



بررسی تجربی تلرانس‌های هندسی در فرایند ماشینکاری فولاد AISI 4140 با روانکاری کمینه بوسیله مایع یونی BMIM-PF6

شهاب رمضانی گهروئی، محمدمهدی ابوترابی*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران
* ایمیل نویسنده مسئول: abootorabi@yazd.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
تحقیقات در حیطه فناوری روان کاری همواره مورد توجه محققین است. از موارد جدید در تحقیقات اخیر می‌توان به بررسی عملکرد مایعات یونی به عنوان روان کار اشاره کرد. همچنین برای کاهش میزان مصرف روان کار در فرایندهای مختلف، سیستمی تحت عنوان سیستم روان کاری کمینه (MQL) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش با انجام آزمایش‌های تجربی، عملکرد روغن آفتابگردان و همچنین، ترکیب مایع یونی [BMIM] [PF6] با روغن آفتابگردان به عنوان روان کار در فرایند تراشکاری فولاد AISI 4140 با روان کاری کمینه مورد بررسی قرار گرفته‌است. علاوه بر اثر تغییر روان کار، اثر تغییر فاصله نازل تا قطعه کار و فشار سیستم MQL نیز در فرایند تراشکاری بررسی شد. طبق نتایج به دست آمده، هر چه فاصله نازل تا قطعه کار کاهش یابد، تأثیر روان کاری با مایع یونی نسبت به روان کاری با روغن آفتابگردان بیشتر می‌شود. همچنین استفاده از مایع یونی [BMIM] [PF6] به عنوان افزودنی به روغن آفتابگردان توانست تلرانس‌های دایره‌ای و استوانه‌ای قطعه کار را در مقایسه با روان کاری با روغن آفتابگردان، به ترتیب ۱۲ و ۲۲ درصد کاهش دهد.	مقاله پژوهشی دریافت: ۱۴ شهریور ۱۴۰۴ پذیرش: ۱ اسفند ۱۴۰۴
	کلیدواژگان: تراشکاری تلرانس هندسی روان کاری کمینه مایع یونی

Experimental investigation of geometric tolerances in the machining process of AISI 4140 steel with minimum lubrication by ionic liquid BMIM-PF6

Shahab Ramezani Gahrouei, Mohammad Mahdi Abootorabi*

Faculty of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran
* Corresponding Author's Email: abootorabi@yazd.ac.ir

Article Information	Abstract
Original Research Paper Received: 5 September 2025 Accepted: 20 February 2026	Research in the field of lubrication technology is always of interest to researchers. One of the new cases in recent researches is the study of the performance of ionic liquids as lubricants. Also, to reduce the amount of lubricant consumption in various processes, a system called minimum lubrication system is used. In this research, the performance of sunflower oil and also the combination of ionic liquid [BMIM] [PF6] with sunflower oil as a lubricant in the turning process of AISI 4140 steel with minimum lubrication has been investigated. In addition to the effect of changing the distance between the nozzle and the workpiece and the pressure of the MQL system was also investigated in the turning process. According to the obtained results, as the distance between the nozzle and the workpiece decreases, the effect of lubrication with ionic liquid increases compared to lubrication with sunflower oil. Also, the use of ionic liquid [BMIM] [PF6] as an additive to sunflower oil was able to reduce the circular and cylindrical tolerances of the work piece by 12 and 22%, respectively, compared to lubrication with sunflower oil.
Keywords: Turning Geometric Tolerance Minimum Quantity Lubrication Ionic liquid	

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Ramezani Gahrouei Sh, Abootorabi MM. Experimental investigation of geometric tolerances in the machining process of AISI 4140 steel with minimum lubrication by ionic liquid BMIM-PF6. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Dec 22;12(10):35-44. doi: 10.22034/ijme.2026.544949.2131 [In Persian]

۱- مقدمه

ابزارآلات و ماشین‌هایی که در زندگی روزمره از آن‌ها استفاده می‌شود، شامل بخش‌های متحرکی هستند که نیاز به روان‌کاری دارند. وجود اصطکاک باعث فرسایش، ایجاد حرارت و در نهایت کم‌شدن عمر مفید تجهیزات می‌شود [۱]. وظیفه اصلی روان‌کار، کاهش و به حداقل رساندن میزان اصطکاک بین سطوح است [۲]. در سال‌های اخیر، استفاده از مایعات یونی به عنوان روان‌کار مورد توجه بیشتری قرار گرفته است.

مطالعات اصلی بر روی مایعات یونی در سال ۱۹۴۰ انجام و اصطلاح مایع یونی به طور عمومی از سال ۱۹۴۳ به بعد رایج شد [۳]. این مواد از سال ۲۰۰۱ هم به عنوان روان‌کننده و هم به عنوان افزودنی به روغن برای بهبود عملکرد سایش و اصطکاک مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مایعات یونی می‌توانند محافظت قابل توجهی در برابر سایش نشان داده و اصطکاک را تا مقدار قابل توجهی کاهش دهند. مقدار کمی مایع یونی در یک روغن پایه می‌تواند تفاوت زیادی در اصطکاک و سایش ایجاد کند [۴]. در حین ماشین‌کاری، میان ابزار و براده اصطکاک ایجاد می‌شود و به سبب گرمای تولیدشده، به کارگیری روان‌کار مناسب مهم است. مایعات یونی در فرایندهای ماشین‌کاری علاوه بر کاربرد به عنوان روان‌کننده خالص، به عنوان مواد افزودنی روان‌کننده به روغن پایه نیز قابل استفاده هستند. در این نوع استفاده از مایعات یونی، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سیال برشی پایه مانند ویسکوزیته، نقطه اشتعال و مقاومت در برابر اکسیداسیون و خواص تریبولوژیکی مانند اصطکاک و سایش بهبود می‌یابد.

در فرایندهای ماشین‌کاری برای رساندن سیال برشی به ناحیه برش روش‌های مختلفی وجود دارد. از آنجا که با کاهش نیاز به روان‌کار، هزینه نهایی و اثرات منفی زیست محیطی ناشی از مصرف روان‌کار نیز کم می‌شود، روشی با عنوان روان‌کاری کمینه ابداع شده است که در آن، حجم محدودی از روان‌کار همراه هوای فشرده به ناحیه برش تزریق می‌شود. روش روان‌کاری کمینه به دلیل مصرف پایین روان‌کار، دمای پایین ماشین‌کاری و روان‌کاری بهتر نسبت به روش سنتی در بهبود عملکرد بعضی از فرایندهای ماشین‌کاری مفید است [۵].

