

تحلیل کمانش سرجنگی کامپوزیتی تحت فشار خارجی و نیروی محوری

جعفر اسکندری جم^{۱*}، مجید حیدری^۲

۱ و ۲ - تهران دانشگاه صنعتی مالک اشتر

(تاریخ وصول: ۸۸/۱۰/۹، تاریخ پذیرش: ۸۹/۱/۱۶)

چکیده

در این تحقیق به تحلیل، ساخت و تست کمانش یک سرجنگی کامپوزیتی، تحت بارهای فشار خارجی و نیروی محوری پرداخته شده است. در ابتدا تغییرات زاویه و ضخامت در طول یال سرجنگی کامپوزیتی تعیین و با توجه به معیارهای به هم ریختگی آرایش الیاف و دور ریز مواد اولیه، طرح بهینه جهت پیشش سرجنگی بدست آمده است. سپس سرجنگی توسط نرم افزار المان محدود، مدل سازی و تحت تحلیل استاتیک و کمانش به روش مقادیر ویژه قرار گرفته و اثرات تغییرات زاویه و ضخامت در طول یال سرجنگی بررسی و زاویه بهینه بدست آمده است. با در نظر گرفتن زاویه بهینه از نظر فرآیند ساخت، سرجنگی کامپوزیتی ساخته شده و سپس با طراحی و ساخت تجهیزات آزمون فشار از بیرون، سرجنگی تحت آزمون قرار گرفته است. نتایج تجربی با نتایج حاصل از مدل المان محدود مورد مقایسه قرار گرفته، تا کارایی این نتایج در پیشگویی رفتار کمانشی سرجنگی کامپوزیتی تعیین گردد.

واژه‌های کلیدی: سرجنگی کامپوزیتی، کمانش، ساخت، روش رشته پیچی، آزمایش.

۱- مقدمه

به صورت نوار یا باند روی یک مندرل چرخان پیچیده می‌شوند. الیاف می‌توانند با زوایای مختلفی نسبت به محور مندرل پیچیده شوند. این روش تولید، دارای کاربردهای وسیع و استراتژیک در صنایع مختلف می‌باشند که از مهمترین آنها می‌توان به تولید مخازن تحت فشار، لوله‌های کامپوزیتی و تقویت بدنه هواپیماها و زیردریایی‌ها اشاره نمود. با توجه به مزایای روش رشته پیچی در مقایسه با سایر روش‌های تولید، برای ساخت سرجنگی کامپوزیتی، این روش انتخاب شده است [۱ و ۲]. سرجنگی‌ها به لحاظ دارا بودن شکل آئرو دینامیکی، معمولاً به شکل مخروط ناقص ساخته می‌شوند. به

در دهه‌های اخیر استفاده از کامپوزیت‌ها در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، صنایع هوافضا و غیره، گسترش زیادی یافته است. از جمله مزیت‌های بارز این گونه مواد که باعث گسترش آنها شده است، می‌توان به مواردی مانند: وزن کم، نسبت استحکام به وزن بالا، عمر طولانی، عایق حرارتی و صوتی، میرایی و کاهش ارتعاشات اشاره نمود. روش رشته پیچی یکی از فرآیندهای بسیار مهم تولید کامپوزیت‌ها با فناوری بالا محسوب می‌شود. این روش از تکنیک‌های قالب باز تولید کامپوزیت می‌باشد، که الیاف

* E-mail: jejam@mail.com

۱- دانشیار

۲- دانشجوی کارشناس ارشد

است. نتایج حاصل از تحلیل و آزمون سرجنگی کامپوزیتی، مقایسه و ارزیابی شده است. از نتایج مهم این تحقیق، فناوری ساخت سرجنگی به روش رشته پیچی می باشد.

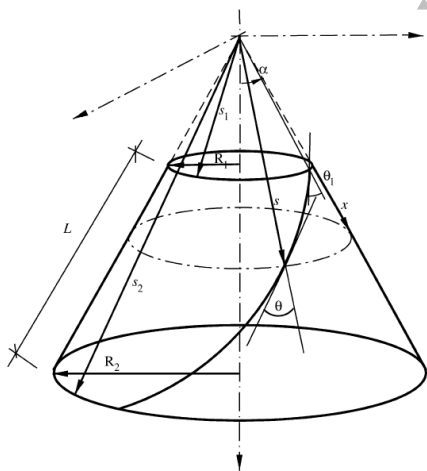
۲- تعریف مسئله و فرمولاسیون ریاضی

با توجه به ساخت سرجنگی کامپوزیتی به روش پیچش الیاف، ضخامت و زاویه سرجنگی کامپوزیتی تولید شده ثابت نمی باشد و در طول الیاف سرجنگی تغییر می نماید. با حرکت از سمت قطر بزرگ به سمت قطر کوچک، ضخامت افزایش و زاویه نسبت به الیاف سرجنگی، کاهش می یابد. در شکل (۱) پارامترهای مورد نیاز برای تعیین ضخامت و زاویه متغیر در هر مقطع برای سرجنگی ساخته شده به روش پیچش الیاف نشان داده شده است. تغییرات زاویه و ضخامت طبق روابط زیر محاسبه می گردند [۱۵].

$$\theta^{(i)}(S) = \arcsin\left(\frac{S_1}{S} \sin \theta_1^{(i)}\right) \quad (1)$$

$$t^{(i)}(S) = t_1^{(i)} \frac{S_1 \cos \theta_1^{(i)}}{S \cos \theta^{(i)}} \quad (2)$$

در معادله فوق $t_1^{(i)}$ ضخامت در سمت قطر کوچک تر سطح مقطع می باشد.



