

# تأثیر استفاده از روانکار روغنی حاوی نانوذرات آلومینا بر میزان صافی سطح چرخ‌دنده‌های ساده تولیدشده در فرایند هابینگ

سامان خلیل پورآذری

عضو هیأت علمی گروه مهندسی مکانیک ساخت و تولید

دانشگاه صنعتی ارومیه

s.khalilpour@mee.uut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۱۰

## چکیده

فرایند هابینگ از جمله روش‌های متداول براده‌برداری برای تولید چرخ‌دنده‌های ساده با ابعاد گوناگون است. در فرایندهای براده‌برداری انتخاب روانکار مناسب از عوامل مهم در افزایش میزان تولید و ارتقاء کیفیت قطعات تولیدی است. در این مقاله از روانکار حاوی نانوذرات آلومینا در روغن 25W-50 برای انجام فرایند هابینگ استفاده شده است. در ابتدا با هر یک از دو روانکار معمولی و روانکار حاوی نانوذرات آلومینا دو چرخ‌دنده ساده مشابه از جنس DIN1.7131 تولید گردید. برای انجام فرایند هابینگ از یک ابزار هاب نو و یکسان برای هر یک از دو روانکار استفاده شد. سپس به منظور بررسی تأثیر نوع روانکار بر کیفیت قطعات تولیدی، مقادیر زبری متوسط، بیشترین مقدار زبری و زبری ده نقطه چرخ‌دنده‌ها با استفاده از دستگاه زبری‌سنج مدل MarSurf PS1 مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که کاربرد نانوذرات آلومینا در فرایند هابینگ می‌تواند سبب کاهش یک‌دهم میکرونی مقدار زبری متوسط سطح، نسبت به چرخ‌دنده‌های مشابه تولیدشده با روانکار معمولی گردد.

**واژگان کلیدی:** فرایند هابینگ، نانوذرات، آلومینا، زبری سطح، چرخ‌دنده ساده

## ۱. مقدمه

ایجاد شده به‌وسیله یک ابزار هاب با دندان‌های مارپیچ به صورت تدریجی تولید می‌شود [۲]. بنابراین ساخت چرخ‌دنده در این روش با ایجاد اصطکاک و سایش بالا در ابزار برشی و قطعه کار همراه است که نیاز به استفاده از روانکار به منظور افزایش پارامترهای عمر ابزار و کیفیت

با وجود استفاده از روش‌هایی چون آهن‌گری، اکستروژن و نورد، فرایند براده‌برداری متداول‌ترین فرایند برای تولید انواع چرخ‌دنده‌های ساده است [۱]. فرایند هابینگ یکی از روش‌های ماشینکاری برای تولید انواع چرخ‌دنده‌های ساده است که در آن دندان‌های چرخ‌دنده با استفاده از برش‌های

