

Investigation of the Effect of Printing Orientation and Loading Direction on the Mechanical Properties and Fracture Behavior of Additively Manufactured Polylactic Acid

Elyas Haddadi ^{1*}, Mohammad Reza Adibeig ², Abuzar Es'haghi Oskui ^{3,4}

¹ Department of Mechanical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

² Department of Mechanics and Aerospace Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, 518055, China

³ Moganshan Institute ZJUT, Kangqian District, Deqing 313200, China

⁴ High-speed Rotating Machinery Laboratory, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

ABSTRACT

The mechanical properties and crack growth resistance of polylactic acid (PLA) specimens produced via additive manufacturing were investigated. The primary objective was to evaluate the influence of printing orientation on the mechanical behavior of specimens under different loading conditions. Specimens were fabricated with three printing orientations: 0°, 90°, and 0°/90°, representing longitudinal, transverse, and bidirectional layer arrangements, respectively. The results revealed that changing the printing orientation from 0° to 90° or 0°/90° significantly increased the maximum tensile stress by approximately 39% and the strain at failure by an average of 30%. To assess crack growth resistance, fracture tests were conducted under tensile (mode-I) and shear (mode-II) loading using butterfly-shaped specimens tested with a modified Arcan fixture. Geometric factors corresponding to different loading orientations were extracted using finite element simulations. The results indicated that the critical strain energy release rate under shear loading was approximately 58% lower than under tensile loading. Additionally, specimens printed at a 90° orientation exhibited lower crack growth resistance compared to those at 0° and 0°/90° due to weaker interlayer bonding. Ultimately, the 0°/90° orientation was identified as optimal, offering a favorable balance between high tensile strength and adequate crack growth resistance.

KEYWORDS

* Corresponding Author Email: ehadadi@tvu.ac.ir

1- Introduction

Additive manufacturing (AM) has recently garnered significant attention in engineering applications due to its unique capabilities. As materials produced through this method exhibit distinct mechanical behaviors, comprehensive mechanical testing and engineering analysis are essential to achieve reliable performance under various loading conditions. In recent decades, polymer-based additive manufacturing has been widely adopted across diverse industries. To ensure the safe and effective use of this technology, extensive research has been conducted in recent years. This study investigates the combined effects of printing orientation and loading direction on the mechanical behavior of additively manufactured PLA. The research comprises a series of experimental tests and numerical simulations to characterize the mechanical properties of specimens manufactured via Fused Filament Fabrication (FFF) with printing orientations of 0° , 90° , and $0^\circ/90^\circ$.

2- Methodology

Dog-bone and butterfly-shaped geometries were used to evaluate mechanical properties and fracture behavior, respectively. All specimens were tested under standardized conditions to ensure consistency. As expected, following a limited plastic deformation, a sudden and nearly brittle failure was observed, indicating the applicability of Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM). Notably, specimens printed at 0° exhibited earlier failure compared to those at 90° and $0^\circ/90^\circ$, with lower ultimate tensile strength (UTS). This behavior can be attributed to the fiber orientation in each specimen. The results showed differences in elastic modulus, yield stress, ultimate tensile strength, and ultimate strain across the printing orientations, with variations of 16%, 39%, 17%, and 30%, respectively. A modified Arcan fixture, which addresses the limitations of previous versions [1, 2], was employed for fracture testing.

The load-displacement results from the experimental fracture tests are presented in "Figure 1". For specimens under tensile loading, the bidirectional (cross) configuration sustained higher loads compared to other orientations, indicating that the cohesive

zones between fibers significantly contribute to load-bearing capacity in this case. In contrast, in the parallel configuration, fibers primarily bear the load, and their higher stiffness limits deformation prior to crack initiation. The difference in displacement before crack initiation between these configurations was approximately 93%. Clearly, the location of maximum stress can serve as an indicator of the crack initiation region. The $0^\circ/90^\circ$ grid-like printing orientation exhibited behavior intermediate between the two extremes. A reduction in the number of fibers aligned with the loading direction decreased stiffness, allowing greater deformation before crack initiation. A similar trend was observed for the maximum sustained load.

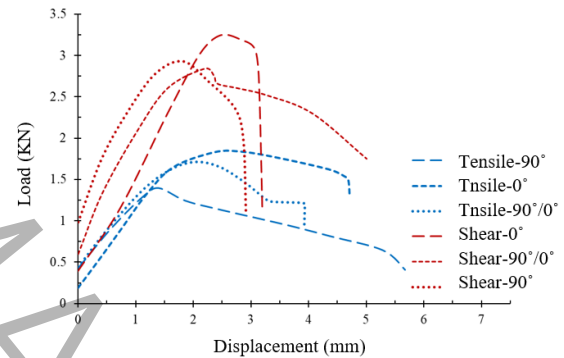


Figure 1. Load-displacement curves of butterfly-shaped specimens manufactured via FFF under combined tensile and shear loading with raster orientations of 0° , 90° , and $0^\circ/90^\circ$.

"Figure 2" illustrates the results of finite element simulations of the butterfly-shaped specimen. As evident, the plastic zone at the crack tip (shown in gray) is confined to a limited region, justifying the use of Linear Elastic Fracture Mechanics in this study.

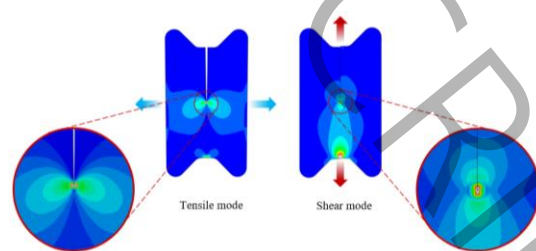


Figure 2. Stress distribution at the crack tip of the butterfly-shaped specimen under tensile and shear loading conditions.

3- Results and Discussion

Critical stress intensity factors for various loading and printing orientations were determined based on geometric factors extracted from finite element analyses and critical force values obtained from experimental fracture tests. The material generally exhibited greater resistance to crack growth under tensile loading compared to shear loading across all printing orientations. The critical fracture values for mode-II were, on average, approximately 58% lower than those for mode-I. Another significant finding is the influence of printing orientation on critical fracture values. The 90° orientation showed poorer performance compared to the 0° and 0°/90° orientations, a trend observed in both tensile and shear loading conditions. Additionally, the 0°/90° orientation performed nearly equivalently to the 0° orientation. From a fracture mechanics perspective, the 0° and 0°/90° orientations can be considered equivalent and are superior to the 90° orientation.

4- Conclusions

This study utilized a modified Arcan fixture to investigate the fracture behavior of PLA specimens printed at 0°, 90°, and 0°/90° orientations. The key findings are as follows:

- Crack growth resistance under tensile loading exceeds that under shear loading across all printing orientations, with critical fracture values for mode-II being approximately 58% lower than those for mode-I.
- The 90° printing orientation exhibits inferior crack growth resistance compared to the 0° and 0°/90° orientations, a trend consistent across both tensile and shear loading, indicating that this performance is independent of loading direction.
- The 0°/90° orientation performs nearly equivalently to the 0° orientation, with performance reductions of only 1% and 7% in tensile and shear modes, respectively.
- The 0°/90° orientation is recommended as the optimal choice, offering a favorable balance of acceptable crack growth resistance, high tensile strength, and adequate deformability.

5- References

- [1] J.M. Greer Jr., S.E. Galyon Dorman, and M.J. Hammond, Some Comments on the Arcan Mixed-Mode (I/II) Test Specimen, *Engineering Fracture Mechanics* 78(9) (2011) 2088–2094.
- [2] A. Oskui et al., On the Development of a Testing Device for Fracture Characterization under Mixed-Mode Loading Conditions, in *Symposium on Advances in Accelerated Testing and Predictive Methods in Creep, Fatigue, and Environmental Cracking*, ASTM International, (2023): pp. 127–140.

تحلیل اثر جهت چاپ و بارگذاری بر خواص مکانیکی و رفتار شکست پلیمر پلی لاکتیک اسید تولیدشده با روش ساخت افزایشی

الیاس حدادی^{۱*}، محمدرضا آدی بیگ^۲ و ابوذر اسحقی اسکویی^۳

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت جنوب، شنزن، چین

۳- موسسه موگانسان، دیچینگ، چین

۴- آزمایشگاه ماشین‌های دوار پرسرعت، دانشگاه جیجیانگ، هانگژو، چین

* ehadadi@tvu.ac.ir، ۱۴۳۵۷۶۳۸۱۱، صندوق پستی

چکیده

خواص مکانیکی و مقاومت در برابر رشد ترک نمونه‌های پلی لاکتیک اسید تولیدشده به روش ساخت افزایشی مورد بررسی قرار گرفت. هدف اصلی، ارزیابی تأثیر جهت‌گیری چاپ بر رفتار مکانیکی نمونه‌ها تحت بارهای کششی و برشی بود. نمونه‌ها در سه جهت چاپ 0° ، 90° و $90^\circ/0^\circ$ تهیه شدند. این جهت‌گیری‌ها به ترتیب نشان‌دهنده چاپ لایه‌ها در راستای طولی، عرضی و ترکیبی بودند. نتایج نشان داد که تغییر جهت چاپ از 0° به 90° یا $90^\circ/0^\circ$ باعث افزایش قابل توجه بیشینه تنش کششی به میزان حدود ۳۹٪ و کرنش پیش از شکست به‌طور متوسط ۳۰٪ شد. این امر به دلیل تفاوت در چیدمان لایه‌ها و توزیع تنش در ساختار داخلی نمونه‌ها بود. برای بررسی مقاومت در برابر رشد ترک، از آزمون‌های شکست در مودهای کششی و برشی استفاده شد. نمونه‌های پروانه‌ای شکل و با گیره آرکان اصلاح‌شده آزمایش شدند. همچنین ضرایب هندسی متناظر با جهات بارگذاری با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود استخراج شد. نتایج نشان داد که مقادیر بحرانی انرژی شکست در مود برشی نسبت به مود کششی حدود ۵۸٪ کاهش داشته است. همچنین، نمونه‌های چاپ‌شده در جهت 90° به دلیل ضعف در اتصال بین لایه‌ای، مقاومت کمتری در برابر رشد ترک نسبت به جهت‌های 0° و $90^\circ/0^\circ$ از خود نشان دادند. در نهایت، از میان موارد بررسی شده، جهت $90^\circ/0^\circ$ به دلیل برقراری تعادل مطلوب میان استحکام کششی بالا و مقاومت مناسب در برابر رشد ترک، به‌عنوان جهت‌گیری بهینه پیشنهاد گردید.