فام و همکاران [۶] در پژوهشی خصوصیات مایع یونی به عنوان روان‌کننده در فرایند میکروفرزکاری را بررسی و تأثیر استفاده از چند روان‌کار مختلف از جمله مایع یونی [I] [BMIM] و روغن معمولی نسبت به حالت خشک (بدون روان‌کار) بر زبری سطح قطعه کار را با یکدیگر مقایسه کردند. کمترین زبری سطح ماشین‌کاری شده با استفاده از مایع یونی [I] [BMIM] به دست آمد. سعادت‌بخش و همکاران [۷] در مطالعه‌ای تجربی دریافتند که روش روان‌کاری و سرعت برشی بیشترین اثر را بر تلرانس ابعادی و هندسی در فرایند فرزکاری مارپیچ فولاد AISI 4340 دارند. استفاده از سیستم روان‌کاری کمینه همراه با روغن گیاهی به دلیل قطبیت بالای آن، تلرانس را نسبت به حالت‌های دیگر بهبود بخشید. داویس و همکاران [۸] اثر افزودن مایع یونی BMIM-PF6 به روان‌کننده در ماشین‌کاری تیتانیوم به کمک سیستم روان‌کاری کمینه را بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که مایع یونی مذکور با ایجاد یک لایه محافظ مرزی، می‌تواند یک ماده افزودنی مؤثر برای بهبود عملکرد روان‌کاری کمینه باشد زیرا استفاده از آن، میزان سایش ابزار را نسبت به برش خشک ۶۰ درصد کاهش داده است. گویندی و همکاران [۹] کاربرد مایع‌های یونی در روان‌کاری کمینه در ماشین‌کاری فولاد با کربن متوسط را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از روان‌کننده‌ها با ویسکوزیته بالاتر منجر به بهبود زبری سطح می‌شود و در سرعت‌های برش بالاتر، این کارایی بیشتر است.

عبدالرحیم و همکاران [۱۰] به بررسی عملکرد برخی از پارامترهای مؤثر در تکنیک روان‌کاری کمینه پرداختند. آن‌ها از دستگاه روان‌کاری کمینه به منظور اعمال روان‌کننده تحت فشارها و قطرهای مختلف نازل، استفاده کردند. عملیات تراشکاری در سه سرعت برشی مختلف، با دو نرخ پیشروی متفاوت و در عمق برش ثابت انجام شده است. آن‌ها دریافتند که عملکرد نازل با قطر خروجی ۳ میلی‌متر بهتر از قطر خروجی نازل ۲ میلی‌متر است. نازل با قطر ۳ میلی‌متر زاویه مخروط گسترده‌تری را به دست می‌دهد و اثر خنک‌کنندگی آن در طول فرایند ماشین‌کاری بیشتر است؛ در نتیجه نیرو و دمای برش را نیز به میزان بیشتری کاهش می‌دهد. دالیمونته و جینتینگ [۱۱] پژوهشی با هدف بررسی اثر استفاده از روان‌کاری کمینه بر روی دو ابزار سِرمِت و کاربید انجام دادند. سِرمِت‌ها نوعی کامپوزیت هستند که فاز غالب آن‌ها سرامیک و جزء فلزی در اقلیت است. آن‌ها دریافتند که روان‌کاری کمینه با ابزار سِرمِت دارای کیفیت بهتری است، به منطقه برش بیشتر نفوذ می‌کند و دمای برش و زبری سطح را نیز کاهش می‌دهد. سالور و همکاران [۱۲] در مطالعه‌ای به ارزیابی سایش ابزار، دمای برش و مصرف برق در فرزکاری فولاد AISI 1040 در دو حالت روان‌کاری کمینه و خشک پرداختند. آن‌ها دریافتند که سیستم روان‌کاری کمینه با کاهش سایش ابزار، دمای برش و مصرف برق، عملکرد بهتری در مقایسه با فرزکاری خشک دارد. در

سرعت‌های برشی بالاتر، تفاوت‌ها مشهودتر است. مزیت اصلی استفاده از سیستم روان کاری کمینه، کاهش نیروهای برشی و بهبود توانایی برش است که باعث می‌شود مقاومت در برابر سایش و عمر ابزار افزایش یابد. باقری و همکاران [۱۳] در بررسی فرایند تراشکاری آلایژ آلومینیم T6-7075 نتیجه گرفتند که استفاده از سیال سرد ۲۰- درجه سانتی‌گراد در روان کاری کمینه نسبت به دمای سیال ۲۰+ درجه سانتی‌گراد کیفیت سطح بهتری ایجاد کرده‌است. امامی [۱۴] با بررسی اثر روان کاری کمینه و نوع روان کار در فرایند فرزکاری فولاد زنگ‌نزن EN 1.4903 به این نتیجه رسید که روش روان کاری کمینه نسبت به روش‌های متداول روان کاری، کیفیت سطح بهتر و نیروهای کمتری ایجاد می‌کند و خروجی‌های فرایند تحت تأثیر نوع روغن مصرفی در روان کاری کمینه هستند.

