



مقایسه تجربی تolerانس‌های ابعادی و هندسی در سوراخ‌های تولیدشده به روش فرزکاری روی فولاد AISI D2

هادی ایمانی، جواد هاشمی خسروشاهی، محمدحسین صادقی^{*}، امیر راستی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۰ دی ۱۳۹۵
بازنگری: ۱۰ اردیبهشت ۱۳۹۶
پذیرش: ۱۱ تیر ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۷ تیر ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

استراتژی‌های سوراخ‌کاری
فرزکاری مارپیچ
فرزکاری پروفایل
تولانس ابعادی و هندسی
فولاد سخت AISI D2

چکیده: ایجاد سوراخی با ابعاد دقیق توسط فرایندهای سوراخ‌کاری سنتی نیازمند استفاده از عملیات ثانویه‌ای نظیر برافروازی است. همچنین، تolerانس نهایی سوراخ در این فرایند دامنه محدودی داشته و برای سیستم‌های تolerانس‌گذاری ثبوت میله‌کاری ندارد؛ اما با استفاده از روش‌های جدید ایجاد سوراخ مانند استراتژی‌های فرزکاری مارپیچ و پروفایل می‌توان در یک مرحله به سوراخی با تolerانس و دقت موردنظر دست یافت. در این پژوهش، با بررسی و مقایسه تجربی استراتژی‌های فرزکاری مارپیچ و پروفایل در سوراخ‌کاری فولاد سخت AISI D2، اندازه اسمی قطر سوراخ و همچنین تolerانس گردی و استوانه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. روش طراحی آزمایش فاکتوریل کامل به منظور بررسی اثر پارامترهای برش روی خروجی‌های تolerانس‌های ابعادی و هندسی سوراخ به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که تolerانس ابعادی به دست آمده در فرزکاری مارپیچ در بازه $0.001/0.034$ میلی‌متر قرار داشت که بسته‌تر از روش فرزکاری پروفایل بود. با این حال، تolerانس‌های هندسی سوراخ‌های ایجاد شده با فرزکاری پروفایل به دلیل خطای میان‌بایی کم‌تر در محاسبه مسیر ابزار، دقت بیش‌تری داشتند. کم‌ترین مقدار تolerانس استوانه‌ای با استفاده از استراتژی فرزکاری پروفایل و در سرعت برش 110 متر بر دقیقه، نرخ پیشروی 0.3 میلی‌متر بر دندانه و عمق برش 0.3 میلی‌متر حاصل شد.

۱- مقدمه

صحت و دوام عملکرد یک مجموعه مونتاژی زمانی حاصل می‌گردد که بین اجزای مختلف محصول تناسب ابعادی و هندسی دقیقی برقرار باشد [۱]. در این میان فرایند سوراخ‌کاری، به‌عنوان یکی از پرکاربردترین عملیات در ماشین‌کاری و همچنین به دلیل مباحث انطباقی در مجموعه‌های مونتاژی، از اهمیت بالایی برخوردار است. معمولاً فرایند سوراخ‌کاری جزء عملیات انتهایی ساخت قطعه محسوب می‌شود. در نتیجه، قطعه کار قبل از رسیدن به این مرحله دارای ارزش افزوده است (به دلیل انجام فرایندهای پیشین روی آن). به همین دلیل صحت اجرای فرایند سوراخ‌کاری از لحاظ اقتصادی نیز بسیار حائز اهمیت است [۲].

با معرفی ماشین‌های کنترل عددی، روش‌های جدیدی به‌منظور سوراخ‌کاری قطعات مورد مطالعه قرار گرفت. فرزکاری مارپیچ^۱ و پروفایل^۲ جزء این روش‌ها هستند. مهم‌ترین مزیت این روش‌ها را می‌توان در انعطاف‌پذیری بالای آن‌ها دانست به طوری که با یک ابزار می‌توان سوراخ‌هایی با قطرهای متفاوت تولید کرد [۳]. کاهش نیروی ماشین‌کاری و همچنین کیفیت بالای سوراخ‌های ایجادشده نیز از دیگر ویژگی‌های این روش‌ها هستند [۴].

در سال‌های اخیر چندین پژوهش در زمینه روش‌های ایجاد سوراخ و اثرات آن‌ها بر کیفیت سوراخ‌ها صورت گرفته است. نتایج به‌دست‌آمده در این بررسی‌ها حاکی از تأثیر به‌سزای استراتژی‌های ماشین‌کاری بر میزان کیفیت سوراخ تولیدی بوده است.

الورا و همکاران [۵] سه استراتژی سوراخ‌کاری سنتی، فرزکاری مارپیچ و فرزکاری مارپیچ کانتورهای را بر ایجاد سوراخ بررسی و مشاهده کردند که در فرزکاری مارپیچ تغییرات قطر سوراخ در مقایسه با سایر استراتژی‌ها کم‌تر است.

چیچک و همکاران [۶] در بررسی سوراخ‌کاری فولاد ضدزنگ دریافتند که پیشروی و سرعت برشی بیش‌ترین تأثیر را در تolerانس گردی^۳ دارد و با افزایش این پارامترها، خطای گردی نیز بیش‌تر می‌شود. آن‌ها دلیل این امر را افزایش حرارت در نوک ابزار به دلیل سایش آن دانستند.

اوریکاین و همکاران [۷] نیز با اندازه‌گیری انحراف قطر سوراخ در دو مقطع دریافتند که سوراخ‌های ایجادشده به روش فرزکاری مارپیچ انحراف کم‌تری نسبت به سوراخ‌کاری با مته داشتند.

برینکسمیر و همکاران [۸] سینماتیک فرایند فرزکاری مارپیچ را بررسی و عنوان کردند که به دلیل کوچک بودن منطقه برش در این فرایند و همچنین تقسیم منطقه برش به نواحی برش پیشانی و جانبی، احتمال تشکیل لبه

- 1 Helical milling
- 2 Profile milling

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sadeghim@modares.ac.ir

انباشته کاهش می‌یابد.

شان و همکاران [۹] با مطالعه سینماتیک فرزکاری مارپیچ دریافتند که با افزایش گام مسیر مارپیچ، خطای ابعادی قطر سوراخ افزایش پیدا می‌کند و این مقدار خطا در دهانه خروجی بیشتر از دهانه ورودی است. آن‌ها دلیل این امر را افزایش میزان نیروی وارده به ابزار و کاهش پایداری آن به سبب افزایش گام مسیر مارپیچ دانستند.

در مطالعه‌ای دیگر، هائو لی و همکارانش [۱۰] سوراخ‌های ایجادشده با فرزکاری مارپیچ را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها قطر سوراخ و خطای گردی را قابل قبول دانستند و مطرح کردند که سایش ابزار سبب تغییرات شدید در اندازه قطر سوراخ و خطای گردی نمی‌شود. همچنین انحراف ابزار در جهت محور سوراخ به دلیل نیروهای واردشده به‌عنوان علت انحراف اندازه قطر سوراخ از اندازه اسمی آن عنوان گردید.

سعادت‌بخش و همکاران [۱۱] در مطالعه‌ای تجربی تolerانس‌های ابعادی^۱ و هندسی^۲ سوراخ‌های تولیدشده توسط فرآیند فرزکاری مارپیچ را در قطعه‌ای فولادی از جنس AISI4340 مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش سرعت برشی اثر مثبتی روی تolerانس‌های ابعادی و هندسی دارد. آن‌ها دلیل این اثر را افزایش حرارت و نرم شدن ماده در ناحیه برش عنوان کردند.

بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که تاکنون تحقیقات بسیار اندکی در زمینه تأثیر پارامترهای برش روی تolerانس‌های هندسی و ابعادی سوراخ‌های تولیدی به روش فرزکاری صورت گرفته است. همچنین کیفیت سوراخ ایجادشده با استراتژی فرزکاری پروفایل تاکنون در گزارشی مشاهده نشده است. لذا در این پژوهش، تأثیر سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش محوری بر اندازه اسمی^۳، تolerانس گردی و تolerانس استوانه‌ای سوراخ ایجادشده با دو روش فرزکاری مارپیچ و پروفایل روی فولاد سخت D2 مورد بررسی قرار گرفت. طراحی آزمایش به‌صورت عاملی کامل^۴ انجام شد و نتایج حاصل از دو استراتژی با هم مقایسه گردید.

