Archive of SID

پانزدهمین سمینار ملی مهندسی سطح
پژوهشگاه مواد و انرژی
۲۹ و ۳۰ مهرماه ۱۳۹۳

انجمن علوم و تکنولوژی سطح ایران

مطالعه تلرانس‌های ابعادی و هندسی سوراخ تولیدشده در فرآیند فرزکاری مارپیچ

حامد حسن‌پور[۱]، فرهاد محمدی پیراسته[۲]، مجید یوسفی تبار[۳]

[۱]. تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک (دانشجوی دکتری)
[۲]. تهران، دانشگاه آزاد واحد پرند (دانشجوی کارشناسی‌ارشد)
[۳]. تهران، دانشگاه مالک اشتر تهران (کارشناس ارشد)

چکیده

توانایی ساخت یک محصول بر اساس فاکتورهایی همچون تلرانس‌های ابعادی و هندسی مورد ارزشیابی قرار می‌گیرد. در واقع مهم‌ترین عنصر در نقشه ساخت یک قطعه صنعتی، مشخصه‌های تلرانسی آن است. هدف از تحقیق حاضر، مطالعه تجربی دقت سوراخ تولید شده به کمک فرآیند نوین فرزکاری مارپیچ، روی فولاد آلیاژی ۱.۷۷۶۵ می‌باشد. در این فرآیند، سوراخ توسط ابزار فرزکاری متحرک روی یک مسیر مارپیچ تولید می‌شود. با استفاده از این روش، سوراخی با کیفیت بالا تولید شده و دیگر نیازی به پرداخت‌کاری (بورینگ) آن نخواهد بود. روش طراحی آزمایش تاگوچی به منظور بررسی اثر پارامترهای فرآیند فرزکاری شامل؛ سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش محوری و سختی قطعه‌کار روی تلرانس‌های ابعادی و هندسی سوراخ به کار گرفته شد. همچنین اثر استفاده از دو روش روان‌کاری با حداقل سیال برشی و فرزکاری خشک نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که روش فرزکاری مارپیچ می‌تواند جایگزین مناسبی برای سوراخ‌کاری سنتی باشد. همچنین سرعت برشی به عنوان اصلی ترین پارامتر، نقش موثری بر بهبود کیفیت سوراخ تولیدی داشت. از سوی دیگر روش روان‌کاری با حداقل سیال‌برشی و روغن پایه گیاهی بهترین عملکرد روانکاری را در مقایسه با استفاده از روغن معدنی و ماشین‌کاری خشک از خود نشان داد.

واژه‌های کلیدی: فرزکاری مارپیچ؛ سوراخ‌کاری؛ تلرانس‌های های ابعادی و هندسی؛ روش حداقل سیال برشی.

[۱]. h.hassanpour@modares.ac.ir

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

در فرآیند سوراخ‌کاری، به علت برقراری انطباق بین مجموعه‌ها و اتصالات میان آن‌ها، کوچک‌ترین خطا و اشتباهی باعث رد شدن محصول تولیدی می‌گردد. توانایی ساخت یک محصول بر اساس فاکتورهای خروجی مانند تلرانس‌های ابعادی و هندسی مورد ارزشیابی قرار می‌گیرد، به‌طوری‌که این فاکتورها طول عمر و نحوه عملکرد قطعه را در مجموعه بکار گرفته‌شده مشخص می‌کنند. از این‌رو مهم‌ترین پارامتر در نقشه ساخت یک قطعه صنعتی مشخصه‌های ابعادی و تلرانسی است. یکی از روش‌های نوین سوراخ‌کاری، به‌منظور ایجاد سوراخی با دقت و کیفیت بالا، فرزکاری مارپیچ[1] است. این فرآیند به تولید سوراخ توسط ابزار فرزکاری متحرک روی یک مسیر مارپیچ اطلاق می‌شود. در واقع سوراخ‌کاری معمولی دارای محدودیت‌هایی می‌باشد. در این روش سرعت برشی در نوک ابزار صفر بوده و به دنبال آن، نیروی محوری برش بالا می‌رود. این پدیده شرایط نامطلوبی ازجمله انحراف ابزار و کاهش دقت ابعادی سوراخ را به همراه دارد [۱]. همچنین در عملیات سوراخ‌کاری توسط مته، به دلیل هندسه گوه‌ای شکل ابزار و تغییر شکل پلاستیکی ماده‌ی قطعه‌کار، پلیسه‌ای[2] در دهانه ابتدایی و انتهایی سوراخ ایجاد می‌گردد [۲].