کلمات کلیدی

ساخت افزایشی، پلی لاکتیک اسید، خواص مکانیکی، جهت چاپ، گیره آرکان

۱- مقدمه

به‌تازگی، طراحی و ساخت به‌کمک کامپیوتر پیشرفت زیادی داشته است؛ به‌گونه‌ای که محققان نه‌تنها می‌توانند طراحی و آنالیز یک محصول را به‌کمک کامپیوتر انجام دهند، بلکه همچنین می‌توانند از روی مدل سه‌بعدی آن یک نمونه واقعی نیز بسازند. این فناوری ساخت از روی مدل سه‌بعدی که به‌صورت لایه‌به‌لایه روی هم اضافه می‌شوند، ساخت افزایشی^۱ نام دارد [۲،۱]. روش ساخت افزایشی اخیراً به‌دلیل منحصر به فرد بودن آن در کاربردهای مهندسی، توجه بیشتری را به خود جلب کرده است. از آنجایی که مواد تولید شده با این روش، رفتارهای مکانیکی متفاوتی از خود نشان می‌دهند، برای دستیابی به محصولی با عملکرد قابل قبول تحت شرایط مختلف بارگذاری، نیاز به انجام آزمایش‌های مکانیکی و تحلیل مهندسی کافی است. در دهه‌های اخیر، ساخت افزایشی مبتنی بر پلیمر، به‌طور گسترده‌ای در صنایع مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از این روش، می‌توان هندسه‌های پیچیده را به سرعت طراحی، اصلاح و چاپ کرد که منجر به روشی مقرون به‌صرفه برای تولید می‌شود و نیاز به قطعات در ساخت‌افزارهای فضایی را کاهش می‌دهد [۳]. در ابتدا این روش بیشتر بر نمونه‌سازی متمرکز بود، اما با پیشرفت‌های مواد و فرایندها، این روش که به عنوان چاپ سه‌بعدی نیز شناخته می‌شود، به سطح بالاتری از تولید ارتقاء یافته است. ساخت افزایشی برای اولین بار در سال ۱۹۸۶ توسعه یافت و به عنوان یک پیشرفت مهم در تولید مواد مختلف شناخته می‌شود [۴]. تکنیک‌های مختلفی در ساخت افزایشی معرفی شده است، از جمله ذوب لیزری انتخابی^۲،

¹ Additive Manufacturing

² Selective Laser Melting (SLM)

ذوب پرتو الکترونی^۱ و مدل سازی رسوبی فیلامنت^۲ رایج ترین روش های چاپ سه بعدی است که به مواد پلیمری محدود می شود [۵]. استفاده از مواد پلیمری در صنعت به طور فزاینده ای در حال افزایش است [۷۶]. در روش رسوبی فیلامنت، مواد از طریق نازل خارج شده و به یکدیگر متصل می شوند تا اشیاء سه بعدی ایجاد کنند. به عبارت دیگر، در این فرایند با خارج کردن فیلامنت پلیمری به صورت رشته های نازک آغاز می شود. پس از عبور فیلامنت از نازل و گرم شدن تا دمای مشخص، روی لایه قبلی رسوب می کند تا شکل مورد نظر ایجاد شود. از دیگر روش های مرسوم، تکنیک ساخت فیلامنت ذوب^۳ شده می باشد. بر اساس گزارش های موجود در تحقیقات مختلف، عملکرد مکانیکی قطعات تولید شده با این تکنیک تحت تأثیر تعدادی از پارامترهای فرایندی مانند جهت ساخت، ضخامت لایه و تراکم پرکننده قرار دارد [۹،۸]. چندین مطالعه برای ارزیابی اثرات این پارامترها انجام شده است [۱۰]. به همین دلیل، شناسایی دقیق مواد استفاده شده در روش ساخت افزایشی برای شبیه سازی قطعات نهایی قبل از تولید ضروری است. این امر منجر به تلاش های متعددی برای شبیه سازی رفتار مکانیکی ساختارهای تولید شده به روش فیلامنت ذوب شده، شده است [۱۱،۲]. در ساخت افزایشی، ناهمسانگردی نقش مهمی ایفا می کند، به ویژه در رابطه با جهت ساخت نسبت به جهت بارگذاری. به عنوان مثال، گارگ^۴ و همکاران [۱۲] از روش المان محدود برای شبیه سازی رفتار الاستوپلاستیک نمونه های ساخته شده با فیلامنت ذوب شده با دقت بالا استفاده کردند. آن ها بر اساس تصاویر میکروسکوپی، مدل هندسی را توسعه دادند که شامل لایه هایی با ضخامت های مختلف و شطرنجی های مختلف بود تا یکپارچگی نواحی اتصال حفظ شود. در مطالعه ای توسط آزادی و همکاران [۱۳]، خواص خستگی پلیمرهای آکریلونیتریل بوتادین استایرن^۵ و پلی لاکتیک اسید^۶ تولید شده با ساخت افزایشی تحت شرایط خمشی با چرخه بالا بررسی شد. نتایج آن ها نشان داد که نمونه های پلی لاکتیک اسید طول عمر خستگی بیشتری نسبت به نمونه های آکریلونیتریل بوتادین استایرن دارند. علاوه بر این، استحکام خستگی نمونه های فیلامنت ذوب شده ساخته شده به صورت افقی بیشتر از نمونه های ساخته شده به صورت عمودی بود. طبق گفته احمد^۷ و همکاران [۱۴]، می توان استحکام استاتیک پلی لاکتیک اسید تولید شده با ساخت افزایشی را با استفاده از نظریه فواصل بحرانی^۸ آزمایش کرد. در این مطالعه، فرض الاستیک-خطی این تئوری به طور موفقیت آمیزی برای طراحی بارگذاری استاتیک قطعات دارای شکاف ساخته شده از پلی لاکتیک اسید به کار رفت. در مطالعه ای توسط چکن^۹ و همکاران [۱۵]، تأثیر جهت ساخت، ضخامت لایه و محتوای حجم فیبر بر عملکرد مکانیکی کامپوزیت های تقویت شده با فیبر پیوسته که با چاپ سه بعدی ساخته شده اند، بررسی شد. نتایج نشان داد که، ضخامت لایه تأثیر زیادی بر عملکرد مکانیکی نمونه های نایلون دارد. شناسایی قطعات تولید شده توسط روش های ساخت افزایشی، در حضور ترک برای استفاده ایمن از آن ها ضروری است. با وجود اینکه این روش ساخت به طور قابل توجهی خواص مواد را تغییر می دهد، تعداد کمی از مطالعات به شکست چنین قطعاتی پرداخته اند. در یک مطالعه در سال ۲۰۲۴، سه نوع ساختار لانه زنبوری^{۱۰} تولید شده به روش ساخت افزایشی مورد بررسی قرار گرفت و ارتباط بین اندازه و پارامترهای شکست گزارش شد [۱۶]. همچنین در برخی از تحقیقات نیز به گزارش تأثیر پارامترهای چاپ بر مقاومت محصول نهایی در برابر رشد ترک پرداخته شده [۱۷] و در ادامه سعی در بهینه سازی پارامترهای چاپ برای دستیابی به مقادیر چقرمگی شکست^{۱۱} مطلوب شده است [۱۸]. در برخی تحقیقات نیز تأثیر راستای چاپ بر رفتار ماده مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۹]. چنانکه مشاهده می شود، تأثیر جهت چاپ در رفتار شکست ماده، از موضوعات بروزی می باشد که محققان، خصوصاً در سال های اخیر، به آن پرداخته اند. با این حال، این موضوع هنوز نیاز به بررسی دقیق تر

¹ Electron Beam Melting (EBM)

² Fused Deposition Modeling (FDM)

³ Fused Filament Fabrication (FFF)

⁴ Garg

⁵ Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

⁶ Polylactic Acid (PLA)

⁷ Ahmed

⁸ Theory of Critical Distances (TCD)

⁹ Chacon

¹⁰ Honeycomb structures

¹¹ Fracture toughness

دارد. از طرفی واضح است که مقاومت بیشتر نمونه در راستای چاپ دور از انتظار نیست.

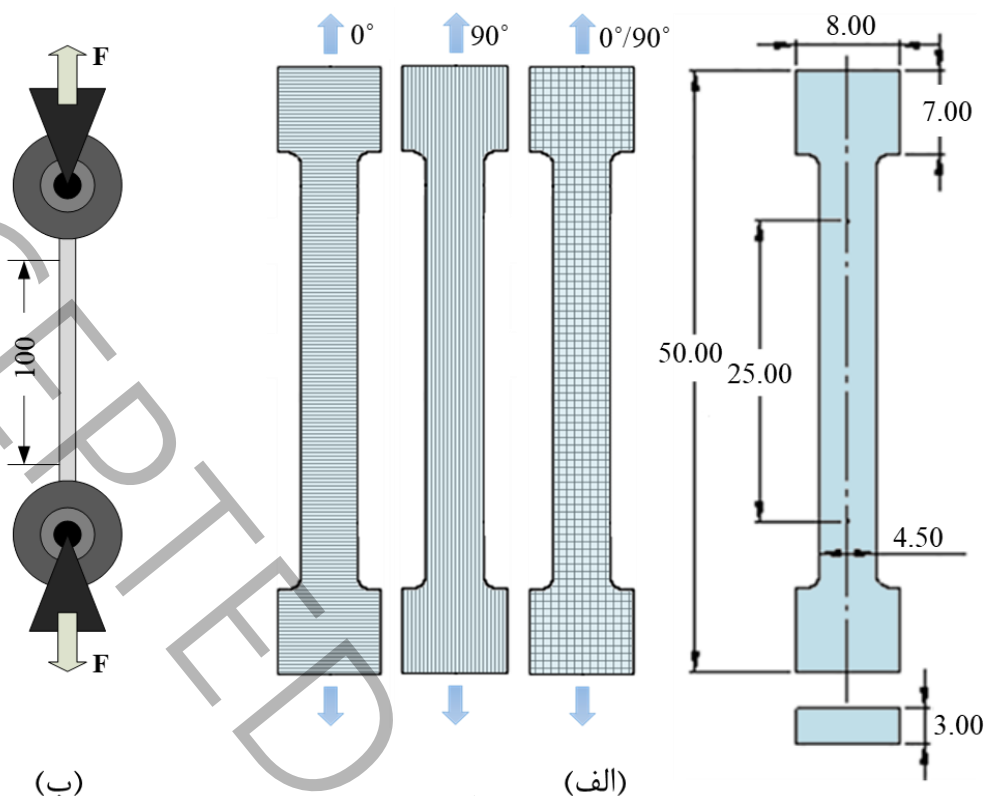
در این تحقیق به بررسی تأثیر متقابل جهت چاپ و راستای بارگذاری پرداخته شده است. برای این منظور، نمونه‌های ترک‌دار در دو زاویه 0° و 90° نسبت به افق چاپ شده‌اند و در دو راستای صفر و نود درجه نسبت به راستای عمود به سطح ترک که به ترتیب معادل مود یک و مود دوی بارگذاری می‌باشد مورد آزمایش قرار گرفته‌اند تا تأثیر متقابل این دو پارامتر مهم بر هم مشخص شود. این تحقیق با مجموعه‌ای از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی برای دستیابی به ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌های ساخته شده با فیلامنت ذوب‌شده در جهت‌های 0° ، 90° و $90^\circ/0^\circ$ سروکار دارد. در ادامه، در نمونه‌های ساخته شده، ترک اولیه ایجاد و تحت بارگذاری‌های مود یک خالص (مود کششی) و مود دوی خالص (مود برشی) انجام گرفت، تا تأثیر متقابل این دو پارامتر مورد بررسی قرار گیرد. در این مطالعه با آزمایش کشش ساده و آزمایش شکست نمونه‌های پلی‌لاکتیک اسید خواص مکانیکی و رفتار آن در حضور ترک، به صورت تجربی بررسی شد. منحنی‌های نیرو-جابجایی برای آزمایش‌های شکست استخراج شد و برای محاسبه ضریب شدت تنش بحرانی استفاده شد. نمونه ترک خورده و نوک ترک با روش اجزای محدود^۱ در مود کششی و برشی مدل‌سازی شدند تا تغییرات پارامترهای هندسی مودهای یک و دو تعیین شوند.

