



# Investigation of The Residual Strains in The Continuous Fiber Reinforced Specimens of The Fused Deposition Modeling Process Using Digital Image Correlation Method

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Azadi F. <sup>1</sup>,  
Behraves A. <sup>1</sup>,  
Akbari D. <sup>1\*</sup>,  
Hedayati S K. <sup>1</sup>,

### How to cite this article

Azadi F, Behraves A, Akbari D, Hedayati S K. Investigation of The Residual Strains in The Continuous Fiber Reinforced Specimens of The Fused Deposition Modeling Process Using Digital Image Correlation Method. Modares Mechanical Engineering, 2022;22(07):441-449.

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

### \*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran  
daakbari@modares.ac.ir

### Article History

Received: June 01, 2021  
Accepted: March 07, 2022  
ePublished: June 06, 2022

## ABSTRACT

In this study, the effect of fiber presence in continuous fiber reinforced Fused Deposition Modeling samples (FDM) on the stress and residual strain created during the process was investigated. The FDM process is recognized as one of the most widely used Additive Manufacturing methods for layered prototypes from a three-dimensional model. One of the most important issues in this process is the distortion of parts produced during printing. The distortion created is mainly due to the rapid cycles of melting and solidification of the material, which produce residual stresses in the sample. The main objective of this study was to measure the residual strain of residual stress in unreinforced and reinforced PLA samples with continuous glass fiber using digital image correlation and hole drilling technique. According to the results, the presence of continuous glass fibers in PLA samples made by fused deposition modeling method, will cause residual stresses and residual strain due to these stresses in the parts that have the maximum amount of residual strains created in the sample reinforced with glass fibers in the x and y directions were equal to 1.09 and 0.34%, respectively. The results show that the released strains in the reinforced specimen in all stages of drilling were greater than the unreinforced specimen. Therefore, the presence of continuous glass fibers will increase the residual stresses and as a result will create further distortions in acidic polylactic samples produced by the molten coating method.

**Keywords** Digital Image Correlation, Continuous Fibers, Fused Deposition Modeling

## CITATION LINKS

[1] Residual stresses in composite materials. [2] Practical residual stress measurement methods. [3] Advances in hole-drilling residual stress measurements. [4] Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. [5] Improving dimensional accuracy of fused deposition modelling processed part using grey Taguchi method. [6] Calibration and evaluation of optical systems for full-field strain measurement. [7] Improving mechanical properties of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites produced by FDM 3D printer. [8] Hole-drilling residual stress measurement with artifact correction using full-field DIC. [9] Recent progress in residual stress measurement techniques. [10] Determination of displacements using an improved digital correlation method. [11] Rapid prototyping. [12] X-ray diffraction residual stress techniques. [13] Measurement of microscopic stress distribution of multilayered composite by X-ray stress analysis. [14] ASTM E83713-a, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gauge Method. [15] Use of rigid-body motion for the investigation and estimation of the measurement errors related to digital image correlation technique. [16] Applications of digital image correlation to biological tissues. [17] Lens distortion correction for digital image correlation by measuring rigid body displacement. [18] Development of digital image correlation method for non-destructive measurement of residual stress. [19] Mechanics of composite materials. [20] 3D Printed PCL Scaffold Reinforced with Continuous Biodegradable Fiber. [21] A Study on Mechanical and Cell Viability Properties Mechanics of composite materials.

## بررسی کرنش‌های پسماند در نمونه‌های تقویت شده با الیاف پیوسته در فرآیند لایه نشانی مذاب به کمک برهمنگاری تصاویر دیجیتال

فرید آزادی

دانشکده مهندسی مکانیک، گروه ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

امیرحسین بهروش

دانشکده مهندسی مکانیک، گروه ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

داود اکبری\*

دانشکده مهندسی مکانیک، گروه ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

سید کاوه هدایتی

دانشکده مهندسی مکانیک، گروه ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

### چکیده

در این مقاله، تأثیر حضور الیاف در نمونه‌های تقویت شده با الیاف پیوسته در فرآیند لایه نشانی مذاب، بر میزان تنش و کرنش‌های پسماند ایجاد شده در حین فرآیند لایه نشانی مذاب بررسی شده است. فرآیند FDM به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های ساخت افزایشی جهت ساخت نمونه‌های اولیه به صورت لایه به لایه از یک طرح سه بعدی شناخته شده است. یکی از مهمترین مسائل در این فرآیند، اعوجاج قطعات تولیدی در حین چاپ می‌باشد. اعوجاج ایجاد شده عمدتاً به دلیل چرخه‌های سریع گرم شدن و خنک شدن ماده بوده که منجر به ایجاد تنش پسماند در نمونه می‌شود. هدف اصلی این تحقیق، اندازه‌گیری میزان کرنش پسماند آزاد شده در اثر تنش پسماند موجود در نمونه‌های تقویت نشده و تقویت شده پلی لاکتیک اسید با الیاف پیوسته شیشه به کمک روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال و سوراخکاری می‌باشد. تجهیزات مورد استفاده در این تحقیق، جهت تلفیق دو روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال و سوراخکاری، طراحی و ساخته شده‌اند. طبق نتایج بدست آمده، وجود الیاف پیوسته شیشه در نمونه‌های پلی لاکتیک اسید ساخته شده به روش لایه نشانی مذاب، موجب ایجاد تنش‌های پسماند و کرنش‌های باقیمانده‌ی ناشی از این تنش‌ها در قطعات خواهد شد که بیشینه میزان کرنش‌های باقیمانده‌ی ایجاد شده در نمونه‌ی تقویت شده با الیاف شیشه در راستای x و y به ترتیب برابر با ۱/۰۹ و ۱/۳۴ درصد بوده است. نتایج نشان می‌دهند که کرنش‌های آزاد شده در نمونه‌ی تقویت شده در تمامی مراحل سوراخکاری بیشتر از نمونه‌ی تقویت نشده بوده است. لذا وجود الیاف پیوسته شیشه موجب افزایش تنش‌های باقیمانده و در نتیجه ایجاد اعوجاجات بعدی در نمونه‌های پلی لاکتیک اسیدی تولید شده با روش لایه نشانی مذاب خواهد شد.

**کلیدواژه‌ها:** برهمنگاری تصاویر دیجیتال، الیاف ممتد، لایه نشانی مذاب

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۶

\*نویسنده مسئول: daakbari@modares.ac.ir

مورد توجه صنعتگران بوده است. گاهی وجود تنش پسماند در قطعه تولید شده، سبب ایجاد انبساط و انقباض غیر یکنواخت و در نتیجه اعوجاج در آن می‌شود که مطلوب نیست. از این رو دانش تخمین و اندازه‌گیری تنش‌های پسماند، از جمله موارد بسیار مهم در تولید قطعات حساس می‌باشد. به طور کلی اندازه‌گیری تنش پسماند به سه روش غیرمخرب، نیمه مخرب و مخرب تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های مخرب اندازه‌گیری، به علت تخریب ساختار قطعه اولیه در فرآیند ارزیابی تنش پسماند، دارای محدودیت‌هایی می‌باشد. به همین علت استفاده از روش‌های بالا در صنعت بسیار حایز اهمیت است [1].

