



# The Effect of Applying R410a Refrigerant as a Cooling Fluid on Dimensional Deviation and Surface Roughness in Turning 1045 Steel Compared to Soap-water Fluid

Mohammad-Javad Haghparast<sup>1</sup>, Alireza Motahari<sup>2</sup>, Gholamreza Khalaj<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>M.Sc., Mechanical Engineering, Savah Branch, Islamic Azad University, Saveh, Iran.

<sup>2,3</sup>Faculty Member, Department of Engineering, Savah Branch, Islamic Azad University, Saveh, Iran.

## ARTICLE INFO

### Article Type:

Original Research

**Received:** 01.25.2023

**Revised:** 05.08.2023

**Accepted:** 06.11.2023

### Keyword:

Tool Wear

Cryogenic Cooling

Dimensional Deviation Surface

Roughness

Tool

### \*Corresponding Author:

Gholamreza Khalaj

Email: [gh.khalaj@srbiau.ac.ir](mailto:gh.khalaj@srbiau.ac.ir)

## ABSTRACT

In this research, the life of the tool and the wear rate of the cutting edge of the tool were investigated using R410a coolant in cooling the cutting edge of the tool and comparing it with the traditional fluid of soapy water. In addition, dimensional deviation and surface roughness of steel (ck45) 1045 in chipping with a high-speed steel (HSS) tool at cutting speeds of 15, 25, 40, and 55 meters per minute cutting depths of 0.5, 1, and 1.5 mm and feed rate of 0.05, 0.12, and 0.2 mm /rev were investigated in two modes of liquid cooling, soapy water and R410a coolant. The obtained results showed that cooling with R410a refrigerant, due to its high cooling power and better control of the temperature of the cutting area compared to the soapy water fluid in the machining process, reduced the amount of tool wear and can be used as one of the suitable cooling fluids. Based on the minimum values of dimensional deviation and surface roughness under different conditions, by using R410a refrigerant, the cutting speed can be increased by 60% from 25 m/min to 40 m/min. Furthermore, in the most optimal mode, at a cutting speed of 40/min, the chipping depth is 1 mm and the advance values are 0.05 mm per round, the dimensional deviation and surface roughness are improved by up to 6 and 10 times. In the optimal state, the dimensional deviation based on the diameter difference in 300 mm length is 14 microns and the surface roughness will decrease to 3.1 micrometers after 60 minutes of chipping time.



---

## EXTENDED ABSTRACT

---

### Introduction

In various processes of machining and shaping of materials, the use of various coolants and lubricants in different industrial machines such as lathes, milling and grinding machines is very popular. The use of various types of coolants primarily causes the cooling of the machining tool and lowers its temperature, and on the other hand, with its lubricating properties, it reduces the friction between the tool and the workpiece. Choosing the right cutting fluid by reducing friction, better cooling and preventing excessive heat in the machining environment leads to longer tool life, reducing cutting force and improving surface quality. One of the most important parameters affecting the cost of production of products and their final quality is the surface roughness of the production parts, which depends on several factors such as the type of tools, the type of workpiece, and cooling fluids. The importance of this matter is that by reducing the roughness of the surface of the manufactured parts, the value of the manufactured products increases and a much more stylish and usable product is obtained.

Because 1045 steel with the brand name CK45 is one of the hard-to-turn metals in the industry and its machining is always associated with damage to the tool and reduction of tool life and tool operation time, and also due to its high wear resistance, it is one of the most widely used metals in various industrial fields, increasing the tool life in the machining of this steel is very important. Of course, since the supply of liquid nitrogen and its application method are very expensive and require advanced equipment, in the present research, the refrigerant R410a, which was previously used in the cooling systems of facilities and cold stores, and its capability was investigated. As it reduced temperature by up to -50 degrees Celsius, this refrigerant was used as a tool cooling fluid, and in the experiments, separate application of water-soap fluid and R410a refrigerant jet on the cutting edge of the HSS tool during turning of AISI1045 steel and the dimensional deviation and roughness of the resulting surface under both cooling conditions were investigated and compared. R410A refrigerant gas is a mixture of 50% difluoromethane refrigerant gas (R32) and 50% pentafluoroethane gas (R125). This gas is completely colourless, non-toxic, non-flammable and environmentally friendly.

### Methodology

Pieces of steel 1045 (CK45) in the form of rebar with an initial diameter of 50 mm and an initial length of 500 mm were selected for testing. The parts were cut in diameters of 50 mm and lengths of 350 mm, and a hole was drilled on one side of them. At each stage, the pieces of 40 mm size were placed inside three systems and were restrained on the opposite side by the bird device. The tools were made of HSS steel with dimensions of 12 x 12, grinded and prepared under a 14° cutting angle and 8° front and side free angles.

The Tabriz TN50 lathe equipped with two step motors and gearboxes was used to control the movement values of superts electronically and equipped with a three-phase AC inverter to bring the revolutions of the machine to the exact values tested. Emco's CNC

machine microscope was used to check the condition of the tip of the tool and the Phertometer P1 roughness meter installed on the Supert set.

### **Results and discussion**

Data related to the dimensional deviation of parts for cutting speeds of 15, 25, 40 and 55 meters per minute, depth of loads 0.5, 1 and 1.5 mm and advances of 0.05, 0.12 and 0.2 mm was considered and the dimensional deviation recorded in lengths of 50 mm up to the final length of 300 mm. In each stage of the test, to make the diameter of the piece uniform, HM diamond tools were used to reduce the diameter by 0.5 mm so that the test conditions for each stage were similar to the previous stage. For each selected cutting speed, a piece different from the previous piece with a diameter of 49 mm was prepared and tested under the same conditions.

To save consumables, the data related to the surface roughness was recorded in some experiments simultaneously with the dimensional deviation data. Since in recording the dimensional deviation data the length of 300 mm was the basis from the beginning to the end of the test process, and in the recording of the surface roughness data, the time of 60 minutes was the basis of the examination, the duration of the test was different for these two cases. Therefore, according to the different cutting speeds, the course travelled by the tool was not the same for different situations.

### **Conclusion**

In this research, by using R410a refrigerant and comparing it with the traditional soap-water fluid in cooling the cutting edge of the tool, the effect of applying this fluid on the surface roughness and dimensional deviation was investigated. Considering models made of AISI45 steel with a diameter of 50 mm and a length of 350 mm and turning them using HSS tools with a 14-degree cutting angle and 8-degree front and side free angles, the effects of cooling fluid at cutting speeds of 15, 25, 40 and 55 meters per minute, load depth of 0.5, 1 and 1.5 mm and advances of 0.05, 0.12 and 0.2 mm per round were recorded. The results obtained from the research indicated that cooling with R410a refrigerant, due to its high cooling power and better control of the temperature of the cutting area compared to the soap-water fluid in the machining process, reduced the roughness of the part surface and increased the quality of the machining surface. It also reduced the dimensional deviation of parts and can be used as a suitable cooling fluid.

## تأثیر اعمال مبرد R $\epsilon$ 10+a به عنوان سیال خنک‌کننده بر انحراف ابعادی و زبری سطح در تراشکاری فولاد ۱۰۴۵ در مقایسه با سیال آب - صابون

محمدجواد حق پرست<sup>۱</sup>، علیرضا مطهری<sup>۲</sup>، غلامرضا خلیج<sup>۳\*</sup>

۱- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه، ساوه، ایران.  
۲ و ۳- هیات علمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساوه، ساوه، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

اصطکاک بین ابزار و قطعه کار حین عملیات ماشینکاری همیشه سبب افزایش نرخ فرسایش ابزار می‌شود. برطرف ساختن این مشکل با استفاده از سیالات و خنک‌کاری ابزارها امری ضروری است. در این تحقیق انحراف ابعادی و زبری سطح فولاد (CK45) در براده برداری با ابزاری از جنس فولاد تندبر (HSS) در سرعت‌های برشی ۱۵، ۲۵، ۴۰ و ۵۵ متر بر دقیقه، عمق‌های براده‌برداری ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌متر و مقادیر پیشروی ۰/۰۵، ۰/۱۲ و ۰/۲ میلی‌متر بر دور، در دو حالت خنک‌کاری سیال آب صابون و مبرد R $\epsilon$ 10+a بررسی شد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که خنک‌کاری به‌وسیله مبرد R $\epsilon$ 10+a به علت قدرت سرمایش بالا و کنترل بهتر دمای محل برش نسبت به سیال آب صابون در فرآیند ماشین‌کاری، سبب کاهش میزان فرسایش ابزار گردیده و می‌تواند به عنوان یکی از سیالات مناسب خنک‌کاری به کار گرفته شود. براساس کمینه‌های مقدار انحراف ابعادی و زبری سطح در شرایط مختلف، با استفاده از مبرد R $\epsilon$ 10+a می‌توان سرعت برشی را ۶۰ درصد افزایش داد و از ۲۵ به ۴۰ متر بر دقیقه رساند. همچنین در بهینه‌ترین حالت در سرعت برشی ۴۰ متر بر دقیقه، عمق براده‌برداری ۱ میلی‌متر و مقادیر پیشروی ۰/۰۵ میلی‌متر بر دور، انحراف ابعادی و زبری سطح تا ۶ و ۱۰ برابر بهبود می‌یابد. در حالت بهینه، انحراف ابعادی براساس اختلاف قطر در طول ۳۰۰ میلی‌متر به ۱۴ میکرون و زبری سطح پس از گذشت ۶۰ دقیقه از زمان براده برداری، به ۳/۱ میکرومتر کاهش می‌یابد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۰۵

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۱۸

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۲۱

### کلید واژگان:

کیفیت سطح  
خنک‌کاری تبریدی  
زبری سطح  
انحراف ابعادی  
فولاد تندبر

\*نویسنده مسئول: غلامرضا خلیج

پست الکترونیکی:

[gh.khalaj@srbiau.ac.ir](mailto:gh.khalaj@srbiau.ac.ir)

## مقدمه

در فرآیندهای مختلف ماشین‌کاری و شکل‌دهی مواد، استفاده از انواع خنک‌کارها و روانکارها در انواع ماشین‌آلات صنعتی نظیر ماشین‌های تراش، فرز و سنگ‌زنی رواج فراوان دارد. استفاده از انواع خنک‌کارها در درجه‌اول باعث خنک شدن ابزار ماشین‌کاری شده و دمای آن را پایین‌تر می‌آورد و از طرف دیگر با خاصیت روانکاری سبب کاهش اصطکاک بین ابزار و قطعه کار می‌گردد. انتخاب درست سیال برشی با کاهش اصطکاک، خنک‌کاری بهتر و جلوگیری از ایجاد گرمای بیش از حد در محیط ماشین‌کاری، منجر به طول عمر بیشتر ابزار، کاهش نیروی برشی و بهبود کیفیت سطح می‌گردد [۱]. یکی از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در هزینه تولید محصولات و کیفیت نهایی آنها زبری سطح قطعات تولیدی می‌باشد که به عوامل متعددی همچون جنس ابزار، جنس قطعه کار و سیالات خنک‌کننده بستگی دارد. اهمیت این موضوع از این نقطه نظر است که با کاهش زبری سطح قطعات تولیدی، ارزش محصولات تولیدی افزایش یافته و محصولی به مراتب شکیل‌تر و قابل استفاده به‌دست می‌آید [۲].

یکی از رایج‌ترین روش‌های کاهش زبری سطح استفاده از سیالات خنک‌کننده می‌باشد که به سبب کاهش دمای ابزار از افزایش حرارت در لبه‌های برنده جلوگیری به عمل آورده و فرسایش کمتری در ابزار رخ می‌دهد و همچنین اجازه افزایش سرعت برشی را در فرآیند ماشین‌کاری می‌دهد که همه اینها دستیابی به زبری سطح پایین‌تر را نتیجه می‌دهد. ویژگی‌هایی که برای یک سیال خنک‌کننده فوق سرد مناسب عنوان شده عبارتند از قابلیت از بین بردن حرارت در ناحیه برش و در نتیجه آن کاهش دمای برشکاری، قابلیت اعمال تغییر در میزان اصطکاک موجود بین ابزار و براده، قابلیت ایجاد تغییر در ویژگی‌های قطعه کار و ابزار و در آخر چنانچه سیال قابلیت بازگشت به چرخه خنک‌کاری را داشته باشد و یا بدون عوارض بتواند وارد طبیعت شود از ویژگی‌های مثبت آن به حساب می‌آید [۳-۵].

