



## تحلیل رفتار مجالگی محوری تیوب پر شده با فوم فلزی سلول بسته با رویکرد ورونوی

یوسف طراز جمشیدی<sup>۱</sup>، علی پورکمالی انارکی<sup>۱\*</sup>، مجتبی صدیقی<sup>۲</sup>، جواد کدخدایپور<sup>۱</sup>، سید محمد حسین میرباقری<sup>۳</sup>، بهناز اخوان<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید رجایی، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران  
<sup>۳</sup> دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران  
<sup>۴</sup> دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه تهران شمال، تهران، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۱۰-۲۷  
بازنگری: ۱۳۹۸-۰۱-۱۰  
پذیرش: ۱۳۹۸-۰۱-۲۵  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۲-۱۷

### کلمات کلیدی:

تیوب پر شده از فوم  
فوم سلول بسته آلپوراس  
دیاگرام ورونوی  
ریزساختار  
روش اجزای محدود

**خلاصه:** مواد متخلخل به ویژه فوم‌های فلزی از جمله مواد با کاربرد جذب انرژی و نسبت استحکام به وزن بالا اند. در مقاله حاضر رفتار شبه استاتیکی فشار محوری نمونه‌های فوم آلومینیومی تابعی و تیوب‌های پر شده از فوم به صورت عددی و تجربی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. برای ایجاد مدل عددی نمونه‌های تابعی، لایه‌های مختلف مکعبی فوم با چگالی‌ها و تنش‌های تسلیم متفاوت روی یکدیگر جانمایی شده است. نمونه‌ها عبارتند از تابعی دو و سه لایه و نیز فوم غیر تابعی تک لایه به صورت درون تیوب و بدون آن. برای صحنه‌گذاری مدل عددی و نیز تخمین خواص غیر خطی فوم از تست‌های استاندارد فشار محوری استفاده شده است. به منظور ارتقای استحکام و جذب انرژی از یک طرف و قابلیت ساخت سفارشی از طرف دیگر، نمونه‌های فوم داخل تیوب‌های آلومینیومی با مقطع مربعی جانمایی شده‌اند. در مدل‌سازی ریزساختار تصادفی از دیاگرام ورونوی استفاده شده است. به علاوه در مدل‌سازی، سلول واحدی مبتنی بر سلول کلون ارائه گردیده است. برای افزایش کارایی و سهولت در مدل‌سازی، رویکرد ترکیبی اجزای محدود و دیاگرام ورونوی به کمک قابلیت ماکرونویسی پایتون، در نرم‌افزار آباکوس پیاده‌سازی شده است. نهایتاً با کالیبراسیون مدل عددی، تطابق مناسبی میان نتایج تحلیل عددی و تست‌های تجربی مشاهده شده است.

### ۱- مقدمه

و هسته‌های مولد شبکه می‌باشد. در این پژوهش اثر بی‌نظمی در ساختار و چگالی نسبی بر رفتار فشاری الاستو-پلاستیک براساس مدل‌های نیمه تجربی و تحلیلی انجام شده است. تمرکز تحقیق عمدتاً معطوف به اثر چگالی نسبی فوم است. فروربری نانو یکی از بهترین تکنیک‌های تعیین خواص الاستیک مواد متخلخل است. نیمچک و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۳ با استفاده از این روش، خواص فوم سلول بسته آلومینیومی با ریزساختار ناهمگن، ضخامت دیواره ۰/۱ میلی‌متر و ابعاد متوسط حفره ۲/۹ میلی‌متر را مطالعه نمودند. برای مطالعه رفتار فوم‌ها دو مقیاس مختلف تعریف شد. بررسی مقیاس اول شامل مطالعه فازها و مواد تشکیل دهنده ضخامت دیواره سلولی می‌باشد. با روش فروربری نانو، خواص الاستیک و نسبت حجمی فازهای مختلف مواد ارزیابی و خواص مؤثر، با استفاده از الگوهای همگن‌سازی عددی و تحلیلی محاسبه شدند. مدول یانگ مؤثر دیواره سلولی در حدود ۷۰ گیگاپاسکال تخمین زده شد. مقیاس بالاتر نیز به صورت دیواره‌های

ریز ساختار مواد سلولی جامد به ویژه فوم‌های فلزی پیچیده و تا حدی نامنظم است. شبیه‌سازی و مطالعه رفتار این گونه مواد مستلزم مدل‌سازی دقیق ساختار آن‌هاست. روش‌های متعدد و مختلفی در خصوص مدل‌سازی هندسه ریز ساختار فوم‌ها ارائه شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به دیاگرام ورونوی، بازسازی تصاویر سی تی اسکن، جانمایی حفرات نامنظم، کف صابون و غیره نام برد. سوتومایر و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۴ روشی مناسب برای مدل‌سازی هندسی ریز ساختار فوم‌های سلول باز آلومینیومی ۶۱۰۱ با عملیات حرارتی ۶ براساس دیاگرام‌های ورونوی سه بعدی ارائه کردند. پس از مدل‌سازی به وسیله فرآیند یا مهار ترتیبی ساده<sup>۱</sup>، پیکربندی تصادفی فوم ایجاد می‌شود. این روش در واقع جانمایی تصادفی گره‌ها

### 1 Simple Sequential Inhibition (SSI)

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: ali\_pourkamali@sru.ac.ir



[۲۷] نیز در سال ۲۰۱۷ مطالعه‌ای تئوری-تجربی بر اثر بارهای ضربه دینامیکی عرضی و مچالگی تیوب‌های استوانه‌ای پر شده با فوم کردند. در پژوهش حاضر ابتدا مدل‌های هندسی نمونه‌های مکعبی از فوم‌های آلومینیومی و نیز تیوب‌های آلومینیومی با طول‌های مختلف ایجاد و سپس نمونه‌های تابعی در محیط نرم‌افزار ایجاد می‌شوند. نمونه‌ها عبارتند از نمونه‌های تک، دو و سه لایه با چیدمان لایه‌های فوم مختلف درون تیوب و بدون آن. تعداد کل حالات مورد مطالعه ۲۸ عدد است. ابعاد نمونه‌های مکعبی در هر لایه ۲/۵ میلی‌متر و تیوب مورد استفاده دارای ابعاد داخلی ۲۲ میلی‌متر است. به عبارت دیگر با شبیه‌سازی حالات مختلف می‌توان به سازه‌هایی با ساخت سفارشی و خواص مکانیکی و جذب انرژی مورد نیاز دست یافت. به منظور صحت‌گذاری و کالیبراسیون مدل عددی تست‌های مختلفی روی فوم‌ها و نیز تیوب‌های آلومینیومی انجام شد. نهایتاً تطابق مناسبی میان تست و شبیه‌سازی مشاهده شد.

## ۲- مدل‌سازی هندسی و تحلیل اجزای محدود

### ۲-۱- شرح مسئله

بدیهی است که گام اول در شبیه‌سازی رفتار مکانیکی مواد به‌ویژه مواد متخلخل و سلولی مدل‌سازی دقیق تمامی اجزای ساختاری آن است. در مقاله حاضر به روش عددی اجزای محدود و با استفاده از تکنیک دیاگرام ورونویی سه‌بعدی عملیات مدل‌سازی و تحلیل مکانیکی ریزساختار مزوسکوپی فوم سلول بسته آلومینیوم انجام شده است. رفتار مورد مطالعه نیز عبارت است از تغییرات خواص ماکروسکوپی فشار محوری شبه استاتیکی مانند تنش هموار، حداکثر تنش، کرنش چگالش، جذب انرژی، تابعیت نرخ کرنش و اثر میکرو اینرسی و غیره در چیدمان‌های مختلفی از نمونه‌های فوم آلپوراس تابعی. مقصود از فوم تابعی نیز استفاده از آلیاژهای مختلف آلومینیوم با تنش‌های تسلیم و چگالی‌های مختلف جرمی است. بدین ترتیب که در هر نمونه لایه‌های مختلفی از فوم فلزی با مشخصات مختلف استفاده شده و بدین ترتیب تلاش می‌شود خواص مورد نیاز به دست آید. در نتیجه ساخت سفارشی فوم‌های فلزی حاصل خواهد شد. برای ایجاد فوم‌های تابعی از چیدمان چند نمونه با چگالی‌های نسبی متفاوت استفاده شده است. البته در تست‌های تجربی، برای رسیدن به نمونه‌های تابعی پیوسته می‌توان عمل جداسازی نمونه و برش آن

