



Experimental Analysis of Abrasion Resistance of Acrylonitrile Butadiene Styrene Components Made by Fused Deposition Modelling Using Response Surface Method

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Hashemi M.R.¹ MSc,
Adibi A.^{1*} PhD,
Nazeri Astanjin A.¹ BSc

How to cite this article

Hashemi M R, Adibi A, Nazeri Astanjin A. Experimental Analysis of Abrasion Resistance of Acrylonitrile Butadiene Styrene Components Made by Fused Deposition Modelling Using Response Surface Method. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(4):235-245.

¹ Department of Mechanical Engineering, Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran.

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Amir Kabir University of Technology, Tehran, Iran.

Phone: -

Fax: -
hadibi@aut.ac.ir

Article History

Received: October 20, 2020

Accepted: December 19, 2020

ePublished: March 24, 2021

ABSTRACT

In this research, the abrasion resistance of the parts manufactured by Additive Manufacturing (AM) has been experimentally analyzed. These days, the AM is widely used in various industries and the Fused Deposition Modelling (FDM) process is one of the most popular methods of fabrication in this field. Although many researches have been done to model mechanical behavior in this field, there are limited studies in wear and its modeling. In this research, to create an exact mathematical relationship between the input variables (layer thickness, raster angle, and raster distance) and the response variable (wear rate), the experimental design using the Central Composite Design (CCD) method has been employed. Moreover, twenty systematic experiments were performed to determine the response and provide a proportional regression model. Using analysis of variance (ANOVA), a mathematical model corresponding to the actual process was obtained, and the validity of the proposed model was confirmed by statistical methods. The results have indicated that the proposed model predicts the wear rate of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) parts made by FDM method with the coefficient of determination of 97.44%. Furthermore, the results of the experimental study and experimental analysis have shown that the raster distance parameter and the effect of its interaction with the raster angle, creates the highest wear rate, and also the second-order effect of layer thickness has the most negative effect on wear rate.

Keywords Abrasion Resistance, Fused Deposition Modelling, Response Surface Method (RSM), Central Composite Design (CCD)

CITATION LINKS

[1] Additive manufacturing (3Dprinting): A review of ... [2] A review on composite material and process parameters... [3] Photo-curing 3D printing technique and its challenges.[4] Development of Micro Selective Laser Melting: The State of ... [5] 3D printing of polymer matrix composite: A review and ... [6] the rise of 3-D printing the advantages of additive ... [7] additive manufacturing techniques in manufacturing an overview [8] mechanical behaviour of ABS: An experimental... [9] Experimental investigation of laser cutting post process of ... [10] Mechanical characterization of FDM 3Dprinting of ... [11] 4D Printing Additive Manufacturing Review; Mechanisim, Challenges ... [12] Additive manufacturing of cementitious ... [13] Effect of processing conditions on the bonding quality of... [14] A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid ... [15] Effect of Layer Orientation on Mechanical ... [16] optimization of rapid prototyping parameters for production of ... [17] Mechanical Characterization of Additively Manufactured Parts by ... [18] Parametric Appraisal of fused deposition modelling process using ... [19] Experimental investigation and empirical modelling of FDM ... [20] Additive manufacturing and analysis of tibial insert in ... [21] FDM preparation of bio-compatible UHMWPE polymer ... [22] Novel biomaterials used in medical 3D ... [23] Prediction and analysis of sliding wear performance of ... [24] An investigation on silding wear of FDM built parts [25] Friction and wear rate characteristics of parts ... [26] Analysis of wear behavior of additively ... [27] Comparison of wear behavior of ABS and ABS composite ... [28] Multi-Response Optimization of Fused Deposition ... [29] RSM Optimization of parameters influencing ... [30] Experiments: planning, analysis and parameter ... [31] Opimize epoxy matrix with RSM/CCD method and ... [32] 3D printed parts with honeycomb internal pattern by ... [33] Fused Deposition Modelling process parameter optimization... [34] The synergic effect of FDM 3D printing parameters on ... [35] Experimental and Optimizing flexural strength of ... [36] ASTM International, 2020 [37] Design and Analysis of ... [38] On the Experimental Attainment of Optimum... [39] post-processing of FDM 3D-printed polylactic acid...

تحلیل تجربی مقاومت سایشی قطعات آکریلونیتریل بوتادین استارین ساخته شده به روش لایه نشانی ذوبی با کمک روش پاسخ سطح

محمدرضا هاشمی MSc

کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

حامد ادیبی PhD*

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

احمد ناظری آستانچین BSc

کارشناس، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

چکیده

در این پژوهش به تحلیل تجربی مقاومت سایشی قطعات ساخته شده به روش ساخت افزایشی پرداخته شده است. ساخت افزایشی امروزه کاربرد وسیعی در صنایع گوناگون پیدا کرده است و فرآیند لایه نشانی ذوبی یکی از محبوبترین روش‌های ساخت قطعه در این زمینه می‌باشد. با اینکه تاکنون تحقیقات فراوانی با هدف مدل‌سازی رفتار مکانیکی در این حوزه انجام شده است، ولی در زمینه سایش و مدل‌سازی این پدیده، مطالعات محدودی صورت گرفته است. در این پژوهش به منظور ایجاد یک رابطه دقیق ریاضی بین متغیرهای ورودی (ضخامت لایه، زاویه و فاصله رشته‌گذاری) و متغیر پاسخ (نرخ سایش) از طراحی آزمایش به روش طراحی مرکب مرکزی استفاده شده است. به منظور تعیین پاسخ و ارائه مدل رگرسیونی متناسب، بیست آزمایش سیستماتیک انجام شد. با استفاده از تحلیل واریانس، مدل ریاضی منطبق بر فرآیند واقعی بدست آمد، همچنین اعتبار مدل ارائه شده به کمک روش‌های آماری تایید شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل ارائه شده میزان نرخ سایش قطعات آکریلونیتریل بوتادین استارین ساخته شده به روش لایه نشانی ذوبی را با ضریب تعیین ۹۷/۴۴٪ پیش‌بینی می‌کند. نتایج بدست آمده از انجام مطالعه تجربی و تحلیل مدل نشان داد که متغیر فاصله رشته‌گذاری و اثر برهم‌کنش آن با زاویه رشته‌گذاری، بیشترین میزان نرخ سایش را ایجاد می‌کند و همچنین اثر مرتبه دوم ضخامت لایه بیشترین تاثیر منفی را بر نرخ سایش دارد.

کلیدواژه‌ها: مقاومت سایشی، لایه نشانی ذوبی، روش پاسخ سطح، طراحی مرکب مرکزی.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۹

* نویسنده مسئول: hadibi@aut.ac.ir

۱- مقدمه

ساخت افزایشی، فناوری نوظهوری می‌باشد که با کاهش زمان تولید و توانایی تولید قطعات پیچیده، امروزه کاربرد فراوانی در صنایع مختلف پیدا کرده است و موجب تحولات اساسی در فرآیند ساخت قطعات گردیده است. این فناوری مجموعه‌ای از فرآیندها نظیر استریولیتوگرافی، لایه نشانی ذوبی، تفجوشی گزینشی لیزر، فرآیند تابش نور و غیره را شامل می‌شود، که براساس شیوه‌ای مشترک در ساخت قطعات، طیف وسیعی از قابلیت‌های تولید قطعات پیچیده را با جنس‌های متفاوت ارائه می‌کند. اساساً نقطه مشترک این فرآیندها روشی است که در آن قطعات به صورت لایه

به لایه ساخته می‌شوند^[1,2]. به طور مثال در فرآیند استریولیتوگرافی که جزء نخستین روش‌های ابداعی در زمینه ساخت افزایشی می‌باشد، از رزین فتوپلیمر برای ساخت قطعات استفاده می‌شود. در این روش، قطعه بر روی میزی که در مخزن حاوی رزین حساس به نور قرار گرفته است و در راستای عمودی حرکت می‌کند، ساخته می‌شود. در ساخت قطعه تحت این روش، از یک سیستم لیزری که در بالای دستگاه قرار دارد، به منظور تابیدن بر سطح رزین تحت یک الگوی مشخص و ساخت قطعه به صورت لایه به لایه استفاده می‌شود^[3]. فرآیند تفجوشی گزینشی لیزر، یکی دیگر از مجموعه روش‌های ساخت افزایشی می‌باشد. در این روش در مقایسه با روش استریولیتوگرافی، از پودر پلاستیک و یا آمیخته‌ای از پودر فلز بجای رزین فتوپلیمر برای ساخت قطعات استفاده می‌شود. در این فرآیند، اشعه لیزر پودر ماده موردنظر را طبق یک الگوی مشخص ذوب کرده و ذرات ماده را به یکدیگر متصل می‌نماید، تا قطعه به صورت لایه به لایه ساخته شود^[4].