روش‌های خنک‌کاری فوق سرد در فرآیندهای ماشین‌کاری با توجه به پژوهش‌های انجام شده به صورت زیر طبقه‌بندی می‌شوند: پیش‌خنک‌کاری فوق سرد قطعه کار به صورت پالسی و یا یک حمام بسته و خنک‌کاری فوق سرد براده، خنک‌کاری فوق سرد غیر مستقیم یا خنک‌کاری فوق سرد پشت ابزار یا خنک‌کاری هدایتی فاصله‌دار، خنک‌کاری جت فوق سرد به‌وسیله تزریق طوفان‌وار ماده خنک‌کننده به محدوده برش و یا به لبه‌های برشی ابزار و یا سطوح ابزار. خنک‌کاری فضای بین ابزار و براده و فضای بین ابزار و قطعه کار به‌وسیله نازل‌های فوق ریز و عملیات تبریدی ابزارهای برشی که سبب افزایش بازده آنها می‌شود نیز می‌تواند خود به ایجاد طبقه‌بندی‌های دیگری بینجامد [۶-۱۰].

در روش خنک‌کاری فوق سرد، هدف سرد کردن قطعه کار یا براده به منظور تغییر خواص ماده از حالت نرم به سخت می‌باشد. چرا که براده‌های داکتیل (نرم) وقتی که دمای براده کاهش می‌یابد به حالت ترد (شکننده) تبدیل می‌شوند [۱۱]. همچنین کنترل کردن و شکستن براده‌ها در حین براده‌برداری، بازده ماشین‌کاری را افزایش خواهد داد [۱۲]. از طرفی در دماهای پایین‌تر از ۵۵- درجه سانتیگراد برای فولاد AISI 1008 منجر به شکننده‌تر شدن فلز می‌شود [۱۳]. رشد فرسایش سطح آزاد با اعمال نیتروژن مایع کاهش می‌یابد که علت آن ثابت ماندن سختی و تیزی لبه برنده ابزار به علت پایدار بودن سردسازی، جلوگیری از اکسید شدن، خوردگی، چسبندگی و ایجاد لبه انباشته می‌باشد، این بدان معناست که عمر ابزار حدود ۱۵۰ درصد افزایش پیدا می‌کند [۱۴]. استفاده از نیتروژن مایع ممکن است در حالت کلی امکان استفاده در خط تولید را نداشته باشند و با اثری وارونه نیروی برش و سایش را افزایش دهد. در ضمن احتمال تغییرات ابعادی قطعه کار وجود داشته و مصرف بالای نیتروژن مایع مقرون به‌صرفه و اقتصادی نیست [۱۵؛ ۱۶]. باید در نظر داشت، نیتروژن مایع قابلیت سیرکوله شدن و بازگشت به مخزن همانند سیالات خنک‌کننده سنتی را ندارد چون بعد از خارج شدن از مخزن به فشار اتمسفر می‌رسد و گرمای فرآیند برش کاری را جذب می‌کند و به سرعت تبخیر می‌شود و فقط در صورتی که عملیات پاشش به‌صورت هدفمند و با کمک میکرونازل‌ها صورت گیرد از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه می‌باشد [۱۷؛ ۱۸]. اثرات دمای فوق سرد بر ویژگی‌های مواد قطعه کارهایی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴

AISI، فولاد کم کربن ۱۰۱۰ و ۱۰۰۸، فولاد پر کربن ۱۰۷۰، فولاد باتاقان E۵۲۱۰۰، آلیاژ تیتانیوم ۴۷-۶Al-Ti و آلیاژ ریختگی آلومینیوم A ۳۹۰ مورد بررسی قرار گرفته است [۱۹-۲۵].

در بررسی اثر خنک کاری فوق سرد بر روی زبری سطح و انحرافات ابعادی، انحرافات و عدم دقت ابعادی به وسیله مقایسه عمق برش تنظیم شده و عمق برش حاصل به دست می آید [۲۶]. دقت ابعادی به شدت متأثر از نیروهای برش و سختی ابزار برش، نگهدارنده ابزار و نگهدارنده های قطعه است [۲۷]. پرداخت سطحی و انحرافات ابعادی هم شدیداً متأثر از سختی ابزار و دقت ماشین های ابزار و شرایط ماشین کاری می باشند. در چنین شرایطی، پارامترهای منفی حاصل، به علت دمای برش بالا و خنک کاری ناکافی رخ می دهند [۲۸-۳۰].

با توجه به این که فولاد ۱۰۴۵ با نام تجاری CK ۴۵ یکی از فلزات سخت تراش صنعت می باشد و همواره ماشینکاری آن توأم با صدمات به ابزار و کاهش عمر ابزار و زمان عملکرد ابزار است و همچنین به علت مقاومت به سایش بالای خود یکی از پر کاربردترین فلزات در حوزه های مختلف صنعتی است، افزایش عمر ابزار در ماشینکاری این فولاد اهمیت به سزایی دارد [۳۱؛ ۳۲]. البته از آنجایی که تأمین نیتروژن مایع و روش اعمال آن بسیار هزینه بر و نیازمند تجهیزات پیشرفته می باشد، در این پژوهش با نگاهی تازه بر مبرد R۴۱۰a که پیشتر در سیستم های سرمایشی تأسیساتی و سردخانه ها استفاده می شده و توانایی کاهش دما تا ۵۰- درجه سانتیگراد را در محل اعمال دارد، از این مبرد در نقش سیال خنک کننده ابزار استفاده شده و با طراحی آزمایش هایی تجربی به اعمال جداگانه سیال آب - صابون و جت مبرد R۴۱۰a بر لبه برنده ابزار HSS حین تراشکاری فولاد ۱۰۴۵ AISI پرداخته و انحراف ابعادی و زبری سطح حاصل تحت هر دو شرایط خنک کاری بررسی و مقایسه شد. گاز مبرد R۴۱۰a مخلوطی از ۵۰ درصد گاز مبرد دی فلئورو متان (R۳۲) و ۵۰ درصد گاز پنتا فلئورو اتان (R۱۲۵) می باشد. این گاز کاملاً بی رنگ، غیر سمی، غیر قابل اشتعال و دوستدار محیط زیست است.

## روش انجام آزمایش

قطعه های از جنس فولاد ۱۰۴۵ (CK۴۵) به شکل میلگرد با قطر اولیه ۵۰ میلی متر و طول اولیه ۵۰۰ میلی متر جهت آزمایش انتخاب شد. قطعات در قطرهای ۵۰ میلی متر و طول های ۳۵۰ میلی متر بریده شده و یک سمت آنها سوراخ مته مرغک زده شد. در هر مرحله قطعات به اندازه ۴۰ میلی متر داخل سه نظام قرار گرفته و در سمت مقابل آن توسط دستگاه مرغک مهار گردیدند. ابزارها از جنس فولاد HSS با ابعاد ۱۲ در ۱۲، تحت زاویه براده ۱۴ درجه و زوایای آزاد پیشانی و جانبی ۸ درجه سنگ زنی و آماده شدند.

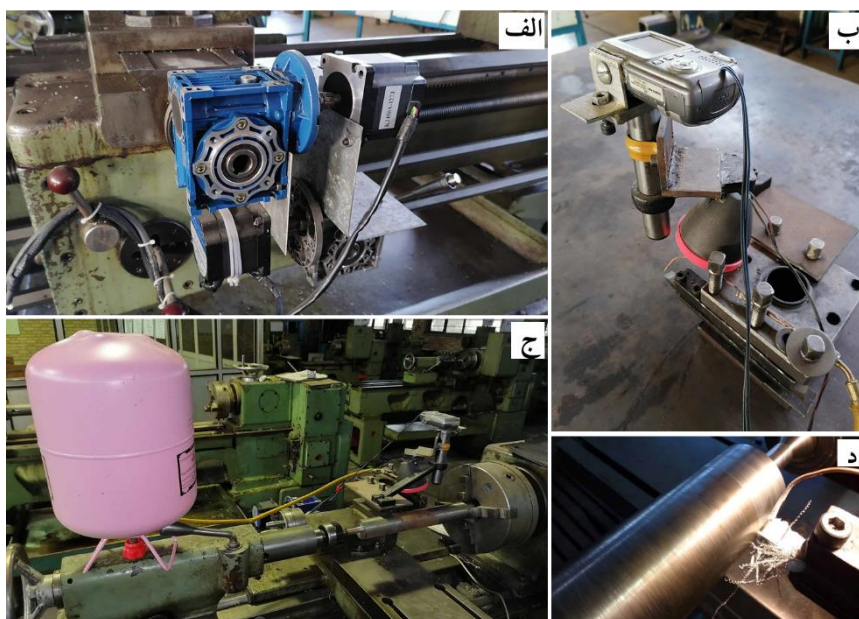
از دستگاه تراش تبریز TN ۵۰ مجهز به دو عدد استپ موتور و گیربکس برای کنترل مقادیر حرکات سوپرت ها به صورت الکترونیکی و مجهز به اینورتور سه فاز AC به منظور رساندن عده دوران دستگاه به مقادیر دقیق مورد آزمایش استفاده شد. از میکروسکوپ دستگاه CNC امکو برای بررسی وضعیت نوک ابزار و زبری سنج Phertometer P1 نصب شده بر روی مجموعه سوپرت بهره گرفته شد.

با اعمال تغییراتی بر روی ماشین تراش TN۵۰ تبریز امکان اندازه گیری پارامتر انحراف ابعادی و زبری سطح فراهم گردید. این تغییرات عبارتند از:

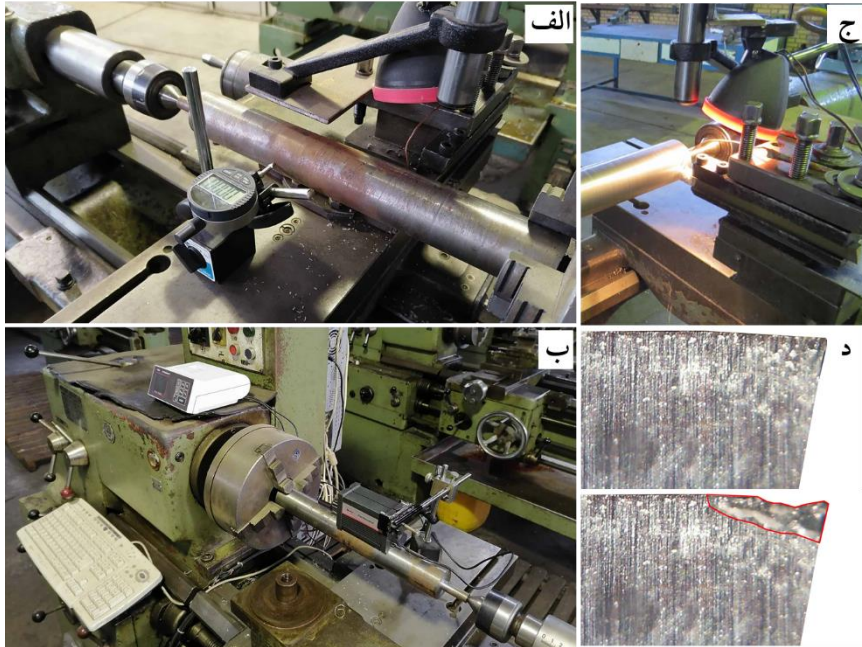
- استفاده از دو استپ موتور و دو درایو راه انداز برای آنها و اتصال آنها به سیستم رایانه و نصب موتورها بر روی سوپرت عرضی و طولی به منظور کنترل محورهای دستگاه توسط رایانه
- استفاده از یک اینورتور ۳ فاز به منظور دستیابی به عده دوران و سرعت برشی دقیق و کنترل عده دوران از پشت گلوبی دستگاه توسط دور سنج دیجیتالی (شکل ۱ الف)
- نصب دوربین عکاسی بر روی میکروسکوپ دستگاه تراش سی ان سی امکو و نصب این مجموعه بر روی ابزارگیر دستگاه تراش (شکل ۱ ب)

- نصب نازل اعمال آب صابون بر روی ابزارگیر و ارتباط آن با پمپ و مخزن آب صابون
- نصب نازل اعمال سیال تبریدی R۴۱۰a و اتصال آن به کپسول حاوی سیال (شکل ۱، ج، د)
- نصب پایه نگهدارنده ساعت اندازه‌گیری دیجیتال بر روی مجموعه سوپرت به منظور اندازه‌گیری قطر قطعه کار در مراحل مختلف (شکل ۲ الف)
- نصب پایه نگهدارنده زبری سنج پرتومتر بر روی مجموعه سوپرت به منظور اندازه‌گیری زبری سطح قطعه (شکل ۲ ب)

نهایتاً پس از آماده‌سازی پیش نیازهای تحقیق به ترتیب با در نظر گرفتن سرعت‌های برشی مختلف و عمق بارهای متفاوت و پیشروی‌های خودکار متفاوت به ثبت میزان زبری سطح و انحراف ابعادی پرداخته شد. شکل ۲. ج و د) ضبط و پردازش تصویر دوربین دیجیتال را نشان می‌دهد.



شکل ۱. الف) نصب اینور تور ۳ فاز، ب) نصب دوربین عکاسی بر روی میکروسکوپ دستگاه تراش، ج) و د) نصب نازل و اعمال سیال تبریدی R۴۱۰a.



