

## بررسی عملکرد فرایندهای ماشینکاری سبز

محمد مهدی ابوترابی<sup>۱</sup>، رضوان احمدی<sup>۲</sup>

۱ استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، abootorabi@yazd.ac.ir

۲ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۹/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۲۸

### چکیده

وجود مشکلات فراوان بر سر راه استفاده از خنک‌کارها نظیر مشکلات تنفسی و پوستی برای اپراتور، ایجاد باکتری، انتشار بوی نامطبوع در محیط کار، مشکلات زیست محیطی ناشی از دفع آنها و هزینه نسبتاً بالای تهیه و نگهداری سیال‌های برشی باعث شده است که همواره صنعتگران در پی گزینه‌ای مناسب جهت جایگزینی این مواد باشند. در این مقاله روش‌های متنوع ماشینکاری سبز معرفی شده است. ماشینکاری سبز شامل روش‌های تبریدی، روانکاری کمینه و استفاده از هوای فشرده است. در خنک‌کاری تبریدی، از نیتروژن مایع به‌عنوان سیال خنک‌کار استفاده می‌شود که همراه با هوای فشرده به محل برش منتقل می‌شود. در روانکاری کمینه، مقدار بسیار کمی از سیال، که معمولاً روغن پایه نفتی یا گیاهی است، به کمک هوای فشرده به صورت ابر درآمده و با نازل به ناحیه برشی منتقل می‌گردد. روش‌های ماشینکاری سبز علاوه بر عملکرد مشابه یا بهتر در بعضی حالت‌ها نسبت به خنک‌کاری معمولی، مقدار استفاده از سیال‌های برش را به میزان زیادی کاهش می‌دهند.

### واژگان کلیدی

ماشینکاری سبز، خنک‌کاری تبریدی، روانکاری کمینه، هوای فشرده

### ۱. مقدمه

ماشینکاری، تنش‌های نرمال و برشی، توزیع تنش‌ها در طول محل تماس ابزار - قطعه کار و ابزار - براده، سایش ابزار، یکپارچگی سطح ماشینکاری شده و تنش‌های پسماند در قطعه کار تأثیر می‌گذارد [۲]. برای اینکه استفاده از یک روان‌کار نتایج خوبی را به دنبال داشته باشد و سبب صرفه‌جویی و کاهش هزینه‌ها شود، باید چهار عامل مهم و کلیدی در روانکاری؛ یعنی نوع روان‌کار، مقدار، زمان و محل مناسب را مورد توجه قرار داد. سیال‌های برش

هدف اولیه عملیات ماشینکاری، تولید قطعه مطابق تolerانس دقیق ابعادی، صافی سطح مناسب و دستیابی به شرایط بهینه اقتصادی است. سیال برشی برای دستیابی به این اهداف مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیال برش مناسب می‌تواند سبب بهبود کیفیت سطح قطعه کار، افزایش عمر ابزار، کاهش نیروهای برش، کاهش تغییر شکل قطعه کار، جدا شدن راحت‌تر براده، کاهش تشکیل لبه انباشته و دفع براده از ناحیه برش شود [۱]. سیال برش بر حرارت منطقه

در سه گروه طبقه‌بندی می‌شوند: الف) سیال‌های محلول در آب، برای فرایندهایی با سرعت برشی زیاد، ب) روغن‌های برشی خالص، برای فرایندهایی با سرعت برشی کم و ج) خنک‌کننده‌های گازی، برای خنک‌کاری قسمت‌هایی که نفوذ سیال برش مایع ممکن نیست [۳].

