



تأثیر پرینت سه‌بعدی و قالب‌گیری تحت فشار روی ناهمسانگردی نمونه‌های میکرونی ای‌بی‌اس: یک مطالعه‌ی مقایسه‌ای بر اساس همبستگی تصاویر دیجیتال

سینا نظری اونلقی^۱، علیرضا صادقی^{۱*}، مراد کریم‌پور^۱، هادی محمدی^۲

^۱ دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲ دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۲۸

بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۰۶

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۳

ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۱۳

کلمات کلیدی:

آکریلونیتریل بوتادین استایرن

(ای‌بی‌اس)

پرینت سه‌بعدی

قالب‌گیری تحت فشار

همبستگی تصاویر دیجیتال

ناهمسانگردی

خلاصه: در این مقاله ضرایب ناهمسانگردی نرمال در دو نمونه‌ی میکرونی پرینت شده و قالب‌گیری شده تحت فشار از جنس ای‌بی‌اس محاسبه و مقایسه شده است. برای این منظور، نمونه‌های میکرونی پرینت شده و قالب‌گیری شده از جنس ای‌بی‌اس فرآوری شده است. نمونه‌ها با یک دستگاه تست کشش میکرونی و در میدان دید میکروسکوپ نوری کشیده شده و در حین کشش از تغییر شکل نمونه‌ها فیلم تهیه شده است. فریم‌هایی از این فیلم برای پیاده‌سازی همبستگی تصاویر دیجیتال انتخاب شده و توزیع کرنش روی سطح میکرونی به صورت تابعی از تغییر شکل بدست آمده است. نتایج تحلیل همبستگی تصاویر دیجیتال با مشاهدات تجربی توافق کاملی دارد. از روی مولفه‌های کرنش‌های سطحی و با فرض تراکم‌ناپذیری پلاستیک، مقادیر ضرایب ناهمسانگردی نرمال در سطح میکرونی بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر شکل پلاستیک در هر دو نمونه با ناهمسانگردی همراه است. در کرنش‌های پلاستیک پائین، نمونه‌ی پرینت شده رفتار ناهمسانگردتری نسبت به نمونه‌ی تک‌لایه از خود نشان می‌دهد. با افزایش کرنش اعمالی، مقدار ضریب ناهمسانگردی برای نمونه‌ی پرینت شده افزایش یافته و برای نمونه‌ی پرس شده کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

سه‌بعدی نسبت به روش‌های سنتی ساخت شامل سرعت بالای تولید، کاهش یا حذف دورریز مواد، انعطاف‌پذیری روش نسبت به هندسه‌های پیچیده و دقت بالای تکنیک می‌باشد [۱ و ۲]. در این روش امکان ساخت قطعات از جنس پلیمر [۳]، فلز [۴ و ۵]، سرامیک [۶] و کامپوزیت [۷-۹] وجود دارد.

آکریلونیتریل بوتادین استایرن (ای‌بی‌اس)^۵ پلیمر ترموپلاستیکی است که به صورت گسترده‌ای در پرینت سه‌بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. قیمت پائین، خواص مکانیکی مناسب و مقاومت بالا در برابر ضربه از دلایل این محبوبیت روزافزون می‌باشد. در سال‌های اخیر تحقیقات وسیعی روی خواص مکانیکی و شکست قطعات پرینت شده با ای‌بی‌اس صورت پذیرفته است.

رونده و همکاران [۱۰ و ۱۱] با انجام تست‌های کششی و برشی

پرینت سه‌بعدی یا ساخت افزودنی روشی است که امکان ساخت قطعات با اشکال پیچیده را از روی مدل‌های سه‌بعدی کامپیوتری فراهم می‌آورد. در این روش، مدل کد^۱ سه‌بعدی به صورت فایل استریولیتوگرافی^۲ ذخیره و در یک نرم‌افزار اسلایسر^۳ که قطعه را به صورت لایه‌های مختلفی روی هم برش می‌زند فراخوانی می‌شود. خروجی این نرم‌افزار یک فایل جی‌کد^۴ است که به پرینتر وارد می‌شود. پرینتر مواد مذاب را اکستروود کرده و بصورت لایه‌هایی روی هم می‌افزاید تا نهایتاً قطعه‌ی سه‌بعدی ایجاد شود. مزایای پرینت

- 1 . CAD
- 2 . STL
- 3 . slicer
- 4 . G-code

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: alireza.sadeghi@ut.ac.ir

5 . Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.

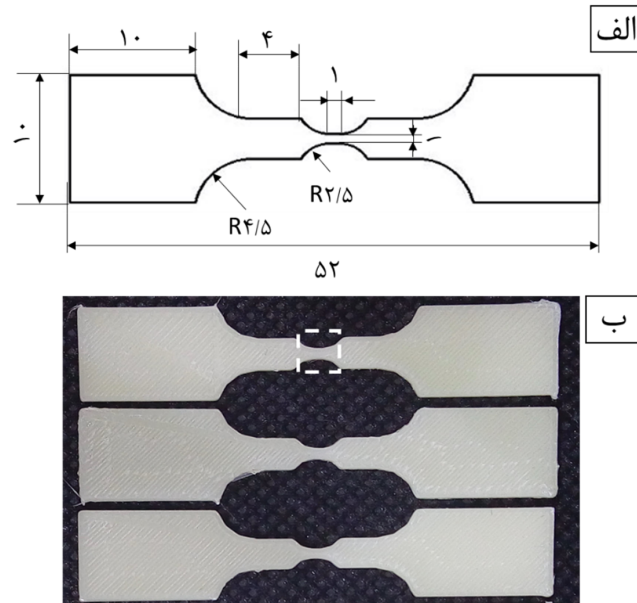


داد که نمونه‌های با زاویه‌ی رستر صفر درجه (جهت پرینت منطبق بر جهت کشش) بالاترین استحکام کششی و مدول الاستیک را دارند و نمونه‌های $45^\circ / -45^\circ$ بهترین عمل کرد را در برابر خستگی از خود بروز دادند.

ایساک و همکاران [۱۸] رفتار شکست ای‌بی‌اس پرینت شده را تحت بارگذاری‌های دینامیکی و استاتیکی بررسی کردند. آن‌ها سه معماری برای پرینت لایه‌ها در نظر گرفتند: $90^\circ / 0^\circ$ ، $45^\circ / -45^\circ$ و $45^\circ / 90^\circ / -45^\circ / 0^\circ$. برای بررسی رفتار دینامیکی از تست میله‌ی فشار هاپکینسون اصلاح شده استفاده کردند. اندازه‌گیری میدان‌های جابجایی با استفاده از همبستگی تصاویر دیجیتال و عکس‌برداری فوق سریع نمونه‌های با ناچ وی-شکل انجام گرفت. با وجود همسانگردی الاستیک، رفتارهای شروع و رشد ترک متمایز و مودهای واماندگی مختلفی برای سه معماری مذکور تحت بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی مشاهده شد. معماری $45^\circ / 90^\circ / -45^\circ / 0^\circ$ نسبت به دو معماری دیگر رفتار رشد ترک بهتری را نشان می‌داد که این مسئله تأثیر معماری لایه‌ها بر رفتار شکست را نشان می‌دهد. گاردان و همکاران [۱۹] روش جدیدی را برای نشان دادن لایه‌ها ارائه کردند. بر اساس این روش، جهت پرینت باید منطبق بر جهات اصلی تنش در نمونه باشد. مؤلفین جهت ارزیابی روش ارائه شده و تأثیر آن روی رفتار شکست نمونه‌ها، نمونه‌هایی را با و بدون در نظر گرفتن معیار فوق پرینت کردند. نتایج حاکی از این بود که رعایت معیار ارائه شده باعث بهبود ۳۰ درصدی در چقرمگی شکست نمونه‌ها می‌شود. همچنین نتایج همبستگی تصاویر دیجیتال نشان داد که اصلاح مذکور در جهت لایه‌نشانی باعث تغییر رفتار رشد ترک به رفتاری داکتیل‌گونه و کاهش نرخ رشد ترک می‌شود. کانوی و پاتاکی [۲۰] رفتار ترک‌خوردن^۳ را در ای‌بی‌اس پرینت شده و قالب‌گیری شده‌ی تحت فشار با استفاده از همبستگی تصاویر دیجیتال بررسی کردند. در نمونه‌ی قالب‌گیری شده، با رسیدن تنش به تنش آستانه‌ای ترک‌خوردن، ترک‌ها به صورت همزمان در مقطع نمونه ظاهر می‌شوند و به صورت یکنواختی توزیع شده‌اند. در نمونه‌ی پرینت شده، ترک‌ها از یک نقطه‌ی اولیه شروع می‌شوند و محصول حفرات بزرگ داخلی و مصنوعات پرینت هستند. همچنین اندازه‌ی این ترک‌ها در مقایسه با اندازه‌ی آنها در نمونه قالب‌گیری شده به مراتب ضخیم‌تر است. به‌علاوه