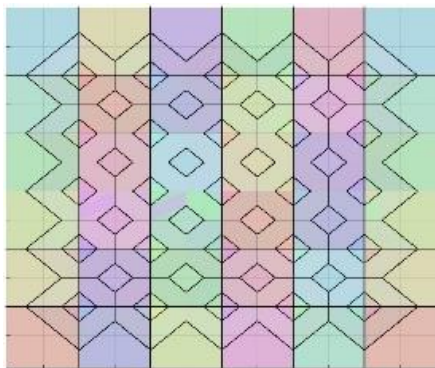
سلولی و ریزساختار همگن تعریف می‌شود. از آنجا که روش تحلیلی به خوبی قابل پیاده‌سازی روی مواد با تخلخل بالا نیست، از روش اجزای محدود چند مقیاسی استفاده شده است. برای مدل‌سازی اجزای محدود نیز روش پردازش تصویر، موزاییک‌کاری ورونویی و مدل تیر به کار رفته است. بدین ترتیب مدول یانگ مؤثر محاسباتی تقریباً برابر با مقدار محاسبه شده از تست فشار محوری می‌باشد. ژنگ و همکاران [۳] در سال ۲۰۱۴ رفتار ضربه دینامیکی محوری فوم فلزی را به کمک مدل اجزای محدود سه‌بعدی بررسی کرده‌اند. از جمله نتایج مهم تحقیق نیز می‌توان به مکانیزم تغییرشکل و فروریزش برشی و اثر آن در رفتار متشکله فوم‌های فلزی مورد بحث اشاره کرد. در این مطالعه از مدل ورونویی سه‌بعدی و دو بعدی استفاده شده است. در سال ۲۰۱۵ یوان و همکاران [۴] به صورت عددی و تجربی اثرات خواص دیواره سلولی بر عملکرد فشاری فوم آلومینیومی سلول بسته با تخلخل بالا تحت فشار محوری را مورد مطالعه قرار دادند. شکست ریزساختار در این حالت به کمک تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی مطالعه شده است. برای شبیه‌سازی رفتار مکانیکی به صورت عددی نیز از روش اجزای محدود به کمک سلول کلون چهارده وجهی نازک استفاده شده است. در سال ۲۰۱۳ ژنگ و همکاران [۵] اقدام به مدل‌سازی اجزای محدود ساختار مزوسکوپی فوم فلزی سلول بسته به کمک مدل ورونویی سه بعدی کردند. اندازه حفره به کمک دانه‌بندی ورونویی و میزان تخلخل با استفاده از کالیبره کردن ضخامت دیواره سلولی کنترل شده است. در این مطالعه رفتار پلاستیک و ترک خوردگی حفره‌ها در مقیاس مزو تحت تغییرشکل بزرگ فشاری و کششی بررسی شده است. در سال ۲۰۱۴ کدخدایپور و همکاران [۶] به کمک ترکیب روش شبیه‌سازی و تست‌های تجربی ارتباطی میان تغییرشکل مقیاس میکرو و خواص مکانیکی مقیاس ماکرو در فوم‌های آلومینیومی سلول بسته ارائه دادند. در بخشی از مطالعه، اثر چگالی نسبی بر خواص مکانیکی و در بخشی دیگر اثر توپولوژی و ریزساختار بررسی شده است. مدل‌های هندسی مورد مطالعه به صور مختلف و ساده ایجاد شده است. شکل هندسی سلول‌های مورد نظر عبارتست از کروی، بیضوی قائم، بیضوی افقی و مکعبی. در سال ۲۰۱۸ آقای کین و همکاران [۲۶] به صورت تحلیلی و عددی به مطالعه اثر بار ضربه سرعت پایین بر تیرهایی با هسته فوم فلزی پرداختند. مدل مورد استفاده در روش عددی آن‌ها، مدل هموزن بود. آقای لیو و همکاران



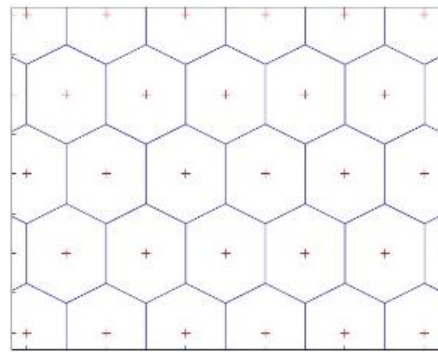
شکل ۱: نمونه مورد استفاده در تست بارگذاری فشار محوری  
**Fig. 1. Uniaxial compression test specimen**

ساختارهای سلولی به‌ویژه فوم فلزی سلول بسته تطابق دارد. الگوریتم این روش به طور ساده عبارتست از انتخاب  $N$  نقطه به عنوان هسته در یک ناحیه مشخص از فضا به حجم  $V_0$  و سپس تعیین نواحی مسطح و هندسی خاصی از فضای اطراف هر هسته به نحوی که کمترین فاصله را تا آن نقطه داشته باشد. با چیدمان مناسب هسته‌ها می‌توان در حالت دوبعدی به ترکیب لانه‌زنبوری شش ضلعی و در حالت سه‌بعدی به ترکیب چهارده وجهی رسید. نمایی از مدل ورونویی دو بعدی و سه بعدی به ترتیب با ساختار لانه زنبوری شش ضلعی و چهارده وجهی در شکل ۲ نشان داده شده است. سلول مورد نظر شامل شش سطح چهارضلعی و هشت سطح شش ضلعی است. این سلول واحد با نام سلول کلون شناخته می‌شود. ال. لی [۷]، ژ. لی [۸] و سونگ [۹] رابطه‌ای برای محاسبه فواصل میان هسته‌ها در مدل فوم چهارده وجهی منظم ارائه دادند. بدین ترتیب

$$d_0 = \frac{\sqrt{6}}{2} \left( \frac{V_0}{\sqrt{2}N} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$



(ب)



(الف)

شکل ۲: (الف) شبکه ورونویی دو بعدی شش ضلعی با ساختار منظم و (ب) ساختار سه بعدی چهارده وجهی ورونویی منظم مبتنی بر سلول کلون

**Fig. 2. (a) Regular 2D Voronoi lattice and (b) 3D tetrakaidecahedron Kelvin cell structure**

را در امتداد جهت فوم‌سازی بلوک اصلی انجام داد. به عبارت دیگر در تولید فوم آلومینیومی آلپوراس با حرکت از کف نمونه به سمت بالا چگالی فوم کاهش و قطر سلول‌ها افزایش می‌یابد. نمونه‌ای از فوم آلومینیومی مورد استفاده در تست فشار استاتیکی به منظور صحنه‌گذاری شبیه‌سازی در شکل ۱ نشان داده شده است. پیاده‌سازی روش دیاگرام ورونویی در نرم‌افزارهای مدل‌ساز و تحلیل‌گر به‌رغم سادگی ظاهری با مشکلات عدیده‌ای روبروست. از جمله این موارد می‌توان به حجم زیاد محاسبات، زمان مدل‌سازی بالا در ساختارهای بزرگ و پیچیده، معضلات ناشی از پیاده‌سازی روابط هندسه تحلیلی و تولید هندسه مادر در هر نرم‌افزار اشاره کرد. با توجه به ماهیت سه‌بعدی رفتار و هندسه ریزساختار مورد بحث، استفاده از دیاگرام ورونویی سه‌بعدی از نظر دقت به مراتب بالاتر از روش دوبعدی است. البته برای رسیدن به تقریب اولیه، به دلیل حجم محاسبات بالا و زمان مدل‌سازی طولانی، ابتدا از روش دوبعدی استفاده شده است. شایان ذکر است که به دلیل ضخامت بسیار کم دیواره سلولی، برای تعیین رفتار مکانیکی به روش اجزای محدود از المان پوسته‌های متداول استفاده شده است. از طرف دیگر برای مدل‌سازی لبه‌ها و محل تجمع مواد در فصل مشترک سلول‌ها از المان‌های تیر استفاده شده است. به عبارت دیگر، استفاده از المان پوسته در مدل‌سازی سطوح سلولی و المان تیر در لبه‌های ریزساختار از جمله نوآوری‌های مطالعه حاضر است.

## ۲-۲- دیاگرام ورونویی

از جمله روش‌های بسیار کارآمد در مدل‌سازی محیط متخلخل، استفاده از دیاگرام ورونویی است. این روش به خوبی با فیزیک

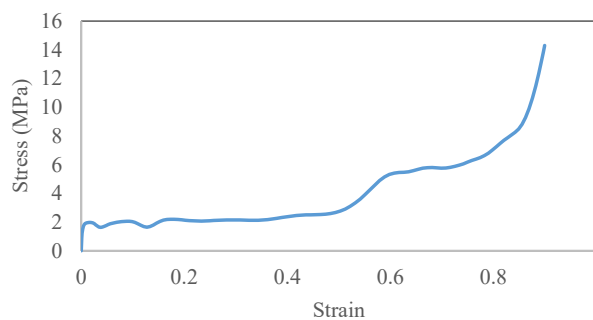
عدد اشاره کرد. به علاوه حجم آن  $۱۱/۳۱۷^۳$ ، مساحت کل  $۲۶/۸۱^۲$  و طول لبه‌ها  $۳۶l$  است [۱۳]. در این روابط  $l$  طول متوسط هر لبه است. شایان ذکر است که این مقادیر برای یک سلول منفرد بوده و برای یک ساختار متخلخل دارای تعداد زیادی سلول، تعداد سطح به ازای هر سلول نصف مقدار فوق، تعداد لبه‌ها  $۰/۳۳$  و تعداد رئوس  $۰/۲۵$  مقادیر بالاست. بدین ترتیب برای محاسبه چگالی نسبی یک محیط متخلخل فلزی می‌توان از این اطلاعات استفاده نمود. برای یک ساختار متخلخل متشکل از  $N$  سلول کلوبین، حجم نمونه متخلخل  $V_s^*$ ، حجم ساختار متخلخل  $V^*$ ، ضخامت لبه‌های سلولی  $t_e$ ، ضخامت سطوح و دیواره‌های سلولی  $t_f$  و چگالی ماده جامد  $\rho_s$  داریم

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{m^*}{m_s} = \frac{V^*}{V_s} = \frac{26.8l^2 N t_f}{2} + \frac{36l N t_e^2}{3} = Nl \{13.4l t_f + 12t_e^2\} \quad (۲)$$

در این رابطه  $m$  معرف جرم است. البته رابطه فوق با فرض بینهایت سلول از دقت بالایی برخوردار است و برای تعداد متناهی دارای خطاست. به عنوان مثال در یک ساختار متخلخل با بیش از ۸۵۰ سلول کلوبین، میزان خطای محاسبه مساحت کل سطوح حدود ۱۵ درصد است.