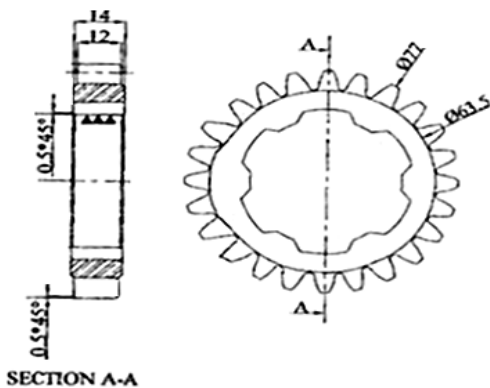


چرخ‌دنده تولیدی را ضروری می‌نماید. استفاده از سیالات برش در فرایندهای براده‌برداری سبب افزایش عمر مفید ابزار، بهبود سطح پرداخت، کاهش درجه حرارت در منطقه ماشینکاری و دور شدن براده از منطقه ماشینکاری می‌گردد [۳]. یکی از انواع سیالات برشی مورد استفاده در فرایندهای براده‌برداری سنگین با سرعت‌های پایین برشی نظیر فرایند هایبینگ، روغن برشی است. با توجه به آثار مهم روانکارهای با پایه روغنی تحقیقات زیادی برای افزایش راندمان آنها انجام گرفته است. یکی از این روش‌های جدید، استفاده از روانکارهای حاوی نانوذرات  $Al_2O_3$ ،  $WS_2$  و  $MoS_2$  تحت نام نانو روانکار می‌باشد. استفاده از نانو روانکار در روی سطوح با زبرهای میکروسکوپی سبب نفوذ ذرات نانو و کروی شکل موجود در روانکار در منافذ بین سطوح شده و حرکت آنها روی هم را تسهیل می‌کند [۴-۵]. پاربو و وینایاگام از روغن SAE20W40 حاوی نانو تیوب‌های کربن برای بهینه‌سازی ترک‌های میکرو و زبری سطح در قطعه کار AISI D3 توسط روش تاگوچی استفاده کرد. با اجرای روش تاگوچی بهینه‌ترین نتایج برای این مقادیر در دو حالت سنگ‌زنی با یا بدون استفاده از نانو سیال تعیین گردید. نتایج بیانگر کاهش زبری و ترک‌های میکرو در سطح سنگ زنی شده در حالت استفاده از نانو روانکار می‌باشد [۶]. سایوتی و همکاران برای تراشکاری قطعه کار از جنس AISI4140 در ماشین CNC از روانکار حاوی نانو ذرات  $SiO_2$  به منظور بررسی میزان تأثیر آن بر روی مقادیر کیفیت سطح قطعه و اصطکاک استفاده نمود. تحقیقات نشان داد که استفاده از این سیستم روانکاری به دلیل عملکرد غلظتی ذرات نانو سبب افزایش کیفیت سطح قطعه کار و کاهش میزان اصطکاک گردیده است [۷]. در تحقیق دیگری از ذرات کربن در ترکیب با روغن معدنی برای ماشینکاری قطعه کار با جنس Al-2017-T4 توسط ماشین فرز CNC استفاده شد. مقادیر زبری سطح قطعه، ضریب اصطکاک و مصرف انرژی به عنوان پارامترهای خروجی مورد بررسی قرار گرفت [۸]. در تحقیق حاضر

استفاده از نانو ذرات آلومینا در روانکار برای اجرای فرایند هایبینگ چرخ‌دنده ساده و بررسی تأثیر آن بر روی زبری سطح قطعه کار برای اولین بار مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور ابتدا چرخ‌دنده ساده‌ای با ۲۴ دندانه از روی گیربکس دروگر علوفه چین چهار چرخ انتخاب شد. سپس با هر یک از دو روانکار معمولی و روانکار حاوی نانو ذرات آلومینا دو نمونه چرخ‌دنده ساده با ابعاد یکسان، در دستگاه هاب و با شرایط مشابه تولید گردید. فرایند هایبینگ چرخ‌دنده‌های ساده، با یک ابزار هاب جدید برای هر یک از دو روانکار انجام شد تا مقایسه نتایج حاصل از مقادیر زبری سطوح چرخ‌دنده‌ها به آسانی صورت گیرد. اندازه‌گیری مقادیر زبری سطح چرخ‌دنده‌ها توسط دستگاه زبری سنج مدل MarSurf PS1 با قابلیت اندازه‌گیری مقادیر زبری متوسط سطح ( $R_a$ )، زبری ده نقطه ( $R_z$ ) و بیشترین مقدار زبری سطح ( $R_{max}$ ) انجام گرفت.

## ۲. انتخاب چرخ‌دنده ساده

برای اجرای فرایند هایبینگ نیاز به تعیین جنس و ابعاد چرخ‌دنده ساده نهایی جهت تولید در دستگاه هاب می‌باشد. شکل ۱ نقشه چرخ‌دنده انتخاب شده از روی گیربکس دروگر علوفه چین چهار چرخ را نشان می‌دهد.

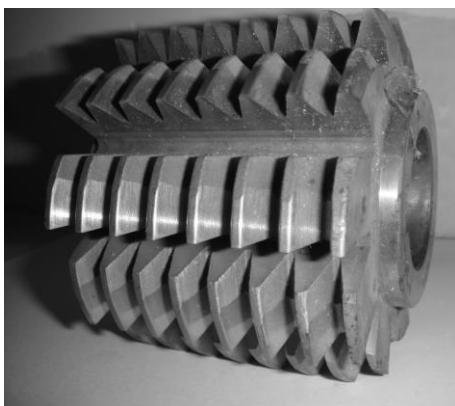


شکل ۱. چرخ‌دنده ساده برای تولید در دستگاه هاب

جنس چرخ‌دنده ساده انتخاب شده در این تحقیق از فولاد DIN 1.7131 با سختی ۱۲ راکول سی است که در تولید

### ۳. انتخاب ابزار هاب

در فرایند هایبینگ انتخاب ابزار هاب بر اساس مشخصات چرخ‌دنده ساده صورت می‌پذیرد. در شکل ۳ ابزار هاب انتخاب شده با مدول ۳، زاویه فشار ۲۰ درجه و زاویه ماریچ معادل ۲۰۶ نشان داده شده است. جنس ابزار هاب مورد استفاده از فولاد P6M5K5 با پوشش نیتريد تیتانیوم می‌باشد. در جدول ۳ معادل این فولاد در استانداردهای مختلف نشان داده شده است.