با استفاده از فرزکاری مارپیچ می‌توان به نحو چشمگیری تولید پلیسه لبه سوراخ را کاهش داد. از مزایای دیگر این روش می‌توان به برش هموار در طول عملیات، نیروی محوری کوچک و دقت بالاتر در مقایسه با سوراخ‌کاری سنتی اشاره کرد. برتری دیگر این روش نسبت به سوراخ‌کاری معمولی، عدم نیاز به تعویض ابزار برای تولید سوراخ‌هایی با قطرهای مختلف است که به‌موجب آن، انعطاف‌پذیری سیستم افزایش و زمان و هزینه‌های ماشین‌کاری کاهش می‌یابد [۳-۵]. از این رو فرزکاری مارپیچ به‌طور گسترده‌ای در ساخت قطعات و ابزارآلات در صنایع هوافضا، نیروگاهی و ادوات حفاری کاربرد دارد.

قطر اسمی سوراخ نهایی در فرزکاری مارپیچ، ترکیبی از قطر ابزار و قطر مسیر مارپیچ است. در این فرآیند سه نوع حرکت همزمان، شامل چرخش ابزار به دور محور خود، چرخش حول دایره مسیر مارپیچ و حرکت محوری وجود دارد در فرزکاری مارپیچ هر چه نسبت قطر سوراخ به قطر ابزار بیشتر شود، نرخ برداربرداری بیشتر شده و در نتیجه راندمان فرآیند افزایش پیدا خواهد کرد.[۳].

فاکتور موثر دیگر در تولید سوراخ باکیفیت و دقت بالا، نحوه دفع حرارت تولیدی حین فرآیند با استفاده از روان‌کاری و خنک‌کاری مناسب است. استفاده از روش‌های سنتی روان‌کاری، علاوه بر افزایش چشمگیر هزینه‌های ماشین‌کاری و مصرف بیش از حد سیال برشی، عدم توانایی کافی جهت نفوذ کامل سیال به منطقه برش را در پی دارد. از سوی دیگر، توجه روزافزون به مقوله‌های زیست‌محیطی فعالیت‌های، صاحبان صنایع را وادار به کاهش استفاده از سیالات برشی پایه معدنی کرده است [۶]. امروزه تحقیقات زیادی به‌منظور یافتن روش‌هایی جهت جایگزین کردن سیالات کم‌خطر برای محیط‌زیست، کم‌هزینه برای صنعت و کارآمد از نظر

---

۱. Helical Milling
۲. Burr

www.SID.ir

Archive of SID

خواص روان‌کاری صورت گرفته است. ازجمله این روش‌ها می‌توان روان‌کاری جامد، خنک‌کاری برودتی و همچنین روان‌کاری نیمه‌خشک (MQL[1]) با استفاده از سیالات تجدیدپذیر مانند روغن‌های پایه گیاهی[2] را نام برد [۷]. در ادامه به برخی از مطالعات صورت گرفته در زمینه ایجاد سوراخ به روش فرزکاری مارپیچ اشاره شده است.

ایبر و همکاران [۸] به مقایسه تجربی دو فرآیند سوراخ‌کاری مارپیچ و معمولی برای تولید سوراخ دقیق در فولاد ابزار AISI D۲ با سختی بالا پرداختند که برتری فرزکاری مارپیچ در پروفیل سوراخ تولیدشده گزارش شد. همچنین نشان داده شد که پروفیل گردی در ابزار یکپارچه بهتر از نوع اینسرتی است.

دنکنا و همکاران [۳] عملیات فرزکاری مارپیچ را روی قطعه کامپوزیتی شامل تیتانیوم و فیبر انجام دادند و با تحلیل براده به این مهم رسیدند که در فرزکاری مارپیچ، ضخامت براده نتراشیده شده دارای رفتار سینوسی می‌باشد. در نتیجه براده‌های تولیدی در روش مارپیچ منفصل و کوچک بوده درحالی‌که سوراخ‌کاری معمولی براده‌هایی پیوسته و بزرگ تولید می‌کند. آن‌ها همچنین نشان دادند که به علت مکانیزم حرکتی سه جهته در فرزکاری مارپیچ، نیاز به ماشین‌ابزاری با نرخ تغذیه متغیر و صلبیت کافی بوده و فقدان این شرایط باعث به هم ریختن تلرانس‌ها و خطای ابعادی می‌شود.

شان و همکاران [۵] مطالعاتی در زمینه افزایش عمق برش محوری (گام مارپیچ) فرزکاری مارپیچ انجام دادند و اذعان داشتند که طول مسیر ماشین‌کاری در فرآیند فرزکاری مارپیچ بسیار بیشتر از سوراخ‌کاری سنتی بوده و با افزایش مقدار گام، طول این مسیر کاهش می‌یابد. نیروهای برشی و در پی آن لرزش و ارتعاشات ابزار نیز با افزایش گام مارپیچ بیشتر شده که این پدیده منجر به وخیم‌تر شدن کیفیت سوراخ می‌گردد.