فرآیند لایه نشانی ذوبی یکی دیگر از محبوب‌ترین و پرکاربردترین فرآیندهای ساخت افزایشی می‌باشد که در آن قطعات به صورت لایه به لایه ساخته می‌شوند. در این روش برخلاف سایر روش‌های ساخت افزایشی، عمدتاً از رشته‌های ترموپلاستیک موسوم به فیلامنت بجای رزین حساس به نور و پودر مواد برای ساخت قطعات استفاده می‌شود. مواد مصرفی در این روش، تحت دمایی از پیش تعیین شده، ذوب و بر روی لایه قبلی، لایه نشانی می‌شوند^[5-9]. در روش لایه نشانی ذوبی، قطعات به صورت یک آرایه کامپوزیتی و از لایه‌های انباشته شده عمودی که شامل الیاف پیوسته و حفره‌های بینابینی هستند، شکل می‌گیرد^[10].

تا به امروز پیشرفت‌های فراوانی در زمینه بروزرسانی فناوری ساخت افزایشی صورت گرفته است. به عنوان نمونه چاپ چهار بعدی یک فناوری جدید است که با در نظر گرفتن بُعد زمان برای چاپ سه بعدی، ایجاد شده است^[11]. با این وجود همانند سایر فناوری‌ها، این فناوری نیز در هریک از فرآیندهای تحت پوشش خود با چالش‌هایی مواجه است یکی از چالش‌های موجود در روش لایه نشانی ذوبی، بررسی اثر متغیرهای فرآیند بر رفتار مکانیکی قطعات می‌باشد، که این مسئله سبب انجام مطالعاتی در این زمینه شده است^[12]. به عنوان مثال، بلهومر و همکاران به ارزیابی تاثیر متغیرهای فرآیند لایه نشانی ذوبی بر روی کیفیت پیوند میان رشته‌ها که تاثیر بسزایی بر خواص مکانیکی دارد، پرداختند. این محققان با مطالعه بر روی تاریخچه دمایی محل اتصال، گزارش دادند که کیفیت پیوند میان رشته‌ها وابسته به دمای محفظه و تغییرات شرایط همرفتی در طول ساخت قطعه می‌باشد؛ به نوعی با کاهش ضخامت لایه، مقدار گرادیان دمایی میان رشته‌های مجاور افزایش پیدا می‌کند که این مسئله سبب بهبود کیفیت اتصال میان رشته‌ها می‌شود. از طرفی با افزایش دمای میان لایه‌ها، امکان ایجاد تنش پسماند در قطعه نهایی

مختلف نظیر پزشکی رخ داده است^[20]. با ارتقاء فرآیند لایه نشانی ذوبی و همچنین توان استفاده از مواد سازگار زیستی در این فرآیند، پیشرفت‌های فراوانی در زمینه ساخت پروتزها و ایمپلنت‌های کاشتنی روی داده است. از این جهت مطالعه بر روی رفتار مکانیکی قطعات مورد استفاده در این حوزه خصوصا مقاومت در برابر خستگی و سایش از اهمیت بالایی برخوردار است^[21,22]. علی‌رغم تحقیقات انجام شده بر روی تاثیر متغیرهای فرآیند بر خواص مکانیکی، تحقیقات کمی بر روی رفتار سایشی قطعات ساخته شده به روش لایه نشانی ذوبی انجام گرفته است؛ به عنوان مثال در سال ۲۰۱۰، اقبال و همکاران به مطالعه تجربی در خصوص پدیده سایش در قطعات لایه نشانی شده پرداختند. این محققان در پژوهش‌های خود گزارش دادند که سایش لغزشی پدیده‌ای پیچیده می‌باشد؛ که ممکن است به علت شکسته شدن پیوند میان رشته‌ها و حذف مواد به دلیل سایش و خراش رخ دهد. همچنین آنها در مطالعه خود با تحلیل تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی به تشکیل ترک، جدا شدن مواد و ایجاد گودال در مناطق تحت سایش اشاره کردند^[23]. در واقع می‌توان گفت مسئله سایش نیز مانند دیگر رفتارهای مکانیکی قطعات لایه نشانی شده به مقاومت داخلی در برابر نیروهای خارجی بستگی دارد. از این رو با کنترل عوامل موثر بر پیوند بین لایه‌های بیرونی و درونی قطعات، می‌توان مقاومت سایشی را بهبود بخشید^[24].

با مشخص شدن این موضوع محققان به بررسی راه‌های بهبود کیفیت اتصال میان رشته‌ها و دیگر عوامل موثر بر این موضوع در جهت افزایش مقاومت سایشی قطعات لایه نشانی شده پرداختند. گورالا و همکارانش به تحقیق بر روی تاثیر متغیرهای نیروی نرمال، سرعت لغزش و زاویه قرارگیری قطعه روی میز بر روی میزان اصطکاک و نرخ سایش پرداختند. در این مطالعه که با انجام آزمون پین بر روی دیسک صورت گرفت، مشخص گردید که با افزایش نیروی نرمال و سرعت لغزش میزان نرخ سایش و اصطکاک افزایش پیدا می‌کند. از طرفی این محققان گزارش کردند که با افزایش زاویه قرارگیری قطعه روی میز، مقدار نرخ سایش و اصطکاک به دلیل کاهش ترک، ایجاد چاله و پدیده جدا شدن ناگهانی مواد، کاهش پیدا می‌کنند^[25]. محمد و همکاران با انتخاب متغیرهای فاصله هوایی، ارتفاع لایه، جهت قرارگیری قطعه بر روی میز، زاویه پرشوندگی سطح و تعداد کانتورها به بررسی اثر این متغیرهای فرآیند بر نرخ سایش پرداختند. در ارزیابی صورت گرفته توسط این محققان مشخص گردید که با افزایش متغیرهای زاویه قرارگیری قطعه روی میز و ارتفاع لایه، مقدار نرخ سایش افزایش پیدا می‌کند؛ این مسئله به دلیل کاهش کیفیت پیوند میان لایه و همچنین رشد ترک در محل اتصال دو رشته مجاور روی می‌دهد. با افزایش فاصله هوایی و زاویه پرشوندگی سطح میزان نرخ سایش کاهش می‌یابد همچنین تاثیر متغیر تعداد کانتورها بر میزان سایش نوسانی می‌باشد^[26].

افزایش می‌یابد^[13]. یاو و همکاران نیز به بررسی تاثیر متغیرهای ضخامت لایه و زاویه قرارگیری قطعه نسبت به میز بر استحکام کششی قطعات پلی‌لاکتیک اسید پرداختند. آنها با ساخت قطعات در زاویه‌های قرارگیری مختلف نسبت به میز در سه نوع ضخامت لایه، گزارش دادند که در ضخامت لایه ثابت با افزایش زاویه، مقدار استحکام کششی قطعات افزایش پیدا می‌کند^[14].

