بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

تأثیر الگوهای اسکن لیزر در فرآیند سینترینگ لیزری تک لایه بر روی پودر پلی پروپایلن

علیرضا کاریان، مهدی رجایی جعفرآبادی، محمدرضا حاذق شنوا، سعید طالش علیخانی

مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران، تهران

چکیده - چاپگرهای سه‌بعدی لیزری یکی از بهترین و کارآمدترین دستگاه‌های نمونه‌سازی سریع در صنعت امروز هستند. در این نوشتار، سعی شده تا اثر الگوهای مختلف اسکن لیزر بر روی استحکام کششی و تغییرات ابعادی نمونه‌هایی از جنس پلی پروپایلن با دانه بندی ۲۰۰ میکرومتر که طی فرآیند یکسان سینترینگ لیزری تک لایه توسط لیزر گاز کربنیک ۲ وات به منظور نمونه سازی، قوام داده شده اند، بررسی گردد . نمونه‌های آزمایش تجربی درسه الگوی مختلف اسکن طبق استاندارد ASTM D882 مورد تست کشش و اندازه گیری ابعادی قرار گرفت و نتایج آن گزارش گردیده است.

کلید واژه- چاپگرهای سه بعدی لیزری، سینترینگ لیزری تک لایه، الگوی اسکن، استحکام کششی، پودر پلی پروپایلن

The Influence of Laser Scanning Pattern on Tensile Strength of Polypropylene Powder through the Single Layer Laser Sintering Process.

AliReza Karian, Mahdi Rajaei Jafarabadi, MohammadReza Hazegh Shenava, Saeed Talesh Alikhani

Iranian National Center for Laser Science and Technology, Tehran, IRAN

Abstract- Nowadays, laser 3D printers are one of the best and efficient devices for rapid prototyping techniques. There is vast number of studies about quality of samples in these printers. In this study, we tried to consider the role of laser scanning pattern in tensile strength as an important quality factor of the samples which are sintered by laser in single layer procedure. Experimental samples have been sintered with low power CO_2 laser on Polypropylene powder with 200 micrometer grain size. Tensile strength and dimensional deviation of samples have been tested according to ASTM D882 standard and results are reported eventually.

Keywords: 3D laser Printer, Single layer laser sintering, scanning pattern, Tensile strength, Polypropylene powder

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

۱-مقدمه

امروزه، صنعت نمونه سازی سریع و پرینترهای سه بعدی[۱] بسیار جذاب شده است. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد لیزر از قبیل دقت و تمرکز انرژی قابل کنترل، استفاده از لیزر نیز در این ماشینها روز به روز گسترش می یابد. نمونه‌سازی سریع در پرینترهای سه بعدی لیزری اغلب با استفاده از تکنیک ساخت لایه‌های افزودنی[۲] صورت می-گیرد. یکی از فناوری‌های مورد استفاده در این تکنیک، سینتر کردن[۳] پودر ماده اولیه به وسیله حرکت باریکه لیزر مطابق با الگو و هندسه مشخص هر مقطع از حجم قطعه است که در آن از انرژی لیزر برای قوام و شکل‌دهی پودر در بستر استفاده می‌گردد. به این فرآیند قوام لیزری با Laser Consolidation گفته می شود[۱].

به این صورت که ابتدا پودر ماده (که در این تحقیق از پودر پلیمر ترموپلاست -پلی پروپایلن– طبق استاندارد DIN16774 (12.84) استفاده شده است) در ابتدا به صورت یک لایه در یک بستر با قابلیت پیش گرم، پراکنده و با ضخامت یکسان فشرده می‌گردد. سپس در حضور گاز محافظ با استفاده از انرژی گرمایی متمرکز لیزر در ناحیه کانونی‌اش و اسکن کانون روی سطح پودر طبق الگوی تعیین شده توسط CAD، عملیات سینتر شدن صورت می‌گیرد. پس از صرف زمان مشخص و قوام پودر اولین لایه از قطعه شکل می‌گیرد. به همین ترتیب لایه‌های بعدی روی لایه قبلی قرار می‌گیرد تا قطعه سه بعدی نهایی ساخته شود. از آنجایی که انتخاب الگوی اسکن مناسب منجر به سینترشدن بهتر و در نتیجه استحکام بالاتر هر لایه می‌گردد، در این نوشتار سه الگوی مختلف اسکن لیزری، برای عملیات سینترینگ تک لایه معرفی و سپس استحکام کششی آن‌ها و همچنین میزان تغییرات ابعادی ناشی از انقباض[۴] یا درجه سینتر شدگی[۵] را در حالت تک لایه(دو بعدی) بررسی و مقایسه می‌شود .

