



## Simulation of Mechanical Behavior and Construction of Regular PLA Scaffolds

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Faramarzian Haghighi A.<sup>1</sup> MSc,  
Haerian Ardakani A.<sup>1</sup> PhD,  
Kafae Razavi M.<sup>2</sup> PhD,  
Moloodi A.<sup>\*3</sup> MSc

#### How to cite this article

Faramarzian Haghighi A, Haerian Ardakani A, Kafae Razavi M, Moloodi A. Simulation of Mechanical Behavior and Construction of Regular PLA Scaffolds. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(8):1953-1958.

### ABSTRACT

In this study, the mechanical properties of one of the most widely used polymeric biomaterials in the body called Poly Lactic Acid (PLA) in the porous state were evaluated. Firstly, the initial regular porous structures, based on the tetrahedron-catheter model known as Kelvin model, were designed for simulating bone tissue, using 3D design software with FDM technique. Afterwards, pressure test was used to determine the mechanical properties and mode of failure. Finally, experimental results were compared with the simulation software analysis results. The results showed that increasing the porosity reduces the strength and the increasing the cell size in a constant porosity results in increased compressive strength. Also, by decreasing the porosity, the amount of the strain up to fracture increases in a relatively constant stress. The brittle failure at 45° in the samples of high porosity was shown. However, the samples with a lower porosity had a relative ductile behavior and as the pressure rises, the cells accumulate on each other and change the form to the fracture point. Comparing the empirical and the simulation results showed that there is a good agreement between them and the simulation model has a high reliability for the porous model.

**Keywords** Porous Material; Kelvin Model; 3D Printer; Bone Tissue; Poly Lactic Acid (PLA)

<sup>1</sup>Material Science Department, Mechanical Engineering & Material Science Faculty, Sadjad University, Mashhad, Iran

<sup>2</sup>Bio-electric Department Department, Electrical Engineering & Medical Engineering Faculty, Sadjad University, Mashhad, Iran

<sup>3</sup>Materials Research Department, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Mashhad, Iran

#### \*Correspondence

Address: Materials Research Group, Iranian Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Mashhad Branch, Mashhad, Iran. Postal Code: 9177949367  
Phone: +98 (511) 31997471  
Fax: +98 (511) 31997197  
a.moloodi@jdm.ac.ir

#### Article History

Received: June 27, 2018

Accepted: January 26, 2019

ePublished: August 12, 2019

### CITATION LINKS

[1] Biodegradable polymeric scaffolds for musculoskeletal tissue engineering [2] A high-modulus polymer for porous orthopedic implants: biomechanical compatibility of porous implants [3] A study of biocomposite resins for creating Orthodontic appliances using a 3D printer [4] Numerical implementation and calibration of microplane model for closed-cell metal foams with spherical cellular structure [5] Geometrical modeling of closed-cell metal foams using stochastic cells generation [6] Effect of microstructure of closed cell foam on strength and effective stiffness [7] Investigation on in-plane behavior of bare and foam-filled honeycombs in quasi-static and dynamic states by using numerical method [8] Simulation and modeling of single point incremental forming processes within a solidworks environment [9] A comprehensive modeling and analysis guide in ABAQUS software [10] Perforation of honeycomb sandwich plates by projectiles [11] Analytical study of high velocity impact on sandwich panels with foam core and aluminum face-sheets [12] Micro-mechanics of Foam using unit cell (closed cell) approach

## شبیه‌سازی رفتار مکانیکی و ساخت داربست‌های متخلخل منظم از جنس PLA

ابوالفضل فرامرزیان حقیقی MSc

گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی سجاد، مشهد، ایران

علی حائریان اردکانی PhD

گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی سجاد، مشهد، ایران

مرتضی کفایی‌رضوی PhD

گروه بیو الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی سجاد، مشهد، ایران

احمد مولودی MSc

گروه پژوهشی مواد، سازمان جهاددانشگاهی، مشهد، ایران

### چکیده

در این پژوهش خواص مکانیکی، یکی از پرکاربردترین بیومواد پلیمری قابل جذب در بدن به نام پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) در حالت متخلخل‌شده مورد ارزیابی قرار گرفت. ابتدا ساختارهای منظم برگرفته از مدل تتراکایدکاهدرون که مدل کلون نامیده می‌شود طراحی شدند و سپس با استفاده از پرینتر سه‌بعدی با تکنیک FDM ساخته شدند. پس از آن به منظور تعیین خواص مکانیکی و نحوه شکست، از آزمون فشار استفاده شد. در نهایت، نتایج تجربی با نتایج آنالیز نرم‌افزار شبیه‌سازی مقایسه شد. نتایج نشان داد افزایش درصد تخلخل منجر به کاهش استحکام و همچنین افزایش اندازه سلول‌ها در یک تخلخل ثابت منجر به افزایش استحکام فشاری می‌شود. همچنین با کاهش درصد تخلخل مقدار کرنش تا مرحله شکست در یک تنش نسبتاً ثابت، افزایش می‌یابد. نحوه شکست نمونه‌های با درصد تخلخل بالا به صورت ترد و با زاویه ۴۵ درجه بود. این در حالی بود که نمونه‌های با درصد تخلخل کمتر، رفتار نسبتاً داکتیل داشتند و همراه با افزایش فشار، سلول‌ها روی یکدیگر جمع شده و تغییر فرم بالاتری تا نقطه شکست داشتند. همچنین مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان دادند که همخوانی مناسبی بین نتایج وجود دارد و مدل پیش‌بینی نرم‌افزار از صحت بالایی برای این مدل فومی برخوردار است.

