



دانشکده فنی و مهندسی مکانیک

گروه مهندسی ساخت و تولید

رساله برای دریافت درجه دکتری در رشته مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید

عنوان

مطالعه تجربی و عددی تاثیرات نانوسیالات پایه گیاهی گرافیت و مس در سلامتی سطح فولاد
AISI 1045 در فرآیند سنگ زنی با حداقل روانکار

استاد راهنما

پروفسور محمدرضا شبگرد

استادان مشاور

دکتر مهران محبوب خواه

دکتر موسی محمدپور

پژوهشگر

میرصادق سیدزوار

دی ماه 1396

نام خانوادگی دانشجو: سیدزوار	نام: میرصادق
عنوان رساله:	
مطالعه تجربی و عددی تاثیرات نانوسیالات پایه گیاهی گرافیت و مس در سلامتی سطح فولاد AISI 1045 در فرآیند سنگ زنی با حداقل روانکار	
استاد راهنما: پرفسور محمدرضا شبگرد	
استادان مشاور: دکتر مهران محبوب خواه، دکتر موسی محمدپورفرد	
مقطع تحصیلی: دکتری تخصصی	رشته: مهندسی مکانیک
دانشکده: مهندسی مکانیک	تاریخ فارغ التحصیلی: 1396/10/24
کلید واژه ها: نانوسیال گرافیت، نانوسیال اکسید مس، روغن گیاهی، سنگ زنی با حداقل جریان روانکار، نیروی برش، ضریب اصطکاک، ضریب همرفت حرارتی، سهم حرارتی قطعه کار	
چکیده:	
مصرف بالای سیال خنک کار در پروسه های ماشینکاری از جمله سنگ زنی از نقطه نظر مسائل و مشکلات زیست محیطی و اقتصادی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. تحقیقات صورت گرفته نشان دادند که حداقل جریان سیال روانکار (MQL) بعنوان یک جایگزین برای سیستم خنک کاری جریان سیال می تواند مطرح گردد. در این راستا، بررسی های انجام گرفته نشان دهنده اهمیت بالای ویژگی های سیال مورد استفاده، از جنبه ارتقاء هدایت حرارتی و مشخصات تریبولوژی، در موفقیت روش MQL است. تحقیقاتی که در این زمینه در حال جریان است در مراحل ابتدایی خود بوده و نقش تعداد محدودی از نانوسیالات در ویژگی های سنگ زنی قطعات با استفاده از فرآیند MQL بررسی شده است. در این تحقیق ویژگی های نانوسیالات گرافیت و اکسید مس، که به روش تخلیه الکتریکی تولید گردیدند، بعنوان سیال خنک کار در فرآیند سنگ زنی فولاد AISI 1045 تحت سیستم MQL مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. جهت سنتز نانوسیالات گرافیت و اکسید مس، سه سطح برای مدت زمان پروسه تخلیه الکتریکی جهت دستیابی به غلظت های مختلف نانوذرات در سیال پایه استفاده شده است. از جنبه آزمایش های سنگ زنی، سرعت خطی قطعه کار و عمق برش هرکدام در سه سطح و فشار هوا در سیستم MQL در دو سطح متفاوت مورد بررسی قرار گرفته اند. بعلاوه، مقادیر پارامترهای شدت جریان تخلیه، زمان روشنی پالس، و نوع سیال پایه در پروسه تخلیه الکتریکی غوطه ور و سرعت چرخ ساینده در پروسه سنگ زنی ثابت در نظر گرفته شده اند. از ترموکوپل نوع J ج زنی شده در قطعه کار برای اندازه گیری دما درحین پروسه سنگ زنی و از مکانیزم طراحی و ساخته شده بر مبنای لودسل ها جهت اندازه گیری نیروهای سنگ زنی استفاده شده است. اندازه گیری این خروجی ها جهت تعیین نیروهای سنگ زنی، ضریب اصطکاک بین سنگ ساینده و قطعه کار، شار حرارتی ایجاد شده در حین پروسه سنگ زنی، و سهم انرژی حرارتی قطعه کار در طی پروسه سنگ زنی، الزامی است. برای بررسی سلامت سطحی قطعات سنگ زنی شده از اندازه گیری زبری سطح قطعات، تغییرات میکروسختی و مشاهدات میکروسکوپی از سطوح سنگ زنی شده و مقاطع عرضی آنها استفاده شده است. شبیه سازی انتقال حرارت بر مبنای روش تفاضل محدود (FDM) جهت مطالعه سهم حرارتی قطعه کار و نحوه توزیع دما در نمونه ها درحین پروسه سنگ زنی انجام شده است. ضرایب همرفت حرارتی سیستم خنک کاری بصورت نیمه تجربی محاسبه شده و در شبیه سازی ها استفاده گردیده است. قوس حرارتی ناشی از عملیات سنگ زنی در مرحله شبیه سازی FDM بصورت تابع نمایی در نظر گرفته شده و نقش آن در دقت پیش بینی های توزیع دما در قطعه کار حرارت ارزیابی شده است. مطابق نتایج حاصله، نیروی مماسی و نسبت نیروی سنگ زنی در شرایط استفاده از سیستم روانکاری MQL با نانوسیال گرافیت حداکثر کاهش برابر با 48/8٪ را در مقایسه با دیگر روش های روانکاری بخصوص در حالت سنگ زنی با پارامترهای برشی بالا را داراست. گرافیت دارای ساختار لایه ای است که در حضور نیروهای برشی صفحات اتمی بر روی یکدیگر لغزیده و باعث کاهش نیروی اصطکاکی در وجه تماس چرخ ساینده با قطعه کار می گردد. نیروی مماسی و نسبت نیروهای سنگ زنی در شرایط استفاده از سیستم روانکار MQL با نانوسیال اکسید مس با درصد حجمی پایین نانوذرات در سیال پایه کمتر از مقادیر مشابه در روانکاری MQL خالص و جریان سیال است. مقادیر این متغیرها با غلظت حجمی نانوسیال اکسید مس مورد استفاده و فشار مابین ذرات ساینده و سطح کار تغییر می نماید. برخلاف نانوذرات گرافیت، نانوذرات اکسید مس دارای ساختار لایه ای نمی باشند و روانکاری از طریق عمل غلظشی نانوذرات کروی در وجه مشترک چرخ ساینده - قطعه کار اتفاق می افتد. تقریباً هیچ نشانه سوختگی در سطح قطعات سنگ زنی شده با روش خنک کاری MQL با نانوسیالات گرافیت و اکسید مس مشاهده نمی گردد. افزایش دمای سطح کار در سنگ زنی MQL با نانوسیال	

اکسید مس حداکثر کاهش برابر با $66/2\%$ در مقایسه با شرایط سنگ زنی در حالت خشک و $2/5\%$ در حالت MQL با نانوسیال گرافیت نمایش می دهد، در حالی که ضریب انتقال حرارت همرفت سیستم MQL نانوسیال گرافیت بالاتر از مقدار مشابه در سیستم MQL نانوسیال اکسید مس است. براساس نتایج مدل FDM، سهم انرژی قطعه کار در سنگ زنی با استفاده از سیستم MQL نانوسیال اکسید مس کمترین مقادیر را نسبت به مقادیر مشابه در سنگ زنی با استفاده از سیستم روانکار MQL نانوسیال گرافیت و جریان سیال دارا می باشد.

همچنین میکروسختی سطوح قطعات در سنگ زنی MQL با استفاده از نانوسیال گرافیت از طریق نفوذ نانوذرات گرافیت در سطح سنگ زنی قطعات و نیز در نتیجه تغییر شکل پلاستیکی زیر لایه سطحی کار ناشی از لغزش سطوح آزاد دانه های ساینده بر روی سطح کار بواسطه شکل گیری فیلم روانکار مؤثر در وجه مشترک چرخ سنگ با قطعه کار افزایش می یابد. بطور مشابه، تحت شرایط روانکاری MQL با نانوسیال اکسید مس، عمل تغییر شکل پلاستیکی زیر لایه سطحی کار ذکر شده به همراه نفوذ نانوذرات اکسید مس در سطح سنگ زنی سبب افزایش میکروسختی سطوح کار می گردد. این میزان میکروسختی با افزایش درصد حجمی نانوذرات در سیال پایه نانوسیالات مورد استفاده افزایش می یابد.



بخش اول: پایه‌های نظری و پیشینه پژوهش

فصل اول: مقدمه ای بر مبحث نانوسیال و کاربرد آن به عنوان سیال خنک کاری در فرآیند سنگ زنی	1
1-1- مقدمه	2
2-1- نانوسیال ها	3
3-1- سیستم حداقل جریان سیال روانکار (MQL)	5
4-1- انتقال حرارت در سنگ زنی	7
5-1- اهداف و روش های کاهش مصرف سیال در فرآیندهای سنگ زنی	8
فصل دوم: پیشینه تحقیق	12
1-2- مقدمه	13
2-2- تولید و بررسی ویژگی های نانوسیالات مختلف	13
1-2-2- بررسی ویژگی نانوسیالات تولید شده به روش دو مرحله ای	13
2-2-2- بررسی ویژگی نانوسیالات تولید شده به روش تخلیه الکتریکی	26
3-2- بررسی نقش روانکار در مشخصات فرآیند و توزیع حرارت در پروسه ماشینکاری	32
1-3-2- نقش سیال خالص به عنوان روانکار در ویژگی های فرآیند ماشینکاری	32
2-3-2- نقش نانوسیال به عنوان روانکار در ویژگی های فرآیند ماشینکاری	43
4-2- مدل سازی نحوه توزیع حرارت در فرآیند سنگ زنی	57
1-4-2- تعاریف اولیه	57
1-1-4-2- شکل غیریکنواخت قوس حرارتی در ناحیه سنگ زنی	57
1-1-4-2- سوختن قطعه کار	57
2-4-2- پیشینه تحقیق در زمینه مدل سازی توزیع حرارت در سنگ زنی	58
5-2- لزوم انجام تحقیق و اهداف پژوهش	68

بخش دوم: مبانی و روش های کار

فصل سوم: مواد و روش ها	73
1-3- مقدمه	74
2-3- مواد، روش ها و طراحی آزمایش ها	74
3-3- سنتز و آماده سازی نانوسیالات گرافیت و اکسید مس	78
فصل چهارم: مدلسازی توزیع حرارت در پروسه سنگ زنی به روش تفاضل محدود	83
1-4- مقدمه	84
2-4- شبیه سازی توزیع حرارت در قطعه کار در حین سنگ زنی	84
3-4- مدل نیمه تجربی اندازه گیری ضریب انتقال حرارت همرفت سیستم خنک کاری	89

بخش سوم: نتایج و بحث

5- نتایج و بحث	91
1-5- مقدمه	92

92	2-5- نتایج تجربی نیروی برش و دمای سنگ زنی
94	3-5- ضریب انتقال حرارت همرفت سیستم خنک کاری
98	4-5- نتایج شبیه سازی حرارتی براساس مدل FDM
98	1-4-5- توزیع دما در قطعه کار و ارزیابی صحت مدل FDM
102	2-4-5- اثرات خنک کاری در لبه پیش رو و پس رو از ناحیه سنگ زنی بر روی نحوه توزیع دمای قطعات
104	3-4-5- اثرات شرایط خنک کاری در حین سنگ زنی بر روی سهم انرژی قطعه کار
105	5-5- نتایج سنگ زنی MQL با استفاده از نانوسیال گرافیت در فشار جریان 4 bar
105	1-5-5- نقش روش روانکاری بر روی نیروهای سنگ زنی
111	2-5-5- نقش روش روانکاری بر روی دمای سنگ زنی
115	3-5-5- نقش روش روانکاری بر روی سلامت سطح قطعه کار
124	6-5- نتایج سنگ زنی MQL با استفاده از نانوسیال اکسید مس در فشار جریان 4 bar
124	1-6-5- نقش روش روانکاری بر روی نیروهای سنگ زنی
131	2-6-5- نقش روش روانکاری بر روی دمای سنگ زنی
135	3-6-5- نقش روش روانکاری بر روی سلامت سطح قطعه کار
	7-5- مقایسه عملکرد نانوسیالات گرافیت و اکسید مس به عنوان روانکار در شرایط سنگ زنی MQL تحت فشار
913	جریان 6 bar
913	1-7-5- نقش خواص تریبولوژی نانوسیال بر روی نیروهای سنگ زنی
314	2-7-5- نقش خواص فیزیکی نانوسیال بر روی دمای سنگ زنی
714	3-7-5- نقش خواص تریبولوژی نانوسیال بر روی سلامت سطح قطعه کار

بخش سوم: نتایج و بحث

315	6- نتیجه گیری و پیشنهادات
415	1-6- مقدمه
415	2-6- نتیجه گیری
715	3-6- پیشنهادات

منابع و مراجع

816	ضمیمه الف - طراحی و ساخت وسیله اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی سیال
916	ض.م-الف-1- مقدمه
916	ض.م-الف-2- اندازه گیری هدایت حرارتی سیالات بر مبنای سیم داغ گذرا (THW)
916	ض.م-الف-2-1- اساس روش اندازه گیری هدایت حرارتی بر مبنای سیم داغ گذرا
711	ض.م-الف-2-2- سیستم اصلاح شده THW برای اندازه گیری هدایت حرارتی سیال
741	ض.م-الف-3- طراحی و ساخت سیستم اندازه گیری هدایت حرارتی بر مبنای ترمیستور
182	ضمیمه ب - مدل تفاضل محدود برای شبیه سازی توزیع حرارت در قطعه کار در پروسه سنگ زنی
318	ض.م-ب-1- معادله حاکم انتقال حرارت در ناحیه محاسباتی
418	ض.م-ب-2- معادله پایداری انرژی در لبه فوقانی ناحیه محاسباتی
518	ض.م-ب-3- معادله پایداری انرژی در گوشه سمت چپ لبه فوقانی ناحیه محاسباتی
518	ض.م-ب-4- معادله پایداری انرژی در گوشه سمت راست لبه فوقانی ناحیه محاسباتی

- ض.م-ب-5- معادله پایداری انرژی در لبه سمت چپ ناحیه محاسباتی-----618
- ض.م-ب-6- معادله پایداری انرژی در لبه سمت راست ناحیه محاسباتی-----718
- ض.م-ب-7- معادله پایداری انرژی در لبه تحتانی ناحیه محاسباتی-----718
- ض.م-ب-8- معادله پایداری انرژی در گوشه سمت چپ لبه تحتانی ناحیه محاسباتی-----818
- ض.م-ب-9- معادله پایداری انرژی در گوشه سمت راست لبه تحتانی ناحیه محاسباتی-----918
- ضمیمه پ - عدم قطعیت نتایج تجربی 190
- ض.م-ب-1- مقدمه -----191
- ض.م-ب-2- پروسه تعیین عدم قطعیت اندازه گیری ها-----191
- ض.م-ب-3- ارزیابی عدم قطعیت استاندارد-----921



بخش اول

پایه‌های نظری و پیشینه پژوهش

فصل اول

مقدمه ای بر مبحث نانوسیالات و کاربرد آنها به
عنوان روانکار در فرآیند سنگ زنی

فصل اول

مقدمه ای بر مبحث نانوسیالات و کاربرد آنها به عنوان روانکار در فرآیند سنگ زنی

1-1- مقدمه

نانو سیال ها دسته جدیدی از سیالات مهندسی شده هستند که عمدتاً از طریق اضافه نمودن ذرات جامد در اندازه های نانو در سیال پایه با ایجاد یک توزیع یکنواخت و پایدار با هدف افزایش ضریب هدایت حرارتی و ویژگی های تریبولوژی¹ سیال، تولید می شوند [1]. در این تحقیق، نانو سیالات گرافیت و اکسید مس به روش تخلیه الکتریکی غوطه ور² (SEDP) تولید شده و ویژگی های نانوسیالات حاصله و کاربرد آنها به عنوان سیال برشی در فرآیند سنگ زنی با سیستم حداقل جریان سیال روانکار³ (MQL) مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. بکارگیری MQL با هدف به حداقل رساندن حجم سیال روانکار در جت خنک کاری هدایت شده به وجه مشترک ابزار - قطعه کار و از این طریق کاهش قابل ملاحظه در مقدار مصرف سیال برشی مورد استفاده می باشد [2]. سیالات برشی، چرخ های سنگ زنی، و توسعه دانش مرتبط با جنبه های توزیع حرارت در فرآیند سنگ زنی، سه حیطه فنی است که در موفقیت فرآیند سنگ زنی MQL نقش کلیدی دارند [3]. هدف از مطالعه حاضر، کمک به بسط دانش فنی در زمینه نانوسیالات با ویژگی های تریبولوژی مطلوب جهت استفاده در فرآیندهای سنگ زنی است که از جنبه تولید، عملی و از جهت مسائل زیست محیطی قابل قبول باشند. مطالبی که در ادامه بحث آورده شده است بترتیب شامل موارد زیر خواهد بود:

1-2 نانو سیال ها

1-3 سیستم حداقل جریان سیال روانکار

1-4 انتقال حرارت در سنگ زنی

1-5 اهداف و روش های کاهش مصرف سیال در فرآیندهای سنگ زنی

¹ Tribological properties² Submerged Electro Discharge Process³ Minimum quantity lubrication

1-2- نانو سیال ها

در بسیاری از کاربردهای صنعتی نیاز به سیستم های انتقال حرارت مؤثر وجود دارد که این سیستم ها عموماً در فرم سیال در حال حرکت می باشند. سیالات خنک کاری نظیر آب، اتیلن گلیکول، هوا و روغن بصورت گسترده ای به عنوان خنک کننده در اتومبیل ها، تجهیزات الکترونیک، مولدهای انرژی، یخچال ها، سیستم های تهویه مطبوع و صنایع تولید محصولات شیمیایی بکار گرفته می شوند. با این حال، سیالات مذکور در مقایسه با مواد جامد دارای هدایت حرارتی بسیار پایینی هستند که منجر به راندمان پایین در انتقال حرارتی می گردد. لذا، سیالات حاوی نانو ذرات جامد معلق انتظار می رود که دارای هدایت حرارتی بالاتری باشند [4]. در سالیان گذشته، گسترش سریع تکنولوژی نانو منجر به ظهور دسته جدیدی از سیالات با نام نانوسیال گردیده است که ذرات جامد در ابعاد نانو بصورت سوسپانسیون در سیالی که سیال پایه خوانده می شود بحالت معلق حضور دارد. آب، اتیلن گلیکول، و یا مخلوطی با درصد مشخص از آنها به عنوان سیال پایه در بسیاری از مطالعات انجام گرفته انتخاب و بکار گرفته شده اند. نانوذرات اضافه شده به سیال عموماً از جنس فلزات و اکسیدهای متفاوت بوده اند [5]. لی و همکاران نشان دادند که ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بطور قابل ملاحظه ای در اثر حضور ذرات اکسید فلزی در داخل سیال پایه افزایش می یابد. این امر سبب کاهش قابل ملاحظه حجم سیال خنک کاری مورد نیاز در سیستم های مختلف می گردد [6].

