

# A Method for Determining Design Parameters of Space Umbrella Antenna

Sadjad Samipour<sup>1\*</sup>, Alireza Toloei<sup>2</sup> and Vladimir Batrakoff<sup>3</sup>

1. Assistant Professor, Faculty of New Technologies and Aerospace Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
2. Associate Professor, Faculty of New Technologies and Aerospace Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
3. Ph.D., Department of Aerospace Structures Production, Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia

\*Corresponding Author's E-mail: [s\\_samipour@sbu.ac.ir](mailto:s_samipour@sbu.ac.ir)

## Abstract

*Development in the aerospace industry is linked to the continuous pursuit for lightweight designs. Open-architecture composite structures are a new and novel use of composites for minimal weight component design. It is reasonable to use efficient and advanced techniques such as radial braiding in manufacturing of composite lattice tubular structures. In this article an aerospace composite lattice tubular structure with a braided reinforcement system is studied. A method is developed to determine the parameters of the preform reinforcement. A new process has been created for the manufacture of lattice structure with a braided reinforcement system. A methodology has been developed for determining the technological parameters of radial braiding. A sample structure is manufactured and tested. Experimental studies of lattice structure samples were carried out in order to verify the methods for determining mechanical, structural, and technological parameters.*

**Keywords:** Aerospace structure, Composite, Lattice structure, Radial braiding

## 1. Introduction

Composite lattice structures (LSs) are a promising area of development of design and technology solutions in aerospace engineering. The winding method is the main method of manufacturing composite LSs. The shortcomings of this method include the difficulty of laying reinforcement in the axial direction, uneven filling with reinforcing material across the width of the part, the uneven ratio of the binder and the reinforcement, and the need for a large number of layers to create a balanced symmetrical laying for form stable structures. This article proposes an alternative method of radial braiding for the manufacturing of such structures. This method ensures high level of process automation, structural integrity of preform material and design flexibility as well as low manufacturing cost. Thanks to a variety of applications and new opportunities, braiding is a prospective technique for the manufacturing of tubular parts. The idea of flexible wing airplane can be realized using LS with a carbon reinforcement system, for which a wing with

lattice structure with a reinforcement system has been manufactured. For structures with complex shapes, spokes of the umbrella antenna, the concept of lattice structure can be used. For practical testing of the manufacture of a curved LS with a variable cross-section, the geometry of the spokes of a parabolic umbrella antenna of a spacecraft with a braided reinforcement system was adopted as an object for technological research. The main idea of reflectors with flexible ribs is to use the elastic energy of deformation of the ribs, providing a parabolic shape of the reflecting surface, rolled around the central part of the reflector. An umbrella antenna structure supporting a reflective surface usually consists of a certain number of helical spokes, one end of which is fixed to the central hub structure. The thin wall thickness of this design provides low weight. The high-modulus carbon fiber, which is often used in space structures due to its high modulus of elasticity and low coefficient of thermal expansion and good technological characteristics, was chosen as the material of the ribs. The



## COPYRIGHTS

© 2022 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [the Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

## How to cite this article:

S. Samipour, A. Toloei and V. Batrakoff, "A Method for Determining Design Parameters of Space Umbrella Antenna," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 15, No. 4, pp. 31-43, 2022 (in Persian), <https://doi.org/10.30699/jsst.2023.1403>.

braiding process on a curvilinear mandrel with a variable cross-section is carried out with a constant step, so that the LS coverage coefficient remains constant. The practical application of the developed technology for the manufacture of a folding lattice structure with a high degree of packaging and the spokes of an umbrella antenna is proposed.

## 2. Methodology

The aim of this paper was to develop a method for determining the parameters of the preform reinforcement and to produce the preform. The design has to insure the specified characteristics of the composite product according to the lay-up sequence to the volume filling factor. The above parameters ensure the required rigidity, strength, and temperature stability of the structure. The realization of the braiding procedure requires the determination of the parameters, such as the roving width, the number of the axial rovings, the number of the layers, and the arrangement of spindles installed on the annular frame of the radial braiding machine.

## 3. Conclusions

Thus, experimental studies of LS specimens, manufactured and tested at the Center of Composite Technology (KNRTU-KAI, Kazan, Russia), were performed to verify suggested methods. A method for manufacturing of multilayer LS using relief mandrel was developed. Compressive testing of LS specimens was performed to verify structure and process characterization. Results of calculation and experimental studies were compared. They demonstrated that the suggested structure and process characterization provided a possibility to perform prompt analysis of mechanical properties of LS which might be applied in designing LS with braided reinforcement systems.

The basic elements of the extended abstract are listed below in the order in which they should appear:

## 4. References

- [1] Q. Zhang, D. Beale, and R.M. Broughton, "Analysis of circular braiding process, Part I: theoretical investigation of kinematics of the circular braiding process," *Journal of Manufacturing Science and Engineering ASME*, vol.121, pp. 345-350, 1999.
- [2] A.R Toloei , M Zarchi , and B Attaran , "Application of active suspension system to reduce aircraft vibration using pid technique and bees algorithm," *International Journal of Computer Applications* , vol.98 , no. 6 , 2014.
- [3] S.V. Lomov, A. Nakai, R.S. Parnas, S. Bandyopadhyay Ghosh, and I. Verpoest, "Experimental and theoretical characterisation of the geometry of flat two- and three-axial braids," *Textile Research Journal*. vol .72, no 8, pp. 706-712, 2002.
- [4] J. Carey, A. Fahim, and M. Munro, "Predicting elastic constants of 2D-braided fiber rigid and elastomeric-polymeric matrix composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 23, no. 17, pp. 1845-1857, 2004.
- [5] C. Ayranci, and J.P. Carey, " Predicting the longitudinal elastic modulus of braided tubular composites using a curved unit-cell geometry," *Composites Part B: Engineering*, vol. 41, no. 3, pp. 229-235, 2010.
- [6] F. T. Pierce, "5-The geometry of cloth structure," *Journal of Textile Institute Transactions*, vol. 28, no.3, T45-T97 1937.
- [7] J. Carey, M. Munro, and A. Fahim, "Regression-based model for elastic constants of 2D braided/woven open mesh angle-ply composites," *Polymer Composites*, vol. 26, no.2, pp. 152-164, 2005.
- [8] L. Joalu, Y. Jiao, Y. Sun, and L. Wei, "Experimental investigation of cut-edge effect on mechanical properties of three-dimensional braided composites," *Materials & design*, vol.28, no.9, pp. 2417-2424, 2007.
- [9] R. K. Gideon, H. Zhou, Y. Li, B. sun, and B. GU, "Quasi-static compression and compression-compression fatigue characteristics of 3D-braided carbon/epoxy tube," *Journal of the Textile Institute*, vol. 107, no. 7, pp. 938-948, 2016.
- [10] T. Ziyang, Y. Yan, L. Jie, Y. Hong, and F.Guo, "Progressive damage and failure analysis of three-dimensional braided composites subjected to biaxial tension and compression," *Composite Structures*, vol. 185, pp. 496-507, 2018.
- [11] H. Wang, B. Sun, and B. Gu, "Numerical modeling on compressive behaviors of 3D-braided composites under high temperatures at microstructure level," *Composite Structures*, vol. 160, pp. 925-938, 2017.
- [12] G. D. Fang, J. Liang, Y. Wang, and B. L. Wang, "The effect of yarn distortion on the mechanical properties of 3D four-directional braided composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 40, no. 4, pp. 343-350, 2009.
- [13] L. Chen, X. M. Tao, and C.L. Choy, "Mechanical analysis of 3-D braided composites by the finite multiphase element method," *Composites and Technology*, vol. 59, no. 16, pp. 2383-2391, 1999.
- [14] V. V. Vasil'ev, and V. A. Bunakov, "Design axially compressed lattice composite cylindrical shells," *Composite Structures*, vol. 2, pp. 68-77, 2000.
- [15] V. V. Vasil'ev, V. A. Barynin, and A. F. Razin, "Anisogrid lattice composite structures - design and application in aerospace technology," *Composites and nanostructures*, vol.3, pp. 38-50, 2009.
- [16] S.A. Samipour, & V.V. Batrakov, "Determining the Design Parameters of Braided Aerospace Composite Lattice Structures," *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, vol. 51, no. 1, pp. 71-79, 2022.
- [17] S. A. Samipour, and Ya. S. Danilov, "Development and verification of an analytic technique to determine the stiffness parameters of braided tubular parts," *Russian Aeronautics*, vol. 59, no. 4, pp. 460-465, 2016.
- [18] S. A. Samipour, V. I. Khaliulin, and V. V. Batrakov, "Development of the Technology of Manufacturing Aerospace Composite Tubular Elements by Radial Braiding," *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, vol. 47, no.3, pp. 284-289, 2018.
- [19] S. A. Samipour, V. I. Khaliulin, and V. V. Batrakov, "A Method for Calculating the Parameters for Manufacturing Preforms via Radial Braiding," *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, vol. 46, no. 3, pp. 302-308, 2017.