**کلیدواژه‌ها:** مواد متخلخل، مدل کلون، پرینتر سه‌بعدی، بافت استخوان، پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA)

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۶

نویسنده مسئول: a.moloodi@jdm.ac.ir

### ۱- مقدمه

امروزه در علم پزشکی و مهندسی بافت به منظور ترمیم و بازسازی بافت استخوان و بافت غضروف از مواد پلیمری زیست‌سازگار و قابل جذب استفاده می‌شود. یکی از این مواد زیست‌سازگار که مصرف بالایی دارد و برای بافت استخوان استفاده می‌شود، پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA) است [1].

استخوان به دو نوع فشرده و متخلخل در بدن انسان وجود دارد. استخوان متخلخل، استحکام فشاری پایین‌تری نسبت به استخوان متراکم دارد، اما در برابر ضربه مقاومت بیشتری دارد. به‌تازگی ساخت ایمپلنت‌های متخلخل به دلیل شباهت با بافت استخوان مورد توجه قرار گرفته است. شباهت بیشتر ایمپلنت با ساختار استخوان منجر به بهبود سریع‌تر و مناسب‌تر بافت آسیب دیده می‌شود [2].

یکی از روش‌های ساخت این ایمپلنت‌های پلیمری قابل جذب، ساخت با پرینتر سه‌بعدی بوده که امکان چاپ پلیمرهای مصرفی در مهندسی بافت از جمله PLA را فراهم نموده است. پرینترهای سه‌بعدی توانسته‌اند به‌طور مطلوبی نقش حلقه اتصال‌دهنده علم مواد و مهندسی بافت را ایفا کنند [3].

در سال ۲۰۱۵، سوری و شاه‌بیک به دلیل دارابودن خواص مکانیکی مطلوب فوم‌های فلزی و کاربردهای در حال گسترش آنها، رفتار فوم‌های فلزی سلول بسته را به صورت الگوریتم عددی به کمک روش اجزای محدود غیرخطی شبیه‌سازی نموده و تحت بارگذاری‌های تک‌محوری و هیدروستاتیک قرار دادند [4].

در سال ۲۰۱۴، حسین‌پور و همکاران، روش جدیدی را برای مدل‌کردن فوم‌های سلول بسته ارائه دادند که مدل‌کردن فوم‌های فلزی با اندازه حفره و چگالی کنترل‌شده را ممکن ساخته است. آنها در گام بعدی، تاثیر اندازه حفره‌ها و تعداد حفره‌ها روی چگالی نسبی این فوم‌ها را مورد بررسی قرار دادند [5].

برای قابل پیش‌بینی‌بودن خواص مکانیکی ایمپلنت پلیمری متخلخل، استفاده از یک ساختار منظم، مطلوب‌تر است. ساختار متخلخل منظم تتراکایدکاهدرون که به مدل کلون معروف است، یک ساختار ۱۴وجهی منظم است. این ساختار امکان دسترسی به تخلخل‌های بیش از ۸۵٪ را فراهم می‌آورد [6].

در سال ۲۰۱۵، ملاطقی و مظفری تاثیر به‌کارگیری تکنیک پرکردن هسته لانه زنبوری را با فوم پلی‌یورتان سبک مورد بررسی قرار دادند. آنها چهار نوع لانه زنبوری آلومینیومی، به صورت خالی و پر شده با فوم تحت بارگذاری فشاری تک‌جهتی در شرایط شبه‌استاتیک و دینامیک را مورد بررسی قرار دادند تا بتوانند تاثیر چگالی نسبی سلول‌های لانه زنبوری را روی خواص همچون استحکام فروریزی و ظرفیت جذب انرژی تعیین کنند. نتایج تحلیل‌های اجزای محدود نشان داد که به‌کارگیری فوم در هسته لانه زنبوری می‌تواند استحکام فروریزی را تا ۲۴ برابر و همچنین ظرفیت جذب انرژی را تا ۱۱ برابر افزایش دهد. نتایج نشان داد که در شرایط شبه‌استاتیک، فوم پلی‌یورتان به خوبی خواص هسته را بهبود می‌بخشد، در حالی که با افزایش سرعت برخورد و در شرایط دینامیکی، تاثیر فوم پلی‌یورتان بر استحکام فروریزی و ظرفیت جذب انرژی کاهش چشمگیری خواهد داشت [7].

