

## ارزیابی تجربی و عددی خواص و رفتار مکانیکی ساختار مشبک کلوین، ساخته شده توسط روش SLM

در این مقاله، خواص و رفتار مکانیکی ساختار مشبک کلوین به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. ساختار مورد نظر، از جنس فولاد زنگ نزن 316L می باشد و با استفاده از روش ذوب انتخابی به کمک لیزر (SLM) ساخته شده است. به منظور بررسی رفتار و خواص مکانیکی ساختار مشبک کلوین، آزمون فشار شبه استاتیک انجام شد. مدل سازی اجزای محدود با هدف پیش بینی خواص و رفتار مکانیکی ساختار مشبک کلوین صورت پذیرفت. بر اساس تصاویر تهیه شده، ساختار مشبک کلوین بدون نقص و مطابق با هندسه از پیش تعیین شده ساخته شد. نتایج آزمون فشاری تجربی حاکی از خواص مکانیکی مطلوب، توانایی جذب انرژی بالا و تکرارپذیری عالی نتایج ساختارهای مشبک ساخته شده می باشد. همچنین مدل سازی اجزای محدود از همخوانی مناسب با نتایج تجربی برخوردار بود.

رضا صارمیان<sup>۱</sup>

کارشناسی ارشد

احسان فروزمهر<sup>۲</sup>

دانشیار

محسن بدرسمای<sup>۳</sup>

استادیار

محمود کدخدائی<sup>۴</sup>

استاد

واژه های راهنما: ساختار مشبک کلوین، ساخت افزودنی، ذوب انتخابی به کمک لیزر، روش اجزای محدود، فولاد 316L

### ۱- مقدمه

امروزه مواد متعددی با دامنه گسترده ای از خواص مکانیکی، فیزیکی، شیمیایی و زیستی در دسترس هستند. هریک از مواد موجود با توجه به خواص خود، ویژگی ها و کاربردهای متنوع و متفاوتی دارند. مواد سلولی<sup>۵</sup> از جمله مواد پر کاربرد در صنایع مختلف مانند حمل و نقل، هوافضا، پزشکی و ایمنی هستند. این مواد به دلیل دارا بودن محدوده وسیعی از خواص مکانیکی در وزن های کم، مورد توجه هستند. به طور کلی فرآیند ایجاد تخلخل،

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان r.saremiyan@me.iut.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان eforoozmehr@cc.iut.ac.ir

<sup>۳</sup> نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، کد پستی: ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱

mohsen.badrossamay@cc.iut.ac.ir,

<sup>۴</sup> استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان kadhodaiei@cc.iut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۷

گستره خواص در دسترس برای کاربردهای مهندسی را افزایش می‌دهد [۱]. از این رو، مواد سلولی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. ساختارهای مشبک<sup>۱</sup> به‌عنوان یک زیرمجموعه از مواد سلولی دارای خواص ویژه‌ای هستند که آن‌ها را برای کاربردهای متنوعی مناسب می‌سازد. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های ساختارهای مشبک که آن‌ها را برای کاربردهای سازه‌ای مناسب می‌سازد، نسبت استحکام به وزن بالای آن‌هاست. این ویژگی، امکان تولید سازه‌های سبک‌وزن را فراهم آورده و به کاهش مواد اولیه مورد نیاز، انرژی و آلودگی‌های متناسب با آن می‌انجامد. در زمینه هوافضا و خودروسازی وزن کم همیشه هدف اصلی طراحی است که هم‌زمان مقدار ماده کمتر، مصرف سوخت کمتر و عملکرد بالاتر نیز مورد توجه می‌باشد. برای مثال مؤسسه فرانهورف<sup>۲</sup> آلمان، از فرآیند ذوب انتخابی به‌کمک لیزر<sup>۳</sup> برای ساخت قطعات پیچیده در کاربردهای هوافضا و خودرو استفاده کرده است [۲]. مواد سلولی دسته‌ای از مواد هستند که ساختار آن‌ها از کنار هم قرار گرفتن شبکه‌ای از میله‌ها<sup>۴</sup> و یا صفحه‌های کوچک تشکیل می‌شود که لبه‌ها و سطوح سلول‌ها را تشکیل می‌دهند. مواد سلولی طبیعی قرن‌هاست که توسط انسان مورد استفاده قرار می‌گیرند. آثار باستانی چوبی موجود در اهرام مصر به ۵۰۰۰ سال پیش برمی‌گردد. در دوران روم باستان برای بستن درپوش بطری‌های نوشیدنی از چوب‌پنبه استفاده می‌شده است. در طی سالیان گذشته، انسان‌ها به تولید مواد سلولی مصنوعی پرداخته‌اند. ساختارهای لانه‌زنبوری ساده‌ترین سطح از این مواد بودند که در سازه‌های سبک‌وزن مورد استفاده قرار گرفتند. نوع دیگری از مواد سلولی تولیدشده، فوم‌های پلیمری بودند که در کاربردهای وسیعی استفاده شدند. امروزه علاوه بر فوم‌ها و مواد سلولی پلیمری، این مواد با استفاده از سرامیک‌ها، فلزها و حتی شیشه نیز تولید می‌شوند [۳].

مشخصه اصلی مواد سلولی، چگالی نسبی<sup>۵</sup> پایین آن‌ها می‌باشد که به‌صورت نسبت چگالی ماده سلولی به چگالی ماده‌ای که سلول‌ها از آن ساخته شده‌اند (ماده چگال)، تعریف می‌شود. مواد سلولی به دو دسته کلی تصادفی و غیرتصادفی (دوره‌ای) تقسیم می‌شوند. مواد سلولی تصادفی، از توزیع تصادفی سلول‌های واحد<sup>۶</sup> خود به وجود می‌آیند. چنین توزیع غیر قابل کنترلی معمولاً نتیجه فرآیند تولید این مواد است. مواد سلولی با ساختار غیرتصادفی، توسط یک سازماندهی کنترل شده از سلول‌های واحد تشکیل می‌شوند [۴]. از جمله مواد سلولی غیرتصادفی، می‌توان به ساختارهای مشبک اشاره کرد. یک ساختار مشبک از تکرار یک سلول واحد در سه بعد و بدون فاصله یا شکاف بین سلول‌ها ایجاد می‌شود. این ساختارها یک راه‌حل در حال ظهور برای کاهش وزن، جذب انرژی و کاهش زمان ساخت هستند [۵]. مزیت اصلی ساختارهای مشبک نسبت به سایر مواد سلولی سنتی این است که، هندسه آن‌ها از پیش تعیین شده بوده و امکان کنترل خواص مکانیکی آن‌ها بیش از پیش فراهم می‌گردد. ساختارهای مشبک می‌توانند به دو نوع اصلی کشش غالب<sup>۷</sup> و خمش غالب<sup>۸</sup> تفکیک شوند. ساختارهای کشش غالب به‌دلیل سفتی<sup>۹</sup> مناسبی که دارند برای استفاده در سازه‌های سبک وزن مناسب

<sup>1</sup> Lattice structures

<sup>2</sup> Fraunhofer

<sup>3</sup> Selective Laser Melting

<sup>4</sup> Struts

<sup>5</sup> Relative density

<sup>6</sup> Unit cells

<sup>7</sup> Stretch-dominated

<sup>8</sup> Bending-dominated

<sup>9</sup> Stiffness

هستند [۶]. ساختارهای خمشی غالب، دارای قابلیت کرنش بالا در یک تنش نسبتاً ثابت هستند که آن‌ها را برای کاربردهای جذب انرژی مناسب می‌سازد [۶-۷]. اگرچه ساختارهای مشبک در گذشته با روش‌های تولید سنتی ایجاد شده‌اند، ولی ساخت چنین اجزای پیچیده‌ای به دلیل ناتوانی فرآیندهای تولید سنتی در ساخت ساختارهایی بدون نیاز به فرآیندهای مونتاژ، محدود می‌باشد. علاوه بر این، ایجاد ساختارهای مشبک با استفاده از روش‌های تولید سنتی محدود به برخی از سلول‌های خاص است. در حال حاضر، هیچ روش تولید سنتی برای ایجاد یک ساختار مشبک بدون نیاز به مونتاژ و یا پس پردازش وجود ندارد. پیشرفت فن‌آوری ساخت افزودنی<sup>۱</sup> به‌طور مستقیم با افزایش استفاده از ساختارهای مشبک به دلیل سهولت تولید در ارتباط است [۵].