شکل ۲. (الف) نصب پایه نگهدارنده ساعت اندازه گیری دیجیتال، (ب) نصب پایه نگهدارنده زبری سنج پرتومتر، (ج) و (د) ضبط و پردازش تصویر دوربین دیجیتال.

### جزئیات آماده سازی دستگاه تراش

در این تحقیق در ابتدای امر تغییراتی بر روی دستگاه تراش TN ۵۰ تبریز اعمال گردید. این تغییرات شامل افزودن ۲ عدد استپ موتور ۱/۸ درجه و ۴/۵ کیلو نیوتن و جعبه دنده با نسبت انتقال ۱:۵۰ در ورودی سوپرت طولی و عرضی و اضافه کردن یک اینورتور سه فاز در ورودی الکتروموتور دستگاه و یک عدد انکودر دورسنج در راستای محور سه نظام، به منظور تنظیم عده دوران دستگاه بود.

استپ موتورهای مدل MG ۸۶ (ساخت چین) استفاده شده در دستگاه با استفاده از دو عدد درایو استپ موتور لیدشاین چین مدل DM۵۴۲E به یک سیستم رایانه و به خروجی پورت LPT متصل شدند تا کنترل حرکات ماشین با مکانیزم کنترل عددی قابل انجام باشد. همچنین انکودر مورد استفاده با استفاده از پورت مذکور به رایانه متصل گردیده و عده دوران مورد نیاز برای دستگاه را با کمک اینتورتور متصل شده به الکترو موتور تنظیم می نمود. نرم افزار استفاده شده در سیستم رایانه Mach۳ ورژن (R۳.۰۴۳.۰۶۶) بوده که با استفاده از پورت LPT پالس های مورد نیاز برای درایوهای استپ موتور و اینورتور را تأمین می نمود.

همچنین با توجه به این که سیستم گیربکس سه نظام دستگاه دارای عده دوران های محدود می باشد به علت حفظ گشتاور و عده دوران مناسب و عدم کاهش توان الکتروموتور حین عملیات ماشینکاری در هر مرحله از آزمایش عده دوران مورد نیاز محاسبه شده و دستگاه بر روی دوری نزدیک به دور اصلی تنظیم شده و مقدار اختلاف عده دوران دقیق توسط اینورتور محاسبه و به الکتروموتور اعمال می گردید.

علاوه بر تجهیزات حرکتی اضافه شده به دستگاه تراش TN ۵۰، یک عدد میکروسکوپ نمایش نوک ابزار دستگاه CNC امکو بر روی ابزارگیر دستگاه توسط فیکسچر ساخته شده، نصب و تصاویر توسط یک عدد دوربین دیجیتال

سامسونگ با کیفیت ۵ مگاپیکسل ذخیره گردید (شکل ۲، ج. د). فیکسچر طراحی شده دیگری وظیفه حمل دستگاه زبری سنج را بر عهده داشت.

نازل‌های آب صابون و سیال R۴۱۰a نیز بر روی مجموعه ابزارگیر نصب شده و بر روی نوک ابزار به منظور اعمال دقیق تنظیم شدند. سیال آب صابون توسط پمپ آب صابون کنترل شده و سیال R۴۱۰a توسط یک شیربرقی که به‌وسیله سیستم رایانه کنترل می‌شد بر روی ابزار اعمال گردید. مخزن سیال آب صابون در مکان استاندارد و در زیر دستگاه تراش واقع شده و مخزن سیال R۴۱۰a هم‌راستا با نازل و بر روی دستگاه مرغک قرار داشت. سیال آب صابون به‌وسیله پمپ اعمال می‌شود ولی سیال R۴۱۰a به علت فشار بالای مخزن تنها با باز شدن شیر برقی اعمال می‌گردد. نمونه‌های آماده شده بعد از بسته‌شدن در داخل سه نظام تحت عملیات روتراشی قرار گرفتند. عملیات روتراشی از ابتدای قطعه آغاز و هم‌زمان، زمان سنج شروع به شمردن دقیق می‌کند و عملیات تا ۶۰ دقیقه ادامه پیدا می‌کند. در این مرحله چنانچه قبل از رسیدن به طول ۳۰۰ میلیمتری زمان به پایان برسد، اندازه‌گیری در طول مربوطه و با توجه به بازه‌های زمانی ۵ دقیقه در موقعیتی که ابزار در بازه‌های زمانی ذکر شده داشته است اندازه‌گیری می‌شود و چنانچه با وجود رسیدن به انتهای مسیر ۳۰۰ میلیمتری زمان به پایان نرسیده باشد؛ ابزار به ابتدای مسیر برگشته و عملیات تا رسیدن به زمان ۶۰ دقیقه ادامه پیدا می‌کند. لازم به ذکر است که در چنین حالتی ابزار بدون سنگ‌زنی باید تا طی شدن کامل زمان به ماشینکاری ادامه دهد.

در هر مرحله از سیکل روتراشی، نوع سیال خنک‌کاری، سرعت برشی، مقدار پیشروی و عمق بار مشخص و ثابت می‌باشد. ضمناً داده‌های مربوط به میزان زبری سطح و انحراف ابعادی توسط دوربین میکروسکوپ دستگاه سی‌ان‌سی امکو در محدوده‌های زمانی مد نظر از روی مدل اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد. به این ترتیب در هر سیکل آزمایش در زمان‌های ۵ دقیقه‌ای (تا ۶۰ دقیقه) برای میزان زبری سطح و انحراف ابعادی اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد.

در انتهای عملیات قطر نمونه از ابتدا تا انتهای مسیر ۳۰۰ میلیمتری در فواصل ۵۰ میلیمتری توسط میکرومتر دیجیتالی میتوتویو (ساخت کشور ژاپن) اندازه‌گیری شده و توسط ساعت اندازه‌گیری دیجیتالی مدل A۱۲ (ساخت کشور چین) چک شده و ثبت می‌گردد. به این ترتیب در هر سیکل از روتراشی ۶ عدد برای قطرها و ۶ عدد برای اختلاف قطر نسبت به قطر اولیه محاسبه و ثبت می‌گردد. با توجه به این‌که در هر مرحله سرعت برشی مد نظر مشخص می‌باشد عده دوران با توجه به کاهش قطر در هر مرحله محاسبه و در G-Code های نوشته شده اصلاح گردید. داده‌های مربوط به زبری سطح به‌وسیله دستگاه زبری سنج Phertometer p۱ در محدوده‌های زمانی مد نظر از روی مدل اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد. به این ترتیب در هر سیکل آزمایش به ازای تقسیم ۶۰ دقیقه به زمان‌های ۵ دقیقه ای ۱۲ عدد برای زبری سطح اندازه‌گیری و ثبت می‌گردد. با توجه به این‌که در هر مرحله سرعت برشی مد نظر مشخص می‌باشد عده دوران مانند آزمایش قبل با توجه به کاهش قطر در هر مرحله محاسبه و در G-Code های نوشته شده اصلاح گردید.

سرعت‌های برشی در نظر گرفته شده برای آزمایش برابر ۱۵، ۲۵، ۴۰ و ۵۵ متر بر دقیقه، عمق بار ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلیمتر و پیشروی‌های برابر ۰/۰۵، ۰/۱۲ و ۰/۲ میلیمتر در هر دور بودند. جدول ۱ پارامترهای ورودی و سطوح آنها را نشان می‌دهد. کلیه پارامترها یک مرحله برای سیال آب - صابون و مرحله دیگر برای سیال R۴۱۰a ثبت گردیدند. مفهوم عمق برش (Depth of Cut) نصف کاهش قطر قطعه کار در هر مرحله از روتراشی است. شکل ۳ فلوجارت روند بررسی انحراف ابعادی و زبری سطح را نشان می‌دهد.

جدول ۱. پارامترهای ورودی و سطوح آنها.

پارامتر	واحد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
سرعت برشی Cutting Velocity	متر بر دقیقه	۱۵	۲۵	۴۰	۵۵

پارامتر	واحد	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
عمق بار Depth of Cut	میلیمتر	۰/۵	۱	۱/۵	-
سرعت پیشروی Feed Rate	میلیمتر در هر دور	۰/۰۵	۰/۱۲	۰/۲	-



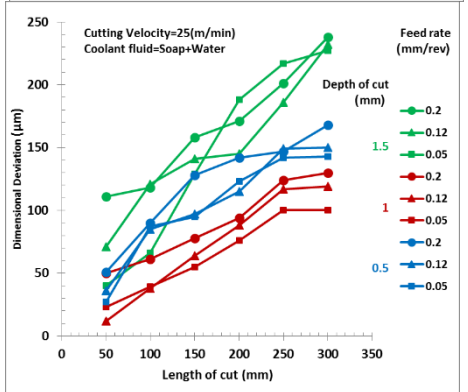
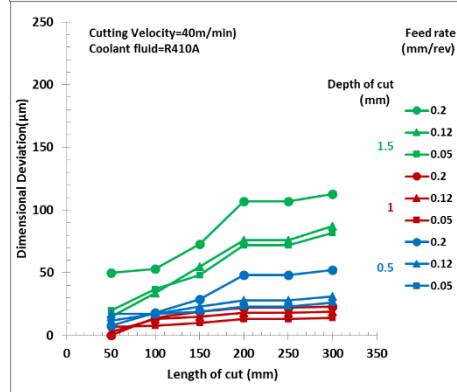
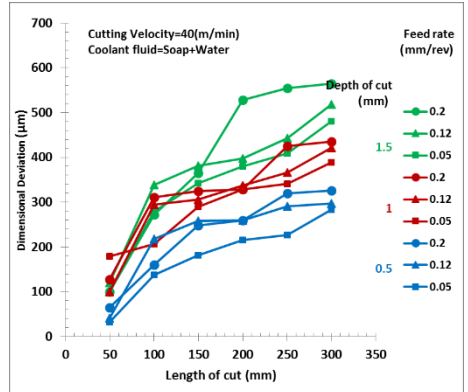
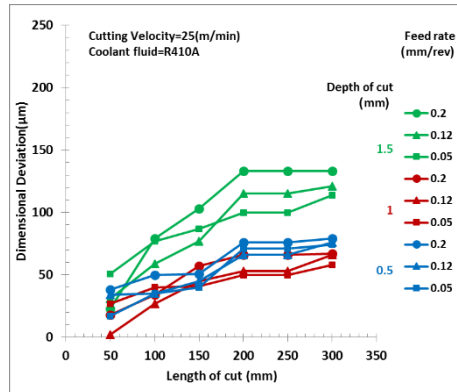
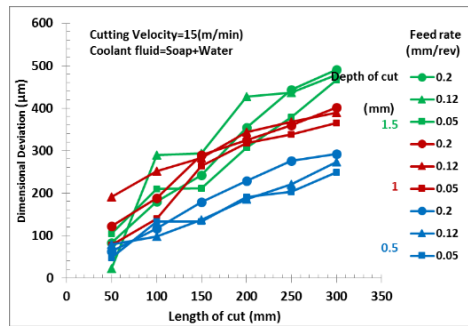
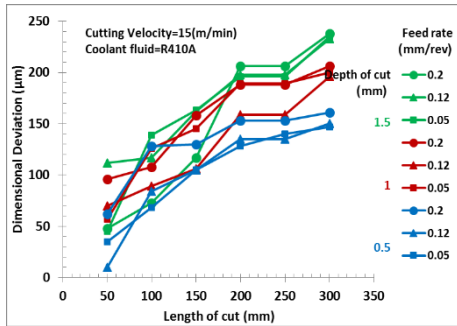
شکل ۳. فلوجارت روند بررسی انحراف ابعادی و زبری سطح.

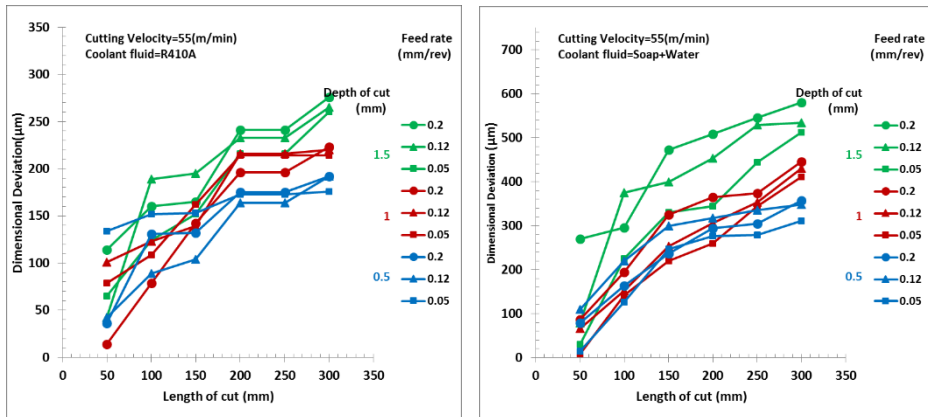
## نتایج و بحث

### بررسی داده‌ها برای انحراف ابعادی

داده‌های مربوط به انحراف ابعادی قطعات در شکل ۴ برای چهار سرعت برش، سه عمق بار مختلف و سه سرعت پیشروی برای ابزار در نظر گرفته شده و انحراف ابعادی در طول‌های ۵۰ میلیمتری تا طول نهایی ۳۰۰ میلیمتر ثبت گردیده است. در هر مرحله از آزمایش به منظور یکنواخت شدن قطر قطعه به وسیله ابزار الماسه HM به اندازه ۰/۵

میلیمتر از قطر کم شد تا شرایط انجام آزمایش برای هر مرحله شبیه به مرحله قبل باشد. برای هر سرعت برشی انتخابی قطعه‌ای متفاوت با شرایط قطعه قبل و قطر ۴۹ میلیمتر آماده‌سازی شده و آزمایش در شرایط یکسان مورد بررسی قرار گرفت.