نرم‌افزارهای طراحی گوناگونی برای طراحی قطعات وجود دارند که یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین آنها نرم‌افزار Solidworks است. نرم‌افزار Solidworks علاوه بر اینکه دارای یک محیط کاربرپسند است، توانایی برقراری ارتباط با نرم‌افزارهای تجزیه و تحلیل المان محدود از جمله ABAQUS را نیز دارد [8]. نرم‌افزار شبیه‌سازی ABAQUS یک نرم‌افزار توانا در حیطه تجزیه و تحلیل استاتیک و دینامیک سازه‌ها و قطعات است. این نرم‌افزار امکان حل مسایل متنوعی از جمله مسایل فیزیکی، حرارتی و الکتریکی را دارا است [9].

در سال ۲۰۰۰ فت و پارک در مقاله‌ای به بررسی تحلیلی ضربه سرعت بالا روی پانل‌های ساندویچی با رویه‌های کامپوزیتی و هسته فومی پرداخته‌اند [10].

در سال ۲۰۱۵ علوی‌نیا و همکاران [11] با انجام اصلاحاتی روی روش تحلیلی ارائه‌شده توسط فت و پارک [10] به بررسی ضربه سرعت بالا روی پانل‌های ساندویچی با رویه‌های فلزی و هسته فومی در برخورد قائم با یک پرتابه استوانه‌ای پرداختند. آنها به دلیل ارزیابی صحت روش تحلیلی مورد نظرشان از آزمایش‌های تجربی صورت‌گرفته روی دو نوع پانل با هسته‌های فوم پلیمری و فلزی و رویه‌های آلومینیومی کمک گرفتند. نتایج آنها نشان داد که روش تحلیلی ارائه‌شده توسط آنها دقت قابل قبولی در تعیین سرعت باقیمانده پرتابه در برخورد با پانل‌هایی با هسته فوم پلیمری و فلزی و با نسبت چگالی‌های مختلف را دارا است [11].

هدف از انجام این تحقیق، بررسی رفتار خواص مکانیکی فوم

سپس در قسمت متریال، خواص ماده PLA شامل دانسیته، الاستیسیته و پلاستیسیته که از آزمون فشار نمونه استاندارد به دست آمده بود، وارد نرم‌افزار شد. در مرحله بعد خواص وارد شده به نرم‌افزار، به قطعه طراحی شده اختصاص داده شد. سپس با توجه به داده‌های ورودی و نسبت به خروجی مد نظر، حلگر مناسب انتخاب شد که در اینجا حلگر مد نظر داینامیک ایمپلیسایت است. پس از انتخاب حلگر، نوبت به مشخص‌بندی نمونه می‌رسد. برای نمونه متخلخل که دارای بازوهای نازک است، نوع مشی که انتخاب می‌شود اهمیت خاصی دارد. زیرا نحوه صحیح مشخص‌بندی میزان خطاهای احتمالی در خروجی را کاهش می‌دهد و همچنین بر میزان دقت خروجی تأثیرگذار است. نوع مشی که برای مشخص‌بندی این نمونه استفاده شد، تت مش است که امکان حل معادلات در بازوهای نازک را فراهم می‌آورد. در مرحله بعد، میزان نیرویی که به نمونه وارد می‌آید، مشخص می‌شود. در این مرحله، با توجه به نرخ کرنش، بارگذاری به صورت دیسپلیسمنت تعریف شد. این بارگذاری روی سطح نمونه به صورت یکنواخت و با نرخ جابه‌جایی یک میلی‌متر بر دقیقه تعیین شد. همچنین سطح انتهایی نمونه به صورت ثابت قرار داده شد. در انتهای کار برای شروع حل کردن معادلات به محیط جاب رفته و با سامیت کردن نمونه، نرم‌افزار، کار حل کردن معادلات را آغاز می‌نماید.

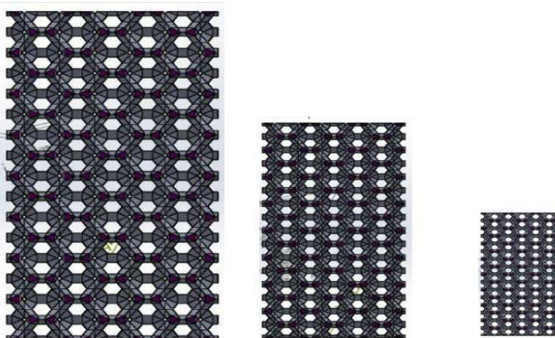
### ۳- بحث و نتایج

#### ۳-۱- نمونه‌های مدل شده توسط نرم‌افزار طراحی سه‌بعدی

تصاویر نهایی نمونه‌های مدل شده در نرم‌افزار طراحی سه‌بعدی در شکل‌های ۱ و ۲ آورده شده است. در شکل ۱ نمونه‌های با اندازه سلول یکسان و درصد تخلخل متفاوت و در شکل ۲ نمونه‌های با درصد تخلخل یکسان و اندازه سلول متفاوت نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود یکپارچگی سلول‌ها در تمام مدل‌های اولیه وجود دارد. نمونه‌های ساخته شده توسط پرینتر سه‌بعدی در شکل ۳ نمایش داده شده است. در تصاویر، پرینت کامل از مدل اولیه قابل رویت است.