# طراحی و توسعه فناوری ساخت المان‌های آنتن چتری فضایی

سجاد سمیع پور<sup>۱\*</sup>، علیرضا طلوعی<sup>۲</sup> و ولادیمیر باتراکف<sup>۳</sup>

۱- دانشکده فناوری‌های نوین و مهندسی هوافضا، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- دانشکده تولید سازه‌های هوافضایی، دانشگاه ملی تحقیقاتی فنی کازان، روسیه

\*ایمیل نویسنده مخاطب: [s\\_samipour@sbu.ac.ir](mailto:s_samipour@sbu.ac.ir)

## چکیده

توسعه صنعت هوافضا مستلزم تلاش دائم برای طراحی و ساخت سازه‌های سبک‌تر و کارآمدتر است. سازه‌های کامپوزیتی شبکه‌ای، کاربرد نوین و فناورانه از کامپوزیت‌ها برای کاهش وزن سازه‌های هوافضایی است. استفاده از روش‌های کارآمد و پیشرفته مانند بافت دورانی در ساخت سازه‌های استوانه‌ای کامپوزیتی شبکه‌ای مورد نیاز است. در این مقاله یک سازه استوانه‌ای شبکه‌ای کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن بافته شده با کاربرد هوافضایی مورد مطالعه قرار گرفته است. یک روش برای تعیین پارامترهای ساختاری پیش‌سازه، یک فرآیند جدید برای تولید سازه شبکه‌ای و همچنین یک روش برای تعیین پارامترهای تکنولوژیکی دستگاه بافت دورانی به منظور تولید پیش‌سازه توسعه داده شده است. یک سازه نمونه ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است. مطالعات نرم افزاری و تجربی نمونه‌های سازه شبکه‌ای به منظور صحت سنجی روش‌های تعیین پارامترهای مکانیکی، سازه‌ای و تکنولوژیکی انجام شده است.

**کلمات کلیدی:** طراحی اجسام پرنده، آنتن فضایی چتری، سازه‌های کامپوزیتی هوافضایی، روش بافت دورانی الیاف

## علائم و اختصارات

Radial Braiding Machine	دستگاه بافت دورانی
(Space) Umbrella Antenna	آنتن فضایی چتری
Filament Winding	رشته پیچشی
Resin Transfer Method	روش انتقال رزین

## مقدمه

پتانسیل عالی فناوری مدرن، طیف گسترده الیاف تقویت‌کننده و چسب به ما اجازه می‌دهد تا طرح‌های فضایی را با خواص منحصر به فرد طراحی کنیم که خصوصیات دارند که از نظر راندمان وزنی و ثبات ابعادی در طیف وسیعی از دما، چندین سال پیش دست نیافتنی بودند. در ساخت این سازه‌ها توصیه می‌شود از ابزار مؤثر و پیشرفته مانند دستگاه بافت دورانی استفاده شود. از

مزایای روش بافت دورانی می‌توان به سطح بالای اتوماسیون، یکپارچگی سازه‌های تولید شده، انعطاف‌پذیری در طراحی و همچنین هزینه کم تولید که منجر به صرفه‌جویی در مقیاس می‌شود، اشاره کرد. از مزایای دیگر بافت دورانی امکان ایجاد پیش‌سازه‌های تقویت شده دو و سه محوری با زاویه قرارگیری الیاف نسبت به هم است. این ویژگی امکان تولید ساختارهای کامپوزیتی با خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مورد نظر را می‌دهد. با توجه به تنوع کاربردها و ویژگی‌های جدید، روش بافت دورانی در تولید سازه‌های هوافضایی چشم‌انداز بسیار خوبی دارد [۱]. ایده آنتن فضایی چتری را می‌توان با استفاده از سازه شبکه‌ای تقویت‌شده با الیاف کربن پیاده‌سازی کرد. سازه آنتن چتری به‌عنوان نگهدارنده یک بازتابنده استفاده می‌شود. سطح آنتن چتری فضایی معمولاً شامل تعداد مشخصی سازه استوانه‌ای دارای انحنا با سطح مقطع شبه بیضی است که در راستای محور سازه ابعاد سطح مقطع تغییر می‌کند و یک سر آن به سازه مرکزی ثابت شده است [۲].

تقاطع این الیاف در هم تنیده شده‌اند که تفاوت اصلی استفاده از روش بافت دورانی نسبت به روش‌های مشابه برای تولید چنین سازه‌هایی است. سازه‌های کامپوزیتی شبکه‌ای با کاربرد هوافضایی عمدتاً به روش رشته پیچی ساخته می‌شوند. تنیده بودن الیاف کربن در محل‌های تقاطع باعث بهبود خواص مکانیکی سازه‌های شبکه‌ای بافته شده می‌شود.

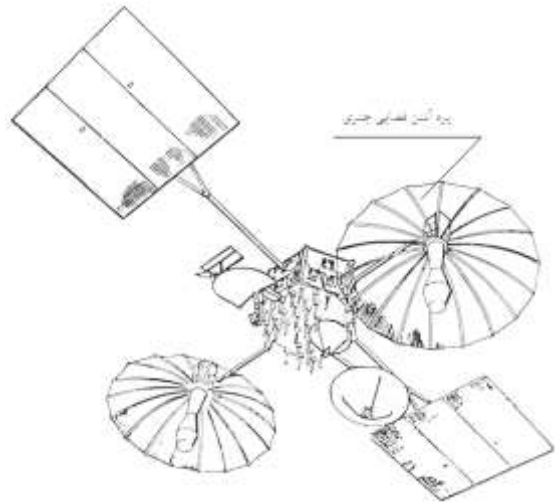
## مقایسه روش بافت دورانی و روش رشته گذاری

با توجه به اینکه در مقاله حاضر برای تولید سازه‌های کامپوزیتی شبکه‌ای روش بافت دورانی به‌عنوان جایگزین فرایند رشته پیچی پیشنهاد می‌شود، در ادامه به مقایسه این دو روش پرداخته می‌شود. روش رشته پیچی از جمله روش‌هایی است که در آن امکان استفاده از الیاف پیوسته در تمام طول قطعه و جهت‌دهی ساده الیاف در جهت بارگذاری وجود دارد. همچنین امکان ساخت قطعاتی با ابعاد بسیار بزرگ و نیز دستیابی به محصولی با نسبت حجمی بالای الیاف از دیگر مزایای این روش است. طبیعتاً این روش نیز دارای محدودیت‌هایی است که می‌توان به سطح خارجی نسبتاً ناهموار قطعات رشته پیچی و نیز محدودیت پیچش بر روی سطوح با انحنای معکوس اشاره کرد. از آنجاکه این روش ساخت باعث به وجود آمدن عناصری با استحکام بالا و وزن پایین می‌شود، استفاده از آن در صنایعی هم چون هوافضا و صنایع نظامی و سازه‌های تجاری و صنعتی رشد چشم‌گیری داشته است. برای نمونه می‌توان به تولید استوانه‌ها و اتصالات کامپوزیتی، انواع مخازن تحت فشار در ابعاد مختلف، شفت‌های کامپوزیتی، استوانه موتورهای کامپوزیتی راکت‌ها، بدنه فیوزها و بسیاری از قطعات صنعتی و نظامی مختلف اشاره کرد.