در صنعت ماشینکاری عامل اصلی آلودگی محیط زیست و به‌خطر افتادن سلامتی اپراتور، استفاده از سیال‌های برشی است [۴]. دفع نامناسب سیال‌های برشی سبب آلودگی زمین، آب، هوا و سپس اختلال کل محیط زیست می‌شود. تماس سیال برشی با پوست و استنشاق آنها باعث مشکلات پوستی و تنفسی ناشی از افزودنی‌های مختلف مانند معلق‌کننده، آفت‌کش‌ها، ضدزنگ‌ها و تثبیت‌کننده‌ها می‌شود. علاوه بر این سیال‌های برشی به‌صورت معلق در محیط زیست برای مدت طولانی باقی می‌مانند [۵]. با توجه به آثار منفی سیال‌های برش در صنعت ماشینکاری، ماشینکاری سبز جهت اطمینان از سلامت اپراتور، ایمنی محیط کار و جلوگیری از آلودگی محیط زیست مورد توجه قرار گرفته است. مزایای ماشینکاری سبز<sup>۱</sup> شامل صرفه‌جویی در مصرف سیال‌های برشی، کاهش هزینه‌های تولید، کاهش هزینه‌های دفع و تأثیر کمتر بر محیط زیست است. ماشینکاری سبز شامل سه روش خنک‌کاری تبریدی<sup>۲</sup>، روانکاری کمینه<sup>۳</sup> و هوای فشرده<sup>۴</sup> است. به‌کارگیری هر روش به نوع عملیات ماشین‌کاری، نوع ابزار و جنس قطعه‌کار بستگی دارد. کاهش دمای منطقه ماشینکاری با استفاده از نیتروژن مایع، که خنک‌کاری تبریدی نام دارد، روشی است که به‌منظور بهبود قابلیت ماشینکاری سوپرآلیاژها و مواد با استحکام بالا پیشنهاد شده است [۶].

روش نوین روانکاری کمینه برای کاهش معایب روش‌های سنتی ابداع شده است. در سیستم خنک‌کاری با هوای فشرده، هوا به‌عنوان سیال با سرعت و فشار بالا به ناحیه برش برخورد می‌کند و باعث خنک‌شدن و دفع براده از ناحیه برش می‌شود. چوی<sup>۵</sup> و همکاران (۲۰۰۲) از هوای فشرده به‌عنوان خنک‌کننده برای بررسی تأثیر آن بر صافی سطح و تنش‌های پسماند در سنگ‌زنی فولاد آلیاژی SCM21 استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که خنک‌کاری با هوای فشرده سرد باعث کاهش زبری سطح و تنش‌های پسماند و بهبود گردی نسبت به خنک‌کاری معمولی می‌شود [۷]. دهانانچیزین<sup>۶</sup> و کومار<sup>۷</sup> (۲۰۱۱) به بررسی تغییرات دمای برش در تراشکاری Ti6Al4V تحت تأثیر خنک‌کاری

معمولی و تبریدی پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که خنک‌کاری تبریدی باعث کاهش ۶۰ تا ۶۶ درصد دمای برش، ۳۵ تا ۴۲ درصد نیروهای برش و ۳۵ تا ۳۹ درصد زبری سطح نسبت به خنک‌کاری معمولی می‌شود [۸]. ایکینویچ<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۵) در تراشکاری فولاد St52-3 با استفاده از روانکاری کمینه به این نتیجه رسیدند که موقعیت نازل تأثیر قابل توجهی بر نیروهای برش ندارد. آنها کاهش ۱۷ درصدی نیروهای برشی را گزارش کردند [۹].

رحیم<sup>۹</sup> و همکاران (۲۰۱۵) در تراشکاری فولاد AISI 1045 در دو حالت خشک و روانکاری کمینه به‌صورت تجربی نشان دادند که روانکاری کمینه سبب کاهش دما، اصطکاک، نیروهای برش و سایش ابزار می‌شود. آنها کاهش ۱۰ تا ۳۰ درصدی حرارت و ۵ تا ۲۸ درصدی نیروی برش را گزارش کردند [۱۰]. شکرانی<sup>۱۱</sup> و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی اثر خنک‌کاری تبریدی بر سلامت سطح در فرزکاری آلیاژ Ti6Al4V با تیغ فرز انگشتی پرداختند و نتیجه گرفتند که خنک‌کاری تبریدی به‌طور قابل ملاحظه‌ای سلامت سطح قطعه‌کار را بهبود می‌بخشد و باعث افزایش سختی سطح قطعه‌کار و بهبود ۱۲ تا ۱۸ درصدی صافی سطح قطعه‌کار می‌گردد [۱۱].

