Journal of Modeling in Engineering Volume Nomber (year) first page-last page

Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: https://modelling.semnan.ac.ir/

ISSN: 2783-2538



Research Article

Aluminum foam microstructural deformation measurement using digital image correlation and finite element method

Behnaz Akhavan[1], Ali Pourkamali Anaraki [2,*], Abbass Malian[3]

[1] Ph.D. Student, Industrial Eng., Islamic Azad University, Tehran North Branch, Tehran, Iran
[2] Associate Prof., Mech. Eng., Shahid Rajaee Teacher Training Univ., Tehran, Iran
[3] Assistant Prof., Civil. Eng., Shahid Rajaee Teacher Training Univ., Tehran, Iran

UNCORRECTED PROOF

PAPER INFO

Paper history:

Received:
Revised:
Accepted:

Keywords:
Digital Image Correlation;
Aluminum foam;
CT scan image reconstruction;
FEM.

ABSTRACT

Cellular solids especially metallic foams have unique characteristics especially in energy absorption applications and good strength to weight ratio. So the uniaxial crushing tests are essential for characterization purposes. The main problem in the mechanical behavior investigations is impossibility to use strain gages and other contact methods for displacement and strain measurement purpose because of their porosity on the faces. In the present research we manipulate the digital image correlation or simply DIC technique for deformation and strain field measurement in quasi-static uniaxial compression test. We use GOM inspect and NCORR software for DIC implementation. Using the image processing method, the displacement and strain field are obtained continuously. For verification purpose, we conduct comprehensive finite element simulation using ABAQUS 2019 commercial non-linear code. Due to the importance of micro-structural modeling in mechanical behavior prediction of cellular solids, we use geometric reconstruction technique based on computed tomography or CT scan images. Also geometric modifications are performed using digital optical microscope. Comparison of DIC results and FEA simulation outputs shows good accordance.

DOI:

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

*** Corresponding author.**
E-mail address: email of correponding author

How to cite this article:

مقاله پژوهشی

اندازه‌گیری میدان تغییرشکل ساختار متخلخل فوم آلومینیومی با استفاده از همبستگی تصاویر دیجیتال و روش اجزای محدود

بهناز اخوان[۱]، علی پورکمالی انارکی[۲،*] و عباس مالیان[۳]

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۲۴
بازنگری مقاله:
پذیرش مقاله:

واژگان کلیدی:
همبستگی تصاویر دیجیتال،
فوم آلومینیومی،
تصاویر سی تی اسکن،
تحلیل تجربی تنش،
روش اجزای محدود.

چکیده

با توجه به قابلیت‌های منحصر به فرد مواد متخلخل به ویژه فوم‌های فلزی به عنوان سازه‌های نوین با کاربرد جذب انرژی ضربه بالا، تست‌های فشار و مچالگی محوری از اهمیت خاصی برخوردار است. از جمله چالش‌های اساسی در مطالعه رفتار مکانیکی این سازه‌ها نیز عدم امکان استفاده از روش‌های متداول و تماسی تحلیل تجربی تنش مانند کرنش‌سنج‌ها است. در پژوهش حاضر با استفاده از تصویربرداری دیجیتال، در حین تست فشار محوری شبه استاتیکی نمونه‌های فوم آلومینیومی سلول بسته و به کمک پیاده‌سازی روش همبستگی تصاویر دیجیتال، اقدام به اندازه-گیری میدان جابجایی و کرنش در سطح نمونه متخلخل شده است. با این روش توزیع پیوسته‌ای از متغیرهای میدان تغییرشکل شامل جابجایی و کرنش بدست آمده است. به منظور صحه‌گذاری روش همبستگی، از شبیه‌سازی اجزای محدود در محیط نرم افزار آباکوس استفاده شده است. با توجه به تأثیر زیاد ریزساختار متخلخل مدل بر رفتار مکانیکی و جذب انرژی، مدلی سه بعدی از این ساختار سلولی ایجاد شده است. تولید مدل هندسی براساس بازسازی تصاویر توموگرافی رایانه‌ای و اصلاح جزییات هندسی به کمک پردازش تصاویر میکروسکوپ نوری انجام شده است. از جمله نوآوری های پژوهش حاضر می توان به پیاده سازی رویکرد ترکیبی اندازه گیری به روش همبستگی و شبیه سازی اجزای محدود و نیز بهینه یابی تنظیمات پردازش تصویر و تصویربرداری توموگرافی اشاره کرد. مقایسه نتایج روش همبستگی بر روی تصاویر تست بارگذاری استاتیکی و خروجی‌های شبیه‌سازی اجزای محدود تطابق مناسبی را نشان می‌دهد.

DOI:

© 2024 Published by Semnan University Press.
This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.(https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

UNCORRECTED PROOF

۱-مقدمه

روش‌های نوین تحلیل تجربی جابجایی و تغییرشکل اجسام تحت بارگذاری، انقلابی در این حوزه ایجاد کردند. به عنوان مثال استفاده از روزت‌ها تا مدت‌ها پیشتاز این حوزه بود. البته معایب اصلی این روش‌ها عبارتند از خطای ناشی از اتصال آن به نمونه، تعیین گسسته و موضعی جابجایی، هزینه بالا و عدم امکان استفاده از آن‌ها در سطوح ناصاف و متخلخل. روش‌های مبتنی بر پردازش تصویر و به ویژه همبستگی تصاویر دیجیتال از جمله بهترین روش‌های تحلیل تجربی تنش و کرنش هستند [۱]. اسکوزریت و همکاران در سال ۲۰۱۵ اقدام به مطالعه‌ای عددی و تجربی در زمینه رفتار الاستیک-پلاستیک-تخریب آلیاژهای آلومینیومی کردند. روند مطالعه تجربی شامل تست‌های کشش استاتیکی و دینامیکی و نیز خمش سه‌نقطه‌ای در

نرخ کرنش‌های مختلف می‌باشد. به علاوه در شبیه‌سازی عددی از رویکرد دوبعدی تنش مسطح و روش اجزای محدود استفاده شده است. برای تعیین دقیق میدان تغییرشکل و جابجایی، روش همبستگی تصویر دیجیتال و نیز برای آشکارسازی توزیع درجه حرارت، روش گرمانگاری مادون قرمز به کار رفته است. بدین ترتیب روش همبستگی تصویر دیجیتال به ابزاری کارآمد در کالیبره کردن شبیه‌سازی و استخراج ضرایب مادی در معادلات متشکله تبدیل شد [۱]. بگونیا و همکاران با استفاده از روش غیرتماسی همبستگی تصاویر دیجیتال، میدان کرنش و تغییرشکل استخوان ساعد موش تحت بارگذاری فشار محوری را محاسبه کردند. در این پژوهش با دقت مناسبی میدان پیوسته تغییرشکل و نیز نقاط بحرانی با احتمال بروز شکستگی استخراج شد. نکته حائز اهمیت، استفاده از این روش در مقیاس نمونه های کوچک و نیز مواد بایو و استخوان است [۲]. در سال ۲۰۱۵ باربه و همکاران از روش همبستگی تصویر دیجیتال برای مشخصه‌یابی و مشاهده میدان تغییرشکل بخشی تناوبی از ساختار لوله‌های کامپوزیتی بافت دوبعدی SiC/SiC استفاده کردند [۳]. با توجه به اطلاعات بسیار محدود و ناقص در زمینه تعیین میدان تغییرشکل میان فیبرهای مواد مرکب، در سال ۲۰۱۶ مهدی‌خانی و همکاران اقدام به اندازه‌گیری میدان کامل کرنش کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف در مقیاس میکرو با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال نمودند. این مطالعه بر روی کامپوزیت با الیاف شیشه تک‌جهته تحت خمش سه‌نقطه‌ای در دستگاه تصویربرداری به روش میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شده است [۴]. به دلیل کاربرد وسیع کامپوزیت‌های ماتریس سرامیکی در دماهای بسیار بالا، در سال ۲۰۱۶ ویتلو و همکاران مطالعه‌ای کاربردی و جامع بر روی نحوه پایش وضعیت این کامپوزیت‌های SiC/SiC و تخمین عمر درجا آن‌ها ترتیب دادند. استحکام نهایی این مواد تابعی از خواص فیبرهای سرامیکی آن است [۵]. گربیگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ با کوپل نمودن تکنیک همبستگی تصویر دیجیتال و روش اجزای محدود، پارامترهای مادی یک نمونه تحت بارگذاری کششی دارای توزیع غیر یکنواخت جابجایی را محاسبه کردند. این روش مبتنی بر کمینه‌سازی اختلاف میان مقدار جابجایی اندازه‌گیری شده با روش همبستگی تصاویر و محاسبه شده به روش اجزای محدود است [۶].

انگ کوئیست و همکاران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال اقدام به محاسبه میدان کامل کرنش و تغییرشکل نمونه‌های پلی کربنات شیشه‌ای کردند. میدان جابجایی ناشی از بارگذاری دومحوری نمونه‌هایی با هندسه ابداعی و جدید به منظور مطالعه اثرات محلی کرنش مورد تحلیل قرار گرفته است [۷]. در سال ۲۰۱۵ اپارا و همکاران به منظور مطالعه کاربرد و قابلیت‌های روش گرمانگاری مادون قرمز در تعیین تسلیم دینامیکی فلزات، اقدام به مقایسه این روش با روش دقیق همبستگی تصویر دیجیتال سه‌بعدی نمودند. استفاده همزمان از روش گرمانگاری و همبستگی سبب افزایش دقت محاسبه میدان تغییر شکل و نیز تخمین مناسب تر آسیب پلاستیک در نواحی پر تنش سازه ها شد [۸]. در سال ۲۰۱۶ ژیانگ و همکاران برای محاسبه ضریب شدت تنش در بلوک‌های سرامیکی و رزین کامپوزیتی با کاربرد ترمیم دندان از روش همبستگی تصویر دیجیتال استفاده کردند. محاسبه این ضرایب با توجه به کوچک بودن نمونه‌های مورد استفاده در دندانپزشکی عملاً با استفاده از روش‌های کلاسیک و نمونه‌های استاندارد میسر نمی‌باشد [۹]. نگوین و همکاران در سال ۲۰۱۶ برای محاسبه خواص مزوسکوپی و ماکروسکوپی و نیز مطالعه رفتار مکانیکی استخوان گاو، از روش‌های مختلف چندمقیاسی و نیز تکنیک همبستگی تصویر دیجیتال استفاده کردند. در این روش تصویربرداری در دو مقیاس و در حین تست انجام شده است. با متدولوژی مورد استفاده در این پژوهش، رفتار ماده در مقیاس‌های مختلف شناسایی شده است [۱۰]. کاربرد وسیع کامپوزیت‌ها در صنایع مختلف از یک طرف و پیچیدگی‌های ذاتی تحلیل خستگی و رشد ترک در آن‌ها با روش‌های کلاسیک از سوی دیگر، ایده و انگیزه اصلی مطالعه آپارنا و

UNCORRECTED PROOF

همکاران در سال ۲۰۱۵ بود. بدین ترتیب که برای مشاهده نحوه رشد ترک و تعیین میزان تمرکز تنش، از روش همبستگی تصویر دیجیتال در تست خستگی کامپوزیت‌های پلیمر تقویت‌شده با الیاف شیشه استفاده شده است. استفاده از روش همبستگی در تخمین رفتار مکانیک شکست و رشد ترک خستگی در این پلیمرها با دقت قابل قبول از جمله دستاوردهای مهم این پژوهش است [۱۱]. در سال ۲۰۱۶ لو و همکاران اقدام به مطالعه تغییرات ریخت‌شناسی و تغییرشکل باتری‌های تجاری یون لیتیوم در حین حین سیکل‌های شارژ و تخلیه به صورت درجا و با استفاده از روش همبستگی تصویر دیجیتال نمودند. نتیجه پژوهش رسیدن به دقت بالا در تعیین وضعیت شارژ باتری ها و به عبارت دیگر ارتقای روش پایش وضعیت درجای مجموعه های مختلف شده است [۱۲]. در سال ۲۰۱۵ حاج علی و همکاران مطالعه‌ای بر روی روش‌های نوین تست و استخراج خواص الاستیک هواژل انجام دادند. عدم امکان تست به روش‌های متداول، بدلیل ماهیت ترد ساختار این ماده نوین و وجود حفره‌ایی در مقیاس نانو، ایده اصلی پژوهش حاضر است [۱۳]. مائو و همکاران در سال ۲۰۱۶ اقدام به استفاده از روش همبستگی تصویر دیجیتال دردمای بالا برای مطالعه رفتار شکست درجای کامپوزیت ماتریس SiC تقویت شده با فیبرهای کربن نمودند [۱۴].

