



Developing a New Manufacturing Method and Numerical and Experimental Investigation of Buckling Behaviour of Cylindrical Fish Cell Metastructure

Vahid Zal^{1*}, Mohammad Habibi², Amir Hossein Jafari-Marbini³

¹Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran.

²MSc, Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran.

³BSc, Department of Mechanical Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 09.09.2023

Revised: 11.28.2023

Accepted: 12.03.2023

Keyword:

Cellular Metastructure

Fish Cell

Laser Cutting

Cylindrical Shell

Buckling

*Corresponding Author:

Vahid Zal

Email: Zal@qut.ac.ir

ABSTRACT

Fish cell cellular metastructures have received wide interest from researchers due to their zero Poisson ratio behaviour. However, their production, which is mainly based on additive manufacturing processes, is one of their limitations. Therefore, in this research, a new method based on the conventional manufacturing processes including laser cutting and metal forming was presented for the production of metallic cylindrical metastructures. Two samples were manufactured using this method and their quality was verified using mechanical and non-destructive tests. The samples' mechanical and buckling behaviour under uniaxial compression were simulated using ABAQUS FEM package and experimentally validated. This was followed by the effects of the metastructures' geometrical parameters including the cylinder diameter, height and thickness on their linear buckling being investigated numerically, and the results compared with the outcome of classic theories for conventional cylinder buckling. The results showed that these metastructures can be produced successfully with the conventional manufacturing processes, and the buckling behaviour of these metastructures does not follow the classical buckling theories of cylinders; their buckling behaviour shows much lower sensitivity to the thickness and radius changes in comparison with conventional cylinders.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Metastructures are a new generation of cellular structures which are made artificially to achieve different mechanical, thermal, electrical characteristics which are not achievable through conventional materials. Mechanical metastructures have the most application and are widely investigated to achieve structures with special features such as negative Poisson's ratio (auxetic structures), zero Poisson's ratio (ZPR structures) and high energy absorption capabilities. Many different cell shapes have been developed to achieve these desired properties.

Dayyani et al. have recently developed a new cell to achieve ZPR metastructures which the cell is a combination of a hexagonal shape (positive poisson ratio) and a reentrant shape (negative poisson ratio), and due to its similarity, they named it *Fish Cell*. They have intensively studied this metastructure's mechanical behavior, its modification, and applications. Despite the extensive research on these metastructures, their buckling behavior have not yet been studied, and therefore, in this research, its buckling behaviour was investigated experimentally and numerically using ABAQUS FEM simulation package. Another remarkable innovation of this research is presenting a new inexpensive manufacturing process for the metastructures. The metastructures are mostly produced using additive manufacturing techniques which are low-speed processes and have material limitations. Regarding these weaknesses, the conventional laser cutting and metal forming processes were used successfully in this research to produce cylindrical steel fish cell metastructures.

Methodology

A 1.2 mm thickness cold rolled AISI 1075 steel sheet with yield strength of 340 MPa, was used to manufacture the cylindrical metastructures. First, planar 2D cells were cut through RT1530NC laser cutting machine, and then the planes were 3-rolls bended to 114.6 mm diameter cylinders. After this forming step, the seam was welded using tungsten inert gas (TIG) welding with the same filler material. All the manufacturing process sequencies are shown in Figure 1.

Due to the fine and thin ligaments of the fish cells, use of the conventional laser cutting process resulted in oxidation, overheating, and melting of the ligaments, therefore an optimization was carried out on the processing parameters and inert Nitrogen gas was used to successfully carry out the cutting process. The processing parameters of laser cutting are presented in Table 1.

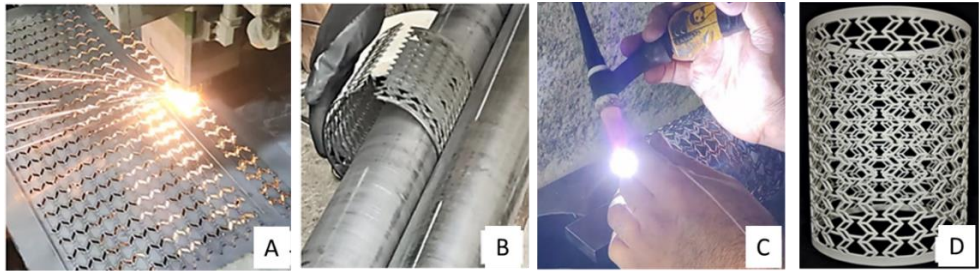


Figure 1. Manufacturing sequences of the experimental samples: (A) laser cutting; (B) three rolls bending; (C) TIG welding; and (D) painted metastructural cylinder.

Table 1. Parameter values of the steel plate laser cutting process (Laser Cutting Machine).

Processing Parameters	Laser Power (watt)	Cutting speed (mm/s)	Laser Type	Cutting Atmosphere	Movement Accuracy (mm)
Value	1500	15.5	Fiber	N2	±0.05

The cylinders were then tested under axial compression loading with a speed of 0.5 mm/min and their effective stress-strain curves were achieved along with buckling strain which was measured using Plot Digitizer image processing software. The samples' mechanical and buckling behaviour were also simulated using ABAQUS package and validated by experimentally achieved results. The unit cell of these metastructures was composed of two fish cells in opposite directions which were connected through two ligaments as shown in Figure 2; periodic repeat of m unit cells in longitudinal and n cells in circumferential directions make $m \times n$ cell metastructure.

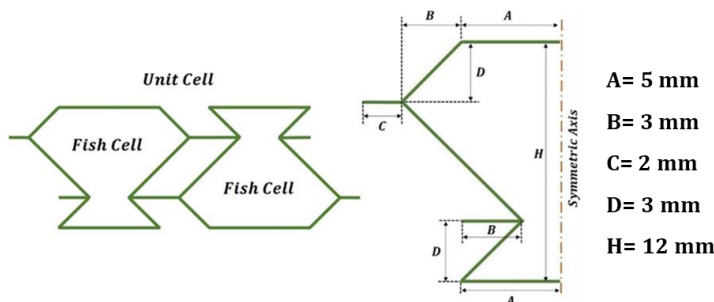


Figure 2. Unit cell of the studied metastructure, composed of 2 opposite fish cells.

Results and discussion

The buckling mode shape and effective stress-strain curves from FEM simulations and experimental tests of a 12×12 cell metastructure are presented in Figure 2-A, B and C. As can be observed, the buckling mode shape of both experimental and FEM results was the same and their buckling strains were 0.04 and 0.0415, respectively, implying that FEM simulation predicted the buckling at 3.75% higher strains. The FEM simulation models the metastructures elastic behaviour very accurately, but some errors were seen for its yield strength and ultimate strength. These errors were due to the manufacturing process which heavily relies on the thermal process of laser cutting, where a large temperature increase

occurs in the cutting area (HAZ). On the other hand, due to the delicate dimensions of the cells, the cooling occurs at a high rate, so a type of unwanted heat treatment such as quenching occurs, which strongly affects the mechanical strength of the material.

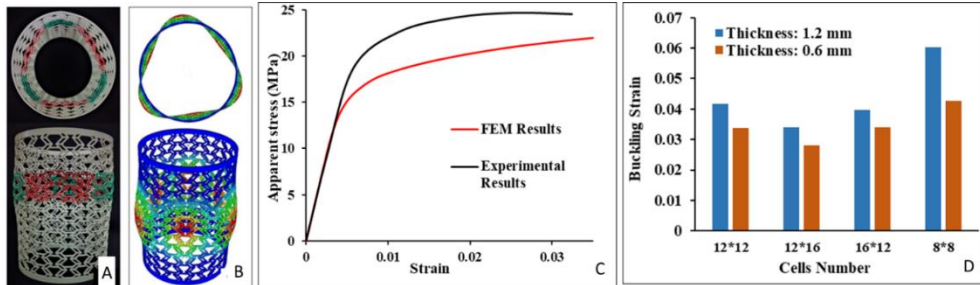


Figure 2. Experimental (A) and FEM simulation(B) buckling mode shape of a 12×12 metastructure; C: apparent stress-strain curves; and D: the metastructures' dimensional change effect on the buckling strain.

