



Semnan University

# Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>



## Research Article

# An Experimental Investigation on the Effects of MQL Method on Grinding of Nickel Based Superalloy 738 (Inconel 738)

M. Khazali<sup>1</sup>, H. Hatami<sup>2,\*</sup>

1.M.Sc., Mechanical Engineering, Mechanical Faculty, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

2.Associate Professor, Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran

\*Corresponding Author: [hatami.h@lu.ac.ir](mailto:hatami.h@lu.ac.ir)

### PAPER INFO

#### Paper history:

Received: 06 September 2021

Revised: 24 February 2023

Accepted: 24 April 2023

#### Keywords:

Inconel 738,  
minimum quantity lubrication (MQL),  
grinding,  
gas turbine blade,  
Taguchi.

### ABSTRACT

In this research, the usage possibility of minimum quantity lubrication in grinding super alloy Inconel 738 has been studied empirically to reach improved grinding and lubricating conditions. For reaching this purpose, based on Taguchi design of experiment method grinding variables were set in three levels and lubrications were set in six levels in order to compare conventional, dry and MQL methods. Studies have shown that in grinding this material by MQL method we can obtain the results very close to conventional mode in terms of force and surface roughness even having better surface quality. Results in MQL method by considering various oils with different viscosities show that Behzist 6046 and Canola herbal-based oil are the best replacement of conventional method in terms of force reduction and surface roughness. In fact, in the case of using the MQL method together with Behzist 6046 oil, a 50% reduction in the force output is observed and when using Behzist 6043 oil, there is only a 30% difference in the surface roughness obtained with the traditional method, which creates a better surface smoothness is visible. For all the 100 investigated modes, the results show that the optimal levels for the variables of advance speed, stone wheel speed and chipping depth are level 1, 2046 rpm and 5 microns, respectively. The specific vertical force can be predicted in more than 50% of the tests with the least error (about 20%).

© 2023 Published by Semnan University Press.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.24361.2136>

### How to cite this article:

Khazali, M., & Hatami, H. (2023). An Experimental Investigation on the Effects of MQL Method on Grinding of Nickel Based Superalloy 738 (Inconel 738). *Journal of Modeling in Engineering*, 21(74), 125-151. doi: 10.22075/jme.2023.24361.2136

## بررسی تجربی تأثیرات کاربرد روان کاری کمینه در سنگ‌زنی سوپر آلیاژ پایه نیکل ۷۳۸ (اینکونل ۷۳۸)

محسن خزلی<sup>۱</sup>، حسین حاتمی<sup>۲\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۵ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۲/۰۵ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۰۴</p> <p><b>واژگان کلیدی:</b> اینکونل ۷۳۸، روان کاری کمینه (MQL)، سنگ‌زنی، پره توربین گاز، تاگوچی.</p>	<p>در این پژوهش امکان استفاده از شرایط روان کاری کمینه در سنگ‌زنی سوپر آلیاژ اینکونل ۷۳۸ به صورت تجربی به جهت رسیدن به شرایط سنگ‌زنی و روان کاری بهینه بررسی شده است. به این منظور متغیرهای سنگ‌زنی در سه سطح و روانکاری برای مقایسه حالت سنتی و خشک و MQL در شش سطح با طراحی آزمایش تاگوچی مورد آزمایش قرار گرفته اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در سنگ‌زنی این ماده با کمک روش MQL می‌توان نتایجی نزدیک به حالت سنتی از لحاظ نیرویی و زبری سطح به دست آورد و حتی کیفیت سطح بهتری داشت. نتایج در روش MQL با بررسی روغن‌هایی با ویسکوزیته متفاوت نشان می‌دهند که روغن بهزیست ۶۰۴۶ و روغن پایه گیاهی کانولا از لحاظ کاهش نیرو و زبری سطح می‌توانند جایگزین مناسبی برای روش سنتی باشند و در نتیجه به کاهش مشکلات زیست‌محیطی ناشی از استفاده بیش‌ازحد روانکار کمک خواهند کرد. در واقع در حالت استفاده از روش MQL به همراه روغن بهزیست ۶۰۴۶، کاهش ۵۰ درصدی برآیند نیروها مشاهده می‌شود و در هنگام استفاده از روغن بهزیست ۶۰۴۳ تنها اختلاف ۳۰ درصدی در میزان زبری سطح بدست آمده با روش سنتی که صافی سطح بهتری ایجاد می‌کند، قابل مشاهده است. برای تمامی صد حالت بررسی شده نتایج نشان می‌دهد که سطوح بهینه برای متغیرهای سرعت پیشروی و سرعت چرخ سنگ و عمق براده برداری به ترتیب، سطح یک و ۲۰۴۶ دور بر دقیقه و ۵ میکرون می‌باشند. نیروی عمودی مخصوص بیش از ۵۰ درصد آزمایش‌ها با کمترین خطا (حدود ۲۰ درصد) قابل پیش‌بینی می‌باشد.</p>

### ۱- مقدمه

روان کار مورد استفاده و نحوه به‌کارگیری آن تأثیر بسزایی روی کاهش حرارت تولید شده و در نتیجه بر صافی سطح خواهد داشت [۱]. وجود آمدن خواص فیزیکی و مکانیکی متنوعی در آن‌ها می‌شود؛ این تفاوت در خواص سبب می‌شود که شرایط ماشین‌کاری و اثرات عوامل گوناگون همچون استفاده از  $MQL^2$  نیز نتایج متفاوتی را نشان دهد. اینکونل‌ها مشخصات مکانیکی خوبی در دماهای بالا دارند اما ماشین‌کاری آن‌ها دشوار است. از طرفی به سبب دشواری فرایند سنگ‌زنی که هم شامل براده برداری و هم

نگرانی‌ها به جهت مشکلات زیست‌محیطی ناشی از سیالات روان کار سنتی سبب شده تا تمایل به استفاده از سیالات زیست‌تخریب‌پذیر و قابل بازیافت روزبه‌روز افزایش یابد. آگاهی نسبت به نوع روان کار و نحوه ماشین‌کاری تأثیر به‌سزایی روی افزایش بازده خواهد داشت. به‌طور کلی گرمای تولید شده در محل براده برداری و اصطکاک بین سطح ابزار و قطعه کار از عوامل مهم و تأثیرگذار روی کیفیت قطعه ماشین‌کاری شده هستند. آگاهی مناسب نسبت به نوع

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: hatami.h@lu.ac.ir

<sup>2</sup> Minimum quantity lubrication

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف  
۲. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

لغزش می‌شود و می‌بایست مابین تولید حرارت در آن و روان کاری تعادل ایجاد شود؛ تحقیقات اندکی روی استفاده از روش حداقل روان کار در سنگ‌زنی انجام شده است. بررسی استفاده از روش MQL در سنگ‌زنی روی اینکونل ۷۵۱ نشان می‌دهد که نیروهای ماشین‌کاری، دما و صافی سطح تا حد زیادی بهبود خواهند یافت. این آلیاژ به سبب توانایی تحمل دمای بالا در شیرهای خروجی دود موتورهای احتراق داخلی کاربرد دارد [۳]. آلیاژهای اینکونل به‌طور کلی دارای درصد بالایی نیکل و کروم به‌عنوان عناصر پایه هستند که به آن‌ها خواصی همچون مقاومت به خوردگی و استحکام در دماهای بالا را می‌دهند و به‌صورت رسوبی نیز سخت‌کاری می‌شوند اما آنچه باعث تفاوت این آلیاژها باهم می‌شود درصد سایر عناصر در ترکیبات آن‌هاست که باعث به اینکونل ۷۳۸ بعد از دو عنصر اصلی نیکل و کروم شامل حدود ۹ درصد کبالت و حدود ۳ درصد از هر یک از عناصر آلومینیوم و تیتانیوم و تنگستن است؛ وجود کبالت به‌عنوان عنصر دوم از لحاظ درصد حجمی در این آلیاژ خواصی چون افزایش استحکام فاز رسوبی و جلوگیری از لغزش آن و در کل افزایش استحکام در دماهای بالا و کاهش خزش در حالت تک‌بلور را در پی دارد

درحالی‌که در اینکونل ۷۵۱ آهن با حدود ۵ تا ۹ درصد حجمی بیشترین فراوانی را دارد و میزان آلومینیوم و تیتانیوم که موجب استحکام پیر سختی و افزایش استحکام آن می‌شوند حدود ۱/۵ تا ۲ درصد می‌باشند؛ این تفاوت در ترکیبات سبب می‌شود که خواص مکانیکی تأثیرگذار در سنگ‌زنی این سوپر آلیاژها نیز متفاوت باشد و به‌این ترتیب نتایج به‌دست‌آمده در یک پژوهش برای تمامی اینکونل‌ها قابل‌تعمیم نیست [۲،۳].

در سیستم‌های MQL بهینه‌شده مقدار روان کننده، حدود ۱۰ ml/hr است. از ویژگی‌های خاص فناوری MQL این است که اگر به‌طور صحیح استفاده شود، ابزار، قطعه کار و براده خشک باقی می‌مانند. در نمونه‌ای از یک منبع خارجی، مخلوط هوا و روغن با یک یا چند نازل از بیرون به ابزار پاشیده می‌شود. تعداد و جهت نازل‌ها و همچنین الگوی پاشش که به طراحی نازل بستگی دارد، همگی تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد ماشین‌کاری دارند. این روش به‌عنوان مثال در اره کاری، فرزکاری پیشانی با ابزارهای متداول همچنین تراشکاری استفاده می‌شود. از مزیت‌های منبع داخلی مایع واسط MQL، این است که مشکلاتی که

درزمینه‌ی موقعیت دهی مثل حالتی که از نازل‌های خارجی استفاده می‌شود، پیش نمی‌آید و یکپارچگی پاشش MQL به ماشین‌ابزار باعث می‌شود که نیازی به محدود کردن فضای کار به‌وسیله خطوط تغذیه وجود نداشته باشد. زمانی که از منبع MQL داخلی استفاده می‌شود، بین سیستم‌های یک کاناله و دوکاناله تفاوت وجود دارد [۴].

اینکونل (Inconel)، نام تجاری پوششی از گروه پوشش‌های پایه نیکل آستنیتی است که در دماهای بسیار بالا استفاده می‌شود. عنصر دوم از لحاظ درصد ترکیب شیمیایی، کروم بوده که باعث تغییر در خواص پوشش می‌شود. نام تجاری Inconel توسط شرکت Special Metals Co. ثبت شده است. این آلیاژ از خانواده‌ی محلول جامد بین نشین نیکل-کروم می‌باشد و به‌طور کلی برای انجام برنامه‌هایی با دمای بالا استفاده می‌شود. به نام‌های "inconel"، "inco" نیز خوانده می‌شود. نام‌های تجاری رایج برای اینکونل عبارت‌اند از: Inconel 625, Chronin625, Altemp 625, Haynes 625, Nickelvac 625, Nicrofer 6020. این آلیاژ اولین بار توسط گروه تحقیقاتی در انگلستان ساخته شده است. استحکام دمابالای اینکونل بسته به نوع آن، مربوط به استحکام دهی محلول جامد یا استحکام دهی رسوبی است. در انواع پیر سختی یا استحکام دهی رسوبی، مقادیر کمی از نیوبوم با نیکل ترکیب شده و ترکیب بین فلزی گاما پرایم (Ni3Nb) را تشکیل می‌دهند. گاما پرایم کریستال‌های مکعبی کوچکی را تشکیل می‌دهد که لغزش و خزش مؤثر در دماهای بالا را مهار می‌کنند. تشکیل این کریستال‌ها با زمان افزایش می‌یابد. سوپر آلیاژ اینکونل ۷۳۸ یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین سوپر آلیاژهای پایه نیکل در صنایع هوایی، نیروگاهی و ساخت پره توربین‌های گازی می‌باشد. به‌طورمعمول، پره‌های توربین‌های گازی مورد استفاده در نیروگاه‌های تولید برق در دمای بالا و تنش زیاد کار می‌کنند. سوپر آلیاژهای پایه نیکل، کبالت یا آهن، گروهی از مواد هستند که قابلیت کار در دماهای بالا را دارند و تا دمایی برابر ۸۵ درصد نقطه ذوبشان استحکام خود را حفظ می‌کنند و مقاومت خوبی در برابر خوردگی و اکسیداسیون در دمای بالا از خود نشان می‌دهند. سوپر آلیاژ پایه نیکل به علت پایداری و استحکام در دماهای بالا و همچنین مقاومت زیاد در برابر تغییر شکل، خزش، خوردگی و اکسیداسیون، کاربرد گسترده‌ای در صنایع هوایی، نیروگاهی، نظامی و ساخت پره

لغزش می‌شود و می‌بایست مابین تولید حرارت در آن و روان کاری تعادل ایجاد شود؛ تحقیقات اندکی روی استفاده از روش حداقل روان کار در سنگ‌زنی انجام شده است. بررسی استفاده از روش MQL در سنگ‌زنی روی اینکونل ۷۵۱ نشان می‌دهد که نیروهای ماشین‌کاری، دما و صافی سطح تا حد زیادی بهبود خواهند یافت. این آلیاژ به سبب توانایی تحمل دمای بالا در شیرهای خروجی دود موتورهای احتراق داخلی کاربرد دارد [۳]. آلیاژهای اینکونل به‌طور کلی دارای درصد بالایی نیکل و کروم به‌عنوان عناصر پایه هستند که به آن‌ها خواصی همچون مقاومت به خوردگی و استحکام در دماهای بالا را می‌دهند و به‌صورت رسوبی نیز سخت‌کاری می‌شوند اما آنچه باعث تفاوت این آلیاژها باهم می‌شود درصد سایر عناصر در ترکیبات آن‌هاست که باعث به اینکونل ۷۳۸ بعد از دو عنصر اصلی نیکل و کروم شامل حدود ۹ درصد کبالت و حدود ۳ درصد از هر یک از عناصر آلومینیوم و تیتانیوم و تنگستن است؛ وجود کبالت به‌عنوان عنصر دوم از لحاظ درصد حجمی در این آلیاژ خواصی چون افزایش استحکام فاز رسوبی و جلوگیری از لغزش آن و در کل افزایش استحکام در دماهای بالا و کاهش خزش در حالت تک‌بلور را در پی دارد

درحالی‌که در اینکونل ۷۵۱ آهن با حدود ۵ تا ۹ درصد حجمی بیشترین فراوانی را دارد و میزان آلومینیوم و تیتانیوم که موجب استحکام پیر سختی و افزایش استحکام آن می‌شوند حدود ۱/۵ تا ۲ درصد می‌باشند؛ این تفاوت در ترکیبات سبب می‌شود که خواص مکانیکی تأثیرگذار در سنگ‌زنی این سوپر آلیاژها نیز متفاوت باشد و به‌این ترتیب نتایج به‌دست‌آمده در یک پژوهش برای تمامی اینکونل‌ها قابل‌تعمیم نیست [۲،۳].

در سیستم‌های MQL بهینه‌شده مقدار روان کننده، حدود ۱۰ ml/hr است. از ویژگی‌های خاص فناوری MQL این است که اگر به‌طور صحیح استفاده شود، ابزار، قطعه کار و براده خشک باقی می‌مانند. در نمونه‌ای از یک منبع خارجی، مخلوط هوا و روغن با یک یا چند نازل از بیرون به ابزار پاشیده می‌شود. تعداد و جهت نازل‌ها و همچنین الگوی پاشش که به طراحی نازل بستگی دارد، همگی تأثیر قابل‌توجهی بر عملکرد ماشین‌کاری دارند. این روش به‌عنوان مثال در اره کاری، فرزکاری پیشانی با ابزارهای متداول همچنین تراشکاری استفاده می‌شود. از مزیت‌های منبع داخلی مایع واسط MQL، این است که مشکلاتی که

توربین‌های گازی دارد سوپر آلیاژ اینکونل ۷۳۸ یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین سوپر آلیاژهای پایه نیکل در ساخت قطعات توربین‌های گازی می‌باشد که اولین بار توسط شرکت «اینترنشنال نیکل» تولید و به‌منظور استفاده در ساخت پره توربین وارد بازار شد. پره‌های ردیف اول این توربین‌ها معمولاً از جنس سوپر آلیاژهای پایه نیکل هستند که یکی از متداول‌ترین آن‌ها سوپر آلیاژ IN738LC می‌باشد. این سوپر آلیاژ ویژگی‌های خزشی، خستگی و خوردگی مطلوبی دارد. پره‌های ساخته‌شده از این نوع آلیاژ پس از مدتی کار کردن در دمای بالا به علت خزش، خستگی و همچنین، خوردگی داغ و اکسیداسیون، ویژگی‌های خود را از دست می‌دهند و باید تعویض گردند. به‌طورمعمول، در نیروگاه‌ها کنترل دقیقی روی دمای کاری و تنش‌های اعمالی صورت نمی‌گیرد و از این‌رو پره‌ها در شرایط متغیر و احیاناً نامطلوبی کار می‌کنند و به همین دلیل عمر دقیق آن‌ها را نمی‌توان پیش‌بینی کرد. ریزساختار IN738LC متشکل از چندین فاز از جمله: زمینه آستنیتی  $\gamma$ ، رسوب‌های همدوس (کوهرنرنت) و منظم  $\gamma'$ ، کاربیدهای مختلف، پوتکتیک  $\gamma - \gamma'$  و مقادیر ناچیزی فازهای مضر همچون: سیگما، اتا و لاوز می‌باشد [۵].