ینگ و همکاران در سال ۲۰۱۵ مطالعه‌ای تجربی بر روی مکانیزم آسیب و شکست سنگ گرانیت تحت کشش محوری انجام دادند. توزیع جابجایی روی سطح خارجی نمونه به کمک روش همبستگی تصویر دیجیتال اندازه‌گیری شده است. مشاهده شد که توزیع کرنش درست پیش از رسیدن تنش به مقدار حدی و آستانه شکست دچار پدیده محلی‌شدگی نسبتاً شدیدی شده است [۱۵]. تائو و همکاران در سال ۲۰۱۶ از روش همبستگی تصویر دیجیتال به منظور محاسبه میدان تغییرشکل در محل اتصال مواد مختلف به یکدیگر –که دارای گرادیان تنش بالاست- استفاده کردند. روش فوق به همراه تکنیک اجزای محدود، با دقت بالا قادر به اندازه‌گیری جابجایی در حدفاصل دو بخش مختلف مانند مواد مرکب خواهد بود [۱۶]. با توجه به بروز رفتار غیرایزوتروپ در مرز فریت/پرلیت در فولادها، ژنگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ از روش همبستگی تصویر دیجیتال برای تحلیل تغییرشکل‌های میکروسکوپی ریزساختار در اثر بار کشش محوری استفاده کردند [۱۷]. ونگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ اقدام به استفاده از روشی نوین مبتنی بر ترکیب همبستگی تصویر دیجیتال و گرمانگاری مادون قرمز برای مطالعه رفتار تغییرشکل پلاستیک نمونه‌های آلومینیومی در دو مقیاس مزو کردند. در پیاده‌سازی این روش کوپله و ترکیبی، با استفاده از روش‌های آماری و همبستگی، میزان خطا مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاکی از نقش مؤثر ریزساختار در تغییرشکل پلاستیک نمونه‌های آلومینیومی است [۱۸]. در سال ۲۰۱۷ میگِم و همکاران به بررسی اثر جابجایی‌های بزرگ خارج صفحه‌ای بر دقت نتایج روش همبستگی تصویر دیجیتال تک دوربینه و عدم فوکوس نمودن صحیح دوربین پرداختند [۱۹]. کروم و همکاران در سال ۲۰۱۷ اقدام به اندازه‌گیری میدان کرنش سه‌بعدی ریزساختار بافته‌شده کامپوزیت SiC/SiC به کمک میکرو سی تی اسکن اشعه ایکس درجا و نیز همبستگی تصویر دیجیتال حجمی نمودند. بدین ترتیب تنش محلی در بخش‌های مختلف رشته‌های بافته‌شده اندازه‌گیری و مکانیزم شکست و آسیب این سازه مورد تحلیل قرار گرفت [۲۰]. استفاده از روش همبستگی تصویر دیجیتال سه‌بعدی در صنایع مختلف به طور روزافزون در حال توسعه است. لی و همکاران در سال ۲۰۱۷ با طراحی یک سیستم همبستگی تصویر دیجیتال سه‌بعدی متشکل از چهار دوربین با دو دوربین در بخش جلویی و دو دوربین دیگر در قسمت عقبی نمونه، اقدام به محاسبه میدان کامل کرنش نمودند [۲۱].

راتنام و همکاران در سال ۲۰۱۷ با استفاده از روش همبستگی تصویر دیجیتال تک مرحله مبتنی بر استفاده از دستگاه اسکنر، میدان جابجایی و کرنش را در یک نمونه لاستیک اندازه‌گیری کردند [۲۲]. روش همبستگی تصویر دیجیتال یک تکنیک قدرتمند برای مقایسه دو بخش از دو

UNCORRECTED PROOF

تصویر و یافتن همبستگی و تغییرات میان آن‌هاست. در صورت یکسان بودن دو بخش قله خودهمبستگی و در غیر این صورت قله همبستگی عرضی ایجاد می‌شود. محل بروز قله همبستگی‌ها معرف میزان تغییرشکل نسبی دو بخش تصویر است. مودسر و همکاران در سال ۲۰۱۵ اقدام به مطالعه روش‌های مختلف اندازه‌گیری تغییرشکل تحت عنوان عکاسی الکترونیکی نقاط الگو نمودند. روشی نیز تحت عنوان همبستگی تصاویر دیجیتال ارتقا یافته برای محاسبه تغییرشکل ارائه و با استفاده از شبیه‌سازی و نتایج تست‌های تجربی، بهبود روش همبستگی مورد استفاده اثبات شد [۲۳] و[۲۴].

در پژوهش حاضر با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال، تصاویر ثبت شده از روند تست بارگذاری فشار محوری نمونه‌های فوم آلومینیومی سلول بسته مورد تحلیل دقیق قرار گرفته‌اند. با این روش، میدان جابجایی و کرنش در تمامی نواحی سطح خارجی نمونه تست، اندازه‌گیری شده است. به کمک این اطلاعات می‌توان به سادگی میدان تنش، مقدار جذب انرژی و نیز مودهای مختلف خرابی در سلول‌های جسم متخلخل را مطالعه کرد. روند پژوهش حاضر عبارت است از تولید نمونه‌های فوم فلزی متخلخل و آماده‌سازی آن برای تست فشار محوری، پیاده‌سازی سیستم تصویربرداری و نورپردازی، اتصال دوربین به رایانه برای کنترل تصویربرداری، پردازش تصاویر به روش همبستگی پس از تعیین تنظیمات بهینه جهت ارتقای دقت نتایج و نهایتاً صحه‌گذاری نتایج روش همبستگی با استفاده از شبیه‌سازی تست فشار محوری به روش اجزای محدود. به منظور ایجاد مدل دقیق ریزساختار فوم فلزی از ترکیب تصویربرداری سی تی اسکن و میکروسکوپ نوری دیجیتال استفاده شده است. به علاوه در خصوص تصویربرداری سی تی اسکن از فوم های فلزی مطالعه تجربی وسیعی به منظور بهینه یابی تنظیمات تصویربرداری اشعه ایکس شامل ولتاژ، آمپراژ، ضخامت برش و غیره در جهت کاهش نویز تصاویر انجام شده است. از جمله نوآوری های پژوهش حاضر می توان به موارد زیر اشاره کرد.

الف. پیاده سازی روش همبستگی تصاویر دیجیتال برای تعیین میدان تغییر شکل سطوح متخلخل فوم فلزی سلول بسته تحت فشار محوری.

ب. بهینه سازی تنظیمات روش همبستگی مانند شعاع همسایگی کرنش، فواصل زیرمجموعه و شعاع زیرمجموعه برای بالابردن دقت نتایج اندازه گیری بر اساس نتایج عددی اجزای محدود.

ج. استفاده از ترکیب تصاویر سی تی اسکن و میکروسکوپ نوری برای مدلسازی سه بعدی ریز ساختار فوم های فلزی به منظور افزایش دقت نتایج تحلیل عددی و بهینه یابی پروتکل تصویربرداری کلینیکال برای استخراج تصاویر اشعه ایکس از نمونه متخلخل فلزی.

د. اندازه گیری میدان تغییرشکل و کرنش در مقادیر بارگذاری کوچک و کالیبراسیون روش اندازه گیری برای استفاده در سطوح متخلخل.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱- تولید فوم آلپوراس سلول بسته

مواد مورد مطالعه جهت مدلسازی ریزساختار هندسی و سپس تخمین میدان تغییرشکل آن تحت بار فشار محوری، فوم آلومینیومی سلول بسته است. این فوم‌ها -که آلپوراس نامیده می‌شوند- به روش حالت مایع و به کمک عامل حبابزای هیدرید تیتانیوم تولید شده است. کلیات روش عبارتست از ذوب، افزایش لزجت، افزودن عامل حبابزا، هم-زدن شدید، فوم‌سازی در دمای ثابت و نهایتاً خنک کاری و پایدار سازی حباب‌ها. در این روش ابتدا آلومینیوم خالص ذوب و دمای آن به حدود ۶۸۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. افزودن هیدرید تیتانیوم به مذاب به سرعت باعث تجزیه شدن آن به H_2 و Ti و تشکیل حباب درون مذاب می‌شود. برای کاهش سرعت خروج گاز از مذاب باید لزجت افزایش یابد. بدین منظور حدود ۱.۵ درصد کلسیم به مذاب افزوده می‌شود. پس از بهبود لزجت، حدود ۲ درصد هیدرید تیتانیوم افزوده و پس از هم‌زدن و یکنواخت شدن مذاب، فرآیند فوم‌سازی و در پی آن خنک کاری انجام می‌شود

UNCORRECTED PROOF

[۳۳]. فوم‌های تولید شده به این روش در بلوک‌هایی با ابعاد ۱۰۰ در ۵۰ در ۱۰ سانتی‌متر تولید و پس از برش بخش‌های چگال و غیرمتخلخل، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در سالیان اخیر، روش همبستگی تصاویر دیجیتال به یکی از روش های دقیق و کارآمد در تحلیل تجربی تنش تبدیل شده است. به علاوه این روش اخیراً به عنوان روشی مناسب در پایش وضعیت و سلامت استفاده می شود. البته پیاده سازی روش همبستگی در تحلیل تغییر شکل و تنش معمولاً بر روی سطوح صاف انجام می شود. زیرا در صورت وجود ناهمواری در سطوح به دلیل بروز تغییرات در نورپردازی، ایجاد سایه ها و نیز مشکل عدم فوکوس صحیح استفاده از روش همبستگی و پردازش تصاویر با مشکلاتی همراه است.