#### ۴-۲- مدل‌سازی عددی

در شبیه‌سازی به روش اجزای محدود، تولید مدل هندسی و در پی آن مدل اجزای محدود گام اساسی است. رویکرد مدل‌سازی حاضر در هر دو حالت دو و سه‌بعدی استفاده از روش دیاگرام ورونویی است. در فوم تابعی لایه‌ای برای پیشگیری از جدایش و لغزش نسبی لایه‌ها از چسبی ضعیف با خواص مکانیکی نزدیک به صفر استفاده می‌شود. به دلیل تأثیر ناچیز چسب در رفتار مکانیکی نمونه، از مدل‌سازی آن صرف‌نظر شده است. به‌دلیل ماهیت تصادفی و همراه با اغتشاش توزیع حفره‌ها در شبیه‌سازی اجزای محدود، مقدار متوسط نتایج به دست آمده گزارش شده است. برای بررسی اثر بی‌نظمی، مدل‌هایی با اغتشاش حدود ۱۰ درصد تولید شده است. البته تمرکز اصلی بحث روی مدل‌هایی منظم تشکیل شده از سلول واحد کلوبین بهبود یافته می‌باشد. این میزان از اغتشاش با توزیع احتمال یکنواخت در جانمایی هسته‌های سلول ورونویی برای رسیدن به هندسه‌ای نزدیک به



شکل ۳: رفتار فشار محوری متداول در فوم تابعی چندلایه  
**Fig. 3. Stress-strain curve for typical multi-layered graded foam filled tube**

برای مدل‌سازی فوم با میزانی از بی‌نظمی می‌توان پارامتر درجه بی‌نظمی را به صورت  $k = 1 - \delta / d$  تعریف کرد. در این رابطه  $\delta$  حداقل فاصله مجاز میان دو هسته متوالی است. بدیهی است که در مدل کاملاً منظم  $\delta = d$  و در نتیجه  $k = 0$ . در مطالعه رفتار فوم‌های تابعی، مثلاً متشکل از دو یا چند لایه با چگالی‌های نسبی مختلف، معمولاً رفتار فشار محوری استاتیکی به صورت ترکیبی از نواحی الاستیک، هموار و چگالش مختلف و گاه ترکیبی از رفتار فشاری هر یک از لایه‌ها است. نمونه‌ای از این رفتار در شکل ۳ نشان داده شده است. این شکل مربوط به شبیه‌سازی فشار محوری و مچالگی یک سازه تابعی سه لایه با چیدمان دو لایه ضعیف فوم آلومینیومی در بخش تحتانی و یک لایه قوی‌تر آلایژ آلومینیوم-سیلیسیومی در بخش فوقانی می‌باشد. همان‌طور که در شکل به خوبی مشاهده می‌شود دو ناحیه تنش هموار و در پی آن دو ناحیه چگالش دیده می‌شود. کرنش چگالش هر ناحیه نظیر طول نقاط اکستره‌موم منحنی راندمان جذب انرژی است. در ادامه نحوه محاسبه راندمان جذب انرژی تشریح می‌شود.

#### ۳-۲- مورفولوژی سلولی در فوم آلپوراس

رفتار مکانیکی و خواص ویژه جامدات سلولی کاملاً متأثر از شکل و ریزساختار آنهاست. مهم‌ترین ویژگی این مواد چگالی نسبی  $\rho^* / \rho_s$  می‌باشد که در آن بالانویس \* معرف جامد متخلخل و پایین‌نویس  $s$  نظیر جامد چگال تشکیل دهنده آن است. در این پژوهش ریزساختار سه‌بعدی موردنظر برای شبیه‌سازی به صورت سلول واحدی مبتنی بر چهارده وجهی کلوبین تولیدی به روش دیاگرام ورونویی است. از جمله مشخصات این سلول می‌توان به تعداد لبه ۳۶ و رئوس ۲۴

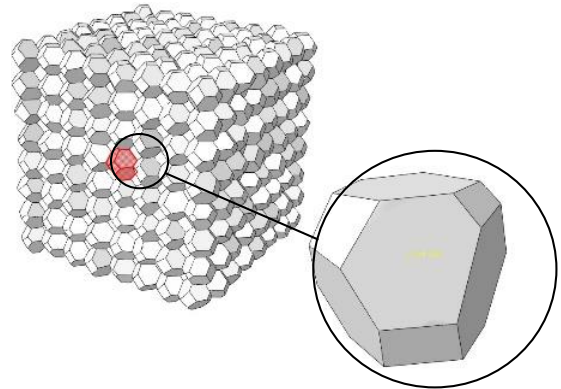
پس پردازش استفاده کرد. برای پیشگیری از حذف محتوای فرکانسی موردنیاز، به رغم افزایش حجم فایل‌های خروجی از فیلتر پس پردازش با فرکانس قطع ۲ کیلوهرتز استفاده شده است [۱۰].

با توجه به شبیه‌سازی‌های مختلف و فرآیند سعی و خطا از یک طرف و نیز محاسبه دوره تناوب مود ارتعاشات آزاد غالب از سوی دیگر، پریود حل در حدود ۱۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب زمان تحلیل و دقت آن قابل قبول خواهد بود. شایان ذکر است که یکی از روش‌های متداول در کاهش هزینه محاسباتی، افزایش این سرعت است. البته با افزایش نرخ بارگذاری نتایج از حالت شبه استاتیکی فاصله می‌گیرد. در واقع این افزایش به نحوی انجام شده که تا حد امکان اثرات میکرو اینرسی وارد نشود. این کنترل با رصد تاریخچه زمانی کمیت‌های انرژی مانند انرژی جنبشی و چگالی انرژی کرنشی انجام شده است [۱۰]. برای جلوگیری از بروز ضربه اولیه ناخواسته در آغاز حل، روند بارگذاری و اعمال شرایط مرزی جابجایی به جای رمپ خطی به صورت پله هموار با شرط پیوستگی مشتق اول مدل‌سازی شده است. ارائه نتایج در پدیده فشار محوری به صورت تنش نامی بر حسب کرنش نامی است. برای محاسبه تنش نامی، نیروی عکس‌العمل وارد بر سطح صلب فک متحرک بر مساحت سطح مقطع عرضی تماس با نمونه تقسیم می‌شود. کرنش نامی نیز حاصل تقسیم جابجایی فک بر ارتفاع کل نمونه است. شرایط مرزی حاکم بر مسئله، مقید کردن تمامی درجات آزادی جابجایی و دورانی فک پایین و تمامی درجات آزادی فک متحرک به جز حرکت محوری به سمت نمونه است. با توجه به ذات استاتیکی پدیده، شرایط اولیه سرعتی بر مدل اعمال نشده است.

#### ۵-۲- تغییر شکل فشاری فوم آلپوراس و محاسبه نقطه چگالش

کرنش چگالش و تنش هموار دو پارامتر اساسی در تعیین رفتار مکانیکی و جذب انرژی فوم‌های فلزی هستند. به طور تقریبی کرنش چگالش  $\epsilon_d$  با رابطه  $\epsilon_d = 1 - 1/4 \rho^* / \rho_s$  به دست می‌آید. برای محاسبه پارامترهای مادی فوق می‌توان از روشی دقیق‌تر و مبتنی بر محاسبه جذب انرژی استفاده نمود [۸].

$$E(\sigma_a) = \frac{\int_{\epsilon_{cr}}^{\epsilon_a} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{\sigma(\epsilon_a)} \quad (3)$$



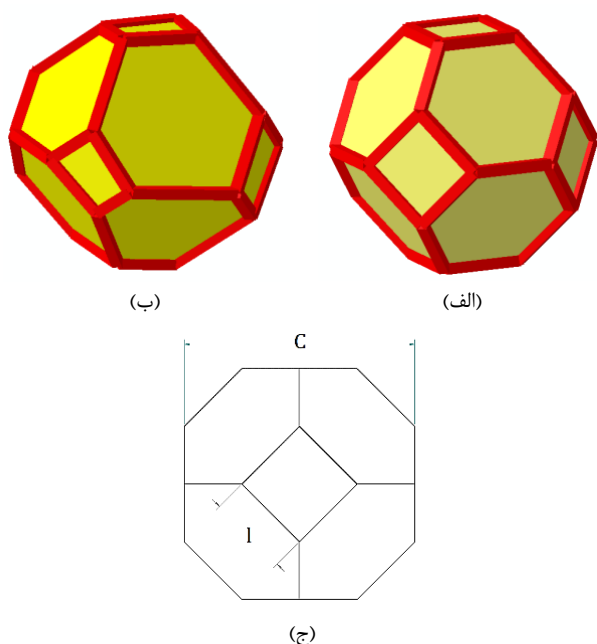
شکل ۴: نماهایی از مدل متخلخل سه‌بعدی نیمه‌منظم با بی‌نظمی ۲۰ درصد  
Fig. 4. Cellular solid model for cubic foam specimen with 20% irregularity

نمونه‌های واقعی انتخاب شده است. مدل‌ها با المان‌های پوسته متداول خطی چهارضلعی با انتگرال‌گیری کاسته یا S4R برای مدل‌سازی سطوح سلولی و المان‌های تیر مرتبه اول سه‌بعدی یا B31 برای مدل‌سازی لبه‌ها و روش تحلیل دینامیکی صریح در محیط آباکوس 2017 تحلیل شده‌اند (شکل ۴). برای مدل‌سازی فک‌های دستگاه بارگذاری از المان‌های صلب R3D4 استفاده شده است.