به دلیل خصوصیات مکانیکی مناسب اینکونل ۷۱۸ در سال‌های اخیر کاربرد زیادی پیدا کرده است. استفاده از بخار آب و هوا به‌عنوان سیال خنک کار تأثیر به‌سزایی روی مشخصات ماشین‌کاری آن از جمله خوردگی ابزار خواهد داشت به‌طوری‌که واکنش شیمیایی آن با قطعه کار موجب تولید اکسیدهایی مثل  $Cr_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Fe_3O_4$  می‌شود. این اکسیدهای ناپایدار به‌طور مؤثری به‌عنوان روان کار عمل کرده و موجب کاهش خوردگی ابزار می‌شوند [۶]. اینکونل ۷۱۸ قابلیت ماشین‌کاری و تراشکاری پایینی دارد اما برای استفاده از ویژگی‌های خاص آن شامل مقاومت زیاد در دماهای بالا، مقاومت به خوردگی، مقاومت به خزش، نسبت استقامت به وزن بالا و طول عمر کاری بالای آن می‌بایست قابلیت ماشین‌کاری آن نیز بهبود داده شود [۷]. استفاده از روش حداقل روان کار در ماشین‌کاری فلزات به‌ویژه آلیاژهای خاص سبب شده تا مطالعه بر روی ساختار قطرات روغن که تحت فشار به محل ماشین‌کاری اسپری می‌شوند اهمیت پیدا کند [۸]. در پژوهشی که توسط ستی و همکارانش انجام شده است؛ هدف یافتن شرایط بهینه MQL شامل اندازه و تراکم ذرات، دبی و

فشار مخلوط هوا و روان کار در سنگ‌زنی آلیاژ پایه تیتانیوم است [۹]. در پژوهشی که توسط شائو و همکارانش انجام شد؛ تلاش شد تا مدلی فیزیکی و قابل‌فهم از آنچه در فرایند سنگ‌زنی همراه با روان کاری حداقل اتفاق می‌افتد ارائه شود [۱۰]. در آزمایش‌هایی که توسط شن و همکارانش بر روی سنگ‌زنی چدن با سنگ CBN و چسب شیشه‌ای به‌منظور تعیین اثرات روش MQL انجام گرفت مشخص شد که در مقایسه با روش سنتی این روش می‌تواند با نیروهای تقریباً یکسان همان نرخ برداشت را داشته باشد اما صافی سطح در روش سنتی بهتر است زیرا براده‌ها را بهتر خرد می‌کند. [۱۱]. در پژوهشی که باتاکو در سال ۲۰۱۰ بر روی اثر استفاده از MQL بر روی سنگ‌زنی سطحی فولادهای سخت و نرم انجام شد؛ نیروهای مماسی و عمودی و دما و زبری سطح در سه حالت خشک و سنتی و MQL اندازه‌گیری شده‌اند. آزمایش‌ها با کمک الگوریتم تاگوشی طراحی شده و پس از بررسی نتایج، گزارش‌ها نشان می‌دهند که روش MQL تأثیر مثبتی روی کاهش نیرو و توان مصرفی داشته و برخلاف روش سنتی به‌نوعی مستقل از روند آزمایش عمل کرده است. هم‌چنین دمای قطعه کار در این روش بسیار کم‌تر از حالت خشک بوده به‌طوری‌که دما به میزان بحرانی قطعه نمی‌رسد اما صافی سطح در حالت سنتی بهتر است [۱۲]. در پژوهشی که توسط گوژ در سال ۲۰۱۴ انجام شده است سه روش بلوک تفلونی، میله آلومینیوم اکسید و هوای فشرده به‌منظور تمیز کردن سنگ در کنار روش MQL به‌کاررفته شده‌اند [۱۳]. در طراحی توربین‌ها پارامترهای زیادی در افزایش عمر آنها مطرح هستند که در پژوهش‌هایی به این پارامترها پرداخته شده مانند خنک کاری‌های تزریقی، نحوه پرداخت سطح و کاهش تمرکز تنش [۱۴-۱۸]

در این پژوهش تلاش‌هایی صورت گرفت تا به‌صورت تجربی و بر مبنای طراحی آزمایش‌هایی دقیق به تأثیر استفاده از روش روانکاری کمینه در سنگ‌زنی سوپرآلیاژ پایه نیکل اینکونل ۷۳۸ پرداخته شود. از آنجایی‌که اینکونل ۷۳۸ در ساخت پره‌های توربین گاز کاربرد دارد و دقت ابعادی و کیفیت سطوح آن حائز اهمیت است لذا در فرایند سنگ‌زنی این آلیاژ می‌بایست دقت کافی به عمل آید زیرا هرگونه ریز ترکی که بر سطح پره‌های توربین ساخته‌شده از این آلیاژ به جا بماند در دوره‌های بالا محلی برای تمرکز تنش و رشد ترک خواهد بود. متغیرهای انتخاب‌شده برای

## ۲- تجهیزات آزمایش

به منظور انجام این پژوهش تجهیزاتی شامل: دستگاه سنگ زنی، دستگاه MQL، دینامومتر، زبری سنج و میکروسکوپ دیجیتال مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

### ۲-۱- دستگاه سنگ زنی

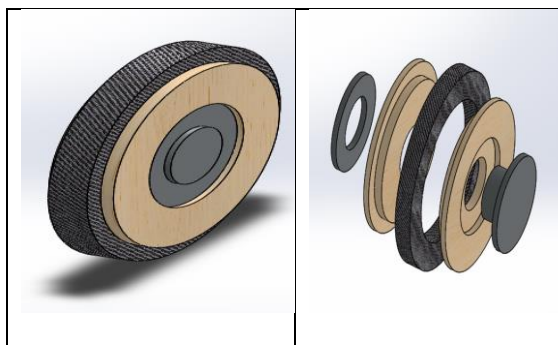
دستگاه سنگ زنی مورد استفاده در این پژوهش دستگاه NAGASE با مدل SGH-600T ساخت کشور ژاپن می‌باشد. این دستگاه سنگ زنی تخت را با دقت ۵ میکرون انجام می‌دهد. (جدول ۱ و شکل ۱).

بررسی عبارت‌اند از نوع روانکار که شامل روغن کانولا، روغن بهزیست ۶۰۴۶ و روغن بهزیست ۶۰۴۳ به ترتیب ویسکوزیته و حالت‌های خشک و سنتی و هوای فشرده می‌باشد. همچنین سرعت پیشروی و سرعت چرخ سنگ و عمق براده برداری نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به عنوان خروجی نیز نیروهای مماسی و عمودی و زبری سطح و همچنین کیفیت میکروسکوپی سطح مورد بررسی قرار گرفتند. طراحی آزمایش‌ها بر اساس الگوریتم تاگوچی صورت گرفت.

جدول ۱- محاسبه سرعت حرکت طولی میز دستگاه سنگ زنی

سرعت میز (m/min)	طول (cm)	زمان (S)	سطح شیر هیدرولیکی دستگاه سنگ زنی
۳۰۹	۶۵	۲۲.۸۶	۱
۵.۷۸	۶۵	۱۲.۸۶	۲
۹.۴۴	۶۵	۸.۲۶	۳

سنگ و حداقل کردن لغزش آن امکان قرارگیری مناسب آن در دستگاه را نیز فراهم کنند. (شکل ۳)



شکل ۲- قطعات طراحی شده برای نصب سنگ



شکل ۱- دستگاه سنگ زنی

### ۲-۲- چرخ سنگ

مهم‌ترین بخش دستگاه چرخ سنگ می‌باشد که در نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها نیز تأثیر بسیار مهمی دارد به همین خاطر می‌بایست به درستی انتخاب شود. به همین خاطر چرخ سنگی با مشخصات Tyrolit C 80 J 30 V برای سنگ زنی اینکونل ۷۳۸ مناسب است انتخاب شده است. به دلیل این که چرخ سنگ تهیه شده از نظر قطر داخلی با دستگاه همخوانی نداشت می‌بایست مطابق با شکل (۲) قطعه‌ای طراحی می‌شد که هم سنگ را از دو طرف مهار کند و هم به صورتی ساخته شود که قطر داخلی آن با قطر محل قرارگیری سنگ روی دستگاه برابر باشد و قطر خارجی آن مناسب برای قرارگیری سنگ باشد. به این منظور دو قطعه از جنس آلومینیوم طراحی شدند تا علاوه بر مهار



شکل ۳- سنگ پس از نصب قطعات آلومینیومی

## ۳-۲- دستگاه MQL

نحوه عملکرد این دستگاه به این صورت است که فشار هوای ایجادشده توسط کمپرسور ابتدا توسط شلنگ به ورودی دستگاه وارد می‌شود در مسیر آن ابتدا یک شیر کنترل فشار قرار داده شده است تا بتوان به کمک آن میزان فشار هوای ورودی به دستگاه را کنترل کرد سپس از این شیر دو خروجی گرفته شده است یکی از این خروجی‌ها به قسمت مخلوط کننده هوا و روغن متصل می‌شود و دیگری به شیر تنظیم کننده فشاری متصل خواهد شد که فشار روی مخزن روان کار را تنظیم می‌کند. به این ترتیب توسط شیر دوم فشار از قسمت بالایی مخزن وارد شده و موجب جریان یافتن روان کار به درون مخلوط کننده می‌شود در این قسمت مخلوط هوا و روغن توسط لوله نازکی که در آن تعبیه شده به سر نازل انتقال می‌یابد. علت این امر نیز این است که در صورتی که مخلوط در ابتدا داخل لوله انتقال به نازل قرار گیرد ممکن است با به هم پیوستن قطرات اندازه آن‌ها از میزان مطلوب بزرگ‌تر شده و فرایند اسپری کردن به خوبی انجام نشود در نتیجه تأثیر MQL را نیز نمی‌توان به‌طور صحیح بررسی کرد. تصویر دستگاه و اجزای آن در شکل (۴) آمده است.



شکل ۴- MQL و اجزای آن

## ۴-۲- دینامومتر

برای اندازه‌گیری نیروها از دینامومتر ساخت شرکت کیستلر مدل B9257 استفاده شده است این دینامومتر که در داخل آن المان پیزو قرار دارد به کمک آن نیروها و گشتاورهای واردشده را به صورت آنالین به دستگاه تقویت کننده متصل به آن می‌فرستد و به کمک رایانه و نرم‌افزار خاص طراحی شده برای دینامومتر می‌توان این نیروها را مشاهده کرد (شکل ۵).

## ۵-۲- زبری سنج

در این پژوهش برای محاسبه زبری از دستگاه زبری سنج TR200 ساخت شرکت Time High Tech که در شکل

(۶) آمده استفاده شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۵- الف) قطعه کار و دینامومتر نصب شده روی دستگاه سنگ‌زنی، ب) مجموعه تقویت کننده و رایانه متصل به دینامومتر



شکل ۶- زبری سنج

## ۶-۲- میکروسکوپ

مطابق شکل (۷) برای تصویربرداری از سطوح سنگ خورده نمونه‌ها به منظور بررسی کیفیت سطح از میکروسکوپ دیجیتالی مدل AM-4113ZT ساخت شرکت Dino light با قابلیت بزرگنمایی تا ۲۵۰ برابر و با وضوح ۱.۳ مگاپیکسل که قابلیت تنظیم نور را نیز داراست استفاده شده است.



شکل ۷- میکروسکوپ دیجیتال

هوا خارج می‌شود اما در حالتی که روغن‌ها می‌بایست توسط دستگاه MQL اسپری شوند از سه روغن بهزیست ۶۰۴۶، بهزیست ۶۰۴۳ و روغن کانولا که پایه گیاهی و سرشار از اسیدهای چرب است استفاده شده است. روغن کانولا در واقع نامی تجاری برگرفته از نام گیاهی است به همین نام که در کشور کانادا می‌روید، این روغن در اصل از دانه‌هایی روغنی به نام ریپ سید ۱ گرفته می‌شود. جداول ۳، ۴ و ۵ مشخصات فیزیکی روغن کانولا و روغن‌های ۶۰۴۶ و ۶۰۴۳ را نشان می‌دهند.

جدول ۲- شرایط سنگ‌زنی

عمق برش (μm)	سرعت چرخ (m/s)	پیشروی (m/min)
۵	۲۰	۲.۵
۱۰	۲۵	۵
۱۵	۳۰	۱۰

جدول ۳- مشخصات روغن کانولا.

پارامتر	مقدار
چگالی نسبی (g/cm <sup>3</sup> , 20 °c)	۰.۹۱۴-۰.۹۱۷
ضریب شکست (nD 40 °c)	۱.۴۶۵-۱.۴۶۷
مقدار تردی	۶۷-۷۰
ویسکوزیته (kinematic at 20 °c, mm <sup>2</sup> /s)	۷۸.۲
تایید (15 hrs at 4 °c)	تایید
Smoke point (°c)	۲۲۰-۲۳۰
Flash point (°c)	۲۷۵-۲۹۰
گرمای ویژه (j/g at 20 °c)	۱.۹۱۶-۱.۹۱۰
Thermal conductivity (w/m*k)	۰.۱۷۹-۰.۱۸۸

حال با مشخص شدن چهار متغیر و سطوح آن‌ها می‌بایست طراحی آزمایش انجام گیرد. حالت ایده آل این است که طراحی به صورت فاکتوریل کامل انجام شود اما با توجه به تعداد بالای عوامل و سطوح آن‌ها تعداد آزمایش‌ها در این حالت زیاد شده و در واقع امکان انجام آن نیست بهترین

### ۳- طراحی آزمایش - روش تاگوچی

تاگوچی بر این باور بود که بهترین راه بهبود کیفیت طراحی و ایجاد آن در خود محصول است. تاگوچی برای ارائه آزمایش‌های گروه‌های ویژه‌ای از آرایه‌های ارتوگونال (OA) را ترکیب و ایجاد نمود. آرایه‌های ارتوگونال فرایند طراحی آزمایش‌ها را سهولت می‌بخشد. روش تاگوچی دو عنصر جدید و قدرتمند را ایجاد می‌کند؛ این روش یک روش مرتب و منظم برای توسعه یک محصول و یا بررسی مسائل پیچیده است. دوم اینکه این روش وسیله‌ای را برای بازرسی مقرون‌به‌صرفه گزینه‌های نهایی قابل‌استفاده فراهم می‌کند و به‌طور کلی در چهار مرحله انجام می‌شود چهار مرحله انجام می‌شود:

۱- کنکاش مشخصه‌های کیفی و پارامترهای

طراحی مهم در ارتباط با محصول/فرایند.

۲- طراحی و هدایت آزمایش‌ها.

۳- تحلیل نتایج برای تعیین شرایط بهینه.

۴- انجام آزمون و یا آزمون‌های تأیید با استفاده از

شرایط بهینه [۱۹].

لذا در این پژوهش، نوع روانکار، عمق برش، سرعت چرخ و سرعت میز یا Feed به‌عنوان چهار متغیر اصلی انتخاب شده اند. فشار دستگاه در بیشینه فشار ممکن آن قرار داده شده است. برای هر سیال نیز در این فشار دبی بعد از باز کردن شیرها محاسبه شده است. هم‌چنین از دیگر عوامل تأثیرگذار بر این فرایند را می‌توان نحوه پاشش نازل دانست در این طراحی این مسئله ثابت قرار داده شده است تا اثر سایر عوامل مشاهده گردد و به همین خاطر با توجه به این نکته که در اغلب پژوهش‌هایی که نحوه پاشش را مورد بررسی قرار داده‌اند بهترین حالت به‌دست آمده پاشش مایل روانکار به سنگ است در این آزمایش‌ها نیز نازل به‌صورت مایل به سمت سنگ قرار داده شده است؛ بنابراین سنگ‌زنی تخت اینکونل ۷۳۸ تحت شرایط سنگ‌زنی زیر و با شش حالت روانکاری خشک، سنتی، هوای فشرده و سه روغن که به‌صورت MQL پاشیده می‌شوند انجام خواهد شد (جدول ۲).