در سال‌های اخیر، چند مورد مطالعه در مورد استفاده از سیال یونی در فرایندهای ماشین کاری انجام شده‌است. مالیک و همکاران [۱۵] عملکرد تراشکاری سخت تحت روان کاری کمینه با استفاده از روغن معدنی و مایعات یونی مبتنی بر ۱-بوتیل-۳-متیل ایمیدازولیوم کلرید را مقایسه کردند. در این تحقیق، شاخص‌های عمر ابزار، زبری سطح، توان برشی، دمای برش، صدای برش، انتشار کربن و خطای دایروی بودن ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که روان کاری کمینه با سیال یونی به طور قابل توجهی از روغن معدنی بهتر عمل می‌کند. روان کاری کمینه با سیال یونی عمر ابزار را ۲۹٪ افزایش و زبری سطح را ۶٪ کاهش داده‌است. علاوه‌براین، پس از ۸۵ دقیقه ماشین کاری، مصرف برق و انتشار کربن کمتری هنگام استفاده از سیال یونی مشاهده شد که نشان‌دهنده تأثیر زیست‌محیطی کمتر است. برای ماشین کاری دقیق، سیال یونی مطلوب‌تر عمل کرد، زیرا خطای دایره‌ای بودن هنگام استفاده از سیالات یونی ۲/۶۷ برابر کمتر از روغن معدنی بود. این مطالعه سیال یونی را به عنوان خنک‌کننده برتر برای سخت‌تراشی معرفی کرد که پایداری را در ماشین کاری فلزات سخت‌تراش افزایش می‌دهد. بامبام و گجرانی [۱۶] در مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۴ به بررسی اثرات افزودن مایعات یونی به روغن کانولا در فرایند ماشین کاری پرداختند. آن‌ها دریافتند که مایعات یونی بدون هالوژن مبتنی بر فسفونیوم (HF-ILs) جایگزین ایمن‌تری با قابلیت تجزیه زیستی بیشتر و حداقل اثرات نامطلوب بر محیط زیست هستند. در این تحقیق، دو مایع یونی هالوژنه [BMIM][PF6] و [BMIM][BF4] و یک مایع یونی بدون هالوژن [P6,6,6,14][i(C8)2PO2] به میزان ۱ درصد حجمی به روغن کانولا اضافه شدند. نتایج نشان داد که ترکیب مایع یونی مبتنی بر فسفونیوم HF-IL و روغن کانولا در مقایسه با روغن کانولای خالص رسانایی حرارتی را ۱۰/۵ درصد بهبود می‌دهد. یافته‌ها نشان داد که ترکیب مایع یونی مبتنی بر فسفونیوم و روغن کانولا، عملکرد برش بهتری نشان می‌دهد، به‌گونه‌ای که دمای برش ۱۰ تا ۳۳ درصد و زبری سطح ۳۴ تا ۴۶ درصد کاهش می‌یابد.

خارکا و همکاران [۱۷] در مطالعه فرایند فرزکاری مارپیچ فولاد ۳۰۴، با توجه به مقادیر حداقل تلرانس‌های بدست‌آمده نتیجه گرفتند که هنگام استفاده از روش روان کاری کمینه، کیفیت سوراخ H8 بدست می‌آید در حالی که در روان کاری معمولی (تر) و در حالت خشک، کیفیت سوراخ، H9 است. آن‌ها بیان کردند که با افزایش تعداد سوراخ‌های تولیدی و در نتیجه سایش بیشتر ابزار، تلرانس‌های استوانه‌ای و دایره‌ای بیشتر می‌شود ولی میزان این انحرافات در روان کاری کمینه کمتر از روش‌های خشک و تر است. راستی و همکاران [۱۸] تلرانس‌های هندسی استوانه‌ای و دایروی بودن و تلرانس ابعادی قطر سوراخ را در سوراخ کاری با روان کاری کمینه بررسی کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که نرخ پیشروی مؤثرترین عامل بر تلرانس‌های بررسی‌شده مخصوصاً در مواد سخت‌تر است. استفاده از روغن سؤیا در روان کاری کمینه عملکرد مناسبی در سوراخ کاری فولاد ۴۳۴۰ از خود نشان داده‌است. سلواکومار و همکاران [۱۹] سوراخ کاری قطعه‌ای از ترکیب آلایژ آلومینیم و کامپوزیت تقویت‌شده با کربن با مته‌های میکرو طرح‌دار در شرایط روان کاری کمینه را بررسی کردند. هنگام استفاده از مته‌های دارای میکرو طرح‌های سوراخ شکل در روش کمینه، ذخیره سیال در میکرو سوراخ‌ها باعث کاهش خطای گردی، زبری و تورق شده‌است.

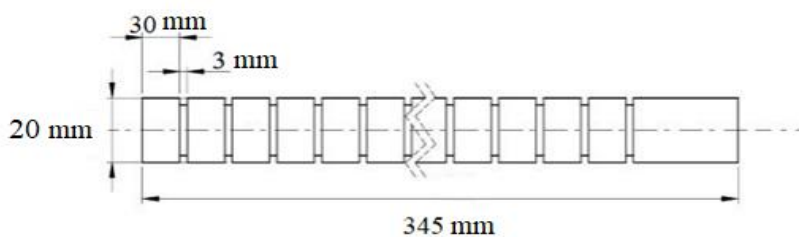
در سال‌های اخیر، مایعات یونی به دلیل ساختار و ترکیب شیمیایی ویژه به‌عنوان روان کار جدید در زمینه‌هایی همچون یاتاقان‌ها، شکل‌دهی فلزات و ... مورد توجه قرار گرفته‌اند ولی در زمینه کاربرد مایعات یونی به‌عنوان روان کار در فرایندهای ماشینکاری، تحقیقات بسیار اندکی انجام شده‌است. ترکیب این نوع مایعات با روغن‌های گیاهی و تأثیرات آن در روان کاری و کاهش تلرانس‌های هندسی، از نظر کاهش هزینه و حفظ محیط زیست اهمیت دارد. از آنجا که تاکنون در تراشکاری فولاد AISI 4140 از ترکیب روغن آفتابگردان و مایع یونی BMIM-PF6 به‌عنوان روان کار استفاده نشده‌است، در این مقاله میزان اثر استفاده از این روان کار به همراه فشار سیستم روان کاری کمینه و فاصله نازل تا قطعه کار بر روی تلرانس‌های دایره‌ای و استوانه‌ای قطعه کار مورد آزمایش قرار گرفته‌است. مایع یونی BMIM-PF6 یا ۱-بوتیل-۳-متیل ایمیدازولیوم هگزا فلئورو فسفات با ترکیب شیمیایی $C_8H_{15}F_6N_2P$ ، فراریت پایین، پایداری حرارتی بالا و نقطه ذوب پایین دارد.