شکل (۱) به ترتیب از راست نمونه کلون ۱۵-۸۹، ۱۵-۸۵ و ۱۵-۸۱



شکل (۲) به ترتیب از راست نمونه‌های کلون ۱۵-۸۵، ۱۵-۸۵ و ۱۵-۸۵

تخلخل باز منظم با جنس PLA در اندازه‌های مختلف قطر حفره و درصد‌های تخلخل متفاوت است. برای این منظور، ابتدا ساختارهای منظم با الگوی مدل کلون، طراحی و سپس با روش پرینت سه‌بعدی ساخته شد. برای این منظور از نرم‌افزار Solidworks و پرینتر سه‌بعدی استفاده شد. سپس تمامی نمونه‌های ساخته شده در شرایط مختلف، تحت آزمون فشار قرار گرفت و منحنی‌های تنش- کرنش فشاری به دست آمد. در نهایت نتایج تجربی با نتایج آنالیز شبهه‌سازی توسط نرم‌افزار ABAQUS مقایسه شد.

### ۲- مواد و روش تحقیق

#### ۲-۱- مواد اولیه

مواد اولیه مورد استفاده در این تحقیق فیلامنت PLA مصرفی پرینتر سه‌بعدی بود.

#### ۲-۲- طراحی مدل سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار

مرحله اول ساخت فوم، به طراحی سه‌بعدی مدل کلون با استفاده از نرم‌افزار طراحی سه‌بعدی مربوط می‌شود. در این مرحله، ابتدا سلول واحد کلون توسط نرم‌افزار طراحی شد. این سلول یک ۱۴ وجهی بوده که دارای ۳۶ یال و ۲۴ رأس است. در این سلول تمام یال‌ها با هم برابر هستند. زوایای بین وجوه ۴ و ۶ ضلعی ۱۲۵°۱۵'۵۱" و زاویه بین وجوه ۶ و ۶ ضلعی ۱۰۹°۲۸'۱۶" است [12]. برای ساخت فوم لازم است بین سلول‌ها فضای خالی وجود داشته باشد. در ادامه کار، لبه‌ها یا همان یال‌های سلول پخ زده شد تا هنگام قرار گرفتن این سلول‌ها کنار هم، فضای خالی مورد نظر بین آنها ایجاد شود.

#### ۲-۳- ساخت مدل پلیمری با دستگاه پرینتر سه‌بعدی

مرحله دوم به ساخت فوم پلیمری با پرینت مدل سه‌بعدی طراحی شده با نرم‌افزار طراحی سه‌بعدی اختصاص دارد. در این مرحله با استفاده از پرینتر سه‌بعدی مدل پروشای تری (Prusa i3) و تکنیک FDM مطابق با جدول ۱، مدل‌های پلیمری با اندازه سلول‌های ۷، ۱۰، ۱۵ میلی‌متر و با درصد تخلخل ۸۱، ۸۵ و ۸۹٪ ساخته شد.

جدول (۱) مشخصات نمونه‌های مدل کلون

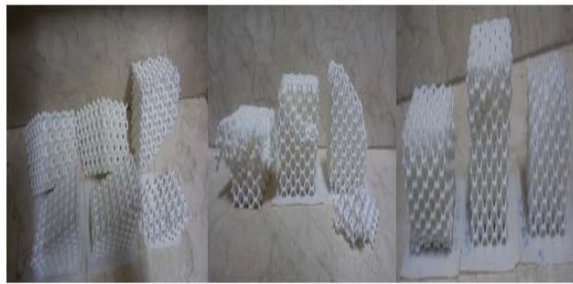
ردیف	نام اختصاری	اندازه سلول (میلی‌متر)	درصد تخلخل
۱	۷-۸۹	۷	۸۹
۲	۷-۸۵	۷	۸۵
۳	۷-۸۱	۷	۸۱
۴	۱۰-۸۹	۱۰	۸۹
۵	۱۰-۸۵	۱۰	۸۵
۶	۱۰-۸۱	۱۰	۸۱
۷	۱۵-۸۹	۱۵	۸۹
۸	۱۵-۸۵	۱۵	۸۵
۹	۱۵-۸۱	۱۵	۸۱

### ۲-۴- بررسی خواص مکانیکی

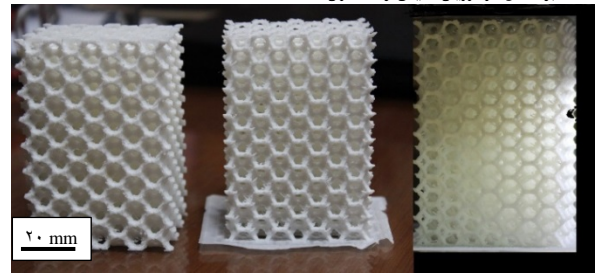
برای بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها از آزمون فشار و مطابق با استاندارد ASTM E9 که مناسب‌ترین روش برای ارزیابی خواص مکانیکی مواد فومی است، با نرخ جابه‌جایی یک میلی‌متر بر دقیقه استفاده شد.