ساساهارا و همکاران [۹] فرزکاری مارپیچ را روی آلیاژ آلومینیوم و با استفاده از روان‌کاری نیمه‌خشک انجام دادند و نتیجه گرفتند که در هنگام استفاده از یک نازل برای سیستم خنک‌کاری، پروفیل مقطع دایره به یک‌طرف کشیده شده و در حالت دو نازله تلرانس‌های بهتری بدست خواهد آمد. همچنین زبری سطح در حالت MQL و روش سنتی تقریباً یکسان بوده ولی در مقایسه با حالت خشک کاهش قابل‌توجهی داشته است.

لی و همکاران [۴] به بررسی کیفیت سوراخ در فرزکاری مارپیچ خشک آلیاژ Ti۶Al۴V پرداختند و گزارش کردند که بدترین کیفیت سوراخ در سوراخ‌کاری با ابزار ساییده شده به وجود می‌آید. علت این پدیده تولید حرارت بالاتر در استفاده از ابزار کندشده بود. در واقع با افزایش زمان ماشین‌کاری و سایش ابزار، کیفیت سطح نامطلوبی به وجود خواهد آمد.

ریبرو و همکاران [۱۰] نیز تلرانس‌های ابعادی و هندسی را در فرزکاری یک قالب صنعتی از جنس فولاد ابزار سخت شده H۱۳ مورد مطالعه قراردادند. نشان داده شد که فرزکاری مخالف تلرانس‌های دقیق‌تری در سطوح داخلی و خارجی نتیجه می‌دهد.

---

۱. Minimum Quantity Lubrication
۲. Vegetable Based Oil

www.SID.ir

Archive of SID

هدف از تحقیق حاضر، مطالعه تجربی تلرانس‌های ابعادی و هندسی سوراخ تولیدشده با استفاده از فرآیند فرزکاری مارپیچ روی فولاد AISI۱.۷۷۶۵ با دو نوع سختی و دو نوع سیستم روان‌کاری می‌باشد. به این منظور از روش طراحی آزمایش تاگوچی بهره گرفته‌شد و اثر پارامترهای برشی شامل سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش محوری روی تلرانس‌های ابعادی و هندسی سوراخ مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش تحقیق

آزمایش‌ها روی فولاد آلیاژی AISI۱.۷۷۶۵ با دو نوع سختی انجام شد. آزمایش‌های طرح‌ریزی شده روی دستگاه فرز کنترل عددی سه محوره کنترل همزمان مدل S۱۳۵۴A، با کنترلر میتسوبیشی و حداکثر دور اسپیندل ۸۰۰۰ دور بر دقیقه انجام شد. ابزار بکار گرفته‌شده نیز، تیغچه فرز سرتخت یکپارچه، ۴پره، به قطر ۶ میلی‌متر، با زاویه مارپیچ ۳۰ درجه و روکش TiAlN، ساخت شرکت گریسون[۱] بود. از سیستم روان‌کاری MQL نیز با دو نازل در زاویه ۴۵ درجه نسبت به محور ابزار بهره گرفته شد. آزمایش‌ها در حالت MQL با دو روغن معدنی و گیاهی و نیز حالت خشک با هوای فشرده انجام گرفت. دبی خروجی روغن مورد استفاده در سیستم MQL برابر با ۱۰۰ میلی‌لیتر بر ساعت و فشار هوای ۳ بار بودند. شکل ۱ تصویر چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری تلرانس‌های ابعادی و هندسی نیز از دستگاه ماشین اندازه‌گیری مختصات[۲] مدل LH۸۷ ساخت شرکت ونزل[۳]، با قطر پراب ۲ میلی‌متر از نوع تماسی و با دقت ۲/۷ میکرومتر استفاده گردید.

از روش طراحی آزمایش تاگوچی به‌منظور کاهش تعداد آزمایش‌ها و بررسی و ارزیابی پنج فاکتور سختی قطعه‌کار، سرعت برشی، سرعت پیشروی، عمق برش محوری و نوع سیستم روان‌کاری استفاده شده. با استفاده از این روش طراحی آزمایش، می‌توان با اطمینان بالا و در عین حال صرف زمان کمی، تاثیر پارامترهای ورودی را روی خروجی آزمایش بررسی کرد. برای انجام آزمایش‌ها از آرایه متعامد L۱۸ استفاده گردید و در مجموع ۱۸ آزمایش انجام شد.