نکته دیگر آن که تماس میان سطوح و خودتماسی از طریق تماس عمومی نرمال سخت با رفتار مماسی دارای اصطکاک با ضریب اصطکاک ۰/۱ [۷] پیاده‌سازی شده است. پس از مدل‌سازی‌های مختلف مشاهده شد که تغییر اندک ضریب اصطکاک، تأثیر معناداری بر نتایج ندارد. این حساسیت اندک به اصطکاک ناشی از نسبت پواسن بسیار کم ساختار متخلخل و عدم لغزش جانبی می‌باشد. لازم به ذکر است که با افزایش ضریب اصطکاک نوپز خروجی کمی افزایش می‌یابد که در روش حل دینامیکی صریح قابل پیش‌بینی است. در تعریف رفتار پلاستیک آلومینیوم از مدل کار سختی دو خطی در ارتباط میان تنش و کرنش استفاده شده است. این خواص در جدول ۱ آمده است. تغییر در چگالی نسبی لایه‌های مختلف فوم تابعی از طریق تغییر در اندازه متوسط سلول‌ها و گاهی با تغییر در ضخامت متوسط دیواره‌ها و لبه‌ها اجرا می‌شود. بارگذاری فشاری نیز از طریق اعمال جابجایی به فک صلب متحرک از یک سمت و مقید نمودن فک دیگر انجام می‌شود. برای حذف نوپز خروجی ناشی از خطای حل عددی اپراتور صریح می‌توان از فیلتر بلادرنگ حذف دندانه ۱ و نیز فیلتر باترورث در

جدول ۱: پارامترهای مادی آلومینیوم خالص، A۳۵۶ و تیوب آلومینیومی

نسبت پواسن	تنش تسلیم (MPa)	مدول تانژانت (GPa)	مدول یانگ (GPa)	چگالی جرمی (kg/m <sup>3</sup> )	ماده
۰/۳۵	۷۶	۰/۴۷	۶۹	۲۷۰۰	آلومینیوم (Al) [۷]
۰/۳۵	۱۳۰	۰/۰	۶۹	۲۷۰۰	A۳۵۶ (AS) [۱۱]
۰/۳۴	۱۲۰	۰/۲	۷۰	۲۷۰۰	تیوب آلومینیومی ۱۱۰۰ [۱۲]



شکل ۵: سلول واحد ارائه شده (الف) منظم، (ب) با بی‌نظمی ۲۰ درصد و

(ج) تعریف اندازه سلول (C) و طول لبه (l)

Fig. 5. Proposed unit cell, (a) regular, (b) with 20% irregularity and (c) major dimensions definitions

است. مشخصه بارز این سلول استفاده هم‌زمان از المان تیر در لبه‌ها با پروفیل مربعی و المان پوسته در سطوح سلولی است. ابعاد پروفیل تیر با  $t_e$  و ضخامت سطوح با  $t_f$  نشان داده شده است.

از جمله پارامترهای مورفولوژیکی مهم جامدات سلولی، نسبت حجمی ماده جامد در لبه‌های ساختار سلولی،  $\phi$  است. مقدار این پارامتر در فوم‌های سلول بسته در حدود ۰/۶ تا ۰/۸ است [۱۳ و ۱۶]. نهایتاً مسئله اصلی یافتن مقدار پارامترهای مختلف مورفولوژیکی برای رسیدن به چگالی فوم مورد نظر به‌ازای اندازه سلول مشخص است. به دلیل عدم قطعیت در مورد تعداد سلول‌های کامل در هر جهت و

در این رابطه راندمان جذب انرژی  $E(\sigma_a)$  به صورت میزان انرژی جذب شده از تسلیم تا تنش مورد نظر  $\sigma_a = \sigma(\varepsilon_a)$  به صورت نرمال شده نسبت به این تنش تعریف می‌شود. پارامتر  $\varepsilon_{cr}$  کرنش در نقطه تسلیم است. به علاوه نقطه تسلیم نیز به صورت اولین قله در نمودار تنش-کرنش تعریف می‌شود. کرنش چگالش را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد. این کرنش نظیر حداکثر راندمان جذب انرژی است [۸].

$$\frac{dE(\varepsilon)}{d\varepsilon} = 0 \Rightarrow \varepsilon = \varepsilon_d \quad (4)$$

در این صورت می‌توان تنش هموار تحت بار فشار محوری را محاسبه نمود [۸]. یعنی

$$\sigma_{pl} = \frac{\int_{\varepsilon_{cr}}^{\varepsilon_d} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\varepsilon_d - \varepsilon_{cr}} \quad (5)$$

#### ۲-۶- تعیین پارامترهای مورفولوژیکی

یکی از چالش‌های اساسی در مدل‌سازی ریزساختار هندسی فوم‌ها تعیین پارامترهای مورفولوژیکی آن است. در پژوهش حاضر، برای مدل‌سازی هندسی دقیق‌تر، سلول واحدی نوین مبتنی بر سلول کلونین چهارده وجهی ارائه شده است. این سلول واحد شامل یک چهارده وجهی کلونین با بی‌نظمی کنترل شده و دارای شش سطح چهارضلعی و هشت سطح شش ضلعی می‌باشد. برای تولید این سلول‌ها از دیاگرام ورونویی با جانمایی هسته‌ها با توزیع احتمال یکنواخت خطا نسبت به یکدیگر برای تولید بی‌نظمی در شبکه استفاده شده است. سلول واحد پیشنهادی نمونه در شکل ۵ در حالت کاملاً منظم و نیز با بی‌نظمی ۲۰ درصد نشان داده شده است. به علاوه در این شکل نمادگذاری‌های مربوط به اندازه متوسط سلولی، C و طول لبه‌ها، l نشان داده شده

جدول ۲: پارامترهای هندسی ساختار سلولی در سیستم میلی‌متریک

Table 2. Geometrical parameters for several cellular structures in SI units

$L_{edge}$ (mm)	$N_{edge}$	$Err_A$	$A_{total}^{infinite}$ (mm <sup>2</sup> )	$A_{total}^{finite}$ (mm <sup>2</sup> )	$N_{quad}$	$N_{hex}$	$V_{total}$ (mm <sup>3</sup> )	$N_{total}$	$l$ (mm)	$C$ (mm)	$N_1$
۳۲۸۴	۱۷۲۸	۲۷	۴۴۰۴	۶۰۶۱	۳۴۸	۵۱۲	۷۰۶۳	۹۱	۱/۹۰	۵/۳۸	۴
۵۰۱۷	۳۳۰۰	۲۳	۵۸۵۳	۷۶۰۰	۶۹۰	۱۰۰	۷۵۱۱	۱۸۹	۱/۵۲	۴/۳۰	۵
۷۱۱۵	۵۶۱۶	۲۰	۷۳۳۴	۹۱۴۱	۱۲۰۶	۱۷۲	۷۸۴۲	۳۴۱	۱/۲۷	۳/۵۸	۶
۹۵۷۸	۸۸۲۰	۱۷	۸۸۳۳	۱۰۶۸۵	۱۹۳۲	۲۷۴	۸۰۹۶	۵۵۹	۱/۰۹	۳/۰۷	۷
۱۲۴۰۵	۱۳۰۵ ۶	۱۵	۱۰۳۴۴	۱۲۲۳۰	۲۹۰۴	۴۰۹ ۶	۸۲۹۵	۸۵۵	۰/۹۵	۲/۶۹	۸