ساخت افزودنی شامل فرآیند ساخت یک قطعه توسط مونتاژ کردن مواد به صورت لایه‌به‌لایه می‌باشد. این فن‌آوری انقلابی در تولید محصولات ایجاد کرده است. مفهوم چاپ سه‌بعدی در دهه (۱۹۷۰) با ظهور چاپ جوهرافشان وجود داشت؛ اما تنها در دهه (۱۹۸۰) میلادی مردم با استفاده از استریولیتوگرافی<sup>۲</sup> شروع به چاپ مواد به جای جوهر کردند [۸]. ساخت افزودنی اشاره به فرآیند اضافه کردن و اتصال لایه‌ای برای تشکیل یک قطعه دارد و این با ساخت کاهشی که در آن ماده از یک جسم حذف می‌شود تا محصول نهایی به دست آید (برای مثال ماشین‌کاری) در تقابل است. یک مزیت مهم ساخت افزودنی در مقابل ساخت کاهشی، توانایی آن برای ساخت دقیق شکل‌های پیچیده است [۹]. یک دسته از روش‌های ساخت افزودنی، فرآیندهای فیوژن بستر پودر<sup>۳</sup> هستند. ماده اولیه در این فرآیندها به صورت پودر مورد استفاده قرار گرفته و قابلیت ساخت قطعات از جنس‌های مختلف شامل فلزها، سرامیک‌ها و پلیمرها را دارا است. در تمامی فرآیندهای فیوژن بستر پودر یک یا چند منبع حرارتی برای فیوژن ذرات پودر و یک مکانیزم برای اضافه و صاف کردن پودر استفاده می‌شود. در فرآیندهای ذوب انتخابی به کمک لیزر و تف‌جوشی انتخابی به کمک لیزر<sup>۴</sup> منبع حرارتی لیزر و در فرآیند ذوب به کمک پرتو الکترونی<sup>۵</sup> منبع حرارتی پرتو الکترون می‌باشد [۱۰]. روش ذوب انتخابی به کمک لیزر این امکان را فراهم می‌آورد که ساختارهای مشبک فلزی منظم، با هندسه کارآمد و با کاهش اتلاف ماده برای رسیدن به خواص مکانیکی بهینه تولید شوند [۱۱]. به دلیل کوچک بودن قطر پرتو لیزر و ضخامت لایه کم در این روش، روش ذوب انتخابی به کمک لیزر مناسب‌ترین روش برای تولید ساختارهای مشبک فلزی است.

اولین مطالعات در رابطه با مواد سلولی توسط Thomas و Gent در سال (۱۹۵۹) صورت پذیرفت [۱۲]. پس از آن، پژوهش‌های مختلفی با هدف ارائه روابطی برای ارتباط بین خواص کشسان<sup>۶</sup> و چگالی نسبی مواد سلولی انجام شد. همچنین کتاب‌های مختلفی مانند کتاب جامدات سلولی توسط Ashby و Gibson [۳]، در سال (۱۹۸۸) منتشر شد که این کتاب‌ها گستره وسیعی از مسائل مربوط به مواد سلولی طبیعی و مصنوعی از تولید تا کاربرد را مورد بررسی قرار می‌دهند. امروزه شناخت کافی از رفتار و ویژگی‌های انواع مواد سلولی به دست آمده است. در حال حاضر انواع مختلفی از مواد سلولی مانند فوم‌ها و ساختارهای لانه زنبوری به‌طور گسترده‌ای در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند.

<sup>1</sup> Additive Manufacturing

<sup>2</sup> Stereolithography

<sup>3</sup> Powder Bed Fusion

<sup>4</sup> Selective Laser Sintering

<sup>5</sup> Electron Beam Melting

<sup>6</sup> Elastic

این شناخت و کاربرد، حاصل پژوهش‌های بسیاری است که در گذشته انجام شده است. نوع دیگری از مواد که به‌طور فزاینده‌ای علاقه محققان را جذب می‌کند، ساختارهای مشبک هستند. با توسعه فعلی روش‌های مختلف تولید، به‌ویژه استفاده از فن‌آوری ساخت افزودنی می‌توان ساختارهای مشبک در ابعاد مختلف تولید کرد. ارزیابی رفتار این ساختارها در شرایط بارگذاری شبه استاتیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در ادامه برخی از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه آورده شده است. Yan و همکاران [۱۳]، به ارزیابی قابلیت ساخت و عملکرد ساختارهای مشبک از جنس فولاد زنگ نزن 316L با استفاده از روش ذوب انتخابی به‌کمک لیزر پرداختند. ساختارها از تکرار سلول واحد جی‌روید<sup>۱</sup> با میله‌های دایره‌ای و هسته کروی طراحی شدند. آن‌ها اثر سائز سلول روی قابلیت ساخت، چگالی و خواص فشاری ساختارهای مشبک را بررسی کردند. Smith و همکاران [۱۴]، دو ساختار ساده BCC و BCC-Z از جنس فولاد زنگ نزن 316L که با روش ذوب انتخابی به‌کمک لیزر ساخته شده بود را به‌صورت عددی و تجربی در آزمون فشار مورد بررسی قرار دادند.

Gümürük و همکاران [۱۵]، به مطالعه رفتار استاتیکی برخی از ساختارهای مشبک از جنس فولاد زنگ نزن 316L در شرایط بارگذاری‌های مختلف مانند فشاری، برشی، پیچشی و ترکیبی پرداختند. نتایج نشان داد که چگالی نسبی و پارامترهای هندسی سلول واحد، بیشترین اثر را بر رفتار مکانیکی ساختارهای مشبک دارند. در پژوهشی دیگر [۱۶]، آن‌ها ساختار BCC از جنس فولاد زنگ نزن 316L که با روش ذوب انتخابی به‌کمک لیزر ساخته شده بود را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها رفتار مکانیکی این ساختار را در شرایط شبه استاتیک به‌صورت تئوری، عددی و تجربی بررسی کردند.

یاوری و همکاران [۱۷]، سه ساختار مکعبی، الماس<sup>۲</sup> و ترانکیتد کوباکتاهدرون<sup>۳</sup> با تخلخل‌های مختلف را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها به بررسی ویژگی‌های ریخت‌شناسی<sup>۴</sup>، رفتار مکانیکی استاتیکی و خستگی پرداختند. هدایتی و همکاران [۱۸]، به مطالعه خواص مکانیکی ساختار ترانکیتد کوباکتاهدرون به‌صورت تحلیلی و عددی پرداختند. روابط تحلیلی برای برآورد مدول کشسان، نسبت پواسون و تنش تسلیم بر اساس تئوری‌های تیر اویلر-برنولی و تیموشنکو استفاده شد. Prashanth و همکاران [۱۹]، رفتار فشاری ساختارهای فلزی از جنس 316L که با روش ذوب انتخابی به‌کمک لیزر ساخته شده بود را در چگالی‌های مختلف مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها چهار حالت مختلف ساختار رومبیک دوازده سطحی<sup>۵</sup> را به‌صورت عددی و تجربی بررسی کردند. Crupi و همکاران [۲۰]، ساختار BCC را در بارگذاری فشاری شبه استاتیک با رویکرد تغییر در سائز سلول و تغییر قطر میله‌ها تحلیل کردند. Qi و همکاران [۲۱]، خواص مکانیکی ساختارهای مشبک خرپای هشتایی<sup>۶</sup> و ترانکیتد اوکتاهدرون<sup>۷</sup> با میله‌های منظم و مخروطی را به‌صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. Wei و همکاران [۲۲]، رفتار مکانیکی ساختار مشبک کاگوم<sup>۸</sup> از جنس آلیاژ تیتانیوم را به‌صورت عددی و تجربی ارزیابی کردند. برای این کار، آن‌ها از آزمون‌های فشار و خمش سه نقطه استفاده کردند.