۱ Garryson
۲. Coordinate Measuring Machine (CMM)
۳. Wenzel

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱ متغیرهای آزمایش را به همراه سطوح آن‌ها نشان می‌دهد. در هر آزمایش، با هدف ایجاد سوراخی به قطر ۱۰ میلی‌متر، فرآیند فرزکاری مارپیچ روی قطعه پیاده‌سازی شد. پس از آن و با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری مختصات، مقادیر اندازه اسمی و تلرانس گردی سوراخ تولیدی اندازه‌گیری شدند.

نتایج و بحث

جدول ۲: آرایه طراحی آزمایش L۱۸ به‌همراه تلرانس‌های اندازه‌گیری شده در هر آزمایش را نشان می‌دهد. در ادامه هرکدام از این خروجی‌ها به صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته‌است.

- اندازه اسمی سوراخ

اندازه اسمی یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های کیفیت سوراخ بوده و بیشترین تأثیرپذیری را از پارامترهای برشی دارا می‌باشد. شکل ۲ اثر فاکتورهای مورد بررسی در این تحقیق را بر اندازه اسمی سوراخ به تصویر می‌کشند. مشاهده می‌شود که اندازه قطر سوراخ دارای مقدار کمینه ۱۰/۰۵ و بیشینه ۱۰/۱۸ می‌باشد. همچنین روند تغییرات نشان می‌دهد که روش روان‌کاری و سرعت برشی بیشترین سهم را در تغییرات تلرانس‌های ابعادی ایفا کرده و پارامترهای نرخ پیشروی، سختی قطعه‌کار و گام مارپیچ دارای سهم کمتری می‌باشند.

شکل ۲ (الف) نشان می‌دهد که با افزایش سختی قطعه‌کار، اندازه اسمی سوراخ تا حدودی بالاتر می‌رود، که علت را می‌توان در افزایش استحکام ماده و همچنین افزایش نیروهای ماشین‌کاری دانست [۱۰]. علاوه بر این، دوبدگی ابزار در اثر نفوذپذیری کمتر ابزار در داخل قطعه‌کار سخت‌تر، بیشتر می‌شود. همچنین در شکل ۲ (ب) مشاهده می‌شود که افزایش سرعت برشی موجب بهبود تلرانس‌های ابعادی قطعه‌کار شده و سوراخ دقیق‌تری تولید می‌کند. سرعت برشی تنها پارامتری است که چنین اثر مثبتی روی کیفیت سوراخ دارد. در واقع افزایش این پارامتر موجب افزایش حرارت و نرم‌شدن ماده در ناحیه برش شده و بهبود تلرانس‌ها را به‌همراه دارد. با توجه به شکل ۲ (ج) نیز اثر پیشروی روی دقت سوراخ به نحوی است که نرخ تغذیه بیشتر، باعث افزایش ضخامت براده نتراشیده شده و به‌موجب آن، نیروی هدایت‌کننده در راستای مسیر پیشروی ابزار ازدیاد می‌یابد. این افزایش نیرو، انحراف ابزار را در پی داشته و در نتیجه منجر به دورتر شدن قطر سوراخ از اندازه اسمی آن می‌شود [۴].

شکل ۲ (د) تأثیر افزاینده عمق برشی محوری را روی اندازه اسمی سوراخ نشان می‌دهد. بر اساس سینماتیک فرآیند فرزکاری مارپیچ، با افزایش عمق برشی محوری، گام مارپیچ و در پی آن نیروهای برش افزایش می‌یابد. این افزایش نیروی برشی، باعث بالا رفتن لرزش و ارتعاشات در فرآیند شده و وخیم‌تر شدن کیفیت سوراخ را به دنبال دارد. در نهایت شکل ۲ (ه) اثر روش‌های مختلف روان‌کاری را روی اندازه اسمی سوراخ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تغییر حالت روانکاری بیشترین تاثیر را روی تغییرات اندازه سوراخ دارد. این تأثیرگذاری

www.SID.ir

Archive of SID

بالاتر، ناشی از توانایی بالای روش MQL در مقایسه با روش‌های دیگر است. دلیل برتری این روش را می‌توان در تولید یک لایه فیلم روغن در منطقه برش مابین سطح در حال ماشین‌کاری و ابزار برش دانست. این لایه تولیدشده در زمان استفاده از روغن گیاهی به علت ویسکوزیته بالای آن، بهتر می‌تواند اصطکاک و حرارت را کاهش دهد. همچنین روغن‌های گیاهی در مقایسه با نوع معدنی مخصوصاً در مرزهای روان‌کاری دارای قطبیت بالایی هستند، این ویژگی به آن‌ها اجازه می‌دهد تا پیوند قوی‌تری در سطح روان‌کاری ایجاد کرده و پایداری لایه روانکار را افزایش دهند [۶]. حالت خشک یا هوای فشرده، به دلیل عدم توانایی در روان‌کاری و خنک‌کاری ناحیه برش، بدترین نتایج را نتیجه داد.