۲-۲- تست فشار محوری شبه‌استاتیکی

جهت بررسی میدان تغییرشکل این فوم‌ها، از فشار محوری استاتیکی استفاده می‌شود. برش نمونه‌های فوم در پژوهش حاضر با سه روش واترجت، وایرکات و اره نواری انجام شده است. البته پس از برشکاری‌های مختلف، روش اره‌نواری به عنوان مناسب‌ترین روش انتخاب شد. اره نواری مورد استفاده مدل T-Rex260 با سرعت برش کم و حدود ۱ میلی‌متر بر ثانیه (۲ از ۱۰) و سرعت خطی نوار اره برابر با ۱۰۰ متر بر دقیقه (۲ از ۲) در حالت اتوماتیک انجام شده است. از جمله معایب اصلی روش واتر جت می‌توان به عدم دقت و زاویه‌دار شدن سطوح در برش نمونه‌ها با ضخامت بیش از ۲۰ میلی‌متر به دلیل واگرایی جت آب در برخورد با سلول‌های فوم در حین برش اشاره کرد. مهم‌ترین معایب استفاده از وایرکات در برش نیز قیمت بسیار بالا، سرعت پایین برش و محدودیت ابعادی در مهار و برش نمونه‌ها است. با توجه به دقت ابعادی نسبتاً پایین در برش با اره نواری، ابعاد نمونه‌ها پس از برش با سایز بزرگتر، به کمک ماشین‌کاری دقیق خواهند شد. حاصل کار ساخت ۱۶ نمونه از فوم آلومینیوم خالص با چگالی پایین‌تر و در نتیجه استحکام کمتر و ۲۲ نمونه از فوم آلومینیوم سیلیسیوم A356 با چگالی نسبتاً بالاتر و در نتیجه استحکام بالاتر است. در شکل ۱ نمونه‌های مکعبی تولید شده از جنس فوم آلومینیوم و دستگاه بارگذاری نمونه‌ها نشان داده شده است. ابعاد نمونه‌های تولیدی با توجه به تخلخل ماده و نیاز به وجود ۵ تا ۷ سلول سالم در هر سمت، در حدود ۲۲ تا ۴۰ میلی‌متر و براساس اندازه متوسط سلول‌ها و چگالی فوم انتخاب شده است [۲۵]. به علاوه به دلیل ماهیت ساختار متخلخل فوم آلومینیومی حاضر، برای اجرای تست فشار محوری از استاندارد ASTM D1621 استفاده شده است. به منظور اجرای آزمایش فشار محوری نمونه‌های فوم حاضر از دستگاه Zwick100 با نرخ بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. سرعت پایین بارگذاری، برای رسیدن به نتایج شبه استاتیکی و نیز جلوگیری از ایجاد اعوجاج و عدم فوکوس مناسب در فرآیند تصویربرداری انتخاب شده است.

۲-۳- روش همبستگی تصاویر دیجیتال

مبانی نظری و معادلات حاکم

هدف اصلی در استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال، تعیین دقیق میدان جابجایی و در پی آن کرنش در اجسام انعطاف پذیر حین بارگذاری است. بدین ترتیب ابتدا از بخشی از نمونه، به طور پیاپی و در حین اعمال بار، تصویربرداری دیجیتال انجام می‌شود. در ادامه این تصاویر به بخش‌های کوچک با نام زیرمجموعه تقسیم بندی شده و با مقایسه این نواحی در تصویر اولیه و جاری، میزان تغییرشکل آن بخش مورد تحلیل قرار می‌گیرند. این روش محاسبه تغییرشکل، رویکرد لاگرانژی نامیده می‌شود. در هر زیرمجموعه نیز تعدادی نقطه مختصاتی در پیکربندی مرجع در نظر گرفته شده است. به کمک این نقاط، تغییرشکل و جابجایی در پیکربندی جاری محاسبه خواهد شد. ارتباط میان زیرمجموعه جاری و مرجع به صورت یک نگاشت خطی در نظر گرفته شده است. در صورت تغییر شکل کوچک این فرض صادق است. در این حالت برای محاسبه جابجایی هر پیکسل در جهات x و y داریم:

$$u_s = u + \frac{\partial u}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial u}{\partial y}\Delta y \qquad (۱)$$

UNCORRECTED PROOF

$$v_s = v + \frac{\partial v}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial v}{\partial y}\Delta y \qquad (۲)$$

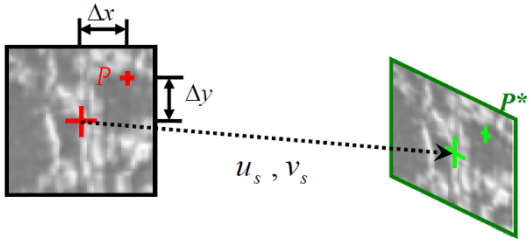
در این روابط بردار جابجایی $\vec{P}$ شامل مؤلفه‌های مجهول جابجایی و مشتقات جزیی آن است. یعنی

$$\vec{P} = \left\{u, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, v, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}\right\}^T \qquad (۳)$$

به علاوه Δx و Δy فواصل پیکسل‌های موردنظر از پیکسل مرکزی است. دو تابع f و g نیز به صورت مقادیر شدت درجه خاکستری پیکسل‌ها به ترتیب در پیکربندی مرجع و جاری تعریف می‌شود. مطابق شکل ۲، مختصات نقاط در پیکربندی جاری با بالانویس * مشخص شده است [۲۶].



شکل ۱. دستگاه سی تی اسکن و زوئیک مورد استفاده (بالا) و نمونه‌های مکعبی فوم آلومینیوم تولید شده (پایین)



شکل ۲. تغییرشکل یک زیرمجموعه نمونه در دو پیکربندی مرجع و جاری [۲۶]

هدف اصلی، تعیین مؤلفه‌های بردار جابجایی با شرط حداکثر تطابق میان دو زیرمجموعه است. بدین منظور روش‌های مختلفی وجود دارد. دو مورد از دقیق‌ترین روش‌ها عبارتند از ضریب همبستگی عرضی CC و ضریب کمترین مربعات LS. در این پژوهش از روش کمترین مربعات استفاده شده است. در این حالت داریم [۲۶]

$$LS = \frac{\sum_{i,j=-(n-1)/2}^{+(n-1)/2}\{f(x,y) - g(x^*,y^*)\}^2}{\sum_{i,j=-(n-1)/2}^{+(n-1)/2} f(x,y)^2} \qquad (۴)$$

در این رابطه n اندازه زیرمجموعه مربعی با تعداد $n \times n$ پیکسل و i و j شمارنده تمامی پیکسل‌ها است. با توجه به تعریف توابع شدت خاکستری در دو پیکربندی مرجع و جاری، f تنها تابعی از مختصات نقطه مرکزی زیرمجموعه مرجع (x_c, y_c) و شمارنده پیکسل‌ها و تابع g علاوه بر این موارد، تابعی از بردار جابجایی (u_s, v_s) و در نتیجه تابعی از مؤلفه‌های مجهول بردار $\vec{P}$ است. یعنی [۲۶]

$$f = f(x_c + i, y_c + j) \qquad (۵)$$

$$g = g(x_c + i + u_s, y_c + j + v_s) \qquad (۶)$$

برای یافتن بهترین تطابق زیرمجموعه جاری و مرجع کافی است، بردار $\vec{P}$ به نحوی محاسبه شود که مقدار LS کمینه شود. بدین منظور از رویکرد نیوتن-رافسون برای تابع چند متغیره LS استفاده می‌شود. یعنی [۲۶]

$$x_{n+1} = x_n - \frac{F(x_n)}{F'(x_n)} \qquad (۷)$$

در این روش $F = \nabla LS$ با شرط صفر بودن در محل کمینه‌های موضعی تابع است. یعنی

UNCORRECTED PROOF

$$\nabla LS = \frac{\partial LS}{\partial P_k} = \frac{2}{\sum_{i,j=-M}^{+M} f(x,y)^2} \cdot \sum_{i,j=-M}^{+M} \{f(x,y) - g(x^*,y^*)\} \frac{\partial g}{\partial P_k} \quad (۸)$$

علت وجود جمله $\partial g/\partial P_k, (k = 0, \dots, 5)$ در رابطه فوق، تابعیت g نسبت به مؤلفه‌های بردار جابجایی است. به علاوه $F'(x_n)$ معرف مشتق دوم LS و به عبارتی هشین آن است. هشین، یک ماتریس شامل مشتقات جزیی مرتبه دوم تابع و در واقع بیان‌گر میزان انحنای موضعی تابع به ازای متغیرهای آن است. یعنی

$$H = \nabla\nabla LS = \frac{\partial^2 LS}{\partial P_k \partial P_l} = \frac{2}{\sum_{i,j=-M}^{+M} f(x,y)^2} \cdot \sum_{i,j=-M}^{+M} \left\{ \frac{\partial g}{\partial P_k} \cdot \frac{\partial g}{\partial P_l} + (f-g) \frac{\partial^2 g}{\partial P_k \partial P_l} \right\} \quad (۹)$$

که در آن $M = (n-1)/2$. با توجه به نزدیکی f و g می‌توان از مشتق مرتبه دوم $\partial^2 g/\partial P_k \partial P_l$ در مقابل مشتقات مرتبه اول صرفنظر کرد. بدین ترتیب داریم:

$$H = \nabla\nabla LS = \frac{\partial^2 LS}{\partial P_k \partial P_l} = \frac{2}{\sum_{i,j=-M}^{+M} f(x,y)^2} \cdot \sum_{i,j=-M}^{+M} \left\{ \frac{\partial g}{\partial P_k} \cdot \frac{\partial g}{\partial P_l} \right\} \quad (۱۰)$$

با توجه به حدس اولیه $\vec{P}_0$ و مقدار جابجایی در حدود یک پیکسل، فرم کلی معادله نیوتن-رافسون به صورت زیر خواهد بود [۲۶].

$$\vec{P}_{n+1} - \vec{P}_n = -H(\vec{P}_n)^{-1} \cdot \nabla LS(\vec{P}_n) \quad (۱۱)$$

با استفاده از فرآیند سعی و خطا، بردار $\vec{P}$ با بالاترین تطابق در محدوده تلرانس همگرایی موردنظر بدست می‌آید. پارامترهای u و v نیز به عنوان بردار جابجایی پیکسل مرکزی زیرمجموعه ذخیره می‌شود. مقدار نهایی LS نیز به عنوان شاخصی از میزان همبستگی در نظر گرفته می‌شود. به علاوه کیفیت تطابق نیز با شاخص $100(1-LS)$ سنجیده می‌شود. به عبارتی دیگر $LS = 0$ معرف بالاترین تطابق با کیفیت صد درصدی است.

برای محاسبه مؤلفه‌های مجهول بردار $\vec{P}$ از روش گوس-نیوتن ترکیبی معکوس استفاده می‌شود. به علاوه برای افزایش دقت می‌توان از توابع شکل مرتبه دوم به جای تقریب خطی حاضر استفاده کرد [۲۷]. پارامترهای مشتق جزیی مانند $\partial u/\partial x$ و غیره در محاسبه کرنش کاربرد دارد و از دقت کمتری برخوردار است. برای کاهش خطا باید از روش‌های فیلترینگ تصاویر و کاهش نویز ذاتی آن‌ها استفاده کرد [۲۸]. البته استفاده از فرمت‌های غیرفشرده تصاویر مانند tif نسبت به jpg در افزایش دقت مؤثر است. نهایتاً برای محاسبه میدان کرنش به کمک میدان جابجایی می‌توان به صورت زیر عمل کرد. در حالت کلی معادلات سینماتیک، به صورت زیر معرف ارتباط میان جابجایی و کرنش است [۲۹].

$$E_{xx} = \frac{1}{2}\left\{2\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}\right\} \quad (۱۲)$$

$$E_{yy} = \frac{1}{2}\left\{2\frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right\} \quad (۱۳)$$

$$E_{xy} = \frac{1}{2}\left\{\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial x} \cdot \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \cdot \frac{\partial v}{\partial y}\right\} \quad (۱۴)$$

که در آن $E_{\alpha\beta}$ مؤلفه‌های کرنش گرین-لاگرانژی است. از طرف دیگر در صورت کوچک بودن تغییرشکل‌ها می‌توان از جملات غیرخطی و مشتقات مراتب بالاتر از یک صرفنظر کرد. یعنی

$$E_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (۱۵)$$

$$E_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (۱۶)$$

$$E_{xy} = \frac{1}{2}\left\{\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right\} \quad (۱۷)$$

تانسور کرنش گرین-لاگرانژی E در شکل تانسوری با استفاده از تانسور گرادیان تغییرشکل F تعریف می‌شود. یعنی $F = \partial x/\partial X$. بدین ترتیب داریم [۲۹].