<sup>۱</sup> Gyroid

<sup>۲</sup> Diamond

<sup>۳</sup> Truncated cuboctahedron

<sup>۴</sup> Morphology

<sup>۵</sup> Rhombic dodecahedron

<sup>۶</sup> Octet truss

<sup>۷</sup> Truncated octahedron

<sup>۸</sup> Kagome

به‌طور کلی از سال‌های گذشته تاکنون، پژوهش‌های مختلف و متعددی در زمینه ساختارهای مشبک انجام شده است. همواره محققان علاقه‌مند به ارزیابی رفتار ساختارهای مشبک با شکل‌های مختلف سلول واحد و اثر آن بر خواص مکانیکی این ساختارها بوده‌اند. به همین دلیل، مطالعات زیادی در رابطه با بررسی رفتار ساختارهای مشبک با انواع شکل‌های مختلف سلول واحد انجام شده است. ساختار مشبک کلونین، از جمله ساختارهایی می‌باشد که کمتر در پژوهش‌های گذشته مورد بررسی قرار گرفته است. این ساختار به دلیل خواص مکانیکی مطلوب شامل نسبت استحکام به وزن بالا و قابلیت جذب انرژی بالا مورد توجه است. این پژوهش، به ارزیابی رفتار و خواص مکانیکی ساختار مشبک کلونین به صورت تجربی و عددی می‌پردازد. برای این کار، پس از طراحی هندسه ساختار مشبک کلونین، این ساختار با استفاده از روش ذوب انتخابی به کمک لیزر ساخته شد و خواص مکانیکی آن اندازه‌گیری و بررسی شد. در ادامه تجزیه و تحلیل اجزای محدود به منظور پیش‌بینی خواص و رفتار مکانیکی این ساختار انجام شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- طراحی ساختار مشبک

Maxwell در سال (۱۸۶۴) معیاری برای تشخیص رفتار ساختارهای مشبک (خمشی غالب یا کششی غالب) ارائه کرد. مطابق با این معیار، با استفاده از رابطه‌های (۱) و (۲) رفتار ساختارهای مشبک به صورت دوبعدی و سه‌بعدی قابل پیش‌بینی است [۲۳].

$$M = b - 2j + 3 \quad (2D) \quad (1)$$

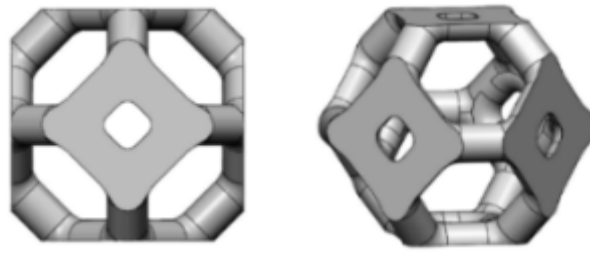
$$M = b - 3j + 6 \quad (3D) \quad (2)$$

که در آن‌ها  $b$  تعداد میله‌ها و  $j$  تعداد مفصل‌ها است. بر اساس مقادیر  $M$  حالت‌های زیر وجود دارد:

$M < 0$ : در این شرایط ساختار رفتار خمشی غالب از خود نشان می‌دهد؛

$M \geq 0$ : در این شرایط ساختار رفتار کششی غالب از خود نشان می‌دهد.

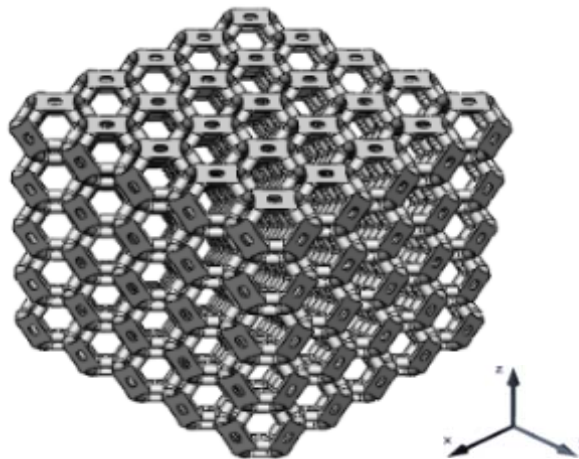
ابعاد هندسی سلول واحد کلونین به نحوی انتخاب شدند که ساختار مشبک کلونین به درستی توسط روش ذوب انتخابی به کمک لیزر ساخته شود. از این‌رو، هندسه سلول واحد کلونین با سایز سلول  $2/83\text{mm}$  و قطر میله‌های  $0/5\text{mm}$  با درصد تخلخل  $82/93$ ، طراحی شد. بر اساس معیار Maxwell این سلول رفتار خمشی غالب دارد. در شکل (۱)، تصویر هندسه سلول واحد کلونین در دو نمای مختلف آورده شده است. جزئیات هندسی سلول واحد کلونین در جدول (۱) آمده است که منظور از  $l$ ، طول هر میله از سلول واحد کلونین می‌باشد. ساختار مشبک کلونین با تکرار سلول واحد آن در سه راستای اصلی ایجاد می‌شود. در زمینه ساختارهای مشبک، به‌منظور حذف اثرات اندازه از نتایج خواص مکانیکی و کسب نتایج با دقت مناسب، حداقل پنج سلول واحد در هر جهت توصیه می‌شود. از این‌رو، پنج سلول واحد در هر جهت اصلی در نظر گرفته شد. نمای ایزومتریک ساختار مشبک کلونین در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱- هندسه سلول واحد کلون در دو نمای مختلف.

جدول ۱- مشخصات هندسی سلول واحد کلون [۳].

شکل سلول	تعداد صفحات	تعداد میله‌ها	تعداد مفصل‌ها	حجم سلول	مساحت سطح	طول میله‌ها
کلون	۱۴	۳۶	۲۴	$11/31l^3$	$26/8l^2$	$36l$



شکل ۲- تصویر ساختار مشبک کلون در نمای ایزومتریک.

جدول ۲- ترکیب شیمیایی پودر فولاد زنگ نزن 316L.

Fe	Cr	Ni	Mo	C	ترکیب پودر
Bal	۱۸	۱۲	۲/۵	$0.03 <$	درصد وزنی

## ۲-۲- خواص ماده

برای ساخت ساختارهای مشبک از پودر فولاد زنگ نزن 316L استفاده شد. این فولاد به دلیل قابلیت فرآیندپذیری مناسب، جزء پرکاربردترین مواد مورد استفاده در روش ذوب انتخابی به کمک لیزر می‌باشد. ترکیب شیمیایی پودر مورد استفاده در جدول (۲) آمده است.



شکل ۳- دستگاه پرینتر سه بعدی فلزی Noura M100.

### ۲-۳- روش ساخت

ساختارهای مشبک کلون با استفاده از روش ذوب انتخابی به کمک لیزر ساخته شدند. برای این کار، از دستگاه پرینتر سه بعدی فلزی Noura M100 ساخت صنایع نورا لایه نگار استفاده شد. این دستگاه مجهز به یک لیزر فیبری با توان ۳۰۰ W و قطر پرتو لیزر متمرکز  $80\ \mu\text{m}$  است. تصویر دستگاه پرینتر سه بعدی فلزی Noura M100 در شکل (۳) نشان داده شده است.

به منظور بررسی کیفیت ساخت ساختارهای مشبک، تصاویر با بزرگ‌نمایی بیشتر با استفاده از یک میکروسکوپ دیجیتال گرفته شد. علاوه بر این، تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی<sup>۱</sup> با هدف مشاهده و ارزیابی دقیق جزئیات و کیفیت ساخت نمونه‌ها تهیه شد.

