

## طراحی بهینه ساختارهای مشبک مدور

جعفر اسکندری جم      دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مرکز کامپوزیت، تهران  
 میلاد نورآبادی      دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی کامپوزیت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مرکز  
 کامپوزیت، تهران  
 سید حسین تقویان      کارشناس ارشد مهندسی کامپوزیت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مرکز کامپوزیت،  
 تهران

### چکیده

در این مقاله بهینه‌سازی وزنی ساختارهای مشبک مدور کامپوزیتی (استوانه‌ای و مخروطی) تحت بار محوری بررسی می‌شود. در ابتدا معادلات حاکم به منظور استخراج ماتریس سفتی با توجه به هندسه سازه بدست آورده شده‌اند. همچنین روابط و قیدهای مربوط به بهینه‌سازی وزنی این ساختارها با توجه به استحکام کمانشی ارائه شده است. با ایجاد یک مدل اجزای محدود از ساختار مشبک مخروطی تحلیل خطی کمانش انجام شده و نتایج تحلیل با نتایج ارائه شده توسط یکی از مراجع راستی‌آزمایی می‌شود. سپس برای دو نمونه از ساختارهای مشبک استوانه‌ای و مخروطی فرآیند بهینه‌سازی صورت گرفته است. در ادامه یک مدل اجزای محدود از ساختار مشبک مخروطی در نرم‌افزار Abaqus با استفاده از المان تیر تیموشینکو ایجاد گردیده و روی آن تحلیل اجزای محدود به منظور بررسی استحکام کمانشی ساختار مشبک تحت بار بحرانی محوری صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات وزنی سازه مشبک مخروطی و استوانه‌ای رفتاری شبیه به یکدیگر دارد. همچنین برای طراحی ساختارهای مشبک مخروطی ایجاد نمودارهای راهنما به منظور استخراج زوایای ژئودسیک در مقاطع ارتفاعی مختلف ضروری می‌باشد.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی، سازه مشبک مخروطی، ریب، اجزای محدود.

## Optimal Design of Annular Lattice Structures

J. E. Jam      Associate Professor, Composite Materials and Technology  
 Center, Tehran  
 M. Noorabadi      M.Sc. Student, Composite Materials and Technology Center,  
 Tehran  
 S. H. Taghavian      M.Sc., Composite Materials and Technology Center, Tehran

### Abstract

In this paper, the weight optimization of annular lattice composite structures (cylindrical and conical) has been investigated. First the governing equations are derived to achieve the stiffness matrix, regarding the geometry of the structure. Also the relations and constraint of the weight optimization of these structures regarding the buckling strength has been presented. Linear buckling analysis of the conical lattice structure has been carried out, using a finite element model by means of the ABAQUS software. Using the Timoshenko beam element, the finite element analysis has been done in order to study the buckling strength of the lattice structure under critical axial loading. The analysis of conical lattice structures and creating guiding diagrams for extracting the geodesic angles at height sections is of great importance.

**Keywords:** Conical lattice structure, Optimization, Stiffness matrix, Rib, Finite element.

## ۱-مقدمه

سازه‌های مشبک<sup>۱</sup> کامپوزیتی ساخته شده از الیاف کربن، شیشه و کولار به طور گسترده در سازه‌های هوافضا از جمله، راکت‌های چند مرحله‌ای، آداپتور<sup>۲</sup> حامل ماهواره و بدنه هواپیما بکار می‌روند [۱ و ۲]. پوسته‌های مشبک ترکیبی از ریب‌های محیطی<sup>۳</sup> و مارپیچی<sup>۴</sup> می‌باشند که از مواد کامپوزیتی تک‌راستا و با استحکام و سفتی بالا ساخته شده‌اند. این پوسته‌ها با پیچش الیاف توسط دستگاه فیلامنت‌واینده<sup>۵</sup> روی یک مندرل<sup>۶</sup> تولید می‌شوند. استفاده از مواد کامپوزیتی در ساختارهای مشبک این امکان را فراهم می‌سازد که از خواص طولی (در راستای الیاف) مواد کامپوزیتی، در جهات مختلف سازه استفاده شود. این مسئله یکی از مزایای استفاده از این ساختارها در طراحی سازه‌هایی است که در پیکره خود به مواد مرکب نیاز دارند [۳]. اولین مدل پیوسته سازه مشبک کامپوزیتی و تحلیل آن بوسیله وسیلیو و پیچ‌خاداز با استفاده روش انرژی در سال ۱۹۸۲ ایجاد شد [۴].

یکی از جامع‌ترین تحقیقاتی که در مورد انواع الگوهای مشبک انجام شده‌است، مربوط به چن و سای در سال ۱۹۹۶ می‌باشد [۵]. در تحقیقات آن‌ها اثر انواع بارگذاری‌ها بر روی انواع الگوهای مشبک بررسی شده و مقایسه‌های خوبی میان خواص مکانیکی انواع ساختارهای مشبک، ساندویچی و چندلایه صورت پذیرفته است. هو و گرامول مسئله کمانش پوسته‌های مشبک را تحت بار محوری بررسی کرده‌اند. در این بررسی ریب‌ها با استفاده از المان تیر مدل‌سازی شده‌اند [۶]. اسلینچکو و وریجنکو تحلیلی از پوسته‌های مشبک استوانه‌ای تک‌گرید کامپوزیتی را با استفاده از سفتی معادل ارائه کردند [۷]. بهینه‌سازی ارتعاشی و کمانشی صفحات تقویت‌شده ایزوتروپ با تغییر چیدمان تقویتی‌ها در مرجع [۸] صورت گرفته است. بهینه‌سازی به روش عددی برای سازه مشبک مدور تحت فشار محوری در مرجع [۹] صورت گرفته است. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که بهینه‌سازی جرم سازه با تغییر پارامترهای موثر در سازه مشبک باعث بهبود عملکردی سازه می‌گردد. براگوهین و ولموروجان [۱۰] تحلیل کمانش پوسته استوانه‌ای مشبک شش‌وجهی کامپوزیتی را با استفاده از مدل‌سازی پوسته معادل برپایه روش انرژی بوسیله نظریه کلاسیک پوسته و نظریه ریتز انجام دادند. آن‌ها نتایج حاصل از ارزیابی کمانش خود را بوسیله روش اجزای محدود