- **تلرانس گردی**

تلرانس گردی، میزان خروج از گردی در یک مقطع از سوراخ را به صورت عددی بیان می‌کند. نتایج اندازه‌گیری این تلرانس نیز حاکی از تغییرات گردی مابین ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۳۵ میلی‌متر است. بیشترین انحراف در فرزکاری با سرعت پایین و در حالت استفاده از هوای خشک بدست آمد.

شکل ۳ اثر پنج پارامتر را بر تلرانس گردی سوراخ نشان می‌دهد. بررسی شیب نمودار نشان می‌دهد که سرعت برشی بازهم بیشترین تأثیر را روی این تلرانس داشته و در ادامه نوع سیستم خنک‌کاری، پیشروی، گام مارپیچ و سختی قطعه‌کار به ترتیب دارای بالاترین نقش هستند.اثر سختی قطعه‌کار روی تلرانس‌های گردی (شکل ۳ (الف))، مشابه قبل است. تأثیر تغییرات سرعت برشی بر تلرانس‌های گردی در شکل ۳ (ب) نیز قابل مشاهده است. این نمودار نشان‌دهنده اثر مثبت افزایش سرعت برشی روی تلرانس‌های گردی می‌باشد. علت این پدیده را می‌توان مشابه اثر سرعت برشی روی تلرانس‌های ابعادی، در افزایش پایداری فرآیند با بالا رفتن مقدار این پارامتر دانست. شکل ۳ (ج) نیز اثر نرخ پیشروی را بر تلرانس‌های گردی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که روند تغییرات تلرانس‌های گردی با نرخ پیشروی، مشابه تلرانس‌های ابعادی می‌باشد.

اما در شکل ۳ (د) بر خلاف نتیجه قبلی، با افزایش عمق برش محوری یا همان گام مارپیچ فرزکاری، انحراف گردی سوراخ کمتر شده و در نتیجه تلرانس‌های گردی کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش عمق برش محوری، هم نیروهای برشی و هم سطح درگیری ابزار با سوراخ بطور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش‌یافته و ابزار در هر مرحله باربرداری، با سطح بیشتری از قطعه‌کار درگیر می‌شود. این پدیده باعث می‌گردد که در نهایت سوراخی با پستی و بلندی کمتر به وجود آید. از سوی دیگر، با افزایش مقدار عمق برش محوری، تعداد حلقه‌های مارپیچ مسیر حرکت ابزار کاهش‌یافته و در نتیجه طول مسیر کوتاه‌تر می‌شود. این کاهش طول مسیر، خطاهای ناشی از ماشین‌ابزار و عوامل خارجی موثر بر عملیات را کمتر کرده و پایداری بیشتر فرآیند برش را به همراه دارد [۱۱].

همچنین در شکل ۳ (ه) اثر استفاده از روش‌های مختلف روان‌کاری را روی تلرانس‌های گردی سوراخ نشان

www.SID.ir

Archive of SID

داده شده است. با مقایسه این نمودار با شکل ۲ (ه) می‌توان دریافت که سهم تأثیرگذاری روش روان‌کاری روی تلرانس‌های گردی در مقایسه با تلرانس‌های ابعادی به نصف کاهش‌یافته است. همانند تلرانس‌های ابعادی، در اینجا نیز برتری روغن گیاهی نسبت به روغن معدنی و هوای فشرده مشهود است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش فرآیند فرزکاری مارپیچ به عنوان روشی نوین به‌منظور انجام سوراخ‌کاری روی فولاد ۱.۷۷۶۵ و در حضور سیستم روان‌کاری با حداقل سیال برشی و سوراخ‌کاری خشک مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی، اثر پارامترهای برشی شامل سرعت برشی، پیشروی و عمق برش محوری و سختی قطعه‌کار روی کیفیت سوراخ تولیدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده در این پژوهش به صورت خلاصه در ادامه آورده شده است.

۱) افزایش سرعت برشی به عنوان اصلی‌ترین پارامتر موثر بر کیفیت سوراخ موجب بهبود اندازه اسمی سوراخ تولیدی شده و تنها پارامتر دارای اثر مثبت روی تمامی معیارهای کیفیت سوراخ تولیدی می‌باشد.

۲) افزایش عمق برش محوری بر خلاف اثر آن روی تلرانس‌های ابعادی، باعث کاهش تلرانس‌های هندسی سوراخ تولیدی شده و میزان تأثیرگذاری آن روی تلرانس‌های استوانه‌ای دو برابر تلرانس‌های گردی است.

۳) نتایج حکایت از عملکرد بهتر سیال برشی پایه گیاهی در مقایسه با نوع معدنی روی کیفیت سوراخ داشته و می‌تواند به عنوان جایگزین مناسبی برای سیال‌های برشی تجدیدناپذیر باشد.