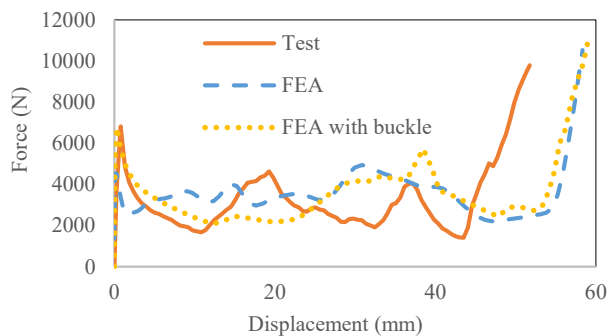
به تبع آن اندازه متوسط سلولی، شبیه سازی‌های مختلفی با تعداد سلول‌های متفاوت مانند ۴ و ۵ سلول انجام و نهایتاً پس از مشاهده نتایج، تفاوت معناداری مشخص نشد. البته در شبیه‌سازی با ۴ سلول به دلیل اندک بودن تعداد سلول‌ها و افزایش اثرات محلی و کماتش موضعی در پیرامون نمونه‌ها، نویز در خروجی‌ها افزایش چشمگیری یافت. در نتیجه ۵ سلول در هر جهت برای مدل‌سازی انتخاب شد. با انتخاب ۵ سلول کامل در هر جهت اندازه متوسط سلول و طول لبه به ترتیب ۴/۳ و ۱/۵۲ محاسبه می‌شود. با توجه به هندسه سلولی ارتباط میان اندازه سلول و طول لبه عبارتست از  $l = C / (2\sqrt{2})$ . در جدول ۲ نتایج مطالعه هندسه ساختار سلولی با تعداد مختلفی از سلول‌ها در هر جهت آمده است. در این جدول اندازه سلولی، طول متوسط لبه، تعداد کل سلول‌ها، حجم کل ساختار  $V_{total}$  به صورت توپر جهت محاسبه چگالی نسبی فوم، تعداد سطوح شش ضلعی  $N_{hex}$  و چهار ضلعی  $N_{quad}$ ، کل مساحت سطح به روش تعداد محدود  $A_{total}^{finite}$ ، مساحت سطح از روابط ساختار نامتناهی سلولی  $A_{total}^{infinite}$ ، درصد خطای محاسبه مساحت سطح از روابط بینهایت  $Err_A$ ، تعداد لبه‌ها  $N_{edge}$  و نهایتاً طول کل لبه‌ها  $L_{edge}$  آمده است. واحد طول در این جدول میلی‌متر می‌باشد.

### ۳- صحنه‌گذاری و کالیبراسیون مدل عددی

به منظور صحنه‌گذاری نتایج شبیه‌سازی، تست‌های متعددی انجام شده است. این تست‌ها عبارتند از تست فشار محوری نمونه‌های فوم آلومینیومی، تست فشار محوری تیوب‌های آلومینیومی با مقطع مربع و نیز تست کشش محوری نمونه دمبلی تولید شده از تیوب‌ها [۱۷]. تست کشش در استخراج خواص مکانیکی ماده تیوب مورد استفاده قرار گرفته است. نمونه‌های فوم مورد استفاده در تست دارای چگالی‌های جرمی مختلف ۳۲۲ و ۴۳۵ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشند. برای صحنه‌گذاری تحلیل و کالیبراسیون مدل عددی، مطالعه پارامتریک انجام و پارامترهای مورفولوژیکی و مادی استخراج شده است. مقایسه نتایج تست فشار محوری نمونه فوم با چگالی ۳۲۲ در شکل ۶ آمده است. در این شکل محور افقی کرنش نامی و محور عمودی تنش نامی بر حسب مگاپاسکال است.

نمودار، تطابق مناسب میان تست و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. برای اطمینان از صحت و تکرارپذیری نتایج، آزمایشات سه مرتبه تکرار شده‌اند. پس از پردازش داده‌ها تنش هموار و کرنش چگالش

سه متغیر  $t_e$ ،  $t_f$  و  $\phi$  مستقل نبوده و با رابطه  $\phi = t_e^2 / (t_e^2 + Z_f t_f l / \bar{n})$  به یکدیگر مرتبطند. در این رابطه  $\bar{n}$  به ترتیب تعداد سطوح مشترک در هر لبه و تعداد متوسط لبه‌های سطوح در هر سلول است؛ در اکثر فوم‌ها  $Z_f = 3$  و در شرایط حاضر

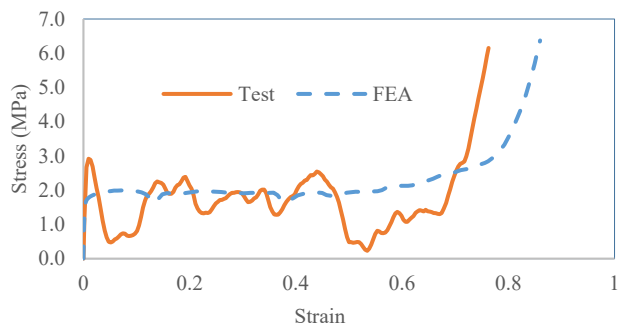


شکل ۸: مقایسه تست و شبیه‌سازی فشار محوری تیوب بلند  
**Fig. 8. Comparison between experiments and FEA results in uniaxial compression loading for long tube specimen**

مختلف نیز تطابق مناسبی را نشان می‌دهند. در شکل ۸ نتایج مربوط به تیوب بلند به ارتفاع  $3 \times 21/5$  میلی‌متر جهت جانمایی سه لایه فوم نشان داده شده است. در این نمودار محور عمودی و افقی به ترتیب نیرو بر حسب نیوتن و جابجایی بر حسب میلی‌متر است. با پردازش این داده‌ها، نیروی هموار، جابجایی چگالش و کرنش آن در تست به ترتیب  $2857$  نیوتن،  $46$  میلی‌متر و  $71$  درصد است. مقادیر نظیر در شبیه‌سازی به ترتیب  $3395$  نیوتن،  $55$  میلی‌متر و  $85$  درصد است. در تمامی متغیرها، خطای بیش تخمین شبیه‌سازی حداکثر  $20$  درصد است. نکته مهم آن‌که برای افزایش دقت شبیه‌سازی، تحلیل پس کمانش پس از ایجاد نقص هندسی برابر با  $10$  درصد مود کمانش خطی اول نیز انجام شده است. همان‌طور که از نمودار مشخص است، این تحلیل نیز تطابق مناسبی را نشان می‌دهد.

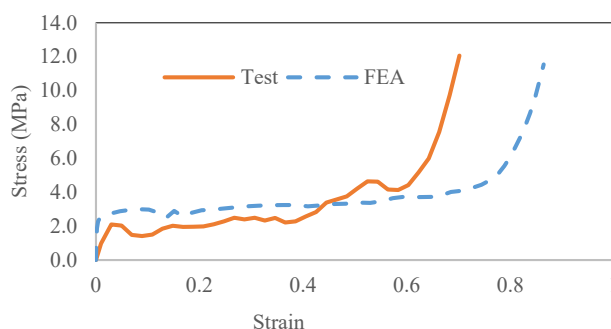
در شکل ۹ و شکل ۱۰ نیز به ترتیب مقایسه تغییرشکل نمونه‌های فوم آلومینیومی و تیوب در تست فشار محوری و شبیه‌سازی به روش اجزای محدود نشان داده شده است. تطابق بسیار مناسب مود تغییرشکل و مچالگی نمونه‌ها قابل مشاهده است.

پس از مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تست، به منظور بررسی استقلال نتایج حل عددی از مش‌بندی، مطالعه حساسیت انجام شده است. با توجه به اهمیت بالای چگالی جذب انرژی، این متغیر به عنوان معیار بررسی استقلال از مش‌بندی مورد توجه قرار گرفت. بدین ترتیب شبیه‌سازی‌ها با مدل‌های اجزای محدود مختلف با تراکم مش مختلف انجام و نتایج با یکدیگر مقایسه شد. تعیین تراکم مش و اندازه کلی المان‌ها در حالت بهینه در واقع مصالح‌های میان دقت و کارایی حل است [۱۰]. سه مدل اجزای محدود برای هر قطعه مکعبی از فوم‌ها



شکل ۶: مقایسه تست و شبیه‌سازی فشار محوری فوم با چگالی  $322$  کیلوگرم بر متر مکعب

**Fig. 6. Comparison between experiments and FEA results in uniaxial compression loading for  $322$  kg/m<sup>3</sup> foam specimen**



شکل ۷: مقایسه تست و شبیه‌سازی فشار محوری فوم با چگالی  $435$  کیلوگرم بر متر مکعب

**Fig. 7. Comparison between experiments and FEA results in uniaxial compression loading for  $435$  kg/m<sup>3</sup> foam specimen**

تست سوم به ترتیب حدود  $1/6$  مگاپاسکال و  $70$  درصد به دست آمده است. نتایج شبیه‌سازی نیز حاکی از تنش هموار و کرنش چگالش  $1/9$  و  $75$  درصد است. به ترتیب این دو پارامتر خروجی  $18$  و  $7$  درصد دارای خطای بیش تخمین است. در شکل ۷ نیز مقایسه نتایج تست و شبیه‌سازی نمونه با چگالی  $435$  آمده است. در این شکل محور افقی کرنش نامی و محور عمودی تنش نامی بر حسب مگاپاسکال است.