After the buckling simulation validation, the metastructures dimensional variation effects on its buckling strain were simulated and presented in Figure 2-D. The results showed that increasing the thickness of the cylinder increases buckling strain, but this increase is not linear while, according to the classical theory of cylindrical shells, buckling is linearly related to thickness. This is due to the rectangular arms of these metastructures which could buckle in any direction that is weaker. The height of the metastructures does not have a meaningful effect on the initiation of buckling, and increase in the cylinders' diameter reduces its buckling strain.

Conclusion

In this research, the production of steel fish cell cylindrical metastructures using conventional manufacturing processes including laser cutting, metal forming, and welding were conducted, and then the buckling behavior of these metastructures was studied experimentally and numerically. The main results are as follows:

- This metastructure can be successfully produced in precise dimensions by the laser cutting method. The use of nitrogen gas is necessary to improve its geometric accuracy.
- This production method of the metastructure does not affect its elastic and buckling characteristics, but due to HAZ, an increase in its strength occurs which intensifies in delicate geometries.
- The fish cell metastructures buckle locally and their height does not have much effect on the strain and mode shape of the buckling. In addition, increasing the thickness and decreasing the radius of the metastructure increase the buckling strain. However, the trend of these effects does not follow the buckling of conventional cylindrical shells under axial compression.



دانشگاه فنی و حرفه‌ای
تکنولوژی و مهارت

کارافان

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

پاییز ۱۴۰۲، دوره ۲۰، شماره ۳، ۳۱-۱۳

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

doi: [10.48301/KSSA.2024.414483.2687](https://doi.org/10.48301/KSSA.2024.414483.2687)



شابای الکترونیکی: ۴۴۳-۲۵۲۸

شابای چاپی: ۹۷۹۶-۲۳۸۲

مقاله پژوهشی

ارائه روش جدید ساخت و بررسی عددی و تجربی رفتار کمانش فراسازه استوانه‌ای ماهی شکل

وحید زال^{۱*}، محمد حبیبی^۲، امیر حسین جعفری ماریینی^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران.

۲- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران.

۳- کارشناسی مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران.

چکیده

فراسازه‌های سلولی ماهی شکل با توجه به رفتار ضریب پواسون صفر آنها، مورد توجه گسترده پژوهشگران قرار گرفته‌اند. با این وجود، روش ساخت آنها که عمدتاً مبتنی بر ساخت افزایشی است، یکی از محدودیت‌های این فراسازه‌ها محسوب می‌شود. لذا در این پژوهش یک روش جدید مبتنی بر فرایندهای ساخت متعارف شامل برش لیزری و شکل‌دهی برای ساخت فراسازه‌های پوسته‌ای استوانه‌ای از جنس فلز ارائه شد. دو نمونه فراسازه استوانه‌ای با این روش ساخته شد و کیفیت آنها با استفاده از آزمون‌های مکانیکی و بررسی‌های غیر مخرب تایید شد. همچنین رفتار نیرویی و کمانشی این فراسازه‌ها تحت بارگذاری فشاری محوری، با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس شبیه‌سازی شده و با نتایج تجربی اعتبارسنجی شدند. در ادامه تأثیر پارامترهای مختلف هندسی فراسازه شامل قطر، ارتفاع و ضخامت بر رفتار الاستیک و کمانش خطی آن شبیه‌سازی شد و نتایج با تئوری‌های کلاسیک کمانش پوسته‌های استوانه‌ای مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج حاصل نشان داد که فراسازه‌های پوسته‌ای استوانه‌ای را می‌توان با موفقیت با روش‌های ساخت متعارف تولید کرد، همچنین مشخص شد که رفتار کمانشی این فراسازه‌ها از تئوری‌های کلاسیک کمانش پوسته‌های استوانه‌ای پیروی نمی‌کند و تأثیر ضخامت و شعاع انحنای این فراسازه‌ها بر روی کمانش، بسیار کمتر از پوسته‌های استوانه‌ای متعارف است.

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۶/۱۸

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۰۷

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۲

کلید واژگان:

فراسازه سلولی
سلول ماهی شکل
برش لیزری
پوسته استوانه‌ای
کمانش

*نویسنده مسئول: وحید زال

پست الکترونیکی:

Zal@qut.ac.ir



©2023 Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

مقدمه

فراسازه‌ها^۱ نسل جدیدی از مواد مصنوعی هستند که به منظور ایجاد خواص مکانیکی، الکتریکی و گرمایی خاص که با مواد متعارف و مرسوم قابل دستیابی نیستند، توسعه یافته‌اند. این خواص خارق‌العاده در این دسته از مواد که در مقیاس بزرگ متخلخل هستند، به دلیل هندسه خاص آنها می‌باشد و جنس ماده به کار رفته در سازه، دارای رفتار متعارف است. چیدمان متناوب هندسه خاصی که به نام سلول واحد شناخته می‌شود، می‌تواند سازه‌های دوبعدی و سه‌بعدی با خواص مختلف ایجاد کند [۱]. فرامواد برای کاربردهای مختلف مکانیکی، الکتریکی و الکترومغناطیسی [۲] به کار گرفته می‌شوند، با این وجود، فرامواد مکانیکی بیشترین کاربرد را دارد و برای ایجاد خواص مکانیکی مختلف نظیر ایجاد ضریب پواسون منفی، افزایش قابلیت جذب انرژی و چقرمگی شکست، مورد پژوهش قرار گرفته‌اند [۳]. یکی از کاربردهایی که برای فرامواد دوبعدی (استوانه‌ای و صفحه‌ای) ارائه شده است، ایجاد سازه‌هایی با ضریب پواسون صفر (ZPR^2) می‌باشد چرا که این سازه‌ها در کشش جابجایی‌های عرضی از خود نشان نمی‌دهند و یا در خمش دچار انحنای نامطلوب دوبعدی نمی‌شوند و این مسأله این سازه‌ها را برای کاربردهایی نظیر جذب انرژی و پوسته‌های شکل‌پذیر^۳ بسیار مطلوب می‌کند [۴؛ ۵].

ذوالفقاریان و همکارانش [۶]، یک فراماده ZPR استوانه‌ای برای کنترل ارتعاش و همچنین کماتش ارائه کردند و نتایج بسیار مطلوبی را در مقایسه با استوانه‌های متعارف به دست آوردند. لی^۴ و همکارانش [۷]، فرامواد ZPR را برای ساخت سیلندرهای مقاوم به فشار برای سازه‌های عمیق اقیانوسی به کار گرفتند. لیو^۵ و همکارانش [۸]، یک فرامواد ZPR را به روش پرینت چهاربعدی از جنس پلیمر هوشمند تولید کردند که این فراماده متناسب با دما، خواص مکانیکی خود را تغییر می‌دهد. حمزه‌ای و همکارانش [۹]، با استفاده از فرایند پرینت سه‌بعدی پلیمر، سازه‌های ZPR با سلول‌های مختلف را تولید کردند و به بررسی جذب انرژی آنها پرداختند.