به همراه همبستگی تصاویر دیجیتال میزان ناهمسانگردی در خواص کششی و برشی قطعات پرینت شده با ای‌بی‌اس را بررسی کردند. آن‌ها نمونه‌های کششی و برشی با جهات رستر^۱ و بیلد^۲ مختلف را آزمایش کردند و نتیجه گرفتند که به دلیل ناهمسانگردی، امکان تعیین خواص برشی با استفاده از خواص کششی وجود ندارد. ترادو و همکاران [۱۲] تأثیر افزودنی‌های مختلف را روی ناهمسانگردی مکانیکی ای‌بی‌اس مطالعه کردند. بر اساس این تحقیق، ترکیب ای‌بی‌اس با استایرن اتیلن بوتادین استایرن و پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در ناهمسانگردی مکانیکی ای‌بی‌اس می‌شود. رنکوهی و همکاران [۱۳] تأثیر ضخامت و جهت‌گیری لایه‌ها روی خواص مکانیکی نمونه‌های پرینت شده با ای‌بی‌اس را به‌صورت آماری تحلیل کردند. آن‌ها نشان دادند که ضخامت و جهت‌گیری لایه‌ها هر دو تأثیر قابل ملاحظه‌ای روی خواص مکانیکی نمونه‌ها دارند. به‌عنوان مثال، نمونه‌های پرینت شده با ضخامت لایه 0.2 میلی‌متر در مقایسه با نمونه‌ها با ضخامت لایه 0.4 میلی‌متر مدول یانگ و استحکام نهایی بیشتری داشتند. رودریگوئز و همکاران [۱۴] در یک مطالعه‌ی تجربی خواص مکانیکی مونوفیلامنت را با خواص مکانیکی فیلامنت پرینت شده مقایسه کردند. بر طبق این تحقیق مدول یانگ و استحکام فیلامنت پرینت شده نسبت به مونوفیلامنت به ترتیب ۱۱ تا ۳۷ درصد و ۲۲ تا ۵۷ درصد کاهش داشت. کرس و همکاران [۱۵] تأثیر بازیافت را بر روی خواص مکانیکی ای‌بی‌اس بررسی کردند. آن‌ها ۳۳۷ تست کششی روی ای‌بی‌اس دست‌نخورده و بازیافت شده انجام دادند و مشاهده کردند بازیافت، تخلخل ای‌بی‌اس پرینت شده را از حدود ۱۱ درصد حجمی تا حدود ۱۷ درصد حجمی افزایش می‌دهد و در نتیجه استحکام کششی و استحکام شکست حدود ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین کرنش شکست حدود ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. این کاهش، به نوبه‌ی خود، باعث کاهش ۳۷ درصدی چقرمگی می‌شود. ژانگ و همکاران [۱۶] رفتار کششی و خزشی ای‌بی‌اس پرینت شده را مطالعه کردند. آن‌ها نمونه‌هایی با سه زاویه رستر 0° ، 45° و 90° را بررسی کردند و دریافتند که زاویه‌ی 0° بیشترین استحکام کششی و زاویه 90° بیشترین استحکام خزشی را دارد. زمییمان و همکاران [۱۷] تأثیر جهت پرینت لایه‌ها روی خواص کششی و خستگی ای‌بی‌اس را به صورت تجربی بررسی کردند. تحقیقات زمییمان و همکارانش نشان

1 . raster
2 . build



شکل ۱. (الف) ابعاد نمونه‌های میکرونی به میلی‌متر (ب) نمونه‌های میکرونی پرینت شده
Fig. 1. (a) Dimensions of micro-specimens in mm (b) printed specimens

تحت فشار را روی رفتار میکرومکانیکی ای‌بی‌اس مطالعه کردند [۲۲]. آن‌ها نشان دادند که نمونه‌های پرینت شده نسبت به نمونه‌های قالب‌گیری شده خواص مکانیکی بهتری از خود نشان می‌دهند. آن‌ها همچنین با آنالیز همبستگی تصاویر دیجیتال توزیع کرنش طولی را در دو نمونه بدست آوردند و نشان دادند که در کرنش‌های ماکروسکوپی یک برابر، کرنش‌های موضعی بزرگ‌تری در نمونه‌ی پرینت شده به‌وجود می‌آید. در این مقاله، تأثیر دو فرآیند مذکور (پرینت و قالب‌گیری) بر روی ضریب ناهمسانگردی نرمال نمونه‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. برای نیل به این هدف، نمونه‌های میکرونی پرینت شده (چند لایه) و قالب‌گیری شده (تک‌لایه) با استفاده از دستگاه تست کشش میکرو و در زیر لنز یک میکروسکوپ نوری کشیده شده‌اند. در حین تغییر شکل، از نمونه فیلم تهیه شده و تصاویر خاصی از این فیلم برای آنالیز همبستگی تصاویر دیجیتال و بررسی تکامل ضریب ناهمسانگردی نرمال (به صورت تابعی از کرنش اعمالی) انتخاب شده است.

۲- آماده‌سازی نمونه‌ها و آزمون‌های تجربی

۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های میکرونی از جنس ای‌بی‌اس با ابعاد نشان داده شده در شکل ۱(الف) پرینت شده است. هندسه‌ی نمونه‌ها به‌گونه‌ای است که

با انتشار ترک‌ها در نمونه، اندازه حفرات داخلی هم بزرگ‌تر می‌شود. مکلوث و همکاران [۲۱] تأثیر جهت رستر و بیلد را بر روی چقرمگی شکست ای‌بی‌اس بررسی کردند. آن‌ها نمونه‌های کشش فشرده^۱ از جنس ای‌بی‌اس را در سه جهت متعامد پرینت کردند (جهت بیلد). برای هر کدام از جهات بیلد، الگوی رستر $45^\circ / -45^\circ$ و $10^\circ / 90^\circ$ در نظر گرفته شد. آن‌ها نتیجه گرفتند وقتی جهات لایه‌های فیلامت از حالت موازی با صفحه‌ی ترک به حالت عمود بر آن تغییر می‌یابد، چقرمگی شکست ۵۴ درصد افزایش می‌یابد. با این وجود جهات رستر تنها در یکی از جهات بیلد تأثیر قابل ملاحظه داشت. وقتی الگوی $10^\circ / 90^\circ$ به جای الگوی $45^\circ / -45^\circ$ در لایه‌های عمود بر صفحه‌ی ترک استفاده شود، چقرمگی شکست ۱۱ درصد کاهش می‌یابد.

