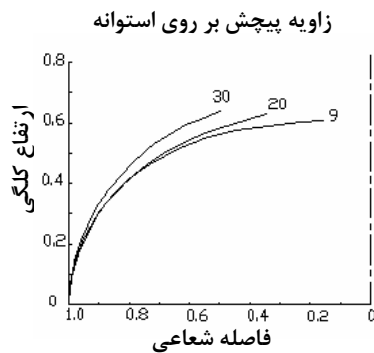
$$\sigma_{fs} = \frac{N_{\phi}}{xt_s \cos^2 \alpha}, \quad (2)$$

که در آن، σ_{fs} تنش در راستای الیاف، N_{ϕ} نیرو در راستای نصف النهاری، x درصد حجمی الیاف و t_s ضخامت لایه کامپوزیت است. شکل ۴ نیروهای وارده بر یک المان عدسی را نشان می دهد.



شکل ۴: بارهای وارده بر یک المان در قسمت عدسی.

برای این که تنش در سرتاسر الیاف ثابت باشد، لازم است که در رابطه فوق مقدار زیر ثابت باشد:



شکل ۵: اشکال مختلف عدسی ژئودزیک برای زوایای پیچش مختلف.

۲-۳- زاویه پیچش الیاف و ضخامت کامپوزیت متغیر در طول پروفیل عدسی

به خاطر چرخش مندرل حین پیچش و حرکت بازوی تغذیه، الیاف روی عدسی مخزن در یک زاویه مشخص قرار نمی گیرند (از آنجایی که بر روی باندها هنگام پیچش یک کشش اولیه ایجاد می کنیم، باند در حال پیچش سعی می کند که خود را روی عدسی در یک وضعیت متعادل قرار دهد) و زوایای الیاف از مقدار ۹۰ درجه روی گشودگی دهنه عدسی تا مقدار زاویه پیچش α_0 روی استوانه متغیر خواهد بود (شکل ۳). برای به دست آوردن زاویه پیچش در هر نقطه می توان از رابطه زیر استفاده کرد [۱۲]:

$$\rho \sin \alpha = \rho_0 \sin \alpha_0 = \rho_{b1} \sin 90 = \rho_{b2} \sin 90, (6)$$

که در آن، ρ_{b1} و ρ_{b2} به ترتیب شعاع دهنه (سوراخ) کلگی در سمت چپ و راست هستند. بنابراین در پیچش به روش یکسان بودن کشش، لزوماً باید دو درپوش، شعاع دهنه یکسان و شکل ژئودزیک کاملاً مشابهی داشته باشند.

هنگام پیچش مخزن کامپوزیتی، به علت شکل هندسی عدسی تجمع الیاف آغشته به رزین روی عدسی در نزدیکی محل گشودگی دهنه عدسی بیشتر است و می توان گفت که عملاً ضخامت کامپوزیت روی عدسی مخزنها متغیر است. از

$$\rho^2 \frac{\sqrt{1+\rho'^2}}{\cos \alpha} = \text{Constant} \quad (3)$$

در نهایت، معادلات (۱) و (۳) یک دستگاه معادلات دیفرانسیل تشکیل می دهند که توابع $\rho(z)$ و $\alpha(z)$ از طریق آن به دست می آیند. قانون پیچش به صورت رابطه زیر به دست می آید:

$$\rho \sin \alpha = \text{constant} \quad (4)$$

رابطه فوق، ارتباط ساده بین زاویه پیچش (α) و فاصله شعاعی تا محور طولی مخزن (ρ) در هر نقطه را برای پیچش به روش یکسان بودن کشش بیان می کند. مختصات نقاط سازنده پروفیل درپوش (ρ و z) از طریق انتگرال گیری عددی از رابطه زیر به دست می آید:

$$z = -\rho_0 \int_1^{\frac{\rho}{\rho_0}} \frac{(\cos \alpha_0) r^3 dr}{\sqrt{(1-r^2)[(\cos^2 \alpha_0) r^2 (1+r^2) - \sin^2 \alpha_0]}} \quad (5)$$

که ρ_0 و α_0 به ترتیب مقادیر زاویه پیچش روی استوانه و شعاع قسمت استوانه ای هستند.

انتگرال فوق در محل اتصال درپوش با پوسته استوانه ای یعنی $r = \rho/\rho_0 = 1$ در مخرج تابع زیر انتگرال دارای نقطه منفرد است. در این مقاله، انتگرال فوق با استفاده از مقادیر ρ_0 و α_0 که مربوط به قسمت استوانه ای هستند، به روش عددی محاسبه شده است. به این ترتیب برای مقادیر مختلف ρ مقدار z به دست آمده و شکل درپوش مشخص شده است. سپس از رابطه (۴)، مقادیر زاویه پیچش (α) برای هر مقدار فاصله شعاعی از محور مرکزی (ρ) محاسبه شده است. در شکل ۵ هندسه عدسی های ژئودزیک و وابستگی آن به زاویه پیچش الیاف در قسمت استوانه ای نشان داده شده است.

۳- مدل اجزای محدود

برای تحلیل اجزای محدود مخزن از نرم افزار اجزای محدود *ANSYS* استفاده شده است. پوسته کامپوزیتی مخزن به صورت سه بعدی تحلیل و جزء پوسته های نازک محسوب می شود. المان پوسته ای لایه ای خطی *SHELL99* برای تحلیل مورد استفاده قرار گرفته است. به دلیل تغییرات ناگهانی انحنای در محل برخورد استوانه و عدسی، اثر تمرکز تنش در این ناحیه زیاد است. به همین خاطر المان های پوسته در این ناحیه ریزتر از سایر نقاط استوانه در نظر گرفته شده است (شکل ۷).

