



مطالعه زبری سطح، نرخ براده برداری و انحراف در قطعات کامپوزیتی جدار نازک طی فرآیند ماشین کاری سریع

مریم رضی فر¹، پیام سرآئیان^{2*}، احسان شکوری³، عادل مقصود پور⁴

- 1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
 2- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد
 3- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
 4- استادیار، مهندسی مکانیک، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران
 * P_saraeian@iau-tmb.ac.ir, 8514143131

چکیده

امروزه، به علت نیاز صنایع مختلف، استفاده از قطعات کامپوزیتی با جدار نازک به دلیل بالا بودن نسبت استحکام به وزن آن بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. ساختار لایه‌ای کامپوزیت‌ها، موجب مشکلات و آسیب‌هایی در فرآیند ماشین کاری می‌گردد، این مشکلات مخصوصاً در ماشین کاری قطعات کامپوزیتی با جدار نازک، بیشتر می‌باشد. یکی از راهکارهای مناسب جهت جلوگیری از بروز آسیب طی ماشین کاری کامپوزیت‌های جداره نازک استفاده از فرآیند ماشین کاری سرعت بالا می‌باشد. در این تحقیق تأثیر پارامترهای فرزکاری سرعت بالا بر روی زبری سطح، نرخ براده برداری و میزان انحراف در کامپوزیت جدار نازک، مورد مطالعه قرار گرفت. به این منظور ابتدا نمونه‌های کامپوزیتی از جنس شیشه-اپوکسی با ضخامت‌های 2، 4 و 6 میلی‌متر تهیه گردید و سپس عملیات فرزکاری سرعت بالا بر روی نمونه‌ها، با تغییر پارامترهای سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی و عمق برش، انجام شد. آزمایشات انجام شده توسط نرم‌افزار مینی‌تب طراحی و آنالیز گردید. مقایسه نتایج حاصل از بهینه‌سازی بر روی کامپوزیت‌ها با ضخامت‌های متفاوت به روش سطح پاسخ نشان داد که مقادیر بهینه میزان زبری سطح 2.12 میکرومتر، نرخ براده برداری 5.99 میلی‌متر مکعب بر دقیقه و میزان انحراف 0.082 میلی‌متر مربوط به نمونه با ضخامت 6 میلی‌متر می‌باشد. در کامپوزیت‌های با ضخامت 6 میلی‌متر به علت برخورداری از صلبیت بالاتر، نتایج مطلوب‌تری بدست آمد. همچنین میزان خطای پیش‌بینی شده در مقایسه با مقادیر تجربی بدست آمده برای پارامترهای زبری سطح، نرخ براده برداری و میزان انحراف به ترتیب 6%، -5.22% و 2.5% محاسبه گردید که نشان دهنده توافق مطلوب نتایج تجربی و تحلیل آماری می‌باشد.

اطلاعات مقاله:

دریافت: 99/04/23
 پذیرش: 99/10/03
کلیدواژگان
 ماشین کاری سریع
 کامپوزیت جدار نازک
 زبری سطح
 نرخ براده برداری
 انحراف

Study of the surface roughness, material removal rate and deflection in thin-walled composite structures during the high speed machining process

Maryam Razifar¹, Payam Saraeian^{2*}, Ehsan Shakouri³, Adel Maghsoud Pour¹

- 1- Department of Mechanical Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
 2- Department of Mechanical Engineering, Najaf Abad Branch, Islamic Azad University, Najaf Abad, Iran.
 3- Department of Mechanical Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
 * P.O.B. 8514143131, Najaf Abad, Iran, P_saraeian@iau-tmb.ac.ir.

Keywords

High Speed Machining
 Thin-walled Composite
 Surface roughness
 Material removal rate (MRR)
 Deflection

Abstract

Nowadays, due to the need of composite structures with thin walls in industry and due to low weight ratio to high strength, has received more consideration than before. Composite laminates are cause of more problems and damages in machining process. This problems are especially in thin wall composite structures. One of the best ways for preventing damage during machining process in thin wall composite structures is use of machining process with high speed. In this study effect of milling parameters in high speed on surface roughness, material removal rate, and deflection in thin wall composite structures was studied. For this purpose, firstly were made samples of glass- epoxy composite with thicknesses 2mm, 4mm and 6mm and then milling process with high speed and changing spindle speed, feed rate, and cutting depth was done. To get test results using an experimental design. Comparison of the optimization results on composites with different thicknesses by the response surface methodology, showed that the optimal values of surface roughness 2.12 μm and material removal rate 5.99 mm^3/min and deflection of 0.082 mm is for the sample with a thickness 6 mm. In composites with a thickness 6 mm due to higher rigidity, better results were obtained. Also, the predicted error rate was calculated in comparison with the experimental values obtained for the surface roughness parameters, material removal rate and deflection rate 6%, -5.22% and 2.5%, respectively, which indicates the favorable agreement between the experimental results and statistical analysis.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:
 Razifar, M. Saraeian, P. Shakouri, E. and Maghsoud Pour, A., "Study of the surface roughness, material removal rate and deflection in thin-walled composite structures during the high speed machining process", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 7, No. 3, pp. 1083-1094, 2020.

1- مقدمه

سابقه استفاده از کامپوزیت‌ها به گذشته‌های دور و مصر باستان مربوط می‌شود، در حالیکه تجاری‌سازی این محصول از اوایل قرن نوزدهم و با افزودن الیاف سلولز به عنوان تقویت‌کننده به رزین فنولیک و سرانجام تولید ملامین آغاز گردید [1]. امروزه کامپوزیت‌ها به دلیل برخورداری از خواص مکانیکی مطلوبی نظیر نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت در برابر خوردگی و خستگی، وجود روش‌های متنوع ساخت و همچنین امکان تولید در شکل‌های متنوع، در صنایع گوناگون از جمله هوا فضا و خودروسازی، جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده‌اند [2]. به‌کارگیری این قطعات در تولید محصولات مختلف و تطبیق و اتصال مکانیکی آنها به یکدیگر، مستلزم استفاده از فرآیندهای مختلف ماشین‌کاری می‌باشد. در حالی‌که، ساختار مرکب و لایه‌ای کامپوزیت‌ها و نوع الیاف و رزین بکار رفته در آنها، سبب پیچیدگی فرآیند ماشین‌کاری در این دسته از مواد شده است [3, 4].

انجام فرآیند فرزکاری روی قطعات کامپوزیتی، با توجه به تمایل این نوع مواد به جدایش لایه‌هایشان تحت نیروهای برشی، همواره با مشکلاتی نظیر ایجاد پلیسه، زبری سطح، ترک خوردگی ماتریس، خروج الیاف و باقی ماندن الیاف برش نخورده همراه بوده است [5, 6]. در میان فرآیندهای مختلف ماشین‌کاری، استفاده از روش ماشین‌کاری سرعت بالا علاوه بر کاهش پلیسه و بهبود کیفیت سطح، کاهش آسیب‌های حرارتی وارد شده به قطعه‌کار را نیز سبب می‌شود [7, 8]. یکی دیگر از مشکلات انجام عملیات ماشین‌کاری روی قطعات جدار نازک، ایجاد ارتعاش چتر¹ و کاهش کیفیت سطح ناشی از آن است. رخداد ارتعاش چتر طی ماشین‌کاری قطعات انعطاف‌پذیر با جدار نازک، بسیار محتمل بوده و این پدیده غالباً تحت تأثیر شرایط برش و موقعیت ابزار نسبت به قطعه جدار نازک می‌باشد. همچنین، صلبیت پایین قطعات طی نازک نیز سبب ایجاد لرزش و کاهش کیفیت سطح این قطعات طی فرآیندهای مختلف ماشین‌کاری می‌شود. بنابراین، با توجه به دشواری‌های موجود در ماشین‌کاری قطعات با جدار نازک، استفاده از روش ماشین‌کاری با سرعت بالا به عنوان راهکاری مناسب جهت دستیابی به شرایط بهینه ماشین‌کاری در این دسته از مواد معرفی شده است [9, 10].

ها و همکاران در سال 2017، به بررسی تأثیر استفاده از سرعت‌های بالا بر نیروی برشی و حرارت ایجاد شده طی فرزکاری پلاستیک تقویت شده با الیاف کربن پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از سرعت‌های برشی بالا تا مقدار مشخصی، کاهش نیروی برشی را به همراه دارد، در حالیکه ادامه روند افزایش سرعت برشی، تغییر چندانی در نیروی برشی ایجاد نمی‌کند که علت آن، افزایش حرارت در موضع ماشین‌کاری، نرم شدن رزین اپوکسی² و در پی آن کاهش مقاومت قطعه در برابر تغییر شکل عنوان شده است [11].

کلیک و همکاران در سال 2019، تأثیر هندسه ابزار و پارامترهای فرآیند فرزکاری بر نیروی برشی و زبری سطح پلیمر تقویت شده با الیاف را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش تعداد لبه برنده ابزار برشی، کاهش زبری سطح و جدایش لایه‌ها را در بر داشته و افزایش نرخ پیشروی با افزایش نیروی برشی و کاهش زمان لازم برای برش الیاف، افزایش زبری سطح قطعات را در پی داشت [12].

پراسانت و همکاران در سال 2018، به بررسی تأثیر پارامترهای سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی، عمق برش و جنس ابزار بر نیروهای ماشین‌کاری و

زبری سطح نمونه‌های پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه با استفاده از طراحی آزمایش به روش تاگوچی پرداختند. نتایج نشان داد که پس از جنس ابزار، سرعت اسپیندل مؤثرترین پارامتر بر کنترل نیروهای ماشین‌کاری و زبری سطح نمونه‌ها بوده است [13].

پردانا و همکاران در سال 2019، به بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند فرزکاری بر زبری سطح و جدایش لایه‌ها، در کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن پرداختند. آزمایش‌ها به روش فاکتوریل کامل انجام شد و نتایج حاصل از بهینه‌سازی انجام شده با استفاده از شبکه عصبی پس انتشار، نشان دهنده موفقیت شبکه عصبی طراحی شده در پیش‌بینی زبری سطح و جدایش لایه‌ها با میانگین مربعات خطا 2.49% بود [14].