یک فراسازه جدیدی که بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است، توسط نقوی‌زاده و همکارانش [۱۰]، برای ایجاد رفتار ZPR توسعه یافته و به نام سلول ماهی‌شکل^۶ شناخته می‌شود. این فراماده نیز به روش پرینت سه‌بعدی تولید شده و رفتار الاستیک آن در حالت سازه ورقه‌ای شکل مورد بررسی قرار گرفته است [۱۱]. نمونه‌های استوانه‌ای از این فراماده به روش پرینت سه‌بعدی تف‌جوشی لیزری انتخابی^۷ توسط کوین^۸ و همکاران [۱۲]، ساخته شده و رفتار مکانیکی آن به صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در یک پژوهش دیگر توسط جها و دیانی^۹ [۱۳]، این فراسازه به عنوان یک کاندید با پتانسیل بالا برای پوسته‌های شکل‌پذیر معرفی شده و اتصالات جدید بازوهای سازه برای بهبود عملکرد آن معرفی شده است. اگرچه این سازه به صورت گسترده توسط دیانی و همکارانش مورد بررسی قرار گرفته و کاربردهای گسترده‌ای برای آن ارائه شده است، ولی رفتار کماتش آن به صورت محدود و در حد شبیه‌سازی عددی مطالعه شده است، درحالی‌که برای فراسازه‌های استوانه‌ای ماهی‌شکل با توجه به هندسه خاص آن و همچنین نیروهای فشاری زیادی که تحمل می‌کنند، مطالعه رفتار کماتشی از الزام بالایی برخوردار است. با توجه به این مسأله، در این

¹ Metamaterials/Metastructures

² Zero Poisson's Ratio

³ Morphing Skins

⁴ Li

⁵ Liu

⁶ Fish-Cell

⁷ Selective Laser Sintering

⁸ Qin

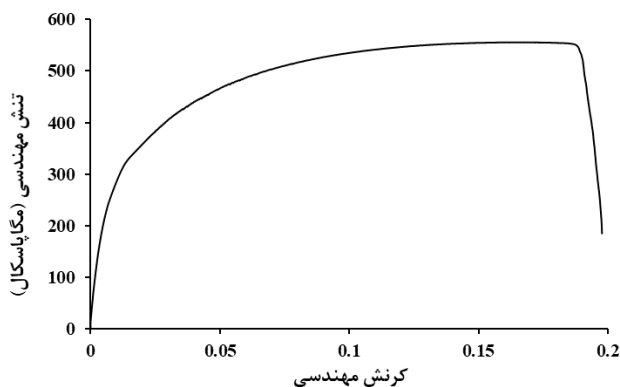
⁹ Jha & Dayyani

پژوهش رفتار کمانشی سازه استوانه‌ای فراسازه سلولی ماهی‌شکل به صورت تجربی و عددی بررسی شده و به مطالعه تأثیر ضخامت پوسته استوانه‌ای و همچنین تعداد سلول‌ها بر روی رفتار کمانشی سازه پرداخته شده است. نکته دیگری که راجع به فرامواد باید در نظر گرفت، روش ساخت آنها است که عمدتاً مبتنی بر روش‌های کم سرعت و پرهزینه ساخت افزایشی و پرینت سه‌بعدی هستند [۱۴؛ ۱۵]. این مسأله علاوه بر هزینه، موجب محدودیت زیاد در انتخاب جنس مواد پایه می‌شود، چرا که پرینت سه‌بعدی برای جنس‌های فلزی چندان به کار گرفته نمی‌شود. فرایندهای ساخت پرسرعت و متعارف نظیر برش لیزری می‌توانند به عنوان جایگزینی مناسب برای ساخت فرامواد با سلول‌های دوبعدی به کار گرفته شود. با توجه به این مسأله، در این پژوهش برای اولین بار سلول‌های ماهی‌شکل با فرایند برش لیزری بر روی ورق فولادی ایجاد شده و سپس با فرایند خمش سه‌گلتکی و جوشکاری تنگستن گاز خنثی (TIG^۱) فراماده استوانه‌ای با سلول ماهی‌شکل تولید شده و سپس تحت بارگذاری فشاری قرار گرفته است. این فرایند تولید بر روی هر جنس قابل جوشکاری قابل اجرا است و می‌تواند بر بسیاری از محدودیت‌های پرینت سه‌بعدی فائق آید.

مواد و روند آزمایش تجربی

مواد

ورق فولادی نورد سرد شده از جنس AISI 1075 (DIN Ck75) به ضخامت ۱.۲ میلی‌متر برای ساخت نمونه‌های آزمون‌های تجربی به کار گرفته شده است. آزمون کشش بر روی ورق مذکور در جهت نورد و با دو تکرار مطابق با استاندارد ASTM E8 انجام گرفته است که نمودار تنش-کرنش و مشخصات مکانیکی حاصل به ترتیب در شکل ۱ و جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. نمودار تنش-کرنش ورق فولادی AISI 1075 به کار رفته (ماده پایه).

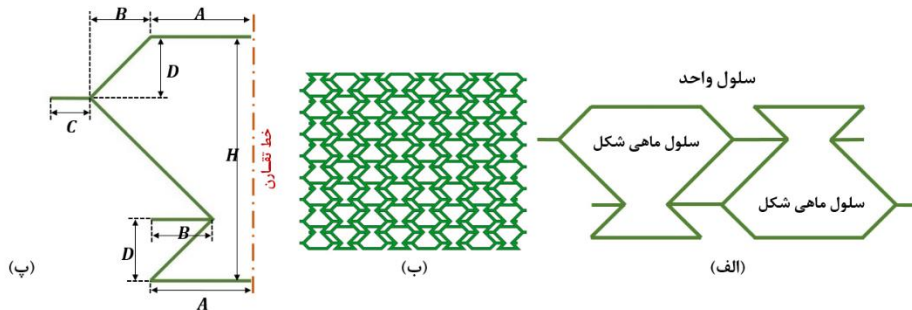
¹ Tungsten Inert Gas

جدول ۱. خواص مکانیکی ورق فولادی AISI 1075 (ماده پایه).

مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم مهندسی (MPa)	استحکام کششی نهایی مهندسی (MPa)	کرنش شکست مهندسی (درصد)
۲۱۰	۳۴۰	۵۵۵	۱۷

سلول واحد و الگوی چیدمان

سلول واحد فراسازه ماهی شکل از دو سلول به شکل ماهی تشکیل شده است که در خلاف جهت همدیگر و از طریق دو بازویی که در شکل ۲-الف نشان داده شده است، به همدیگر متصل شده‌اند. تکرار این سلول واحد در دو جهت x و y یک فراماده صفحه‌ای مطابق شکل ۲-ب را ایجاد می‌کند. همان‌طور که در شکل ۲-پ مشاهده می‌شود، هر سلول ماهی شکل دارای پنج اندازه مستقل است که در جدول ۲ ارائه شده است. پهنای بازوها ۱.۵ میلی‌متر و ضخامت آن ۱.۲ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۲. الف- سلول واحد فراماده مورد مطالعه، ب- تکرار سلول واحد در الگوی صفحه‌ای و پ- ابعاد پارامتریک سلول ماهی شکل.

جدول ۲. ابعاد هندسی سلول ماهی شکل مطالعه شده بر حسب میلی‌متر.

A	B	C	D	H
۵	۳	۲	۳	۱۲

در این پژوهش چیدمان سلول‌ها در مختصات استوانه‌ای می‌باشند و تعداد سلول‌ها به صورت $n \times m$ نشان داده می‌شود که در آن n تعداد سلول‌های واحد در راستای طول استوانه و m تعداد سلول واحد در محیط استوانه را نشان می‌دهد. همچنین جهت سلول‌ها نیز به گونه‌ای است که ماهی‌ها موازی با محور استوانه قرار بگیرند.