در حالت سنتی از آب به‌عنوان روانکار استفاده شده و در حالت هوای فشرده نیز از نازل خروجی دستگاه MQL تنها

<sup>1</sup> rape seed

در آن همان‌طور که محاسبات نشان می‌دهد نزدیک‌ترین سرعت‌ها زمانی به دست می‌آیند که شیر هیدرولیکی دستگاه سنگ‌زنی در سطوح ۱، ۲ و ۳ باشد. بنابراین در جدول طراحی هم از همین سطوح استفاده خواهد شد. در ادامه نیز در تمامی نمودارها و جداول به‌جای بیان سرعت پیشروی میز دستگاه سنگ‌زنی برحسب  $m/min$  از سطوح ذکر شده استفاده خواهد شد (جدول ۶).

راه‌حل طراحی آزمایش‌ها به کمک روش تاگوجی می‌باشد زیرا با کم‌ترین تعداد آزمایش‌ها امکان تحلیل را به ما می‌دهد. به این منظور برای طراحی این آزمایش با توجه به عوامل و سطوح آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار Minitab آزمایش‌ها به‌صورت زیر خواهند بود. توجه به این نکته ضروری است که با توجه به بررسی‌ها میزان پیشروی  $۲/۵$ ،  $۵$  و  $۱۰$  متر بر دقیقه تعیین شده است. اما با توجه به آنالوگ بودن این تنظیمات در دستگاه و مقیاس هیدرولیکی موجود

جدول ۴- مشخصات روغن بهزیست ۶۰۴۶

تست	رنگ	PH (5%)	قلیائیت کل (5%)	هدایت الکتریکی (5%)	شاخص ریفراکتومتری (5%)	وزن مخصوص	نقطه اشتعال	نقطه ریزش	گرانروی در $40^{\circ}C$	گرانروی در $100^{\circ}C$	شاخص گرانروی
روش تست	Visual	ASTM EY۰	استاندارد داخلی	استاندارد داخلی	استاندارد داخلی	ASTM D۱۲۹۸	ASTM D۹۲	ASTM D۹۷	ASTM D۴۴۵	ASTM D۴۴۵	ASTM D۲۲۷۰
واحد	-	-	ml of 0.1N HCL	s/cm $\mu$	Brix	-	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	cSt	cSt	-
محدوده	قهوه ای روشن	-	-	-	-	۰.۸۹	۱۵۵	$\leq ۶$	۳۷	-	-

جدول ۵- مشخصات روغن بهزیست ۶۰۴۳

تست	رنگ	PH (5%)	قلیائیت کل (5%)	هدایت الکتریکی (5%)	شاخص ریفراکتومتری (5%)	وزن مخصوص	نقطه اشتعال	نقطه ریزش	گرانروی در $40^{\circ}C$	گرانروی در $100^{\circ}C$	شاخص گرانروی
روش تست	Visual	ASTM EY۰	استاندارد داخلی	استاندارد داخلی	استاندارد داخلی	ASTM D۱۲۹۸	ASTM D۹۲	ASTM D۹۷	ASTM D۴۴۵	ASTM D۴۴۵	ASTM D۲۲۷۰
واحد	-	-	ml of 0.1N HCL	s/cm $\mu$	Brix	-	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	cSt	cSt	-
محدوده	زرد	-	-	-	-	۰.۸۳	۹۵	$\leq ۱۵$	۳	-	-

#### ۴- بررسی نتایج

جهت اندازه‌گیری دبی تنها نیاز به مشخص کردن زمان رسیدن به سطح ارتفاعی معین می‌باشد که این امر هم توسط کرنومتر انجام شده است. بنابراین دبی روانکارهای مورد استفاده در این آزمایش‌ها به‌صورت جدول ۷ است. چرخ سنگ به‌صورت پادساعتگرد حرکت می‌کند. برای انجام هر تست برای اینکه اثرات سنگ‌زنی روبه پایین و رو به بالا باهم تداخل نکنند قطعه کار در سمت چپ سنگ

قرار داده شده و حرکت جانبی میز متوقف می‌شود و پس از تنظیم سرعت چرخ سنگ و Feed و همچنین فراهم کردن شرایط روانکاری مطابق با طراحی آزمایش، میزان بار موردنظر به سنگ داده شده و قطعه یکبار به سمت سنگ حرکت می‌کند و سطح آن سنگ زده می‌شود پس از آن درحالی‌که از عبور مجدد قطعه از زیر سنگ در همان محل تست قبلی جلوگیری شده سنگ به اندازه ضخامت آن جابه‌جا می‌شود تا در کنار محل تست نخست تست بعدی



جدول ۷- محاسبه دبی

روانکار	اختلاف ارتفاع (mm)	زمان (s)	دبی (mm <sup>3</sup> /s)
کانولا	۲	۴۳.۷۳	۲۰۲
۶۰۴۶	۲	۴۲.۰۷	۲۱۰
۶۰۴۳	۳	۸.۶۱	۱۵۳۸



شکل ۸- مجموعه در حال انجام تست



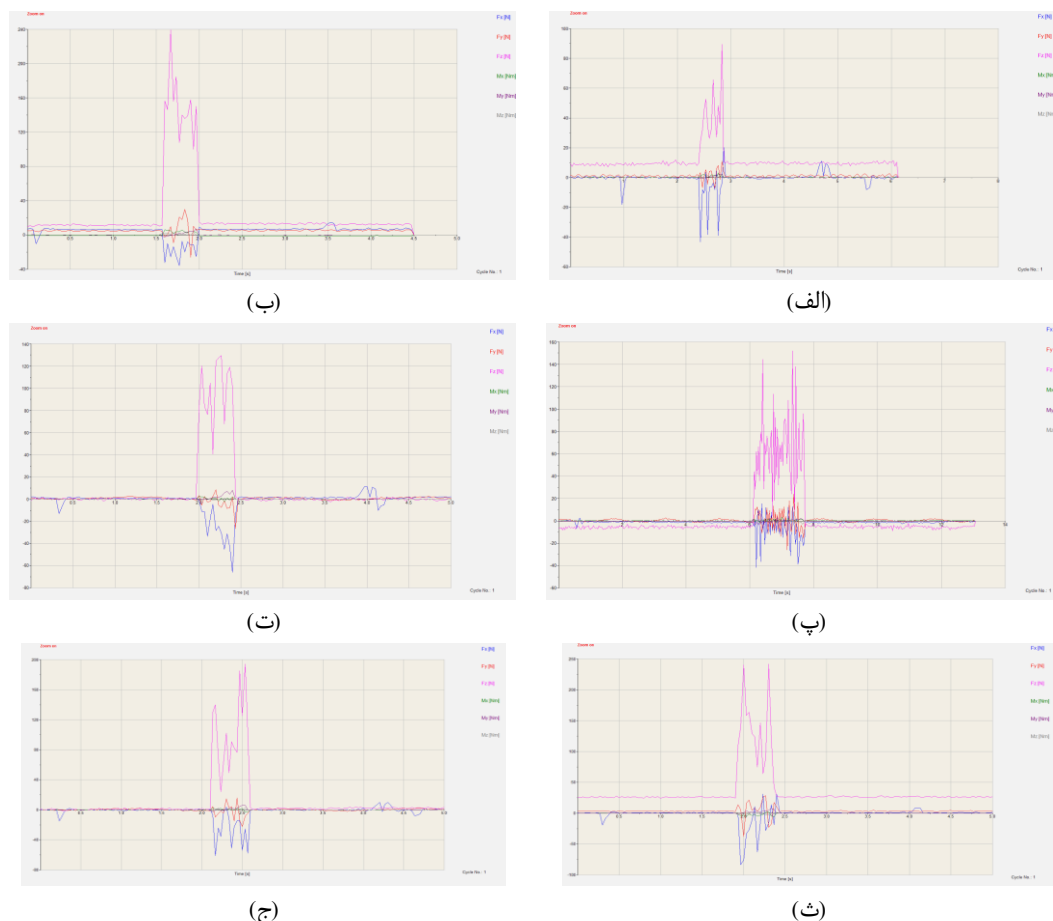
شکل ۹- قطعه کار باز شده پس از انجام تست

به سبب اختلال‌های به وجود آمده در جریان داده‌برداری دینامومتر و مشاهده نویزها در نیروی نمایش داده‌شده در نرم‌افزار جدا از تکرارهای اصلی، هر آزمایش به‌طور مستقل برای رسیدن به شرایط داده‌برداری مطلوب چندین بار تکرار شده و به‌طور کلی برای این که اثر پدیده‌های نامعین و نویزها و یا عوامل غیرقابل کنترل حذف گردد هر آزمایش با سه بار تکرار و به‌صورت تصادفی انجام شده است. به‌علاوه این که چرخ سنگ پس از هر سه بار انجام تست با سرعت دورانی ۲۰۴۶ دور بر دقیقه و عمق ۱۵ میکرون Dress شده است. در شکل (۱۰) در ابتدا به‌عنوان نمونه برای هر یک از شرایط روانکاری یک نمودار نیرو که توسط دینامومتر ثبت شده نشان داده شده است. متوسط نیروهای مماسی و عمودی ثبت شده توسط دینامومتر مطابق جدول ۸ است.

هم زده شود به همین ترتیب تست سوم نیز در یک‌طرفه سطح قطعه کار انجام خواهد شد. لازم به ذکر است که هر بار پیش از حرکت نهایی قطعه به سمت سنگ با سرعت معین قطعه زیر سنگ قرار گرفته و سنگ کاملاً با سطح آن مماس می‌شود. پس از انجام سه تست قطعه باز می‌شود تا زبری سنجی و عکس‌برداری از سطح قطعه پیش از استفاده از طرف دیگر آن صورت گیرد. بدین ترتیب پس از اندازه‌گیری متغیرهای مدنظر تمام شرایط ذکر شده می‌بایست برای حالت روانکاری دیگری مجدداً تکرار شوند. با توجه به این نکته که حرکت چرخ سنگ ساعتگرد بوده و میز از چپ به راست حرکت می‌کند بنابراین آزمایش‌ها به‌صورت سنگ‌زنی رو به بالا (up grinding) می‌باشند. نمونه در حال تست در شکل (۸) و پس از تست در شکل (۹) مشاهده می‌شود.

جدول ۶- طراحی آزمایش با الگوریتم تاگوچی

خنک کننده	پیشروی	سرعت چرخ (rpm)	عمق برش (μm)
۶۰۴۶	۱	۱۳۶۴	۵
۶۰۴۶	۲	۱۷۰۵	۱۰
۶۰۴۶	۳	۲۰۴۶	۱۵
۶۰۴۳	۱	۱۳۶۴	۱۰
۶۰۴۳	۲	۱۷۰۵	۱۵
۶۰۴۳	۳	۲۰۴۶	۵
کانولا	۱	۱۷۰۵	۵
کانولا	۲	۲۰۴۶	۱۰
کانولا	۳	۱۳۶۴	۱۵
هوای فشرده	۱	۲۰۴۶	۱۵
هوای فشرده	۲	۱۳۶۴	۵
هوای فشرده	۳	۱۷۰۵	۱۰
سنتی	۱	۱۷۰۵	۱۵
سنتی	۲	۲۰۴۶	۵
سنتی	۳	۱۳۶۴	۱۰
خشک	۱	2046	۱۰
خشک	۲	۱۳۶۴	۱۵
خشک	۳	۱۷۰۵	۵



شکل ۱۰- نیروهای ثبت‌شده توسط دینامومتر برای تست الف) ۳ حالت MQL 6046، ب) ۶ حالت MQL 6043، پ) ۷ حالت MQL canola، ت) تست ۱۲ حالت هوای فشرده، ث) تست ۱۵ حالت سنتی، ج) تست ۱۸ حالت خشک

جدول ۸- متوسط نیروهای مماسی و عمودی ثبت‌شده توسط دینامومتر

متوسط نیروی عمودی (N)	متوسط نیروی مماسی (N)	عمق برش ( $\mu\text{m}$ )	سرعت چرخ (rpm)	خوراک	خنک کننده
۱۳.۹۰	۲.۰۹	۵	۱۳۶۴	۱	۶۰.۴۶
۳۴.۱۲	۳.۲۴	۱۰	۱۷۰.۵	۲	۶۰.۴۶
۲۶.۶۴	۹.۲۲	۱۵	۲۰۴۶	۳	۶۰.۴۶
۵۰.۰۹	۱۷.۳۸	۱۰	۱۳۶۴	۱	۶۰.۴۳
۹۵.۶۹	۲۳.۰۸	۱۵	۱۷۰.۵	۲	۶۰.۴۳
۱۰۲.۵۰	۱۹.۵۳	۵	۲۰۴۶	۳	۶۰.۴۳
۳۵.۹۴	۷.۵۴	۵	۱۷۰.۵	۱	کانولا
۵۶.۰۹	۵.۶۰	۱۰	۲۰۴۶	۲	کانولا
۸۳.۰۳	۱۴.۹۳	۱۵	۱۳۶۴	۳	کانولا
۱۱۶.۰۰	۳۰.۹۳	۱۵	۲۰۴۶	۱	هوای فشرده
۴۰.۵۴	۲۱.۴۱	۵	۱۳۶۴	۲	هوای فشرده
۷۶.۲۹	۲۴.۱۲	۱۰	۱۷۰.۵	۳	هوای فشرده
۲۱.۳۳	۲۵.۳۵	۱۵	۱۷۰.۵	۱	سنتی
۱۲.۶۸	۱۰.۰۱	۵	۲۰۴۶	۲	سنتی
۱۰۰.۴۰	۲۱.۱۵	۱۰	۱۳۶۴	۳	سنتی
۴۱.۱۱	۱۸.۱۷	۱۰	۲۰۴۶	۱	خشک
۸۴.۷۵	۲۹.۳۹	۱۵	۱۳۶۴	۲	خشک
۷۹.۸۸	۲۳.۶۱	۵	۱۷۰.۵	۳	خشک

جدول ۹- زبری سطح ثبت شده توسط زبری سنج

میانگین زبری ( $\mu\text{m}$ )	عمق برش ( $\mu\text{m}$ )	سرعت چرخ (rpm)	خوراک	خنک کننده
۰.۱۴۳	۵	۱۳۶۴	۱	۶۰۴۶
۰.۲۰۲	۱۰	۱۷۰۵	۲	۶۰۴۶
۰.۰۶۴	۱۵	۲۰۴۶	۳	۶۰۴۶
۰.۰۸۲	۱۰	۱۳۶۴	۱	۶۰۴۳
۰.۰۶۴	۱۵	۱۷۰۵	۲	۶۰۴۳
۰.۱۰۰	۵	۲۰۴۶	۳	۶۰۴۳
۰.۱۰۶	۵	۱۷۰۵	۱	کانولا
۰.۱۶۲	۱۰	۲۰۴۶	۲	کانولا
۰.۴۷۳	۱۵	۱۳۶۴	۳	کانولا
۰.۲۸۸	۱۵	۱۳۶۴	۱	هوای فشرده
۰.۳۳۱	۵	۱۷۰۵	۲	هوای فشرده
۰.۳۹۵	۱۰	۲۰۴۶	۳	هوای فشرده
۰.۰۵۲	۱۵	۱۳۶۴	۱	سنتی
۰.۰۵۲	۵	۱۷۰۵	۲	سنتی
۰.۰۵۸	۱۰	۲۰۴۶	۳	سنتی
۰.۲۲۰	۱۰	۱۷۰۵	۱	خشک
۰.۵۰۸	۱۵	۲۰۴۶	۲	خشک
۰.۱۷۹	۵	۱۳۶۴	۳	کانولا

مقادیر نیروی مماسی در حالت‌های استفاده از روغن کانولا و ۶۰۴۶ و روش سنتی به دست آمده‌اند. میزان تأثیر روانکار بر نیروی مماسی حدود ۱۰۰ درصد بوده است. همچنین می‌توان گفت می‌توان گفت که نیرو با پیشروی روند افزایشی داشته است. میزان تأثیر Feed بر نیروی مماسی در حدود ۲۰ درصد است. به طوری که با افزایش سرعت نیرو کاهش می‌یابد. میزان تأثیر سرعت چرخ سنگ بر نیروی مماسی بسیار کم و در حدود ۱۱ درصد است. با افزایش عمق براده برداری نیرو افزایش پیدا کرده است. میزان تأثیر عمق براده برداری بر نیروی مماسی حدود ۸۰ درصد است. در حالت‌های روانکاری با روغن ۶۰۴۶ و کانولا و سنتی کمترین مقدار را داشته است. میزان تأثیر روانکار بر نیروی عمودی حدود ۷۳ درصد بوده است. با افزایش پیشروی نیرو نیز روندی افزایشی خواهد داشت. میزان تأثیر Feed بر نیروی عمودی ۷۷ درصد است. تغییرات نیروی عمودی بر حسب سرعت سنگ ناچیز اما نزولی است و کمترین آن در ۲۰۴۶ دور بر دقیقه رخ داده است. میزان تأثیر سرعت چرخ سنگ بر نیروی عمودی بسیار ناچیز است. میزان تأثیر عمق براده برداری بر نیروی عمودی می‌تواند تا حدود ۵۰ درصد باشد. در حالت استفاده از روغن ۶۰۴۳ و روش سنتی

جدول ۹ نیز شامل نتایج میانگین اندازه‌گیری‌های زبری انجام گرفته روی هر سطح آزمایش بلافاصله پس از اتمام آزمایش مربوط به یک روانکار می‌باشد به این منظور دستگاه به صورت کاملاً موازی و در تماس با سطح قرار گرفته و عملیات سنجش زبری توسط آن انجام شده است.