بطور خلاصه می توان گفت که نانو سیال ها دسته جدیدی از سیالات مهندسی شده هستند که از طریق اضافه نمودن ذرات جامد در ابعاد نانو به سیال پایه نظیر آب، اتیلن گلیکول، روغن صنعتی، سیالات برشی و غیره و ایجاد یک توزیع یکنواخت و پایدار بدست می آیند. تحقیقات انجام گرفته نشان دادند که هدایت حرارتی و ضریب انتقال حرارت همرفت سیال پایه بصورت قابل ملاحظه ای از طریق حضور نانوذرات معلق در آن افزایش می یابد [7]. اخیراً، مطالعات تریبولوژی نشان دادند که روغن های روانکار دارای افزودنی های نانو ذرات (TiO_2 , CuO , MoS_2 ، الماس و غیره) ظرفیت حمل بار¹، خواص ضد سایشی و کاهش اصطکاک بهتری را دارا هستند [8]. این ویژگی ها سبب شده اند تا نانوسیال ها در کاربردهای خنک کاری و یا روانکاری در بسیاری از صنایع از جمله ساخت و تولید، حمل و نقل، انرژی، الکترونیک و غیره مورد توجه قرار گیرند. یافته های یو و همکاران² [9] نشان داد که نانوسیال ها می توانند در افزایش هدایت حرارتی جوششی³ بکار برده شوند. ذرات درشت در سیال سبب خوردگی سطح داخلی لوله ها گشته و یا باعث ایجاد خاصیت موینگی می گردد و از این جهت سبب محدود شدن کاربرد نانوسیال در میزان رسانایی حرارتی دوفازی⁴ می گردد. ساندرا و شارما⁵ [10] بصورت تجربی نشان دادند که انتقال حرارت توسط نانو سیالات حاوی نانوذرات فلزی معلق افزایش می یابد. پنت زالی و همکاران⁶ [11] مشاهده نمودند که بکارگیری نانوسیال ها بعنوان خنک کننده ها سبب بهبود عملکرد مبدل های حرارتی صفحه ای صنعتی می گردد. در گرمایش

¹ Load carrying capacity² You et al.³ Boiling thermal conductance⁴ Two-phase thermal conductance⁵ Sandar and Sharma⁶ Pantzali et al.

خانگی نیز در مقوله کاربرد انرژی پاک، نانو سیالات می توانند در سیستم های حرارت دهی ساختمان ها بکار گرفته شوند.

پودرهای بکار گرفته شده در تولید نانوسیالات از طریق روش های متفاوتی چون رسوب دهی بخار شیمیایی، سونوشیمیایی، سول-ژل¹، فرسایش لیزری² و غیره و با صرف هزینه نسبتاً بالایی تولید و سپس بصورت مکانیکی به سیال پایه اضافه می گردند [12]. تولید نانوسیال از طریق تخلیه الکتریکی غوطه ور روشی است که در سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته است و در آن نیازی به اضافه نمودن پودر به حالت دستی نیست. در این روش میله هایی از جنس مورد نظر برای نانو ذرات در داخل سیال دی الکتریک، که به عنوان سیال پایه محسوب می شود، غوطه ور گردیده و سپس منبع حرارتی در فرم تخلیه های الکتریکی سبب ذوب و تبخیر ماده الکترود می گردد. در اثر حرارت ایجاد شده ناشی از تخلیه های الکتریکی، علاوه بر ذوب و تبخیر شدن ماده الکترودها، سیال پیرامون کانال تخلیه تبخیر گردیده و باعث ایجاد یک حائل بخار با فشار بالا می گردد. در لحظه قطع جریان و با فروپاشی حباب ناشی از بخار، یک نیروی روبش قابل ملاحظه ای به بخار و مذاب الکترودها اعمال گردیده و باعث تمرکز³ و شکل گرفتن ذرات ریز⁴ می شود که در نهایت بصورت ذات جامد در داخل سیال پایه توزیع می گردند. کنترل اندازه ذرات دارای اهمیت بالایی است چراکه شعاع ذرات دارای اثر تعیین کننده ای بر روی خواص مورد انتظار از نانوسیال است. پارامترهای فرآیند، جنس سیال پایه و نوع شستشو (که تا حدودی تعیین کننده دمای سیال در گپ در حین تخلیه می باشد) در نحوه منقبض ساختن فاز بخار و اندازه ذرات تشکیل شده تعیین کننده هستند [13].

ذراتی که دارای ضریب هدایت حرارتی بالایی هستند، نظیر Ag ، Al_2O_3 ، ذرات و نانولوله های کربن، TiO_2 ، مس و غیره بیشتر در تولید نانوسیال ها مورد توجه قرار گرفته اند. جدول (1-1) نمایش دهنده ضریب هدایت حرارتی ذرات نام برده شده است. مورشد و همکاران [14] نانوذرات TiO_2 را به سیال پایه آب جهت تهیه نانو سیال با کمک سورفکتانت سیتل تریم اتیل آمونیوم بروماید⁵ (CTEB) اضافه نمودند و نشان دادند که ضریب هدایت حرارتی نانو سیال حاصله تا میزان 30٪ افزایش می یابد. خوان و همکاران⁶ [15] در زمینه انتقال حرارت نانوسیال مس تحقیق نمودند. این محققین از روش اضافه نمودن مرحله ای پودر نانوذرات مس در سیال پایه در تولید نانوسیال مسی استفاده کردند. نتایج مطالعات انجام گرفته نشان دادند رسوب نانوذرات از طریق بکارگیری نمک لورانت در آب به عنوان سورفکتانت کاهش یافته و هدایت حرارتی بطور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. ابراهیم و همکاران [16] نانوسیال های پایدار اکسید آلومینیم (Al_2O_3) و اکسید تیتانیوم (TiO_2) در سیال پایه پروپیلن گلیکول را از طریق ارتعاش آلتراسونیک طولانی مدت تهیه کردند. آنها چنین گزارش نمودند که هدایت حرارتی نانوسیال بصورت غیرخطی با افزایش حضور نانوذرات در سیال پایه افزایش می یابد. همچنین نتایج نشان دادند که افزایش هدایت حرارتی مستقل از دما بوده و به موازات رفتار پروپیلن گلیکول خالص می باشد.

¹ Sol-gel

² Laser ablation

³ Condensation

⁴ Nucleation

⁵ Cetyltrimethyl-ammonium bromide

⁶ Xuan et al.

جنس ذرات و اندازه آنها در ویژگی های نانوسیال حاصله، از جمله ضریب هدایت حرارتی نانوسیال، بسیار تعیین کننده است. همچنین، پایداری نانوسیال یک فاکتور مهم دیگر برای ایجاد خواصی با ثبات برای نانوسیال تولیدی در کاربردهای صنعتی می باشد. عوامل متعددی از جمله میزان تمرکز ذرات، اندازه قطری ذرات، خواص سیال پایه، هدایت الکتریکی و عدد pH بر روی پایداری نانوسیال تاثیر گذار هستند. این فاکتورها بر روی عکس العمل های پیچیده ای که در نانوسیال وجود دارند، شامل حرکت های براونی ذرات، نیروهای واندروالانس، و نیروی دفع الکترو-استاتیک کولمب، تاثیرگذار هستند. جنگ و چوئو¹ [17] به مطالعه نقش حرکت براونی در ارتقاء هدایت حرارتی نانوسیالات پرداختند. نتایج حاصل از تحقیقات آنها نشان داد که حرکت براونی نانوذرات در مقیاس نانو یک مکانیزم کلیدی حاکم در رفتار حرارتی نانو سیالات است. واداسز² [18] به مطالعه اثر سطح به حجم نانوذرات معلق در سیال، تحت عنوان سطح ویژه نانوذرات بر روی هدایت حرارتی نانوسیال حاصله پرداختند. نانوسیالات مورد مطالعه بصورت نانوذرات مس در سیال پایه اتیلن گلیکول و نانو لوله های کربن در نفت را تشکیل می دادند. نتایج مطالعات نشان دادند که سطح ویژه دارای اثر قابل ملاحظه ای بر روی هدایت حرارتی است و افزایش سطح ویژه ذرات سبب ارتقاء هدایت حرارتی سیال می گردد. لی و همکاران³ [19] به مطالعه پایداری نانو سیال مس از طریق بررسی اثرات عدد pH، نوع سورفکتانت و درصد عامل توزیع کننده در نانوسیال پایه آب پرداختند. این محققین چنین گزارش نمودند که افزایش پتانسیل زتا⁴ مانع ته نشین شدن نانوذرات می شود و سوسپانسیون نانوذرات باقی می ماند.

جدول 1-1 هدایت حرارتی برخی از نانو ذرات مطرح در تولید نانوسیالات [17]

جنس ذرات نانو	TiO ₂	CuO	Al ₂ O ₃	Ag
ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)	8/5	20	30	429

روش های متفاوتی برای تعیین پایداری نانو سیالات وجود دارد که از جمله آنها استفاده از شدت طیف جذب⁵ توسط اسپکتروسکوپی UV-Vis و پتانسیل زتا می باشد. زتا پتانسیل سنج در حقیقت نمایش دهنده نیروی دفع کولمب می باشد که مانع از کلوخه شدن و ته نشین شدن ذرات در ته ظرف محتوی نانوسیال می گردد. با این وجود، فاکتورهای متعددی چون اندازه ذرات، میزان غلظت ذرات/یون ها، و عدد pH می توانند بر روی مقدار پتانسیل-زتا تاثیر گذار باشند [19].

¹ Gang Choi

² Vadasz

³ Li et al.

⁴ پتانسیل زتا به عنوان یک پتانسیل الکتریکی در پیرامون ذرات می باشد که با پایداری محلول کلئیدی ارتباط دارد. محلول های کلئیدی با پتانسیل زتای بالا (مثبت یا منفی) پایداری بهتری دارند. در حالت کلی گفته می شود که نانوسیالات با پتانسیل زتای 40 mV تا 60 mV پایداری قابل قبول و نانوسیالات دارای پتانسیل زتای بالای 60 mV پایداری خیلی خوبی دارند.

⁵ Intensity of absorption spectrum

1-3- سیستم حداقل جریان سیال روانکار (MQL)

سیستم خنک کاری با حداقل جریان سیال روانکار (MQL) مربوط است به کاربرد یک امولسیون با ویژگی های مطلوب جهت تأمین حداقل مقدار سیال برشی در وجه مشترک ابزار و قطعه کار. عموماً نرخ جریان سیال در MQL در محدوده 50 تا 500 میلی لیتر در هر ساعت (ml/h) است که بسیار کمتر از مقدار سیالی است که بطور متداول در شرایط خنک کاری جریان سیال بکار برده می شود [20]. سیستم MQL بصورت نسبتاً گسترده ای در بسیاری از فرآیندهای ماشینکاری نظیر سوراخکاری، فرزکاری و تراشکاری مورد بررسی قرار گرفته است. بخش تحقیق و توسعه دانش ماشینکاری پیشرفته¹ (AMTD) در شرکت فورد یکی از شرکت های پیشگام در تلاش برای بکارگیری پروسه های MQL در تولید محسوب می شود. یکی از متداول ترین کاربردهای MQL در ابعاد گسترده، در مته کاری سوراخهای روغن میل لنگ های فولادی می باشد. صرفه جویی انجام شده در بخش هزینه ها به سبب کاهش بکارگیری و دفع سیال برشی و در عین حال، حفظ راندمان و کیفیت محصول دلیلی است بر اثبات اینکه یک فرآیند MQL توسعه یافته می تواند هم از جنبه زیست محیطی و هم از لحاظ کاهش هزینه های تولید راهگشا باشد [21].

با این حال، کاربرد MQL در سنگ زنی یک حیطه مطالعاتی نسبتاً جدید بشمار می رود که فرصت های تحقیقاتی وسیعی را در خود جای داده است. در شرایط اعمال سیال برشی در ناحیه سنگ زنی ابتدا سیال تحت تبخیر اتمیزه² قرار می گیرد که سبب افزایش نرخ انتقال حرارت بین قطعه کار و سیال می شود. با افزایش بیشتر درجه حرارت، یک فیلم بخار مابین قطعه کار و سیال تشکیل می گردد که به عنوان یک عایق عمل نموده و مانع از انتقال حرارت به سیال می شود. در نتیجه دمای قطعه کار سریعاً افزایش یافته و منجر به سوختن سطح کار می گردد [22]. روانکاری MQL تحت شرایط روانکاری مرزی یا فیلم نازک³ اتفاق می افتد که در آن ویژگی های تریبولوژی سیال دارای اهمیت زیادی بوده و درجه جدایش سطوح لغزش نه تنها به ویژگی های شیمیایی و فیزیکی روانکار، بلکه به ماهیت سطوح و حرکت نسبی آنها بستگی دارد. در کنار این، فرآیند ماشینکاری با استفاده از MQL در شرایط بکارگیری نانوسیال به عنوان سیال روانکار در سالیان اخیر مورد توجه قرار گرفته است. پایداری حرارتی- مکانیکی ذرات اضافه شده به سیال روانکار در وجه مشترک ابزار-قطعه کار یک چالش عمده در فرآیندهای ماشینکاری سایشی با انرژی زیاد⁴ نظیر سنگ زنی است. اتفاقی بودن یا متغیر بودن فرآیند بخاطر ابزار برشی چند لبه رندوم⁵ و نیز سایش و شکست دانه های ساینده یک ویژگی اجتناب ناپذیر در فرآیند براده برداری سایشی است. از این رو انتخاب سیال مناسب برای ارتقاء خواص تریبولوژی یک فاکتور مهم در عملکرد ماشینکاری MQL می باشد چرا که حداقل حجم سیال بایستی پاسخگوی عملکردهای اصلی سیال روانکار شامل خنک کاری و روانکاری ناحیه سنگ زنی و در کنار آن زدودن براده ها از فصل مشترک ابزار-قطعه کار باشد [23]. مطالعه حاضر به منظور

¹ Advanced Manufacturing Technical Development

² Nucleated boiling

³ Boundary lubrication or thin film

⁴ High-energy abrasive machining processes

⁵ Random multi-point cutting tool

بسط دانش فنی در زمینه سیستم روانکاری MQL با بکارگیری نانوسیالات گرافیت و اکسید مس و بررسی نقش پارامترهای ماشین کاری در خروجی های فرآیند از جهت نیروهای برشی، دمای سنگ زنی و سلامت سطح قطعه کار، انجام گرفته است.

1-4- انتقال حرارت در فرآیند سنگ زنی

فرآیند سنگ زنی انرژی ورودی بالایی را به ازای واحد حجم ماده برداشته شده تولید می نماید. بخش عمده ای از این انرژی تبدیل به حرارت می گردد که سبب افزایش دما و آسیب های حرارتی به قطعه کار نظیر سوختن، تغییر فاز، تنش های پسماند کششی، ترک ها، کاهش استحکام خستگی، اعوجاج حرارتی و عدم دقت ابعادی می گردد [24 و 25]. مطالعات متعددی در مورد جنبه های تئوری و عملی انتقال حرارت در فرآیند سنگ زنی انجام گرفته است. تحقیقات اولیه در زمینه پیش بینی دمای سطح قطعه کار در سنگ زنی خشک در شرایط عدم حضور انتقال حرارت همرفت ناشی از حذف سیالی که نقش قابل ملاحظه ای در انتقال حرارت از وجه مشترک ابزار و قطعه کار دارد، انجام شده است. تحقیقات بعدی در مورد بسط دانش انتقال حرارت به قطعه کار، ذرات ساییده، سیال سنگ زنی و براده صورت پذیرفته اند. مدل های حرارتی با هدف تخمین دمای سطح قطعه کار، توزیع شار حرارتی در ناحیه سنگ زنی، کسر انرژی حرارتی وارده به قطعه کار، و ضریب انتقال حرارت همرفت برای عمل خنک کاری در سطح قطعه کار توسعه پیدا کرده اند. مطالعه تجربی در زمینه انتقال حرارت در سنگ زنی نیازمند اندازه گیری های دقیق درجه حرارت می باشد. روش های اندازه گیری دما در سنگ زنی عبارتند از تصویر برداری حرارتی، فیبرنوری¹، ترموکوپل فویل/قطعه کار² (تک قطب)، و ترموکوپل جا زده شده³ (دوقطبی) [26 و 27].