۲- سینماتیک مسیر ابزار

۲-۱- فرزکاری مارپیچ

فرزکاری مارپیچ یکی از روش‌های ایجاد سوراخ می‌باشد که به دلیل نوع حرکت و مسیر ابزار از انعطاف‌پذیری بالایی در ایجاد سوراخ برخوردار است. شکل ۱ مسیر حرکت ابزار را در سوراخ‌کاری با دو روش فرزکاری مارپیچ و پروفایل را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، در فرزکاری مارپیچ ابزار دارای سه نوع حرکت هم‌زمان، شامل چرخش ابزار به دور محور خود، چرخش حول محور مسیر مارپیچ و حرکت محوری است. همچنین ابزار در این استراتژی دارای سه سرعت پیشروی؛ سرعت پیشروی محوری به ازای

- 1 Dimensional tolerances
- 2 Geometrical tolerances
- 3 Nominal dimension
- 4 Full factorial

هر دندان (V_{fha}) ، سرعت پیشروی مماس بر دایره مارپیچ (V_{ft}) و سرعت پیشروی مماس بر لبه برشی (V_{fht}) است که مقدار آن‌ها به ترتیب با استفاده از روابط (۱) تا (۳) به دست می‌آید. همچنین سرعت پیشروی مماس بر مسیر ابزار (V_f) نیز از رابطه (۴) محاسبه می‌شود. قطر مسیر مارپیچ نیز با استفاده از رابطه (۵) تعیین می‌شود.

$$V_{fha} = f_{za} \cdot z \cdot n \quad (1)$$

$$V_{ft} = f_{zt} \cdot z \cdot n \quad (2)$$

$$V_{fht} = V_{ft} \cdot \frac{D_h}{D_B} \quad (3)$$

$$V_f = \sqrt{V_{fha}^2 + V_{fht}^2} \quad (4)$$

$$D_h = D_B - D_t \quad (5)$$

در این روابط، z تعداد دندانه‌های تیغه‌فرز، n میزان دوران اسپیندل در هر دقیقه، f_{za} و f_{zt} به ترتیب مقدار پیشروی محوری و مماسی به ازای هر دندان، D_h قطر مسیر مارپیچ، D_B قطر سوراخ و D_t قطر ابزار است.

همان‌گونه که در مقدمه نیز اشاره شد، یکی از ویژگی‌های روش فرزکاری مارپیچ در تولید سوراخ‌هایی با قطرهای مختلف و تنها با استفاده از یک ابزار است. البته این نکته قابل‌ذکر است که قطر ابزار در فرزکاری مارپیچ باید بزرگ‌تر از نصف قطر سوراخ باشد. علاوه بر این، نسبت قطر ابزار به قطر سوراخ در این روش بسیار مهم بوده، به‌طوری‌که نرخ براده‌برداری با افزایش این نسبت بالاتر می‌رود.

۲-۲- فرزکاری پروفایل

فرزکاری پروفایل یکی دیگر از روش‌های ایجاد سوراخ با دقت ابعادی بالا است. سینماتیک حرکت ابزار در این روش نیز مانند روش فرزکاری مارپیچ است با این تفاوت که در این روش حرکت ابزار در راستای عمق سوراخ یا همان عمق برش به‌صورت مرحله‌ای انجام می‌گیرد اما در روش فرزکاری مارپیچ عمق برش به‌صورت پیوسته و در حین ایجاد سوراخ اعمال می‌شود (شکل ۱).

تفاوت اصلی فرزکاری پروفایل نسبت به روش فرزکاری مارپیچ، براده برداری این روش در دو بعد است. در واقع در این روش ابزار هم‌زمان در دو راستای X و Y براده برداری می‌کند اما در روش فرزکاری مارپیچ کنترلر ماشین در سه جهت میان‌یابی کرده و براده برداری در سه جهت X ، Y و Z صورت می‌گیرد.

در سوراخ‌کاری به روش فرزکاری پروفایل، مقدار سرعت پیشروی مماس بر لبه برشی (V_{fm}) از رابطه (۶) و سرعت پیشروی مماس بر مسیر ابزار (V_f)

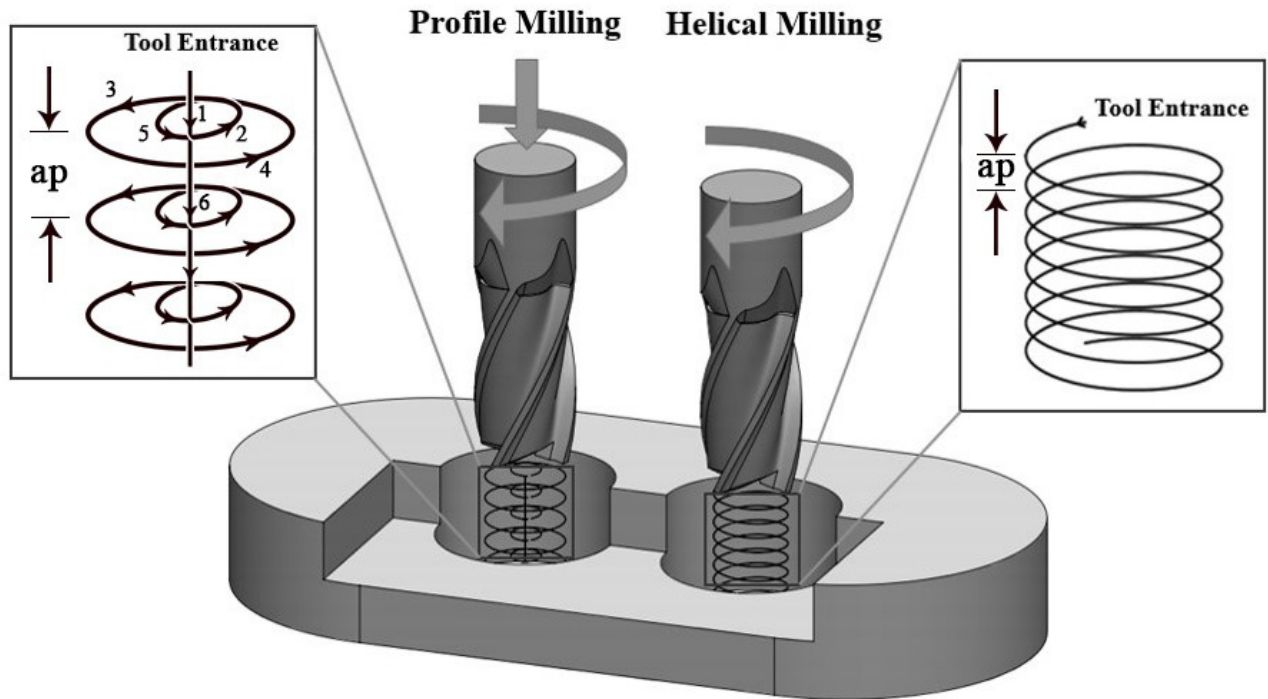


Fig. 1. 3D description of tooling path in helical and profile milling methods

شکل ۱: نمایی سه بعدی از مسیر ابزار در روش‌های فرزکاری مارپیچ و پروفایل

جدول ۱: پارامترهای فرزکاری موردبررسی و سطوح آن‌ها

Table 1. Milling parameters and their levels

سطوح			فاکتورها
۳	۲	۱	
۱۱۰	۷۰	۳۰	سرعت برشی (V_c) (m/min)
۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۳	نرخ پیشروی (f_z) (mm/tooth)
-	۰/۳	۰/۱۵	عمق برش محوری (a_p) (mm)

دور بر دقیقه و بدون استفاده از روان کار ایجاد شد. تصویر مربوط به انجام آزمایش‌های سوراخ‌کاری و همچنین قطعه‌کار مورد استفاده در شکل ۲ آمده است.