مشخصات ساختارها شامل جرم، ابعاد و قطر میله‌ها اندازه‌گیری شد. برای به دست آوردن جرم ساختارهای مشبک ساخته شده، از یک ترازوی دیجیتال با دقت  $1\ \text{mg}$  استفاده شد. ابعاد کلی ساختارهای مشبک توسط یک کولیس دیجیتال با دقت  $0.1\ \text{mm}$  اندازه‌گیری شد. حجم ساختارها از حاصل ضرب ابعاد اندازه‌گیری شده آن به دست می‌آید. با تقسیم جرم ساختارها به حجم اندازه‌گیری شده، چگالی ظاهری ساختارهای مشبک محاسبه شد. با تقسیم چگالی ظاهری به چگالی ماده چگال، چگالی نسبی ساختار مشبک به دست می‌آید. درصد تخلخل ساختارهای مشبک با استفاده از رابطه (۳) مشخص شد.

$$\Phi = 1 - \rho^*/\rho_s \quad (3)$$

که در آن  $\rho^*$  چگالی ظاهری ساختار مشبک و  $\rho_s$  چگالی ماده چگال است. در این پژوهش، چگالی فولاد زنگ نزن 316L برابر  $8000\ \text{kg/m}^3$  در نظر گرفته شده است.

<sup>۱</sup> Scanning Electron Microscopic

## ۲-۴- آزمون فشار شبه استاتیک

به منظور دستیابی و تحلیل خواص و رفتار مکانیکی ساختار مشبک کلون، آزمون فشار تک محوره انجام شد. برای اینکار، ساختارهای مشبک کلون توسط دستگاه سنتام مدل STM-50 با استفاده از یک نیروسنج ۵۰ kN مورد آزمایش قرار گرفتند. با هدف جلوگیری از اثرات دینامیکی، آزمون‌ها با نرخ کرنش  $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  انجام شدند. همچنین برای بررسی تکرارپذیری، دو ساختار مشبک در شرایط یکسان مورد آزمایش قرار گرفتند. با استفاده از منحنی نیرو بر حسب جابه‌جایی خروجی دستگاه، منحنی تنش-کرنش برای هر آزمون به دست آمد. برای محاسبه تنش، مقدار نیرو در هر لحظه به مساحت کل ساختار ( $200/2 \text{ mm}^2$ ) تقسیم شد. برای محاسبه کرنش، مقدار جابه‌جایی در هر لحظه به طول اولیه ساختار (۱۴/۱۵ mm) تقسیم گردید.

## ۳- مدل سازی به روش اجزای محدود

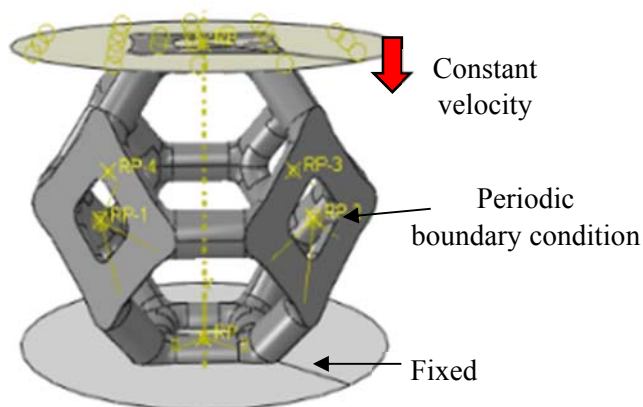
به منظور پیش‌بینی عملکرد مکانیکی ساختارهای مشبک، آزمایش‌های تجربی و مدل سازی نرم‌افزاری به‌طور گسترده‌ای انجام می‌گیرد. مدل سازی این امکان را به وجود می‌آورد که ساختارهای مشبک متعدد با شکل، تخلخل و ابعاد هندسی متفاوت مورد بررسی قرار گیرند. روش تجربی می‌تواند به‌طور مستقیم خواص مکانیکی ساختارهای مشبک تولید شده توسط فن‌آوری ساخت افزودنی را مشخص کند، ولی محدودیت‌هایی برای انجام روش تجربی در کاربردهای مهندسی وجود دارد. روش تجربی نیاز به تعداد مشخصی نمونه برای به حداقل رساندن خطا و بهبود دقت آزمایش دارد. از آنجایی که هزینه ساخت محصولات ساخت افزودنی به‌ویژه روش ذوب انتخابی به‌کمک لیزر هنوز هم بالا است، تولید نمونه‌های زیاد با استفاده از فرآیندهای ساخت افزودنی مقرون به‌صرفه نیست. همچنین سرعت فرآیندهای ساخت افزودنی نسبتاً کند است. به همین دلیل ساخت یک محصول می‌تواند ساعت‌ها یا روزها توسط این روش به طول بیانجامد. بنابراین لازم است که خواص مکانیکی ساختارهای مشبک به‌صورت تحلیلی و عددی بررسی شوند. انجام مدل سازی عددی به‌منظور کاهش ساخت تعداد نمونه‌ها و همچنین کاهش آزمون‌های مکانیکی لازم می‌باشد. البته روش تجربی معیاری برای بررسی نتایج مدل سازی نیز می‌باشد.

## ۳-۱- روش سلول واحد

باتوجه به اینکه ساختارهای مشبک از تکرار یک سلول واحد در سه راستای اصلی ایجاد می‌شوند، استفاده از روش سلول واحد برای پیش‌بینی خواص مکانیکی آن‌ها در شرایط بارگذاری شبه استاتیک مناسب است. از این‌رو، به جای مدل سازی و تحلیل کل ساختار مشبک، می‌توان یک سلول واحد از آن را با اعمال شرایط مرزی تکرارشونده مورد ارزیابی قرار داد. به دلیل اینکه مدل سازی کل ساختار مشبک متحمل هزینه محاسباتی سنگین است، اغلب روش سلول واحد توسط محققان مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌منظور مدل سازی ساختار مشبک کلون با روش سلول واحد، از نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. برای این کار، هندسه سلول واحد کلون مطابق با شکل (۴)، بین دو صفحه صلب مقید شد و به هر کدام از صفحه‌های صلب یک نقطه مرجع اختصاص داده شد. شرایط مرزی به گونه‌ای تعریف شد که صفحه صلب پایین به‌صورت کامل مقید و صفحه صلب بالا با سرعت ثابت در جهت پایین حرکت کند. همچنین شرایط مرزی تکرارشونده برای وجه‌های جانبی سلول واحد



اعمال شد. از آنجایی که میله‌های ساختار مشبک پس از فروپاشی<sup>۱</sup> ساختار، با هم تماس پیدا می‌کنند، رفتار تماس با خواص تماس سخت<sup>۲</sup> و بدون اصطکاک<sup>۳</sup> برای میله‌های سلول واحد در نظر گرفته شد. در نهایت می‌توان ادعا نمود که شرایط مرزی اعمال شده در مدل اجزای محدود، شرایط مرزی آزمون فشار شبه استاتیک را با دقت مناسبی برقرار می‌سازد. با توجه به اینکه تماس یک پدیده غیر خطی شدید است، همگرایی مدل‌سازی انجام شده توسط حلگر استاندارد (استاتیکی عمومی<sup>۴</sup>) حاصل نشد. از این رو، از حلگر صریح<sup>۵</sup> (صریح دینامیکی<sup>۶</sup>) برای حل مدل‌سازی انجام شده استفاده شد. این حلگر از رویکرد صریح برای انتگرال‌گیری استفاده می‌کند و برای حل سیستم‌های غیرخطی شامل مسائل تماس و همچنین در شرایط بارگذاری دینامیکی کاربرد دارد. به دلیل ماهیت ساخت لایه‌به‌لایه در روش ساخت افزودنی، ساختارهای مشبک ساخته شده دارای اندکی بی‌نظمی هندسی هستند که این بی‌نظمی‌ها معمولاً در مدل‌سازی در نظر گرفته نمی‌شوند. به همین دلیل هندسه سلول واحد به صورت منظم و با یک قطر میانگین ثابت برای تمام میله‌ها مدل می‌شود. برای گسسته‌سازی مدل از المان‌های سه بعدی پیوسته چهار وجهی ده گره‌ای مرتبه دوم اصلاح شده<sup>۷</sup> که در نرم‌افزار آباکوس با اختصار C3D10M شناخته می‌شوند، استفاده شد. همچنین حساسیت نتایج به سائز المان‌ها بررسی، و از سائز المان مناسب برای مدل‌سازی استفاده شد.



