



مطالعه تجربی تأثیر متغیرهای لیزر بر روی خواص مکانیکی نمونه‌های پلی پروپایلن سینتر شده در چاپگرهای سه بعدی لیزری

علیرضا کاریان¹، مهدی مدببری فر^{2*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات مرکزی، اراک

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اراک، اراک

* اراک، صندوق پستی 38156-8-8349، m-modabberifar@araku.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 30 تیر 1394

پذیرش: 01 مهر 1394

ارائه در سایت: 25 مهر 1394

کلیدواژگان:

چاپگر سه بعدی لیزری

سینترینگ لیزری

پودر پلی پروپایلن

تحلیل واریانس

روش فاکتوریل

چاپگرهای سه بعدی لیزری یکی از کارآمدترین دستگاه‌های نمونه‌سازی سریع در صنعت امروز هستند. یکی از تکنیک‌های مورد استفاده برای قوام و شکل‌دهی ماده در این دستگاهها، سینترینگ پودر ماده اولیه به کمک اشعه لیزر است. عوامل مختلفی در بهبود کیفی قطعات تولیدشده به روش سینترینگ لیزری تأثیرگذار هستند. از آنجایی که عامل اصلی فرآیند و ایجاد انرژی لیزر است، لذا متغیرهای مربوط به لیزر در بهبود کیفیت محصول از اهمیت بیشتری برخوردار هستند. در این مقاله اثر شاخص‌های مهم از قبیل توان، سرعت و الگوی اسکن لیزر بر روی استحکام کششی و سفتی نمونه‌هایی از جنس پلی پروپایلن با دانه‌بندی 200 میکرومتر که طی فرآیند یکسان سینترینگ لیزری تک لایه توسط لیزر گاز کربنیک توان پایین سینتر شده‌اند، بررسی شده است. نمونه‌های سینتر شده طبق استاندارد ASTM D882 مورد تست کشش و اندازه‌گیری سفتی به عنوان خروجی‌های آزمایش، قرار گرفتند تا اثرات شاخص‌های مذکور به طور مستقل و در تعامل با یکدیگر بر روی خروجی‌ها با استفاده از تحلیل واریانس بررسی شود و در نهایت معادله عمومی رگرسیون استخراج شده است. روش عمومی فاکتوریل برای طراحی آزمایش‌ها در نظر گرفته شده است. نتایج نشان داده‌اند که الگوی اسکن و توان لیزر بیشترین تأثیر را بر روی استحکام کششی و سفتی نمونه‌های تولیدشده دارند. بیشترین مقدار استحکام کششی 2/9 مگاپاسکال و بیشترین مقدار سفتی 96 نیوتن بر میلیمتر است که با توان 2 وات لیزر و سرعت اسکن 1650 میلیمتر بر دقیقه و تحت الگوی شماره 2 حاصل شده‌اند.

Experimental study of laser parameter effects on mechanical property of laser sintered polypropylene samples in 3D laser printers

Alireza Karian¹, Mehdi Modabberifar^{2*}

1- Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran

* P.O.B. 38156-8-8349, Arak, Iran, m-modabberifar@araku.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 21 July 2015
Accepted 23 September 2015
Available Online 17 October 2015

Keywords:

3D laser printer
laser sintering
polypropylene powder
Variance analysis
Full factorial

ABSTRACT

Today, laser 3D printers are one of the efficient devices for rapid prototyping process. There are a large number of studies about quality of samples in these printers. The laser sintering technique is the one of the popular methods for consolidation and shaping of semi-crystalline polymer powders. In this study, we considered the role of laser parameters including laser scanning pattern, laser scanning speed and power in tensile strength and stiffness as the important factors of the mechanical property of samples which are sintered by laser in single layer procedure. Experimental samples were sintered with low power CO₂ laser on Polypropylene powder with 200 micrometer grain size. Tensile strength and stiffness had been measured according to ASTM D882 standard and results were reported. In this paper, main effects of factors and interactions were considered via the variance analysis under the imperative conditions that have been passed before. The regression equation was derived. A general full factorial method was employed as experimental design. The results show that the laser scanning pattern and laser power have the greatest effects on tensile strength and stiffness of produced samples. The maximum value of responses, 2/9 MPa for mechanical strength and 96 N/mm for stiffness demonstrate that the 2W power of laser with 1650mm/min of scan speed can be the proper value to obtain an optimal response when the selected pattern is No2.

1- مقدمه

است. با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد لیزر از قبیل دقت و تمرکز انرژی قابل کنترل، استفاده از لیزر نیز در این ماشین‌ها روز به روز در حال گسترش یافتن است. نمونه‌سازی سریع در پرینترهای سه بعدی لیزری اغلب با استفاده

امروزه، صنعت نمونه‌سازی سریع و چاپگرهای سه بعدی¹ بسیار جذاب شده

1- 3D printer

Please cite this article using:

A. Karian, M. Modabberifar, Experimental study of laser parameter effects on mechanical property of laser sintered polypropylene samples in 3D laser printers, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 143-150, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

از تکنیک ساخت لایه‌های افزودنی¹ صورت می‌گیرد. یکی از فناوری‌های مورد استفاده در این تکنیک، سینتر کردن² 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 لیزری³ گفته می‌شود [1]. در این فرآیند پودر ماده 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 تعیین‌شده عملیات سینتر شدن صورت پذیرفته و 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.

فرآیند سینترینگ لیزری توسط پژوهشگران متعددی مورد بررسی قرار گرفته است. کرول و همکارانش اولویت شاخص‌ها در بهینه‌سازی فرآیند ساخت افزودنی لیزری را با ارائه یک مدل اجزا محدود شبیه‌سازی و بیان کرده‌اند. مبنای این رویکرد تحت روش موضعی سراسری نامیده و ارائه شده است [2]. در پژوهش دیگری هو و همکارانش با استفاده از پردازش تصویر، کنترل میزان پودر پلیمر برای عملیات سینترینگ لیزری را بررسی کردند و یک حسگر اپتوالکترونیک را برای کنترل میزان پاشش پودر طراحی و معرفی کردند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده بهبود قابل توجه در دقت ابعادی قطعات ساخته‌شده در این روش است [3]. کرول و همکاران پدید قوام پودر توسط لیزر و دستاوردهای مربوط به سینترینگ لیزری را با اشاره به مزایا و معایب به طور کامل جمع‌بندی و به صورت کاملاً علمی دسته‌بندی کردند [4]. لیزرها معمولاً به دو دسته حالت گازی، و حالت جامد تقسیم می‌شوند. بررسی تأثیر لیزر حالت جامد در فرآیند سینترینگ لیزری بر دقت ابعادی و بازده و مقایسه آن با لیزر گازی توسط گلردون و همکاران انجام شد [5]. استارلی و همکارانش بهبود تخلخل را در سطوح نمونه‌های سینترشده پلیمری بررسی کردند. آن‌ها با رویکرد دستیابی به صافی سطح مناسب در شرایط یکسان قطر پودر، روش ایجاد شتاب در ذرات را برای پر کردن فضا مختلف آزمایش کردند [6].

از آنجایی که انتخاب متغیرها و شاخص‌های مهم لیزر منجر به سینتر شدن بهتر و در نتیجه استحکام بالاتر هر لایه می‌گردد، در این پژوهش تأثیر متغیرهای لیزر از قبیل توان، سرعت اسکن و الگوی اسکن بر روی خواص مکانیکی لایه سینتر شده شامل استحکام کششی و سفتی یک لایه بررسی می‌گردد. برای انجام تحلیل از روش آماری و تحلیل واریانس⁴ استفاده می‌گردد.