در حین فرآیند سنگ زنی، بخش عمده ای از انرژی مصرفی صرف لغزش سطوح ساییده شده از دانه های ساییده در برابر سطح قطعه کار می گردد. سطوح ساییده شده، لبه های تخت شده و ساییده شده ای از ذرات ساییده هستند که بدون انجام عمل براده برداری بر روی سطح کار می لغزند. نیروهای سنگ زنی، که تحت عنوان نیروی متعامد (F_n) و نیروی سنگ زنی مماسی (F_t) می باشد در شرایط پارامترهای ثابت سنگ زنی با افزایش سطح تخت ساییده شده⁴ (A_t) طبق روابط زیر افزایش می یابد:

$$F_t = F_{t,c} + F_{t,sl} = F_{t,c} + \mu \times P \times A_a \quad (1-1)$$

$$F_n = F_{n,c} + F_{n,sl} = F_{n,c} + P \times A_a \quad (2-1)$$

که در آن $F_{t,c}$ و $F_{n,c}$ بترتیب نیروهای برشی مماسی و عمودی بوده و $F_{t,sl}$ و $F_{n,sl}$ بترتیب نیروهای لغزشی مماسی و عمودی هستند. $F_{t,sl}$ برابر است با حاصل ضرب $\mu \times P \times A_a$ که μ ، P و A_a بترتیب عبارتند از ضریب اصطکاک لغزشی، تنش فشاری و سطح تخت ساییده شده. در تمام شرایط سنگ زنی مورد نظر، اجزاء نیروی برشی

¹ Optical fiber

² Foil/workpiece thermocouple

³ Embedded thermocouple

⁴ wear-flat area

($F_{n,c}$, $F_{t,c}$) ثابت هستند. از این جهت با بکارگیری روانکاری که دارای خواص تریبولوژی ممتازی می باشد، بخصوص در شرایطی که یک فیلم سطحی بتواند بر روی سطح ساییده شده دانه های ساییده رسوب نماید، ضریب اصطکاک (μ) بطور قابل ملاحظه ای کاهش خواهد یافت. این امر سبب کاهش میزان هدر روی ناشی از اصطکاک لغزشی گردیده و از این رو شار حرارتی و دمای سنگ زنی با حفظ نرخ برداشت ماده، کاهش یافته و عمر چرخ ساییده بیشتر می شود [28].

1-5- اهداف و روش های کاهش مصرف سیال در فرآیندهای سنگ زنی

سنگ زنی یک فرآیند ماشین کاری دقیق است که بطور گسترده ای برای تولید قطعاتی که نیازمند تلرانس های دقیق و سطوح نهایی هموار هستند مورد استفاده قرار می گیرد. سیالات برشی در فرآیند سنگ زنی برای اهداف متعددی از قبیل بهبود عمرسنگ، کاهش تغییر شکل حرارتی قطعه کار، بهبود صافی سطح، و زدودن براده ها بکار گرفته می شوند. نرخ بکارگیری سیال در حجم بالا در سیستم های خنک کاری در کارگاه های تولیدی بسیار بارز است، بگونه ای که فرآیند سنگ زنی بعنوان یکی از فرآیندهای تولیدی که شدیداً بصورت ناسازگار با طبیعت می باشد، شناخته شده است. حجم قابل ملاحظه ای از گرد و غبار در طی سنگ زنی تولید می گردد و در شرایط بکارگیری سرعت های بالاتر چرخ ساییده وضعیت وخیم تر می شود. چن و همکاران¹ از طریق اندازه گیری تمرکز گرد و غبار و توزیع اندازه قطرات در فضای کارگاه چنین نتیجه گیری نمودند که نرخ تولید غبار در فرآیند سنگ زنی عموماً چندین برابر بالاتر از شرایط حاکم در تراشکاری است [29]. میلیون ها کارگر روزانه در سراسر جهان با فرآیند تولید درگیر هستند. با این وجود، خطرات سلامتی اپراتورهای ماشین و دیگر کارگرانی که در محیط حاوی غبارهای مضر تنفس می کنند غالباً نادیده گرفته می شود. هزینه بالای دفع و بازیابی سیال سنگ زنی هزینه هایی است که بر روی قیمت نهایی محصول تمام شده تاثیر گذار خواهد بود. با وضع قوانین زیست محیطی سخت گیرانه تر، هزینه های دفع و بازیابی سیال سنگ زنی حتی بالاتر می رود. طبق قوانین وضع شده توسط سازمان سلامت و ایمنی کارکنان² (OHS) حد مجاز غبار و ریزگردهای³ موجود در کارگاههای تولیدی برابر 5 mg/m^3 به ازای 8 ساعت برای غبار روغن های صنعتی و برابر 15 mg/m^3 برای دیگر ریزگردهایی که طبقه بندی نشده اند⁴ (PNOC) می باشد. حتی برخی از موسسات استاندارد و ایمنی نظیر موسسه ایمنی و سلامت کارکنان ایالت متحده⁵ (NIOSH) رعایت سطح مجاز ریزگردهای موجود در محیط کارگاههای صنعتی را در حد پایین تری برابر 5 mg/m^3 الزامی ساخته اند [30-32]. بنابراین، لازم است که میزان آلاینده ها و سطح غبار معلق در محیط کارگاههای صنعتی در کشور ما نیز در حدود استاندارد کاهش داده شود چرا که حضور این آلاینده ها هزینه های بالاتری را از جهت بیماری های پوستی و تنفسی کارکنان بر جامعه تحمیل می نماید.

¹ Chen et al.

² Occupational Safety and Health Administration

³ Aerosol

⁴ Particulates Not Otherwise Classified

⁵ National Institute for Occupational Safety and Health

مهمترین مانع در برابر جایگزینی یا حذف سیال برشی، انرژی تولید شده در حین فرآیند ماشینکاری است که بصورت حرارت در قطعه کار پخش می شود و سبب افزایش دما، آسیب های حرارتی، و عدم دقت ابعادی قطعه تمام شده می گردد. بکارگیری سیالات برشی عمدتاً از طریق فراهم سازی روانکاری و خنک کاری در حین پروسه ماشینکاری، یک فاکتور مهم در کنترل آثار نامطلوب ذکر شده می باشند. روانکاری باعث کاهش توان مصرفی ماشینکاری و حرارت تولیدی ناشی از آن می گردد و درعین حال باعث ارتقاء کیفیت سطحی قطعه کار و کاهش سایش چرخ ساینده می شود. خنک کاری انجام شده توسط سیال سبب دور ساختن حرارت از ابزار و قطعه کار می گردد [33].

یک جایگزین برای بکارگیری سیال برشی در حجم گسترده، ماشینکاری خشک (ماشینکاری بدون استفاده از هر نوع سیال برشی) می باشد. تحقیقات در زمینه ماشینکاری خشک عمدتاً بر روی توسعه ابزارهای مناسب و ایجاد پوشش برای این ابزارها متمرکز گردیده است. اگرچه ماشینکاری خشک در برخی از شرایط امکان پذیر است، بسیاری از موارد عمده در زمینه عمر ابزار، آسیب حرارتی قطعه کار، و غیره، هنوز بصورت موانعی عمده بر سر راه این پروسه وجود دارند. آوریخ و همکاران¹ [34] چنین گزارش داده اند که سنگ زنی خشک با مشکلات فنی متعددی همراه است که از آن جمله می توان سایش چرخ سنگ زنی، آسیب های حرارتی، سلامت سطح نامطلوب قطعه کار، و از دست رفتن دقت ابعادی و هندسی قطعه کار را نام برد. در مطالعه دیگر، مالکین و گوو² [35] در جمع بندی مشاهدات خود چنین آورده اند که حذف سیال سنگ زنی سبب می گردد که سرعت پرشدن خلل و فرج در سطح ساینده چرخ سنگ زنی بشدت بالا رفته و تمایل برای تراکم و جمع شدن³ ذرات براده در این فرورفتگی ها بالاتر رود. این امر یک فاکتور منفی در فرآیند سنگ زنی بحساب آمده و سبب می گردد تا سنگ زنی خشک تنها در حالت ماشینکاری قطعات با ابعاد بسیار کوچک مورد توجه باشد. محدودیت های حاکم در فرآیند سنگ زنی خشک می تواند در بسیاری از موارد توسط بکارگیری مکانیزم روانکاری با حداقل سیال خنک کاری مرتفع گردد. بنابراین، در سالیان اخیر سنگ زنی MQL مورد توجه قرار گرفته است که در آن مخلوطی از سیال روانکار و هوا تحت فشار مشخصی بجای جریان سیال به موضع سنگ زنی هدایت می شود [36]. این فرآیند قادر است تا تولید حرارت اصطکاکی را کاهش داده و سبب خنک کاری در وجه مشترک ابزار و قطعه کار گردد که این امر باعث می شود تا دمای قطعه کار در سطوح پایین تری نسبت به حالت ماشین کاری خشک نگه داشته شود. ویژگی دیگر این فرآیند آن است که در شرایط بکارگیری صحیح آن، قطعات و براده ها بصورت خشک باقی می مانند که سبب بهبود قابلیت جابجایی آنها می شود. با این حال، از آنجایی که سنگ زنی یک فرآیند سایشی است، سبب تولید حرارت بسیار بالایی در فصل مشترک ابزار قطعه کار می گردد. بکارگیری MQL در سنگ زنی نسبت به سایر فرآیندهای براده برداری دارای چالش های بیشتری بوده و در سالهای اخیر مطالعاتی جهت بسط دانش فنی و بهبود خروجی های فرآیند سنگ زنی با سیستم حداقل جریان سیال روانکار (MQL) انجام گرفته است.

¹ Aurich et al.

² Malkin and Guo

³ Clog and aggregation

بعلاوه، در تلاش برای بهبود هدایت حرارتی سیال ها جهت پاسخ گویی به نیازهای روز افزون تجهیزات و فرآیندهای مختلف که همراه با شار حرارتی بالایی در حین پروسه هستند، سوسپانسیون هایی از نانو ذرات مختلف معلق در سیال ها بعنوان جایگزینی با پتانسیل بالا ظهور یافتند. نانو سیال ها دسته جدیدی از سیالات مهندسی شده هستند که از طریق توزیع ذرات جامد در ابعاد نانو در یک سیال نظیر آب، روغن های روانکار و غیره که بعنوان سیال پایه محسوب می شوند، تولید می گردند. این نانو سیال ها انتظار می رود که دارای ویژگی های حرارتی و تریبولوژی ممتازی نسبت به سیال تک فاز (سیال پایه) باشند. بهبود خواص حرارتی این نانوسیالات عمدتاً بدلیل فرکانس برخورد¹ بالاتر و سطح تماس بزرگتر مابین نانوذرات جامد و فاز مایع است. عموماً نانوسیال ها برحسب جنس ذرات حاضر در سیال پایه به سه دسته عمده نانوسیال های پایه فلزی، اکسید فلزی، و کربنی طبقه بندی گردیده اند. هرکدام از این نانو سیال ها دارای ویژگی های هدایت حرارتی و تریبولوژی منحصر بفردی هستند که برحسب این ویژگی ها در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می گیرند. یکی از ویژگی های عمده ای که در نانوسیال های مورد نظر برای فرآیندهای ماشینکاری، نظیر فرآیند سنگ زنی، بایستی لحاظ گردد کاهش ضریب اصطکاک بین سطوح لغزنده در کنار بحث ارتقاء ضریب هدایت حرارتی سیال روانکار می باشد. این امر بدین خاطر است که فرآیندهای براده برداری و بخصوص فرآیندهای براده برداری سایشی نظیر سنگ زنی با فشار و درجه حرارت بالا در فصل مشترک ابزار و قطعه کار توام می باشند. از این جهت کاهش دمای تولید شده در حین فرآیند از طریق کاهش ضریب اصطکاک سطوح لغزشی، و در نتیجه آن کاهش میزان سایش و افزایش عمر ابزار، و کاهش آسیب های سطحی به قطعه کار با حفظ راندمان ماشینکاری دارای اهمیت بالایی می باشد. در این راستا، توسعه های انجام گرفته در زمینه نانو سیالات در سالهای اخیر جایگزین مناسبی را برای سیال های برشی فراهم کرده است که می توانند در سنگ زنی MQL مورد استفاده قرار گیرند. نتایج حاصل از مطالعات وو و همکاران² [37] نشان داد که سیال روانکاری حاوی نانو ذرات دارای ظرفیت هدایت حرارتی بالایی بوده و خصوصیات ضد سایش و کاهش اصطکاک آنها نسبت به سیال پایه ارتقا یافته است. از این رو، نانو ذرات اضافه شده به سیال پایه که در شکل غبار توام با هوای فشرده به فصل مشترک سنگ ساینده و قطعه کار پاشیده می گردد سبب بهبود عملکرد فرآیند سنگ زنی می شود. از این رو، انتقال حرارت بالاتر و خصوصیات تریبولوژی بهتر نانو سیال ها سبب می گردد تا خنک کاری و روانکاری بهتری را در حین فرآیند سنگ زنی نسبت به MQL با سیال ساده فراهم ساخته و این فرآیند را از نظر تولید عملی سازد.

انتظاری که از نانوسیال های تشکیل یافته از نانوذراتی چون گرافیت و اکسیدهای فلزی در سیال پایه موردنظر، که بعنوان نانو روانکارها بکار گرفته می شوند این است که بطور مؤثری باعث کاهش هدر روی ناشی از اصطکاک لغزشی از طریق تأمین نانوذرات فعال اضافه شده به روانکار³ و تشکیل یک فیلم سطحی پایدار و با اصطکاک پایین در وجه مشترک لغزشی دانه های ساینده چرخ سنگ و سطح قطعه کار گردد. در مطالعه حاضر، قابلیت نانوسیالات حاوی نانوذرات گرافیت و اکسید مس تولید شده به روش تخلیه الکتریکی غوطه ور (SEDM) در فرمول بندی

¹ Collision frequency

² Wu et al.

³ Active lubricant additives

جدید حاوی سیال گیاهی کانولا به عنوان سیال برشی در فرآیند سنگ زنی MQL مورد مطالعه قرار گرفته است. دستیابی به مشخصات ویژه ای از جهت ارتقاء قابلیت روانکاری و خنک کاری سیستم روانکاری مورد استفاده به همراه کاهش مصرف سیال برشی در فرآیند سنگ زنی و ایجاد مشخصات مطلوب سلامت سطح قطعات ماشینکاری شده از اهداف مطالعاتی این پژوهش می باشند.



بخش اول

پایه‌های نظری و پیشینه پژوهش

فصل دوم

پیشینه تحقیق

فصل دوم

پیشینه تحقیق

1-2- مقدمه

در این بخش، تعدادی از مقالات چاپ شده در زمینه نانو سیال، ویژگی ها و بکارگیری آنها بعنوان روانکار در فرآیندهای ماشین کاری، از جمله سنگ زنی، مورد بررسی قرار می گیرند. مطالب ارائه شده در این بخش شامل موارد زیر هستند:

- معرفی نانوسیال های تولید شده از طریق یک سیستم دو مرحله ای شامل اضافه نمودن نانوذرات تجاری در داخل سیال پایه، و یا سنتز نانوذرات در شرایط آزمایشگاهی و سپس اضافه نمودن این نانوذرات به سیال پایه جهت تهیه نانوسیال مورد نظر و بررسی ویژگی های نانوسیالات تولید شده،
- معرفی روش های ارائه شده در جهت تولید یک مرحله ای نانوسیال های مختلف از طریق بکارگیری فرآیند تخلیه الکتریکی غوطه ور و بررسی ویژگی های این نانوسیال ها،
- بررسی عملکرد نانوسیالات به عنوان روانکار در شرایط ماشینکاری MQL، با تأکید بر کاربرد آن در فرآیند سنگ زنی،
- بررسی روش های ارائه شده در زمینه شبیه سازی انتقال حرارت در قطعه کار در فرآیند ماشینکاری برای تعیین سهم قطعه کار از حرارت تولید شده حین سنگ زنی و تخمین ضرایب انتقال حرارت همرفت سیستم خنک کاری استفاده شده می باشد.

2-2- تولید و بررسی ویژگی های نانوسیالات مختلف

1-2-2- بررسی ویژگی نانوسیالات تولید شده به روش دو مرحله ای

خواصی که عملکرد حرارتی یک سیال را تعیین می کنند عموماً عبارتند از هدایت حرارتی، ویسکوزیته، ظرفیت حرارتی ویژه، و چگالی سیال. سیالاتی نظیر هوا، آب، اتیلن گلیکول، و روغن های معدنی از جمله موادی هستند که به عنوان محیط انتقال حرارت در کاربردهایی چون تولید انرژی، تولید مواد شیمیایی، خودروها، تجهیزات مرتبط با پروسه های محاسباتی¹، تهویه مطبوع و یخچال ها بکار گرفته می شوند. با این حال، قابلیت هدایت حرارتی آنها بدلیل ضریب هدایت حرارتی پایینی که دارند محدود است بگونه ای که ضریب هدایت حرارت آنها در مقایسه با فلزات بسیار کمتر می باشد [38].

¹ Computing process systems

در تلاش برای بهبود هدایت حرارتی سیالات مذکور، توزیع ذرات جامد در ابعاد میکرونی در این سیالات مورد مطالعه قرار گرفته است. آهو¹ [39] با بررسی ذرات پلی استایرن کروی شکل به قطر 50 و 100 μm در محلول کلرید سدیم در گلیسرین، و متزگر و همکاران² [40] با بررسی ذرات کروی PMMA³ به قطر 1 تا 2 mm در سیال پایه تریتون X-100 (74 wt%)، کلرید روی (13/4 wt%)، و آب (9/2 wt%) به مطالعه هدایت حرارتی و ویژگی های جریان دوغاب های حاصله پرداختند. یکی از مشکلات مرتبط با بکارگیری دوغاب ها، عملکرد سایشی ذرات است که سبب خوردگی اجزاء سیستم می گردد. ثانیاً ذرات در ابعاد میکرو بدلیل جرم بالایی که دارند تمایل زیادی به ته نشینی در سوسپانسیون تشکیل یافته دارند که سبب رسوب در مسیر جریان سیال و افزایش افت فشار در خطوط جریان سیال می گردد. کاهش اندازه ذرات تا حدود نانومتر، پتانسیل بالایی را در جهت غلبه بر مشکلات و موانع ذکر شده فراهم می سازد. ماسودا و همکاران⁴ [41] برای نخستین بار هدایت حرارتی و ویسکوزیته سیالات حاوی نانوذرات را گزارش نمودند. همچنین چوی و ایستمن⁵ [42] تحقیقاتی را در زمینه ارتقاء هدایت حرارتی سوسپانسیون های حاوی نانوذرات مس انجام دادند و برای نخستین بار نام "نانوسیال" را برای کلئید حاصله قرار دادند. در کنار غلبه بر مشکلات مرتبط با بکارگیری ذرات در ابعاد میکرونی، استفاده از سوسپانسیون حاصل از حضور نانوذرات در سیال پایه سبب ارتقاء هدایت حرارتی تا مقادیر بالاتر از میزان پیش بینی شده توسط روابط ماسکول می گردد. نتایج تجربی منتشر شده در زمینه هدایت حرارتی ناشی از حضور نانوذرات جامد متفاوت، نظیر مس، نقره، طلا و اکسیدهای فلزی چون آلومینیا، تیتانیا، و اکسید آهن، داری تنوع زیادی بوده و مکانیزم های متفاوتی در زمینه ارتقاء هدایت حرارت این نانوسیالات مطرح شده است. مکانیزم های پیشنهاد شده جهت تفسیر ارتقاء هدایت حرارتی نانوسیال ها عبارتند از حرکت براونی نانوذرات، لایه لایه شدن سیال در پیرامون نانوذرات، انتقال حرارت تشعشی نزدیک میدان⁶، و تجمع نانوذرات [43]. با این حال، غالباً تفاوت قابل ملاحظه ای بین مقادیر تجربی و مقادیر حاصل از روابط ارائه شده وجود دارد. این امر نیاز به ارائه راه حل جهت رفع اختلاف موجود بین مشاهدات تجربی و مقادیر عددی و ایجاد تکرارپذیری داده های بدست آمده را آشکار می سازد. از این جهت تلاش برای دستیابی به یک مدل فیزیکی دقیق که بتواند در برگیرنده ارتقاء غیرعادی در هدایت حرارتی نانوسیال مورد نظر باشد از اهمیت بالایی برخوردار است. این امر می تواند از طریق گزارش دقیق اجزاء نانو سیال تحت آزمایش نظیر نوع سورفکتانت، جنس مواد ذرات، سیال پایه، روش سنتز نانوذرات و آلودگی های احتمالی از حضور عوامل دیگر در سیال مورد مطالعه قابل دستیابی باشد [44].