#### ۲-۵- شبهه‌سازی

برای شبهه‌سازی آزمون فشار و تحلیل تنش‌های وارده بر نمونه طراحی شده از نرم‌افزار شبهه‌سازی المان محدود ABAQUS استفاده شد. ابتدا نمونه طراحی شده در نرم‌افزار طراحی سه‌بعدی به عنوان یک قطعه وارد نرم‌افزار شبهه‌سازی المان محدود شد.



شکل ۴) به ترتیب از راست نمونه‌های کلوین ۷-۸۹، ۷-۸۵، ۷-۸۱، ۱۰-۸۹، ۱۰-۸۵، ۱۰-۸۱، ۱۰-۸۹، ۱۵-۸۵، ۱۵-۸۱ و ۱۵-۸۹ پس از آزمون فشار



شکل ۳) به ترتیب از راست نمونه کلوین ۱۵-۸۹، ۱۵-۸۵، ۱۵-۸۱ و ۱۵-۸۹

### ۱-۳- نتایج تست فشار

نمودارهای تنش- کرنش نمونه‌های کلوین در نمودارهای ۱-۳ و تصاویر شکست نمونه‌ها در شکل ۴ آورده شده است. در جدول ۲، استحکام تسلیم، مدول یانگ و کرنش شکست تمامی نمونه‌های کلوین آورده شده است.

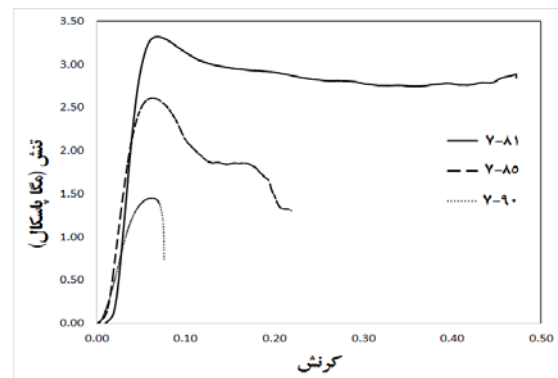
جدول ۲) استحکام تسلیم، مدول یانگ و کرنش شکست نمونه‌های کلوین

ردیف	نام اختصاری	استحکام تسلیم (مگاپاسکال)	مدول یانگ (مگاپاسکال)	کرنش شکست (درصد)
۱	۷-۸۱	۳/۳۲	۴۷/۴۳	۴۷
۲	۷-۸۵	۲/۶۱	۴۳/۵	۱۳
۳	۷-۸۹	۱/۴۵	۲۴/۱۷	۸
۴	۱۰-۸۱	۳/۶۳	۶۰/۵	۳۲
۵	۱۰-۸۵	۲/۷۳	۵۴/۶	۱۰
۶	۱۰-۸۹	۱/۴۲	۲۸/۴	۶
۷	۱۵-۸۱	۳/۵۵	۸۸/۷۵	۱۳
۸	۱۵-۸۵	۲/۷۱	۵۴/۲	۹
۹	۱۵-۸۹	۱/۳۲	۲۲	۷

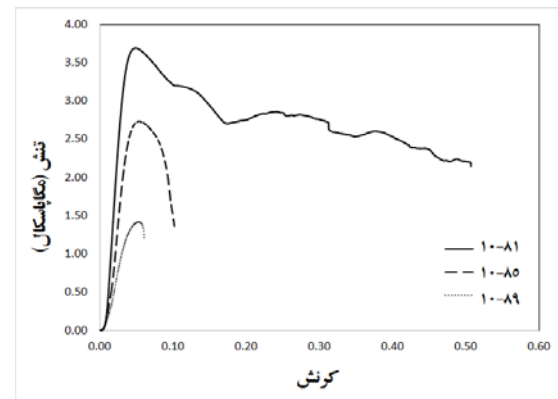
### ۲-۳- مشخصات استخراج شده از نمودارهای تنش و کرنش

در نمودارهای ۴-۶ به ترتیب مدول یانگ، کرنش شکست و استحکام تسلیم برای تمامی نمونه‌ها استخراج و رسم شده است. آنچه از نمودارهای فوق و نتایج آزمون فشار به دست می‌آید در زیر آمده است:

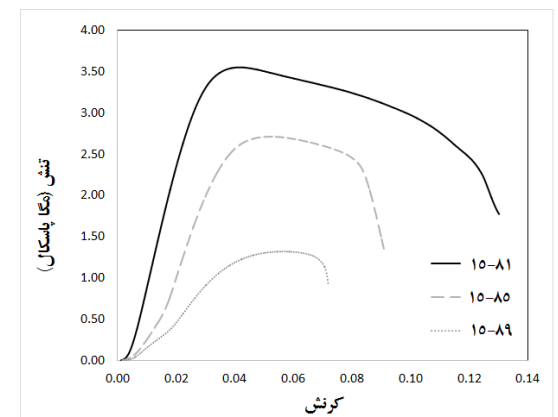
- ۱- با افزایش درصد تخلخل، استحکام تسلیم و مدول یانگ نمونه‌ها کاهش می‌یابد.
- ۲- مقدار کرنش شکست به‌عنوان معیاری برای مقایسه انعطاف‌پذیری قطعات، با کاهش درصد تخلخل افزایش می‌یابد.
- ۳- استحکام تسلیم نمونه‌ها با افزایش یا کاهش اندازه حفرات تقریباً ثابت است.
- ۴- مدول یانگ نمونه‌ها با افزایش اندازه حفرات، افزایش می‌یابد.
- ۵- انعطاف‌پذیری قطعه با افزایش اندازه حفرات کاهش می‌یابد.
- ۶- در اندازه حفرات بالا (۱۵ میلی‌متر) در تمامی درصدهای تخلخل، ماده انعطاف‌پذیری بالایی ندارد.



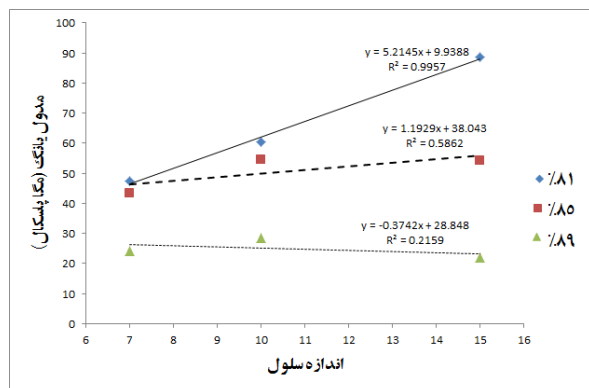
نمودار ۱) تنش-کرنش نمونه‌های ۷-۸۹، ۷-۸۵ و ۷-۸۱



نمودار ۲) تنش-کرنش نمونه‌های کلوین ۱۰-۸۱، ۱۰-۸۵، ۱۰-۸۹



نمودار ۳) تنش-کرنش نمونه‌های کلوین ۱۵-۸۱، ۱۵-۸۵ و ۱۵-۸۹



نمودار ۴) مشخصات مدول یانگ برای تمامی نمونه‌ها



۲- فاصله مکان قرارگیری تمرکز تنش از سطح با فاصله مکان قرارگیری تمرکز تنش بعدی برابر است.  
 ۳- حداکثر تنش به وجود آمده برای تمامی نمونه‌ها که بعد از آن ماده تسلیم شده بوده، حدود ۴/۵ مگاپاسکال است که با مقدار تجربی به دست آمده برای تنش تسلیم نمونه بالک همخوانی دارد.  
 ۴- با افزایش اندازه حفرات، حداکثر تنش به وجود آمده در نمونه‌ها بالاتر می‌آید. در نتایج تجربی نیز نمونه‌های با اندازه حفرات ۵- با افزایش یا کاهش درصد تخلخل، حداکثر تنش به وجود آمده در نمونه‌ها تقریباً ثابت است.

۶- تغییر فرم ماده در تمام نمونه‌ها از سمت فوقانی صورت می‌گیرد. آنچه در نتایج تجربی نیز حاصل شد، شکست از قسمت فوقانی بود.

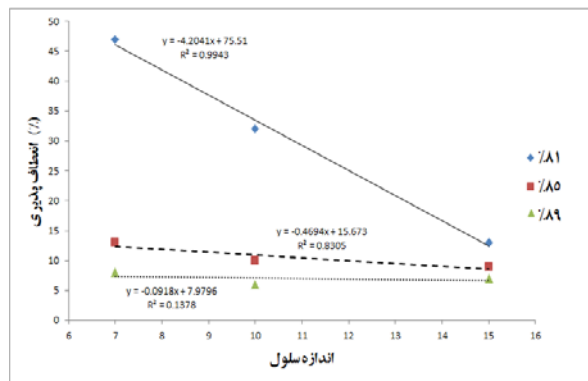
در نتایج شبهه‌سازی مشاهده شد که با افزایش اندازه حفرات، حداکثر تنش وارده به نمونه افزایش می‌یابد. علت آن افزایش برآیند تنش‌های وارده بر گوشه‌های سلول‌ها است. به همین دلیل است که در تمامی سه نمونه با اندازه حفره زیاد (نمونه‌های با اندازه حفره ۱۵ میلی‌متر)، تغییر فرم زیادی تا مرحله شکست رخ نداد. طبق نتایج تجربی، افزایش درصد تخلخل، منجر به کاهش استحکام تسلیم و مدول ینگ نمونه‌ها می‌شود. این رفتار به دلیل کاهش ضخامت جداره سلول‌ها و کم شدن استحکام آنهاست. هرچه درصد تخلخل افزایش می‌یابد، نسبت ضخامت جداره سلول‌ها به قسمت‌های توخالی کاهش می‌یابد و در نتیجه استحکام ماده کم می‌شود.