به منظور اندازه‌گیری تolerانس‌های هندسی و ابعادی سوراخ‌ها در هر آزمایش از دستگاه اندازه‌گیری مختصات^۱ مدل LH87 شرکت ونزل^۲ با دقت ۲/۷ میکرومتر استفاده گردید. پرآب‌های مورد استفاده دارای قطر ۲ میلی‌متر و از نوع تماسی و پوششی بودند.

در مجموع ۳۶ سوراخ با شرایط برشی مختلف به روش فرزکاری مارپیچ و پروفایل در قطعه‌کار ایجاد شد. اندازه‌گیری‌ها در سه مقطع و به فاصله ۲، ۵ و ۸ میلی‌متری از سطح قطعه انجام گردید (شکل ۳) و در هر مقطع، موقعیت دیواره سوراخ توسط ۳۰۰ نقطه اندازه‌گیری شد.

1 Coordinate Measuring Machine (CMM)

2 Wenzel

از رابطه (۷) تعیین می‌شود.

$$V_{fm} = f_z \cdot z \cdot n \quad (۶)$$

$$V_f = V_{fm} \cdot \frac{D_h}{D_B} \quad (۷)$$

در این روابط نیز همانند استراتژی مارپیچ، z تعداد دندانه‌های تیغه‌فرز، میزان دوران اسپیندل در هر دقیقه، f_z مقدار پیشروی به ازای هر دندانه، D_h قطر مسیر ابزار و D_B قطر سوراخ است.

۳- تجهیزات و روش انجام آزمایش

صفحه فولاد آلیاژی AISI D2 به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و با سختی ۵۵ راکول سی جهت انجام آزمایش‌های تجربی انتخاب گردید. این فولاد به دلیل مقاوم بودن در برابر کار سرد نظیر خمش، برش و فورج سرد به فولاد سردکار معروف است.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در این پژوهش سه فاکتور سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش به عنوان متغیرهای آزمایش انتخاب گردیدند. با توجه به تعداد سطوح و فاکتورها (جدول ۱)، مجموعاً ۱۸ آزمایش برای هر استراتژی به روش عاملی کامل انجام شد. ابزارهای استفاده‌شده برای هر دو استراتژی از نوع تیغه‌فرز انگشتی کاربایدی یکپارچه سر تخت با قطر ۶ میلی‌متر و با روکش TiAlN بود. تمامی سوراخ‌ها توسط دستگاه فرز کنترل عددی سه محوره مدل VMC850 با حداکثر دور اسپیندل ۸۰۰۰

شکل ۴ تغییرات اندازه اسمی سوراخ در اثر تغییر پارامترهای برش در دو استراتژی فرزکاری ماریپچ و پروفایل را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴(a) مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت برشی مقدار اندازه اسمی سوراخ در هر دو استراتژی به سمت ۱۰ میلی‌متر میل می‌کند؛ به عبارت دیگر، افزایش سرعت برشی باعث کاهش ۶۲٪ و ۵۲٪ خطای ابعادی سوراخ در استراتژی‌های فرزکاری ماریپچ و پروفایل شده است. دلیل این امر را می‌توان کاهش نیروی برشی در سطوح بالاتر سرعت برشی دانست. در واقع، بالا رفتن دمای منطقه برش با افزایش سرعت برشی، باعث نرم‌شدن ماده و جدا شدن راحت‌تر براده از قطعه کار می‌شود. همچنین این افزایش دما، اصطکاک بین سطح تماس ابزار و قطعه کار را کاسته و این شرایط باعث کاهش نیروی ماشین‌کاری و بهبود شرایط برش در هر دو استراتژی می‌گردد.

با توجه به این که نیروی برشی یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر تلرانس ابعادی است، کاهش نیروی ماشین‌کاری باعث کاهش خیز و انحراف ابزار شده و خطای ابعادی کم‌تری را در پی دارد. از طرف دیگر افزایش سرعت برشی باعث پایداری فرایند و بهبود شرایط برش می‌شود.

با توجه به شکل ۴(b)، افزایش نرخ پیشروی باعث افزایش خطای ابعادی در هر دو استراتژی شده است. این افزایش در استراتژی‌های فرزکاری ماریپچ و پروفایل به ترتیب برابر ۹۷٪ و ۶۶٪ است. همانند نرخ پیشروی، بیش‌تر شدن عمق برش نیز باعث افزایش خطای ابعادی در هر دو استراتژی شده است (شکل ۴(c)). دلیل این امر را می‌توان در افزایش نیروی ماشین‌کاری دانست. به طوری که با افزایش این دو پارامتر میزان نیروی ماشین‌کاری افزایش پیدا کرده و سبب انحراف ابزار می‌شود.

یکی از دلایل تأثیر زیاد عمق برش در فرزکاری پروفایل نسبت به فرزکاری ماریپچ در تفاوت مسیر حرکت ابزار است. در فرزکاری پروفایل ابزار به صورت ناپیوسته و مرحله‌ای براده‌برداری می‌کند؛ به عبارت دیگر، ابزار در هر مرحله به اندازه عمق برش براده برداری کرده و برای شروع مرحله بعد به میزان عمق برش در راستای محور سوراخ پایین می‌رود. این حرکت رو به پایین ابزار باعث می‌شود تا نیروی ماشین‌کاری نیز افزایش یابد. در حالی که در روش فرزکاری ماریپچ ابزار به صورت پیوسته براده‌برداری کرده و عمق برش را در حین ماشین‌کاری اعمال می‌کند. در واقع به دلیل وجود حرکت انتقالی ابزار موازی با محور سوراخ در فرزکاری پروفایل، نیروی ماشین‌کاری در بازه زمانی کم‌تر و به صورت یک‌باره به ابزار وارد شده و به موجب آن، ابزار بیش‌تر منحرف می‌گردد؛ اما در روش فرزکاری ماریپچ نیروی ماشین‌کاری در کل مسیر برش به صورت پیوسته و یکسان است.

در حالت کلی، مقایسه نتایج دو استراتژی فرزکاری ماریپچ و پروفایل نشان می‌دهد که تلرانس ابعادی به دست آمده در فرزکاری ماریپچ بسته‌تر از روش پروفایل است. خطای ابعادی در روش فرزکاری ماریپچ بین ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۳۴ میلی‌متر و در روش فرزکاری پروفایل در بازه ۰/۰۰۷ تا ۰/۰۴۵ میلی‌متر تغییر می‌کرد.

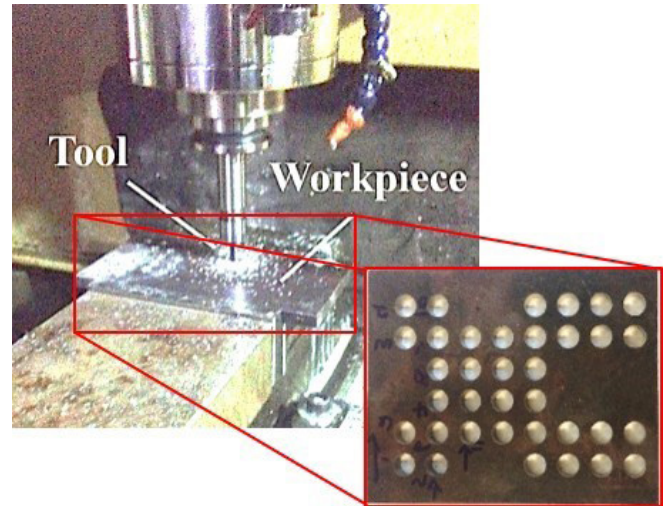


Fig. 2. Experimental setup and top view of the test workpiece
شکل ۲: چیدمان انجام آزمایش و قطعه کار مورد استفاده در آزمایش‌ها