نانو لوله های کربنی⁷ (CNTs) بدلیل ساختار ویژه ای که دارند دارای خواص مکانیکی و الکتریکی منحصر به فردی هستند. این مواد دارای هدایت حرارتی بالایی بوده و عموماً از فرآیندهای تخلیه الکتریکی یا تجزیه حرارتی بخار ماده هیدروکربنی برای تولید آنها در حجم بالا استفاده می گردد. از این لحاظ انتظار می رود که سوسپانسیون

¹ Ahuja² Metzger et al.³ Poly methyl methacrylate⁴ Masuda et al.⁵ Choi and Eastman⁶ Near field radiative heat transfer⁷ Carbon nano tubes

حاوی نانو لوله های کربن دارای هدایت حرارتی بالایی باشد و بتوان از آن در سیستم های انرژی استفاده نمود. در این راستا، خای و همکاران¹ [45] به مطالعه نقش حضور نانو لوله های کربنی چند دیواره در سیال پایه از جنس سیالات قطبی شامل آب دی یونیزه شده و اتیلن گلیکول بدون سورفکتانت و در سیال غیر قطبی دیسن² با حضور اولیلامین به عنوان سورفکتانت پرداختند. از آنجایی که که CNT ها هیدروفوبیک³ هستند این قابلیت را دارند که در داخل آب مقطر و یا اتیلن گلیکول بدون استفاده از سورفکتانت توزیع گردند. با این حال نانو لوله ها قابلیت توزیع در داخل سیال غیر قطبی نظیر دیسن را ندارند. از این رو این محققین تلاش نمودند تا از طریق اضافه نمودن عوامل عمل کننده هیدروفیلیک⁴ در سطح نانولوله های کربن امکان ایجاد یک نانو سیال با ثبات را فراهم سازند. مطابق شکل 1-2 نانو ذرات قبل از اضافه شدن به سیال پایه بصورت به هم پیوسته و در هم تنیده بودند. متوسط قطر و طول گزارش شده برای نانو لوله های کربنی بترتیب برابر 15 nm و 30 μm می باشد. این محققین ابتدا از اسید نیتریک و مخلوط اسید نیتریک و سولفوریک برای اصلاح سطوح نانو لوله های کربنی استفاده نمودند. یک گرم از نانو لوله ها به 40 ml از مخلوط اسید اضافه شده و به مدت یک ساعت جوشانده شد. سپس نمونه حاصله توسط آب مقطر برای چندین بار شستشو و فیلتر گردید. نانو لوله های حاصله بمدت 12 ساعت در دمای 0°C 150 نگه داری شد تا آب اضافه شده به آن خشک گردد. این مرحله تحت عنوان اصلاح شیمیایی نام گذاری گردید. پس از مرحله اصلاح شیمیایی، نانو لوله های حاصله به سیال پایه توسط میکسر اضافه گردید. سپس مخلوط حاصله تحت ارتعاشات آلتراسونیک قرار گرفتند. چنین گزارش شده است که پروسه بیان شده سبب تولید نانوسیال در سیال پایه آب مقطر و اتیلن گلیکول (EG) با ثبات بالا بدون نیاز به سورفکتانت گردیده است. همچنین برای ایجاد ثبات در نانوسیال پایه دیسن (DE) مقدار بسیار کمی از سورفکتانت اولیلامین به سیال پایه اضافه گردید. در تحقیق انجام یافته از روش سیم داغ گذرا⁵ برای اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی استفاده شده است. در سیستم بکار رفته از سیم پلاتینی به قطر 67/2 μm برای سیم داغ، هم به عنوان واحد حرارت دهی و هم به عنوان اندازه گیر مقاوم الکتریکی استفاده گردید. این سیم دارای پوشش تفلونی به ضخامت 17 μm به عنوان عایق می باشد. نتایج منتشر شده نشان دادند که نانو لوله های کربنی که تحت فرآیند اصلاح شیمیایی قرار نگرفته اند دارای تمایل بالایی برای بهم چسبیدن و ته نشین شدن در ته ظرف محتوی نانوسیال، حتی برای بسیاری از سیالاتی که در معرض ارتعاشات آلتراسونیک طولانی مدت قرار گرفته اند، هستند (شکل 2-2-الف). در نقطه مقابل، در سیالات پایه قطبی نظیر آب مقطر، اتیلن گلیکول و الکل چنین گزارش شده است که نانو لوله های کربنی که تحت فرآیند اصلاح شیمیایی قرار گرفته اند دارای پایداری بسیار بالایی بوده و حتی پس از گذشتن 2 ماه، نانوسیال ثبات بالایی را از خود نشان می دهد (شکل های 2-2-ب و ج).

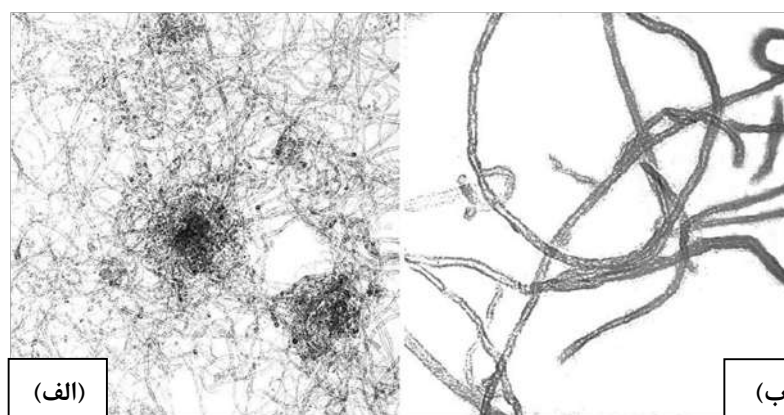
¹ Xie et al.

² Decene

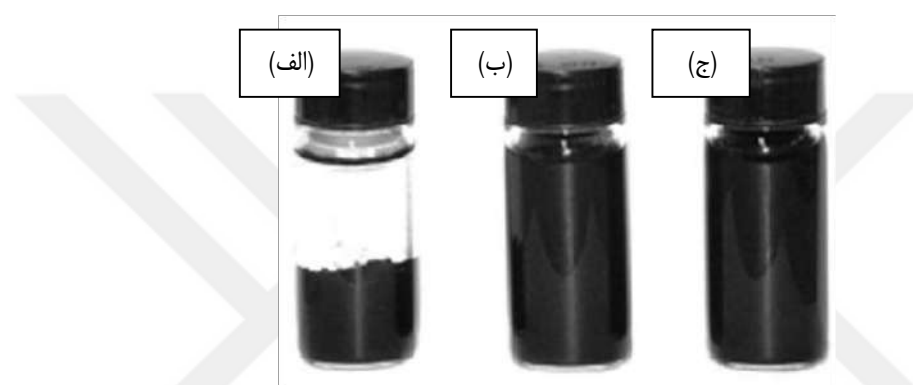
³ Hydrophobic

⁴ Hydrophilic

⁵ Transient hot-wire method



شکل 1-2 تصاویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانولوله های کربنی؛ الف) نانولوله ها قبل از عملیات اصلاح شیمیایی (PCNTs¹) و ب) نانولوله ها پس از عملیات اصلاح شیمیایی (TCNTs²) [45].



شکل 2-2 تصاویر تهیه شده از سوسپانسیون نانولوله های کربنی؛ الف) سوسپانسیون با 1٪ حجمی PCNT در آب مقطر که در مدت 5 min بعد از اتمام قرارگیری در حمام آلتراسونیک برای مدت طولانی، ته نشین گردیده است، ب) سوسپانسیون 0/1٪ حجمی TCNT در آب مقطر پس از دو ماه زمان دهی برای ته نشینی، ج) سوسپانسیون 0/1٪ حجمی TCNT در اتیلن گلیکول پس از دو ماه زمان دهی برای ته نشینی [45].

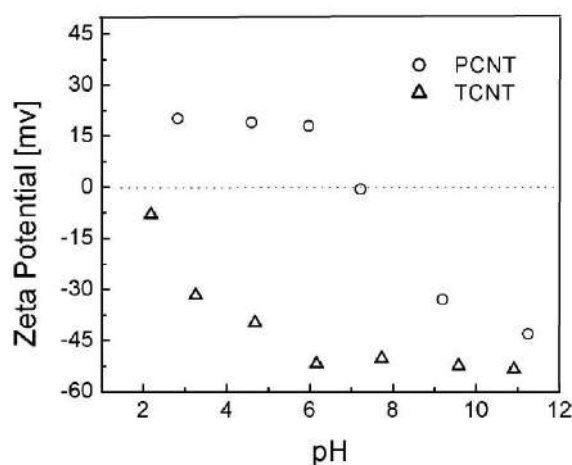
همچنین، خای و همکاران [45] اثر اکسیداسیون نانو لوله های کربنی از طریق بکارگیری عامل اسیدی (اسید نیتریک و مخلوطی از اسید سولفوریک و هیدروژن پروکساید یا آب اکسیژنه) و عامل قلیایی (هیدروکسید آمونیاک/ آب اکسیژنه) را بر روی عدد پتانسیل زتا بررسی نمودند (شکل 2-3). مطابق نتایج حاصله، برای نانو سیال حاوی نانو لوله های کربنی که تحت فرآیند اصلاح شیمیایی قرار گرفته اند (TCNT) در محیط اسیدی با pH کمتر سبب افزایش نیروی رانش الکترو استاتیک³ بین نانو لوله ها گردیده، منجر به کاهش مقدار مطلق پتانسیل زتا می شود. چنین وضعیتی برای نانوسیال که نانولوله های کربنی بکار رفته در آن در معرض اصلاح شیمیایی قرار نگرفته اند (PCNT) مشاهده نگردیده است. بعلاوه، نتایج حاصل از اندازه گیری هدایت حرارتی نانوسیال های حاوی TCNT در سیالات پایه متفاوت نشان دهنده ارتقاء ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بدست آمده است. بالاترین میزان افزایش در هدایت حرارتی برای 1 vol% نانولوله ها در سیال دیسن برابر 19/6٪ گزارش شده است. یافته های حاصله نشان داد که هرچه ضریب هدایت حرارتی سیال پایه کمتر باشد به همان میزان ارتقاء هدایت حرارتی ناشی از حضور نانولوله ها در سیال پایه بالاتر خواهد بود. چون DE کمترین میزان هدایت حرارتی را نسبت به آب مقطر و اتیلن

¹ Pristine carbon nano tubes

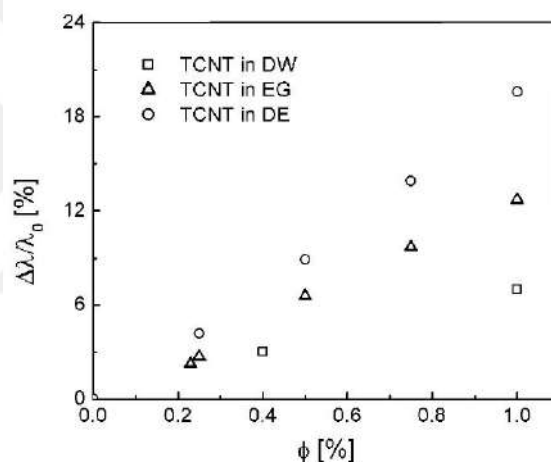
² Treated carbon nano tubes

³ Electrostatic repulsion

گلیکول دارا می باشد از این رو افزایش هدایت حرارتی در شرایط حضور نانو لوله های کربنی در DE بالاتر بوده و با افزایش درصد حضور TCNT در سیال پایه میزان ارتقاء هدایت حرارتی بیشتر خواهد گردید (شکل 2-4).



شکل 2-3 پتانسیل زتا برای سوسپانسیون PCNT و TCNT بصورت تابعی از عدد pH [44].



شکل 2-4 ارتقاء هدایت حرارت نسبی سوسپانسیون TCNT بصورت تابعی از درصد نانولوله های کربن در سیال پایه [44].

لیو و همکاران¹ [46] به تولید نانوسیال حاوی نانوذرات مس در آب با استفاده از روش کاهش شیمیایی² پرداختند. استات مس³ $(\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2)$ به عنوان پیش ماده⁴ بکار گرفته شد. این ماده در آب دی یونیزه حل شده و محلول بدست آمده در دمای 55°C تحت محیط نیتروژن بصورت یکنواخت هم زده می شود. هیدروژن (N_2H_4) به عنوان عامل کاهنده⁵ بکار گرفته شد. این عامل کاهنده بصورت تدریجی به محلول استات مس در حین هم زنی اضافه گردید تا یک محلول یکنواخت بدست آید. سپس این محلول تا دمای صفر درجه سانتی گراد خنک گردیده و زمان لازم برای ته نشینی محصول واکنش داده شد. مخلوط بدست آمده به آرامی توسط آب دی یونیزه جهت زدودن ناخالصی ها شستشو گردیده و محصول نهایی بدست آمد. متغیرهای مورد مطالعه عبارت بودند از تمرکز پیش ماده به میزان 1، 2، و 4 درصد و تمرکز عامل کاهنده به میزان 1، 2/5، و 5 درصد. تصاویر میکروسکوپ

¹ Liu et al.

² Chemical reduction method

³ Copper acetate

⁴ Precursor

⁵ Reducing agent

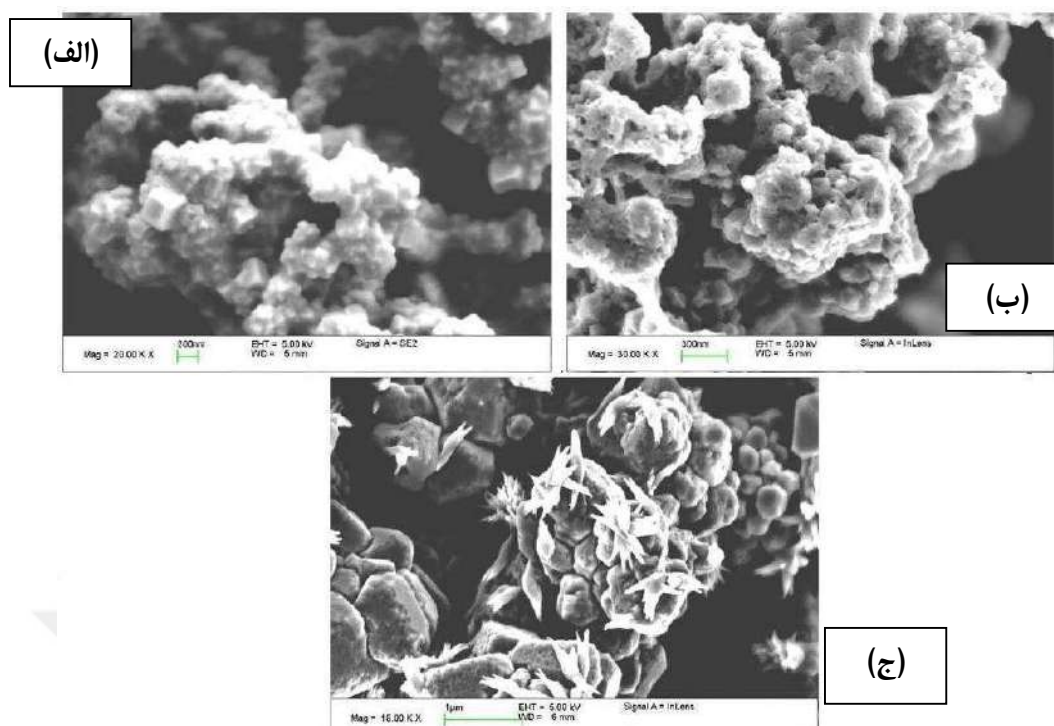
الکترونی تهیه شده از نانوذرات مس تولید شده توسط روش کاهش شیمیایی نمایش دهنده توزیع یکسان نانوذرات از نظر اندازه ذره می باشد (شکل 2-5). کسر حجمی نانوذرات مس اضافه شده در سوسپانسیون پایه آب کمتر از 0/2 گزارش شده است و از هیچ ماده ای به عنوان پایدار کننده استفاده نشده است. در جدول 1-2 میزان ارتقاء ضریب هدایت حرارتی نانوسیال بر حسب درصد کسر حجمی، اندازه ذرات و شکل ظاهری نانوذرات مس ارائه شده است. نتایج حاصله نشان می دهد که نانوسیال آب-مس با تمرکز پایین نانوذرات دارای ضریب هدایت حرارتی بالاتری نسبت به سیال پایه آب بدون حضور نانوذرات مس است، بگونه ای که در شرایط کسر حجمی 0/1 از نانوذرات مس در سیال پایه، هدایت حرارتی آن تا حدود 23/8 % ارتقاء می یابد.