[۱] 3D printer
[۲] Additive Layer Manufacturing
[۳] Laser Sintering
[۴] Shrinkage
[۵] Degree of Sintering

۱-۱ - مدلسازی ریاضی:

مقدار انرژی جذب شده توسط ماده از رابطه (۱)، بدست می آید[۱]:

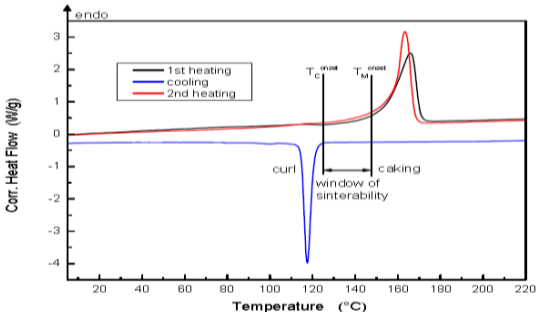
$$E=\frac{P}{v*h*d} \quad (1)$$

که در آن E انرژی جذب شده (J/mm^3) ، P توان لیزر (w)، v سرعت اسکن (mm/min)، h فاصله خطوط هاشور[۶] الگو (mm) و d ضخامت لایه (mm) است. پس از عملیات سینترینگ، ماده اولیه نیاز به خنک شدن دارد، نرخ خنکسازی از رابطه زیر به دست می آید[۱]:

$$k=\frac{T_1+T_0}{t_1-t_0} \quad (2)$$

که در این رابطه k نرخ خنکسازی(C^o/S)، T_0 دمای اولیه و T_1 دمای نهایی (C^o) و t_0 و t_1 زمان اولیه و نهایی(s) هستند.

نمودار DSC: در عملیات سینترینگ پلاستیک های نیمه –کریستالی که ماده اولیه استفاده شده در این تحقیق نیز جزو آنها است، دمایی که عملیات سینتر شدن رخ می‌دهد بین دمای ذوب ماده (T_{melt}) و نصف این مقدار ($T_{melt}/2$) است. نمودار Differential Scanning Calorimetry (DSC) برای هر ماده معرف رفتار کریستاله شدن است. دمای پیش گرم و دمای حاصل از انرژی عامل مطابق این نمودار که در شکل شماره ۱ آمده است، بدست می آید [۲]:



شکل شماره ۱- نمودار DSC مربوط به پودر پلی پروپایلن –کدp7

[۶] Hatch

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

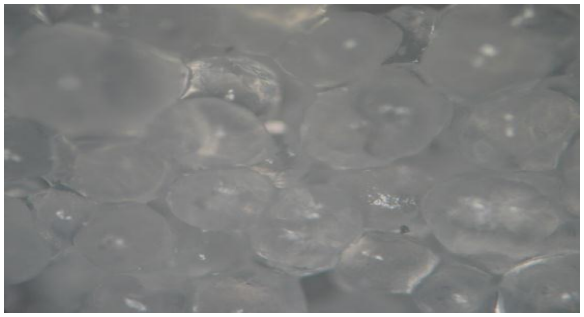
۲-چیدمان آزمایشگاهی:

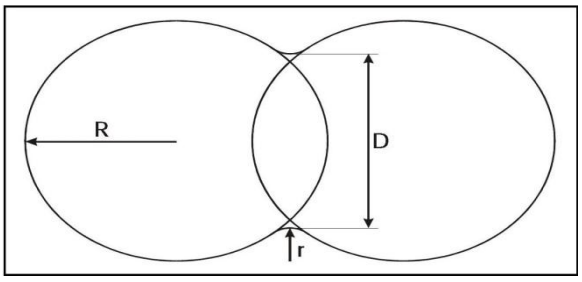
در این آزمایش از یک لیزر CO_2 با توان 2 W استفاده شد. کانونی کردن لیزر توسط یک عدسی ZnSe با قطر 28 mm و فاصله کانونی 127mm انجام شد. قطر پرتو لیزر قبل از عدسی 7mm است. با توجه به اینکه لیزر فوق از دسته لیزرهای گازی با توان پایین بوده و فاکتور کیفیت آن حدود 1.05 می باشد، لذا برای محاسبه قطر لکه در کانون از رابطه ذیل استفاده شده است.