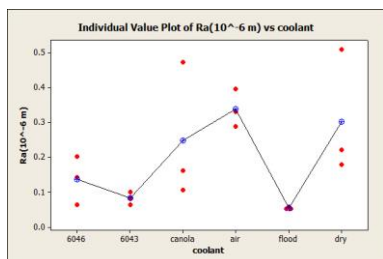
#### ۴-۱- تحلیل ANOVA

در گام نخست برای تحلیل داده‌ها از آنالیز تحلیل واریانس ANOVA استفاده شده است. به این ترتیب می‌توان علاوه برداشتن نمودار تغییر هر یک از خروجی‌های نیروی FX, FZ و صافی سطح Ra بر حسب متغیرهای نوع روانکار، سرعت چرخ سنگ، Feed و عمق براده برداری به کمک محاسبه مجموع مجذورات و انحراف معیار و با کمک پارامتر P value میزان احتمال تأثیر اختلاف در میانگین‌ها یا به تعبیری دیگر میزان مؤثر بودن عامل انتخاب شده بر روی خروجی را نیز تعیین کرد. در ادامه نمودارهای تغییرات خروجی‌ها بر حسب متغیرهای ذکر شده و همچنین مجموع مجذورات و انحراف معیار و پارامتر P value که توسط نرم افزار Minitab محاسبه شده است ارائه شده است (شکل ۱۱ و ۱۲).

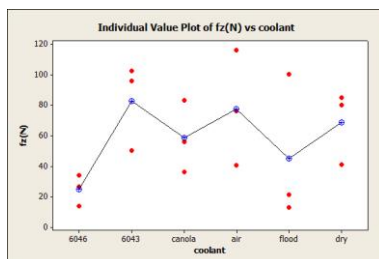
از شکل (۹) و شکل (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت: کمترین

دقیقه زبری به کمترین مقدار خود رسیده است. میزان تأثیر سرعت چرخ سنگ بر صافی سطح ۶۵ درصد است و همچنین زبری برحسب عمق براده برداری شاهد روندی افزایشی هستیم و در عمق ۱۵ میکرون زبری به بیشترین مقدار خود رسیده است.

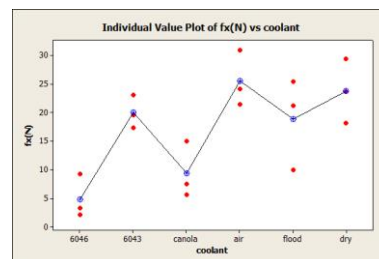
بهترین صافی سطح را داریم. میزان تأثیر روانکار بر صافی سطح حدود ۹۶ درصد بوده است. زبری سطح با افزایش سرعت پیشروی روندی افزایشی داشته است. میزان تأثیر Feed بر صافی سطح حدود ۴۰ درصد است. روند تغییرات صافی سطح به‌گونه‌ای است که در سرعت ۲۰۴۶ دور بر



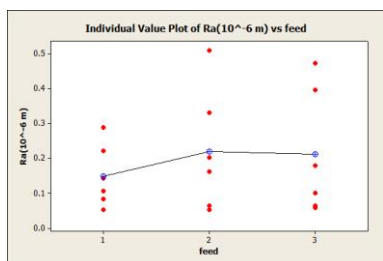
الف-۳



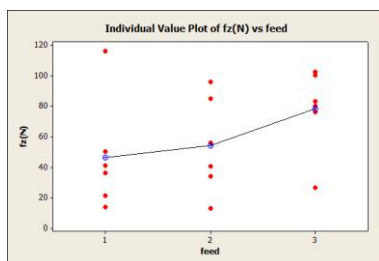
الف-۲



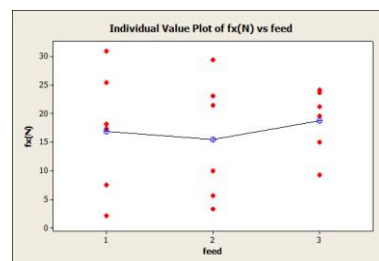
الف-۱



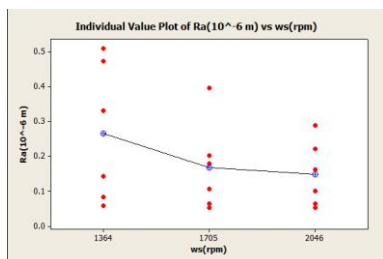
ب-۳



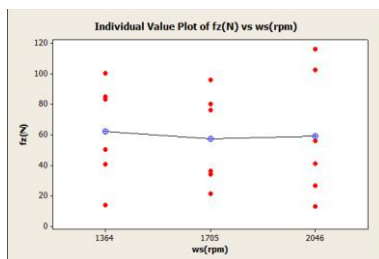
ب-۲



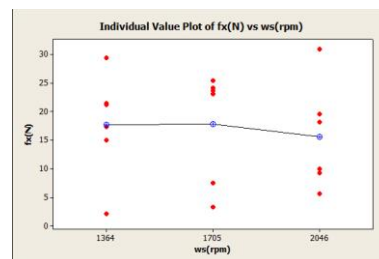
ب-۱



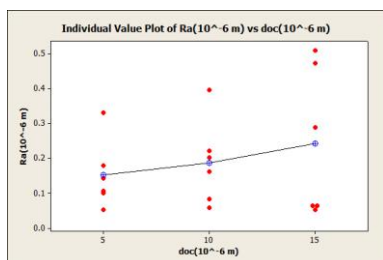
پ-۳



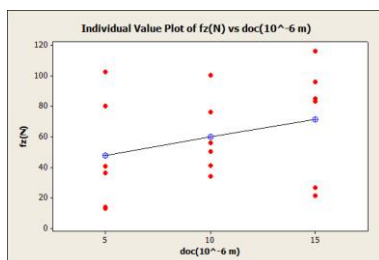
پ-۲



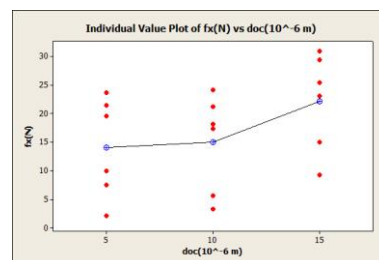
پ-۱



ت-۳

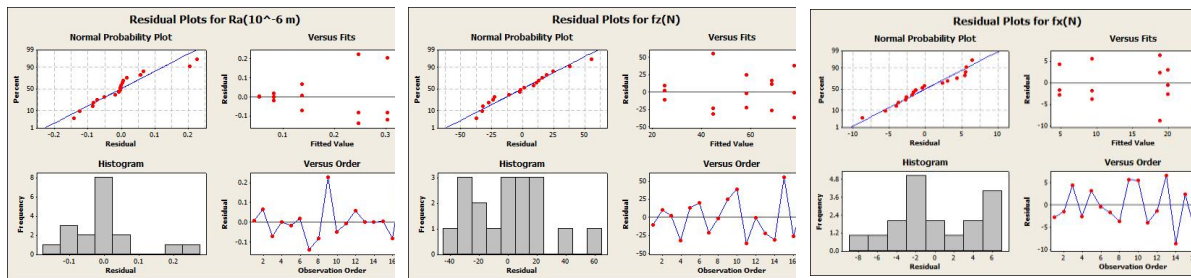


ت-۲



ت-۱

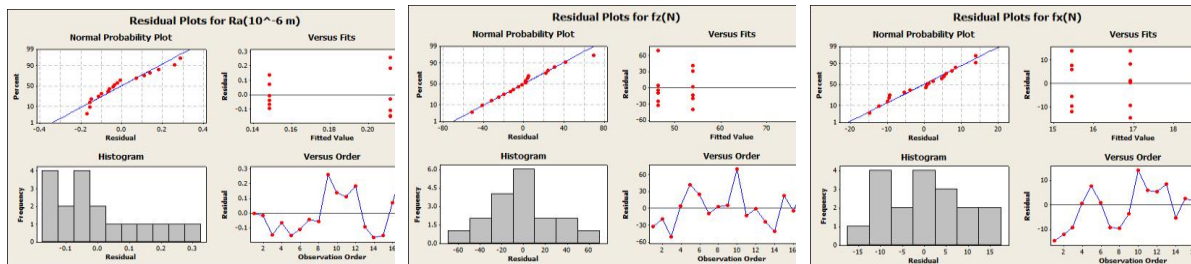
شکل ۱- تغییرات برحسب الف) روانکار، ب) Feed (پ) سرعت چرخ سنگ و ت) عمق براده برداری برای ۱-نیروی مماسی ۲-نیروی عمودی و ۳- زبری



۳-الف

۲-الف

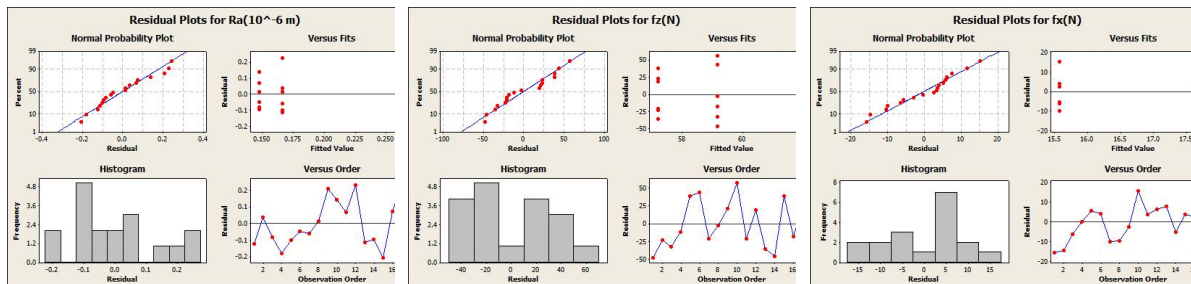
۱-الف



۳-ب

۲-ب

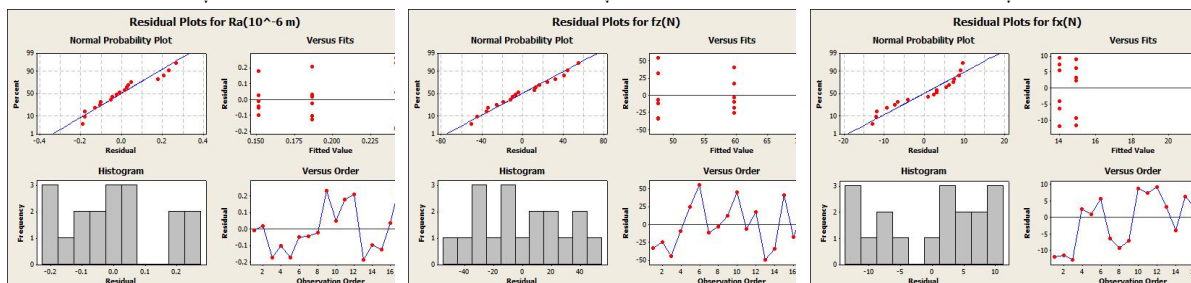
۱-ب



۳-پ

۲-پ

۱-پ



۳-ت

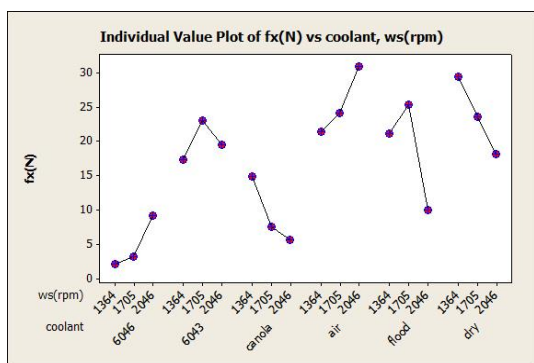
۲-ت

۱-ت

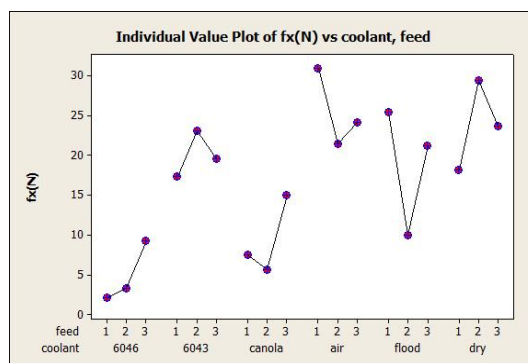
شکل ۱۲- نمودار تغییرات residual برحسب الف) روانکار، ب) Feed (پ) سرعت چرخ سنگ و ت) عمق براده برداری برای ۱-نیروی مماسی ۲-نیروی عمودی و ۳-زبری

و سرعت پیشروی هم‌چنین به کمک تحلیل ANOVA می‌توان تأثیر عوامل را به صورت ترکیبی بر روی خروجی‌ها مشاهده کرد به طوری که برای هر پاسخ خروجی آزمایش می‌توان اثر دو عامل به طور همزمان را مورد بررسی قرارداد که با توجه به تعداد عوامل برای هر خروجی شش حالت امکان وقوع دارد (شکل ۱۳، شکل ۱۴ و شکل ۱۵).