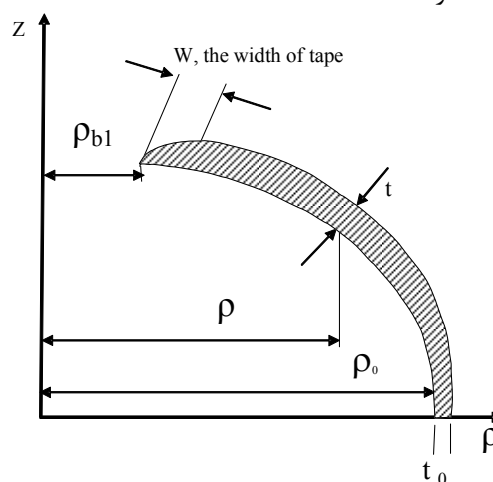
به علت آن که سازه متقارن است، نیمی از آن مدل شده است. البته با توجه به تقارن محوری برش های متفاوتی را می توان برای مخزن در نظر گرفت (مثل برش زدن و تحلیل یک چهارم مخزن). دلیل نصف کردن مخزن به صورت عرضی آنست که تعداد شرایط مرزی روی مدل پایین بیاید، چون تعداد زیاد شرایط مرزی ممکن است در جوابها تأثیر نامطلوب بگذارد [۱۴]. مقطع دایره ای شکل در وسط استوانه در جهت طولی و لبه دهنه (گشودگی) واقع در انتهای عدسی در جهات مماسی و شعاعی مقید می شوند. محدود نمودن مقطع دایره ای وسط مخزن به خاطر جلوگیری از حرکت انتقالی مخزن صورت می گیرد. مقید نمودن لبه دهنه به خاطر وجود چسبندگی میان رزین الیاف و فلنج فلزی است که در اثر اتصال همزمان این دو هنگام پخت، به وجود می آید [۱۲]. ترتیب چیدمان یک المان، مش بندی اجزای محدود و شرایط مرزی در شکل ۷ نشان داده شده است.

محل اتصال استوانه به درپوش تا گشودگی درپوش، محیط حلقه هایی که الیاف از آن می گذرند، کاهش می یابد. در عین حال تعداد الیافی که از هر کدام از این حلقه ها می گذرند، یکسان است. با توجه به موارد فوق به تدریج از محل اتصال استوانه و درپوش تا گشودگی درپوش ضخامت کامپوزیت افزایش می یابد (شکل ۶). ضخامت لایه کامپوزیتی در هر نقطه از درپوش را می توان از رابطه زیر به دست آورد [۱۲]:

$$t_s = t_{s0} \frac{\rho_0 \cos \alpha_0}{\rho \cos \alpha} \quad (7)$$

که در آن، t_s و t_{s0} به ترتیب ضخامت لایه های مارپیچ روی هر نصفه کلگی و روی استوانه هستند.

علاوه بر موارد فوق، زاویه پیچش الیاف به سطحی که بر روی آن پیچیده می شود، بستگی دارد. در عین حال با هر بار پیچش الیاف بر شعاع سازه افزوده می شود و شکل هندسی آن تغییر می کند. بنابراین زاویه پیچش الیاف در جهت ضخامت تغییر می کند. این تغییر خصوصاً در ناحیه انتهایی مخزن (گشودگی) که ضخامت بیشتر است، محسوس تر است [۱۳]. در این مقاله برای پرهیز از پیچیدگی موضوع، از این اثر صرف نظر شده است.



شکل ۶: ضخامت کامپوزیت متغیر در طول پروفیل عدسی.

که در آن،

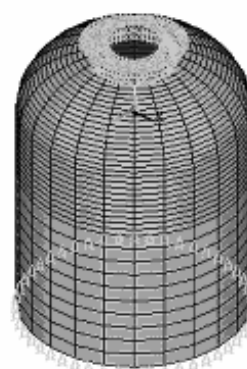
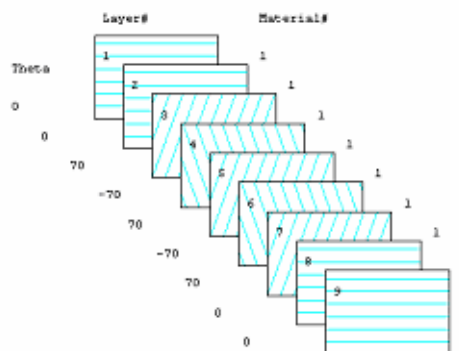
$$A = -\frac{(\sigma_x)^2}{\sigma_{xt}^f \sigma_{xc}^f} - \frac{(\sigma_y)^2}{\sigma_{yt}^f \sigma_{yc}^f} - \frac{(\sigma_z)^2}{\sigma_{zt}^f \sigma_{zc}^f} + \frac{(\sigma_{xy})^2}{(\sigma_{xy}^f)^2} + \frac{(\sigma_{yz})^2}{(\sigma_{yz}^f)^2} + \frac{(\sigma_{xz})^2}{(\sigma_{xz}^f)^2} + \frac{C_{xy} \sigma_x \sigma_y}{\sqrt{\sigma_{xt}^f \sigma_{xc}^f \sigma_{yt}^f \sigma_{yc}^f}} + \frac{C_{yz} \sigma_y \sigma_z}{\sqrt{\sigma_{yt}^f \sigma_{yc}^f \sigma_{zt}^f \sigma_{zc}^f}} + \frac{C_{xz} \sigma_x \sigma_z}{\sqrt{\sigma_{xt}^f \sigma_{xc}^f \sigma_{zt}^f \sigma_{zc}^f}}$$

$$B = \left[\frac{1}{\sigma_{xt}^f} + \frac{1}{\sigma_{xc}^f} \right] \sigma_x + \left[\frac{1}{\sigma_{yt}^f} + \frac{1}{\sigma_{yc}^f} \right] \sigma_y + \left[\frac{1}{\sigma_{zt}^f} + \frac{1}{\sigma_{zc}^f} \right] \sigma_z$$

ξ_3 مقدار معیار شکست تسای-وو سه بعدی، σ تنش های وارده، σ_t^f استحکام کششی، σ_c^f استحکام فشاری، C_{xy} ، C_{yz} ، C_{xz} ضرایب کوپلینگ^۱ برای تئوری تسای-وو، اندیسهای x ، y و z به ترتیب جهت در راستای الیاف، راستای عمود بر آن در صفحه المان و راستای عمود بر الیاف در خارج از صفحه هستند. نرم افزار به صورت پیش فرض مقدار ۱- را برای ضرایب کوپلینگ در نظر می گیرد [۱۵].