2- معادلات حاکم بر فرآیند

در فرآیند سینترینگ لیزری، عامل شکل‌دهی ایجاد حرارت توسط لیزر است. در واقع با جذب انرژی حرارتی لیزر توسط پودر ماده اولیه، دمای ماده تا نزدیکی‌های نقطه ذوب بالا می‌رود و پودرها به یکدیگر چسبیده به صورت نیمه جامد در می‌آیند. به این دما دمای کیکی شدن گفته می‌شود. لذا میزان انرژی دریافتی از لیزر و جذب‌شده توسط ماده از اهمیت بالایی برخوردار است. مقدار انرژی جذب‌شده توسط ماده از رابطه (1) به دست می‌آید [1]:

$$E = \frac{P}{V \cdot D \cdot H} \quad (1)$$

در این رابطه E انرژی جذب‌شده (ژول بر میلی‌متر مکعب)، P توان لیزر (وات)، V سرعت اسکن (میلی‌متر بر دقیقه)، H فاصله خطوط هاشور⁵ الگو (میلی‌متر) و

در عملیات سینترینگ لیزری پلاستیک‌های نیمه - کریستالی که ماده اولیه استفاده‌شده در این پژوهش نیز جزو آن‌ها است، دمایی که عملیات سینتر شدن (دمای کیکی شدن) رخ می‌دهد بین دمای ذوب ماده و نصف این مقدار است. برای تعیین محدوده دمای کاری می‌توان از نمودار⁶ DSC استفاده کرد. این نمودار برای هر ماده معرف رفتار کریستاله شدن است. با توجه به نمودار مذکور محدوده دمای مورد نیاز برای کیکی شدن به دست می‌آید. در اینجا لازم نیست تمام انرژی حرارتی برای رسیدن به دمای کیکی شدن توسط لیزر تأمین شود بلکه می‌توان بخش عمده‌ای از انرژی حرارتی را توسط پیش گرم به وجود آورد. دمای سینتر شدن از رابطه (3) به دست می‌آید [7]:

$$T_s = T_p + \frac{1}{C} \left[\left(\frac{\pi \eta}{4\rho} \right) \cdot (E) - \Delta L \right] \quad (3)$$

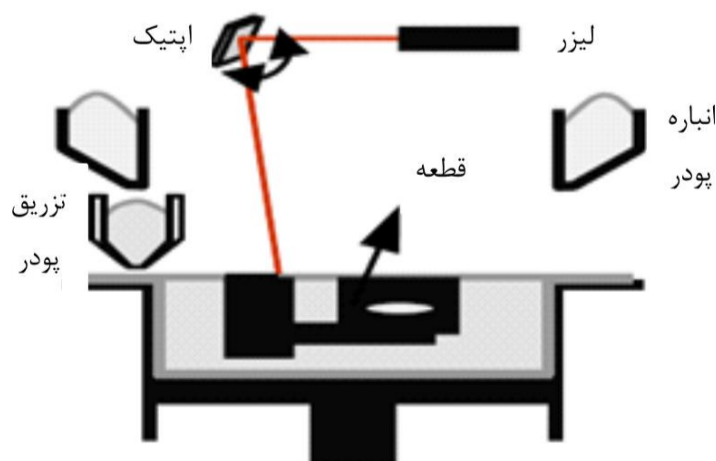
که T_s دمای سینتر شدن (درجه کلین)، T_p دمای پیشگرم (درجه کلین)، C ظرفیت گرمایی ویژه (ژول بر گرم درجه کلین)، η شاخص کیفی اتصال، ρ چگالی ماده (کیلوگرم بر مترمکعب)، L گرمای نهان ذوب (ژول بر کیلوگرم) و در نهایت E مقدار انرژی جذب‌شده (رابطه 1) است.

با توجه به محدودیت در تأمین پودرهای پلیمری با اندازه مناسب در بازار، در این پژوهش از پودر پلی پروپایلن استفاده شده است.

3- آزمایش‌ها

3-1- چیدمان آزمایشگاهی

در شکل شماره 1 چگونگی عملیات سینترینگ لیزری تک لایه که بر اساس آن دستگاه مورد نیاز آزمایش ساخته شده است به همراه اجزا لازم به صورت شماتیک نشان داده شده است. در این پژوهش از یک لیزر گاز کربنیک با توان حداکثر 3 وات استفاده شده است. کانونی کردن لیزر توسط یک عدسی محدب با قطر 28 میلی‌متر و فاصله کانونی 127 میلی‌متر انجام شده است. قطر پرتو لیزر قبل از عدسی 7 میلی‌متر است. با توجه به اینکه لیزر فوق از دسته لیزرهای گازی با توان پایین بوده و فاکتور کیفیت⁷ آن 1/05 است، لذا برای محاسبه قطر لکه در کانون از رابطه شماره (4) استفاده شده است.



شکل 1 شماتیک سینترینگ لیزری و اجزا لازم

6- Differential Scanning Calorimetric
7- M² factor

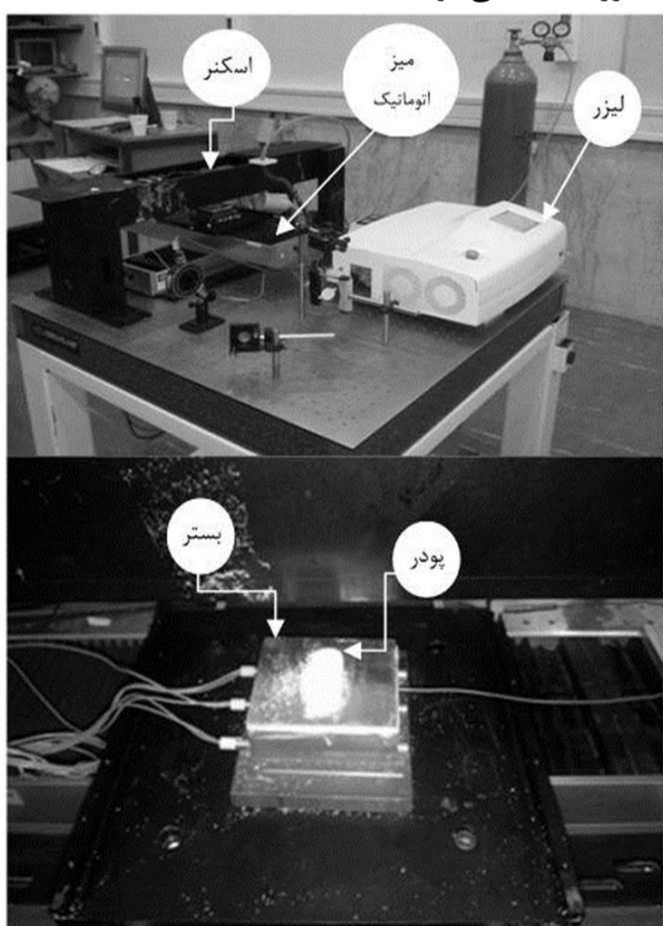
1- Additive Layer Manufacturing
2- Laser Sintering
3- Laser Consolidation
4- ANOVA
5- Hatch

دست می‌آید. درجه سینتر شدگی برابر با $D/2R$ در شکل شماره 2 است که هرچه این عدد بزرگ‌تر باشد استحکام لایه بیشتر است [10]. با توجه به قطر پودر، برای x مقدار $1/25$ در نظر گرفته شد، لذا فاصله هاشور برابر با $0/2$ میلیمتر به دست آمد. لذا سه مدل الگوی اسکن به صورت شکل شماره 3 طراحی گردید.

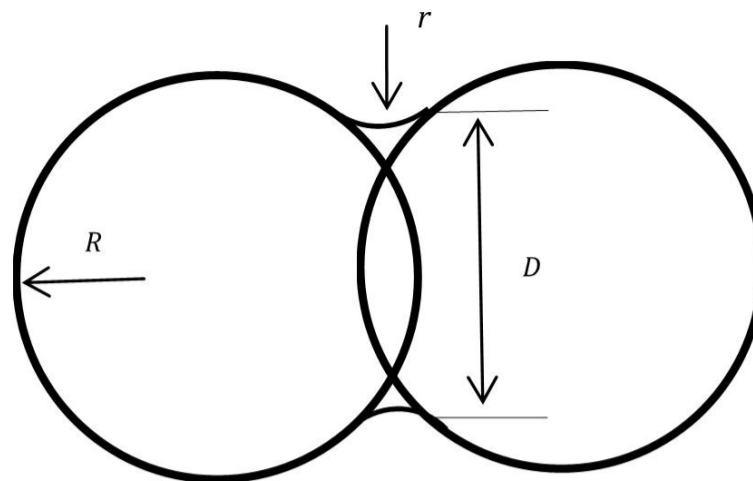
در شکل شماره 4 نمونه‌هایی سینتر شده با استفاده از لیزر به همراه پودر اولیه دیده می‌شود. این‌ها نمونه‌های شماره 1 و 5 آزمایش هستند که مشخصات آن‌ها در ادامه و در بخش 3-3 آمده است. با توجه به خطای مرکب موجود در محورهای حرکتی آینه‌های دستگاه، علی‌رغم تعریف شکل هندسی مستطیلی برای کد نویسی برنامه کنترل عددی، نمونه‌ها به شکل مستطیل کامل به دست نیامدند. نمونه‌های موجود در عکس مربوط به پس از عملیات تست کشش است؛ لذا پارگی ناشی از تست کشش به طور واضح در آن‌ها دیده می‌شود. به دلیل پدیده انقباض³ نمونه‌ها کاملاً مسطح نیستند اما همگی دارای ضخامت یکسان می‌باشند.