## ۲- روابط حاکم بر ساختارهای مشبک

سازه مشبک از تعدادی ریب مارپیچی و محیطی تشکیل شده است. این ساختارها می‌توانند اشکال گوناگونی داشته باشند. طرحواره از انواع ساختارهای مشبک بکار رفته در بخش‌های مختلف صنایع فضایی در شکل ۱ نمایش داده شده است. بطور کلی هدف اصلی در بکارگیری ساختار مشبک استفاده بهینه از خواص طولی مواد کامپوزیتی می‌باشد.

## ۳- معادلات تحلیلی به منظور بهینه‌سازی وزنی ساختار

## مشبک مدور

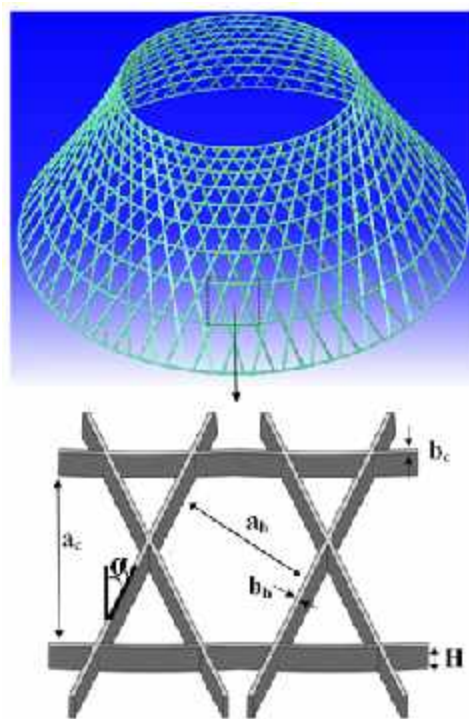
به منظور بهینه‌سازی وزنی باید مجموعه‌ای از متغیرهای هندسی را به یکدیگر وابسته نموده و محدوده مشخصی را به منظور تبدیل ساختار مشبک به ساختار صفحه‌ای در نظر گرفت. همچنین در طراحی برای بهینه‌سازی وزنی باید از کمانش کلی و محلی ساختار مشبک و همچنین تسلیم ریب‌ها جلوگیری کرد.

- 1 . Lattice
- 2 . Adapter
- 3 . Hoop ribs
- 4 . Helical ribs
- 5 . Filament winding
- 6 . Mandrel

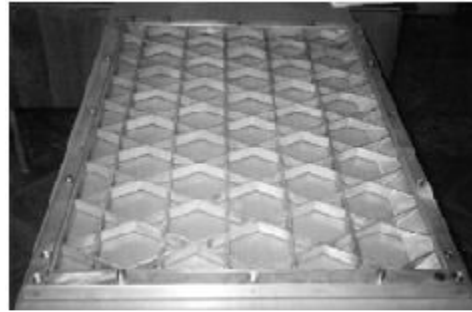
بدین منظور قيود و محدوده پارامترهای هندسی لازم برای طراحی به شرح زیر می‌باشند:

$$\begin{aligned} 0 < H &\leq R/20 \\ 0 < \frac{b_h}{a_h} &\leq 1 \\ 0 < \frac{b_c}{a_c} &\leq 1 \\ 0 < \alpha &\leq \pi/2 \end{aligned} \quad (1)$$

در شکل ۲ پارامترهای اصلی هندسی ساختار مشبک مدور روی مدل اجزای محدود سازه مخروطی مشبک مشخص شده است.



شکل ۲- پارامترهای اصلی هندسی ساختار مشبک



(a)



(b)



(c)

شکل ۱- نمونه‌ای از ساختارهای مشبک

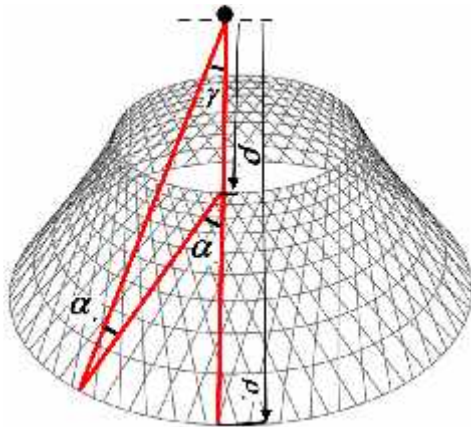
برای جلوگیری از تسلیم ساختار باید شرایط زیر ایجاد گردد:

$$\begin{aligned} P - P_c(x) &\leq 0 \\ P - P_l(x) &\leq 0 \\ P - P_s(x) &\leq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

در معادله ۲،  $P$  نیروی فشاری محوری اعمال شده روی ساختار،  $P_c$  بار بحرانی کماتش کلی ساختار،  $P_l$  بار کماتش محلی ریب‌های مارپیچی،  $P_s$  نیروی بحرانی تسلیم ریب-های مارپیچی. در معادله ۳ پارامترهای  $P_c$ ،  $P_l$  و  $P_s$  تشریح شده است:

- a: ساختار مشبک صفحه‌ای با پوسته زیرین
- b: ساختار مشبک استوانه‌ای بکار رفته در بدنه هواپیما
- c: ساختار مشبک مخروطی بکار رفته در بخش زیرین سامانه ماهواره (آداپتور ماهواره‌بر) [۱،۲ و ۱۲]

بنابراین تابع هدف در فرآیند بهینه‌سازی، وزن ساختار مشبک می‌باشد که با پارامتر  $M(x)$  نمایش داده می‌شود. در اینجا  $x$  پارامترهای موثر در فرآیند بهینه‌سازی وزنی است ( $x = a, H, b_h/a_h, b_c/a_c$ ).



شکل ۳- پارامترهای هندسی به منظور طراحی بهینه

تغییرات  $\rho$  نسبت به  $\alpha$  برابر است با:

$$d\rho = -\rho_0 \sin \alpha_0 \frac{\cos \alpha}{\sin^2 \alpha} d\alpha \quad (7)$$

در معادله ۷، پارامتر  $\alpha$  در ارتفاع تغییر می‌کند، بطوری که با حرکت به سمت سطح مقطع بزرگتر این پارامتر کاهش می‌یابد.

با استفاده از معادله ۶ و ۷ فاصله ریب‌های دایره‌ای از یکدیگر در هر ردیف از معادله ۸ بدست می‌آید:

$$(a_c)_{i,i+1} = \frac{\rho_i}{\alpha_{i+1}} \int_{\alpha_i}^{\rho_{i+1}} \Delta \psi d\rho \quad (8)$$

در معادله ۸،  $i$  شماره ریب دایره‌ای از سطح مقطع بزرگتر می‌باشد. وزن ریب‌های دایره‌ای و مارپیچی از معادله ۹ بدست می‌آید:

$$M_c = 2n_h m_c H b_c \ln \left( \frac{\tan \left( \frac{\alpha_0}{2} \right)}{\tan \left( \frac{\alpha_f}{2} \right)} \right) \rho_0 \sin \alpha_0 \quad (9)$$

$$M_h = 2n_h m_h H b_h (\cot \alpha_f - \cot \alpha_0) \rho_0 \sin \alpha_0$$

در معادله ۹،  $m_c$ ،  $m_h$  به ترتیب چگالی ریب‌های دایره‌ای و مارپیچی می‌باشد.

وزن کل سازه مشبک مخروطی برابر مجموع وزن ریب‌های دایره‌ای و مارپیچی می‌باشد (معادله ۱۰).

$$M = M_c + M_h \quad (10)$$

$$P_c(x) = 2\pi H^2 \cos^2 \alpha \sqrt{E^2 \frac{2b_h b_c}{3a_h a_c}}$$

$$P_l(x) = \frac{1}{3} k \pi^3 ERH \left( \frac{b_h}{a_h} \right)^3 \sin^2(2\alpha) \cos^2 \alpha \quad (3)$$

$$P_s(x) = 4\pi \bar{\sigma} RH \frac{b_h}{a_h} \cos^2 \alpha$$

پارامترهای موثر در فرآیند بهینه‌سازی ساختار مشبک با توجه به هندسه سازه بدست می‌آید. در ادامه این پارامترها برای دو نوع ساختار هندسی مخروطی و استوانه‌ای استخراج می‌گردد.

#### ۴- سازه مشبک مخروطی

فرآیند طراحی ساختارهای مشبک استوانه‌ای تا حدودی در مرجع [۹] ذکر شده است. با توجه به اینکه پارامترهای طراحی و مولفه‌های ساخت در سازه مشبک مخروطی به یکدیگر وابسته می‌باشند بنابراین طراحی پارامتری سازه مشبک مخروطی با سازه مشبک استوانه‌ای که در مرجع [۹] ذکر شده است متفاوت می‌باشد. بطور کلی طراحی سازه مشبک مخروطی برپایه تحمل بارهای محوری بنا نهاده شده است. برای سازه مشبک مخروطی موقعیت ریب‌های دایره‌ای بین تقاطع ریب‌های مارپیچی می‌باشد. در سازه مشبک مخروطی برای اینکه بیشتری استحکام در راستای محوری ایجاد گردد طراحی ریب‌های مارپیچی بصورت ژئودسیک صورت می‌گیرد. در معادله ۴ زاویه ژئودسیک در سطح مقطع کوچکتر و زاویه ژئودسیک در سطح مقطع بزرگتر بیان گردیده است.

$$\alpha_0 = \tan^{-1} \left( \frac{\rho_f \sin \gamma}{\rho_f \cos \gamma - \rho_0} \right)$$

$$\alpha_f = \alpha_0 - \gamma \quad (4)$$

پارامترهای معادله ۴ در شکل ۳ نمایش داده شده است. با در نظر گرفتن هندسه سازه  $\gamma$  از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\gamma = \frac{\Delta \psi}{2} (n_c - 1) \quad (5)$$

زاویه بین دو ریب مارپیچ  $\Delta \psi$  می‌باشد و برابر:

$$\Delta \psi = 2\pi \sin \beta / n_h \quad (6)$$

در معادله ۶،  $\beta$  زاویه راس مخروط می‌باشد.