شکل ۳. ابزار هاب برای تولید چرخ‌دنده‌های ساده

جدول ۳. فولادهای معادل فولاد P6M5K5 در استانداردهای مختلف

| نام فولاد           | استاندارد |
|---------------------|-----------|
| HS6-5-2-5           | ISO       |
| Z90WDKCV06-05-04-02 | AFNOR     |
| S6-5-2-5            | DIN, VDEh |
| SS2723              | SS        |
| SKH55               | JIS       |
| BM35                | BS        |

فرایند هایبینگ در این تحقیق توسط دو ابزار هاب نو و مشابه برای تولید چرخ‌دنده‌های ساده با نانو روانکار آلومینا و روانکار معمولی انجام گرفت تا مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری مقادیر زبری سطوح چرخ‌دنده‌های ساده آسانتر باشد.

انواع محورهای هزار خاری و میل بادامک‌ها کاربرد دارد. در جداول ۱ و ۲ به ترتیب مشخصات ابعادی چرخ‌دنده ساده و خواص مکانیکی فولاد مورد نظر نشان داده شده است.

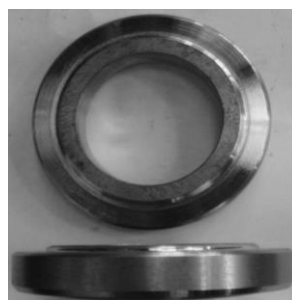
جدول ۱. ابعاد چرخ‌دنده ساده انتخاب شده

| ابعاد              | پارامتر                         |
|--------------------|---------------------------------|
| 24                 | تعداد دندانه‌های چرخ‌دنده       |
| $\phi 77 + 0.05$   | قطر خارجی چرخ‌دنده به میلی‌متر  |
| $\phi 63.5 + 0.05$ | قطر داخلی چرخ‌دنده به میلی‌متر  |
| 20°                | زاویه فشار                      |
| 3                  | مدول چرخ‌دنده                   |
| 23/05              | میزان ماگ دنده برای اندازه‌گیری |
| 23/08              | روی سه دندانه به میلی‌متر       |

جدول ۲. خواص مکانیکی فولاد DIN 1.7131

| مقدار                    | پارامتر              |
|--------------------------|----------------------|
| $\geq 785 MPa$           | تنش کششی             |
| $\geq 590 MPa$           | تنش تسلیم            |
| $\geq 47 J$              | انرژی ضربه‌ای        |
| $\geq 59 \frac{J}{cm^2}$ | میزان چقرمگی ضربه‌ای |
| $0.46 \frac{J}{g.K}$     | ظرفیت گرمایی ویژه    |
| $7.81 \frac{g}{cm^3}$    | چگالی                |

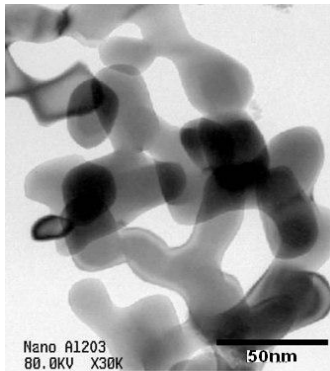
جهت کاهش میزان براده‌برداری در تولید چرخ‌دنده ساده ماده اولیه با ابعاد نزدیک به چرخ‌دنده ساده نهایی، انتخاب شده و سپس عملیات تراشکاری بر روی آن انجام گرفت. شکل ۲ نمای روبرو و بالایی قطعه ماشینکاری شده برای نصب در دستگاه هاب و تولید چرخ‌دنده ساده را نشان می‌دهد.