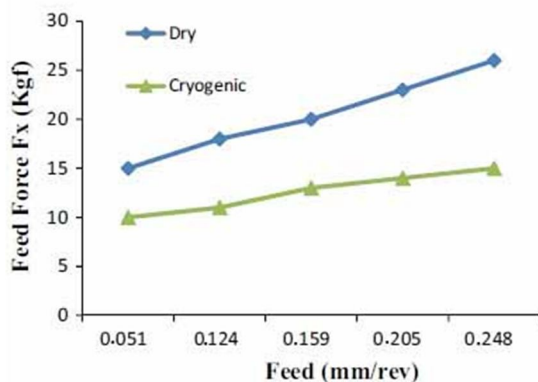
## ۲. ماشینکاری سبز

روش‌های ماشینکاری سبز به‌عنوان فرایند سازگار با محیط زیست را می‌توان به سه دسته اصلی تقسیم‌بندی نمود. این روش‌ها در ادامه تشریح شده است.

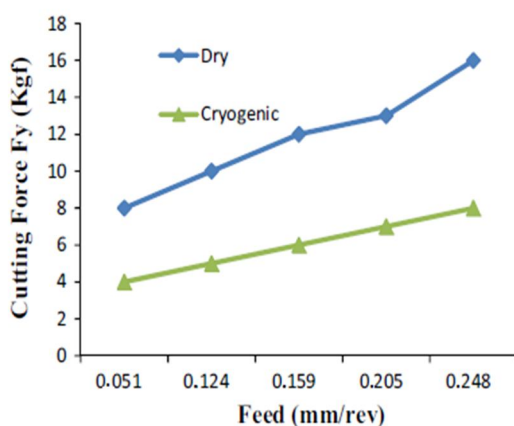
### ۱-۲. خنک‌کاری تبریدی (کرایوژنیک)

علم کرایوژنیک به بررسی خواص و استفاده از مواد در دماهای پایین می‌پردازد. نقطه جوش گازهای پایدار مثل هلیوم، هیدروژن، نئون، نیتروژن و اکسیژن به‌عنوان مخلوط سرمازا به زیر ۱۸۰- درجه سانتی‌گراد می‌رسد. گازهای کرایوژنیک در صنایعی چون الکترونیک، خودروسازی و هوافضا به‌طور گسترده به‌منظور خنک‌کاری استفاده می‌شوند. استفاده از نیتروژن در خنک‌کاری تبریدی رایج‌تر از سایر عناصر است. نیتروژن گازی بی‌بو، بی‌رنگ، بی‌مزه و غیرسمی است. نیتروژن مایع علاوه بر نداشتن عیوب روان‌کارهای رایج مثل ایجاد مشکلات پوستی، آلودگی محیط زیست و تولید بخارهای سمی، دارای قدرت خنک‌کنندگی بسیار

در دمای پایین، ارتفاع آستانه فرسایش کاهش می‌یابد این کاهش دما و اصطکاک باعث کاهش سایش ابزار و افزایش عمر آن می‌گردد. گوپتا<sup>۱۱</sup> و همکاران (۲۰۱۵) از نیتروژن مایع به‌عنوان خنک‌کننده، به‌منظور بررسی میزان تأثیر آن بر نیروهای برش، سایش ابزار و زبری سطح قطعه در تراشکاری فولاد AISI 1040 با ابزار تنگستن کارباید استفاده کردند. آنها بیان کردند که خنک‌کاری تبریدی باعث بهبود ۵۵ تا ۶۵ درصدی سایش ابزار، کاهش ۶۱ تا ۹۶ درصدی نیروهای برش و کاهش ۱۲۹ درصدی زبری سطح قطعه کار می‌شود. در شکل ۱ نیروی پیشروی و در شکل ۲ نیروی برشی به‌دست آمده از آزمایش‌های گوپتا و همکاران در ماشینکاری تبریدی و خشک با یکدیگر مقایسه شده است [۱۵].