شکل ۴. انحراف ابعادی بر حسب طول برش برای دو خنک کننده؛ ستون سمت چپ خنک کننده R410a و ستون سمت راست خنک کننده آب-صابون؛ سرعت برشی از بالا به پایین به ترتیب ۱۵، ۲۵، ۴۰ و ۵۵ متر بر دقیقه، عمق بار و سرعت پیشروی داخل هر نمودار با رنگ و شکل متفاوت مشخص شده است.

به طور کلی در همه حالات با افزایش عمق بار و سرعت پیشروی، انحراف ابعادی افزایش می یابد. در خنک کننده R410a کمترین انحراف ابعادی با ۱۴ میکرون مربوط به حالت ۰.۰۵-۱-۴۰ (سرعت پیشروی- عمق بار- سرعت برشی) و بیشترین با ۲۷۶ میکرون متعلق به ۰.۲-۱.۵-۵۵ است. در همه حالات سرعت برش ۲۵ و ۴۰ متر بر دقیقه، انحراف ابعادی زیر ۱۳۵ میکرون است. از طرفی در سیال آب-صابون با افزایش سرعت برشی در همه حالات، انحراف ابعادی با گذشت زمان به صورت تصاعدی افزایش یافته است. کمترین و بیشترین انحراف ابعادی در سیال آب-صابون با مقادیر ۱۰۰ و ۵۸۰ میکرون به ترتیب مربوط به حالت های ۰.۰۵-۱-۲۵ و ۰.۲-۱.۵-۵۵ است. میزان زیاد انحراف ابعادی به خصوص در سرعت های برش بالا و عمق برش زیاد، به علت تشکیل لبه انباشته سخت شده در لبه برنده ابزار در ابتدای ورود ابزار به داخل قطعه کار و عدم فرصت جدا شدن آن در زمان های ابتدای براده برداری است. این موضوع در تصاویر ثبت شده تایید می شود. در ادامه عملکرد بهتر سیال R410a از طول ۱۰۰ میلی متر به بعد مشهود می باشد. جدول ۲ انحراف ابعادی قطعات را پس از طی مسافت ۳۰۰ میلی متر برای دو خنک کننده نشان می دهد.

جدول ۲. انحراف ابعادی قطعات پس از طی مسافت ۳۰۰ میلی متر و زبری سطح پس از گذشت زمان ۶۰ دقیقه (و با زمان از بین رفتن نوک ابزار) برای دو خنک کننده.

شماره ردیف	برشی سرعت Cutting Velocity (m/min)	عمق بار Depth of cut (mm)	سرعت پیشروی Feed rate (mm/rev)	زبری سطح		انحراف ابعادی	
				Soap-Water	R410a	Soap-Water	R410a
				(µm)	(µm)	(µm)	(µm)
۱	۱۵	۰/۵	۰/۰۵	۱۰۳	۱۷۲	۱۴۷	۲۴۹
۲	۲۵	۰/۵	۰/۰۵	۱۰۵	۱۹۲	۱۵۰	۲۷۳
۳	۴۰	۰/۵	۰/۰۵	۳/۹	۲۸/۱	۱۶۱	۲۹۲
۴	۵۵	۰/۵	۰/۰۵	۲۸/۸	۳۲/۵	۷۴	۱۴۳
۵	۱۵	۱	۰/۰۵	۱۴	۲۴/۸	۷۶	۱۵۰

انحراف ابعادی		زبری سطح		سرعت پیشروی Feed rate	عمق بار Depth of cut	برشی سرعت Cutting Velocity	شماره ردیف
Dimensional Deviation Soap-Water	Rf10a	Surface Roughness Soap-Water	Rf10a				
( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	( $\mu\text{m}$ )	(mm/rev)	(mm)	(m/min)	
۱۶۸	۷۹	۱۶/۱	۹/۲	۰/۰۵	۱	۲۵	۶
۲۸۳	۲۶	۴۹/۱	۳/۱	۰/۰۵	۱	۴۰	۷
۲۹۷	۳۱	۴۹/۵	۴۹/۸	۰/۰۵	۱	۵۵	۸
۳۲۶	۵۲	۲۹/۹	۱۴/۹	۰/۰۵	۱/۵	۱۵	۹
۳۱۱	۱۷۶	۲۹/۳	۱۷/۱	۰/۰۵	۱/۵	۲۵	۱۰
۳۴۸	۱۹۲	۴۷/۸	۱۱/۸	۰/۰۵	۱/۵	۴۰	۱۱
۳۵۷	۱۹۲	۴۹/۷	۴۸/۳	۰/۰۵	۱/۵	۵۵	۱۲
۳۶۵	۲۰۰	۲۹/۵	۲۰	۰/۱۲	۰/۵	۱۵	۱۳
۳۸۹	۱۹۶	۱۷/۱	۳۰	۰/۱۲	۰/۵	۲۵	۱۴
۴۰۲	۲۰۶	۲۹/۵	۱۰/۷	۰/۱۲	۰/۵	۴۰	۱۵
۱۰۰	۵۸	۲۳/۶	۲۵/۳	۰/۱۲	۰/۵	۵۵	۱۶
۱۱۹	۶۶	۴۶/۹	۲۶/۹	۰/۱۲	۱	۱۵	۱۷
۱۳۰	۶۷	۲۶/۹	۱۷/۷	۰/۱۲	۱	۲۵	۱۸
۳۸۹	۱۴	۴۹/۲	۶/۶	۰/۱۲	۱	۴۰	۱۹
۴۲۱	۱۹	۴۹/۶	۴۷/۷	۰/۱۲	۱	۵۵	۲۰
۴۲۵	۲۳	۴۷/۱	۳۳/۹	۰/۱۲	۱/۵	۱۵	۲۱
۴۱۱	۲۱۴	۴۱/۶	۲۷/۶	۰/۱۲	۱/۵	۲۵	۲۲
۴۳۱	۲۲۰	۴۹	۲۸/۹	۰/۱۲	۱/۵	۴۰	۲۳
۴۴۶	۲۲۳	۴۵/۸	۴۷/۸	۰/۱۲	۱/۵	۵۵	۲۴
۴۶۶	۲۳۵	۳۴/۹	۳۰/۵	۰/۲	۰/۵	۱۵	۲۵
۴۷۹	۲۳۳	۳۰/۲	۲۵/۷	۰/۲	۰/۵	۲۵	۲۶
۴۹۱	۲۳۸	۲۰/۶	۲۸/۲	۰/۲	۰/۵	۴۰	۲۷
۲۲۷	۱۱۴	۲۳/۷	۲۶/۸	۰/۲	۰/۵	۵۵	۲۸
۲۳۲	۱۲۱	۴۹/۳	۳۸/۱	۰/۲	۱	۱۵	۲۹
۲۲۸	۱۳۳	۴۳/۸	۲۵	۰/۲	۱	۲۵	۳۰
۴۸۱	۸۲	۴۹/۸	۱۸/۸	۰/۲	۱	۴۰	۳۱
۵۱۸	۸۷	۴۹/۳	۴۸/۹	۰/۲	۱	۵۵	۳۲
۵۶۵	۱۱۳	۴۷/۷	۴۸	۰/۲	۱/۵	۱۵	۳۳
۵۱۲	۲۶۰	۴۹/۹	۳۹/۱	۰/۲	۱/۵	۲۵	۳۴
۵۳۴	۲۶۵	۴۹/۱	۴۹/۳	۰/۲	۱/۵	۴۰	۳۵
۵۸۰	۲۷۶	۴۷/۲	۴۸/۱	۰/۲	۱/۵	۵۵	۳۶

در طرح آزمایش (DOE) از فاکتوریال کامل عمومی<sup>۱</sup>، برای بررسی تأثیر سرعت برشی، سرعت پیشروی و عمق بار بر انحراف ابعادی استفاده شد. با استفاده از داده‌های آزمایش، مقادیر ضرایب معادله خطی به کمک روش طراحی آزمایش و نرم‌افزار آماری مینیتب نسخه ۱۸ محاسبه شدند.

آنالیز واریانس برای انحراف ابعادی در جدول‌های ۳ (الف) و (ب) برای دو سیال خنک‌کننده نشان داده شده است. با توجه به سطح اطمینان ۹۵٪ مقدار P برای هر کدام از پارامترها که کمتر از ۰/۰۵ باشد، نشان‌دهنده این است که پارامتر موردنظر از لحاظ آماری معنی‌دار بوده و در فرآیند نیز تأثیرگذار است. برای هر دو حالت ماشینکاری، مقدار P مدل کمتر از ۰/۰۵ بوده که نشان از تطابق خوب مدل با نتایج تجربی دارد (مقادیر صفر در جداول به معنای P کمتر از ۰/۰۰۰۱ است). مقدار R<sup>2</sup> در جدول آنالیز واریانس معادل ۹۵ و ۹۷/۵٪ به ترتیب برای دو سیال خنک‌کننده آب-صابون و R<sup>2</sup> ۴۱۰a است که نشان‌دهنده پوشش داده‌ها توسط تحلیل انجام‌شده و معادلات به‌دست‌آمده است.

مطابق آنالیز واریانس انجام شده در جدول ۳ میزان تأثیر سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق بار بر انحراف ابعادی در سیال خنک‌کننده آب-صابون به ترتیب ۶۳/۸، ۲۹/۷۱ و ۱/۵۸ درصد و میزان صحت آنالیز ۹۵ درصد است. این مقادیر برای سیال خنک‌کننده R<sup>2</sup> ۴۱۰a به ترتیب ۸۳/۷۴، ۱۳/۲۹ و ۰/۵ درصد و میزان صحت آنالیز ۹۷/۵ درصد است. در اثرات استاندارد شده چارت پارتو<sup>۲</sup> هم مشاهده می‌شود در هر دو حالت خنک‌کاری، هر سه عامل تأثیرگذار هستند.

جدول ۳ (الف). آنالیز واریانس برای انحراف ابعادی در سیال خنک‌کننده آب-صابون.

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	۷	۶۱۱۴۳۷	۹۵.۰۸%	۶۱۱۴۳۷	۸۷۳۴۸	۷۷.۳۷	۰.۰۰۰
Linear	۷	۶۱۱۴۳۷	۹۵.۰۸%	۶۱۱۴۳۷	۸۷۳۴۸	۷۷.۳۷	۰.۰۰۰
Cutting Velocity(m/min)	۳	۴۱۰۲۴۱	۶۳.۸۰%	۴۱۰۲۴۱	۱۳۶۷۴۷	۱۲۱.۱۳	۰.۰۰۰
Depth of cut(mm)	۲	۱۹۱۰۶۶	۲۹.۷۱%	۱۹۱۰۶۶	۹۵۵۳۳	۸۴.۶۲	۰.۰۰۰
Feed rate(mm/rev)	۲	۱۰۱۳۰	۱.۵۸%	۱۰۱۳۰	۵۰۶۵	۴.۴۹	۰.۰۲۰
Error	۲۸	۳۱۶۱۰	۴.۹۲%	۳۱۶۱۰	۱۱۲۹		
Total	۳۵	۶۴۳۰۴۷	۱۰۰.۰۰%				
			S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
			۳۳.۵۹۹۴	۹۵.۰۸%	۹۳.۸۶%	۵۲۲۵۲.۷	۹۱.۸۷%

جدول ۳ (ب). آنالیز واریانس برای انحراف ابعادی در سیال خنک‌کننده R<sup>2</sup> ۴۱۰a.