۲- آماده‌سازی نمونه

پلی‌لاکتیک اسید ماده‌ای برای ساخت نمونه‌های ساخت افزایشی انتخاب شد. پلی‌لاکتیک اسید پلیمری است که به صورت فیلامنت موجود است و در فرایند مدل‌سازی رسوبی فیلامنت در چاپگر سه‌بعدی قرار گرفته و مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶]. مطالعات قبلی (به عنوان مثال، [۲۰، ۵]) پارامترهای مناسب برای فرایند مدل‌سازی رسوبی فیلامنت را ارائه داده‌اند. با توجه به این منابع، دمای نازل 210°C درجه سانتی‌گراد، دمای بستر 60°C درجه سانتی‌گراد و سرعت چاپ 30 میلی‌متر بر ثانیه برای این تحقیق انتخاب شدند. برای تولید نمونه‌های چاپ سه‌بعدی، قطر نازل خروجی 0.4 میلی‌متر، چگالی پرکنندگی 1.100 و ضخامت لایه 0.2 میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. هیچ‌گونه عملیات حرارتی روی نمونه‌های ساخته شده سه‌بعدی اعمال نشد. از سه جهت مختلف برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد (0° ، 90° و $90^\circ/0^\circ$). ابعاد و راستای چاپ نمونه‌های دمبلی در شکل ۱ نشان داده شده است. نمونه‌ها به صورت هندسه‌های دمبلی و پروانه‌ای ساخته شدند تا به ترتیب خواص مکانیکی و رفتار شکست آن‌ها مورد بررسی قرار گیرند.

¹ Finite Element Method (FEM)

² Infill density



شکل ۱: الف) ابعاد و راستای چاپ نمونه‌های دمبلی، ب) شماتیک نحوه انجام آزمایش کشش بر روی فیلامنت‌های پلی‌لاکتیک اسید.

Fig. 1. a) Dimensions and printing orientation of dog-bone specimens, b) schematic of the tensile testing setup for PLA filaments.

۳- آزمایش‌های تجربی

۳-۱- استخراج خواص ماده

قبل از آزمایش نمونه‌های دمبلی، استخراج خواص مکانیکی فیلامنت‌های خریداری شده پلی‌لاکتیک اسید ضروری می‌باشد. این کار در تحقیق قبلی محققان انجام شده است [۹]. چنانکه در شکل ۱ (ب) به صورت شماتیک نمایش داده شده است، یک فیلامنت ۲۰۰ میلی‌متری در یک گیره خاص تثبیت و در دمای اتاق آزمایش شده است. قرقه بین دسته‌های دستگاه تست کشش قرار داده شده تا از هرگونه نیروی خارج از مرکز در فیلامنت جلوگیری شود. خواص مکانیکی استخراج شده در جدول ۱ قابل مشاهده است. برای استخراج خواص مکانیکی نمونه‌های چاپ شده، نمونه‌های دمبلی شکل مطابق استاندارد ASTM D638 تهیه شدند [۲۱]. تمامی نمونه‌ها با رعایت شرایط استاندارد و در شرایط یکسان مورد آزمایش قرار گرفتند. آزمایش‌ها در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد و به منظور کاهش اثرات دینامیکی، سرعت بارگذاری برابر با ۱.۰ mm/min در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها با دستگاه سنتم^۱ انجام شد و برای کاهش خطای آزمایش‌ها، هر آزمایش هفت بار تکرار شد و مقادیر میانگین ملاک محاسبات قرار گرفتند. در شکل ۲، منحنی تنش حقیقی برحسب کرنش حقیقی نمونه‌های دمبلی چاپ شده با زوایای ۰°، ۹۰° و ۹۰°/۰° نشان داده شده است. چنانکه انتظار می‌رفت با افزایش بارگذاری، پس از مقدار کمی رفتار پلاستیک، شکست ناگهانی و تقریباً ترد مشاهده می‌شود که نشان از امکان استفاده از تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی دارد. همچنین مشاهده می‌شود که نمونه با زاویه چاپ ۰°، زودتر از نمونه‌های دیگر دچار شکست شده است؛ افزون بر اینکه استحکام نهایی آن نیز در مقایسه با نمونه‌های چاپ شده در جهات ۹۰°/۰° و ۹۰° کمتر می‌باشد. دلیل این مشاهدات را می‌توان در جهت‌گیری فیبرها در هریک از نمونه‌ها یافت. در واقع در نمونه با زاویه چاپ ۰° عامل تعیین استحکام نمونه‌ها، میزان چسبندگی

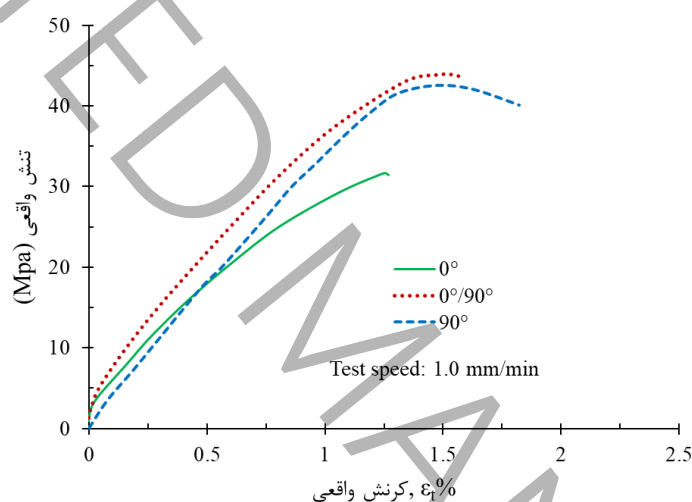
^۱ Santam

فیبرها است در حالی که در نمونه با زاویه چاپ 90° ، عامل استحکام نمونه‌ها همراستایی با فیبرها می‌باشد. توجه شود که در این تحقیق زاویه چاپ نمونه‌ها نسبت به راستای افق بیان شده است و با راستای بارگذاری ارتباطی ندارد. با بررسی دقیق‌تر مقادیر عددی منحنی‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که با تغییر راستای چاپ از 0° به 90° یا $90^\circ/0^\circ$ ، مقادیر حداکثر تنش به مقدار تقریبی ۳۹٪ افزایش یافته است. نکته جالب اینکه علی‌رغم افزایش مقدار حداکثر تنش، میزان کرنش قبل از شکست نیز روندی افزایشی داشته و در حدود ۳۰٪ افزایش یافته است. برای همین واضح است که از بابت استحکام ماده، استفاده از راستاهای چاپ 90° یا $90^\circ/0^\circ$ ، بر زاویه 0° ارجحیت دارد. حال لازم است که تأثیر این راستای چاپ بر مقاومت ماده در برابر رشد ترک نیز مشخص گردد.

جدول ۱: نتایج آزمایش کشش بر روی فیلامنت‌های پلی‌لاکتیک اسید [۹].

Table 1. Results of tensile tests conducted on polylactic acid filaments [9].

مدول الاستیسیته (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	کرنش نهایی (%)
۲٫۱۰	۴۳٫۷۹	۴۸٫۹۵	۲۰٫۹۶



شکل ۲: منحنی تنش-کرنش حقیقی نمونه‌های تهیه شده به روش ساخت افزایشی فیلامنت ذوب‌شده

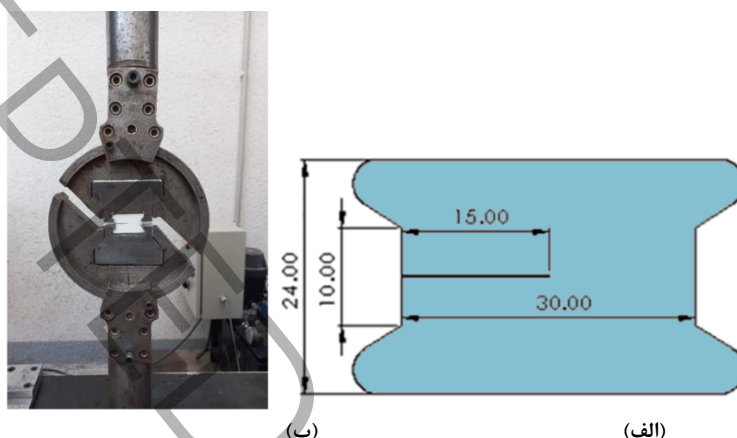
Fig. 2. True stress-true strain curves of specimens manufactured via FFF.

در ادامه لازم است تا خواص ماده استخراج شده از آزمون کشش نمونه‌ها با راستاهای ساخت مختلف به‌طور دقیق‌تری بررسی شود. طبق نتایج، مشاهده شد که اختلاف مقادیر خواص مدول الاستیسیته، تنش تسلیم، استحکام نهایی و کرنش نهایی در جهات ساخت مختلف، به ترتیب ۱۶٪، ۳۹٪، ۱۷٪ و ۳۰٪ می‌باشد. با توجه به تئوری شکست مورد استفاده در این تحقیق، که در بخش‌های بعدی به آن پرداخته شده است، عمده تأثیرپذیری از پارامتر مدول الاستیسیته می‌باشد. برای همین نتیجه گرفته می‌شود که ناهمسانگردی موجود در رابطه با خواص کششی ماده تأثیرگذاری جزئی دارد و مداخله قابل توجهی در مقادیر شکست بحرانی نداشته و قابل چشم‌پوشی است. این مشاهده در تحقیق مشابه دیگری که آن هم متمرکز بر پلی‌لاکتیک اسید چاپ شده در راستاهای ساخت مختلف بود نیز گزارش شده و به همین شکل از آن چشم‌پوشی شده است [۱۹]. به همین دلیل در شبیه‌سازی‌ها از مقادیر میانگین خواص مکانیکی استفاده شده است.