به دلیل ماهیت پرینت و وجود جهات رستر و بیلد مختلف، ناهمسانگردی یکی از خواص ذاتی پلیمرهای پرینت شده است و به صورت گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است (مثلاً مراجع [۱۰ و ۱۱]). در این تحقیقات، نمونه‌های پلیمری پرینت شده در جهات مختلف، تحت بارگذاری کششی قرار گرفته و اختلاف در پاسخ‌های تنش-کرنش به‌دست آمده به‌عنوان معیاری از ناهمسانگردی ارزیابی شده است و عمدتاً ضریب ناهمسانگردی نرمال برای نمونه‌ها استخراج نشده است. مؤلفین این مقاله، اخیراً تأثیر دو فرآیند پرینت و قالب‌گیری

1 . Compact tension

جدول ۱. تنظیمات پرینت سه بعدی
Table 1. 3D printing parameters

مقدار	پارامتر پرینت
۲۳۵ °C	دمای نازل
۶۰ °C	دمای بستر
۵ mm/s	سرعت پرینت
۱۰۰٪	درصد پرشدگی
۰/۱۵ mm	ارتفاع لایه‌ها
۴۵ °	زاویه رستر

سیمپلی‌فای‌تری‌دی^۶ فراخوانی شد. در این نرم‌افزار کلیه پارامترها و تنظیمات پرینت صورت پذیرفته و مدل برش خورده به صورت فایل جی‌کد تولید شده است. تنظیمات پرینت در جدول ۱ ارائه شده است. این پارامترها بر اساس مقادیر گزارش شده در مرجع [۱۱] و قابلیت پرینتر در دسترس در تأمین دمای بستر انتخاب شده‌اند. این فایل در دستگاه پرینتر سه بعدی مینیاتوری مونوپرایس^۷ وارد شده است. در شکل ۱(ب) نمونه‌های پرینت شده نشان داده شده است.

برای بررسی تأثیر فرآیند روی ضریب ناهمسانگردی نرمال، با استفاده از قالب‌گیری تحت فشار، یک ورق ای‌بی‌اس (تک لایه) از جنس همان فیلامنت ای‌بی‌اس پرینت شده ساخته شده است. برای این منظور، فیلامنت را خرد کرده و ای‌بی‌اس‌های خرد شده در دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس (دمای ذوب تقریبی ای‌بی‌اس) و به مدت ۴ دقیقه حرارت داده شده است. سپس مواد مذاب تحت فشار ۱۵۰ بار (فشار پرس) و به مدت ۳ دقیقه پرس شده است تا ورقی به ضخامت ۱ میلی‌متر بدست آید. محصول پرس، در دمای آزمایشگاه خنک شده است. لازم به توضیح است که میزان فشار و زمان‌های ذکر شده به صورت تجربی و برحسب ضخامت و ظرفیت حرارتی صفحات قالب استفاده شده و نیز نوع پلیمر فرآوری شده به دست آمده است. از ورق بدست آمده، با فرز سی‌ان‌سی^۸ نمونه‌های میکرونی با ابعاد نشان داده شده در شکل ۱ تولید شده است.

با حرکت به سمت مرکز نمونه، ابعاد نمونه کوچکتر و کوچکتر می‌شود و نهایتاً مقطعی به ابعاد ۱ × mm ۱ در وسط نمونه شکل می‌گیرد. با توجه به اینکه تنش در این قسمت بالاتر از سایر قسمت‌های نمونه است، تغییر شکل در این ناحیه میکرونی متمرکز می‌شود. لازم به توضیح است که در استاندارد ای‌اس‌تی‌ام^۱ برای نمونه‌های معمولی (ماکروسکوپی) و زیراندازه^۲ ابعاد و هندسه استاندارد وجود دارد ولی برای نمونه‌های میکرونی، استاندارد وجود ندارد. برای همین، در مراجع مختلف از هندسه‌های متفاوتی برای تست نمونه‌های میکرونی استفاده شده است. وجه اشتراک همه‌ی این نمونه‌ها این است که در مرکز نمونه، یک سطح میکرونی یا نزدیک به میکرونی شکل می‌گیرد (ناحیه گیج^۳) که به علت تنش بالاتر، تمرکز کرنش در آن اتفاق می‌افتد و در واقع با کشیدن نمونه، این ناحیه میکرونی کشیده شده و رفتار میکرومکانیکی ماده ثبت می‌شود. سایر قسمت‌های نمونه جنبه‌ی حمایت‌کننده^۴ قسمت مرکزی (ناحیه میکرونی) را دارند تا طول کلی نمونه بزرگتر باشد. این طول کلی بزرگتر، باعث آسان‌تر شدن حمل، آماده‌سازی و گریپ کردن نمونه می‌شود. در مراجع [۲۳ و ۲۴] هندسه‌های متفاوتی برای نمونه‌های میکرونی معرفی یا استفاده شده است. هندسه در نظر گرفته شده برای نمونه‌های میکرونی در این مقاله، هندسه‌ای است که در مرجع [۲۲] معرفی شده است.

هندسه‌ی نمونه‌ها در نرم‌افزار کتیا ترسیم و فایل با پسوند اس‌تی‌ال^۵ استخراج گردیده است. این فایل در نرم‌افزار اسلایسر

۲-۲- تست کشش و همبستگی تصاویر دیجیتال

نمونه‌های پرینت شده و تک‌لایه با استفاده از یک دستگاه تست

6 . Simplify3D
7 . Monoprice
8 . CNC

1 . ASTM
2 . Subsize
3 . Gage
4 . Support
5 . STL



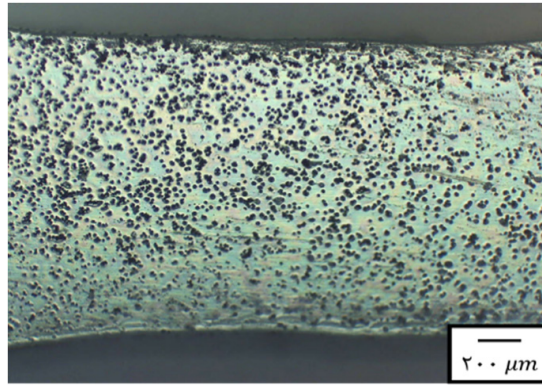
شکل ۲. ست‌آپ آزمایشگاهی (دستگاه تست کشش میکرو قرار گرفته در زیر لنز میکروسکوپ نوری)
Fig. 2. Experimental setup (a micro-tensile testing machine placed under an optical microscope)

قائم، نمونه از طریق لنزهای میکروسکوپ (از بالا) رصد می‌شود. کوچک‌ترین غیریکنواختی در پیچاندن، باعث خارج شدن بخشی از نمونه از وضوح^۳ شده و کاربر بلافاصله متوجه این موضوع شده و چرخش پیچ‌ها را به‌گونه‌ای تنظیم می‌کند که تمام سطح نمونه در وضوح قرار بگیرد. نمونه‌ها در زیر لنز با بزرگ‌نمایی ۵۰ برابر کشیده شده‌اند. در شکل ۲ تصویری از ست‌آپ^۴ آزمایشگاهی ارائه شده است. اندازه‌گیری میدان کرنش روی یک سطح میکرونی مورد علاقه با روش‌های سنتی نظیر نصب اکستنسومتر یا کرنش‌سنج به‌راحتی امکان‌پذیر نیست؛ زیرا اولاً ایجاد تماس بین نمونه و وسیله‌ی اندازه‌گیری کرنش بسیار دشوار است. ثانیاً این ابزارها تنها امکان اندازه‌گیری کرنش در جهات خاص را دارند و میدان کرنش را بدست نمی‌دهند. ثالثاً نصب این ابزارها خود باعث تقویت نمونه و بالا رفتن استحکام و سفتی می‌شود. تکنیک همبستگی تصاویر دیجیتال یک روش غیرمخرب، غیرتماسی، دقیق و انعطاف‌پذیر برای اندازه‌گیری میدان کرنش است. این روش، تصاویر دیجیتال گرفته شده در حین

