



بررسی تجربی رفتار مکانیکی ساختار اینفینیتی الهام گرفته شده از پیله کرم ابریشم و مقایسه آن با ساختار میله‌ای جهت استفاده در ساختارهای سلولی معماری

مصطفی حسینی واجاری^۱، حسین مرادی نسب^۲، مرتضی بهزادنسب^{۳*}، محمود نیکخواه شه‌میرزادی^۴، مجید سoltانی^۵

۱- دانشجوی دکتری، گروه معماری، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۲- استادیار، گروه معماری، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۳- استادیار، مهندسی پلیمر، گروه رنگ، پژوهشکده فرایند پلیمرها، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران

۴- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

۵- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی ۱۱۵/۱۴۹۶۵، m.behzadnasab@ippi.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۴ مرداد ۱۴۰۱

داوری اولیه: ۲۷ شهریور ۱۴۰۱

پذیرش: ۱۹ مهر ۱۴۰۱

کلیدواژگان:

ساختار سلولی

ساندویچ پنل

ساختار اینفینیتی

چاپ سه بعدی

خواص مکانیکی

ساختارهای سلول باز، ساختارهای سلولی معماری شده‌ای با یک هندسه تناوبی تعیین شده می‌باشند. پیله کرم ابریشم می‌تواند به عنوان یک ساختار طبیعی جهت طراحی سلول‌های ساختار باز مورد استفاده قرار گیرد. پیله ابریشم از یک ساختار سلسه مراتبی با عملکرد چندگانه تشکیل شده است که طی میلیون‌ها سال جهت ایجاد شرایط بهینه برای دگرذیسی و حفظ جان حشره در مقابل شکارچیان تکامل یافته است. در این مقاله با الهام‌گیری از ساختار حلقه اینفینیتی که توسط کرم ابریشم در ساخت پیله بکار می‌رود، ساختارهایی سلول باز، جهت بررسی خواص مکانیکی طراحی شد. به این منظور براساس فرمول ماکسول در طراحی ساختارهای سلول باز میله‌ای، نمونه‌های مختلف تشکیل شده از میله‌های مستقیم و یا ساختار دارای حلقه اینفینیتی با پارامترهای متفاوت با استفاده از روش چاپ FDM ساخته شد. پس از ساخت قطعات، آزمون تنش کششی محوری بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که ساختارهای سلولی طراحی شده براساس حلقه‌های بکار رفته در پیله کرم ابریشم بصورت تک لایه غیر ایزوتروپیک بوده و رفتار مکانیکی متفاوتی در جهات مختلف از خود نشان می‌دهند. اگرچه ساختارهای سلولی اینفینیتی از مدول کششی و استحکام کمتری برخوردارند اما کرنش الاستیک بزرگتر و روند تدریجی شکست و در نتیجه تبدیل مدول کششی به خمشی در این ساختار از مزایای مهم آنها به حساب می‌آید که در کاربردهای مختلف مانند ساندویچ پنل‌های ساختمانی که وظیفه تحمل بار را ندارند، می‌توانند مورد توجه قرار بگیرند.

Investigating the mechanical behavior of the infinity structure inspired by the silkworm cocoon and comparing it with the rod structure for use in architectural cellular structures

Mostafa Hosseini Vajari¹, Hossein Moradi Nasab¹, Morteza Behzadnasab^{2*}, Mahmoud Nikkhah Shahmirzadi³, Majid Soltani⁴

1- Department of Architecture, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

2- Color Department, Polymer Process Research Institute, Iran Polymer and Petrochemical Research Institute, Tehran, Iran

3- Department of Civil Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran

4- Faculty of Mechanical Engineering, Khajeh Nasir Toosi University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 14965/115 Tehran, Iran, m.behzadnasab@ippi.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 26 July 2022

First Decision: 18 September 2022

Accepted: 11 October 2022

Keywords:

Cellular structure

Sandwich panel

Infinity structure

3D printing

Mechanical properties

Abstract

Open cell structures are architectural cell structures with a determined periodic geometry that can be designed parametrically based on mathematical models or simulations of nature. The silkworm cocoon can be used as a natural structure to design open structure cells. The silk cocoon consists of a hierarchical structure with multiple functions, which have evolved over millions of years to create optimal conditions for metamorphosis and preserving the life of the insect against Predators. In this article, inspired by the infinite loop structure used by silkworms in making cocoons, open cell structures were designed to investigate mechanical properties. For this purpose, based on Maxwell's formula in the design of rod open cell structures, different samples consisting of straight rods or infinity ring structures with different parameters were made using FDM 3D printing method. After manufacturing the parts, the axial tensile stress test was performed on the samples. The obtained results showed that the cell structures designed based on the rings used in the silkworm cocoon are non-isotropic single layers. Although the infinite cell structures have a lower tensile modulus and strength, the larger elastic strain and the gradual process of failure, and as a result, the conversion of the tensile modulus to bending in this structure, is considered one of their important advantages, which are used in various applications such as building sandwich panels that bear the duty They don't have the burden, they can be noticed.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Hosseini Vajari, H. Moradi Nasab, M. Behzadnasab, M. Nikkhah Shahmirzadi, M. Soltani, Investigating the mechanical behavior of the infinity structure inspired by the silkworm cocoon and comparing it with the rod structure for use in architectural cellular structures, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 6, pp. 11- 23, 2022 (in Persian). <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.160938>

۱- مقدمه

امروزه در بسیاری از صنایع مانند خودروسازی، هوافضا و یا پزشکی، مواد سبک وزن و در عین حال با خواص فیزیکی و مکانیکی بالا و مقاوم در برابر خستگی مورد نیاز است که بکارگیری ساختارهای سلول باز را می‌طلبد که شامل فوم‌های تصادفی و یا ساختارهای سلولی معماری شده می‌گردد [۱-۴]. مواد سلولی معماری شده دارای یک هندسه تناوبی تعیین شده هستند که می‌تواند به طور کامل توسط تعداد کمی از پارامترهای طراحی تعیین شود. وجه تمایز اصلی این ساختارها با فوم‌هایی که دارای ساختار تصادفی هستند، امکان کنترل بر روی اندازه سلول و ضخامت دیواره سلولی و در نتیجه خواص مکانیکی می‌باشد [۵-۷]. طراح در این مواد علاوه بر مواد اولیه (اغلب مواد پایه نامیده می‌شود که می‌تواند فلزی، سرامیکی، پلیمری یا کامپوزیت باشند) می‌تواند با کنترل بر روی شکل بخش ماکروسکوپی، طیف وسیعتری از خواص نهایی را در اختیار داشته باشد.

بسته به اینکه هم لبه‌ها و هم وجه‌ها بسته باشند یا فقط لبه‌های سلول بسته باشند سلول‌ها می‌توانند به دو گروه باز یا بسته تقسیم بندی شوند. مواد سلولی سلول باز نسبت به جریان سیالات نفوذپذیر هستند، که معمولاً یک نیاز ضروری در کاربردهای زیست پزشکی است [۸].

این ساختارها در کنار وزن پایین، جذب انرژی بالایی داشته که استفاده از آنها را به عنوان مواد محافظ، بطور مثال در کلاه‌های محافظ ورزشی، مناسب می‌کند [۹-۱۱]. سازه‌های سلولی در کاربردهای صنعتی مرتبط با مبدل‌ها و مدیریت حرارتی نیز به دلیل مساحت سطح و خواص نفوذپذیری بالای ساختار متخلخل کاربرد دارند [۱۲-۱۴].

در چند سال گذشته غلبه بر ویژگی‌های هندسی پیچیده و چالش‌های تولید مرتبط با ساختارهای سلولی، با توسعه سریع و بلوغ فن‌آوری‌های ساخت افزایشی (AM) آسان شده است. فرآیند ساخت لایه به لایه در تولید افزایشی اجازه می‌دهد تا محصولات سفارشی‌شده تقریباً با هر هندسه‌ای تولید شوند [۱۵، ۱۶].

مواد سلولی تقریباً با تمامی روش‌های تولید افزایشی و در طیف گسترده‌ای از مواد از جمله فلزات، پلیمرها، سرامیک‌ها و مواد پلیمری-کامپوزیت ساخته شده‌اند [۱۷].

برای تهیه مواد سلولی چند سلول واحد را می‌توان در یک الگوی تناوبی منظم در کنار هم قرار داد [۱۸]. در شکل ۱ برخی از رایجترین معماری‌های مختلف سازه‌های شبکه‌های سلولی

مبتنی بر میله نشان داده شده‌اند. این سلول‌های واحد می‌توانند شامل انواع منشورهای مثلثی، لوزی و شش ضلعی، دوازده وجهی لوزی، و چهار وجهی و ... باشند.

عمر نذیر و همکاران با بررسی‌های سیستماتیک به شناسایی دامنه وسیعی از طراحی ساختارهای سلولی، بهینه‌سازی و کاربردهای آن پرداختند و نشان دادند که برای موقعیت‌های مختلف نیاز به طراحی منحصر به فرد ساختارهای سلولی می‌باشد. همچنین نشان دادند که فرض همسانگرد بودن در شبیه‌سازی‌ها با روش المان محدود برای ساختارهایی که به روش چاپ سه بعدی بصورت لایه‌لایه ایجاد می‌شود از اساس اشتباه است و نیاز به توسعه نرم افزارهای شبیه‌سازی در خصوص تحلیل رفتار این ساختارها می‌باشد [۱۹]. گورگلواریسلان و همکاران روش‌هایی به منظور افزایش مقیاس در ساختارهای سلولی مبتنی بر شبیه‌سازی چند سطحی پیشنهاد نمودند و نشان دادند روش ارائه شده دارای پتانسیل قابل توجهی است برای تایید مؤثر ساختارهای سلولی ساخته شده با مواد افزودنی می‌باشد و بنابراین امکان استفاده از قطعات ساخت افزودنی ساخته شده برای کاربردهای زیستی را فراهم می‌کند [۲۰].