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	۷	۲۲۱۸۳۴	۹۷.۵۳%	۲۲۱۸۳۴	۳۱۶۹۰.۶	۱۵۷.۸۷	۰.۰۰۰
Linear	۷	۲۲۱۸۳۴	۹۷.۵۳%	۲۲۱۸۳۴	۳۱۶۹۰.۶	۱۵۷.۸۷	۰.۰۰۰
Cutting Velocity(m/min)	۳	۱۹۰۴۷۱	۸۳.۷۴%	۱۹۰۴۷۱	۶۳۴۹۰.۵	۳۱۶.۲۹	۰.۰۰۰
Depth of cut(mm)	۲	۳۰۲۲۰	۱۳.۲۹%	۳۰۲۲۰	۱۵۱۰۹.۸	۷۵.۲۷	۰.۰۰۰
Feed rate(mm/rev)	۲	۱۱۴۳	۰.۵۰%	۱۱۴۳	۵۷۱.۶	۲.۸۵	۰.۰۷۵
Error	۲۸	۵۶۲۱	۲.۴۷%	۵۶۲۱	۲۰۰.۷		

<sup>1</sup> General full factorial design

<sup>2</sup> Pareto Chart of the Standardized Effects

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Total	۳۵	۲۲۷۴۵۵	۱۰۰.۰۰%				
			S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
			۱۴.۱۶۸۲	۹۷.۵۳%	۹۶.۹۱%	۹۲۹۱.۳۱	۹۵.۹۲%

مقادیر ضرایب معادله خطی بین فاکتورها و پاسخ محاسبه شدند. مشخصات این ضرایب در جدول ۴ (الف) و (ب) آورده شده است. شکل ۵ (الف) و (ب) به ترتیب مقادیر محاسبه شده از طریق مدل برازش شده را به همراه مقادیر تجربی برای انحراف ابعادی برای دو سیال خنک کننده آب-صابون و Rf10a نشان می دهند. نتایج محاسبه شده از مدل ریاضی به خوبی با نتایج تجربی مطابقت دارند.

جدول ۴ (الف). ضرایب معادله خطی برای انحراف ابعادی در سیال خنک کننده آب-صابون.

Term	Coef	SE Coef	۹۵% CI	T-Value	P-Value	VIF
Constant	۳۴۸.۸۳	۵.۶۰	(۳۳۷.۳۶, ۳۶۰.۳۰)	۶۲.۲۹	۰.۰۰۰	
Cutting Velocity (CV)(m/min)						
۱۵	۲۹.۶۱	۹.۷۰	(۹.۷۴, ۴۹.۴۸)	۳.۰۵	۰.۰۰۵	۱.۵۰
۲۵	-۱۸۱.۳۹	۹.۷۰	(-۲۰۱.۲۶, -۱۶۱.۵۲)	-۱۸.۷۰	۰.۰۰۰	۱.۵۰
۴۰	۶۳.۹۴	۹.۷۰	(۴۴.۰۸, ۸۳.۸۱)	۶.۵۹	۰.۰۰۰	۱.۵۰
۵۵	۸۷.۸۳	۹.۷۰	(۶۷.۹۷, ۱۰۷.۷۰)	۹.۰۶	۰.۰۰۰	*
Depth of cut (DC)(mm)						
۰.۵	-۸۲.۴۲	۷.۹۲	(-۹۸.۶۴, -۶۶.۱۹)	-۱۰.۴۱	۰.۰۰۰	۱.۳۳
۱.۰	-۱۲.۳۳	۷.۹۲	(-۲۸.۵۶, ۳.۸۹)	-۱.۵۶	۰.۱۳۱	۱.۳۳
۱.۵	۹۴.۷۵	۷.۹۲	(۷۸.۵۳, ۱۱۰.۹۷)	۱۱.۹۶	۰.۰۰۰	*
Feed rate (FR)(mm/rev)						
۰.۰۵	-۲۰.۷۵	۷.۹۲	(-۳۶.۹۷, -۴.۵۳)	-۲.۶۲	۰.۰۱۴	۱.۳۳
۰.۱۲	۰.۴۲	۷.۹۲	(-۱۵.۸۱, ۱۶.۶۴)	۰.۰۵	۰.۹۵۸	۱.۳۳
۰.۲۰	۲۰.۳۳	۷.۹۲	(۴.۱۱, ۳۶.۵۶)	۲.۵۷	۰.۰۱۶	*

جدول ۴ (ب). ضرایب معادله خطی برای انحراف ابعادی در سیال خنک کننده Rf10a.

Term	Coef	SE Coef	۹۵% CI	T-Value	P-Value	VIF
Constant	۱۳۹.۴۲	۲.۳۶	(۱۳۴.۵۸, ۱۴۴.۲۵)	۵۹.۰۴	۰.۰۰۰	
Cutting Velocity (CV)(m/min)						
۱۵	۵۶.۸۱	۴.۰۹	(۴۸.۴۳, ۶۵.۱۸)	۱۳.۸۹	۰.۰۰۰	۱.۵۰
۲۵	-۵۱.۸۶	۴.۰۹	(-۶۰.۲۴, -۴۳.۴۸)	-۱۲.۶۸	۰.۰۰۰	۱.۵۰
۴۰	-۸۹.۷۵	۴.۰۹	(-۹۸.۱۳, -۸۱.۳۷)	-۲۱.۹۴	۰.۰۰۰	۱.۵۰
۵۵	۸۴.۸۱	۴.۰۹	(۷۶.۴۳, ۹۳.۱۸)	۲۰.۷۳	۰.۰۰۰	*
Depth of cut (DC)(mm)						
۰.۵	-۲۶.۴۲	۳.۳۴	(-۳۳.۲۶, -۱۹.۵۸)	-۷.۹۱	۰.۰۰۰	۱.۳۳

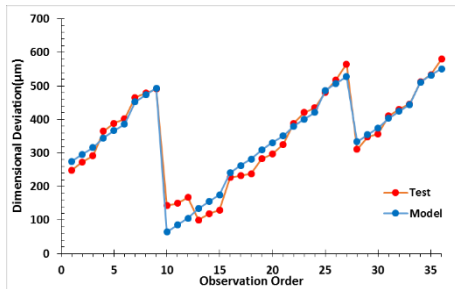
Term	Coef	SE Coef	۹۵% CI	T-Value	P-Value	VIF
۱.۰	-۱۳.۹۲	۳.۳۴	(-۲۰.۷۶, -۷.۰۸)	-۴.۱۷	۰.۰۰۰	۱.۳۳
۱.۵	۴۰.۲۳	۳.۳۴	(۳۳.۴۹, ۴۷.۱۷)	۱۲.۰۸	۰.۰۰۰	۰
Feed rate (FR)(mm/rev)						
۰.۰۵	-۶.۰۸	۳.۳۴	(-۱۲.۹۲, ۰.۷۶)	-۱.۸۲	۰.۰۷۹	۱.۳۳
۰.۱۲	-۱.۴۲	۳.۳۴	(-۸.۲۶, ۵.۴۲)	-۰.۴۲	۰.۶۷۵	۱.۳۳
۰.۲۰	۷.۵۰	۳.۳۴	(۰.۶۶, ۱۴.۳۴)	۲.۲۵	۰.۰۳۳	۰

معادله رگرسیون انحراف ابعادی در سیال خنک کننده آب- صابون و  $Rf 10a$  براساس جدول ۴ به صورت زیر است:

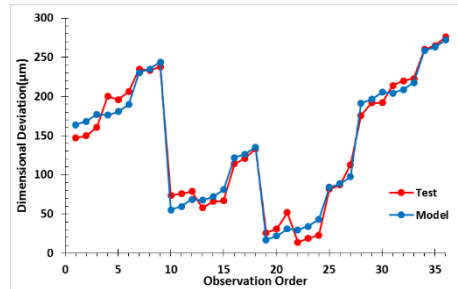
$$\text{Dimensional Deviation, SW } (\mu\text{m}) = 348.83 + 29.61 CV_{15} - 181.39 CV_{25} + 63.94 CV_{40} + 87.83 CV_{55} - 82.42 DC_{0.5} - 12.33 DC_{1.0} + 94.75 DC_{1.5} - 20.75 FR_{0.05} + 0.42 FR_{0.12} + 20.33 FR_{0.20}$$

$$\text{Dimensional Deviation, R410a } (\mu\text{m}) = 139.42 + 56.81 CV_{15} - 51.86 CV_{25} - 89.75 CV_{40} + 84.81 CV_{55} - 26.42 DC_{0.5} - 13.92 DC_{1.0} + 40.33 DC_{1.5} - 6.08 FR_{0.05} - 1.42 FR_{0.12} + 7.50 FR_{0.20}$$

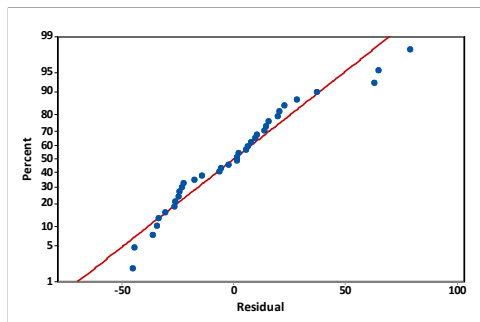
در رابطه‌های بالا، سرعت برشی با  $CV$  و عمق بار با  $DC$  و سرعت پیشروی با  $FR$  نشان داده شده و اندیس‌ها مشخص کننده سطح مورد استفاده در هر یک از پارامترها است.



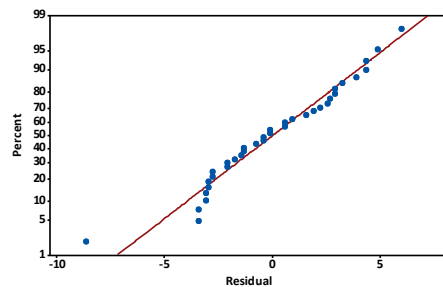
الف



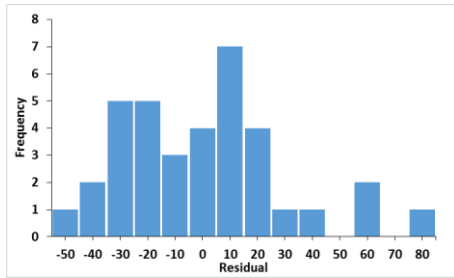
ب



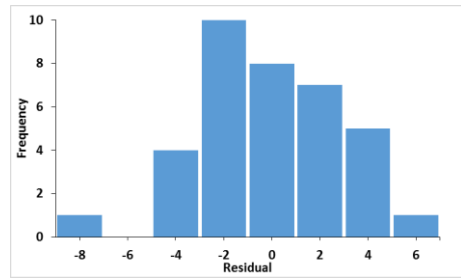
ج



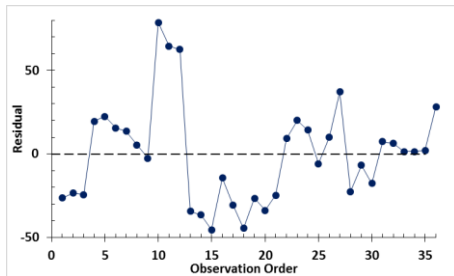
د



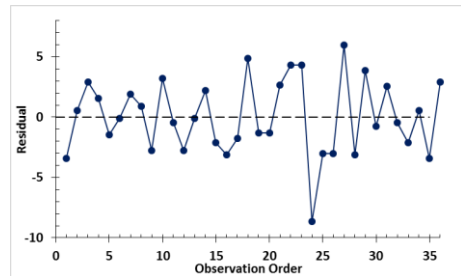
ه



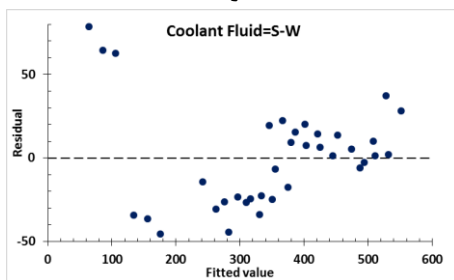
و



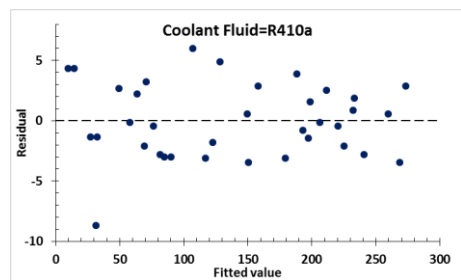
ز



ک



ل



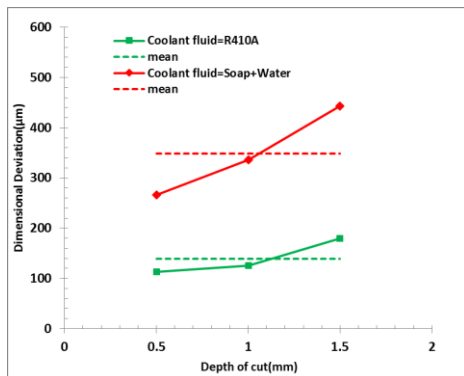
م

شکل ۵. (الف) مقایسه نتایج تجربی انحراف ابعادی و مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل (ب) و (ج) نمودار توزیع احتمال نرمال باقیمانده‌ها، (د) و (ه) باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر به‌دست آمده از مدل، (ز) و (ک) باقیمانده‌ها در مقابل شماره آزمایش‌ها، (ل) و (م) باقیمانده‌ها در مقابل برازش شده برای دو سیال خنک‌کننده R۴۱۰a (سمت راست) و آب-صابون (سمت چپ).