شکل ۴- مدل سلول واحد کلونین در نرم‌افزار آباکوس.

<sup>1</sup> Collapse

<sup>2</sup> Hard contact

<sup>3</sup> Frictionless

<sup>4</sup> General static

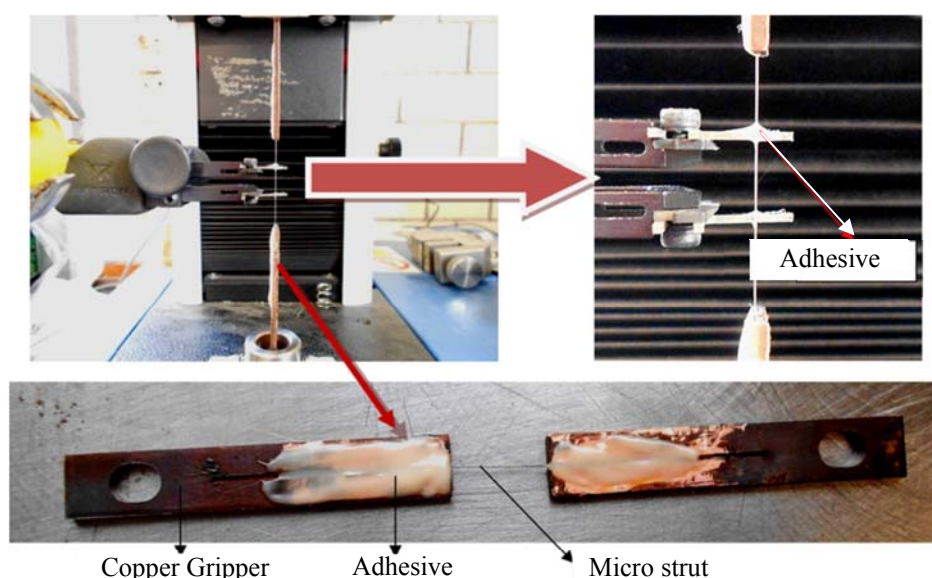
<sup>5</sup> Explicit

<sup>6</sup> Dynamic explicit

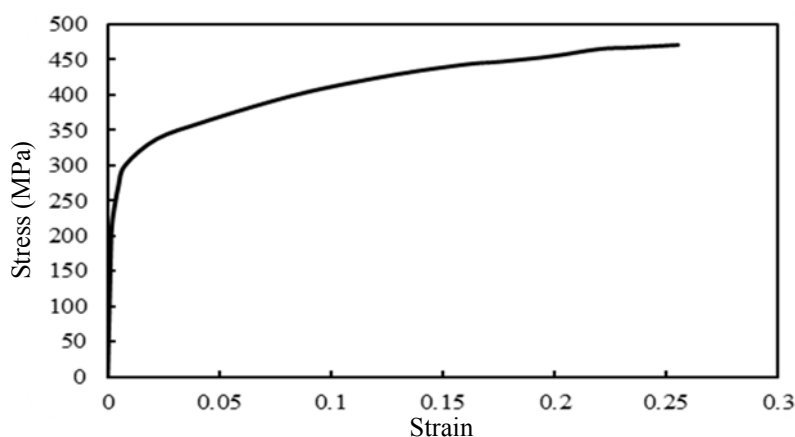
<sup>7</sup> A 10-node modified quadratic tetrahedron

### ۳-۲- رفتار ماده

برای در نظر گرفتن خواص مکانیکی ماده چگال، از منحنی تنش- کرنش سیم از جنس فولاد زنگ نزن 316L و ساخته شده توسط روش ذوب انتخابی به کمک لیزر که توسط Gümrük و همکارانش [۱۶] به دست آمده، استفاده شد. آن‌ها، به دلیل وجود پدیده کماتش در آزمون فشاری سیم‌ها، از آزمون کشش یک محوره استفاده کردند. همچنین برای انجام آزمون مکانیکی کشش سیم از یک فیکسچر مناسب استفاده شد. برای مقید کردن هر یک از سیم‌ها در محل مورد نظر در فیکسچر و همچنین اتصال اکستنسومتر<sup>۱</sup> به سیم، از یک نوع چسب قوی استفاده شد (شکل ۵). در نهایت تعدادی سیم در شرایط یکسان مورد آزمون کشش ساده قرار گرفت و نتایج از تکرارپذیری مطلوبی برخوردار بود. منحنی تنش- کرنش میانگین آزمون‌های کشش سیم در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۵- تجهیزات و روش آزمون کشش سیم [۱۶].

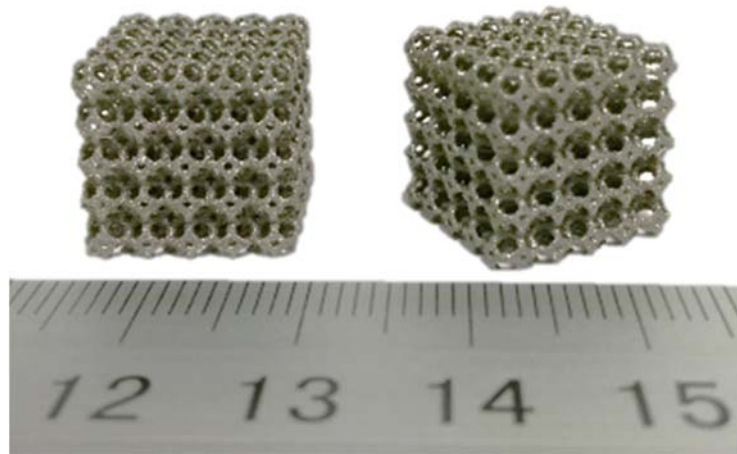


شکل ۶- منحنی تنش- کرنش میانگین آزمون‌های کشش سیم [۱۶].

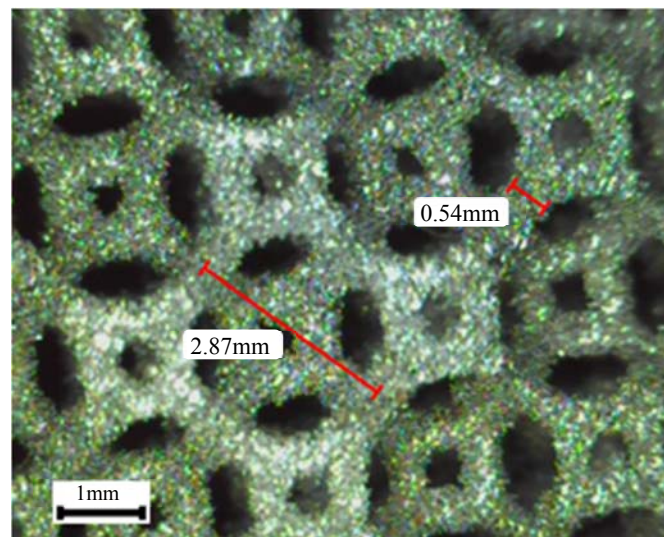
<sup>1</sup> Extensometer

#### ۴- نتایج و بحث

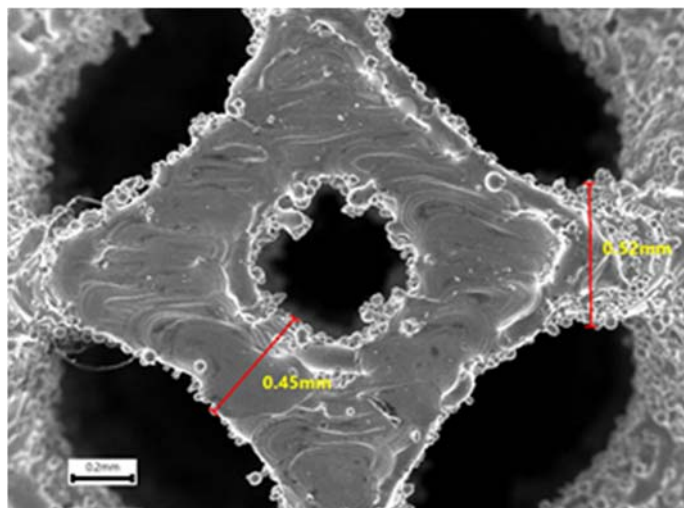
ساختارهای مشبک کلوین مطابق با هندسه طراحی شده به درستی ساخته شدند. شکل (۷)، ساختارهای ساخته شده پس از ساخت را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل‌های (۲) و (۷)، می‌توان صحت و درستی ساختارهای مشبک ساخته شده را ارزیابی کرد. مطابق با شکل (۸)، سلول‌های واحد کلوین و میله‌های آن‌ها به طور کامل و بدون نقص ایجاد شده‌اند. بی‌نظمی‌های هندسی و صافی سطح پایین ساختارهای ساخته شده ناشی از ماهیت فرآیند ساخت می‌باشد که این موضوع در شکل (۹) به وضوح قابل مشاهده است.