بعلاوه لیو و همکاران [46] چنین گزارش نموده اند که بدون حضور سورفکتانت، هدایت حرارتی نانوسیال تولید شده ویژگی وابسته به زمانی¹ را از خود نشان میدهد؛ بدین صورت که هدایت حرارتی نانوسیال در ابتدای بازه اندازه گیری بزرگترین مقدار را دارا بوده و با گذشت زمان بصورت قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. بازه اندازه گیری هدایت حرارتی برابر 30 min گزارش شده است که در فواصل اندازه گیری 5 min هدایت حرارتی انجام شده و در انتهای این مدت زمان هیچ تفاوتی در هدایت حرارتی سیال بدلیل ته نشینی نانوذرات مس گزارش نشده است.

جدول 1-2 درصد ارتقاء هدایت حرارتی نانوسیال مس و شکل ظاهری نانوذرات در درصدهای مختلف از کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه [46].

شماره سطر	کسر حجمی ذرات (vol.%)	میزان ارتقاء هدایت حرارتی (%)	فرم و اندازه ذرات توسط SEM
1	0/05	11/6	کروی و چهارگوش 100 تا 200 nm
2	0/05	3/6	--
3	0/05	8/5	کروی و چهارگوش 130 تا 200 nm
4	0/1	23/8	کروی و چهارگوش 75 تا 100 nm
5	0/1	23/8	کروس و چهارگوش 50 تا 100 nm
6	0/1	11/0	کروی، چهارگوش و سوزنی 100 تا 300 nm
7	0/2	9/7	کروی 130 تا 300 nm
8	0/2	13/2	سوزنی 200 تا 500 nm
9	0/2	3/6	کروی، چهارگوش و سوزنی 250 Nm

¹ time-dependent characteristic



شکل 2-5 تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نانوذرات مس برای الف) نمونه شماره 4، ب) نمونه شماره 5، و ج) نمونه شماره 9 [46].

یکی از مشکلات عمده ای که در بکارگیری نانوسیال ها در تجهیزات و فرآیندهای مختلف نظیر دفع نمودن حرارت در تجهیزات الکترونیک همانند LED¹ ها وجود دارد، ته نشینی نانوذرات بعد از مدتی از ذخیره سازی یا عملکرد بدلیل سوسپانسیون ضعیف حاصله می باشد که منجر به تضعیف نرخ انتقال حرارت نانوسیال می گردد. این امر در تحقیقات انجام گرفته در زمینه نانوسیال ها مورد توجه خاصی قرار گرفته است. در این راستا، لین و همکاران² [47] به مطالعه ویژگی های سوسپانسیون و انتقال حرارت در نانوسیال Al_2O_3 تولید شده از طریق بکارگیری ارتعاشات آلتراسونیک و اضافه نمودن سورفکتانت و توزیع کننده بصورت مجزا و توأم پرداختند. ابعاد نانوذرات مورد استفاده در حدود 10 تا 30 nm بوده و از عامل توزیع کننده³ QF-DTK-190، که یک عامل توزیع کننده برای اکسیدهای فلزی واکسیدتیتانیوم است، استفاده نمودند. این عامل توزیع کننده دارای قابلیت حل شدن در آب است و دارای عدد pH برابر 4 و ضریب هدایت حرارتی $0/51 W/m.^0K$ است. در کنار این، از مخلوطی از سورفکتانت های غیریونی، شامل⁴ Tween 20، Tween 80، Span 20، و Span 80 برای ایجاد امولسیون نانوذرات Al_2O_3 در آب دی یونیزه شده استفاده گردید. مطابق گزارش منتشر شده، سورفکتانت های غیریونی با مقادیر عدد تعادل هیدروفیل-لیپوفیل (HLB^5) بالاتر دارای ویژگی هیدروفلیک قوی تری هستند. نتایج تجربی حاصله نشان دادند که نانوسیال Al_2O_3 آماده سازی شده با سورفکتانت غیر یونی با HLB برابر 12 دارای کمترین نرخ رسوب دهی نانوذرات و بصورت متناظر دارای بالاترین درجه ثبات امولسیون می باشد. بعلاوه نشان داده شد که نانوسیال های

¹ Light emitting diode

² Lin et al.

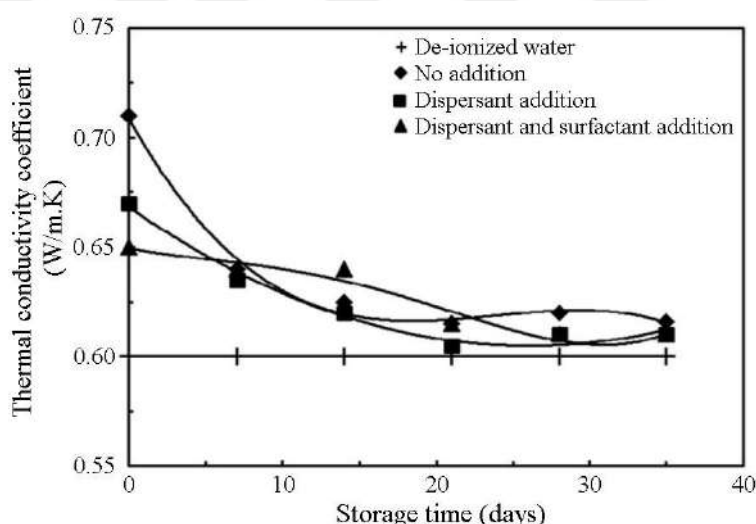
³ Young-Zhen Technomaterial Co., Taiwan

⁴ First Chemical Company, China

⁵ Hydrophil-lipophile balance

آماده سازی شده با حضور هر دو عامل توزیع کننده و مواد سورفکتانت دارای بالاترین ویسکوزیته دینامیکی و پایین ترین درجه هدایت حرارتی می باشند. با حضور بیشتر این عوامل در نانوسیال Al_2O_3 ، نرخ رسوب دهی و ویسکوزیته دینامیکی افزایش یافته و هدایت حرارتی کاهش می یابد. نتایج ارائه شده نشان دهنده افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال با افزایش میزان دمای سیال است که این افزایش به اثر متقابل نانوذرات و افزایش حرکت براونی آنها در داخل سیال پایه در اثر افزایش انرژی حرارتی نسبت داده شده است.

چنین گزارش شده است که حضور سورفکتانت و توزیع کننده سبب کاهش نسبی هدایت حرارتی نانوسیال محتوی 1 wt% نانوذرات Al_2O_3 در دمای کاری متفاوت می گردد (شکل 2-6). این کاهش در ضریب هدایت حرارتی به پوشیده شدن سطح نانو ذرات Al_2O_3 توسط عوامل اضافه شده به نانو سیال ارتباط داده شده است که سبب می گردد هدایت حرارتی کاهش یابد. در این حال، حضور سورفکتانت نه تنها باعث تشکیل امولسیون پایدارتر می گردد بلکه از طریق کاهش قابلیت جذب ذرات به هم، سبب پایین نگه داشته شدن نسبی ویسکوزیته می شود. افزایش مدت زمان نگه داری نانوذرات سبب افزایش میزان بهم پیوستگی و رسوب نانوذرات، کاهش تمرکز ذرات در سیال پایه و کاهش هدایت حرارتی نانو سیال می گردد.



شکل 2-6 میزان ضریب هدایت حرارتی نانو سیال حاوی 1 wt% اکسید آلومینیم در آب دی یونیزه در برابر مدت زمان ذخیره سازی برای شرایط مختلف حضور و عدم حضور عوامل فعال در سطح و عامل توزیع کننده [47].

بکارگیری نانوسیال ها بجای سیالات پایه به معنای سیستم های حرارت دهی کوچکتر است که همان قابلیت حرارت دهی را دارا می باشد. این بدین معنی است که توان کمتری برای واحدهای حرارت دهی کوچک مورد نیاز است و از این جهت حجم تولید آلاینده های محیطی توسط سیستم حرارتی کمتر خواهد بود. با در نظر گرفتن اهمیت بکارگیری نانوسیالات در سیستم های انرژی، ویژگی های ویسکوزیته مؤثر و هدایت حرارتی سوسپانسیون حاصل از توزیع نانوذرات اکسید آلومینیم (Al_2O_3) در سیال پایه آب دی یونیزه شده توسط لی و همکاران¹ مورد بررسی قرار گرفت [6]. حجم نانوذرات آلومینا اضافه شده به سیال پایه در بازه 0/01 تا 0/3 % حجمی بوده و از هیچ عامل توزیع کننده ای در مرحله اضافه نمودن نانوذرات به سیال پایه استفاده نگردیده است. این محققین از

¹ Lee et al.

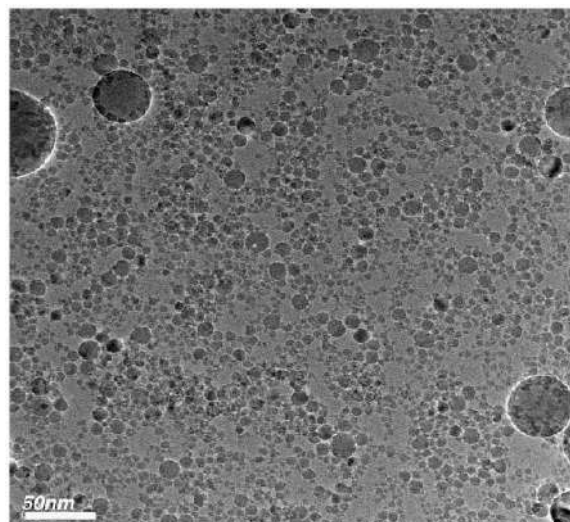
روش آلتراسونیک جهت توزیع نانوذرات به ابعاد اسمی 30 ± 5 nm در داخل سیال پایه در فرکانس ارتعاش KHz 30–40 برای مدت زمان 0، 5، 20 و 30 ساعت جهت مطالعه اثر مدت زمان ارتعاشات آلتراسونیک بر روی پایداری و ویژگی های مورد مطالعه استفاده نمودند. بدلیل آنکه سطح نانوذرات اکسید آلومینیم در داخل سوسپانسیون تشکیل یافته بصورت مثبت باردار شده است، در شرایط اندازه گیری بارسطحی¹ یا پتانسیل زتا برای نانوذرات، در صورت پایداری مطلوب نانوذرات و توزیع یکنواخت آنها در سیال پایه پتانسیل زتا برابر 30 mV می شود و در شرایطی که پتانسیل زتا بالاتر از 60 mV باشد پایداری سوسپانسیون حاصله بسیار عالی است.² برای مقادیر زیر 20 mV پایداری سوسپانسیون محدود بوده و برای مقادیر کمتر از 5 mV بهم چسبیدگی شدید در نانوذرات اتفاق افتاده است. نتایج سنجش پتانسیل زتا در دمای 25°C بر حسب مدت زمان پروسه توزیع آلتراسونیک نشان داد که نانوسیال حاوی 0/1 % حجمی نانوذرات Al_2O_3 که تحت 5 ساعت ارتعاش آلتراسونیک در مرحله آماده سازی قرار گرفته است دارای پتانسیل زتا بمراتب بالاتر از سیال مشابهی است که تحت فرآیند آلتراسونیک قرار نگرفته است. بعلاوه، بالاترین پتانسیل زتا ثبت شده برای نانوسیال آماده سازی شده تحت شرایط ارتعاش آلتراسونیک 5 ساعت است که برابر 34 mV بوده و نشان دهنده بالاترین میزان پایداری نانوذرات در سیال پایه است. نتایج حاصل از تصویر برداری توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از سیال حاوی 0/1 % حجمی نانوذرات Al_2O_3 که به مدت 5 ساعت در معرض ارتعاشات آلتراسونیک قرار گرفته است نمایش دهنده توزیع یکنواخت نانوذرات در سیال پایه با اندازه تقریبی 30 ± 5 nm و با حداقل حالت چسبندگی به هم می باشد (شکل 2-7). نتایج حاصل از اندازه گیری ویسکوزیته مؤثر³ بر حسب درصد حجمی نانوذرات در سیال پایه و دمای انجام آزمایش نشان داد که میزان ویسکوزیته مؤثر نانوسیال با افزایش درصد حجمی حضور نانوذرات در سیال پایه به میزان کمی افزایش می یابد. همچنین درجه حرارت تأثیر قابل ملاحظه ای بر روی ویسکوزیته مؤثر اندازه گیری شده دارد، چنانچه افزایش دما سبب کاهش قابل توجه ویسکوزیته نانوسیال می گردد (شکل 2-8).

بعلاوه، هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال به ازای درصدهای مختلف حضور نانوذرات در سیال پایه توسط سیستم سیم داغ گذار در دمای 21°C اندازه گیری شده است. مطابق نتایج ارائه شده، هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال با افزایش درصد حجمی نانوذرات در سیال پایه بصورت خطی افزایش می یابد. بالاترین میزان ارتقاء هدایت حرارتی به ازای 0/3 حجمی حضور نانوذرات Al_2O_3 در سیال پایه آب دی یونیزه شده برابر 1/44 % گزارش شده است.

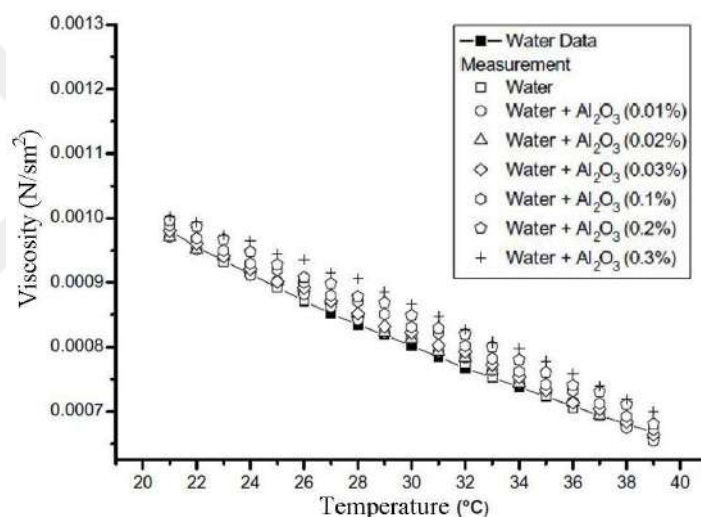
¹ Surface charge

² پتانسیل زتا به عنوان یک پتانسیل الکتریکی در پیرامون ذرات می باشد که با پایداری محلول کلئیدی ارتباط دارد. محلول های کلئیدی با پتانسیل زتای بالا (مثبت یا منفی) پایداری بهتری دارند. در حالت کلی گفته می شود که نانوسیالات با پتانسیل زتای 40 mV تا 60 mV پایداری قابل قبول و نانوسیالات دارای پتانسیل زتای بالای 60 mV پایداری خیلی خوبی دارند.

³ Effective viscosity



شکل 2-7 تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی از نانوذرات اکسید آلومینیم توزیع شده در سیال پایه آب دی یونیزه توسط فرآیند حمام آلتراسونیک به مدت 5 ساعت [6].



شکل 2-8 ویسکوزیته مؤثر نانوسیال حاصل از توزیع نانوذرات Al_2O_3 با درصدهای تمرکز حجمی مختلف در سیال پایه آب دی یونیزه شده در برابر درجه حرارت انجام آزمایش [6].

گارج و همکاران¹ [43] به مطالعه هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوذرات مس در سیال پایه اتیلن گلیکول پرداختند. این محققین از روش کاهش شیمیایی جهت تولید نانوذرات مس استفاده نمودند که در آن از آب به عنوان حلال استفاده شده و سپس نانوذرات حاصله با استفاده از حمام آلتراسونیک در سیال پایه اتیلن گلیکول توزیع گردیدند. درصد حجمی نانوذرات مس در سیال پایه تا 2 % حجمی گزارش شده است. همچنین میزان افزایش ویسکوزیته تقریباً چهار برابر مقدار پیش بینی شده توسط قانون ویسکوزیته انشتین بوده است [48]. همچنین محاسبات تحلیلی² در زمینه انتقال حرارت با استفاده از نانوسیال بدست آمده نشان دادند که این نانوسیال در شرایطی می تواند در مبدل های حرارتی به عنوان خنک کننده بکار گرفته شود که قطر لوله ها تغییر یابد و اینکه در

¹ Garg et al.

² Analytical calculations

شرایط تغییر قطر لوله ها، ارتقاء هدایت حرارتی ناشی از حضور نانوذرات مس در سیال پایه سبب عملکرد بهتر حرارتی سیستم می گردد. روش بکارگرفته شده در تولید نانوسیال مس به روش کاهش شیمیایی مشابه روش لیو و همکاران¹ [46] می باشد با این تفاوت که هیدروکسید سدیم (NaOH) به عنوان یکی از واکنش دهنده ها به محلول اضافه گردید. روش کار بدین صورت بوده است که 2 گرم استات مس در 50 mL آب مقطر به همراه همزنی توسط همزن مغناطیسی حل شده است. پس از آن 0/5 g از هیدروکسید سدیم به محلول اضافه و در آن حل گردیده است. سپس این محلول تا دمای تقریبی 5 °C خنک شده و پس از آن 3 mL از هیدروژن در حالت تداوم همزنی اضافه گردیده است. این همزنی برای مدت زمان 12 h در دمای اتاق جهت دستیابی به عکس العمل کاهش² بصورت کامل، تداوم یافته است. سپس برای جداسازی نانوذرات حاصله از فرآیند مذکور، محلول تحت فرآیند گریز از مرکز قرار گرفته است. سپس ذرات دوبار توسط آستون شستشو شده و در دمای 50 °C بمدت 12 h در محیط خلاء جهت از دست دادن آب موجود³ حرارت داده شده است. سپس نانوذرات حاصله توسط فرآیند ارتعاش آلتراسونیک در سیال پایه اتیلن گلیکول توزیع گردید. در تصاویر بدست آمده از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) اندازه نانوذرات مشاهده شده در حدود 200 nm گزارش شده است و اینکه ذرات با ابعاد کوچکتر نیز در نانوسیال حاصله وجود دارند (شکل 2-9).