با مشاهده نتایج فوق نیز تنش هموار و کرنش چگالش تست  $2/6$  مگاپاسکال و  $63$  درصد و مقادیر این متغیرها در شبیه‌سازی  $3/1$  و  $71$  درصد به دست آمد. خطای تخمین تنش هموار و کرنش چگالش در این حالت نیز به ترتیب  $19$  و  $13$  درصد است. به عبارت دیگر شبیه‌سازی همواره حداکثر حدود  $20$  درصد بیش تخمین است. از طرف دیگر مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تست فشار تیوب‌ها با طول‌های

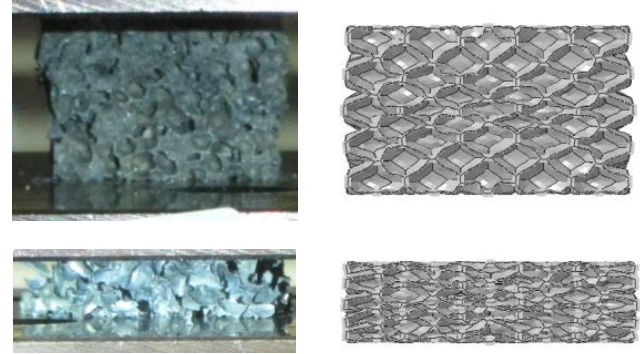


با ریزتر کردن المان‌ها، زمان حل بیشتر شده و دقت حل کمی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر مش‌بندی حالت ریز که در بالا اشاره شد- بهینه است. از طرف دیگر متوسط خطای مدل‌های اجزای محدود متوسط و درشت در حدود ۳۳ و ۵۷ درصد است.

#### ۴- تفسیر نتایج

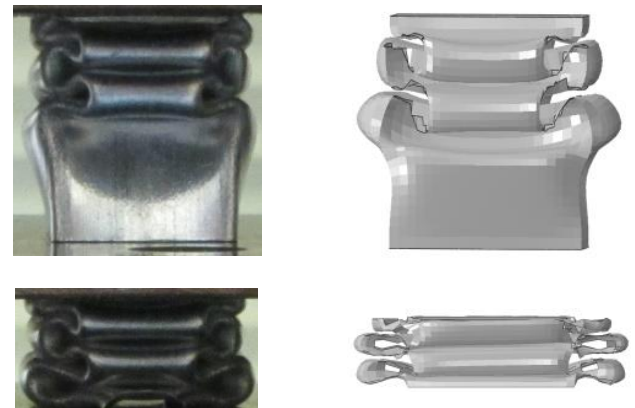
در این بخش مهم‌ترین نتایج استخراج شده از شبیه‌سازی تشریح خواهد شد. بحث عمده‌تاً معطوف به تفسیر نتایج تحلیل شامل تعیین رفتار تنش- کرنش و فازهای مختلف آن شامل الاستیک خطی، تنش یا تنش‌های هموار و چگالش، چگالی جذب انرژی و میزان جذب انرژی هر سازه، فیلترینگ نويز در خروجی‌ها و نیز تفسیر نمودارهای راندمان انرژی و تغییرات انرژی مخصوص است. در جدول ۳ تا جدول ۶ خلاصه‌ای از نتایج شبیه‌سازی آمده است. در این جداول  $\epsilon_d^{ult}$ ، کرنش نامی چگالش نهایی کل سازه به صورت درصد،  $u_{total}$ ، چگالی جذب انرژی در کل فرآیند جذب انرژی بر حسب مگاپاسکال،  $E_{total}$ ، میزان جذب انرژی توسط سازه تا چگالش نهایی بر حسب ژول،  $N_{extr}^{Eff}$ ، تعداد نقاط اکستره‌موم مهم نمودار راندمان جذب انرژی و به نوعی معرف تعداد فازهای مختلف جذب انرژی در سازه تابعی،  $\epsilon_d^{phases}$ ، تمامی کرنش‌های نامی چگالش در کل فرآیند جذب به ترتیب صعودی بر حسب درصد،  $u_{phases}$ ، چگالی جذب انرژی در فازهای مختلف به ترتیب نواحی چگالش بر حسب مگاپاسکال و نهایتاً  $\sigma_{pl}^{phases}$ ، تنش‌های هموار در فازهای مختلف جذب انرژی بر حسب مگاپاسکال است. در جدول ۳ نتایج مربوط به سازه تابعی متشکل از سه لایه فوم درون تیوب و در جدول ۴ نتایج مربوط به سازه تابعی سه لایه بدون تیوب است. در جدول ۵ نیز نتایج سازه‌های تک و دو لایه، در دو حالت درون تیوب و بدون آن آمده است. در ستون چیدمان در این جداول، لایه‌چینی فوم‌های آلپوراس آلومینیوم خالص با چگالی ۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و سیلیسیوم دار با چگالی ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب از پایین و مجاور فک ثابت به سمت بالا و فک متحرک ذکر شده است.

برای روشن‌تر شدن بحث، روند تفسیر نتایج از ساده‌ترین سازه یا فوم تک لایه غیر تابعی بدون تیوب آغاز می‌شود. به علاوه برای درک تأثیر تیوب، این سازه نیز به تنهایی در سه حالت کوتاه، متوسط و بلند به ترتیب نظیر فوم تک، دو و سه لایه تحلیل شده است. نتایج



شکل ۹: مقایسه تغییرشکل فوم آلومینیومی در تست و شبیه‌سازی فشار محوری

Fig. 9. Experiment and FEA comparison of deformation mode of bare foam specimen



شکل ۱۰: مقایسه تغییرشکل تیوب بلند در تست و شبیه‌سازی فشار محوری

Fig. 10. Experiment and FEA comparison of deformation mode of empty tube

به ترتیب به نام‌های ریز، متوسط و درشت با تعداد تقریبی ۳۷۰۰۰، ۲۹۰۰۰ و ۲۱۰۰۰ المان تولید شده‌اند. البته حدود ۳۰ درصد از این المان‌ها، تیر و مابقی پوسته می‌باشند. بدیهی است در نمونه‌های تابعی چند لایه، تعداد کل المان‌های ساختار متخلخل در تعداد لایه ضرب می‌شوند. نکته آن که با توجه به مود تغییرشکل کمانش و پس-کمانش پلاستیک تیوب، برای مدل‌سازی این سازه باید از المان‌های بسیار ریز استفاده نمود. سایز تقریبی المان‌های تیوب در حدود ۱ میلی‌متر انتخاب می‌شود. از طرف دیگر تغییر اندازه المان‌های صلب بر دقت نتایج بی‌تأثیر است ولی در صورت بزرگ بودن بیش از حد، احتمال بروز مشکل عدم ردگیری در سطوح تماسی افزایش می‌یابد [۱۸ و ۱۹]. نهایتاً با استفاده از مش ریز در مدل‌ها، خطای محاسبه چگالی جذب انرژی حداکثر ۲۰ درصد می‌شود. لازم به ذکر است که

جدول ۳: خلاصه نتایج شبیه‌سازی عددی سازه تابعی تیوب‌دار سه لایه  
**Table 3. Simulation results summary for 3 layered graded foam filled tube**

$\sigma_{pl}^{phases}$ (MPa)	$u_{phases}$ (MPa)	$\varepsilon_d^{phases}$ (%)	$N_{extr}^{Eff}$	$E_{total}$ (J)	$u_{total}$ (MPa)	$\varepsilon_d^{ult}$ (%)	چیدمان از پایین	نوع سازه
۱۱/۸	۸/۶۲	۷۳	۱	۲۵۷	۸/۶۲	۷۳	Al→Al→Al-T	تابعی سه لایه تیوب دار
۱۴/۳، ۱۱/۳ و ۱۸/۷	۲/۱۵، ۴/۹۷ و ۴/۳۱	۸۲ و ۵۹، ۴۴	۳	۳۴۱	۱۱/۴۳	۸۲	Al→Al→AS-T	
۱۷/۲ و ۱۵، ۱۰/۴	۳/۱ و ۲/۱، ۴/۷	۷۷ و ۵۹، ۴۵	۳	۲۹۵	۹/۹	۷۷	Al→AS→Al-T	
۱۴/۷	۱۰/۹	۷۴	۱	۳۲۵	۱۰/۹	۷۴	Al→AS→AS-T	
۱۷/۴ و ۱۱/۶	۶/۱ و ۵/۷	۸۴ و ۴۹	۲	۳۵۱	۱۱/۸	۸۴	AS→Al→Al-T	
۱۶/۸، ۱۲/۴ و ۱۷/۱	۲/۴ و ۴/۲، ۵/۱	۸۰ و ۶۶، ۴۱	۳	۳۴۹	۱۱/۷	۸۰	AS→Al→AS-T	
۱۵/۱	۱۲/۴	۸۲	۱	۳۷۰	۱۲/۴	۸۲	AS→AS→Al-T	
۱۸/۸، ۱۶/۷، ۱۴/۸ و ۲۱/۳	۳/۴ و ۴/۹، ۲، ۴/۳	۶۷، ۴۱، ۲۹ و ۸۳	۴	۴۳۵	۱۴/۶	۸۳	AS→AS→AS-T	

جدول ۴: خلاصه نتایج شبیه‌سازی عددی سازه تابعی بدون تیوب سه لایه  
**Table 4. Simulation results summary for 3 layered foam specimen**