در مقایسه رفتار تغییر فرم نمونه‌های با اندازه حفره یکسان و درصد تخلخل متفاوت برای مثال نمونه‌های ۸۹-۱۰، ۸۵-۱۰، ۸۱-۱۰، مشاهده می‌شود هرچه درصد تخلخل افزایش می‌یابد، تغییر فرم ماده تا کرنش شکست کاهش می‌یابد. به طوری که در نمونه با بیشترین درصد تخلخل، تقریباً تغییر فرم نداریم و در اوایل آزمون فشار نمونه با میزان کرنش اندکی خرد شده و می‌شکند. در حالی که در نمونه با کمترین مقدار تخلخل، نمونه تا کرنش ۳۳٪ تغییر فرم داد.

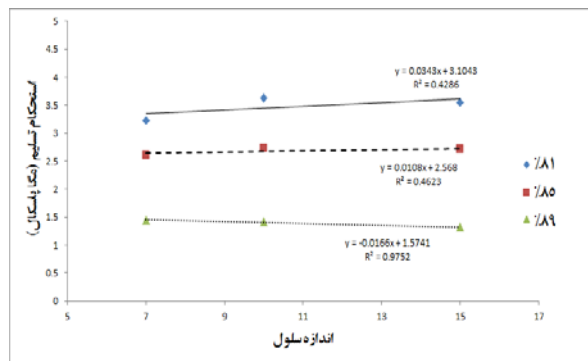
به نظر می‌رسد این رفتار به دلیل کم شدن سطح مقطع سلول‌ها با افزایش درصد تخلخل است. همان‌طور که در شکل‌ها نشان داده شد، هرچه درصد تخلخل افزایش می‌یابد، سطح مقطع سلول‌های داخلی کاهش می‌یابد و در نتیجه در یک مقدار سرعت کرنش ثابت، امکان تحمل تنش‌های فشاری را ندارد و ترک‌ها رشد می‌کنند و منجر به شکست ناگهانی قطعه می‌شود. ولی در نمونه‌های با ضخامت سطح مقطع سلولی بیشتر، امکان جمع شدن سلول‌ها روی هم و ادامه تغییر فرم پلاستیک فراهم می‌شود. توزیع تنش حاصل از نیروی وارده به سطح مقطع سبب می‌شود تا تنش به ردیف‌های سلولی پایین‌تر انتقال یابد و در نهایت، در ردیف سوم سلولی، تمرکز تنش در گوشه‌های سلول به بالاترین حد ممکن برسد و به دنبال آن شکست از این ردیف سلولی رخ دهد. به علت ثابت بودن سطح زیرین نمونه، این اتفاق در سومین ردیف سلولی از پایین نمونه نیز رخ می‌دهد که این عمل منجر به بشکته‌ای شدن نمونه می‌شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ابتدا ساختاری منظم به منظور شبهه‌سازی بافت استخوان با استفاده از نرم‌افزار Solidworks طراحی شد. این



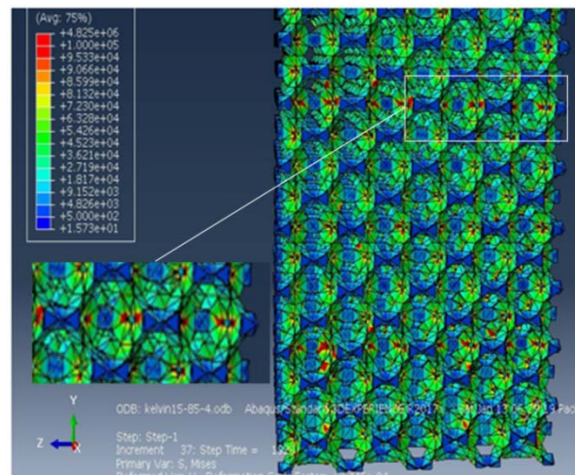
نمودار ۵) مشخصات انعطاف‌پذیری برای تمامی نمونه‌ها



نمودار ۶) مشخصات استحکام تسلیم برای تمامی نمونه‌ها

#### ۳-۳- نتایج تحلیل نرم‌افزار شبهه‌سازی المان محدود

در شکل ۵، تصویر نمونه‌ای از نتایج تحلیل شبهه‌سازی در محیط ABAQUS آورده شده است.



شکل ۵) نمونه‌ای از شبهه‌سازی نمونه کلونین ۸۵-۱۵ در محیط ABAQUS

آنچه در این شبهه‌سازی مورد مطالعه قرار گرفت، نحوه تغییر فرم در نقاط مختلف نمونه، چگونگی توزیع تنش و حداکثر میزان تنش در قسمت‌های مختلف نمونه یعنی اولین محل‌هایی بود که دچار تغییر فرم می‌شوند. به طور کلی نتایج مربوط به شبهه‌سازی به صورت زیر بود:

۱- حداکثر تنش در ردیف‌های سوم سلولی از سمت بالا و پایین و در وسط نمونه قرار دارد که این با نتایج تجربی (محل شروع ترک) همخوانی دارد.