روش ساخت نمونه‌ها

در این پژوهش یک روش نوآورانه برای ساخت نمونه استفاده شده است. در این روش پرتو باریک لیزر بر روی ورق فولادی تابیده می‌شود و ناحیه باریکی از ماده را ذوب می‌کند. به طور هم‌زمان یک جت گاز که از نازل خارج می‌شود، مذاب حاصل را از ناحیه ذوب خارج می‌کند و بدین ترتیب برش حاصل می‌شود. حرکت نازل دستگاه لیزر به وسیله

کنترل عددی کامپیوتری (CNC^۱) کنترل شده و با توجه به قطر بسیار کم پرتو (در حدود ۰.۱ میلی‌متر) امکان ایجاد برش‌های بسیار دقیق و پیچیده قابل دسترس است، بنابراین سلول‌های دوبعدی بسیار دقیق و ظریف می‌توانند بدین طریق ایجاد شوند.

به دلیل ظرافت بالای بازوهای سلول‌های ماهی‌شکل در این پژوهش، استفاده از فرایند برش لیزری متداول، گاهی موجب ذوب بیش از حد و نیز اکسید شدن قسمت‌هایی از ناحیه برش در ابعادی بزرگ‌تر از پهنای پرتو لیزر شده و در نتیجه ابعاد و هندسه فراسازه دچار عیب می‌شد. با توجه به این مسأله، پارامترهای کنترلی فرایند برش لیزری با سعی و خطا بهینه‌سازی شده و مشخص شد که برای ساخت نمونه دقیق و ظریف، باید از گاز خنثی نیتروژن استفاده شود. فرایند برش توسط دستگاه RT1530NC انجام گرفته و پارامترهای دستگاه مطابق با جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳. مقادیر پارامترهای فرایند برش لیزری ورق فولادی (دستگاه برش لیزری RT1530NC)

نوع گاز برش	نوع لیزر	دقت حرکت پرتو (mm)	سرعت برش (mm/s)	توان لیزر (W)
گاز نیتروژن	فایبر	±۰.۰۵	۱۵.۵	۱۵۰۰

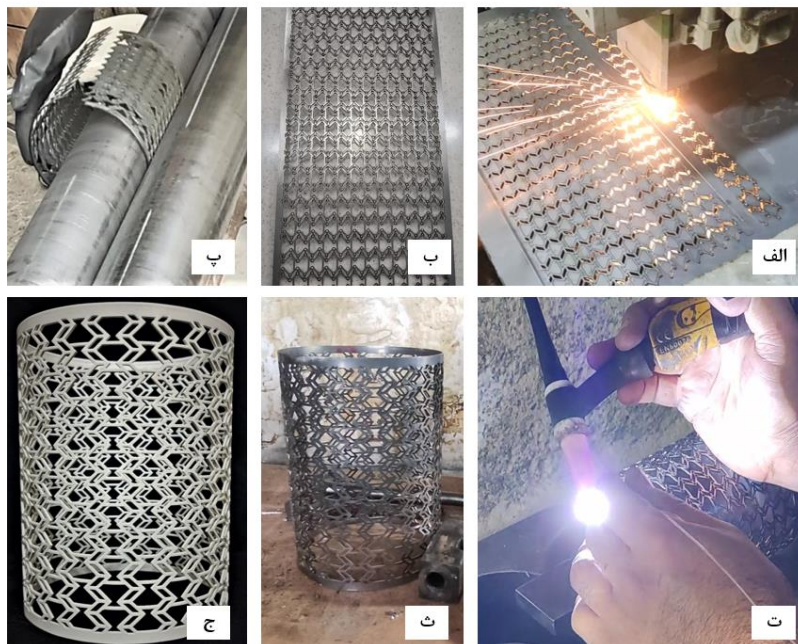
دو نمونه تخت با ورق فولادی Ck75 به ضخامت ۱.۲ مطابق با چیدمان سلولی ۱۲×۱۲ تحت برش لیزری قرار گرفتند و در ادامه ورق حاصل با استفاده از فرایند خمکاری سه‌گلتکی به شکل استوانه‌ای به قطر خارجی ۱۱۴.۶ میلی‌متر درآمد. خمکاری در جهتی انجام گرفت که سلول‌ها در راستای محور استوانه قرار گیرند. فرایند خمکاری موجب اعمال کرنش‌های پلاستیک به سطح داخلی و بیرونی استوانه طبق رابطه^۱ می‌شود که در آن T و ρ به ترتیب ضخامت و شعاع انحنای استوانه را نشان می‌دهند.

$$\varepsilon = \frac{T}{2\rho} \quad (1)$$

با توجه به ضخامت ۱.۲ میلی‌متری ورق و شعاع انحنای استوانه برابر با ۵۶.۷ میلی‌متر، کرنش پلاستیک اعمالی از ۱.۰۵- درصد در سطح داخلی تا ۱.۰۵ درصد در سطح بیرونی تغییر می‌کند که از کارسختی حاصل از این میزان کرنش در بخش شبیه‌سازی عددی صرف‌نظر شده است.

بعد از اتمام فرایند شکل‌دهی ورق حاصل و ایجاد استوانه مورد نظر، درز استوانه با استفاده از فرایند جوشکاری TIG و با فیلر از جنس خود ورق (برای حفظ یکنواختی جنس) جوش داده شده است. برای جلوگیری از اعوجاج در حین جوشکاری، از یک فیکسچر مناسب استفاده شده است تا لبه‌ها به صورت موازی باهم و تحت فشار قرار بگیرند. همه مراحل ساخت نمونه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

¹ Computer Numerical Control



شکل ۳. مراحل ساخت نمونه‌های تجربی، الف- برش لیزری، ب- فراماده ورقی حاصل، پ- خمکاری سه غلتکی ورق حاصل، ت- جوش TIG، ث- نمونه فراماده استوانه‌ای ج- نمونه رنگ آمیزی شده نهایی.

بعد از ساخت نمونه‌ها، به بررسی ابعاد هندسی و میزان خروج از حالت استوانه‌ای آن، و همچنین بازرسی غیر مخرب با مایع نافذ در ناحیه جوشکاری پرداخته شد که مشخص شد هیچ‌گونه ترکی در اتصالات وجود ندارد و همچنین میزان بیضوی شدن فراسازه (اختلاف قطر بزرگ و کوچک) در حدود ۰.۵ میلی‌متر (کمتر از نیم درصد قطر) است. با توجه به این که بررسی کمانش نمونه به صورت تصویربرداری انجام می‌گیرد، برای ایجاد تفکیک‌پذیری مناسب، نمونه‌ها بعد از بازرسی‌های مورد نظر، به روش رنگ آمیزی الکترواستاتیک در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس، به رنگ سفید درآمدند. اعمال دمای مذکور می‌تواند بخشی از تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری را نیز از بین ببرد.

آزمون‌های تجربی

برای بررسی رفتار کمانش نمونه‌های ساخته شده به صورت تجربی، از آزمون فشار با استفاده از یک دستگاه فشار یونیورسال مدل سنتام^۱ با ظرفیت ۱۰۰ کیلونیوتن، مطابق شکل ۴ استفاده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود نمونه بین دو ورق فولادی با ضخامت ۱۰ میلی‌متر قرار گرفته و با حرکت فک‌های دستگاه فشرده می‌شود. محور فراسازه در بین فک‌های دستگاه باید همراستا با جهت حرکت فک‌ها باشد تا نیروی وارده به صورت فشار خالص بوده و از ایجاد بارهای خمشی در فراسازه جلوگیری شود.