مزایا و معایب روش بافت دورانی نسبت به روش رشته پیچی به شرح زیر است:

- ۱- از آنجا که مقاومت خاصیتی است که با خرابی موضعی رابطه مستقیم دارد، انتظار می‌رود مقاومت بین سازه‌های ساخته شده توسط این دو فرآیند تفاوت معنی داری نداشته باشد.
- ۲- زاویه الیاف نسبت به یکدیگر در روش رشته پیچی بین ۵ تا حدود ۹۰ درجه است در حالی که در روش بافت دورانی بین ۲۰ تا ۷۰ درجه است. هرچند در روش بافت دورانی زوایای کمتر از ۲۰ و بیشتر از ۷۰ درجه هم قابل دسترسی هستند ولی کیفیت قرارگیری الیاف و کشش آن‌ها به اندازه مطلوب نخواهد بود.
- ۳- از هر دو روش می‌توان برای تولید سازه‌های متقارن و غیرمتقارن استفاده کرد. برای سازه‌های با طول بیش از ۳۵ متر روش بافت دورانی کارآمدتر است. همچنین برای تولید سازه‌های دارای انحنا روش بافت دورانی کاربردی‌تر است.
- ۴- یکی از مزایای روش بافت دورانی توانایی بافتن الیاف با الگوهای تقویت‌کننده مختلف است. فناوری بافت دورانی امکان

برای سازه‌های با اشکال پیچیده مانند سازه‌های دارای انحنا با سطح مقطع متغیر سازه شبکه‌ای می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. برای تولید پیش‌سازه پره‌های آنتن فضایی چتری فرآیند بافت بر روی یک قالب منحنی با سطح مقطع متغیر با یک گام ثابت انجام می‌شود، به طوری که ضریب پوشش سازه شبکه‌ای ثابت باقی می‌ماند. شکل ۱، کاربردهای سازه‌های شبکه‌ای بافته شده را نشان می‌دهد. الیاف کربن به دلیل مدول الاستیسیته بالا و ضریب انبساط گرمایی کم و ویژگی‌های تکنولوژیکی خوب اغلب در سازه‌های فضایی به عنوان تقویت کننده انتخاب می‌شود.



شکل ۱- حوزه کاربرد سازه‌های شبکه‌ای بافته شده: پره‌های آنتن فضایی چتری

استفاده از روش بافت دورانی الیاف برای تولید سازه‌های شبکه‌ای در دنیا سابقه نداشته است. در کشورهای روسیه و آلمان شرکت‌های HERZOG, T4L, Tex Inter, RWTH Aachen, و دانشگاه اشتوتگارد، دانشگاه مونیخ، دانشگاه اوپوم دارای تکنولوژی ساخت سازه‌های کامپوزیتی به روش بافت دورانی هستند. این روش در صنایع نظامی و موشکی مزیت‌های قابل توجهی دارد. از جمله این مزایا می‌توان به تولید سازه‌های با سطح مقطع متغیر اشاره کرد که برای تولید نازل موشک‌های سوخت مایع و همچنین بدنه هواپیمای بدون سرنشین کاربرد دارد. همچنین امکان استفاده از الیاف مختلف در جهت تولید سازه‌های کامپوزیتی هیبریدی نیز از مزایای این روش است.

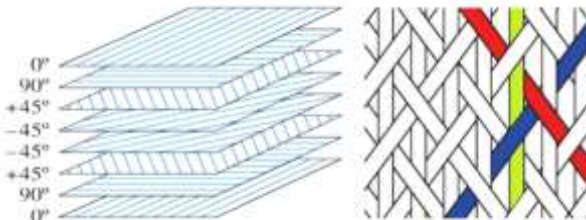
در مقاله حاضر به طراحی سازه‌های کامپوزیتی شبکه‌ای تقویت شده با الیاف کربن که به روش بافت دورانی تولید شده پرداخته شده است. همان‌گونه که در شکل ۲ نمایش داده شده، سازه شبکه‌ای متشکل از مسیرهایی با زوایای مثبت و منفی است که این زوایا با توجه به خواص مکانیکی سازه محاسبه می‌شوند. در نمونه تولیدشده، این زاویه ۴۵ درجه در نظر گرفته شده است. به این صورت که مسیره عمود بر هم هستند. این مسیره‌ها از قرار گرفتن الیاف کربن در کنار هم ایجاد و در محل‌های



(الف)



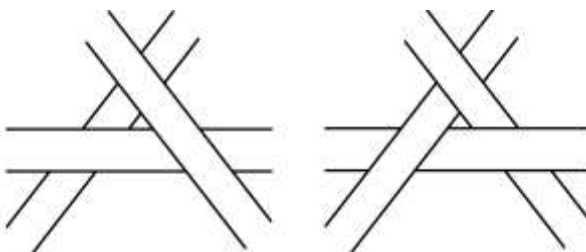
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل ۲- الف) بافت دو محوری و سه محوری؛ ب) انواع سبک‌های بافت الیاف؛ ج) مقایسه ماده شبه ایزوتروپیک تشکیل شده از ۸ لایه تک محوری با بافت سه محوری؛ د) ماده کامپوزیتی ترکیبی؛ ه) نحوه قرارگیری الیاف نسبت به یکدیگر در روش رشته‌گذاری و روش بافت دورانی

به دست آوردن محصولاتی با بافت دو محوری و سه محوری الیاف فراهم می‌کند. در بافت سه محوری، رشته‌هایی به صورت طولی، در امتداد محور قالب اضافه می‌شوند (شکل ۲ الف). تقویت محوری، استحکام و مقاومت قابل توجهی را برای سازه فراهم می‌کند. علاوه بر این، چندین سبک بافت وجود دارد، مانند  $1 \times 1$ ،  $2 \times 2$ ،  $3 \times 3$  (شکل ۲ ب).

۵- اصطلاح «شبه ایزوتروپیک» یا همسان‌گرد به این معنی است که ماده کامپوزیتی مورد نظر از نظر حجم کل محصول ایزوتروپیک، اما از نظر میکرو حجم ناهمسان‌گرد است. با استفاده از روش بافت دورانی، می‌توان با بافتن یک طرح تقویت سه محوری با زاویه  $60^\circ$  درجه، یک ماده شبه ایزوتروپیک به دست آورد. می‌توان نتیجه گرفت که بافت سه محوری ساخت سازه‌های فوق سبک با طرح تقویت شبه ایزوتروپیک را امکان‌پذیر می‌سازد (شکل ۲ ج).

۶- مواد کامپوزیتی حاوی بیش از یک نوع ماده تقویت‌کننده را ترکیبی می‌نامند. روش بافت دورانی امکان ساخت سازه‌های دارای تقویت‌کننده ترکیبی را فراهم می‌کند، به این صورت که می‌توان از الیاف مختلف در جهت‌های مختلف به صورت همزمان استفاده کرد (شکل ۲ د)

۷- تفاوت دیگر میان روش رشته پیچی با روش بافت دورانی الزام وجود قالب در روش رشته پیچی است. در حالی که در روش بافت دورانی می‌توان سازه مورد نظر را به صورت آستین بافت و سپس برای انجام فرایند چسب کاری بر روی قالب مورد نظر قرار داد.

۸- ثابت شدن الیاف روی قالب به کشش آن‌ها در هنگام بافت و تعامل آن‌ها با یکدیگر بستگی دارد. بدیهی است که تعامل الیاف در روش بافت به مراتب بیشتر است (شکل ۲ ه).

۹- کشش الیاف در روش رشته پیچی به مراتب بیشتر از روش بافت دورانی است. به همین دلیل قالب مورد استفاده در این روش باید دارای استحکام بیشتری باشد. در نتیجه در روش بافت دورانی می‌توان از قالب‌های قابل دسترس‌تر استفاده کرد که موجب صرفه جویی در هزینه می‌شود.

۱۰- روش بافت دورانی کاملاً اتوماتیک است که این برای تولید قطعات در تعداد زیاد یک مزیت محسوب می‌شود. همچنین هزینه تولید قطعه با روش بافت دورانی کمتر است که از لحاظ استراتژیک باعث صرفه جویی در مقیاس می‌شود.

بنابراین، روش بافت دورانی برای تولید سازه‌هایی با قطر کوچک و یا سازه‌های بسیار طولانی دارای سطح مقطع پیچیده و همچنین برای سازه‌های بسیار سبک وزن نسبت به روش رشته پیچی دارای مزیت است.

## مروری بر مطالعات نظری و تجربی پیشین

پژوهش‌های مفصلی در مورد سازه‌های ساخته شده از الیاف بافته شده به عمل آمده است. مطالعات نظری و تجربی شبیه‌سازی کامپوزیت‌های بافته شده در آثار بسیاری از نویسندگان از جمله لوموف [۳] انجام شده است. خصوصیات مکانیکی کامپوزیت‌های بافته شده به هندسه بافت الیاف بستگی زیادی دارد. انحنای الیاف بر مقاومت محوری، مقاومت در برابر ضربه و پایداری ابعادی سازه‌های بافته شده کامپوزیت تأثیر می‌گذارد [۴]. رابطه معنی‌داری بین هندسه الیاف، سختی، مقاومت و جذب انرژی در اثر ضربه وجود دارد که مدل‌سازی میکرومکانیکی را برای توصیف روند شکست ضروری می‌کند [۵]. در اولین مدل‌سازی رسمی سازه‌های بافته شده، پیرس [۶] یک مدل ساده ارائه داد که در آن رشته‌ها دارای مقطع دایره‌ای هستند. شایان ذکر است که رشته عبارت است از مجموع تعداد مشخصی از الیاف. توصیف هندسی، که برای سازه‌های بافته شده مناسب‌تر است، توسط کری و همکاران [۷] تهیه شده است. لی و همکاران [۸] یک مدل هندسی از معماری الیاف را در کامپوزیت‌های پیشرفته ارائه داد و رفتارهای فشرده‌سازی، کشش و خمش را با یکدیگر مقایسه کرد. گیدنون و همکاران [۹] رفتار فشرده‌سازی محوری استوانه‌های کامپوزیتی بافته شده سه بعدی را با زوایای مختلف تقویت آزمایش کرد. تیان و همکاران [۱۰] از نظر تئوری مکانیسم خرابی کامپوزیت‌های سه بعدی بافته شده تحت فشار کششی دو محوره و بار فشرده‌سازی را مطالعه کرد. وانگ و همکاران [۱۱] تأثیر دما و زاویه تقویت را بر خرابی فشاری طولی نشان داد. فانگ و همکاران [۱۲] برای مطالعه رفتار خرابی تدریجی کامپوزیت‌های سه بعدی بافته شده از یک روش اتصال چند مقیاسی استفاده کرد. چن و همکاران [۱۳] خواص الاستیک موثر کامپوزیت‌های بافته شده سه بعدی را با استفاده از روش المان محدود چند فازی محاسبه کرد.