کشش میکرونی که توسط مؤلفین ساخته شده با نرخ ۰/۰۰۵ بر ثانیه کشیده شده‌اند. جزئیات ساخت دستگاه در مرجع [۲۲] ارائه شده است. این دستگاه قبلاً برای مطالعه‌ی رفتار میکرومکانیکی مواد فلزی (آلیاژهای منیزیم) [۲۵] نیز با موفقیت به‌کار گرفته شده است. در حین کشش، دستگاه زیر میکروسکوپ نوری مدل سینوون ۸۵۰۲^۱ قرار داده شده است. دستگاه طوری در زیر لنز جانمایی می‌شود که مرکز نمونه‌ها (مقطع به ابعاد ۱ × mm) در زیر لنز قرار بگیرد. این جابجایی دستگاه در صفحه‌ی افق به صورت دستی انجام می‌شود. این کار یک بار و قبل از شروع تست صورت می‌پذیرد. برای جابجایی دستگاه در راستای قائم (به‌منظور دست یافتن به فاصله‌ای که تصویر میکروسکوپی دارای بالاترین وضوح است)، یک بستر مکانیکی^۲ یک درجه آزادی طراحی و ساخته شده است (پایه‌ای که در شکل ۲ در زیر میکروسکوپ قرار گرفته است). با پیچاندن پیچ‌های بستر، دستگاه با دقت میکرونی در راستای قائم جابجا می‌شود. همزمان با جابجایی استیج و در نتیجه جابجایی دستگاه تست کشش در راستای

3 . Focus
 4 . Setup

1 . Sinowon 8502
 2 . Mechanical stage



شکل ۳. نمونه لکه‌پاشی شده (آماده‌سازی شده برای پیاده‌سازی همبستگی تصاویر دیجیتال)
Fig. 3. Speckled specimen (prepared for DIC analysis)

کرنش ضخامتی با فرض تراکم‌ناپذیری پلاستیک (قانون حجم ثابت) استخراج شده است. این فرض برای ای‌بی‌اس توسط سایر محققان نیز استفاده شده است (مثلاً [۲۷]). نسبت کرنش عرضی به ضخامتی به عنوان ضریب ناهمسانگردی پلاستیک محاسبه شده است. شایان ذکر است که همسانگردی به عدم وابستگی خواص مادی به جهت اطلاق می‌شود. در مورد یک ماده همسانگرد، $R = 1$ است.

۳- نتایج و بحث

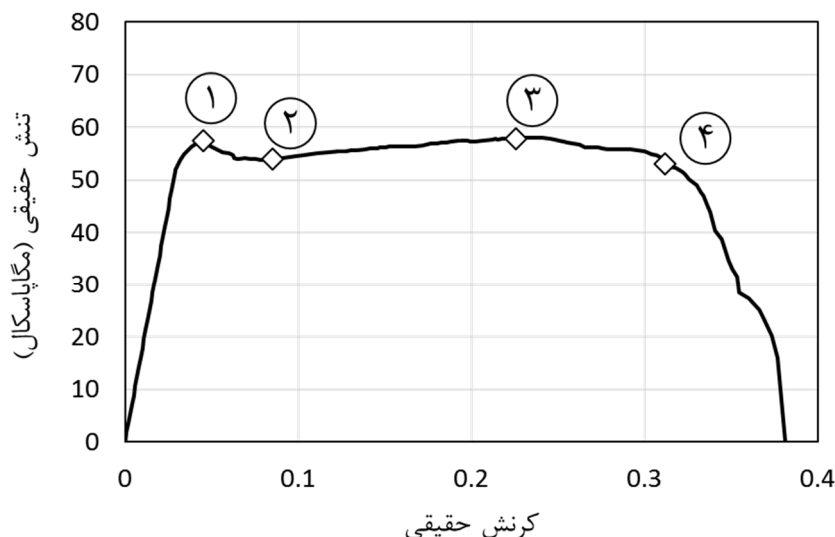
از هر روش، سه تست صورت گرفته و نتایج تست‌ها در مرجع [۲۲] ارائه و مقایسه شده است. از بین نتایج برای هر روش، یک مورد که کرنش شکست تقریباً یکسانی داشتند برای مطالعه و مقایسه ناهمسانگردی با آنالیز همبستگی تصاویر دیجیتال انتخاب شده است. در ادامه، نتایج تحلیل برای هر دو نمونه آورده شده است.

۳-۱- نمونه‌ی پرینت شده

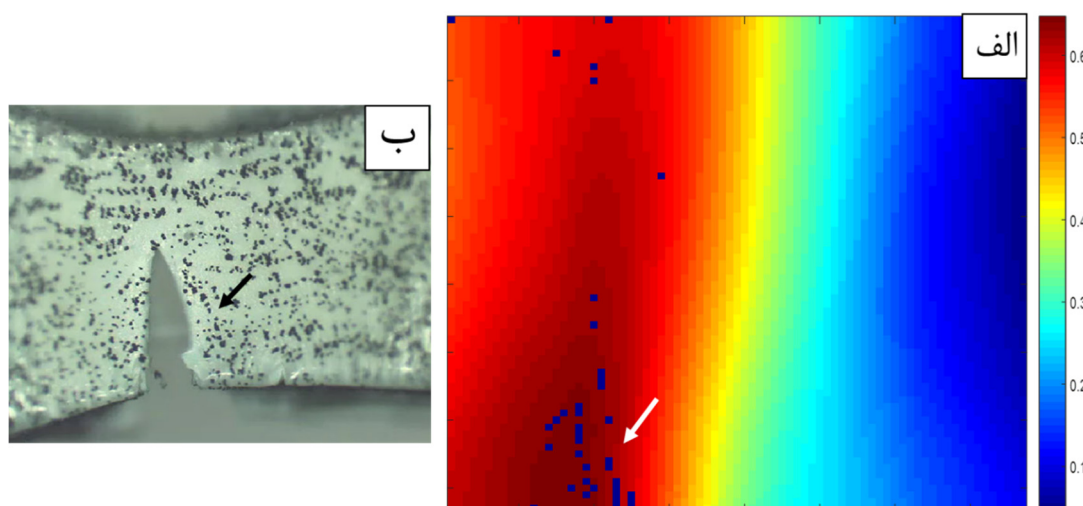
در شکل ۴ نمودار تنش-کرنش برای نمونه‌ی پرینت شده ارائه شده است. بعد از تغییر شکل الاستیک (ناحیه‌ی خطی)، تنش در نقطه‌ی ۱ به مقدار بیشینه می‌رسد. با تداوم تغییر شکل در ناحیه‌ی پلاستیک، تنش تا نقطه‌ی ۴ دچار تغییرات قابل ملاحظه‌ای نشده و نهایتاً در نقطه‌ی ۴ با کاهش ناگهانی مواجه می‌شود. این نقطه با شروع ترک و رشد آن همراه است. چهار نقطه‌ای که روی نمودار مشخص شده‌اند، نقاطی هستند که در آنها تحلیل همبستگی تصاویر دیجیتال انجام شده و ضرایب ناهمسانگردی نرمال بدست آمده است. در شکل ۵ توزیع کرنش طولی برای نقطه‌ی شماره‌ی ۴ (لحظه‌ی

تغییر شکل را با تصویر اولیه مقایسه می‌کند و میدان جابجایی را بدست می‌دهد. با مشتق‌گیری از میدان جابجایی، میدان کرنش هم در منطقه مورد علاقه بدست می‌آید. برای آسان‌سازی مقایسه تصاویر دیجیتال، روی نمونه الگویی از نقاط ایجاد می‌شود. ایجاد این الگو روی یک سطح میکرونی کار چالش‌برانگیزی محسوب می‌شود. در کار حاضر، برای ایجاد این الگو، لایه‌ی بسیار نازکی از تافت موی سر روی سطح نمونه اسپری شده تا سطح نمونه چسبناک گردد. سپس پودر کارتريچ که حاوی دانه‌های سیاه رنگ با ابعاد میکرونی است توسط کمپرسور باد به سطح نمونه پاشیده شده است. در شکل ۳ سطح نمونه بعد از ایجاد الگوی تصادفی از نقاط نشان داده شده است. بعد از ایجاد الگوی مطلوب، نمونه‌ها در معرض بار کششی واقع شده‌اند. در حین کشش، از نمونه‌ها فیلم تهیه شده است. فرکانس دوربین فیلم‌برداری ۳۰ فریم بر ثانیه است. تصاویری از این فیلم تهیه شده و با تصویر اولیه (تغییر شکل نیافته) مقایسه شده‌اند. برای پیاده‌سازی آنالیز همبستگی تصاویر دیجیتال، از کد متلب ان‌کور^۱ [۲۶] استفاده شده است. سایز پیکسل تصاویر مقایسه شده ۲/۹ میکرومتر بدست آمده است. در این کار، یک ناحیه‌ی مستطیلی در منطقه‌ی گیج به‌عنوان منطقه‌ی مورد علاقه برای محاسبات میدان کرنش انتخاب شده است. این ناحیه‌ی میکرونی در شکل ۱(ب) نشان داده شده است (ناحیه‌ای که داخل مربع سفید با خط‌چین انداخته شده است). در داخل منطقه‌ی مورد علاقه دایره‌هایی به شعاع ۳۰ پیکسل به‌عنوان زیرمجموعه^۲ و با گام ۴ پیکسل تعریف شده‌اند. بعد از بدست آمدن میدان کرنش طولی و عرضی در منطقه‌ی مورد علاقه، میدان