شکل ۱ - پارامترهای مورد نیاز و هندسه سرجنگی [۴].

۲-۱- فرمولاسیون ریاضی

در شکل (۲) یک پوسته مخروطی تحت بار محوری یکنواخت و تحت بار محوری نامتقارن و فشار خارجی نشان داده شده است.

دلیل سرعت بالای این سامانه ها که باعث مقاومت و اصطکاک جریان هوا در برخورد با سطح آنها شده، سازه تحت تاثیر فشار بیرونی، گرما و نیروهای ناشی از اینرسی قرار می گیرد. بنابراین سازه باید توانایی تحمل بارهای وارده را دارا بوده و از همه مهمتر، در مقابل کمانش ناشی از فشار مقاومت کند [۳]. یاماکا رفتار غیر خطی پوسته های استوانه ای را تحت فشار خارجی و اثر نواقص هندسی بررسی نموده است [۴]. هولست و همکاران به مطالعه روش محاسبه تنش پسماند معادل با در نظر گرفتن تاثیرات غیر متجانس کرنش پوسته های ناقص و کامل پرداخته اند [۵]. انسوریان روش طراحی ساده شده، یک پوسته تحت بار باد و با در نظر گرفتن تاثیرات نواقص و قیود مرزی را ارائه داده است [۶]. شن و چن کمانش و رفتار منتج از کمانش پوسته های کامل و ناقص را تحت بار مرکب محوری و فشار خارجی مورد مطالعه قرار داده اند [۷]. آنها نشان دادند، این رفتار به هندسه، بارگذاری و نواقص اولیه بستگی دارد. همچنین گلزانا و شوکتیب روش آزمایشگاهی و مدل المان محدود شش پوسته ناقص مخروطی و چهار نمونه سرپوش را جهت محاسبه پاسخ کمانش الاستیک و پلاستیک و مقایسه آن با نتایج ریاضی و عددی، توسعه داده اند [۸]. سوفیوو و همکارانش ارتفاعات و ثبات مخروط های کامل و ناقص ارتوتروپیک، با بارگذاری یکنواخت عرضی و فشار هیدروستاتیک را با استفاده از روش گلرکین مورد بررسی قرار داده اند [۹]. آنها همچنین تاثیرات پارامترهای مختلفی مانند: تغییرات مدول یانگ، نسبت های هندسی و نسبت های خواص مواد را بر نیروی کمانش مطالعه نموده اند. براون و ناچالس به بهینه سازی پوسته مخروطی چندلایه با متناسب سازی سفتی ها و ضرایب انبساط حرارتی جهت بدست آوردن بیشترین استحکام پرداخته اند [۱۰]. باروخ و همکاران نشان داده اند، به علت هندسه منحصربفرد صفحه مخروطی و با در نظر گرفتن روش های رشته پیچی پوسته های چند لایه، در صنایع، به ضرایب ثابت سفتی نمی توان دست یافت [۱۱ و ۱۲].

اخیراً گلدفلد و آربوکر نیروی کمانش پوسته های مخروطی چندلایه را با در نظر گرفتن تغییرات ضرایب سفتی بررسی نموده اند [۱۳]. گلدفلد و همکارانش بهینه سازی آرایش تک لایه ها در پوسته های مخروطی چند لایه رشته پیچی شده با شرط ماکزیمم نیروی کمانش را بررسی نموده اند [۱۴]. نیروی دقیق کمانش را با استفاده از نرم افزار (STAGS-A) محاسبه نموده و مسئله بهینه سازی با استفاده از روش پاسخ سطح را حل نمودند.

در این مقاله تحلیل، ساخت و مطالعه تجربی سرجنگی کامپوزیتی که قادر به تحمل فشار محیطی و نیروی محوری مشخص باشد، مورد بررسی قرار گرفته

۲-۲- برآیند تنش و روابط کرنش

با استفاده از قانون هوک، برآیند نیرو لایه ارتوتروپیک با استفاده از $\{\sigma\} = [Q^*] \{\epsilon\}$ و با فرض ضخامت $\{N\} = \{\sigma\}t$ به صورت زیر

بدست می‌آیند [۱۶]:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_\phi \\ N_{x\phi} \\ M_x \\ M_\phi \\ M_{x\phi} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{11} & D_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{21} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_\phi \\ 2\epsilon_{x\phi} \\ \chi_x \\ \chi_\phi \\ 2\chi_{x\phi} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

ماتریس‌های سختی A_{ij} و D_{ij} ($i, j = 1, 2, 6$) برای لایه ارتوتروپیک با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} A_{11} &= \frac{E_x t}{1 - \nu_{x\phi} \nu_{\phi x}} & A_{12} &= \frac{\nu_{\phi x} E_x t}{1 - \nu_{x\phi} \nu_{\phi x}} \\ A_{21} &= \frac{\nu_{x\phi} E_\phi t}{1 - \nu_{x\phi} \nu_{\phi x}} & A_{22} &= \frac{E_\phi t}{1 - \nu_{x\phi} \nu_{\phi x}} \\ A_{66} &= G_{x\phi} t \\ D_{11} &= \frac{E_x t^3}{12(1 - \nu_{x\phi} \nu_{\phi x})} & D_{12} &= \frac{\nu_{\phi x} E_x t^3}{12(1 - \nu_{x\phi} \nu_{\phi x})} \\ D_{21} &= \frac{\nu_{x\phi} E_\phi t^3}{12(1 - \nu_{x\phi} \nu_{\phi x})} & D_{22} &= \frac{E_\phi t^3}{12(1 - \nu_{x\phi} \nu_{\phi x})} \\ D_{66} &= \frac{G_{x\phi} t^3}{12} \end{aligned} \quad (10)$$

در معادلات فوق t ضخامت پوسته می‌باشد.