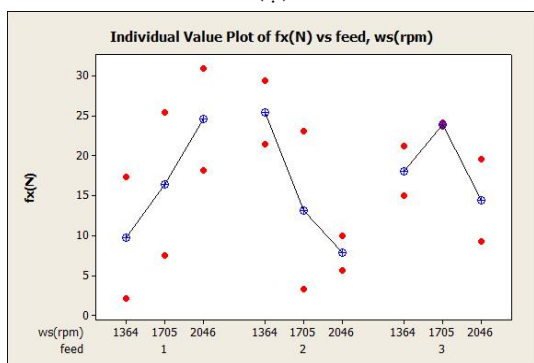
با توجه به نتایج آماری بدست آمده متغیرهای ورودی آزمایش به ترتیب بیشترین به کمترین تأثیر برای پارامترهای خروجی به صورت زیر می‌باشند:  
نیروی مماسی: روانکار، عمق براده برداری، سرعت پیشروی و سرعت چرخ سنگ  
نیروی عمودی: سرعت پیشروی، روانکار، عمق براده برداری و سرعت چرخ سنگ  
زبری سطح: روانکار، سرعت چرخ سنگ، عمق براده برداری



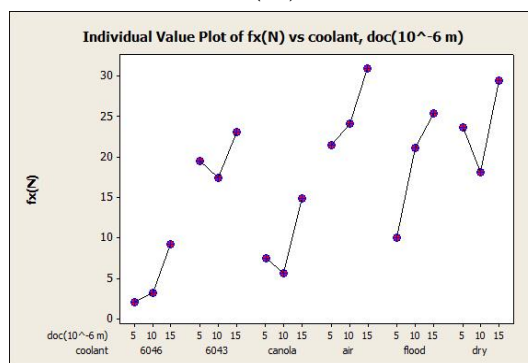
(ب)



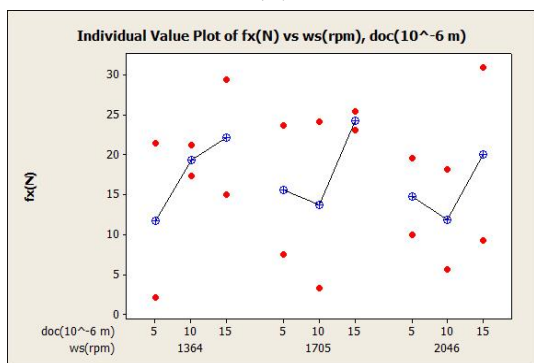
(الف)



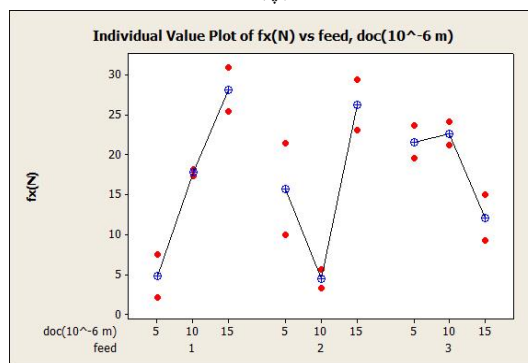
(ت)



(پ)



(ج)

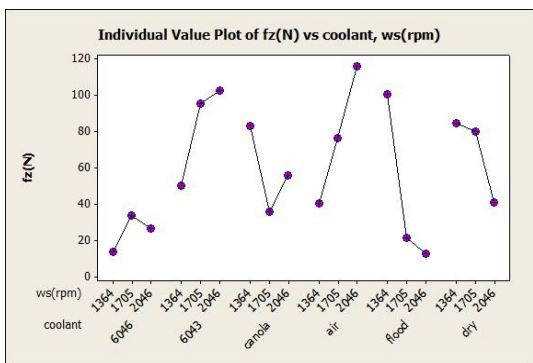


(ث)

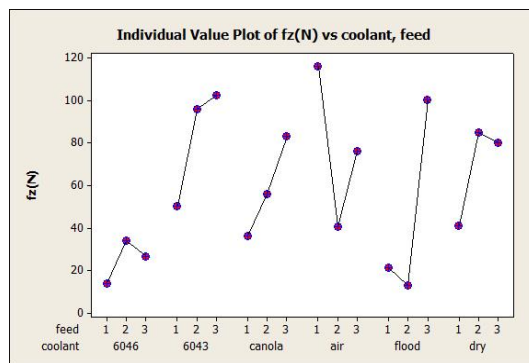
شکل ۱۳- تغییرات نیروی مماسی برحسب الف) نوع روانکار و سرعت پیشروی، ب) نوع روانکار و سرعت چرخ سنگ، پ) نوع روانکار و عمق براده برداری، ت) سرعت پیشروی و سرعت چرخ سنگ، ث) سرعت پیشروی و عمق براده برداری و ج) سرعت چرخ سنگ و عمق براده برداری

تعیین کرد که با توجه به نتایج کمترین مقدار در سطح ۲ و با سرعت ۲۰۴۶ دور بر دقیقه اتفاق می‌افتد. برای سطوح سرعت پیشروی از یک تا سه در عمق براده برداری ۵ و ۱۰ و ۱۵ کمترین نیروهای مماسی را داریم. به این ترتیب با این ترکیب تأثیر این دو عامل روی نیروی مماسی تقریباً ثابت مانده اما همچنان برای عمق براده برداری این تأثیر بیشتر است. برای دوره‌های ۱۳۶۴ و ۲۰۴۶ مقدار عمق براده برداری در عمق‌های ۵ و ۱۰ میکرون بسیار به هم نزدیک است. محاسبات آماری نشان می‌دهد که تغییرات سرعت چرخ سنگ همچنان بر روی تغییرات نیروهای مماسی تأثیر اندکی دارد.

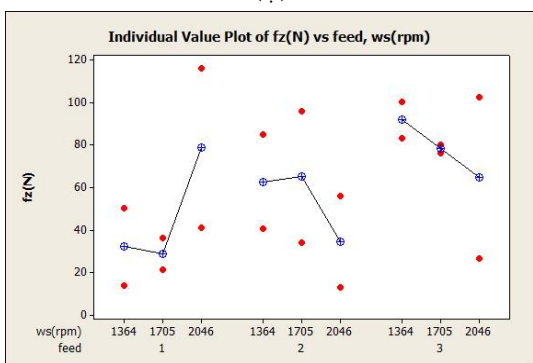
از شکل (۱۳) می‌توان نتیجه گرفت؛ درحالی‌که میزان تأثیرگذاری روانکار در این حالت ترکیبی بدون تغییر بوده، میزان تأثیرگذاری سرعت پیشروی افزایش پیدا کرده است. با توجه به این نتایج در روانکاری با ۶۰۴۶ در سرعت ۱۳۶۴ کمترین نیروی مماسی به دست آمده است. در حالت‌های روانکاری با ۶۰۴۳ و کانولا و همچنین خشک در عمق ۱۰ میکرون کمترین نیرو را داریم اما همچنان نیروی کمینه متعلق به روغن ۶۰۴۶ است. نتایج نشان می‌دهد این ترکیب متغیرها بیشترین تأثیر را بر اختلاف میانگین نیروهای مماسی داشته است. در هر سطح از سرعت پیشروی، سرعت چرخ سنگی که منجر به کمترین نیروی مماسی می‌شود را



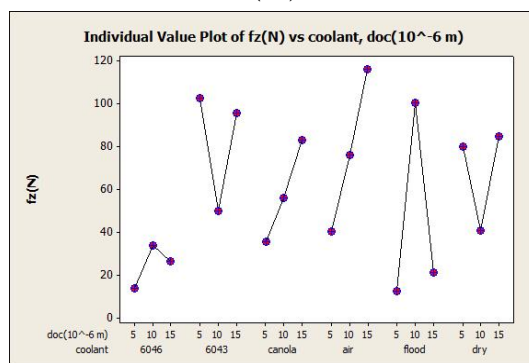
(ب)



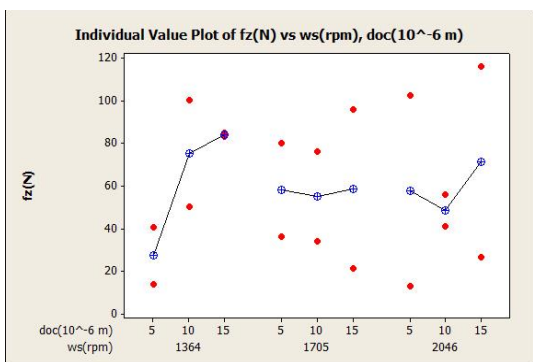
(الف)



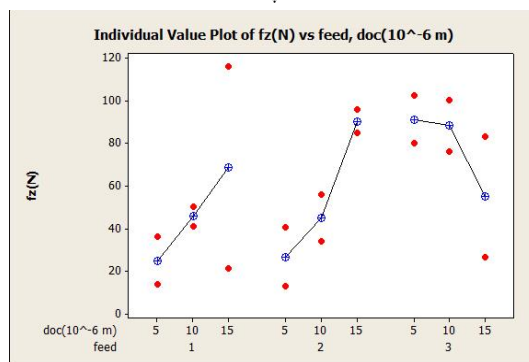
(ت)



(پ)



(ج)

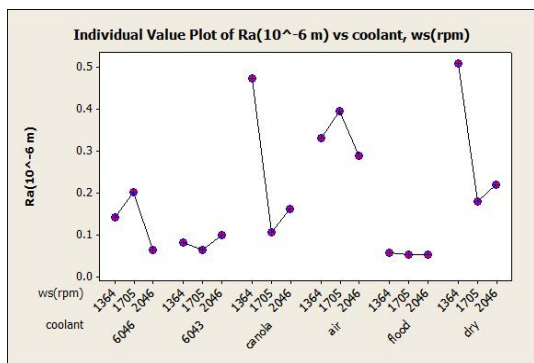


(ث)

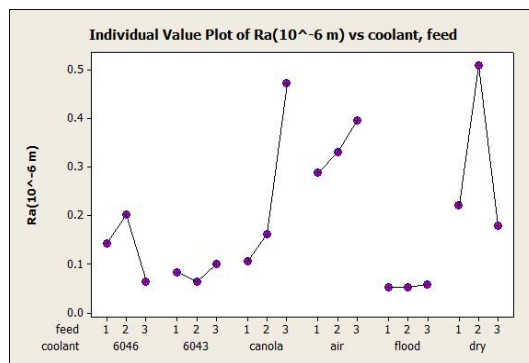
شکل ۱۴- تغییرات نیروی عمودی برحسب الف) نوع روانکار و سرعت پیشروی، ب) نوع روانکار و سرعت چرخ سنگ، پ) نوع روانکار و عمق براده برداری، ت) سرعت پیشروی و عمق براده برداری و ج) سرعت چرخ سنگ و عمق براده برداری

دارد اما تأثیر عمق براده برداری نیز می‌تواند تا حدود ۵۷ درصد برسد. با توجه به محاسبات انحراف معیار و میزان P value تأثیرگذاری پیشروی در این ترکیب حدود ۱۰ درصد کمتر از عمق براده برداری است. در ترکیب شکل (۱۵-ج) نیز در مقایسه با عمق براده برداری، سرعت چرخ سنگ بر تغییرات میانگین زبری اثرگذارتر است.

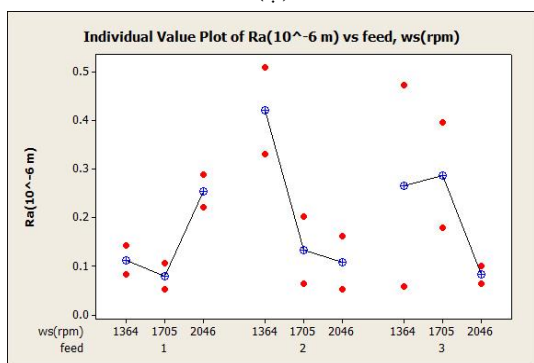
از شکل (۱۵) می‌توان نتیجه گرفت: تغییر میانگین زبری سطح آزمایش‌ها برای متغیر روانکار بیش از ۹۰ درصد و برای متغیر سرعت پیشروی حدود ۵۰ درصد باشد. برای متغیر سرعت چرخ سنگ این تأثیر به حدود ۸۴ درصد رسیده است. در مقایسه با عمق براده برداری نتایج محاسبات نشان می‌دهد که روانکار تأثیر بیشتری روی نتایج



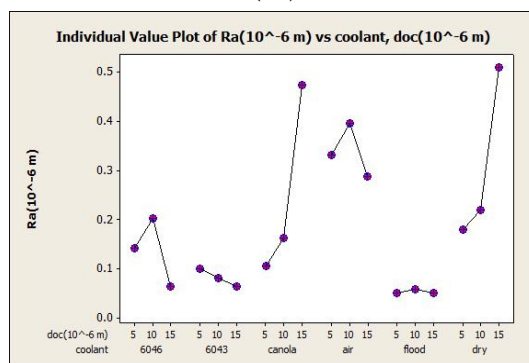
(ب)



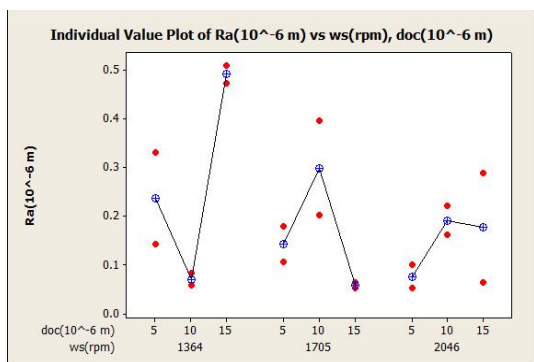
(الف)



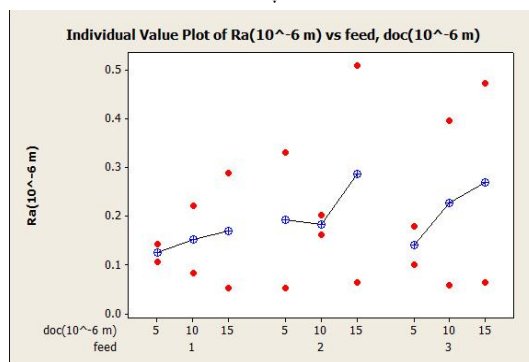
(ت)



(پ)



(ج)



(ث)

شکل ۱۵- تغییرات زبری برحسب (الف) نوع روانکار و سرعت پیشروی، (ب) نوع روانکار و سرعت چرخ سنگ، (پ) نوع روانکار و عمق براده برداری، (ت) سرعت پیشروی و سرعت چرخ سنگ و عمق براده برداری و (ج) سرعت پیشروی و عمق براده برداری و عمق براده برداری، (ث) سرعت پیشروی و سرعت چرخ سنگ، (ث) سرعت پیشروی و عمق براده برداری و عمق براده برداری

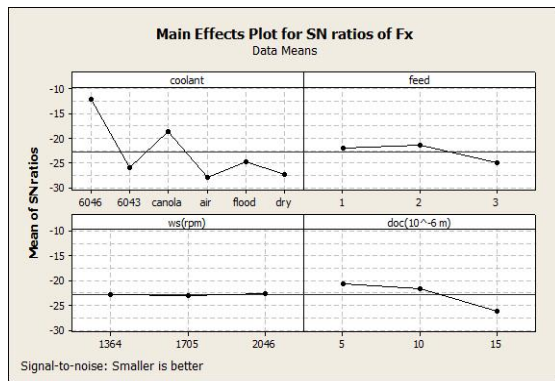
$$(Y^2/n) (\Sigma S/N = -10 * \log) \quad (۱)$$

که در این رابطه  $Y$  توسط میانگین‌گیری از خروجی آزمایش‌های انجام‌شده به روش تاگوچی به دست می‌آید. نمودار میانگین نیروهای عمودی و مماسی و زبری سطح برحسب هر یک از چهار متغیر نوع روانکار، سرعت پیشروی، سرعت چرخ سنگ و عمق براده برداری به‌صورت شکل ۱۶ خواهد بود.

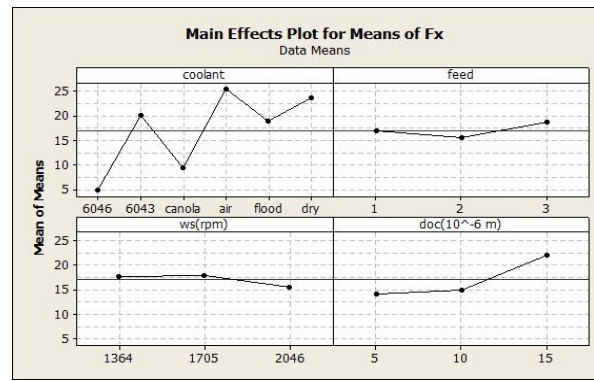
## ۲-۴- تحلیل تاگوچی

به کمک نرم‌افزار Minitab نمودار سیگنال برحسب نویز را بر اساس تئوری کمترین مقدار بهترین است رسم می‌شود بدین ترتیب هر سطحی که بیشترین مقدار سیگنال برحسب نویز را داشته باشد در صورت همخوانی با مقدار خروجی آن که به معنی کمینه بودن نیرو یا صافی سطح است مناسب‌ترین انتخاب برای رسیدن به هدف خواهد بود. نحوه محاسبه سیگنال بر نویز در صورتی که کمترین مقدار، بهترین باشد به‌صورت زیر است [۱۹]:

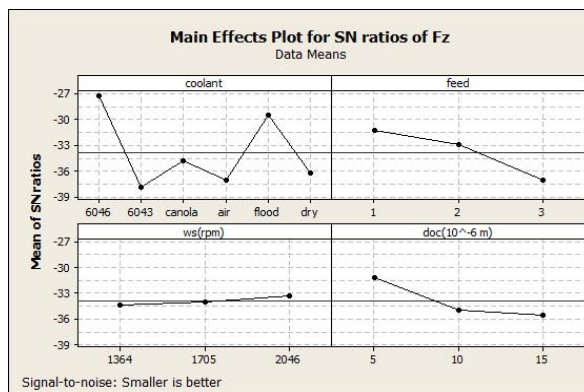




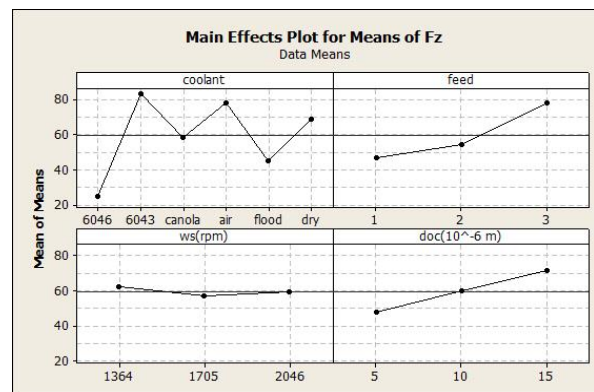
(ب)