UNCORRECTED PROOF

$$E = \frac{1}{2}(F^T F - 1) \quad (۱۸)$$

پس از محاسبه مؤلفه‌های کرنش لاگرانژی ε_{lag} ، برای نمایش توزیع کرنش به صورت کانتوری، از مفهوم کرنش حقیقی ε_{true} استفاده شده است. بدین ترتیب که با استفاده از کرنش لاگرانژی، کرنش مهندسی ε_{eng} بدست می‌آید و سپس به کمک آن کرنش واقعی محاسبه می‌شود. یعنی [۲۹].

$$\varepsilon_{eng} = -1 + \sqrt{2\varepsilon_{lag} + 1} \quad (۱۹)$$

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{eng}) \quad (۲۰)$$

۲-۴- مدلسازی با استفاده از تصاویر دیجیتال و سی تی اسکن

تصویربرداری سی تی اسکن و بازسازی هندسی

استفاده از توموگرافی رایانه‌ای از جمله روش‌های نوین در مدلسازی ریزساختار است. بدین ترتیب پس از آماده‌سازی نمونه‌ها تصویربرداری سی تی اسکن انجام می‌شود. دستگاه سی تی اسکن مورد استفاده در پژوهش حاضر، از نوع $GE\ 16\ slices$ با تنظیمات گام برش ۰.۱ و ۰.۲ میلی‌متر، میدان دید اسکن کوچک برابر ۱۵۴، ولتاژ ۱۲۰ kV کیلوولت، شدت جریان ۱۰۰ mA میلی آمپر و نوع اسکن هلیکال فول ۱ ثانیه است.

این تنظیمات پس از تکرار تصویربرداری و ارزیابی کیفی مدل خروجی بهینه‌سازی شده است. متغیرهای تأثیرگذار در این حالت شامل kV ، mA ، گام برش و میدان دید اسکن است. سطوح تغییر این متغیرها برای ولتاژ ۱۰۰، ۱۲۰ و ۱۴۰ انتخاب شده است. مشاهده شد که کاهش ولتاژ باعث افزایش نویز و آرتیفکت در تصاویر می‌شود. البته در این حالت کمی کنتراست تصاویر ارتقا می‌یابد.

با افزایش ولتاژ به مقدار ۱۴۰، تغییر قابل ملاحظه‌ای در جهت کاهش نویز ایجاد نمی‌شود. در نتیجه مقدار ولتاژ برابر با ۱۲۰ kV انتخاب می‌شود. مقدار mA قابل استفاده در بازه ۸۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ kV مذکور برای دستگاه GE مورد استفاده نیز است. اثر افزایش شدت جریان نیز مانند ولتاژ در جهت کاهش نویز تصاویر است. مقدار بهینه شدت جریان نیز برابر ۱۰۰ تعیین شد. تابع هدف در بهینه‌سازی و یافتن مقادیر متغیرهای ورودی بهینه، به صورت بیشینه کردن نسبت سیگنال به نویز SNR و کنتراست به نویز CNR تصاویر انتخاب شده است.

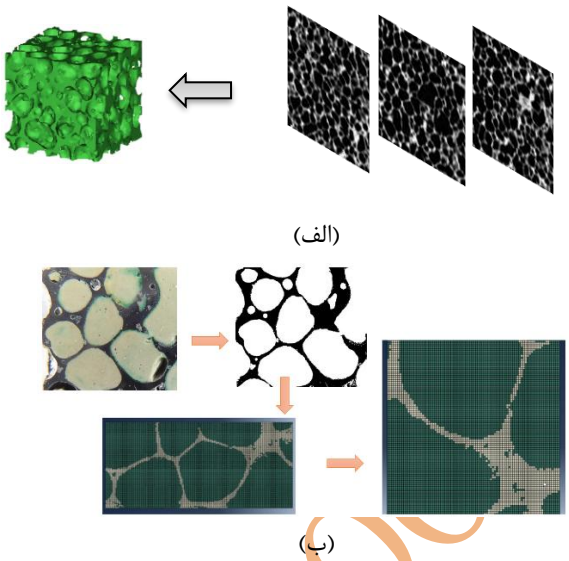
میدان دید اسکن نیز با توجه به بزرگترین ابعاد نمونه‌ها انتخاب شده است. افزایش این متغیر برخلاف دو متغیر ولتاژ و جریان به افزایش آرتیفکت تصویر منجر می‌شود. با توجه به تنظیمات فوق، ابعاد نمونه و گام برش اسکن، تعداد تصاویر در هر جهت بیش از ۳۴۰ عدد شد.

با توجه به نویز شدید در تصویربرداری اشعه ایکس از فلزات به ویژه فلزات متخلخل، این فرآیند بهینه یابی تنظیمات و پروتکل ها از جمله جنبه های نوآورانه پژوهش حاضر محسوب می شود. نهایتاً برای تبدیل تصاویر به مدل سه-بعدی از نرم افزار $Mimics\ Research\ 21$ استفاده شده است. در شکل ۳ روند تولید مدل هندسی براساس بازسازی تصاویر سی تی اسکن نشان داده شده است [۳۰].

تولید مدل اجزای محدود براساس مش واکسلی و هرمی

پس از تولید مدل هندسی متخلخل با استفاده از بازسازی تصاویر سی تی اسکن، مهم‌ترین گام برای تضمین شبیه-سازی دقیق رفتار مکانیکی سازه، ایجاد مدل اجزای محدود دقیق از ریزساختار است. مدلسازی اجزای محدود یا مش-بندی در واقع تولید یک مدل متشکل از تعداد زیادی بخش با هندسه ساده و معادلات حاکم از پیش تعیین شده است. در این مدل، به هر بخش یک المان گفته می‌شود. المان‌ها نیز در محل رئوس به یکدیگر متصل بوده و به این رئوس گره گفته می‌شود.

UNCORRECTED PROOF



(الف)

(ب)

شکل ۳. روند تولید مدل هندسی به روش بازسازی تصاویر سی تی اسکن (الف) و مدلسازی دو بعدی با استفاده از کد توسعه داده شده IMO (ب).

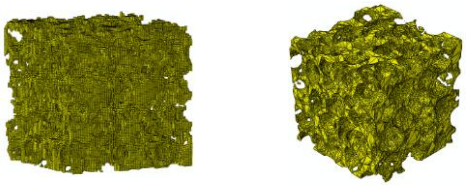
گام اول در مدلسازی حاضر استفاده از تصاویر دیجیتال دوبعدی، پردازش آنها و تبدیل این تصاویر به مدلهای هندسی و مش بندی مورد نیاز شبیه سازی است. بدین ترتیب ابتدا تصاویر با رزولوشن مناسب و تراکم پیکسل بالا از بخش های مختلف سطوح فوم های مورد مطالعه ایجاد می شود. در مرحله بعد این تصاویر پردازش شده و تا حد امکان کیفیت آنها ارتقا می یابد. بدین منظور ابتدا فیلترینگ با فیلتر median انجام و سپس عملیات ارتقای کنتراست پیاده می شود. در مرحله بعد با استفاده از تکنیک های شناسایی لبه ها، منحنی های پیرامونی حفرات شناسایی می شود. نهایتاً این تصاویر در دو مرحله به تصاویر خاکستری و سپس به تصاویر باینری تبدیل می شوند.

بدین ترتیب بر اساس حد آستانه مناسب، مقدار عددی هر پیکسل صفر یا یک است. در مرحله بعد پس از ایجاد ماتریس نظیر هر تصویر، به کمک کد توسعه یافته جهت تبدیل تصاویر به مدل اجزای محدود با نام IMO در محیط متلب، مش بندی نظیر تصویر در آباکوس ایجاد می شود. مراحل انجام کار در شکل ۳ نشان داده شده است. نکته آنکه برای حذف سایه ها و ارتقای کیفیت تصاویر به ویژه در میان سلولها، ابتدا نمونه با خمیر مناسب پر شده و پس از ایجاد کنتراست با لبه ها تصویر برداری انجام شده است.

نهایتاً می توان از این روش به صورت ترکیبی با پردازش تصاویر سی تی اسکن داخل قطعات برای مدلسازی سه بعدی استفاده کرد. البته با توجه به عدم وجود سی تی اسکن صنعتی در مقیاس میکرو در حال حاضر به ناچار تصویربرداری به کمک دستگاه های بیمارستان انجام شده است. در واقع ادامه روند مدلسازی حاضر در مقیاس میکرو تلاشی است برای کاهش خطای ناشی از رزولوشن پایین تر این دستگاه ها.

در ایجاد مدل اجزای محدود پژوهش حاضر برای افزایش سهولت در مش‌بندی و نیز مقایسه دقت و سرعت تحلیل از دو نوع المان با هندسه مختلف استفاده شده است. در مش اصلی، نوع المان‌ها به صورت آجری شش وجهی ۸ گره‌ای منظم با درونیابی خطی در نظر گرفته شده است. مزیت اصلی این مدل سرعت حل بالا به دلیل کاهش تعداد المان‌ها و گره‌ها است. البته به دلیل ماهیت واکسلی و دندانه‌دار این مش، خطای تطابق مش و هندسه در این حالت افزایش می‌یابد. به منظور رسیدن به بیشترین تطابق بین مدل اجزای محدود و هندسه در نواحی پیچیده و دارای انحنای زیاد از المان‌هایی با شکل هندسی هرمی با قاعده مثلث استفاده شده است.

این نکته بزرگترین مزیت استفاده از المان هرمی است. نام این المان چهاروجهی یا تتراهدرال ۴ گره‌ای است. در این حالت تعداد المان و زمان تحلیل به شدت افزایش می‌یابد. عیب دیگر این المان، دقت نسبتاً پایین آن در محاسبه جابجایی و کرنش است. البته برای حل این مشکل می‌توان از تکنیک ریزکردن مش استفاده کرد. در شکل ۴ مدل‌های اجزای محدود مختلف جهت شبیه‌سازی با تراکم مش و نوع المان مختلف نشان داده شده است [۳۱].



شکل ۴. مدل اجزای محدود تولید شده بر اساس المان آجری شش وجهی (چپ) و هرمی مثلثی چهاروجهی (راست)

UNCORRECTED PROOF

پس از تحلیل اجزای محدود با مدل‌های مختلف مش‌بندی، مدل مستقل از مش‌بندی انتخاب شد. در جدول ۱ گزارشی آماری از تعداد المان‌های تقریبی هر مدل اجزای محدود با تراکم مش مختلف به همراه اختلاف نسبی در تخمین متغیرهای جابجایی ارائه شده است.

این اطلاعات در واقع نتیجه مطالعه استقلال نتایج از مش-بندی است. بدین ترتیب انتخاب مدل بهینه اجزای محدود انجام شده است. با ملاحظه این مقادیر بدیهی است که استفاده از مش‌بندی با تراکم ۲ مناسب‌ترین گزینه از منظر کارایی و سرعت تحلیل و نیز دقت نتایج است. در این جدول زمان تحلیل و میزان درصد اختلاف نتایج جابجایی به طور نرمال شده نسبت به مش بهینه آمده است.