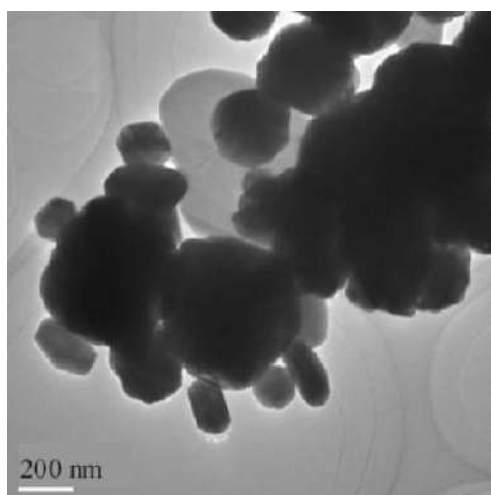
همچنین در مورد هدایت حرارتی اتیلن گلیکول چنین بیان شده است که اتیلن گلیکول زمانی که در معرض اتمسفر قرار می گیرد آب جذب می نماید و از آنجایی که هدایت حرارتی آب بالاتر از اتیلن گلیکول است سبب ایجاد خطا در اندازه گیری هدایت حرارتی نانوسیال پایه اتیلن گلیکول با گذشت زمان می گردد. در آزمایشی که انجام گرفت نشان داده شد، اتیلن گلیکول پس از قرارگیری در معرض هوای آزاد بمدت 12 روز، 2 % افزایش هدایت حرارتی و پس از مدت 33 روز، 4 % ارتقاء هدایت حرارتی را از خود نشان می دهد که لازم است در اندازه گیری های هدایت حرارتی نانوسیالات مورد توجه قرارگیرد. در شکل 2-10 هدایت حرارتی نانوسیال مس در سیال پایه اتیلن گلیکول بر حسب کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه نمایش داده شده است. همچنین نتایج حاصل از رابطه تئوری محیط مؤثر ماکسول و نتایج حاصل از تحقیقات لی و همکاران⁴ [44] جهت مقایسه ارائه گردیده است. مطابق نتایج ارائه شده از سوی گارج و همکاران، هدایت حرارتی نانوسیال اندازه گیری شده به روش سیم داغ گذار تقریباً 2 برابر مقادیر پیش بینی شده توسط تئوری محیط مؤثر ماکسول می باشد. در توجیه این پدیده این محققین چنین بیان نموده اند که رابطه محیط مؤثر ماکسول با فرض مورفولوژی ذرات کروی بدست آمده است و در این رابطه مقاومت حرارتی در وجه مشترک ذرات با سیال پایه و کاهش هدایت حرارتی ذرات بخاطر اثر اندازه درنظر گرفته نشده است.

¹ Liu et al.

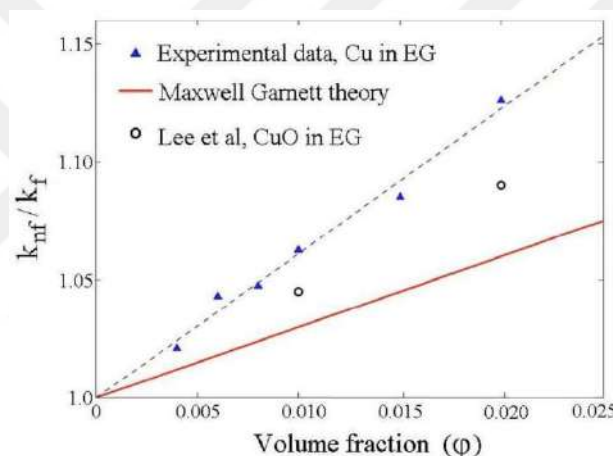
² Reduction reaction

³ Vacuum dried at 50°C for 12h

⁴ Lee et al.



شکل 2-9 تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نانوذرات مس تهیه شده به روش کاهش شیمیایی و توزیع شده در سیال پایه اتیلن گلیکول از طریق ارتعاش توسط حمام آلتراسونیک [43].



شکل 2-10 هدایت حرارتی مؤثر نانوسیال مس پایه اتیلن گلیکول در برابر کسر حجمی نانوذرات؛ k_{nf} هدایت حرارتی نانوسیال و k_f هدایت حرارتی سیال پایه [43].

چن و همکاران¹ [49] روشی را برای پیش بینی هدایت حرارتی نانوسیالات بر پایه علم جریان شناختی سوسپانسیون² پیشنهاد نمودند و از نتایج تجربی با استفاده از چهار نوع نانوسیال متشکل از نانوذرات و سیال پایه متفاوت جهت بررسی صحت مدل ارائه شده استفاده کردند. نتایج حاصله نشان داد که روابط پیشین قادر به پیش بینی صحیح هدایت حرارتی نانوسیالات نمی باشند و این درحالی است که در نظر گرفتن پارامترهای میکروساختار بدست آمده از اندازه گیری های جریان شناختی سبب افزایش قابلیت پیش بینی دقیق هدایت حرارتی می گردد. این محققین چنین گزارش نموده اند که ویژگی های جریان شناختی نانوسیالات می تواند فراهم کننده اطلاعات ساختاری موردنظر جهت انجام شبیه سازی هدایت حرارتی سوسپانسیون گردد. اندازه گیری های ساختاری³ از طریق سنجش اندازه ذرات در شرایط پایا توسط روش هایی چون تفرق نور دینامیکی⁴ و میکروسکوپ الکترونی

¹ Chen et al.

² Suspension reology

³ Structure measurements

⁴ Dynamic light scattering

(SEM) انجام شده است. سپس از داده های میکروساختاری بدست آمده در پیش بینی هدایت حرارتی نانوسیال استفاده نموده اند. چهار نوع نانوسیال متفاوت از طریق اضافه نمودن نانوذرات کروی تیتانیا¹ (اکسیدتیتانیم، TiO_2) با قطر متوسط 25 nm و نانولوله های تیتانات² (TNT) به قطر تقریبی 10 nm، طول 100 nm و نسبت وجه³ $r=10$ در سیال پایه آب و اتیلن گلیکول (EG) شامل EG-TiO_2 ، water-TNT ، EG-TNT جهت توسعه مدل های فوق الذکر بدون بکارگیری سورفکتانت تولید شدند. ایشان از هم زنی مغناطیسی و حمام آلتراسونیک جهت توزیع یکنواخت نانوذرات مذکور در سیال پایه استفاده نمودند. مطابق مشاهدات به ثبت رسیده، نانوسیالات تولید شده تا یک ماه پس از تولید ثبات خود را حفظ نموده و ته نشینی قابل ملاحظه ای از نانوذرات در سوسپانسیون تولید شده مشاهده نگردیده است. همچنین نتایج حاصل از مشاهدات SEM و تفرق نور دینامیکی نشان داد که با بکارگیری روش دو مرحله ای در تولید نانوسیالات گرچه اندازه ذرات بهم چسبیده بطور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد اما این روش قادر به شکست کلوخه های ایجاد شده به ابعاد اولیه نانوذرات نیست.

چن و همکاران [49] گزارش نموده اند که حضور نانوذرات در سیال پایه سبب افزایش ویسکوزیته مؤثر سیال می گردد و افزایش این مقدار به شکل ذرات و کسر حجمی آن در سیال پایه بستگی دارد. به ازای کسر حجمی مشخص نانوذرات در سیال پایه، ویسکوزیته نانوسیالات حاوی ذرات میله ای شکل بالاتر از ذرات کروی شکل است. برای شکل ذرات مشخص، ویسکوزیته برشی نانوسیالات بصورت غیرخطی با کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه افزایش می یابد و روابط ارائه شده پیشین از سوی محققین مختلف قادر به پیش بینی صحیح مقادیر ویسکوزیته اندازه گیری شده نیستند. دلیل اختلاف فاحش مشاهده شده بین مقادیر حاصل از روابط ارائه شده جهت پیش بینی ویسکوزیته سوسپانسیون و مقادیر تجربی به تشکیل میکروساختار نانوذرات در سیال پایه نسبت داده شده است. این امر در تصاویر SEM و نتایج تفرق نور دینامیکی تأیید شده است. چن و همکاران چنین بیان می کنند که نیروهای هیدرو دینامیکی در یک جریان برشی⁴ قادر به شکست شبکه متشکل از نانوذرات (ذرات به هم چسبیده) به اندازه های ابتدایی آنها نبوده و تنها سبب جریان سیال متشکل از کلوخه های ریز با کسر حجمی مؤثر می گردد. در نتیجه به جای کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه (ϕ) لازم است که از کسر حجمی ذرات بهم چسبیده (ϕ_a) استفاده شود.

همچنین نتایج حاصل از اندازه گیری هدایت حرارتی نانو سیالات تحت آزمایش توسط دستگاه KD2 و مقادیر حاصل از مدل همیلتون-کراسر⁵ (H-C) [50] جهت پیش بینی ضریب هدایت حرارتی سوسپانسیون در شکل 2-11 ارائه شده است. مطابق شکل مذکور میزان هدایت حرارتی نانوسیال با افزایش کسر حجمی نانوذرات در سیال پایه افزایش می یابد. با مراجعه به این شکل ملاحظه می گردد که روابط پایه H-C قادر به پیش بینی دقیق هدایت حرارتی سوسپانسیون نانوذرات نمی باشد. این محققین با اصلاح مدل H-C از طریق لحاظ نمودن کسر حجمی ذرات بهم چسبیده (ϕ_a) بجای کسر حجمی نانوذرات (ϕ) در سیال پایه و بکارگیری ضریب هدایت حرارتی ذرات بهم

¹ Titania, titanium oxide

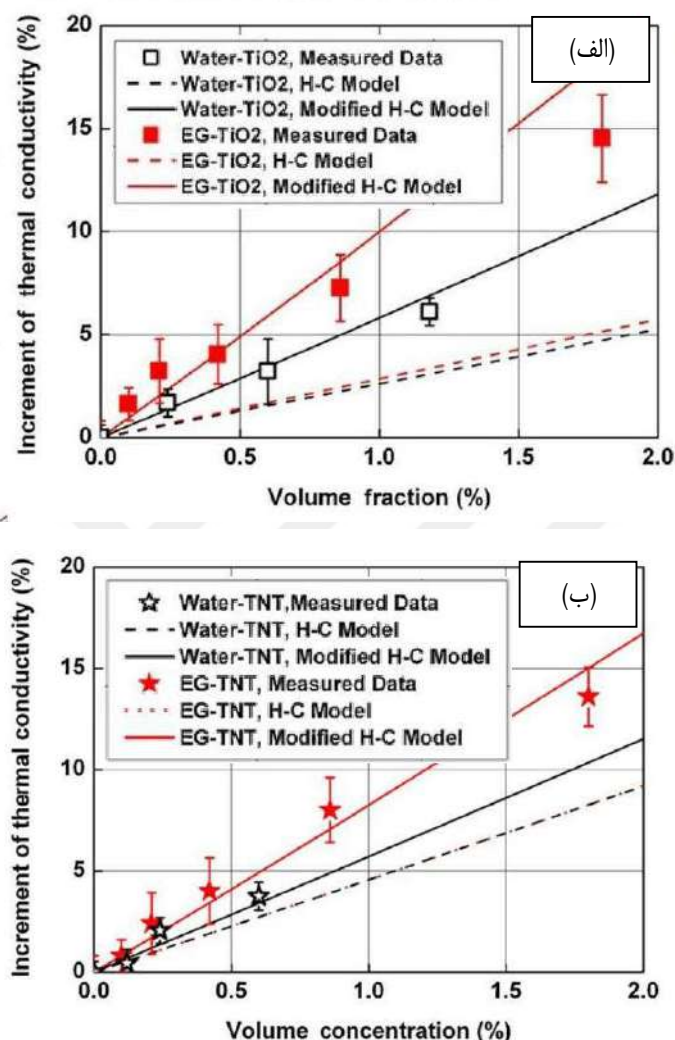
² Titanate nanotubes

³ Aspect ration

⁴ Shear flow

⁵ Hamilton-Crosser, 1962

چسبیده (K_a) بجای هدایت حرارتی نانوذرات (K_p) که به ترتیب از مدل های پیشنهادی توسط براگمن¹ [51] برای ذرات با مرفولوژی کروی و نان² [52] برای ذرات میله ای شکل بدست آوردند، توانستند بطور قابل ملاحظه ای قابلیت مدل مذکور را در پیش بینی ضریب هدایت حرارتی نانوسیال تحت مطالعه بهبود بخشند.



شکل 2-11 تغییرات ضریب هدایت حرارتی در برابر تغییرات درصد نانوذرات در سیال پایه برای مقادیر حاصل از اندازه گیری های تجربی و مقادیر پیش بینی شده؛ الف) نانوذرات اکسید تیتانیوم، ب) نانولوله های تیتانات [49].

2-2-2- بررسی ویژگی نانوسیالات تولید شده به روش تخلیه الکتریکی

از زمان های گذشته نقره به عنوان ماده ای محافظ در برابر انواع باکتری ها شناخته شده و از آن در محافظت آب آشامیدنی، نگهداری شیر در داخل ظروف و بکارگیری محلول نیتريد نقره برای محافظت نوزادان در برابر اوفسالما نیوناتوریم³ و غیره استفاده می گردید. بدلیل رشد مصرف آنتی بیوتیک ها در سالیان اخیر، بسیاری از باکتری ها در

¹ Bruggeman, 1935

² Non, Shi & Lin, 2003

³ Ophthalmia neonatorum

اوسالمیا نیوناتوریم از انواع باکتری های شایعی است که سبب عفونت چشمی نوزادان میگردد. این باکتری دارای سرعت رشد بسیار بالایی بوده و می تواند سبب از بین رفتن کل چشم در مدت زمان چند روز گردد.

برابر این آنتی بیوتیک ها مقاوم شده و از این جهت نقره به عنوان ماده مؤثر در برابر باکتری ها مجدداً مورد توجه قرار گرفته است. در این راستا تی ین و همکاران¹ [53] مطالعه تجربی را در جهت تولید سوسپانسیون ذرات نقره در آب مقطر توسط روش تخلیه الکتریکی انجام دادند. پارامترهای فرآیند شامل ولتاژ مدار باز 135 V، جریان تخلیه الکتریکی 4 A و 6، زمان روشنی و خاموشی پالس 50 μ s، دمای سیال 25 °C در 500 ml آب دی یونیزه شده توسط الکترودهای نقره به قطر 1 mm و خلوص 99/99 % در مدت زمان فرآیند 60 sec گزارش شده است. این ویژگی ها سبب ایجاد برداشت ماده از الکترودها با نرخ 100 mg/min می گردد. در مطالعه انجام گرفته از دستگاه اندازه گیری پتانسیل زتا جهت اندازه گیری قطر نانوذرات استفاده گردید. چنین ذکر شده است که استفاده از این وسیله در جهت آنالیز توزیع نانوذرات فلزی نقره در داخل سوسپانسیون برای محاسبه سرعت و زمان مورد نیاز برای دستیابی به شرایط بهینه جهت انجام تست گریز از مرکز بسیار مناسب است. از دستگاه گریز از مرکز طبق رابطه $RFC=1.18 \times 10^{-5} r N^2$ (که در آن RFC نیروی گریز از مرکز، r شعاع دوران و N عدد دوران است) جهت دستیابی به نیروی گریز از مرکز برابر 20,000 g استفاده گردید. مطابق مقاله منتشر شده، تحت این شرایط 96 % از نانو ذرات فلزی نقره از یونهای نقره جدا خواهند شد. این امر از طریق جدایش مستقیم در حین فرآیند گریز از مرکز با عدد دوران 18,000 rpm و به مدت 100 min با ته نشینی ذرات نقره (Ag^0) و حل شدن یونها (Ag^+) در سطح آب دی یونیزه شده² انجام می گیرد. عیب این روش، عدم توانایی آن در جداسازی نانو ذراتی است که دارای اندازه های بسیار کوچک، در حد چند نانومتر می باشد ذکر شده است. روند مطالعات انجام گرفته توسط این محققین در شکل 2-12 قابل مشاهده می باشد.

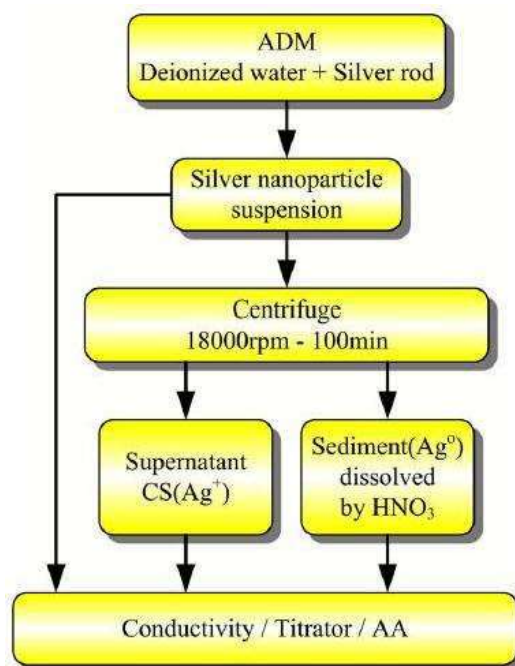
تی ین و همکاران [53] با استفاده از روش تیترا تور³ و اسپکتروسکوپی جذب اتمی⁴ (AA) میزان غلظت یونهای نقره اندازه گیری شده در سطح آب دی یونیزه شده را بترتیب برابر 18/6 ppm و 19/2 ppm گزارش نموده اند. اختلاف اعداد بدست آمده بدین دلیل است که روش تیتراسیون تنها به یونهای نقره حساس است در حالی که روش اسپکتروسکوپی جذب اتمی هم به یونها و هم به نانو ذرات نقره حساس می باشد. نتایج نشان دادند که لایه سطحی بوجود آمده در سطح سیال پایه، حاوی نانو ذرات نقره به قطر کمتر از 10 nm می باشد. نانو ذرات نقره (Ag^0) ته نشین شده در داخل اسید نیتریک (65%) بطور کامل حل و این محلول توسط آب دی یونیزه شده رقیق گردید تا آنکه به شرایط اولیه خود باز گردد. نتایج تیتراسیون و AA نشان دادند که میزان نانو ذرات موجود در سیال پایه بترتیب برابر 11/2 ppm و 11/4 ppm می باشد. این امر نشان می دهد که نانو سیال حاصله دارای میزان غلظت تقریبی 11 ppm از نانو ذرات نقره (Ag^0) است. تی ین و همکاران چنین نتیجه گیری نمودند که در بمباران یونی و الکترونی در حین فرآیند تخلیه الکتریکی، اتمهای اکسیژن به سطح نانو ذرات نقره باردار می چسبند و بدلیل نیروی پیوند هیدروژنی، مولکولهای آب با اتم های اکسیژن پیوند خورده و از این جهت یک کلئید پایدار بدون حضور سورفکتانت تشکیل می گردد. در مجموع چنین بیان شده است که تشکیل یونهای نقره در سوسپانسیون نانوذرات نقره تولید شده به روش تخلیه الکتریکی سبب افزایش قابلیت ضد جرم نانوسیال حاصله می گردد.