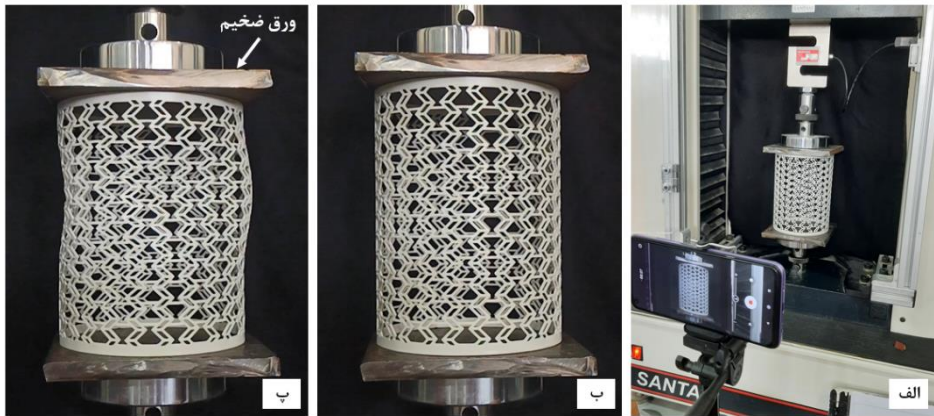
جابجایی فک متحرک دستگاه با سرعت ۰.۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده که سرعت نسبتاً کمی به حساب می‌آید. این کار سبب می‌شود تا لحظه وقوع کمانش و ثبت جابجایی لحظه‌ای کمانش با دقت بیشتری انجام شود. برای تعیین

¹ SANTAM

کمانش از تصویربرداری پیوسته فراسازه تحت آزمون و پردازش آن با استفاده از نرم افزار پلات دیجیتایزر^۱ استفاده شده است. همچنین با استفاده از نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از آزمون، مدول الاستیک ظاهری و تنش ظاهری نمونه به ترتیب طبق روابط ۲ و ۳ به دست می آید که در آنها m شیب منحنی نیرو-جابجایی در ناحیه الاستیک، L طول نمونه، d قطر خارجی نمونه، t ضخامت ورق و F نیروی اعمالی بر حسب نیوتن می باشد.

$$E_{eff} = m \frac{L}{\pi dt} \quad (2)$$

$$\sigma_{eff} = \frac{F}{\pi dt} \quad (3)$$



شکل ۴. الف- تصویر مجموعه اجرای تست فشار، ب- تصویر نمونه پیش از آزمون و ب- پس از اعمال فشار و وقوع کمانش.

مدل سازی هندسی و عددی

مدل سازی هندسی

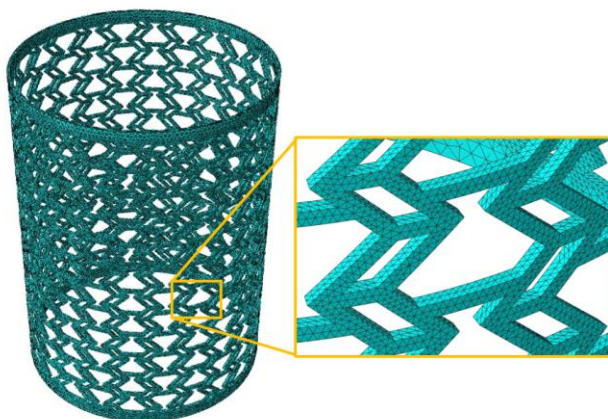
مدل سازی نمونه های استوانه ای این فراسازه با استفاده از نرم افزار سالیدورکس و به صورت مدل سازی تخت یک سلول واحد و تصویر کردن آن بر روی سطح منحنی شکل استوانه انجام شده است (با استفاده از دستور پیچش^۲ سالیدورکس). سپس با تکرار سلول های تصویر شده در راستاهای محوری و محیطی استوانه، سازه استوانه ای نهایی حاصل می شود. ابعاد مورد اشاره در جدول ۲ که در مدل سازی حالت تخت سلول ماهی شکل به کار رفته است، پس از تصویر شدن بر روی پوسته استوانه ای به دلیل اثر انحنای استوانه به میزان بسیار کمی از ابعاد اولیه فاصله می گیرد که می توان از این اثر صرف نظر کرد. بر این اساس هشت نمونه استوانه ای با چیدمان سلولی 12×12 ، 12×16 ، 16×12 و 8×8 و هر کدام با ضخامت های ۱.۲ و ۰.۶ میلی متر مدل سازی شده است.

¹ Plot Digitizer

² Wrap

شبیه‌سازی المان محدود

شبیه‌سازی رفتار کمانش فراسازه‌های استوانه‌ای با سلول واحد ماهی‌شکل، به صورت خطی و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس^۱ انجام گرفته است. برای این منظور، مدل هندسی فراسازه به نرم‌افزار وارد شده و از المان‌های سه بعدی چهار وجهی خطی ۴ گره هیبریدی که به اختصار C3D4H نامیده می‌شوند، استفاده شده است. در ابتدا با انجام شبیه‌سازی‌های اولیه، تأثیر اندازه مش بر نتایج مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شد که نتایج شبیه‌سازی با مش‌های ۰.۷ میلی‌متر و کوچکتر همگرا شده و مستقل از اندازه مش می‌شوند. لذا در شبیه‌سازی‌های انجام گرفته به منظور افزایش سرعت حل، از اندازه مش ۰.۷ میلی‌متری استفاده شده است. شکل ۵ تصویری از مدل نمونه ۱۲×۱۲ و مش‌بندی آن را نشان می‌دهد. برای اعمال شرایط مرزی، هر شش درجه آزادی یک انتهای استوانه به طور کامل مقید شده و در انتهای دیگر نیز با مقید کردن ۵ درجه آزادی، تنها یک جابجایی محوری به اندازه ۱ میلی‌متر به صورت فشاری بر فراسازه اعمال می‌شود. با حل مساله کمانش خطی فوق با ابزار Buckle نرم‌افزار آباکوس، برای هر مود کمانشی فراسازه یک مقدار ویژه به دست می‌آید که ضریب از جابجایی ۱ میلی‌متر اولیه بوده و بیانگر جابجایی وقوع آن مود است. بدین ترتیب، هشت مدل استوانه‌ای مختلف تحت شبیه‌سازی قرار گرفت و کرنش کمانشی هر کدام به دست آمد.



شکل ۵. تصویری از هندسه نمونه و مش‌های به کار رفته در شبیه‌سازی کمانش.

همچنین هشت شبیه‌سازی دیگر نیز برای بررسی رفتار الاستیک و پلاستیک این فراسازه‌ها تحت بارگذاری فشار خالص تا قبل از وقوع کمانش، انجام گرفت. در این شبیه‌سازی‌ها از حل گر آباکوس استاندارد استفاده شد و شرایط مرزی نیز کاملاً مشابه شبیه‌سازی کمانش اعمال گردید، با این تفاوت که میزان جابجایی محوری اعمالی در حدود جابجایی لازم برای ایجاد مود اول کمانش هر فراسازه (که از شبیه‌سازی کمانش خطی به دست آمده است) در نظر گرفته شد. نوع المان‌های به کار گرفته شده در این شبیه‌سازی‌ها از نوع سه بعدی شش وجهی هشت گرهی و از نوع ناسازگار^۲ که C3D8I نامیده می‌شود، می‌باشند. استفاده از این نوع المان از دقت بالاتری نسبت به انواع دیگر المان برای محاسبه نیرو و تغییر شکل ناشی از فشار برخوردار است.

¹ Abaqus Package

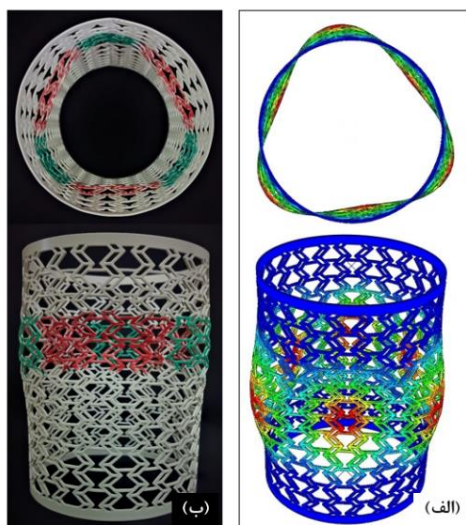
² Incompatible

خواص مکانیکی ماده پایه در تمام شبیه‌سازی‌ها با استفاده از داده‌های به دست آمده از تست کشش نمونه فولاد CK75 اعمال شده است. برای ساده‌سازی مسأله، مدلی برای خرابی و از هم‌گسیختگی المان‌ها در نظر گرفته نشده است. به منظور اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، شکل مود، کرنش کمانش، مدول الاستیک مؤثر و نمودار تنش ظاهری-کرنش حاصل از شبیه‌سازی فراسازه 12×12 سلولی با نتایج حاصل از آزمون تجربی همان فراسازه مورد مقایسه قرار گرفته است.