3-2- طراحی الگوی اسکن

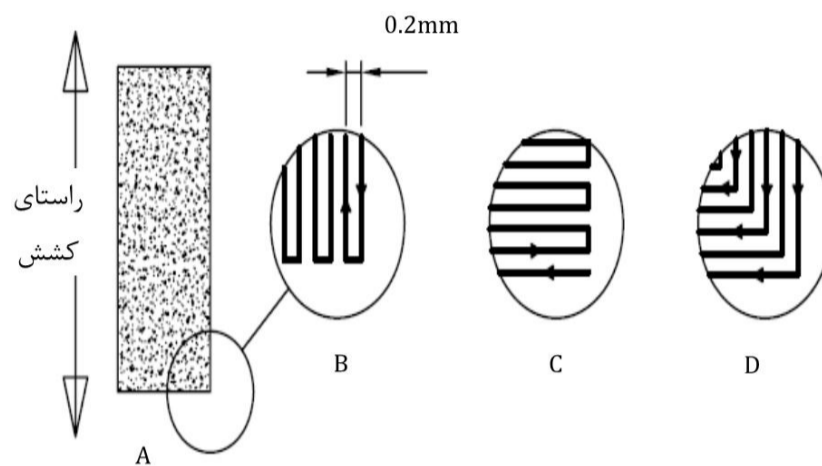
همان طور که در شکل شماره 3 قسمت A مشاهده می‌گردد، شکل هندسی نمونه‌های سینتر شده مورد آزمایش به صورت مستطیل و ابعاد آن در عرض 10 و در طول 30 میلیمتر است. راستای اعمال نیروی کشش در راستای طول مستطیل است. در الگوی شماره 1 حرکت ممتد نازل لیزر و به عبارت دیگر مسیر حرکت باریکه لیزر به صورت رفت و برگشتی و در راستای طول نمونه است که با علامت فلش توپر در شکل شماره 3 قسمت B نشان داده شده است. در الگوی شماره 2، مسیر حرکت ممتد باریکه لیزر به صورت رفت و برگشتی و در راستای عرض نمونه یا عمود بر راستای نیروی کشش است (شکل شماره 3-C). مسیر حرکت باریکه لیزر در الگوی شماره 3 به صورت پیچ‌پیچ و از بیرون به داخل⁴ است که در شکل شماره 3 قسمت (D) دیده می‌شود. در شکل شماره 5 تصویر دستگاه ساخته شده برای عملیات سینترینگ لیزری دیده می‌شود.



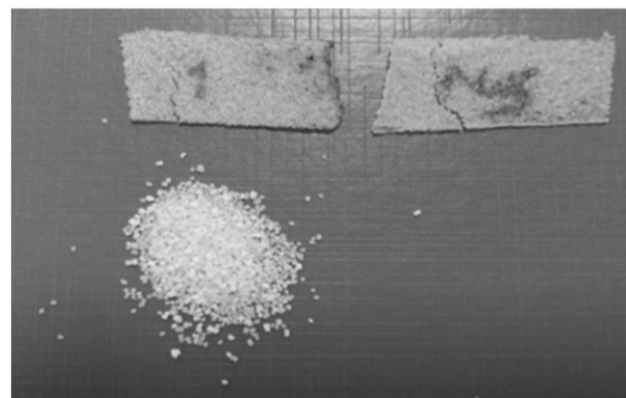
شکل 5 دستگاه ساخته شده برای سینترینگ لیزری



شکل 2 نمایش هندسی نحوه همپوشانی در مکانیزم چسبندگی [10]



شکل 3 الگوهای مختلف اسکن با فاصله هاشور 0/2 میلیمتر



شکل 4 نمونه‌های شماره 1 و 5 سینتر شده توسط لیزر از پودر پلی پروپایلین

$$W = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot \frac{f}{D} \quad (4)$$

در این فرمول λ طول موج لیزر گاز کربنیک (نانومتر)، f فاصله کانونی عدسی محدب (میلیمتر) و D قطر باریکه قبل از عدسی (میلیمتر) است. با استفاده از این فرمول قطر لکه در محل کانون برابر با $0/245$ میلیمتر به دست می‌آید. آزمایش بر روی پلیمر با دانه‌بندی¹ 200 میکرون کد P7 انجام شده است [8].

به منظور کنترل حرکت آینه‌های انتقال‌دهنده لیزر (سیستم اپتیک) برای اجرای الگوی مدنظر، از یک سیستم کنترل عددی استفاده شده است. دمای پیش‌گرم با توجه به نمودار DSC برابر با 120°C درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد. جهت جلوگیری از پدیده گرمای اکسیداسیون از سپر گاز محافظ نیتروژن با خلوص بالا طبق استاندارد DIN 1089 بهره گرفته شده است. حرکت باریکه لیزر در فرآیند سینترینگ لیزری به صورت هاشور زدن است. در این آزمایش فاصله هاشور از رابطه (5) به دست آمده است [9].

$$H = \frac{W}{x} \quad (5)$$

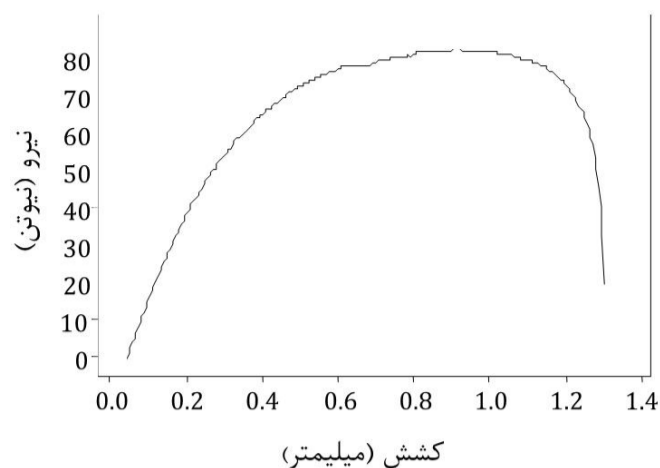
در این رابطه، W قطر لکه در محل کانون برحسب میلیمتر، x نسبت هم پوشانی بدون واحد و H فاصله هاشور برحسب میلیمتر است. نسبت هم پوشانی بر اساس مکانیزم چسبندگی در فرآیند سینتر شدگی حالت جامد² به

3- Shrinkage
4- Introvert Helical

1- Grain Size
2- Solid Sintering State

سفتی را نشان می‌دهد.

شکل 7-الف بیانگر این مطلب است که الگوی شماره 2 یا همان حرکت نازل لیزر در راستای عمود بر جهت اعمال کشش بیشترین سفتی را در نمونه‌ها ایجاد می‌کند. در شکل 7-ب می‌توان دید که توان 2 وات سفتی بالاتری را باعث می‌شود. به عبارت دیگر هرچه توان بالاتر رود الزاماً سفتی هم افزایش پیدا نخواهد کرد. به طور مشابه برای تأثیر سرعت اسکن نیز وضع به همین شکل است. شکل 7-ج نشان می‌دهد که سرعت 1650 میلیمتر بر دقیقه سرعت بهینه برای سفتی بیشتر است. از مشاهده و بررسی عکس‌های میکروسکوپی نحوه همپوشانی می‌توان دید که میزان تشکیل گلوبی که به لحاظ هندسی منجر به درجه سینتر شدگی ($D/2R$) بیشتر می‌گردد، در نمونه‌های سینتر شده با توان 2 وات و الگوی شماره 2، بیشتر است. از آنجایی که سرعت اسکن، مقدار جذب انرژی توسط پودر را تعیین کند، طبق رابطه شماره 1 نرخ مناسب جذب انرژی توسط پودر در سرعت 1650 میلیمتر بر دقیقه و توان 2 وات حاصل شده است؛ یعنی حالت کیکی شدن مناسب که منجر به چسبیدگی بهتر می‌شود. از دیدگاه دیگر هنگامی که لیزر در طول نمونه حرکت می‌کند با توجه به طی مسافت بیشتر نسبت به حرکت لیزر در عرض نمونه، پودرهای سینتر شده قبلی تحت تأثیر گرادیان حرارتی کمتری هستند که به نظر می‌رسد منجر به سفتی بیشتر گردیده است.