شکل ۱. مقایسه نیروی پیشروی در ماشینکاری تبریدی و خشک [۱۵]



شکل ۲. مقایسه نیروی برشی در ماشینکاری تبریدی و خشک [۱۵]

## ۲-۲. روانکاری کمینه

با توجه به معایب روانکارها که عمدتاً شامل هزینه بالا و مسائل زیست محیطی است، استفاده از روش روانکاری کمینه با روانکار

بالایی است. این خصوصیات باعث شده است که از آن به‌عنوان یک خنک‌کننده کارآمد و سازگار با محیط زیست یاد شود. خنک‌کاری تبریدی فرایندی است که در آن از نیتروژن مایع به‌عنوان خنک‌کننده به‌علت قدرت خنک‌کنندگی بالا در عملیات براده برداری استفاده می‌شود. عملکرد اصلی خنک‌کاری تبریدی، کاهش مؤثر دما در ناحیه برش است [۱۲]. استفاده از نیتروژن مایع به‌عنوان خنک‌کننده یکی از راه‌های کاهش دما در ناحیه برش و بهبود قابلیت ماشینکاری سوپراآلیاژها، کامپوزیت‌های شبکه فلزی و مواد با استحکام بالاست است. خنک‌کاری تبریدی به‌دلیل کاهش مؤثر دمای برش در ماشینکاری کامپوزیت‌های شبکه فلزی، به‌علت عدم آلودگی، در صنعت پزشکی و به‌سبب تبدیل براده نرم به براده ترد و شکننده، در براده‌برداری از مواد پلیمری مورد استفاده قرار می‌گیرد. از معایب این روش می‌توان به هزینه‌بر بودن، ایجاد سوختگی سرد و نیاز به پوشش مناسب برای اپراتور اشاره کرد. خنک‌کاری تبریدی به سه روش انجام می‌شود:

۱. روش پیش‌سردکردن قطعه کار که هدف از آن، تغییر خاصیت مواد از نرم به شکننده است. پیش‌سردکردن قطعه کار و قرار دادن آن در حمام سیال با دمای بسیار پایین در صنعت امری ناممکن است و علاوه بر این موجب افزایش نیروهای برشی و نرخ سایش ابزار در هنگام ماشینکاری می‌گردد. در نتیجه، در این روش نیتروژن مایع به صورت پیوسته روی قطعه کار ریخته می‌شود [۱۳].

۲. روش خنک‌کاری تبریدی غیرمستقیم که هدف از آن خنک‌کاری ناحیه برش با انتقال گرما از طریق محفظه نیتروژن مایع است که در سطح ابزار یا ابزارگیر تعبیه شده است [۱۴].

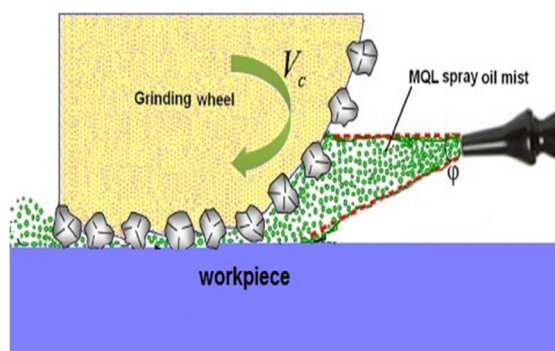
۳. روش خنک‌کاری تبریدی پاششی که هدف از آن خنک‌کاری ناحیه برش به‌ویژه سطح مشترک ابزار و براده با استفاده از نازل جهت پاشش نیتروژن مایع است [۳].

در این روش برای جلوگیری از سرد شدن قطعه کار و کاهش قابلیت ماشینکاری آن، دبی مورد نیاز به دقت محاسبه شده و سیال دقیقاً به ناحیه برش پاشیده می‌شود. در خنک‌کاری تبریدی، به‌علت تغییر خواص مواد در دمای پایین، چسبندگی بین سطوح کاهش یافته و اصطکاک کم می‌شود و به‌علت حفظ سختی ابزار