اندجین و همکاران در سال 2020، به مدل‌سازی و بررسی زبری سطح طی فرزکاری پلی‌کربنات پرداختند. نتایج نشان داد که عمق برش، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر زبری سطح نمونه‌ها نداشته و نرخ پیشروی و جنس ابزار، مؤثرترین پارامترها بر فرآیند بوده است، بطوریکه افزایش نرخ پیشروی، افزایش زبری سطح نمونه‌ها را به دنبال داشت [15].

مطالعه مقالات موجود در زمینه ماشین‌کاری انواع کامپوزیت‌ها نشان داد که تحقیقات گسترده‌ای پیرامون بررسی تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری سرعت بالا، شرایط مختلف ماشین‌کاری و تأثیر هندسه ابزار بر مواردی نظیر گشتاور، نیروی برشی و جدایش لایه‌های قطعات کامپوزیتی انجام شده است. با توجه به اهمیت استحکام و سبک‌سازی سازه‌ها و کاربرد گسترده کامپوزیت‌های جدار نازک در صنایع مختلف، دستیابی به کیفیت سطح و دقت ابعادی در محصولات ساخته شده از این دسته از مواد می‌تواند در بهبود کارایی و گسترش استفاده از آنها در صنایع تأثیرگذار باشد. بنابراین، با توجه به ساختار کامپوزیت‌های جدار نازک و اهمیت کاهش نیروهای ماشین‌کاری در بهبود کیفیت سطح نهایی، استفاده از روش ماشین‌کاری سرعت بالا به عنوان راهکاری مناسب جهت کاهش آسیب‌ها طی ماشین‌کاری این دسته از مواد معرفی شده است. در این راستا، پژوهش‌های بسیاری پیرامون بهینه‌سازی فرآیندهای ماشین‌کاری و بررسی اعوجاج، ارتعاش و انحراف ایجاد شده در قطعات جدار نازکی که عمدتاً از کامپوزیت‌های زمینه فلزی و آلیاژهای فلزی مختلف ساخته شده‌اند انجام گرفته است. در حالی‌که، در ارتباط با تأثیر پارامترهای فرآیند فرزکاری سرعت بالا بر روی قطعات کامپوزیتی زمینه پلیمری با جدار نازک، موردی یافت نشد. در این مطالعه، با هدف بهبود کیفیت سطوح فرزکاری شده، به بررسی تأثیر پارامترهای سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی و عمق برش بر زبری سطح، نرخ براده برداری و انحراف ایجاد شده در قطعات کامپوزیتی با جدار نازک پرداخته شده و در نهایت پس از تجزیه و تحلیل آماری نتایج، شرایط مطلوب جهت فرزکاری قطعات با جدار نازک بیان شده است.

2- روش تجربی

در این پژوهش، ابتدا نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از رزین اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه به روش کیسه خلاء با اوتوکلاو ساخته شدند. جهت ساخت نمونه‌ها از صفحات پیش‌آغشته³ استفاده شده است. این صفحات پیش‌آغشته، حاوی الیاف شیشه تک جهته 1200 گرم بر متر مربع و آغشته به رزین اپوکسی امپرگ⁴ و هاردنر با 32% وزنی می‌باشند. اپوکسی رزین و

³ Prepreg
⁴ Impreg

¹ Chatter
² Epoxy

به منظور بررسی تأثیر پارامترهای سرعت اسپیندل، نرخ پیشروی، عمق برش و ضخامت نمونه‌ها، بر زبری سطح، نرخ براده برداری و انحراف ایجاد شده در قطعات کامپوزیتی جدار نازک، طی جدول 2، به معرفی پارامترها و سطوح آنها در ارائه گردیده است. پارامترها و سطوح آزمایش، با استفاده از مطالعه پیشینه پژوهش‌های انجام شده، انتخاب گردیده است [7, 17].

به این ترتیب با استفاده از روش عاملی کامل، 81 آزمایش قابل انجام می‌باشد که به منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها و بهره‌مندی از تحلیل آماری، از نرم‌افزار آماری مینی‌تیب 17⁵ و روش سطح پاسخ⁶ بهره گرفته شده است. بنابراین طی طراحی انجام شده به روش طراحی مرکب مرکزی⁷، تعداد کل آزمایش‌ها مطابق جدول 3، به 31 عدد کاهش یافت.

جدول 2 پارامترها و سطوح انتخابی فرآیند

پارامترها	نماد	سطح 1	سطح 2	سطح 3
سرعت اسپیندل (rpm)	(X ₁)	2000	10000	18000
نرخ پیشروی (mm/min)	(X ₂)	1200	2600	4000
عمق برش (mm)	(X ₃)	0.4	0.6	0.8
ضخامت قطعات (mm)	(X ₄)	2	4	6

جدول 3 طراحی آزمایش

Table 3 Experiments Design table

NO	Spindle Speed (X ₁) (rpm)	Feed Rate (X ₂) (mm/min)	Cutting depth (X ₃) (mm)	Thickness(X ₄) (mm)
1	18000	4000	0.8	2
2	2000	1200	0.8	6
3	18000	1200	0.4	2
4	2000	1200	0.8	2
5	2000	1200	0.4	6
6	2000	4000	0.8	6
7	18000	1200	0.8	6
8	18000	1200	0.8	2
9	10000	2600	0.6	4
10	2000	4000	0.8	2
11	10000	2600	0.6	6
12	10000	2600	0.6	4
13	10000	2600	0.6	4
14	10000	2600	0.6	4
15	18000	4000	0.8	6
16	10000	2600	0.6	4
17	10000	1200	0.6	4
18	10000	2600	0.6	2
19	18000	4000	0.4	2
20	10000	4000	0.6	4
21	10000	2600	0.6	4
22	10000	2600	0.8	4
23	18000	2600	0.6	4
24	2000	4000	0.4	6
25	10000	2600	0.4	4
26	10000	2600	0.6	4
27	2000	2600	0.6	4
28	18000	4000	0.4	6
29	18000	1200	0.4	6
30	2000	4000	0.4	2
31	2000	1200	0.4	2

اپوکسی هاردنر بکار رفته در ساخت صفحات پیش‌آغشته بترتیب، LY 556 و HY951 می‌باشند که به نسبت نه به یک و کسر حجمی 60 با یکدیگر ترکیب شده‌اند ساخت نمونه‌های مورد آزمایش در سه ضخامت دو، چهار و شش میلی‌متری انجام شده است. بنحوی که برای ساخت نمونه با ضخامت دو میلی‌متر، از سه لایه و برای ساخت نمونه با ضخامت چهار و شش میلی‌متر، بترتیب از شش و نه لایه استفاده شد. مشخصات فنی رزین و الیاف بکار رفته در جدول 1 آمده است.

به منظور ساخت نمونه‌ها به روش کیسه خلاء با اوتوکلاو، ابتدا صفحات پیش‌آغشته، در ابعاد 65*65 سانتی‌متر مربع برش زده شد و سپس صفحات برش خورده به صورت یک در میان با زاویه صفر و نود درجه لایه چینی شدند. در این مرحله، از یک لایه داکرون¹ با وزن واحد سطح 85 گرم بر مترمربع استفاده شد. سپس جهت جذب رزین اضافی، از یک لایه نمودی به نام بریدر² با وزن واحد سطح 400 گرم بر متر مربع استفاده شد و جهت اعمال خلاء، یک لایه پلاستیکی³ با ضخامت 50 میکرون، روی کل سطح کشیده شد و به کمک خمیر آب‌بندی، دور تا دور سطح درزبندی گردید. در شکل 1، شماتیک فرآیند ساخت کامپوزیت نشان داده شده است. در نهایت نیز پس از مراحل آماده‌سازی، فرآیند پخت نمونه‌ها به مدت 230 دقیقه در دمای 120 درجه سانتی‌گراد و با اعمال فشار 0.88- بار انجام گردید.

سپس صفحه کامپوزیتی ساخته شده، توسط دستگاه واترجت مدل دلتا، در ابعاد 80*150 برش زده شد و باین ترتیب، نمونه‌ها برای انجام آزمایش آماده سازی گردید. در ادامه، به منظور امکان محاسبه نرخ براده‌برداری، قطعات توسط ترازوی دیجیتال کرن⁴ با دقت 0.0001 گرم مورد توزین قرار گرفتند و ضخامت قطعات نیز توسط میکرومتر با دقت 0.01 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. جهت اطمینان از درستی مقادیر، هر اندازه‌گیری سه بار تکرار شده است.

جدول 1 مشخصات فنی رزین و الیاف [16]

ماده	مدول یانگ (GPa)	نسبت پواسون	مدول برشی (GPa)	استحکام کششی (MPa)
الیاف شیشه	73	0.25	29	1310
رزین اپوکسی	4.2	0.35	32	80

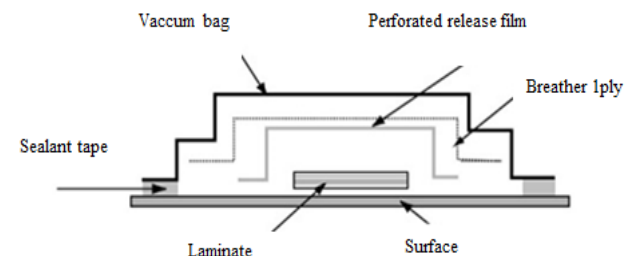


Fig. 1 Schematic vacuum bag process

شکل 1 شماتیک فرآیند ساخت کامپوزیت به روش خلاء

¹ Docron
² Breather
³ Vacuum bag
⁴ Kern

⁵ Minitab 17

⁶ Response surface methodology (RSM)

⁷ Central composite design(CCD)

نرخ براده برداری نیز با محاسبه حجم براده حذف شده به زمان ماشین کاری محاسبه گردید. به این ترتیب که، جرم براده برداشته شده در هر حالت فرآیندی، با محاسبه اختلاف وزن نمونه قبل و بعد از فرزکاری محاسبه شد و زمان ماشین کاری نمونه نیز طی فرآیند فرزکاری نمونه از ابتدا تا انتهای طول آن، توسط کرنومتر اندازه گیری شده است.