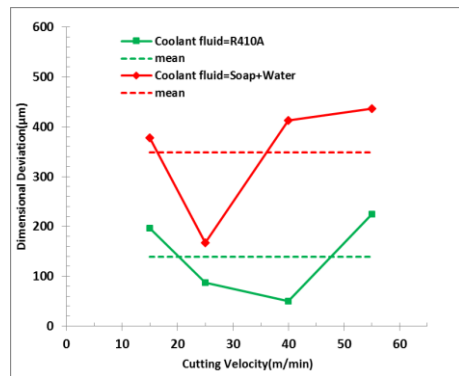
شکل ۵ (ب) و (ج) به ترتیب نمودار توزیع احتمال نرمال باقیمانده‌ها را برای انحراف ابعادی در حالت خنک‌کاری با دو سیال آب-صابون و R۴۱۰a نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود توزیع داده‌ها در نزدیک خط مورب بوده و این بدین معنی است که خطاها دارای توزیع نرمال می‌باشند و مدل برازش شده کیفیت خوبی را داراست. شکل ۵ (د) و (ه) به ترتیب نمودار باقیمانده‌ها را در مقابل مقادیر به‌دست آمده از مدل برای دو سیال خنک‌کننده نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود پراکندگی مناسبی در شکل وجود دارد. از این پراکندگی می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی مدل مناسبی برای پیش‌بینی انحراف ابعادی می‌باشد. شکل ۵ (ز) و (ک) به ترتیب مقادیر باقیمانده‌ها را در مقابل شماره آزمایش‌ها برای دو سیال آب-صابون و R۴۱۰a نشان می‌دهند.

همان طور که در این شکل‌ها مشخص است، باقیمانده‌ها در اطراف خط صفر به صورت تصادفی و بدون پیروی از الگوی خاصی قرار گرفته‌اند و دارای مقادیر مثبت و منفی می‌باشند که نشان‌دهنده استقلال داده‌ها و باقیمانده‌ها است. شکل ۵ (ل) و (م) به ترتیب مقادیر باقیمانده‌ها را در مقابل مقادیر برازش شده<sup>۱</sup> برای دو سیال آب-صابون و R۴۱۰a نشان می‌دهند. همان طور که در این شکل‌ها مشخص است، باقیمانده‌ها در اطراف خط صفر به صورت تصادفی و بدون پیروی از الگوی خاصی قرار گرفته‌اند و دارای مقادیر مثبت و منفی می‌باشند که نشان‌دهنده استقلال داده‌ها و باقیمانده‌ها است. در شکل ۶ اثرهای اصلی میانگین‌ها روی دمای سطح ابزار نشان داده شده است. محور x مقادیر میانگین پارامترهای ورودی (سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق بار) و محور y میانگین انحراف ابعادی را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در خنک‌کننده R۴۱۰a انحراف ابعادی در اکثر موارد در سرعت برشی ۴۰ متر بر دقیقه حالت کمینه‌ای دارد در حالی که در خنک‌کننده آب-صابون حالت کمینه عمدتاً در سرعت برشی ۲۵ متر بر دقیقه رخ می‌دهد. همچنین انحراف ابعادی با خنک‌کننده R۴۱۰a، کاهش بسیار چشمگیری نسبت به خنک‌کننده سنتی آب-صابون دارد (شکل ۶ الف)). از طرفی با افزایش عمق بار و نرخ پیشروی در هر دو خنک‌کننده، مقدار انحراف ابعادی افزایش می‌یابد. سهم عمق بار در انحراف ابعادی بیشتر از نرخ پیشروی می‌باشد. با افزایش عمق برش از ۰/۵ به ۱ و سپس تا ۱/۵ میلیمتر، میزان انحراف ابعادی در خنک‌کننده R۴۱۰a کمتر از آب-صابون است (شکل ۶ ب)). با افزایش سرعت پیشروی از ۰/۵ به ۰/۱۲ میلیمتر بر دور، شیب (سرعت) افزایش انحراف ابعادی در هر دو خنک‌کننده تقریباً موازی یکدیگر و به صورت خطی است (شکل ۶ ج)). با تغییر سیال خنک‌کننده از آب-صابون به R۴۱۰a میزان انحراف ابعادی کاهش می‌یابد. در مجموع متوسط انحراف ابعادی با خنک‌کننده R۴۱۰a با ۱۳۹ میکرون، ۱۵۰ درصد کمتر از خنک‌کننده آب-صابون (۳۴۹ میکرون) است.

براساس بهینه‌یابی داده‌ها از طریق نرم‌افزار، برای سیال خنک‌کننده آب-صابون کمترین انحراف ابعادی در سرعت برشی ۲۵ متر بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۰۵ میلیمتر بر دور و عمق بار ۰/۵ میلیمتر به مقدار ۱۰۰ میکرون حاصل می‌شود. با توجه به نمودار، کمترین انحراف ابعادی برای سیال خنک‌کننده R۴۱۰a در سرعت برشی ۴۰ متر بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۰۵ میلیمتر بر دور و عمق بار ۰/۵ میلیمتر برابر با ۱۴ میکرون به وجود می‌آید.

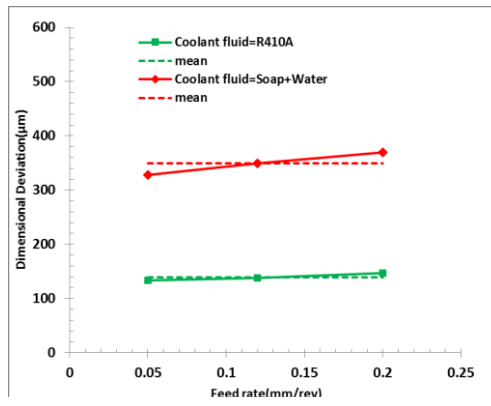


ب



الف

<sup>1</sup> Fitted value

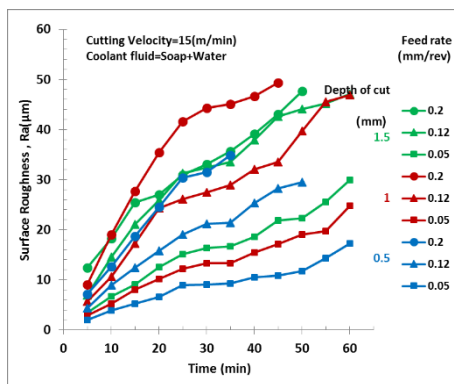
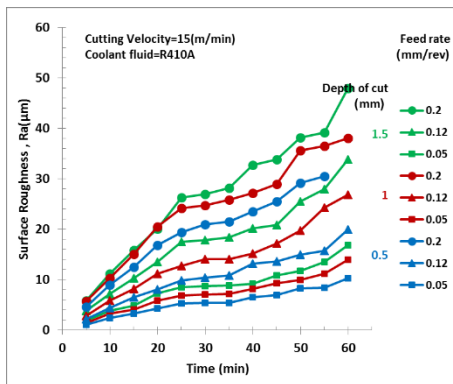


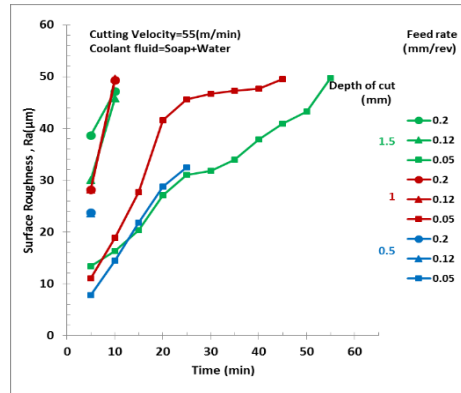
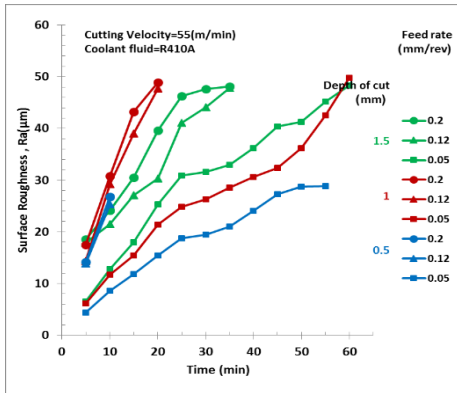
ج

شکل ۶. تحلیل آماری نتایج انحراف ابعادی برای دو خنک‌کننده؛ رنگ سبز خنک‌کننده R۴۱۰a و رنگ قرمز خنک‌کننده آب-صابون؛ سرعت برشی (چپ)، عمق بار (وسط) و سرعت پیشروی (راست).

### بررسی داده‌ها برای زبری سطح

به منظور صرفه‌جویی در مواد مصرفی، ثبت داده‌های مرتبط با زبری سطح در برخی از آزمایش‌ها، هم‌زمان با ثبت داده‌های انحراف ابعادی اندازه‌گیری گردید. از آنجایی‌که در ثبت داده‌های انحراف ابعادی طول ۳۰۰ میلی‌متر مبنای ابتدا تا انتهای پروسه آزمایش بود و در ثبت داده‌های زبری سطح زمان ۶۰ دقیقه مبنای بررسی بود مدت زمان آزمایش برای این دو حالت متفاوت بود. بنابراین با توجه به سرعت‌های برشی مختلف کورس طی شده ابزار برای حالات مختلف یکسان نبود. در جداول زیر برای چهار سرعت برش، سه عمق بار و سه سرعت پیشروی برای ابزار در نظر گرفته شده و زبری سطح در زمان‌های ۵ دقیقه‌ای تا زمان نهایی ۶۰ دقیقه ثبت گردیده است. در شکل ۷ عدم ادامه منحنی به معنای از بین رفتن کامل لبه برنده ابزار در آن زمان مشخص می‌باشد. جدول ۲ زبری سطح قطعات را پس از گذشت زمان ۶۰ دقیقه و یا زمان از بین رفتن نوک ابزار برای دو خنک‌کننده نشان می‌دهد.





شکل ۷. تغییرات زبری سطح بر حسب زمان براده برداری برای دو خنک کننده؛ ستون سمت چپ خنک کننده R410a و ستون سمت راست خنک کننده آب-صابون؛ سرعت برشی از بالا به پایین به ترتیب ۰.۲۵، ۰.۴۰ و ۰.۵۵ متر بر دقیقه، عمق بار و سرعت پیشروی داخل هر نمودار با رنگ و شکل متفاوت مشخص شده است.

به طور کلی در همه حالات با افزایش عمق بار و سرعت پیشروی، زبری سطح افزایش می‌یابد. در خنک کننده R410a کمترین زبری سطح با ۰.۰۵-۱-۴۰ (سرعت پیشروی-عمق بار-سرعت برشی) و بیشترین ۰.۰۵-۱-۵۵ است. از طرفی در سیال آب-صابون با افزایش سرعت برشی در همه حالات، زبری سطح با گذشت زمان به صورت تصاعدی افزایش یافته است. کمترین و بیشترین زبری سطح در سیال آب-صابون با مقادیر ۰.۱۶ و ۰.۹۹ میکرون به ترتیب مربوط به حالت‌های ۰.۰۵-۱-۲۵ و ۰.۰۲-۱.۵-۲۵ است. میزان زیاد زبری سطح به خصوص در سرعت‌های برش بالا و عمق برش زیاد، به علت تشکیل لبه انباشته سخت شده در لبه برنده ابزار در ابتدای ورود ابزار به داخل قطعه کار و عدم فرصت جدا شدن آن در زمان‌های براده برداری است. این موضوع در به تصاویر ثبت شده تأیید می‌شود. در ادامه عملکرد بهتر سیال R410a مشهود می‌باشد.

به علت عدم تکمیل فرایند در سیال خنک کننده آب-صابون و از بین رفتن نوک ابزار، اطلاعات در این بخش ناقص بود و آنالیز واریانس برای زبری سطح در سیال خنک کننده آب-صابون انجام نشد. آنالیز واریانس برای زبری سطح برای سیال خنک کننده R410a در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به سطح اطمینان ۹۵٪، مقدار P مدل کمتر از ۰/۰۵ بوده که نشان از تطابق خوب مدل با نتایج تجربی دارد. مقدار  $R^2$  در جدول آنالیز واریانس تقریباً ۹۱٪ است که نشان دهنده پوشش داده‌ها توسط تحلیل انجام شده و معادلات به دست آمده است. مطابق آنالیز واریانس انجام شده در جدول ۵ میزان تأثیر نرخ پیشروی، سرعت برشی و عمق بار بر زبری سطح در سیال خنک کننده R410a به ترتیب ۳۷.۱۵، ۳۲.۸۲ و ۲۰.۷۹ درصد و میزان صحت آنالیز ۹۰.۷۵ درصد است. علاوه بر اثر جداگانه هر پارامتر، اثر هم‌زمان پارامترها نیز بررسی شده است. در چارت پارتو هم مشاهده می‌شود که در هر دو حالت خنک کاری، هر سه عامل تأثیرگذار هستند.