معیارهای هاشین و پاک به صورت مستقیم در *ANSYS* تعریف نشده اند و برای استفاده از آنها نیازمند نوشتن زیربرنامه ای در این نرم افزار است. با توجه به این مسأله معیار تسای-وو در این تحقیق به کار گرفته شده است. همانگونه که در رابطه معیار شکست تسای-وو سه بعدی دیده می شود، برای محاسبه این معیار به مقدار استحکام کامپوزیت در جهات مختلف نیاز است. مشخصات مکانیکی ماده کامپوزیتی به کار رفته در مدل اجزای محدود در جدول ۱ خلاصه شده است.

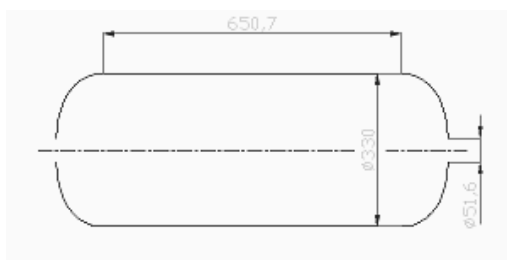
چگالی ماده کامپوزیت به کار رفته برابر 1565 Kg/m^3 در نظر گرفته شده است. همانگونه که قبلاً ذکر شد، x ، راستای الیاف و y و z دو راستای عمود بر راستای x به ترتیب داخل و خارج صفحه چندلایه کامپوزیتی هستند. مشخصات مکانیکی این ماده کامپوزیت که نوعی کربن/اپوکسی به کار رفته در مخازن هوافضا است در مرجع [۱۶] آمده است.



شکل ۷: (بالا) ترتیب چیدمان در المان *SHELL99* (پائین) نحوه مش بندی، شرایط مرزی.

برای پیش بینی شکست در کامپوزیت ها معیارهای شکست متفاوتی مانند معیار شکست تنش بیشینه، کرنش بیشینه، تسای-هیل، تسای-وو، پاک و هاشین را می توان در نظر گرفت. در دو معیار شکست تنش و کرنش بیشینه اثر برهم کنش میان مؤلفه های مختلف تنش و کرنش در نظر گرفته نشده است. در معیار شکست تسای-هیل نیز امکان در نظر گرفتن تفاوت میان مؤلفه های کششی و فشاری استحکام وجود ندارد. در معیار شکست تسای-وو این دو مشکل برطرف شده است. حالت سه بعدی معیار شکست تسای-وو به صورت زیر تعریف می شود [۱۵]:

$$\xi_3 = A + B,$$



شکل ۸: ابعاد مخزن (بر حسب میلیمتر) (در صورتیکه زاویه پیچش ماریپیچ الیاف $\pm 9^\circ$ درجه در ناحیه استوانه ای باشد).

مختصات نقاط به دست آمده برای عدسی ژئودزیک با زاویه پیچش ۹ درجه به صورت نمونه در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲: مختصات به دست آمده برای نقاط پروفیل عدسی ژئودزیک با زاویه پیچش ماریپیچ الیاف $\pm 9^\circ$ درجه.

ب	
E_{xx}	۱۱۰/۳
E_{yy}	۱۵/۲
E_{zz}	۸/۹۷
G_{xy}	۴/۹
G_{xz}	۴/۹
G_{yz}	۳/۲۸
V_{xy}	۰/۲۵
V_{xz}	۰/۲۵
V_{yz}	۰/۳۶۵

الف	
σ_{xt}^f	۱۹۱۸
σ_{xc}^f	۱۵۶۹
σ_{yt}^f	۲۴۷
σ_{yc}^f	۱۲۴۵
σ_{zt}^f	۲۴۷
σ_{zc}^f	۱۲۴۵
σ_{xy}	۶۸/۹
σ_{yz}	۳۴/۵
σ_{xz}	۳۴/۵

جدول ۱: (الف) استحکام (برحسب مگاپاسکال) در راستاهای مختلف برای ماده کامپوزیت- (ب) مدول های الاستیک (بر حسب گیگاپاسکال) و ضرایب پواسون در راستاهای مختلف برای ماده کامپوزیت.

شماره نقطه	$\rho (mm)$	$\zeta (mm)$
۱	۱۶۵	۰
۲	۱۶۴	۱۲/۶
۳	۱۶۱/۲	۲۵
۴	۱۵۶/۴	۳۷
۵	۱۴۹/۶	۴۸/۷
۶	۱۴۰/۷	۵۹/۸
۷	۱۲۹/۲	۷۰/۳
۸	۱۱۵/۲	۷۹/۷
۹	۹۷/۳	۸۸/۱
۱۰	۲۵/۸	۱۰۰/۳

مخزن مورد مطالعه یک مخزن تحت فشار گاز طبیعی با آستر غیرفلزی است. فشار کاری^۱، فشار تست^۲ و فشار ترکیدن^۳ بر اساس استاندارد *ISO11439* [۱۷] به ترتیب ۲۰۰، ۳۰۰ و ۴۷۰ بار است. در مدل اجزای محدود، فشار داخلی یکنواخت ۴۷۰ بار بر سطح مخزن وارد می شود. انتخاب این فشار از میان سه فشار مزبور، به خاطر آنست که اگر در فشار ۲۰۰ یا ۳۰۰ بار مخزن بهینه شود، افزایش اندکی در فشار داخلی مخزن باعث ترکیدن آن خواهد شد. بنابراین فشار ترکیدن کمتر از ۴۷۰ بار خواهد بود. مطابق مرجع [۱۴] قسمت استوانه ای آستر مخزن موردنظر دارای قطر خارجی ۳۳۰ میلی متر و طول ۶۵۰ میلی متر است. شکل عدسی، ژئودزیک انتخاب شده است (شکل ۸).

1-Working Pressure
2-Test Pressure
3-Burst Pressure

تعداد، ضخامت و ترتیب چیدمان لایه ها تبدیل می شود و زوایای پارامترهای گسسته از پیش تعیین شده اند $(90, -\alpha, +\alpha)$. ضخامت تمام لایه ها برابر یک و یا ضریب صحیحی از آن انتخاب می شود. این امر به خاطر آنست که ضخامت دسته الیاف مورد استفاده در ماشین الیاف پیچی برابر یک میلیمتر انتخاب شده است. تعداد لایه ها نماد وزن پوسته کامپوزیتی در نظر گرفته شده است. در اینجا مسئله بهینه سازی به صورت زیر فرمول بندی شده است:

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

subject to: NL = تعداد لایه ها

$$1 \text{ mm} = \text{ضخامت لایه ها}$$

$$90, \alpha, -\alpha = \text{زاویه لایه ها}$$

جدول ۳: زوایای الیاف و ضخامت لایه‌های مارپیچ کامپوزیت برای عدسی ژئودزیک با زاویه پیچش مارپیچ الیاف ± 9 درجه در ناحیه استوانه‌ای.