## ۲-۳. سیستم خنک کاری با هوای فشرده

در سیستم هوای فشرده، سیال با تراکم بالا در سطح تماس ابزار و قطعه کار ارسال می‌شود. فشار زیاد اجازه نفوذ بهتر سیال به ناحیه تماس بین ابزار و قطعه کار و ابزار و براده را فراهم می‌کند. بنابراین تأثیر خنک‌کنندگی بیشتر و سایش ابزار کمتر می‌شود. در سال‌های اخیر استفاده از این روش برای فرایندهای ماشینکاری به‌عنوان جایگزین روش سنتی مورد بررسی قرار گرفت. این تحقیقات نشان دادند که سیستم هوای فشرده در مقایسه با ماشینکاری خشک به‌طور قابل ملاحظه‌ای گرمای تولیدشده در ناحیه برش را کاهش می‌دهد. در سیستم خنک کاری با هوای فشرده از گازها به‌عنوان سیال برشی استفاده می‌شود که جایگزین خوبی برای خنک‌کننده‌های معمولی است. گازهای مهم در این سیستم شامل هوا، بخار آب، دی اکسید کربن، اکسیژن و نیتروژن است. هوا و بخار آب به‌علت کم‌هزینه بودن و خطر زیست محیطی کم در مقایسه با دیگر گازها بیشترین کاربرد را دارند [۱۹]. تأثیر گازها به‌عنوان سیال برشی از روغن‌ها و امولسیون‌ها کمتر است که برای بهبود خواص گازها از روش‌های مختلفی مانند: میعان، خنک‌کنندگی و فشرده‌سازی استفاده می‌شود [۲۰]. اساسی‌ترین و بیشترین کاربرد سیستم خنک کاری با هوای فشرده در ماشینکاری خشک فلزها، پلاستیک، چوب، لاستیک، سرامیک‌ها و سایر مواد است که اجازه ماشینکاری با سرعت بالا را داده و طول عمر ابزارهای برشی را افزایش می‌دهد. سیستم هوای سرد به‌عنوان یک سیستم خنک کاری قابل انتقال در پروسه‌های مختلف صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. موارد کاربرد این سیستم در سوراخ کاری و تراشکاری و فرزکاری، سنگ‌زنی، دستگاه‌های ابزار تیزکن، اره‌های برش، خنک کاری قالب‌ها و قطعه‌های تولیدی توسط پرس کاری است. در این روش خنک کاری، جت خنک‌کننده برای ارسال هوای فشرده بین سطح آزاد ابزار و براده از طریق یک سوراخ کوچک در سطح آزاد ابزار قرار می‌گیرد [۲۱]. سیستم خنک کاری با هوای فشرده تأثیر قابل توجهی در تغییر نیروهای برشی ندارد، اما دمای ابزار برشی را به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد و نیز در شکستن براده بسیار مؤثر است. ریبو<sup>۱۳</sup> و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از خنک کاری با هوای فشرده سرد نتیجه گرفتند که هوای فشرده سرد سبب کاهش اصطکاک، درجه حرارت و نیروی برشی و بهبود صافی سطح و عمر ابزار می‌گردد [۲۲]. هوای فشرده به‌صورت مماسی وارد لوله گردابی شده و در

گیاهی به‌عنوان جایگزین روش خنک کاری سنتی به‌عنوان یکی از راه‌کارهای مؤثر مطرح است. در ماشینکاری با روانکاری کمینه یا نزدیک به خشک، سیال خنک‌کننده، مخلوطی از هوا و روغن به‌صورت اسپری است که به‌صورت متناوب به منطقه ماشینکاری پاشیده می‌شود. جهت تولید مخلوط هوا و روغن در روانکاری کمینه، از دستگاه میکرورواناساز استفاده می‌شود. قطره‌های کوچک روغن - که در اندازه چند میکرون هستند - به‌صورت مستقیم به سر ابزار منتقل می‌شوند و هر دو عمل خنک کاری و روانکاری را انجام می‌دهند. حداقل مقدار روغن باعث کاهش اصطکاک روی سطح ابزار می‌شود. در این فناوری، عمل روان‌کنندگی با روغن و عمل خنک‌کنندگی با هوای فشرده تأمین می‌شود و جریان روان‌کننده از ۵ تا ۵۰۰ میلی‌لیتر بر ساعت و فشار از ۲۰ تا ۵۰ بار است [۱۶]. یکی از روانکارهای مورد استفاده در این روش، روغن گیاهی است که اثرهای مخرب روانکارهای معدنی و شیمیایی را ندارد [۲]. دبی سیال، موقعیت نازل، جهت پاشش و فشار هوای خروجی از نازل پارامترهای مؤثر در روانکاری کمینه هستند. شرایط بهینه این پارامترها به نوع ابزار و فرایند مورد استفاده بستگی دارد. ابیکواوا<sup>۱۲</sup> و همکاران (۲۰۰۶) روش روانکاری کمینه، روانکاری معمولی و شرایط خشک را در شیار تراشی با سرعت بالا روی فولاد کم کربن مقایسه کردند. آنها نتیجه گرفتند که روانکاری کمینه با توجه به مکانیزم انتقال بخار روغن به منطقه ماشینکاری باعث کاهش سایش ابزار می‌شود [۱۷]. روش روانکاری کمینه در مقایسه با دیگر روش‌های خنک کاری سبب کاهش فرسایش ابزار و بهبود عمر ابزار و صافی سطح گردیده است. در شکل ۳ استفاده از روش روانکاری کمینه در فرایند سنگ‌زنی نمایش داده شده است.