جدول ۵. آنالیز واریانس برای زبری سطح در سیال خنک کننده R410a.

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	۷	۴۸۸۱.۷	۹۰.۷۵%	۴۸۸۱.۷	۶۹۷.۳۹	۲۵.۲۴	۰.۰۰۰
Linear	۷	۴۸۸۱.۷	۹۰.۷۵%	۴۸۸۱.۷	۶۹۷.۳۹	۲۵.۲۴	۰.۰۰۰
Cutting Velocity(m/min)	۳	۱۷۶۵.۳	۳۲.۸۲%	۲۴۰۶.۰	۸۰۱.۹۹	۲۹.۰۳	۰.۰۰۰
Depth of cut(mm)	۲	۱۱۱۸.۴	۲۰.۷۹%	۸۱۶.۸	۴۰۸.۳۸	۱۴.۷۸	۰.۰۰۰

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Feed rate(mm/rev)	۲	۱۹۹۸.۱	۳۷.۱۵%	۱۹۹۸.۱	۹۹۹.۰۴	۳۶.۱۶	۰.۰۰۰	
Error	۱۸	۴۹۷.۳	۹.۲۵%	۴۹۷.۳	۲۷.۶۳			
Total	۲۵	۵۳۷۹.۱	۱۰۰.۰۰%					
				S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)
				۵.۲۵۶۳۶	۹۰.۷۵%	۸۷.۱۶%	۱۲۱۳.۸۵	۷۷.۴۳%

مقادیر ضرایب معادله خطی محاسبه شدند. مشخصات این ضرایب در جدول ۶ آورده شده است. شکل ۸ (الف) به ترتیب مقادیر محاسبه شده از طریق مدل برازش شده را به همراه مقادیر تجربی برای زبری سطح برای دو سیال خنک‌کننده آب-صابون و R۴۱۰a نشان می‌دهند. نتایج محاسبه شده از مدل ریاضی به خوبی با نتایج تجربی مطابقت دارند.

جدول ۶. ضرایب معادله خطی برای زبری سطح در سیال خنک‌کننده R۴۱۰a.

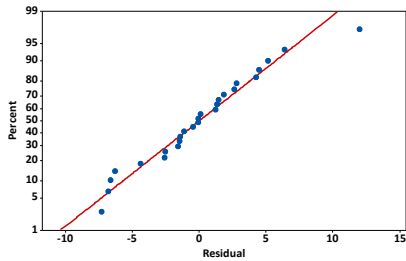
Term	Coef	SE Coef	۹۵% CI	T-Value	P-Value	VIF
Constant	۳۰.۸۰	۱.۲۸	(۲۷.۹۰, ۳۳.۷۰)	۲۲.۳۴	۰.۰۰۰	
Cutting Velocity (CV)(m/min)						
۱۵	-۳.۸۵	۱.۸۵	(-۷.۷۳, ۰.۰۳)	-۲.۰۸	۰.۰۵۲	۱.۰۶
۲۵	-۹.۹۸	۱.۸۶	(-۱۳.۸۹, -۶.۰۷)	-۵.۳۶	۰.۰۰۰	۱.۰۸
۴۰	-۱۳.۲۲	۱.۸۵	(-۱۷.۱۰, -۹.۳۴)	-۷.۱۶	۰.۰۰۰	۱.۰۶
۵۵	۲۷.۰۶	۳.۱۵	(۲۰.۴۵, ۳۳.۶۷)	۸.۶۰	۰.۰۰۰	*
Depth of cut (DC)(mm)						
۰.۵	-۴.۴۴	۱.۶۸	(-۷.۹۶, -۰.۹۱)	-۲.۶۴	۰.۰۱۷	۱.۵۷
۱.۰	-۳.۳۷	۱.۴۴	(-۶.۴۰, -۰.۳۳)	-۲.۳۳	۰.۰۳۲	۱.۵۱
۱.۵	۷.۸۰	۱.۴۴	(۴.۷۷, ۱۰.۸۴)	۵.۴۰	۰.۰۰۰	*
Feed rate (FR)(mm/rev)						
۰.۰۵	-۱۱.۰۳	۱.۵۰	(-۱۴.۱۷, -۷.۸۸)	-۷.۳۷	۰.۰۰۰	۱.۴۱
۰.۱۲	-۰.۹۲	۱.۵۳	(-۴.۱۴, ۲.۳۱)	-۰.۶۰	۰.۵۵۷	۱.۲۸
۰.۲۰	۱۱.۹۵	۱.۶۱	(۸.۵۷, ۱۵.۳۲)	۷.۴۳	۰.۰۰۰	*

معادله رگرسیون زبری سطح در سیال خنک‌کننده R۴۱۰a براساس جدول ۶ به شکل زیر است:

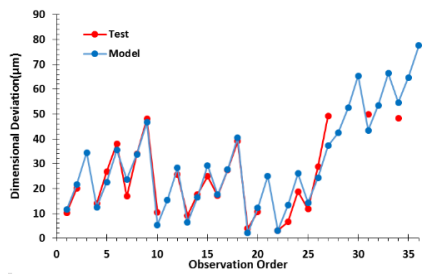
$$\text{Surface Roughness, R410a}(\mu\text{m}) = 30.80 - 3.85 \text{ CV}_{15} - 9.98 \text{ CV}_{25} - 13.22 \text{ CV}_{40} + 27.06 \text{ CV}_{55} - 4.44 \text{ DC}_{0.5} - 3.37 \text{ DC}_{1.0} + 7.80 \text{ DC}_{1.5} - 11.03 \text{ FR}_{0.05} - 0.92 \text{ FR}_{0.12} + 11.95 \text{ FR}_{0.20}$$

شکل ۸ (ب) نمودار توزیع احتمال نرمال باقیمانده‌ها را برای زبری سطح در حالت خنک‌کاری با سیال R۴۱۰a نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود توزیع داده‌ها در نزدیک خط مورب بوده و این بدین معنی است که خطاها دارای توزیع نرمال می‌باشند و مدل برازش شده کیفیت خوبی را داراست. شکل ۸ (ج) نمودار باقیمانده‌ها را در مقابل مقادیر به دست آمده از مدل نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پراکندگی مناسبی در شکل وجود دارد. از این پراکندگی

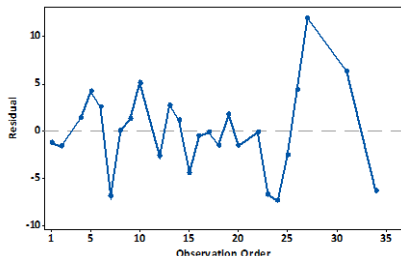
می‌توان نتیجه گرفت که مدل پیشنهادی مدل مناسبی برای پیش‌بینی زبری سطح می‌باشد. شکل ۸ (د) مقادیر باقیمانده‌ها را در مقابل شماره آزمایش نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است، باقیمانده‌ها در اطراف خط صفر به صورت تصادفی و بدون پیروی از الگوی خاصی قرار گرفته‌اند و دارای مقادیر مثبت و منفی می‌باشند که نشان‌دهنده استقلال داده‌ها و باقیمانده‌ها است. شکل ۸ (ه) مقادیر باقیمانده‌ها را در مقابل مقادیر برازش شده<sup>۱</sup> نشان می‌دهد. باقیمانده‌ها در اطراف خط صفر به صورت تصادفی و بدون پیروی از الگوی خاصی قرار گرفته‌اند و دارای مقادیر مثبت و منفی می‌باشند که نشان‌دهنده استقلال داده‌ها و باقیمانده‌ها است.



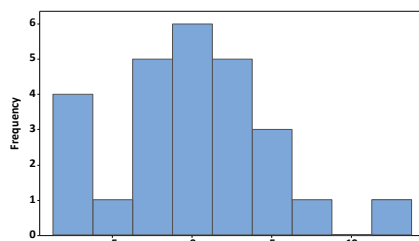
ب



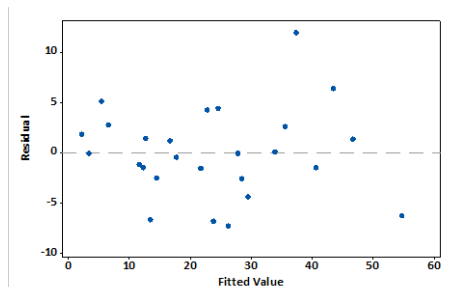
الف



د



ج

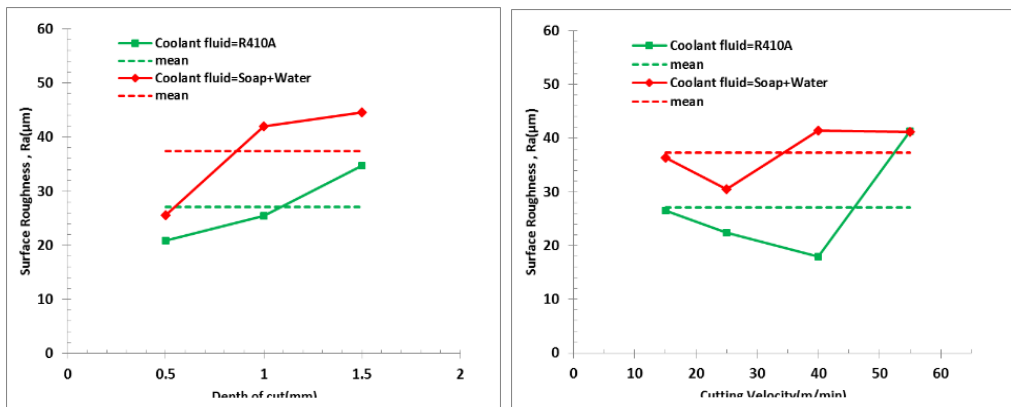


ه

شکل ۸. (الف) مقایسه نتایج تجربی انحراف ابعادی و مقادیر پیش‌بینی شده با استفاده از مدل (ب) نمودار توزیع احتمال نرمال باقیمانده‌ها، (ج) باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر به دست آمده از مدل، (د) باقیمانده‌ها در مقابل شماره آزمایش‌ها، (ه) باقیمانده‌ها در مقابل مقادیر برازش شده برای دو سیال خنک‌کننده R۴۱۰a.

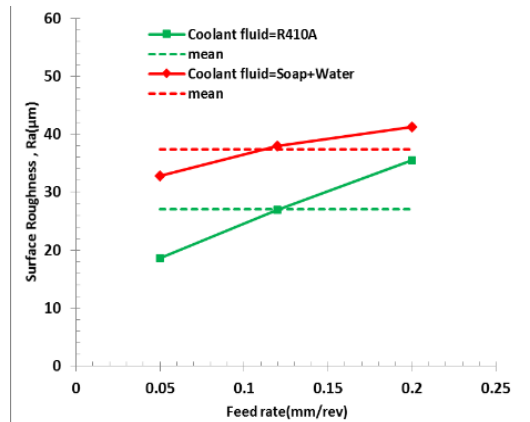
<sup>1</sup> Fitted value

در شکل ۹ اثرهای اصلی میانگین‌ها روی زبری سطح نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در مجموع متوسط زبری سطح با خنک‌کننده R۴۱۰a با ۲۷ میکرون، ۳۷ درصد کمتر از خنک‌کننده آب-صابون (۳۷ میکرون) است. در شکل ۹ (الف) در هر دو خنک‌کننده با تغییر سرعت‌های برشی، کمینه زبری سطح مشاهده می‌شود که این مقدار برای خنک‌کننده R۴۱۰a و آب-صابون به ترتیب در سرعت‌های ۴۰ و ۲۵ متر بر دقیقه است. از طرفی با افزایش عمق بار و پیشروی در هر دو خنک‌کننده، مقدار زبری سطح افزایش می‌یابد. در شکل ۹ (ب) با افزایش عمق برش از ۰/۵ به ۱ میلی‌متر، میزان زبری سطح در خنک‌کننده R۴۱۰a کمتر از آب-صابون است و پس از آن شیب (سرعت) افزایش زبری سطح در خنک‌کننده R۴۱۰a بیشتر از آب-صابون است. در شکل ۹ (ج) با افزایش سرعت پیشروی از ۰/۵ به ۰/۱۲ و سپس ۰/۲ میلی‌متر بر دور، شیب (سرعت) افزایش زبری سطح در خنک‌کننده R۴۱۰a بیشتر از آب-صابون است. در سرعت‌های برشی بالا، رشد مقدار زبری سطح در هر دو سیال آب-صابون و R۴۱۰a به چشم می‌خورد که ناشی از خوردگی ابزار است و در موارد متعددی، مقدار نهایی زبری سطح در زمان ۶۰ دقیقه به خصوص برای سیال آب-صابون به علت از بین رفتن لبه برنده ابزار قابل اندازه‌گیری نبود.