حمزه السالا و همکاران استحکام کششی و ازدیاد طول ساختار سلولی و مکانیسم چقرمگی شکست موضعی ساختار سلولی را بررسی کردند و نشان دادند چقرمگی شکست به شدت به جهت ساختمان و جهت‌گیری تیرها در ساختارهای سلولی بستگی دارد، و سایر پارامترهای مؤثر بر چقرمگی شکست، چگالی و نرخ بارگذاری است [۲۱].

در مطالعه دیگر چانگ جون‌هان و همکاران خصوصیات توپولوژی‌های ساختارهای سلولی واحد مختلف از جمله مکعبی (CCP)، مکعب محور (FCC)، مکعب متمرکز (BCC) و مکعب توخالی کروی (SHC)، از طریق شبیه‌سازی المان محدود، تست‌های فشرده‌سازی و سپس مکانیسم شکست مورد بحث قرار دادند که در نتیجه سلول FCC دارای پایه‌های شیبدار و تیرهای افقی دارای حداقل میزان تنش در بین چهار توپولوژی سلولی بود. در داریست‌های متخلخل میزان تنش به ترتیب نزولی FCC، BCC، SHC، CCP نشان داده شدند، در توپولوژی‌هایی با اندازه سلول یکسان. در مقایسه، سلول FCC میزان تنش کمتر و خواص تراکم پذیری، مدول الاستیک و مقادیر مقاومت فشاری بهتری را نشان داد [۲۲].

ژنگ ژی و همکاران با تجزیه و تحلیل مشخصات شکست سازه‌های شبکه سه بعدی تحت بار کششی شبه استاتیکی با روش المان محدود و شبیه‌سازی با سه نوع ساختار شبکه دوازده

کلاذواسیلاکسیس و همکاران آزمایشی با ساختار TPMS الماس شوارتز (SD) در چگالی‌های نسبی مختلف (یعنی ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪) انجام دادند. دقت ابعادی، پرداخت سطح و همچنین رفتار مکانیکی قطعات ساخته شده با چگالی‌های مختلف و فناوری‌های چاپ سه بعدی مقایسه شد. هدف اصلی بررسی اثر چگالی نسبی بر عملکرد مکانیکی این ساختارهای شبکه پیچیده با استفاده از دو عملیات چاپ سه بعدی مختلف بود. در این مطالعه نشان داده شد که تمامی خواص مکانیکی مربوط به خمش، مانند: مدول خمش، مقاومت خمشی، تنش برشی هسته نهایی نسبت به چگالی نسبی اعمال شده کنترل می‌شود [۲۷].

در مواد سلولی چگالی یک معیار طبقه‌بندی بسیار مفید است که تأثیر بسزایی بر رفتار مکانیکی شبکه‌ها دارد. پارامتر مهم دیگر در مواد سلولی، چگالی نسبی ρ است که به عنوان نسبت چگالی ماده سلولی ρ به چگالی ماده پایه (جامد) ρ_0 تعریف می‌شود (معادله ۱) [۲۸] چگالی نسبی اساساً تعیین می‌کند که چه مقدار ماده جامد در حجم اشغال شده توسط مواد سلولی وجود دارد. مدل‌هایی برای محاسبه چگالی نسبی چندین نوع مختلف مواد سلولی به عنوان تابعی از طول و قطر پایه در [۲۸] بحث شده اند.

$$\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0} \quad (1)$$

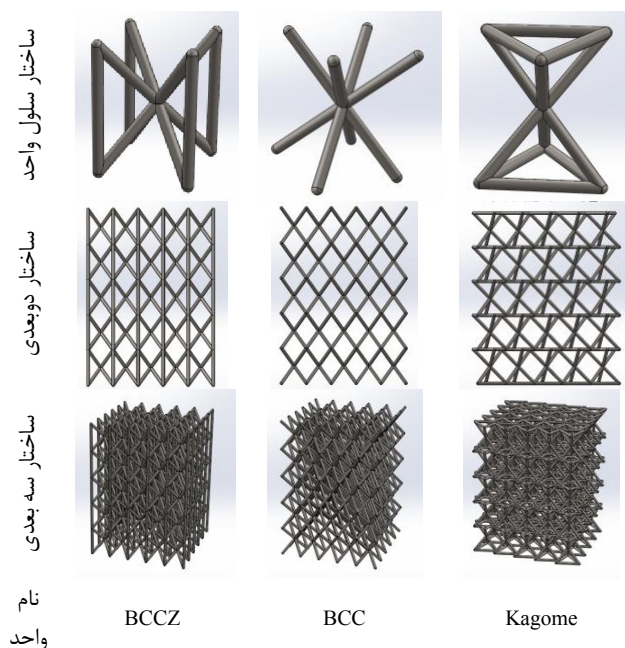


Fig. 1 Some of the most common different architectures of rod-based cellular network structures

شکل ۱ برخی از رایجترین معماری‌های مختلف سازه‌های شبکه‌های سلولی مبتنی بر میله

وجهی لوزی و دو نوع ساختار شبکه سلولی BCC بررسی نمودند و نشان دادند نوع پیکربندی سلول واحد، حالت شکست ساختار شبکه را تعیین می‌کند. فرآیند شکست ساختار شبکه DOD یک تکامل شکست پیشرونده است که شبیه به انتشار ترک است، همچنین ایجاد و تکامل آسیب اولیه پایه‌ها در سلول‌های واحد از معیار شکل پذیری پیروی میکند، یعنی شامل مراحل شکستگی شکل پذیر ناشی از هسته، رشد و ادغام فضای خالی می‌باشد [۲۳].

از طرفی ژین یانگ و همکاران به منظور استفاده ایمن ساختارهای سلولی در بدن انسان برای مدت طولانی، به دست آوردن استحکام کششی بالا و در عین حال بهبود ریزساختارها قطعات کششی از نوع ساختار F2CCZ (سلول واحد مکعبی روبه‌مرکز با پایه‌های عمودی) طراحی و مورد آزمون قرار دادند و در بررسی‌ها نشان دادند که خطای نمونه ساخته شده نسبت به نمونه طراحی شده در تیرهای با زاویه ۴۵ درجه بیشتر از تیرهای مستقیم است که بر نتایج آزمونها تأثیر مستقیم دارد و در نمونه‌هایی که چگالی در نقاطی بالاتر از میزان طراحی شده است منجر به بروز استرس پسماند و تمرکز استرس جدی در اتصال شبکه و جامد تحت بار کششی می‌شود [۲۴].

ژی نیو و همکاران سه نوع مختلف از ساختارهای شبکه با تکرار سه نوع سلول واحد فرم باز متشکل از منشور مثلثی، منشور مربع و منشور شش ضلعی طراحی کردند. نتایج تحلیل اجزای محدود نشان داد که ساختارهای شبکه‌ای با منشور مثلثی از نظر نسبت مدول یانگ به چگالی نسبی بهتر از دو منشور دیگر عمل می‌کنند. نتایج نشان داد که ساختارهای شبکه با شکل مثلثی و منشور عملکرد بهتری نسبت به دو مورد دیگر دارد و منشورها بر حسب مدول کششی یانگ، نسبت چگالی نسبی انواع مختلف سلول‌های واحد و پارامترهای هندسی، درجات مختلفی را نشان دادند [۲۵].

ماسکری و همکاران نشان دادند چارچوب موجود که خواص مکانیکی شبکه‌ها را توصیف می‌کند، بر یک ویژگی مهم، که چگالی نسبی سلول‌های تکرار شونده می‌باشد تأکید زیادی دارد. آنها جهت مطالعه از ساختار سلولی مکعبی متمرکز (BCC) جهت بررسی مدول الاستیک و استحکام کششی نهایی قطعات مشبک با طیف وسیعی از اندازه سلول واحد و چگالی ثابت استفاده کردند و با توجه به استحکام کششی نهایی نسبی شبکه‌ها، وابستگی به اندازه سلول پیش‌بینی نمودند و نشان دادند که بین مدول الاستیک نسبی ساختارهای شبکه و اندازه سلول‌هایی که آنها را تشکیل می‌دهند وابستگی وجود دارد [۲۶].

منحنی‌های تنش- کرنش شبکه‌های تحت تسلط کشش عموماً سختی اولیه و استحکام تسلیم بالاتری نسبت به شبکه‌های تحت تسلط خمش با همان چگالی نسبی دارند. علاوه بر این، نرم شدن پس از تسلیم نیز مشاهده می‌شود، که نشان دهنده شکست تدریجی لایه‌ها است.

سازه‌های تحت سلطه کشش از نظر ساختاری کارآمدتر هستند، اما مستعد شکست‌های ناگهانی هستند و در اتلاف انرژی ناشی از تغییر شکل چندان مؤثر نیستند. از سوی دیگر، سازه‌های تحت سلطه خمش به دلیل خمش پایه‌ها، در منحنی تنش و کرنش قبل از شکست کامل ناحیه صاف بلند تری دارند [۳۱].