شماره قسمت	زاویه الیاف (درجه)	ضخامت کامپوزیت (میلیمتر)
۱	۹	۱
۲	۹/۰۶	۱/۰۱
۳	۹/۲۵	۱/۰۳
۴	۹/۶۴	۱/۰۷
۵	۱۰/۲۸	۱/۱۴
۶	۱۰/۲۸	۱/۲۶
۷	۱۲/۷۳	۱/۴۲
۸	۱۵	۱/۶۹
۹	۱۸/۷۴	۲/۱۴
۱۰	۲۵/۷۹	۳/۰۵
۱۱	۴۴/۱۳	۶/۱۰

برای اعمال اثر زاویه الیاف متغیر و ضخامت کامپوزیت متغیر در طول پروفیل عدسی در مدل اجزای محدود، این پروفیل به ده قسمت مساوی تقسیم می شود. سپس مقدار زاویه پیچش الیاف و ضخامت کامپوزیت در نقاط ابتدایی و انتهایی هر قسمت با استفاده از روابط (۶) و (۷) محاسبه و مقدار متوسط آن برای آن قسمت به دست می آید. نمونه این مقادیر برای عدسی ژئودزیک با زاویه پیچش ۹ درجه در جدول ۳ آمده است.

بنابراین کل سطح مخزن تحت فشار کامپوزیتی با استفاده از المان SHELL99 با ۱۱ نوع ثابت حقیقی یعنی با ضخامت و زاویه لایه های متفاوت، مش بندی می شود (از این ۱۱ ثابت، ۱۰ عدد مربوط به قسمت عدسی و یک عدد مربوط به قسمت استوانه ای است). در تحلیل اجزای محدود از اثر آستر غیرفلزی صرف نظر شده است. این مسأله به خاطر آنست که آستر غیر فلزی عملاً نقشی در تحمل بار ندارد و نقش اصلی آن جلوگیری از نشت گاز است.

۴- بهینه سازی وزن مخزن

در حالت کلی برای یافتن ترتیب چیدمان چند لایه که در بارگذاری موردنظر بهترین حالت باشد، تعداد لایه ها، جهت قرار گرفتن و ضخامت آنها باید به عنوان متغیرهای طراحی استفاده شوند. در واقع، در بعضی از الگوریتم های طراحی، هر سه پارامتر به عنوان متغیر طراحی در نظر گرفته می شود. برای مسائل بهینه سازی که برای کمینه شدن وزن طراحی رابطه سازی شده اند، تابع هدف مستقل از جهت لایه هاست. بدین سبب در همگرایی به جواب بهینه در بعضی از الگوریتم ها، ممکن است مشکلاتی ایجاد شود. یک گزینه جایگزین برای تابع هدف کمینه سازی وزن، بیشینه سازی مقاومت لایه ها است [۱۸].

به خاطر وابسته بودن شکل عدسی ژئودزیک به زاویه پیچش و قطر دهنه، لازم است برای هر زاویه پیچش، مدلی با شکل عدسی خاص، ایجاد و تحلیل روی آن انجام شود. در نتیجه مسأله بهینه سازی وزنی مخزن تحت فشار الیاف پیچی شده به روش کشش یکسان، به مسأله بهینه سازی

ها، راه حل به صورت آماری و با نمونه برداری اتفاقی از فضای طرح، یافت می شود، بنابراین بسیار قوی و در عین حال دارای هزینه محاسباتی بالایی هستند. به عبارت دیگر، راندمان طراحی در آنها نسبتاً پایین است. در این مقاله از روش الگوریتم ژنتیک در بهینه سازی مخازن نوع ۴ استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک یک روش جستجو بر پایه مکانیسم انتخاب طبیعی و ژنتیک است. این روش تکامل طبیعی را شبیه سازی می کند. بنابراین نقاط طراحی متعدد برای رسیدن به یک بهینه کلی متکامل می شوند. مفیدترین مزیت الگوریتم ژنتیک آنست که به طور طبیعی متغیرهای طراحی گسسته را به کار می برد. بنابراین کاربرد متغیرهای گسسته در الگوریتم ژنتیک ساده است. الگوریتم ژنتیک شامل سه عملیات کلی است: ارزیابی تابع، انتخاب و تولید مجدد. تقاطع و جهش، دو عملگر اصلی هستند که در روند تولید مجدد به کار می روند. الگوریتم ژنتیک در چهار مورد از سایر روش های بهینه سازی و روندهای جستجو متمایز می شود: ۱- این الگوریتم با کدگذاری یک مجموعه پارامتر کار می کند و نه با خود پارامترها. ۲- جستجو در جمعیتی از نقاط صورت می گیرد و نه یک نقطه تنها. ۳- این روش یک تابع هدف به کار می برد و نه مشتقات و یا سایر معلومات کمکی. ۴- همچنین این روش قوانین احتمالاتی را به کار می برد و نه قوانین معین را [۱۹].

بنابراین الگوریتم ژنتیک یک روش طراحی بهینه قوی و مورد اعتماد است. در مرجع [۲۰] به تفصیل در مورد این الگوریتم بحث شده است.

روند کلی بهینه سازی به این ترتیب است که برای تعداد لایه های مختلف بهینه سازی ترتیب چیدمان با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام می شود. برای هر تعداد لایه، ترتیب چیدمانی که مقدار معیار شکست تسای-وو در آن کمترین مقدار است، به کمک الگوریتم ژنتیک انتخاب خواهد شد. تعداد لایه های اولیه با استفاده از روش های تقریبی و سریع مانند تئوری شبکه ای به دست می آید. این روش به تفصیل در مرجع [۱۲] آمده است. در صورتیکه معیار شکست برای این تعداد لایه مشخص بیشتر از یک

در روابط بالا، DV مجموعه متغیرهای طراحی یعنی ترتیب چیدمان زوایا، LN شماره لایه با ماکزیمم معیار شکست و S مکان رخ دادن ماکزیمم معیار شکست در طول یال مخزن است. در بیشتر روشهای بهینه سازی، فرض بر این است که متغیرهای طراحی، متغیرهایی پیوسته هستند. البته در دنیای واقعی، در بسیاری از مسائل مهندسی متغیرهای طراحی از نوع گسسته هستند. به عنوان مثال تعداد لایه ها و زاویه آنها در ترتیب چیدمان پوسته کامپوزیتی مخزن نوع ۴ متغیرهای گسسته اند. روش های طراحی بهینه گسسته غیرخطی، به سه شاخه تقسیم می شوند: روش شاخه و کران^۱، روش تقریب^۲ و روش های با خطای زیاد^۳ [۱۹].