همچنین به منظور محاسبه انحراف ایجاد شده در نمونه‌ها، اختلاف ضخامت ناحیه فرزکاری شده در قسمت لبه بالایی قطعه کار و قسمت پائینی آن توسط میکرومتر مورد اندازه گیری قرار گرفت. در شکل 3 شماتیک انحراف ایجاد شده طی فرزکاری قطعات با جدار نازک نشان داده شده است.

در نهایت نیز زبری سطح نمونه‌ها نیز توسط زبری سنج ماهر² طی استاندارد دین (DIN EN ISO 11562) اندازه گیری شد و نتایج ثبت گردید. جهت اطمینان از صحت نتایج، هر آزمون سه بار تکرار شده و از میانگین مقادیر جهت تحلیل نتایج بهره گرفته شده است. در شکل 4، نمایی از قطعات کامپوزیتی فرزکاری شده نشان داده شده است. طی جدول 6، مقادیر اندازه گیری شده برای کمیت‌های مورد بررسی ارائه شده است.

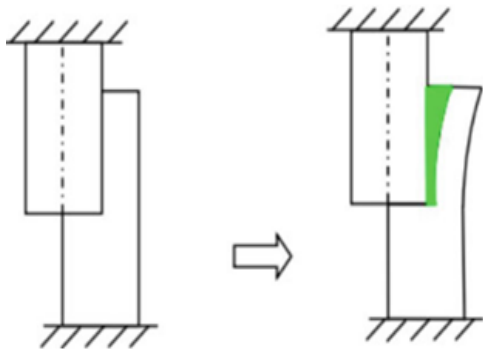


Fig. 3 Schematic deflection created during milling thin walled parts[18]

شکل 3 شماتیک انحراف ایجاد شده در قطعه جدار نازک طی فرآیند فرزکاری [18]



Fig. 4 View of milled composite samples

شکل 4 نمایی از نمونه‌های کامپوزیتی فرزکاری شده

سپس عملیات فرزکاری روی قطعات، مطابق با جدول طراحی آزمایش، توسط ماشین فرز سی ان سی ساخت شرکت دی‌ام‌جی¹ ژاپن انجام گردید. مشخصات فنی ماشین در جدول 4 ارائه شده است.

انجام فرآیند فرزکاری در تمام قطعات با جهت یکسان، در راستای طول آنها، و با عمق محوری 10 میلی‌متر، انجام گردید. در شکل 2، شماتیک موقعیت ابزار و نمونه نسبت به یکدیگر نشان داده شده است. در این پژوهش، از ابزار فرز انگشتی با چهار لبه برنده از جنس فولاد تندبر (HSS) استفاده شده است. مشخصات فرز انگشتی نیز در جدول 5 بیان شده است.

جدول 4 مشخصات فنی ماشین فرز CNC

Table 4 CNC milling machine specifications

ماشین فرز DMG	
18000 (rev/min)	حداکثر دور اسپیندل
1200 (mm)	دسترسی در راستای محور X
635 (mm)	دسترسی در راستای محور Y
610 (mm)	دسترسی در راستای محور Z
3000 (mm/min)	بیشترین نرخ پیشروی قابل حصول
5.5 (kw)	توان ماشین

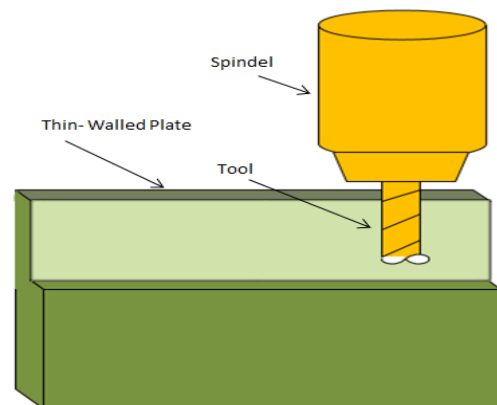


Fig. 2 Tool and work piece location

شکل 2 نمایی از موقعیت ابزار و قطعه کار

جدول 5 مشخصات فنی ابزار

Table 5 Tool technical specifications

مشخصات ابزار برشی	
HSS	جنس
12 میلی‌متر	قطر ابزار
4	تعداد لبه برنده
30°	زاویه مارپیچ
83 میلی‌متر	طول ابزار
26 میلی‌متر	طول ناحیه برنده
12°	زاویه براده

² Mahr

¹ DMG

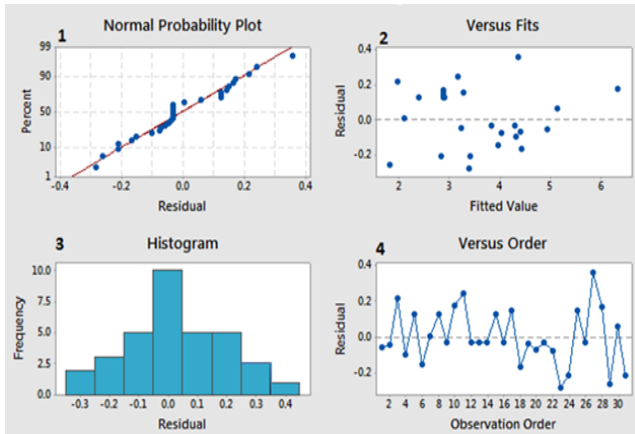


Fig. 5 Plots of the residuals for surface roughness

شکل 5 نمودار باقیمانده‌ها برای زبری سطح

جدول 7 آنالیز واریانس برای زبری سطح

Table 7 Analysis of variance for surface roughness (μm)

Source	Degrees of freedom	Adjusted sum of squares	Adjusted mean of squares	F-value	P-value
model	14	26.05	1.861	87.17	0.000
Linear	4	22.26	5.565	260.70	0.000
X_1	1	3.546	3.546	166.13	0.000
X_2	1	9.930	9.930	465.18	0.000
X_3	1	2.184	2.184	102.30	0.000
X_4	1	6.600	6.600	309.18	0.000
Square	4	0.667	0.166	7.82	0.001
X_1^2	1	0.017	0.017	0.82	0.378
X_2^2	1	0.045	0.045	2.13	0.164
X_3^2	1	0.045	0.045	2.13	0.164
X_4^2	1	0.001	0.001	0.06	0.806
Interaction	6	3.124	0.520	24.39	0.000
$X_1 * X_2$	1	0.005	0.005	0.25	0.627
$X_1 * X_3$	1	0.445	0.445	20.87	0.000
$X_1 * X_4$	1	0.170	0.170	7.97	0.012
$X_2 * X_3$	1	0.033	0.033	1.56	0.230
$X_2 * X_4$	1	1.911	1.911	89.53	0.000
$X_3 * X_4$	1	0.558	0.558	26.17	0.000
Error	16	0.341	0.021	-	-
Lack of Fit	10	0.034	0.034	46.07	0.002
Total	30	26.396	-	-	-

در این آنالیز، مقایسه انحراف کل نمونه‌ها با استفاده از آزمون F و تعیین سطوح معنادار نیز با استفاده از مقدار P-Value انجام شده است. از آنجایی که پارامترها با سطح اطمینان 95% مدل شده‌اند، بنابراین مقادیر کمتر از 0.05 برای P، به عنوان مقادیر معنادار در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در جدول 6 مشاهده می‌شود، مقدار P-Value برای مدل رگرسیون و برخی از دیگر جملات، کوچک‌تر از سطح معنادار 0.05 است که نشان می‌دهد که این پیش‌بینی‌کننده‌ها، تأثیر قابل توجهی بر جواب داشته‌اند. همچنین ضریب انطباق یا سازگاری مدل R^2_{adj} یا R^2 منطبق شده نیز برای زبری سطح نمونه‌ها 97.57% بدست آمد که به این معنا است که در حدود 98% از داده‌ها توسط مدل پوشش داده شده است. همچنین، مقدار P-Value برای کمبودهایی که ممکن است در سازگاری وجود داشته باشند (Lack of Fit)، کوچک‌تر از سطح معنادار 0.05 است که نشان دهنده سازگاری مدل ریاضی می‌باشد.

جدول 6 مقادیر مربوط به کمیت‌های اندازه‌گیری شده

Table 6 Values for measured quantities

NO	X_1 (rpm)	X_2 (mm/min)	X_3 (mm)	X_4 (mm)	Surface roughness (μm)	Deflection (mm)	MRR (mm)
1	18000	4000	0.8	2	4.89	0.32	1.75
2	2000	1200	0.8	6	3.19	0.40	2.37
3	18000	1200	0.4	2	2.19	0.35	1.02
4	2000	1200	0.8	2	4.23	0.49	0.32
5	2000	1200	0.4	6	2.51	0.24	1.61
6	2000	4000	0.8	6	3.82	0.48	4.47
7	18000	1200	0.8	6	2.12	0.14	6.42
8	18000	1200	0.8	2	3.03	0.28	2.68
9	10000	2600	0.6	4	3.81	0.35	3.70
10	2000	4000	0.8	2	6.51	0.57	1.67
11	10000	2600	0.6	6	3.42	0.26	5.32
12	10000	2600	0.6	4	3.81	0.35	3.70
13	10000	2600	0.6	4	3.81	0.35	3.70
14	10000	2600	0.6	4	3.81	0.35	3.70
15	18000	4000	0.8	6	3.01	0.15	6.71
16	10000	2600	0.6	4	3.81	0.35	3.70
17	10000	1200	0.6	4	3.03	0.32	2.89
18	10000	2600	0.6	2	4.27	0.47	1.32
19	18000	4000	0.4	2	4.27	0.39	1.52
20	10000	4000	0.6	4	4.35	0.42	4.97
21	10000	2600	0.6	4	3.81	0.35	3.70
22	10000	2600	0.8	4	3.95	0.39	4.10
23	18000	2600	0.6	4	3.11	0.22	4.65
24	2000	4000	0.4	6	3.20	0.39	4.32
25	10000	2600	0.4	4	3.43	0.31	3.12
26	10000	2600	0.6	4	3.81	0.35	3.70
27	2000	2600	0.6	4	4.37	0.41	2.54
28	18000	4000	0.4	6	3.05	0.17	7.02
29	18000	1200	0.4	6	2.00	0.08	6.32
30	2000	4000	0.4	2	5.20	0.53	1.32
31	2000	1200	0.4	2	2.63	0.45	0.18

3- نتایج و بحث

در این پژوهش، با هدف بهبود کیفیت سطوح قطعات جدار نازک ماشین کاری شده طی فرآیند فرزکاری با سرعت بالا، به تحلیل و بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند بر انحراف، نرخ براده برداری و زبری سطح قطعات پرداخته شده و در نهایت نیز، طی تحلیل آماری انجام شده، شرایط مطلوب جهت فرزکاری قطعات با جدار نازک گزارش شده است.