شکل ۲. قطعه اولیه برای تولید چرخ‌دنده ساده در دستگاه هاب

#### ۴. مشخصات پودر نانو آلومینا

آلومینا ماده‌ای است سرامیکی که ضمن داشتن خواص فیزیکی و شیمیایی مناسب مانند پایداری در برابر خوردگی، نسبتاً فراوان و ارزان است. دلیل دیگر اهمیت آلومینا پایین بودن دمای سینترینگ آن نسبت به دیگر سرامیک‌های مهندسی است که کاربرد صنعتی آن را مقرون به صرفه می‌سازد. برای تولید روانکار حاوی نانو ذرات آلومینا در فرایند هایبینگ چرخ‌دنده ساده از نانو پودر آلومینای گاما ( $\gamma - Al_2O_3$ ) استفاده شده که اطلاعات مربوط به آن در جدول ۴ ارائه گردیده است.



شکل ۴. تصویر میکروسکوپ انتقال الکترونی از پودر آلومینای مورد استفاده

جدول ۵. خواص فیزیکی و شیمیایی روغن 25W-50

| پارامتر                         | مقدار                           |
|---------------------------------|---------------------------------|
| ویسکوزیته در ۱۰۰ درجه سانتیگراد | 19 cSt                          |
| ویسکوزیته شاخص                  | 119                             |
| نقطه جوش                        | 234 °C                          |
| نقطه انجماد                     | -21 °C                          |
| چگالی                           | 895 $\frac{kg}{m^3}$ at 15/6 °C |

#### ۵. اجرای فرایند هایبینگ چرخ‌دنده‌های ساده

فرایند تولید چرخ‌دنده‌های ساده با هر یک از دو روانکار معمولی و نانو روانکار آلومینا، در دستگاه هاب مدل UMC Cugir انجام گردید. با هر روانکار دو نمونه چرخ‌دنده ساده تولید شد که در مراحل بعد از نظر زبری سطح مورد بررسی قرار گرفت. برای تولید چرخ‌دنده‌های ساده با روانکار معمولی از روغن پایه معدنی 25W-50 بدون نانو ذرات آلومینا استفاده شد. ابتدا قطعه اولیه برای تولید چرخ‌دنده ساده بر روی محور قطعه کار و سپس ابزار هاب بر روی محور ابزار نصب گردید. سپس با تنظیم مقادیر مورد نظر در دستگاه هاب دو چرخ‌دنده ساده نمونه تولید شد. برای اجرای فرایند هایبینگ با نانو روانکار آلومینا ابتدا مخزن دستگاه هاب که دارای ظرفیت روغن ۵۵ لیتر است کاملاً از روغن معمولی تخلیه گردید. سپس نانو روانکار مورد نیاز بعد

جدول ۴. مشخصات نانو پودر آلومینا

| پارامتر                        | مقدار                 |
|--------------------------------|-----------------------|
| رنگ                            | سفید                  |
| میانگین اندازه ذرات به نانومتر | 20                    |
| مساحت سطح ویژه                 | $>138 \frac{m^2}{g}$  |
| مورفولوژی                      | نزدیک به کروی         |
| خلوص                           | 99+%                  |
| ظرفیت گرمایی ویژه              | 880 $\frac{J}{kg.K}$  |
| چگالی                          | 3890 $\frac{kg}{m^3}$ |

در شکل ۴ نیز نمایی از پودر آلومینای مورد استفاده که توسط میکروسکوپ انتقال الکترونی تهیه گردیده، نشان داده شده است. برای تهیه نانو روانکار مورد نیاز در فرایند هایبینگ، ابتدا ترکیب پودر نانو آلومینا با روغن پایه معدنی 25W-50 بر حسب درصد وزنی تعیین شده، انجام گرفت. با توجه به بررسی مقالات مختلف علمی درصد ترکیب مواد نانو به روانکارها بین ۰/۱ تا ۰/۲ درصد وزنی روانکار معرفی شده است [۹]. با این حال در این تحقیق درصد بهینه اختلاط مواد نانو به روانکار با توجه به مقالات ارائه شده ۰/۱۵ انتخاب گردیده است [۱۰]. جدول ۵ خواص روغن مورد استفاده در این تحقیق برای انجام فرایند هایبینگ چرخ‌دنده‌های ساده را نشان می‌دهد.