جهت‌گیری رشته‌ها یکی دیگر از متغیرهای فرآیند لایه نشانی ذوبی می‌باشد که تاثیر فراوانی بر رفتار و خواص مکانیکی می‌گذارد؛ به طوری که اس سید و همکاران با بررسی بر روی تاثیر جهت قرارگیری رشته‌ها بر خواص مکانیکی قطعات گزارش دادند که جهت قرارگیری رشته‌ها، سبب صف‌بندی مولکول‌های پلیمری در طول جهت لایه در حین ساخت قطعه می‌شود. مادامی که رشته‌های نیمه ذوب شده از نازل خارج می‌شوند و به دمای محیط می‌رسند، احتمال رخ دادن تغییر فاز وجود دارد؛ در نتیجه انقباض حجمی رخ داده که منتج به اتصال ضعیف لایه‌ها و ایجاد تخلخل شده که سبب کاهش مقاومت‌های کششی، خمشی و ضربه‌ای می‌شود^[15]. همچنین برخی از محققان با ارزیابی بر روی تعدادی از متغیرهای فرآیند، نظیر ضخامت لایه، زاویه رشته نشانی و فاصله رشته نشانی گزارش دادند که متغیرهای مورد مطالعه بر نحوه پیوند لایه‌ها، ساختمان داخلی قطعات و همچنین عملکرد الاستیک قطعات ساخته شده اثر بسزایی می‌گذارند^[16,17]. در مطالعه‌ای که بر روی تاثیر متغیرهای جهت قرارگیری قطعه روی میز، ضخامت لایه‌ها، زاویه رشته‌گذاری، ضخامت رشته‌ها و فاصله رشته‌گذاری بر خواص مکانیکی مانند مقاومت کششی، خمشی و ضربه‌ای توسط سود و همکاران صورت پذیرفت، مشخص گردید که با کاهش ضخامت لایه، گرادیان دمایی افزایش پیدا می‌کند که سبب بهبود اتصال میان لایه‌ها و در نتیجه افزایش مقاومت مکانیکی خواهد شد. همچنین مشخص گردید که زاویه رشته‌گذاری کوچک سبب قرارگیری رشته‌ها در امتداد بارگذاری شده و مقاومت مکانیکی را بهبود می‌بخشد. از طرفی کاهش فاصله رشته‌گذاری باعث کاهش میزان تلفات حرارتی و بهبود اتصال میان رشته‌ها و افزایش مقاومت مکانیکی خواهد شد^[18]. برخی از محققان در مطالعات خود گزارش دادند که به دلیل اثر متغیرهایی مانند ضخامت لایه، جهت رشته‌گذاری، دمای نازل و میز و همچنین سیکل‌های غیریکنواخت گرمایش و سرمایش که در ذات فرآیند لایه نشانی ذوبی وجود دارد، امکان ایجاد انباشتگی تنش و اعوجاج در قطعات لایه نشانی شده وجود دارد^[19]. با توجه به مطالعاتی که بر روی خواص و رفتار مکانیکی قطعات لایه نشانی شده بررسی شده است، می‌توان این نتیجه‌گیری را ارائه نمود که بررسی متغیرهایی که بر ساختار داخلی قطعه و پیوند رشته‌ها به یکدیگر تاثیر می‌گذارند، از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد.

در سال‌های اخیر با توجه به پژوهش‌های که در حوزه ساخت افزایشی صورت پذیرفته است، پیشرفت‌های قابل توجهی در صنایع

بررسی بهتر انحنای پاسخ، احتیاج به اضافه کردن تعدادی نقاط مرکزی در سطوح عوامل مورد بررسی است که این مسئله اساس روش‌های طراحی مرکب مرکزی و باکس بنکن را ایجاد کرده است [29,30].

۲-۲- روش طراحی مرکب مرکزی

روش طراحی مرکب مرکزی یکی از انواع رایج طراحی پاسخ سطح می‌باشد که متشکل از تکنیک‌های طراحی آزمایش پیشرفته بوده که برای درک بهتر پاسخ‌ها و بهینه‌سازی آنها مفید می‌باشد. هنگامی که وجود انحنای میان مقادیر متغیرها تحت بررسی مورد نظر باشد، اضافه کردن نقاط بیشتر به مقادیر متغیرهای مورد بررسی می‌تواند به تعیین دقیق‌تر رفتار پاسخ مورد بررسی بینجامد. با اضافه کردن این نقاط جدید در فضای بین سطوح عوامل، روش طراحی مرکب مرکزی ایجاد می‌شود [31,32]. به عبارت بهتر تفاوت بین معادله پاسخ سطوح با معادله طراحی فاکتوریلی در اضافه شدن ترم‌های درجه دوم متغیرهای موثر فرآیند می‌باشد که اجازه مدل کردن انحنای پاسخ‌ها را می‌دهد. در واقع روش طراحی مرکب مرکزی متشکل از فاکتوریلی‌ها یا کسری از فاکتوریلی‌ها می‌باشد، که دارای نقاط مرکزی برای تعیین انحنای می‌باشد. این روش با ایجاد درک یا نقشه‌برداری از یک منطقه پاسخ، پیدا کردن سطح بهینه متغیرهای مورد بررسی و انتخاب شرایط عملیاتی برای برآورده کردن مشخصات، دارای مزیت می‌باشد [33,34].

۲-۳- انتخاب متغیرهای فرآیند

در این مطالعه به منظور ایجاد یک مدل تجربی مناسب برای پیش‌بینی مقاومت سایشی قطعات لایه نشانی شده، متغیرها و سطوح مورد بررسی آنها بر اساس مقادیر توصیه شده در مقالات در نظر گرفته شدند [24]. همچنین به منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها و مطالعه اثر برهم‌کنش متغیرهای مورد بررسی از روش طراحی مرکب مرکزی استفاده شد. در طراحی آزمایش، هر یک از متغیرهای ضخامت لایه، زاویه رشته‌گذاری و فاصله رشته‌گذاری در سه سطح فاکتوریلی پایین، مرکزی و فاکتوریلی بالا و دو نقطه محوری بالا و پایین مورد مطالعه قرار گرفتند. همچنین شش تکرار مرکزی برای بدست آوردن تقریب منطقی از خطای آزمایش در نظر گرفته شد. شکل ۱ متغیرهای فرآیند را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد. در جدول ۱ متغیرهای مورد بررسی و مقادیر آنها که به منظور بررسی مقاومت به سایش قطعات ترموپلاستیکی استفاده گردیدند، آورده شده است. همچنین مقادیر سایر متغیرهای فرآیند، که در این مطالعه ثابت فرض شدند، در جدول ۲ آورده شده است. بر اساس طراحی مرکب مرکزی تعداد آزمایش‌ها مورد نیاز، با استفاده از رابطه (۱) تعیین می‌شود:

$$N = 2^k + 2k + n_0 \quad (1)$$

در رابطه (۱)، N تعداد آزمایش‌های مورد نیاز و k تعداد متغیرهای

برخی از محققان به جهت افزایش مقاومت به سایش قطعات لایه نشانی شده، اقدام به افزودن تقویت کننده به ماده مصرفی کردند. به عنوان نمونه سودین و همکاران با اضافه کردن مواد تقویت کننده به بهبود مقاومت سایشی قطعات لایه نشانی شده پرداختند. این محققان با اضافه کردن الیاف فیبرکربن به پلیمر آکریلونیتریل بوتادین استارین، گزارش دادند که میزان نرخ سایش، نیروی اصطکاک و ضریب اصطکاک در مقایسه با حالت استفاده از پلیمر بدون تقویت کننده، کاهش پیدا کرده است [27].

در این پژوهش که بر روی رفتار سایشی قطعات ساخته شده به روش لایه نشانی ذوبی انجام شده است، هدف بررسی اثر متغیرهای فرآیند بر مقاومت سایشی و ارائه مدل رگرسیونی به منظور پیش‌بینی این رفتار می‌باشد؛ که به منظور بررسی دقیق این مسئله از روش پاسخ سطح استفاده شده است. جهت رسیدن به این هدف، متغیرهای تاثیرگذار بر کیفیت پیوند میان رشته‌ها و ساختار داخلی قطعه مورد نظر قرار گرفتند. با توجه به اینکه فرآیند لایه نشانی ذوبی یک فرآیند پرکاربرد نسبت به سایر روش‌های ساخت افزایشی می‌باشد و همچنین با توجه به مروری که بر پیشینه تحقیق در این حوزه صورت پذیرفت، پژوهشگران مطالعات کمتری در زمینه مقاومت سایش انجام داده‌اند و اکثریت مطالعات در زمینه بررسی تاثیر متغیرهای فرآیند، شناخت ماهیت سایر رفتارهای مکانیکی صورت گرفته است. به منظور رفع این خلاء در این تحقیق با انتخاب سه متغیر ضخامت لایه، زاویه و فاصله رشته‌گذاری به بررسی تاثیر متغیرها و مدل‌سازی مقاومت سایشی پرداخته شد. به منظور مطالعه دقیق اثر متغیرها و برهم‌کنش آنها بر نرخ سایش استفاده از روش طراحی مرکب مرکزی، جهت طراحی آزمایش تجربی استفاده گردید. با ساخت نمونه‌ها مطابق بر آرایه‌های پیشنهادی طراحی آزمایش، آزمون سایش پین روی دیسک بر روی نمونه‌های ساخته شده، صورت پذیرفت و میزان سایش نمونه‌ها به ازای سطوح مختلف متغیرهای مورد بررسی تعیین گردید. پس از آن با استفاده از تحلیل واریانس بر روی نتایج، مدل رگرسیونی جهت پیش‌بینی رفتار سایشی قطعات لایه نشانی شده ارائه گردید و با استفاده از روش‌های آماری مورد راستی آزمایشی قرار گرفت.