نتایج و بحث

اعتبار سنجی نتایج شبیه‌سازی و روش ساخت

برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی، به مقایسه مشخصات کمانش و همپنین رفتار الاستیک فراسازه با تعداد سلول 12×12 با ضخامت 1.2 میلیمتری تحت آزمون فشار تجربی و شبیه‌سازی پرداخته شده است. در شکل ۶-الف مود اول کمانش حاصل از شبیه‌سازی این فراسازه نشان داده شده است، این مود کمانش در کرنش فشاری 4.15 درصد روی می‌دهد که اندکی بیشتر از کرنش کمانش حاصل از آزمون تجربی (در حدود 4 درصد) است. شکل ۶-ب دو نمای مختلف کمانش نمونه تجربی را نشان می‌دهد.



شکل ۶. الف- تصویر مود اول کمانش فراسازه استوانه‌ای ماهی شکل 12×12 سلولی حاصل از شبیه‌سازی و ب- تصویر کمانش همان نمونه در آزمون تجربی

در شکل ۶-ب که نمونه تجربی را نشان می‌دهد، قسمت‌هایی که به رنگ قرمز علامت زده شده به سمت داخل استوانه و قسمت‌های سبز رنگ به سمت خارج استوانه تغییر شکل داده است، همان‌طور که ملاحظه می‌شود در نتیجه کمانش مقطع دایروی فراسازه همانند شبیه‌سازی به مثلی تغییر یافته است.

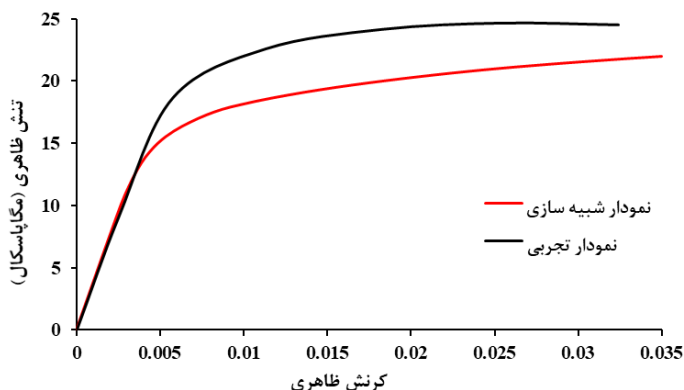
مقایسه این نتایج بیانگر تطابق بسیار خوب نتایج کمناش آزمون تجربی و نمونه شبیه‌سازی، هم از نظر شکل مود کمناش و هم میزان کرنش کمناش است که دارای خطای کمتر از ۴ درصد هستند. در جدول ۴ مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی انجام گرفته است.

جدول ۴. کرنش لازم برای وقوع کمناش نمونه ۱۲×۱۲.

درصد خطا	کرنش کمناش در شبیه سازی	کرنش کمناش در آزمون تجربی
۳.۷۵	۰.۰۴۱۵	۰.۰۴

نکته با اهمیت دیگری که از این نتایج می‌توان گرفت عدم خطاهای ناشی از روش ساخت به کار گرفته شده است، به گونه‌ای که هم دقت ابعادی بازوهای سلول‌ها کاملاً تکرارپذیر و یکنواخت است و هم جوش ناحیه درز تأثیری بر یکنواختی و تقارن محوری نمونه‌ها ایجاد نکرده است.

یکی دیگر از مشخصه‌هایی که بررسی آن در شناخت رفتار مکانیکی این فراسازه ضروری می‌نماید، رفتار نیرویی آن است. لذا به مقایسه منحنی‌های تنش ظاهری-کرنش حاصل از آزمون تجربی و شبیه‌سازی نمونه فوق پرداخته شده و در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود رفتار تنش ظاهری-کرنش در محدوده ناحیه الاستیک تطابق بسیار خوبی با یکدیگر دارند. اما در محدوده‌ای که ناحیه پلاستیک دو منحنی را شامل می‌شود اختلاف بین نتایج تجربی و عددی ایجاد می‌شود.



شکل ۷. نمودار تنش ظاهری - کرنش ظاهری حاصل از آزمون تجربی و شبیه‌سازی عددی برای فراسازه ۱۲×۱۲ سلولی.

در جدول ۵ به مقایسه رفتار مکانیکی نمونه تحت آزمون تجربی و شبیه‌سازی پرداخته شده است.

جدول ۵. مدول یانگ و تنش تسلیم ظاهری حاصل از آزمون تجربی و شبیه‌سازی فراسازه ۱۲×۱۲ سلولی.

درصد خطا	نتیجه تجربی	نتیجه شبیه‌سازی
۵.۱	۳.۷	مدول یانگ (GPa) ۳.۵۱
۲۲.۵	۱۸.۲	تنش تسلیم (MPa) ۱۴.۱
۱۰.۵	۲۴.۵	تنش نهایی (MPa) ۲۱.۹۵

برای تشریح این اختلاف نتایج، به خصوص برای تنش تسلیم نمونه‌ها، باید بیشتر از خطاهای ناشی از شبیه‌سازی، به اثرات ناشی از روش ساخت نمونه تجربی پرداخته شود. با توجه به این که روش ساخت نمونه فلزی بسیار متکی بر فرآیند حرارتی برش لیزری است و در این فرآیند افزایش دمای بزرگی در ناحیهٔ برش روی می‌دهد (ناحیه^۱ HAZ) و از طرف دیگر به دلیل ظریف بودن ابعاد سلول‌ها، فرایند خنک شدن نیز با نرخ بالایی اتفاق می‌افتد، لذا می‌توان گفت که به نوعی عملیات حرارتی ناخواسته مشابه با کوئنچ^۲ روی می‌دهد که استحکام مکانیکی ماده را می‌تواند به شکل موضعی شدیداً افزایش دهد. البته باید در نظر گرفت که افزایش استحکام معمولاً در جهت عکس کرنش‌پذیری عمل می‌کند [۱۶] و لذا شکست این نمونه‌ها قاعدتاً در کرنش‌های پایین‌تری روی خواهد داد.

نکتهٔ با اهمیت این است که اگرچه نمونه‌های به کار رفته برای آزمون کشش نیز با برش لیزری آماده شده‌اند، ولی به دلیل ابعاد بزرگتر آن نمونه‌ها در مقایسه با بازوهای سلول‌ها، نسبت ناحیه HAZ در آنها بسیار کمتر بوده و در نتیجه خواص مکانیکی نیز با همان تناسب، کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرند. لذا یک اختلاف خواص در جنس ماده اعمالی برای شبیه‌سازی و تجربی ایجاد می‌شود که به سختی می‌تواند مدل‌سازی شود. باید در نظر گرفت که با توجه به ماهیت اعمال حرارت در برش لیزری، هرچقدر ابعاد سلول‌ها ظریف‌تر شوند نسبت بزرگتری از آن تحت تأثیر حرارت قرار گرفته و در نتیجه این تغییر رفتار بیشتر می‌شود.