$$[Q] = \begin{bmatrix} \frac{2E_h b_h}{a_h c^4} & \frac{2E_h b_h}{a_h s^2 c^2} & 0 \\ \frac{2E_h b_h}{a_h s^2 c^2} & \frac{2E_h b_h}{a_h s^4} + \frac{E_c b_c}{a_c} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2E_h b_h}{a_h s^2 c^2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$s = \sin \varphi, c = \cos \varphi$$

$E_h$  مدول الاستیسیته ریب مارپیچی،  $E_c$  مدول الاستیسیته ریب دایره‌ای می‌باشد. معادله (۱۳) مستقیماً از تئوری، فرمول-بندی و فرضیاتی که مربوط به سفتی لایه و خواص الیاف می‌باشد حاصل شده است. همچنین خصوصیات سفتی معادل در جهت محوری از معادله (۱۴) استخراج می‌گردد [۹]:

$$\bar{E}_x = \frac{1}{H} \left( \frac{q_{11} q_{22} - q_{12}^2}{q_{22}} \right) \quad (14)$$

$q_{ij}$  استفاده شده در معادله (۱۴) مولفه‌های ماتریس سفتی  $Q$  می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌گردد  $\bar{E}_x$  به زاویه ریب‌های مارپیچ، پهنای ریب و فواصل ریب‌های مارپیچی و دایره‌ای بستگی دارد.

### ۷- راستی آزمایی

مدل اجزای محدود سازه مشبک مخروطی که در مرجع [۱۲] تحت بار محوری و خمشی تحلیل کمانش شده است، در این بخش توسط نرم‌افزار ABAQUS با استفاده از المان تیر تیموشینکو ایجاد گردیده و تحلیل کمانش روی آن انجام می‌گیرد. مشخصات هندسی و مواد بکار رفته در تحلیل اجزای محدود مطابق مرجع [۱۲] تعیین شده است. مطابق مرجع [۱۲] مدول الاستیسیته و چگالی به ترتیب برابر ۱۰۰ گیگاپاسکال و ۱۵۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. در شکل ۵ نمایی از تحلیل اجزای محدود کمانش سازه مشبک مخروطی با مشخصات هندسی تعریف شده در مرجع [۱۲] نمایش داده شده است. قطر بزرگ و کوچک به ترتیب برابر ۱/۶ و ۰/۸ متر می‌باشد. همچنین ارتفاع سازه برابر ۰/۶ متر است. بار بحرانی نمایش داده شده در کانتور شکل زیر برحسب نیوتن بوده و به منظور نمایش بهتر تغییر شکل سازه ضریب نمایش ۱۰۰ برابر شده است. مقایسه نتایج مرجع [۱۲] با نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود و نتایج تحلیلی در جدول زیر آورده شده است.

### ۵- سازه مشبک استوانه‌ای

ساختار مشبک استوانه‌ای (شکل ۴) از پیچش متقارن مارپیچی و پیچش محیطی تشکیل شده است. ریب‌های مارپیچی در ساختار مشبک استوانه‌ای زاویه ( $\pm \alpha$ ) نسبت به محور استوانه ایجاد می‌کنند. تعداد ریب‌های محیطی از معادله ۱۱ استخراج می‌شود.

$$s = \frac{\pi D}{n} \quad (11)$$

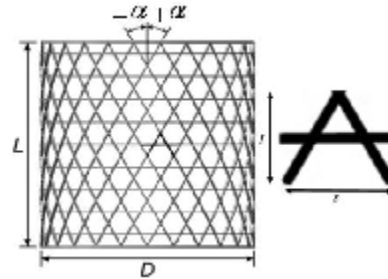
$$l = \frac{\pi D}{2n \tan \alpha}$$

$$n_c = \frac{L}{l} = \frac{2nL \tan \alpha}{\pi D}$$

در معادله ۱۱،  $n$  تعداد ریب‌های مارپیچی می‌باشد. همچنین پارامترهای  $D, L, d, s$  و  $\alpha$  در معادله فوق در شکل زیر نمایش داده شده است.

وزن سازه مشبک استوانه‌ای از معادله ۱۲ بدست می‌آید:

$$M = 2\pi RLH \left( 2m_h \frac{b_h}{a_h} + m_c \frac{b_c}{a_c} \right) \quad (12)$$



شکل ۴- سازه مشبک استوانه‌ای به همراه سلول واحد آن

### ۶- ماتریس سفتی معادل

خصوصیات سفتی یک سلول که بصورت تکرار ایجاد شده است، نماینده سفتی کل بخش تکرار شونده می‌باشد. خصوصیات اورتوتروپیک بدست آمده برای اجسام مدور، در جهت محوری می‌باشد. به عنوان نمونه برای پوسته استوانه ای سفتی در جهت محوری برابر  $\bar{E}_x \frac{A}{L}$  می‌باشد، که  $A = 2\pi RH$  سطح مقطع پوسته می‌باشد. ماتریس سفتی  $[Q]$  سلول‌ها را با توجه به ترتیب ریب‌های ایجاد شده استخراج کرد (معادله (۱۳)).

مشخصات هندسی مشابهی دارند صورت می‌گیرد. فرآیند بهینه‌سازی بر مبنای کماتش محلی ریب‌ها، کماتش کلی سازه، استحکام سازه و ماتریس سفتی معادل لایه‌های سازه مشبک صورت گرفته است. سفتی معادل مورد نیاز در جهت محوری به منظور طراحی بهینه سازه مشبک مخروطی و استوانه‌ای برابر نیم مگانیوتن بر میلی‌متر می‌باشد. خصوصیات مواد استفاده شده در سازه مشبک مخروطی و استوانه‌ای در جدول ۲ ارائه شده است.