منابع متعدد ایجاد تنش‌های پسماند به سه مجموعه کلی مکانیکی، حرارتی و متالورژیکی دسته‌بندی می‌شوند. تنش‌های پسماند می‌توانند باعث بروز مشکلاتی از قبیل اختلال در مونتاژ، کارکرد سازه، افت استحکام، تغییر شکل‌های ناخواسته و حتی از کار افتادگی زودتر از موعد قطعات شوند [2]. روش‌های شیاری، کرنش سنجی سوراخ عمیق و روش کانتور نمونه‌هایی از روش‌های مخرب می‌باشند [2]. در سال‌های اخیر تکنیک‌های نوری معرفی شده‌اند که در اندازه‌گیری تنش‌های پسماند مورد استفاده قرار می‌گیرند. از مزایای این تکنیک‌ها می‌توان به استخراج اطلاعات کرنش و تنش در تمامی نقاط اشاره کرد که در مقایسه با کرنش‌سنجی سوراخ که تنش‌های اصلی را استخراج می‌کند می‌تواند استفاده بیشتری داشته باشد. استفاده از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال مانند به کار بردن تعداد زیادی کرنش‌سنج می‌باشد به طوری که می‌تواند تمام سطح قطعه را پوشش دهد. مقایسه‌ای بین این روش‌ها در جدول ۱ آورده شده است [3].

اهن و همکارانش به طور تجربی تأثیرات متغیرهای لایه نشانی مذاب از جمله جهت‌گیری رشته‌ها در ساخت را بر استحکام کششی و فشاری قطعات از جنس ABS ساخته شده با لایه نشانی مذاب مورد بررسی قرار دادند. از بین متغیرهای بررسی شده، فاصله هوایی بین رشته‌ها و جهت‌گیری رشته‌ها بیشترین اثر را روی خواص مکانیکی داشته‌اند. با استفاده از متغیرهای بهینه، استحکام‌های کششی و فشاری قطعات چاپ شده با فرآیند لایه نشانی مذاب ABS به ترتیب در محدوده‌های ۶۵-۷۵٪ و ۸۰-۹۰٪ استحکام قطعات ساخته شده با روش تزریق پلاستیک بوده‌اند [4].

**جدول ۱) مقایسه قابلیت‌های کرنش‌سنج‌ها و روش‌های نوری در ارزیابی تنش پسماند [3].**

روش‌های نوری	کرنش‌سنج
هزینه تجهیزات کم، هزینه تست زیاد، هزینه تست کم	هزینه تجهیزات کم، هزینه تست زیاد
زمان آماده‌سازی و انجام کم	زمان آماده‌سازی و انجام زیاد
حجم محاسبات تنش کم	حجم محاسبات تنش زیاد
قابلیت چک اطلاعات وجود ندارد	قابلیت چک اطلاعات وجود ندارد
حساس به خارج از مرکز بودن سوراخ	غیر حساس به خارج از مرکز بودن سوراخ

### ۱- مقدمه

تنش و کرنش پسماند، یکی از مسائل مورد توجه در تولید اجزا و قطعات مکانیکی است که عدم توجه به آن، موجب بروز مشکلاتی در حین کارکرد و مونتاژ قطعات خواهد شد. این موضوع از دیرباز

با توجه به پیشینه پژوهش ارائه شده و افزایش روز افزون استفاده از روش‌های ساخت افزایشی و نیاز به بررسی تأثیرات روش‌های تقویت نمونه‌ها به خصوص روش افزودن الیاف ممتد، ترکیب برهمنگاری تصاویر دیجیتال و سوراخکاری می‌تواند پاسخگوی این نیاز باشد. بنابراین این انگیزه ایجاد شد تا سیستمی طراحی شود که بتواند دو روش را در خود بگنجانند.

## ۲- تئوری و روش‌ها

### ۲-۱- برهمنگاری تصاویر دیجیتال

امروزه در بین روش‌های غیرمخرب، استفاده از روش‌های نوری که قابلیت ارزیابی تنش پسماند به صورت تمام صفحه و در موقعیت را دارا می‌باشند، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این روش‌ها دارای مزایای سرعت بسیار بالا، دقت بالا، هزینه پایین و عدم وابستگی به ریزساختار و کیفیت سطوح می‌باشند. در بین انواع روش‌های نوری، روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی به علت هزینه پایین، سرعت بالا و همچنین عدم نیاز به مواردی نظیر تحلیل فازها، هاله‌ها و امواج نسبت به روش‌های نوری دیگر دارای برتری می‌باشد [9]. این روش برای اولین بار از سال ۱۹۸۲ در دانشگاه کارولینای جنوبی توسط پروفیسور ساتن برای به دست آوردن میدان جابجایی معرفی شد [10]. در این روش، ابتدا روی سطح قطعه یک الگوی لکه‌ای سیاه و سفید تصادفی ایجاد می‌شود. بعد از آماده‌سازی نمونه، قبل و بعد از بارگذاری دو عکس از الگوی لکه‌ای سطح قطعه گرفته می‌شود و سپس با تحلیل این دو عکس در الگوریتم برهمنگاری می‌توان میدان جابجایی و کرنش را به دست آورد. در روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی، شدت نور هر عکس با یک تابع چند جمله‌ای پیوسته تخمین زده می‌شود. الگوریتم برهمنگاری هر بار تابع شدت نور دو زیرناحیه از دو تصویر قبل و بعد از بارگذاری را با هم مقایسه کرده و آن زیرناحیه از عکس بعد از بارگذاری را که بیشترین تطابق با زیرناحیه عکس مرجع دارد، به عنوان زیرناحیه تغییر یافته در نظر گرفته و جابجایی و تغییر شکل‌های آن را به دست می‌آورد که در شکل ۱ نشان داده شده است. این روند برای تمامی زیرناحیه‌های تصویر مرجع انجام شده و در نهایت، میدان جابجایی کل به دست می‌آید. برای بررسی میزان انطباق هر جفت زیرناحیه، ضریب برهمنگاری C به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود که می‌تواند معیار مناسبی برای درک مقدار مطابقت دو زیرناحیه متناظر باشد.

$$C(R) = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} \sum_{j=-m}^{j=m} (G_r(X_p, Y_p) - G_d(X'_p, Y'_p))^2}{\sum_{i=-m}^{i=m} \sum_{j=-m}^{j=m} (G_r(X_p, Y_p))^2} \quad (1)$$

R بردار مجهولات به صورت زیر می‌باشد:

$$R = (X, Y, U, V, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial y}) \quad (2)$$

در معادلات بالا، U و V مولفه‌های جابجایی در مرکز زیرناحیه  $G_r$  و  $G_d$  توابع پیوسته درونیابی شدت نور قبل و بعد از بارگذاری

سود و همکاران به بررسی تجربی اثر پارامترهای مهم فرآیند از جمله، ضخامت لایه، جهت‌گیری قطعه، زاویه شطرنجی، شکاف هوا و عرض شطرنجی و همچنین اثر برهم‌کنش‌های آن‌ها بر دقت ابعادی قطعات ساخته شده به کمک فرآیند لایه نشانی مذاب پرداختند [5]. طبق نتایج آن‌ها انقباض در جهت طول و عرض قطعه‌ی ساخته شده مشهود است. نتایج تجربی آن‌ها نشان داده که تنظیمات بهینه برای هر پارامتر فرآیند متفاوت است.