$\sigma_{pl}^{phases}$ (MPa)	$u_{phases}$ (MPa)	$\varepsilon_d^{phases}$ (%)	$N_{extr}^{Eff}$	$E_{total}$ (J)	$u_{total}$ (MPa)	$\varepsilon_d^{ult}$ (%)	چیدمان از پایین	نوع سازه
۲/۸ و ۲/۲، ۲	۰/۳۶ و ۰/۲، ۱/۱	۷۷ و ۶۴، ۵۵	۳	۴۹	۱/۷	۷۷	Al→Al→Al	سازه تابعی سه لایه بدون تیوب
۵ و ۲/۱	۱/۵ و ۱	۷۸ و ۴۸	۲	۷۵	۲/۵	۷۸	Al→Al→AS	
۷/۱ و ۵/۴، ۲	۰/۵ و ۱/۴، ۱	۸۳ و ۷۶، ۵۰	۳	۸۶	۲/۹	۸۳	Al→AS→Al	
۵/۶ و ۲/۱	۲/۸ و ۰/۵	۷۴ و ۲۴	۲	۹۸	۳/۳	۷۴	Al→AS→AS	
۵ و ۲	۱/۵ و ۱	۷۸ و ۴۸	۲	۷۳	۲/۵	۷۸	AS→Al→Al	
۶/۷ و ۲	۳/۲ و ۰/۵	۷۳ و ۲۵	۲	۱۱۰	۳/۷	۷۳	AS→Al→AS	
۵/۵ و ۱/۸	۲/۸ و ۰/۴	۷۳ و ۲۲	۲	۹۵	۳/۲	۷۳	AS→AS→Al	
۷/۵ و ۵/۳	۱/۲ و ۳/۱	۷۵ و ۵۹	۲	۱۲۸	۴/۳	۷۵	AS→AS→AS	

نسبتاً پایین ساختار و امکان چگالش پس از چگالش‌های موضعی ساختار است. کرنش چگالش نهایی نظیر این ساختار برابر با ۷۳ درصد می‌باشد. با توجه نتایج، چگالی جذب و انرژی کل جذب شده در بازه ۶۴ تا ۷۳ درصد به ترتیب ۱/۳ تا ۱/۵ و ۱۲/۹ تا ۱۴/۹ است. مشخصه بارز تغییرات تنش-کرنش این سازه، هموار بودن و یکنواختی تا رسیدن به چگالش است. نتایج شبیه‌سازی نمونه ق نشان می‌دهد کرنش چگالش آن در حدود ۷۰ درصد و چگالی جذب و انرژی کل جذب شده توسط سازه در حدود ۴/۲ مگاپاسکال و ۴۱/۷ ژول است. تفاوت قابل مشاهده در تغییرات تنش-کرنش این دو نمونه به دلیل

این تحلیل نیز در جدول ۶ آمده است. در تفسیر نتایج فوم آلومینیوم خالص و آلیاژ ۳۵۶ و سیلیسیوم دار برای سادگی بیشتر، به ترتیب با ض و ق و وجود تیوب در ساختار نیز با حرف ت نامگذاری شده و لایه چینی سازه‌های تابعی نیز از پایین به بالا بیان شده است. مثلاً لایه چینی با نام ض/ق/ت- یعنی از پایین به بالا لایه‌هایی از فوم ضعیف، قوی و سپس قوی داخل تیوب جانمایی شده است. در حالت ض (یعنی یک لایه فوم ضعیف آلومینیوم با چگالی ۳۰۰ بدون تیوب) نمودار راندمان جذب در بخش انتهایی و در کرنش ۶۴ تا ۷۳ درصد به حالت نسبتاً هموار تبدیل می‌شود. این مسئله ناشی از استحکام

جدول ۵: خلاصه نتایج شبیه‌سازی عددی سازه تابعی دارای تیوب و بدون تیوب تک و دو لایه

Table 5. Simulation results summary for single and 2 layerd graded foam with and without tube

$\sigma_{pl}^{phases}$ (MPa)	$u_{phases}$ (MPa)	$\varepsilon_d^{phases}$ (%)	$N_{ext}^{Eff}$	$E_{total}$ (J)	$u_{total}$ (MPa)	$\varepsilon_d^{ult}$ (%)	چیدمان از پایین	نوع سازه
۱۲/۲	۸/۹	۷۳	۱	۱۷۷	۸/۹	۷۳	Al→Al-T	تابعی دو لایه تیوب پر شده
۲۰ و ۱۸/۱، ۱۲/۲	۲/۲ و ۲/۹، ۶/۱	۷۷ و ۶۶ و ۵۰	۳	۲۲۳	۱۱/۲	۷۷	Al→AS-T	
۲۰ و ۱۷/۸، ۱۳	۱ و ۳/۲، ۷/۳	۷۹ و ۷۴ و ۵۶	۳	۲۲۹	۱۱/۵	۷۹	AS→Al-T	
۲۰/۷ و ۱۶/۶	۳/۱ و ۹/۶	۷۳ و ۵۸	۲	۲۵۲	۱۲/۷	۷۳	AS→AS-T	
۲/۵ و ۲	۰/۳ و ۱/۲	۶۹ و ۵۹	۲	۲۹	۱/۵	۶۹	Al→Al	تابعی دو لایه بدون تیوب
۵/۸ و ۲	۲/۶ و ۰/۷	۸۰ و ۳۵	۲	۶۶	۳/۳	۸۰	Al→AS	
۵/۸ و ۲	۲/۵ و ۰/۷۵	۸۰ و ۳۷	۲	۶۵	۳/۲۵	۸۰	AS→Al	
۵/۹	۴/۱	۷۰	۱	۸۱	۴/۱	۷۰	AS→AS	
۱۷/۳ و ۹/۸	۳/۶ و ۵/۷	۷۹ و ۵۹	۲	۹۳	۹/۴	۷۹	Al-T	تک لایه با تیوب
۱۶/۸	۱۲/۳	۷۳	۱	۱۲۲	۱۲/۳	۷۳	AS-T	
حدود ۲	۱/۵ تا ۱/۳	۷۳ تا ۶۴	۱	۱۴/۹ تا ۱۲/۹	۱/۵ تا ۱/۳	۷۳ تا ۶۴	Al	تک لایه بدون تیوب
۶	۴/۲	۷۰	۱	۴۲	۴/۲	۷۰	AS	

سازه‌ها در جذب انرژی و نهایتاً امکان سفارشی سازی این سازه‌هاست. با مشاهده نتایج گزارش شده در جداول و انتخاب سازه مناسب می‌توان ادعای ساخت سفارشی با ویژگی‌های جذب انرژی مورد نیاز را داشت.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این بخش مهم‌ترین دست آوردهای پژوهش به اختصار ذکر می‌شود. در این پژوهش، سلول واحدی مبتنی بر سلول کلونین و دیگرام ورونویی همراه با اغتشاش و بی‌نظمی ارائه شد. امکان استفاده از این نوع مدل‌سازی با مقایسه نتایج تست اثبات شد. میزان خطای شبیه‌سازی اجزای محدود در مقایسه با نتایج تست حداکثر ۲۰ درصد و همواره در جهت بیش تخمین است. با اطمینان به نتایج شبیه‌سازی و مدل‌های عددی کالیبره شده می‌توان ادعای ساخت سفارشی در سازه‌های تابعی و تیوب‌های پر شده با فوم را داشت. نهایتاً می‌توان روابط همبستگی مناسبی برای تخمین رفتار سازه‌ها ارائه داد. این روابط به سادگی با استفاده از عملیات برازش مناسب قابل پیاده‌سازی است. به عنوان مثال می‌توان روابطی برای تنش هموار، کرنش چگالش و چگالی جذب انرژی بر حسب چگالی متوسط سازه ارائه داد. چگالی متوسط سازه نیز به دلیل برابری حجم تمام نمونه‌ها برابر با متوسط عددی چگالی لایه‌ها می‌باشد. به عنوان مثال رابطه خطی  $\sigma_{pl} + 4/1588 + 0.257 \bar{\rho}_{st}$  می‌تواند به خوبی معرف ارتباط میان تنش هموار متوسط سازه‌های دارای تیوب بر حسب چگالی متوسط سازه باشد. به علاوه تأثیر متغیرهای مختلف مانند ضریب

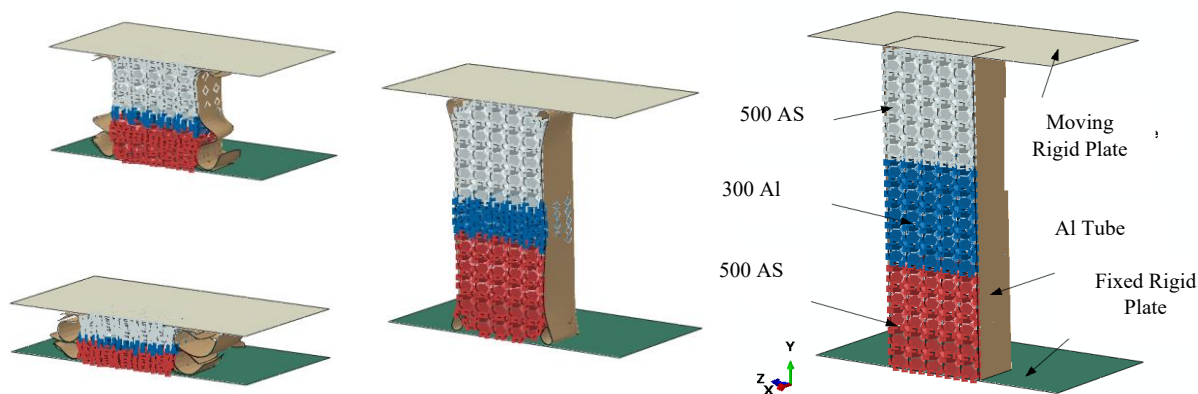
جدول ۶: خلاصه نتایج شبیه‌سازی عددی تیوب‌های کوتاه، متوسط و بلند

Table 6. Simulation results summary for tube specimens

$E_{total}$ (J)	$\varepsilon_d^{ult}$ (%)	ضخامت (mm)	ارتفاع (mm)	نوع سازه
۴۳	۷۴	۱	کوتاه - ۲۲	تیوب مربعی خالی
۹۱	۶۸		متوسط - ۴۴	
۱۳۲	۸۵		بلند - ۶۶	

تفاوت در استحکام آن‌ها و افزایش نسبی تنش با افزایش کرنش در ناحیه تنش هموار نمونه ق می‌باشد.