شکل 6 نمونه منحنی نیرو- کشش برای نمونه شماره 1

جدول 1 متغیرهای آزمایش

متغیر	سطح 1	سطح 2	سطح 3
توان (وات)	1	2	3
سرعت اسکن (میلیمتر بر دقیقه)	1450	1650	1850
الگوی اسکن	(1)	(2)	(3)

جدول 2 متغیرهای ورودی و نتایج مربوط به نمونه‌های شماره 1 و 5

نمونه	توان (وات)	سرعت اسکن (میلیمتر بر دقیقه)	الگوی استحکام کششی (مگا پاسکال)	سفتی (نیوتن بر میلیمتر)
1	1	1450	1/3	42
5	2	1650	2/9	96

3-3- طراحی آزمایش

ورودی‌های آزمایش در سه سطح و هر سطح شامل سه متغیر طبق جدول شماره 1 معرفی گردیده‌اند. همان طور که اشاره شد در این پژوهش از یک لیزر حداکثر 3 وات استفاده شده است؛ لذا مقادیر توان بر همین اساس انتخاب شده‌اند. با توجه به روابط شماره 1 و 3 نیز مقادیر سرعت اسکن متناظر با توان محاسبه و در جدول شماره 1 ذکر گردیده‌اند. در طراحی آزمایش از روش فاکتوریل کامل بهره گرفته شده است از این رو 27 آزمایش انجام و نتایج آن بررسی گردیده‌اند.

آزمایش‌های تجربی توسط یک دستگاه تست کشش 2 تن با سرعت کشش 5 میلیمتر بر دقیقه، روی هر 27 نمونه سینتر شده (شکل شماره 4) در سه الگو، تحت استاندارد ASTM D882 انجام شده است [11].

گزارش دستگاه تست به صورت نمودار نیرو- کشش ارائه می‌گردد. خروجی‌های مورد مطالعه عبارت‌اند از استحکام کششی بر حسب مگاپاسکال و سفتی بر حسب نیوتن بر میلیمتر که از گزارش دستگاه تست کشش به دست می‌آیند.

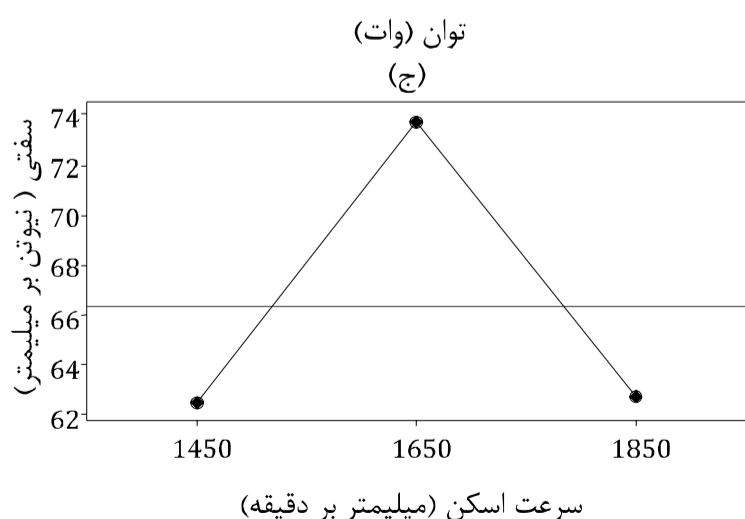
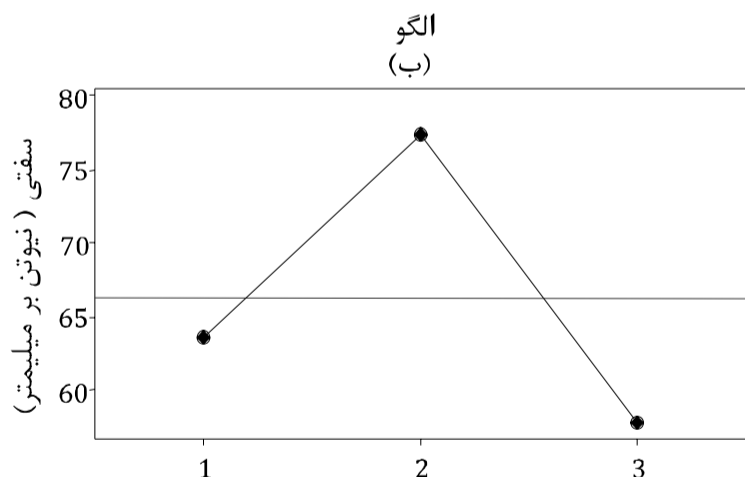
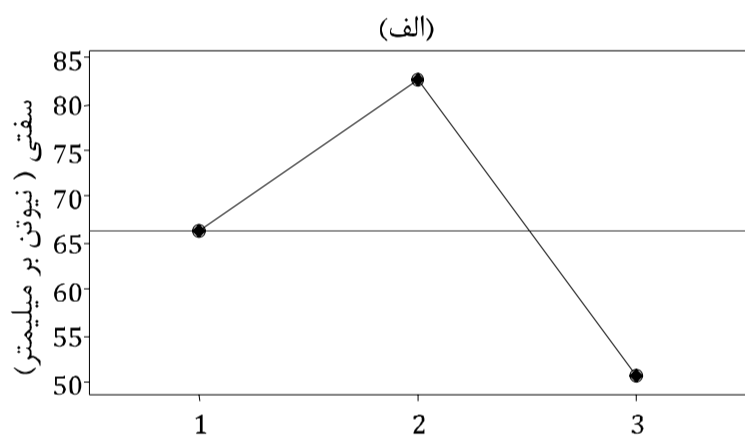
شکل شماره 6 نمونه‌ای از گزارش دستگاه تست کشش مربوط به نمونه شماره یک است که با توان 1 وات، سرعت اسکن 1450 میلیمتر بر دقیقه و تحت الگوی اسکن شماره 1 سینتر شده است.

همچنین نمونه شماره 5 با توان لیزر 2 وات و سرعت اسکن 1650 میلیمتر و توسط الگوی اسکن شماره 2 سینتر شده است. به عنوان مثال مشخصات نمونه‌های شماره 1 و 5 از نقطه نظر متغیرهای ورودی و نتایج، در جدول شماره 2 آورده شده است. مقدار استحکام کششی از بیشینه مقدار تنش کششی تحمل شده توسط نمونه و سفتی از محاسبه شیب منحنی نیرو- کشش در محیط الاستیک استخراج گردیده است.