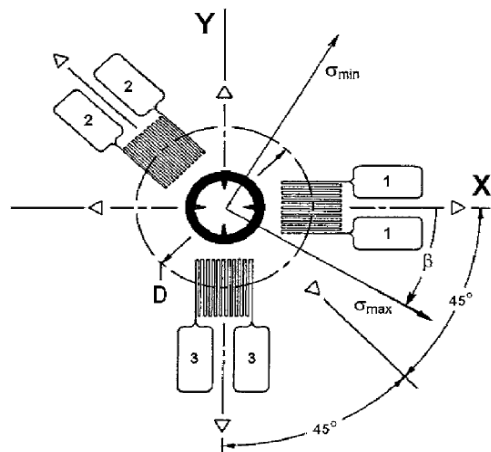
پاترسون و همکارانش به بهینه‌سازی خواص مکانیکی قطعات لایه نشانی شده پرداخته و متغیرهای ضخامت لایه، جهت‌گیری رشته‌ها در ساخت، زاویه بین رشته‌ها، عرض رشته و فاصله‌ی هوایی را مورد بررسی قرار دادند. مطابق نتایج، استحکام کششی قطعات از میزان ۹/۹ تا ۱۶/۷ مگاپاسگال متغیر بوده و افزایش ۶۹ درصدی استحکام کششی را به همراه داشته است. علاوه بر این، با افزایش تعداد لایه‌های یک قطعه (کاهش ضخامت هر لایه) گرادیان حرارتی ایجاد شده به سمت کف قطعه بیشتر شده و موجب افزایش استحکام قطعه کار می‌شود. افزایش تعداد لایه‌ها، موجب بالا رفتن تعداد چرخه‌ی گرم و سرد شدن قطعه شده و افزایش تنش پسماند در قطعه را به همراه خواهد داشت. گرادیان حرارتی ایجاد شده بین رشته‌ی لایه‌نشانی شده و لایه‌ی پیشین براساس فرآیند نفوذ و انتقال حرارت بین آن‌ها، موجب اتصال بهتر شده و متعاقباً افزایش استحکام را به همراه خواهد داشت [6].

آخوندی و همکارانش با طراحی و ساخت نازل جدید و استفاده از روش آغشته سازی همزمان و تغذیه الیاف شیشه به پلیمرهای گرما نرم موفق به چاپ قطعات با درصد الیاف قابل کنترل و با هندسه پیچیده‌تر شدند که در شکل ۲ نشان داده شده است. فیلامنت مورد استفاده در این پژوهش PLA و قطر نازل ۰/۵ است. آنها چیدمان‌های مختلف الیاف را مورد بررسی قرار داده و پیشینه درصد الیاف را به صورت تئوری محاسبه کردند. آنها موفق به تولید قطعات کامپوزیتی تا بیشینه درصد حجمی ۴۹/۳ شدند. نمونه‌های با درصد الیاف بالاتر به دلیل کاهش حجم ماتریس و عدم اتصال مناسب بین رشته‌ها قابلیت تولید را نداشتند. آنها موفق به افزایش استحکام کششی و مدول الاستیسیته با افزودن ۴۹/۳ درصد الیاف به ترتیب به میزان ۴۷۹ مگاپاسگال و ۲۹/۴۱ گیگاپاسگال شدند. بیشترین میزان اختلاف مقادیر تئوری و نتایج تجربی ۱۴ درصد بوده است [7].

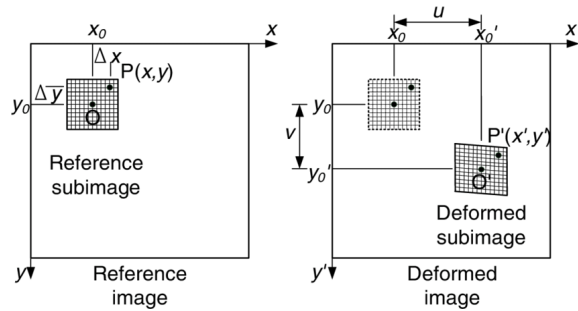
شاجر و همکاران، یک روش محاسباتی چند محوره برای تعیین تنش‌های پسماند با استفاده از روش سوراخکاری به همراه تکنیک برهمنگاری تصویر دیجیتال ارائه کرده‌اند [8]. روش برهمنگاری تصویر دیجیتال به همراه شیازنی و سوراخکاری مرکزی از لحاظ تحلیلی ساده و اجرائی آن آسان است. در این پژوهش از ترکیب روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال و سوراخکاری مرکزی جهت بررسی تأثیر اضافه کردن الیاف ممتد بر مقدار کرنش آزاد شده در قطعات ساخته شده به روش لایه نشانی مذاب استفاده شده است.

در قطعات است. تنش پسماند در یک ماده در غیاب بارهای خارجی رخ می‌دهد. تنش پسماند با بارگذاری اعمال شده بر روی مواد در تعامل است و می‌تواند بر استحکام کلی، خستگی و عملکرد خوردگی مواد تأثیرگذار باشد<sup>[11]</sup>. روش سوراخکاری مرکزی یکی از روش‌های پرکاربرد برای اندازه‌گیری تنش پسماند است. روش سوراخکاری مرکزی می‌تواند تنش‌های باقیمانده میکروسکوپی را در نزدیکی سطح ماده اندازه‌گیری کند. این روش بر اساس حفر یک سوراخ کوچک روی مواد است. وقتی ماده دارای تنش پسماند برداشته شود، مواد باقیمانده به حالت تعادل جدید می‌رسند. حالت تعادل جدید تغییر شکل‌هایی در اطراف سوراخ را در پی دارد. تغییر شکل‌های اطراف سوراخ در طول آزمایش با استفاده از کرنش‌سنج‌ها یا روش‌های نوری، اندازه‌گیری می‌شود. کرنش‌سنجی سوراخ، پرکاربردترین روش برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند است. این روش نسبتاً ساده، ارزان و سریع است که روی گستره وسیعی از جنس‌ها در محیط آزمایشگاهی یا بیرون از آن قابل استفاده می‌باشد<sup>[12,13]</sup>. روزت دارای سه کرنش‌سنج مستقل است که یک کرنش‌سنج در راستای مرجع (صفر درجه) قرار می‌گیرد و دو کرنش‌سنج دیگر در زوایای ۹۰ درجه و ۴۵ یا ۱۳۵ درجه از جهت مرجع قرار می‌گیرند. در شکل ۲ کرنش‌سنج متداول جهت انجام آزمون سوراخکاری مشاهده می‌شود.