در این فرمول λ طول موج لیزر CO_2، f فاصله کانونی لنز ZnSe و D قطر باریکه قبل از عدسی است. آزمایش بر روی پلیمر پلی پروپایلن با دانه بندی[۷] 200 میکرون کد P7 انجام شده است [۲].

جهت کنترل حرکت نازل لیزر برای اجرای الگوی مدنظر، از یک سیستم کنترل عددی (CNC)[۸] استفاده شده است. سرعت 1650 میلیمتر بر دقیقه و دمای پیشگرم با توجه به نمودار DSC مطابق 130 درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد. جهت جلوگیری از پدیده گرمازای اکسیداسیون از سپر گاز محافظ نیتروژن 5 grade با خلوص بالا طبق استاندارد DIN EN 1089 بهره گرفته شده است. در این آزمایش فاصله هاشور از رابطه (۴) بدست آمده و در طراحی هاشور الگو استفاده شد.

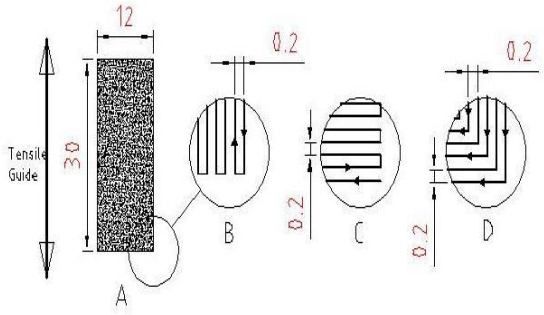
که در این رابطه h فاصله هاشور (mm)، W قطر باریکه لیزر در محل تماس با پودر[۹] (µm) و x نسبت همپوشانی(Overlap Ratio) است، که مطابق با مکانیزم چسبندگی در فرآیند سینترینگ حالت جامد[۱۰] (SSS) تعیین می شود[۳].





شکل شماره ۲- نحوه همپوشانی در مکانیزم چسبندگی SSS مربوط به نمونه های تحقیق- عکس میکروسکوپی (بالا)، نمایش هندسی نحوه همپوشانی (پایین).

درجه سینتر شدگی برابر با D/2R در شکل شماره ۲ (پایین) است که هرچه این عدد بزرگتر باشد استحکام لایه بیشتر است[۴]. با توجه به قطر پودر، برای X مقدار 1.25 در نظر گرفته شد، لذا اندازه h=0.2mm بدست آمد. بر این اساس سه مدل الگوی اسکن به شکل شماره ۳ طراحی گردید.



شکل شماره ۳- الگوهای مختلف اسکن با فاصله هاشور 0.2 mm

در شکل شماره ۳، A، معرف ابعاد نمونه های مستطیل شکل آزمایش و جهت نیروی کشش. B، الگوی اول که حرکت ممتد لیزر (با علامت فلش توپر) در راستای کشش یا X-pattern، وC، حرکت ممتد لیزر عمود بر جهت

---

[۷] Grain size
[۸] Computer Numerical Control
[۹] قطر لکه در کانون
[۱۰] Solid State Sintering

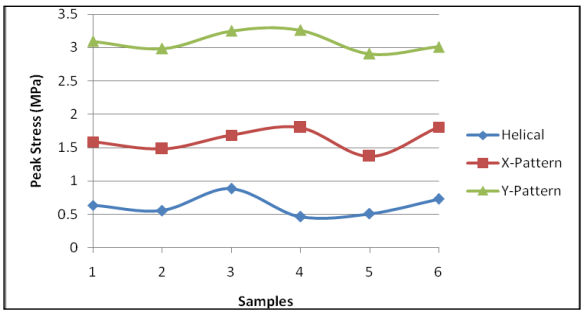
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]

نیروی کشش یا DoY-pattern، حرکت لیزر به صورت پیچاپیچ، از بیرون به داخل (Introvert Helical) است.