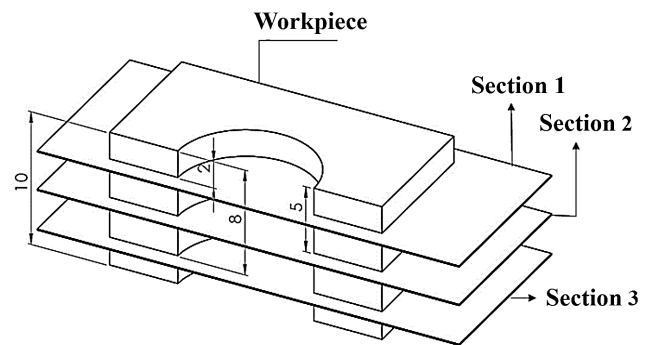


Fig. 3. Sections of the workpiece where the geometrical and dimensional tolerances were measured

شکل ۳: مقاطع اندازه‌گیری شده به منظور مطالعه تلرانس‌های هندسی و ابعادی سوراخ

۴- بحث و نتایج

در تمامی آزمایش‌ها، هدف ایجاد سوراخی راه‌به‌در به قطر ۱۰ میلی‌متر بود. نتایج به دست آمده در جدول ۲ آمده است. در ادامه به بررسی نتایج به دست آمده و تأثیر پارامترهای ماشین‌کاری بر تلرانس‌های ابعادی و هندسی در دو استراتژی فرزکاری ماریپچ و پروفایل پرداخته می‌شود.

۴-۱- تلرانس اندازه اسمی

بزرگ‌ترین اندازه قطر به دست آمده در تمامی مقاطع اندازه‌گیری شده به عنوان اندازه اسمی سوراخ در نظر گرفته شد. از روش آنالیز واریانس برای تحلیل اندازه اسمی سوراخ استفاده گردید. آنالیز واریانس مدل توسعه یافته در هر دو استراتژی فرزکاری ماریپچ و پروفایل به ترتیب در جدول ۳ و جدول ۴ نشان داده شده است. بر این اساس، تمامی پارامترهای اصلی آزمایش در هر دو استراتژی سوراخ‌کاری معنی‌دار هستند. مقدار R_{adj} مدل‌ها در هر دو فرایند به ترتیب ۹۹/۶۴٪ و ۹۵/۳۸٪ به دست آمد که حاکی از تطابق مناسب هر دو مدل با نتایج آزمایش است.

جدول ۲: مقادیر خطاهای ابعادی و هندسی سوراخ‌های فرزکاری شده با روش‌های ماریج و پروفایل

Table 2.

شماره آزمایش	سرعت برشی (V_c) m/min	نرخ پیشروی (f_z) mm/tooth	عمق برش (a_p) mm	خطای اندازه اسمی mm		خطای گردی سوراخ mm		خطای استوانه‌ای سوراخ mm	
				فرزکاری پروفایل	فرزکاری ماریج	فرزکاری پروفایل	فرزکاری ماریج	فرزکاری پروفایل	فرزکاری ماریج
۱	۳۰	۰/۰۳	۰/۱۵	۰/۰۱۵	۰/۰۲۳	۰/۰۲۸	۰/۰۲۵	۰/۰۲۰	۰/۰۱۹
۲	۷۰	۰/۰۳	۰/۱۵	۰/۰۱۲	۰/۰۰۹	۰/۰۲۰	۰/۰۱۶	۰/۰۱۶	۰/۰۱۵
۳	۱۱۰	۰/۰۳	۰/۱۵	۰/۰۰۷	۰/۰۰۱	۰/۰۱۶	۰/۰۱۲	۰/۰۱۱	۰/۰۱۲
۴	۳۰	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۰۲۲	۰/۰۲۹	۰/۰۳۲	۰/۰۲۷	۰/۰۲۷	۰/۰۲۱
۵	۷۰	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۰۱۱	۰/۰۱۵	۰/۰۲۶	۰/۰۲۲	۰/۰۱۷	۰/۰۱۷
۶	۱۱۰	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۰۰۶	۰/۰۱۱	۰/۰۱۸	۰/۰۱۴	۰/۰۱۵	۰/۰۱۲
۷	۳۰	۰/۰۷	۰/۱۵	۰/۰۲۸	۰/۰۳۴	۰/۰۳۸	۰/۰۳۲	۰/۰۳۱	۰/۰۲۷
۸	۷۰	۰/۰۷	۰/۱۵	۰/۰۱۹	۰/۰۲۵	۰/۰۳۰	۰/۰۲۴	۰/۰۲۷	۰/۰۲۲
۹	۱۱۰	۰/۰۷	۰/۱۵	۰/۰۱۲	۰/۰۱۸	۰/۰۲۱	۰/۰۱۴	۰/۰۲۱	۰/۰۲۰
۱۰	۳۰	۰/۰۳	۰/۳	۰/۰۲۴	۰/۰۳۳	۰/۰۲۲	۰/۰۱۷	۰/۰۱۹	۰/۰۱۴
۱۱	۷۰	۰/۰۳	۰/۳	۰/۰۲۲	۰/۰۲۷	۰/۰۱۷	۰/۰۱۰	۰/۰۱۵	۰/۰۱۱
۱۲	۱۱۰	۰/۰۳	۰/۳	۰/۰۰۶	۰/۰۱۲	۰/۰۱۴	۰/۰۱۱	۰/۰۱۰	۰/۰۰۸
۱۳	۳۰	۰/۰۵	۰/۳	۰/۰۲۹	۰/۰۳۵	۰/۰۲۴	۰/۰۲۱	۰/۰۲۴	۰/۰۲۲
۱۴	۷۰	۰/۰۵	۰/۳	۰/۰۱۹	۰/۰۲۵	۰/۰۱۹	۰/۰۱۶	۰/۰۱۷	۰/۰۱۹
۱۵	۱۱۰	۰/۰۵	۰/۳	۰/۰۱۳	۰/۰۱۹	۰/۰۱۶	۰/۰۱۴	۰/۰۱۵	۰/۰۱۰
۱۶	۳۰	۰/۰۷	۰/۳	۰/۰۳۴	۰/۰۴۵	۰/۰۳۰	۰/۰۲۶	۰/۰۲۸	۰/۰۲۵
۱۷	۷۰	۰/۰۷	۰/۳	۰/۰۳۲	۰/۰۳۸	۰/۰۲۶	۰/۰۲۰	۰/۰۲۲	۰/۰۲۰
۱۸	۱۱۰	۰/۰۷	۰/۳	۰/۰۲۱	۰/۰۲۹	۰/۰۲۲	۰/۰۱۷	۰/۰۱۹	۰/۰۱۸

جدول ۴: آنالیز واریانس مدل تolerانس اندازه اسمی در فرزکاری پروفایل

Table 4. ANOVA of the diameter tolerance model in profile milling

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مقدار F	مقدار P	سهم تأثیر (%)
V_c	۰/۰۰۰۸۸۷۵	۲	۹۳/۲۳	۰	۴۷/۱
f_z	۰/۰۰۰۵۰۲۱	۲	۵۲/۷۴	۰	۲۶/۶
a_p	۰/۰۰۰۴۳۹۶	۱	۹۲/۳۵	۰	۲۳/۳
خطا	۰/۰۰۰۰۵۷۱	۱۲	-	-	۳
کل	۰/۰۰۱۸۸۶۲	۱۷	-	-	۱۰۰

جدول ۳: آنالیز واریانس مدل تolerانس اندازه اسمی در فرزکاری ماریج

Table 3. ANOVA of the diameter tolerance model in helical milling

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مقدار F	مقدار P	سهم تأثیر (%)
V_c	۰/۰۰۰۸۰۲۱	۲	۸۱/۳۶	۰	۴۶/۹
f_z	۰/۰۰۰۴۷۷۴	۲	۴۸/۴۳	۰	۲۷/۹
a_p	۰/۰۰۰۳۷۳۱	۱	۷۵/۶۹	۰	۲۱/۸
خطا	۰/۰۰۰۰۵۹۲	۱۲	-	-	۳/۴
کل	۰/۰۰۱۷۱۱۷	۱۷	-	-	۱۰۰