۲- آزمایش‌های تجربی

شرایط انجام آزمایش‌های تجربی در جدول ۱ بیان شده‌است. شکل ۱ نقشه قطعه‌کار مورد استفاده در آزمون‌های تجربی از جنس فولاد AISI 4140 را نشان می‌دهد. برای تهیه نمونه‌های آزمایش، ۱۸ قسمت به قطر ۲۰ و طول ۳۰ میلی‌متر روی قطعه‌کار ماشین‌کاری و همگی به عمق ۰/۲ میلی‌متر سنگ زده شده‌اند تا سطحی کم عیب و هم‌اندازه حاصل شود. برای تراشکاری هر قطعه از یک اینسرت مجزا و جدید استفاده شده‌است. شرایط محیطی برای انجام تمامی آزمایش‌ها یکسان در نظر گرفته شده‌است. فشار سیستم روان‌کاری کمینه و فاصله نازل تا قطعه‌کار هر کدام در سه سطح در نظر گرفته شده‌اند. نوع روان‌کار مورد استفاده در دو سطح تغییر می‌کند. روان‌کار پایه، روغن آفتابگردان خالص و روان‌کار دوم ترکیبی از روغن آفتابگردان و مایع یونی BMIM-PF6 است. ۹۵ گرم روغن آفتابگردان و ۵ گرم مایع یونی BMIM-PF6 به‌منظور دست‌یابی به محلولی همگن، در دمای محیط در حمام آلتراسونیک قرار داده و به مدت ۳۰ دقیقه به محلولی همگن تبدیل شد. دلیل انتخاب نسبت وزنی ۵٪ در این مطالعه، نتایج به‌دست آمده از تحقیقات پیشین مرتبط با روان‌کاری به‌کمک سیال یونی بود [۴]. این درصد وزنی، یک نسبت بهینه برای داشتن خروجی‌ها و روان‌کاری بهتر است. طراحی آزمایش به صورت کامل و در مجموع ۱۸ آزمون انجام شده‌است.

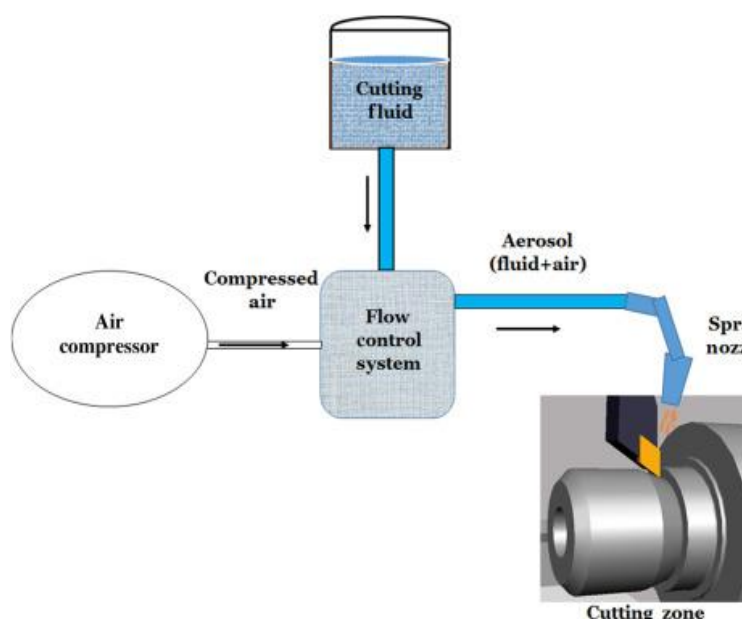
جدول ۱ پارامترهای ثابت و متغیر مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی

پارامتر مورد استفاده	مقادیر
سرعت برشی	۶۰ متر بر دقیقه
نرخ پیشروی	۰/۱۲ میلی‌متر بر دور
عمق برش	۰/۵ میلی‌متر
دبی روان‌کاری بهینه	۲۰ میلی‌لیتر بر ساعت
فشار روان‌کاری بهینه	۴، ۶ و ۲ بار
فاصله نازل تا قطعه‌کار	۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر
زاویه نازل نسبت به سطح ابزار	۴۵ درجه
سیال پایه روان‌کاری	روغن آفتابگردان



شکل ۱ نقشه قطعه مورد آزمایش

ماشین ابزار مورد استفاده در این تحقیق، ماشین تراش CNC سه محوره مدل PUMA 6S ساخت شرکت دوو و مجموعه روان‌کاری کمینه شامل واحد مراقبت پنوماتیک مدل SAMMIT NTF 2780، کمپرسور خارجی و نازل بر روی این ماشین ابزار نصب شده‌است. دو متغیر فشار سیستم روان‌کاری کمینه و فاصله نازل تا قطعه‌کار از طریق این مجموعه قابل تغییر و تنظیم‌اند. تصویر شماتیک از سیستم روان‌کاری کمینه در شکل ۲ نشان داده شده‌است. برای اندازه‌گیری تلرانس‌های هندسی استوانه‌ای و دایره‌ای قطعه‌کار، از دستگاه CMM با کیفیت ۵ مگاپیکسل ساخت شرکت GOM آلمان استفاده شده‌است. دقت حجمی این دستگاه، 0.015 ± 0.02 mm/m است. دقت حجمی نشان دهنده میزان دقت ابعادبرداری یک اسکنر سه بعدی در یک حجم خاص از فضا است و خطای تجمعی در کل یک ناحیه یا حجم اسکن‌شده را نشان می‌دهد. رزولوشن این دستگاه CMM برای اندازه‌گیری تلرانس‌های هندسی ۰/۰۱ است. تلرانس‌های هندسی در قطعات تولیدشده با فرایند تراشکاری یکی از مهم‌ترین چالش‌های تولید قطعات دقیق با کیفیت بالا است [۲۰].



شکل ۲ تصویر شماتیک از سیستم روان کاری کمینه

tolerانس گذاری هندسی برای توصیف ارتباط میان بخش‌های مختلف در تولید یک محصول استفاده می‌شود و مقدار مجاز انحراف از شکل‌های هندسی را نشان می‌دهد. در tolerانس هندسی استوانه‌ای، ناحیه tolerانسی بین دو استوانه ایده‌آل هم‌محور با فاصله مشخص از یکدیگر محدود می‌شود و استوانه بزرگتر مماس بر مرتفع‌ترین نقاط سطح فرض می‌شود. برای محاسبه میزان tolerانس استوانه‌ای، سطح استوانه موردنظر باید در یک مقطع شعاعی و در یک دور چرخش کامل قطعه اندازه‌گیری شود. اندازه‌گیری باید در تعداد مقاطع موردنیاز تکرار شود. نصف بیشترین اختلاف قطر بین مقادیر حداکثر و حداقل به‌دست آمده روی تمام سطوح استوانه به عنوان مقدار عدم استوانه‌ای بودن در نظر گرفته می‌شود.