## تعیین پارامترهای طراحی سازه‌های شبکه‌ای بافته شده

طراحی و ساخت سازه شبکه‌ای تقویت‌شده با الیاف کربن بافته شده نیازمند توسعه روش‌های جدید برای تجزیه و تحلیل خواص مکانیکی است. روش‌های عددی و تحلیلی متداول که به طور گسترده در تجزیه و تحلیل خواص مکانیکی سازه‌های پوسته فلزی و کامپوزیتی به کار می‌روند، نمی‌توانند یک ارزیابی قابل اعتماد از خواص مکانیکی در نواحی از سازه شبکه‌ای که در آن الیاف در هم تنیده می‌شوند، ارائه دهند. این مسئله به دلیل تفاوت‌های توپولوژیک قابل توجه بین سازه‌های با دیواره نازک و دنده‌های سازه شبکه‌ای رخ می‌دهد. تفاوت اصلی این است که هر سه پارامتر هندسی دنده‌ها (طول، عرض و ضخامت) همگی از مرتبه بزرگی یکسانی هستند، بنابراین لازم است که سازه نه به صورت دو بعدی، بلکه به صورت سه بعدی تحلیل شود.

روش‌های طراحی سازه شبکه‌ای به روش رشته پیچی به خوبی در مقالات نویسندگان مختلفی از جمله خلیمانوویچ، واسیلیف و بارنین شناخته شده‌اند [۱۴-۱۵]. این مقاله از روش طراحی ارائه شده در مقاله [۱۶] استفاده می‌کند. به منظور تعیین مدول الاستیک یک کامپوزیت، می‌توان از روش المان محدود استفاده کرد. با این حال، در این پژوهش از راه‌حل تحلیلی برای تعیین مدول الاستیک کامپوزیت‌های بافته شده که در [۱۷] پیشنهاد شده است، استفاده می‌کند. تحلیل محاسباتی مبتنی بر المان محدود زمان زیادی می‌برد و به نرم‌افزارهای گران‌قیمت نیاز دارد و در صورتی که یکی از پارامترها تغییر کند، تمام محاسبات باید دوباره تکرار شود. در عین حال، به منظور طراحی سازه‌ی تقویت شده با الیاف کربن بافته شده، طراح نیاز به یک معادله نسبتاً ساده و دقیق برای انتخاب الیاف، رزین، الگوی تقویت و نسبت حجمی الیاف دارد. در مقاله اینجانب [۱۷]، روش تحلیلی تعیین مدول الاستیک برای یک سازه استوانه‌ای تقویت شده با الیاف کربن بافته شده معرفی شده است. علاوه بر این، روشی برای تعیین پارامترهای ساختاری سازه شبکه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. این پارامترها برای ساخت نمونه و انجام آزمایش تجربی بر روی نمونه‌ها مورد نیاز هستند.

نمونه سازه مورد بررسی در این مقاله، یک سازه‌ی استوانه‌ای شبکه‌ای کامپوزیتی هوافضایی است. الیاف T700S و رزین T-26 براساس بررسی مجموعه‌ای از خواص انتخاب شده‌اند که سختی  $1/2$  گیگا پاسکال و مقاومت نهایی  $10$  مگا پاسکال را برای سازه تضمین می‌کنند [۱۷]. نسبت حجمی الیاف در نواحی متقاطع  $57$  درصد و زاویه بین دنده‌های مارپیچی  $90$  درجه است. براساس الزامات طراحی سازه مورد نظر، وزن نمونه نباید از  $115$  گرم تجاوز کند. با استفاده از معادلات وزن و هندسه، پارامترهای هندسی دنده‌ها تعیین می‌شود: عرض  $11$  میلی‌متر، ضخامت  $3$  میلی‌متر و فاصله مرکز دنده‌ها  $65$  میلی‌متر. هدف از این بخش توسعه روشی برای تعیین پارامترهای تقویت و تولید پیش‌سازه است. پارامترهای بالا سختی، استحکام و پایداری دمایی مورد نیاز سازه را تضمین می‌کنند. تحقق فرایند بافت پیش‌سازه به روش بافت دورانی نیازمند تعیین پارامترهایی مانند عرض رشته‌ها، تعداد رشته‌های محوری، تعداد لایه‌ها و آرایش قرقره‌های نصب‌شده بر روی قاب حلقوی دستگاه بافت دورانی است. برای محاسبه پارامترهای تکنولوژیک از مقاله دیگر اینجانب استفاده شده است [۱۷]. این پژوهش در چهار مرحله انجام می‌شود. مرحله اول شامل توسعه یک مدل ریاضی و یافتن یک الگوریتم برای به دست آوردن پارامترهای تکنولوژیک به منظور بارگذاری قرقره‌ها در دستگاه بافت و محاسبه سرعت محوری قالب است. مرحله دوم تحلیل سازه مورد نظر به روش المان محدود به کمک نرم‌افزار آنسیس به منظور صحت‌سنجی محاسبات تحلیلی است. مرحله سوم ساخت نمونه با استفاده از قالبی که مخصوص این نوع سازه‌ها طراحی و ساخته شده است. در نهایت در مرحله

شرایط مرزی به این صورت است که نمونه در قسمت پایین ثابت، بخش بالایی دارای جابجایی محوری ۲ میلی متری و بار واقعی ۴۱۲۳ نیوتن است. شکل ۳-الف) و ب)، تغییر شکل سازه شبکه‌ای در امتداد محورهای  $x$  و  $z$  را نشان می‌دهد. همچنین در شکل ۳-ج) حاشیه ایمنی برای معیار Puck و سایت‌های شکست مورد انتظار سازه شبکه‌ای را نشان می‌دهد. مطابق این معیار، شکست در مقیاس میکرومکانیک بوده و مدل کاهش خواص بعد از شکست اولیه نیز موجود است. Puck در مدل کاهش خواص خود در نظر گرفت که پس از شکست اولیه ماده مرکب، خواص آن دچار کاهش شده و ماده مرکب به تدریج از بین می‌رود. مطابق این فرضیه، قبل از اینکه ماده مرکب به شکست نهایی برسد، یک سری آسیب‌ها و عیوب موضعی در آن به وجود آمده که این آسیب‌ها شامل جدایش الیاف و ماتریس، پارگی الیاف و ایجاد شدن میکروتورک‌هایی درون ماتریس است.

طبق جدول ۲ نتایج حاصل از محاسبات تحلیلی مدول الاستیسیته همبستگی خوبی با نتایج حاصل از مطالعات عددی دارد که با استفاده از المان محدود انجام شد. شایان ذکر است که مدول الاستیسیته با توجه به شیب نمودار تنش به کرنش محاسبه شده است.

جدول ۲- نتایج حاصل از محاسبات تحلیلی مدول الاستیسیته

خطا (درصد)	مدول الاستیسیته (روش تحلیلی)، گیگاپاسکال	مدول الاستیسیته (روش عددی)، گیگاپاسکال
۱۱/۵	۱/۲	۱/۳۳۸

با توجه به درصد خطای محاسبه شده در جدول ۲، نتایج حاصل از محاسبات تحلیلی قابل اتکا بوده و می‌توان از آن‌ها برای ساخت نمونه استفاده کرد.