پوسته مخروطی تحت بار فشاری محوری بر واحد عرض P_a ، فشار خارجی q و گشتاور خمشی M_a قرار دارد. لذا:

$$N_x = P_a + P_b \cos \phi \quad (11)$$

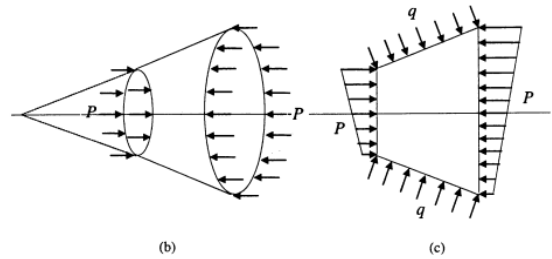
همچنین داریم:

$$P_b = \frac{M_a}{\pi R^2(x)} \quad (12)$$

تحت چنین بارگذاری خواهیم داشت:

$$N_{x0} = \frac{P + 2q\pi(R_0 + x \sin \alpha)x \sin \alpha}{2\pi R(x) \cos \alpha} + \frac{M_a}{\pi R^2(x) \cos \alpha} \cos \phi \quad (13)$$

$$N_{\phi 0} = \frac{qR(x)}{\cos \alpha}$$



شکل ۲ - پوسته مخروطی (a) تحت بار محوری یکنواخت (b) تحت بار محوری نامتقارن و فشار خارجی [۱۶].

در شکل (۳) المان پوسته مخروطی تحت برآیند نیرو و تحت برآیند گشتاور و برآیند نیروی برشی نشان داده شده است. تغییرات کرنش و انحناء در سطح میانی پوسته مخروطی با استفاده از روابط زیر تشریح می‌گردد [۱۶]:

$$\epsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 \quad (3)$$

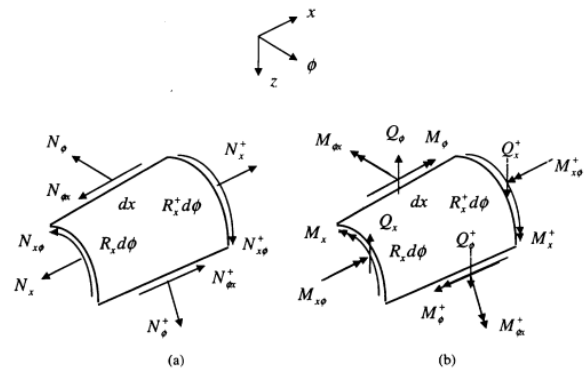
$$\epsilon_\phi = \frac{U \sin \alpha - W \cos \alpha}{R(x)} + \frac{1}{R(x)} \frac{\partial V}{\partial \phi} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R(x)} \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2 \quad (4)$$

$$\gamma_{x\phi} = 2\epsilon_{x\phi} = \frac{1}{R(x)} \frac{\partial U}{\partial \phi} - \frac{V \sin \alpha}{R(x)} + \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{R(x)} \frac{\partial W}{\partial x} \frac{\partial W}{\partial \phi} \quad (5)$$

$$\chi_x = -\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \quad (6)$$

$$\chi_\phi = -\frac{\sin \alpha}{R(x)} \frac{\partial W}{\partial x} - \frac{1}{R^2(x)} \frac{\partial^2 W}{\partial \phi^2} \quad (7)$$

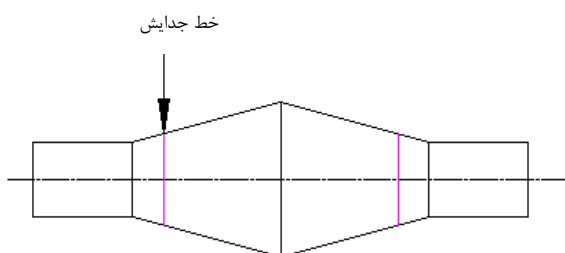
$$\chi_{x\phi} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{R(x)} \frac{\partial W}{\partial \phi} \right) \quad (8)$$



شکل ۳ - المان پوسته مخروطی (a) تحت برآیند نیرو (b) تحت برآیند گشتاور و برآیند نیروی برشی [۱۶].

مندرل دوقلو با قسمت استوانه‌ای اضافی در ناحیه قطر کوچک

با مشکلات مشاهده گردیده در طرح‌های قبلی و عدم رضایت از نمونه‌های تولیدی، مندرل دوقلو با قسمت استوانه‌ای اضافی در ناحیه قطر کوچک مطابق شکل (۴) طراحی و ساخته شده است. نمونه‌های ساخته شده با این نوع مندرل کاملاً بی‌عیب و نقص می‌باشند. برای اطمینان از عدم آشفستگی آرایش الیاف در ناحیه قطر کوچک سرچنگی، طول نمونه‌ها بلندتر و قطعه از محل مشخص شده در شکل (۴) برش داده شده‌است.