به منظور محاسبه و کنترل انحراف دایره‌ای، محور قطعه کار باید عمود بر جهت اندازه‌گیری و از نظر محوری کاملاً ثابت باشد. عمل اندازه‌گیری در تعدادی از مقاطع استوانه انجام می‌گیرد. استوانه موردنظر باید در یک مقطع شعاعی و در یک دور چرخش کامل قطعه، اندازه‌گیری شود. نصف بیشترین اختلاف قطر بین مقادیر حداقل و حداکثر به‌دست آمده در مقاطع مختلف محاسبه شده و در مقطعی که این عدد دارای بیشترین مقدار است، به‌عنوان عدم گردی قطعه کار یا میزان انحراف از دایره‌ای بودن، در نظر گرفته می‌شود.

۳- نتایج و بحث

در جدول ۲ طراحی آزمایش‌ها و tolerانس‌های هندسی به‌دست‌آمده از تراشکاری با سیستم روان کاری کمینه ارائه شده‌است. داده‌های پرت مشاهده‌شده در آزمایش‌های ۱۵ و ۱۸ که ممکن است به‌دلیل خطاهای تصادفی هنگام انجام عملیات ماشین کاری یا همگن نبودن قطعه کار و روان کاری و تفاوت با سایر آزمون‌ها اتفاق افتاده‌باشد، به‌عنوان مقادیر غیرقابل قبول خروجی از دستگاه CMM، در نظر گرفته و صرف‌نظر شده‌اند.

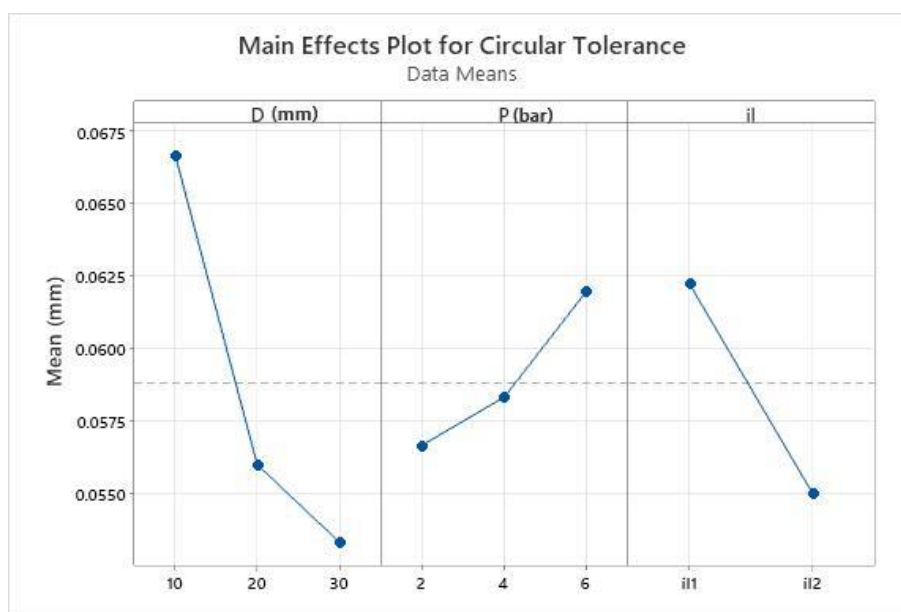
شکل‌های ۳ و ۴ تأثیر پارامترهای نوع روان کار، فشار سیستم روان کاری کمینه و فاصله نازل تا قطعه کار بر tolerانس دایره‌ای و استوانه‌ای را نشان می‌دهد. در شکل‌های ۳ و ۴، روغن آفتابگردان با شماره ۱ و ترکیب روغن آفتابگردان و مایع یونی با شماره ۲ نمایش داده شده است.

شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش فاصله نازل تا قطعه کار و فشار سیستم روان کاری کمینه، میانگین tolerانس دایره‌ای به‌ترتیب کاهش و افزایش یافته‌است. علاوه‌براین، ترکیب مایع یونی با سیال پایه، tolerانس دایره‌ای را نسبت به حالت سیال پایه خالص، ۱۲ درصد کاهش داده است.

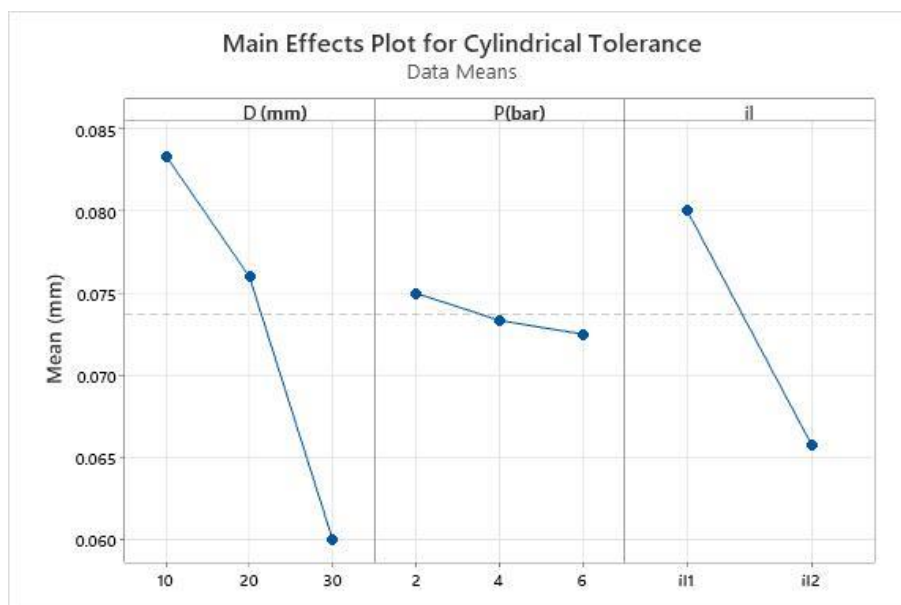
با توجه به شکل ۴، تأثیر افزایش فاصله نازل تا قطعه کار و نوع روانکار بر tolerانس استوانه‌ای مشابه اثر آن‌ها بر tolerانس دایره‌ای است ولی با افزایش فشار سیستم روان کاری کمینه، میانگین tolerانس استوانه‌ای به مقدار ناچیزی کاهش یافته‌است.