با توجه به نتایج فوق ذکر چند نکته شایان توجه است. مش بندی با تراکم ۲ و مش نسبتاً ریز از نظر دقت با مش ریز و تراکم ۱ تنها ۲ درصد تفاوت دارد. حال آن که زمان تحلیل با استفاده از مش ریز با تراکم ۱ واکسل، ۵ برابر حالت بهینه و مش نسبتاً ریز است. از طرف دیگر در صورت استفاده از مش متوسط و درشت به ترتیب زمان تحلیل به حدود نصف و ۱۰ درصد حالت مش بهینه تقلیل می‌یابد. در این دو حالت نتایج به ترتیب دارای حدود ۵۶ درصد بیش تخمین و ۷۵ درصد تخمین کمتر خواهد بود. بر این اساس استفاده از مش با تراکم ۲ بهینه خواهد بود. روش پیاده سازی و مطالعه استقلال نتایج از مش بندی با ترکیبات مختلفی از انواع توابع درونیابی المان ها، تراکم دانه بندی، نوع و شکل هندسی المان ها و غیره انجام شده است. در این جدول تنها بخشی از نتایج به صورت نمونه و مقایسه ای آورده شده است. هدف اصلی نیز یافتن مش مناسب به صورت مصالحه ای میان دقت و سرعت می باشد. برای نشان دادن دقت و همگرایی پاسخ نیز یکی از حالات به عنوان مش مرجع در نظر گرفته شده و نتایج به صورت نسبی بیان شده است.

بدیهی است که در این روش مش بندی مناسب به صورت کمترین اختلاف میان نتایج، و همزمان با آن سرعت شبیه سازی منطقی تعریف شده است. نکته دیگر آن که در بررسی استقلال نتایج از مش بندی، متوسط تخمین مقادیر جابجایی در نقاط مهم سطح متخلخل به عنوان معیار همگرایی پاسخ در نظر گرفته شده است. به دلیل وجود خطای بالای محاسبه کرنش، تعریف متغیر کرنش به عنوان معیار همگرایی از دقت مطالعه می کاهد.

جدول ۱. مطالعه آمار مدل‌های اجزای محدود مختلف و استقلال نتایج از مش‌بندی

هندسه المان	تراکم مش	تراکم المان (واکسل)	تعداد تقریبی المان (×۱۰۰۰)	تعداد تقریبی گره (×۱۰۰۰)	زمان تحلیل نرمال شده	تطابق نتایج با حالت مرجع
شش وجهی آجری (واکسلی)	ریز	۱	۱۱۶۹	۱۸۱۷	۵.۳	۱.۰۲
	نسبتاً ریز	۲	۲۰۶	۳۴۸	۱	۱
	متوسط	۳	۷۲	۱۲۲	۰.۴۵	۱.۵۶
	درشت	۴	۲۵	۴۲	۰.۱۲	۰.۲۵

۳- تفسیر نتایج

۳-۱- اندازه‌گیری میدان جابجایی و کرنش به روش همبستگی تصاویر

در این بخش با استفاده از روش همبستگی و تصاویر دیجیتال بدست آمده از تست‌های فشار محوری نمونه‌های فوم آلومینیومی، میدان تغییرشکل و کرنش آن‌ها استخراج خواهد شد. میدان جابجایی به صورت مؤلفه افقی u و عمودی v و نیز میدان کرنش به صورت مؤلفه‌های نرمال ε_{xx} و ε_{yy} و برشی ε_{xy} خواهد بود. نرم‌افزارهای مورد استفاده در تخمین تغییرشکل GOM و NCORR است. به دلیل ابزارها و امکانات خاص هر یک از این دو نرم‌افزار و نیز به منظور صحه‌گذاری عملکرد و دقت نرم‌افزار از ترکیب هر دو نرم‌افزار استفاده شده است. به عنوان مثال نرم‌افزار GOM قابلیت محاسبه انواع کرنش‌ها با اعمال تنظیمات دقیق و میان‌یابی مراتب بالا را دارد. در ارتقای دقت تحلیل همبستگی و محاسبه تغییرشکل، متغیرهای مختلفی ایفای

UNCORRECTED PROOF

نقش می‌کنند. مهم‌ترین این موارد عبارتند از: پیکربندی و تصویر مرجع اولیه، تعداد تصاویر و مراحل میانی، تعریف مرزهای ناحیه مورد علاقه یا ROI و ابعاد آن، شکل هندسی این ناحیه، اندازه و شکل ناحیه زیرمجموعه مانند شعاع زیرمجموعه بر حسب پیکسل، فواصل میان نقاط درون زیرمجموعه بر حسب پیکسل، تلرانس حل تکراری، حداکثر تعداد تکرارهای مجاز، تعداد رشته‌ها در پردازش موازی، تعریف تقریب غیرخطی برای تغییرشکل بزرگ شامل روش انتشار هسته یا حرکت جهشی، تحلیل ناپیوستگی و ترک، امکان تحلیل مستقیم یا معکوس، انتخاب محل هسته‌های اولیه جهت شروع حل، کالیبراسیون ارتباط جابجایی با اندازه پیکسل، مقدار ضریب قطع همبستگی، ضریب اعوجاج لنز، شعاع همسایگی در محاسبه مشتقات جزیی جابجایی و کرنش و نیز تنظیمات مشاهده نتایج خروجی شامل میزان شفافیت، رویکرد لاگرانژی و اویلری، محورهای مختصات، شاخص نشانگر طول و تنظیم حداقل و حداکثر در بازه نمایش متغیرها.

در بسیاری موارد مقادیر پیش‌فرض تنظیمات نرم‌افزار اولین و مناسب‌ترین انتخاب است. البته با توجه به هندسه پیچیده سطح خارجی فوم فلزی و وجود تخلخل با درصد مساحت بسیار زیاد نسبت به لبه‌های خارجی، در صورت استفاده از مقادیر پیش‌فرض، تحلیل همبستگی با واگرایی و مشکلات عدیده عددی روبرو خواهد شد. بدین منظور در مرحله اول متغیرهای تأثیرگذار در روند حل و کیفیت نتایج با فرآیند سعی و خطا بدست آمده است. به دلیل ماهیت پیچیده پردازش تصاویر سطوح متخلخل، استخراج عوامل مهم در اندازه گیری متغیرهای میدان به روش همبستگی از جمله ویژگی های مهم و قابل توجه پژوهش حاضر است.

از جمله مزایای اصلی استفاده از این روش می توان به محدودیت های مختلف روش های تحلیل تجربی تنش در محاسبه میدان تنش و تغییر شکل در سطوح متخلخل اشاره کرد. به عبارت دیگر برای محاسبه تغییر شکل، کرنش و تنش در بخش های مختلف از سطوح متخلخل فوم ها نمی توان از روش های تماسی مرسوم مانند استرین گیج و اکستنسومتر های مکانیکی استفاده کرد. این محدودیت عمدتاً به دلیل وجود تخلخل در سطوح نمونه ها و نیز ترد بودن و استحکام پایین سلول های پیرامونی است. بدین ترتیب با استفاده از روش همبستگی تصاویر می توان میدان تغییر شکل را روی سطوح متخلخل تعیین کرد. مزیت دیگر این روش تعیین میدان جابجایی و بالتبع کرنش به صورت پیوسته است. در روش های کلاسیک مانند روزت ها و غیره، میدان تنش و جابجایی به صورت گسسته استخراج می شود. به علاوه روش ابداعی حاضر، دقت و صحت اندازه گیری تغییرشکل را تضمین می کند. در این روش ترکیبی با استفاده از نتایج تحلیل عددی اجزای محدود می توان تنظیمات ورودی روش همبستگی را نیز برای رسیدن به بالاتریت دقت اندازه گیری کالیبره کرد. در جدول ۲ مقادیر مناسب متغیرهای اصلی جهت اجرای تحلیل همبستگی نشان داده شده است.

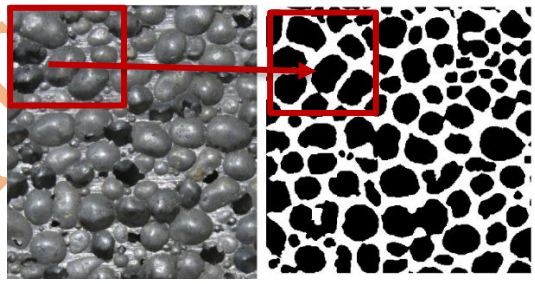
پس از ایجاد تغییر در تنظیمات مذکور، مؤثرترین عوامل در کنترل دقت نتایج و روند همگرایی حل مشخص شد. در محاسبه میدان جابجایی عمودی و افقی فاکتورهای اصلی عبارتند از شعاع زیرمجموعه و فواصل نقاط داخلی در هر زیرمجموعه. در محاسبه میدان کرنش یک عامل دیگر نیز به این دو افزوده می‌شود. این عامل اضافی شعاع همسایگی در محاسبه مشتقات جابجایی مورد نیاز در تعیین کرنش است. پس از اجرای فرآیند همبستگی با استفاده از تصاویر مربوط به تست‌های فشار محوری، پس از اعمال تنظیمات مناسب و نهایتاً متوسط گیری از نتایج خروجی، میدان جابجایی و کرنش بدست می‌آید. با توجه به پیوستگی میدان متغیرها، مقادیر اندازه‌گیری شده خروجی تنها در یک بخش از تصاویر مورد تحلیل قرار می‌گیرد. بدیهی است این مسئله خدشه‌ای به کلیت فرآیند وارد نکرده و برای محاسبه مقادیر در نقاط دیگر می‌توان به طور مشابه عمل نمود. محل داده-برداری از نتایج خروجی در شکل ۵ نشان داده شده است. بدیهی است این بخش از قطعه به دلیل وضوح تصویر و ضخامت قابل توجه دیواره، به صورت یک نمونه از کل نقاط و نواحی برای اندازه گیری میدان جابجایی به روش

UNCORRECTED PROOF

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

همبستگی و بهینه یابی تنظیمات انتخاب شده است. برای مقایسه تمامی نقاط در ادامه کانتورهای جابجایی در کل سطح مورد مطالعه آمده است.

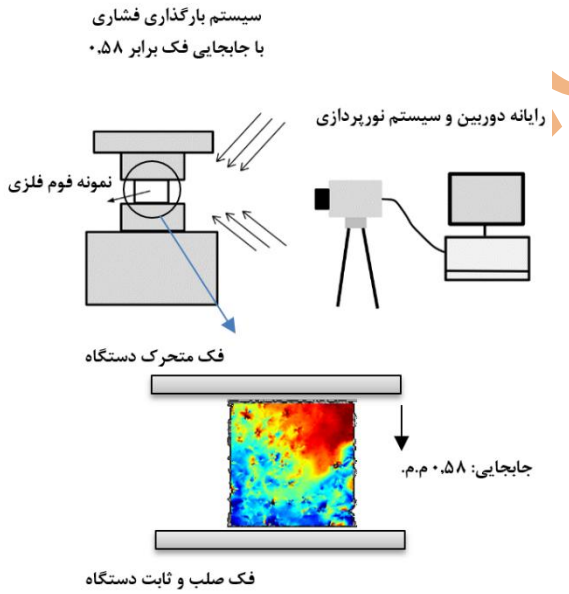
بارگذاری نمونه‌های فوم آلومینیومی به صورت جابجایی فک و به میزان ۰.۵۸ میلی‌متر است. بدین ترتیب تصاویر مختلف از آغاز بارگذاری تا جابجایی فوق تحلیل شده و نهایتاً نتایج کانتوری میدان جابجایی در سطح نمونه ترسیم می شود. مقدار جابجایی فک به گونه ای انتخاب شده که ساختار متخلخل وارد ناحیه پلاستیک نشود. بدین ترتیب تغییرشکل الاستیک و پس از باربرداری حذف می شود. با توجه به وجود نیروسنج در دستگاه بارگذاری زوئیک ۱۰۰، مقدار بار نظیر جابجایی فوق برای نمونه‌های کوچک ۲۲ میلی‌متری حدود ۴۳۰ نیوتن و برای نمونه‌های بزرگ ۴۰ میلی‌متری در حدود ۱۴۵۰ نیوتن است.