شکل ۴ - مندرل دوقلو با قسمت استوانه‌ای اضافی در ناحیه قطر کوچک.

با بررسی طرح‌های مختلف مندرل و با توجه به اینکه طرح مندرل دوقلو با قسمت استوانه‌ای اضافی (شکل ۴) دارای کمترین به هم ریختگی آرایش الیاف و دور ریز مواد اولیه بوده این طرح جهت ساخت انتخاب و مندرل آن با استفاده از لوله و گچ تهیه گردید. روی لوله با استفاده از گچ به شکل مخروط ساخته شده است.

پس از ماشین‌کاری بر روی مندرل با استفاده از پارچه داکرون پوشیده و سپس عملیات رشته‌پیچی انجام گردیده است. برای پیچش سرچنگی کامپوزیتی از دستگاه پیچش الیاف با سه درجه آزادی استفاده شده است. زاویه پیچش در قسمت قطر کوچک سرچنگی نسبت به یال، چهل درجه می‌باشد. تعداد لایه‌های پیچیده شده چهار لایه منفرد، معادل دو لایه $\pm\alpha$ است. ضخامت سرچنگی در قسمت قطر کوچک چهار میلی‌متر است. برای اجرای رژیم پخت، نمونه پیچیده از کوره الکتریکی با دمای قابل کنترل استفاده شده است. رژیم پخت نمونه‌ها یک روز در دمای محیط (۲۵ درجه سانتیگراد) و ۱۵ ساعت در دمای ۵۰ درجه سانتیگراد بوده است.

در معادلات فوق $N_{x0}, N_{\phi 0}$ نیروهای غشایی بر واحد عرض در حالت بحرانی می‌باشند.

برای کمانش پوسته مخروطی تحت فشار و خمش محوری با استفاده از تئوری پوسته نازک دانل و اصل مینیمم انرژی پتانسیل کلی، خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + (N_x - N_\phi) \frac{\sin \alpha}{R(x)} + \frac{1}{R(x)} \frac{\partial N_{x\phi}}{\partial \phi} &= 0 \\ \frac{\partial N_{x\phi}}{\partial x} + \frac{2 \sin \alpha}{R(x)} N_{x\phi} + \frac{1}{R(x)} \frac{\partial N_\phi}{\partial \phi} &= 0 \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} [R(x)M_x] - \sin \alpha \frac{\partial M_\phi}{\partial x} + \frac{1}{R(x)} \frac{\partial^2 M_\phi}{\partial \phi^2} &+ \\ \frac{2}{R(x)} \frac{\partial^2}{\partial x \partial \phi} [R(x)M_{x\phi}] + \cos \alpha N_\phi + \\ \frac{1}{R(x)} \frac{\partial}{\partial x} [N_{x0}R(x)] \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{1}{R^2(x)} \frac{\partial}{\partial \phi} [N_{\phi 0}R(x)] \frac{\partial W}{\partial \phi} &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

۳- آزمون تجربی

۳-۱- مواد

رزین مورد استفاده از نوع اپوکسی با کد 5052 شرکت هانتزمن^۱ و الیاف تقویت‌کننده از نوع E-Glass است. مشخصه‌های مکانیکی کامپوزیت شیشه-اپوکسی در جدول (۱) ارائه گردیده‌اند.

جدول ۱ - خواص مکانیکی کامپوزیت شیشه-اپوکسی [۱۵].

E_{11} GPa	E_{22} GPa	E_{33} GPa	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	$G_{12} = G_{13}$ GPa	G_{23} GPa
۴۵	۱۲	۱۲	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۳	۴/۴	۱
σ_1^T MPa	σ_1^C MPa	σ_2^T MPa	σ_2^C MPa	σ_3^T MPa	σ_3^C MPa	$\tau_{12} = \tau_{13}$ MPa	τ_{23} MPa
۱۰۰۰	۵۵۰	۳۴	۱۴۰	۳۴	۱۴۰	۴۰	۴۰

۳-۲- روش ساخت نمونه

برای ساخت سرچنگی کامپوزیتی نیاز به مندرل می‌باشد، روند انتخاب طرح بهینه در ادامه تشریح گردیده است.

۳-۳- تجهیزات آزمایش

برای انجام آزمون سرچنگی تحت فشار هیدرواستاتیک، مطابق شکل (۵) تجهیزات آزمون طراحی و ساخته شده است. تجهیزات بکار رفته در آزمون عبارتند از:

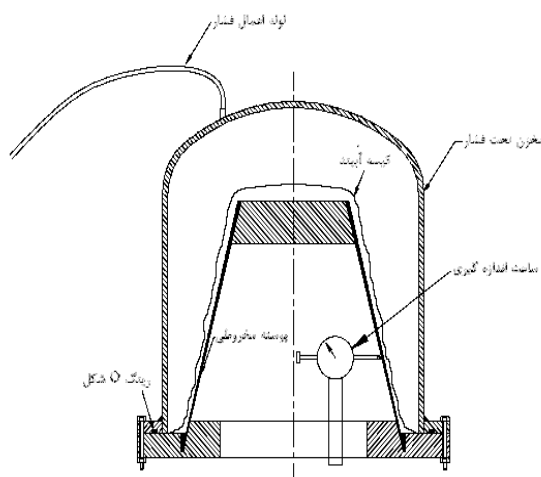
- ۱- مخزن تحت فشار فلزی که قادر به تحمل فشار ده بار باشد
- ۲- کیسه آببندی از جنس لاستیک سیلیکون
- ۳- اورینگ با قطر مقطع ده میلیمتر برای آببندی درب فلنج
- ۴- فلنج جوشکاری شده روی مخزن
- ۵- فلنج‌های مورد استفاده برای نصب سرچنگی
- ۶- ساعت اندازه‌گیری
- ۷- چسب سیلیکونی
- ۸- ستر فشار با قابلیت کنترل نرخ تغییرات فشار
- ۹- گیج فشار با دقت ۰/۱ بار
- ۱۰- کرنش‌سنج

۳-۴- روش آزمایش

زاویه بهینه ساخت با توجه به شرایط و محدودیت‌های تجهیزات ساخت، ۴۰ درجه می‌باشد، لذا نمونه با زاویه الیاف ۴۰ درجه مانند شکل (۶) پیچیده شده است. پس از پیچش و پخت سرچنگی کامپوزیتی، مندرل از آن خارج، و ناحیه قطر بالا و پایین سرچنگی ماشین‌کاری گردیده است. سرچنگی با استفاده از چسب اپوکسی به رینگ‌های بالا و پایین چسبانده شده است. در ادامه کیسه آببندی که از قبل آماده گردیده، بر روی سرچنگی کشیده شده و در نهایت با قرار دادن اورینگ و بستن پیچ‌های مربوطه، قطعه آماده تست می‌گردد. از محلی که شیلنگ اعمال فشار بسته شده داخل مخزن را با آب، پر و سپس شیلنگ اعمال فشار بسته شده و یک یا دو عدد ساعت اندازه‌گیری در داخل سرچنگی و حدود ده سانتیمتر بالاتر از کف فلنج پایینی نصب می‌گردد. فشار با نرخ تغییرات ثابت حداکثر ۰/۵ بار بر دقیقه افزایش و در هر ۰/۲ بار افزایش فشار، تغییرات ساعت اندازه‌گیری ثبت گردیده است.



(b)



(a)

شکل ۵ - تجهیزات انجام آزمون

(a) شکل شماتیک (b) نمونه ساخته شده به همراه تجهیزات آزمون فشار.



(b)



(a)

شکل ۶ - مندرل دوقلو با قسمت استوانه‌ای اضافی در ناحیه قطر کوچک (a) در زمان پیچش (b) اتمام پیچش.

سرچنگی همه درجات آزادی انتقالی گره‌ها (U, V, W) و در قسمت قطر کوچک سرچنگی نیز به جز در راستای محور، دیگر درجات آزادی بسته شده است. فشار (bar) ۴، بر روی سطوح بیرونی سرچنگی اعمال شده است.

جدول ۲ - تغییرات زاویه و ضخامت در مدل ده قسمتی.

موقعیت	زاویه مدل (ده قسمتی (درجه)	ضخامت مدل (ده قسمتی (میلیمتر)
۱	۴۹/۰۴	۱
۲	۵۲/۱۰	۰/۸۹۷
۳	۵۴/۶۹	۰/۸۱۶
۴	۵۶/۹۲	۰/۷۵۰
۵	۵۸/۸۷	۰/۶۹۶
۶	۶۰/۵۹	۰/۶۴۹
۷	۶۲/۱۳	۰/۶۰۹
۸	۶۳/۵۰	۰/۵۷۴
۹	۶۴/۷۴	۰/۵۴۴
۱۰	۶۵/۸۷	۰/۵۱۶

۵- نتایج و بحث

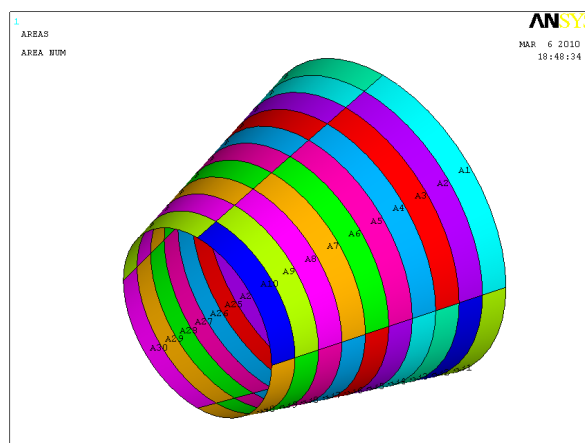
۵-۱- نتایج حاصل از تحلیل المان محدود

پس از انجام مدل‌سازی و تحلیل استاتیکی و کمانش سرچنگی کامپوزیتی، برای تعیین زاویه بهینه پیچش، زاویه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. ضخامت در قطر کوچک سرچنگی چهار میلی‌متر و تعداد لایه‌ها دو تا $\pm\alpha$ معادل چهار لایه منفرد در نظر گرفته شده است. زاویه‌های در نظر گرفته شده مربوط به قسمت قطر کوچک سرچنگی می‌باشند. زاویه‌های در نظر گرفته شده در هر مرحله نسبت به مرحله قبل ده درجه افزایش یافته و