3-1- بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند بر زبری سطح نمونه‌ها

پس از انجام عملیات فرزکاری مطابق با جدول طراحی آزمایش و اندازه‌گیری مقادیر مربوط به زبری سطح نمونه‌ها در هر حالت فرآیندی، مطابق با روش و استاندارد ذکر شده، به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند بر زبری سطح نمونه‌ها و تعیین اهمیت نسبی پارامترها، از آنالیز واریانس بهره گرفته شد. به این منظور، پس از طراحی مدل، ابتدا مطابق شکل 5، به بررسی کفایت مدل پرداخته شده و سپس طی جدول 7، آنالیز واریانس برای زبری سطح نمونه‌ها، ارائه گردیده است.

طبق نمودارهای ارائه شده در شکل 5، مشاهده می‌شود که در نمودار شماره 1، نقاط با فاصله مناسبی نسبت به خط رسم شده قرار گرفته‌اند که نشان دهنده نرمال بودن مقادیر می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که در نمودار شماره 2 که مربوط به باقی‌مانده‌ها است، مقادیر از روند خاصی تبعیت نمی‌کنند، بنابراین می‌توان گفت، مقدار واریانس بین داده‌ها ثابت است. در نمودار شماره 3 (هیستوگرام)، شکل نمودار حالت گاوسی دارد که نشان می‌دهد، داده‌ها از یک جمعیت نرمال به دست آمده‌اند و در نمودار شماره 4 مشاهده می‌شود که عوامل مستقل از زمان بوده و تغییرات آن از روند خاصی پیروی نمی‌کند که نشان دهنده کفایت مدل ریاضی استفاده شده می‌باشد.

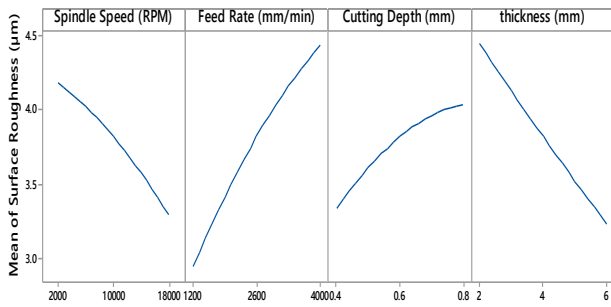


fig. 7 Main effects of parameters on surface roughness (µm)

شکل 7 نمودار تأثیرات اصلی پارامترها بر زبری سطح

در ادامه، طی شکل‌های 8، 9 و 10 به بررسی تأثیر تعاملی پارامترهای فرآیند بر زبری سطح نمونه‌ها پرداخته شده است. در شکل 8، تأثیر تعاملی پارامترهای نرخ پیشروی و سرعت اسپیندل بر زبری سطح قطعات ارائه شده است، همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش نرخ پیشروی توأم با کاهش سرعت اسپیندل، افزایش زبری سطح نمونه‌ها را در پی داشته است. زیرا، همان‌طور که در برخی از منابع به آن اشاره شده، با افزایش نرخ پیشروی، میزان تماس ابزار و نمونه در واحد زمان افزایش می‌یابد که متعاقب آن افزایش اصطکاک، نیروهای ماشین کاری و در نهایت افزایش ارتعاش و زبری سطح نمونه را به همراه دارد [7، 19]. این در حالی است که با افزایش سرعت اسپیندل، زبری سطح نمونه‌ها کاهش یافته که مطابق با مقالات مطالعه شده در این زمینه، دلیل آن را می‌توان به تسهیل تغییر شکل پلاستیک در نمونه با افزایش حرارت در سرعت‌های بالاتر نسبت داد که با کاهش اصطکاک و نیروهای ماشین کاری، کاهش زبری سطح نمونه را سبب می‌شود [20، 21]. همان‌طور که در شکل 9، مشاهده می‌شود، کاهش توأم ضخامت نمونه‌ها و سرعت اسپیندل نیز افزایش زبری سطح نمونه‌ها را به دنبال داشته است. زیرا، مطابق با مقالات مطالعه شده در این زمینه، طی ماشین کاری قطعات با جدار نازک، ایجاد ارتعاش و لرزش به دلیل انعطاف‌پذیری و صلیبیت پایین قطعات با جدار نازک توأم با افزایش نیروهای ماشین کاری به ازای استفاده از سرعت‌های پایین‌تر، افزایش زبری سطح قطعات را سبب می‌شود [17].

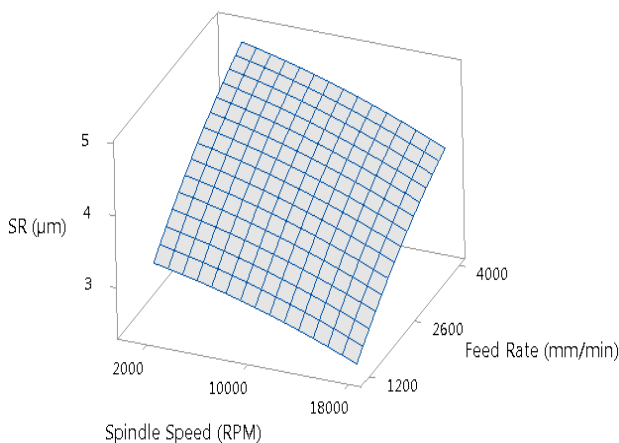


Fig. 8 Surface roughness versus feed rate and spindle speed of samples (thickness 4 mm, cutting depth 0.6 mm)

شکل 8 تغییرات زبری سطح بر حسب سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی (ضخامت 4 mm و عمق برش 0.6 mm)

معادله عمومی رگرسیون برای زبری سطح نمونه‌ها، در قالب معادله (1)، ارائه شده است.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 + \beta_{33} X_3^2 + \beta_{44} X_4^2 + \beta_{21} X_1 * X_2 + \beta_{31} X_1 * X_3 + \beta_{41} X_1 * X_4 + \beta_{32} X_2 * X_3 + \beta_{42} X_2 * X_4 + \beta_{43} X_3 * X_4 \quad (1)$$

در این معادله β_0 ثابت سطح پاسخ، β_1 و β_2 و β_3 ضرایب خطی متغیرها و β_{11} و β_{22} و β_{33} و β_{44} ضرایب جملات مربعی و β_{21} و β_{32} و... ضرایب تعامل متغیرهای خطی هستند. به این ترتیب، معادله رگرسیون برای زبری سطح نمونه‌ها، طی معادله (2) ارائه گردیده است.

$$\text{Surface Roughness } (\mu\text{m}) = -1.597 + 0.000011 X_1 + 0.001489 X_2 + 9.05 X_3 + 0.189 X_4 - 3.31 X_3^2 + 0.0057 X_4^2 - 0.000104 X_1 * X_3 + 0.000006 X_1 * X_4 - 0.000163 X_2 * X_3 - 0.000123 X_2 * X_4 - 0.4672 X_3 * X_4 \quad (2)$$

همچنین به منظور مقایسه مقادیر زبری سطح بدست آمده، طی مدل طراحی شده به روش سطح پاسخ و مقادیر حاصل از آزمایش‌های انجام شده، نمودار زبری سطح بر حسب ترتیب و نظم آزمایش‌ها، طی شکل 6 ارائه شده است. جهت بررسی درصد خطا و مقایسه دقت مقادیر بدست آمده برای زبری سطح طی دو روش سطح پاسخ و روش تجربی، مقدار خطا برای بیشترین خطای ایجاد شده در اندازه‌گیری زبری سطح نمونه‌ها، طی جدول 8 ارائه شده است. مقدار گزارش شده، نشان دهنده سازگاری و دقت پیش‌بینی مدل می‌باشد.

جهت تعیین مؤثرترین پارامتر بر فرآیند، نمودار مقادیر میانگین سازگار شده بر حسب زبری سطح، ترسیم گردید. همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود، بعد از نرخ پیشروی، ضخامت نمونه‌ها و سرعت دوران اسپیندل، به ترتیب بیشترین تأثیر را بر کنترل زبری سطح نمونه‌ها داشته اند.

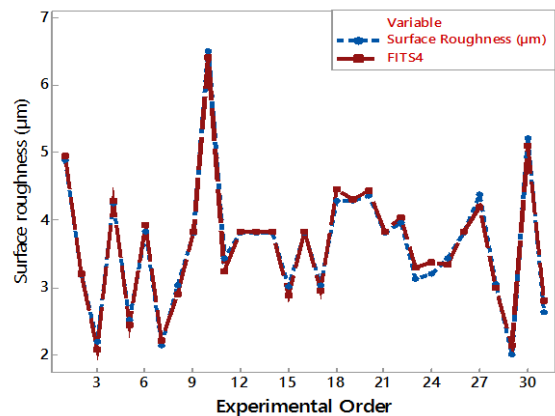


Fig. 6 Comparison of RSM and experimental values of surface roughness (µm)

شکل 6 مقایسه مقادیر زبری سطح طی دو روش تجربی و سطح پاسخ

جدول 8 محاسبه درصد خطا برای زبری سطح طی دو روش تجربی و سطح پاسخ

Table 8 Calculation error percentage for surface roughness, by response surface methodology and experimental method

No	X_1 (RPM)	X_2 (mm/min)	X_3 (mm)	X_4 (mm)	SR (µm)	RSM	Error (%)
23	18000	2600	0.6	4	3.11	3.28	5.46