۲- طراحی آزمایش

۲-۱- طراحی آزمایش به روش پاسخ سطح

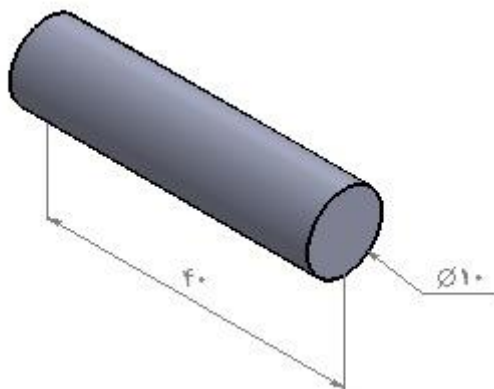
هدف از انجام طراحی آزمایش، مطالعه و بهینه‌سازی فرآیند با انجام کمترین تعداد آزمایش‌ها و امکان مطالعه برهم‌کنش متغیرهای مورد بررسی می‌باشد [28]. یکی از شیوه‌های طراحی آزمایش، روش‌های پاسخ سطح می‌باشد، که در این روش‌ها، پاسخ آزمایش به صورت خطوط هم‌تراز نمایش داده می‌شوند. طراحی‌های آزمایشی که به روش پاسخ سطح انجام می‌شوند، عمدتاً قادر به برازش سطح بر روی پاسخ نیستند، در این موارد برای

جدول ۳) آرایه‌های پیشنهاد شده

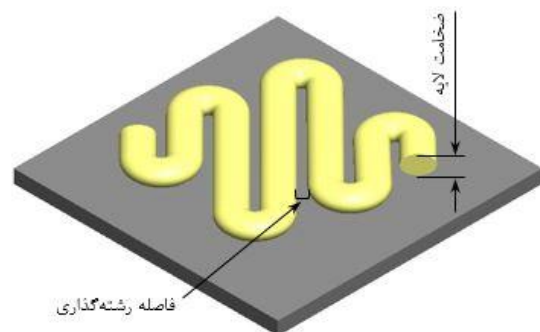
نوع	مقادیر سطوح کد گذاری شده			آرایه‌ها
	W	P	L	
فاکتوری	۱	-۱	۱	۱
فاکتوری	-۱	-۱	-۱	۲
فاکتوری	-۱	-۱	۱	۳
فاکتوری	۱	-۱	-۱	۴
فاکتوری	۱	۱	۱	۵
فاکتوری	۱	۱	-۱	۶
فاکتوری	-۱	۱	-۱	۷
مرکزی	۰	۰	۰	۸
فاکتوری	-۱	۱	۱	۹
مرکزی	۰	۰	۰	۱۰
مرکزی	۰	۰	۰	۱۱
مرکزی	۰	۰	۰	۱۲
مرکزی	۰	۰	۰	۱۳
محوری	۰	۰	۱/۶۳۳	۱۴
مرکزی	۰	۰	۰	۱۵
محوری	۰	-۱/۶۳۳	۰	۱۶
محوری	-۱/۶۳۳	۰	۰	۱۷
محوری	۰	۰	-۱/۶۳۳	۱۸
محوری	۰	۱/۶۳۳	۰	۱۹
محوری	۱/۶۳۳	۰	۰	۲۰

۴-۲- ساخت نمونه و آزمون سایش

به منظور ساخت قطعات آزمون سایش از چاپگر سه بعدی آتور ال پرو استفاده شد. در ابتدا مدل سه بعدی نمونه آزمون سایش با استفاده از نرم‌افزارهای طراحی و بر اساس استاندارد ترسیم شد. شکل ۲ مدل و ابعاد نمونه آزمون سایش را نشان می‌دهد. پس از آن با پسوند قابل فراخوانی برای نرم‌افزار چاپگر سه بعدی ذخیره شد. نمونه ذخیره شده و رو دی نرم‌افزار چاپگر سه بعدی بوده و پس از اعمال متغیرهای مورد بررسی برای هر نمونه مطابق بر آرایه‌های پیشنهادی روش طراحی مرکب مرکزی که توسط نرم‌افزار تحلیل داده‌ها تعیین گردید، مسیر پیمایش نازل دستگاه برای هر نمونه مشخص شد. شکل ۳ نمونه آزمون سایش را در حین ساخت نشان می‌دهد.



شکل ۲) مدل نمونه آزمون سایش



شکل ۱) متغیرهای فرآیند (شکل بالا): متغیرهای فاصله رشته‌گذاری و ضخامت لایه، شکل پایین: متغیر زاویه رشته‌گذاری در وضعیت‌های متفاوت)

جدول ۱) متغیرهای مورد بررسی و سطوح آن‌ها

متغیر	نماد	واحد	محدوده سطح پایین (-۱/۶۳۳)	سطح مرکزی (۰)	سطح بالا (+۱/۶۳۳)	سطح محوری بالا (+۱/۶۳۳)
ضخامت لایه	L	mm	۰/۰۸۶	۰/۱۲۷	۰/۱۹۰	۰/۲۹۴
زاویه رشته‌گذاری	P	Deg	۰	۱۸	۴۵	۷۲
فاصله رشته‌گذاری	W	mm	۰	۰/۰۰۲	۰/۰۰۵	۰/۰۰۸

جدول ۲) متغیرهای ثابت و مقادیر آن‌ها

متغیر	واحد	مقدار
قطر نازل	mm	۰/۴
دمای نازل	oC	۲۳۰
عرض اکستروود	mm	۰/۴
سرعت پرینت	mm/min	۳۶۰۰
سرعت بازمشک	mm/min	۱۸۰۰
الگوی پر شدن سطح	-	مستطیلی
Top solid layer	-	۰
Bottom solid layer	-	۰
Outline overlap	%	۲۰

مورد بررسی (متغیرهای مستقل) را نشان می‌دهند. همچنین k_2 تعداد آزمایش‌های را که با استفاده از سطوح فاکتوری انجام شده است را نشان می‌دهد. k_2 و n_0 نیز به ترتیب تعداد آزمایش‌های در نظر گرفته شده با سطوح محوری و تعداد تکرار سطوح مرکزی را در این طراحی آزمایش نشان می‌دهند^[35]. جدول ۳ آرایه‌های پیشنهادی روش طراحی مرکب مرکزی را نشان می‌دهد.



شکل ۵) نمونه‌های ساخته شده با دستگاه لایه نشانی ذوبی



شکل ۶) دستگاه آزمون سایش

جدول ۴) شرایط آزمون سایش

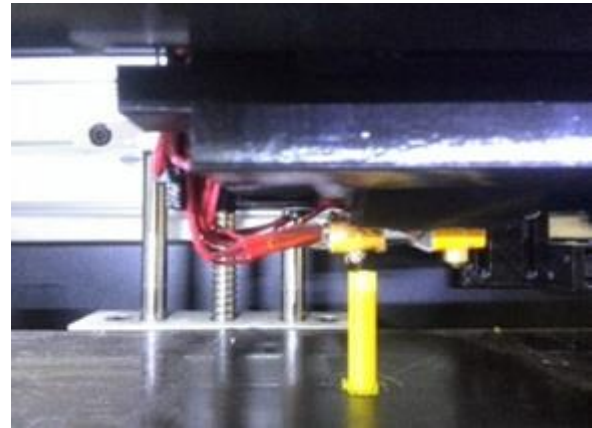
متغیر	واحد	مقدار
نیرو	kgf	۱۰
سرعت	cm/s	۲۹/۳۳
قطر مسیر سایش	mm	۵۶
مدت زمان آزمون	Min	۲۵
روان کننده	-	خشک
دما	oC	۲۳±۲
رطوبت نسبی	%	۵۰±۵
دور توقف	rpm	۲۵۰۰