کرنش‌های به دست آمده از تست کرنش‌سنجی سوراخ، در سه جهت می‌باشند. برای تبدیل کرنش‌های به دست آمده به تنش‌های پسماند و جهت این تنش‌ها از روابط تنش کرنش خطی (قانون هوک) استفاده می‌شود. روابط مورد استفاده در استاندارد ASTM E837 برای محاسبه تنش‌های پسماند از روابط ۹، ۱۰ و ۱۱ قابل محاسبه می‌باشد<sup>[14]</sup>. لازم به ذکر است که در این روابط، به دلیل ناهمسانگردی قطعات ساخته شده، مدول الاستیک و نسبت پواسون معادل مورد استفاده قرار گرفته است. این پژوهش صرفاً به بررسی کرنش‌های آزاد شده در دو راستای طولی و عرضی پرداخته است.



شکل ۲) شماتیک یک روزت با سه کرنش‌سنج<sup>[13]</sup>



شکل ۱) زیرناحیه‌های مرجع و تغییر شکل یافته<sup>[9]</sup>

می‌باشند،  $(x, y)$  و  $(x', y')$  به ترتیب مختصات نقاط در زیرناحیه‌های تصویر مرجع و تصویر بعد از بارگذاری هستند که طبق روابط ۴ و ۳ با همدیگر ارتباط دارند.

$$x' = x + U + \frac{\partial U}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial U}{\partial y} \Delta y \quad (3)$$

$$y' = y + V + \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial V}{\partial y} \Delta y \quad (4)$$

$\Delta x$  و  $\Delta y$  فواصل افقی و عمودی نقطه  $(x, y)$  از مرکز زیرناحیه هستند.

در رابطه برهم‌نگاری، مقدار شدت نور در هر نقطه، از زیرناحیه عکس مرجع با نقطه متناظر آن در زیرناحیه متناظر در عکس بعد از بارگذاری مقایسه شده و اختلاف آن‌ها به دست می‌آید. سپس مقدار مجذور اختلاف آن‌ها بر مقدار مجذور شدت نور آن نقطه در عکس مرجع تقسیم می‌شود. عدد به دست آمده، معیاری از خطای نسبی در آن نقطه است. برای محاسبه مقدار خطای کل در یک زیرناحیه، مقدار خطای نقاط با یکدیگر جمع می‌شوند. وقتی ضریب برهم‌نگاری صفر شود، در حقیقت تابع خطا در کل زیرناحیه صفر شده و این نشان دهنده تطابق کامل است. بهترین جواب زمانی به دست می‌آید که ضریب  $C(R)$  در رابطه ۱ کمینه شود. به تعبیر دیگر، توابع درونیایی قبل و بعد از بارگذاری در هر نقطه اختلاف کمی داشته باشند. طبق رابطه ۵ برای کمینه کردن  $C$  باید گرادیان آن صفر شود.

$$\nabla C = \left( \frac{\partial C}{\partial R_k} \right)_{k=1,13} \quad (5)$$

برای حل رابطه ۵ و به دست آوردن ریشه‌های آن، از روش نیوتن-رافسون استفاده می‌شود. در این روش با انجام محاسبات کلی در نهایت کرنش‌ها در راستاهای مختلف به صورت روابط ۶-۸ بیان می‌شوند:

$$\epsilon_{xx} = \frac{1}{2} \left( \left( \frac{du}{dx} \right)^2 + \left( \frac{dv}{dx} \right)^2 + \left( \frac{d\omega}{dx} \right)^2 \right) + \left( \frac{du}{dx} \right) \quad (6)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{1}{2} \left( \left( \frac{du}{dy} \right)^2 + \left( \frac{dv}{dy} \right)^2 + \left( \frac{d\omega}{dy} \right)^2 \right) + \left( \frac{dv}{dy} \right) \quad (7)$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{1}{2} \left( \left( \frac{du}{dz} \right)^2 + \left( \frac{dv}{dz} \right)^2 \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{du}{dx} \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \frac{dv}{dy} \right) \quad (8)$$

## ۲-۲- سوراخکاری مرکزی

تنش پسماند زمینه‌هایی از تنش‌ها هستند که در غیاب هر گونه بارهای خارجی وجود دارند. همه فرآیندهای مکانیکی که می‌توانند باعث تغییر شکل شوند ممکن است باعث ایجاد تنش‌های پسماند شوند. روش سوراخ کاری روشی برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند

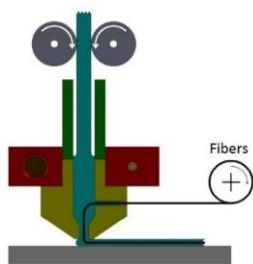
جدول ۲) متغیرهای چاپ نمونه‌ها

مقدار پارامتر	پارامتر
۰/۶ mm	قطر نازل
۰/۴ mm	عرض روزن رانی (width extrusion)
-۰/۰۲ mm	فاصله هوایی بین رشته‌ها (air gap)
۰/۲۲ mm	ارتفاع لایه‌ها (layer height)
°	الگوی پرشدن (fill pattern)
۰/۱ mm	همپوشانی رشته‌ها و کانتور (outline overlap)
۶۵ °C	دمای بستر (bed temperature)
۱۰ mm/s	سرعت چاپ نمونه‌ها (printing speed)

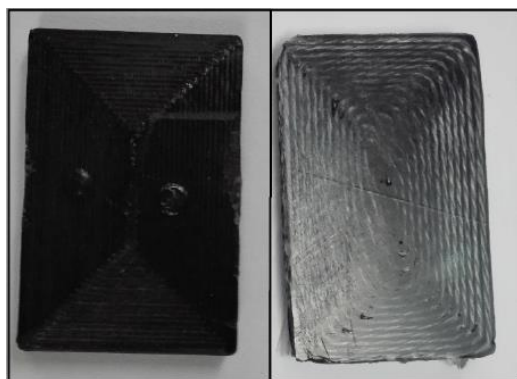
شده و بر روی میز دستگاه و یا لایه قبلی روزن رانی می‌شوند. برای ساخت کلیه نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف پیوسته، چاپگر FDM با نازل مخصوص طراحی شده برای سیستم آغشته سازی هم‌زمان استفاده شد. الیاف شیشه از طریق ورودی خود در سطح جانبی نازل وارد محفظه مذاب شده و رشته‌ها به صورت آغشته شده از خروجی نازل خارج شده و بر روی میز دستگاه و یا لایه قبلی روزن رانی می‌شوند. شکل ۳ سیستم آغشته سازی هم‌زمان استفاده شده را نشان می‌دهد [7].