شکل ۵. محل داده‌برداری مقادیر خروجی تغییرشکل در تصویر دیجیتال اصلی (چپ) و تصویر باینری و فیلتر شده جهت مدلسازی اجزای محدود (راست)

در شکل ۶ مدل شماتیک بارگذاری نمونه فوم نشان داده شده است. به منظور ارتقای دقت و صحت نتایج شبیه سازی عددی و نیز مدلسازی جزییات ریزساختار تصادفی بر اساس پردازش تصاویر از تصویربرداری به کمک میکروسکوپ نوری دیجیتال استفاده شده است. در شکل ۷ روند اندازه گیری ضخامت لبه‌ها به کمک شبکه مدرج کالیبره شده و تصاویر میکروسکوپ نوری نشان داده شده است. هر واحد از شبکه ۰.۱ میلی‌متر است. با توجه به شکل، حداقل ضخامت سطوح ریزساختار ۰.۲ میلی‌متر است. بدین ترتیب کفایت تصویربرداری سی تی اسکن با اندازه برش حدود ۰.۱ تا ۰.۲ میلی‌متر اثبات می‌شود.

بدیهی است که جابجایی در نقاط مختلف سطح متخلخل به دلیل ماهیت ریزساختار و کمانش موضعی دیواره‌ها متفاوت است. در شکل ۸ نمایش کانتوری میدان جابجایی افقی u و عمودی v بر اساس تحلیل تصاویر و روش همبستگی نشان داده شده است. با توجه به شکل مشخص است که کانتور جابجایی عمودی یکنواختی بیشتری نسبت به جابجایی افقی دارد. البته این مسئله با توجه به نوع بارگذاری فشار محوری در جهت عمودی قابل توجیه است. از طرف دیگر عدم وجود یکنواختی در جابجایی افقی ناشی از تخلخل جسم و پایین بودن نسبت پواسن است. نسبت پواسن عبارتست از منفی نسبت کرنش جانبی به کرنش محوری در بارگذاری محوری. به عبارت دیگر در یک جسم با تخلخل بالا، در صورت اعمال بار محوری، عمده تغییرشکل در جهت بار است. بدین ترتیب مقدار تغییرشکل عرضی کوچک است. به دلیل کمانش و تغییرشکل موضعی غیرقابل پیش‌بینی در این جهت، محاسبه جابجایی و کرنش با خطای نسبی بیشتر همراه است.



شکل ۶. مدل شماتیک بارگذاری و تصویر برداری

مقدار جابجایی عمودی و افقی پس از متوسط گیری در محل داده برداری به ترتیب عبارتند از ۰.۳۵ و ۰.۰۷ میلی-متر. برای اطمینان از صحت نتایج و کنترل تکرارپذیری آن-ها، تصاویر مربوط به سه تست فشار مختلف به روش همبستگی تحلیل شده و میانگین مقادیر نظیر این تست‌ها

PROOF

به عنوان نتیجه نهایی گزارش گردیده است. در این شکل به علاوه مقایسه ای میان نتایج تجربی و اندازه گیری به روش همبستگی با نتایج تحلیل عددی به روش اجزای محدود نشان داده شده است.

در شکل ۹ نتایج کانتوری مؤلفه‌های کرنش روی سطح نمونه تحت فشار نشان داده شده است. این مؤلفه‌ها شامل دو کرنش نرمال در جهت افقی ε_{xx} و عمودی ε_{yy} و یک مؤلفه کرنش برشی درون صفحه‌ای ε_{xy} است. به دلیل کوچک بودن مقادیر کرنش، در گزارش‌گیری نتایج برای مؤلفه‌های نرمال از واحد درصد به جای میلی‌متر بر میلی‌متر و برای مؤلفه برشی از واحد درجه به جای رادیان استفاده شده است. البته نمایش کانتوری نتایج با واحد اصلی گزارش شده است. در کانتورهای کرنش ظاهراً یکنواختی بیشتری نسبت به کانتورهای جابجایی وجود دارد. البته مسئله کاملاً متفاوت است. به عبارت دیگر میزان خطا در محاسبه کرنش‌ها به دلیل عملیات مشتق‌گیری افزایش چشمگیری یافته است. یکنواختی ظاهری در نمایش کانتوری صرفاً به دلیل برازش و میانیابی نتایج در شعاع همسایگی اطراف نقاط است. مقدار یکنواختی ارتباط مستقیمی با شعاع کرنش دارد.

مقادیر مؤلفه‌های کرنش در محل داده‌برداری مذکور نیز مانند مؤلفه‌های بردار جابجایی پس از متوسط‌گیری مقادیر از نتایج تست‌های مختلف و نیز پیکسل‌های همسایه محل داده‌برداری گزارش شده است. به این ترتیب مقدار متوسط کرنش نرمال عمودی و افقی به ترتیب منفی ۰.۷ و ۱.۲ درصد و کرنش برشی ۱.۶ درجه است. نکته حائز اهمیت در داده‌برداری کرنش آن است که در اکثر نواحی تصویر توزیع کرنش بسیار کوچک و در محدوده صفر است. حال آنکه به منظور مشاهده مناسب‌تر، بازه تغییرات متغیر در نمایش کانتوری بزرگ در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر در صورت حذف نواحی بسیار کوچک و موضعی دارای تغییرات بزرگ، پس از بزرگنمایی تصاویر، مقادیر واقعی کرنش در نقاط مختلف و به ویژه محل داده‌برداری حداکثر در حدود صدم میلی‌متر بر میلی‌متر خواهند بود. نکته دیگر آن که توزیع کرنش نرمال در نواحی مختلف به دلیل شکل هنسی پیچیده و ریزساختار متخلخل و تصادفی فوم حاضر به صورت کششی و فشاری توأم می‌باشد. در خصوص توزیع کرنش برشی و تغییرات زوایای داخلی نواحی مختلف حین بارگذاری مسئله مشابه است. در این شکل به علاوه مقایسه‌ای میان نتایج تجربی و اندازه گیری به روش همبستگی با نتایج تحلیل عددی به روش اجزای محدود برای متغیر میدان کرنش مسطح نیز نشان داده شده است.

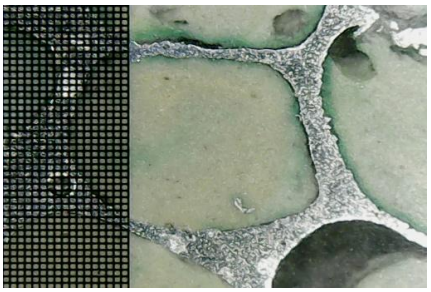
۳-۲- صحه‌گذاری نتایج با روش ترکیبی اجزای محدود و همبستگی تصاویر

به منظور صحه‌گذاری نتایج تحلیل‌های مبتنی بر پردازش تصاویر دیجیتال به روش همبستگی از شبیه‌سازی اجزای محدود استفاده شده است. از جمله عوامل اصلی استفاده از روش اجزای محدود به منظور صحه‌گذاری می‌توان به عدم استفاده از روش‌های تماسی در محاسبه کرنش و جابجایی مانند روزت و استرین گیج روی سطح محیط متخلخل، توزیع پیوسته میدان جابجایی در روش اجزای محدود، دقت بالا، امکان مدلسازی دقیق ریزساختار به منظور شبیه‌سازی عددی به روش بازسازی تصاویر سی تی اسکن، عدم نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی پیچیده و گران و غیره اشاره کرد.

بدین ترتیب با استفاده از بازسازی تصاویر سی تی اسکن و تبدیل آن به مدل اجزای محدود سه‌بعدی، شبیه‌سازی تست‌های فشاری انجام می‌شود. به منظور مدلسازی دقیق‌تر ریزساختار و اصلاح ضخامت دیواره‌ها و اتصال لبه‌ها، از تصاویر میکروسکوپ نوری دیجیتال با بزرگنمایی $800X$ استفاده شده است. بدین منظور مقطعی نازک از نمونه فوم فلزی تهیه و مانت می‌شود. پس از پرکردن منافذ با خمیر و پولیش‌کاری، تصویربرداری با میکروسکوپ انجام می‌شود. سپس به کمک شاخص کالیبره شده، عملیات ابعاد برداری و اندازه‌گیری دقیق از جزییات مدل انجام می‌شود.

UNCORRECTED PROOF

استناد به این مقاله: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.



شکل ۷. اندازه‌گیری جزییات نمونه به کمک میکروسکوپ نوری

روش تحلیل دینامیکی صریح با نرخ بارگذاری کم به منظور رسیدن به نتایج شبه-استاتیکی است. در مدل‌های اجزای محدود نیز از المان‌های آجری شش وجهی $C3D8$ و المان-های هرمی مثلثی $C3D4$ استفاده شده است. در مدلسازی فک‌های دستگاه بارگذاری از المان‌های پوسته صلب $R3D4$ استفاده شده است. به منظور حذف نویز در خروجی تحلیل از فیلتر بلادرنگ ضد آلیاس و فیلتر پس پردازش باترورث با فرکانس قطع ۲ کیلوهرتز استفاده شده است [۳۲] و [۳۳]. ورودی‌های شبیه‌سازی اجزای محدود نیز از نتایج تست‌های استاندارد کشش طبق استاندارد $ASTM\ B557$ بدست آمده است. خلاصه‌ای از این نتایج در جدول ۳ آمده است.

در شکل ۸ کانتور جابجایی افقی و عمودی بر روی سطح خارجی مدل سه‌بعدی از تحلیل اجزای محدود نیز به صورت مقایسه با نتایج پردازش تصاویر دیجیتال نشان داده شده است. با توجه به شکل مقدار جابجایی متوسط عمودی و افقی در محل داده‌برداری به ترتیب برابر با ۰.۴ و ۰.۰۸۳ میلی‌متر است. در این حالت خطای محاسبه این مقادیر در روش همبستگی تصاویر دیجیتال به ترتیب حدود ۱۵ و ۱۹ درصد است. این مقدار از خطا تطابق مناسب میان نتایج شبیه‌سازی عددی اجزای محدود مبتنی بر مدل تولید شده از بازسازی هندسی تصاویر سی تی اسکن با نتایج تحلیل تصاویر به روش همبستگی را به خوبی نشان می‌دهد [۳۴] بازسازی تصاویر سی تی اسکن در محیط نرم افزار میمیکس و براساس پردازش تصاویر دو بعدی، فیلتر کردن به روش گوسی و نهایتاً بر هم نهی تصاویر انجام شده است [۳۵].

نکته بسیار مهم آن که نتایج کانتوری جابجایی عمودی از شبیه سازی اجزای محدود تطابق مناسبی با مقدار جابجایی قرائت شده توسط دستگاه بارگذاری دارد. مقدار جابجایی عمودی دستگاه زوئیک در بار مورد نظر برابر ۰.۵۸ میلی متر است. مشاهده می شود که جابجایی سطح فوقانی مدل عددی نیز دارای جابجایی حدود ۰.۶ میلی متر می باشد.