۴-۲- تolerانس گردی

مؤثر در مدل‌های آزمایش مشخص گردید. جدول ۵ و جدول ۶ آنالیز واریانس مدل توسعه داده‌شده تolerانس گردی را به ترتیب برای استراتژی‌های فرزکاری ماریج و پروفایل را نشان می‌دهد. بر این اساس، تمامی پارامترهای اصلی و برهم‌کنش سرعت برشی و عمق برش دارای اثر معنی‌داری بودند. با توجه به شکل ۵ (a)، افزایش سرعت برشی تأثیر مثبتی بر تolerانس

به منظور بررسی تolerانس گردی، بازه تغییرات قطر سوراخ در هر سه مقطع سوراخ مشخص گردید و نصف اختلاف بین بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین قطر در تمامی مقاطع به‌عنوان خطای گردی در نظر گرفته شد. با استفاده از روش آنالیز واریانس داده‌های به‌دست‌آمده تحلیل و عوامل

جدول ۵: آنالیز واریانس مدل تلرانس گردی در فرزکاری مارپیچ

Table 5. ANOVA of the roundness tolerance model in helical milling

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مقدار F	مقدار P	سهم تأثیر (%)
V_c	۰/۰۰۰۳۸۴۵	۲	۱۱۴/۹۲	۰	۵۲/۴
f_z	۰/۰۰۰۲۱۴۴	۲	۶۴/۰۹	۰	۲۹/۳
a_p	۰/۰۰۰۰۸۷۴	۱	۵۲/۲۶	۰	۱۱/۹
V_c^*	۰/۰۰۰۰۳۰۲	۲	۹/۰۴	۰/۰۰۰۶	۴/۱
a_p	۰/۰۰۰۰۱۶۷	۱۰	-	-	۲/۳
خطا	۰/۰۰۰۷۳۳۳	۱۷	-	-	۱۰۰
کل	۰/۰۰۱۸۸۶۲	۱۷	-	-	۱۰۰

جدول ۶: آنالیز واریانس مدل تلرانس گردی در فرزکاری پروفایل

Table 6. ANOVA of the roundness tolerance model in profile milling

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مقدار F	مقدار P	سهم تأثیر (%)
V_c	۰/۰۰۰۳۷۱۰	۲	۸۵/۵۳	۰	۵۷/۴
f_z	۰/۰۰۰۱۴۳۲	۲	۳۳/۰۲	۰	۲۲/۱
a_p	۰/۰۰۰۰۶۷۵	۱	۳۱/۱۳	۰	۱۰/۴
V_c^*	۰/۰۰۰۰۴۳۵	۲	۱۰/۰۳	۰/۰۰۰۴	۶/۷
a_p	۰/۰۰۰۰۲۱۷	۱۰	-	-	۳/۴
خطا	۰/۰۰۰۶۴۷۰	۱۷	-	-	۱۰۰
کل	۰/۰۰۱۸۸۶۲	۱۷	-	-	۱۰۰

شکل ۵ (c) نیز اثر عمق برش را روی تلرانس گردی نشان می‌دهد. نکته حائز اهمیت این نمودار روند تغییر تلرانس گردی با افزایش عمق برش است. به طوری که افزایش عمق برش باعث کاهش خطای گردی شده است. دلیل این امر می‌تواند کاهش تعداد حلقه‌ها و کوتاه شدن مسیر ابزار در اثر افزایش عمق برش باشد. کوتاه شدن مسیر ابزار سبب کاهش خطاهای ناشی از مسیریابی و میان‌یابی ماشین‌ابزار و عوامل خارجی می‌شود. این پدیده در مطالعات پیشین نیز مشاهده شده است [۵ و ۹].

شکل ۶ و شکل ۷ به ترتیب نمودار برهم‌کنش سرعت برشی و عمق برش را در استراتژی‌های فرزکاری مارپیچ و پروفایل نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که روند تغییرات در هر دو استراتژی

جدول ۵ آنالیز واریانس مدل تلرانس گردی در فرزکاری مارپیچ شرایط برشی خطای گردی در فرزکاری پروفایل، در محدوده ۰/۰۱۰ تا ۰/۰۳۲ میلی‌متر قرار داشت.

به طور کلی، دلیل بسته‌تر بودن تلرانس گردی در فرزکاری پروفایل نسبت به فرزکاری مارپیچ، میان‌یابی روش فرزکاری پروفایل در دو جهت است؛ به عبارت دیگر در این استراتژی به دلیل براده برداری در دو راستا، خطای

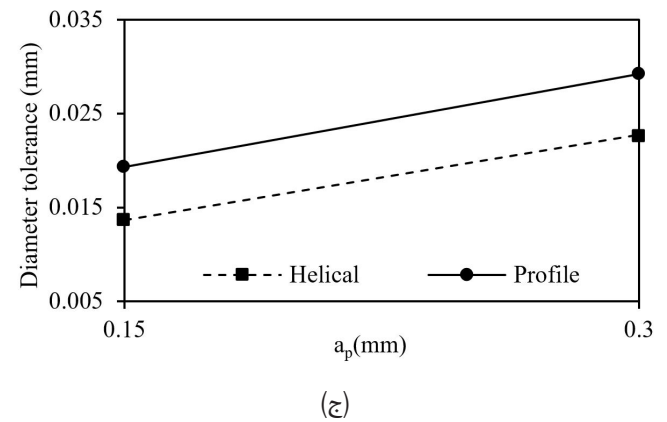
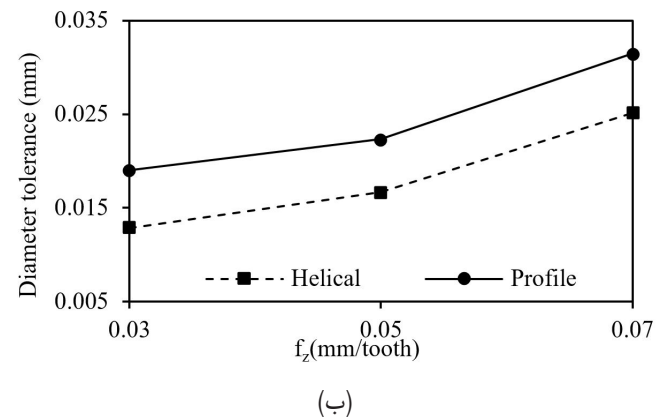
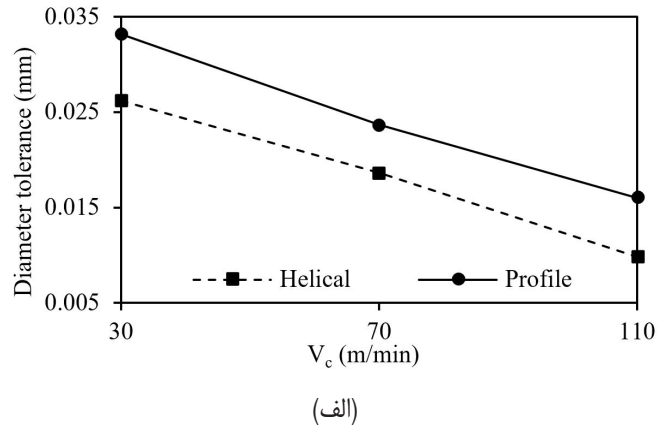


Fig. 4. Effect of a) cutting speed, b) feed rate, c) depth of cut on the nominal diameter deviation of the helical and profile milled holes
شکل ۴: تأثیر الف) سرعت برشی ب) نرخ پیشروی ج) عمق برش بر خطای اندازه اسمی سوراخ‌ها در فرزکاری مارپیچ و پروفایل

گردی دارد، به طوری که افزایش این پارامتر، به ترتیب باعث کاهش ۳۹٪ و ۴۴٪ خطای گردی در فرزکاری مارپیچ و پروفایل شده است. علت این پدیده را می‌توان مشابه بخش ۴-۱ در افزایش پایداری فرایند دانست؛ اما در شکل ۵ (b) ملاحظه می‌شود که افزایش نرخ پیشروی روندی متفاوت با اثر سرعت برشی دارد. افزایش نرخ پیشروی، به دلیل بیش‌تر شدن نیروی ماشین‌کاری، به ترتیب باعث افزایش ۴۳٪ و ۴۷٪ خطای گردی در استراتژی‌های فرزکاری مارپیچ و پروفایل شده است.