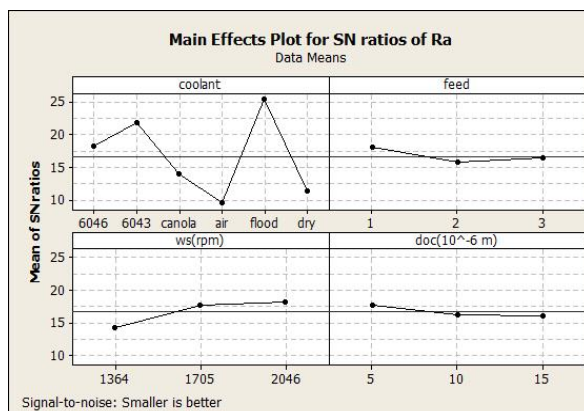
(الف)



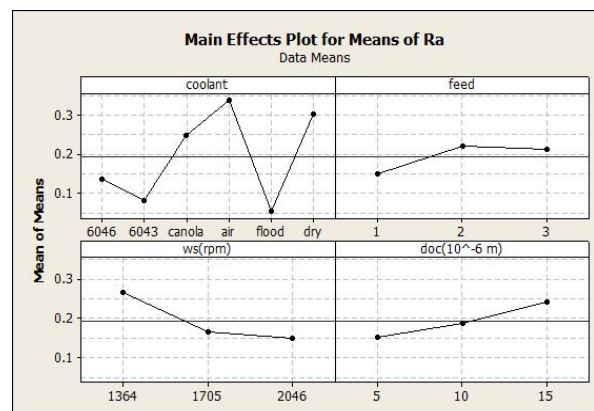
(ت)



(پ)



(ج)



(ث)

شکل ۱۶- برحسب هر چهار متغیر (الف) میانگین نیروی ، (ب) سیگنال بر نوپز نیروی مماسی ، (پ) میانگین نیروی عمودی ، (ت) سیگنال بر نوپز نیروی عمودی ، (ث) میانگین زبری سطح و (ج) سیگنال بر نوپز زبری سطح

به دست آمده از تحلیل تاگوچی برای نیروی مماسی نشان می دهد که در صورت استفاده از شرایط روانکاری MQL 6046 کمترین نیروی مماسی و عمودی به دست می آید پس از آن MQL کانولا و روش روانکاری سنتی به ترتیب بیشترین سیگنال بر نوپز را دارند و برای نیروی عمودی کانولا در رتبه سوم قرار دارد. در مورد نیروی عمودی جای روش سنتی و MQL کانولا عوض شده اما همچنان کمترین نیروها متعلق به این سه حالت است اما در مورد روغن

نمودارها نشان می دهند که در تمام شرایط نیروی عمودی از نیروی مماسی بزرگتر بوده است، علت این امر زاویه براده منفی بزرگ ذرات تشکیل دهنده چرخ سنگ می باشد. به طور کلی نیروی عمودی بر تغییرات سطح و زبری آن و نیروی مماسی بر توان مصرفی و حرارت تولید شده و عمر چرخ سنگ تأثیر گذارند. استفاده از روانکار سبب می شود تا با ایجاد لایه ای بر سطح تماس ابزار و قطعه کار میزان اصطکاک و در نتیجه نیروی کلی کاهش یابد. نتایج

محل سنگ‌زنی اثر مثبتی بر صافی سطح بگذارد اما نتایج نشان می‌دهد که اثر غالب در این روش جایگزینی پیوسته دانه‌ها به خاطر شرایط نیرویی بوده است. روند تغییرات زبری با سرعت پیشروی و سرعت چرخ سنگ با توجه به نمودار تحلیل تاگچی نشان می‌دهد که با افزایش سرعت پیشروی زبری افزایش یافته و به‌طور معکوس با افزایش سرعت چرخ سنگ کاهش می‌یابد، علت این امر این است که در شرایط سرعت پیشروی کمتر و سرعت چرخ سنگ بیشتر دانه‌های بیشتری در فرایند برداشت ماده از سطح قطعه کار شرکت می‌کنند بنابراین عمق درگیری و همچنین ضخامت براده تغییر شکل نیافته کمتر بوده و صافی سطح بهتر خواهد شد.

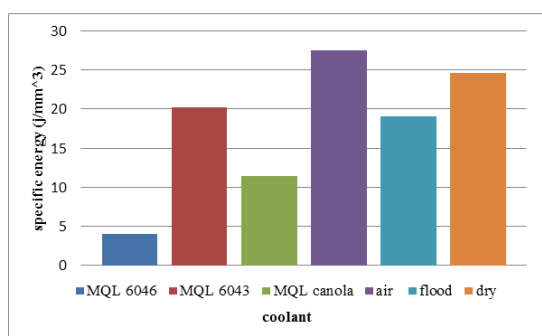
مقادیر انرژی مخصوص سنگ‌زنی برای هر یک از آزمایش‌های انجام‌شده طبق رابطه ۲، ۳ و ۴ قابل‌محاسبه است. در صورتی که میانگین این مقادیر را برای هر یک از حالت‌های روانکاری محاسبه کنیم با توجه به شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که انرژی مخصوص سنگ‌زنی در حالت استفاده از روانکاری کمینه با روغن بهزیست ۶۰۴۶ و کانولا و همچنین روش سنتی کمترین مقادیر را به خود اختصاص می‌دهد.

$$U = \frac{P}{Q} \quad (2)$$

$$P = Ft \times Vs \quad (3)$$

$$Q = d \times b \times Vw \quad (4)$$

در این روابط  $U$  انرژی مخصوص سنگ‌زنی برحسب ژول بر میلی‌متر مکعب،  $P$  توان مصرفی است که از حاصل‌ضرب نیروی مماسی  $Ft$  و  $Vs$  سرعت مماسی چرخ سنگ به دست می‌آید.  $Q$  نیز نرخ براده برداری است که از ضرب  $d$  عمق براده برداری و  $b$  عرض سنگ و  $Vw$  سرعت میز به دست می‌آید.



شکل ۱۷- انرژی مخصوص سنگ‌زنی برحسب نوع روانکار

۶۰۴۳ شرایط نیرویی بدتر شده زیرا این روغن به علت ویسکوزیته بسیار پایین در فشار ثابت دبی بالاتری نسبت به سایر حالات داشت به همین خاطر کمترین اثر را بر روانکاری بین ذرات ساینده و قطعه کار گذاشته است. در واقع در توضیح تأثیر مثبت روش MQL می‌توان گفت که به‌کارگیری سیستم MQL به نفوذ بهتر روانکار به لایه‌مرزی ایجادشده اطراف سنگ و کاهش نیروی اصطکاک ایجادشده بین براده در حال شکل‌گیری و ذرات ساینده کمک می‌کند. با افزایش سرعت چرخ سنگ نیرو کاهش یافته و با افزایش سرعت پیشروی نیرو افزایش می‌یابد. در حالت استفاده از MQL از آنجایی که این روش کمک می‌کند تا ذرات ساینده برای مدت طولانی‌تری تیز بمانند شیارهای عمیق‌تری توسط این ذرات روی سطح ایجاد می‌شود که تغییر شکل پلاستیک کمتری در لبه‌ها پیدا کرده‌اند، این امر موجب افزایش زبری سطح خواهد شد. در بین روغن‌های مورد استفاده در شرایط روانکاری MQL نتایج نشان می‌دهد که روغن ۶۰۴۳ زبری سطح کمتری در مقایسه با سایر روغن‌ها ایجاد کرده است علت این امر را می‌توان در ویسکوزیته پایین آن یافت زیرا در این حالت نیز توان سیال در دور کردن حرارت و براده‌ها بالاتر است. نکته قابل‌توجه اینجاست که روغن ۶۰۴۶ علاوه بر نتایج خوبی که در داده‌های نیرو نشان داد در بررسی زبری سطح نیز پس از روش سنتی و روغن ۶۰۴۳ رتبه سوم را از نظر سیگنال بر نوبز دارد که نشان می‌دهد این روغن می‌تواند انتخاب مناسبی برای روانکاری عملیات سنگ‌زنی اینکونل ۷۳۸ باشد. همچنین روغن کانولا که در بررسی نتایج نیرو جزو سه انتخاب اول بود در شرایطی که زبری سطح را مورد مطالعه قرار می‌دهیم خروجی سیگنال بر نوبز آن در رتبه چهارم قرار گرفته است که نشان می‌دهد این روغن در کاهش نیرو مؤثرتر عمل کرده است. اما در مورد حالت خشک و هوای فشرده باید به این نکته اشاره شود که ایجاد شیارهای عمیق در این دو حالت و عدم دور کردن مناسب براده‌ها از محل و همچنین نیروی بالا در این دو حالت که موجب شکستن و تیز شدن مجدد دانه‌ها و یا بیرون کشیده شدن و جایگزینی آن‌ها با دانه جدید شده همگی شرایطی را ایجاد کرده‌اند که صافی سطح در این دو حالت از بقیه روش‌های روانکاری نامناسب‌تر شود نکته قابل‌توجه اینجاست که برخلاف تصور اولیه که انتظار می‌رفت استفاده از اسپری هوا با دور کردن براده‌ها از بین ذرات ساینده و

که در این روابط  $F_n$  نیروی نرمال و  $F_t$  نیروی مماسی می‌باشند.  $F_n, sl$  و  $F_n, ch$  نیروهای عمودی و مماسی تشکیل براده و  $F_t, ch$  و  $F_t, sl$  نیروهای عمودی و نرمال سایش می‌باشند. همچنین  $k_1$  تا  $k_4$  ضرایبی هستند که از آزمایش‌ها برای شرایط مختلف به دست خواهند آمد و  $ap$  عمق براده برداری،  $V_s$  سرعت چرخ سنگ،  $V_w$  سرعت پیشروی،  $b$  عرض محل سنگ‌زنی،  $A$  نسبت مساحت سطح خورده شده سنگ،  $de$  قطر معادل چرخ سنگ و  $P_0$  و  $\beta$  و  $\alpha$  ثابت‌هایی هستند که به مشخصات فیزیکی بستگی دارند و از طریق آزمایش به دست می‌آیند.

همان‌طور که مشخص است این مدل بسیار پیچیده بوده و ثابت‌های زیادی که در آن وجود دارد برای تعیین نیازمند آزمایش‌های فراوانی است اما در مدل دیگری که توسط ویجی کومار در سال ۲۰۱۳ ارائه شد [۲۱]، بر مبنای تئوری ورنر و با توسعه آن می‌توان به رابطه‌ای برای نیروی مخصوص عمودی برحسب شرایط سنگ‌زنی و متغیرهای آزمایش رسید. از آنجایی که با توجه به نتایج بخش بزرگی از نیروی برآیند در هر آزمایش سهم نیروی عمودی است بنابراین با داشتن تخمینی از آن می‌توان نیروی برآیند را نیز به دست آورد نتایج تحلیل تاگوچی برای نیروی برآیند به شرح زیر در شکل (۱۷) آمده است که همان‌طور که انتظار می‌رفت کاملاً مشابه نیروی عمودی است.

رابطه نیروی عمودی مخصوص که از تقسیم نیروی عمودی بر عرض محل سنگ‌زنی که در این آزمایش‌ها ۳۰ میلی‌متر بوده است به صورت زیر است که در آن  $Q_w$  نرخ مخصوص برداشت براده،  $A_e$  عمق براده برداری،  $V_s$  سرعت چرخ سنگ،  $V_w$  سرعت پیشروی،  $ds$  قطر چرخ سنگ و ثابت  $k_1$  به شرایط سنگ‌زنی، مشخصات ماده و نوع چرخ سنگ مرتبط و ثابت  $\epsilon$  به مشخصات ماده بستگی دارد؛ این ثابت می‌تواند مقداری بین ۰/۵ تا ۱ داشته باشد [۲۱]. ضمناً با بررسی بیشتر از این روابط در پرداخت با هوش مصنوعی نیز استفاده شده است [۲۲].

$$F_{ns} \quad (9)$$

$$= k_1 \left( \frac{Q_w}{V_s} \right)^{2\epsilon-1} A_e^{1-\epsilon} ds^{1-\epsilon}$$

$$Q_w = \frac{A_e V_w}{60} \quad (10)$$

### ۳-۴- مدل‌سازی نیرو

جهت مدل‌سازی نیروها سنگ‌زنی تلاش‌های زیادی صورت گرفته است، همان‌طور که گفته شد در سنگ‌زنی نیروها به‌طور کلی در سه بخش برش، شخم‌زنی و سایشی تقسیم می‌شوند که در بخش اول براده برداری توسط ذرات ساینده انجام می‌شود اما در حالت شخم‌زنی تنها شیارهایی بر روی سطح ایجاد می‌شود و در بخش سایش نیز ذرات بر روی قطعه کار ساییده می‌شوند و نیرو به سبب اصطکاک تولید می‌شود. در مدل‌سازی که در سال ۲۰۰۹ توسط جین یوان تنگ<sup>۱</sup> انجام شده نیرو در هر دو قسمت عمودی و مماسی به دو بخش نیروی موردنیاز برای تشکیل براده و نیروی سایشی تقسیم شده و از نیروی شخم به دلیل کوچکی آن در برابر این دو نیرو صرف‌نظر شده است؛ بنابراین برای نیروی نرمال و مماسی داریم [۲۰] (شکل ۱۸)

$$F_n = F_{n, ch} + F_{n, sl} \quad (5)$$

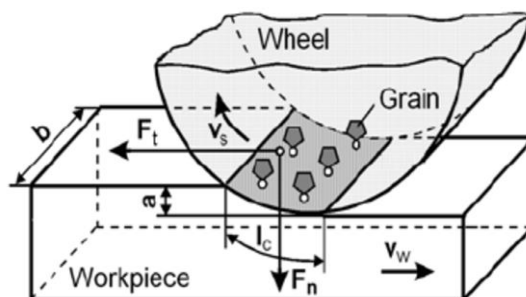
$$F_t = F_{t, ch} + F_{t, sl} \quad (6)$$

$$F_t \quad (7)$$

$$= \left( k + k_2 \ln \frac{V_s^{1.5}}{ap^{0.25} V_w^{0.5}} \right) \frac{V_w ap}{V_s} b + bA \left( \alpha + \frac{4\beta P_0 V_w}{de V_s} \right) (de ap)^{\frac{1}{2}}$$

$$F_n \quad (8)$$

$$= \left( k_3 + k_4 \ln \frac{V_s^{1.5}}{ap^{0.25} V_w^{0.5}} \right) \frac{V_w ap}{V_s} b + \left( \frac{4\beta P_0 A V_w}{V_s} \right) \left( \frac{ap}{de} \right)^{1/2}$$



شکل ۱۸- شماتیک نیروها در سنگ‌زنی [۲۰]

<sup>1</sup>Jinyuan Tang

خطا (حدود ۲۰ درصد) قابل پیش‌بینی می‌باشد. (جدول ۱۰ و شکل ۱۹)

### ۴-۴- بهینه‌سازی

به‌منظور بهینه‌سازی فرایند سنگ‌زنی اینکونل ۷۳۸ با روانکاری کمینه در صورتی که هدف کاهش نیروی برآیند و همچنین رسیدن به کمترین زبری باشد می‌توان از بهینه‌سازی چندهدفه توسط الگوریتم تاگوچی کمک گرفت، تفاوت اصلی در این روش با حالت تک متغیره در نحوه محاسبه سیگنال بر نویز بر اساس مفهوم تابع اتلاف نرمال<sup>۱</sup> می‌باشد.

$$S_{ij} = \frac{L_{ij}}{\bar{L}_j} \quad (11)$$

در این رابطه  $S_{ij}$  مقدار تابع اتلاف نرمال شده برای  $i$  امین خروجی در  $i$  امین آزمایش است و  $L_{ij}$  تابع اتلاف برای  $i$  امین خروجی در  $i$  امین آزمایش و  $\bar{L}_j$  تابع اتلاف میانگین برای  $i$  امین خروجی. در صورتی که هدف از بهینه‌سازی رسیدن به خروجی کمتر باشد تابع اتلاف به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$L_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{K=1}^n (y_{ijk})^2 \quad (12)$$