## منابع

- 1- Agrawal CM1, Ray RB. Biodegradable polymeric scaffolds for musculoskeletal tissue engineering. *Journal of Biomedical Materials Research*. 2001;55(2):141-50.
- 2- Spector M, Michno MJ, Smarook WH, Kwiatkowski GT. A high-modulus polymer for porous orthopedic implants: biomechanical compatibility of porous implants. *Journal of Biomedical Materials Research*. 1978;12(5):665-77.
- 3- Kakami C, Nakano H, Hotta Y, Miyazaki T, Maki K. A study of biocomposite resins for creating Orthodontic appliances using a 3D printer. *Orthodontic Waves*. 2017;76(3):140-150.
- 4- Souri A, Shahbeyk S. Numerical implementation and calibration of microplane model for closed-cell metal foams with spherical cellular structure. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;14(10):121-128. [Persian]
- 5- Hosseinpour M, Abbaszadeh M, Mirzaee I. Geometrical modeling of closed-cell metal foams using stochastic cells generation. *Modares Mechanical Engineering*. 2014;14(3):129-135. [Persian]
- 6- Sue JW. Effect of microstructure of closed cell foam on strength and effective stiffness [Dissertation]. Texas: Texas A&M University; 2006.
- 7- Molatefi H, Mozafari H. Investigation on in-plane behavior of bare and foam-filled honeycombs in quasi-static and dynamic states by using numerical method. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;14(15):177-185. [Persian]
- 8- Gómez-López LM, Miguel V, Martínez A, Coello J, Calatayud A. Simulation and modeling of single point incremental forming processes within a solidworks environment. *Procedia Engineering*. 2013;63:632-641.
- 9- Nejatbakhsh H, Shahnazari H, Gharani A, Tarkash Esfahani R. A comprehensive modeling and analysis guide in ABAQUS software. Tehran: Abed Publishing; 2012. [Persian]
- 10- Fatt MSH, Park KS. Perforation of honeycomb sandwich plates by projectiles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2000;31(8):889-899.
- 11- Alavi Nia A, Kazemi M. Analytical study of high velocity impact on sandwich panels with foam core and aluminum face-sheets. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;15(6):231-239. [Persian]
- 12- Venkatachalam G. Micro-mechanics of Foam using unit cell (closed cell) approach. *Indian Journal of Science and Technology*. 2013;6(9):5220-5222.

ساختار برگرفته از مدل تتراکایدکاهدرون بود که هم میزان تخلخل بالایی را در اختیار قرار می‌دهد و هم به دلیل منظم بودن ساختار، امکان قابل پیش‌بینی بودن را عرضه می‌نماید. سپس از پرینتر سه‌بعدی با تکنیک FDM برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد و مدل‌های اولیه در اندازه و درصد تخلخل‌های متفاوت تولید شدند. در نهایت، نتایج تجربی از آزمون خواص مکانیکی با نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار ABAQUS مقایسه شد.

نتایج نشان دادند افزایش درصد تخلخل منجر به کاهش استحکام و افزایش اندازه سلول‌ها در یک تخلخل ثابت منجر به افزایش مدول یانگ می‌شود. همچنین با کاهش درصد تخلخل، مقدار کرنش تا مرحله شکست در یک تنش نسبتاً ثابت افزایش داشت. نکته قابل توجه در آزمون فشار، نحوه شکست نمونه‌های با درصد تخلخل بالا به صورت برشی و با زاویه ۴۵ درجه بود. در حالی که نمونه‌های با درصد تخلخل کمتر، تغییر فرم بیشتری تا مرحله شکست داشتند و همراه با افزایش فشار، سلول‌ها روی یکدیگر جمع شده و تغییر فرم پلاستیک داشتند. همچنین مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی نشان داد که همخوانی مناسبی بین نتایج وجود دارد و مدل پیش‌بینی نرم‌افزار از صحت بالایی برای این مدل فومی برخوردار است.

**تشکر و قدردانی:** نویسندگان بر خود لازم می‌بینند تا از زحمات پرسنل زحمت کش مرکز خدمات فنی مهندسی سازمان جهاددانشگاهی که ما را در انجام این طرح یاری نمودند، کمال تشکر و قدردانی را داشته باشند.

**تأییدیه اخلاقی:** این مقاله تا کنون در نشریه دیگری (بخشی از آن یا به طور کامل) چاپ نشده است و محتویات علمی آن حاصل فعالیت علمی نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج بر عهده آنها می‌باشد.

**تعارض منافع:** مقاله حاضر هیچ گونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص دیگری ندارد.

**سهم نویسندگان:** ابوالفضل فرامرزیان حقیقی (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی (۴۰٪)؛ علی حائریان اردکانی (نویسنده دوم)، پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۲۰٪)؛ مرتضی کفای رضوی (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۲۰٪)؛ احمد مولودی (نویسنده چهارم)، نگارنده مقدمه/ پژوهشگر کمکی/نگارنده بحث (۲۰٪)

**منابع مالی:** این پژوهش توسط سازمان جهاددانشگاهی خراسان رضوی و دانشگاه صنعتی سجاد حمایت مالی شده است.