نمونه‌های تقویت شده با ابعاد ۴×۲۰×۳۰ میلی‌متر با الیاف ۲۵ درصد و نمونه تقویت نشده با ابعاد یکسان جهت بررسی میزان تنش پسماند ایجاد شده تولید شدند. نمونه های پرینت شده در شکل ۴ آورده شده است.

اطلاعات و خواص مورد نیاز جهت استخراج مقادیر کرنش ازاد شده نظیر نسبت پواسون، خواص کششی و مدول الاستیسیته در جدول ۳ آورده شده است و با در نظر گرفتن مدل رفتاری الاستیک خطی برای ماده مورد نظر محاسبات انجام گردید.



شکل ۳) فرایند چاپ نمونه تقویت شده با الیاف ممتد [7]



شکل ۴) نمونه های تقویت شده با الیاف و بدون الیاف پرینت شده

$$\sigma_x = \frac{E}{2} \left( \frac{\epsilon_3 + \epsilon_1}{b} - \frac{\epsilon_3 + \epsilon_1}{a(1+\nu)} \right) \quad (9)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{2} \left( -\frac{\epsilon_3 + \epsilon_1}{a(1+\nu)} - \frac{\epsilon_3 + \epsilon_1}{b} \right) \quad (10)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2} \left( -\frac{\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2}{b} \right) \quad (11)$$

در این روابط،  $\sigma_x$  و  $\sigma_y$ ، تنش پسماند در جهت  $x$  و  $y$ ،  $\tau_{xy}$ ، تنش پسماند برشی در صفحه  $xy$ ،  $E$ ، مدول الاستیک،  $\epsilon_1$ ،  $\epsilon_2$  و  $\epsilon_3$ ، کرنش‌های اندازه‌گیری شده در جهت کرنش‌سنج‌های نشان داده شده در شکل ۲،  $\nu$ ، ضریب پواسون و  $\bar{a}$  و  $\bar{b}$ ، ثابت مواد برای انجام کالیبراسیون، می‌باشند.

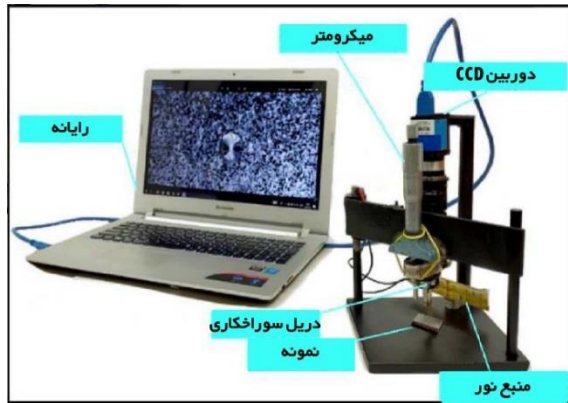
### ۳-روش تحقیق

از میان فرایندهای ساخت افزودنی، فرآیند لایه نشانی مذاب که به اختصار FDM بیان می‌شود، به دلیل هزینه پایین، سادگی و توانایی بالای این فرآیند در تولید ساختارهای نسبتاً پیچیده مورد توجه صنایع و همچنین عموم قرار گرفته است. تکنولوژی ساخت افزایشی یک تکنولوژی تولید پیشرفته است که برای ساخت قطعات به صورت لایه-لایه به طور مستقیم از یک فایل مدل سه بعدی استفاده می‌شود. این فرایند برای ساخت یک جسم از افزودن مواد به هر لایه و تکمیل لایه قبلی و افزودن لایه جدید بر روی لایه پیشین استفاده می‌کند، که مزایایی را برای تولید قطعات پیچیده با زمان چرخه کوتاه تر و هزینه های پایین تر نسبت به فرایندهای تولید سنتی ایجاد می‌کند [11]. فرآیند لایه نشانی مذاب همانند سایر فرایندها تابع متغیرهای مختلفی بوده که هر یک بر خواص نهایی نمونه موثر بوده، بنابراین بررسی خواص قطعات تولید شده توسط این فرآیند از جمله خواص مکانیکی و تنش پسماند ایجاد شده در آنها از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.

در این پژوهش از فیلامنت پلی لاکتیک اسید با قطر ۱/۷۵ میلی‌متر خریداری شده از شرکت ایسان استفاده شده است. همچنین از دستگاه پرینتر سه بعدی Quantum 2020 با ابعاد کاری ۲۰۰×۲۰۰×۲۰۰ استفاده شد. برای اندازه‌گیری خواص مکانیکی از دستگاه آزمون کشش Santam STM-20 استفاده می‌شود. به منظور بررسی اثر افزایش الیاف ممتد بر روی خواص مکانیکی نمونه ها، نمونه ها در دو حالت تقویت شده با الیاف و تقویت نشده، طراحی و ساخته شدند. برای بررسی خواص کششی قطعات، نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM D638 Type IV در راستای الیاف چاپ و تحت آزمون کشش قرار گرفتند. سایر شرایط چاپ نمونه‌ها در جدول ۲ آمده است.

برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف پیوسته، چاپگر FDM با نازل مخصوص طراحی شده برای سیستم آغشته سازی هم‌زمان استفاده شد. الیاف شیشه از طریق ورودی خود وارد محفظه مذاب شده و رشته‌ها به صورت آغشته شده از نازل خارج

آزاد سازی تنش پسماند در قطعات در مراحل و عمق های مشخص انجام گردید. ازمون برهمنگاری تصاویر دیجیتال و سوراخکاری به کمک دستگاه ساخته شده در آزمایشگاه اتصالات و ازمون های غیر مخرب پیشرفته، دانشگاه تربیت مدرس انجام گردید. دستگاه ساخته شده در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵) دستگاه برهمنگاری تصاویر دیجیتال و سوراخکاری

نمونه ای از مراحل انجام عملیات سوراخکاری و تصویر برداری در شکل ۶ آورده شده است. به کمک دستگاه ساخته شده بعد از هر مرحله عملیات سوراخکاری، فرز مورد استفاده جهت سوراخکاری از قسمت جلوی دوربین جابجا شده و سپس عملیات تصویر برداری انجام می گردد.