شکل ۷- ساختارهای مشبک کلوین ساخته شده توسط روش ذوب انتخابی به کمک لیزر.

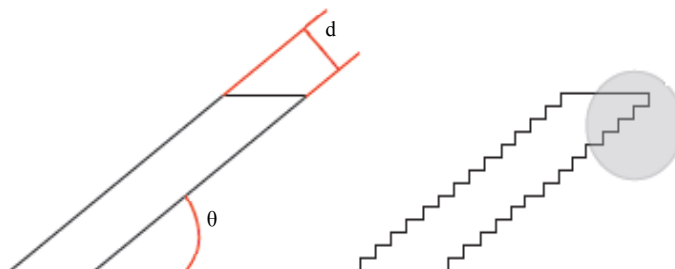


شکل ۸- تصویر میکروسکوپی دیجیتال از ساختار مشبک کلوین.



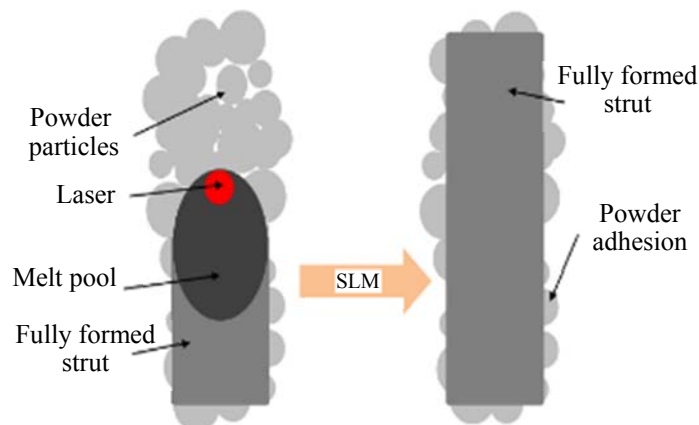
شکل ۹- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از ساختار مشبک کلوین.

شکل (۱۰)، به صورت شماتیک اثر روش ساخت لایه به لایه برای یک میله با زاویه مایل را نشان می دهد. بر اساس شکل (۱۰)، زمانی که یک میله مایل از ساختار مشبک ساخته می شود، اثرات پله ای ناشی از ساخت لایه به لایه به وجود می آیند که موجب بی نظمی هندسی در میله های ساختار می شود. علاوه بر این، در اثر حرکت لیزر بر روی بستر پودر و تشکیل حوضچه مذاب ناشی از آن، شار حرارتی ناشی از اختلاف دمای حوضچه مذاب با پودرهای اطراف، به طرف بیرون حوضچه مذاب منتقل شده و باعث ذوب جزئی پودرهای اطراف می شود و در نتیجه مقداری پودر، به نمونه اصلی می چسبد (شکل ۱۱). این پودرهای چسبیده شده، در میزان زبری سطح نمونه های ساخته شده با استفاده از روش ذوب انتخابی به کمک لیزر نقش مهمی دارند. مشخصات ساختارهای مشبک کلوین شامل جرم، ابعاد کلی ساختار مشبک، قطر میانگین میله ها و درصد تخلخل در جدول (۳) آمده است. با توجه به جدول (۳)، ابعاد هندسی و درصد تخلخل ساختارهای مشبک کلوین نزدیک به ابعاد و درصد تخلخل طراحی است.



شکل ۱۰- شماتیک بی نظمی های هندسی ناشی از فرآیند ساخت

لایه به لایه، در یک میله با زاویه دلخواه [۴].

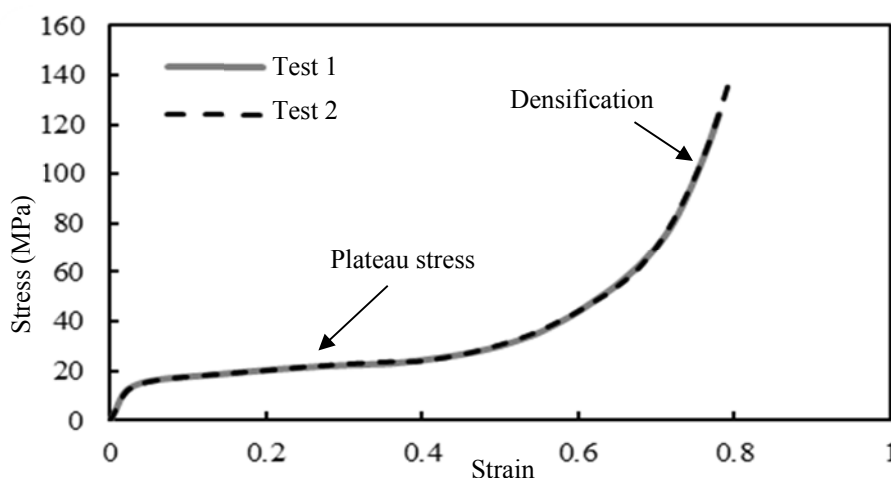


شکل ۱۱- شماتیک پودرهای چسبیده شده به نمونه اصلی، ناشی از شار حرارتی منتقل شده از حوضچه مذاب [۲۴].

جدول ۳- مشخصات ساختارهای مشبک ساخته شده.

درصد تخلخل	چگالی نسبی	قطر میانگین میله‌ها (mm)	ابعاد X Y Z (mm)	جرم (g)	ساختار مشبک
۸۴/۳۴	۰/۱۵۶۶	۰/۵۱۲±۰/۰۲۷	۱۴/۵۲×۱۴/۶۳×۱۴/۱۱	۳/۷۵۵۸	ساختار ۱
۸۴/۲۱	۰/۱۵۷۹	۰/۵۰۶±۰/۰۲۱	۱۴/۴۸×۱۴/۴۹×۱۴/۱۵	۳/۷۵۰۳	ساختار ۲

شکل (۱۲) منحنی تنش- کرنش ساختار مشبک کلون در شرایط بارگذاری شبه استاتیک را نشان می‌دهد. با هدف بررسی تکرارپذیری، آزمون فشار شبه استاتیک یکبار تکرار شد که نتایج آن، تکرارپذیری عالی نتایج را نشان می‌دهد. مطابق با شکل (۱۲)، رفتار ساختار مشبک کلون شامل سه ناحیه می‌شود. در ناحیه اول، رفتار به صورت کشسان خطی است. در این ناحیه تغییر شکل عمده ناشی از خم شدن میله‌های ساختار است که موجب مدول کشسان کمتر نسبت به ساختارهای کشش غالب می‌شود.



شکل ۱۲- منحنی‌های تنش-کرنش ساختارهای مشبک کلون در آزمون فشار.