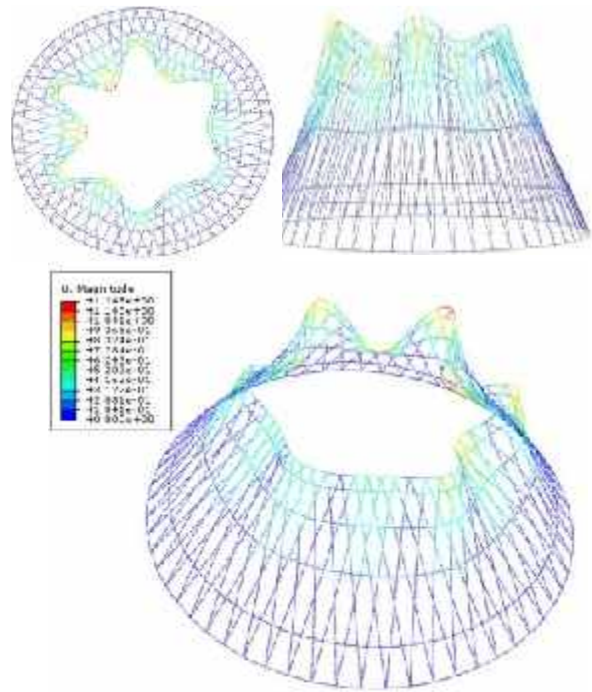
جدول ۲- خصوصیات مواد استفاده شده در طراحی سازه

مشبک

$E_h$ (GPa)	$\bar{\sigma}_h$ (MPa)	$m_h$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$E_c$ (GPa)	$m_c$ (Kg/m <sup>3</sup> )
۸۰	۳۵۰	۱۴۵۰	۶۴	۱۴۱۰

#### ۹- سازه مشبک مخروطی

در این بخش بهینه‌سازی وزنی سازه مشبک مخروطی با توجه به روابط تحلیلی مطرح شده در بخش ۲ و روش ارائه شده در مرجع [۹] انجام می‌گیرد. برای سازه مشبک مخروطی تعداد ریب دایره‌ای ۱۰ عدد در نظر گرفته شده است. ارتفاع مخروط مشبک برابر ۹۰۰ میلی‌متر، همچنین قطر سطح مقطع بزرگ و کوچک مخروط به ترتیب برابر ۲۵۰۰ و ۱۲۵۰ میلی‌متر می‌باشد. تغییرات جرم (شکل ۶)، ابعاد هندسی (شکل ۷) و زوایای ژئودسیک (شکل ۸) سازه مشبک مخروطی تابعی از نیمی از تعداد ریب‌های مارپیچی بیان شده است. کمترین جرم سازه مشبک مخروطی در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ بصورت پررنگ نمایش داده شده است. همچنین محور تعداد ریب مارپیچی شامل نیمی از تعداد ریب‌های مارپیچی بکار رفته می‌شود ( $+\alpha$  یا  $-\alpha$ ). همانطور که از نمودارهای ارائه شده مشخص می‌باشد سازه مشبک مخروطی با ۴۲ عدد ریب مارپیچی دارای بهینه‌ترین حالت از نظر وزنی می‌باشد. همچنین ضخامت سازه مشبک مخروطی تأثیر بسیار زیادی روی استحکام سازه دارد. با افزایش تعداد ریب‌های مارپیچی، زوایای ژئودسیک دچار کاهش می‌شوند (شکل ۸). با توجه به پیش ژئودسیک ساختارهای مشبک مخروطی، مدل‌سازی اجزای محدود و ساخت این ساختارهای در محدوده‌ای از زوایای ژئودسیک ( $\alpha_c$ ) به دلیل ایجاد انحناء در ریب‌های مارپیچی امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین تعداد ریب‌های دایره‌ای که نقش عمده‌ای در اندازه زوایای ژئودسیک دارند، در تعیین بار بحرانی کماتش و استحکام نهایی سازه مشبک



Step: Step-1  
Mode: 1 EigenValue = 33831  
Primary Var: U, Magnitude  
Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+02

شکل ۵- استخراج بار بحرانی کماتش به روش اجزای محدود ( $h = b = 4 \text{ mm } \alpha = 5^\circ$ )

جدول ۱. مقایسه نتایج مرجع [۱۲] با نتایج بار بحرانی محوری

حاصل از حل تحلیلی و عددی حاضر

	$h = 8 \text{ mm}$ $b = 2 \text{ mm}$	$h = 4 \text{ mm}$ $b = 4 \text{ mm}$	$h = 2 \text{ mm}$ $b = 8 \text{ mm}$	
مرجع [۱۲] (kN)	۴۴,۳۳۴	۳۴,۴۱۶	۱۳,۸۶۳	
Abaqus (kN)	۴۹,۱۱۲	۳۳,۸۳۱	۱۵,۱۲۲	
تحلیلی (kN)	۴۷,۹۹۷	۳۶,۲۱۶	۱۵,۰۶	

از نتایج ارائه شده در جدول ۱ می‌توان دریافت که نتایج استخراج شده از حل عددی اجزای محدود و نتایج تحلیلی از دقت بالایی برخوردار می‌باشد. بنابراین با توجه به راستی‌آزمایی انجام شده در ادامه روی سازه مشبک مخروطی و استوانه‌ای با ابعاد هندسی مشخص با توجه به معادلات ذکر شده در بالا بهینه‌سازی وزنی صورت می‌گیرد.