شکل ۶) عملیات سوراخکاری روی نمونه ی چاپ شده

#### ۴- ارایه نتایج و بحث

برای بدست آوردن داده های دقیق و اندازه گیری کرنش، آماده سازی سطح و همچنین یافتن تنظیمات سخت افزاری و نرم افزاری مناسب امری ضروری است. در این راستا تنظیمات و روش های مورد استفاده در این آزمون در ادامه آورده شده است و منابع خطای احتمالی بررسی شده اند تا بتوان با کنترل و به حداقل رساندن آنها نتایج دقیق تری بدست آورد. آزمایش های اولیه برای

جدول ۳) خواص مکانیکی قطعات چاپ شده

عنوان	خواص	مقدار	واحد
PLA خالص	مدول الاستیسیته	۲/۵	GPa
	استحکام کششی	۵۴	MPa
	ضریب پواسون	۰/۳۵	-
نمونه تقویت شده	مدول الاستیسیته	۱۶	GPa
	استحکام کششی	۲۶۰	MPa
	ضریب پواسون	۰/۳۵	-

میزان استحکام کششی و مدول الاستیسیته تئوری با استفاده از روابط ۱۲ و ۱۳ (قانون اختلاط) محاسبه شدند [19]:

$$\sigma_c = \sigma_f^* V_f + \sigma_m^* (1 - V_f) \quad (12)$$

$$E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (13)$$

که در این روابط  $\sigma$  و  $E$  به ترتیب نشانگر استحکام کششی و مدول الاستیسیته،  $V$  کسر حجمی الیاف و  $c$ ،  $f$  و  $m$  به ترتیب نشانگر کامپوزیت، الیاف و زمینه پلیمری هستند روابط بالا در شکست مواد مرکبی که الیاف تردتر از زمینه پلیمری باشند استفاده می شود.

حضور الیاف در این فرآیند نیازمند تغییر برخی از متغیرهای فرآیند بوده که از جمله آن ها می توان به تعیین میزان درصد الیاف و تغییر ضریب خروجی مواد در حین چاپ نمونه اشاره کرد. به عنوان مثال با در نظر گرفتن طول مشخصی از مسیر حرکتی نازل، طول و عرض سطح مقطع ایجاد شده به ترتیب عرض روزن رانی و ارتفاع لایه را نشان می دهد. با فرض ارتفاع لایه  $0.22$  میلی متر میزان عرض روزن رانی با استفاده از فرمول ۱۴ محاسبه می گردد [20].

$$w = \frac{\pi d_f^2}{4 \times h \times v_f} \quad (14)$$

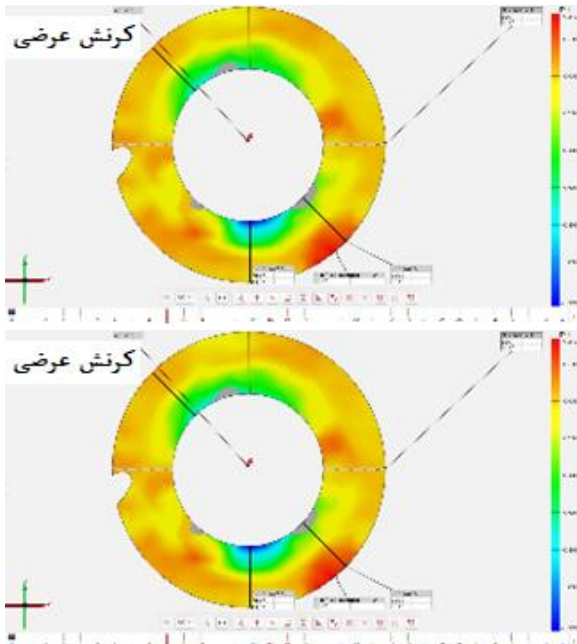
در این فرمول  $d$  قطر،  $h$  ارتفاع لایه،  $v$  کسر حجمی و  $f$  نشانگر الیاف است. حضور الیاف در سطح مقطع رشته ایجاد شده در حین چاپ نمونه نرخ تغذیه پلیمر باید کاهش پیدا کرده و مقدار آن باید در حین G-Code گیری نمونه مدنظر قرار گیرد. این مقدار با استفاده از فرمول ۱۵ محاسبه می شود.

$$F = 1 - (\pi d_f^2 / 4wh) \quad (15)$$

در روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال جهت تصویر برداری از نرم افزار عکس برداری 2.4 IC Capture استفاده شد. پس از عکس برداری از نمونه ها به کمک الگوریتم های پردازش تصویر میدان جابجایی محاسبه خواهد شد. در این پژوهش از نرم افزار پردازش تصویر GOM Correlate استفاده شد. تصویر اول قبل از سوراخکاری به عنوان عکس مرجع گرفته شده و بعد از بارگذاری تصاویر بعدی گرفته می شود. با تحلیل این تصاویر در الگوریتم برهمنگاری میدان جابجایی و کرنش های آزاد شده در اثر سوراخکاری به دست می آید. برای بررسی کرنش پسماند، قطعات تحت عملیات سوراخکاری قرار گرفته و تصویر برداری بر روی آن ها انجام گرفت. عملیات سوراخکاری با فرز انگشتی ۲ میلی متر برای

اعوجاج لنز باعث ایجاد خطای سیستماتیک می‌شود، که می‌تواند از طریق الگوریتم‌های اختصاصی<sup>[17]</sup> یا کالیبراسیون مناسب تا حدی جبران شود<sup>[6]</sup>. در این راستا با اعمال فیلترهای موجود در نرم افزار پردازش تصویر و همچنین کنترل دقیق تعامد محور دوربین بر سطح قطعه کار (که در صورت عدم رعایت خطای زیادی ایجاد می‌کند) با دقت انجام گردید.

خطاهای مربوط به تغییر منبع نور ممکن است در نتایج نهایی تاثیر گذار باشند<sup>[15]</sup>. نور باید پایدار و یکنواخت باشد تا نویز را کاهش دهد و تصاویر آزمایشی خام را با کیفیت بهتر ثبت کند<sup>[3]</sup>. در این راستا تمامی مراحل در محیطی تاریک و بدون نویز انجام گرفت و تنها از منبع نور سفید متصل شده به دستگاه استفاده شد. برای آزمون برهمنگاری و سوراخکاری مقدار کرنش‌های آزاد شده حول سوراخ در راستاهای ۰ و ۹۰ درجه مورد بررسی قرار گرفت و نمودار گرافیکی مربوط به توزیع کرنش‌های آزاد شده حول سوراخ، در شکل ۹ آورده شده است.