1 . Ncorr
 2 . Subset



شکل ۴. نمودار تنش-کرنش برای نمونه‌ی پرینت شده
Fig. 4. Stress-strain curve for the printed specimen

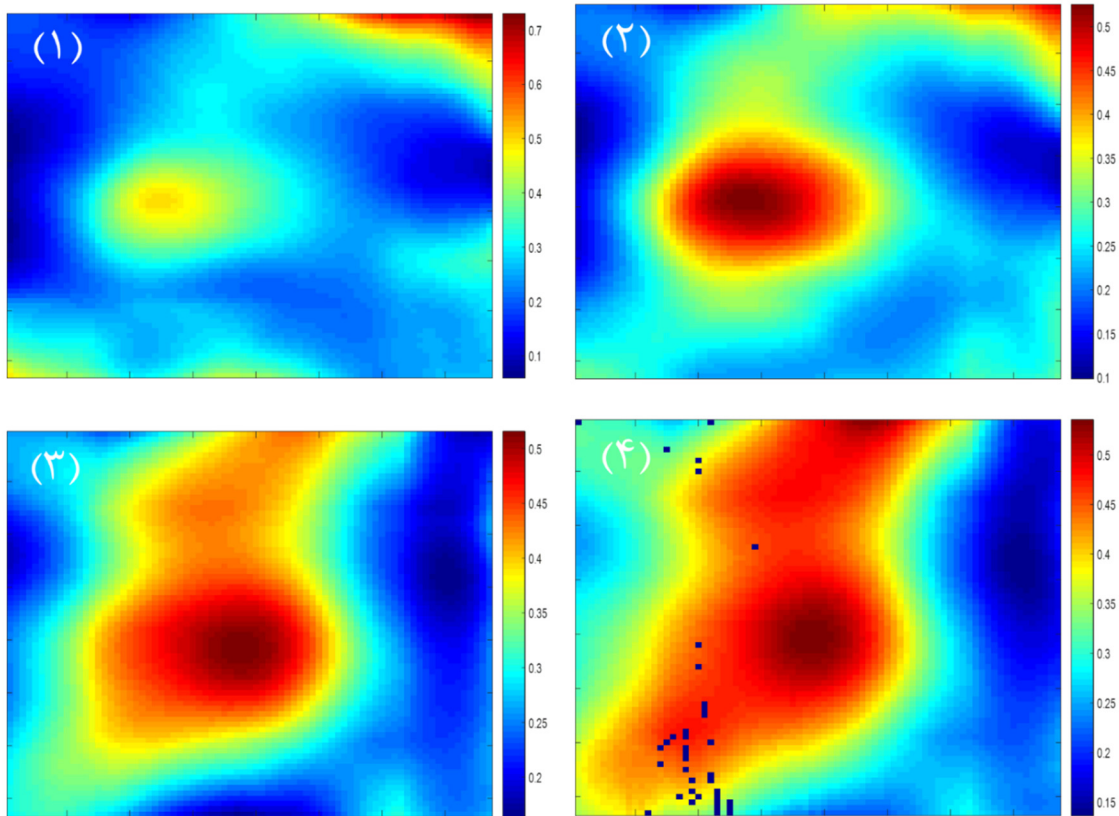


شکل ۵. (الف) توزیع کرنش طولی در نقطه‌ی ۴ از شکل ۴ (ب) محل پیدایش ترک در نمونه پرینت شده
Fig. 5. (a) Longitudinal strain distribution at point 4 of Fig. 4 (b) crack nucleation place in the printed specimen

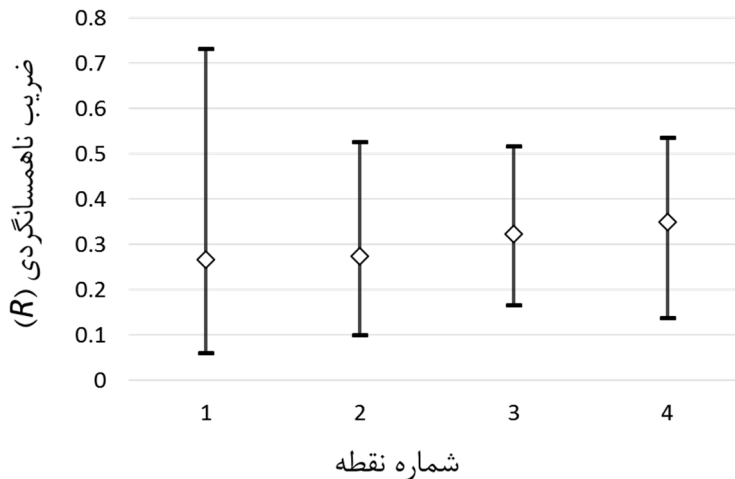
رفتن الگوها، در برخی نقاط همبستگی برقرار نشده است. اما با توجه به محدود بودن تعداد این نقاط، و این که نتایج تحلیل با مشاهدات تجربی هم‌خوانی دارد، نتایج هم‌چنان قابل قبول می‌باشد.

در شکل ۶ توزیع ضریب ناهمسانگردی نرمال برای این چهار نقطه ارائه شده است. نتایج حاکی از ناهمسانگردی شدید در نمونه پرینت شده است. $R = 1$ معادل با حالت همسانگردی کامل است که در هیچ کانتوری چنین مقداری محاسبه نشده است. منشأ این ناهمسانگردی شدید، جهت‌گیری زنجیره‌های پلیمری در راستای

شروع ترک) ارائه شده است. محل کرنش طولی بیشینه هم با فلش سفید رنگ در شکل ۵(الف) نشان داده شده است. مقایسه‌ی این شکل، با شکل ۵(ب) که مربوط به لحظاتی بعد از گسترش ترک است نشان می‌دهد که تحلیل همبستگی تصاویر دیجیتال به‌درستی توزیع کرنش را در نمونه اندازه‌گیری کرده است و شکست از محل کرنش بیشینه رخ داده است. لازم به توضیح است که در شکل ۵(الف) تعدادی نقطه‌ی آبی رنگ مشاهده می‌شود. با توجه به این که این شکل مربوط به کرنش‌های بسیار بالا (بالای ۳۰ درصد) است، به علت از بین



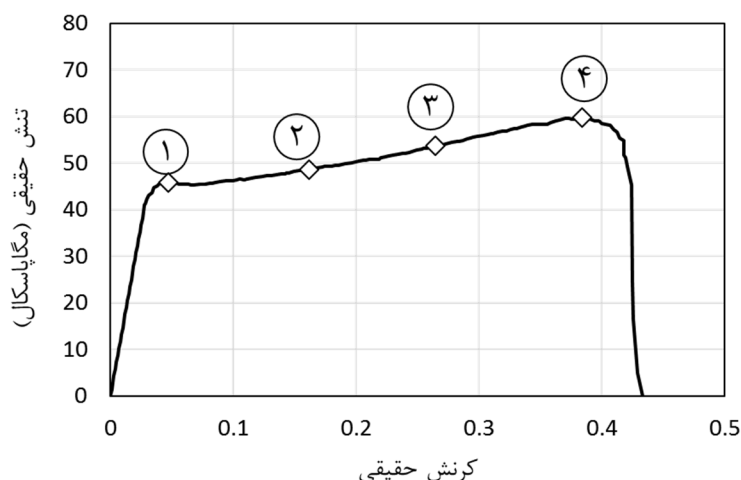
شکل ۶. توزیع ضریب ناهمسانگردی نرمال برای چهار نقطه‌ی مشخص شده روی نمودار شکل ۴
 Fig. 6. Distribution of normal anisotropy coefficient for the four points marked on Fig. 4