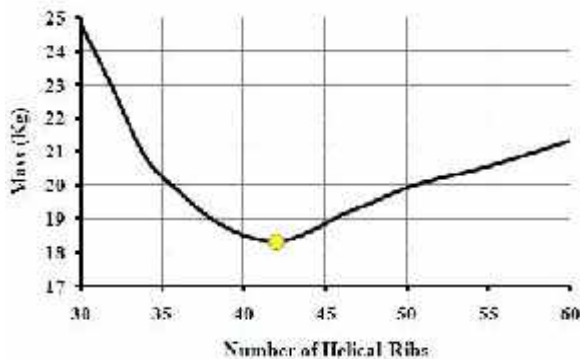
#### ۸- بهینه‌سازی

در فرآیند بهینه‌سازی پارامترهای هندسی ساختار مشبک نقش بسیار مهمی دارند. با ثابت نگه‌داشتن یکی از پارامترها (معمولاً  $n_c$ ) تغییرات وزن سازه نسبت به تعداد ریب‌های مارپیچی ترسیم می‌گردد. تغییر در تعداد ریب مارپیچی روی زاویه ریب‌های مارپیچی تأثیر مستقیم می‌گذارد. در ادامه بهینه‌سازی وزنی ساختار مشبک مخروطی به همراه ساختار مشبک استوانه‌ای که

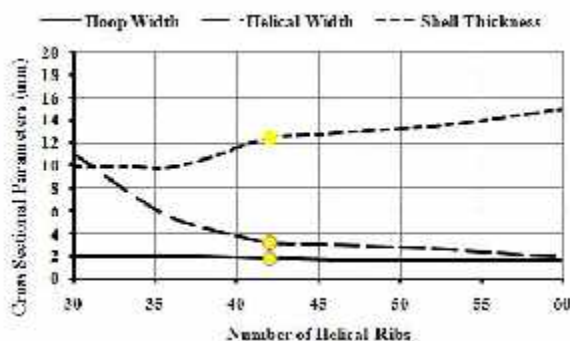
۱۰- سازه مشبک استوانه‌ای

در این بخش طراحی اولیه یک سازه مشبک استوانه‌ای که تحت فشار محوری می‌باشد و در سازه‌های هوافضایی قابل کاربرد می‌باشد، بررسی می‌گردد. قطر استوانه برابر ۲۵۰۰ میلیمتر و ارتفاع ۹۰۰ میلیمتر می‌باشد. تعداد ریب دایره‌ای سازه مشبک استوانه‌ای برابر ۱۰ عدد می‌باشد. به منظور بهینه‌سازی وزنی ساختار استوانه‌ای مشبک همه پارامترهای موثر هندسی بطور جداگانه بهینه می‌شوند. نتایج بهینه‌سازی پارامترها برحسب نیمی از تعداد ریب‌های مارپیچی ( $n_h$ ) بیان شده است.

در شکل ۹ تغییرات وزنی سازه مشبک استوانه‌ای با تغییر تعداد ریب مارپیچی نمایش داده شده است. شکل ۱۰ تغییرات ابعادی ریب‌های سازه مشبک استوانه‌ای را با تغییر تعداد ریب مارپیچی به منظور ایجاد یک ساختار بهینه وزنی نمایش داده است. همچنین شکل ۱۱ زاویه ریب‌های مارپیچی را با تغییر در تعداد آن‌ها نمایش می‌دهد. همانطور که از نمودار ۱۱ نمایان است با افزایش تعداد ریب مارپیچی زاویه ریب‌های مارپیچی کاهش می‌یابد که این رفتار مستقل از فرآیند بهینه‌سازی می‌باشد. در نمودارهای زیر اندازه پارامترها به منظور ایجاد وزن کمینه پررنگ شده است.

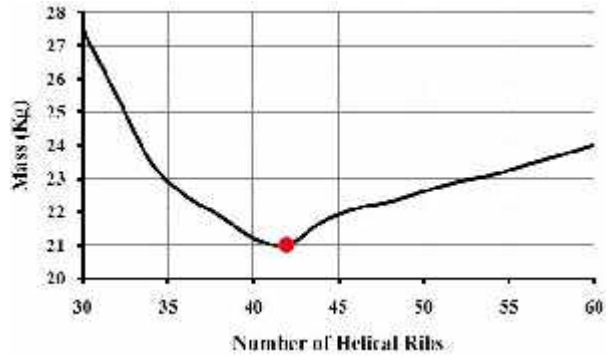


شکل ۸- تغییرات وزنی سازه مشبک استوانه‌ای با افزایش ریب‌های مارپیچی

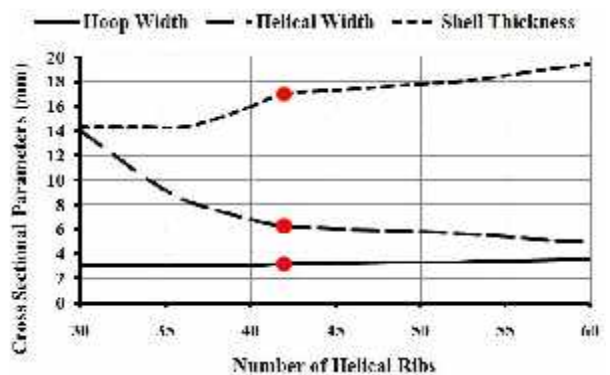


شکل ۹- تغییرات ابعادی ریب‌های مارپیچی و دایره‌ای سازه مشبک استوانه‌ای با افزایش تعداد ریب‌های مارپیچی