در مرحله دوم پس از به‌دست آوردن پارامترهای ساختاری با توجه به الزامات طراحی و صحت‌سنجی نتایج حاصل از روش تحلیلی به کمک روش المان محدود یک الگوریتم برای تعیین پارامترهایی مانند عرض رشته، که تعیین‌کننده تعداد الیاف در هر رشته است، تعداد رشته‌های شعاعی و محوری، تعداد لایه‌ها و تعداد قرقره‌های نصب شده درون دستگاه برای بافت پیش‌سازه استوانه‌ای توسعه داده شده است. در ابتدا، مدل ریاضی برای بافت پیش‌سازه استوانه‌ای توسعه داده شده است. اگر  $L$  و  $r$  به ترتیب طول و شعاع سازه استوانه‌ای،  $\alpha$  زاویه تقویت و  $b$  عرض رشته باشد، آنگاه مسیر الیاف روی سطح قالب را می‌توان به صورت زیر توصیف کرد:

$$\begin{aligned} x &= r \cdot \cos\left(\frac{t}{r \cdot \cot(\alpha)}\right) \\ y &= r \cdot \sin\left(\frac{t}{r \cdot \cot(\alpha)}\right) \\ z &= t \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن  $t$  مختصات جاری است. با استفاده از معادله (۱) می‌توان طول رشته  $L_f$  مورد نیاز برای پوشش سطح قالب و ضریب پوشش  $k$  را پیدا

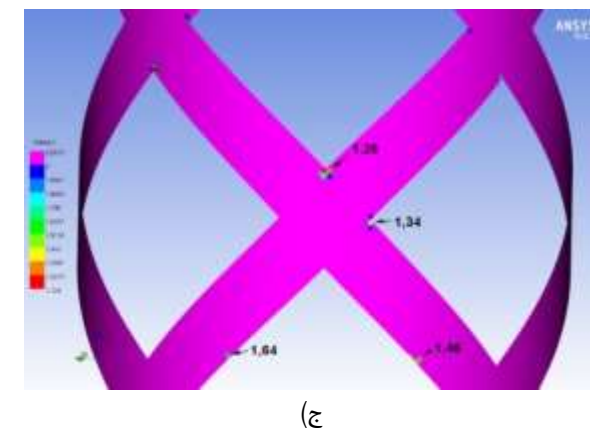
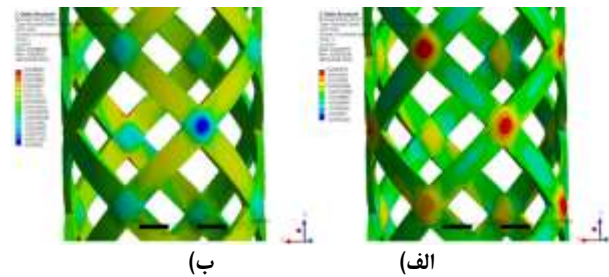
چهارم پس از تست نمونه ساخته‌شده، نتایج حاصل از روش تحلیلی، روش المان محدود با نتایج حاصل از تست نمونه مقایسه می‌شوند.

با استفاده از داده‌های سازه‌ای و ویژگی‌های مواد انتخابی، یک مدل محاسباتی برای تجزیه و تحلیل المان محدود توسعه داده شده است. مدل‌سازی توسط نرم‌افزار آنسیس انجام شده است، که پلتفرمی را برای تحلیل سازه‌ها فراهم می‌کند. لازم است که هندسه سازه شبکه‌ای، ویژگی‌های الیاف و رزین، شرایط مرزی و بارها در آنسیس تنظیم شود. چیدمان سازه مورد بررسی برای انجام محاسبات عددی دارای دنده‌های مارپیچی ساخته شده از کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن یک جهته است. علاوه بر این، مدل المان محدود سازه شبکه براساس این مدل هندسی خواهد بود. این سازه از کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن با ویژگی‌های خاص ساخته شده است. مدل‌سازی المان محدود سازه کامپوزیتی به این صورت است که دنده‌ها به صورت ساختارهای تک‌جهته و محل‌های تقاطع به صورت ساختارهای بافته شده در نظر گرفته شده‌اند. خواص مکانیکی کامپوزیت تک‌جهته تقویت شده با الیاف کربن در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی کامپوزیت تک‌جهته تقویت‌شده با الیاف کربن

$E_x$ , GPa	$E_y$ , GPa	$\sigma_x^+$ , GPa	$\sigma_x^-$ , GPa	$\sigma_y$ , GPa	$\tau_{xy}$ , GPa
۱۳۸*	۱۰/۵	۲/۵۵۰	۱/۴۷۰	۱/۶۷۰	۰/۰۶۹

\* مقدار میانگین بین مدول کششی و فشاری



شکل ۳- تغییر شکل سازه شبکه‌ای؛ الف) در امتداد محور  $z$  ب) در امتداد محور  $x$ ؛ ج) حاشیه ایمنی برای معیار Puck

رشته را می توان تعیین کرد. سپس تعداد رشته های محوری به صورت زیر تعیین می شود:

$$n_{axial} = \frac{\pi r}{a_1 + b_2}$$

تعداد لایه ها نیز از رابطه زیر به دست می آید:

$$m = \frac{D_{out} - D_{in}}{2(4a_1 + 2a_2)}$$

که در آن  $D_{out}$  قطر بیرونی و  $D_{in}$  قطر داخلی است. بعد از اینکه عرض رشته تعیین شد، تعداد قرقره های لازم برای نصب درون دستگاه بافت با استفاده از معادله (۳) محاسبه می شود. برای تنظیم دوک ها در دستگاه بافت دورانی به طور متقارن، تعداد لازم دوک ها باید به ۷۲ تقسیم شود، که تعداد کل دوک ها در دستگاه بافت دورانی مورد استفاده در پژوهش حاضر (HERZOG 1/144-100) ساخت کشور آلمان واقع در مرکز تکنولوژی های کامپوزیتی دانشگاه ملی تحقیقاتی فنی کازان روسیه) در یک جهت است. پس از ساده سازی کسر، قرقره ها به این صورت جای گذاری می شوند که برای مثال، اگر برای بافت پیش سازه ای فرضی هشت قرقره در هر جهت مورد نیاز باشد، آنگاه  $8/72 = 1/9$ ؛ یعنی برای حفظ تقارن باید از هر ۹ عدد دوک یکی توسط یک قرقره پر شده با الیاف بارگذاری شود [۱۹].

در فرآیند تولید پیش سازه در دستگاه بافت دورانی، زاویه تقویت کننده به سرعت زاویه ای، سرعت محوری قالب درون دستگاه شعاع قالب بستگی دارد.

$$\tan \alpha = \frac{r\omega}{V_0}$$

سرعت زاویه ای چرخش دوک ها نسبت به محور دستگاه بافت دورانی با معادله زیر تعیین می شود:

$$\omega = \frac{4\pi f_h}{N_h}$$

که به ترتیب  $f_h$  و  $N_h$  فرکانس چرخش و تعداد دوک های دستگاه بافت دورانی است. سپس سرعت محوری قالب برای قالب استوانه ای و مخروطی تعیین می شود. برای قالب استوانه ای با استفاده از معادله (۶)، سرعت محوری قالب به صورت زیر تعیین می شود:

$$V_0 = \frac{r\omega}{\tan(\alpha)}$$

برای یک مخروط، شعاع هر بخش با استفاده از معادله زیر تعیین می شود:

$$r_i = \frac{x}{L}(r_1 - r_0) + r_0$$

که شعاع  $r_i$  سطح مقطع مخروط است، که در امتداد محور آن تغییر می کند. برای اینکه زاویه بافت الیاف بر روی سطح مخروط ثابت بماند، لازم است نرخ تغذیه قالب برای فرآیند بافت بر روی قالب مخروطی به صورت زیر تنظیم شود.

$$V_i = \frac{\omega}{\tan(\alpha)} \left( \frac{x}{L}(r_1 - r_0) + r_0 \right)$$

کرد. ضریب پوشش، سطح اشغال شده توسط الیاف به سطح کل سازه استوانه ای شکل است.

$$L_f = \int_0^L \sqrt{\frac{dx^2}{dt} + \frac{dy^2}{dt} + \frac{dz^2}{dt}} dt = \frac{L}{\cos \alpha} \quad (2)$$

$$k = \frac{L}{2\pi r L} \frac{nb}{\cos \alpha} = \frac{nb}{2\pi r \cos \alpha} \quad (3)$$

که در آن n تعداد رشته های شعاعی در یک جهت است. اگر فرض کنیم که شکل رشته های شعاعی به موج سینوسی نزدیک تر است، خط محوری آن ها را می توان با معادلات زیر توصیف کرد (باید توجه داشت که رشته های محوری، تقریباً شکل مستقیم دارند و از انحنای آن ها صرف نظر می شود):

$$Y_{Biaxial} = \frac{A}{4} \sin\left(\frac{\pi}{B}x\right), Y_{Triaxial} = \frac{A}{3} \sin\left(\frac{\pi}{B}x\right) \quad (4)$$