جدول 9 آنالیز واریانس برای نرخ براده برداری

Source	Degrees of freedom	Adjusted sum of squares	Adjusted mean of squares	F-value	P-value
model	14	100.21	7.15	72.72	0.000
Linear	4	86.77	21.69	220.37	0.000
X ₁	1	20.672	20.6725	210.00	0.000
X ₂	1	5.489	5.4891	55.76	0.000
X ₃	1	0.916	0.915	9.30	0.008
X ₄	1	59.696	59.6960	606.43	0.002
Square	4	2.70	0.67	6.87	0.000
X ₁ ²	1	0.079	0.078	0.80	0.385
X ₂ ²	1	0.067	0.067	0.68	0.421
X ₃ ²	1	0.066	0.065	0.67	0.426
X ₄ ²	1	0.52	0.52	5.31	0.035
Interaction	6	10.78	1.78	18.18	0.000
X ₁ * X ₂	1	2.38	2.83	28.84	0.000
X ₁ * X ₃	1	0.005	0.004	0.05	0.826
X ₁ * X ₄	1	6.52	6.52	66.32	0.000
X ₂ * X ₃	1	0.31	0.31	3.19	0.093
X ₂ * X ₄	1	0.87	0.87	8.88	0.009
X ₃ * X ₄	1	0.17	0.17	1.76	0.199
Error	16	1.575	0.098	-	-
Lack-of-fit	10	1.575	0.157	-	-
Total	30	101.790	-	-	-

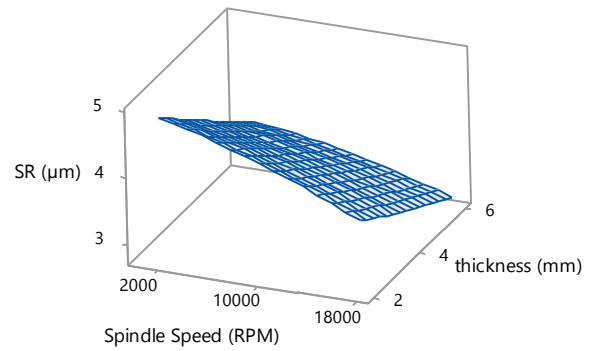


Fig. 9 Surface roughness versus thickness and spindle speed of samples (cutting depth 0.6 mm, feed rate 2600 mm/min)

شکل 9 تغییرات زبری سطح بر حسب سرعت اسپیندل و ضخامت قطعات (عمق برش 0.6 mm و نرخ پیشروی 2600 mm/min)

همچنین ضریب انطباق یا سازگاری مدل نیز برای نرخ براده برداری در حدود 97% بدست آمد که به این معنا است که داده‌ها توسط مدل پوشش داده شده است.

به این ترتیب، معادله رگرسیون برای نرخ براده برداری، طی معادله (3) ارائه گردیده است.

$$\begin{aligned} \text{MRR (mm}^3/\text{min)} = & -5.75 + 0.000120 X_1 + 0.000309 X_2 \quad (3) \\ & + 8.14 X_3 + 1.350 X_4 - 3.97 X_3^2 - 0.1122 X_4^2 \\ & + 0.000011 X_1 * X_3 + 0.000040 X_1 * X_4 - 0.000500 X_2 * X_3 \\ & + 0.000083 X_2 * X_4 - 0.262 X_3 * X_4 \end{aligned}$$

در ادامه، به منظور مقایسه مقادیر بدست آمده برای نرخ براده برداری، طی مدل طراحی شده به روش سطح پاسخ و مقادیر حاصل از آزمایش‌های انجام شده، نمودار نرخ براده برداری بر حسب ترتیب و نظم آزمایش‌ها، طی شکل 11، ارائه شده است.

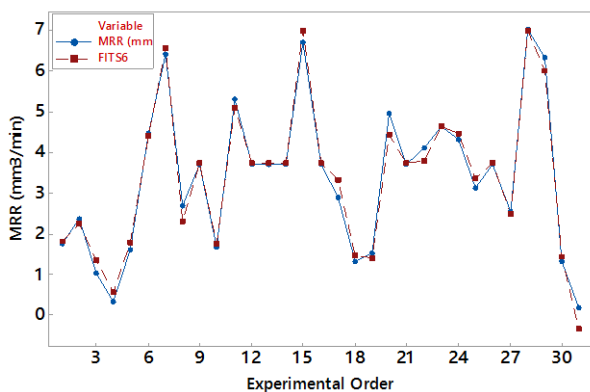


Fig. 11 Comparison of RSM and experimental values of material removal rate (cm³/min)

شکل 11 مقایسه مقادیر نرخ براده برداری طی روش سطح پاسخ و روش تجربی همچنین جهت بررسی درصد خطا و مقایسه مقادیر بدست آمده برای نرخ براده برداری طی دو روش سطح پاسخ و روش تجربی، مقدار خطا برای

در شکل 10، تأثیر تعاملی پارامترهای عمق برش و سرعت اسپیندل بر زبری سطح قطعات ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش عمق برش توأم با کاهش سرعت اسپیندل، افزایش زبری سطح قطعات را در پی داشته است. زیرا با افزایش عمق برش، میزان درگیری لبه برنده ابزار با سطح قطعه کار افزایش می‌یابد که افزایش ارتعاش و لرزش نمونه را سبب می‌شود و کاهش توأم سرعت اسپیندل نیز به سبب افزایش نیروهای ماشین کاری افزایش زبری سطح قطعات را به دنبال دارد که در برخی از منابع به آن اشاره شده است [22].

2-3- تأثیر پارامترهای فرآیند بر نرخ براده برداری

به منظور بررسی تغییرات نرخ براده برداری در هر حالت فرآیندی، پس از بررسی کیفیت مدل طراحی شده طی مواردی نظیر نرمال بودن مقادیر، فرض ثابت بودن واریانس‌ها، نمودار هیستوگرام و نمودار مستقل از زمان، آنالیز واریانس برای نرخ براده برداری، طی جدول 9، ارائه گردید. از آنجایی که در این آنالیز پارامترها با سطح اطمینان 95% مدل شده‌اند، بنابراین مقادیر کمتر از 0.05 برای P، به عنوان مقادیر معنادار در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در جدول 9 مشاهده می‌شود، مقدار P-Value برای مدل رگرسیون و برخی از دیگر جملات، کوچک‌تر از سطح معنادار 0.05 است که نشان می‌دهد که این پیش‌بینی کننده‌ها، تأثیر قابل توجهی بر جواب داشته‌اند.

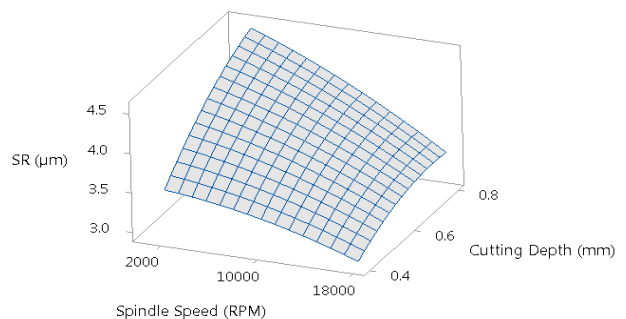


Fig. 10 Surface roughness versus feed rate and spindle speed of samples (thickness 4 mm, feed rate 2600 mm/min)

شکل 10 تغییرات زبری سطح بر حسب سرعت دورران و عمق برش (ضخامت قطعات 4mm و نرخ پیشروی 2600 mm/min)

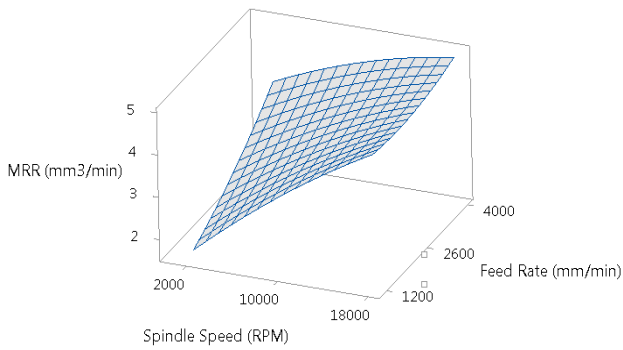


Fig. 14 Material removal Rate versus spindle speed and feed rate of samples (thickness 4 mm, cutting depth 0.6 mm)

شکل 14 تغییرات نرخ براده برداری بر حسب سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی (ضخامت 4 mm و عمق برش 0.6 mm)

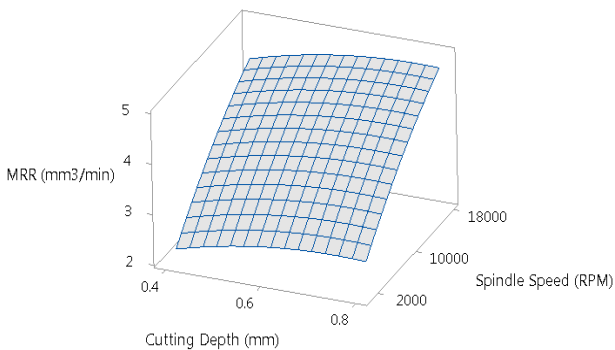


Fig. 15 Material removal Rate versus cutting depth and spindle speed (feed rate 2600 mm/min, cutting depth 0.6 mm)

شکل 15 تغییرات نرخ براده برداری بر حسب سرعت اسپیندل و عمق برش (ضخامت 4mm و نرخ پیشروی 2600 mm/min)

همان طور که در شکل 13 مشاهده می شود، افزایش توأم سرعت اسپیندل و ضخامت قطعات به ازای نرخ پیشروی و عمق برش ثابت، افزایش نرخ براده برداری را به همراه داشته است. علت افزایش نرخ براده برداری با افزایش ضخامت نمونه ها را می توان به صلبیت بالاتر قطعات ضخیم تر نسبت داد. زیرا، همان طور که در برخی از منابع به آن اشاره شده، افزایش ضخامت قطعات، سبب کاهش ارتعاش و لرزش نمونه ها حین عملیات ماشین کاری می شود که افزایش نرخ براده برداری را به دنبال دارد [17]. علاوه بر آن، با افزایش سرعت اسپیندل و در پی آن کاهش نیروهای ماشین کاری، لرزش و ارتعاش قطعات طی فرآیند کاهش یافته که نتیجه آن انجام براده برداری یکنواخت تر و افزایش نرخ براده برداری طی فرآیند می باشد [23].