در این شکل، نمایش کانتوری میدان کرنش نرمال افقی، عمودی و برشی نشان داده شده است. در این حالت مقدار کرنش متوسط ε_{xx}، ε_{yy} و ε_{xy} محاسبه شده به روش اجزای محدود به ترتیب برابر است با منفی ۱.۰۸، ۱.۶۱ و ۲.۶ درجه. در این حالت مقادیر اختلاف نتایج روش عددی اجزای محدود و همبستگی تصاویر دیجیتال برای محاسبه مؤلفه‌های نرمال کرنش افقی، عمودی و برشی به ترتیب عبارتست از ۵۵، ۳۴ و ۶۵ درصد. علت اصلی بروز خطای بیشتر نسبت به محاسبه میدان جابجایی لزوم استفاده از عملگر مشتق‌گیر در محاسبه کرنش است. البته در بسیاری موارد مانند تعیین مود خرابی و شکست، کمانش موضعی سطوح و لبه‌های ریزساختار متخلخل، محاسبه انرژی جذب شده توسط سازه و غیره، تعیین میدان جابجایی از اهمیت بالاتری برخوردار است. با توجه به تغییرشکل کوچک در سازه، محاسبه کرنش با رویکرد اویلری و لاگرانژی تقریباً برابر است. در نتیجه مقادیر کرنش گزارش شده عملاً متوسط نتایج حاصل از دو رویکرد فوق است.

۴- نتیجه‌گیری

به کارگیری فوم آلومینیومی سلول بسته با قابلیت جذب انرژی بالا، نیاز به مشخصه‌یابی دقیق این سازه‌های نوین را بیش از پیش پدیدار کرده است. به منظور مطالعه رفتار و اندازه‌گیری میدان تغییرشکل نمونه‌های متخلخل موجود از روش همبستگی تصاویر دیجیتال و برای صحه‌گذاری نتایج این روش از شبیه‌سازی اجزای محدود استفاده شده است. از طرف دیگر برای یافتن تنظیمات بهینه و مناسب در پیاده سازی روش همبستگی تصاویر دیجیتال از متدولوژی سطح پاسخ در محیط نرم افزار Design Expert استفاده شده است [۳۶]. از جمله چالش‌های پیش رو، نیاز به مدل دقیق از ریزساختار تصادفی فوم فلزی است. برای حل این مشکل

UNCORRECTED PROOF

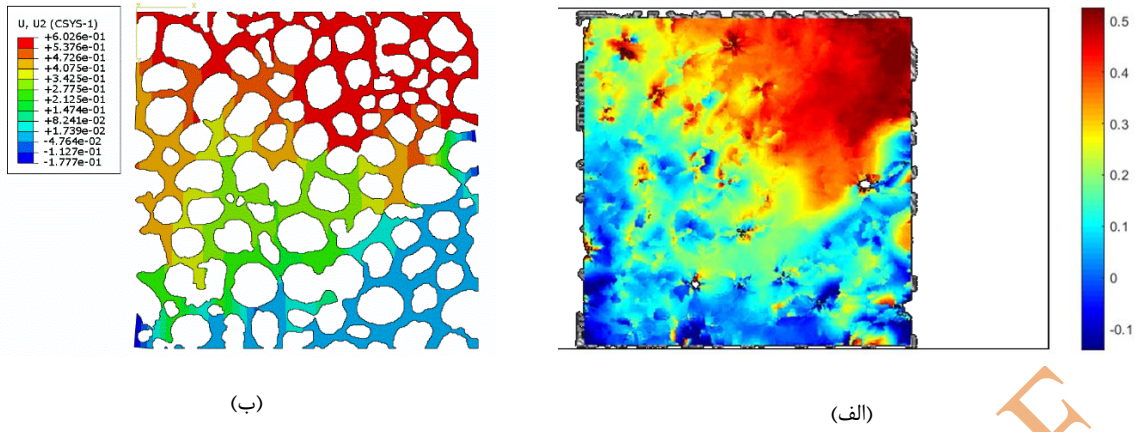
نیز از روش بازسازی تصاویر سی تی اسکن و نیز اصلاح آن براساس تصاویر میکروسکوپ نوری استفاده شده است. در ادامه مهم‌ترین دستاورها و نتایج حاصل از پژوهش حاضر جمع‌بندی خواهد شد.

- تصویربرداری دیجیتال دقیق از تست فشار محوری مستلزم پیاده‌سازی یک سیستم کامل تصویربرداری شامل نورپردازی، حذف ارتعاشات ناشی از بارگذاری، نشانه‌روی دقیق و تراز بودن دوربین، ثبت تصاویر بدون فشرده سازی و نیز تصویربرداری با فرکانس بالا است.
- برای رسیدن به نتایج با دقت مناسب به روش همبستگی تصاویر باید تنظیمات روش همبستگی و پردازش تصویر به طور دقیق انجام شود. تنظیمات مناسب از فرآیند سعی و خطا تعیین خواهد شد.
- صحه‌گذاری نتایج روش همبستگی با روش‌های مرسوم تحلیل تغییرشکل مانند کرنش سنج و اکستنسومتر امکان‌پذیر نیست. به این منظور استفاده از روش شبیه‌سازی عددی اجزای محدود یکی از بهترین گزینه هاست.
- شبیه‌سازی دقیق به روش اجزای محدود نیازمند مدل ریزساختاری سه بعدی است. برای تولید این مدل از تصاویر سی تی اسکن و میکروسکوپ نوری دقیق استفاده شده است.
- میزان اختلاف میان نتایج عددی و تجربی مبتنی بر روش همبستگی در تخمین جابجایی عمودی و افقی حداکثر برابر ۱۵ و ۱۹ درصد است.
- میزان خطای محاسبه کرنش پس از مقایسه روش اجزای محدود و همبستگی تصاویر در تخمین کرنش نرمال افقی، عمودی و برشی حداکثر برابر ۵۵، ۳۴ و ۶۵ درصد است.
- حداکثر خطای ۱۹ درصدی در محاسبه جابجایی حاکی از تطابق مناسب نتایج است. خطای ۶۵ درصدی در میدان کرنش به دلیل عملیات برازش و میانیابی نتایج حادث شده است. البته اهمیت اندازه گیری میدان جابجایی نسبت به کرنش بالاتر است.
- در بسیاری از موارد برای یافتن تغییرشکل های سطوح متخلخل می توان به جای مدل های سه بعدی، از مدل های دو بعدی متخلخل نظیر استفاده کرد.
- صحه گذاری روش همبستگی تصاویر با استفاده از تصاویر پیکسلی تصادفی و اعمال تبدیلات هندسی ساده بر روی آن میسر است. در این حالت خطای اندازه گیری و روش همبستگی بسیار کم و حداکثر ۱ درصد است.

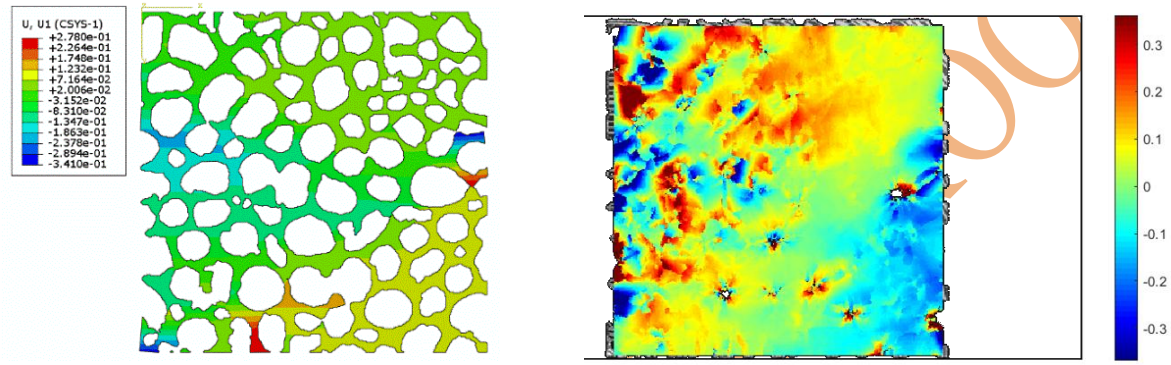
جدول ۲. تنظیمات مناسب جهت اجرای تحلیل همبستگی نمونه متخلخل

ابعاد ROI (میلیمتر)	شعاع زیرمجموعه (پیکسل)	فواصل در زیرمجموعه (پیکسل)	شعاع همسایگی کرنش (پیکسل)	تلرانس حل	حداکثر تکرار مجاز
۴۰-۲۰	۳۴	۱	۱۵	1.0e-7	۶۰
شکل ROI	تعداد رشته‌ها	محل هسته‌ها	تعداد تصاویر میانی	میزان بارگذاری فوم	روش تحلیل
مربع	۸-۴	مرکز ربع ROI	۲۰	۰.۵۷۶ میلیمتر	مستقیم

UNCORRECTED PROOF

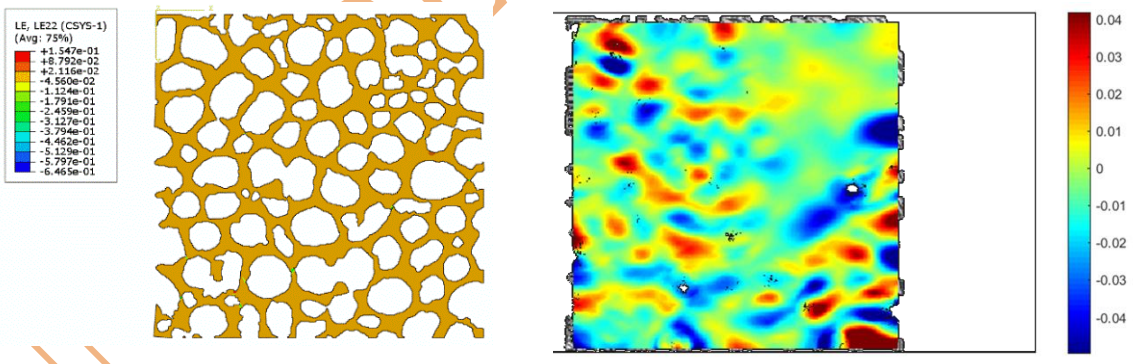


(ب) (الف)