در سال‌های اخیر مطالعات مختلفی بر روی پیله کرم ابریشم به عنوان یک ساختار سلولی سلول باز صورت گرفته است. پیله یک ساختار کامپوزیتی بی بافت سه بعدی است که از تکرار یک مدول اولیه به شکل هشت انگلیسی و یا علامت بی نهایت (اینفینیتی) ∞ که توسط کرم ابریشم در طی ساخت پیله به صورت تکرار شونده ایجاد می‌شود، به وجود می‌آید.

در این پژوهش سعی شده با استفاده از چاپ سه بعدی نمونه‌هایی براساس ساختار مشابه ساختار اینفنتی، بکار رفته در پوسته پیله، طراحی شود و خواص مکانیکی آن در مقایسه با یک ساختار میله‌ای مستقیم با چگالی یکسان مورد مقایسه قرار گیرد. همانگونه که در مقاله قبلی خواص جذب انرژی ساختار اینفنتی در مقابل ساختار میله‌ای مورد مقایسه قرار گرفت [۳۲] در مقاله حاضر هدف بررسی تفاوت مکانیسم کشش، خمش و شکست این ساختار در زمان اعمال بار کششی نسبت به ساختار میله‌ای می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مطالعه ساختار حلقه و نبافته

برای بررسی تناسب اندازه‌های حلقه از یک پیله گونه بامبیکس موردی نژاد چینی و ژاپنی استفاده شد. پیله‌ها ابتدا از کناره و سپس در جهت طولی برش خوردند تا بصورت صفحات قابل مطالعه درآیند. نمونه‌ها در زیر میکروسکوپ مورد مطالعه قرار گرفت که همان‌گونه که در شکل ۳ پیدا است، ساختار حلقه بصورت تکی و همچنین ساختار تصادفی نبافته پیله به خوبی قابل مشاهده می‌باشند.

با تجزیه و تحلیل اتصال گره‌ای، مشاهده می‌شود که ساختارهای سلولی هنگام ایجاد تنش به دو صورت خمشی و یا کششی نسبت به تنش از خود عکس العمل نشان می‌دهند. اگر تصور کنیم که اتصالات صلب بین پایه‌ها با پین جایگزین شوند، بسته به اتصال گره شبکه، در هنگام فشرده شدن، سازه می‌تواند به دلیل چرخش پایه‌ها در اطراف اتصالات فرو بریزد و یا به یک قاب خرد تبدیل شود. این طبقه‌بندی به صورت ریاضی با معیار پایداری ماکسول بیان و بر اساس علامت ضریب M مشخص می‌شود که به ترتیب برای سازه‌های تحت سلطه خمشی منفی و برای سازه‌های تحت سلطه کشش مثبت است [۲۹].

برای شبکه‌های دو بعدی، $M = b - 2j + 3$ ، که در آن b تعداد پایه‌ها و j تعداد گره‌ها است (شکل ۲). سازه‌های تحت سلطه کشش از نظر ساختاری کارآمدتر از سازه‌های خمشی هستند [۳۰].

در شکل ۲ ساختار A به عنوان سازه خمشی تعریف می‌شود، زیرا تعداد تیر و گره‌ها با یکدیگر برابر هستند. که موجب شده عدد ماکسول مقدار -1 شود و در نتیجه پایه‌های قاب با اتصالات متصل هنگام بارگذاری خارجی خم می‌شوند (مقاومت در برابر چرخش). در حالی که ساختار B ، که عدد ماکسول در آن برابر صفر شده است، به عنوان یک سازه کششی تعریف می‌شود زیرا اضافه شدن تیر در جهت افقی موجب می‌شود که پایه‌ها عمدتاً به صورت محوری بارگذاری شده و نیروهای کششی را تجربه کنند. در ساختار C وجود ساختار افقی و عمودی موجب توزیع تنش در درون ساختار می‌گردد.

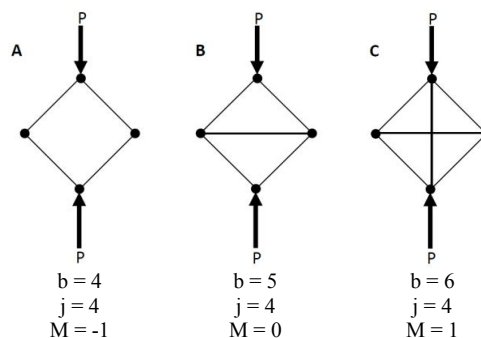


Fig. 2 Examples of unit cells dominated by bending and influenced by tension are shown. M is the Maxwell number, b is the number of bases and j is the number of nodes

شکل ۲ نمونه‌هایی از سلول‌های واحد تحت تسلط خمش و تحت تأثیر کشش نشان داده شده است. M عدد ماکسول، b تعداد پایه‌ها و j تعداد گره‌ها است

۲-۲- طراحی ساختار حلقه

بر اساس نمونه‌های بدست آمده الگویی متناسب با حلقه‌های دارای ساختار نبافته پیله در نرم‌افزار سالیید ورکس^۱ طراحی شد. پارامترهای طراحی به گونه‌ای تنظیم شد که بیشترین تناسب فرمی در ساختارهای طراحی شده با نمونه طبیعی وجود داشته باشد. در شکل ۴ تصویر دو ساختار طراحی شده به همراه پارامترهای طراحی نشان داده شده‌اند. پارامترهای طراحی نیز در جدول ۱ گردآوری شده است.

همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، ۵ پارامتر در طراحی جهت ایجاد ساختار حلقه و تکرار آن استفاده شده است. ۳ پارامتر مربوط به قطر فیلامنت (L_5)، با استفاده از پارامترهای L_1 و L_2 می‌توان به خوبی با آن ویژگی‌های حلقه را کنترل کرد. ۲ پارامتر دیگر L_3 و L_4 مرتبط با تکرار حلقه در جهات افقی و عمودی می‌باشند. جهت حفظ چگالی نمونه‌ها تنها ۲ (L_3 و L_4) پارامتر تغییر داده شده و ۳ پارامتر دیگر ثابت نگه داشته شد.

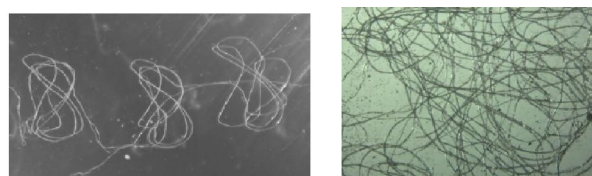


Fig. 3 Light microscope image of rings made in the shape of mathematical infinity sign (∞) by the silkworm

شکل ۳ تصویر میکروسکوپ نوری حلقه‌های ساخته شده به شکل علامت بی‌نهایت ریاضی (∞) توسط کرم ابریشم

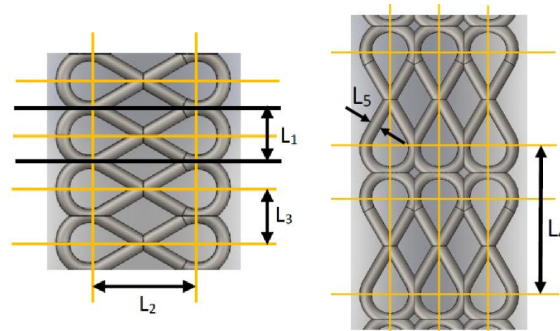


Fig. 4 Parameters used in the design of rings

شکل ۴ پارامترهای استفاده شده در طراحی حلقه‌ها

جدول ۱ مقادیر متغیرهای بکار رفته در طراحی نمونه‌های ساختارهای اینفینیتی تک لایه

Table 1 Values of variables used in the design of samples of single-layer infinity structures

نمونه‌ها	L5 mm	L4 mm	L3 mm	L2 mm	L1 mm
INF A	۲/۵	۳۰	۱۰	۲۰	۱۰
INF B	۲/۵	۲۵	۷	۲۰	۱۰

¹ Solid works

همان‌گونه که قبلاً ذکر شد برای طراحی شبکه‌های دو بعدی ساختارهای سلولی، جهت پیش بینی عملکرد کششی و یا خمشی ساختار می‌توان از عبارت " $M = b - 2j + 3$ " استفاده کرد. که در آن b تعداد پایه‌ها و j تعداد گره‌ها استفاده شده است. براین اساس برای هرکدام از نمونه‌ها ۲ ساختار متمایز براساس تعداد تیر و گره طراحی شد و نتایج آن با یکدیگر مقایسه گردید [۳۳].

براساس مقادیر جدول ۲ تمامی ساختارها عملکرد خمشی دارند اما براساس میزان تیر و گره‌ها این عملکرد متفاوت خواهد بود البته در این فرمول ساختارهای خمیده دیده نشده است. نکته مهم دیگر وجود تعداد گره‌های متمایز در ساختارها است که نقش تعیین کننده در عملکرد مکانیکی ماکرو ساختار در چند لایه‌ها بازی می‌کنند.