از انجام اختلاط روغن 25W-50 و نانو ذرات آلومینا تهیه و در داخل مخزن دستگاه ریخته شد. پارامترهای ماشینکاری در این حالت عیناً با حالت تولید چرخ‌دنده‌ها توسط روانکار معمولی یکسان می‌باشد. در جدول ۶ پارامترهای فرایند هایبینگ برای تولید چرخ‌دنده‌های ساده نشان داده شده است.

جدول ۶. پارامترهای ماشینکاری در فرایند هایبینگ برای هر دو روانکار معمولی و نانو

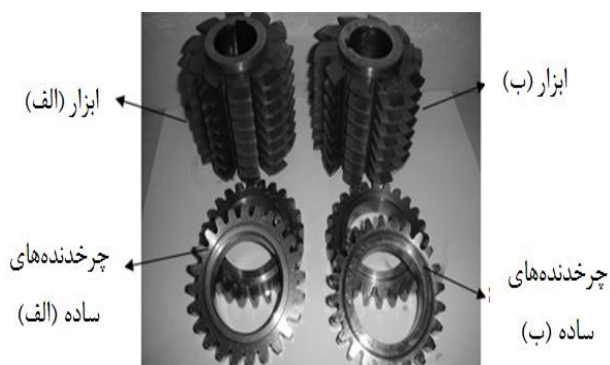
| پارامتر                               | مقدار                    |
|---------------------------------------|--------------------------|
| $(n_T)$ تعداد دوران اسپیندل ابزار هاب | ۶۰ rpm                   |
| تعداد دوران اسپیندل قطعه کار          | $\frac{n_T}{Z} \times K$ |
| سرعت برشی                             | $17 \frac{m}{min}$       |
| میزان پیشروی محوریدر حالت خشن کاری    | $2 \frac{mm}{min}$       |
| میزان پیشروی محوری در حالت پرداخت     | $12 \frac{mm}{min}$      |
| عمق برش در حالت خشن کاری              | $0.75 mm$                |
| عمق برش در حالت پرداخت                | $0.1 mm$                 |

در جدول ۶ پارامتر  $Z$  تعداد دندانه‌های چرخ‌دنده و  $K$  ضریب دستگاه است که بر طبق دستورالعمل شرکت سازنده دستگاه هاب برابر یک می‌باشد. شکل ۵ نیز نحوه ماشینکاری چرخ‌دنده ساده در دستگاه هاب و با نانو روانکار آلومینا را نشان می‌دهد.



شکل ۵. تولید چرخ‌دنده ساده با نانو روانکار آلومینا در دستگاه هاب

در شکل ۶ چرخ‌دنده‌های ساده تولید شده با روانکار معمولی (دو عدد) و نانو روانکار آلومینا (دو عدد) همراه با ابزارهای هاب به کار رفته در هر مورد نشان داده شده است. نتایج کنترل کیفیت انجام شده بر روی تمام چرخ‌دنده‌های تولیدی بیانگر انطباق آنها با نقشه ارائه شده در شکل ۱ می‌باشد.



شکل ۶. ابزار هاب و چرخ‌دنده‌های ساده در فرایند هایبینگ با (الف) روانکار معمولی (ب) نانو روانکار

## ۶. اندازه‌گیری مقادیر زبری سطح چرخ‌دنده‌های ساده

پس از پایان فرایند هایبینگ و تولید چرخ‌دنده‌های ساده توسط دو روانکار، دندانه‌های چرخ‌دنده‌ها به منظور تعیین میزان زبری سطح مورد بررسی قرار گرفت. دستگاه زبری سنج مورد استفاده MarSurf PS1 و با قابلیت اندازه‌گیری مقادیر زبری‌های متوسط سطح، ده نقطه و بیشترین مقدار زبری برای سطوح مختلف است. پراب دستگاه روی پهنای دندانه چرخ‌دنده حرکت نموده و اطلاعات به کامپیوتر منتقل می‌گردد. با ورود اطلاعات به نرم افزار کامپیوتری که متعلق به دستگاه زبری سنج است، نمودار سطح رسم شده و مقادیر پارامترهای زبری دندانه تعیین می‌گردد. شکل ۷ دستگاه مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