همچنین، مطابق شکل های 14 و 15 مشاهده می شود، افزایش توأم سرعت اسپیندل با نرخ پیشروی و عمق برش، افزایش نرخ براده برداری را به دنبال داشته است. زیرا مطابق معادله (4)، تغییرات نرخ براده برداری یا حذف مواد با پارامترهای تعداد دوران اسپیندل، پیشروی و عمق برش رابطه مستقیم دارد.

$$MRR = N f z a_p a_e \quad (4)$$

بیشترین خطای ایجاد شده در اندازه گیری زبری سطح در هر ناحیه، طی جدول 10، ارائه شده است.

مقدار گزارش شده، نشان دهنده سازگاری و دقت پیش بینی مدل می باشد. همچنین، جهت تعیین مؤثرترین پارامتر بر نرخ براده برداری، نمودار مقادیر میانگین سازگار شده بر حسب نرخ براده برداری، ترسیم شد. همان طور که در شکل 12 مشاهده می شود، پس از ضخامت نمونه ها، سرعت دوران اسپیندل بیشترین تأثیر را بر نرخ براده برداری داشته و تأثیر نرخ پیشروی و عمق برش بر نرخ براده برداری چشمگیر نبوده است. در ادامه، طی شکل های 13، 14 و 15، به بررسی تأثیر تعاملی پارامترهای فرآیند بر نرخ براده برداری پرداخته شده است.

جدول 10 محاسبه خطا برای نرخ براده برداری طی دو روش تجربی و سطح پاسخ

Table 10 Calculation error percentage for material removal rate, by response surface methodology and experimental method

No	X_1 (rpm)	X_2 (mm/min)	X_3 (mm)	X_4 (mm)	MRR (mm ³ /min)	RSM	Error (%)
20	10000	4000	0.6	4	4.97	4.53	-8.85

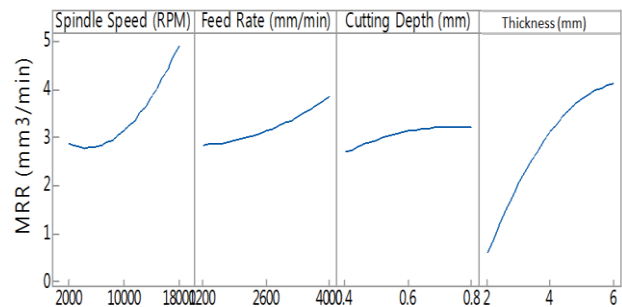


Fig. 12 Comparison of the effect of process parameters on material removal rate

شکل 12 مقایسه میزان تأثیر پارامترهای فرآیند بر نرخ براده برداری

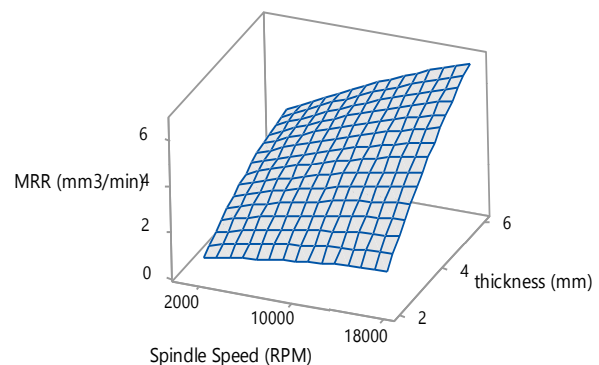


Fig. 13 Material removal Rate versus spindle speed and thickness of samples (feed rate 2600 mm/min, cutting depth 0.6 mm)

شکل 13 تغییرات نرخ براده برداری بر حسب سرعت اسپیندل و ضخامت نمونه ها (نرخ پیشروی 2600 mm/min و عمق برش 0.6mm)

(5)

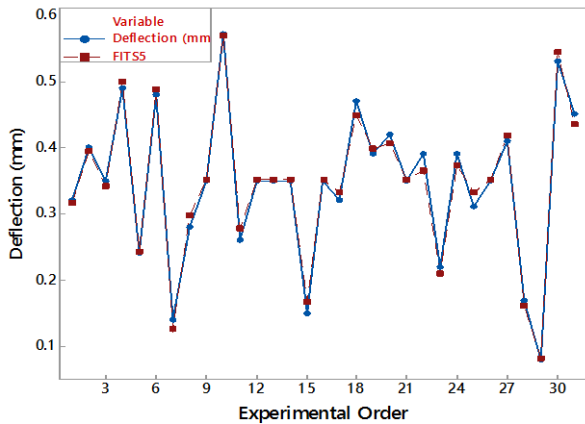


Fig. 16 Comparison of deflection of samples by response surface methodology and experimental method

شکل 16 مقایسه انحراف نمونه‌ها، طی روش سطح پاسخ و روش تجربی

در ادامه جهت بررسی درصد خطا و مقایسه مقادیر بدست آمده برای انحراف طی دو روش سطح پاسخ و روش تجربی، مقدار خطا برای بیشترین خطای ایجاد شده در اندازه‌گیری انحراف، طی جدول 12 ارائه شده است.

مقادیر گزارش شده، نشان دهنده سازگاری و دقت پیش‌بینی مدل می‌باشد. همچنین، جهت تعیین مؤثرترین پارامتر بر فرآیند، نمودار مقادیر میانگین سازگار شده بر حسب انحراف، ترسیم شد. همان‌طور که در شکل 17 مشاهده می‌شود، سرعت دوران اسپیندل و ضخامت نمونه‌ها، به ترتیب بیشترین تأثیر را بر انحراف ایجاد شده در نمونه‌ها داشته‌اند. در ادامه، طی شکل‌های 18، 19 و 20 به بررسی تأثیر تعاملی پارامترهای فرآیند بر انحراف ایجاد شده در نمونه‌ها پرداخته شده است.

جدول 12 مقایسه درصد خطا برای انحراف ایجاد شده در نمونه‌ها، طی روش سطح پاسخ و روش تجربی

Table 12 Comparison error percentage for deflection of samples by response surface methodology and experimental method

No	X_1 (rpm)	X_2 (mm/min)	X_3 (mm)	X_4 (mm)	deflection (mm)	RSM	Error (%)
18	10000	2600	0.6	2	0.47	0.44	-6.38

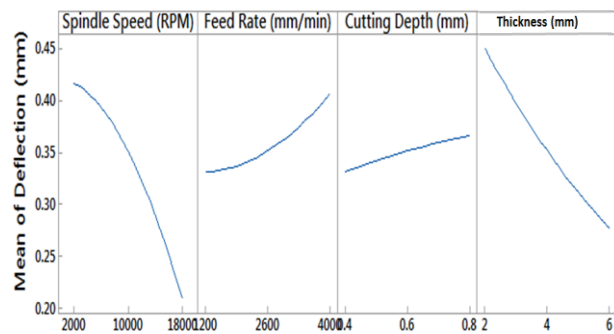


Fig. 17 Comparison of the effect of process parameters on deflection of samples

شکل 17 نمودار تأثیرات اصلی پارامترها بر انحراف نمونه‌ها

در این معادله، MRR نرخ براده برداری، N سرعت دوران اسپیندل بر حسب دور بر دقیقه، f نرخ پیشروی، Z حجم براده برداشته شده توسط هر دندان، a_p عمق برش شعاعی و a_e عمق برش محوری است [24].

3-3- تأثیر پارامترهای فرآیند بر انحراف نمونه‌ها

پس از اندازه‌گیری انحراف ایجاد شده حین عملیات ماشین کاری، به منظور بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند بر انحراف نمونه‌ها و بررسی اهمیت نسبی پارامترها، از آنالیز واریانس بهره گرفته شد. به این منظور، پس از بررسی کفایت مدل، آنالیز واریانس برای مقدار انحراف ایجاد شده در نمونه‌ها، طی جدول 11، ارائه گردید.

جدول 11 آنالیز واریانس مربوط به انحراف

Table 11 Analysis of variance for deflection

Source	Degrees of freedom	Adjusted sum of squares	Adjusted mean of squares	F-value	P-value
model	14	0.3872	0.0276	106.46	0.000
Linear	4	0.3542	0.0885	340.88	0.000
X_1	1	0.1922	0.1922	739.83	0.000
X_2	1	0.0249	0.0249	96.00	0.000
X_3	1	0.0053	0.0053	20.55	0.000
X_4	1	0.1317	0.1317	507.16	0.000
Square	4	0.0045	0.0011	4.37	0.014
X_1^2	1	0.0037	0.0037	14.38	0.002
X_2^2	1	0.0007	0.0007	2.91	0.108
X_3^2	1	0.0000	0.0000	0.09	0.772
X_4^2	1	0.0003	0.0003	1.45	0.246
Interaction	6	0.0284	0.0047	18.24	0.000
$X_1 * X_2$	1	0.0027	0.0027	10.61	0.005
$X_1 * X_3$	1	0.0115	0.0115	44.48	0.000
$X_1 * X_4$	1	0.0045	0.0045	17.54	0.001
$X_2 * X_3$	1	0.0014	0.0014	5.41	0.033
$X_2 * X_4$	1	0.0005	0.0005	1.95	0.182
$X_3 * X_4$	1	0.0076	0.0076	29.47	0.000
Error	16	0.0041	0.00026	-	-
Lack-of-fit	10	0.0041	0.00041	-	-
Total	30	0.3913	-	-	-

در این آنالیز نیز پارامترها با سطح اطمینان 95% مدل شده‌اند، بنابراین مقادیر کمتر از 0.05 برای P، به عنوان مقادیر معنادار در نظر گرفته شده است. همچنین مشاهده می‌شود که مقدار P-Value برای مدل رگرسیون و برخی از دیگر جملات، کوچک‌تر از سطح معنادار 0.05 است که نشان می‌دهد که این پیش‌بینی‌کننده‌ها، تأثیر قابل توجهی بر جواب داشته‌اند. همچنین ضریب انطباق یا سازگاری مدل R^2_{adj} یا R^2 منطبق شده نیز برای نرخ براده برداری در حدود 98% بدست آمد که به این معنا است که داده‌ها توسط مدل پوشش داده شده است.