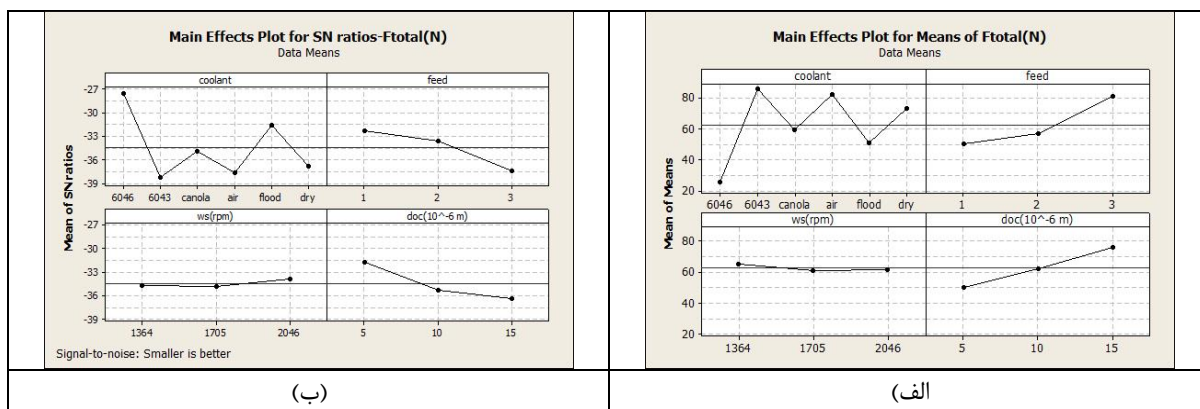
که در آن  $n$  تعداد تکرار آزمایش و  $y_{ijk}$  مقدار خروجی می‌باشد. تابع اتلاف میانگین نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{L}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m L_{ij} \quad (13)$$

جدول ۱۰- نیروی عمودی مخصوص سنگ‌زنی

Fn(N)	Fns(N/mm)
۱۳.۹	۰.۴۶
۳۴.۱۲	۱.۱۴
۲۶.۶۴	۰.۸۹
۵۰.۰۹	۱.۶۷
۹۵.۶۹	۳.۱۹
۱۰۲.۵	۳.۴۲
۳۵.۹۴	۱.۲
۵۶.۰۹	۱.۸۷
۸۳.۰۳	۲.۷۷
۱۱۶	۳.۸۷
۴۰.۵۴	۱.۳۵
۷۶.۲۹	۲.۵۴
۲۱.۳۳	۰.۷۱
۱۲.۶۸	۰.۴۲
۱۰۰.۴	۳.۳۵
۴۱.۱۱	۱.۳۷
۸۴.۷۵	۲.۸۲
۷۹.۸۸	۲.۶۶

نتایج تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهد که متغیر  $\epsilon$  برای ماده‌ای که در آن عنصر نیکل به فراوانی وجود دارد ۰/۷ می‌باشد با قرار دادن این مقدار در رابطه و با داشتن متغیرهای آزمایش و همچنین محاسبه نیروی عمودی مخصوص می‌توان توسط یک رابطه خطی  $k_1$  را حساب کرد. در این صورت مقدار ضریب تناسب  $k_1$  که در واقع شیب خط نیرو بر حسب عبارت سمت راست معادله است ۵/۱۷۳۵ خواهد شد. توسط این ضریب مقادیر نیروی عمودی مخصوص بیش از ۵۰ درصد آزمایش‌ها با کمترین



شکل ۱۹- بر حسب هر چهار متغیر الف) میانگین نیروی برآیند و ب) سیگنال بر نویز نیروی برآیند

<sup>1</sup> Normalized Loss Function

میانگین سیگنال بر نویز را بصورت جدول ۱۳ خواهیم داشت:

نتایج نشان می‌دهد با افزایش میزان درصد اهمیت نیرو از ۱ تا ۵۸ درصد حالت روانکاری سنتی سطح بهینه را دارد و بعد از آن MQL 6046. همچنین برای تمامی صد حالت بررسی شده نتایج نشان می‌دهد که سطوح بهینه برای متغیرهای سرعت پیشروی و سرعت چرخ سنگ و عمق براده برداری به ترتیب، سطح یک و ۲۰۴۶ دور بر دقیقه و ۵ میکرون می‌باشند. به منظور بهینه‌سازی اگر خواهیم میزان تأثیر نیروی مماسی را به طور مستقل بررسی کنیم نه به عنوان جزئی از نیروی برآیند می‌بایست به هر کدام از خروجی‌های نیروی مماسی و عمودی و زبری سطح ضریب بزرگنمایی اختصاص دهیم در این صورت مقادیر اتلاف و اتلاف نرمال برای هر یک از نیروها به صورت جدول ۱۴ خواهد بود:

مقادیر تابع هزینه و سیگنال بر نویز به صورت جدول ۱۵ محاسبه می‌شوند:

برای حالتی که این ضرایب با هم برابر هستند انتخاب و بررسی شده اند (جدول ۱۶).

m در این رابطه تعداد آزمایش‌ها می‌باشد و برای p خروجی با ضریب بزرگنمایی Wj برای j امین خروجی تابع هزینه کل برای i امین خروجی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$TLi = \sum_{j=1}^p Wj Sij \quad (14)$$

بدین ترتیب سیگنال بر نویز برای i امین آزمایش به صورت زیر می‌شود:

$$\eta i = -10 \log(TLi) \quad (15)$$

مقادیر تابع اتلاف و تابع اتلاف نرمال برای طراحی آزمایش تاگوشی انجام شده به صورت جدول ۱۱ می‌باشد:

در صورتی که میزان اهمیت هر دو خروجی برای ما یکسان باشد یعنی  $Wj = 0.5$  در نظر گرفته شود مقادیر تابع هزینه کل و سیگنال بر نویز برای هر آزمایش به صورت جدول ۱۲ می‌باشد:

با توجه به جدول ۱۲ بعد از آزمایش ۱۵ مربوط به حالت سنتی آزمایش ۳ مربوط به MQL 6046 بیشترین سیگنال بر نویز را با هدف کاهش هر دو خروجی نیرو و زبری سطح دارد. در صورتی که برای هر یک از سطوح متغیرها مقادیر

جدول ۱۱- مقادیر اتلاف و اتلاف نرمال

Doc(۱۰ <sup>۰-۶</sup> m)	ws(rpm)	feed	coolant	Li1(F)	Li2(Ra)	Si1	Si2
۵	۱۳۶۴	۱	۶۰۴۶	۱۹۷.۵۷۸۱	۰.۰۲۰۴۴۹	۰.۰۳۹۹۵۷	۰.۳۵۲۸۴۴
۱۰	۱۷۰۵	۲	۶۰۴۶	۱۱۷۴.۶۸۵	۰.۰۴۰۸۰۴	۰.۲۳۷۵۶۳	۰.۷۰۴۰۶۷
۱۵	۲۰۴۶	۳	۶۰۴۶	۷۹۴.۶۹۸	۰.۰۴۰۹۶	۰.۱۶۰۷۱۶	۰.۰۷۰۶۷۶
۱۰	۱۳۶۴	۱	۶۰۴۳	۲۸۱۱.۰۷۳	۰.۰۰۶۷۲۴	۰.۵۶۸۴۹۸	۰.۱۱۶۰۲۲
۱۵	۱۷۰۵	۲	۶۰۴۳	۹۶۸۹.۲۶۳	۰.۰۰۴۰۹۶	۱.۹۵۹۵۱۱	۰.۰۷۰۶۷۶
۵	۲۰۴۶	۳	۶۰۴۳	۱۰۸۷۷.۶۷	۰.۰۱	۲.۲۰۱۸۷۲	۰.۱۷۲۵۴۸
۵	۱۷۰۵	۱	کانولا	۱۳۴۸.۵۸	۰.۱۱۲۳۶	۰.۲۷۲۷۳۱	۰.۱۹۳۸۷۵
۱۰	۲۰۴۶	۲	کانولا	۳۱۷۷.۴۸۲	۰.۰۲۶۲۴۴	۰.۶۴۲۵۹۹	۰.۴۵۲۸۳۶
۱۵	۱۳۶۴	۳	کانولا	۷۱۱۶.۸۸۶	۰.۲۲۳۷۲۹	۱.۴۳۹۲۸۶	۳.۸۶۰۴۱
۱۵	۲۰۴۶	۱	هوای فشرده	۱۴۴۱۲.۶۶	۰.۰۸۲۹۴۴	۲.۹۱۴۷۵	۱.۴۳۱۱۸۶
۵	۱۳۶۴	۲	هوای فشرده	۲۱۰.۱۸۸	۰.۱۰۹۵۶۱	۰.۴۲۵۰۷۴	۱.۸۹۰۴۵۹
۱۰	۱۷۰۵	۳	هوای فشرده	۶۴۰.۱۹۳۹	۰.۱۵۶۰۲۵	۱.۲۹۴۶۹۸	۲.۶۹۲۱۸۸
۱۵	۱۷۰۵	۱	سنتی	۱۰۹۷.۵۹۱	۰.۰۰۲۷۰۴	۰.۲۲۱۹۷۲	۰.۰۴۶۶۵۷
۵	۲۰۴۶	۲	سنتی	۲۶۰.۹۸۲۵	۰.۰۰۲۷۰۴	۰.۰۵۲۷۸	۰.۰۴۶۶۵۷
۱۰	۱۳۶۴	۳	سنتی	۱۰۵۲۷.۴۸	۰.۰۰۳۳۶۴	۲.۱۲۹۰۲۹	۰.۰۵۸۰۴۸
۱۰	۲۰۴۶	۱	خشک	۲۰۲۰.۱۸۱	۰.۰۴۸۴	۰.۴۰۸۵۵۲	۰.۸۳۵۱۳۵
۱۵	۱۳۶۴	۲	خشک	۸۰۴۶.۳۳۵	۰.۲۵۸۰۶۴	۱.۶۲۷۲۵۳	۴.۴۵۲۸۵۵
میانگین				۶۹۳۸.۲۴۷	۰.۰۳۲۰۴۱		

جدول ۱۲- مقادیر تابع هزینه و سیگنال بر نويز

doc(10 <sup>-6</sup> m)	ws(rpm)	feed	coolant	TLi	S/N
۵	۱۳۶۴	۱	۶۰۴۶	۰.۱۹۶۴۰۱	۷.۰۶۷۵۶۸
۱۰	۱۷۰۵	۲	۶۰۴۶	۰.۴۷۰۸۱۵	۳.۲۷۱۴۹۹
۱۵	۲۰۴۶	۳	۶۰۴۶	۰.۱۱۵۶۹۶	۹.۳۶۶۸۱۹
۱۰	۱۳۶۴	۱	۶۰۴۳	۰.۳۴۲۲۶	۴.۶۵۶۱۴
۱۵	۱۷۰۵	۲	۶۰۴۳	۱.۰۱۵۰۹۴	-۰.۰۶۵۰۶
۵	۲۰۴۶	۳	۶۰۴۳	۱.۱۸۷۲۱	-۰.۷۴۵۲۸
۵	۱۷۰۵	۱	کانولا	۰.۲۳۳۳۳۰	۶.۳۲۰۷۹۶
۱۰	۲۰۴۶	۲	کانولا	۰.۵۴۷۷۱۸	۲.۶۱۴۴۳۲
۱۵	۱۳۶۴	۳	کانولا	۲.۶۴۹۸۴۸	-۴.۲۳۲۲۱
۱۵	۲۰۴۶	۱	هوای فشرده	۲.۱۷۲۹۶۸	-۳.۳۷۰۵۳
۵	۱۳۶۴	۲	هوای فشرده	۱.۱۵۷۷۶۶	-۰.۶۳۶۲۱
۱۰	۱۷۰۵	۳	هوای فشرده	۱.۹۹۳۴۴۳	-۲.۹۹۶۰۴
۱۵	۱۷۰۵	۱	سنتی	۰.۱۳۴۳۱۴	۸.۷۱۸۷۷۳
۵	۲۰۴۶	۲	سنتی	۰.۰۴۹۷۱۸	۱۳.۰۳۴۸۲
۱۰	۱۳۶۴	۳	سنتی	۱.۰۹۳۵۳۷	-۰.۳۸۸۳۴
۱۰	۲۰۴۶	۱	خشک	۰.۶۲۱۸۴۳	۲.۰۶۳۱۹
۱۵	۱۳۶۴	۲	خشک	۳.۰۴۰۰۵۴	-۴.۸۲۸۸۱

جدول ۱۳- سیگنال بر نويز هر سطح از متغیرها

روانکار	MQL ۶۰۶۴	MQL ۶۰۴۳	کانولا MQL	هوای فشرده	سنتی	خشک
S/N	۶.۵۶۸۹	۱.۲۸۲۰	۱.۵۶۷۶	-۲.۳۳۴۲	۷.۱۲۱۷	-۰.۸۸۹۶
سرعت پیشروی	۱	۲	۳			
S/N	۴.۲۴۲۸	۲.۲۳۱۷	۰.۱۸۳۵			
سرعت چرخ سنگ (rpm)	۱۳۶۴	۱۷۰۵	۲۰۴۶			
S/N	۰.۲۷۳۲	۲.۵۵۷۷	۳.۸۲۷۲			
عمق براده برداری (μm)	۵	۱۰	۱۵			
S/N	۴.۱۸۹۸	۱.۵۳۶۸	۰.۹۳۱۴			

جدول ۱۴- مقادیر اتلاف و اتلاف نرمال

doc(10 <sup>-6</sup> m)	ws(rpm)	feed	coolant	Li1(Fx)	Li2(Fz)	Si1	Si2
۵	۱۳۶۴	۱	۶۰۴۶	۴.۳۶۸۱	۱۹۳.۲۱	۰.۱۱۹۷۵	۰.۰۴۲۱۸۶
۱۰	۱۷۰۵	۲	۶۰۴۶	۱۰.۵۱۰۵۶	۱۱۶۴.۱۷۴	۰.۰۲۸۱۱۵	۰.۲۵۴۱۸۸
۱۵	۲۰۴۶	۳	۶۰۴۶	۸۵.۰۰۸۴	۷۰۹.۶۸۹۳	۰.۲۳۳۰۵۷	۰.۱۵۴۹۵۵
۱۰	۱۳۶۴	۱	۶۰۴۳	۳۰۲.۰۶۴۴	۲۵۰۹.۰۰۸	۰.۸۲۸۱۳۱	۰.۵۴۷۸۲۱
۱۵	۱۷۰۵	۲	۶۰۴۳	۵۳۲.۶۸۶۴	۹۱۵۶.۵۷۶	۱.۴۶۰۳۹۷	۱.۹۹۹۲۶۱
۵	۲۰۴۶	۳	۶۰۴۳	۳۸۱.۴۲۰۹	۱۰۵۰۶.۲۵	۱.۰۴۵۶۹۲	۲.۲۹۳۹۵۱
۵	۱۷۰۵	۱	کانولا	۵۶.۸۹۶۸۵	۱۲۹۱.۶۸۴	۰.۱۵۵۹۸۷	۰.۲۸۲۰۲۸
۱۰	۲۰۴۶	۲	کانولا	۳۱.۳۹۳۶۱	۳۱۴۶.۰۸۸	۰.۰۸۶۰۶۸	۰.۶۸۶۹۲۲
۱۵	۱۳۶۴	۳	کانولا	۲۲۲.۹۰۴۹	۶۸۹۳.۹۸۱	۰.۶۱۱۱۱	۱.۵۰۵۲۴۳
۱۵	۲۰۴۶	۱	هوای فشرده	۹۵۶.۳۳۴۹	۱۳۴۵۶	۲.۶۲۲۷۶۴	۲.۹۳۸۰۰۴
۵	۱۳۶۴	۲	هوای فشرده	۴۵۸.۳۸۸۱	۱۶۴۳.۴۹۲	۱.۲۵۶۷۰۳	۰.۳۵۸۸۴۳
۱۰	۱۷۰۵	۳	هوای فشرده	۵۸۱.۷۷۴۴	۵۸۲۰.۱۶۴	۱.۵۹۴۹۷۶	۱.۲۷۰۷۸۴
۱۵	۱۷۰۵	۱	سنتی	۶۴۲.۶۲۲۵	۴۵۴.۹۶۸۹	۱.۷۶۱۷۹۵	۰.۰۹۹۳۳۹
۵	۲۰۴۶	۲	سنتی	۱۰۰.۲۰۰۱	۱۶۰.۷۸۲۴	۰.۲۷۴۷۰۶	۰.۰۳۵۱۰۵
۱۰	۱۳۶۴	۳	سنتی	۴۴۷.۳۲۲۵	۱۰۰۸۰.۱۶	۱.۲۲۶۳۶۶	۲.۲۰۰۹۱۸
۱۰	۲۰۴۶	۱	خشک	۳۳۰.۱۴۸۹	۱۶۹۰.۰۳۲	۰.۹۰۵۱۲۵	۰.۳۶۹۰۰۴
۱۵	۱۳۶۴	۲	خشک	۸۶۳.۷۷۲۱	۷۱۸۲.۵۶۳	۲.۳۶۸۰۹۲	۱.۵۶۸۲۵۲
میانگین				۵۵۷.۴۳۲۱	۶۳۸.۸۱۴		