۳- بحث و نتیجه‌گیری

۳-۱- مدل‌سازی و تحلیل واریانس

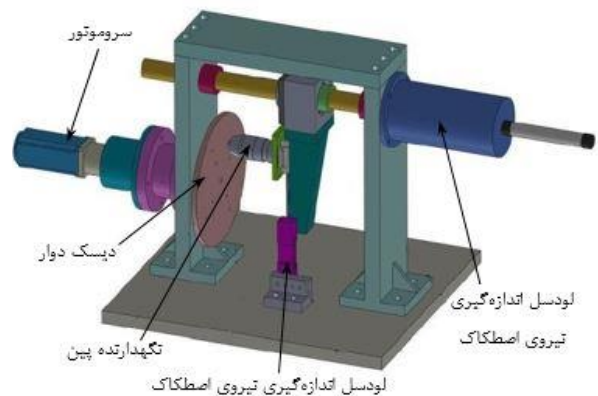
به منظور مدل‌سازی تأثیر متغیرهای مورد بررسی بر مقاومت سایشی بر اساس روش طراحی مرکب مرکزی، در ابتدا تابع وابستگی بین متغیرهای مورد بررسی و متغیر وابسته مطابق با رابطه (۲) در نظر گرفته شد:

$$Y = C_0 + \sum_{i=1}^k C_i X_i + \sum_{i=1}^k C_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k C_{ij} X_i X_j + \epsilon \quad (2)$$



شکل ۳) نمونه آزمون سایش ساخته شده با دستگاه لایه نشانی ذوبی

در این پژوهش از فیلامنت ABS محصول شرکت یوسو جهت ساخت نمونه‌های آزمون سایش استفاده شد. برای انجام آزمون سایش از دستگاه AMI Wear Test استفاده گردید. این دستگاه به منظور انجام آزمون سایش و مطابق با استاندارد ASTM-G99 طراحی و ساخته شده است [36]. شکل ۴ نشان‌دهنده دستگاه آزمون سایش به همراه معرفی قسمت‌های مختلف می‌باشد. در آزمون سایش، از نمونه‌ها به عنوان پین و از یک دیسک با جنس مشخص و با سختی RC 58 و زبری سطح ۰/۳ میکرون استفاده گردید. در شکل ۵ تعدادی از نمونه‌های آزمون سایش آورده شده است. شکل ۶ نمونه تحت آزمون سایش را نشان می‌دهد. همچنین شرایط آزمون سایش در جدول ۴ آورده شده است. با انجام آزمون سایش بر روی نمونه‌ها، نمودارهای مربوط به تغییرات نیروی اصطکاک در زمان‌های مختلف، دما و میزان ارتفاع ساییده شده به ازای دور برای هر نمونه مشخص گردید. با استفاده از داده‌های بدست آمده از آزمون سایش، نرخ سایش به صورت حجم ساییده شده بر حسب میلی‌متر مکعب بر مسافت طی شده بر حسب متر محاسبه شد. میزان نرخ سایش هر نمونه در جدول ۵ آورده شده است.



شکل ۴) دستگاه تست سایش AMI Wear test

$$MS_R = SS_R / p - 1 \quad (6)$$

$$MS_E = SS_E / n - p \quad (7)$$

در روابط (۵) تا (۷)، مجموع مربعات رگرسیون و SSE مجموع مربعات خطا می‌باشند [37] آماره P، معنادار بودن مدل و همچنین اثرگذار بودن هر عامل را در مدل نشان می‌دهد. بدین منظور با تعیین آماره P، مقدار آن بر اساس دقت مورد نظر با مقدار α مقایسه می‌گردد. مقدار P هنگامی بیان کننده معنادار بودن مدل و تاثیرگذاری عوامل بر مدل می‌باشد که کمتر از مقدار α باشد، که معمولاً مقدار α برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته می‌شود [39].

مدل آماری منطبق بر رابطه (۲)، توسط نرم افزار مینی تب و با بررسی نتایج نرخ سایش نمونه‌های لایه نشانی شده، ارائه گردید. همچنین دقت و قابل قبول بودن مدل رگرسیون با استفاده از تحلیل واریانس بررسی شد. به این منظور، با وارد کردن داده‌ها و انجام تحلیل واریانس بر روی نتایج، مقادیر P به ازای هر کدام از جمله‌های خطی، درجه دوم و برهم کنش تعیین گردید. نتایج تحلیل واریانس بر روی نتایج نرخ سایش قطعات لایه نشانی شده در جدول ۶ آورده شده است.

با انجام تحلیل واریانس بر روی نتایج، ضریب رگرسیون و ضریب تعیین تعدیل شده مدل به ترتیب ۹۷/۹۳٪ و ۹۵/۶۲٪ محاسبه شد. همچنین مقدار آماره P و F مدل به ترتیب ۰/۰۰۰ و ۴۲/۵۲ تعیین گردید، که مشخص کننده معناداری و اعتبار مدل می‌باشد. با توجه به جدول ۶، مشاهده می‌شود که مقدار P مربوط به آماره عدم تطابق بیشتر از ۰/۰۵ می‌باشد. این مسئله بیان کننده این موضوع می‌باشد که عوامل در نظر گرفته نشده در این مدل، تاثیر قابل توجهی بر پاسخ مورد بررسی ندارد و مدل در نظر گرفته شده

جدول ۶) تحلیل واریانس

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	آماره F	آماره P
مدل	۱۰	۰/۰۰۰۰۰۵	۴۲/۵۲	۰/۰۰۰
جمله‌های خطی	۳	۰/۰۰۰۰۰۱	۲۷/۶۱	۰/۰۰۰
L	۱	۰/۰۰۰۰۰۰	۱/۸۶	۰/۲۰۶
P	۱	۰/۰۰۰۰۰۰	۱۳/۱۶	۰/۰۰۶
W	۱	۰/۰۰۰۰۰۱	۶۷/۸۲	۰/۰۰۰
جمله‌های درجه دوم	۳	۰/۰۰۰۰۰۰	۸/۶۲	۰/۰۰۵
L ²	۱	۰/۰۰۰۰۰۰	۱۷/۱۸	۰/۰۰۳
P ²	۱	۰/۰۰۰۰۰۰	۵/۴۱	۰/۰۴۵
W ²	۱	۰/۰۰۰۰۰۰	۱/۴۵	۰/۲۵۹
برهم کنش	۳	۰/۰۰۰۰۰۴	۱۰۵/۴۹	۰/۰۰۰
L*P	۱	۰/۰۰۰۰۰۰	۰/۶۸	۰/۴۳۲
L*W	۱	۰/۰۰۰۰۰۰	۱۱/۵۱	۰/۰۰۸
P*W	۱	۰/۰۰۰۰۰۴	۳۰۴/۲۸	۰/۰۰۰
خطا	۹	۰/۰۰۰۰۰۰		
عدم تطابق	۵	۰/۰۰۰۰۰۰	۱/۵۸	۰/۳۳۹
خطا خالص	۴	۰/۰۰۰۰۰۰		
ضریب تعیین = ۹۷/۹۳٪				
ضریب تعیین تعدیل شده = ۹۵/۶۲٪				
ضریب تعیین پیش‌بینی = ۸۶/۸۵٪				

جدول ۵) آرایه‌های پیشنهاد شده

آرایه‌ها	سطوح متغیرها			نرخ سایش (mm ³ /m)
	W	P	L	
۱	۱	-۱	۱	۰/۰۴۲۴۹۵
۲	-۱	-۱	-۱	۰/۰۴۳۳۷۶
۳	-۱	-۱	۱	۰/۰۴۳۱۹۷
۴	۱	-۱	-۱	۰/۰۴۲۳۷۳
۵	۱	۱	۱	۰/۰۴۴۳۲۷
۶	۱	۱	-۱	۰/۰۴۳۸۲۹
۷	-۱	۱	-۱	۰/۰۴۲۲۷۳
۸	۰	۰	۰	۰/۰۴۳۱۸۹
۹	-۱	۱	۱	۰/۰۴۱۹۸۲
۱۰	۰	۰	۰	۰/۰۴۳۰۴۷
۱۱	۰	۰	۰	۰/۰۴۲۹۸۳
۱۲	۰	۰	۰	۰/۰۴۳۰۱۱
۱۳	۰	۰	۰	۰/۰۴۳۰۲۲
۱۴	۰	۰	۱/۶۳۳	۰/۰۴۲۸۳۴
۱۵	۰	۰	۰	۰/۰۴۲۸۵۵
۱۶	۰	-۱/۶۳۳	۰	۰/۰۴۳۰۸۲
۱۷	-۱/۶۳۳	۰	۰	۰/۰۴۲۷۷۹
۱۸	۰	۰	-۱/۶۳۳	۰/۰۴۲۵۸۰
۱۹	۰	۱/۶۳۳	۰	۰/۰۴۳۴۱۰
۲۰	۱/۶۳۳	۰	۰	۰/۰۴۳۵۲۷

در این رابطه، k بیانگر تعداد متغیرهای مستقل می‌باشد. C0 نشان دهنده ضریب ثابت، Ci و Cii به ترتیب نشان دهنده ضرایب خطی، مربعی و اثرهای متقابل متغیرهای مستقل می‌باشند [37].