¹ Tien et al.

² Supernatant

³ Titrator

⁴ Atomic absorption spectroscopy



شکل 2-12 مراحل انجام آزمایشات تجربی و تست های مرتبط [53].

تی سنگ و همکاران¹ [54] به مطالعه تولید سوسپانسیون نانوذرات طلا به روش تخلیه الکتریکی پرداختند. ایشان پس از بررسی سیالات پایه متفاوت، دوسیال آب دی یونیزه شده و اتانول، تحت عنوان سیالات غیر اورگانیک و اورگانیک، بخاطر خواص شیمیایی و فیزیکی آنها و کاربرد وسیعی که دارند را بعنوان سیال پایه انتخاب نمودند. الکترودهای بکار برده شده از جنس طلا با خلوص 99/99٪ و قطر 1 میلی متر بوده و ولتاژ مدار باز 135 V، شدت جریان تخلیه 4 A و 6 A و نیز زمان روشنی پالس برابر 40 و 80 میکرو ثانیه بترتیب برای اتانول و آب دی یونیزه شده گزارش شده است. با استناد به نتایج TEM متوسط اندازه ذرات طلا در شرایط تخلیه در اتانول برابر 5 nm و در آب دی یونیزه شده برابر 31 nm مشاهده شده است. در کنار این، ذرات تولیدی در آب دی یونیزه دارای شکل بیضوی بودند درحالی که ذرات طلای تولید شده در اثر تخلیه های الکتریکی در اتانول به حالت کروی نزدیکتر می باشند. همچنین، نسبت بزرگترین و کوچکترین قطر مشاهده شده در کلئید بترتیب برابر $20 \div 2 = 10$ و $40 \div 20 = 2$ برای اتانول و آب دی یونیزه گزارش شده است که نشان می دهد نانوسیال تولیدشده به روش تخلیه در آب همگن تر می باشد. نتایج توزیع پتانسیل زتا نشان دهنده یک بار منفی² بزرگتر از 50 mv و -30 mv بترتیب برای کلئید طلا در اتانول و آب دی یونیزه بودند. این پتانسیل منفی نمایش دهنده شکل گیری نانوسیال پایدار می باشد. محققین در توجیه مشاهدات خود چنین توضیح داده اند که اکسیژن فعال³ می تواند توسط سطح ذرات طلا در دمای محیط جذب گردد. لذا سطح نانوذرات طلا که دارای بارمنفی است درحقیقت توسط اتم های اکسیژن اشباع شده است که این اتم ها در اتانول تشکیل پیوندهای هیدروژنی داده و موجب ایجاد پتانسیل منفی در کلئید حاصله می شوند.

¹ Tseng et al.

² Negative charge

³ Active oxygen

لو و همکاران¹ [55] به مطالعه تولید نانوسیال حاوی ذرات اکسید مس به روش تخلیه الکتریکی غوطه ور در آب دی یونیزه شده به عنوان سیال دی الکتریک در شرایط شدت جریان تخلیه 2، 5، 8 و 15 A، ولتاژ 220 V و مدت زمان روشنی پالس 12، 25 و 100 μ s پرداختند. این محققین از یک سیستم آبگرد برای کنترل دمای سیال در حین پروسه و یک محفظه خلاء برای کنترل و ایجاد یک فرآیند پایدار بهره جستند. الکترودهای مورد استفاده از جنس مس خالص انتخاب شده بودند. طبق گزارش منتشر شده، نتایج حاصله از تفرق اشعه اکس (XRD) نشان دادند که تنها ذرات CuO در نتیجه مکانیزم تخلیه الکتریکی در سیال آب دی یونیزه شده تولید گردیدند. دلیل این امر بر حضور مس، اکسیژن و هیدروژن در محیط تخلیه الکتریکی نسبت داده شده است. همچنین این محققین چنین گزارش نموده اند که در شرایط تخلیه الکتریکی 2 و 15 آمپر، ذرات تشکیل شده به راحتی در کف ظرف حاوی نانو سیال ته نشین می گردند و بعد از گذشت چند ساعت مجدداً سیال پایه شفاف می گردد. در نقطه مقابل، سوسپانسیون نانو ذرات حاصله از فرآیند تخلیه الکتریکی که در شرایط شدت جریان تخلیه 8 A بدست آمدند، دارای رنگ قهوه ای بوده و ذرات معلق با گذشت زمان ته نشین نگردیدند. بعبارت دیگر، نانوذرات بطور یکنواخت در سیال پایه توزیع شده و ثبات بهتری را از خود نمایش دادند. لو و همکاران این پدیده را به انرژی سطحی نانوذرات که می تواند سبب تولید اثر حرکت براونی گردد که بزرگتر از نیروی گرانشی است نسبت دادند. همچنین اندازه ذرات حاصله به ازای شدت جریان های 2، 5، 8 و 15 آمپر به ترتیب برابر 231، 115، 67/6 و 273 نانومتر گزارش شده اند. لذا مطابق نتایج گزارش شده، در شرایط بکارگیری شدت جریان تخلیه 8 آمپر، علاوه بر اینکه اندازه ذرات تولید شده کوچکترین مقدار را خواهند داشت، میزان ثبات نانوسیال حاصله بهتر و ته نشینی ذرات کمتر خواهد بود. از طرف دیگر، اندازه ذرات تولید شده در زمان های روشنی پالس 12، 25 و 100 میکرو ثانیه به ترتیب برابر 73/7، 143/1 و 267/3 نانومتر گزارش شده است. لذا تولید نانوسیال در زمان روشنی 12 μ s سبب تولید سیالی با کوچکترین قطر نانوذرات نسبت به دیگر حالات زمان روشنی پالس می گردد که دارای توزیع بهتر و پایداری بالاتر است. در کنار این، تأثیر دمای سیال پایه بعنوان محیط متمرکز کننده فاز بخار حاصل از تخلیه الکتریکی در سه سطح 2، 5 و 25 °C مورد مطالعه قرار گرفته و چنین گزارش شده است که اندازه نانو ذرات حاصله به ترتیب برابر 84/4، 148/4 و 386/6 نانومتر می باشد. چنین نتیجه گیری نموده اند که دمای سیال پایه دارای نقش تعیین کننده در اندازه و شکل نانو ذرات و به تبع آن در ویژگی های نانوسیال بدست آمده است. بعلاوه این محققین با استناد به نتایج TEM گزارش نموده اند که تغییر فشار محفظه تخلیه الکتریکی تأثیری در موفولوژی نانوذرات حاصله ندارد.

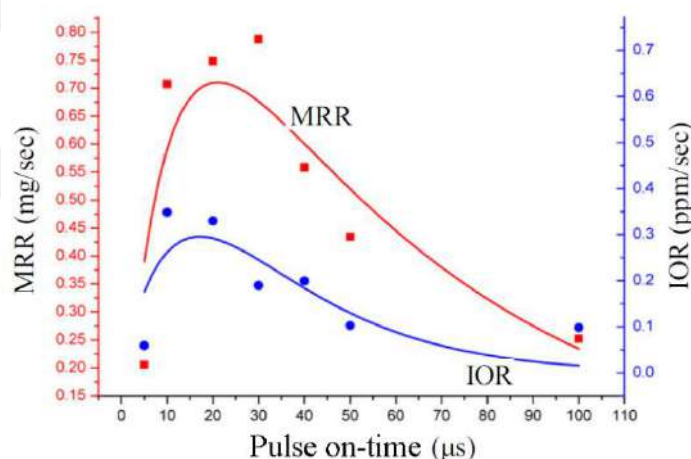
تی سنگ و همکاران² [56] به مطالعه تولید نانوسیال نقره توسط روش تخلیه الکتریکی و رابطه بین پارامترهای فرآیند با ویژگی های نانوسیال حاصله پرداختند. مشاهدات انجام گرفته گویای حضور یون های نقره در کنار نانو ذرات نقره در سیال پایه است. با هدف بررسی رابطه بین پایداری نانو سیال و پارامترهای پروسه، رابطه بین نرخ براده برداری (MRR) از الکترودهای نقره و نرخ یون های نقره³ (IOR) تولیدی مطالعه گردید. بعلاوه، مدت زمان پروسه

¹ Lo et al.

² Tseng et al.

³ Silver ion output rate

تولید بعنوان یک فاکتور کلیدی تأثیر گذار در تمرکز ذرات و یون ها مورد بررسی قرار گرفت. تولید نانو ذرات از طریق تخلیه های الکتریکی در زمان های روشنی پالس 5 تا 100 میکروثانیه و شدت جریان تخلیه 11/5 آمپر در 200 میلی لیتر آب دی یونیزه شده با استفاده از الکترودهایی از جنس نقره با خلوص 99/99٪ و قطره های 1 و 2 میلی متر بترتیب برای کاتد و آند انجام شد. روش کاهش شدت جذب طیف¹ ماوراء بنفش (UV-vis) و مقایسه پتانسیل زتا و اندازه متوسط نانو ذرات با گذشت زمان برای بررسی پایداری نانوسیال تولید شده به روش تخلیه الکتریک مورد استفاده قرار گرفتند. ایشان از روش تیتراسیون و بهره از METTELER TOLEDO, DL50 برای اندازه گیری نرخ تشکیل یون استفاده کردند. طبق تحلیل ارائه شده در مقاله بچاپ رسیده، افزایش غلظت یونها با افزایش مدت زمان پروسه سبب فشرده شدن طول دبای دو-لایه² و محو تدریجی میزان پتانسیل زتا می گردند. بعلاوه، افزایش میزان تمرکز ذرات بر روی نیروی واندراالانسی تأثیرگذار بوده و هر دو مورد ذکر شده در کاهش پایداری نانوسیال تولیدی نقش عمده ای دارند. تغییرات میزان MRR و IOR در منحنی شکل 2-13 نمایش داده شده است. طبق منحنی نمایش داده شده، ماکزیمم میزان MRR و IOR در زمان روشنی پالس 30 μ s حاصل می شود.



شکل 2-13 تغییرات MRR و IOR در برابر زمان روشنی پالس [56].

نانو سیال حاوی ذرات مس بطور گسترده ای در صنایع مختلف بعنوان خنک کننده بکار گرفته می شود. روش های متنوعی در تولید ذرات مس، شامل میکرو امولسیون³، آسیاب ساچمه با انرژی بالا، رسوب دهی از محلول نمک مسی، تشعشع نور ماوراء بنفش⁴، و فرآیند پولیول⁵ وجود دارند. تمامی این روش ها هزینه بر بوده و نیاز به کنترل دقیق اندازه ذرات تولیدی دارند. در کنار این، نانوسیال تولید شده از طریق توزیع این پودرها در سیال پایه با مشکلات عمده ای از جهت تراکم ذرات و نحوه توزیع آن در سیال پایه همراه است. از این جهت، تولید نانوسیالی که مقرون به صرفه و اقتصادی باشد از ویژگی ممتازی برخوردار است. در مطالعه ای که توسط ساهو و همکاران⁶ صورت

¹ Reduction of intensity of absorption spectrum

² Double-layer Debye length

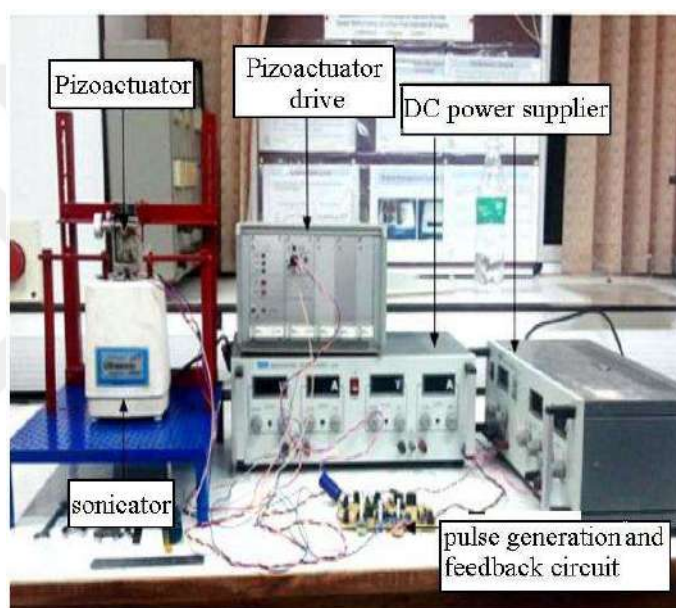
³ Micro-emulsion

⁴ Ultra-violet high radiation

⁵ Polyol process

⁶ Sahu et al.

گرفت [57]، از فرآیند میکرو ماشینکاری تخلیه الکتریکی¹ در سیالی از جنس آب دی یونیزه شده و نیز آب دی یونیزه شده به همراه پلی اتیلن گلیکول (PEG) بعنوان عامل تثبیت کننده به میزان 2 mg در هر 200 ml از آب دی یونیزه شده در جهت تولید نانو ذرات مس استفاده شد. این محققین به مطالعه پایداری ذرات توزیع شده در محیط سیال پایه و هدایت حرارتی نانوسیال تولید شده پرداختند. ایشان از آنالیز تفرق اشعه اکس و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) برای بررسی ماهیت شیمیایی، اندازه و مورفولوژی نانوذرات تولید شده در پارامترهای فرآیند ولتاژ تخلیه 30 V، شدت جریان تخلیه 2 A، فرکانس تخلیه 5 kHz، سیکل وظیفه 30 % و زمان روشنی پالس 60 μ s در مدت زمان ماشینکاری 20 الی 30 دقیقه بهره جستند. این محققین از یک ارتعاش گر آلتراسونیک با فرکانس ارتعاش 5 kHz بطور همزمان با فرآیند جرقه زنی در تولید نانوذرات مس جهت جلوگیری از تراکم ذرات حین تولید استفاده کردند. مجموعه بکارگرفته شده در تحقیق انجام گرفته در شکل 2-14 نمایش داده شده است.



شکل 2-14 تجهیزات مورد استفاده در تولید نانوسیال مسی [57].

ساهو و همکاران [57] از قانون ویسکوزیته استوک² و اندازه گیری زمان لازم برای سقوط ساچمه فولادی در داخل ظرف محتوی نانوسیال (تا این ساچمه به ته ظرف برسد) جهت تعیین رابطه بین سرعت ته نشینی نانوسیال مس برای اندازه گیری پایداری ذرات توزیع شده در سیال پایه استفاده کردند. تصاویر TEM بدست آمده از نانو ذرات تولید شده در آب دی یونیزه خالص نشان دادند که شکل تقریبی این ذرات تقریباً بصورت کروی است و اندازه آنها در بازه 600 تا 1100 nm قرار دارد. چنین گزارش شده است که نانوسیال تولید شده در سیال پایه آب دی یونیزه شده خالص دارای پایداری ضعیف ذرات توزیع شده در حالت سوسپانسیون و ته نشینی قابل ملاحظه این ذرات پس از یک مدت زمان مشخص می باشد. اضافه نمودن PEG در آب دی یونیزه سبب کاهش عکس العمل بین نانو ذرات سنتز شده در داخل سیال پایه می گردد و این امر باعث کاهش اندازه ذرات تولید شده و بهبود پایداری نانوسیال می شود. طبق نتایج حاصله، توزیع اندازه ذرات مس در نانوسیال پایه آب دی یونیزه به همراه

¹ Micro-EDM

² Stokes law of viscosity

PEG بطور متوسط برابر 6 nm می باشد. همچنین نتایج حاصل از آزمون ویسکوزیته نشان دادند که سرعت ته نشینی نانوذرات مس در نانوسیال حاوی PEG در مقایسه با نانوسیال پایه آب دی یونیزه شده به میزان 99٪ کاهش یافته است. لذا، پایداری نانوذرات توزیع شده در سیال پایه حاوی PEG بهتر از نانوسیال پایه آب دی یونیزه شده خالص است. بعلاوه چنین گزارش نموده اند که هدایت حرارتی نانوسیال پایه آب دی یونیزه شده و نانوسیال آب دی یونیزه شده به همراه PEG بترتیب برابر 6 و 15٪ نسبت به هدایت حرارتی آب دی یونیزه شده خالص افزایش یافته است.

2-3- بررسی نقش روانکار در مشخصات فرآیند و توزیع حرارت در پروسه ماشینکاری

2-3-1- نقش سیال خالص به عنوان روانکار در ویژگی های فرآیند ماشینکاری

روانکاری در حین فرآیند سنگ زنی از جنبه کاهش اصطکاک و سایش دانه های ساینده که دارای اثرات ناخواسته ای از جهت تغییر در نیروهای ماشینکاری و زبری سطح کار است، بسیار حائز اهمیت می باشد. اثر روانکاری سیال روانکار عمدتاً به نفوذ سیال در فصل مشترک دانه های ساینده-قطعه کار و تشکیل لایه روانکار مؤثر¹ بستگی دارد. روانکاری MQL تحت شرایط روانکاری مرزی یا فیلم-نازک اتفاق می افتد که در آن ویژگی های جریان شناختی سیال دارای اهمیت زیادی نبوده و درجه جدایش سطوح لغزش² نه تنها به ویژگی های شیمیایی و فیزیکی روانکار، بلکه به ماهیت سطوح و حرکت نسبی آنها بستگی دارد [58].