ب

الف



ج

شکل ۹. تحلیل آماری نتایج زبری سطح برای دو خنک‌کننده؛ رنگ سبز خنک‌کننده R۴۱۰a و رنگ قرمز خنک‌کننده آب-صابون؛ سرعت برشی (چپ)، عمق بار (وسط) و سرعت پیشروی (راست).

براساس بهینه‌یابی داده‌ها از طریق نرم‌افزار، برای سیال خنک‌کننده آب-صابون کمترین زبری سطح در سرعت برشی ۲۵ متر بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۰۵ میلی‌متر بر دور و عمق بار ۰/۵ میلی‌متر حاصل می‌شود. با توجه به نمودار، کمترین زبری سطح برای سیال خنک‌کننده R۴۱۰a در سرعت برشی ۴۰ متر بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۰۵ میلی‌متر بر دور و عمق بار ۰/۵ میلی‌متر به وجود می‌آید.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر سرعت برشی، عمق بار و نرخ پیشروی بر انحراف ابعادی و زبری سطح در حالت‌های تراشکاری با خنک‌کاری سیال سنتی آب-صابون و میرد R۴۱۰a روی فولاد AISI۴۵ با ابزار HSS، بررسی و مقایسه شد. مهم‌ترین نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر است:

- ۱- افزایش سرعت برشی، عمق بار و نرخ پیشروی در حالت‌های مختلف خنک‌کاری باعث افزایش انحراف ابعادی و زبری سطح شده است.
- ۲- متوسط انحراف ابعادی در عملیات خنک‌کاری با R۴۱۰a در مقایسه با آب-صابون، ۱۵۰ درصد کاهش یافته و از ۳۴۹ میکرون به ۱۳۹ میکرون رسیده است. متوسط زبری سطح با خنک‌کننده R۴۱۰a با ۲۷ میکرون، ۳۷ درصد کمتر از خنک‌کننده آب-صابون با مقدار ۳۷ میکرون است.
- ۳- براده‌برداری در سرعت‌های برشی ۴۰ و ۵۵ متر بر دقیقه در عملیات خنک‌کاری با سیال خنک‌کننده آب-صابون منجر به از بین رفتن کامل لبه برنده ابزار شد؛ ولی با سیال خنک‌کننده R۴۱۰a، به شکل مناسبی انجام گردید.
- ۴- آنالیز واریانس داده‌های به دست آمده از آزمایش‌های تجربی نشان داد که سرعت برشی و عمق بار به ترتیب مهمترین عامل مؤثر بر انحراف ابعادی و زبری سطح هستند و پس از آنها، نرخ پیشروی تأثیر کمتری دارد.
- ۵- در خنک‌کننده R۴۱۰a کمترین انحراف ابعادی و کمترین زبری سطح به ترتیب با ۱۴ و ۳۰۱ میکرون مربوط به حالت ۱-۰۰۵-۴۰ (سرعت پیشروی- عمق بار- سرعت برشی) بود در حالی که مقادیر کمینه در سیال آب-صابون به ترتیب ۱۰۰ و ۱۶۰۱ میکرون است.
- ۶- در انحراف ابعادی و زبری سطح، در خنک‌کننده R۴۱۰a در سرعت برشی ۴۰ متر بر دقیقه حالت کمینه‌ای دارد در حالی که در خنک‌کننده آب-صابون حالت کمینه در سرعت برشی ۲۵ متر بر دقیقه رخ می‌دهد.
- ۷- براساس تحلیل نتایج آماری می‌توان با استفاده از میرد R۴۱۰a سرعت برشی را ۶۰ درصد افزایش داد و از ۲۵ متر بر دقیقه تا ۴۰ متر بر دقیقه رساند. در نتیجه انحراف ابعادی و زبری سطح، ۶۰۰ و ۱۰۰۰ درصد بهبود می‌یابد.

نتایج به دست آمده از تحقیق بیان می‌دارد که خنک‌کاری به‌وسیله میرد R۴۱۰a به علت قدرت سرمایش بالا و کنترل بهتر دمای محل برش نسبت به سیال آب-صابون در فرآیند ماشینکاری، سبب کاهش زبری سطح قطعه و افزایش کیفیت سطح ماشینکاری و همچنین کاهش انحراف ابعادی قطعات شده و می‌تواند به عنوان یکی از سیالات مناسب خنک‌کاری به‌کار گرفته شود.

## References

- [1] Adler, D. P., Hii, W. W. S., Michalek, D. J., & Sutherland, J. W. (2006). Examining the role of cutting fluids in machining and efforts to address associated environmental/health concerns. *Machining Science and Technology*, 10(1), 23-58. <https://doi.org/10.1080/10910340500534282>

- [2] Diniz, A. E., & Micaroni, R. (2002). Cutting conditions for finish turning process aiming: the use of dry cutting. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(8), 899-904. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00028-7](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00028-7)
- [3] Neto, L. M. G., Rodriguez, R. L., Lopes, J. C., Ribeiro, F. S. F., De Moraes, D. L., de Angelo Sanchez, L. E., De Mello, H. J., & Bianchi, E. C. (2023). Evaluating the optimized lubricooling technique for various cutting conditions in through-feed centerless grinding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125(7), 3465-3473. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10933-0>
- [4] Talon, A. G., Sato, B. K., Rodrigues, M. d. S., Ávila, B. N., Cuesta, J. L., Ribeiro, F. S. F., Rodrigues, A. R., Sanchez, L. E. d. A., Bianchi, E. C., & Lopes, J. C. (2022). Green manufacturing concept applied to the grinding process of advanced ceramics using an alternative lubri-refrigeration technique. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 123(7), 2771-2782. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10385-y>
- [5] Yildiz, Y., & Nalbant, M. (2008). A review of cryogenic cooling in machining processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(9), 947-964. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2008.01.008>
- [6] Abukhshim, N. A., Mativenga, P. T., & Sheikh, M. A. (2006). Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(7-8), 782-800. <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2005.07.024>
- [7] Duarte Costa, D. M., Brito, T. G., De Paiva, A. P., Leme, R. C., & Balestrassi, P. P. (2016). A normal boundary intersection with multivariate mean square error approach for dry end milling process optimization of the AISI 1045 steel. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1658-1672. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.062>
- [8] Krolczyk, G. M., Maruda, R. W., Krolczyk, J. B., Wojciechowski, S., Mia, M., Nieslony, P., & Budzik, G. (2019). Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production – A review. *Journal of Cleaner Production*, 218, 601-615. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.017>
- [9] Majumdar, P., Jayaramachandran, R., & Ganesan, S. (2005). Finite element analysis of temperature rise in metal cutting processes. *Applied Thermal Engineering*, 25(14-15), 2152-2168. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.01.006>
- [10] Paul, S., & Chattopadhyay, A. B. (2006). Environmentally conscious machining and grinding with cryogenic cooling. *Machining Science and Technology*, 10(1), 87-131. <https://doi.org/10.1080/10910340500534316>
- [11] Ahmed, M. I., Ismail, A. F., Abakr, Y. A., & Amin, A. K. M. N. (2007). Effectiveness of cryogenic machining with modified tool holder. *Journal of Materials Processing Technology*, 185(1-3), 91-96. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.03.123>
- [12] Hernández-González, L. W., Dumitrescu, L., Quesada-Estrada, A. M., & Reyes-Camareno, R. (2020). Cutting parameters determination in milling of AISI 1045 steel. *Universidad y Sociedad*, 12(6), 207-214. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/1833>
- [13] Hernández González, L. W., Seid Ahmed, Y., Pérez Rodríguez, R., Zambrano Robledo, P. D. C., & Guerrero Mata, M. P. (2018). Selection of Machining Parameters Using a Correlative Study of Cutting Tool Wear in High-Speed Turning of AISI 1045 Steel. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2(4), 66. <https://doi.org/10.3390/jmmp2040066>

- [14] Shnfir, M., Olufayo, O. A., Jomaa, W., & Songmene, V. (2019). Machinability Study of Hardened 1045 Steel When Milling with Ceramic Cutting Inserts. *Materials*, 12(23), 3974. <https://doi.org/10.3390/ma12233974>
- [15] Ajaja, J., Jomaa, W., Bocher, P., Chromik, R. R., Songmene, V., & Brochu, M. (2019). Hard turning multi-performance optimization for improving the surface integrity of 300M ultra-high strength steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(1), 141-157. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03863-3>
- [16] Bartarya, G., & Choudhury, S. K. (2012). State of the art in hard turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 53(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jmachtools.2011.08.019>
- [17] Cui, X., Jiao, F., Zhao, B., & Guo, J. (2017). A review of high-speed intermittent cutting of hardened steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(9), 3837-3846. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0815-y>
- [18] Li, B., Zhang, S., Yan, Z., & Zhang, J. (2018). Effect of edge hone radius on chip formation and its microstructural characterization in hard milling of AISI H13 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(1), 305-318. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1933-x>
- [19] Brito, T. G., Paiva, A. P., Paula, T. I., Dalosto, D. N., Ferreira, J. R., & Balestrassi, P. P. (2016). Optimization of AISI 1045 end milling using robust parameter design. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(5), 1185-1199. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7764-0>
- [20] Chinchankar, S., & Choudhury, S. K. (2015). Machining of hardened steel—Experimental investigations, performance modeling and cooling techniques: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 89(9), 95-109. <https://doi.org/10.1016/j.jmachtools.2014.11.002>
- [21] Fnides, M., Yaltese, M. A., Khattabi, R., Mabrouki, T., & Girardin, F. (2017). Modeling and optimization of surface roughness and productivity thru RSM in face milling of AISI 1040 steel using coated carbide inserts. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 8(4), 493-512. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2017.3.001>
- [22] Lawal, S. A., Choudhury, I. A., & Nukman, Y. (2013). A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant. *Journal of Cleaner Production*, 41, 210-221. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.016>
- [23] Masmiaati, N., & Sarhan, A. A. D. (2015). Optimizing cutting parameters in inclined end milling for minimum surface residual stress – Taguchi approach. *Measurement*, 60, 267-275. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.10.002>
- [24] Masmiaati, N., Sarhan, A. A. D., Hassan, M. A. N., & Hamdi, M. (2016). Optimization of cutting conditions for minimum residual stress, cutting force and surface roughness in end milling of S50C medium carbon steel. *Measurement*, 86, 253-265. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.02.049>
- [25] Muñoz-Escalona, P., Díaz, N., & Cassier, Z. (2012). Prediction of Tool Wear Mechanisms in Face Milling AISI 1045 Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(6), 797-808. <https://doi.org/10.1007/s11665-011-9964-6>
- [26] Araújo Junior, A. S., Sales, W. F., Da Silva, R. B., Costa, E. S., & Rocha Machado, Á. (2017). Lubri-cooling and tribological behavior of vegetable oils during milling of AISI 1045 steel focusing on sustainable manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 156, 635-647. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.061>

- [27] Iqbal, S. A., Mativenga, P. T., & Sheikh, M. A. (2007). Characterization of machining of AISI 1045 steel over a wide range of cutting speeds. Part 2: Evaluation of flow stress models and interface friction distribution schemes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 221(5), 917-926. <https://doi.org/10.1243/09544054jem797>
- [28] Debnath, S., Reddy, M. M., & Yi, Q. S. (2014). Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review. *Journal of Cleaner Production*, 83, 33-47. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.071>
- [29] Iqbal, S. A., Mativenga, P. T., & Sheikh, M. A. (2007). Characterization of machining of AISI 1045 steel over a wide range of cutting speeds. Part 1: Investigation of contact phenomena. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 221(5), 909-916. <https://doi.org/10.1243/09544054jem796>
- [30] Iqbal, S. A., Mativenga, P. T., & Sheikh, M. A. (2008). Contact length prediction: mathematical models and effect of friction schemes on FEM simulation for conventional to HSM of AISI 1045 steel. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 3(1-2), 18-33. <https://doi.org/10.1504/ijmmm.2008.017622>
- [31] Araújo, R. P., Rolim, T. L., Oliveira, C. A., Moura, A. E., & Silva, J. C. A. (2019). Analysis of the surface roughness and cutting tool wear using a vapor compression assisted cooling system to cool the cutting fluid in turning operation. *Journal of Manufacturing Processes*, 44, 38-46. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.05.040>
- [32] Chetan, Ghosh, S., & Venkateswara Rao, P. (2015). Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review. *Journal of Cleaner Production*, 100, 17-34. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.039>