تغییر خواص در اثر این عملیات حرارتی عمدتاً بر روی رفتار پلاستیک فولاد اتفاق افتاده و استحکام تسلیم و نهایی آن را بیشتر می‌کند و عملاً تأثیر خاصی بر مدول الاستیک نخواهد داشت [۱۷]. به همین دلیل است که ملاحظه می‌شود مدول الاستیک ظاهری نمونه تحت آزمون تجربی و شبیه‌سازی اختلاف کمتری در مقایسه با تنش تسلیم ظاهری این دو دارند. البته باید در نظر گرفت که برای این فراسازه‌ها، کارکرد اصلی در ناحیهٔ الاستیک می‌باشد و لذا این اختلاف اثر چندانی بر عملکرد آن نخواهد داشت.

فولاد Ck75 به کار گرفته شده به دلیل درصد بالای کربن، قابلیت عملیات حرارتی پذیری بسیار بالایی دارد و لذا این اختلاف خواص تشدید می‌شود درحالی‌که استفاده از فولادهای غیر آلیاژی این مسأله را کمتر ایجاد می‌کند. در کل می‌توان گفت که شبیه‌سازی المان محدود با دقت بالایی روند تجربی را مدل می‌کند و البته روش ساخت به کار گرفته شده نیز در ناحیهٔ الاستیک و رفتار کماتش نمونهٔ تأثیر منفی بر مشخصات فراسازه ایجاد نمی‌کند.

تأثیر پارامترهای هندسی بر مشخصات کماتش

همان‌طور که اشاره شد شبیه‌سازی کماتش خطی و فشار خالص برای ۸ سازه مختلف با تعداد سلول ۱۲×۱۲، ۱۲×۱۶، ۱۶×۱۲ و ۸×۸ و برای دو ضخامت ۱.۲ و ۰.۶ میلی‌متر انجام شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی استاتیکی فشار خالص نشان می‌دهد که برای هر ۸ نمونه، نمودار تنش ظاهری-کرنش دقیقاً مثل هم (همانند نمودار شبیه‌سازی شکل ۷) بوده و هیچ تأثیری از تعداد سلول واحد و نحوهٔ چیدمان آن نمی‌گیرند و تنها متأثر از هندسهٔ خود سلول واحد هستند که در اینجا ثابت و طبق ابعاد ارائه شده در شکل ۲-ب می‌باشد. با این وجود، پارامترهای تعداد سلول و یا ضخامت آن تأثیر زیادی بر کماتش این فراسازه‌ها دارد. در شکل ۸ کرنش کماتش فراسازه‌های شبیه‌سازی شده ارائه شده است. در نتایج ارائه شده، دیده می‌شود که با افزایش ضخامت پوسته استوانه، کماتش دیرتر اتفاق می‌افتد ولی این رابطه خطی نیست و با دو برابر شدن ضخامت، به طور متوسط ۲۵ درصد افزایش در کرنش کماتش روی می‌دهد. مطابق تئوری کلاسیک پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار محوری، کماتش پوسته به صورت خطی با ضخامت در ارتباط است [۱۸] و برخی روابط تجربی نیز کماتش پوستهٔ استوانه‌ای تحت بارگذاری محوری را متناسب با (t^{21}) گزارش می‌کنند که در آن ضخامت و n عددی بین ۱ تا ۲ می‌باشد [۱۹]. در حالی که در فراسازه‌های شبیه‌سازی شده به وضوح مشخص است که

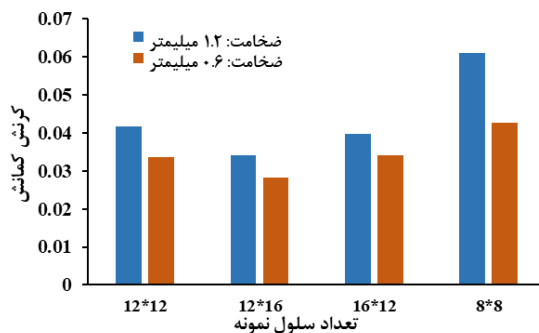
¹ Heat Affected Zone

² Quench Heat Treatment

تأثیر ضخامت بسیار پایین‌تر از این مقادیر است. برای توجیه این اختلاف می‌توان گفت که در این فراسازه‌ها به جای صفحه، بازوهای با مقاطع مختلف نظیر دایروی و مستطیلی وجود دارند، لذا وقتی ضخامت بازوی مستطیلی بیشتر می‌شود و ابعاد دیگر آن ثابت می‌ماند، کمانش برای مثال به جای راستای ضخامت، می‌تواند در راستای عرض بازو شروع شود و در نتیجه تأثیر ضخامت کم اهمیت شود.

همچنین مشاهده می‌شود که ارتفاع فراسازه تأثیر خاصی بر روی شروع کمانش آن ندارد. برای مثال در نمونه 16×12 سلولی با وجود افزایش ۳۳ درصدی ارتفاع نسبت به نمونه 12×12 سلولی (بقیه ابعاد ثابت هستند)، کرنش کمانش تقریباً برای هر دو ضخامت ثابت است. این مسأله به دلیل کمانش موضعی (غیر اویلری) که در پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار محوری روی می‌دهد، می‌باشد. پارامتر مؤثر دیگر شعاع استوانه است، مشاهده می‌شود که با افزایش شعاع فراسازه، کرنش کمانش کاهش می‌یابد، مطابق مرجع [۱۵] رابطه شعاع استوانه با کمانش آن به صورت خطی معکوس می‌باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی این فراسازه‌ها رابطه معکوس بین شعاع فراسازه و کمانش را نشان می‌دهد ولی به صورت خطی نیست.

باید در نظر گرفت که برای این فراسازه‌ها تحت بار فشاری محوری، هر کدام از بازوها همانند یک تیر اویلری دچار کمانش خواهند شد و لذا نقاط اتصال^۱ و زوایای این بازوها نقش زیادی در پذیرش کرنش‌های محوری خواهند داشت و لذا اگر سازه بتواند کرنش فشاری اعمالی را با مکانیزم تغییر شکل چرخش (دورانی) بازوهای سلول‌ها حول نقاط اتصال بپذیرد (به جای فشرده شدن یکنواخت بازوها)، علاوه بر فراهم شدن ضریب پواسون نزدیک به صفر که اصلی‌ترین مشخصه فراسازه سلولی ماهی‌شکل است، بروز کمانش نیز به شکل مؤثری به تأخیر خواهد افتاد.



شکل ۸. الف: کرنش کمانش برای ۸ فراسازه شبیه‌سازی شده.

برای بررسی مشهودتر تأثیر این متغیرها در کرنش کمانش نمونه‌ها، شکل مود اول کمانش آنها مورد بررسی قرار گرفته است و در جدول ۶، مدهای کمانش حاصل برای هر دو ضخامت ۱.۲ و ۰.۶ میلی‌متری ارائه شده است.

¹ Cell Joints

جدول ۶. شکل مود کمانش ۸ فراسازه شبیه‌سازی شده.

نوع ساختار سلولی	ضخامت ۱.۲ میلیمتری			ضخامت ۰.۶ میلیمتری		
	نمای بالایی کمانش	نمای جانبی کمانش	کرنش کمانش	نمای بالایی کمانش	نمای جانبی کمانش	کرنش کمانش
۱۲×۱۲			۰.۰۴۱۵			۰.۰۳۳
۱۲×۱۶			۰.۰۳۴			۰.۰۲۸
۱۶×۲			۰.۰۴			۰.۰۳۴
۸×۸			۰.۰۵۵			۰.۰۲۳

همان‌طور که از شکل‌های جدول ۶ مشخص است، کمانش همه نمونه‌ها به صورت موضعی انجام می‌گیرد و تغییر شکل محور استوانه که نشانی از کمانش اوپلری باشد دیده نمی‌شود. همچنین دیده می‌شود که وقتی ارتفاع نمونه افزایش می‌یابد، شکل کلی مود کمانش ثابت است ولی در ارتفاع‌های مختلف به صورت هم‌زمان به وقوع می‌پیوندد. برای مثال شکل کمانش نمونه ۱۶×۱۲ با ضخامت ۱.۲ در راستای شعاعی دقیقاً مثل نمونه ۱۲×۱۲ با همان ضخامت، به شکل مقطع مثلثی است ولی به دلیل ارتفاع بیشتر نمونه، این مثلث در دو ارتفاع با جهات مختلف تکرار شده است و در نتیجه به شکل ستاره‌ای شش‌پر دیده می‌شود. لذا می‌توان نتیجه گرفت که ارتفاع فراسازه نه تنها بر کرنش کمانش بی‌تأثیر است، شکل مود کمانش را نیز تغییری نمی‌دهد.