بعد از آن، ناحیه مسطح تنش<sup>۱</sup> است؛ جایی که سلول‌ها به دلیل تسلیم شدن میله‌ها، شروع به فروپاشی می‌کنند و ساختار در یک تنش نسبتاً ثابت فروپاشی را ادامه می‌دهد. آخرین ناحیه، چگال شدن<sup>۲</sup> است که در آن میله‌ها به هم نزدیک شده و با هم تماس پیدا می‌کنند؛ در این ناحیه به دلیل تماس بین میله‌ها تنش به صورت ناگهانی افزایش پیدا می‌کند. ویژگی مهم ساختارهای خمش غالب ناحیه مسطح تنش است که در این ناحیه در یک تنش تقریباً ثابت، محدوده بزرگی از کرنش وجود دارد که آن‌ها را برای کاربردهایی که نیاز به جذب انرژی بالا دارند مناسب می‌سازد [۲۳].

**جدول ۴-** خواص مکانیکی ساختار مشبک کلون در آزمون فشار.

ساختار مشبک	مدول کشسان (GPa)	تنش تسلیم با ۰/۲ درصد خطا (MPa)	تنش تسلیم ویژه (MPa)	انرژی جذب شده تا کرنش ۵۰ درصد (J)	انرژی جذب شده ویژه (J)
کلون	۰/۶۲۲	۱۱	۶۹/۹۵	۳۱/۲۲	۱۹۷/۷۲

قبل از بارگذاری      شروع بارگذاری و فشرده شدن تدریجی سلول‌ها      ادامه فشرده شدن سلول‌ها



فروپاشی تدریجی ساختار مشبک      فروپاشی تدریجی ساختار مشبک      چگال شدن



3mm



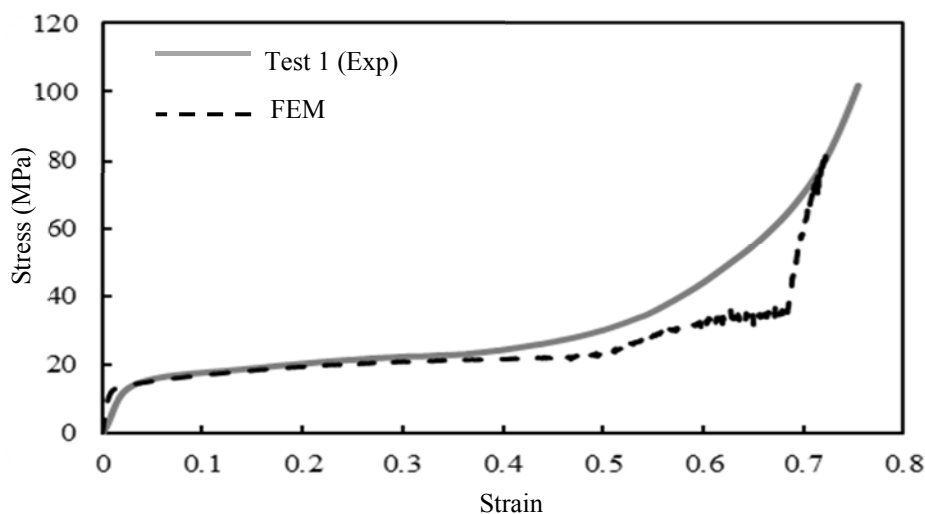
**شکل ۱۳-** رفتار تغییر شکل و مکانیزم فروپاشی ساختار مشبک کلون در بارگذاری فشاری.

<sup>۱</sup> Plateau Stress

<sup>۲</sup> Densification

خواص مکانیکی ساختار مشبک کلوین شامل مدول کشسان، تنش تسلیم با  $0.2$  درصد خطا، تنش تسلیم ویژه، انرژی جذب شده تا کرنش  $50$  درصد و همچنین انرژی جذب شده ویژه در جدول (۴) آمده است. لازم به ذکر است که خواص مکانیکی ویژه، نسبت به چگالی نسبی نرمالایز شده‌اند. به منظور بررسی رفتار تغییرشکل ساختار مشبک کلوین، تصاویری از آن در هنگام بارگذاری فشاری شبه استاتیک تهیه شد. این تصاویر رفتار تغییرشکل ساختار مشبک کلوین را به خوبی مشخص می‌کنند. با مشاهده شکل (۱۳)، تغییرشکل و فروپاشی ساختار مشبک کلوین شامل فشرده شدن تدریجی سلول‌های واحد می‌باشد. پس از فروپاشی کامل سلول‌ها و با تماس میله‌های ساختار با یکدیگر، ناحیه چگال شدن به وجود می‌آید.

مدل سازی سلول واحد کلوین به روش اجزای محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام شد. برای این کار، از خواص کششی سیم از جنس فولاد زنگ نزن 316L که با روش ذوب انتخابی به کمک لیزر ساخته شده است به عنوان خواص مکانیکی ماده چگال استفاده شد. به منظور در نظر گرفتن خواص مکانیکی ماده چگال، به دلیل دشوار بودن آزمون مکانیکی سیم ناشی از لغزش سیم از فک‌های دستگاه، اغلب از خواص فشاری نمونه استاندارد فشاری استفاده می‌شود. از آنجایی که ساختارهای مشبک از به هم پیوستن تعدادی میله (یا سیم) تشکیل می‌شوند، استفاده از خواص مکانیکی سیم به عنوان خواص ماده چگال می‌تواند موجب دستیابی به نتایج نزدیک تر مدل سازی با آزمون‌های تجربی شود. استفاده از منحنی تنش-کرنش سیم به دلیل در نظر گرفته شدن اثرات بی‌نظمی‌های هندسی در آن، به همخوانی مطلوب تر نتایج مدل سازی و تجربی کمک می‌کند. به عبارت دیگر، به جای لحاظ کردن بی‌نظمی‌های هندسی در مدل اجزای محدود که منجر به هزینه محاسباتی بالا می‌شود، می‌توان عیوب ساخت و بی‌نظمی‌های هندسی را در رفتار ماده چگال در نظر گرفت. در شکل (۱۴)، منحنی‌های تنش-کرنش تجربی و حل اجزای محدود با هم مقایسه شده‌اند. مطابق با شکل (۱۴)، نتایج مدل سازی از همخوانی مناسبی با نتایج آزمون تجربی برخوردار است. با توجه به اینکه میله‌های ساختارهای مشبک دارای مقداری بی‌نظمی هندسی هستند و این بی‌نظمی‌ها در مدل سازی اجزای محدود در نظر گرفته نشده‌اند، پس از فروپاشی ساختار مشبک و تماس میله‌های آن با یکدیگر، شروع تماس و مکانیزم آن با مدل سازی انجام شده تا حدی متفاوت است؛ به همین دلیل، نتایج مدل سازی و آزمون‌های تجربی همخوانی کمتری در ناحیه چگال شدن دارند که این مسئله در سایر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه نیز وجود دارد.



شکل ۱۴- مقایسه منحنی‌های تنش-کرنش تجربی و عددی ساختار مشبک کلوین.

## ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

به‌طور سنتی خواص مواد با تغییر در ریزساختار و فرآیند تولید تغییر می‌کند؛ در صورتی که مواد سلولی درجه‌های آزادی بیشتری برای تغییر در خواص مکانیکی دارند. برای مثال، در فوم‌ها علاوه بر خواص ماده چگال سازنده، سایز سلول‌ها هم در خواص مکانیکی اثر دارد و یا در ساختارهای لانه زنبوری به‌جز موارد گفته‌شده، به‌دلیل ناهمسانگرد بودن این ساختارها، جهت‌گیری ساختار نیز در خواص مکانیکی نقش دارد. ساختارهای مشبک به‌دلیل قابلیت انتخاب در شکل سلول، سایز سلول، قطر میله، شکل میله و چیدمان سلول‌ها (مثلاً یکنواخت یا درجه‌بندی شده) بالاترین درجه آزادی در طراحی را برای تغییر در خواص مکانیکی نسبت به سایر مواد سنتی و سلولی موجود دارند.