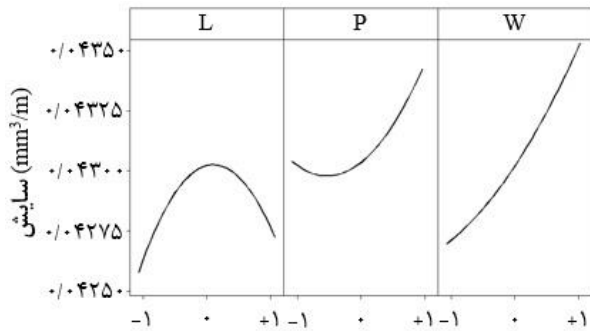
با استفاده از تحلیل واریانس مدل ارائه شده مورد ارزیابی قرار گرفت و ضرایب رگرسیون برای جمله‌های خطی، درجه دوم و برهم کنش محاسبه شد و با استفاده از ضریب تعیین، کیفیت مدل تعیین گردید. ضریب تعیین یا رگرسیون یکی از روش‌های بررسی رگرسیون جهت تشخیص مدل بهتر می‌باشد. یکی دیگر از روش‌های بررسی رگرسیون استفاده از ضریب تعیین تعدیل شده می‌باشد، که حالت اصلاح شده ضریب رگرسیون بوده و در اثر افزایش تعداد عوامل، افزایش نمی‌یابد [30]. ضرایب تعیین با استفاده از روابط (۳) و (۴) محاسبه می‌گردند:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (3)$$

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{(n-1)}{(n-p)}(1 - R^2) \quad (4)$$

در روابط (۳) و (۴)، p تعداد عوامل مدل و n تعداد آزمایش‌ها می‌باشد [37]. پس از تعیین مدل، ضریب رگرسیون شرط لازم بر تعیین مناسب بودن مدل می‌باشد. البته باید توجه داشت ضریب تعیین به تنهایی برای تعیین دقت مدل کافی نیست. بدین جهت معنی‌دار بودن مدل با استفاده از مقادیر P و F بررسی می‌شود. بزرگ بودن عامل F نشان دهنده اعتبار مدل می‌باشد [38]. این عامل با استفاده از روابط (۵) تا (۷) محاسبه می‌گردد:

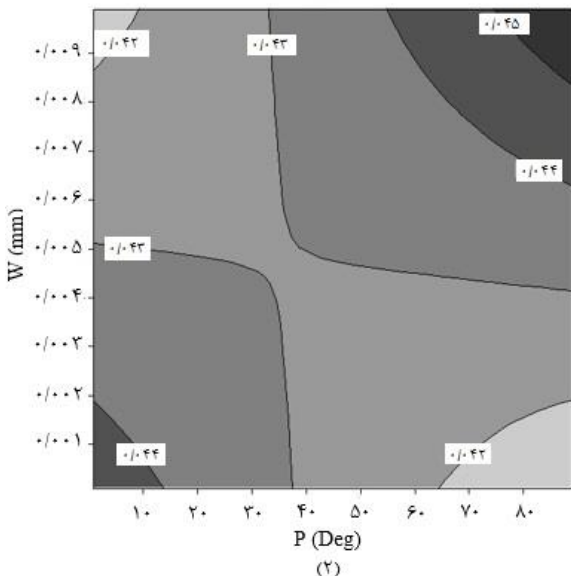
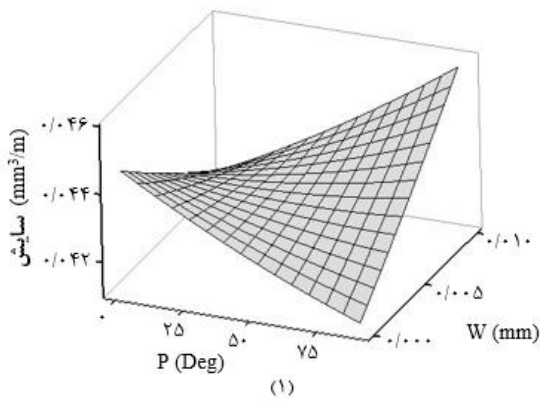
$$F = \frac{MS_R}{MS_E} \quad (5)$$



شکل ۷) نمودار تغییرات نرخ سایش به ازای تغییر حول نقطه مرکزی

می‌باشد، زیرا با افزایش فاصله رشته‌گذاری پیوند میان رشته‌های مجاور ضعیف شده و در نتیجه مقاومت نمونه در برابر سایش پایین آمده و نرخ سایش قطعه افزایش پیدا می‌کند.

به منظور مطالعه اثر متقابل متغیرهای مورد بررسی بر نرخ سایش از نمودار تاثیر هم‌زمان متغیرهای فرآیند بر پاسخ استفاده شد. در شکل‌های ۸ و ۹ اثر برهم‌کنش متغیرهای فرآیند و تاثیرشان بر متغیر پاسخ آورده شده است.



شکل ۸) نمودار اثر متقابل زاویه رشته‌گذاری و فاصله رشته‌گذاری بر نرخ سایش

مناسب است. در این مدل ترم‌هایی که مقدار آماره P آنها بزرگتر از ۰/۰۵ جمله‌های درجه دوم L2 و P2 و ترم‌های برهم‌کنش L*W و P*W دارای مقدار P کوچکتر از ۰/۰۵ بوده و بر روی مدل تاثیرگذار می‌باشند. برای ساده سازی مدل، می‌توان جمله‌های کم اهمیت را از مدل حذف کرد. با حذف ترم‌های کم اهمیت، دومین تحلیل واریانس به منظور دستیابی به مدل نهایی انجام شد. نتایج دومین تحلیل واریانس در جدول ۷ آورده شده است.

با ساده سازی، مدل نهایی ارائه شده جهت پیش‌بینی تاثیر متغیرهای مورد بررسی بر نرخ سایش قطعات لایه نشانی شده با استفاده از متغیرهای کد گذاری شده در رابطه (۸) آورده شده است:

$$Wear\ rate = 0.043051 + 0.113 \times 10^{-3}P + 0.256 \times 10^{-3}W - 0.132 \times 10^{-3}L^2 + 0.7 \times 10^{-4}P^2 + 0.136 \times 10^{-3}(L * W) + 0.701 \times 10^{-3}(P * W) \quad (8)$$

در رابطه (۸)، علامت مثبت ضرایب رگرسیون بدست آمده از مدل طراحی مرکب مرکزی به مفهوم تاثیر مستقیم متغیرهای مورد بررسی بر متغیر وابسته و علامت منفی در ضرایب مدل به مفهوم تاثیر غیرمستقیم متغیرهای مستقل مورد مطالعه بر میزان نرخ سایش قطعات آکریلونتیریل بوتادین استارین می‌باشد.