جدول ۲ محاسبه تعداد پایه و گره و مقدار عددی M

Table 2 Calculation of the number of bases and nodes and the numerical value of M

نمونه	شکل	تعداد تیر تعداد تیر	تعداد تیر تعداد تیر	M
		گره مستقیم	گره منحنی	
نمونه ۱		۴	۴	-۵
نمونه ۲		۱۲	۱۲	-۷
نمونه ۳		۴	۸	-۵
نمونه ۴		۱۶	۱۶	-۵۷
نمونه ۵		۱۰	۰	-۳

همچنین بیان این نکته ضروری است که در ساختارهای سلولی غیر طبیعی و بشرساخت به دلیل استفاده از ماده صلب اثر چیدمان مواد در درون تیرها عموماً در مقالات نادیده گرفته

استفاده از دستگاه آزمون کشش Santam مطابق با استاندارد ASTM D638 مورد آزمایش قرار گرفتند. جهت ثبت نتایج از لود سل ۲۰۰۰ Kg/f استفاده شد. آزمایش‌ها در دمای اتاق تحت سرعت ۵ میلی متر در دقیقه (نرخ کرنش ثابت) انجام شد.

از طرفی به دلیل مشبک بودن ساختارهای مطالعه شده در این تحقیق، جهت محاسبه مقادیر تنش در نمونه‌های مختلف میزان مساحت سطح مقطع در قسمت برش خورده نمونه‌های تست شده جهت محاسبه استفاده گردید و بدین ترتیب عامل سطح مقطع متفاوت در نمونه‌های طراحی و آزمایش شده در نتایج حاصله حذف گردید و لذا تنش نهایی بدست آمده برای تمام نمونه‌ها معادل شد.

می‌شود، اما همان‌طور که در برخی مقالات ذکر شد [۱۹] به دلیل تولید تیرها به روش افزایشی ساختار مواد تولید شده از اساس ناهمسانگرد می‌باشد. یکی از اهداف تحقیق حاضر بررسی تأثیر جهت گیری فیلامنت در ساختار ماده پرینت شده در نواحی منحنی در میله‌ها می‌باشد. اما به دلیل پیچیدگی ایجاد چنین ساختاری در ماده جهت محاسبات عددی و تولید المان محدودی که بتواند نتایج معنی داری را نسبت به ماده همسانگرد ایجاد کند در این پژوهش از شبیه‌سازی آن صرف نظر شد و سعی گردید با طراحی آزمایش‌های تجربی متفاوت تأثیر جهت گیری فیلامنت در ساختار ماده پرینت شده در نواحی منحنی در میله‌ها نشان داده شود.

۲-۳- چاپ سه بعدی

برای ساخت نمونه‌های از چاپگر سه بعدی استفاده شد. به دلیل آنکه پیله از رشته‌های الیاف به هم چسبیده بوجود می‌آید در میان روشهای مختلف، چاپ سه بعدی FDM که قطعات را از رشته‌های فیلامنت ذوب شده در کنار هم ایجاد می‌کند، شباهت ساختاری نسبتاً خوبی به رشته‌های تار ابریشم دارد. روش‌های مختلفی جهت ساخت نمونه‌ها به روش چاپ سه بعدی وجود دارد که انتخاب روش ساخت و به خصوص مواد بکاررفته در فرایند تولید تأثیر مستقیم در نتایج حاصل از نتایج تجربی دارد. از میان روش‌های مرسوم روش ذوب فیلامنت و چیدمان رشته‌های ذوب شده همان‌گونه که در نتایج آزمون نشان داده خواهد شد بخوبی می‌تواند رفتار مواد ناهمسانگرد تشکیل شده از الیاف جهت دار را همچون رشته‌های تار ابریشم بکار رفته در پیله نشان دهد. جهت چاپ از فیلامنت ABS با قطر ۱/۷۵ میلی‌متر (مجیک فیلامنت) استفاده شد که از استحکام و چسبندگی لایه‌ای خوبی برخوردار است.

جهت ساخت نمونه‌های آزمایش تجربی قطعات در ابعاد ۲۱۲*۳۴*۲٫۵ میلی‌متر با پرشدگی (infill) ۱۰۰٪ ساخته شدند. جهت چاپ نمونه‌های از فیلامنت ABS و چاپگر مدل Top 3D استفاده شد دمای نازل ۲۳۰ و دمای صفحه ساخت ۸۰ درجه سانتی‌گراد بصورت ثابت برای همه نمونه‌ها چاپ تنظیم شد. در شکل ۵ تصاویر و ابعاد نمونه‌های چاپ شده نمایش داده شده‌اند.

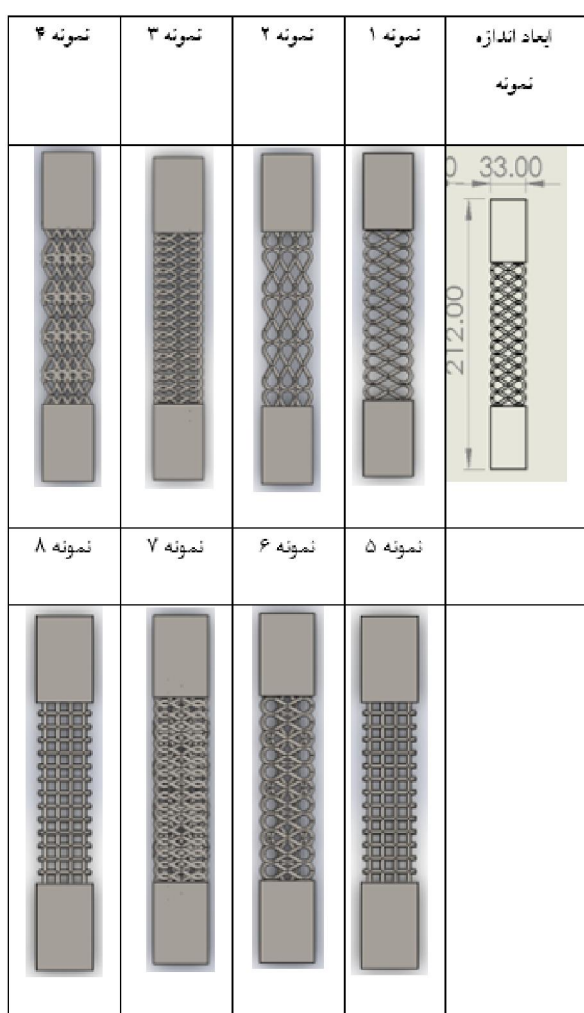


Fig. 5 Images and dimensions of printed samples for tensile test in a single layer and double layer

شکل ۵ تصاویر و ابعاد نمونه‌های چاپ شده جهت آزمون کشش بصورت تک لایه و دولایه لایه

در شکل ۶ شمایی از نحوه قرار گرفتن نمونه‌ها در دستگاه کشش نشان داده شده است.

۲-۴- آزمون کشش

آزمایش‌های کششی بر روی ساختار چاپ شده برای تعیین میزان تنش، کرنش و مدول الاستیک آنها انجام شد. نمونه‌های با

در جدول ۳ نتایج آزمون تجربی نمونه‌ها نشان داده شده است و تأثیر تعداد گره بر استحکام نمونه بخوبی مشاهده می‌شود. مقدار استحکام کششی در نمونه ۳ نسبت به نمونه ۱ به میزان $33/8\%$ و در نمونه ۴ نسبت به نمونه ۲ به مقدار $44/3\%$ بیشتر است. این تفاوت نشان از تأثیر افزایش تعداد گره در ایجاد استحکام در نمونه‌ها دارد در حالی که بیشترین ازدیاد طول مربوط به نمونه ۱ به میزان $4/13\%$ در نقطه پارگی می‌باشد. این ازدیاد طول را می‌توان به جهت‌گیری فیلامنت چاپ شده در نمونه نسبت به محور کشش و تبدیل تنش کششی به تنش برشی مرتبط دانست.

در نمونه ۲ کرنش به میزان $46/5\%$ نسبت به نمونه ۱ کمتر است و این در حالی است که مدول کششی به میزان $150/3\%$ نسبت به مدول کششی در نمونه ۱ بیشتر است. که به علت تفاوت در جهت‌گیری میله‌های مستقیم و تأثیر جهت آن در ساختار هندسی حلقه‌ها است. مقدار استحکام در نمونه‌های دولایه (نمونه‌های ۷، ۶ و ۸) نسبت به نمونه‌های تک لایه (نمونه‌های ۴، ۲ و ۵) تغییر چندانی نکرده و این در حالی است که استحکام در نمونه ۷ نسبت به نمونه ۳ به میزان $238/7\%$ و در نمونه ۶ نسبت به نمونه ۱ به مقدار $105/9\%$ افزایش دارد. بنابراین می‌توان به خوبی تأثیر چیدمان و افزایش گره‌ها را در ساختارهای سلولی در مشاهده کرد، به نحوی که با افزایش تعداد گره در نمونه ۴ نسبت به نمونه ۲ مقدار مدول $86/9\%$ افزایش می‌یابد.

در شکل ۷ خلاصه نتایج بدست آمده از آزمون کشش نمونه‌های تهیه شده ترسیم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد گره و عدد ماکسول استحکام و مدول در نمونه‌ها افزایش پیدا کرده و از میزان کرنش کاسته می‌شود. بیشترین میزان مدول و تنش کششی مربوط به نمونه شماره ۵ به میزان $908/6$ مگاپاسکال و 1045 مگاپاسکال است. علت کاهش $17/5\%$ تنش کششی و $18/2\%$ مدول کششی در نمونه ۸ نسبت به نمونه ۵ را می‌توان به عدم چسبندگی مناسب بین لایه‌ای در تعداد لایه بیشتر به دلیل ذات فرآیند چاپ سه بعدی ذوبی نسبت داد. این در حالی است که بیشترین مقدار نیرو بر سطح تا پارگی مربوط به نمونه ۷ به مقدار $1454/3$ نیوتن و بیشترین مقدار کرنش $11/6$ میلی‌متر کمترین مقدار تنش کششی $111/8$ مگاپاسکال مربوط به نمونه ۱ می‌باشد. این تفاوت در مقادیر نمونه‌ها نشان دهنده وجود ساختار غیر ایزوتروپیک در ساختارهای تک لایه می‌باشد که می‌تواند تحت تنش محوری مشابه خواص متفاوتی از خود نشان دهد.