در این مطالعه، رفتار و خواص مکانیکی ساختار مشبک کلوین مورد بررسی قرار گرفت. برای ساخت ساختار مشبک کلوین از روش ذوب انتخابی به‌کمک لیزر استفاده شد. سپس کیفیت ساخت و خواص ساختارهای مشبک ساخته شده ارزیابی شد. در ادامه آزمون فشار شبه استاتیک با هدف بررسی رفتار و خواص مکانیکی ساختار مشبک کلوین انجام شد. در نهایت، مدل‌سازی اجزای محدود به روش سلول واحد به‌منظور پیش‌بینی خواص و رفتار مکانیکی ساختار مشبک کلوین صورت گرفت؛ این روش علاوه بر نتایج قابل اعتماد، امکان تجزیه و تحلیل سریع و با هزینه محاسباتی کم را نیز فراهم می‌کند. ساختار مشبک کلوین بدون نقص و به درستی مطابق با هندسه از پیش ترسیم شده ساخته شد به‌طوری‌که درصد تخلخل طراحی و تجربی آن زیر ۲ درصد اختلاف داشت. براساس نتایج آزمون فشار شبه استاتیک، ساختار مشبک کلوین به ترتیب دارای تنش تسلیم ویژه و انرژی جذب شده ویژه برابر  $69/95$  (MPa) و  $197/72$  (J) می‌باشد. خواص مکانیکی به‌دست آمده نشان دهنده قابلیت عالی ساختار مشبک کلوین برای استفاده در سازه‌های سبک وزن و کاربردهای جذب انرژی است.

## مراجع

- [1] Schaedler, T.A., and Carter, W.B., "Architected Cellular Materials", *Annual Review of Materials Research*, Vol. 46, pp. 187-210, (2016).
- [2] Tao, W., and Leu, M.C., "Design of Lattice Structure for Additive Manufacturing", In 2016 International Symposium on Flexible Automation (ISFA), pp. 325-332, (2016).
- [3] Gibson, L.J., and Ashby, M.F., "*Cellular Solids: Structure and Properties*", Cambridge University Press, Cambridge, (1997).
- [4] Tamburrino, F., Graziosi, S., and Bordegoni, M., "The Design Process of Additively Manufactured Mesoscale Lattice Structures: A Review", *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol. 18, pp. 040801, (2018).
- [5] Helou, M., and Kara, S., "Design, Analysis and Manufacturing of Lattice Structures: an Overview", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 31, pp. 243-261, (2018).



- [6] Kranz, J., Herzog, D., and Emmelmann, C., "Design Guidelines for Laser Additive Manufacturing of Lightweight Structures in TiAl6V4", *Journal of Laser Applications*, Vol. 27, pp. S14001, (2015).
- [7] Choy, S.Y., Sun, C.N., Leong, K.F., and Wei, J., "Compressive Properties of Ti-6Al-4V Lattice Structures Fabricated by Selective Laser Melting: Design, Orientation and Density", *Additive Manufacturing*, Vol. 16, pp. 213-224, (2017).
- [8] De Leon, A.C., Chen, Q., Palaganas, N.B., Palaganas, J.O., Manapat, J., and Advincula, R.C., "High Performance Polymer Nanocomposites for Additive Manufacturing Applications", *Reactive and Functional Polymers*, Vol. 103, pp. 141-155, (2016).
- [9] Stansbury, J.W., and Idacavage, M.J., "3D Printing with Polymers: Challenges Among Expanding Options and Opportunities", *Dental Materials*, Vol. 32, pp. 54-64, (2016).
- [10] Gibson, I., Rosen, D.W., and Stucker, B., "*Additive Manufacturing Technologies*", Vol. 17, Springer, New York, (2014).
- [11] Ozdemir, Z., Hernandez-Nava, E., Tyas, A., Warren, J.A., Fay, S.D., Goodall, R., Todd, I., and Askes, H., "Energy Absorption in Lattice Structures in Dynamics: Experiments", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 89, pp. 49-61, (2016).
- [12] Gent, A.N., and Thomas, A.G., "The Deformation of Foamed Elastic Materials", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 1, pp. 107-113, (1959).
- [13] Yan, C., Hao, L., Hussein, A., and Raymont, D., "Evaluations of Cellular Lattice Structures Manufactured using Selective Laser Melting", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 62, pp. 32-38, (2012).
- [14] Smith, M., Guan, Z., and Cantwell, W.J., "Finite Element Modelling of the Compressive Response of Lattice Structures Manufactured using the Selective Laser Melting Technique", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 67, pp. 28-41, (2013).
- [15] Gümrük, R., Mines, R.A.W., and Karadeniz, S., "Static Mechanical Behaviors of Stainless Steel Micro-lattice Structures under Different Loading Conditions", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 586, pp. 392-406, (2013).
- [16] Gümrük, R., and Mines, R.A.W., "Compressive Behavior of Stainless Steel Micro-lattice Structures", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 68, pp. 125-139, (2013).
- [17] Yavari, S.A., Ahmadi, S.M., Wauthle, R., Pournan, B., Schrooten, J., Weinans, H., and Zadpoor, A.A., "Relationship between Unit Cell Type and Porosity and the Fatigue behavior of Selective Laser Melted Meta-biomaterials", *Journal of the Mechanical behavior of Biomedical Materials*, Vol. 43, pp. 91-100, (2015).
- [18] Hedayati, R., Sadighi, M., Mohammadi-Aghdam, M., and Zadpoor, A.A., "Mechanical Behavior of Additively Manufactured Porous Biomaterials made from Truncated Cuboctahedron Unit Cells", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 106, pp. 19-38, (2016).

- [19] Prashanth, K., Löber, L., Klauss, H.J., Kühn, U., and Eckert, J., “Characterization of 316L Steel Cellular Dodecahedron Structures Produced by Selective Laser Melting”, *Technologies*, Vol. 4, pp. 34, (2016). 10.3390/technologies4040034
- [20] Crupi, V., Kara, E., Epasto, G., Guglielmino, E., and Aykul, H., “Static Behavior of Lattice Structures Produced via Direct Metal Laser Sintering Technology”, *Materials & Design*, Vol. 135, pp. 246-256, (2017).
- [21] Qi, D., Yu, H., Liu, M., Huang, H., Xu, S., Xia, Y., Qian, G., and Wu, W., “Mechanical Behaviors of SLM Additive Manufactured Octet-truss and Truncated-octahedron Lattice Structures with Uniform and Taper Beams”, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 163, pp. 105091, (2019).
- [22] Wei, K., Yang, Q., Ling, B., Xie, H., Qu, Z., and Fang, D., “Mechanical Responses of Titanium 3D Kagome Lattice Structure Manufactured by Selective Laser Melting”, *Extreme Mechanics Letters*, Vol. 23, pp. 41-48, (2018).
- [23] Ashby, M.F., “The Properties of Foams and Lattices”, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 364, pp. 15-30, (2005).
- [24] Sing, S.L., Wiria, F.E., and Yeong, W.Y., “Selective Laser Melting of Lattice Structures: A Statistical Approach to Manufacturability and Mechanical Behavior”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 49, pp. 170-180, (2018).

## Abstract

Currently, with the advancement and development of the additive manufacturing technology (AM), many studies are conducted to evaluate the behavior and mechanical properties of lattice structures. Due to their ability to control mechanical properties, these structures have been considered by researchers. In this paper, the properties and mechanical behavior of the kelvin lattice structure were investigated experimentally and numerically. The intended structure is 316L stainless steel and is fabricated using the selective laser melting (SLM) method. The build quality and mechanical properties of the kelvin lattice structure were evaluated. Build quality was evaluated using the digital microscope and scanning electron microscope (SEM).

As well as to evaluate the behavior and mechanical properties of the kelvin lattice structure, quasi-static compression test was performed. Finite element modeling was carried out to predict the mechanical properties and behavior of the kelvin lattice structure. To do this, the unit cell method was used. Based on the provided images, the kelvin lattice structure was fabricated without defect and in accordance with the previously defined geometry. The experimental compressive test results show the favorable mechanical properties, the ability to absorb energy, and the excellent reproducibility of the fabricated lattice structures results. Finite element modeling had a good agreement with experimental results which can be used to predict the behavior and mechanical properties of the kelvin lattice structure with much less time and cost than the experimental method.