که در آن A ضخامت یک لایه و B فاصله بین مراکز رشته ها است. از آنجایی که ما یک سلول واحد را در نظر می گیریم، اگر فرض شود که سلول واحد فقط از رشته الیاف و رزین تشکیل شده است، (ینی ناخالصی و هوا درون سلول واحد وجود ندارد) و کل رشته فقط از الیاف تشکیل شده باشد، آنگاه نسبت حجمی الیاف برابر است با نسبت حجم رشته در سلول واحد به حجم کل سلول واحد. با استفاده از معادله (۴)، بدست آوردن یک عبارت برای تعیین حجم الیاف بافت دو محوری و سه محوری امکان پذیر است: (۵)

$$v_{fBiaxial} = \frac{4b_1}{\pi b_f} \xi \left( \frac{\pi}{b_f} \left| \frac{1}{\beta} \right. \right) \sqrt{a_1^2 + \gamma^2}$$

$$v_{fTriaxial} = \frac{8a_1 b_1}{\pi b_f} \xi \left( \frac{\pi}{b_f} \left| \frac{1}{\beta} \right. \right) \sqrt{(2a_1)^2 + \gamma^2} + \frac{4a_2 b_2}{\pi b_{axial}}$$

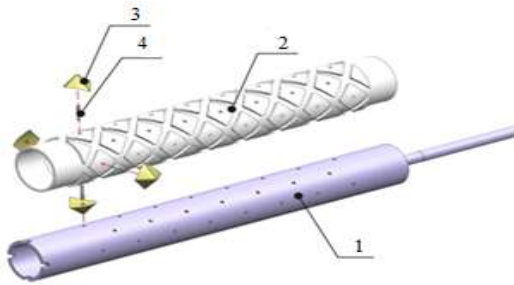
که در آن  $\beta = 1 + \left(\frac{b_f}{\pi a_1 \cos \alpha}\right)^2$ ،  $\gamma = \frac{b_f}{\pi \cos \alpha}$  و  $\xi$  انتگرال

بیضوی نوع دوم است.  $b_f$ ،  $b_{axial}$  فواصل بین مراکز رشته های شعاعی و محوری؛  $a_1$ ،  $b_1$  به ترتیب شعاع های کوچک و بزرگ رشته های شعاعی؛  $a_2$ ،  $b_2$  به ترتیب شعاع های کوچک و بزرگ رشته های محوری هستند.

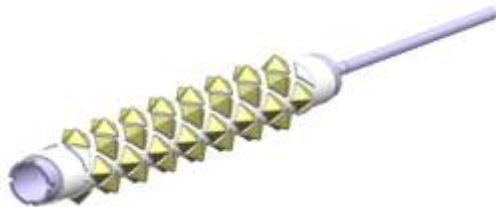
به منظور تعیین پهنای رشته یا به عبارت دیگر تعداد الیاف در یک رشته، یک رشته با تعداد مشخص الیاف برای مثال M46J-12K انتخاب می شود. سطح مقطع رشته به صورت  $S = \frac{l_f}{\rho_f}$  محاسبه می شود، که در آن  $l_f$  چگالی خطی و  $\rho_f$  چگالی الیاف است. سطح مقطع رشته برابر با  $S = \frac{8}{\pi} a_1 b_1$  است. سطح مقطع رشته ثابت است، یعنی  $a_1 = f(b_1)$ . اگر فرض کنیم که ضریب پوشش ۱ است، آنگاه برای بافت دو محوری  $b_f = 2b_1$  و برای بافت سه محوری  $b_f = 2b_1$  و  $b_f = b_f$  و  $2(a_1 + b_2)$  بنابراین رابطه  $V_f = f(b_1)$  برقرار است. بنابراین عرض



میلی متر هستند. قالب مخصوص درون دستگاه بافت دورانی قرار داده می شود. لازم به ذکر است برای نمونه ساخته شده از دستگاه بافت دورانی RF1/144-100 شرکت آلمانی HERZOG استفاده شده است. قرقره ها با الیاف کربن T700S-12K بارگذاری می شوند و فرایند بافت انجام شده است. فرایند بافت الیاف حول قالب مخصوص در شکل (۵) نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)



(ج)



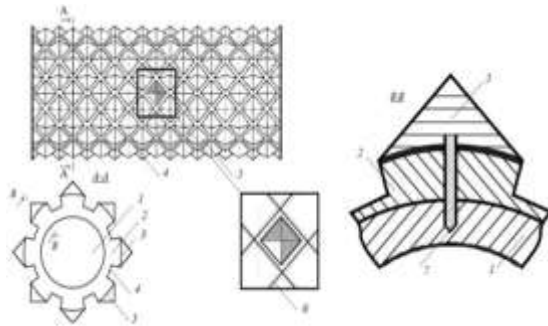
(د)

شکل ۵- (الف) قالب مخصوص بافت پیش سازه شبکه ای؛ (ب) اجزای قالب مخصوص؛ (ج) فرایند بافت پیش سازه؛ (د) پیش سازه شبکه ای

بنابراین، به دست آوردن سرعت حرکت محوری قالب مورد نیاز با برنامه نویسی گام به گام کنترل کننده چندمحوری دستگاه بافت دورانی امکان پذیر است.

## ساخت نمونه آزمایشگاهی

نتایج مطالعات تجربی و محاسباتی را باید به منظور تایید روش های تعیین پارامترهای طراحی مقایسه کرد. سازه شبکه ای استوانه ای هوافضایی برای تست استحکام و سختی ساخته شده است. براساس الزامات فنی سازه مورد بررسی، مدول الاستیک باید  $1/2$  گیگا پاسکال و مقاومت نهایی باید  $10$  مگا پاسکال باشد. قالب مخصوص برای تولید سازه شبکه ای مورد نیاز است (شکل ۴). این قالب از یک هسته مرکزی تشکیل شده است که با لایه ای از الاستومر پوشیده شده است که دارای قله ها و دره های تشکیل دهنده شیارهای طولی و مارپیچی است؛ و زائده هایی که برای هدایت الیاف در حین فرایند بافت طراحی و بر روی قله ها به کمک پیچ متصل می شوند.



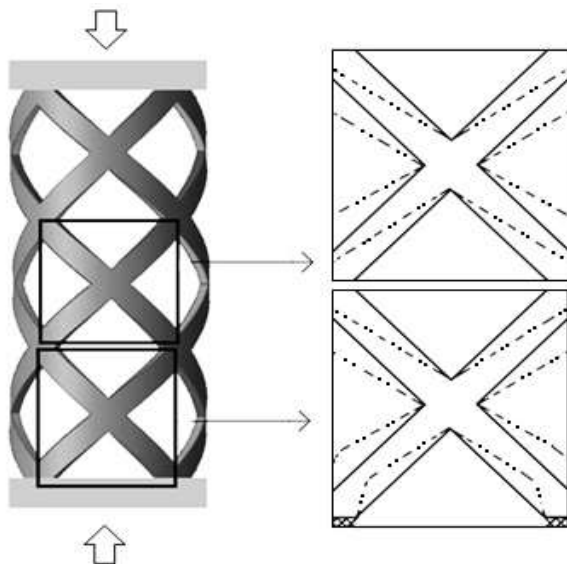
شکل ۴- شماتیک قالب مخصوص تولید سازه های شبکه ای به روش بافت دورانی الیاف: ۱. قالب استوانه ای شکل که دارای ابعاد داخلی سازه نهایی است. ۲. روکش دندانه ای شکل که الیاف درون شیارهای آن قرار می گیرند. ۳. دندانه روکش که دارای ابعادی متناظر با فضای خالی سازه شبکه ای است. ۴. شیارهای قرارگیری الیاف در حین فرایند بافت الیاف. ۵. مخروط های متحرک که برای هدایت الیاف در حین فرایند بافت طراحی شده اند و با پیچ به روکش دندانه ای شکل متصل می شوند و بعد از فرایند بافت جدا می شوند. ۶. شیارهای قرارگیری الیاف در حین فرایند بافت الیاف در دستگاه بافت دورانی. ۷. پیچ متصل کننده قسمت مخروطی شکل به روکش دندانه دار.

فرایند تولید سازه های شبکه ای بافته شده از الیاف کربن با ساخت قالب مخصوص آغاز می شود. قالب می تواند از جنس آلومینیوم یا ماده دیگری دارای مقاومت کافی در برابر کشش الیاف باشد. این قالب به صورت استوانه ای با ابعاد سازه مورد نظر با برجستگی های مخروطی شکل که با پیچ به قالب متصل شده اند، که به منظور هدایت الیاف در حین فرایند بافت در موقعیت مورد نظر تعبیه شده اند.