به این ترتیب، معادله رگرسیون برای انحراف، طی معادله (5) ارائه گردیده است.

$$\text{Deflection (mm)} = 0.4785 + 0.000016 X_1 + 0.000005 X_2 + 0.211 X_3 - 0.0944 X_4 - 0.074 X_3^2 + 0.00301 X_4^2 - 0.000017 X_1 * X_3 - 0.000001 X_1 * X_4 - 0.000033 X_2 * X_3 + 0.000002 X_2 * X_4 + 0.0547 X_3 * X_4 \quad (5)$$

به منظور مقایسه مقادیر انحراف بدست آمده، طی مدل طراحی شده به روش سطح پاسخ (RSM) و مقادیر حاصل از آزمایش‌های انجام شده، نمودار مقدار انحراف نمونه‌ها بر حسب ترتیب و نظم آزمایش‌ها، طی شکل 16 ارائه شده است.

زیرا از آنجایی که در این پژوهش، نمونه‌های مورد آزمایش عملکردی همانند تیر یک سر گیردار یا طره‌ای دارند، می‌توان انحراف ایجاد شده در نمونه‌ها را با استفاده از معادله (6) توجیه نمود. در این معادله، p نیروی وارد بر تیر، L طول تیر، EI صلابت خمشی تیر است.

$$\delta = -\frac{PL^3}{3EI} \quad (7)$$

مطابق معادله (6)، افزایش ضخامت نمونه و در پی آن افزایش ممان اینرسی، کاهش انحراف نمونه را سبب می‌شود و همچنین با کاهش نیروی وارد بر نمونه نیز، مقدار انحراف δ کاهش می‌یابد. علاوه بر آن، همان‌طور که در برخی از منابع به آن اشاره شده است، افزایش سرعت دوران اسپیندل طی عملیات ماشین کاری، کاهش نیروهای ماشین کاری و ارتعاش نمونه را به دنبال داشته و براده برداری یکنواخت‌تری را ممکن می‌سازد [25].

طی شکل‌های 19 و 20، نتایج حاصل از بررسی تأثیر پارامترهای فرآیند بر انحراف نمونه‌ها نشان داد که در قطعات با جدار نازک، افزایش عمق برش و نرخ پیشروی، توأم با کاهش سرعت اسپیندل افزایش انحراف در نمونه‌ها را در پی داشته است. مطابق مقالات مطالعه شده در این زمینه، با افزایش عمق برش، سطح تماس بین ابزار و نمونه در واحد زمان افزایش یافته که افزایش نیروهای ماشین کاری و در پی آن افزایش انحراف نمونه‌ها را به دنبال دارد. افزایش ارتعاش و لرزش ایجاد شده در اثر افزایش نیروهای ماشین کاری حاصل از افزایش نرخ پیشروی و کاهش سرعت دوران اسپیندل نیز سبب می‌شود که براده‌برداری از نمونه‌ها به صورت غیر یکنواخت انجام شود، به طوری که طی عملیات فرزکاری روی لبه نمونه با جدار نازک، برداشت براده در قسمت بالایی لبه کمتر از قسمت پایینی آن باشد که کاهش دقت ابعادی نمونه را نیز به دنبال دارد [26].

به این ترتیب با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان استنباط نمود که پس از سرعت اسپیندل، ضخامت نمونه‌ها بیشترین تأثیر را بر انحراف ایجاد شده در نمونه‌های جدار نازک داشته و عمق برش و نرخ پیشروی تأثیر نسبتاً کمتری بر انحراف ایجاد شده در نمونه‌ها داشته‌اند. نتیجه می‌تواند لزوم استفاده از سرعت‌های بالا برای افزایش دقت ابعادی طی فرزکاری قطعات با جدارهای نازک را نشان دهد.

روش سطح پاسخ، مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که جهت مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل مسائلی که پاسخ آنها تحت تأثیر چندین متغیر قرار دارد استفاده می‌شود و هدف آن، بهینه‌سازی پاسخ بوده و قادر است چندین متغیر پاسخ را به ازای قیود داده شده بهینه‌سازی نماید.

مطابق شکل 21، مقدار بهینه شده توسط مدل برای زبری سطح، نرخ براده‌برداری و انحراف در قطعات 2 میلی‌متری، به ترتیب 2.89 میکرومتر، 2.31 میلی‌متر مکعب بر دقیقه و 0.29 میلی‌متر بدست آمده است. به این ترتیب، خطای پیش‌بینی انجام شده در مقایسه با مقادیر تجربی بدست آمده برای کمیت‌های ذکر شده در قطعات 2 میلی‌متری، به ازای سرعت دوران اسپیندل 18000 دور بر دقیقه، نرخ پیشروی 1200 میلی‌متر بر دقیقه و عمق برش 0.8 میلی‌متر، به ترتیب 4.62٪، -13.8٪ و 3.57٪ محاسبه گردید.

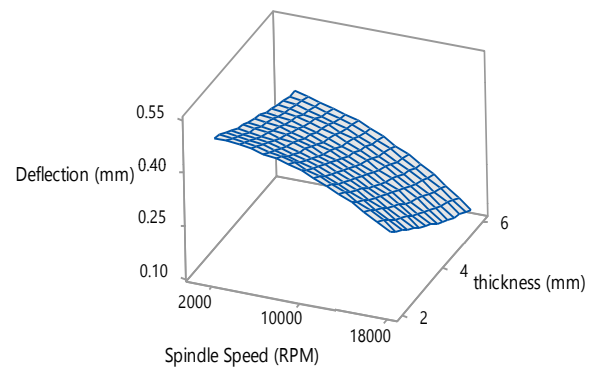


Fig. 18 Deflection versus spindle speed and thickness of samples (feed rate 2600 mm/min, cutting depth 0.6 mm)

شکل 18 تغییرات انحراف بر حسب سرعت اسپیندل و ضخامت نمونه‌ها (نرخ پیشروی 2600 mm/min و عمق برش 0.6 mm)

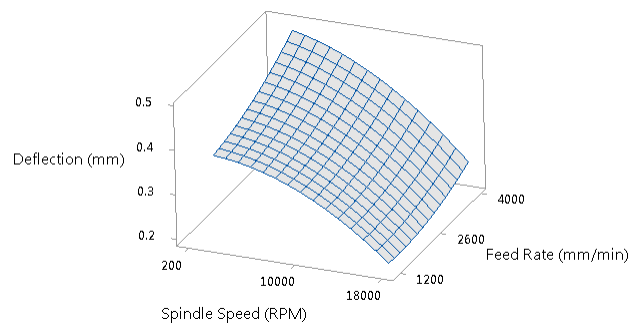


Fig. 19 Deflection versus spindle speed and feed rate (thickness 4 mm, cutting depth 0.6 mm)

شکل 19 تغییرات انحراف بر حسب سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی (ضخامت 4 mm و عمق برش 0.6 mm)

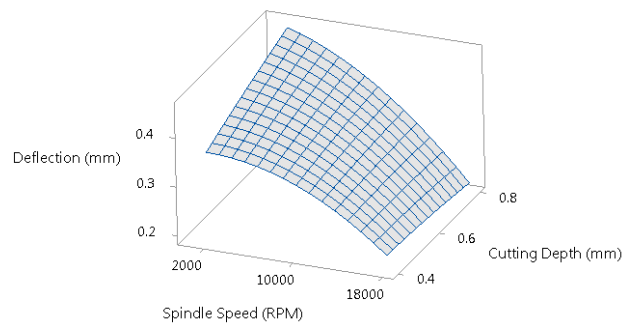


Fig. 20 Deflection versus feed rate and thickness of samples (feed rate 2600 mm/min, thickness 4 mm)

شکل 20 تغییرات انحراف بر حسب سرعت اسپیندل و عمق برش (نرخ پیشروی 2600 mm/min و ضخامت 4 mm)

همان‌طور که در شکل 18، مشاهده می‌شود، افزایش توأم ضخامت نمونه‌ها و سرعت دوران اسپیندل، به ازای نرخ پیشروی و عمق برش ثابت، کاهش انحراف در نمونه‌ها را در پی داشته است.

بنابراین می توان نتیجه گرفت، ترکیبی از سرعت اسپیندل بالا و نرخ پیشروی پایین، بهبود توأم زبری سطح، نرخ براده برداری و انحراف ایجاد شده در نمونه های کامپوزیتی با جدار نازک را به همراه داشته و بهینه سازی انجام شده می تواند لزوم استفاده از سرعت های بالا برای فرزکاری قطعات با جدارهای نازک را نشان دهد.

4- نتیجه گیری

در این پژوهش، تأثیر پارامترهای سرعت دوران اسپیندل، نرخ پیشروی، عمق برش و ضخامت نمونه ها بر زبری سطح، نرخ براده برداری و انحراف نمونه های کامپوزیتی جدار نازک طی فرآیند فرزکاری با سرعت بالا مورد بررسی قرار گرفته که اهم نتایج بدست آمده به شرح ذیل می باشد.

1- تحلیل آماری توسط نرم افزار مینی تب و با سطح اطمینان 95% انجام گردید و طی آن ضریب انطباق یا سازگاری مدل برای زبری سطح قطعات 97.57%، نرخ براده برداری 95% و برای انحراف ایجاد شده در قطعات، 98% بدست آمد.

2- طی تحلیل آماری انجام شده، مشخص شد که پس از نرخ پیشروی، ضخامت نمونه ها و سرعت دوران اسپیندل به ترتیب بیشترین تأثیر را بر کنترل زبری سطح نمونه ها داشته اند.

3- طی بررسی میزان تأثیر پارامترهای فرآیند بر نرخ براده برداری، نتایج نشان داد که پس از ضخامت نمونه ها، سرعت اسپیندل بیشترین تأثیر را بر نرخ براده برداری نمونه ها داشته است و تأثیر نرخ پیشروی و عمق برش بر روی نمونه ها چشمگیر نبوده است.