۴- مدل المان محدود

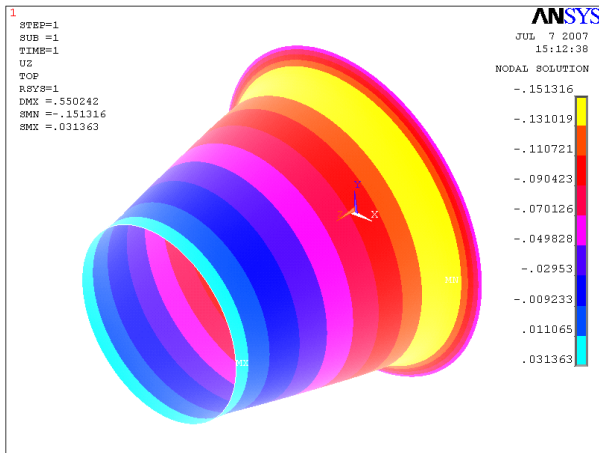
برای آنکه بتوان با نرم‌افزار اجزای محدود، تغییرات زاویه و ضخامت را در طول یال مدل نمود، سطح سرچنگی به ده قسمت تقسیم و با توجه به روابط (۱) و (۲) برای هر یک از این قسمت‌ها، یک زاویه و یک ضخامت ثابت و مشخص در نظر گرفته شده است.

شکل (۷) ده قسمت تولید شده را نشان می‌دهد. در جدول (۲) تغییرات زاویه و ضخامت برای ده قسمت تولید شده، نشان داده شده است.



شکل ۷ - تبدیل هندسه سرچنگی به ده قسمت.

برای شبکه‌بندی مدل المان محدود در نرم‌افزار ANSYS از المان shell99 که یک المان کامپوزیتی می‌باشد، استفاده شده است. در قسمت قطر بزرگ



شکل ۱۰ - تغییر شکل سرچنگی کامپوزیتی در راستای محوری.

همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده، حداکثر مقدار معیار شکست بر اساس معیار سای و ۰/۳۵۶ می‌باشد، که تا مرز شکست سازه، یعنی تا رسیدن به عدد یک، ضریب اطمینان حدود سه بوده و سازه از نظر استاتیکی پایدار است. در نتیجه سرچنگی باید از نظر کماتش بررسی گردد، زیرا نتایج حاصل از تحلیل استاتیک نمی‌تواند مبنا قرار گیرد.

۵-۳- نتایج تحلیل کماتش

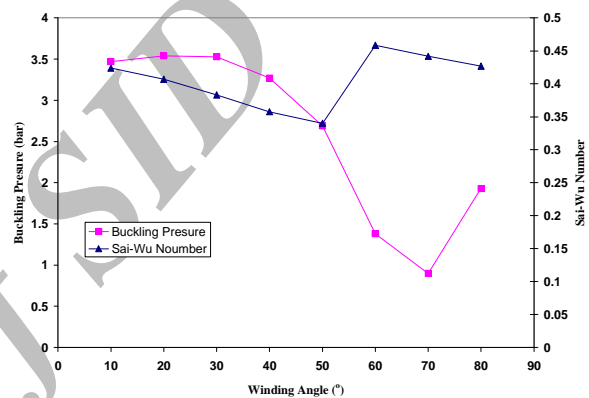
پس از مدل‌سازی و حل کماتش سرچنگی کامپوزیتی توسط نرم‌افزار المان محدود نتایج زیر حاصل گردید. «نسبت بار سازه به بار کماتش» و فشار کماتش برای پنج مود اول کماتش در جدول (۳) نشان داده شده است. نسبت بار کماتش به بار سازه را ضریب فشار کماتش می‌نامند.

جدول ۳ - ضریب فشار کماتشی و فشار کماتش برای پنج مود اول کماتش.

ردیف	مودهای کماتش	ضریب فشار کماتش	فشار کماتش (bar)
۱	۱	۰/۹۴۸۸	۳/۸
۲	۲	۰/۹۴۸۸	۳/۸
۳	۳	۰/۹۶۸۵	۳/۸۷
۴	۴	۰/۹۶۸۵	۳/۸۷
۵	۵	۰/۹۷۷۸	۳/۹

همان‌طور که مشاهده می‌شود اولین مد، کمترین «نسبت بار سازه به بار کماتش» را نشان می‌دهد، که در نتیجه بحرانی‌ترین مقدار را دارا می‌باشد. بار کماتش از حاصل ضرب عدد مذکور (۰/۹۴۸۸) در این مثال) در بار اعمالی به