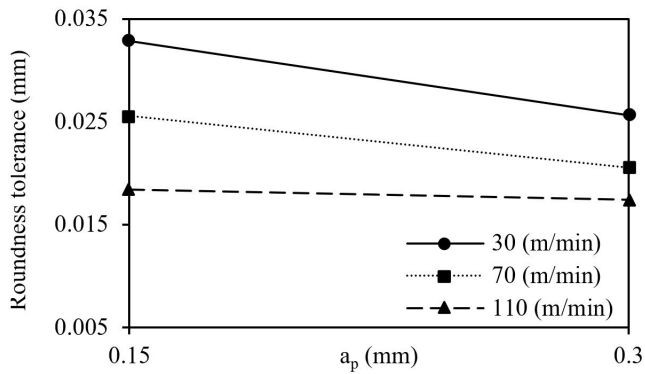


Fig. 6. Interaction effect of cutting speed and depth of cut on the roundness error in helical milling

شکل ۶: تاثیر برهم کنش سرعت برشی و عمق برش بر خطای گردی در فرزکاری مارپیچ

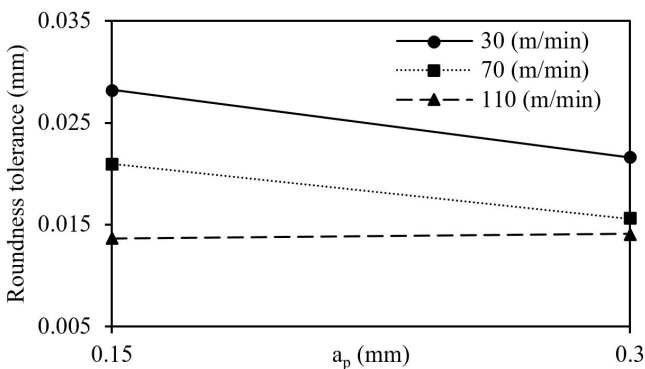


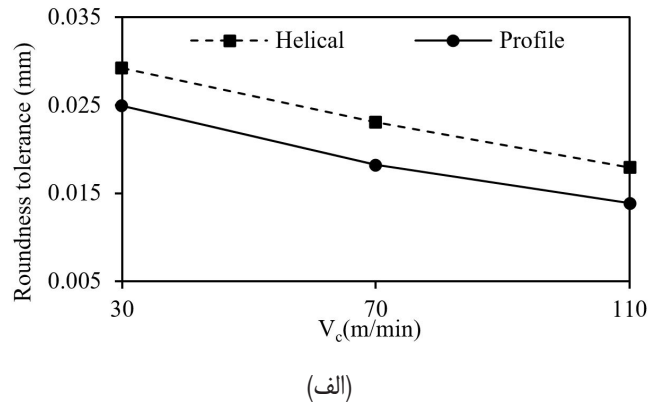
Fig. 7. Effect of interactions of cutting speed and depth of cut on the roundness error in profile milling

شکل ۷: تاثیر برهم کنش سرعت برشی و عمق برش بر خطای گردی در فرزکاری پروفایل

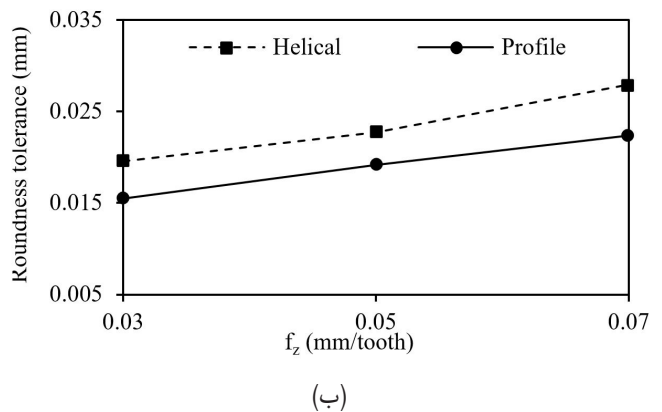
۳-۴- تلرانس استوانه‌ای

تلرانس استوانه‌ای را می‌توان مجموع سه تلرانس، گردی در چند مقطع، تلرانس مستقیم بودن و موازی بودن در نظر گرفت. با استفاده از روش تحلیل آنالیز واریانس، داده‌های به‌دست‌آمده هر دو استراتژی تحلیل شد. جدول ۷ و جدول ۸ به ترتیب مدل توسعه داده شده آنالیز واریانس دو استراتژی فرزکاری مارپیچ و پروفایل را نشان می‌دهند. در هر دو مدل تمامی عوامل اصلی آزمایش مؤثر و معنادار شناخته شدند. برهم کنش نرخ پیشروی و عمق برش در فرزکاری پروفایل تنها برهم کنش مؤثر بود.

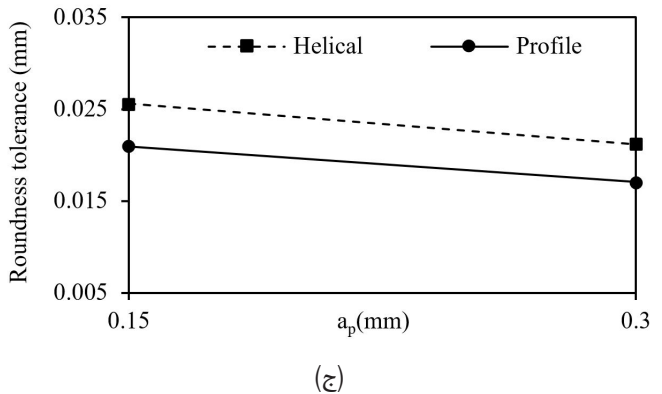
شکل ۸ نمودارهای تأثیر پارامترهای برشی بر خطای استوانه‌ای در دو استراتژی فرزکاری مارپیچ و فرزکاری پروفایل را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود روند تغییرات تلرانس استوانه‌ای با افزایش پارامترهای برشی همانند تلرانس گردی می‌باشد که نشان‌دهنده وابستگی این دو تلرانس به یکدیگر است. با افزایش سرعت برشی، خطای استوانه‌ای سوراخ‌های تولیدی در هر دو روش ۳۶٪ کاهش یافته است. به‌علاوه افزایش نرخ پیشروی در سوراخ‌های تولیدی با روش فرزکاری مارپیچ و پروفایل به ترتیب باعث افزایش ۶۲٪ و ۶۸٪ خطای استوانه‌ای شده است.



(الف)



(ب)

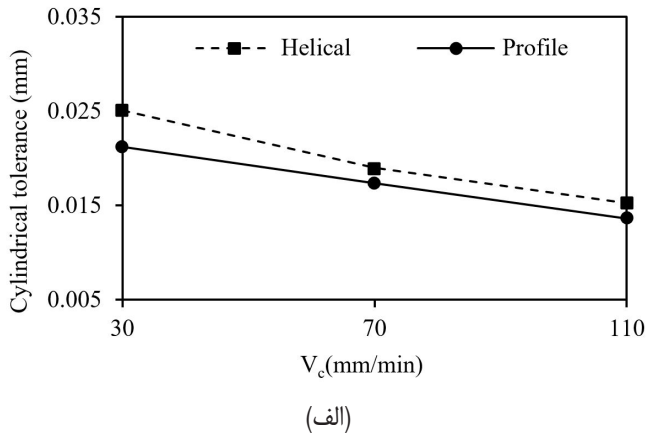


(ج)