شکل ۷. تغییرات ضریب ناهمسانگردی نرمال برای ۴ نقطه‌ی مشخص شده روی نمودار شکل ۴
 Fig. 7. Changes in the normal anisotropy coefficient at the four points marked on Fig. 4

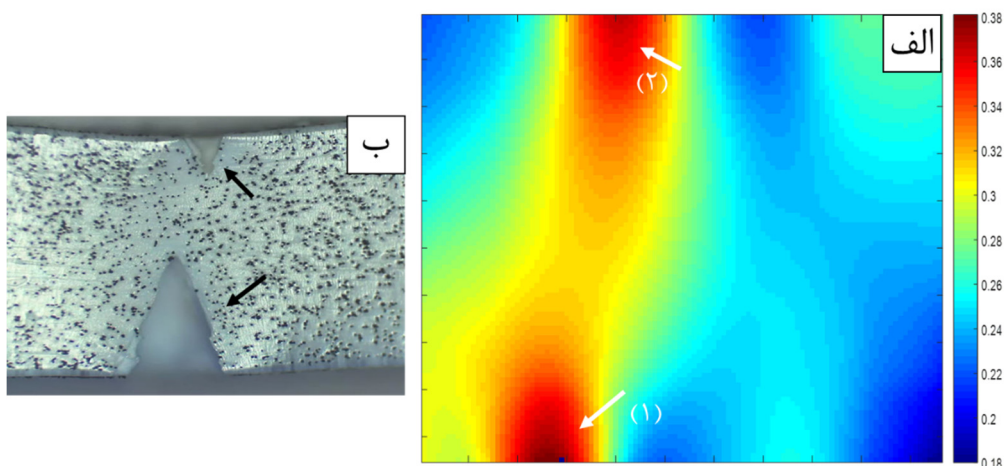
۰/۲۶ در نقطه‌ی ۱ به ۰/۳۴ در نقطه‌ی ۴). پیشرفت تحلیل سازه در سال‌های اخیر به جایگاهی رسیده که عدم اطلاع از ناهمگنی‌های موضعی و ماهیت ناهمسانگرد مواد، از

پرینت است. تغییرات مقادیر متوسط، بیشینه و کمینه R برای چهار نقطه در شکل ۷ ترسیم شده است. با توجه به شکل، مقدار متوسط R در حین تغییر شکل پلاستیک به‌طور پیوسته افزایش یافته است (از



شکل ۸. نمودار تنش-کرنش برای نمونه تک‌لایه

Fig. 8. Stress-strain curve for the monolithic specimen



شکل ۹. (الف) توزیع کرنش طولی موضعی در نقطه‌ی شماره‌ی ۴ شکل ۸ (ب) محل‌های شروع ترک در نمونه

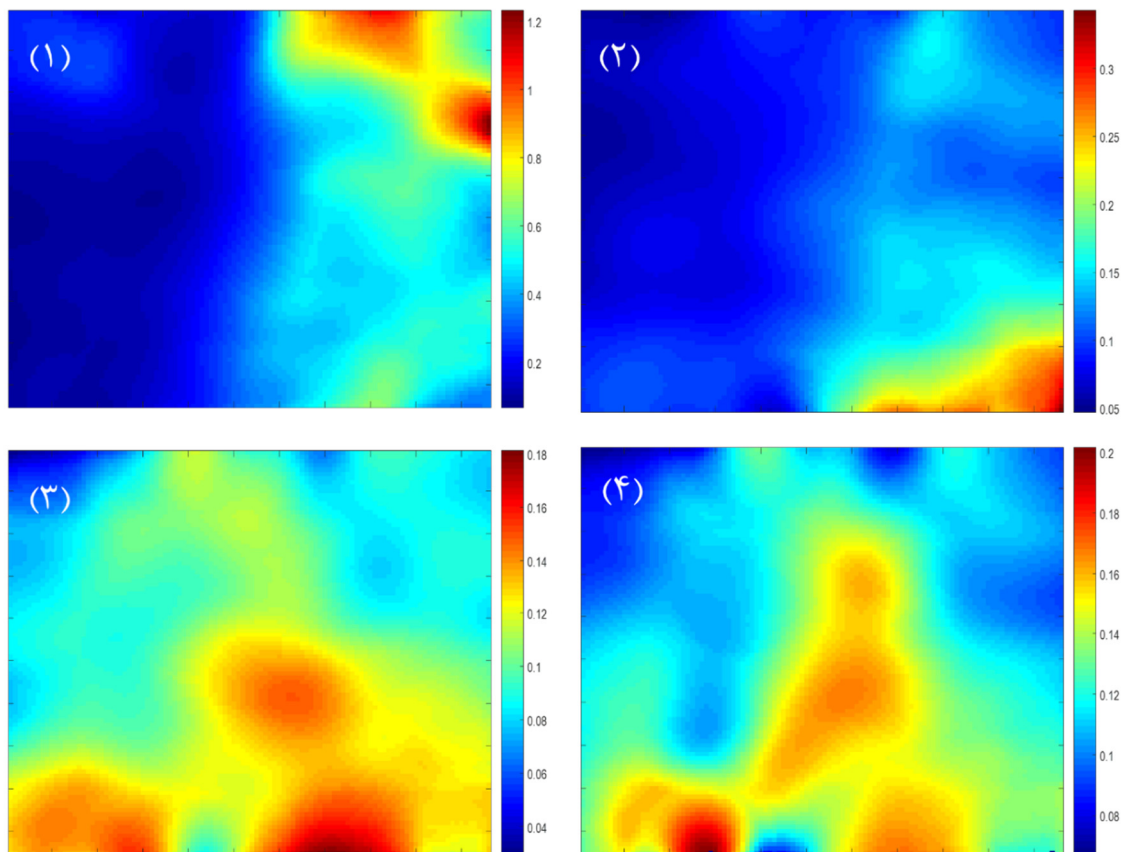
Fig. 9. (a) Longitudinal strain distribution at point 4 of Fig. 8 (b) crack initiation places in the specimen

است. مطابق شکل، بعد از تغییر شکل الاستیک، نمونه وارد ناحیه پلاستیک شده است. در اینجا تنش در حین تغییر شکل پلاستیک به‌طور پیوسته افزایش یافته است. در نقطه‌ی ۴ با جوانه‌زنی و رشد ترک در نمونه، تنش با افت ناگهانی مواجه شده است. مشابه قبل، چهار نقطه در ناحیه‌ی پلاستیک برای محاسبه‌ی ضریب ناهمسانگردی نرمال بر اساس آنالیز همبستگی تصاویر دیجیتال انتخاب شده است. در شکل ۹ توزیع کرنش طولی برای نقطه‌ی شماره‌ی ۴ (لحظه‌ی شروع ترک) ارائه شده است. محل‌های کرنش طولی بیشینه هم با فلش‌های سفید رنگ در شکل ۹ (الف) نشان داده شده است. فلش شماره‌ی (۱) محل کرنش طولی بیشینه را نشان می‌دهد. فلش شماره

پیش‌بینی دقیق رفتار سازه‌ها و مواد جلوگیری می‌کند. مدل‌های عددی توسعه داده شده قادر به لحاظ نمودن خواص موضعی مواد هستند ولی این خواص موضعی باید با روش‌های تجربی تعیین گردد. درحالی‌که با روش‌های سنتی تنها یک مقدار ثابت به‌عنوان ضریب ناهمسانگردی گزارش می‌شود، در این مقاله با تکیه بر آنالیز همبستگی تصاویر دیجیتال، توزیع این ضریب روی یک سطح میکرونی بدست آمده است.