جدول ۲ طراحی آزمایش‌ها و تolerانس دایره‌ای و استوانه‌ای قطعه‌کار حاصل از تراشکاری فولاد AISI 4140

ردیف	نوع روان‌کار	فاصله نازل تا قطعه‌کار (mm)	فشار (bar)	تولرانس دایره‌ای (mm)	تولرانس استوانه‌ای (mm)
1	روغن آفتابگردان	10	2	0.08	0.11
2	روغن آفتابگردان	10	4	0.07	0.09
3	روغن آفتابگردان	10	6	0.07	0.09
4	روغن آفتابگردان	20	2	0.06	0.09
5	روغن آفتابگردان	20	4	0.06	0.09
6	روغن آفتابگردان	20	6	0.06	0.07
7	روغن آفتابگردان	30	2	0.04	0.05
8	روغن آفتابگردان	30	4	0.06	0.07
9	روغن آفتابگردان	30	6	0.06	0.06
10	روغن آفتابگردان و BMIM-PF6	10	2	0.06	0.07
11	روغن آفتابگردان و BMIM-PF6	10	4	0.06	0.07
12	روغن آفتابگردان و BMIM-PF6	10	6	0.06	0.07
13	روغن آفتابگردان و BMIM-PF6	20	2	0.05	0.07
14	روغن آفتابگردان و BMIM-PF6	20	4	0.05	0.06
15	روغن آفتابگردان و BMIM-PF6	20	6	0.19	0.23
16	روغن آفتابگردان و BMIM-PF6	30	2	0.05	0.06
17	روغن آفتابگردان و BMIM-PF6	30	4	0.05	0.06
18	روغن آفتابگردان و BMIM-PF6	30	6	0.06	0.44



شکل ۳ نمودار اثرات اصلی پارامترهای فاصله نازل تا قطعه‌کار، فشار سیستم و نوع روان‌کار بر تولرانس دایره‌ای در تراشکاری فولاد ۴۱۴۰ با روان‌کاری کمینه



شکل ۴ نمودار اثرات اصلی پارامترهای فاصله نازل تا قطعه کار، فشار سیستم و نوع روان کار بر تolerانس استوانه‌ای در تراشکاری فولاد ۴۱۴۰ با روان کاری کمینه

جدول ۳ آنالیز واریانس برای تolerانس دایره‌ای را نشان می‌دهد. پارامترهای ورودی فاصله نازل تا قطعه کار و نوع روان کار با مقدار P-Value کمتر از ۰/۰۵ بر تolerانس دایره‌ای اثری معنادار دارند. میزان تأثیر این پارامترها به ترتیب ۴۲/۸۵ و ۱۶/۱۵ درصد است. برای آنالیز واریانس تolerانس دایره‌ای، ضریب تعیین (R^2) برابر ۶۳/۷٪ و ضریب تعیین تعدیل شده (R^2_{adj}) برابر ۴۷/۲٪ است. ضریب تعیین فرض می‌کند که همه متغیرهای مستقل بر تغییرات متغیر وابسته مؤثر هستند در حالی که ضریب تعیین تعدیل شده فقط زمانی افزایش می‌یابد که متغیرهای جدید، در بهبود دقت مدل نقش داشته باشند. با توجه به ماهیت آزمون‌های تجربی در این تحقیق و تفاوت‌های ناگزیر از نظر همگن بودن قطعات و ابزار و نوع روان کاری، در مجموع می‌توان دقت آنالیز انجام شده را قابل قبول دانست.

جدول ۳ آنالیز واریانس برای تolerانس دایره‌ای

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
D	2	0.000590	42.85%	0.000597	0.000298	6.57	0.013
P	2	0.000065	4.71%	0.000043	0.000022	0.48	0.633
Il	1	0.000222	16.15%	0.000222	0.000222	4.89	0.049
Error	11	0.000500	36.29%	0.000500	0.000045		
Total	16	0.001376	100.00%				

هنگام استفاده از ترکیب روغن آفتابگردان و مایع یونی به عنوان روان کار، تolerانس استوانه‌ای نسبت به حالتی که تنها از روغن آفتابگردان به عنوان روان کار استفاده شده، به طور میانگین ۲۲٪ کاهش یافته است. نتایج حاصل از آنالیز واریانس تolerانس استوانه‌ای در جدول ۴ ذکر شده است. همانند تolerانس دایره‌ای، پارامترهای فاصله نازل تا قطعه کار و نوع روان کار دارای اثر معنادار بر تolerانس استوانه‌ای هستند. فاصله نازل تا قطعه کار ۴۰/۳۱ درصد و نوع روان کار ۳۰/۸۲ درصد تأثیر بر تolerانس استوانه‌ای دارند. اگر در این دسته آزمایش‌ها از فاصله نازل تا قطعه کار ۳۰ میلی‌متری صرف نظر شود اثر نوع روان کار استفاده شده مشهودتر خواهد بود و درصد بهبود تolerانس استوانه‌ای در حالت روان کاری با مایع یونی نسبت به حالت روان کاری با روغن آفتابگردان به ۲۷/۶ درصد خواهد رسید. برای آنالیز واریانس تolerانس استوانه‌ای، ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده به ترتیب ۷۲/۸٪ و ۵۹/۲٪ است که مقادیری قابل قبول و نسبتاً مناسب هستند. با زیاد شدن تعداد مشاهدات در مقایسه با تعداد پیش‌بینی‌ها، مقادیر R^2 و R^2_{adj} به یکدیگر نزدیکتر می‌شوند. درصد خطا برای آنالیزهای واریانس انجام شده در جداول ۳ و ۴ مقادیر بزرگی دارد که می‌تواند به دلیل خطاهای گریز ناپذیر هنگام انجام آزمون‌های تجربی و پراکندگی تعدادی از داده‌ها باشد.