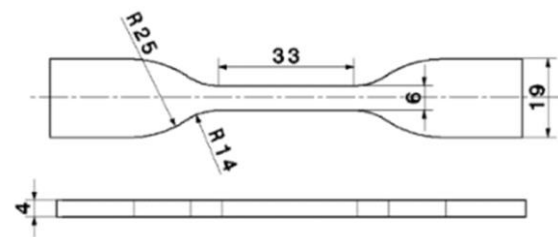


شکل ۹) نمونه ای از کرنش‌های آزاد شده در راستاهای مشخص شده اطراف سوراخ

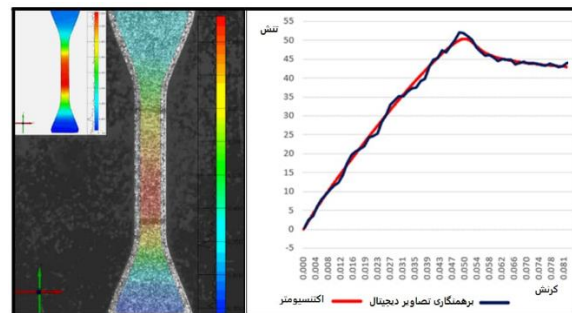
بعد از انجام آزمون و آنالیز برهمنگاری، کرنش‌ها در دو راستای طولی و عرضی در نمونه‌های بدون الیاف و تقویت‌شده با الیاف شیشه توسط آزمون برهمنگاری تصاویر دیجیتال و سوراخکاری اندازه‌گیری شد. روی هر کدام از نمونه‌ها در هر مرحله از سوراخکاری، سه سری آزمون انجام گرفت که نتایج برای هر کدام از نمونه‌ها به تفکیک در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. شکل ۱۱ به صورت مقایسه‌ای نتایج مربوط به کرنش‌های آزاد شده در هر مرحله از سوراخکاری در نمونه‌های بدون الیاف و تقویت شده با الیاف را ارائه می‌دهد.

شناسایی جابجایی‌های مکانی می‌تواند در جلوگیری از کرنش‌های خارج از صفحه در اندازه‌گیری‌ها به کمک روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال دو بعدی کمک کند. در راستای صحت سنجی نتایج دستگاه و سیستم برهمنگاری تصویر دیجیتال، می‌توان از مقایسه‌ی نتایج کرنش‌های اندازه‌گیری شده توسط روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال و دستگاه کشش استفاده نمود<sup>[18]</sup>. بدین منظور، نمونه‌ی کشش استاندارد ASTM D638Type IV (شکل ۷) تحت آزمون کشش قرار گرفت. سطح نمونه باید دارای الگوی لکه‌ای باشد. به کمک دوربین دو بعدی CCD، میزان جابه‌جایی و کرنش‌ها اندازه‌گیری و محاسبه گردید. نمونه به کمک دستگاه کشش مدل SANTAM-STM20 با لودسل ۲۰۰۰۰ نیوتنی و با سرعت کشش دو میلی‌متر بر دقیقه انجام گردید. بعد از تست کشش، نتایج مربوط به روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال و روش استاندارد آزمون کشش با یکدیگر مقایسه شدند که نشان‌دهنده‌ی اختلاف ناچیز نتایج دو روش مطابق شکل ۸ می‌باشد.

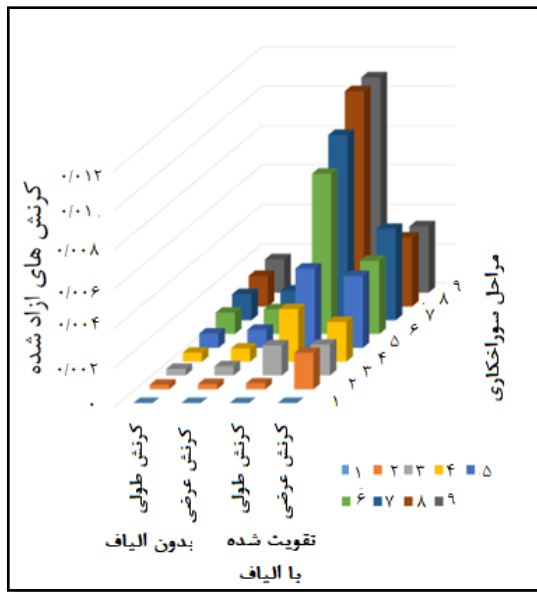
کیفیت الگوی لکه ای تصادفی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. این امر تا حدودی بر نتایج برهمنگاری تصاویر دیجیتال تأثیر می‌گذارد<sup>[15]</sup>. الگوی لکه‌ای با کیفیت پایین منجر به عدم همبستگی در برخی از گره‌های مش المان بندی سطح قطعه در نرم افزار پردازش تصویر می‌شود. همچنین تأثیر مشخصی بر دقت در محاسبه تابع همبستگی دارد<sup>[16]</sup>. در این راستا الگوهای لکه‌ای در تراکم و اندازه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و الگوی لکه ای با اندازه و تراکم بهینه انتخاب شد که مشکل عدم همبستگی در نرم افزار پردازش تصویر به وجود نیامد استفاده شد.



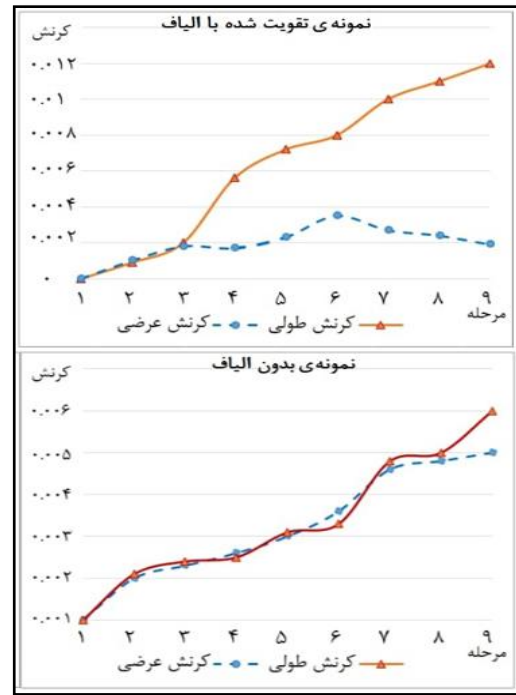
شکل ۷) نمونه‌ی کشش استاندارد ASTM D638Type IV



شکل ۸) اختلاف نتایج روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال و آزمون کشش



شکل ۱۱) مقایسه کرنش‌های بدست آمده از روش تجربی



شکل ۱۰) کرنش‌های آزاد شده در هر مرحله از سوراخکاری در نمونه‌های بدون الیاف و تقویت‌شده با الیاف

تقویت نشده در دو راستای x و y به ترتیب برابر با ۰/۱۷ و ۰/۲ درصد بدست آمد.