مراجع

[۱] H. Tönshoff, W. Spintig, W. König, A. Neises, Machining of holes developments in drilling technology, *CIRP Annals-Manufacturing Technology,* Vol. ٤٣, No. ٢, pp. ٥٥١-٥٦١, ١٩٩٤.

[٢] G. Byrne, D. Dornfeld, B. Denkena, Advancing cutting technology, *CIRP Annals-Manufacturing Technology,* Vol. ٥٢, No. ٢, pp. ٤٨٣-٥٠٧, ٢٠٠٣.

[٣] B. Denkena, D. Boehnke, J. Dege, Helical milling of CFRP–titanium layer compounds, *CIRP Journal of manufacturing Science and Technology,* Vol. ١, No. ٢, pp. ٦٤-٦٩, ٢٠٠٨.

[٤] H. Li, G. He, X. Qin, G. Wang, C. Lu, L. Gui, Tool wear and hole quality investigation in dry helical milling of Ti-٦Al-٤V alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. ١-١٣, ٢٠١٤.

[٥] Y. Shan, N. He, L. Li, W. Zhao, X. Qin, Orbital milling hole of aerospace Al-alloy with big pitch, *Transactions of Tianjin University,* Vol. ١٧, pp. ٣٢٩-٣٣٥, ٢٠١١.

[٦] S. Lawal, I. Choudhury, Y. Nukman, Application of vegetable oil-based metalworking fluids in machining ferrous metals—a review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. ٥٢, No. ١, pp. ١-١٢, ٢٠١٢.

[٧] M. Sadeghi, M. Haddad, T. Tawakoli, M. Emami, Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti–٦Al–٤V titanium alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. ٤٤, No. ٥-٦, pp. ٤٨٧-٥٠٠, ٢٠٠٩.

[٨] R. Iyer, P. Koshy, E. Ng, Helical milling: an enabling technology for hard machining precision holes in AISI D٢ tool steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. ٤٧, No. ٢, pp. ٢٠٥-٢١٠, ٢٠٠٧.

www.SID.ir

Archive of SID

[۹] H. Sasahara, M. Kawasaki, M. Tsutsumi, Helical feed milling with MQL for boring of aluminum alloy, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing,* Vol. ۲, pp. ۱۰۳۰-۱۰۴۰, ۲۰۰۸.

[۱۰] J. L. S. Ribeiro, S. B. Diniz, J. C. C. Rubio, A. M. Abrão, Dimensional and Geometric Deviations Induced by Milling of Annealed and Hardened AISI H۱۳ Tool Steel, *American Journal of Materials Science,* Vol. ۳, No. ۱, pp. ۱۴-۲۱, ۲۰۱۳.

[۱۱] J. Vivancos, C. Luis, J. Ortiz, H. González, Analysis of factors affecting the high-speed side milling of hardened die steels, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. ۱۶۲, pp. ۶۹۶-۷۰۱, ۲۰۰۵.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱: پارامترهای مورد بررسی و سطوح آن ها

فاکتورها	سطوح		
	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
سختی قطعه کار (H) (HRC)	۳۰	۴۵	
سرعت برشی (Vc) (m/min)	۱۰	۴۰	۷۰
پیشروی (fz) (mm/tooth)	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۷
عمق برش محوری (ap) (mm)	۰/۰۵	۰/۱	۰/۱۵
روان‌کاری (Lub)	MQL (معدنی)	MQL (گیاهی)	هوا