۳-۲- آزمایش‌های شکست

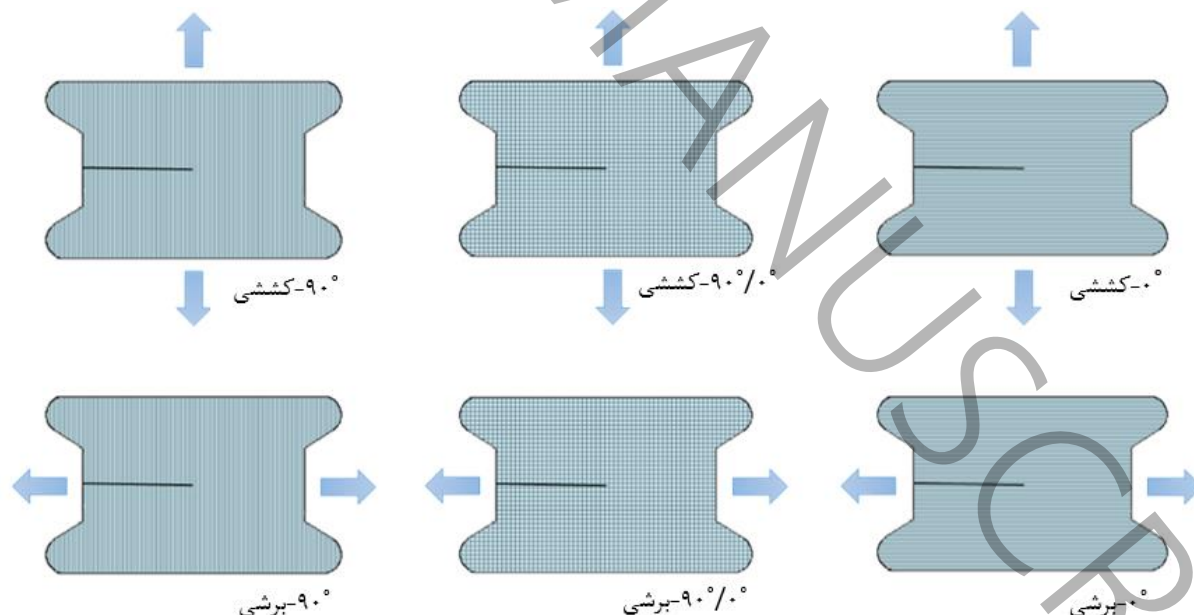
با توجه به اینکه، هدف اصلی بررسی تأثیر متقابل راستای چاپ و راستای بارگذاری نسبت به ترک می‌باشد، بهتر است که از نمونه ترک‌دار یکسان در تمامی آزمایش‌ها استفاده شود. گیره آرکان و نمونه پروانه‌ای شکل آن، از جمله مواردی هست که این امکان را به

خوبی فراهم می‌کند [۲۳،۲۲]. در این تحقیق از یک نسخه اصلاح شده گیره آرکان استفاده شده است که ایرادات موجود در نسخه‌های قبلی در آن اصلاح شده است [۲۵،۲۴]. آزمایش شکست با نمونه‌های کاملاً یکسان و در دو راستای بارگذاری نسبت به راستای ترک، برای نمونه‌های تهیه شده در سه راستای چاپ 0° به 90° یا $90^\circ/0^\circ$ انجام شد (شکل ۳) و در شکل ۴ خلاصه‌ای از آن ارائه شده است. هر آزمایش شکست سه بار تکرار شد و مقادیر میانگین ملاک عمل قرار گرفتند. همچنین مشابه حالت قبل، برای جلوگیری از اثرات دینامیکی، سرعت بارگذاری برابر 1.0 mm/min در نظر گرفته شد.



شکل ۳: الف) نمایی از آزمایش شکست نمونه پروانه‌ای ترک‌دار در نسخه اصلاح شده گیره آرکان و ب) ابعاد نمونه پروانه‌ای ترک‌دار.

Fig. 3. a) Illustration of fracture testing of pre-cracked butterfly-shaped specimens using a modified Arcan fixture, b) dimensions of the pre-cracked butterfly-shaped specimen.

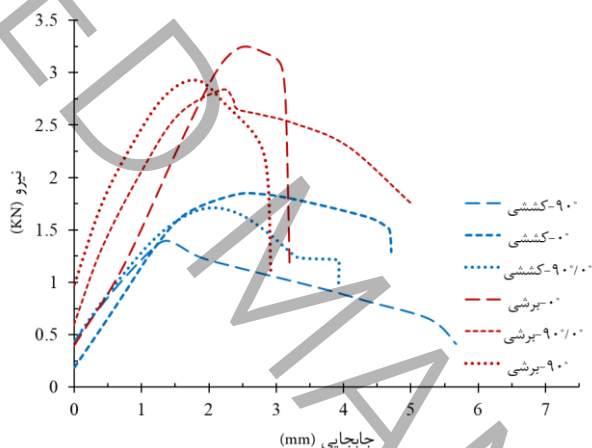


شکل ۴: چیدمان آزمایش‌های انجام شده: بخش اول نام‌گذاری بیانگر زاویه چاپ و بخش دوم آن، بیانگر بارگذاری می‌باشد که در دو نوع بارگذاری کششی و برشی (نسبت به راستای ترک) است.

Fig. 4. Configuration of the conducted experiments: the first part of the notation indicates the printing orientation, and the second part denotes the loading condition, comprising tensile (mode-I) and shear (mode-II) loading relative to the crack orientation.

نتایج نیرو-برحسب جابجایی آزمون‌های تجربی شکست در شکل ۵ نمایش داده شده است. مشابه نمونه‌های دمبلی، در نمونه‌های

پروانه‌ای نیز شکست ترد مشاهده می‌شود. چنانکه از هندسه نمونه پروانه‌ای قابل پیش‌بینی بود، سطح نیروی تحمل شده قبل از شروع ترک، تحت بارگذاری برشی بیشتر از بارگذاری کششی می‌باشد. می‌توان نمونه‌ها را از بابت راستای چاپ نیز مورد بررسی قرار داد. چنانکه مشاهده می‌شود، در نمونه‌های تحت کشش، نیروی تحمل شده در حالت متقاطع، بیشتر از بقیه حالت‌ها می‌باشد و برای همین می‌توان نتیجه گرفت که، ناحیه چسبنده بین فیبرها تأثیر زیادی در تحمل بار در این حالت دارد؛ در حالی که در حالت موازی، فیبرها سهم بیشتری در باربری دارند و به جهت صلبیت بیشتر، مانع از تغییر شکل بیشتر نمونه قبل از لحظه رشد ترک شده‌اند. اختلاف در مقدار جابجایی این دو، قبل از شروع رشد ترک در حدود ۹۳٪ می‌باشد. واضح است که محل حداکثر تنش می‌تواند به عنوان نشانه‌ای از ناحیه شروع رشد ترک باشد. راستای چاپ شبکه‌ای $90^\circ/0^\circ$ ، رفتاری مابین این دو حالت را نشان داده است. در واقع با کاهش تعداد فیبرها در راستای بارگذاری، باعث شده تا حدودی از صلبیت آن کاسته شود و بر میزان تغییر شکل نمونه قبل از شروع رشد ترک افزوده شود. در رابطه با حداکثر بار تحمل شده نیز، همین رفتار مشاهده می‌شود و بار تحمل شده توسط آن مابین دو حالت دیگر است. در رابطه با بارگذاری مود کششی، رفتار مشاهده شده کمی متفاوت می‌باشد و حالت موازی بهترین عملکرد را داشته است. در این حالت، نمونه چاپ شده در راستای متقاطع، با سهولت بیشتری نسبت به دیگر جهات دچار شکست شدند و دلیل آن، تورق^۱ اتفاق افتاده در نمونه‌ها بوده است که می‌تواند از عوامل مختلفی مانند پارامترهای چاپ نشأت بگیرد.



شکل ۵: منحنی نیرو-جابجایی نمونه‌های پروانه‌ای ساخته شده به روش فیلامنت ذوب شده تحت ترکیبی از نیروهای کششی و برشی با راستاهای ساخت 0° ، 90° و $90^\circ/0^\circ$.

Fig. 5. Load-displacement curves of butterfly-shaped specimens manufactured via Fused Filament Fabrication under combined tensile and shear loading with raster orientations of 0° , 90° , and $0^\circ/90^\circ$.

۴- مفاهیم تئوری شکست

مسئله اصلی در پیش‌بینی شکست مواد، تعیین مقادیر چقرمگی شکست تحت شرایط مختلف می‌باشد. شکل ۶ ناحیه نزدیک به نوک یک ترک را در یک ماده الاستیک تحت تنش‌های درون صفحه‌ای نشان می‌دهد. شایان ذکر است که هر مؤلفه تنش با یک ثابت، K ، متناسب است. این موضوع از نظر ریاضی قابل تحلیل است و توزیع تنش و جابجایی در نوک ترک را توصیف می‌کند، همچنین رفتار و بحرانی بودن ترک را نیز مشخص می‌کند. راه حل برای دستیابی به ضریب K شامل عبارت‌هایی است که نشان دهنده تنش (یا نیرو)، طول ترک و هندسه هستند. این راه حل به طور کامل، هندسه ناحیه محلی یک ساختار، تغییرات ترک و نحوه اعمال بار را در نظر می‌گیرد. این عامل ثابت که به عنوان ضریب شدت تنش شناخته می‌شود، به طور کامل شرایط نوک ترک در یک ماده الاستیک خطی را مشخص می‌کند. این عامل به ناحیه مشخصی نزدیک به نوک ترک اشاره دارد، همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است. در این ناحیه، میدان تنش به طور کامل توسط ضریب شدت تنش K_I یا K_{II} توصیف می‌شود. در این راستا، آزمایش چقرمگی شکست با هدف