## ۷. بحث و بررسی

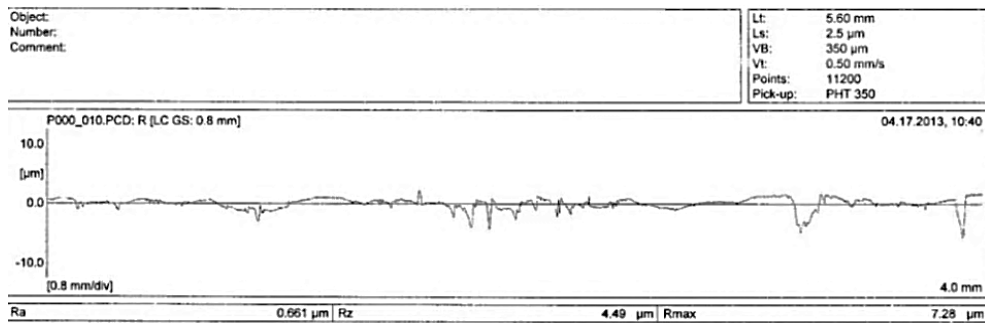
در شکل‌های ۸ تا ۱۱ نمودار زبری سطح برای چرخ‌دنده‌های ساده تولید شده با هر یک از دو روانکار

میزان زبری سطح، سه دندان مختلف از هر چرخ‌دنده انتخاب و اندازه‌گیری روی هر دندان سه بار متوالی انجام شده است. مقادیر عددی به دست آمده از بررسی زبری سطوح هر چهار عدد چرخ‌دنده ساده به تفکیک روانکار در جدول ۷ ارائه گردیده است.

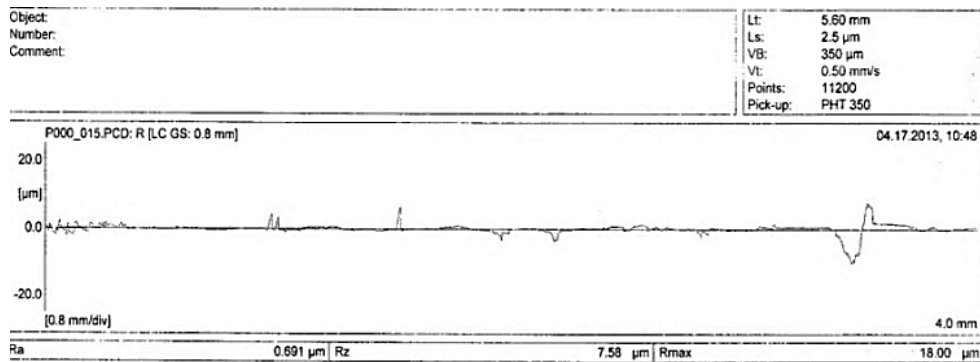
معمولی و نانو نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای به دست آمده برای هر چرخ‌دنده مقادیر زبری‌های متوسط سطح، ده نقطه و بیشترین مقدار زبری با واحد میکرومتر به صورت خودکار توسط نرم افزار دستگاه تعیین و در زیر آن قید گردیده است. لازم به ذکر است که برای اندازه‌گیری



شکل ۷. نحوه سنجش مقادیر زبری سطح چرخ‌دنده‌های ساده

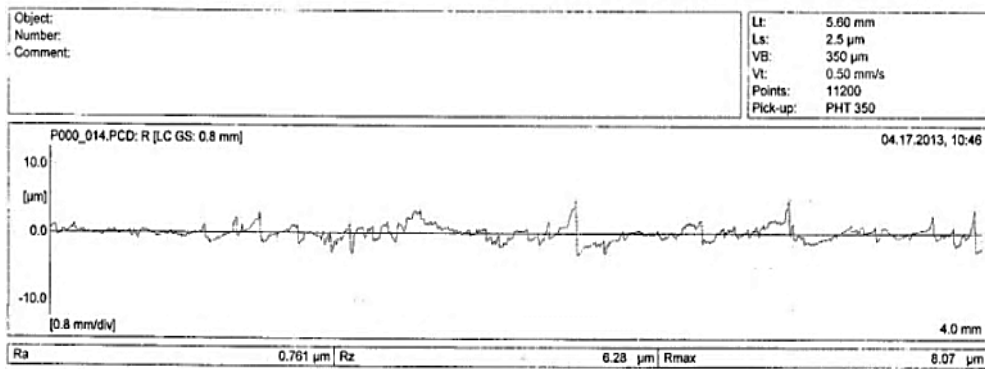


شکل ۸. برای چرخ‌دنده ساده اول (نانو روانکار)