۳-۲- نمونه‌ی تک‌لایه

در شکل ۸ نمودار تنش-کرنش برای نمونه‌ی تک‌لایه ارائه شده



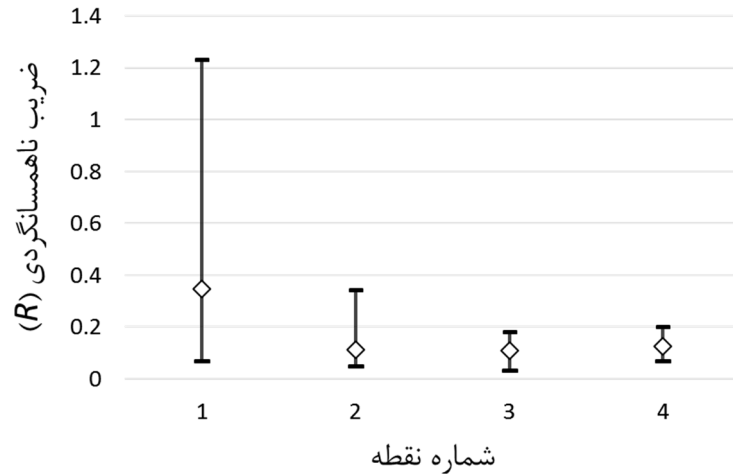
شکل ۱۰. کانتور ضریب ناهمسانگردی نرمال برای چهار نقطه‌ی مشخص شده در نمودار شکل ۸
Fig. 10. Distribution of normal anisotropy coefficient for the four points marked on Fig. 8

متوسط R در حین تغییر شکل پلاستیک روندی نزولی طی کرده و از مقدار $0/35$ در نقطه‌ی شماره‌ی ۱ به $0/13$ در نقطه‌ی شماره‌ی ۴ رسیده است.

۳-۳- مقایسه نتایج به‌دست آمده برای دو روش

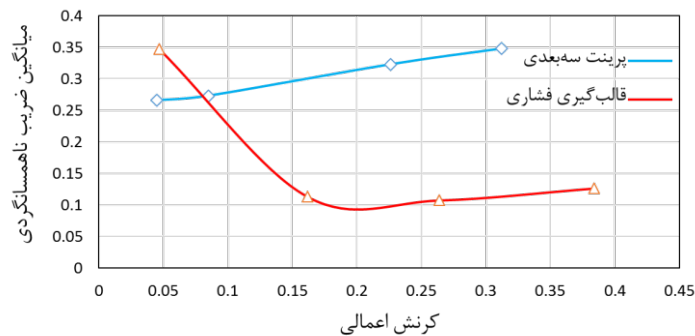
جهت آسان کردن مقایسه رفتار دو نمونه، سیر تحولی مقدار متوسط R در دو نمونه در شکل ۱۲ ارائه شده است که نشان می‌دهد در ابتدای ناحیه‌ی تغییر شکل پلاستیک (نقطه‌ی ۱ در هر دو نمودار)، نمونه‌ی پرینت شده رفتار ناهمسانگردتری را نسبت به نمونه‌ی تک‌لایه از خود نشان داده است ($R_{ave} = 0/27$ برای نمونه‌ی پرینت شده در برابر $R_{ave} = 0/35$ برای نمونه‌ی تک‌لایه). در واقع میزان انحراف R_{ave} از ۱ معیاری برای ارزیابی شدت ناهمسانگردی در نمونه است. با تداوم تغییر شکل پلاستیک (نقاط ۲ تا ۴ در دو نمودار)، انحراف R_{ave} از ۱ برای نمونه‌ی تک‌لایه بیشتر از نمونه‌ی پرینت شده می‌باشد و در نتیجه نمونه‌ی تک‌لایه رفتار

(۲) مکان دیگری است که کرنش در آن موضعی شده است. در اینجا مقدار کرنش طولی قدری کم‌تر از مقدار کرنش موضعی در محل فلش شماره‌ی (۱) است ($0/3656$ در برابر $0/3802$). مقایسه‌ی این شکل، با شکل ۹(ب) که مربوط به لحظاتی بعد از گسترش ترک است نشان می‌دهد که تحلیل همبستگی تصاویر دیجیتال به‌درستی توزیع کرنش را در نمونه اندازه‌گیری کرده است و شکست از محل‌های کرنش موضعی پیشینه آغاز شده است. ترک در محل فلش (۱) بزرگ‌تر از ترک در محل فلش (۲) بوده و با سرعت بالاتری گسترش یافته است. نتایج محاسبات برای ضریب ناهمسانگردی نرمال در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج نشان از ناهمسانگردی در مورد ای‌بی‌اس تک‌لایه می‌باشد. آنالیز همبستگی تصاویر دیجیتال در مورد نقطه ۱، نشان از وجود مناطقی با $R = 1$ (همسانگردی کامل) می‌باشد. با این وجود در اغلب مناطق شرایط ناهمسانگردی حاکم است. در شکل ۱۱ تغییرات مقادیر متوسط و حدی R ارائه شده است. برخلاف حالت قبلی (نمونه‌ی پرینت شده)، در نمونه‌ی قالب‌گیری شده مقدار



شکل ۱۱. تغییرات ضریب ناهمسانگردی برای چهار نقطه مشخص شده در نمودار شکل ۸

Fig. 11. Changes in the normal anisotropy coefficient at the four points marked on Fig. 8



شکل ۱۲. مقایسه تغییرات در دو نمونه

Fig. 12. Comparison of the for the two specimens

جهت گیری ترجیحی برای زنجیره های پلیمری به وجود آمده است و این جهت گیری ترجیحی منشأ افزایش ناهمسانگردی نمونه ی پرینت نشده در کرنش های بالاتر بوده است. لازم به توضیح است که مقایسه انجام شده بین دو روش، برای شرایط فرآوری و پارامترهای ذکر شده در بخش ۱-۲ است و با تغییر پارامترهای مؤثر در ساخت هر دو نمونه، ممکن است نتایج دست خوش تغییر شود.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، برای اولین بار، تأثیر فرآیندهای پرینت و قالب گیری تحت فشار روی ضریب ناهمسانگردی نرمال نمونه های میکرونی ای بی اس مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور، نمونه های میکرونی ای بی اس تهیه شده با دو روش فوق، با دستگاه تست کشش میکرو و در زیر لنز میکروسکوپ نوری کشیده شدند.

ناهمسانگردتری را از خود بروز داده است. به نظر می رسد پیکربندی زنجیره های پلیمری مسبب چنین رفتاری باشد. در ادامه مکانیزمی برای توجیه این رفتار ارائه شده است. در ابتدای تغییر شکل پلاستیک (نقطه ی ۱ در دو نمودار)، زنجیره های پلیمری در نمونه ی پرینت شده طبق جریان اکستروژن در راستای پرینت جهت گیری کرده اند ولی در نمونه ی پرینت نشده، زنجیره ها فاقد چنین پیکربندی بوده اند. این آرایش زنجیره ها در نمونه ی پرینت شده می تواند باعث جهت دار شدن رفتار مکانیکی شود که به صورت رفتار ناهمسانگردتر تبلور یافته است. این ناهمسانگردی شدیدتر خود ممکن است عامل به وجود آمدن کرنش های موضعی در نمونه شده و این کرنش های موضعی باعث انحراف جهت گیری رسترها شود و در نتیجه، رفتار به سمت همسانگردی پیش برود. اما در نمونه ی پرینت نشده، احتمالاً با تداوم تغییر شکل، زنجیره های بی نظم اولیه در راستای کشش باز شده و یک