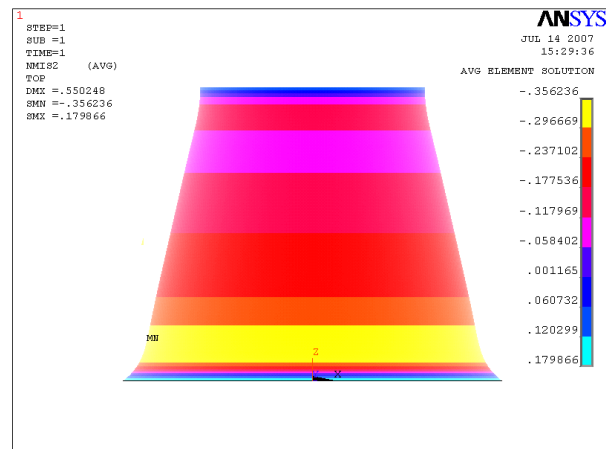
نتایج حاصل از این تحلیل در شکل (۸) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌گردد، با افزایش زاویه پیچش تا ۵۰ درجه، معیار شکست کاهش می‌یابد، که به مفهوم افزایش ضریب اطمینان از نظر استاتیکی می‌باشد. از نظر کماتش با افزایش زاویه پیچش، فشار کماتش در ابتدا به مقدار بسیار کمی افزایش یافته ولی در ادامه روند نزولی پیدا می‌کند. با توجه به شکل (۸) مشخص می‌گردد که از نظر استاتیکی زاویه پیچش بهینه ۵۰ درجه و از نظر کماتش ۷۰ درجه می‌باشد. در صورتی که هر دو حالت استاتیک و کماتش مد نظر باشد، زاویه پیچش ۵۰ درجه مناسب است.



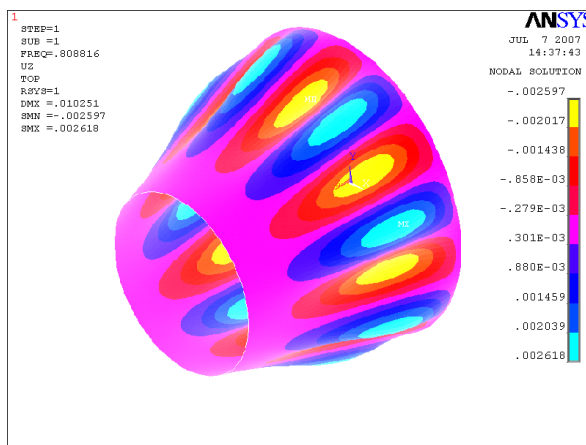
شکل ۸ - تاثیر زوایای پیچش بر تحلیل استاتیکی و کماتشی.

۵-۲- نتایج تحلیل استاتیکی

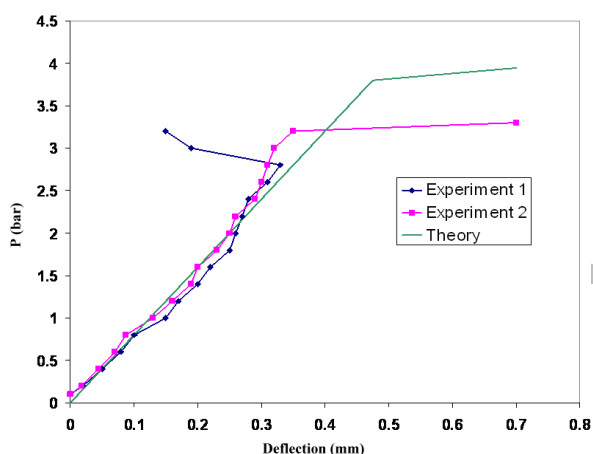
مقادیر معیار شکست سرچنگی برای زاویه ۴۰ درجه در شکل (۹) و کانتور تغییر شکل سرچنگی کامپوزیتی در راستای محوری در شکل (۱۰) نشان داده شده است.



شکل ۹ - معیار شکست سای و در سرچنگی کامپوزیتی.



شکل ۱۱ - (a) مود اول کمانش سرچنگی (b) تغییر شکل سرچنگی پس از انجام تست.



شکل ۱۲ - تغییر شکل کمانشی سرچنگی کامپوزیتی برحسب فشار خارجی.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله نتایج حاصل از تحلیل سرچنگی کامپوزیتی، تحت بارهای محوری و فشار خارجی، که بوسیله نرم‌افزار المان محدود ANSYS صورت گرفته، با مقادیر حاصل از آزمایش نمونه ساخته شده، مقایسه گردیده است. در مدل المان محدود با تغییر زوایای الیاف، مقادیر مختلف نیروی کمانش بر حسب زاویه پیچش بدست می‌آید. منحنی تغییرات نیروی کمانش بر حسب زاویه پیچش، زاویه مناسب را برای حصول سازه بهینه، تحت بارهای محوری ارائه می‌نماید. در مرحله بعد با بررسی مدل‌های مختلف مندرل، نوع مناسب آن برای دستیابی به کمترین آشفتگی در آرایش الیاف و دور ریز مواد اولیه،

سازه (معادل ۳/۸ بار) حاصل می‌شود. شکل مود اول کمانش و تغییرشکل سرچنگی کامپوزیتی پس از انجام تست در شکل (۱۱) نشان داده شده است. به همین ترتیب شکل مودهای دیگر را نیز می‌توان مشاهده نمود. در مودهای بالاتر تعداد قوس‌های به وجود آمده بر روی سطح سرچنگی (فرورفتگی و برآمدگی‌های سطح) افزایش می‌یابد. این مسئله بیان‌گر نیاز به نیروی بیشتر در مدهای بالاتر برای ایجاد چنین تغییرشکل‌هایی می‌باشد.