۲-۳- اثر متغیرهای فرآیند

به منظور بررسی اثر مستقل هر یک از متغیرهای ضخامت لایه، زاویه و فاصله رشته‌گذاری از نمودار تغییرات جزئی هر متغیر در اطراف نقطه مرکزی استفاده شد. در شکل ۷ تغییرات نرخ سایش هنگامی که هر یک از متغیرهای مورد بررسی از نقطه مرکزی عبور می‌کند، نشان داده شده است. مطابق شکل ۷، تغییرات قابل توجه نرخ سایش در اطراف نقاط مرکزی بسیار مشهود است. شیب این تغییرات در متغیر فاصله رشته‌گذاری بیشتر از زاویه رشته‌گذاری و نیز ضخامت لایه می‌باشد، که این مسئله نشان‌دهنده اثر بیشتر متغیر فاصله رشته‌گذاری بر نرخ سایش قطعات لایه نشانی شده

جدول ۷) تحلیل واریانس مدل نهایی

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	آماره F	آماره P
مدل	۷	۰/۰۰۰۰۰۵	۵۲/۲۸	۰/۰۰۰
جمله‌های خطی	۲	۰/۰۰۰۰۰۰	۲۷/۳۰	۰/۰۰۰
P	۱	۰/۰۰۰۰۰۰	۱۳/۰۱	۰/۰۰۴
W	۱	۰/۰۰۰۰۰۱	۶۷/۰۴	۰/۰۰۰
جمله‌های درجه دوم	۲	۰/۰۰۰۰۰۰	۱۲/۰۷	۰/۰۰۲
L ²	۱	۰/۰۰۰۰۰۰	۱۷/۷۹	۰/۰۰۱
P ²	۱	۰/۰۰۰۰۰۰	۴/۹۹	۰/۰۴۷
برهم‌کنش	۲	۰/۰۰۰۰۰۴	۱۵۶/۰۹	۰/۰۰۰
L*W	۱	۰/۰۰۰۰۰۰	۱۱/۳۸	۰/۰۰۶
P*W	۱	۰/۰۰۰۰۰۴	۳۰۰/۸۰	۰/۰۰۰
خطا	۱۱	۰/۰۰۰۰۰۰		
عدم تطابق	۷	۰/۰۰۰۰۰۰	۱/۵۳	۰/۳۵۷
خطا خالص	۴	۰/۰۰۰۰۰۰		
ضریب تعیین = ۹۷/۴۴%				
ضریب تعیین تعدیل شده = ۹۵/۵۷%				
ضریب تعیین پیش‌بینی = ۹۱/۳۷%				

نرخ سایش افزایش پیدا می‌کند. با افزایش ضخامت لایه و با فرض ثابت بودن دمای لایه نشانی و دمای میز، گرادیان حرارتی در امتداد ارتفاع لایه کاهش پیدا می‌کند و سبب اتصال نامناسب رشته‌های مجاور و نیز لایه‌ها بر روی یکدیگر می‌شود که در نتیجه آن مقاومت در برابر سایش کاهش پیدا می‌کند. همچنین این اثر با افزایش فاصله رشته‌گذاری تشدید شده و شرایط را برای افزایش نرخ سایش ایجاد می‌کند. مادامی که فاصله رشته‌گذاری در سطح پایین خود باشد، با افزایش میزان ضخامت لایه نرخ سایش کاهش پیدا می‌کند. از آنجایی که اثر متغیر ضخامت لایه بر روی نرخ سایش مطابق با مقدار F موجود در جدول ۶، کمتر از متغیر فاصله رشته‌گذاری می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که تقابل اثر فاصله رشته‌گذاری و ضخامت لایه، سبب کاهش مقدار نرخ سایش می‌باشد.

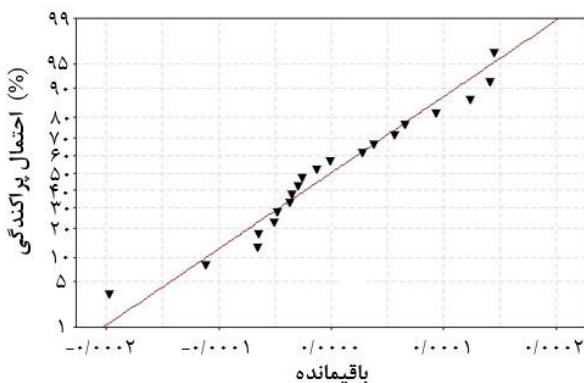
۳-۳- راستی آزمایی مدل

به منظور بررسی صحت مدل ارائه شده، از احتمال پراکندگی نرمال داده‌ها استفاده شد. احتمال پراکندگی نرمال داده‌ها در فضای مدل‌سازی در شکل ۹، آورده شده است. طبق شکل ۱۰، خط مستقیم نشان‌دهنده باقی‌مانده‌های مدل می‌باشد و نقاط، مقدار حقیقی باقی‌مانده‌های بدست آمده از مدل ارائه شده را نشان می‌دهند. نقاط باقی‌مانده در امتداد خط با شرط نرمال قرار دادند که این نقاط به صورت تقریباً خطی تغییر می‌کنند، لذا می‌توان نتیجه گرفت احتمال دخالت خطای تصادفی و اثر ترتیب انجام آزمایش‌ها در مدل‌سازی به شدت کاهش یافته است و به طبع مدل ارائه شده دارای اعتبار کافی برای برازش داده‌ها می‌باشد.

۴- نتایج

در این بخش به طور خلاصه به نتایج حاصل شده، اشاره می‌شود:

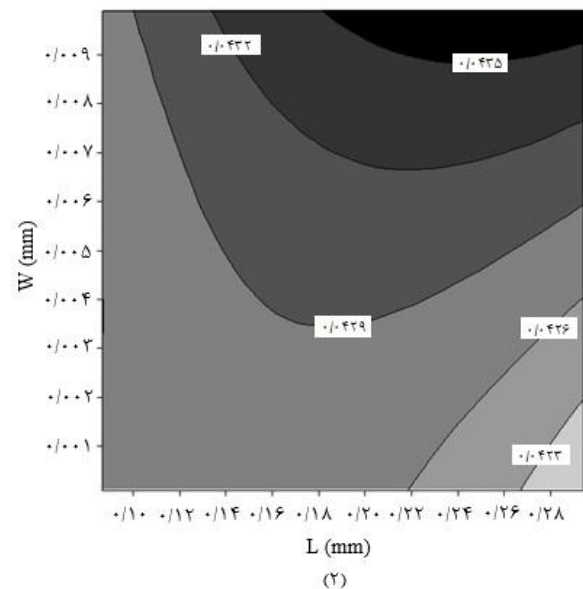
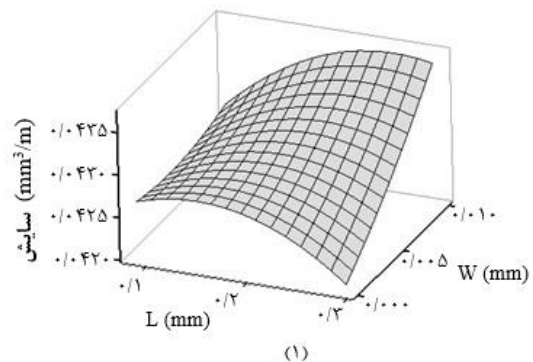
- ۱- روش طراحی مرکب مرکزی در بررسی سه متغیر با سه فاکتوریل پایین، مرکزی و بالا و دو سطح محوری و انجام بیست آزمون سیستماتیک، به منظور مدل‌سازی مقاومت سایشی قطعات آکریلونیتریل بوتادین استارین ساخته شده به روش لایه نشانی ذوبی، با موفقیت به کار برده شد.



شکل ۱۰) نمودار احتمال پراکندگی نرمال داده‌ها در فضای مدل

با توجه به شکل ۸، می‌توان دریافت که با افزایش متغیر زاویه رشته‌گذاری در هنگامی که فاصله رشته‌گذاری در سطح پایین خود قرار دارد، میزان نرخ سایش کاهش پیدا می‌کند که علت آن هم‌راستایی نیروی سایشی و جهت قرارگیری رشته‌ها و کم بودن فاصله میان رشته‌ها می‌باشد، که به علت پیوند مناسب میان رشته‌ها و لایه‌ها، مقاومت بیشتری در برابر سایش دارند. مقدار نرخ سایش با افزایش زاویه رشته‌گذاری در هنگامی که فاصله رشته‌گذاری در حد بالای خود قرار دارد، افزایش می‌یابد. این مسئله به علت افزایش فاصله رشته‌ها از یکدیگر می‌باشد که موجب پیوند ضعیف بین رشته‌های مجاور می‌شود. هنگامی که متغیر زاویه رشته‌گذاری در سطح پایین خود قرار گیرد، با افزایش فاصله رشته‌گذاری، نرخ سایش کاهش می‌یابد. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش فاصله رشته‌گذاری، مادامی که متغیر زاویه رشته‌گذاری در سطح بالای خود قرار دارد، نرخ سایش افزایش پیدا می‌کند که علت این مسئله ضعیف بودن پیوند میان رشته بوده که منبع آن افزایش فاصله رشته‌گذاری می‌باشد.

با توجه به شکل ۹، ملاحظه می‌شود که با افزایش ضخامت لایه و در حالتی که فاصله رشته‌گذاری در سطح بالای خود قرار دارد، میزان



شکل ۹) نمودار اثر متقابل متغیرهای ضخامت لایه و فاصله رشته‌گذاری بر نرخ سایش

moulding techniques. *Journal of Manufacturing Processes*. 2016 ;21:39-45.