Fig. 6 A picture of how the samples are placed in the tensile test machine

شکل ۶ شمایی از نحوه قرار گرفتن نمونه‌ها در دستگاه آزمون کشش

۳- نتایج تجربی

همان‌گونه که ذکر شد از میان ۵ پارامتر مشخص شده در آزمایش ۳ پارامتر ثابت و ۲ پارامتر L_3 و L_4 تغییر داده شد. بر این اساس ۸ نقشه طراحی و از هر نمونه ۳ تکرار و در مجموع ۲۴ قطعه ساخته شد. اثرات جهت، فاصله و اندازه حلقه و ضخامت لایه بر حداکثر استحکام کششی مشاهده شده در جدول ۳ گرد آوری داده شده است.

جدول ۳ نتایج آزمون کشش نمونه‌های یک و دولایه

Table 3 Tensile test results of one and two-layer samples

نمونه	Force (N)	Extension (mm)	Stress (Mpa)	Elongation (%)	Module (Mpa)
۱	تنش تسلیم ۲۵۳/۱	۶/۱۱	۳/۲۲	۲/۸۸	۱۱۱/۸
	شکست ۳۶/۸	۸/۷۷	۰/۴۶	۴/۱۳	۱۱/۱۳
۲	تنش تسلیم ۵۰۸/۶	۳/۲۹	۴/۳۱	۱/۵۴	۲۹۷/۸۷
	شکست ۴۹۹/۳	۳/۶۰	۴/۲۴	۱/۷۰	۲۴۹/۴۱
۳	تنش تسلیم ۴۳۳/۱	۵/۶۲	۳/۶۷	۲/۷۰	۱۳۵/۹۲
	شکست ۴۳۱/۱	۵/۸۹	۳/۶۶	۲/۷۸	۱۳۱/۶۵
۴	تنش تسلیم ۹۶۰/۹	۲/۴۹	۶/۱۲	۱/۱۷	۵۲۳/۰۷
	شکست ۹۵۴/۵	۲/۶۰	۶/۰۷	۱/۲۳	۴۹۳/۴۹
۵	تنش تسلیم ۸۲۰/۶	۲/۴۳	۱۰/۴۵	۱/۱۵	۹۰۸/۶۹
	شکست ۷۹۸/۵	۲/۷۳	۱۰/۱۷	۱/۲۹	۷۸۸/۳۷
۶	تنش تسلیم ۸۰۵/۹	۳/۷۷	۴/۱۰	۱/۷۸	۲۳۰/۳۳
	شکست ۸۰۲/۵	۳/۸۴	۴/۰۸	۱/۸۱	۲۲۵/۴۱
۷	تنش تسلیم ۱۴۵۴/۳	۲/۸۴	۶/۱۷	۱/۳۴	۴۶۰/۴۴
	شکست ۱۴۰۸/۷	۳/۰۵	۵/۹۸	۱/۴۳	۴۱۸/۱۸
۸	تنش تسلیم ۱۳۵۴/۳	۲/۴۷	۸/۶۲	۱/۱۶	۷۴۳/۱۰
	شکست ۱۳۰۶/۷	۴/۰۵	۸/۳۲	۱/۹۱	۴۳۵/۶

در شکل ۸ نتایج آزمون تنش- کرنش نمونه‌های ۱ تا ۵ رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در این نمونه‌ها مقادیر و روند تنش تسلیم، کرنش و مدول بسیار متفاوت است. در نمونه ۵ در جهات ۰ و ۹۰ میزان تنش و کرنش برابر است اما مقدار تنش در نمونه ۱ به مقدار ۲/۲۵٪ کمتر از نمونه ۲ و به مقدار ۱/۶۹٪ کمتر از نمونه ۵ است. کمترین مقدار مدول مربوط به نمونه ۱ به میزان ۱۱۱/۸ مگاپاسکال و بیشترین مقدار مدول مربوط به نمونه ۵ به میزان ۹۰۸/۶ مگاپاسکال می‌باشد. این در حالی است که مدول در جهت نمونه ۲ به مقدار ۳/۱۵۰٪ بیشتر از نمونه ۱ می‌باشد. بیشترین کرنش مربوط به نمونه ۱ که در حداکثر کشش به مقدار ۲/۸۸٪ و در نقطه پارگی به میزان ۴/۱۳٪ می‌باشد. نمودار نمونه ۱ دچار شکست‌های پلکانی است که عملکردی کاملاً متفاوت در شکست نسبت به سایر نمونه‌ها را نشان می‌دهد. وجود نقاط شکست مختلف و ایجاد ساختار پلکانی در شکست بیانگر شکست در نقاط مختلف در میله و گره در ساختار حلقه می‌باشد. وجود حلقه موجب شکست چند مرحله‌ای و افزایش کرنش و در نتیجه اتلاف انرژی بیشتر می‌گردد.

همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده تعداد میله و گره در نمونه‌های تک لایه (نمونه ۲ و نمونه ۴) باهم برابر است. اما تعداد میله منحنی که در اثر برخورد حلقه و ایجاد گره بوجود می‌آید در نمونه ۴ به میزان ۴/۱۷۱٪ بیشتر است. تغییر فاصله میان حلقه‌ها و افزایش تعداد میله‌های منحنی موجب تغییر رفتار کششی نمونه‌ها نسبت به هم شده است. این تغییر رفتار به گونه‌ای است که مدول کششی ۹/۸۶٪ در نمونه ۴ بالاتر است و کرنش ۶/۳۱٪ در نمونه ۲ بیشتر است. تعداد گره بیشتر موجب توزیع تنش بیشتر، استحکام و مدول بالاتر و کرنش کمتر در نمونه گردیده است.

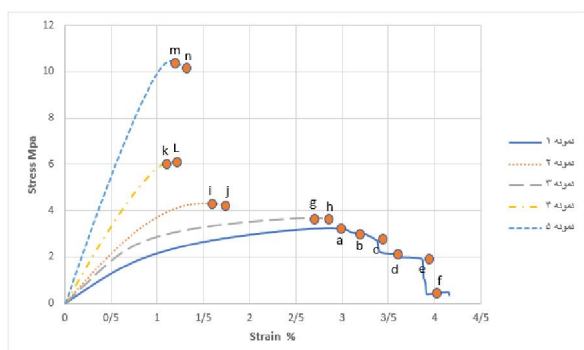


Fig. 8 Comparative results of the tensile test of sample 1 to sample 5 of single layer

شکل ۸ نتایج مقایسه‌ای آزمون کشش نمونه ۱ تا نمونه ۵ تک لایه

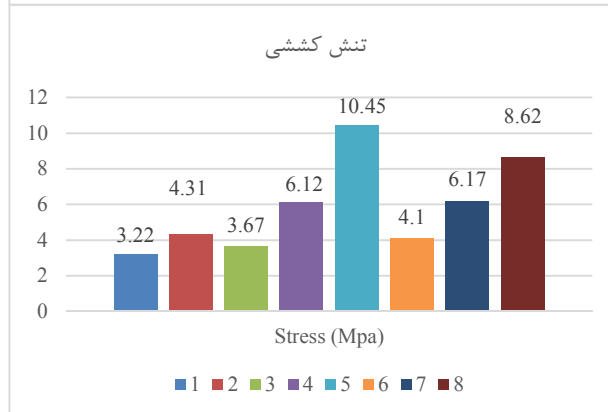
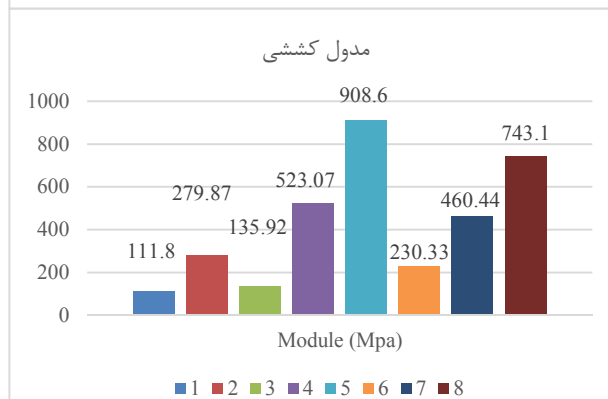
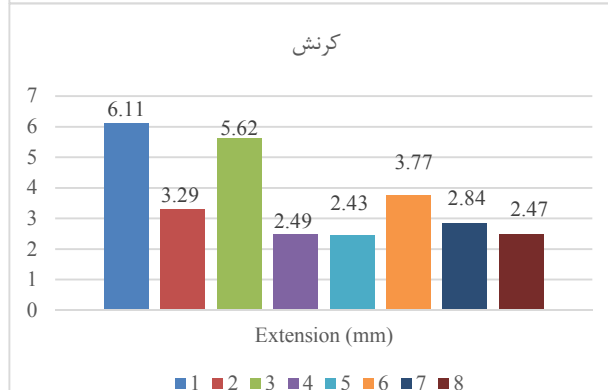
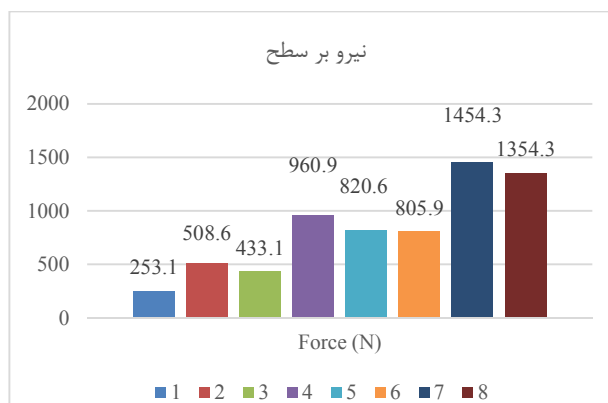