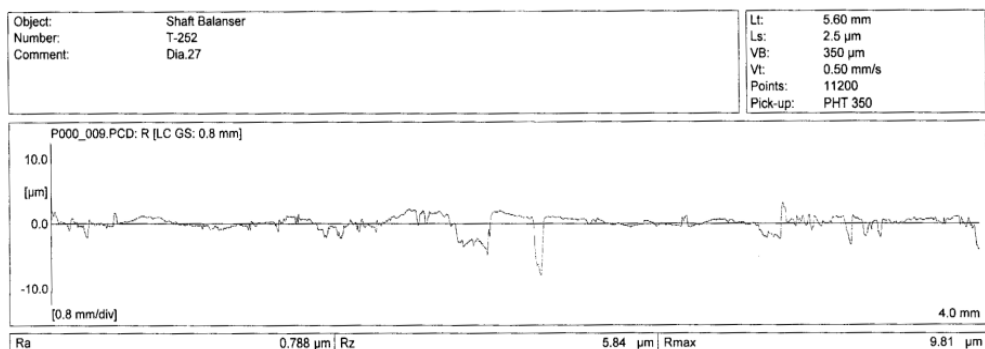


شکل ۹. چرخ‌دنده ساده دوم (نانو روانکار)





شکل ۱۰. چرخ‌دنده ساده اول (روانکار معمولی)



شکل ۱۱. چرخ‌دنده ساده دوم (روانکار معمولی)

جدول ۷. مقادیر زبری سطح برای چرخ‌دنده‌های ساده به تفکیک نوع روانکار

| پارامتر (میکرومتر) | روانکار معمولی     |                    | نانو روانکار      |                   |
|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
|                    | نمونه دوم (شکل ۱۱) | نمونه اول (شکل ۱۰) | نمونه دوم (شکل ۹) | نمونه اول (شکل ۸) |
| $R_a$              | 0.788              | 0.761              | 0.691             | 0.661             |
| $R_z$              | 5.84               | 6.28               | 7.58              | 4.49              |
| $R_{max}$          | 9.81               | 8.07               | 18.00             | 7.28              |

نشان نمی‌دهد. با این حال میانگین این پارامتر در چرخ‌دنده‌های تولید شده با روانکار نانو آلومینا برابر با  $6/035$  میکرومتر است که در مقایسه با میانگین این پارامتر در چرخ‌دنده‌های تولید شده با روانکار معمولی ( $6/06$  میکرومتر) پایین‌تر می‌باشد. در رابطه با پارامتر بیشترین مقدار زبری، این مقدار بیشترین ارتفاع اندازه‌گیری شده در یک نقطه خاص از نمودار زبری سطح رسم شده در هر یک از شکل‌های ۸ تا ۱۱ را نشان می‌دهد. مقادیر این پارامتر نیز در چهار نمونه چرخ‌دنده ساده تولید شده تغییرات معناداری

نتایج مقادیر عددی ارائه شده در جدول ۷ نشان می‌دهد که میزان زبری متوسط سطح در چرخ‌دنده‌های ساده تولید شده با روانکار نانو نسبت به روانکار معمولی به میزان یک دهم میکرون کاهش یافته است. به نظر می‌رسد استفاده از نانو ذرات آلومینا در روانکار سبب شده که این ذرات با نفوذ در زبرهای میکروسکوپی ناشی از براده‌برداری ابزار هاب از روی چرخ‌دنده سبب یکنواخت‌تر شدن سطح گردند. میزان زبری ده نقطه در چهار نمونه چرخ‌دنده ساده تولید شده تغییرات معناداری با توجه به نوع روانکار مورد استفاده را

با توجه به نوع روانکار مورد استفاده را نشان نمی‌دهد. لازم به ذکر است که میزان این پارامتر تحت تأثیر عوامل مختلفی است که از جمله مهمترین آنها می‌توان به سه عامل زیر اشاره کرد:

استهلاک احتمالی در ماشین ابزار که در یک لحظه خاص از اجرای فرایند سبب ارتعاش در قطعه و یا ابزار می‌گردد. ارتعاشات محیط اطراف و دستگاههای موجود در کارخانه مقدار بیشترین زبری را افزایش می‌دهد.

عبور ذرات سخت براده از روی سطح قطعه کار که می‌تواند سبب ایجاد خراش در قسمتی از پروفیل دندانه شده و مقدار این زبری را در آن نقطه افزایش دهد.