4- تحلیل داده‌ها

4-1- تأثیر مستقل و ترکیبی شاخص‌های تعیین شده لیزر بر روی سفتی

شکل شماره 7 تأثیر مستقل الگوی اسکن، سرعت اسکن و توان لیزر بر روی



شکل 7 الف-ج تأثیر مستقیم متغیرهای آزمایش بر روی سفتی

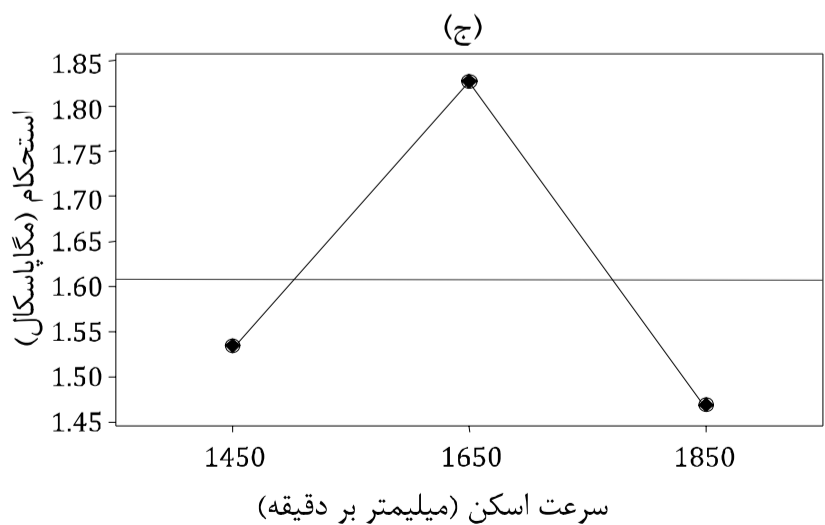
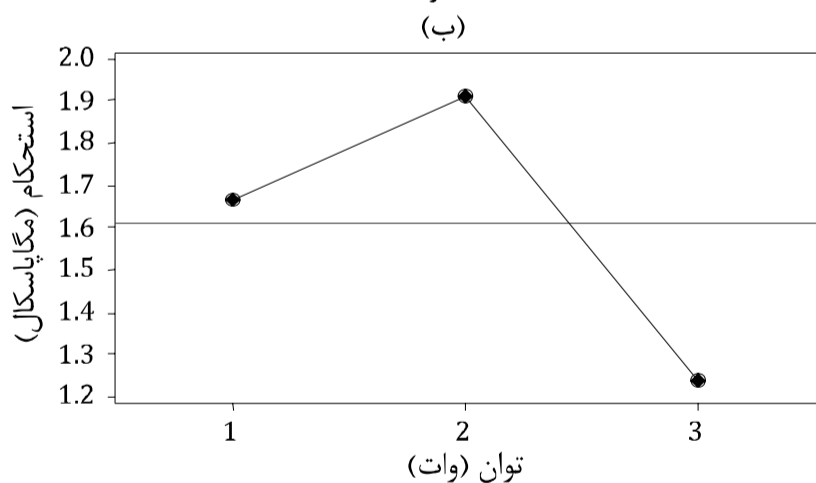
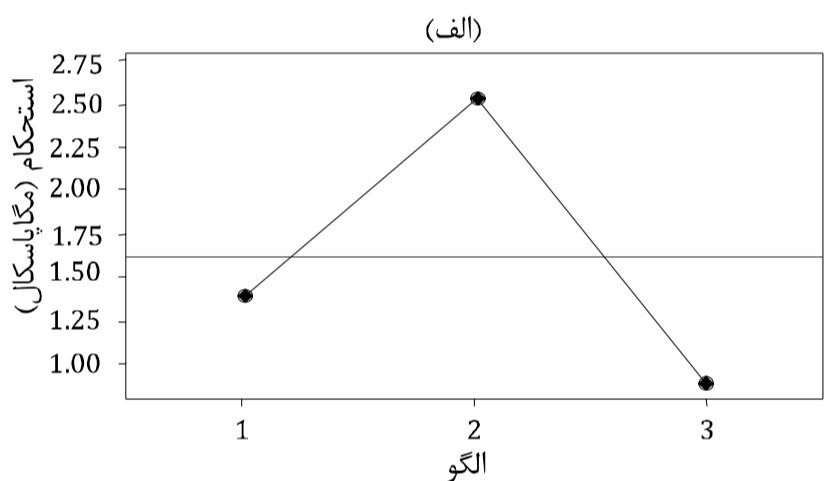
میزان سفتی از چگونگی چسبندگی و چسبندگی از نحوه هم‌پوشانی پودر تأثیر می‌گیرد. برای چگونگی هم‌پوشانی هم نرخ انرژی حرارتی جذب شده توسط ماده (رابطه شماره 1) عامل اصلی است.

4-2- تأثیر مستقل و ترکیبی شاخص‌های تعیین شده لیزر بر روی استحکام کششی

مانند قسمت قبل، در شکل 9 تأثیر مستقل و مستقیم توان لیزر، الگو و سرعت اسکن لیزر بر روی استحکام کششی نشان داده شده است. در شکل 9-الف تأثیر مستقیم الگوی اسکن به طور مستقل از دو متغیر دیگر بر روی اندازه استحکام کششی به دست آمده، نشان داده شده است. در شکل 9-ب تأثیر توان لیزر بر روی استحکام بررسی شده است. بیشترین مقدار استحکام به ازای توان 2 وات به دست آمده است.

در شکل شماره 10، اثرات متغیرهای معرفی شده لیزر بر روی استحکام کششی نمونه‌های سینتر شده به صورت ترکیبی نمایش داده شده است.

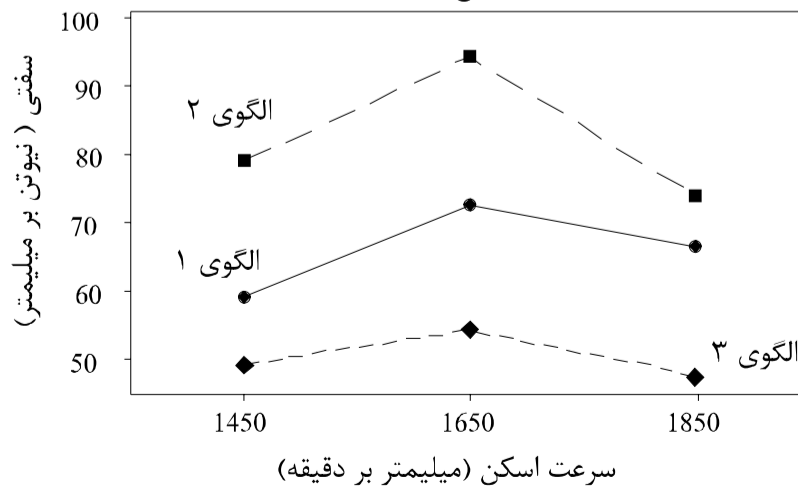
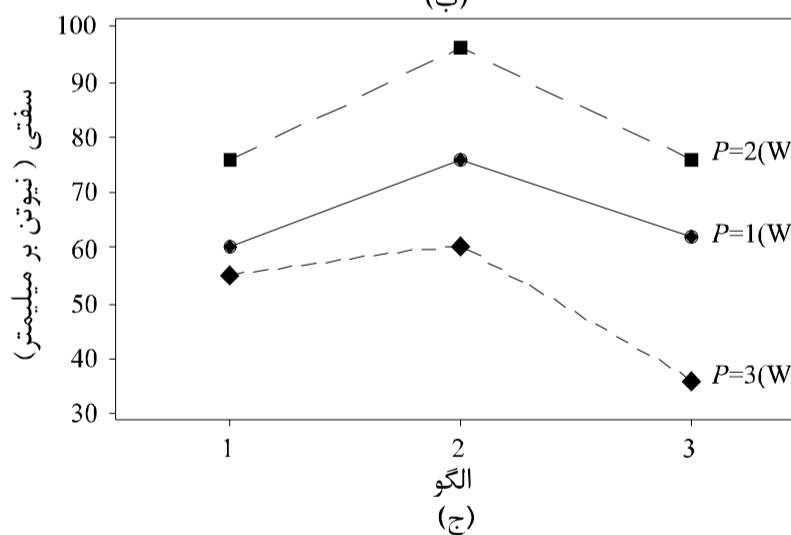
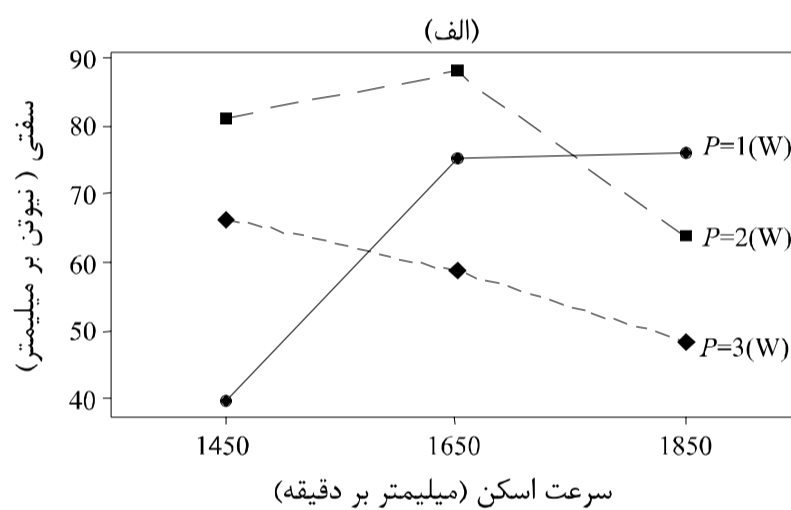
همانطور که در نمودارها دیده می‌شود فقط برای توان لیزر و سرعت اسکن تقاطع خطوط وجود دارد و این به این معنی است که ترکیب این دو متغیر در مقدار استحکام کششی تأثیر دارد. در شکل 10-ب و شکل 10-ج خطوط با یکدیگر تقاطع ندارند، لذا الگوی اسکن با سرعت اسکن به صورت مستقل می‌توانند در مقدار استحکام کششی اثر داشته باشند.