Fig. 7 Comparative results of tensile test of single-layer and double-layer samples

شکل ۷ نتایج مقایسه‌ای آزمون کشش نمونه‌های تک لایه و دولایه

تسلیم و تنش در حد پارگی به میزان ۰/۷۵٪ بود. در نمونه ۷ که بیشترین گره و کوچکترین عدد ماکسول را نسبت به سایر نمونه‌ها برخوردار است پس از تنش تسلیم در نقطه c کرنش تنها به میزان ۰/۰۹٪ افزایش می‌یابد. تعداد گره و مقدار عدد ماکسول ماده، چیدمان و نحوه اتصال حلقه‌ها و زاویه میله‌های تأثیر مستقیم بر رفتار مکانیکی ساختارها دارد.

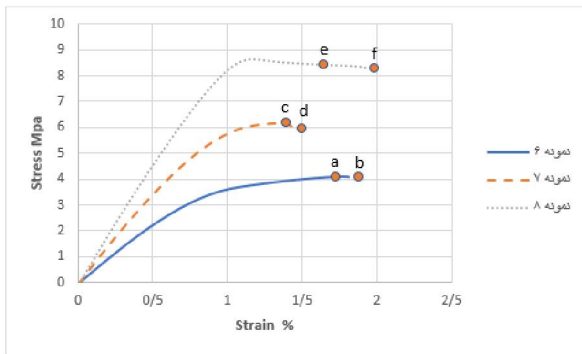


Fig. 9 Comparative results of tensile test of samples 6, 7, and 8 in 2 layers

شکل ۹ نتایج مقایسه‌ای آزمون کشش نمونه‌های ۶، ۷ و ۸ بصورت ۲ لایه

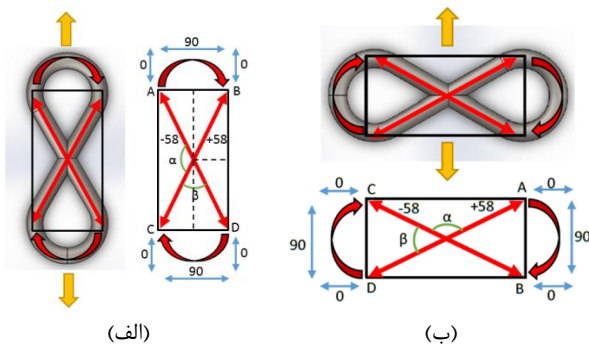


Fig. 10 The orientation of materials in infinity samples in samples 1 and 2

شکل ۱۰ نحوه جهت گیری مواد در نمونه‌های اینفینیتی در نمونه ۱ و ۲

۴- بررسی مکانیزم شکست

در شکل ۱۲ نحوه چیدمان ساختار تیرهای مستقیم و حلقه بطور شماتیک مشخص شده است. همان‌طور که دیده می‌شود ساختار حلقه از ۲ تیر مستقیم با زاویه داخلی آلفا و بتا تشکیل شده است. میزان زاویه داخلی تیرها بر رفتار مکانیکی ساختار حلقه نسبت به بار کششی تأثیر مستقیم دارد. همان‌طور که در شکل ۱۲- الف دیده می‌شود وجود زاویه ۵۸ درجه نسبت به محور افقی موجب می‌شود که تیرها اختلاف زاویه کمتری نسبت به محوری عمودی داشته باشند که در نتیجه نسبت به نمونه شکل ۱۲- ب که تیرها دارای زاویه ۳۲ درجه‌ای نسبت به محور افقی هستند تحت بار کششی، از استحکام و مدول کششی بیشتری برخوردار هستند [۳۵].

در نمونه ۱ و نمونه ۳ همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده تعداد میله و گره در هر دو ساختار باهم برابر است اما تعداد میله منحنی در نمونه ۳ دو برابر بیشتر است. این موضوع سبب افزایش مدول کششی در نمونه ۳ به مقدار ۲۱/۵٪ نسبت به نمونه ۱ می‌گردد. ساختار نمونه ۱ علاوه بر داشتن بیشترین مقدار کرنش به میزان ۴/۱۳٪ دارای بیشترین اختلاف کرنش در تنش تسلیم تا پارگی به میزان ۵۲/۹٪ نسبت به نمونه ۳ می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است رفتار نمونه ۱ و نمونه ۳ پس از تنش تسلیم متفاوت از یکدیگر است. به گونه‌ای که با افزایش تنش کششی پس از تنش تسلیم نمونه ۳ در نقطه g تنش به مقدار کمتری به نسبت نمونه ۱ جهت جذب انرژی افزایش می‌یابد و پس از رسیدن به نقطه h شکست یکباره اتفاق می‌افتد. این در حالی است که در نمونه ۱ با افزایش تنش و عبور تنش از نقطه a ماده دچار شکست مرحله‌ای شده که نشان از جدایش ماده از طریق گره‌ها بصورت جدا گانه از یکدیگر می‌باشد که وجود نقاط مختلف b, c, d, e, f به این دلیل است. بنابراین با اینکه ساختار نمونه ۳ از استحکام بالاتری برخوردار می‌باشد ولی در عین حال ساختار نمونه ۱ از قابلیت اتلاف انرژی تا پارگی بیشتری برخوردار می‌باشد.

نتایج آزمون کشش دو لایه در نمونه‌های ۶، ۷ و ۸ در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین میزان تنش کششی در نمونه ۸ به میزان ۸/۶۲ مگاپاسکال ثبت شده است. استحکام نمونه ۸ نسب به نمونه ۶ به میزان ۱۰۲/۹٪ و نمونه ۷ به مقدار ۳۴/۸٪ بیشتر است که می‌تواند به علت وجود تعداد گره و میله و به تبع آن عدد ماکسول بیشتر باشد. بیشترین میزان کرنش تسلیم در ساختارهای دولایه در نمونه ۶ و به میزان ۱/۷۸٪ بود. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود میان تنش تسلیم تا تنش در نقطه پارگی، کرنش الاستیک میان ۳ نمونه متفاوت است. در نمونه ۸ بیشترین مقدار کرنش پس از تنش تسلیم به میزان ۱/۹۱٪ مشاهده می‌شود که می‌توان علت کاهش مدول و تنش کششی در نمونه ۸ نسبت به نمونه ۵ را به این موضوع نسبت داد.

در نمونه ۶ در نقطه a کرنش ۱/۷۸٪ است اما در نقطه پارگی b به میزان ۱/۸۱٪ می‌باشد. در نمونه ۶ در حالی که کرنش افزایش می‌یابد تنش نیز به آرامی افزایش می‌یابد که این رفتار در سازه‌های جذب انرژی مشاهده می‌گردد [۳۴]. در نمونه ۸ که بصورت میله مستقیم ساخته شده پس از تنش تسلیم در نقطه e، با افزایش کرنش تنش کاهش می‌یابد تا نقطه f که پارگی رخ می‌دهد، که بالاترین تغییرات کرنش مابین تنش

نشان می‌دهد.

در شکل ۱۲ رفتار شکست در نمونه ۲ مشاهده می‌شود، نقاطی که تمرکز تنش در آن وجود دارد با دایره‌های قرمز مشخص شده است. در شکل ۱۲-الف خط برش و جدایش در نمونه ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود شکست در قسمت میانی حلقه و به صورت خط مستقیم عمود بر راستای تنش کششی رخ می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۲-ب دیده می‌شود نقاط برش در اتصالات میانی در یک مکان (محل تقاطع دو تیر) هستند اما در حلقه‌های کناری نقاط برش جابجا شده و به بالاتر از خط تغییر زاویه منتقل شده است. این امر نشان دهنده این مهم است که شکست از نواحی گره ایجاد شده در محل تلاقی تیرها صورت می‌پذیرد. این تغییر جهت موجب ایجاد زاویه θ حدود $7/5$ درجه در نمونه شماره ۲ می‌شود که نسبت به زاویه گاما در نمونه ۱ کوچکتر بوده و در تبدیل تنش کششی به برشی تأثیر اثرگذاری کمتری دارد.