¹ Delamination

تعیین ضریب شدت تنش بحرانی (K_{IC}) تحت شرایط کرنش صفحه‌ای انجام می‌شود. این ویژگی برای توصیف مقاومت شکست اشیاء در طراحی سازه‌ای استفاده می‌شود. استانداردهای ASTM E399 و ASTM D5045 توصیه‌هایی در مورد چقرمگی شکست در مود کششی تحت کرنش صفحه‌ای (K_{IC}) برای فلزات و پلاستیک‌ها ارائه داده‌اند. ضریب شدت تنش (K_{IC}) در نوک ترک در نمونه‌های کششی را می‌توان از طریق معادله (۱) تعیین کرد [۲۶]:

$$K_{IC} = \frac{P_C \sqrt{\pi a}}{wt} f(a/w) \quad (1)$$

در این رابطه، P_C نشان‌دهنده بار بحرانی شکست است. w و t به ترتیب نمایانگر عرض و ضخامت نمونه هستند. a طول ترک را نشان می‌دهد، در حالی که $f(a/w)$ نشان دهنده ضرایب شدت تنش بی‌بعد یا ضرایب هندسی (مستقل از ماده) است که از شبیه‌سازی المان محدود نمونه آزمایشی به دست می‌آید. شرایط اولیه لازم، مکانیک شکست الاستیک خطی^۱ و کرنش صفحه‌ای می‌باشد. مقدار K_{IC} در نوک ترک برای نمونه پروانه‌ای اصلاح شده به صورت معادله (۲) قابل محاسبه است:

$$K_{IC} = \frac{P_C \sqrt{\pi a}}{wt} f_I(a/w) \quad (2)$$

بر اساس مکانیک شکست الاستیک خطی، شکست مود یک زمانی رخ می‌دهد که ضریب شدت تنش، K_I ، به مقدار بحرانی خود، K_{IC} (یعنی چقرمگی شکست ماده) برسد. گرچه روابط فوق در ابتدا برای مواد همسانگرد ارائه گردیده‌اند، اما در تحقیقات مختلفی با تقریب قابل قبولی برای مواد ناهمسانگرد، مانند کامپوزیت‌ها یا آلیاژهای نوردشده، نیز استفاده شده است [۲۸، ۲۷]. این امر به دلیل آن است که در این روابط، پارامتر $f(a/w)$ که وابسته به هندسه و مستقل از خواص ماده است، نقش اصلی را ایفا می‌کند، در حالی که پارامتر P_C تنها پارامتر متأثر از ماده بوده و رفتار واقعی، از جمله ناهمسانگردی، را منعکس می‌کند. همچنین بهتر است ضرایب شدت تنش بحرانی برای هر جهت به صورت جداگانه گزارش شوند. با این حال، هنگامی که میزان تغییر شکل پلاستیک در اطراف نوک ترک قابل توجه است، استفاده از یک پارامتر دیگر به نام J پیشنهاد می‌شود. این پارامتر نرخ تغییر در انرژی پتانسیل خالص برای جامدات الاستیک غیرخطی را نشان می‌دهد و در مکانیک شکست الاستیک-پلاستیک به عنوان یک پارامتر مرتبط با شدت تکینگی^۲ در نوک ترک شناخته می‌شود. روش‌های عددی مختلفی برای تعیین J در اجسام ترک‌دار وجود دارد [۲۹]، مانند محاسبه مستقیم با استفاده از انتگرال‌های کانتور یا روش‌های گسترش ترک مجازی. به روش مشابه، می‌توان طبق معادله (۳) به مقادیر بحرانی شکست تحت بارگذاری مود دو یا برشی نیز دست یافت.

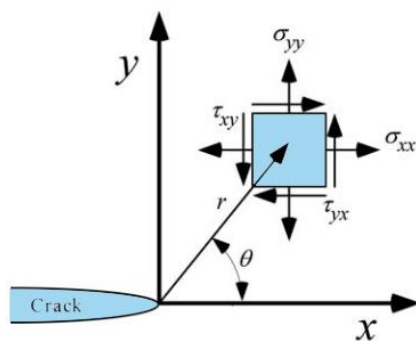
$$G_I = \frac{K_I^2}{E'} \quad (3)$$

در هر دو مکانیک شکست الاستیک خطی و الاستیک-پلاستیک، انتگرال J به عنوان یک پارامتر مهم برای توصیف رفتار شکست عمل می‌کند. این رابطه به عنوان یک معیار برای شروع ترک عمل می‌کند و این زمانی اتفاق می‌افتد که J به مقدار بحرانی خود یعنی J_C برسد. انتگرال J_C همچنین مقایسه معناداری با سایر پارامترهای مربوط به شکست را تسهیل می‌کند. در شرایط تنش صفحه‌ای، مدول مؤثر که با E' نشان داده می‌شود، معادل مدول یانگ^۳ (E) است. در حالی که، در شرایط کرنش صفحه‌ای، E' با معادله $E' = E / (1 - \nu^2)$ تعریف می‌شود، که در آن ν نشان دهنده نسبت پواسون است.

¹ Linear Elastic Fracture Mechanics

² Singularity

³ Young's modulus



شکل ۶: شماتیکی از ناحیه نوک ترک [۳۰].

Fig. 6. Schematic representation of the crack tip region [30].

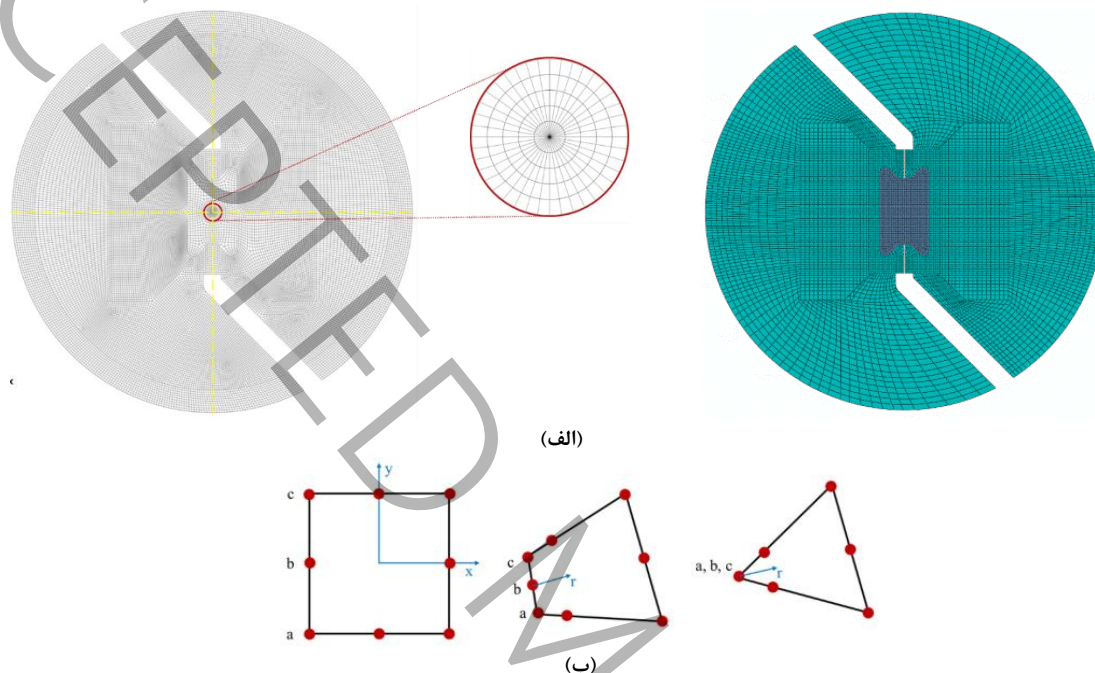
۵- شبیه‌سازی المان محدود

چنانکه در بخش قبل ذکر شد، برای دستیابی به ضرایب شدت تنش بحرانی مطابق معادله (۲)، لازم است تا مقادیر هندسی یا ضرایب شدت تنش بی‌بعد با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود محاسبه گردند. در واقع این مرحله به عنوان مکملی برای آزمایش‌های تجربی شکست است و با جایگذاری مقادیر نیروی بحرانی حاصل شده از آزمایش‌های تجربی شکست و مقادیر هندسی مستخرج از شبیه‌سازی المان محدود، در معادله (۱)، مقادیر ضرایب شدت تنش بحرانی قابل دستیابی خواهند بود. همچنین مطابق روابط (۲) و (۳)، با جایگذاری ضرایب هندسی و نیروهای بحرانی متناظر با هر زاویه بارگذاری، مقادیر ضرایب شدت تنش بحرانی آن زاویه به‌خصوص حاصل خواهد شد. برای همین در ادامه، به شبیه‌سازی المان محدود گیره اصلاح شده آرکان به همراه نمونه پروانه‌ای ترک‌دار پرداخته شده است که در این تحقیق متمرکز به مود کششی و برشی می‌باشد. پس از حل المان محدود تحت یک زاویه بارگذاری مشخص و یک مقدار نیروی دلخواه، با جایگذاری در معادله (۱)، ضریب هندسی متناظر با آن زاویه بارگذاری به دست می‌آید. نکته مهم اینکه، ضریب هندسی، چنانکه از آن مشخص می‌باشد، تنها به هندسه وابسته است و برای همین مستقل از مقدار نیرو و جهت‌گیری ماده می‌باشد و تفاوت خواص مکانیکی ماده، اشاره شده در اشکال ۲ و ۵، تأثیری بر مقادیر ضرایب هندسی مستخرج ندارند. به همین دلیل در شبیه‌سازی آن، از فرض همسانگرد استفاده شده است. در مسائل مکانیک شکست شبه استاتیک، ترک را می‌توان با استفاده از تقریب کانتور انتگرالی مدل‌سازی کرد. برای این منظور، از نرم‌افزار المان محدود آباکوس^۱ استفاده شد، که به‌طور گسترده برای شبیه‌سازی‌های مکانیک شکست مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به تقارن صفحه‌ای مسئله و همچنین طبق تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی، از یک مدل دوبعدی کرنش صفحه‌ای برای شبیه‌سازی استفاده شد، در حالی که همچنان، رفتار مکانیکی مسئله به طور دقیق در نظر گرفته شده است. به دلیل تمرکز تنش بالا در نوک ترک، از یک الگوی مش بهینه شده در این ناحیه استفاده شد، تا دقت پیش‌بینی‌های تنش و کرنش بهبود یابد. به طور خاص، الگوی مش اصلاح‌شده‌ای در اطراف نوک ترک اعمال شد، تا پدیده تمرکز تنش به درستی شبیه‌سازی شوند. همان‌طور که در شکل ۷ (الف) نشان داده شده است، گیره و نمونه پروانه‌ای به همراه الگوی المان‌بندی دقیق در نوک ترک (شکل ۷ (ب)) مدل‌سازی شدند. در این شبیه‌سازی از عناصر چهار ضلعی هشت گره‌ای^۲ استفاده شد، که در نزدیکی نوک ترک برای تطابق با ویژگی‌های میدان تنش تکین، اصلاح شدند. برای دستیابی به تکینگی لازم در نوک ترک که متناسب با $\frac{1}{\sqrt{r}}$ است، المان‌های نزدیک به نوک ترک در این ناحیه بحرانی متمرکز شدند و حداقل اندازه المان‌ها در نوک ترک برابر ۰/۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. علاوه بر این، گره‌های میانی عناصر به سمت یک چهارم نهایی فاصله تا نوک ترک منتقل شدند، تا دقت شبیه‌سازی بیشتر شود و تکینگی به درستی مدل‌سازی گردد. ضرایب شدت تنش تحت مودهای کششی و برشی خالص و نیروی بارگذاری ۱۰۰۰ نیوتن محاسبه شدند و با استفاده از معادله (۲)، مقادیر متناظر ضرایب شدت تنش بی‌بعد به دست آمدند. این مقادیر کاملاً هندسی هستند و به خواص مواد وابسته نیستند که این موضوع امکان استفاده گسترده‌تری از نتایج به دست آمده در مواد مختلف را فراهم می‌سازد. برای حفظ تطابق با شرایط آزمایشی، تلاش