جدول ۱۵- مقادیر تابع هزینه و سیگنال بر نويز

doc(10 <sup>-6</sup> m)	ws(rpm)	feed	coolant	TLi	S/N
۵	۱۳۶۴	۱	۶۰۴۶	۰.۱۹۴۴۹۴	۷.۱۱۰۹۳۷
۱۰	۱۷۰۵	۲	۶۰۴۶	۰.۴۵۶۵۹	۳.۴۰۴۷۳۶
۱۵	۲۰۴۶	۳	۶۰۴۶	۰.۱۲۰۶۲۵	۹.۱۸۵۶۰۹
۱۰	۱۳۶۴	۱	۶۰۴۳	۰.۳۵۹۹۵۲	۴.۴۳۷۵۵۲
۱۵	۱۷۰۵	۲	۶۰۴۳	۰.۹۸۱۰۸۲	۰.۰۸۲۹۴۶
۵	۲۰۴۶	۳	۶۰۴۳	۱.۱۰۸۴۲۴	-۰.۴۴۷۰۶
۵	۱۷۰۵	۱	کانولا	۰.۲۲۵۳۴۸	۶.۴۷۱۴۶۹
۱۰	۲۰۴۶	۲	کانولا	۰.۵۰۹۷۹۴	۲.۹۲۶۰۵۶
۱۵	۱۳۶۴	۳	کانولا	۲.۵۹۳۴۱۳	-۴.۱۳۸۷۲
۱۵	۲۰۴۶	۱	هوای فشرده	۲.۱۵۳۰۷۱	-۳.۳۳۰۵۸
۵	۱۳۶۴	۲	هوای فشرده	۱.۲۱۴۴۳۷	-۰.۸۴۳۷۵
۱۰	۱۷۰۵	۳	هوای فشرده	۲.۰۱۳۹۰۵	-۳.۰۴۰۳۹
۱۵	۱۷۰۵	۱	سنتی	۰.۲۳۹۲۴۳	۶.۲۱۱۵۹۹
۵	۲۰۴۶	۲	سنتی	۰.۰۶۴۸۴۱	۱۱.۸۸۱۴۸
۱۰	۱۳۶۴	۳	سنتی	۱.۰۳۲۰۲۶	-۰.۱۳۶۹۱
۱۰	۲۰۴۶	۱	خشک	۰.۶۵۵۶۸۲	۱.۸۳۳۰۶۹
۱۵	۱۳۶۴	۲	خشک	۳.۰۹۰۵۳۸	-۴.۹۰۰۳۴

جدول ۱۷- تصاویر میکروسکوپی سطوح قطعه کار

شماره آزمایش MQL ۶۰۴۶	۱	۲	۳
شماره آزمایش MQL ۶۰۴۳	۴	۵	۶
شماره آزمایش MQL کانولا	۷	۸	۹
شماره آزمایش هوای فشرده	۱۰	۱۱	۱۲
شماره آزمایش سنتی	۱۳	۱۴	۱۵
شماره آزمایش خشک	۱۶	۱۷	۱۸



جدول ۱۶- سیگنال بر نويز هر سطح از متغيرها

خشک	سنتی	هوای فشرده	کانولا MQL	MQL ۶۰۴۳	MQL ۶۰۴۶	روانکار
-۱.۰۰۲۸	۵.۹۸۵۳	-۲.۴۰۴۹	۱.۷۵۲۹	۱.۳۵۷۸	۶.۵۶۷۰	S/N
			۳	۲	۱	سرعت پیشروی
			۰.۲۴۶۹	۲.۰۹۱۸	۳.۷۸۹۰	S/N
			۲۰۴۶	۱۷۰۵	۱۳۶۴	سرعت چرخ سنگ (rpm)
			۳.۶۷۴۷	۲.۱۹۸۲	۰.۲۵۴۷	S/N
			۱۵	۱۰	۵	عمق براده برداری (μm)
			۰.۵۱۸۴	۱.۵۷۰۶	۴.۰۳۸۶	S/N

#### ۵-۴- بررسی کیفیت سطح

با توجه به مکانیزم براده برداری در روش MQL که بر اساس برش و شکست است میزان عیوبی همچون ترک و بیرون آمدن ذرات ساینده در سطحی که از این روش روی آن استفاده شده ناچیز است و همان طور که تصاویر نشان می دهند عمق شیارها یکنواخت تر و کیفیت سطح بالاتری در سطوحی که از روش MQL در آن ها به کار رفته دیده می شود. به ویژه در حالت استفاده از روغن های ۶۰۴۳ و ۶۰۴۶ که نتایج صافی سطح بهتری هم نسبت به کانولا نشان داده بودند. در روش سنتی مکانیزم برداشت براده بیشتر به صورت تغییر شکل پلاستیک و شخم زنی است که آثار آن مشخص هست. در رابطه باحالت هوای فشرده شاهد شیارهای عمق روی سطح و شخم زنی ذرات ساینده هستیم به طوری که کیفیت آن را بسیار پایین آورده است و در مورد حالت خشک همان طور که تصاویر میکروسکوپی نشان می دهند در برخی نقاط سطح دچار سوختگی شده که این امر بسیار نامطلوب است و علاوه بر این که کیفیت سطح را پایین می آورد می تواند ساختار ماده در سطح قطعه کار را دچار تغییر کند که بسیار خطرناک است (جدول ۱۷).

#### ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش تلاش هایی صورت گرفت تا به صورت تجربی و بر مبنای طراحی آزمایش هایی دقیق به تأثیر استفاده از روش روانکاری کمینه در سنگ زنی سوپرآلیاژ پایه نیکل اینکونل ۷۳۸ پرداخته شود. متغیرهای انتخاب شده برای بررسی عبارتند از نوع روانکار که شامل روغن کانولا، روغن بهزیست ۶۰۴۶ و روغن بهزیست ۶۰۴۳ به ترتیب

ویسکوزیته و حالت های خشک و سنتی و هوای فشرده می باشد. همچنین سرعت پیشروی و سرعت چرخ سنگ و عمق براده برداری نیز مورد بررسی قرار گرفته اند. به عنوان خروجی نیز نیروهای مماسی و عمودی و زبری سطح و همچنین کیفیت میکروسکوپی سطح مورد بررسی قرار گرفتند. طراحی آزمایش ها بر اساس الگوریتم تاگوچی صورت گرفت.

نتایج تحلیل های آماری شامل محاسبات انحراف از معیار و P value نشان می دهد که برخلاف زبری سطح تأثیر گذاری سرعت چرخ سنگ به صورت مجزا بر خروجی های نیروی عمودی و مماسی کم بوده که با ترکیب آن با سایر متغیرها این اثر افزایش پیدا کرده است. در تمام شرایط نیروی عمودی از نیروی مماسی بزرگ تر است، علت این امر زاویه براده منفی بزرگ ذرات تشکیل دهنده چرخ سنگ می باشد. نتایج به دست آمده از تحلیل تاگوچی برای نیروی مماسی نشان می دهد که در صورت استفاده از شرایط روانکاری MQL 6046 کمترین نیروی مماسی و عمودی به دست می آید پس از آن MQL کانولا و روش روانکاری سنتی به ترتیب بیشترین سیگنال بر نويز را دارند و برای نیروی عمودی کانولا در رتبه سوم قرار دارد. مکانیزم عمده براده برداری در حالت استفاده از MQL شکست و برش است در حالی که در حالت خشک و سنتی این مکانیزم عمدتاً به صورت تغییر شکل پلاستیک و شخم زنی می باشد. ویسکوزیته بالای روغن ۶۰۴۶ به بهبود شرایط روانکاری آن کمک می کند. با توجه به نتایج به دست آمده به کمک روانکاری با روغن کانولا و روش MQL در صورتی که اولویت

نشان می‌دهد که اثر غالب در این روش جایگزینی پیوسته دانه‌ها به خاطر شرایط نیروی بوده است. مقدار ضریب تناسب  $k_1$  که در واقع شیب خط نیرو بر حسب عبارت سمت راست معادله است ۵.۱۷۳۵ خواهد شد. حالت سنتی مربوط به MQL 6046 بیشترین سیگنال بر نویز را با هدف کاهش هر دو خروجی نیرو و زبری سطح دارد و نتایج نشان می‌دهند که در این حالت روان کارها به ترتیب سنتی، MQL 6046، MQL canola، MQL 6043 می‌بایست مورد استفاده قرار گیرند. برای تمامی صد حالت بررسی شده نتایج نشان می‌دهد که سطوح بهینه برای متغیرهای سرعت پیشروی و سرعت چرخ سنگ و عمق براده برداری به ترتیب، سطح یک و ۲۰۴۶ دور بر دقیقه و ۵ میکرون می‌باشند.

با بهبود شرایط محیط زیستی و استفاده از روغن‌های پایه گیاهی باشد، این روغن می‌تواند به عنوان جایگزینی کاملاً مناسب عمل کند. در بین روغن‌های مورد استفاده در شرایط روانکاری MQL نتایج نشان می‌دهد که روغن ۶۰۴۳ زبری سطح کمتری در مقایسه با سایر روغن‌ها ایجاد کرده است. علت این امر را می‌توان در ویسکوزیته پایین آن یافت. نکته قابل توجه اینجاست که روغن ۶۰۴۶ علاوه بر نتایج خوبی که در داده‌های نیرو نشان داد در بررسی زبری سطح نیز پس از روش سنتی و روغن ۶۰۴۳ رتبه سوم را از نظر سیگنال بر نویز دارد که نشان می‌دهد این روغن می‌تواند انتخاب مناسبی برای روانکاری عملیات سنگ‌زنی اینکونل ۷۳۸ باشد. برخلاف تصور اولیه که انتظار می‌رفت استفاده از اسپری هوا با دور کردن براده‌ها از بین ذرات ساینده و محل سنگ‌زنی اثر مثبتی بر صافی سطح بگذارد اما نتایج

## مراجع

- [1] S. Debnath<sup>1</sup>, M.M. Reddy<sup>2</sup>, Q.S. Yi<sup>3</sup>, "Environmentally friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review". *Journal of Cleaner Production*, Vol. 83, 2014, pp. 33-47.
- [2] A.S.S. Balan<sup>1</sup>, L. Vijayaraghavan<sup>2</sup>, R. Krishnamurthy<sup>3</sup>, "Minimum Quantity Lubricated Grinding of Inconel751 Alloy". *Materials and Manufacturing Processes*, Vol.28, No.4, 2013, pp. 430-435.
- [۳] نظری، "خواص کششی سوپرآلیاژ پایه نیکل LC738IN در دماهای مختلف و تأثیر سرعت سرد کردن بعد از عملیات حرارتی حل سازی بر خواص کششی"، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۷۵، صفحه ۱-۳۲.
- [۴] محمدجعفر حداد و علیرضا شربتی، "بررسی تجربی اثر پارامترهای ماشین کاری بر انتقال حرارت و توزیع دما در فرآیند تراشکاری"، دومین همایش ملی انتقال حرارت و جرم، سمنان، ایران، ۱۳۹۳.
- [۵] سجادی، امید عودباشی و یوسف ثانی، "بررسی ریزساختار پره های مستعمل ردیف اول توربین گازی و تعیین سیکل عملیات حرارتی مناسب برای بازیابی ساختار اولیه آنها"، نشریه مهندسی متالوژی و مواد، دوره ۲۱، سال ۱۳۸۷، صفحه ۱۱-۱.
- [6] Y. Fan, "New observations on tool wear mechanism in machining Inconel 718 under water vapor + air cooling lubrication cutting conditions". *Journal of Cleaner Production*, Vol. 90, 2015, pp. 381-387.
- [7] D.G. Thakur<sup>1</sup>, B. Ramamoorthy<sup>2</sup>, L. Vijayaraghavan<sup>3</sup>, "Influence of minimum quantity lubrication on the high-speed turning of aerospace material superalloy Inconel 718". *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, Vol. 13, No. 2, 2013., pp.203-214.
- [8] A. Duchosal, "An experimental investigation on oil mist characterization used in MQL milling process". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, No. 5, 2013, pp. 1003-1014.
- [9] D. Setti<sup>1</sup>, S. Ghosh<sup>2</sup>, P.V. Rao<sup>3</sup>. "An Effective Method to Determine the Optimum Parameters for Minimum Quantity Lubrication (MQL) Grinding". 5th International and 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference AIMTDR ,2014.
- [10] Y. Shao<sup>1</sup>, S.Y. Liang<sup>2</sup>. "Predictive force modeling in MQL (minimum quantity lubrication) grinding", ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the JSME 2014 International Conference on Materials and Processing and the 42nd North American Manufacturing Research Conference, American Society of Mechanical Engineers,2014.
- [11] B. Shen<sup>1</sup>, A.J. Shih<sup>2</sup>, "Minimum quantity lubrication (MQL) grinding using vitrified CBN wheels Trans". *NAMRI/SME*, Vol. 37, 2009, pp. 129-136.

[12] L.M. Barczak<sup>1</sup>, A.D.L. Batako<sup>2</sup>, M.N. Morgan<sup>3</sup>, "A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (MQL) conditions Taguchi". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol.50, No. 11, 2010. pp. 977-985.

[13] B.G. Barros, "Utilization of Teflon and aluminum oxide for wheel cleaning in Minimum Quantity Lubrication (MQL) grinding". *Materials Research*, Vol. 17, 2014, pp. 23-32.

[۱۴] یوسف ملاپور، امید پدرام، اسماعیل پورسعیدی و حسن شایانی جم، "شبیه سازی رفتار خوردگی حفره دار شدن فولاد زنگ نزن CUSTOM 450 با نرم افزار کامسول و روش همبستگی تصاویر دیجیتال"، مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۹، شماره ۶۵، تابستان ۱۴۰۰، صفحه ۲۹-۳۹.

[۱۵] رضا نوری، احمد صادقیه و محمدمهدی لطفی، "برنامه ریزی همزمان بازرسی و نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه مبتنی بر تقاضا در شرایط زوال مارکفی ماشین جهت کاربرد در توربین های بادی"، مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۸، شماره ۶۱، تابستان ۱۳۹۹، صفحه ۶۳-۸۴.

[۱۶] سیدابراهیم موسوی ترشیزی و علی جهانگیری، "تحلیل خرابی پره های ثابت کمپرسور در یک توربین گاز"، مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۴، پاییز ۱۳۹۷، صفحه ۳۵۱-۳۶۰.

[۱۷] محسن قاضی، امیرحسین معینی و مهران رجبی زرگرآبادی، "افزایش اثربخشی خنک کاری لایه ای پره توربین در حال چرخش با استفاده از سوراخ تزریق شکل داده شده"، مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۵۱، زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۲۲۵-۲۳۶.

[۱۸] علی سلیمانی، سعید شهرکی، مهدی شرافتی و حسین بیسادی، "تحلیل خستگی و خزش پره های ردیف اول توربین میکروتوربین TRI60"، مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۵۱، زمستان ۱۳۹۶، صفحه ۲۵۱-۲۶۵.

[19] D.C. Montgomery, "Design and Analysis of Experiments". 5 ed, Wiley, 2000.

[20] J. Tang<sup>1</sup>, J. Du<sup>2</sup>, Y. Chen<sup>3</sup>, "Modeling and experimental study of grinding forces in surface grinding". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No.6, 2009, pp. 2847-2854.

[21] L. Settineri<sup>1</sup>, V.K. Mishra<sup>2</sup>, K. Salonitis<sup>3</sup>, "Empirical Estimation of Grinding Specific Forces and Energy Based on a Modified Werner Grinding Model", 14th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO), *Procedia CIRP*. Vol. 8, 2013, pp. 287-292.

[۲۲] ابوالفضل فورگی نژاد، حسین امیرآبادی و خلیل خلیلی، "مدلسازی فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی با شبکه عصبی و بهینه سازی آن با استفاده از الگوریتم کرم شبتاب"، مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۲، شماره ۳۷، شهریور ۱۳۹۳، صفحه ۱-۱۴.