روش های شاخه و کران برای حل مسائل برنامه ریزی خطی محدب ایجاد شده اند. اما بسیاری از محققین، این روش را بر مسائل برنامه ریزی غیر خطی اعمال نموده اند. این روش به صورت تئوری برای مسائل محدب مناسب است. محدودیت های این روش شامل هزینه محاسباتی بالا و مشکلات عددی در ارتباط با دقت روش های حل برنامه ریزی غیر خطی است. بنابراین در صورت افزایش متغیرهای طراحی، هزینه محاسباتی به صورت نمایی افزایش می یابد [۱۹]. بنابراین روش های شاخه و کران اساساً برای ارزیابی روش های طراحی دیگر و یا در ارتباط با روش تقریب به کار می رود. روش تقریب، ابتدا مسأله غیرخطی پیوسته را حل کرده و سپس روش شاخه و کران را بر مسئله تقریبی به جای مسأله غیر خطی اصلی اعمال می کند. این روش، مزیت هزینه محاسباتی پایین و محدودیت عدم توانایی در تضمین رسیدن به جواب بهینه کلی را دارد. نتیجه آنست که قابلیت بهینه سازی متغیرهای گسسته با استفاده از روش های تقریب، وجود دارد ولی کاربر باید مراقب محدودیت ها نیز باشد.

روش های خاصی برای مسائل طراحی بهینه گسسته قابل استفاده اند. روش الگوریتم ژنتیک و مونته کارلو (سرد شدن تدریجی) در این دسته روشها قرار دارند. در این روش

1-Branch and Bound Method (BBM)
2-Approximation Method
3-Ad Hoc Methods

این ترتیب که هر دو عدد نشان دهنده یک زاویه هستند. طبق قرارداد، ترتیب های مختلف صفر و یک به صورت زیر ترجمه می شوند:

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

به عنوان مثال ترتیب چیدمان زوایا برای یک چند لایه کامپوزیتی شامل نه لایه به صورت دودویی نمایش داده می شود:

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

این ترتیب چیدمان برای اعمال در کد اجزای محدود به صورت زیر ترجمه می شود (زاویه ۹۰ درجه و ۹۰- درجه برای الیاف به یک معنی است):

$$[-9,90,90,9,-9,9,90,9].$$

بنابراین، متغیرهای طراحی که پس از هر بار اجرای الگوریتم ژنتیک به دست می آیند، به صورت دودویی تعریف می شوند. مقادیر صفر و یک حاصل در فرزندان نیز به صورت زاویه الیاف در ترتیب چیدمان برای ANSYS ترجمه می شوند. در مواردی که نیاز به اعمال قیودی بر روی ترتیب چیدمان باشد، مثلاً اگر نیاز باشد که ترتیب چیدمان زوایای α و $\alpha -$ به صورت یک در میان باشند، از روش تابع جریمه استفاده می شود. معنی این مسأله آن است که اگر در روند تولید افراد جمعیت ها در الگوریتم ژنتیک، فردی به وجود آمد که شرط مذکور در آن رعایت نشده بود، قبل از اجرای حل اجزای محدود، مقدار تابع هدف (معیار شکست) بسیار بزرگی برای آن اعمال می شود. این امر باعث می شود که آن فرد یا افراد در روند تولید جمعیت های بعدی خود به خود حذف شوند.

جواب حاصل از اجرای کد اجزای محدود، مقدار ماکزیمم معیار شکست تسای-وو در میان تمام المان ها و لایه های مخزن کامپوزیتی است، که به عنوان تابع هدف برای کمینه کردن در نظر گرفته می شود. ارتباط حل گر اجزای محدود با برنامه الگوریتم ژنتیک در شکل ۹ نشان داده شده است.

باشد، تعداد لایه ها یکی بیشتر می شود، اما اگر معیار شکست برای آن تعداد لایه کمتر از یک باشد، تعداد لایه ها یکی کم می شود. در تعداد لایه های جدید مجدداً کار بهینه سازی ترتیب چیدمان صورت می گیرد. این کار تا جایی ادامه می یابد که به کمترین تعداد لایه هایی برسیم که معیار شکست آن زیر یک باشد.

همانطور که در مرجع [۱۹] ذکر شده است، متغیرهای طراحی را می توان به دو گروه تقسیم نمود. در گروه اول رفتار سازه ای خطی و قابل پیش بینی است. تعداد لایه ها در این گروه قرار دارد. در گروه دوم رفتار سازه ای، غیر خطی و غیر قابل پیش بینی است. زوایای پیچش در این گروه قرار دارند. البته در کار ما زوایا به مقادیر گسسته از پیش تعیین شده ای محدود شده اند و ترتیب چیدمان بهینه آنها مورد نظر است. در مرجع [۱۹] این دو گروه متغیرها جدا شده اند و عملگرهای الگوریتم به صورت جداگانه بر روی آنها اعمال شده است.

به عبارت دیگر جدا سازی دو متغیر و انجام بهینه سازی در دو مرحله، به علت یکسان نبودن وزن و تأثیر تعداد لایه ها و ترتیب چیدمان در مقدار وزن و معیار شکست است. این کار کمک شایانی به رهایی الگوریتم از افتادن در دام بهینه های محلی، می کند و به این ترتیب الگوریتم و سریع تر به جواب می رسد. در عین حال روش تکراری ارائه شده در این مقاله برای یافتن تعداد لایه ها روشی ساده است که در آن به راحتی می توان اثر تعداد لایه ها را در طراحی مشاهده نمود.