جدول ۴ آنالیز واریانس تفرانس استوانه‌ای

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
D	2	0.001522	40.31%	0.001850	0.000925	9.01	0.006
P	2	0.000063	1.67%	0.000241	0.000121	1.17	0.348
il	1	0.001164	30.82%	0.001164	0.001164	11.33	0.007
Error	10	0.001027	27.20%	0.001027	0.000103		
Total	15	0.003775	100.00%				

مایعات یونی از نظر حرارتی، سیالات قطبی بسیار پایدار و غیر قابل اشتعال با فراریت ناچیز هستند. این ویژگی‌ها آن‌ها را به روان‌کننده‌های جدید ایده‌آل در شرایط سخت تبدیل کرده‌است [۲۱]. استفاده از ترکیب روغن آفتابگردان و مایع یونی به دلیل قطبیت بالا و پایداری مایع یونی، لایه‌ای پایدار در ناحیه برش ایجاد می‌کند و منجر به کاهش اصطکاک در سطح تماس قطعه کار و ابزار می‌شود. مایعات یونی می‌توانند محافظت قابل توجهی در برابر سایش نشان داده و اصطکاک را به مقدار زیادی کاهش دهند. مقدار کمی مایع یونی در یک روغن پایه می‌تواند تفاوت زیادی در اصطکاک و سایش ایجاد کند [۴]. کاهش اصطکاک و سایش در تراشکاری، کاهش تفرانس‌های هندسی از جمله تفرانس استوانه‌ای و دایره‌ای را نتیجه می‌دهد. در مقایسه‌ی تأثیر استفاده از چند مایع یونی مختلف و روغن معمولی به عنوان روان‌کننده بر زبری سطح نسبت به حالت خشک در فرایند میکروفرزکاری، کمترین زبری سطح ماشین‌کاری شده هنگام استفاده از مایع یونی به دست آمد.

به‌طور کلی، هنگام استفاده از ترکیب مایعات یونی و روغن‌های گیاهی به عنوان روان‌کار در ماشین‌کاری به کمک سیستم روان‌کاری کمینه، دلیل اصلی بهبود تفرانس‌های هندسی نسبت به حالت روان‌کاری کمینه با روغن گیاهی خالص را می‌توان به دو موضوع اصلی نسبت داد. نکته اول، جذب بهتر مایعات یونی روی سطح تماس مشترک بین ابزار و قطعه کار است که می‌تواند لایه‌ای محافظ روی سطح به وجود آورد. تشکیل این لایه محافظ باعث ایجاد یک لایه مرزی مؤثر و در نتیجه، کاهش اصطکاک می‌شود. این رفتار مایع یونی، به دلیل خواص فیزیکی و شیمیایی برتر آن مانند پایداری حرارتی بالا و مقاومت در برابر اکسیداسیون نسبت به روغن گیاهی خالص، ایجاد می‌شود. علاوه بر این، به دلیل فشار بخار بسیار کم، مایعات یونی به سختی بخار می‌شوند و برخلاف سیالات برشی معمول، هنگام ماشین‌کاری و ایجاد دماهای بالا، در حالت مایع باقی می‌مانند و نقش روان‌کاری خود را انجام می‌دهند. هرچند استفاده از روغن‌های گیاهی خالص در روان‌کاری کمینه، از نظر زیست محیطی موضوعی جذاب برای محققان است، ولی نقطه اشتعال پایین و مخصوصاً اکسید شدن آن‌ها در زمان‌های کوتاه، استفاده از آن‌ها را مقداری محدود کرده‌است. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که اضافه شدن مایعات یونی به روغن‌های گیاهی، می‌تواند برخی از معایب روغن‌های گیاهی خالص را برطرف کند. نکته دوم هنگام استفاده از مایعات یونی، قطبیت بالای آن‌ها است. قطبیت بالا به مایع یونی کمک می‌کند که نفوذ بهتری به ناحیه برش داشته باشد و در نتیجه، بازدهی فرایند روان‌کاری را افزایش دهد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، تفرانس‌های استوانه‌ای و دایره‌ای در فرایند ماشین‌کاری یک قطعه کار استوانه‌ای از جنس فولاد AISI 4140 با روان‌کاری کمینه توسط روغن آفتابگردان و همچنین ترکیب روغن آفتابگردان با مایع یونی BMIM-PF6 مورد بررسی قرار گرفته‌است. بررسی تجربی تفرانس‌های هندسی قطعه کار در عملیات تراشکاری با سیستم روان‌کاری کمینه با استفاده از سیال یونی BMIM-PF6 و ترکیب آن با روغن گیاهی، برای اولین بار در این تحقیق بررسی شده‌است. متغیرهای ورودی شامل نوع روان‌کار، فشار سیستم روان‌کاری کمینه و فاصله نازل تا قطعه کار است. تفرانس دایره‌ای هنگام استفاده از ترکیب مایع یونی [PF6] [BMIM] و روغن آفتابگردان به عنوان روان‌کار به‌طور میانگین ۱۲ درصد نسبت به هنگامی که تنها از روغن آفتابگردان به عنوان روان‌کار استفاده شده، کاهش یافته‌است. طبق نتایج آنالیز واریانس، فاصله نازل تا قطعه کار ۴۲/۸۵٪ و نوع روان‌کار ۱۶/۱۵٪ اثر معنادار بر تفرانس دایره‌ای دارند.

استفاده از ترکیب روغن آفتابگردان و مایع یونی BMIM-PF6 به عنوان روان‌کار به‌طور متوسط تفرانس استوانه‌ای را به میزان ۲۲ درصد نسبت به حالتی که تنها از روغن آفتابگردان به عنوان روان‌کار استفاده شده، کاهش داده‌است. بر اساس نتایج آنالیز واریانس، فاصله نازل

تا قطعه‌کار با ۴۰/۳۱ درصد تأثیر، بیشترین اثر را بر تلرانس استوانه‌ای دارد به این صورت که هرچه فاصله مذکور کمتر باشد، اثرگذاری نوع روان‌کار بیشتر است. پارامتر نوع روان‌کار با ۳۰/۸۲ درصد تأثیر بر تلرانس استوانه‌ای، در مرتبه دوم اهمیت قرار دارد. فشار سیستم روان‌کاری کمینه اثر معناداری بر تلرانس‌های دایره‌ای و استوانه‌ای ندارد.

نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان دهنده اثر مثبت استفاده از مایع یونی بر تلرانس‌های هندسی قطعه‌کار در فرایند تراشکاری است. در سال‌های اخیر تحقیقات کمی در مورد استفاده از مایع یونی در فرایندهای ماشین‌کاری انجام شده است. در این مقاله، آزمایش‌های تجربی روی یک نوع جنس قطعه‌کار در پارامترهای برشی ثابت و با استفاده از یک نوع روغن گیاهی انجام شده است. علاوه بر این، موضوع مورد بررسی، تلرانس‌های استوانه‌ای و دایره‌ای بوده و خروجی‌های مهمی نظیر نیروهای برشی، عمر ابزار، سختی و زبری سطح قطعه‌کار بررسی نشده است که می‌تواند در تحقیقات آینده مورد ارزیابی قرار گیرد. علاوه بر این، بررسی اثر نسبت‌های وزنی مختلف سیال یونی در روغن گیاهی و همچنین استفاده از سایر سیالات یونی و در نهایت، مقایسه آن‌ها با روان‌کارهای متداول مورد استفاده در فرایندهای ماشین‌کاری می‌تواند موضوعات مناسبی برای مطالعات بعدی باشد. بررسی جامع چگونگی اثر استفاده از مایع یونی به‌عنوان روان‌کار در فرایندهای برشی نیاز به تحقیقات بیشتر در پژوهش‌های آینده دارد.