نتیجه گیری

- در این پژوهش به بررسی تولید فراسازه استوانه‌ای سلولی ماهی شکل از جنس ورق فولادی، با استفاده از روش‌های ساخت متعارف شامل برش لیزری، شکل دهی و جوشکاری پرداخته شد و در ادامه رفتار کمانشی این فراسازه‌ها به صورت تجربی و عددی مورد مطالعه قرار گرفت؛ اهم نتایج حاصل به شرح زیر است:
- فراسازه ماهی شکل که به منظور فراهم آوردن ضریب پواسون صفر معرفی شده است، می‌تواند در ابعاد و هندسه‌های ظریف با موفقیت به روش برش لیزری تولید شود. انتخاب گاز نیتروژن برای بهبود دقت‌های هندسی آن ضروری است.
 - روش تولید مبتنی بر برش لیزری فراسازه، تأثیری بر خواص الاستیک و مشخصات کمانشی آن ندارد ولی به دلیل اعمال عملیات حرارتی در ناحیه برش، موجب افزایش استحکام ناحیه پلاستیک آن می‌شود، این روند در ابعاد و هندسه‌های ظریف تشدید می‌شود.
 - کمانش فراسازه سلولی ماهی شکل در بازه ابعادی مورد مطالعه، به صورت موضعی می‌باشد و ارتفاع آن تأثیر چندانی بر کرنش و شکل مود کمانشی ندارد. همچنین افزایش ضخامت و کاهش شعاع انحنا فراسازه موجب افزایش کرنش کمانشی می‌شود.
 - تأثیر ضخامت و شعاع فراسازه سلولی ماهی شکل بر کمانش آن، از روند تئوری و تجربی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار محوری پیروی نمی‌کند. در این فراسازه‌ها به دلیل ماهیت بازویی سلول‌ها، تأثیر تغییر ضخامت و شعاع بر روی کمانش، بسیار کمتر از پوسته‌های استوانه‌ای متعارف است.

References

- [1] He, Y. L., Zhang, P. W., You, Z., Li, Z. Q., Wang, Z. H., & Shu, X. F. (2020). Programming mechanical metamaterials using origami tessellations. *Composites Science and Technology*, 189, 108015. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108015>
- [2] Hashemi Talkhouncheh, S. A., & Basafa, A. (2021). Design of a Microstrip Bandpass Filter Using Metamaterials. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(4), 271-280. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.128406>
- [3] Wu, W., Hu, W., Qian, G., Liao, H., Xu, X., & Berto, F. (2019). Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review. *Materials & design*, 180, 107950. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107950>
- [4] Olympio, K. R., & Gandhi, F. (2009). Zero Poisson's Ratio Cellular Honeycombs for Flex Skins Undergoing One-Dimensional Morphing. *Journal of intelligent material systems and structures*, 21(17), 1737-1753. <https://doi.org/10.1177/1045389X09355664>
- [5] Tancogne-Dejean, T., Spierings, A. B., & Mohr, D. (2016). Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading. *Acta Materialia*, 116(2), 14-28. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.05.054>
- [6] Zolfagharian, A., Bodaghi, M., Hamzehei, R., Parr, L., Fard, M., & Rolfe, B. F. (2022). 3D-Printed Programmable Mechanical Metamaterials for Vibration Isolation and Buckling Control. *Sustainability*, 14(11), 6831. <https://doi.org/10.3390/su14116831>
- [7] Li, Q., Yang, D., & Mao, X. (2022). Pressure-resistant cylindrical shell structures comprising graded hybrid zero Poisson's ratio metamaterials with designated band gap characteristics. *Marine Structures*, 84(6), 103221. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2022.103221>
- [8] Liu, K., Han, L., Hu, W., Ji, L., Zhu, S., Wan, Z., Yang, X., Wei, Y., Dai, Z., Zhao, Z., Li, Z., Wang, P., & Tao, R. (2020). 4D printed zero Poisson's ratio metamaterial with switching

- function of mechanical and vibration isolation performance. *Materials & Design*, 196(13), 109153. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109153>
- [9] Hamzehei, R., Zolfagharian, A., Dariushi, S., & Bodaghi, M. (2022). 3D-printed bio-inspired zero Poisson's ratio graded metamaterials with high energy absorption performance. *Smart Materials and Structures*, 31(3), 035001. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac47d6>
- [10] Naghavi Zadeh, M., Dayyani, I., & Yasaee, M. (2020). Fish Cells, a new zero Poisson's ratio metamaterial—Part I: Design and experiment. *Journal of intelligent material systems and structures*, 31(13), 1617-1637. <https://doi.org/10.1177/1045389X20930079>
- [11] Zadeh, M. N., Dayyani, I., & Yasaee, M. (2020). Fish Cells, a new zero Poisson's ratio metamaterial—part II: Elastic properties. *Journal of intelligent material systems and structures*, 31(19), 2196-2210. <https://doi.org/10.1177/1045389X20942576>
- [12] Qin, Q., Dayyani, I., & Webb, P. (2022). Structural Mechanics of cylindrical fish-cell zero Poisson's ratio metamaterials. *Composite Structures*, 289(7), 115455. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.115455>
- [13] Jha, A., & Dayyani, I. (2021). Shape optimisation and buckling analysis of large strain zero Poisson's ratio fish-cells metamaterial for morphing structures. *Composite Structures*, 268, 113995. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113995>
- [14] Nazir, A., Gokcekaya, O., Md Masum Billah, K., Ertugrul, O., Jiang, J., Sun, J., & Hussain, S. (2023). Multi-material additive manufacturing: A systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials. *Materials & design*, 226, 111661. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111661>
- [15] Dogan, E., Bhusal, A., Cecen, B., & Miri, A. K. (2020). 3D Printing metamaterials towards tissue engineering. *Applied materials today*, 20, 100752. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100752>
- [16] Saeidi, N., Amanollahi, A., Ebrahimzadeh, I., & Raeissi, M. (2023). Evaluation of the effect of heat treatment parameters on mechanical properties of architected steel incorporated low carbon steel and aluminum 6061. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 20(1), 285-306. <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.326385.1973>
- [17] Htun, M. S., Kyaw, S. T., & Lwin, K. T. (2008). Effect of heat treatment on microstructures and mechanical properties of spring steel. *Journal of metals, materials and minerals*, 18(2), 191-197. https://www.researchgate.net/publication/237784423_Effect_of_Heat_Treatment_on_Microstructures_and_Mechanical_Properties_of_Spring_Steel
- [18] Zhu, E., Mandal, P., & Calladine, C. R. (2002). Buckling of thin cylindrical shells: an attempt to resolve a paradox. *International Journal of Mechanical Sciences*, 44(8), 1583-1601. [https://doi.org/10.1016/S0020-7403\(02\)00065-6](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(02)00065-6)
- [19] Mandal, P., & Calladine, C. R. (2000). Buckling of thin cylindrical shells under axial compression. *International Journal of Solids and Structures*, 37(33), 4509-4525. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(99\)00160-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(99)00160-2)