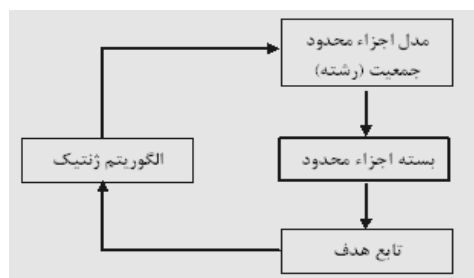
متغیرهای طراحی در مسأله بهینه سازی ترتیب چیدمان که همان زوایای پیچش الیاف هستند، متغیرهای گسسته هستند. همانگونه که قبلاً ذکر شد، اگر به عنوان مثال زاویه پیچش مارپیچ ± 9 در نظر گرفته شود و شکل عدسی ژئودزیک نیز بر اساس آن ایجاد شود، این زوایا به مقادیر $+9$ ، -9 و 90 درجه محدود می شوند. برای اعمال این گسستگی در مسئله و جلوگیری از اعمال مقادیر دیگر برای این زوایا، از رشته های دودویی یعنی فقط شامل صفر و یک برای نشان دادن ترتیب چیدمان زوایا استفاده شده است. به

لایه ای در جدول نشان داده شده است. بنابراین سبک ترین پوسته کامپوزیتی دارای ۹ لایه در قسمت استوانه ای است. از این ۹ لایه چهار لایه ماریپیچی و پنج تا محیطی است.

جدول ۴ - ترتیب چیدمان بهینه برای مخزن کامپوزیتی با زوایای پیچش الیاف +۹، -۹ و ۹۰ درجه.

تعداد لایه ها	ترتیب چیدمان بهینه	مقدار ماکزیم معیار شکست تسای-وو	وزن پوسته کامپوزیتی (کیلوگرم)
۸	[90,9,-9,90,90,-9,9,90]	۱/۱۴۵	۵/۹۷۷
۹	[90,9,-9,90,9,-9,90,9,90]	۰/۹۵۵	۶/۸۳۳
۱۰	9,-9,90,90,9,90,9,-9,90,90]	۰/۸۱۴	۷/۳۶۴

شکل ۱۰ مقدار معیار شکست تسای-وو را برای ترتیب چیدمان بهینه پوسته کامپوزیتی با شکل عدسی ژئودزیک و زاویه پیچش ماریپیچی ± 9 درجه نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که مقدار بیشینه معیار شکست تسای-وو که مطابق جدول ۴ برابر ۰/۹۵۵ است، در محل اتصال استوانه به عدسی رخ می دهد و قسمت استوانه ای پس از این محل بیشترین مقدار معیار شکست تسای-وو را دارد.



شکل ۹- نحوه ارتباط الگوریتم ژنتیک با بسته اجزای محدود.

ورودیهای حل گر اجزای محدود متغیرهای طراحی یعنی ترتیب چیدمان زوایای الیاف و خروجی آن تابع هدف یعنی معیار شکست تسای-وو است.

۵- بررسی نتایج

تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک برای رسیدن به جواب های بهتر بر پایه روش سعی و خطا صورت گرفته است. بر این اساس تعداد افراد جمعیت اولیه در الگوریتم ژنتیک برابر ۵۰ انتخاب شده است. تعداد بیشینه نسل ها یا به عبارتی حداکثر تعداد تکرار، برابر ۱۰۰ است. مقدار مجاز تفاوت بین افراد دو نسل متوالی برابر 10^6 انتخاب شده است و در صورتی که تفاوت دو نسل از این مقدار کمتر باشد، الگوریتم متوقف می شود. عملگرهای جهش و تقاطع از نوع دودویی^۱ و منطقی^۲ [۲۰] و تعداد هر یک از آنها در هر مرحله تولید مجدد برابر ۲ انتخاب شده است.

۵-۱- مقایسه بین ترتیب چیدمان چند لایه ای های

مختلف بهینه شده با زاویه پیچش ۹ درجه

جدول ۴ نتایج بهینه سازی ترتیب چیدمان برای پوسته کامپوزیتی با زوایای پیچش ماریپیچ ± 9 درجه را نشان می دهد. بهینه سازی ترتیب چیدمان برای تعداد لایه های مختلف صورت گرفته است. کمترین تعداد لایه ای که معیار شکست آن زیر یک باشد، ۹ لایه ای است. ترتیب چیدمان، مقدار معیار شکست تسای-وو و وزن مربوط به این نه

1-Binary Mutation
2-Arithmetic Crossover

۲-۵- مقایسه بین ترتیب چیدمان نه لایه ای بهینه شده با زوایای پیچش مختلف

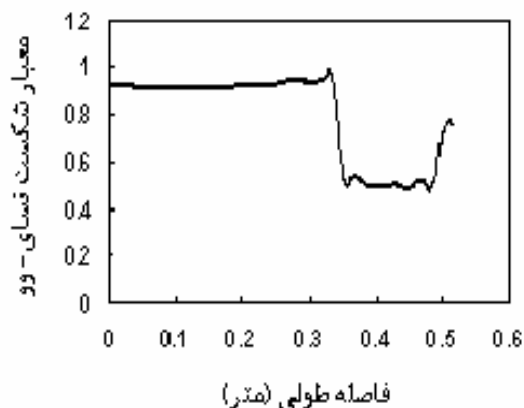
ترتیب چیدمان بهینه برای سه مدل با زوایای پیچش ۹، ۲۰ و ۳۰ درجه همگی با تعداد ۹ لایه در جدول ۵، مقایسه شده‌اند. برای عدسی‌های ژئودزیک با زوایای پیچش متفاوت، با افزایش زاویه پیچش (و قطر دهنه)، مقدار معیار شکست تسای-وو برای ترتیب چیدمان بهینه افزایش می‌یابد.

جدول ۵ - مقایسه ترتیب چیدمان بهینه پوسته کامپوزیتی

برای مخازن با عدسیهای ژئودزیک با زوایای پیچش الیاف مختلف و تعداد ۹ لایه.