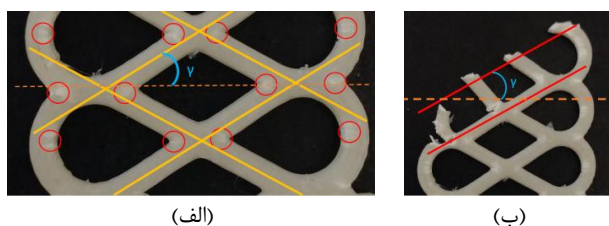


Fig. 11 failure analysis Sample 1

شکل ۱۱ تحلیل شکست نمونه ۱

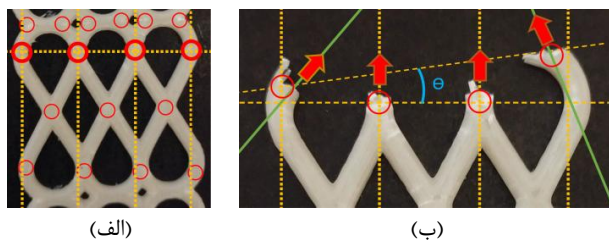


Fig. 12 failure analysis Sample 2

شکل ۱۲ تحلیل شکست نمونه ۲

شکل ۱۳ نحوه توسعه ترک در نمونه‌ها را پس از آزمون کشش محوری نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱۳-الف مشاهده می‌شود در میله‌های مستقیم ترک‌ها صاف بوده و ناهمواری خاصی ندارند. این امر می‌تواند نشانی مبنی بر تحمل بار تا حداکثر شکست، دلیل استحکام و مدول بالا و کرنش کم توسط میله‌های مستقیم باشد. همان‌طور که در شکل ۱۳-ب دیده می‌شود در قسمتی که حلقه‌ها به هم رسیده و مستقیم در جهت نیرو قرار می‌گیرند (مانند نمونه ۵) محل برش‌ها صاف بوده و این ساختار نیز از کرنش کم و استحکام و مدول بالاتری

از طرف دیگر نمونه شکل ۱۲-ب هنگامی که در جهت عمودی تحت بار کششی قرار می‌گیرد به دلیل بزرگتر بودن زاویه تیرها نسبت به جهت کشش میزان استحکام و مدول پایین‌تری را نسبت به شکل ۱۲-الف از خود نشان می‌دهد. به غیر از تیرها وجود ساختار حلقه در انتهای تیرها ویژگی منحصر به فردی از چیدمان الیاف در این ساختار را فراهم می‌آورد به گونه‌ای که در تمامی جهات از جمله جهت ۰ و ۹۰ نیز الیاف وجود دارد و این موجب می‌گردد این ساختار بتواند در تمامی جهاتی که تحت بار کشی قرار می‌گیرد عکس‌العمل از خود نشان دهد. وجود چیدمان‌های مختلف می‌تواند موجب ایجاد گره‌های متفاوت میان ساختارهای چندلایه و همچنین تغییر جهت نیرو و تبدیل آن از نیروی کششی به برشی شود که می‌تواند در اتلاف انرژی نقش مهمی بازی کند [۳۶].

با توجه به اینکه در نمونه ۲ (شکل ۱۰-الف) میله‌های مستقیم در جهت عمودی، نسبت به محور کششی اختلاف زاویه کمتری نسبت به نمونه ۱ (شکل ۱۰-ب) دارند بنابراین نمونه ۲ تنش بیشتری را در مقابل بار اعمالی تجربه می‌کند. در ساختار نمونه ۲ تنش کششی توسط ساختارهای قطری مثبت و منفی با زاویه ۵۸ درجه تحمل می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نقاط a, b, c, d تنش محوری تغییر جهت داده و تنش کششی تبدیل به تنش برشی می‌گردد. بنابراین زاویه‌های آلفا و بتا در جهت گیری الیاف میانی حلقه تأثیر مستقیم داشته و زاویه آن نسبت به محور اصلی کشش، بر نحوه رفتار حلقه‌ها مؤثر بوده و از پارامترهای تأثیر گذار بر خواص حلقه است [۳۷، ۳۸].

در شکل ۱۱ مکانیزم شکست در ساختار نمونه ۱ در جهت عمودی نشان داده شده است. در ساختار نمونه ۱ تنش به صورت یکنواخت در ساختار حلقه توزیع شده است، تغییر رنگ مشاهده شده در نقاطی که توسط دایره‌های قرمز در شکل ۱۱-الف مشخص شده است نشان دهنده تمرکز تنش در آن نقاط است. همانگونه که در شکل ۱۱-ب نشان داده شده است جداسازی در چهار نقطه ایجاد شده که با زاویه گاما نسبت به محور قرار گرفته‌اند رخ می‌دهد. این زاویه پارگی موجب اتلاف انرژی در مکانیزم برش می‌گردد و همانند توسعه ترک در اتصالات صفحات پین شده عمل می‌کند که موجب ایجاد مکانیزم تسلیم برشی در هنگام شکست می‌شود. این در حالی است که نمونه ۱ با افزایش بار کششی با بیشترین کرنش $8/77$ میلی‌متر) نسبت به سایر نمونه‌ها همراه است که این به معنای کاهش مدول الاستیک در سازه می‌باشد. زاویه ترک و برش گاما با زاویه بتا که در تیرهای مستقیم وجود دارد تطابق خوبی را

تعداد گره مقدار استحکام و مدول کششی افزایش و مقدار کرنش کاهش پیدا می‌کند، که این امر را می‌توان به توزیع بهترین نیرو در افزایش تعداد گره‌ها نسبت داد.

در ساختارهای چند لایه با افزایش تعداد گره و اتصال میان لایه‌ها در ساختارهای اینفینیتی شاهد ساختاری با رفتار همگن تر نسبت به تعداد گره و حلقه‌های کمتر هستیم.

به نظر می‌رسد ساختار اینفینیتی که توسط کرم ابریشم در ایجاد پيله به کار می‌رود برای خواص نظیر جذب انرژی که نیازمند تبدیل مدول کششی به مدول برشی می‌باشند توسعه پیدا کرده است.

بررسی نمونه‌های پس از آزمون کشش نشان داد که مکانیزم شکست در ساختار اینفینیتی یک مکانیزم غیر خطی است که به جهت گیری حلقه، لایه و زاویه آلفا و بتا درون ساختار حلقه وابسته است. ترکیب میله‌های مستقیم به حلقه‌ها با زاویه‌های آلفا و بتا موجب جهت گیری متنوع در ساختار حلقه و رفتار متفاوت در جهات گوناگون می‌شود. نقاط شکست پراکنده و ایجاد زاویه شکست در نقاط جدایش موجب تولید ساختاری مناسب جهت اتلاف، جذب انرژی و تبدیل تنش کششی محوری به مدول برشی می‌شود.

۶- مراجع

- [1] M. Marino, R. Sabatini, *Advanced lightweight aircraft design configurations for green operations*, in: PRCC 2014, Engineers Australia, 2014.
- [2] Jansto, S. *Steel Producers Respond to Demand for High Performance Bridge Steels with Niobium*; CBMM North America, Inc.: Pittsburgh, PA, USA, 2020; Available online: www.cbmm.com (accessed on 15 August 2021).
- [3] J.C.Najmon, J.DeHart, Z. Wood, A. Tovar, SAE Int, J.Transp,Saf, 6 (3) (2018).
- [4] Lutsey, N. *Review of Technical Literature and Trends Related to Automobile Mass-Reduction Technology*; Research Report UCD-ITS-RR-10-10; Institute of Transportation Studies, University of California: Davis, CA, USA, 2010.
- [5] Walton, D.; Moztarzadeh, H. *Design and Development of an Additive Manufactured Component by Topology Optimization*. Procedia CIRP 2017, 60, 205–210.
- [6] M. Ashby, Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci. 364 (1838) (2006) 15–30.
- [7] Rosen, D.W. *Computer-Aided Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures*. Comput.-Aided Des. Appl. 2007, 4, 585–594.
- [8] X.P. Tan, Y.J. Tan, C.S.L. Chow, S.B. Tor, W.Y. Yeong, Mater. Sci. Eng. C 76 (2017) 1328–1343.
- [9] X. Xia, Z. Zhang, W. Zhao, C. Li, J. Ding, C. Liu, Y. Liu, *Acoustic properties of closed-cell aluminum*

نسبت به نمونه‌های ۱ و ۳ برخوردار است. در شکل ۱۳- ج بریدگی در نقاط مختلف حلقه مشاهده می‌شود که علت آن را می‌توان به جهت گیری مواد در حلقه نسبت داد [۳۹]. همان‌طور که با دایره قرمز مشخص شده رشته‌های مواد چاپ شده در ساختار از هم گسسته شده که این گسستگی به دلیل ایجاد تنش برشی در ساختار ماده و اتلاف انرژی می‌باشد. بهترین نمونه اتلاف انرژی و تبدیل مدول کششی به تنش برشی در شکل ۱۳- د دیده می‌شود [۴۰]. همان‌طور که در شکل مشخص شده در اثر تنش کششی لبه برش در ساختار بصورت دنداندار است که این فرم مخروطی در لبه برش به دلیل بروز تنش برشی در ترک ایجاد می‌شود که مانند اتصال ۲ صفحه هم محور با پین یا پیچ عمل کرده [۴۱] و با تبدیل تنش کششی محوری به تنش برشی مانع انتشار ترک به سمت جلو می‌گردد. در نتیجه چقرمگی شکست افزایش یافته که موجب اتلاف انرژی در زمان تنش کششی می‌گردد [۴۲، ۴۳].