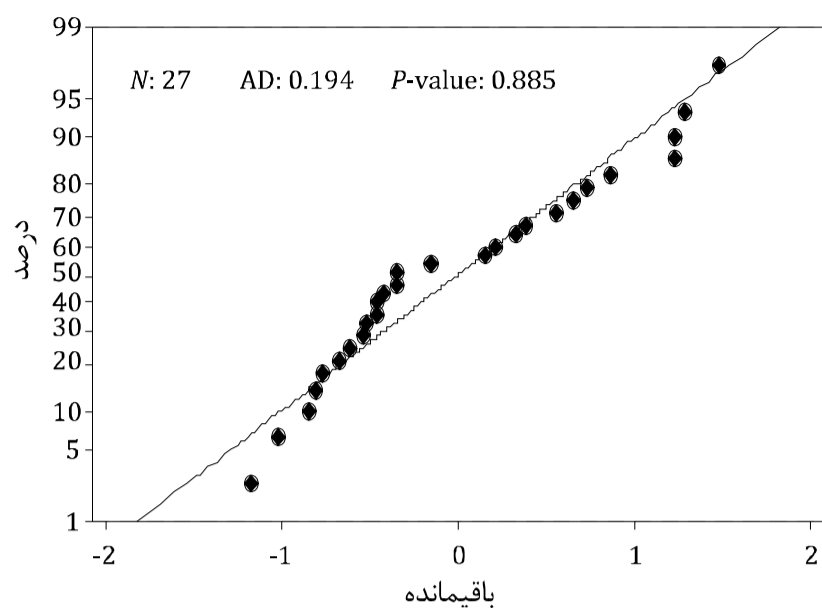
شکل 9 الف-ج تأثیر مستقل متغیرهای آزمایش بر روی استحکام کششی

در شکل شماره 8 تأثیر ترکیبی و تداخلی زوج متغیرها بر روی سفتی نمونه‌ها بررسی شده‌اند. در این نمودارها وجود خطوط موازی نمایانگر عدم ارتباط ترکیبی از متغیرها برای تأثیر در سفتی نمونه‌ها است در حالیکه تقاطع خطوط بیانگر اثرپذیری سفتی از ترکیب و یا تداخل زوج متغیرها است. در شکل 8-الف تداخل تأثیر سرعت اسکن و توان بر روی اندازه سفتی دیده می‌شود. تقاطع خطوط نشان می‌دهد توان و سرعت اسکن تأثیر ترکیبی بر روی سفتی دارند. شکل 8-ب وجود تأثیر ترکیبی توان و الگوی اسکن بر روی سفتی را در حالتی که توان مورد استفاده برای عملیات سینترینگ 1 و 3 وات است را تصدیق می‌کند. در حالتی که توان لیزر 2 وات است و منجر به بیشترین مقدار سفتی می‌گردد، تأثیر ترکیبی وجود ندارد. به صورت مشابه در شکل 8-ج سرعت اسکن 1650 میلیمتر بر دقیقه به صورت مستقل از الگوی اسکن، اندازه سفتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در حالت کلی نیز از آنجایی که اشعه لیزر برای ایجاد انرژی تابع زمان است، تأثیر متقابل متغیرها بر روی اندازه سفتی توجیه‌پذیر است.

تنها ترکیب توان و سرعت اسکن، تأثیر تعاملی بر روی سفتی دارند که با توجه به رابطه شماره 1 و تعامل این دو متغیر در فرمول قابل توجیه است. اگر توان کم شود و سرعت هم به همان نسبت کم شود، انرژی جذب شده ثابت می‌ماند و بر عکس.



شکل 8 الف-ج تأثیر ترکیبی متغیرهای آزمایش بر روی سفتی



شکل 11 نمودار پراکندگی نرمال باقیمانده‌ها برای مقادیر استحکام کششی

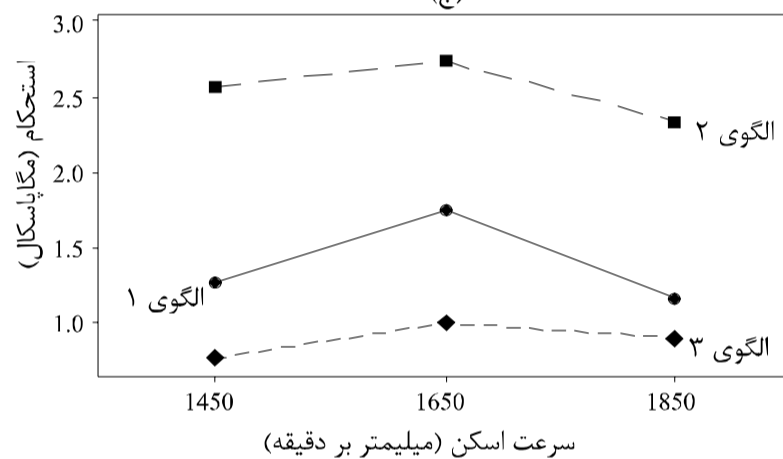
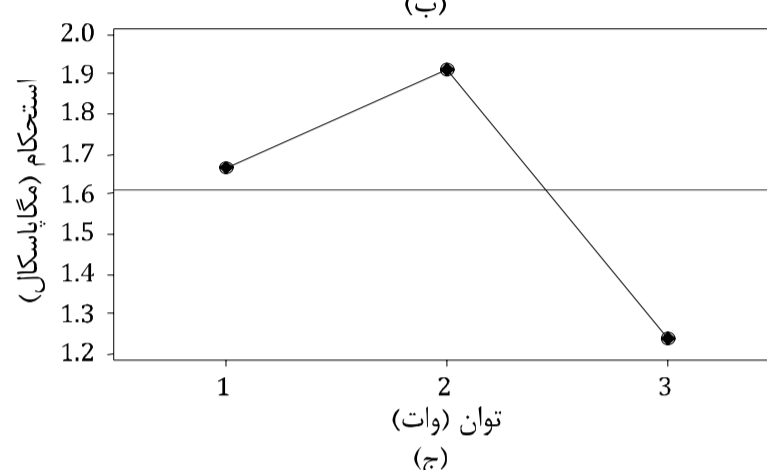
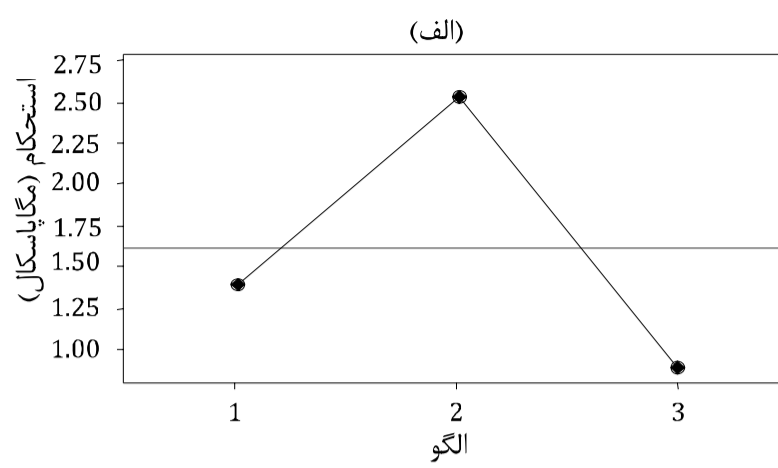
- 1- توزیع نرمال باقیمانده‌ها¹ (شکل‌های 11 و 12)
- 2- خطای مستقل²
- 3- واریانس ثابت

برای بررسی توزیع نرمال باقیمانده‌ها در شکل شماره 11 نمودار مربوطه برای استحکام کششی نشان داده شده است. در اینجا دو شاخص آماری مهم به نام‌های آندرسون-دارلینگ³ (AD) و مقدار احتمال⁴ یا شاخص ریسک رد فرض، برای تحلیل نمودار فوق در نظر گرفته شده است.

این نمودار نشان‌دهنده تراکم داده‌ها و عدم پراکندگی آن‌ها است. مقدار احتمال و شاخص آماری آندرسون-دارلینگ برای امتحان تطابق داده‌های آزمایش با روند توزیع نرمال استفاده شده‌اند. مقدار احتمال برای اثبات و یا رد یک فرضیه تحلیل عددی استفاده می‌گردد. در واقع مقدار احتمال (P) عبارت است از احتمال حصول یک تست آماری که تا حد امکان معرف نتایج واقعی باشد. به طور متداول محدوده اطمینان تعیین شده (95 درصد) برای مقدار احتمال برابر با 0/05 در نظر گرفته می‌شود. اگر مقدار محاسبه شده برای مقدار احتمال در چک آماری فرضیه، کمتر از 0/05 باشد، فرضیه صفر رد می‌گردد [12].