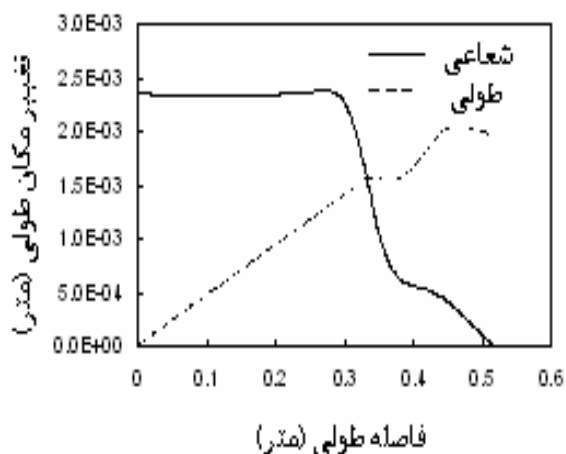
زاویه پیچش الیاف (درجه)	ترتیب چیدمان بهینه لایه ها	معیار شکست تسای-وو کمینه
۹	[90,9, -9,90,9, -9,90,9,90]	۰/۹۵۵
۲۰	[20,90, -20,20,20, -20, -20,20,20]	۶/۸۷۱
۳۰	[90,30, -30,30, -30,30, -30,90,90]	۱۱/۱۰۵

نتایج نشان می‌دهد که برای بهترین ترتیب چیدمان یک لایه ای در زوایای پیچش مارپیچ ۹، ۲۰ و ۳۰ درجه به ترتیب کمترین تا بیشترین مقدار معیار شکست تسای-وو وجود دارد. این مسئله نتایج تحقیقات قبلی [۲۱-۲۲] را تأیید می‌کند. تعداد لایه‌ها در مورد زاویه پیچش ۹ درجه مناسب است و برای ۲۰ و ۳۰ درجه لازم است که تعداد لایه‌ها برای رسیدن به معیار شکست قابل قبول اضافه شود.



شکل ۱۰ - مقدار حداکثر معیار شکست تسای - وو بعد از بهینه سازی برای پوسته کامپوزیتی با عدسی ژئودزیک و زوایای پیچش مارپیچی ۹ درجه.

شکل ۱۱ مقادیر تغییر مکانهای شعاعی و طولی و نحوه تغییرات آن را برای طرح بهینه نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ - مقایسه مقدار تغییر مکان طولی و شعاعی بعد از بهینه سازی برای پوسته کامپوزیتی با عدسی ژئودزیک و زاویه پیچش الیاف ۹، +۹، -۹ و ۹۰ درجه.

گیرند. قید قرار گرفتن لایه های با زوایای $+9^\circ$ و -9° درجه یک در میان به صورت یک تابع جریمه اعمال شده است. این تابع به این صورت اعمال می شود که در صورتی که دو لایه با زاویه $+9^\circ$ درجه پشت سر هم قرار گیرند و یا دو لایه با زاویه -9° درجه، در کنار هم قرار گیرند، یک مقدار بسیار بزرگ برای تابع هدف اعمال می شود. بنابراین برای انتخاب بهترین ترتیب چیدمان، علاوه بر مواردی مثل وزن و استحکام چندلایه لازم است که محدودیت های فرآیند ساخت و تولید نیز به صورت دقیق شناسایی شود و در فرآیند انتخاب منظور شوند.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، طراحی بهینه مخازن الیاف پیچی شده نوع ۴ تحت فشار داخلی صورت گرفته است. الگوریتم طراحی جدیدی بر مبنای مسیر ژئودزیک پیچش الیاف، معیار شکست تسای-وو و الگوریتم ژنتیک ارائه شده است. تنظیم عملگرهای الگوریتم ژنتیک براساس روش سعی و خطا برای رسیدن به جواب های بهتر صورت گرفته است. در نهایت الگوریتم طراحی بهینه بر دو مورد ۹ و ۱۶ لایه ای اعمال شده است. در مقایسه زوایای پیچش مارپیچ مختلف (۹، ۲۰ و 30° درجه) برای ۹ لایه ای، زاویه پیچش 9° درجه به عنوان بهترین زاویه انتخاب شده است. مشاهده می شود که با افزایش زاویه پیچش شرایط بدتری از نظر مقدار معیار شکست رخ می دهد. این مسأله نتایج تحقیقات قبلی را تأیید می کند. شانزده لایه ای های به دست آمده با استفاده از الگوریتم ژنتیک نسبت به پوسته کامپوزیتی مخزن موجود که آنهم شانزده لایه ای است، استحکام بیشتری دارند.

این مسأله نشان دهنده آنست که زاویه پیچش مارپیچ ۹ عملکرد بهتری نسبت به زوایای ۲۰ و 30° درجه ایفا می کند.

۵-۳- مقایسه بین پوسته های ۱۶ لایه ای

مخزن نمونه ای که در دست است، دارای یک پوسته کامپوزیتی ۱۶ لایه ای است. مشخصات ترتیب چیدمان این چندلایه در مقایسه با ۱۶ لایه ای های بهینه در جدول ۶ نشان داده شده است. در این جدول دو نمونه این چند لایه ای ها که از روش الگوریتم ژنتیک به دست آمده است، نشان داده شده است. این دو ترتیب چیدمان از دو فرد در جمعیت نهایی حاصل از یک بار اجرای الگوریتم ژنتیک به دست می آید. یک مزیت الگوریتم ژنتیک این است که به چندین طرح بهینه نزدیک به هم می انجامد و نه به یک بهین [۱۸]. بنابراین طراح می تواند با توجه به ملاحظات طراحی مثلاً اینکه اندکی افزایش وزن برای او مهم تر است یا افزایش استحکام چند لایه ای می تواند در مورد بهترین طرح، تصمیم گیری نماید. همانگونه که از جدول ۶ پیداست، پوسته شماره یک نسبت به ترتیب چیدمان مربوط به مخزن موجود دارای استحکام $1/424$ برابر و وزن $1/0.29$ برابر است. پوسته شماره دو نیز دارای وزنی برابر ترتیب چیدمان مربوط به مخزن موجود و استحکام $1/181$ برابر است.

همانگونه که ذکر شد، فرآیند الیاف پیچی و ساخت می تواند دارای محدودیت هایی باشد که ترتیب چیدمان بهینه را تحت تأثیر قرار می دهد. به عنوان مثال ممکن است لازم باشد که زوایای $+9^\circ$ و -9° درجه یک در میان قرار گیرند و یا به خاطر سادگی فرآیند ساخت، زمانبری کمتر و اقتصادی بودن فرآیند تولید، لایه های با زاویه الیاف 90° درجه به صورت دسته های چندتایی کنار هم قرار گیرند و یا لایه های با زوایای $+9^\circ$ و -9° درجه به صورت گروهی قرار

جدول ۶- مقایسه ترتیب چیدمان ۱۶ لایه ای های مختلف.