با توجه به عوامل بالا بیشترین مقدار زبری تا حدود زیادی مستقل از نوع روانکار مورد استفاده بوده و بیشتر تابع شرایط براده‌برداری خواهد بود.

#### ۸. نتیجه‌گیری

انتخاب روانکار مناسب در فرایند هایبینگ نقش مهمی در کیفیت چرخ‌دنده تولید شده و افزایش عمر ابزار ایفا

می‌نماید. در این تحقیق از یک روانکار با و بدون استفاده از نانو ذرات آلومینا برای اجرای فرایند هایبینگ استفاده شد. جنس قطعه کار مورد استفاده از فولاد DIN1.7131 و ابزار هاب از فولاد P6M5K5 با روکش نیتريد تیتانیوم انتخاب شد. شرایط ماشینکاری چرخ‌دنده‌های ساده به صورت یکسان تعیین و با هر یک از دو روانکار، دو نمونه چرخ‌دنده تولید گردید. فرایند هایبینگ در هر دو حالت با ابزار هاب جدید انجام گرفت تا مقادیر زبری سطح چرخ‌دنده‌های تولیدی به آسانی قابل مقایسه باشد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از نانو روانکار آلومینا بیشترین تأثیر را بر روی میزان زبری متوسط سطح داشته و مقدار آن را در هر دو چرخ‌دنده به میزان یک دهم میکرون نسبت به چرخ‌دنده‌های تولید شده با روانکار معمولی کاهش داده است.

#### ۹. تشکر و قدردانی

در پایان از همکاری صمیمانه شرکت آداکو ارومیه و حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور در اجرای این طرح تشکر می‌شود.

#### ۱۰. مأخذ

- [1] Khalilpourazary, S.; Dadvand, A.; Azdast, T.; and Sadeghi, M.H.; "Design and manufacturing of a straight bevel gear in hot precision forging process using finite volume method and CAD/CAE technology", International Journal of Advance Manufacturing Technology, Vol.56, No. 1, pp. 87-95, (2011).
- [2] Radzevich, S.P.; "Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture", CRC press, Boca Raton, (2012).
- [3] Xia, Y.Q.; Wang, L.; and Wang, X.B.; "Application of synthetic lubricants in gear transmission", Journal Shenyang University of Technology, Vol.29, No.4, pp. 484-487, (2007).
- [4] De Barros, M.I.; Bouchet, J.; Raoult, I.; Le Mogne, T.; Martin, J.M.; Kasrai, M.; and Yamada, Y.; "Friction reduction by metal sulfides in boundary lubrication studied by XPS and XANES analysis", Wear, Vol.254, No.1, pp.863-870, (2003).
- [5] Yan, J.; Zhang, Z.; and Kriyagawa, T.; "Effect of Nano particle lubrication in diamond turning of reaction-bonded SiC", International Journal of Automotive Technology, Vol.5, No.2, pp.307-312, (2011).





- [6] Prabhu, S.; and Vinayagam, B.K.; “AFM investigation in grinding process with Nano fluids using Taguchi analysis”, International Journal of Advance Manufacturing Technology, Vol. 60, No.1, pp.149-160, (2012).
- [7] Sayuti, M.; Sarhan, A.A.; and Salem, S.; “Development of SiO<sub>2</sub> nano lubrication system for better surface quality, more power savings and less oil consumption in hard turning of hardened steel AISI4140”, Advanced Materials Research, Vol. 748, No.2, pp. 56-60, (2013).
- [8] Sayuti, M.; Sarhan, A.A.; Tanaka, T.; Hamdi, M.; and Saito, Y.; “Cutting force reduction and surface quality improvement in machining of aerospace duralumin AL-2017-T4 using carbon onion nano lubrication system International Journal of Advance Manufacturing Technology, Vol. 65, No.2, pp. 1493-1500, (2013).
- [9] Jiao, D.; Zheng, S.; Wang, Y.; Guan, R.; and Cao, B.; “The tribology properties of alumina/ silica composite nanoparticles as lubricant additives”, Applied Surface Science, Vol.257, No. 4, pp. 5720-5725, (2011).
- [10] Razavi Hesabi, Z.; Hafizpour, H.R.; and Simchi, A.; “An investigation on the compressibility of aluminum/nano-alumina composite powder prepared by blending and mechanical milling”, Materials Science and Engineering: A , Vol. 454-455, No.2, pp.89-98, (2007).