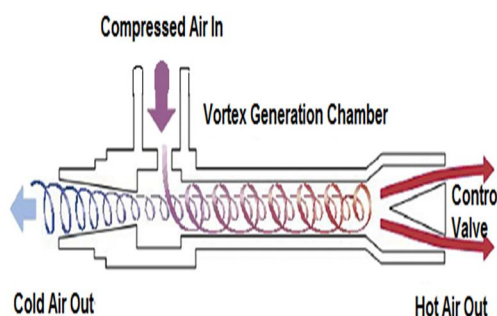
شکل ۳. نمایش شماتیک از روش روانکاری کمینه در فرایند سنگ‌زنی

خنک‌کننده به دلیل کاهش مؤثر دما و عدم آلودگی محیط زیست استفاده می‌شود. خنک‌کاری تبریدی برای ماشینکاری مواد با استحکام بالا بسیار مناسب است. در خنک‌کاری تبریدی به علت کاهش اصطکاک و دما، سایش ابزار کم می‌شود و عمر ابزار افزایش می‌یابد. با روش روانکاری کمینه می‌توان به میزان قابل توجهی هزینه ماشینکاری را کاهش داد. از نظر سلامتی، ایمنی و تأثیر بر محیط زیست، عملکرد روانکاری کمینه با روغن گیاهی بهتر از روغن‌های معدنی است. سیستم هوای فشرده اغلب برای خنک‌کاری قسمت‌هایی که با سایر روش‌ها قابل خنک‌کاری نیست استفاده می‌شود. در این روش، هوای فشرده با فشار بسیار بالا به ناحیه برش انتقال داده می‌شود. سیستم هوای فشرده علاوه بر قدرت خنک‌کنندگی بالا، در شکستن براده بسیار مؤثر است. استفاده از هوای فشرده به عنوان خنک‌کننده سبب آلودگی محیط زیست نمی‌شود.

آنجا به دو جریان هوای گرم و سرد با فشار کمتر تقسیم می‌شود. جریان سرد از روزه‌ای نزدیک به مجرای ورود هوای فشرده از لوله خارج می‌شود، در حالی که جریان گرم به سمت شیر کنترل جریان می‌رود و از آنجا از لوله خارج می‌شود. در شکل ۴ تصویر شماتیک نحوه عملکرد لوله گردابی با هوای فشرده نمایش داده شده است.

### ۳. نتیجه‌گیری

در این مقاله انواع روش‌های ماشینکاری سبز معرفی شده است. ماشینکاری سبز شامل فرایندهای سازگار با محیط زیست؛ یعنی ماشینکاری تبریدی، روان‌کاری کمینه و استفاده از هوای فشرده است. خنک‌کننده‌های مورد استفاده در این روش‌ها مانند نیتروژن، هوای فشرده و روغن‌های گیاهی، سازگاری بالایی با محیط زیست دارند. در خنک‌کاری تبریدی از نیتروژن مایع به عنوان



شکل ۴. نمایش شماتیک از نحوه عملکرد لوله گردابی با هوای فشرده [۲۳]

### ۴. مأخذ

- dry turning, *Annals of the CIRP*, 4912, 2000, pp. 67-64.
- [6] A. Khan, M. Ahmed, Improving Tool life using cryogenic cooling, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 196, 2008, pp.149-154.
- [7] H. Z. Choi, S. W. Lee, H. Jeong, The cooling effects of compressed cold air in cylindrical grinding with alumina and CBN wheels, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 127, 2002, pp. 155-158.
- [8] M. Dhananchezian, M. P. Kumar, Cryogenic turning of the Ti-6Al-4V alloy with modified cutting tool inserts, *Cryogenic*, Vol. 51, 2011, pp. 34-40.
- [۱] م. رازفر، اصول ماشین‌کاری و ابزارشناسی، امیرکبیر، ۱۳۸۹.
- [2] A. S. Lawal, Y. A. Choud, Y. Nukman, Application of vegetable oil based metal working fluids in machining ferrous metals-A review, *Journal Machine Tools & Manufacture*, Vol. 52, 2012, pp.1-12.
- [3] Y. Yildiz, M. Nalbant, A review of cryogenic cooling in machining processes, *Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, 2008, pp. 947-964.
- [4] W. R. Devries, Analysis of material Removal Prozesse, *Springer Verlag*, NewYork, 1996.
- [5] J. W. Sutherland, V. N. Kulur, N. C. King, An experimental investigation of air quality in wet and