۴-۵- نتایج آزمایش تجربی

برای ارزیابی نتایج تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی، بر روی سرچنگی کامپوزیتی آزمون فشار خارجی صورت گرفته است. این آزمون بر روی دو نمونه انجام و نتایج حاصله در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌گردد، در نمونه یک، فشار کمانش ۲/۸ بار و در نمونه دو، فشار کمانش ۳/۲ بار و در نتیجه میانگین فشار کمانش حاصل از آزمون سه بار می‌باشد. در حالی‌که فشار کمانش بدست آمده از تحلیل ۳/۸ بار است، و این مطلب بیانگر اختلاف ۲۵ درصدی نتایج آزمون با نتایج تحلیل می‌باشد. تفاوت رفتار منحنی نمونه‌ها بعد از نقطه کمانش، به علت محل قرارگیری کرنش‌سنج بر روی سطح سرچنگی (محل فرورفتگی و یا برآمدگی سطح) می‌باشد. لازم به ذکر است، بدلیل هزینه بالای ساخت نمونه و انجام آزمون، امکان ساخت نمونه‌های بیشتر و اجرای آزمون‌های اضافی امکان‌پذیر نمی‌باشد.

- [8]. Golzana, H.; Showkatib, B. S. "Buckling of Thin-Walled Conical Shells Under Uniform External Pressure."; *J. Thin-Walled Structures*. 2008, 46, 516–529.
- [9]. Sofiyev, A. H.; Korkmaz, K. A.; Mammadov, Z.; Kamanli, M. "The Vibration and Buckling of Freely Supported Non-Homogeneous Orthotropic Conical Shells Subjected to Different Uniform Pressures."; *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2009, 86, 661–668.
- [10]. Brown, R. T.; Nachlas, J. A. "Structural Optimization of Laminated Conical Shells."; *AIAA J.* 1985, 23(5), 781–787.
- [11]. Baruch, M.; Arbocz, J.; Zhang, G. Q. "Laminated Conical Shells- Considerations for The Variations of Stiffness Coefficients."; Report LR-671, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, the Netherlands; April, 1992.
- [12]. Baruch, M.; Arbocz, J.; Zhang, G. Q. "Laminated Conical Shells- Considerations for the Variations of the Stiffness Coefficients."; *Proceeding of the 35th AIAA / ASME / ASCE / AHS / ASC S.S.D.M conference, Hilton Head, SC, 1994, 2505–2516.*
- [13]. Goldfeld, Y.; Arbocz, J. "Buckling of Laminated Conical Shells Taking into Account the Variations of the Stiffness Coefficients."; *AIAA J.* 2004, 42(3), 642–649.
- [14]. Goldfeld, Y.; Arbocz, J.; Rothwell, A. "Design and Optimization of Laminated Conical Shells for Buckling."; *J. Thin-Walled Structures*. 2005, 43, 107–133.
- [15]. ASM International Handbook Committee, "Engineered Materials Handbook."; Volume 1 – Composites., 1987.
- [16]. Youngjin, Ch. "Buckling of Composite Conical Shells Undercombined Axial Compression, External Pressure, and Bending."; Ph.D. Thesis, New Jersey Institute of Technology, Newark, Jul., 2001.

تعیین و ساخته شد. همچنین در این تحقیق برای آزمایش نمونه ساخته شده، تجهیزات لازم برای آزمون اعمال فشار خارجی، که قابلیت تعیین فشار کمانش را نیز دارا باشد، طراحی و ساخته شد. بر این اساس دستیابی به فرآیند طراحی، تحلیل و ساخت سازه و آزمایش نمونه مورد نظر، توسط تجهیزاتی که به همین منظور طراحی و ساخته شده است، منتج به دستیابی به فناوری ساخت سرجنگی، با روش رشته‌پیچی گردیده است. اختلاف ۲۵ درصدی میان نتایج حاصل از تحلیل المان محدود و نتایج آزمایش تجربی، دلیل تفاوت در برخی پارامترهای طراحی سازه می‌باشد. تفاوت در این پارامترها بیشتر مربوط به خطای اندازه‌گیری و اپراتوری در تعیین خواص مواد بکار رفته برای نمونه آزمایشی می‌باشد.

مراجع

- [1]. Lubin, G. "Hand Book of Composite Materials."; Van Nostrand Reinhold Co., First Ed., 1982.
- [2]. Rosato, D. "Filament Winding its Development, Manufacture, Application and Design."; John Wiley & Sons, USA, First Ed., 1964.
- [3]. Anderson, J. D. "Modern Compressible Flow: With Historical Perspective."; McGraw Hill, 2004 (Translated by Emarati A., Persian, aero space publisher), 2006.
- [4]. Yamaki, N. "Elastic Stability of Circular Cylindrical Shells."; Amsterdam, North-Holland., 1984.
- [5]. Holst, F. G.; Rotter, J. M.; Calladine, Ch. R. "Imperfection in Cylindrical Shells Resulting from Fabrication Misfits."; *J. Eng. Mech.* 1999, 125(4), 410–418.
- [6]. Ansourian, P. "On the Buckling Analysis and Design of Silos and Tanks."; *J. Construct. Steel Res.* 1992, 23(1–3), 273–294.
- [7]. Shen, H. S.; Chen, T. Y. "Buckling and Post Buckling Behavior of Cylindrical Shells Under Combined External Pressure and Axial Compression."; *J. Thin-Walled Struct.* 1991, 12, 321–334.