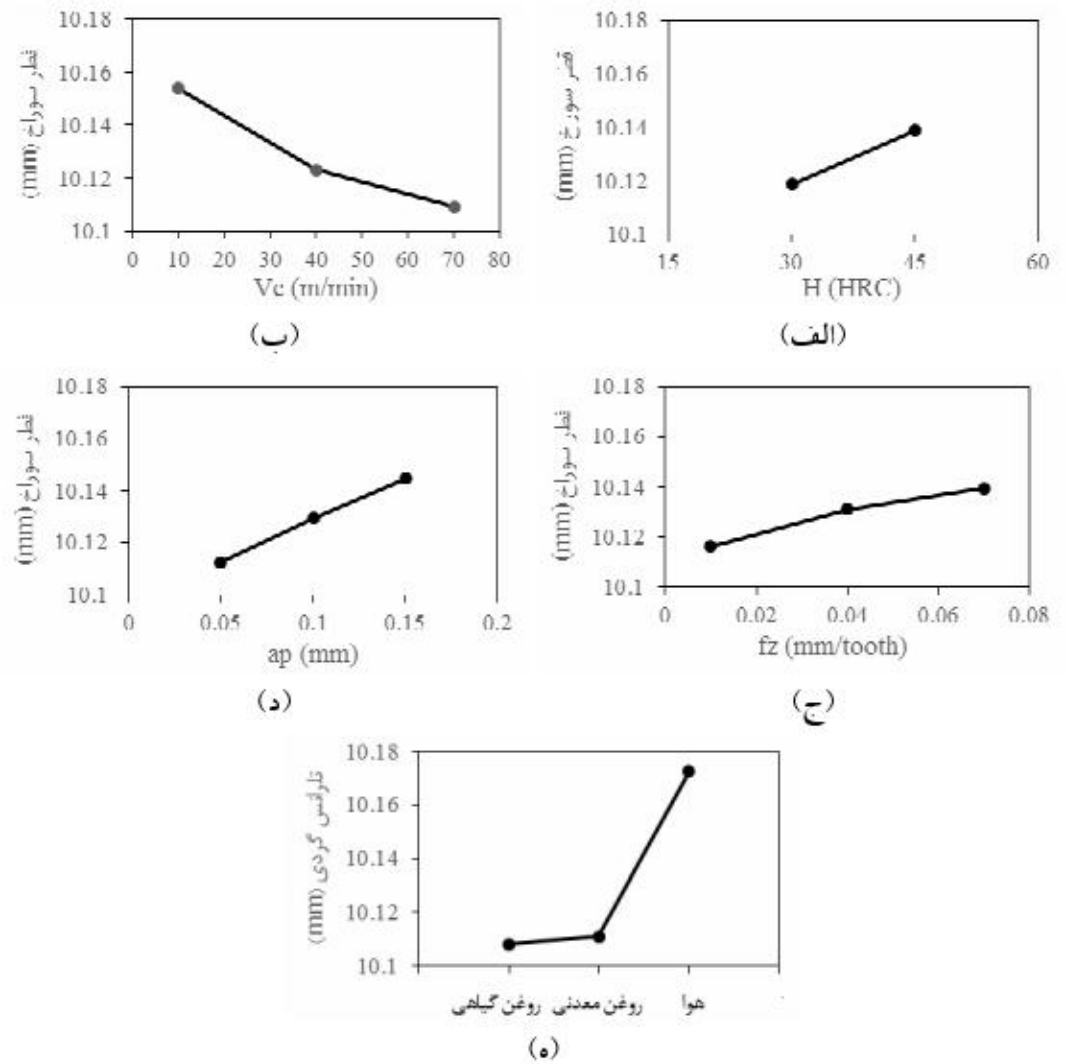
جدول ۲: آرایه طراحی آزمایش L_{18} به‌همراه تلرانس‌های اندازه‌گیری شده

شماره آزمایش	H	Vc	fz	ap	روان‌کاری	قطر سوراخ	تلرانس گردی
۱	۳۰	۱۰	۰/۰۱	۰/۰۵	گیاهی	۱۰/۱۰	۰/۰۳
۲	۳۰	۱۰	۰/۰۴	۰/۱	معدنی	۱۰/۱۲	۰/۰۳۲
۳	۳۰	۱۰	۰/۰۷	۰/۱۵	هوا	۱۰/۲	۰/۰۳۵
۴	۳۰	۴۰	۰/۰۱	۰/۰۵	معدنی	۱۰/۰۵	۰/۰۳۵
۵	۳۰	۴۰	۰/۰۴	۰/۱	هوا	۱۰/۱۸	۰/۰۳۴
۶	۳۰	۴۰	۰/۰۷	۰/۱۵	گیاهی	۱۰/۱۱	۰/۰۳
۷	۳۰	۷۰	۰/۰۱	۰/۱	گیاهی	۱۰/۰۷	۰/۰۲۵
۸	۳۰	۷۰	۰/۰۴	۰/۱۵	معدنی	۱۰/۱	۰/۰۲۸
۹	۳۰	۷۰	۰/۰۷	۰/۰۵	هوا	۱۰/۱۳	۰/۰۳۴
۱۰	۴۵	۱۰	۰/۰۱	۰/۱۵	هوا	۱۰/۲۲	۰/۰۳۵
۱۱	۴۵	۱۰	۰/۰۴	۰/۰۵	گیاهی	۱۰/۱۳	۰/۰۳۵
۱۲	۴۵	۱۰	۰/۰۷	۰/۱	معدنی	۱۰/۱۵	۰/۰۳۵
۱۳	۴۵	۴۰	۰/۰۱	۰/۱	هوا	۱۰/۱۴	۰/۰۳۲
۱۴	۴۵	۴۰	۰/۰۴	۰/۱۵	گیاهی	۱۰/۱۳	۰/۰۳۱
۱۵	۴۵	۴۰	۰/۰۷	۰/۰۵	معدنی	۱۰/۱۳	۰/۰۳۵
۱۶	۴۵	۷۰	۰/۰۱	۰/۱۵	معدنی	۱۰/۱۱	۰/۰۳
۱۷	۴۵	۷۰	۰/۰۴	۰/۰۵	هوا	۱۰/۱۳	۰/۰۳۳
۱۸	۴۵	۷۰	۰/۰۷	۰/۱	گیاهی	۱۰/۱۱	۰/۰۲۸