در حالت ض-ت دو قله در نمودار راندمان مشاهده می‌شود که ناشی از تعامل فوم و تیوب و قفل نسبی سازه حین چگالش است. قله اصلی و چگالش سازه، قله دوم و در کرنش ۷۹ درصد رخ می‌دهد. در کرنش حدود ۳۵ درصد نیز به دلیل کمانش و مچالگی اولیه تمام سطوح تیوب قله‌ای کوچک در نمودار راندمان جذب رخ می‌دهد. قله اصلی نزدیک به چگالش نهایی برای فوم قوی‌تر سیلیسیوم‌دار وجود ندارد. در نتیجه در نمونه ق-ت رفتار سازه بیشتر تابع فوم است و نه تیوب؛ از طرف دیگر قله کوچک در کرنش ۳۵ درصد در نمونه ق-ت نیز وجود دارد که ناشی از رفتار تیوب و تعامل آن با فوم درون آن است. با مشاهده نتایج نمونه‌های تابعی دو و سه لایه نیز نتایج بسیار جالبی در مطالعه رفتار مکانیکی و جذب انرژی آن‌ها به دست می‌آید. البته هدف اصلی از شبیه‌سازی‌های حاضر درک رفتار مکانیکی و به ویژه قابلیت این



شکل ۱۱: نماهای برش خورده مدل مونتاژی نمونه ق/ض/ق-ت و فریم‌هایی از شبیه‌سازی فشار محوری

Fig. 11. Crushing simulation of 3 layered graded foam filled tube

Physics of Solids, 72(1) (2014) 93-114.

- [4]. Y.X.L. J. y. YUAN Effects of cell wall property on compressive performance of aluminum foams, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 25(5) (2015) 1619-1625.
- [5]. L.T. C. Zhang, B. Yang, L. Zhang, X. Huang , D. Fang, Meso-mechanical study of collapse and fracture behaviors of closed-cell metallic foams, Computational Materials Science, 79(1) (2013) 45-51.
- [6]. S.R. J. Kadkhodapour Micro-macro investigation of deformation and failure in closed-cell aluminum foams, Computational Materials Science, 83(1) (2014) 137-148.
- [7]. P.X. L. Li, Y. Chen , H. Butt, Insight into cell size effects on quasi-static and dynamic compressive properties of 3D foams, Materials Science & Engineering A, 636(1) (2015) 60-69.
- [8]. J.Z. Z. Li, J. Fan, Z. Wang , L. Zhao, On crushing response of the three-dimensional closed-cell foam based on Voronoi model, Mechanics of Materials, 68(1) (2014) 85-94.
- [9]. Z.W. Y. Song, L. Zhao , J. Luo, Dynamic crushing behavior of 3D closed-cell foams based on Voronoi random model, Materials and Design, 31(1) (2010) 4281-4289.
- [10]. Y.T. Jamshidi, Comprehensive Guide to Mechanical Analysis with ABAQUS, 4 ed., Tehran: Afrang Pub., Orange Triangle Series, 2017 (In Persian).
- [11]. J.A. R. Nunes, M. Ammons, ASM Handbook,

اصطکاک، سرعت بارگذاری، نحوه بارگذاری، خواص مکانیکی، چگالی جرمی و نیز متغیرهای ریزساختار تصادفی مانند ضخامت‌ها، نسبت حجمی جامد در لبه‌ها و چگالی جرمی بررسی گردید. مجدداً یادآور می‌شود که با تولید نمونه‌های تابعی می‌توان به ساخت سفارشی با جذب انرژی مورد نظر دست یافت. مثلاً سازه‌های دو لایه ض و ق نسبت به دو لایه مشابه ض حدود ۳۰ درصد افزایش جذب انرژی دارد. مقصود از ساخت سفارشی، تولید سازه‌های تابعی سفارشی و نه تولید فوم با مشخصات مورفولوژیکی و میکرومکانیکی سفارشی است. به عبارت دیگر با استفاده از تغییر در چیدمان، چگالی نسبی لایه‌ها، استفاده یا عدم استفاده از تیوب، تغییر در ترکیب شیمیایی فوم و افزودن سیلیسیوم و نیز استفاده از فوم‌هایی با قطر متوسط حفره مختلف می‌توان به خواص جذب انرژی، تنش هموار و چگالش مورد نیاز دست یافت.

## مراجع

- [1]. H.V.T. O. E. Sotomayor, Role of cell regularity and relative density on elastoplastic compression response of 3-D open-cell foam core sandwich structure generated using Voronoi diagrams, Acta Materialia, 78 (2014) 301-313.
- [2]. V.K. J. Němeček, J. Vondřejc, A two-scale micromechanical model for aluminium foam based on results from nanoindentation, Computers and Structures, 128(1) (2013) 136-145.
- [3]. H.W. Z. Zheng, J. Yu, S. R. Reid, J. J. Harrigan, Dynamic stress-strain states for metal foams using a 3D cellular model, Journal of the Mechanics and

- [20]. Z.Z. Z. Li, J. Yu, J. Yang, F. Lu, Spherical indentation of closed-cell aluminum foams: An empirical force–depth relation, *Materials Science & Engineering A*, 618(1) (2014) 433-437.
- [21]. L.J.G. S. K. Maiti, a. M. F. Ashby, Deformation and Energy Absorption Diagrams for Cellular Solids, *Acta Metallurgica*, 32(11) (1984) 1963–1975.
- [22]. N.A.F. V. S. Deshpande Isotropic Constitutive Model for Metallic Foams, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48(6) (2000) 1253–1276.
- [23]. W.-Y.H. W.-Y. Jang, C.-C. Miao , Y.-C. Yen, Microstructure and mechanical properties of ALPORAS closed-cell aluminium foam, *Materials Characterization*, 107(1) (2015) 228-238.
- [24]. P.M. S. Nammi, G. Edwards, Finite element analysis of closed-cell aluminium foam under quasi-static loading, *Materials and Design*, 31(2) (2010) 712-722.
- [25]. Y.Z. S.-Y. He, G. Dai and J.-Q. Jiang, Preparation of density-graded aluminum foam, *Materials Science & Engineering A*, 618(1) (2014) 496-499.
- [26]. W.Z. Q. Qin, On dynamic response of corrugated sandwich beams with metal foam-filled folded plate core subjected to low-velocity impact, *Composites Part A*, 114(1) (2018) 107-116.
- [27]. Y.Z. Z. Liu, Z. Huang, Experimental and theoretical investigations on lateral crushing of aluminum foam-filled circular tubes, *Composite Structures*, (2017). properties and selection: non-ferrous alloys and special purpose materials, ASM International, 1992.
- [12]. I. Ghobadi, Tensile Test Report, Contract No. 8413, Razi Lab., Tehran, 2018 (In Persian).
- [13]. M.F.A. L. J. Gibson Cellular Solids, Structures and properties, 2 ed., Cambridge Publication, 1997.
- [14]. M.S. Y. Taraz Jamshidi Engineering Elasticity, Applications and Problems, Tehran: Amirkabir University Press, 2017 (In Persian).
- [15]. ABAQUS Documentation, Dassault Systemes Simulia Corp., 2017.
- [16]. A.E. M. Ashby, N. Fleck , L. J. Gibson, Metal Foams: A Design Guide, Butterworth-Heinemann publications, 2000.
- [17]. E.D. W. Yan, Y. Yamada , C. Wen, Crushing Simulation of Foam-Filled Aluminium Tubes, *Materials Transactions, The Japan Institute of Metals*, 48(7) (2007) 1901-1906.
- [18]. M.S.M.M.A.S. Talebi, The Effect of Impact Energy Parameters on the Closed-Cell Aluminum Foam Crushing Behavior Using X-Ray Tomography Method, *AUT Journal of Mechanical Engineering*, (2018) 105-114.
- [19]. M.S.M.M.A.S.M.H.M.S. Talebi, Micro–macro analysis of closed-cell aluminum foam with crushing behavior subjected to dynamic loadings, *Materials Today Communications*, (2017).