مخزن	۱۶ لایه ای شماره ۱	۱۶ لایه ای شماره ۲	۱۶ لایه ای با قید زوایای ۹+ و -۹ یک در میان	۱۶ لایه ای در مخزن موجود [۱۴]
ترتیب چیدمان زاوایای پیچش	[9, 90, 9, -9, -9, 9, -9, -9, 9, 90, 90, 90, 90, 90, 90, -9]	[9, -9, 90, -9, -9, 90, 90, 9, -9, -9, 90, 90, 90, 90, 90, 9]	[9, 90, 90, 9, -9, 90, 9, 90, -9, 90, 9, -9, 9, -9, 90, 90]	[9, -9, 90, 90, 90, 9, -9, 9, -9, 9, -9, 90, 90, 90, 90, 90]
مجموع ضخامت لایه های مارپیچی (برحسب میلیمتر)	۹	۸	۹	۸
مجموع ضخامت لایه های محیطی (برحسب میلیمتر)	۷	۸	۷	۸
وزن پوسته کامپوزیتی (برحسب کیلوگرم)	۱۱/۴۲۰	۱۱/۰۹۴	۱۱/۴۲۰	۱۱/۰۹۴
مقدار ماکزیمم معیار شکست	۰/۵۰۵	۰/۶۰۹	۰/۵۱۷	۰/۷۱۹

مراجع:

- Richard, F. and Perreux, D. "A Reliability Method for Optimization of $[+\theta/-\theta]_n$ Fiber Reinforced Composite pipes.", Reliab. Eng. Syst. Saf., Vol. 68, No. 1, pp. 53-9, 2000.
- Messenger, T., Pyrz, M., Gineste, B., and Chauchot, P. "Optimal Laminations of Thin Underwater Composite Cylindrical Vessels", Compos. Struct., Vol. 58, No. 4, pp. 529-37, 2002.
- Azzam, B.S., Muhammad, M.A.A., Mokhtar, M.O.A., and Kolkailah, F.A. "A Finite Element Presentation of an Optimum Design for the Filament-wound Composite Pressure Vessels", The 40th Int. SAMPE Symposium, pp. 867-80, 1995.
- Kabir, M.Z. "Finite Element Analysis of Composite Pressure Vessels with a Load Sharing Metallic Liner", Compos. Struct., Vol. 49, No. 3, pp. 247-55, 2000.
- Kim, B.S., Kim, B.H., Kim, J.B., and Joe, C.R. "Study on The Development of Composite Pressure Vessels.", Cryogenics, Vol. 38, No. 1, pp. 131-34, 1998.
- Jaunky, N., Knight, N.F., and Ambur, D.R. "Optimal Design of General Stiffened Composite Circular Cylinders for Global Buckling with Strength Constraints.", Compos Struct., Vol. 41, No's. 3-4, pp. 243-52, 1998.

- Genetic Algorithm", *Compos. Struct.*, Vol. 71, No. 1, pp. 16-25, 2005.
20. Goldberg, D.E. "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning and Reading", Addison-Wesley, 1989.
 21. Vafaeseefat, A. and Khani, A. "Head Shape Analysis of Composite Pressure Vessels", The Iranian Society of Mechanical Engineers, The 14th Annual (International) Conf., 2006.
 22. Khani, A., Vafaeseefat, A. "Optimum Head Shape and Winding Angle for Symmetric Composite Pressure Vessels Based on A Multi-level Strategy", The 6th International Conference on Composite Science and Technology, 2007.
 7. Azzam, B.S., Muhammad, M.A.A., Mokhtar, M.O.A., and Kolkailah FA. "A Theoretical and Design Analysis of the Filament-wound Composite Pressure Vessels.", *Sci. Eng. Comp. Materials*, Vol. 4, No. 2, pp. 73-87, 1995.
 8. Krikanov, A.A. "Composite Pressure Vessels with Higher Stiffness.", *Compos. Struct.*, Vol. 48, No's. 1-3, pp. 119-27, 2000.
 9. Tabakov, P.Y. "Multi-dimensional Design Optimization of Laminated Structures, Using an Improved Genetic Algorithm", *Compos. Struct.* Vol. 54, No's. 2-3, pp. 349-54, 2001.
 10. Paranas, L. and Katirchi N. "Design of Fiber-reinforced Composite Pressure Vessels Under Various Loading Conditions", *Compos. Struct.*, Vol. 58, No. 1, pp. 83-95, 2002.
 11. Kim, C.U., Park, J.S., Hong, C.S., and Kim, C.G. "Design of Filament Wound Composite Pressure Tanks Using Finite Element Analysis", American Society for Composites, The 17th Annual Technical Conference, pp. 21-23, 2002.
۱۲. میر محمد صادقی، ع. و نکویی م. "تدوین تکنولوژی طراحی مخازن تحت فشار ساخته شده از مواد مرکب به روش پیچش الیاف"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۷۱.
13. Park, J.S., Hong, C.S., Kim, C.G., and Kim, C.U. "Analysis of Filament Wound Composite Structures, Considering the Change of Winding Angle Through the Thickness Direction", *Compos. Struct.*, Vol. 55, No. 1, pp. 63-71, 2002.
۱۴. رحمان م. "گزارش طراحی مخزن CNG4"، صنایع شهید شاه آبادی، معاونت پلیمر، مدیریت طراحی و ساخت، ۱۳۸۲.
15. ANSYS Release 9.0 Documentation.
 16. Hyer, M.W. "Stress Analysis of Fiber Reinforced Composite", McGraw Hill, 2001.
 17. ISO 11439:2000(E), Gas Cylinders-High Pressure Cylinders for the On-board Storage on Natural Gas as a Fuel for Automotive Vehicles.
۱۸. هفتکه، آر.تی، گوردال، زد، ترجمه ابوالبشری، م.ح. "مبانی بهینه سازی سازه ها"، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۲.
19. Kim, C.U., Hong, C.S., Kim, C.G., and Kim, J.Y. "Optimal Design of Filament Wound Type 3 Tanks Under Internal Pressure, Using a Modified