¹ Abaqus

² Eight-node collapsed quadrilateral elements (CPE8R)

شد تا شرایط بارگذاری و مرزی مشاهده شده در آزمون‌های تجربی، به طور دقیق در شبیه‌سازی باز تولید شود. در حدود ۶۳۰۰ المان در مدل در نظر گرفته شد، تا دقت بالایی در میدان‌های تنش و کرنش اطراف نوک ترک حاصل شود و نتایج محاسبات ضرایب شدت تنش با دقت بالایی به دست آید. این رویکرد، نه تنها قابلیت اطمینان نتایج شبیه‌سازی را افزایش می‌دهد، بلکه پایه‌ای قوی برای بررسی بیشتر رفتار شکست تحت شرایط بارگذاری مختلف را هم فراهم می‌سازد. برای اعتبارسنجی بیشتر مدل، تحلیل حساسیت چگالی المان^۱ انجام شد تا استقلال نتایج از اندازه المان تأیید شود.

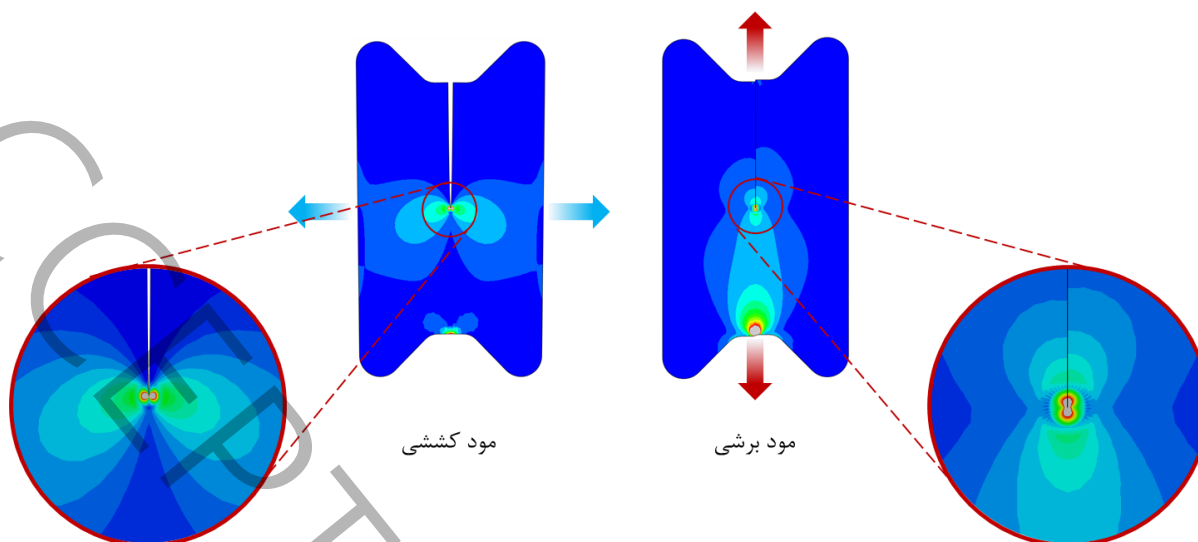


شکل ۷: الف) المان‌بندی گیره و نمونه پروانه‌ای استفاده شده در استخراج ضرایب شدت تنش بی‌بعد ب) الگوی اصلاح شده المان نوک ترک.

Fig. 7. a) Finite element meshing of the Arcan fixture and butterfly-shaped specimen used for extracting non-dimensional stress intensity factors, b) refined mesh pattern at the crack tip.

در ادامه توزیع تنش مربوط به شبیه‌سازی المان محدود نمونه‌های پروانه‌ای تحت نیروی‌های کششی و برشی در شکل ۸ نمایش داده شده است. راستای بارگذاری اعمال شده در شبیه‌سازی در شکل مشخص شده است که به واسطه گیره اصلاح شده آرکان اعمال شده است. چنانکه مشاهده می‌شود، زاویه بارگذاری تأثیر بسزایی بر توزیع تنش در نوع ترک دارد. به علاوه، میزان گستردگی ناحیه پلاستیک اطراف ترک، که در اشکال زیر با رنگ خاکستری نمایش داده شده است، قابل بحث می‌باشد. مقایسه توزیع تنش مود کششی با برشی نشان از وابستگی شکل و اندازه ناحیه پلاستیک به زاویه بارگذاری را نشان می‌دهد. نکته مهم دیگر، کوچک بودن ناحیه پلاستیک نوک ترک در هر دو حالت می‌باشد که تأییدی بر درستی استفاده از تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی در این تحقیق است. برای همین با این توضیح، می‌توان ضرایب شدت تنش مستخرج از تحلیل‌های المان محدود را در معادله (۲) جایگذاری و به مقادیر ضرایب هندسی متناظر با هر زاویه بارگذاری دست یافت. با توجه به استقلال این ضرایب هندسی از مقدار نیروی اعمالی، می‌توان در قدم بعدی آن‌ها را به همراه مقادیر نیروهای بحرانی حاصل شده از آزمایش‌های تجربی شکست، جهت محاسبه مقادیر ضرایب شدت تنش بحرانی استفاده نمود.

¹ Mesh density

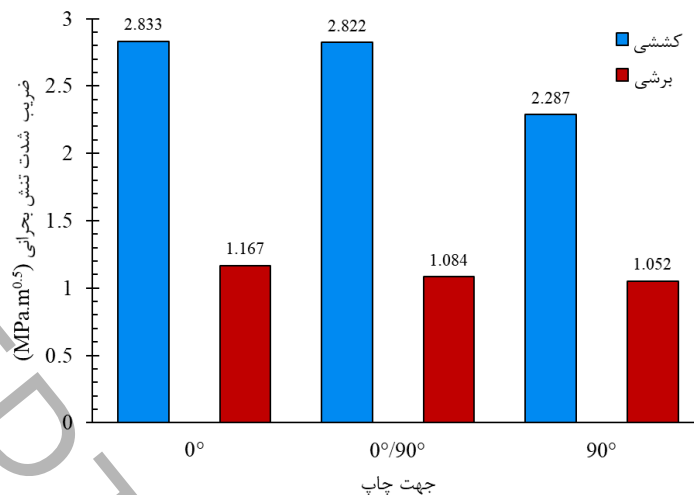


شکل ۸: توزیع تنش در نوک ترک نمونه پروانه‌ای تحت بارگذاری‌های کششی و برشی.

Fig. 8. Stress distribution at the crack tip of the butterfly-shaped specimen under tensile and shear loading conditions.

۶- بحث و نتایج

ضریب شدت تنش بحرانی، برای راستاهای بارگذاری و چاپ مختلف می‌توانند براساس ضریب شدت تنش بی‌بعد یا همان ضریب هندسی مستخرج از تحلیل‌های المان محدود در بخش ۵ و مقادیر نیروی بحرانی، که توسط آزمایش‌های شکست تجربی تعیین شده‌اند، با استفاده از معادله (۲) محاسبه شوند. مقادیر ضرایب بی‌بعد مستخرج که به کمک روش المان محدود محاسبه شده‌اند برای مود کششی و مود برشی برابر با ۲/۲۳ و ۰/۵۰ می‌باشند. با استفاده از جایگزینی این ضرایب هندسی و مقادیر بحرانی نیروهای مستخرج از آزمایش‌های تجربی در معادله (۲)، مقادیر بحرانی شکست مود کششی و برشی به ازای راستاهای چاپ مختلف به دست آمده است. اولین نکته ای که در شکل ۹ به چشم می‌خورد، اختلاف بین مقادیر بحرانی شکست مود کششی و برشی است. چنانکه مشاهده می‌شود، در رابطه با ماده مورد بررسی، در حالت کلی، مقاومت در برابر رشد ترک تحت بار کششی بیشتر از بار برشی می‌باشد. این رفتار در تمامی زوایای چاپ قابل مشاهده است. اختلاف مقادیر بحرانی مود شکست، مود دو نسبت به مود یک به‌طور میانگین در حدود ۵۸٪ می‌باشد. برای همین در استفاده از این ماده تحت بارگذاری برشی، بایستی دقت بیشتری کرد. نکته مهم دیگر قابل استنتاج از این شکل، تأثیر راستای چاپ بر مقادیر بحرانی شکست می‌باشد. چنانکه مشاهده می‌شود، راستای چاپ ۹۰ درجه در مقایسه با دو زاویه دیگر، عملکرد ضعیف تری داشته است. نکته جالب اینکه این عملکرد ضعیف‌تر، در هر دو نوع بارگذاری کششی و برشی مشاهده شده است و برای همین نمی‌توان این ضعف عملکرد را به راستای بارگذاری ربط داد. این نکته بسیار مهم است، چرا که امکان ساخت ماده را در یک جهت (صفر درجه یا ۹۰/۰°) و استفاده از آن، حتی در دیگر راستاها را فراهم می‌کند. نکته دیگر مربوط به عملکرد راستای چاپ ۹۰/۰° می‌باشد. چنانکه مشاهده می‌شود، این راستای چاپ نیز عملکردی تقریباً برابر با راستای چاپ صفر درجه داشته است و میزان افت آن تنها به ترتیب در مود کششی و برشی برابر ۱٪ و ۷٪ بوده است. برای همین از دید مکانیک شکست، عملکرد راستاهای چاپ صفر درجه و ۹۰/۰° را می‌توان یکسان در نظر گرفت و هر دوی آن‌ها به راستای چاپ ۹۰ درجه ارجحیت دارند. برای همین در این حالت، در انتخاب بین راستاهای چاپ صفر درجه و ۹۰/۰°، دیگر خواص مکانیکی تعیین کننده می‌شوند. با بررسی دوباره شکل ۲، مشاهده می‌شود که حداکثر تنش و همچنین حداکثر جابجایی قبل از شکست، در جهات چاپ ۹۰° و ۹۰/۰° به مراتب بیشتر از زاویه صفر درجه می‌باشد. از طرفی نتیجه گرفته شد که، مقاومت ماده در برابر رشد ترک تحت زوایای چاپ ۰° و ۹۰/۰° بهتر از زاویه ۹۰ درجه می‌باشد. برای همین با جمع‌بندی نتایج فوق‌الذکر می‌توان نتیجه گرفت که زاویه چاپ ۹۰/۰° گزینه مناسب برای دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب می‌باشد.