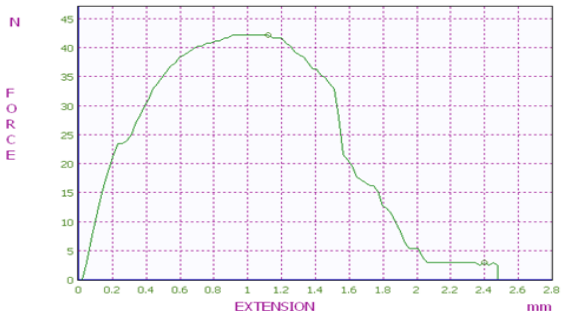
۳- نتایج تجربی: آزمایشات تجربی توسط یک دستگاه تست کشش 2ton با سرعت کشش 5(mm/min)، روی ۱۸ نمونه سینتر شده در سه الگو، تحت استاندارد ASTMD882، (Width/Thic<8) انجام شده است [۵]. اندازه گیری ابعادی با کولیس صورت گرفت.

جدول شماره ۱ – نتایج تست کشش و تغییرات ابعادی

Parameter \ Pattern	Helical	X	Y
Mean Peak Stress(MPa)	0.628	1.622	3.085
Standard Deviation PS	0.156	0.175	0.146
Mean Width deviation(mm)	0.041	0.035	0.043
Mean Length deviation(mm)	0.031	0.011	0.012



شکل شماره ۴ – تفاوت تنش کششی در سه الگوی اسکن



شکل شماره ۵- نمونه منحنی نیرو- کشش برای الگوی Y

۴-بحث و نتیجه گیری:

از بررسی نتایج و نمودارها مشخص است که الگوی Y نسبت به سایر الگوها با اختلاف قابل توجهی دارای استحکام کششی بیشتری (3.085MPa) است. بنابراین:

الف) در شرایط یکسان سینترینگ لیزری تک لایه یک پلیمر نیمه-کریستالی (پلی پروپایلن) از قبیل توان، سرعت اسکن و فاصله هاشور برابر، طرح الگوی اسکن در استحکام کششی لایه سینتر شده موثر است. از بین سه الگوی انتخاب شده، الگویی که در آن حرکت ممتد لیزر عمود بر راستای کشش است، بیشترین تنش کششی را تحمل می کند. یعنی در راستای کشش مذکور، قوام بهتری دارد. به نظر می رسد گرانروی برشی بیشتر ماده در این الگو باعث بالا رفتن درجه سینتر شدگی و هم جوشی بهتر و در نتیجه استحکام کششی بالاتر می گردد.

ب): از نظر اختلاف ابعادی در نمونه های سینتر شده با الگوهای مختلف، تفاوت قابل ملاحظه ای با هم ندارند. یعنی الگوی اسکن در ابعاد نهایی لایه سینتر شده تاثیر چندانی ندارد.

ج) افت نیرو در تست کشش نمونه ها تدریجی است. یعنی شکست آنی در نمونه های سینتر شده دیده نشد (ر.ک . شکل شماره ۵).

۵- مراجع:

[1] Islam, M. et al."*Temperature profile and imaging analysis of laser additive manufacturing of stainless steel*", **Physics Procedia**, 41, 2013, 835-842

[2] Fielder, L. et al. "*Evaluation of Polypropylene powder grades in consideration of the laser sintering processability*" **Journal of Plastics Technology**, 3, 2007, 4

[3] Pilipovic', A. et al. "*Influence of laser sintering parameters on mechanical properties of polymer products*", **3rd International Conference on Additive Technologies**, DAAAM specialized conference, 2010, Nova Gorica, Slovenia

[4] Kruth, J.P. et al "*Binding mechanism in laser sintering and selective laser melting*" **proc. 15th Solid Freeform Fabrication Symposium**, 2004

[5] ASTM D882, "*Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting*"

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-03]