References

- [1] Lawal SA, Choudhury IA, Nukman Y. A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant. *Journal of Cleaner Production*. 2013 Feb 1;41:210-21. doi: 10.1016/j.jclepro.2012.10.016
- [2] Jost P. Lubrication (Tribology)–A report on the present position and industry's needs. Department of Education and Science, HM Stationary Office, London, UK. 1966.
- [3] Yoneyama M, Matsui Y. Direct polycondensation of aromatic tetracarboxylic acids with aromatic diamines in ionic liquids. *High Performance Polymers*. 2006 Oct;18(5):817-23. doi: 10.1177/0954008306068268
- [4] Somers AE, Howlett PC, MacFarlane DR, Forsyth M. A review of ionic liquid lubricants. *Lubricants*. 2013 Jan 21;1(1):3-21. doi: 10.3390/lubricants1010003
- [5] Moghadas A, Hadad M, Kazemi Nasrabadi M. Experimental Study on surface roughness and quality of Hybrid MQL and Thermally-Enhanced Turning of Stainless Steel 17-4 PH (AISI 630). *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2019;6(8):21-32. [In Persian]
- [6] Pham MQ, Yoon HS, Khare V, Ahn SH. Evaluation of ionic liquids as lubricants in micro milling–process capability and sustainability. *Journal of cleaner production*. 2014 Aug 1;76:167-73. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.04.055
- [7] Saadatbakhsh MH, Rasti A, Sadeghi MH, Hassanpour H, Omiddodman AR. Empirical study of dimensional and geometrical tolerances in helical milling of AISI 4340 steel. *Modares Mechanical Engineering*. 2015;14(15):119-26. [In Persian]
- [8] Davis B, Schueller JK, Huang Y. Study of ionic liquid as effective additive for minimum quantity lubrication during titanium machining. *Manufacturing Letters*. 2015 Aug 1;5:1-6. doi: 10.1016/j.mfglet.2015.04.001
- [9] Goindi GS, Jayal AD, Sarkar P. Application of ionic liquids in interrupted minimum quantity lubrication machining of plain medium carbon steel: Effects of ionic liquid properties and cutting conditions. *Journal of Manufacturing Processes*. 2018 Apr 1;32:357-71. doi: 10.1016/j.jmapro.2018.03.007
- [10] Sani AS, Abd Rahim E, Sharif S, Sasahara H. Machining performance of vegetable oil with phosphonium-and ammonium-based ionic liquids via MQL technique. *Journal of cleaner production*. 2019 Feb 1;209:947-64. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.317
- [11] Dalimunthe FN, Ginting A, Sutarman. MQL Applied for Hard Machining of Ferrous Alloys Using Hardmetals: A Review. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2020 Dec 1 (Vol. 1003, No. 1, p. 012058). IOP Publishing. doi: 10.1088/1757-899X/1003/1/012058
- [12] Salur E, Kuntoğlu M, Aslan A, Pimenov DY. The effects of MQL and dry environments on tool wear, cutting temperature, and power consumption during end milling of AISI 1040 steel. *Metals*. 2021 Oct 20;11(11):1674. doi: 10.3390/met11111674
- [13] Bagheri A, Abedini V, Hajjalimohammadi A. Experimental Investigation of the Effective Parameters in 7075-T6 Aluminum Machining Process on Surface Roughness Using Minimum Quantity Lubrication (MQL) and Cold Fluid. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 Aug 23;8(6):7-14. [In Persian]
- [14] Emami M. Study of the performance of minimum quantity lubrication (MQL) and type of lubricant in the milling process of stainless steel EN 1.4903. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2019 Jul 23;6(3):28-42. [In Persian]

- [15] Mallick R, Kumar R, Panda A, Sahoo AK, Das D. Synthesis of an Ionic Liquid-Based Cutting Lubricant and Its Performance Comparison with Mineral Oil in Hard Turning. *Lubricants*. 2025 Apr 6;13(4):166. doi: [10.3390/lubricants13040166](https://doi.org/10.3390/lubricants13040166)
- [16] Bambam AK, Gajrani KK. In pursuit of sustainability in machining titanium alloys using phosphonium-based halogen-free ionic liquids as potential metalworking fluid additives. *Tribology International*. 2024 Nov 1;199:109995. doi: [10.1016/j.triboint.2024.109995](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109995)
- [17] Kharka V, Mujumdar S, Shukla S. Study on helical milling of SS 304 with small diameter tools under the influence of minimum quantity lubrication (MQL). *Manufacturing Letters*. 2023 Aug 1;35:1312-7. doi: [10.1016/j.mfglet.2023.08.042](https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2023.08.042)
- [18] Rasti A, Omiddodman AR, Ustad M. Analysis of geometric dimensioning and tolerancing in sustainable hard drilling using vegetable oil-based MQL. *Journal of Engineering Research*. 2025 Jun 2. doi: [10.1016/j.jer.2025.05.012](https://doi.org/10.1016/j.jer.2025.05.012)
- [19] Selvakumar SJ, Muralidharan SM. Performance analysis of drills with structured surfaces when drilling CFRP/AA7075 stack under MQL condition. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023 Mar 3;89:194-219. doi: [10.1016/j.jmapro.2023.01.053](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.053)
- [20] Bayat M, Amini S, Hadidi M. Effect of ultrasonic-assisted turning on geometrical tolerances in Al 2024-T6. *Materials and Manufacturing Processes*. 2021 Dec 10;36(16):1875-86. doi: [10.1080/10426914.2021.1926496](https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1926496)
- [21] Bermúdez MD, Jiménez AE, Sanes J, Carrión FJ. Ionic liquids as advanced lubricant fluids. *Molecules*. 2009 Aug 4;14(8):2888-908. doi: [10.3390/molecules14082888](https://doi.org/10.3390/molecules14082888)