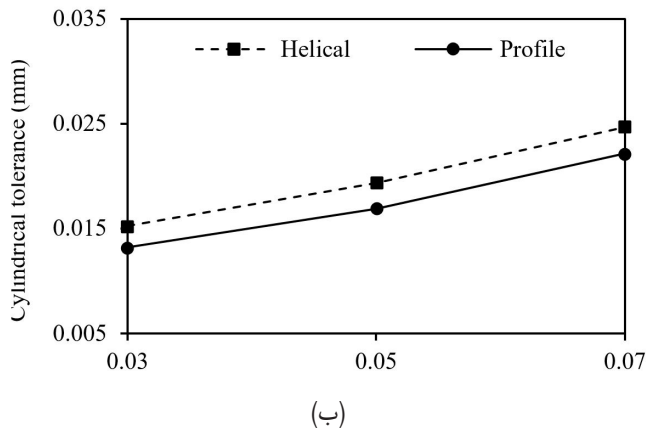
Fig. 5. Effect of a) cutting speed, b) feed rate, c) depth of cut, on the roundness error of the helical and profile milled holes

شکل ۵: تأثیر الف) سرعت برشی ب) نرخ پیشروی ج) عمق برش بر خطای گردی سوراخ‌ها در فرزکاری مارپیچ و پروفایل

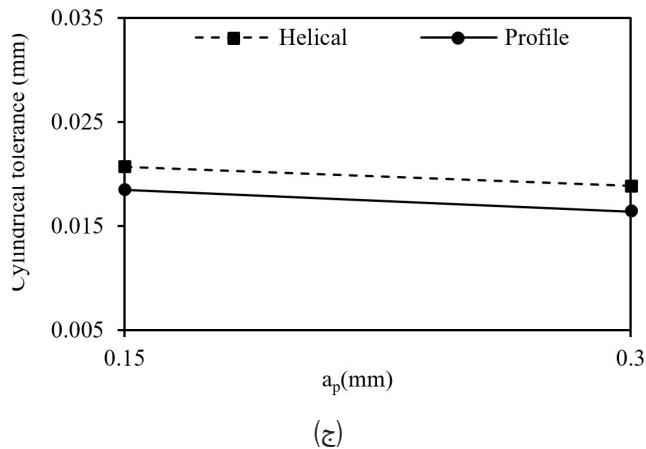
میان‌یابی انجام‌شده توسط کنترلر دستگاه فقط در دو جهت با یکدیگر جمع می‌شود. درحالی‌که در استراتژی فرزکاری مارپیچ براده‌برداری به‌طور هم‌زمان در سه جهت انجام می‌گیرد و به تبع آن خطای میان‌یابی سه جهت با یکدیگر جمع شده و خطای بیش‌تری به وجود می‌آید. این امر باعث می‌شود تا تلرانس گردی به وجود آمده در روش فرزکاری پروفایل خطای کم‌تری نسبت به روش فرزکاری مارپیچ داشته باشد. یکی دیگر از دلایل این تفاوت، نیروی برش کمتر در فرزکاری پروفایل است.



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 8. Effect of a) cutting speed, b) feed rate, c) depth of cut, on the cylindricity error of the holes machined by helical and profile milling

شکل ۸: تأثیر الف) سرعت برشی ب) نرخ پیشروی ج) عمق برش بر خطای استوانه‌ای سوراخ‌ها در فرزکاری مارپیچ و پروفایل

۳۰ متر بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۰۷ میلی‌متر بر دندانه و عمق برش ۰/۱۵ میلی‌متر توسط استراتژی فرزکاری مارپیچ ایجاد شد.

شکل ۱۱ پروفیل این سوراخ را نشان می‌دهد. مقدار محدوده خطای گردی برابر ۰/۰۳۸ میلی‌متر در مقطع ۲ میلی‌متری از سطح، ۰/۰۲۹ میلی‌متر در مقطع ۵ میلی‌متری از سطح و ۰/۰۳۴ میلی‌متر در مقطع ۸ میلی‌متری از سطح نیز بوده است. با مشاهده پروفیل سوراخ می‌توان دریافت که منحنی

جدول ۷: آنالیز واریانس مدل تolerانس استوانه‌ای در فرزکاری مارپیچ

Table 7. ANOVA of the cylindricity tolerance model in helical milling

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مقدار F	مقدار P	سهم تأثیر (%)
V_c	۰/۰۰۰۲۹۴۶	۲	۸۷/۰۷	۰	۴۹/۳
f_z	۰/۰۰۰۲۶۸۷	۲	۷۹/۳۹	۰	۴۴/۹
a_p	۰/۰۰۰۰۱۴۶	۱	۸/۶۲	۰/۰۱۲	۲/۴
خطا	۰/۰۰۰۰۲۰۳	۱۲	-	-	۳/۴
کل	۰/۰۰۰۵۹۸۲	۱۷	-	-	۱۰۰

جدول ۸: آنالیز واریانس مدل تolerانس استوانه‌ای در فرزکاری پروفایل

Table 8. ANOVA of the cylindricity tolerance model in profile milling

عامل	مجموع مربعات	درجه آزادی	مقدار F	مقدار P	سهم تأثیر (%)
V_c	۰/۰۰۰۱۷۴۰	۲	۳۸/۵۴	۰	۳۶/۳
f_z	۰/۰۰۰۲۴۲۸	۲	۵۳/۷۷	۰	۵۰/۶
a_p	۰/۰۰۰۰۱۹۶	۱	۸/۷۰	۰/۰۱۵	۴/۱
$f_z * a_p$	۰/۰۰۰۰۲۰۶	۲	۴/۵۷	۰/۰۳۹	۴/۳
خطا	۰/۰۰۰۰۲۲۶	۱۰	-	-	۴/۷
کل	۰/۰۰۰۴۷۹۷	۱۷	-	-	۱۰۰

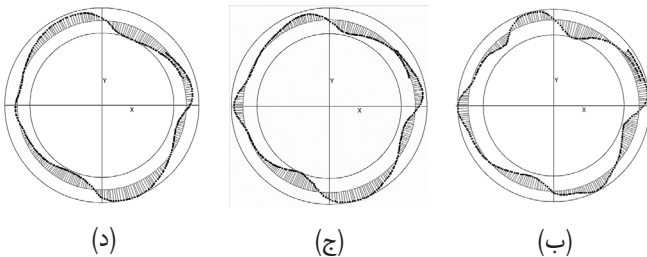
نکته حائز اهمیت در این نمودارها روند تغییر خطای استوانه‌ای سوراخ با عمق برش بوده که با افزایش عمق برش، این تolerانس بسته‌تر می‌شود. دلیل این پدیده را می‌توان در کاهش مسیر ابزار و کم شدن خطای میان‌یابی ماشین‌ابزار در هر دو استراتژی فرزکاری مارپیچ و پروفایل دانست.

نمودار برهم‌کنش سرعت برشی و عمق برش در فرزکاری پروفایل در شکل ۹ نشان داده شده است. با مشاهده این نمودار می‌توان دریافت که اثر عمق برش در سرعت‌های برشی بالا بر تolerانس استوانه‌ای مشهودتر است. در حالت کلی تolerانس استوانه‌ای سوراخ‌های تولیدی توسط استراتژی فرزکاری پروفایل از استراتژی فرزکاری مارپیچ بسته‌تر است. دلیل این امر همانند تolerانس گردی، براده برداری در دو بعد و خطای میان‌یابی کمتر این روش نسبت به فرزکاری مارپیچ است.