در شکل شماره 11 از آنجایی که تراکم داده‌ها در امتداد یک خط راست است، بنابراین پراکندگی داده‌ها به صورت نرمال توزیع شده است. مقدار احتمال از سطح اطمینان تعیین شده 0/05 بسیار بیشتر است و این بدان معنی است که باقیمانده‌ها (خطا) به صورت نرمال توزیع شده است؛ بنابراین فرض صفر که همان توزیع نرمال باقی مانده‌ها است، معتبر است.

به طور مشابه، در شکل شماره 12 نحوه پراکندگی نرمال باقی مانده‌ها برای سفتی آورده شده است. در این نمودار هم پراکندگی داده‌ها در امتداد یک خط راست متراکم شده است. البته نسبت به نمودار قبلی که مربوط به استحکام کششی بود تا حدی از پراکندگی بیشتر برخوردار است. این مقدار پراکندگی بیشتر با مقدار به دست آمده برای مقدار احتمال قابل توجیه است. به هر صورت با توجه به مقدار احتمال به دست آمده برای پراکندگی نرمال باقیمانده‌های سفتی که برابر است با 0/076، و از آنجایی که این مقدار از حد اطمینان گفته شده یعنی 0/05 بیشتر است، بنابراین برای حالت سفتی نیز فرضیه صفر یا توزیع نرمال باقیمانده‌ها معتبر است. مقدار AD هم برای احتمال پراکندگی نرمال مربوط به مقادیر سفتی برابر با 0/796 به دست آمده است.



شکل 10 الف- ج تأثیر ترکیبی متغیرهای آزمایش بر روی استحکام کششی

به طور مشابه، توان و الگوی اسکن هم به صورت ترکیبی و تداخلی تأثیری بر اندازه استحکام کششی ندارند. در تحلیلی مشابه آنچه برای سفتی بیان شد، به نظر می‌رسد ماکزیمم نیروی کششی لازم برای گسیختگی نمونه‌ها با توجه به مکانیزم چسبندگی پودر در دمای مناسب تعیین می‌شود. دمای مناسب سینترینگ (رابطه شماره 3) هنگامی که دمای پیش گرم ثابت است، از ترکیب مناسب سرعت اسکن و توان (انرژی جذب شده) به دست می‌آید. این مقادیر عبارت‌اند از 2 وات برای توان و 1650 میلیمتر بر دقیقه برای سرعت اسکن. همچنین عکس‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که حرکت نازل مطابق الگوی شماره 2 منجر به تشکیل گلوبی بهتر نسبت به الگوهای دیگر شده است.

توجه به این نکته مهم است که، نمودارهای موجود در شکل‌های 7 تا 10 برای نتیجه‌گیری قابل استفاده نیستند زیرا این نمودارها دقیق نیستند. تنها در مواقعی که هدف مقایسه تأثیر متغیرها باشد می‌توان از این نمودارها استفاده کرد. برای ارائه یک استنتاج علمی محققان به طور گسترده‌ای از روش تحلیل واریانس بهره جسته‌اند [12].

3-4- تحلیل واریانس

از تحلیل واریانس برای ارزیابی تأثیر متغیرها بر روی فرآیند استفاده می‌شود. این روش تحلیل، بر مبنای ضریب اطمینان بالایی، میزان تأثیر متغیرها را بررسی می‌کند. قبل از استفاده از واریانس فرضیات زیر باید در نظر گرفته شود [12]:

1- Residual
2- Independent Error
3- Anderson-Darling
4- P-Value

هرجا مقادیر احتمال مربوط به متغیر یا ترکیب متغیرها از 0/05 کمتر باشد، نشان‌دهنده این است که متغیر مربوطه تأثیر مستقیم و اصلی بر روی مقادیر استحکام کششی دارد. همان طور که در جدول شماره 3 دیده می‌شود، متغیرهای توان و الگوی اسکن با کمترین مقدار احتمال، بیشترین تأثیر را به صورت مستقل بر روی اندازه استحکام کششی دارند و سرعت اسکن با مقدار احتمال، برابر با 0/025 کمترین تأثیر را به صورت مستقل بر روی اندازه استحکام کششی نمونه‌های سینتر شده دارد. برای تأثیر متغیرها به صورت ترکیبی هم، ترکیب توان و الگوی اسکن بیشترین اثر را بر روی اندازه استحکام کششی دارد، درحالی‌که ترکیب الگوی اسکن و سرعت اسکن کمترین اثر را بر روی اندازه استحکام کششی دارد. به طور مشابه در جدول شماره 4، کمترین تأثیر مستقل را بر روی اندازه سفتی، سرعت اسکن با مقدار احتمال برابر با 0/041 دارا است و الگوی اسکن بیشترین تأثیر مستقل بر روی سفتی را دارد. ترکیب توان و الگوی اسکن با مقدار احتمال برابر با صفر بیشترین اثر و به همین صورت تأثیر ترکیبی سرعت و الگوی اسکن، کمترین اثر ممکن را بر روی اندازه سفتی نمونه‌ها دارد. در هر صورت، از آنجایی که هیچ‌کدام از مقادیر به دست آمده برای مقدار احتمال از 0/05 بزرگتر نیست، تمامی متغیرها و ترکیب آن‌ها در استحکام و سفتی نمونه‌ها تأثیر دارند.

4-4- معادله رگرسیون

رگرسیون خطی یکی از تکنیکهای آماری برای صحت ارتباط داده‌های مستقل و وابسته است [13]. معادله عمومی رگرسیون با توجه به تأثیر متغیرهای ورودی برای استحکام کششی به صورت رابطه شماره 6 است:

$$T = 2.80759 - 0.211111 P - 0.000166667 S - 0.251111 R \quad (6)$$

به همین ترتیب، معادله عمومی رگرسیون برای سفتی مطابق رابطه شماره 7 است:

$$N = 86.6134 - 2.91667 P + 0.000694444 S - 7.80556 R \quad (7)$$

که در آن T استحکام کششی بر حسب مگاپاسکال، N سفتی بر حسب نیوتن بر میلیمتر، P توان لیزر بر حسب وات، S سرعت اسکن بر حسب میلیمتر بر دقیقه و R الگوی اسکن است.

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از تحلیل آماری تأثیر سه متغیر مهم لیزر شامل توان، سرعت و الگوی اسکن لیزر بر روی استحکام کششی و سفتی نمونه‌های سینتر شده لیزری از جنس پلی پروپیلن بررسی و نتایج به شرح ذیل استخراج گردید:

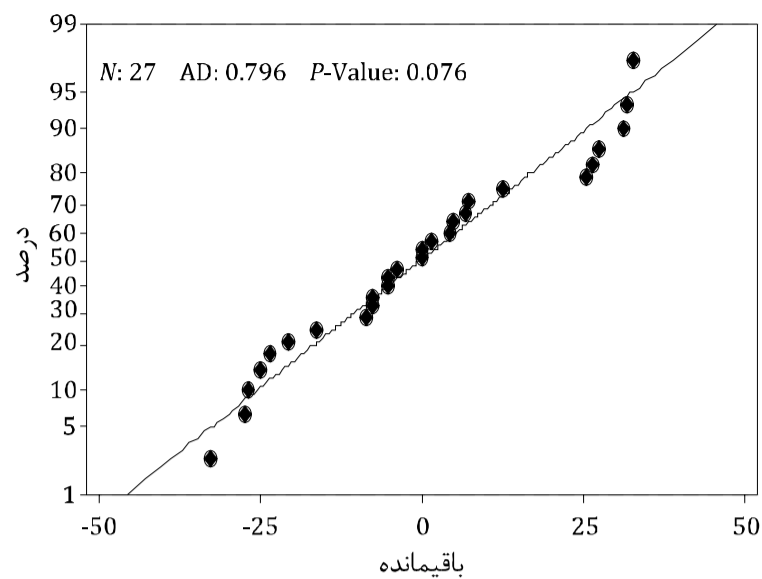
1- متغیرهای توان و الگوی اسکن لیزر به صورت مستقل بیشترین تأثیر را بر روی افزایش اندازه استحکام کششی و سفتی دارند.

2- متغیرهای سرعت اسکن و توان لیزر تأثیر ترکیبی در تغییرات استحکام و سفتی دارند.