- piece surface integrity, *Journal of Materials processing Technology*, Vol. 211, 2011, pp. 1590-1598.
- [17] T. Obikawa, Y. Kamata, J. Shinozuka, High-speed grooving with applying MQL, *Journal Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, 2006, pp. 1854-1861.
- [18] T. Tawakoli, M. J. Hadad, M. H. Sadeghi, Investigation on minimum quantity lubricant MQL grinding of 100Cr6 hardened steel using different abrasive and coolant-lubricant types, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 50, 2010, pp. 698-708.
- [19] W. Y. Liew, I. M. Hutchings, J. A. Williams, Friction and lubrication effects in the machining of aluminum alloys, *Tribology Letters*, Vol. 5, 1998, pp. 117-122.
- [20] A. Shokrani, V. Dhokia, S. T. Newman, Environmentally conscious machining of difficult to machine materials with regard to cutting fluids, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 57, 2012, pp. 83-101.
- [۲۱] ک. ب. اسمیت، اصول مدیریت انرژی، ترجمه شهناز صادقی، مهرداد طباطبائی، دانشگاه تهران، ۱۳۷۶.
- [22] E. M. Rubio, B. Agustina, M. Marin, A. Bericua, Cooling systems based on cold compressed air: a review of the applications in machining processes, *Procedia Engineering*, Vol. 132, 2015, pp. 413-418.
- [23] J. C. Sonja, B. C. Draz, C. Luka, Application of compressed cold air cooling: achieving multiple performance characteristics in end milling process, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 100, 2015, pp. 325-332.
- [9] H. Ekinovic, E. Begovic, S. Prcanovic, Investigation of influence of MQL machining parameters on cutting forces during MQL turning of carbon steel St52-3, *Procedia Engineering*, Vol. 132, 2015, pp. 608 – 614.
- [10] E. A. Rahim, M. R. Ibrahim, A. A. Rahim, S. Aziz, Z. Mohid, Experimental Investigation of Minimum Quantity Lubrication (MQL) as a Sustainable Cooling Technique, *Procedia CIRP*, Vol. 26, 2015, pp. 351-354.
- [11] A. Shokrani, V. Dhokia, S. Newman, Investigation of the effects of cryogenic machining on surface integrity in CNC end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 21, 2016, pp. 172-179.
- [12] M. Rahman, A. S. Kumar, M. U. Salam, Evaluation of minimal quantities of lubricant in end milling, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 18, 2001, pp. 235-240.
- [13] Z. Y. Wang, P. Rajur, G. M. Mura, Cryogenic PCBN turning of ceramic, *Wear*, Vol. 195, 1996, pp. 1-6.
- [14] M. I. Ahmed, A. F. Ismail, Y. A. Abakr, A. N. Amin, effectiveness of cryogenic machining with modified tool holder, *Journal of materials processing Technology*, Vol. 185, 2007, pp. 91-96.
- [15] M. K. Gupta, G. Singh, P. K. Sood, Experimental Investigation of Machining AISI 1040 Medium Carbon Steel Under Cryogenic Machining: A Comparison with Dry Machining, *Journal of The Institution of Engineers*, Vol. 96, 2015, pp. 373-379.
- [16] A. Dvillez, G. L. Goz, S. Dominiak, D. Dudzinski, Dry machining of Inconel 718, work

## بی نوشت

1. green machining
2. cryogenic machining
3. minimum quantity lubrication
4. compressed air
5. Choi
6. Dhananchezian
7. Kumar

8. Ekinovic
9. Rahim
10. Shokrani
11. Gupta
12. Obikawa
13. Rubio