قالب مخصوص در شکل (۵) نمایش داده شده است. ابعاد استوانه و برجستگی های مخروطی شکل بستگی به ابعاد سازه مورد نظر دارد. برای نمونه ساخته شده، ارتفاع و قطر استوانه به ترتیب  $40$  و  $10$  میلی متر در نظر گرفته شده است همچنین برجستگی های مخروطی شکل هم دارای قاعده مربعی شکل به ضلع  $30$  میلی متر و ارتفاع  $30$

۲. انتخاب آزمایش: آزمایش فشاری که در اصل، بارگذاری فشاری کوتاه مدت سازه کامپوزیتی با سرعت ثابت تغییر شکل است. در نتیجه این آزمایش پارامترهای مقاومت فشاری نهایی (تنش تحت بار ماکزیمم قبل از شکست نمونه) و مدول فشاری تعیین می شوند. ۳. تعریف و انتخاب پارامترهای ورودی و خروجی و تجزیه و تحلیل نتایج: بار اعمالی پارامتر ورودی است و تغییر شکل سازه شبکه‌ای تحت بار محوری و حداکثر بار در هنگام شکست پارامترهای خروجی هستند. ۴. تجزیه و تحلیل آماری داده‌های تجربی در نرم افزار بلوهیل ۲ انجام و تغییر شکل با سیستم VIC سه بعدی اندازه گیری شد. ۵. تحلیل نتایج.

قبل از آزمایش، پیش بینی نتیجه مورد انتظار ضروری است. شکل ۷ تغییر شکل سلول واحد سازه شبکه‌ای تحت بار محوری را نشان می دهد. همانطور که در شکل نشان داده شده است، انتظار می رود که شکست در نزدیکی انتهای سازه رخ دهد زیرا در برابر تغییر شکل دنده مقاومت می کند.



شکل ۷- تغییر شکل مورد انتظار در واحد اولیه سازه شبکه‌ای تحت فشار؛ لبه‌های دنده‌ها قبل از بارگذاری، لبه‌های دنده‌ها در حین بارگذاری

پس از اینکه نمونه‌های سازه شبکه‌ای تولید شدند، توزین می شوند. نتایج به شرح زیر است: نمونه شماره یک ۱۱۳/۶۱ گرم، نمونه شماره دو ۱۱۲/۳۱ گرم، نمونه شماره سه ۱۱۱/۲۵ گرم.

شکل ۶-الف) دستگاه الکترومکانیکی اینسترون ۵۸۸۲ (۱۰۰ کیلو نیوتن) را نشان می دهد. حداکثر بار نهایی ۱۰۰ کیلو نیوتن و خطای اندازه گیری بار ۰/۵٪ ± است. شکل ۶-ب) نمای کلی از گیره‌ها برای آزمایش فشاری سازه شبکه‌ای را نشان می دهد: این یک صفحه پایینی ثابت و یک صفحه بالایی متحرک است. آزمایش به این صورت است که نیرویی به صفحه بالایی اعمال می شود و تغییرات حاصل از این نیرو مورد بررسی قرار می گیرد.

بعد از اتمام فرایند بافت الیاف کربن بر روی قالب مخصوص، برجستگی‌های مخروطی شکل از قسمت استوانه‌ای جدا می شود و سپس به روش RTM فرایند چسب کاری انجام می شود. از چسب اپوکسی T-26 استفاده شده است و نسبت حجمی الیاف در محل‌های غیر متقاطع ۷۵ درصد و در محل‌های متقاطع ۵۷ درصد است. در این روش الیاف بافته شده همراه با قالب مخصوص درون محفظه قرار می گیرند. سپس محفظه بسته شده و توسط گیره و یا به کمک پرس با فشار پایین در این حالت نگه داشته می شود. سپس رزین مخلوط شده با عامل پخت از طریق ورودی به داخل محفظه تزریق می گردد. ضمن حرکت رزین در میان الیاف و خیس نمودن آن‌ها، هوای محبوس شده داخل محفظه از محل‌های خروجی خارج می گردد و محفظه توسط رزین پر می شود. پس از پخت رزین و در نهایت پس از فرایند خنک کاری قالب خارج و سازه شبکه‌ای بافته شده از الیاف کربن برای مرحله تست آماده است. (شکل ۶)



الف)



ب)

شکل ۶-الف) نحوه آغشته سازی الیاف به رزین اپوکسی، ب) سازه شبکه‌ای کامپوزیتی آماده تولید شده از الیاف بافته شده

## مطالعات آزمایشگاهی

برای صحت سنجی نتایج حاصل از محاسبات تحلیلی و عددی، تست مکانیکی سازه شبکه‌ای در نظر گرفته شده است. تست استاتیک با استفاده از دستگاه تست الکترومکانیکی اینسترون ۵۸۸۲ (۱۰۰ کیلو نیوتن) و گیره‌ها و لوازم جانبی خاص انجام شده است. مراحل تست به شرح زیر است:

۱. هدف تست: مقایسه نتایج حاصل از محاسبات تحلیلی و نتایج تجربی.



(ب)

ادامه شکل ۹- الف) تغییر شکل یک واحد سلولی سازه شبکه‌ای در امتداد محور x تحت نیروی ۷ کیلو نیوتن، (ب) ناحیه شکست نمونه

### بحث و بررسی

برای ساخت المان‌های آنتن چتری فضایی، سازه شبکه‌ای بافته شده با روش باقت دورانی پیشنهاد شده است. این سازه متشکل از مسیریهای با زوایای مثبت و منفی است که این مسیرها عمود بر هم بوده و از قرار گرفتن الیاف کربن کنار هم ایجاد و در محل‌های تقاطع در هم تنیده هستند. برای طراحی این سازه‌ها پارامترهای هندسی، ساختاری و تکنولوژی تعیین می‌شوند. به این صورت که با استفاده از پارامترهای هندسی و ساختاری مدل سازه مورد نظر ایجاد و در نرم افزار مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورتی که الزامات طراحی سازه برآورده شوند، پارامترهای تکنولوژی که مربوط به دستگاه بافت دورانی است، تعیین و نمونه آزمایشگاهی برای صحت‌سنجی محاسبات نرم‌افزاری تولید می‌شود و در نهایت با انجام مطالعات آزمایشگاهی فرایند طراحی سازه‌های شبکه‌ای بافته شده از الیاف کربن تکمیل می‌شود.

براساس نتایج اندازه‌گیری، رابطه کرنش فشاری بارگذاری فشاری نمونه سازه شبکه‌ای رسم شد (شکل ۱۰). علاوه بر این، مقایسه‌ای از نتایج تجربی و محاسبه شده ارائه شده است. با استفاده از نمودار کرنش فشاری در مقابل بارگذاری فشاری و حداکثر کشش بار، مدول و مقاومت نهایی نمونه سازه شبکه‌ای تعیین شده است. شایان ذکر است که مدول الاستیسیته با توجه به شیب نمودار تنش کرنش محوری در ناحیه خطی محاسبه شده است. همچنین مقاومت نهایی با توجه به ایجاد آسیب و ترک قابل توجه در نمونه تعیین شده است. همان‌طور که در جدول ۳ نشان داده شده است، نتایج مطالعات تجربی تطابق خوبی با الزامات مورد نیاز سازه‌ای نشان داده است. مقایسه داده‌های محاسبه شده و تجربی همبستگی خوبی را نشان داد. لازم به ذکر است که مقادیر آورده شده در جدول ۳ میانگین مقادیر مربوط به سه نمونه تحت آزمایش است.