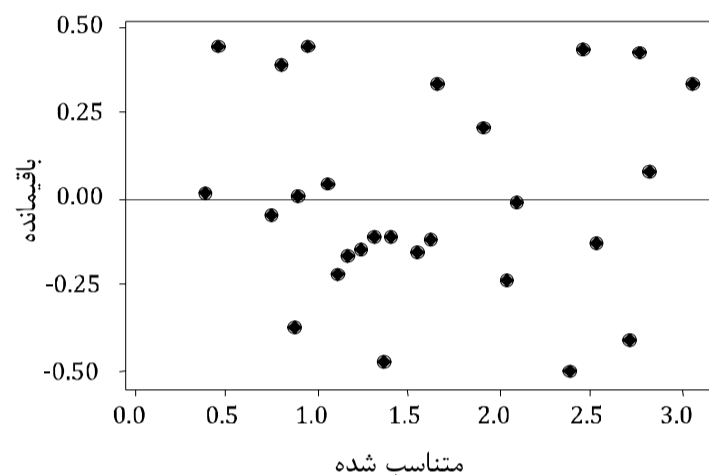
3- معادله رگرسیون میزان تأثیر ورودی‌های آزمایش بر روی خروجی‌ها به صورت رابطه شماره 6 و 7 است.

3- ترکیب توان 2 وات و سرعت اسکن 1650 میلیمتر بر دقیقه منجر به چسبندگی بیشتر پودر و در نتیجه بیشترین استحکام (2/9 مگا پاسکال) و سفتی (96 نیوتن بر میلیمتر) در نمونه‌ها شدند.

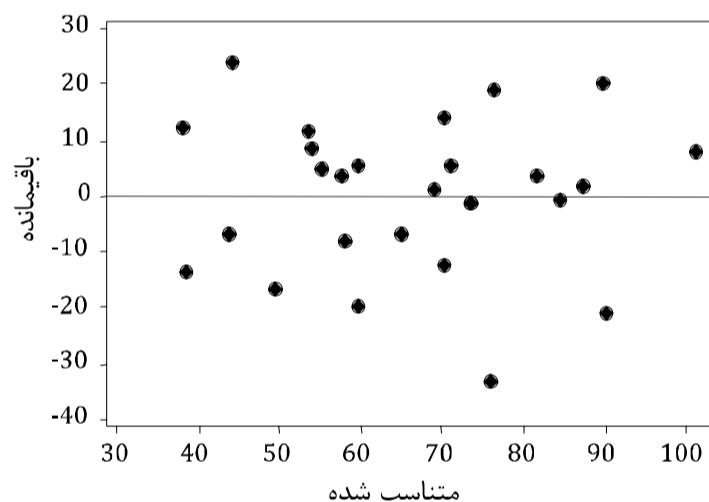
4- حرکت باریکه لیزر عمود بر راستای کشش (الگوی شماره 2) در شرایط توان و سرعت اسکن یکسان، منجر به سفتی و استحکام حداکثری نمونه‌های سینتر شده می‌شود.



شکل 12 نمودار پراکندگی نرمال باقیمانده‌ها برای مقادیر سفتی



شکل 13 نمودار باقیمانده در ازای مقادیر متناسب شده استحکام کششی



شکل 14 نمودار باقیمانده در ازای مقادیر متناسب شده سفتی

دو فرض دیگر که قبلاً توضیح داده شد، یعنی مستقل بودن خطا و ثبوت واریانس، توسط نمودار باقیمانده در ازای اندازه‌های متناسب شده¹ بررسی می‌گردند. شکل‌های شماره 13 و 14 نمودارهای مذکور را به ترتیب برای باقیمانده در ازای مقادیر استحکام کششی متناسب شده و باقیمانده در ازای مقادیر سفتی متناسب شده به عنوان خروجی‌های آزمایش نشان می‌دهد. توزیع غیرمنظم نقاط در بالا و پایین محور افقی (باقیمانده صفر) وعدم پیروی از الگوی خاص این نقاط در شکل‌های شماره 13 و 14 بیانگر وجود خطاهای مستقل و واریانس ثابت است [12]. از این نمودارها به عنوان تست‌های کیفیت آزمون نیز یاد می‌شود.

اکنون با تحقق فرضیات ذکرشده، نتایج تحلیل واریانس می‌تواند مورد اعتماد باشد. در جدول شماره 3 نتایج تحلیل واریانس برای استحکام کششی و در جدول شماره 4 برای سفتی، آورده شده است. در جداول مذکور برای نشان دادن تأثیر ترکیبی متغیرها از علامت (*) استفاده شده است. قابلیت اطمینان در این پژوهش برابر با 95 درصد در نظر گرفته شده است. بنابراین

1- Fitted Value

جدول 3 مقادیر تحلیل واریانس برای استحکام کششی

منبع (متغیرها)	درجه آزادی	جمع مربعات	میانگین مربعات	شاخص F	شاخص P
توان (وات)	2	2/0596	1/0298	14/75	0/000
سرعت اسکن (میلیمتر بر دقیقه)	2	0/6516	0/3258	4/67	0/025
الگوی اسکن	2	12/9698	6/4849	92/88	0/000
توان*سرعت اسکن	4	1/1005	0/2751	3/94	0/021
توان*الگوی اسکن	4	2/0004	0/3004	4/81	0/011
سرعت اسکن*الگوی اسکن	4	1/7504	0/2641	3/89	0/024
خطا	16	1/1171	0/0698		
مجموع	34	18/5483			

جدول 4 مقادیر تحلیل واریانس برای سفتی

منبع (متغیرها)	درجه آزادی	جمع مربعات	میانگین مربعات	شاخص F	شاخص P
توان (وات)	2	1825/4	212/7	9/51	0/002
سرعت اسکن (میلیمتر بر دقیقه)	2	752/2	376/1	3/92	0/041
الگوی اسکن	2	4608/9	2304/5	24/00	0/000
توان*سرعت اسکن	4	3170/8	792/7	8/26	0/002
توان*الگوی اسکن	4	2546/3	811/14	7/56	0/000
سرعت اسکن*الگوی اسکن	4	3070/4	451/2	7/11	0/011
خطا	16	1/1171	96		
مجموع	34	11495/05			

6- تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران به خاطر حمایت و در اختیار گذاشتن تجهیزات لازم برای انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌نمایند.

7- مراجع

- [7] A. Simchi, Direct laser sintering of powders, mechanism, kinetics and micro structure feature, *Material science and Engineering. Elsevier*, A. 428, pp. 148-158, 2006.
- [8] L. Fielder, et al, Evaluation of Polypropylene powder grades in consideration of the laser sintering process ability, *Journal of Plastics Technology*, Vol. 3, No. 4, pp.34-39, 2007.
- [9] A. Pilipovic, et al, Influence of laser sintering parameters on mechanical properties of polymer products, in *the 3rd International Conference on Additive Technologies*, DAAAM specialized conference, NovaGorica, Slovenia, 2010.
- [10] J. P. Kruth, et al, Binding mechanism in laser sintering and selective laser melting, in *The 15th Solid Freeform Fabrication Symposium*, Berlin, Germany, 2004.
- [11] ASTM D882, *Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting*.
- [12] M. Modabberifar, et al, Statistical analysis of parameter effects on linear velocity of ferrous particle in an AC electric field as a new method for powder transportation, *Springer-Verlag London*, No. 45, pp. 140-147, 2009.
- [13] S.M. Emam, K. Khalili, Improving the accuracy of laser scanning using a soft technique, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 9, pp. 77-91, 2013. (In Persian).
- [1] M. Islam, et al, Temperature profile and imaging analysis of laser additive manufacturing of stainless steel, *Physics Procedia*, 41, pp. 835-842, 2013.
- [2] T.A Krol, et al, Prioritization of process parameters for an efficient optimization of additive manufacturing by means of a finite element method, *Elsevier B.V, Procedia CIRP12*, pp.169-174, 2013.
- [3] D. Hu, R. Kovacevic, Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing, *International Journal of Machine Tools & manufacture*, No 43, pp.51-60, 2003.
- [4] J. Kruth, et al, Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing, *Elsevier, procedia CIRP56*, pp.730-759, 2007.
- [5] R. Glardon, N. Karapaticce, V. Romano, Influence of Nd:YAG parameter on the selective laser sintering of metallic powders, *CIRP50*, pp. 133-136, 2001.
- [6] B. Starly, et al, Biometric design and fabrication of interior architecture of tissue scaffolds using Solid Free Form, *Procedia . Solid Free Form fabrication Symposium*, Austin, pp. 742-753, 2002.