www.SID.ir

Archive of SID

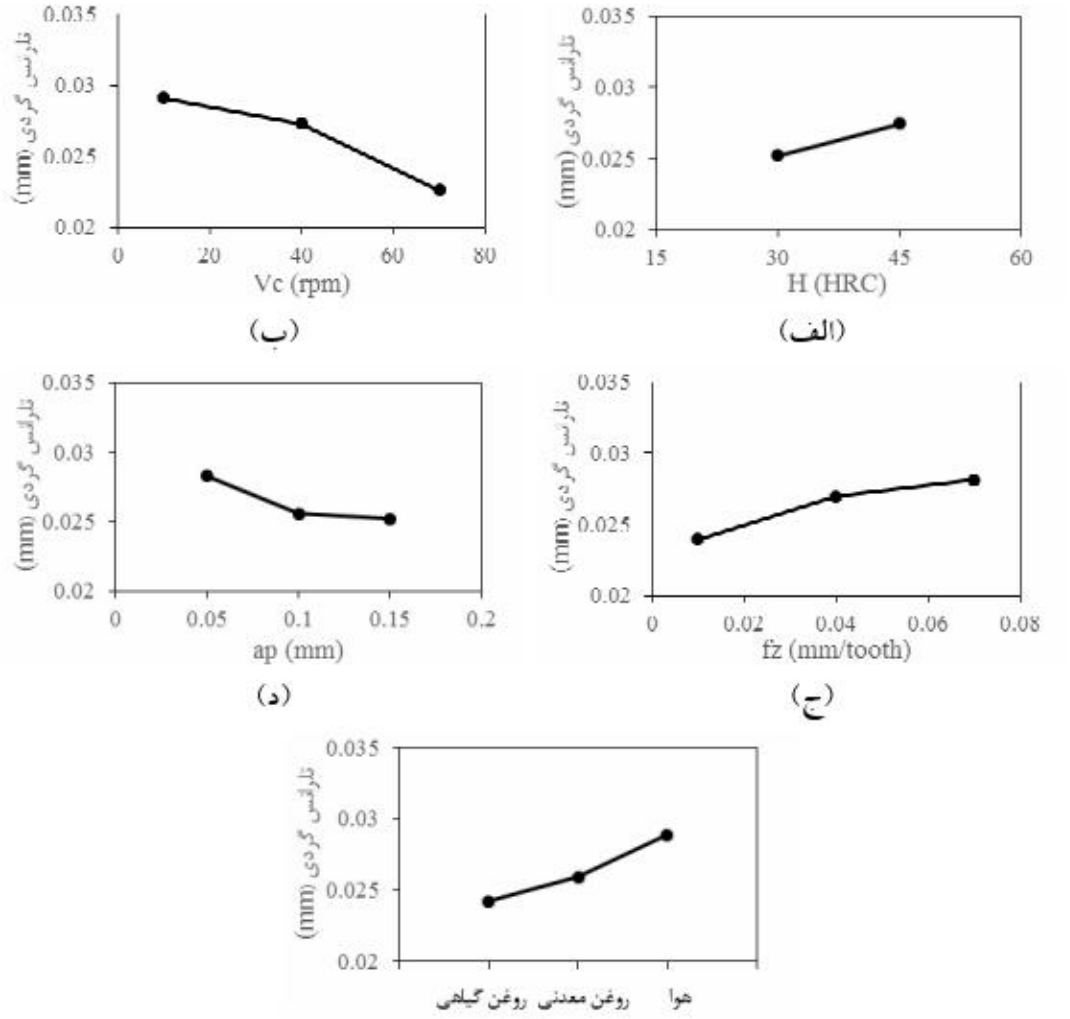
شکل ۱: نمایی از تجهیزات مورد استفاده در آزمایش ها



شکل ۲: اثر پارامترهای اصلی برش بر قطر سوراخ الف) سختی قطعه کار ب) سرعت برشی ج) پیشروی د) عمق برش محوری ه) حالت روان‌کاری

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۳: اثر پارامترهای اصلی برش بر تلرانس گردی سوراخ الف) سختی قطعه‌کار ب) سرعت برشی ج) پیشروی د) عمق برش محوری ه) حالت روان‌کاری

www.SID.ir