با توجه به جدول ۲، کم‌ترین مقدار خطای گردی و استوانه‌ای به ترتیب در آزمایش‌های شماره ۱۱ و ۱۲ در استراتژی فرزکاری پروفایل ایجاد شد. شکل ۱۰ پروفیل سوراخ با کم‌ترین مقدار خطای استوانه‌ای سوراخ را نشان می‌دهد (۰/۰۰۸ میلی‌متر). این سوراخ با سرعت برشی ۱۱۰ متر بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۰۳ میلی‌متر بر دندانه و عمق برش ۰/۳ میلی‌متر ایجاد شده است. نتایج بیانگر شباهت منحنی پروفیل سوراخ در سه مقطع اندازه‌گیری شده می‌باشد که خود علت اصلی کمینه‌بودن تolerانس استوانه‌ای است. بیش‌ترین مقدار خطای گردی و استوانه‌ای نیز در آزمایش شماره ۷ با سرعت برشی



(الف)



(د)

(ج)

(ب)

Fig. 11. The hole number 7, a) cylindricity profile, roundness profile at section b) 2 millimeters from surface, c) 5 millimeters from surface, d) 8 millimeters from surface

شکل ۱۱: سوراخ شماره ۱۲ الف) پروفیل استوانه‌ای، پروفیل گردی در فاصله ب) ۲ میلی‌متری از سطح ج) ۵ میلی‌متری از سطح د) ۸ میلی‌متری از سطح

برش محوری و نرخ پیشروی بر آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. تحلیل آنالیز واریانس نیز برای مدل‌های ایجاد شده در تمامی آزمایش‌ها انجام گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده، سوراخ‌های ایجاد شده در روش فرزکاری مارپیچ ابعاد دقیق‌تری داشتند، در حالی که تolerانس‌های هندسی سوراخ‌های تولیدی با استفاده از روش فرزکاری پروفایل (تولانس گردی و استوانه‌ای)، بسته‌تر بودند.

افزایش سرعت برشی سبب کاهش خطاهای ابعادی و هندسی سوراخ‌های تولیدی در هر دو استراتژی فرزکاری شده، در سوی دیگر افزایش نرخ پیشروی باعث افزایش خطاهای ابعادی و هندسی سوراخ‌های ایجاد شده در هر دو استراتژی شده است. در حالی که بیش تر شدن عمق برش، افزایش خطای ابعادی و کاهش خطای هندسی را در پی داشت.

سوراخ ایجاد شده با روش فرزکاری مارپیچ، با سرعت برشی ۱۱۰ متر بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۰۳ میلی‌متر بر دندانه و عمق برش ۰/۱۵ میلی‌متر، با تolerانس ۰/۰۰۱ میلی‌متر کم‌ترین انحراف را از اندازه اسمی قطر سوراخ داشت. همچنین، کم‌ترین مقدار خطای استوانه‌ای در فرزکاری پروفایل به میزان ۰/۰۰۸ میلی‌متر و در سرعت برشی ۱۱۰ متر بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۰۳ میلی‌متر بر دندانه و عمق برش ۰/۳ میلی‌متر به دست آمد.

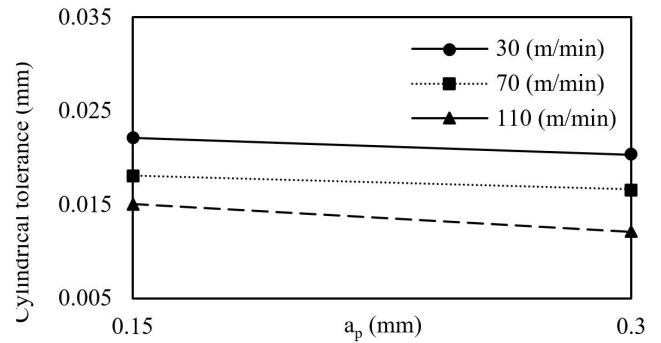
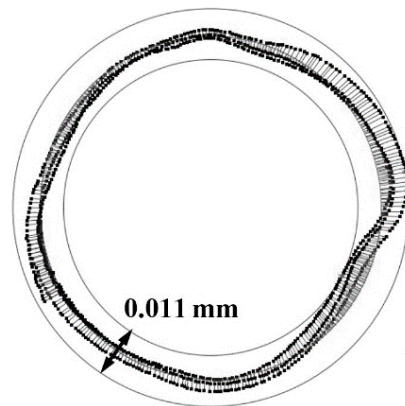
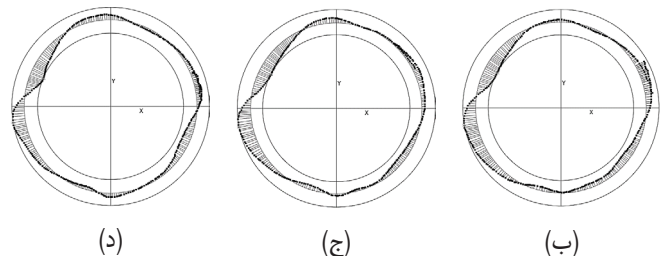


Fig. 9. Effect of interactions of feed rate and depth of cut on the cylindrical error in profile milling

شکل ۹: تاثیر برهم‌کنش نرخ پیشروی و عمق برش محوری بر خطای استوانه‌ای در فرزکاری پروفایل



(الف)



(د)

(ج)

(ب)

Fig. 10. The hole number 12 a) cylindricity profile, roundness profile at section b) 2 millimeters from surface, c) 5 millimeters from surface, d) 8 millimeters from surface

شکل ۱۰: سوراخ شماره ۱۲ الف) پروفیل استوانه‌ای، پروفیل گردی در فاصله ب) ۲ میلی‌متری از سطح ج) ۵ میلی‌متری از سطح د) ۸ میلی‌متری از سطح

پروفیل در سه مقطع تغییرات محسوسی داشته است، به طوری که اندازه پروفیل سوراخ در مقطع اول به سمت حد پایین و در مقطع انتهایی، به سمت حد بالای تolerانس بوده است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تolerانس‌های ابعادی و هندسی سوراخ‌های ایجاد شده با روش فرزکاری مارپیچ و پروفایل و همچنین تأثیر سرعت برشی، عمق

- cryogenically treated HSS drills, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 26(2) (2015) 295-305.
- [7] G. Urbicain, D. Olvera, L.L. de Lacalle, I. Zamakona, P. Rodal, New Strategies For Hole Making In Ti-6Al-4V, in: *Third Manufacturing Engineering Society International Conference: MESIC-09*, AIP Publishing, 2009, pp. 361-369.
- [8] E. Brinksmeier, S. Fangmann, I. Meyer, Orbital drilling kinematics, *Production engineering*, 2(3) (2008) 277-283.
- [9] Y. Shan, N. He, L. Li, W. Zhao, X. Qin, Orbital milling hole of aerospace Al-alloy with big pitch, *Transactions of Tianjin University*, 17 (2011) 329-335.
- [10] H. Li, G. He, X. Qin, G. Wang, C. Lu, L. Gui, Tool wear and hole quality investigation in dry helical milling of Ti-6Al-4V alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(5-8) (2014) 1511-1523.
- [11] M.H. Saadatbakhsh, A. Rasti, M.H. Sadeghi, H. Hassanpour, A.R. Omiddodman, Empirical study of dimensional and geometrical tolerances in helical milling of aisi 4340 steel, *Modares Mechanical Engineering*, 14(15) (2015) 119-126 (In Persian).
- [1] J.F.W. Galyer, C.R. Shotbolt, *Metrology for engineers*, Cassell, 1990.
- [2] H. Tönshoff, W. Spintig, W. König, A. Neises, Machining of holes developments in drilling technology, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 43(2) (1994) 551-561.
- [3] B. Denkena, D. Boehnke, J. Dege, Helical milling of CFRP-titanium layer compounds, *CIRP Journal of manufacturing Science and Technology*, 1(2) (2008) 64-69.
- [4] R. Iyer, P. Koshy, E. Ng, Helical milling: an enabling technology for hard machining precision holes in AISI D2 tool steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(2) (2007) 205-210.
- [5] D. Olvera, L.N.L. de Lacalle, G. Urbicain, A. Lamikiz, P. Rodal, I. Zamakona, Hole making using ball helical milling on titanium alloys, *Machining Science and Technology*, 16(2) (2012) 173-188.
- [6] A. Çiçek, T. Kıvık, E. Ekici, Optimization of drilling parameters using Taguchi technique and response surface methodology (RSM) in drilling of AISI 304 steel with

Please cite this article using:

H. Imani, J. Hashemi Khosrowshahi, M. H. Sadeghi, A. Rasti, An Experimental Comparison of Dimensional and Geometrical Tolerances in Milled Holes on AISI D2 Steel, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(3) (2018) 671-681.
DOI: 10.22060/mej.2017.12303.5308

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