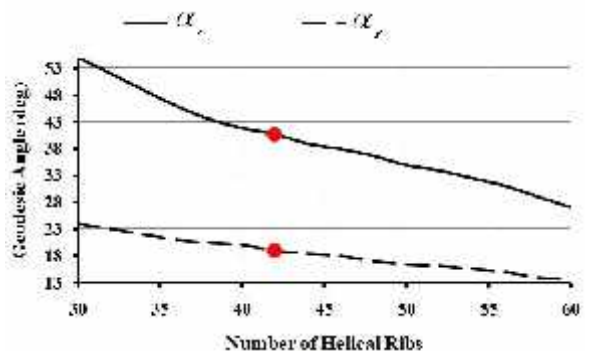
مخروطی دارای اهمیت می‌باشند. بطور کلی تعداد ریب‌های دایره‌ای بکار رفته در سازه مشبک مخروطی نسبت به سازه مشبک استوانه‌ای در تعیین بار بحرانی کمانش نقش زیادی دارند.



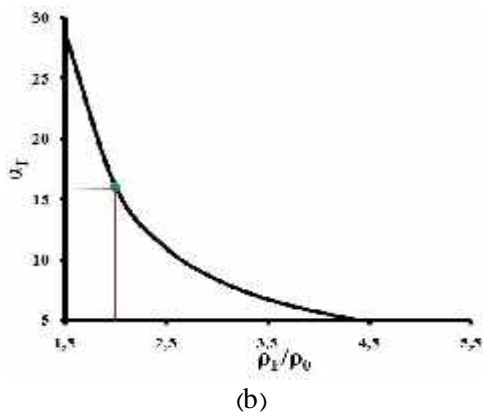
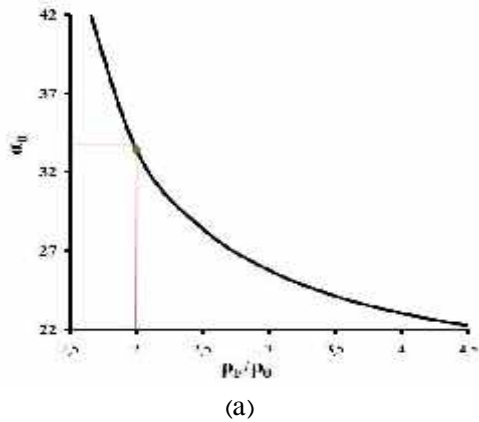
شکل ۱۰- تغییرات وزنی سازه مشبک مخروطی با افزایش ریب‌های مارپیچی



شکل ۱۱- تغییرات ابعادی ریب‌های مارپیچی و دایره‌ای سازه مشبک مخروطی با افزایش تعداد ریب‌های مارپیچی



شکل ۱۲- تغییر در زوایای ژئودسیک با افزایش تعداد ریب مارپیچی



شکل ۱۲- تغییرات زوایای ژئودسیک در سطح مقطع

کوچک (a) و سطح مقطع بزرگ (b) با افزایش  $\frac{\rho_F}{\rho_0}$

جدول ۳- مشخصات هندسی سازه مشبک مخروطی

$n_c$	$n_h$	$\alpha_f$	$\alpha_0$	$H$	$b_c$	$b_h$
				(mm)		
۱۰	۵۳	۱۵/۹۸°	۳۳/۴۴°	۱۸	۴	۵/۷۵

### ۱۲- نتیجه‌گیری

در این مقاله فرآیند بهینه‌سازی وزنی سازه مشبک مدور با تغییر پارامترهای هندسی ساختار بررسی گردید. به منظور بهینه‌سازی وزنی باید استحکام سازه حفظ گردد. استحکام سازه مشبک به ماتریس سفتی سازه وابسته بوده و ماتریس سفتی نیز به هندسه ساختار وابسته می‌باشد. الگوی رفتاری تغییر وزنی نمونه سازه مشبک مخروطی شبیه رفتار وزنی سازه مشبک استوانه‌ای می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که ضخامت ریب‌های ساختار مشبک نقش بسیار مهمی در بهینه‌سازی وزنی سازه ایفاء می‌کند. همچنین با افزایش تعداد ریب مارپیچی وزن ساختار مشبک حالت کاهش یافته و از یک محدوده‌ای به بعد افزایش وزن در ساختار مشبک مشاهده می‌شود.



شکل ۱۱- تغییرات ابعادی ریب‌های مارپیچی و دایره‌ای سازه مشبک استوانه‌ای با افزایش تعداد ریب‌های مارپیچی

### ۱۱- مدل‌سازی و تحلیل اجزای محدود سازه مشبک

#### مخروطی کامپوزیتی

در اینجا مدل‌سازی و تحلیل اجزای محدود سازه مشبک مخروطی با توجه به ملاحظات ساخت صورت می‌گیرد. مدل‌سازی بصورت سیمی انجام شده و از المان تیر تیموشینکو به منظور شبکه‌بندی و در نهایت تحلیل اجزای محدود استفاده شده است.

به منظور طراحی سازه‌های مشبک مخروطی نمودارهای طراحی ایجاد می‌گردند (شکل ۱۲). این نمودارها تغییرات زوایای ژئودسیک با افزایش ارتفاع سازه مشبک مخروطی برای تعداد ریب دایره‌ای مشخص را نمایش می‌دهند. به عنوان مثال در نمودار شکل ۱۲ برای تعداد ریب‌دایره‌ای ۱۰ عدد، مشاهده می‌گردد که زوایای ژئودسیک با افزایش ارتفاع سازه مشبک مخروطی کاهش می‌یابند. در این بخش مدل‌سازی و حل اجزای محدود سازه مشبک مخروطی با نسبت  $\frac{\rho_F}{\rho_0} = 2$  صورت می‌گیرد که زوایای ژئودسیک در سطح مقطع کوچک و بزرگ بر روی نمودارهای شکل ۱۲ مشخص شده‌اند.