شکل ۹: مقادیر ضرایب شدت تنش بحرانی نمونه‌های ساخته شده به روش فیلامنت ذوب‌شده تحت نیروهای کششی و برشی با راستاهای ساخت ۰°، ۹۰° و ۹۰°/۰°

Fig. 9. Critical stress intensity factor values for specimens manufactured via Fused Filament Fabrication under tensile and shear loading with raster orientations of 0°, 90°, and 0°/90°.

ضرایب شدت تنش بحرانی برای زوایای بارگذاری مختلف و جهت چاپ را می‌توان با ادغام ضرایب شدت تنش بی‌بعد به دست آمده از طریق شبیه‌سازی المان محدود و مقادیر نیروی بحرانی حاصل از آزمایش‌های شکست تجربی، مطابق معادله (۱)، محاسبه کرد. شکل ۹ ضرایب مودهای یک و دو را در جهت چاپ مختلف، با توضیح مفصلی که در جدول ۲ خلاصه شده است، نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که، ضرایب شدت تنش بحرانی با تغییر جهت بارگذاری از کششی به برشی و بدون توجه به جهت چاپ، کاهش یافته است. نتایج آزمایش افزایش در مقادیر انحراف استاندارد را هنگامی که جهت چاپ روی ۰ درجه تنظیم می‌شود، نشان می‌دهد. این پدیده ممکن است به دلیل لایه‌لایه شدن الیاف باشد، زیرا بار اولیه توسط اتصالات بین الیاف به جای خود الیاف تحمل می‌شود. در مورد بارگذاری برشی خالص، الیاف بیشتر بار را تحمل می‌کنند، برخلاف اتصالات بین الیاف، که پراکندگی داده‌ها را به حداقل می‌رساند. همچنین آشکار است که حداقل مقدار ضریب شدت تنش بحرانی زمانی مشاهده می‌شود که جهت چاپ در ۹۰ درجه تنظیم شود. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای شکست بحرانی زمانی که جهت چاپ در دو جهت متعامد باشد، مقادیر بالاتری دارند. این یافته بی‌ارتباط با مشاهدات پیش گفته نیست، زیرا چاپ الیاف در دو جهت متعامد تضمین می‌کند که الیاف بخش قابل توجهی از نیرو را تقریباً در هر موقعیت خاص تحمل می‌کنند. حتی زمانی که نیرو در جهتی غیر از جهت فیبر اعمال می‌شود، وجود الیاف در دو جهت عمود بر هم تضمین می‌کند که الیاف همچنان بخش قابل توجهی از نیرو را تحمل می‌کنند. در نتیجه، مشاهده شده است که مقاومت ماده در برابر انتشار ترک، در جهت‌های چاپ ۰° و ۹۰°/۰° بهتر از ۹۰ درجه است. بنابراین، واضح است که با حرکت از مود یک به مود دو، روند کاهشی در افزایش پارامترهای حیاتی ماده وجود دارد. با این حال، ذکر این نکته ضروری است که حتی در بدترین حالت، افزایش قابل توجه ۱۶ درصدی داشته است.

جدول ۲: ضریب شدت تنش بحرانی در حالت‌های بارگذاری مختلف و مقادیر جهت چاپ و همچنین مقادیر میانگین آن‌ها (MPa√m).

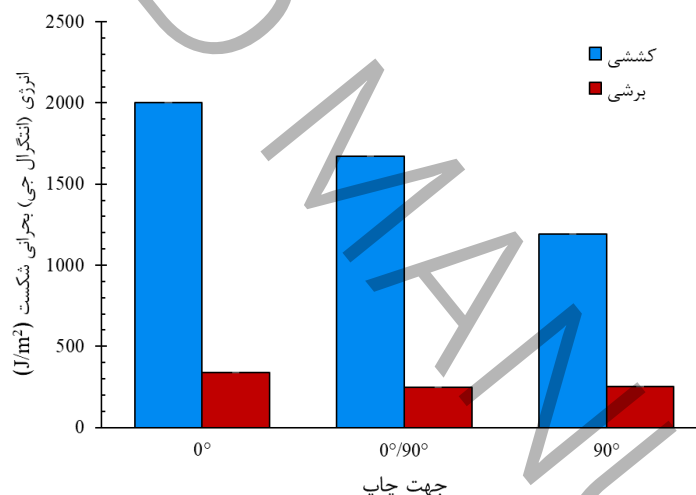
Table 2. Critical stress intensity factors for various loading conditions and printing orientations, along with their mean values (MPa√m).

جهت بارگذاری		۰°		۹۰°/۰°		۹۰°	
		K_{II}	K_I	K_{II}	K_I	K_{II}	K_I
مود یک	۱	۲۶۰	-	۲۸۰	-	۲۲۶	-
	۲	۲۹۹	-	۲۸۹	-	۲۳۲	-
	۳	۲۹۱	-	۲۷۷	-	۲۲۸	-

					۲,۸۳	Avg.
					۰,۲۱	Std.
۱,۰۵	-	۱,۱۶	-	۱,۱۷	-	۱
۱,۰۵	-	۱,۰۴	-	۱,۱۶	-	۲
۱,۰۶	-	۱,۰۵	-	۱,۱۷	-	۳
۱,۰۵	-	۱,۰۸	-	۱,۱۷	-	Avg.
۰,۰۰۳	-	۰,۰۰۷	-	۰,۰۰۱	-	Std.

مود دو

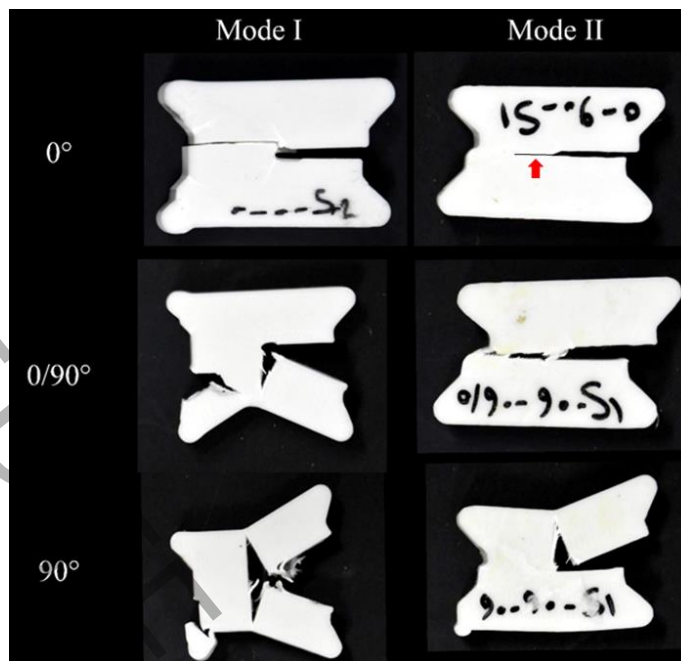
از معادله (۳) برای محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی استفاده شده است که امکان مقایسه نتایج را فراهم می‌کند. این مقادیر اطلاعات مهمی را در مورد انرژی مورد نیاز برای رشد ترک ارائه می‌دهند. شکل ۱۰ مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی را در مودهای یک و دو و در جهت چاپ مختلف نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، در هر دو مود کششی و برشی، مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی از ۰ درجه به طرف ۹۰ درجه کاهش می‌دهد. این کاهش در مود کششی بیشتر است. وجود توان دو در رابطه استفاده شده، اختلاف در مقادیر را تشدید می‌کند. قابل توجه است که این ماده در تمام جهت چاپ تحت بارگذاری مود دو مقاومت پایینی از خود نشان می‌دهد. با مقایسه نتایج به دست آمده در این مطالعه با تحقیقات قبلی می‌توان دریافت که، یافته‌های این مطالعه با یافته‌های سایر مطالعات هم‌خوانی دارد [۳۱، ۱۹]. اختلاف مشاهده شده در نتایج را می‌توان به عوامل مختلفی از جمله تغییرات در ترکیب شیمیایی ماده، تفاوت در پارامترهای چاپ استفاده شده در فرایند ساخت افزودنی و طراحی متمایز نمونه‌های شکست مورد استفاده نسبت داد.



شکل ۱۰: نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی در زوایای بارگذاری مختلف و مقادیر جهت چاپ.

Fig. 10. Critical strain energy release rates at different loading angles and printing orientations.

در شکل ۱۱، تصاویر نمونه‌های شکسته شده مختلف نمایش داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، آزمایش‌های شکست در دو حالت شکست (یک و دو) بر روی نمونه‌هایی که با زوایای چاپ ۰°، ۹۰°/۰° و ۹۰° چاپ شده‌اند، انجام گرفته است. چنانکه در شکل نیز مشاهده می‌شود برای تقریباً تمامی نمونه‌ها، شکست در ناحیه بین‌لایه‌ای رخ داده است، حتی در مورد نمونه‌های متقاطع. در نمونه‌های متقاطع، هر دو جهت فیبرها بار وارد شده را تحمل می‌کنند، اما مجموعه‌ای از فیبرهایی که هم‌راستا با جهت بارگذاری هستند، بار بیشتری را تحمل می‌کنند و ابتدا در این فیبرها شکست رخ می‌دهد. برای همین برای نمونه ۹۰°/۰°، سطوح شکست در زوایای ۹۰°/۰° تشکیل شده‌اند. در نهایت، برای نمونه‌های یک‌جهته که در زاویه ۹۰° ساخته شده‌اند، شکست در ناحیه بین‌لایه‌ای و نه در امتداد فیبرها رخ داده است.



شکل ۱۱: تصاویر پس از شکست نمونه‌های چاپ‌شده در زوایای 0° ، $90^\circ/0^\circ$ و 90° تحت مودهای شکست یک (کششی) و دو (برشی).

Fig. 11. Post-fracture images of specimens printed at orientations of 0° , $0^\circ/90^\circ$, and 90° , subjected to mode-I (tensile), mode-II (shear), and mixed-mode (I/II) fracture conditions.

۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، نمونه‌های استاندارد دمبلی شکل در سه راستای 0° ، $90^\circ/0^\circ$ و 90° چاپ شدند و تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند. تحلیل منحنی‌های تنش-کرنش نشان داد که این ماده، عمدتاً رفتار ترد از خود نشان می‌دهد. همچنین، مشاهده شد که نمونه‌های چاپ شده در زاویه صفر درجه زودتر از سایر نمونه‌ها دچار شکست شده‌اند و استحکام نهایی آن‌ها کمتر از نمونه‌های چاپ شده در راستاهای $90^\circ/0^\circ$ و 90° است. بررسی دقیق‌تر منحنی‌ها نشان داد که، با تغییر جهت چاپ از 0° به 90° یا $90^\circ/0^\circ$ ، حداکثر تنش تقریباً ۳۹ درصد افزایش یافته است. نکته جالب اینکه علیرغم افزایش حداکثر تنش، میزان کرنش قبل از شکست نیز حدود ۳۰ درصد افزایش داشته است. بنابراین، واضح است که از نظر استحکام، راستاهای چاپ $90^\circ/0^\circ$ و 90° نسبت به جهت صفر درجه برتری دارند.

با استفاده از گیره آرکان، نمونه‌های پروانه‌ای تحت بارگذاری‌های کششی خالص و برشی خالص آزمایش شدند. این آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های چاپ شده در سه راستای 0° ، $90^\circ/0^\circ$ و 90° انجام گرفت. نتایج نشان داد که، مقاومت در برابر رشد ترک تحت بارگذاری کششی بیشتر از بارگذاری برشی است و این رفتار در تمامی زوایای چاپ مشاهده شد. اختلاف مقادیر بحرانی مود شکست برشی نسبت به مود کششی، به‌طور میانگین حدود ۵۸ درصد بود، بنابراین، استفاده از این ماده، تحت بارگذاری‌های برشی نیاز به دقت بیشتری دارد. از دیگر نتایج مهم این پژوهش، تأثیر جهت چاپ بر مقادیر بحرانی شکست بود. مشخص شد که راستای چاپ 90° درجه از نظر مقاومت در برابر رشد ترک در مقایسه با دو راستای دیگر عملکرد ضعیف‌تری دارد. این ضعف عملکرد در هر دو نوع بارگذاری کششی و برشی مشاهده شد و نمی‌توان آن را به جهت بارگذاری نسبت داد. این نکته بسیار حائز اهمیت است، زیرا امکان تولید ماده در راستای خاص (0° یا $90^\circ/0^\circ$) و استفاده از آن تحت انواع بارگذاری‌ها را فراهم می‌کند. همچنین، مشاهده شد که، راستای چاپ $90^\circ/0^\circ$ عملکردی تقریباً برابر با راستای صفر درجه دارد و افت عملکرد آن، در مود کششی و برشی به ترتیب تنها ۱ و ۷ درصد است. بنابراین، از دیدگاه مکانیک شکست، می‌توان عملکرد راستاهای 0° و $90^\circ/0^\circ$ را مشابه در نظر گرفت و هر دو نسبت به راستای 90° برتری دارند. در نتیجه، انتخاب بین راستاهای 0° و $90^\circ/0^\circ$ به سایر خواص مکانیکی بستگی خواهد داشت. بررسی نتایج مربوط به حداکثر تنش و جابجایی قبل از شکست نشان داد که استحکام ماده در راستاهای چاپ $90^\circ/0^\circ$ و 90° به مراتب بیشتر از راستای صفر درجه است. همچنین، مقاومت ماده در برابر رشد ترک، در جهت‌های چاپ 0° و $90^\circ/0^\circ$ بهتر از 90° درجه است. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که جهت چاپ $90^\circ/0^\circ$

بهترین گزینه برای دستیابی به عملکرد مطلوب است. این راستای چاپ در عین حال که مقاومت قابل قبول در مقابل رشد ترک دارد، از استحکام کششی و قابلیت تغییر شکل مطلوبی نیز برخوردار است.

این تحقیق بر پایه بررسی رابطه متقابل بارگذاری کششی و برشی، که در مکانیک شکست به نوعی به ترتیب زوایای بارگذاری 0° و 90° نامیده می‌شود، با زاویه چاپ 0° و 90° پایه‌ریزی شده است. با این حال، یک ایده خوب، بررسی زاویه چاپ 45° و $45^\circ +$ و میزان مقاومت در برابر رشد ترک در آن، در مقایسه با حالات قبل می‌باشد. همچنین در آن صورت، بررسی زاویه بارگذاری $45^\circ \pm$ که مود ترکیبی کششی-برشی می‌باشد، می‌تواند نتایج ارزنده‌ای را ارائه دهد که محققان در قدم بعدی تمایل به انجام آن دارند.

۸- منابع و مراجع

- [1] M. Kazemi and A. Rahimi, Improving the Surface Roughness, Material Consumption and Abrasion Ability of Additive Manufacturing Products by Segmentation Design, *Modares Mechanical Engineering* 20(3) (2020) 689–699, (in Persian).
- [2] M.R. Adibeig, F. Vakili-Tahami, and M.-A. Saeimi-Sadigh, Numerical and experimental investigation on creep response of 3D printed Polylactic acid (PLA) samples Part I: The effect of building direction and unidirectional raster orientation, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 145 (2023) 106025.
- [3] C.K. Chua and K.F. Leong, *3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications*, Fifth Edition, (2016).
- [4] I. Gibson, D.W. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 2nd ed, Springer, New York, (2009).
- [5] O.H. Ezech and L. Susmel, On the notch fatigue strength of additively manufactured polylactide (PLA), *International Journal of Fatigue* 136 (2020) 105583.
- [6] J. Cao et al., Mechanical simulation and debonding risk analysis of OLED panels with optically clear adhesives, *Displays* 83 (2024) 102722.
- [7] J. Cao et al., Large strain mechanical behaviors of optically clear adhesives for flexible electronic devices under different temperature, humidity, and strain rates, *Journal of Applied Polymer Science* 141(34) (2024) 1-15.
- [8] M. Domingo-Espin et al., Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts, *Materials & Design* 83 (2015) 670–677.
- [9] M.R. Adibeig et al., Quasi-static simulation and fatigue life estimation of fused filament fabrication of polylactic acid specimens using finite element method, *Journal of Manufacturing Processes* 106 (2023) 202–213.
- [10] H. Li et al., The effect of process parameters in fused deposition modelling on bonding degree and mechanical properties, *Rapid Prototyping Journal* 24(1) (2018) 80–92.
- [11] D. Farbman and C. McCoy, Materials Testing of 3D Printed ABS and PLA Samples to Guide Mechanical Design, in *International Manufacturing Science and Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers, (2016): p. V002T01A015.
- [12] A. Garg and A. Bhattacharya, An insight to the failure of FDM parts under tensile loading: finite element analysis and experimental study, *International Journal of Mechanical Sciences* 120 (2017) 225–236.
- [13] M. Azadi et al., High-cycle bending fatigue properties of additive-manufactured ABS and PLA polymers fabricated by fused deposition modeling 3D-printing, *Forces in Mechanics* 3 (2021) 100016.
- [14] A. a. Ahmed and L. Susmel, A material length scale-based methodology to assess static strength of notched additively manufactured polylactide (PLA), *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 41(10) (2018) 2071–2098.
- [15] J.M. Chacón et al., Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties, *Composites Science and Technology* 181 (2019) 107688.
- [16] S. Lin et al., Influence of structural geometry on tensile properties and fracture toughness in 3D printed novel structures, *Engineering Failure Analysis* 161 (2024) 108277.
- [17] M.R. Khosravani and T. Reinicke, Effects of printing parameters on the fracture toughness of 3D-printed polymer parts, *Procedia Structural Integrity* 47 (2023) 454–459.
- [18] M.R. Khosravani et al., Optimization of fracture toughness in 3D-printed parts: Experiments and numerical simulations, *Composite Structures* 329 (2024) 117766.
- [19] M.R. Ayatollahi et al., The influence of in-plane raster angle on tensile and fracture strengths of 3D-printed PLA specimens, *Engineering Fracture Mechanics* 237 (2020) 107225.
- [20] M.R. Adibeig, F. Vakili-Tahami, and M.-A. Saeimi-Sadigh, Parametric study of the load carrying capacity of polyethylene FSSW single strap joints, *Polymer* 195 (2020) 122434.
- [21] ASTM D638–14 Standard test method for tensile properties of plastics, (2014).
- [22] A. Es'haghi Oskui and N. Soltani, Experimental and numerical investigation of the effect of temperature on mixed-mode fracture behaviour of AM60 Mg alloy, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures* 42 (2019) 2354–2371.
- [23] M. Arcan, Z. Hashin, and A. Voloshin, A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials, *Experimental Mechanics* 18 (1978) 141–146.
- [24] J.M. Greer Jr., S.E. Galyon Dorman, and M.J. Hammond, Some comments on the Arcan mixed-mode (I/II) test specimen, *Engineering Fracture Mechanics* 78(9) (2011) 2088–2094.
- [25] A. Oskui et al., On the Development of a Testing Device for Fracture Characterization under Mixed-Mode Loading Conditions, in *Symposium on Advances in Accelerated Testing and Predictive Methods in Creep, Fatigue, and Environmental Cracking*, ASTM International, (2023): pp. 127–140.
- [26] S. Hashemian, P. Mashhadi Keshtiban, and A. Es'haghi Oskui, Fracture behavior of the forged aluminum 7075-T6 alloy under mixed-mode loading conditions, *Eng Fail Anal* 140 (2022) 106610.

- [27] M. Nikbakht and N. Choupani, Experimental investigation of mixed-mode fracture behaviour of woven laminated composite, *Journal of Materials Science* 44 (2009) 3428–3437.
- [28] S.A. Abbasabad, M. Zadshakoyan, and A.E. Oskui, Experimental and Numerical Investigation of Multi-pass Equal Channel Angular Rolling Effects on the Mechanical Properties of Aluminum Alloy, *J. of Materi Eng and Perform* (2025) 1-14.
- [29] A. Es'haghi Oskui and N. Soltani, Characterization of elastic-plastic fracture toughness of AM60 Mg alloy under mixed-mode loading conditions, *Eng Fract Mech* 204 (2018) 388–403.
- [30] T.L. Anderson, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, 3rd edition, CRC Press, Boca Raton (Fla.), (2004).
- [31] S. Sangaletti et al., Effect of stacking direction and raster angle on the fracture properties of Onyx 3D printed components: A mesoscale analysis, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 129 (2024) 104228.