- [4] T. Duda, L. Raghavan, 3D Metal Printing Technology, IFAC-PapersOnLine, 49 (2016) 103-110.
- [5] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann, Additive manufacturing of metals, Acta Materialia, 117 (2016) 371-392.
- [6] M. Faes, H. Valkenaers, F. Vogeler, J. Vleugels, E. Ferraris, Extrusion-based 3D Printing of Ceramic Components, Procedia CIRP, 28 (2015) 76-81.
- [7] F. Ning, W. Cong, Y. Hu, H. Wang, Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: Effects of process parameters on tensile properties, Journal of Composite Materials, 51(4) (2016) 451-462.
- [8] F. Ning, W. Cong, J. Qiu, J. Wei, S. Wang, Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling, Composites Part B: Engineering, 80 (2015) 369-378.
- [9] A. Perrot, D. Rangeard, A. Pierre, Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques, Materials and Structures, 49(4) (2016) 1213-1220.
- [10] J.T. Cantrell, S. Rohde, D. Damiani, R. Gurnani, L. DiSandro, J. Anton, A. Young, A. Jerez, D. Steinbach, C. Kroese, P. Ifju, Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D Printed ABS and Polycarbonate Parts, in, 2016.
- [11] S. Rohde, J. Cantrell, A. Jerez, C. Kroese, D. Damiani, R. Gurnani, L. DiSandro, J. Anton, A. Young, D. Steinbach, P. Ifju, Experimental Characterization of the Shear Properties of 3D-Printed ABS and Polycarbonate Parts, Experimental Mechanics, 58(6) (2018) 871-884.
- [12] A. Torrado, C. Shemelya, J. English, Y. Lin, R. Wicker, D. Roberson, Characterizing the Effect of Additives to ABS on the Mechanical Property Anisotropy of Specimens Fabricated by Material Extrusion 3D Printing, Additive Manufacturing, 6 (2015).
- [13] B. Rankouhi, S. Javadpour, F. Delfanian, T. Letcher, Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS with Respect to Layer Thickness and Orientation, Journal of Failure Analysis and Prevention,

روی عکس‌های تهیه شده با میکروسکوپ، تحلیل همبستگی تصاویر دیجیتال پیاده شده و میدان کرنش روی سطح نمونه‌ها بدست آمد. تحلیل همبستگی تصاویر دیجیتال به درستی موقعیت کرنش طولی بیشینه را در دو نمونه مشخص کرد. کد متلبی توسعه داده شده است که مؤلفه‌ی ضخامتی کرنش را از روی دو مؤلفه‌ی دیگر حساب و ضریب ناهمسانگردی نرمال را در منطقه‌ی میکرونی مورد علاقه بدست می‌آورد. ناهمسانگردی مکانیکی در حین تغییر شکل پلاستیک هر دو نمونه مشاهده شد. در مراحل ابتدایی تغییر شکل پلاستیک، ناهمسانگردی در نمونه‌ی پرینت شده شدیدتر بود. با تداوم تغییر شکل، از میزان ناهمسانگردی نمونه پرینت شده کاسته شده و بر میزان ناهمسانگردی نمونه تک‌لایه افزوده شد. برای توجیه این پدیده مکانیزمی ارائه شد که جهت‌گیری زنجیره‌های پلیمری را عامل تغییر در رفتار ناهمسانگردی نمونه‌ها بیان می‌کند. بر مبنای این مکانیزم، جهت‌گیری ترجیحی زنجیره‌ها در راستای پرینت می‌تواند منشأ ناهمسانگردی شدیدتر نمونه‌های پرینت شده در مراحل ابتدایی تغییر شکل پلاستیک باشد. با ادامه‌ی تغییر شکل، احتمالاً زنجیره‌های پلیمری نمونه‌ی پرینت شده از وضعیت منظم اولیه خارج شده، و زنجیره‌های بی‌نظم نمونه‌ی تک‌لایه باز شده و آرایش منظم‌تری به خود می‌گیرد. این تغییرات می‌تواند منجر به رفتار مشاهده شده شود.

تشکر و قدردانی

سه نویسنده اول از صندوق حمایت از پژوهش‌گران و فن‌آوران کشور تشکر می‌کنند (شماره طرح: ۹۸۰۰۲۷۳۸).

مراجع

- [1] M. Attaran, The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing, Business Horizons, 60(5) (2017) 677-688.
- [2] T.D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K.T.Q. Nguyen, D. Hui, Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, Composites Part B: Engineering, 143 (2018) 172-196.
- [3] S.C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, R. Mülhaupt, Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing, Chemical Reviews, 117(15) (2017) 10212-10290.

- manufactured acrylonitrile butadiene styrene, *Engineering Fracture Mechanics*, 211 (2019) 114-124.
- [21] T.D. McLouth, J.V. Severino, P.M. Adams, D.N. Patel, R.J. Zaldivar, The impact of print orientation and raster pattern on fracture toughness in additively manufactured ABS, *Additive Manufacturing*, 18 (2017) 103-109.
- [22] S. Nazari-Onlaghi, A. Sadeghi, M. Karimpour, Design and manufacture of a micro-tensile testing machine for in situ optical observation and DIC analysis: application to 3D-printed and compression-molded ABS, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 31 (2021) 045016.
- [23] H. Ghadbeigi, C. Pinna, S. Celotto, J.R. Yates, Local plastic strain evolution in a high strength dual-phase steel, *Materials Science and Engineering: A*, 527(18) (2010) 5026-5032.
- [24] D.A. LaVan, W.N. Sharpe, Tensile testing of microsamples, *Experimental Mechanics*, 39(3) (1999) 210-216.
- [25] S. Nazari-Onlaghi, A. Sadeghi, M. Karimpour, M. Pegguleryuz, Fracture micro-mechanisms in hot-rolled AZ31 and AZ31-Sr magnesium alloys, *Materials Science and Engineering: A*, 812 (2021) 141107.
- [26] J. Blaber, B. Adair, A. Antoniou, Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software, *Experimental Mechanics*, 55(6) (2015) 1105-1122.
- [27] A.D. Drozdov, J.d. Christiansen, Cyclic elastoplasticity of solid polymers, *Computational Materials Science*, 42(1) (2008) 27-35.
- 16(3) (2016) 467-481.
- [14] J. Rodriguez, J. Thomas, J. Renaud, Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) fused deposition materials. Experimental investigation, *Rapid Prototyping Journal*, 7 (2001) 148-158.
- [15] A. Cress, J. Huynh, E. Anderson, R. O'Neill, Y. Schneider, Ö. Keleş, Effect of recycling on the mechanical behavior and structure of additively manufactured acrylonitrile butadiene styrene (ABS), *Journal of Cleaner Production*, 279 (2020) 123689.
- [16] H. Zhang, L. Cai, M. Golub, Y. Zhang, X. Yang, K. Schlarman, J. Zhang, Tensile, Creep, and Fatigue Behaviors of 3D-Printed Acrylonitrile Butadiene Styrene, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(1) (2018) 57-62.
- [17] C. Ziemian, D. Cipoletti, S. Ziemian, M. Okwara, K. Haile, Monotonic and cyclic tensile properties of ABS components fabricated by additive manufacturing, in: *Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2014, pp. 525-541.
- [18] J.P. Isaac, S. Dondeti, H.V. Tippur, Fracture behavior of additively printed ABS: Effects of print architecture and loading rate, *International Journal of Solids and Structures*, 212 (2021) 80-95.
- [19] J. Gardan, A. Makke, N. Recho, Improving the fracture toughness of 3D printed thermoplastic polymers by fused deposition modeling, *International Journal of Fracture*, 210 (2018).
- [20] K.M. Conway, G.J. Pataky, Crazing in additively

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

S. Nazari-Onlaghi, A. Sadeghi, M. Karimpour, H. Mohammadi, *Effect of 3D-Printing and Compression Molding on Anisotropy of Acrylonitrile Butadiene Styrene Micro Specimen: A Comparative Study Based on Digital Image Correlation*, *Amirkabir J. Mech Eng.*, 53(12) (2022) 5645-5658.

DOI: [10.22060/mej.2021.19874.7135](https://doi.org/10.22060/mej.2021.19874.7135)