بدین منظور با توجه به نمودار شکل‌های ۶، ۷ و ۸ و تعداد ریب‌های مارپیچی ۱۰ عدد، مشخصات هندسی مدل اجزای محدود ایجاد شده در جدول ۳ ارائه شده است. پارامترهای مطرح شده در جدول ۳ در بخش ۳ معرفی شده‌اند. همچنین شکل ۱۳ توزیع تنش در ریب‌های دایره‌ای و مارپیچی تحت بار بحرانی کماتش را با ۲۰ برابر بزرگنمایی نسبت به حالت واقعی نشان می‌دهد. اعداد مشخص شده در کانتور براساس مگاپاسکال می‌باشند. همانطور که از شکل ۱۳ پیداست سازه مشبک مخروطی نسبت به بار محوری بحرانی وارد شده در محدوده مرز تسلیم واقع شده است.



[3] Rosato D., "Filament Winding its Development, Manufacture Application and Design", John Wiley & Sons, USA, First Ed, 1964.

[4] V.V. Vasiliev and Pichkhadze GP., "Composite Shells and Plates with Spatial Reinforcement", Design, analysis and testing of composite structure', Vol. 9. Central Aerohydrodynamics Institute, pp. 83-90 [in Russian], 1982.

[5] Tsai, S.W. and Chen, H.J., "Analysis and Optimum Design of Composite Grid Structures", Composite Materials, 30, pp. 503-534, 1996.

[6] Hou A. and Gramoll K., "Compressive Strength of Composite Latticed Structures", Reinforced Plastics Composites, 17(5), pp. 462-83, 1998.

[7] Slinchenko D, Verijenko VE. "Structural analysis of composite lattice shells of revolution on the basis of smearing stiffness". Composite Structures, 54:341-8, 2001.

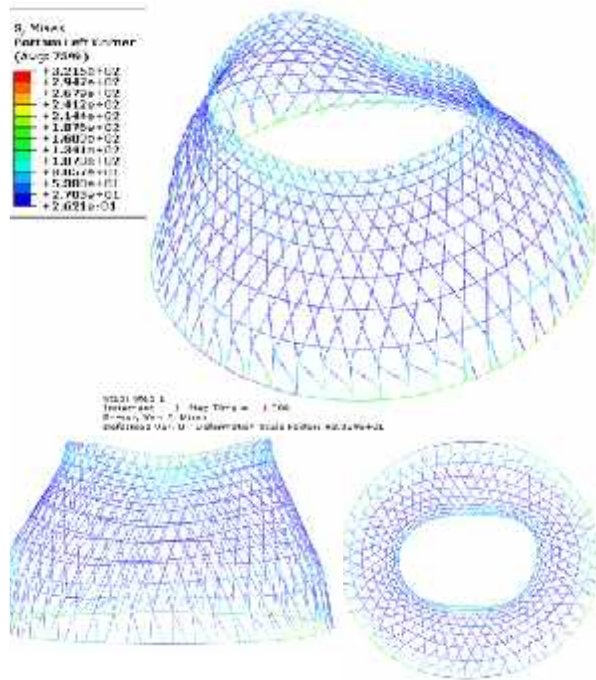
[8] W. Akl, A. El-Sabbagh, A. Baz, "Optimization of the static and dynamic characteristics of plates with isogrid stiffeners", Finite Elements in Analysis and Design, 44,513- 523, 2008.

[9] G. Totaro A. and Z. Gürdal, "Optimal Design of Composite Lattice Shell Structures for Aerospace Applications", Aerospace Science and Technology, 13, pp. 157-164, 2009.

[10] Buragohain M, Velmurugan R. "Buckling analysis of composite hexagonal lattice cylindrical shell using smeared stiffener model". Defence Sci J,50(3):230-8, 2009.

[11] E.V. Morozov, A.V. Lopatin and V.A. Nesterov, "Finite Element Modelling and Buckling Analysis of Anisogrid Composite Lattice Cylindrical Shells", Composite Structures, 93, pp. 308-323, 2011.

[12] E.V. Morozov, A.V. Lopatin and V.A. Nesterov, "Buckling Analysis of Anisogrid Composite Lattice Conical Shells", Composite Structures, 93, pp. 3150-316, 2011.



شکل ۱۳- استحکام سازه مشبک مخروطی تحت بار بحرانی کمانش

با افزایش تعداد ریب‌های مارپیچی در ساختار مشبک مخروطی و دایره‌ای به ترتیب زوایای ژئودسیک و زاویه ریب‌های مارپیچی کاهش می‌یابند. با توجه به اینکه سازه مشبک مخروطی از طریق پیچش ژئودسیک طراحی و تحلیل شده است، بنابراین ضروری می‌باشد که نمودارهای راهنما (تغییرات زاویه ژئودسیک نسبت به تغییر ارتفاع سازه) به منظور تعیین زوایای ژئودسیک در مقاطع مختلف ارتفاعی ایجاد گردد.

#### مراجع

[1] V.V. Vasiliev and A.F. Razin, "Anisogrid Composite Lattice Structures for Spacecraft and Aircraft Applications", Composite Structures, 76, pp. 182-189, 2006.

[2] V.V. Vasiliev, Baryin VA. and Rasin AF., "Anisogrid Lattice Structures Survey of Development and Application". Composite Structures, 54, pp. 361-370, 2001.