همانطور که از نتایج مشخص است، در نمونه‌های بدون الیاف به دلیل ساختار نسبتاً همگن، کرنش‌های آزاد شده در دو جهت طولی و عرضی تقریباً یکسان است و اختلاف چندانی با هم ندارند. در نمونه‌های تقویت شده با الیاف ممتد، به دلیل وجود الیاف در ساختار میزان کرنش‌های آزاد شده در تمامی مراحل بیشتر از نمونه‌ی بدون الیاف است و همچنین کرنش‌های آزاد شده در راستای طولی، به مقدار تقریباً سه برابر بیشتر از کرنش‌های آزاد شده در راستای عرضی می‌باشد. علت این امر را علیرغم سرعت پایین‌تر چاپ نمونه تقویت شده با الیاف، می‌توان به تنش‌های ایجاد شده در خود الیاف و پیچش‌های احتمالی الیاف در حین فرآیند چاپ نمونه مربوط دانست. با توجه به ثابت بودن تمامی پارامترها در فرآیند ساخت نمونه‌ها به روش لایه‌نشانی مذاب به جز افزودن الیاف ممتد به نمونه و بررسی میزان کرنش‌های آزاد شده، می‌توان نتیجه گرفت که با افزودن الیاف ممتد، کرنش‌های آزاد شده ناشی از فرآیند سوراخکاری در نمونه‌ها، افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که کرنش‌های ارائه شده، میانگین سه مرتبه آزمایش برای هر مرحله‌ی سوراخکاری بوده و از تکرارپذیری مطلوبی برخوردارند.

تنش پسماند به دلیل ذوب و انجماد پی در پی در فرآیند ساخت نمونه‌ها و به وجود آمدن گرادیان‌های حرارتی غیر یکنواخت در نمونه‌های ساخته شده به کمک فرآیند ساخت افزایشی در نمونه‌ها

با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان تاثیر بالای حضور الیاف در نمونه‌های پرینت شده به کمک روش لایه نشانی مذاب را اثبات نمود که یکی از مهم‌ترین عوامل می‌تواند ناشی از افزایش تنش پسماند به وجود آمده در قطعات باشد.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، کرنش‌های پسماند ناشی از تنش پسماند آزاد شده در اثر سوراخکاری در قطعات پلیمری پرینت شده با ترکیب دو روش سوراخ کاری مرکزی و برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال بررسی شد. در این راستا، با توجه به تئوری روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال و روش سوراخکاری مرکزی، تجهیزات مورد نیاز برای انجام عملیات تصویربرداری پس از هر مرحله سوراخکاری در حین آزمون، طراحی و ساخته شد. با استفاده از دوربین CCD و روش برهم‌نگاری تصویر دیجیتال، کرنش‌های آزاد شده در اطراف ناحیه سوراخکاری شده در قطعات، اندازه‌گیری شد. روش سوراخکاری مزایای قابل توجهی اعم از تجهیزات لازم در دسترس و عملیات آسان دارند. مهمترین مزیت این روش و تجهیزات ارایه شده، امکان انجام عملیات تصویربرداری پس از هر مرحله عملیات آزاد سازی تنش روی قطعات است. همچنین، این روش باعث کاهش هزینه و زمان آزمایش می‌شود. آماده سازی قبل از آزمایش در مقایسه با روش استاندارد سوراخکاری کاهش می‌یابد.

طبق نتایج بدست آمده بیشینه میزان کرنش ایجاد شده در نمونه تقویت شده با الیاف در راستای x و y به ترتیب برابر با ۱/۰۹ و ۰/۳۴ درصد بوده است. بیشینه میزان کرنش‌های آزاد شده در نمونه



- 14-ASTM E. 837-13a Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. ASTM International, West Conshohocken. 2013.
- 15- Haddadi H, Belhabib S. Use of rigid-body motion for the investigation and estimation of the measurement errors related to digital image correlation technique. *Optics and Lasers in Engineering*. 2008;46(2):185-96.
- 16- Zhang DS, Arola DD. Applications of digital image correlation to biological tissues. *Journal of Biomedical Optics*. 2004;9(4):691-9.
- 17- Yoneyama S, Kikuta H, Kitagawa A, Kitamura K. Lens distortion correction for digital image correlation by measuring rigid body displacement. *Optical engineering*. 2006;45(2):023602.
- 18- Azadi, F., et al., Development of digital image correlation method for non-destructive measurement of residual stress. Fifteenth National Conference and Fourth International Conference on Manufacturing Engineering, Tehran, 2018,
- 19- Kaw, A.K. *Mechanics of composite materials*. CRC press; 2005,
- 20- Hedayati SK, Behraves AH, Hasannia S, Saed AB, Akhondi B. 3D printed PCL scaffold reinforced with continuous biodegradable fiber yarn: A study on mechanical and cell viability properties. *Polymer Testing*. 2020;83:106347.
- 21- Yarn. A Study on Mechanical and Cell Viability Properties Mechanics of composite materials. *Polymer Testing*, 2020. 83: 106347.

به صورت ذاتی وجود دارد. با توجه به نتایج این مقاله می‌توان گفت که حضور الیاف بر میزان تنش پسماند موجود در قطعات تاثیر گذاشته و باعث افزایش آن می‌شود و متعاقباً یکی از عوامل اصلی افزایش کرنش های آزاد شده در نمونه‌های چاپ شده می‌باشد.

**تأییدیه اخلاقی:** نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله رعایت کامل اصول اخلاقی را مدنظر قرار داده‌اند.

**تعارض منافع:** تمامی مطالب مذکور توسط نویسندگان انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

**منابع مالی:** تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است

### منابع

- 1- Shokrieh MM, *Residual stresses in composite materials*. Woodhead publishing; 2014.
- 2- Schajer GS, editor. *Practical residual stress measurement methods*. John Wiley & Sons; 2013.
- 3- Schajer GS. Advances in hole-drilling residual stress measurements. *Experimental mechanics*. 2010;50(2):159-68.
- 4- Ahn SH, Montero M, Odell D, Roundy S, Wright PK. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid prototyping journal*. 2002.
- 5- Sood AK, Ohdar RK, Mahapatra SS. Improving dimensional accuracy of fused deposition modelling processed part using grey Taguchi method. *Materials & design*. 2009;30(10):4243-52.
- 6- Patterson EA, Hack E, Brailly P, Burguete RL, Saleem Q, Siebert T, Tomlinson RA, Whelan MP. Calibration and evaluation of optical systems for full-field strain measurement. *Optics and Lasers in Engineering*. 2007;45(5):550-64.
- 7-Akhondi B, Behraves AH, Bagheri Saed A. Improving mechanical properties of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites produced by FDM 3D printer. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2019;38(3):99-116.
- 8- Schajer GS, Winiarski B, Withers PJ. Hole-drilling residual stress measurement with artifact correction using full-field DIC. *Experimental Mechanics*. 2013;53(2):255-65.
- 9- Huang X, Liu Z, Xie H. Recent progress in residual stress measurement techniques. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2013;26(6):570-83.
- 10- Sutton MA, Wolters WJ, Peters WH, Ranson WF, McNeill SR. Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and vision computing*. 1983;1(3):133-9.
- 11- Gebhardt, A., *Rapid prototyping*. 2003.
- 12- Prevey PS. X-ray diffraction residual stress techniques. *ASM International, ASM Handbook*. 1986;10:380-92.
- 13-Adachi T, Sekino T, Nakayama T, Kusunose T, Niihara K. Measurement of microscopic stress distribution of multilayered composite by X-ray stress analysis. *Materials Letters*. 2003;57(20):3057-62.