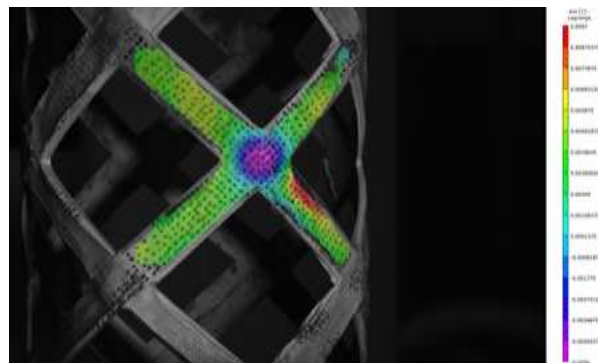
(ب)



(الف)

شکل ۸- دستگاه الکترومکانیکی اینسترون، الف) طرح تست سازه شبکه‌ای؛ (ب) آزمایش فشاری

براساس محاسبات، شکست از ۷ کیلو نیوتن شروع می‌شود، بنابراین می‌توان گفت که تا ۷ کیلو نیوتن نمونه‌های سازه شبکه‌ای در ناحیه خطی نمودار تنش کرنش قرار دارند، پس نمونه سازه شبکه‌ای تا ۷ کیلو نیوتن بارگذاری می‌شود. پس از برداشتن بار، هیچ گونه آسیب و ترک قابل توجهی مشاهده نشد. پس از آن، نمونه تا بیش از ۷ کیلو نیوتن بارگذاری شد. شکل ۹ الف)، تغییر شکل سلول واحد سازه شبکه‌ای را در امتداد محور x تحت بارهای مختلف و شکل ۹ ب)، ناحیه شکست نمونه سازه شبکه‌ای را نشان می‌دهد. همچنین مقاومت نهایی با توجه به ایجاد آسیب و ترک قابل توجه در نمونه تعیین شد. تغییر شکل قابل مشاهده در نمونه مورد آزمایش مشابه تغییرات مورد انتظار در واحد اولیه سازه شبکه‌ای تحت فشار است. به این صورت که لبه‌های دنده‌ها در حین بارگذاری تغییرات بیشتری دارد و مرکز واحد اولیه دارای کمترین تغییر است. چون در اثر بارگذاری مرکز واحدها به هم نزدیک‌تر می‌شوند.



(الف)

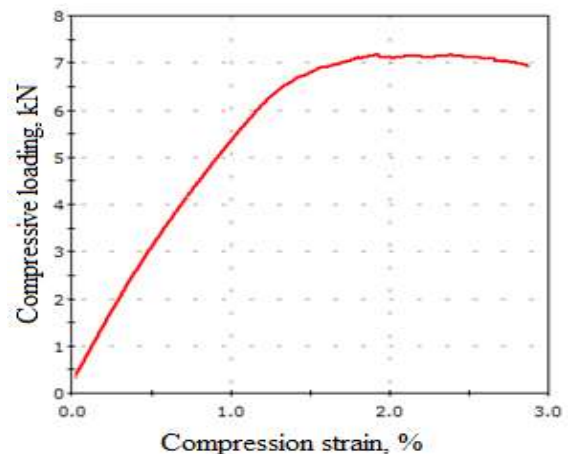
شکل ۹- الف) تغییر شکل یک واحد سلولی سازه شبکه‌ای در امتداد محور x تحت نیروی ۷ کیلو نیوتن، (ب) ناحیه شکست نمونه

## مراجع

- [1] Q. Zhang, D. Beale, and R.M. Broughton, "Analysis of circular braiding process, Part 1: theoretical investigation of kinematics of the circular braiding process," *Journal of Manufacturing Science and Engineering ASME*, vol.121, p.p 345-350, 1999.
- [2] A.R Toloei , M Zarchi , and B Attaran , " Application of active suspension system to reduce aircraft vibration using pid technique and bees algorithm," *International Journal of Computer Applications* , Vol.98 , No 6 , 2014.
- [3] S.V. Lomov, A. Nakai, R.S. Parnas, S. Bandyopadhyay Ghosh, and I. Verpoest, "Experimental and theoretical characterisation of the geometry of flat two- and three-axial braids," *Textile Research Journal*. Vol .72, No 8, P.P 706-712, 2002.
- [4] J. Carey, A. Fahim, and M. Munro, " Predicting elastic constants of 2D-braided fiber rigid and elastomeric-polymeric matrix composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 23, No. 17, P.P 1845-1857, 2004.
- [5] C. Ayranci, and J.P. Carey, " Predicting the longitudinal elastic modulus of braided tubular composites using a curved unit-cell geometry," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 41, No.3, P.P. 229-235, 2010.
- [6] F. T. Pierce, " 5-The geometry of cloth structure," *Journal of Textile Institute Transactions*, Vol. 28. No.3, T 45-T97. 1937.
- [7] J. Carey, M. Munro, and A. Fahim, " Regression-based model for elastic constants of 2D braided/woven open mesh angle-ply composites," *Polymer Composites*, Vol. 26, No.2, P.P. 152-164, 2005.
- [8] L. Joalu, Y. Jiao, Y. Sun, and L. Wei, " Experimental investigation of cut-edge effect on mechanical properties of three-dimensional braided composites," *Materials & design*, Vol.28, No.9, P.P 2417-2424, 2007.
- [9] R. K. Gideon, H. Zhou, Y. Li, B. sun, and B. GU "Quasi-static compression and compression-compression fatigue characteristics of 3D-braided carbon/epoxy tube," *Journal of the Textile Institute*, Vol. 107, No. 7, P.P. 938-948, 2016.
- [10] T. Ziyang, Y. Yan, L. Jie, Y. Hong, and F.Guo, "Progressive damage and failure analysis of three-dimensional braided composites subjected to biaxial tension and compression," *Composite Structures*, Vol. 185, P.P. 496-507, 2018.
- [11] H. Wang, B. Sun, and B. Gu. " Numerical modeling on compressive behaviors of 3D-braided composites under high temperatures at microstructure level," *Composite Structures*, Vol. 160, P. P. 925-938, 2017.
- [12] G. D. Fang, J. Liang, Y. Wang, and B. L. Wang, "The effect of yarn distortion on the mechanical properties of 3D four-directional braided composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. Vol. 40, No. 4, P. P. 343-350, 2009.
- [13] L. Chen, X.M. Tao, and C.L. Choy "Mechanical analysis of 3-D braided composites by the finite multiphase element method," *Composites and Technology* Vol. 59, No. 16, P.P 2383-2391, 1999.
- [14] V. V. Vasil'ev, and V. A. Bunakov, "Design axially compressed lattice composite cylindrical shells," *Composite Structures*, Vol. 2, P.P. 68-77, 2000.
- [15] V. V. Vasil'ev, V. A. Barynin, and A. F. Razin, "Anisogrid

## جدول ۳- مقایسه مطالعات تجربی و الزامات طراحی

درصد خطا	نتایج حاصل از تست	الزامات طراحی سازه	
۷/۵٪	۱/۱۱	۱/۲	مدول الاستیسیته، گیگاپاسکال
۸/۵٪	۹/۱۵	۱۰	مقاومت نهایی، مگاپاسکال



شکل ۱۰. کرنش فشاری در مقابل بارگذاری فشاری

## نتیجه گیری

مطالعات تجربی نمونه‌های سازه شبکه‌ای، در مرکز تکنولوژی کامپوزیت (KNRTU - KAI، کازان، روسیه)، برای تأیید روش‌های پیشنهادی انجام شده است. در ابتدا روش طراحی تحلیلی به کمک محاسبات عددی با استفاده از نرم‌افزار آنسیس تأیید و پارامترهای تکنولوژیک برای فرایند بافت پیش‌سازه محاسبه شدند. سپس یک روش برای تولید سازه شبکه‌ای چند لایه با استفاده از قالب مخصوص توسعه داده شد. نتایج محاسبات و مطالعات تجربی با هم مقایسه و نشان داده شد که خطای تست نمونه ساخته شده با الزامات طراحی در پارامتر مدول الاستیسیته ۷/۵ درصد و در پارامتر مقاومت نهایی ۸/۵ درصد است. می‌توان نتیجه گرفت که روش طراحی پیشنهادی و فرایند بافت با استفاده از قالب طراحی شده، با قابلیت انجام تجزیه و تحلیل سریع خواص مکانیکی سازه شبکه‌ای این امکان را فراهم می‌کند که در طراحی سازه شبکه‌ای تقویت شده با الیاف کربن بافته شده به کار گرفته شود.

## تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

- [18] S. A. Samipour, V. I. Khaliulin, and V. V. Batrakov, "Development of the Technology of Manufacturing Aerospace Composite Tubular Elements by Radial Braiding," *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, Vol. 47, No.3, P.P. 284-289, 2018.
- [19] S. A. Samipour, V. I. Khaliulin, and V. V. Batrakov, " A Method for Calculating the Parameters for Manufacturing Preforms via Radial Braiding," *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, Vol. 46, No. 3, P.P. 302-308, 2017.
- lattice composite structures – design and application in aerospace technology," *Composites and nanostructures*, Vol.3, P.P. 38-50, 2009.
- [16] S.A. Samipour, & V.V. Batrakov, "Determining the Design Parameters of Braided Aerospace Composite Lattice Structures," *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, Vol.51. No.1, P.P. 71-79, 2022.
- [17] S. A. Samipour, and Ya. S. Danilov, " Development and verification of an analytic technique to determine the stiffness parameters of braided tubular parts," *Russian Aeronautics*, Vol. 59, No. 4, P.P. 460-465, 2016.