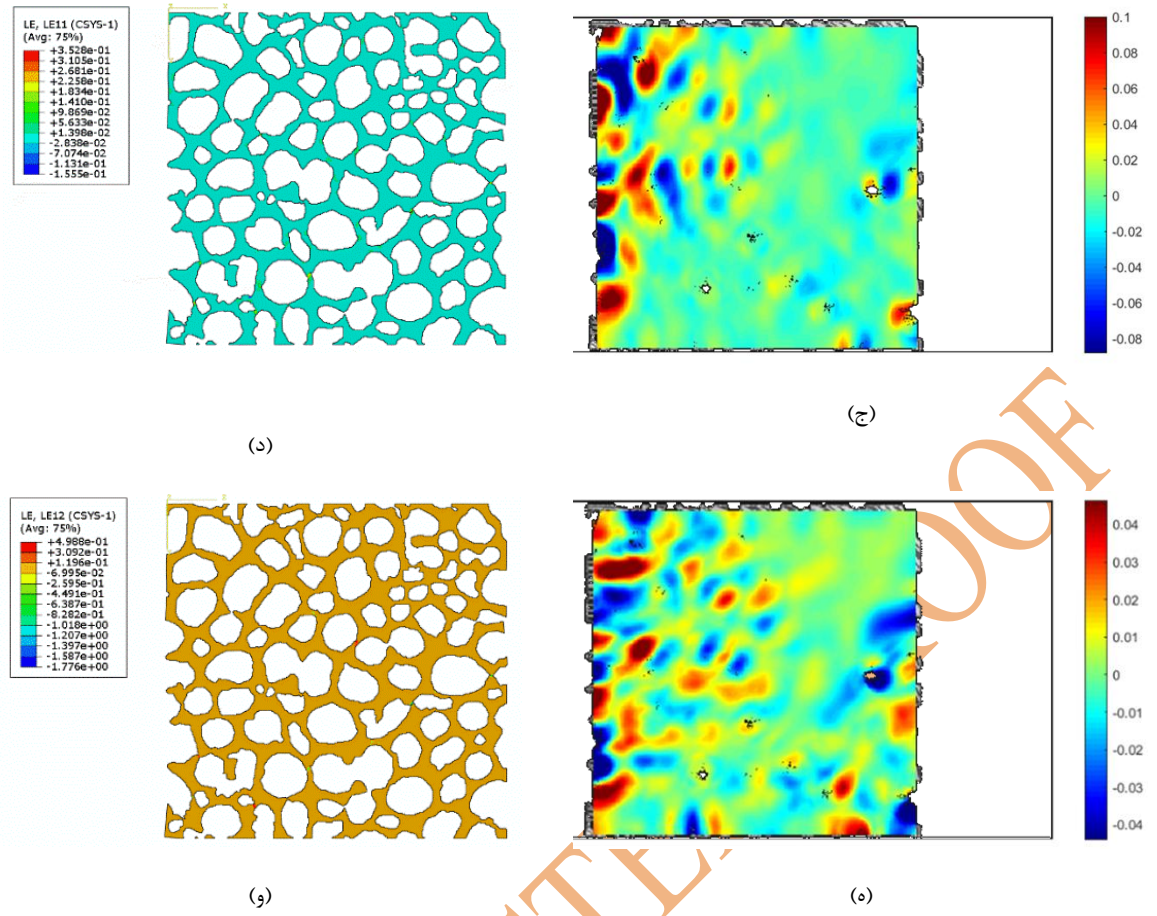
(د) (ج)

شکل ۸. نمایش کانتوری جابجایی روی سطح فوم فلزی، جابجایی عمودی و افقی با روش همبستگی (الف و ج) و جابجایی عمودی و افقی با روش اجزای محدود (ب و د)



(ب) (الف)

UNCORRECTED PROOF



شکل ۹. نمایش کانتوری مؤلفه های کرنش نرمال عمودی، افقی و برشی با روش همبستگی تصاویر (الف، ج و ه) و مؤلفه های کرنش نرمال عمودی، افقی و برشی با روش اجزای محدود (ب، د و و)

جدول ۳. خواص مواد و ورودی‌های شبیه‌سازی اجزای محدود

ماده	چگالی جرمی (کیلوگرم بر متر مکعب)	مدول یانگ (گیگا پاسکال)	مدول تانژانت (گیگا پاسکال)	استحکام تسلیم (مگا پاسکال)	نسبت پواسن
فوم آلومینیوم خالص	۲۷۰۰	۶۹	۰.۴۷	۷۶	۰.۳۵

UNCORRECTED PROOF

مراجع

[1] I. Skozrit, J. Frančeski, Z. Tonković, M. Surjak, L. Krstulović-Opara, M. Vesenjak, J. Kodvanj, B. Gunjević and D. Lončarić, "Validation of numerical model by means of digital image correlation and thermography," Procedia Engineering, p. 450 – 458, (2015).

[2] M. T. Begonia, M. Dallas, B. Vizcarra, Y. Liu, M. L. Johnson and G. Thiagarajan, "Non-contact strain measurement in the mouse forearm loading model using digital image correlation (DIC)," Bone, p. 593–601, (2015).

[3] F. Bernachy-Barbe, L. Gélébart, M. Bornert, J. Crépin and C. Sauder, "Characterization of SiC/SiC composites damage mechanisms using Digital Image Correlation at the tow scale," Composites: Part A, pp. 101-109, (2015).

[4] M. Mehdikhani, M. Aravand, B. Sabuncuoglu, M. G. Callens, S. V. Lomov and L. Gorbatikh, "Full-field strain measurements at the micro-scale in fiber-reinforced composites using digital image correlation," Composite Structures, p. 192–201, (2016).

[5] T. Whitlow, E. Jones and C. Przybyla, "In-situ damage monitoring of a SiC/SiC ceramic matrix composite using acoustic emission and digital image correlation," Composite Structures, p. 245–251, (2016).

[6] D. Gerbig, A. Bower, V. Savic and L. G. H. Jr, "Coupling digital image correlation and finite element analysis to determine constitutive parameters in necking tensile specimens," International Journal of Solids and Structures, (2016).

[7] J. Engqvist, M. Wallin, M. Ristinmaa and S. A. Hall, "Modelling and experiments of glassy polymers using biaxial loading and digital image correlation," International Journal of Solids and Structures, pp. 1-12, (2016).

[8] L. Krstulovic-Opara, M. Surjak, M. Vesenjak, Z. Tonkovic, J. Kodvanj and Z. Domazet, "Comparison of infrared and 3D digital image correlation techniques applied for mechanical testing of materials," Infrared Physics & Technology, p. 166–174, (2015).

[9] Y. Jiang, A. Akkus, R. Roperto, O. Akkus, B. Li, L. Lang and S. Teich, "Measurement of J-integral in CAD/CAM dental ceramics and composite resin by digital image correlation," Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, pp. 240-246, (2016).

[10] M.-T. Nguyen, J.-M. Allain, H. Gharbi, C. Desceliers and C. Soize, "Experimental multiscale measurements for the mechanical identification of a cortical bone by digital image correlation," Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, pp. 125-133, (2016).

[11] M. L. Aparna, G. Chaitanya, K. Srinivas and J. A. Rao, "Fatigue Testing of Continuous GFRP Composites Using Digital Image Correlation (DIC) Technique a Review," Materials Today: Proceedings, p. 3125 – 3131, (2015).

[12] J. Luo, C. Dai, Z. Wang, K. Liu, W. Mao, D. Fang and X. Chen, "In-situ measurements of mechanical and volume change of LiCoO2 lithium-ion batteries during repeated charge–discharge cycling by using digital image correlation," Measurement, (2016).

[13] R. Haj-Ali, R. Eliasi, V. Fourman, C. Tzur, G. Bar, E. Grossman, R. Verker, R. Gvishi, I. Gouzman and N. Eliaz, "Mechanical characterization of aerogel materials with digital image correlation," Microporous and Mesoporous Materials, pp. 44-52, (2016).

[14] W. Mao, J. Chen, M. Si, R. Zhang, Q. Ma, D. Fang and X. Chen, "High temperature digital image correlation evaluation of in-situ failure mechanism: An experimental framework with application to C/SiC composites," Materials Science & Engineering A, p. 26–34, (2016).

[15] G. Yang, Z. Cai, X. Zhang and D. Fu, "An experimental investigation on the damage of granite under uniaxial tension by using a digital image correlation method," Optics and Lasers in Engineering, p. 46–52, (2015).

[16] R. Tao, A. Moussawi, G. Lubineau and B. Pan, "Accurate kinematic measurement at interfaces between dissimilar materials using conforming finite-element-based digital image correlation," Optics and Lasers in Engineering, p. 103–112, (2016).

[17] X. Zhang, Y. Wang, J. Yang, Z. Qiao, C. Ren and C. Chen, "Deformation analysis of ferrite/pearlite banded structure under uniaxial tension using digital image correlation," Optics and Lasers in Engineering, p. 24–28, (2016).

[18] X. Wang, J.-F. Witz, A. E. Bartali and C. Jiang, "Infrared thermography coupled with digital image correlation in studying plastic deformation on the mesoscale level," Optics and Lasers in Engineering, p. 264–274, (2016).

[19] B. V. Mieghem, J. Ivens and A. V. Bael, "Benchmarking of depth of field for large out-of-plane deformations with single camera digital image correlation," Optics and Lasers in Engineering, pp. 134-143, (2017).

[20] B. P. Croom, P. Xu, E. J. Lahoda, C. P. Deck and X. Li, "Quantifying the three-dimensional damage and stress redistribution mechanisms of braided SiC/SiC composites by in situ volumetric digital image correlation," Scripta Materialia, p. 238–241, (2017).

[21] J. Li, X. Xie, G. Yang, B. Zhang, T. Siebert and L. Yang, "Whole-field thickness strain measurement using multiple camera digital image correlation system," Optics and Lasers in Engineering, pp. 19-25, (2017).

UNCORRECTED PROOF

[22] M. Ratnam, C. Goh, H. Ismail and K. Yen, "Single-step scanner-based digital image correlation (SB-DIC) method for large deformation mapping in rubber," p. 167–177, (2017).

[23] A. A. Mudassar and S. Butt, "Improved Digital Image Correlation metho," Optics and Lasers in Engineering, (2015).

[24] J. Poissant, A new digital correlation technique for discontinuous displacement field, Montreal: McGill University, 2007.

[25] X. Li, G. Fang, J. Zhao, Z. Zhang and X. Wu, "Local Hermite (LH) Method: An accurate and robust smooth technique for high-gradient strain reconstruction in digital image correlation," Optics and Lasers in Engineering, vol. 112, pp. 26-38, (2019).

[26] R. Gonzalez, R. E. Woods and S. L. Eddins, Digital Image Processing Using Matlab- 2nd edition, Prentice Hall, 2009.

[27] Y. Taraz Jamshidi and M. Salehi, Engineering Elasticity, Applications and Problems, Tehran: Amirkabir University Press, 2017, 2nd Edition.

[28] 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, pp. 105-114, (2018).

[29] 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).

[30] Y. Taraz Jamshidi, Comprehensive Guide to Mechanical Analysis with ABAQUS, Tehran: Afrang Pub., Orange Triangle Series, 2017, 4th Edition.

[31] ABAQUS Documentation, Dassault Systemes Simulia Corp., 2017.

[32] Y. T. Jamshidi, A. P. Anaraki, M. Sadighi, J. Kadkhodapour, S. M. H. Mirbagheri and B. Akhavan, "Metallic closed-cell foam filled tube uniaxial crushing behavior analysis using Voronoi approach," Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, (2019).

[33] Y. T. Jamshidi, A. P. Anaraki, M. Sadighi, J. Kadkhodapour, S. M. H. Mirbagheri and B. Akhavan, "Micro-structure analysis of quasi-static crushing and low-velocity impact behavior of graded composite metallic foam filled tube," Metals and Materials International - Springer, (2019).

[34] M. R. Soltani, "Blood flow analysis in brain vilis loop using CT and FSI," Journal of Modelling in Engineering – Semnan University press, (1398), 285-294, vol. 17, issue 57 (in Persian).

[35] A. Nasr abbadi, "Human face detection in colored photos based on Guassian filter," Journal of Modelling in Engineering – Semnan University press (1388), 15-23, vol 7, issue 17 (in Persian).

[36] M. Mardalizadeh, "Modeling and statistical investigation in FSW process for 55 aluminum using RSM" , Journal of Modelling in Engineering – Semnan University press (1393), 103-116, vol 2, issue 38 (in Persian).

UNCORRECTED PROOF