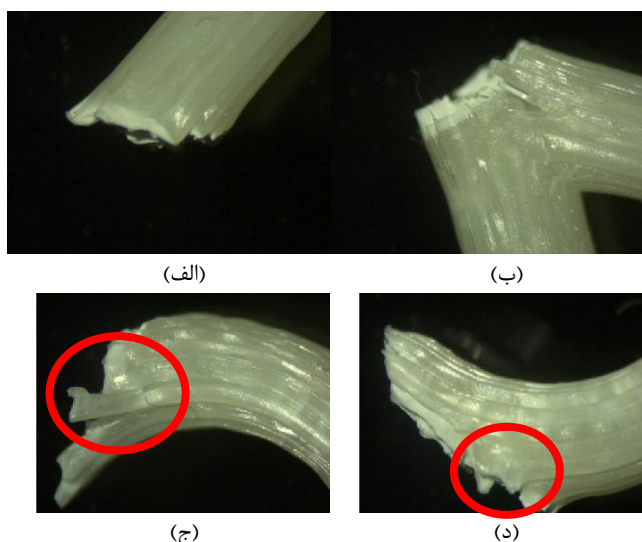


Fig. 13 How material breaks in the structure of the infinity ring

شکل ۱۳ نحوه شکست مواد در ساختار حلقه اینفینیتی

۵- نتیجه گیری

ساختار اینفینیتی نسبت به ساختارهای میله‌ای در جهات مختلف به صورت ناهمگن و غیر ایزو تروپیک می‌باشد که این امر سبب رفتار تنش و کرنش مختلف در جهات متفاوت می‌گردد.

در ساختارهای اینفینیتی به صورت تک لایه کرنش در یک جهت نسبت به جهت دیگر می‌تواند از ۸۶٪ تا ۱۴۳٪ تغییر کند. در حالی که مقدار تنش کششی در یک جهت می‌تواند تا ۱۰۰٪ از جهت دیگر بیشتر باشد. با توجه به فرمول ماکسول با افزایش

- characteristic analysis of cellular lattice structures under tensile load*. International Journal of Solids and Structures. 2019 May 15;163:170-7.
- [24] Yang X, Ma W, Gu W, Zhang Z, Wang B, Wang Y, Liu S. *Multi-scale microstructure high-strength titanium alloy lattice structure manufactured via selective laser melting*. RSC advances. 2021;11(37):22734-43.
- [25] Niu J, Choo HL, Sun W. *Finite element analysis and experimental study of plastic lattice structures manufactured by selective laser sintering*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. 2017 Feb;231(1-2):171-8.
- [26] Maskery I, Aremu AO, Simonelli M, Tuck C, Wildman RD, Ashcroft IA, Hague RJ. *The BCC unit cell for latticed SLM parts; mechanical properties as a function of cell size*. In 2014 International Solid Freeform Fabrication Symposium 2014. University of Texas at Austin.
- [27] Kladovasilakis N, Charalampous P, Tsongas K, Kostavelis I, Tzetzis D, Tzovaras D. *Experimental and Computational Investigation of Lattice Sandwich Structures Constructed by Additive Manufacturing Technologies*. Journal of Manufacturing and Materials Processing. 2021 Aug 31;5(3):95.
- [28] V.S. Deshpande, M.F. Ashby, N.A. Fleck, Acta Mater. 49 (6) (2001) 1035–1040.
- [29] N.A. Fleck, V.S. Deshpande, M.F. Ashby, Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci. 466 (2121) (2010) 2495–2516, 2010.0215.
- [30] M. Ashby, Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci. 364 (1838) (2006) 15–30, 2005.1678.
- [31] L. Gibson, M. Ashby, B. Harley, *Cellular Materials in Nature and Medicine*, 2010.
- [32] M. Hosseini Vajari, S. Dariushi, M. Behzadnasab, *An experimental investigation on mechanical properties of 3D-printed bioinspired sandwich panels based on silk cocoon geometry*.
- [33] M. Benedetti, A. du Plessis, R.O. Ritchie, M. Dallago, S.M.J. Razavi, F. Berto, *Architected cellular materials: A review on their mechanical properties towards fatigue-tolerant design and fabrication*, Materials Science and Engineering: R: Reports, Volume 144, 2021.
- [34] S. Boria, *Lightweight Design and Crash Analysis of Composites*. J.Njuguna (Eds.), *Lightweight Composite Structures in Transport*, pp. 329-360, New York: Woodhead Publishing, 2016.
- [35] Zaki Alomar, Franco Concli, *Compressive behavior assessment of a newly developed circular cell-based lattice structure*, Materials & Design, Volume 205, 2021.
- [36] Yige Liu, Hao Hua, Biao Li, *Exploration and design of knitted composites for architectural application: The MeiTing project*, Frontiers of Architectural Research, 2022.
- [37] Kononova, O., Krasnikovs, A., Harjkova, G., Zaļeskijs, J., & Mačanovskis, *Characterization of foams with different macrostructures*, J. Mater. Sci. Technol. 33 (2017) 1227.
- [10] E. Farre'-Guasch, J. Wolff, M. N. Helder, E. A. Schulten, T. Forouzanfar and J. Klein-Nulend, *Application of additive manufacturing in oral and maxillofacial surgery*, J. Oral Maxillofac. Surg., 2015, 73(12), 2408–2418.
- [11] J. Skibinski, K. Cwieka, T. Kowalkowski, B. Wysocki, T. Wejrzanowski, K.J. Kurzydowski, *The influence of pore size variation on the pressure drop in open-cell foams*, Mater. Des. 87 (2015) 650–655.
- [12] C. Moon, D. Kim, G.B. Abadi, S.Y. Yoon, K.C. Kim, *Effect of ligament hollowness on heat transfer characteristics of open-cell metal foam*, Int. J. Heat Mass Transf. 102 (2016) 911–918.
- [13] S. Catchpole-Smith, R.R.J. S'elo, A.W. Davis, I.A. Ashcroft, C.J. Tuck, A. Clare, *Addit. Manuf.* 30 (2019) 100846.
- [14] O. Nematollahi, G.B. Abadi, D.Y. Kim, K.C. Kim, *Experimental study of the effect of brazed compact metal-foam evaporator in an Organic Rankine Cycle (ORC) performance- toward a compact ORC*, Energy Convers. Manage. 173 (2018) 37–45.
- [15] Ivanova O, Williams C, Campbell T. *Additive Manufacturing (AM) and nanotechnology: Promises and Challenges*. *Rapid Prototyping Journal*. 2013;19(5):353-64.
- [16] Tang YL, Dong GY, Zhou QX, et al. *Lattice structure design and optimization with additive manufacturing constraints*. IEEE Trans Autom Sci Eng 2018;15(4):1546–62.
- [17] A. Nazir, K.M. Abate, A. Kumar, J.Y. Jeng, Int. J. Adv. Manuf. Technol 104 (9–12) (2019) 3489–3510,
- [18] L.J. Gibson, M.F. Ashby, *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- [19] Nazir, A., Abate, K.M., Kumar, A. et al. *A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures*. Int J Adv Manuf Technol 104, 3489–3510 (2019).
- [20] Gorgularslan, R. M., Park, S., Rosen, D. W., and Choi, S. (October 12, 2015). "A Multilevel Upscaling Method for Material Characterization of Additively Manufactured Part Under Uncertainties." ASME. J. Mech. Des. November 2015; 137(11): 111408.
- [21] Hamza Alsalla, Liang Hao, Christopher Smith, *Fracture toughness and tensile strength of 316L stainless steel cellular lattice structures manufactured using the selective laser melting technique*, Materials Science and Engineering: A, Volume 669, 2016, Pages 1-6, ISSN 0921-5093.
- [22] Changjun Han, Chunze Yan, Shifeng Wen, Tian Xu, Shuai Li, Jie Liu, Qingsong Wei, Yusheng Shi, *Effects of the unit cell topology on the compression properties of porous Co-Cr scaffolds fabricated via selective laser melting*, Rapid Prototyping Journal, ISSN: 1355-2546, Article publication date: 16 January 2017.
- [23] Geng X, Lu Y, Liu C, Li W, Yue Z. *Fracture*

- [40] Gabr MH, Phong NT, Okubo K, Uzawa K, Kimpara I, Fujii T. *Thermal and mechanical properties of electrospun nano-celullose reinforced epoxy nanocomposites*. Polym Testing 2014;37:51–8.
- [41] G. Bergmann, et al., *Biomed. Mater. Eng.* 20 (2) (2010) 65–75.
- [42] Pervin F, Zhou Y, Rangari VK, Jeelani S. *Testing and evaluation on the thermal and mechanical properties of carbon nano fiber reinforced SC-15 epoxy*. Mater Sci Eng, A 2005;405:246–53.
- [43] Raei M, Reza Toroghinejad M, Jamaati R. *Nano/ultrafine structured AA1100 by ARB process*. Mater Manuf Processes 2011;26:1352–6.
- Mechanical Properties by Inverse Technique for Composite Reinforced by Knitted Fabric. Part 1. Material Modeling and Direct Experimental Evaluation of Mechanical Properties*, E. (2012).
- [38] Yuan L, Fan W, Miao Y, et al. *Enhanced mechanical and electromagnetic properties of polymer composite with 2.5D novel carbon/quartz fiber core-spun yarn woven fabric*. Journal of Industrial Textiles. 2021;51(1):134-151.
- [39] M. Sugavaneswaran, G. Arumaikkannu, *Analytical and experimental investigation on elastic modulus of reinforced additive manufactured structure*, Materials & Design (1980-2015), Volume 66, Part A, 2015, Pages 29-36.