9- Moradi M, Falavandi H, Karami Moghadam M, Shaikh Mohammad Meiabadi M. Experimental Investigation of Laser Cutting Post Process of Additive Manufactured Parts of Poly Lactic Acid (PLA) by 3D Printers Using FDM Method. *Modares Mechanical Engineering*. 2020 ;20(4):999-1009.

10- Heidari-Rarani M, Rafiee-Afarani M, Zahedi AM. Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites. *Composites Part B: Engineering*. 2019;175:107147.

11- Moradi M, Karami Moghadam M, Asgari F. 4D printing additive manufacturing review; Mechanism, Chalanges, Applications and Future. *Modares Mechanical Engineering*. 2020;20(4):1063-77.

12- Hamidi F, Aslani F. Additive manufacturing of cementitious composites: Materials, methods, potentials, and challenges. *Construction and Building Materials*. 2019;218:582-609.

13- Sun Q, Rizvi GM, Bellehumeur CT, Gu P. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid prototyping journal*. 2008.

14- Yao T, Deng Z, Zhang K, Li S. A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations. *Composites Part B: Engineering*. 2019;163:393-402.

15- Es-Said OS, Foyos J, Noorani R, Mendelson M, Marloth R, Pregger BA. Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples. *Materials and Manufacturing Processes*. 2000 ;15(1):107-22.

16- Lee BH, Abdullah J, Khan ZA. Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. *Journal of materials processing technology*. 2005;169(1):54-61.

17- Somireddy M, Czekanski A. Mechanical characterization of additively manufactured parts by FE modeling of mesostructure. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2017;1(2):18.

18- Sood AK, Ohdar RK, Mahapatra SS. Parametric appraisal of fused deposition modelling process using the grey Taguchi method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2010;224(1):135-45.

19- Sood AK, Ohdar RK, Mahapatra SS. Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement. *Journal of Advanced Research*. 2012;3(1):81-90.

20- Harish S, Devadath VR. Additive manufacturing and analysis of tibial insert in total knee replacement implant. *Int Res J Eng Technol*. 2015;2(04):633-8.

21- Ramli MS, Wahab MS, Ahmad M, Bala AS. FDM preparation of bio-compatible UHMWPE polymer for artificial implant. *ARPN J. Eng. Appl. Sci*. 2016;11(8):5473-80.

22- Tappa K, Jammalamadaka U. Novel biomaterials used in medical 3D printing techniques. *Journal of functional biomaterials*. 2018;9(1):17.

۲- تحلیل واریانس صورت گرفته بر روی مدل ارائه شده اعتبار و دقت آن را به خوبی تایید می‌کند. در این تحلیل مقدار ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده، به ترتیب ۹۷/۴۴٪ و ۹۵/۵۷٪ می‌باشند.

۳- در تحلیل واریانس صورت انجام شده بر روی مدل مشخص گردید، جمله‌های P, L_2, W, P_2, L^*W و P^*W بر روی سایش تاثیر گذارند.

۴- با استفاده از احتمال پراکندگی نرمال داده‌ها، راستی آزمایی بر روی مدل صورت پذیرفت و مشخص گردید که مدل ارائه شده از اعتبار کافی برای پیش‌بینی مقاومت سایشی قطعات لایه نشانی شده، برخوردار است.

تشکر و قدرانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تاییدیه اخلاقی: نویسندگان موارد اخلاقی را در نگارش این مقاله رعایت نموده‌اند.

تعارض منافع: نویسندگان این مقاله با اختیار و آگاهی کامل، کلیه حقوق مادی مربوط به انتشار این مقاله را به نشریه دانشگاه تربیت مدرس، واگذار می‌نمایند و نشریه در انتشار این مقاله به هر صورت اختیار تام دارد و منافع مادی احتمالی متعلق به نشریه است.

سهم نویسندگان: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع مالی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع

1- Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KT, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018;143:172-96.

2- Mohan N, Senthil P, Vinodh S, Jayanth N. A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process. *Virtual and Physical Prototyping*. 2017 ;12(1):47-59.

3- Quan H, Zhang T, Xu H, Luo S, Nie J, Zhu X. Photocuring 3D printing technique and its challenges. *Bioactive materials*. 2020;5(1):110-5.

4- Nagarajan B, Hu Z, Song X, Zhai W, Wei J. Development of micro selective laser melting: The state of the art and future perspectives. *Engineering*. 2019;5(4):702-20.

5- Wang X, Jiang M, Zhou Z, Gou J, Hui D. 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*. 2017;110:442-58.

6- Attaran M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*. 2017;60(5):677-88.

7- Prakash KS, Nancharaih T, Rao VS. Additive manufacturing techniques in manufacturing-an overview. *Materials Today: Proceedings*. 2018 ;5(2):3873-82.

8- Dawoud M, Taha I, Ebeid SJ. Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection

- 37- Montgomery DC. Design and analysis of experiments. John Wiley & sons; 2017.
- 38- Box GE, Wilson KB. On the experimental attainment of optimum conditions. *Journal of the royal statistical society: Series b (Methodological)*. 1951;13(1):1-38.
- 39- Moradi M, Karami Moghadam M, Shamsborhan M, Bodaghi M, Falavandi H. Post-processing of FDM 3d-printed polylactic acid parts by laser beam cutting. *Polymers*. 2020;12(3):550.
- 23- Equbal A, Sood AK, Toppo V, Ohdar RK, Mahapatra SS. Prediction and analysis of sliding wear performance of fused deposition modelling-processed ABS plastic parts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2010;224(12):1261-71.
- 24- Sood AK, Equbal A, Toppo V, Ohdar RK, Mahapatra SS. An investigation on sliding wear of FDM built parts. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2012;5(1):48-54.
- 25- Gurralla PK, Regalla SP. Friction and wear rate characteristics of parts manufactured by fused deposition modelling process. *International Journal of Rapid Manufacturing*. 2017;6(4):245-61.
- 26- Mohamed OA, Masood SH, Bhowmik JL. Analysis of wear behavior of additively manufactured PC-ABS parts. *Materials Letters*. 2018;230:261-5.
- 27- Sudin MN, Ramli FR, Alkahari MR, Abdullah MA. Comparison of wear behavior of ABS and ABS composite parts fabricated via fused deposition modelling. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*. 2018;5(1):164-9.
- 28- Srivastava M, Maheshwari S, Kundra TK, Rathee S. Multi-response optimization of fused deposition modelling process parameters of ABS using response surface methodology (RSM)-based desirability analysis. *Materials Today: Proceedings*. 2017;4(2):1972-7.
- 29- Baligheid SM, Chandrasekhar U, Elangovan K, Shankar S. RSM optimization of parameters influencing mechanical properties in selective inhibition sintering. *Materials Today: Proceedings*. 2018 ;5(2):4903-10.
- 30- Wu CJ, Hamada MS. *Experiments: planning, analysis, and optimization*. John Wiley & Sons; 2011.
- 31- Sarafrazi M, Hamadani M, Ghasemi AR. Optimize epoxy matrix with RSM/CCD method and influence of multi-wall carbon nanotube on mechanical properties of epoxy/polyurethane. *Mechanics of Materials*. 2019;138:103154.
- 32- Moradi M, Meiabadi S, Kaplan A. 3D printed parts with honeycomb internal pattern by fused deposition modelling; experimental characterization and production optimization. *Metals and Materials International*. 2019;25(5):1312-25.
- 33- Sheoran AJ, Kumar H. Fused Deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research. *Materials Today: Proceedings*. 2020;21:1659-72.
- 34- Moradi M, Karami Moghadam M, Shamsborhan M, Bodaghi M. The synergic effects of FDM 3D printing parameters on mechanical behaviors of bronze poly lactic acid composites. *Journal of Composites Science*. 2020;4(1):17.
- 35- Rostamiyan Y, Fereidoon A, Rezaeiashtiyani M, Mashhadzadeh AH, Salmankhani A. Experimental and optimizing flexural strength of epoxy-based nanocomposite: effect of using nano silica and nano clay by using response surface design methodology. *Materials & Design*. 2015;69:96-104.
- 36- ASTM International, 2020. [Online]. Available: <http://www.astm.org/standard/G99.htm>.