4- نتایج حاصل از بررسی میزان تأثیر پارامترهای فرآیند بر انحراف ایجاد شده در نمونه ها نشان داد که پس از سرعت اسپیندل، ضخامت نمونه ها بیشترین تأثیر را بر انحراف ایجاد شده در نمونه ها داشته است و نرخ پیشروی و عمق برش تأثیر قابل توجهی بر انحراف ایجاد شده در نمونه ها نداشته اند.

5- طی بهینه سازی انجام شده به روش سطح پاسخ، مقدار بهینه شده توسط مدل برای نمونه های 6 میلی متری، برای نرخ براده برداری 5.99 میلی متر مکعب بر دقیقه، زبری سطح، 2.12 میکرومتر و برای انحراف 0.082 میلی متر، حاصل شد. خطای پیش بینی انجام شده در مقایسه با مقادیر تجربی بدست آمده برای کمیت های ذکر شده به ترتیب 6%، 5.22% و 2.5% به دست آمد.

5- مراجع

- [1]Nassar, M. M., Arunachalam, R. and Alzebehd, K. I., "Machinability of Natural Fiber Reinforced Composites: A Review" The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 88, No. 9-12, pp. 2985-3004, 2017.
- [2]Patil, A. and Shende, M., "Experimental and Analytical Investigation of Drilling of Sandwich Composites: A Review" methodology, Vol. 27, No. 3, 2013.
- [3]Jones, R. M., "Mechanics of Composite Materials", CRC press, 2014 .
- [4]Kaw, A. K., "Mechanics of Composite Materials", CRC press, 2005 .
- [5]Mohan, N., Kulkarni, S. and Ramachandra, A., "Delamination Analysis in Drilling Process of Glass Fiber Reinforced Plastic (Gfrp) Composite Materials" Journal of Materials Processing Technology, Vol. 186, No. 1-3, pp. 265-271, 2007.
- [6]Saeed Amini, M. B., "Statistical Study of the Effect of Various Machining Parameters on Delamination in Drilling of Carbon Fiber Reinforced Composites, in Persian", Vol. 5, No. 1, pp. 41-50, 2018.

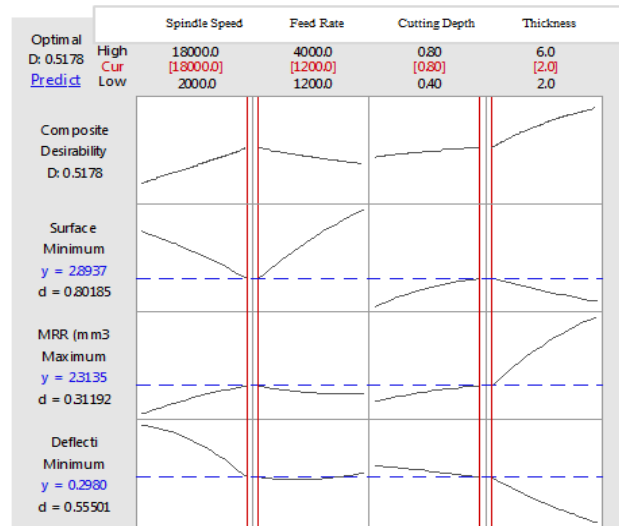


Fig. 21 Optimal values for the surface roughness, material removal rate and deflection of the samples (thickness 2 mm)

شکل 21 مقادیر بهینه برای کمیت های زبری سطح، نرخ براده برداری و انحراف نمونه ها (ضخامت نمونه ها 2 mm)

مطابق شکل 22، مقدار بهینه شده توسط مدل برای زبری سطح، نرخ براده برداری و انحراف در قطعات 6 میلی متری، به ترتیب 2.12 میکرومتر، 5.99 میلی متر مکعب بر دقیقه و 0.082 میلی متر بدست آمده است. به این ترتیب، خطای پیش بینی انجام شده در مقادیر تجربی بدست آمده برای کمیت های ذکر شده در نمونه های 6 میلی متری، به ازای سرعت دوران اسپیندل 18000 دور بر دقیقه، نرخ پیشروی 1200 میلی متر بر دقیقه و عمق برش 0.4 میلی متر، به ترتیب 6%، 5.22% و 2.5% محاسبه گردید.

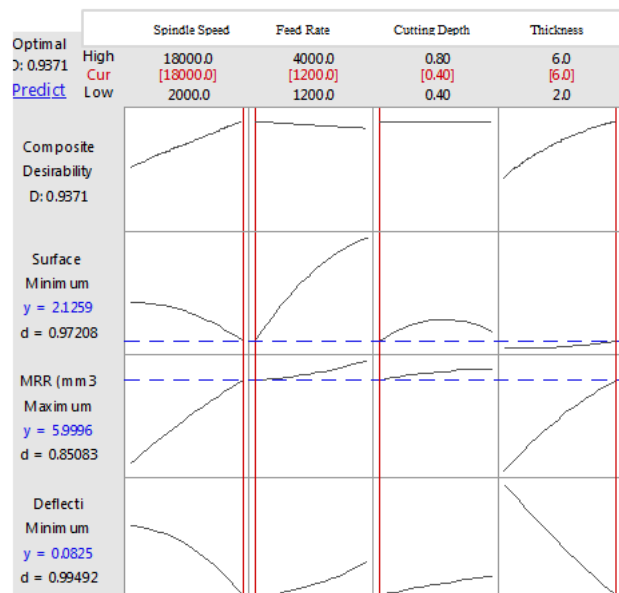


Fig. 22 Optimal values for the surface roughness, material removal rate and deflection of the samples (thickness 6 mm)

شکل 22 مقادیر بهینه برای کمیت های زبری سطح، نرخ براده برداری و انحراف نمونه ها (ضخامت نمونه ها 6 mm)

- [26] Sonawane, S. A. and Pawar, A. P., "Effect of Cutting Variables of End Milling Process on Surface Roughness and Machining Vibrations" in: Techno-Societal 2018, Eds., pp. 661-670: Springer, 2020.
- [7] Babu, J., Paul, L. and Davim, J. P., "High Speed Machining of Composite Materials" in: High Speed Machining, Eds., pp. 63-96 Elsevier, 2020.
- [8] Jain, A. K., Narasaiah, K. and Gopinath, S., "Machining of Thin Walls and Thin Floor Aerospace Components Made of Aluminum Alloy with High Aspect Ratio" in Proceeding of Trans Tech Publ, pp. 112-115, 2015.
- [9] Mane, I., Gagnol, V., Bouzgarrou, B. and Ray, P., "Stability-Based Spindle Speed Control During Flexible Workpiece High-Speed Milling" International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 48, No. 2, pp. 184-194, 2008.
- [10] Jain, A. and Bajpai, V., "Introduction to High-Speed Machining (Hsm)" in: High Speed Machining, pp. 1-25, 2020.
- [11] Hamlaoui, N., Azzouz, S., Chaoui, K., Azari, Z. and Yaltese, M.-A., "Machining of Tough Polyethylene Pipe Material: Surface Roughness and Cutting Temperature Optimization" The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 92, No. 5-8, pp. 2231-2245, 2017.
- [12] celik, Y. H., Kilickap, E. and Kilickap, A. İ., "An Experimental Study on Milling of Natural Fiber (Jute)-Reinforced Polymer Composites" Journal of Composite Materials, 2019.
- [13] Prasanth, I., Ravishankar, D., Hussain, M. M., Badiganti, C. M., Sharma, V. K. and Pathak, S., "Investigations on Performance Characteristics of Gfrp Composites in Milling" The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 99, No. 5-8, pp. 1351-1360, 2018.
- [14] Nurullah, F. P., Pramujati, B., Suhardjono, Effendi, M. K., Soepangkat, B. O. P. and Norcahyo, R., "Multi Response Prediction of End-Milling Cfrp with Backpropagation Neural Network" in Proceeding of AIP Publishing LLC, pp. 1-13, 2019.
- [15] Adeniji, D., Schoop, J., Gunawardena, S., Hanson, C. and Jahan, M., "Characterization and Modeling of Surface Roughness and Burr Formation in Slot Milling of Polycarbonate" Journal of Manufacturing and Materials Processing, Vol. 4, No. 2, pp. 59, 2020.
- [16] www. and afzir.com, Specification Sheet, December 2018.
- [17] Izamshah, R., Mo, J. and Ding, S., "Hybrid Deflection Prediction on Machining Thin-Wall Monolithic Aerospace Components" Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 226, No. 4, pp. 592-605, 2012.
- [18] Manikandan, H., Sreejith, S., Vivek, K., Jayaram, C. S. and Azeemhafiz, P., "Error Compensation Strategies for Workpiece Deflection During End Milling of Thin-Walled Straight and Curved Geometries" in: Recent Trends in Mechanical Engineering, Eds., pp. 249-258, 2020.
- [19] Yosefitabar, M., matipour, M., "Study of surface roughness in high speed milling of 1.7765 hard alloyed steel" in Persian, Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No. 20, pp. 86-89, 2016.
- [20] Seguy, S., Dessein, G. and Arnaud, L., "Surface Roughness Variation of Thin Wall Milling, Related to Modal Interactions" International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 48, No. 3-4, pp. 261-274, 2008.
- [21] Ghoreishi, R., Roohi, A. H. and Ghadikolaie, A. D., "Analysis of the Influence of Cutting Parameters on Surface Roughness and Cutting Forces in High Speed Face Milling of Al/Sic Mmc" in Persian, Materials Research Express, Vol. 5, No. 8, 2018.
- [22] Imani, L., Rahmani Henzaki, A., Hamzeloo, R. and Davoodi, B., "Modeling and Optimizing of Cutting Force and Surface Roughness in Milling Process of Inconel 738 Using Hybrid Ann and Ga" in Persian Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 234, No. 5, pp. 920-932, 2020.
- [23] Pal, P., Prabhu, R. and Sakthimurugan, K., "Surface Error Compensation in Hsm of Thin Wall Structures" International Journal of Engineering Science Invention, Vol. 2, No. 2, pp. 2319-6734, 2013.
- [24] Boothroyd, G., "Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools", Crc Press, 1988.
- [25] Arnaud, L., Gonzalo, O., Seguy, S., Jauregi, H. and Peigné, G., "Simulation of Low Rigidity Part Machining Applied to Thin-Walled Structures" The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 54, No. 5-8, pp. 479-488, 2011.