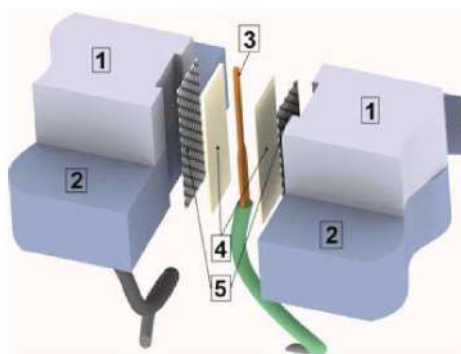
دراین راستا مورگان و همکاران³ [59] به مطالعه توزیع دما در حین فرآیند سنگ زنی دقیق با عمق برش در بازه 5 تا 25 μm پرداختند. این محققین به مقایسه نتایج حاصله با نتایج حاصل از سنگ زنی در شرایط روانکاری جریان سیال (WET) با استفاده از روانکار Castrol Hysol XF 5٪ و سنگ زنی خشک پرداختند. ایشان از روانکار Castrol-Careat-ES1 به عنوان سیال برشی در سنگ زنی MQL با فشار هوای 4 bar و نرخ جریان 40 ml/h و از روش ترموکوپل تک قطبی با نام ترموکوپل اومگا⁴ CO2-T جهت اندازه گیری دما در حین پروسه سنگ زنی استفاده گردید (شکل 2-15). در این حالت چرخ سنگ با ترموکوپل نوع J در هر پاس عبوری تماس پیدا می نماید، ترموکوپل را خم کرده و تماسی را با قطعه کار ایجاد می کند (شکل 2-16). جنس ماده مورد آزمایش و متغیرهای فرآیند مطالعه شده در طی آزمایشات تجربی در جدول 2-2 نمایش داده شده است.

¹ Effective lubrication layer

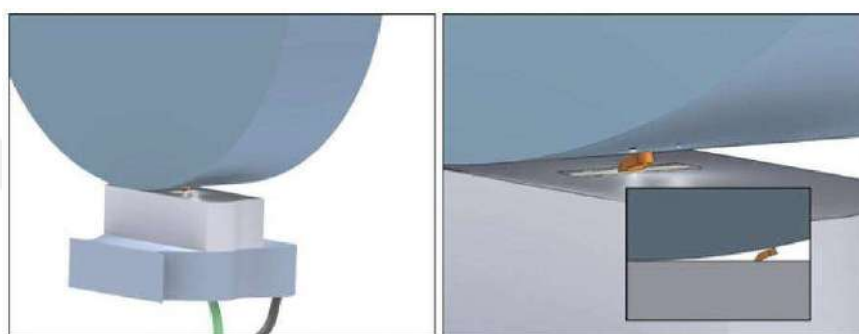
² Degree of separation of sliding surfaces

³ Morgan et al.

⁴ Omega CO2-T



شکل 2-15 شماتیکی از پیکربندی ترموکوپل تک قطبی با شیر قابل مشاهده برای ترموکوپل؛ 1-قطعه کار، 2-قطعه کار پایه، 3- ترموکوپل، 4-طلق نسوز (Mica)، 5-لایه جلا داده شده (Varnished layer) [59].



شکل 2-16 چرخ ساینده در حین عبور ترموکوپل را خم کرده و یک ارتباطی را با ماده قطعه کار ایجاد می نماید [59].

جدول 2-2 ورودی های مورد مطالعه در ضمن فرآیند سنگ زنی در تحقیق مورگان و همکاران [59].

پارامتر	فولاد EN 8	فولاد EN 31/M2
سرعت چرخ ساینده (m/s)	25	45
سرعت قطعه کار (m/min)	6.5	15
عمق برش (μm)	5	15
نوع اصلاح سنگ	خشن	پرداخت

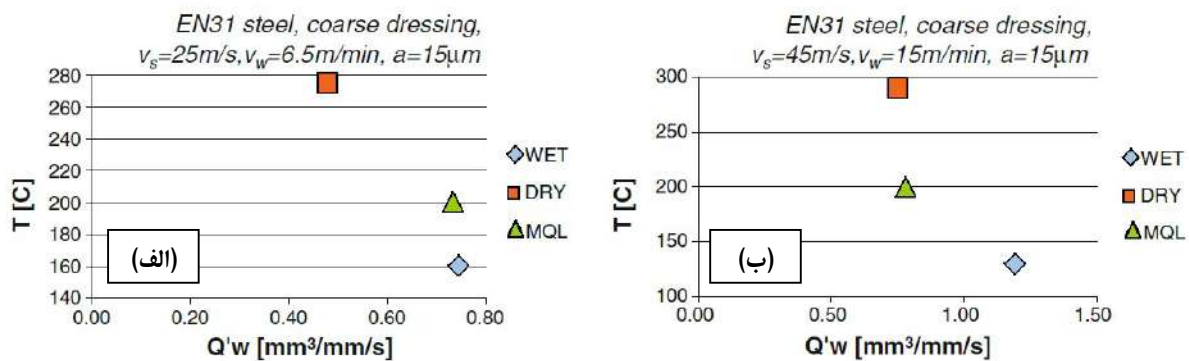
مطابق نتایج ارائه شده توسط مورگان و همکاران [59] در ماده کار فولاد EN31 نرخ برداشت ماده ویژه¹ (Q_w) در حالت MQL و WET تقریباً یکسان هستند. با این حال، میزان حرارت تولید شده در MQL به میزان تقریبی 20٪ از دمای تولید شده تحت WET بالاتر است (شکل 2-17 الف). عملکرد بهتر در شرایط WET به راندمان برش بالاتر و اثر شستشوی بهتر براده ها توسط حجم بالاتر سیال نسبت داده شده است. همچنین، بالاترین مقدار Q_w در شرایط افزایش سرعت چرخ ساینده و سرعت قطعه کار برای حالت WET گزارش شده است در حالی که نرخ برداشت ماده ویژه برای MQL و DRY تقریباً یکسان است. همچنین پایین ترین دما برای حالت WET گزارش شده است. عملکرد مناسبی که برای حالت WET مشاهده می گردد اساساً بخاطر چرخ سنگی است که برای مواد سخت، سرعت های بالا و اصلاح خشن² در شرایط خنک کاری متداول جریان سیال طراحی گردیده است.

¹ Specific material removal rate ($\text{mm}^3/\text{mm/s}$)

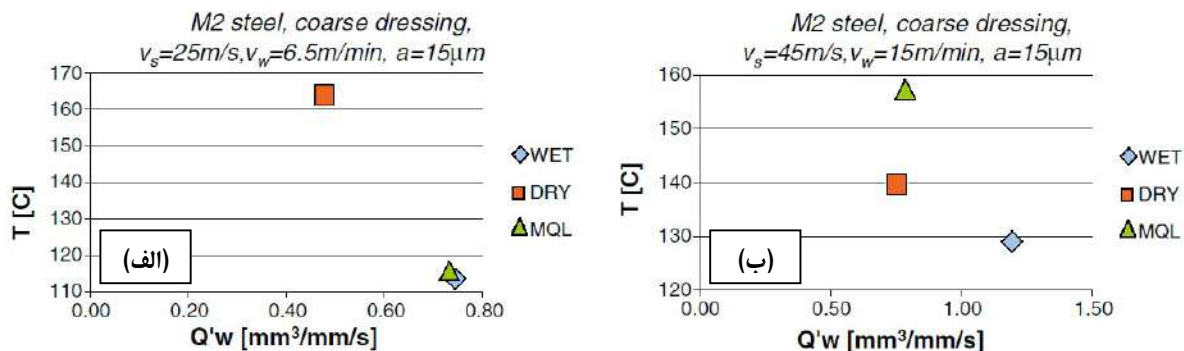
نرخ برداشت ویژه ماده برابر است با نرخ برداشت ماده از قطعه کار به ازای پهنای سطح واحد از قطعه کار.

² Coarse dressing

فولاد ابزار M2 دارای سختی پایین تری نسبت به فولاد EN31 است. این محققین کاهش دمای سنگ زنی بخصوص در مورد سنگ زنی خشک در حالت سنگ زنی فولاد M2 نسبت به سنگ زنی فولاد EN31 را گزارش نموده اند (شکل 2-18-الف). با این حال، به ازای افزایش سرعت چرخ سنگ و سرعت قطعه کار رفتار متفاوتی از میزان دمای سنگ زنی در حالت MQL و DRY گزارش شده است (شکل 2-18-ب). مورگان و همکاران نتیجه گیری نمودند که تحت شرایط مشخصی از متغیرهای فرآیند سنگ زنی می توان عملکرد یکسانی را بر حسب نرخ ویژه برداشت ماده و دمای فرآیند در شرایط MQL و WET انتظار داشت.



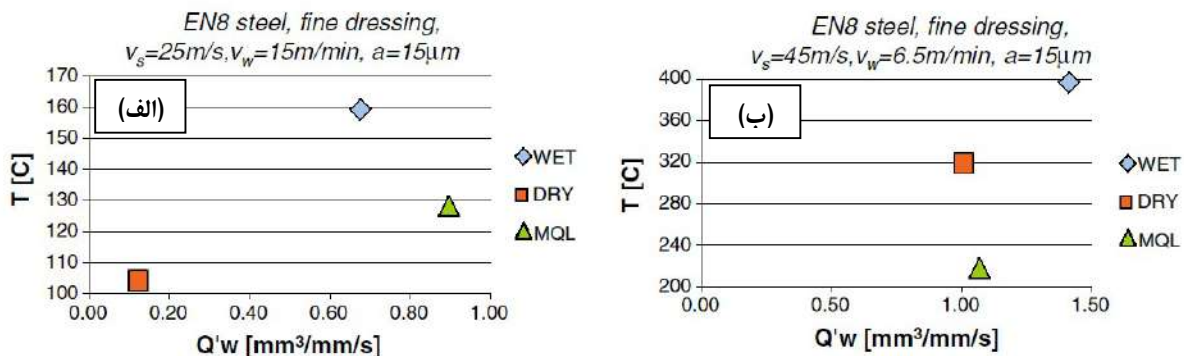
شکل 2-17 دمای سنگ زنی در برابر نرخ برداشت ماده ویژه ($Q'w$) برای فولاد EN31 [59].



شکل 2-18 دمای سنگ زنی در برابر نرخ برداشت ماده ویژه ($Q'w$) برای فولاد ابزار M2 [59].

نتایج تحقیقات مورگان و همکاران [59] در زمینه سنگ زنی فولاد EN8، که دارای درجه سختی پایین تری نسبت به جنس قطعات EN31/M2 است، نشان میدهد که راندمان برش تحت شرایط MQL نسبت به حالت WET و DRY بالاتر و حرارت تولید شده نسبت به حالت روانکاری جریان سیال پایین تر می باشد (شکل 2-19-الف). این محققین چنین آورده اند که راندمان فرآیند سنگ زنی در حالت DRY در مورد ماده قطعه کار با سختی پایین بشدت پایین می آید چنانچه $Q'w$ برای حال DRY بسیار کم است. تحت شرایط سنگ زنی در حالت WET، از آنجایی که چرخ سنگ دارای دانه های ریز است و دارای خلل و فرج کمی است برای عملیات سنگ زنی دقیق قطعات نرم مناسب نمی باشد و ماده کار بجای برداشته شدن، دچار تغییر شکل پلاستیکی گردیده و به سمت بالا و به کناره ها جریان می یابند. با افزایش سرعت چرخ ساینده و سرعت خطی قطعه کار پایین ترین دمای سنگ زنی در شرایط MQL مشاهده گردیده است (شکل 2-19-ب). برای شرایط سنگ زنی WET چنین گزارش شده

است که حالت بخار فیلم روانکار¹ بوجود می آید ولی جریان شستشوی روانکار سبب زدودن براده ها و افزایش میزان Q_w' می گردد.



شکل 2-19 دمای سنگ زنی در برابر نرخ برداشت ماده ویژه (Q_w') برای فولاد EN8 [59].

واشیستا و پاول² [60] مطالعه تجربی-تحلیلی را برای بررسی نقش پارامترهای فرآیند بر روی ضریب انتقال حرارت همرفت سیال خنک کاری و کسر توزیع حرارت در سنگ زنی عمیق راندها بال³ (HEDG) انجام دادند. این محققین تأثیر سرعت چرخ ساینده (V_c)، سرعت قطعه کار (V_w) و عمق بار (a_p) را بر روی سهم هر کدام از چاه های حرارتی⁴، شامل قطعه کار (R_w)، چرخ ساینده (R_s)، براده سنگ زنی (R_{ch})، و سیال خنک کاری (R_f) در سنگ زنی HEDG بر روی فولاد AISI 1060 با استفاده از چرخ ساینده CBN مورد مطالعه قرار دادند. ایشان گزارش نمودند که ضریب انتقال حرارت همرفت سیال خنک کاری با افزایش سرعت چرخ ساینده و نیز با کاهش طول ناحیه تماس سنگ زنی افزایش می یابد. طبق نظریه مطرح شده، تحت عنوان فرضیه چرخ سیال⁵، لایه نازکی از سیال خنک کار ما بین چرخ و قطعه کار در ناحیه سنگ زنی تشکیل می شود که با سرعت چرخ ساینده دوران نموده و سبب دور نمودن حرارت از ناحیه تماس سنگ زنی با استفاده از خنک کاری همرفت می گردد. بعلاوه، یافته های این محققین نشان می دهد که افزایش V_w به همراه کاهش V_c و a_p سبب افزایش R_s می شود. R_w با افزایش V_c و V_w و با کاهش میزان a_p افزایش می یابد. در شرایط سنگ زنی HEDG در صورت اعمال روانکاری مناسب، سهم R_s و R_w می تواند تا کمتر از 10٪ کاهش یابد. همچنین افزایش a_p و V_w و نیز کاهش V_c سبب افزایش میزان R_{ch} می گردد. مهمتر اینکه سیال پایه آب بعنوان خنک کار می تواند تا 70٪ از حرارت تولید شده را از ناحیه سنگ زنی دفع نماید. R_f با افزایش V_c و کاهش a_p و V_w بیشتر می گردد. مهمتر اینکه بکارگیری چرخ CBN با ضریب هدایت حرارتی بالا و خنک کاری مؤثر با جریان سیال خنک کار سبب می گردد تا تنش پسماند در سطح کار از نوع تنش فشار بوده و تغییر فازی در سطح قطعه سنگ زنی شده مشاهده نگردد.

حداد و همکاران [33] مطالعه ای را در زمینه توزیع حرارت در سطح قطعه کار سخت کاری شده از جنس فولاد 100Cr6 در فرآیند سنگ زنی MQL با استفاده از چرخ های ساینده زینتر شده Al_2O_3 و CBN با چسب رزینی

¹ Lubrication film boiling

² Vashista and Paul

³ High efficiency deep grinding

⁴ Ratio of heat partition to different sinks

⁵ Fluid wheel assumption

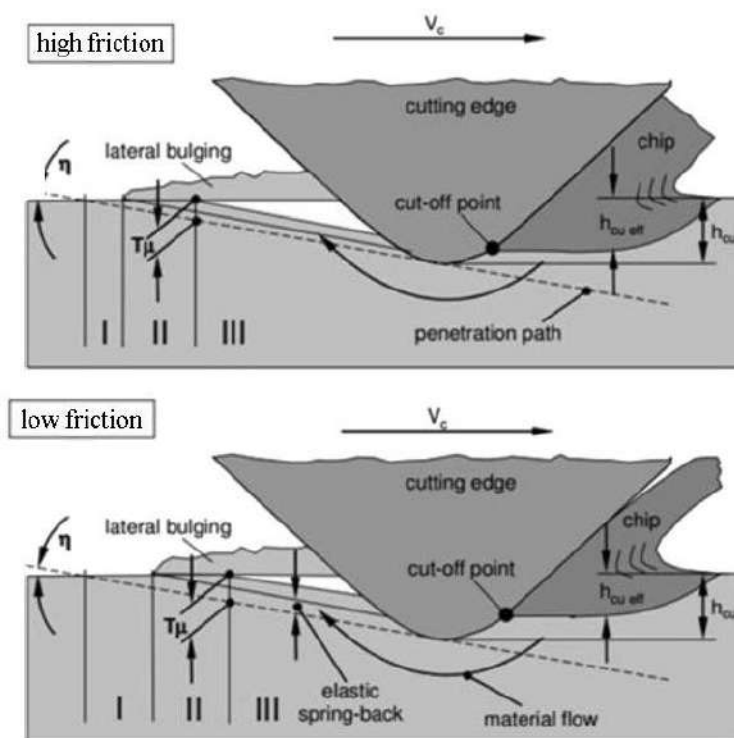
پرداختند. ایشان برای این منظور از روش جازنی ترموکوپل در داخل قطعه کار برای اندازه گیری دما در حین فرآیند سنگ زنی استفاده نموده و به بررسی سهم حرارت منتقل شده به قطعه کار پرداختند. ترموکوپل در فاصله 1 mm از سطح فوقانی قطعه کار در داخل قطعه از طریق اتصال اپوکسی جازنی شده و سنگ زنی تا خود ترموکوپل ادامه یافت. روانکار بکار برده شده از نوع روانکار بر پایه روغن های معدنی بوده و با نرخ 20 و 100 ml/min در فشار 4 و 7 bar به موضع سنگ زنی توسط نازلی به قطر 3 mm، زاویه 15° و فاصله 80 mm از ناحیه سنگ زنی پاشیده می شد. این محققین نشان دادند که در حالت MQL دمای حداکثر به میزان 50 تا 115° در وضعیت بکار گیری چرخ Al_2O_3 و 18 تا 23° در وضعیت بکارگیری چرخ CBN نسبت به حالت خشک کاهش می یابد. ایشان توضیح دادند که این کاهش بخاطر اثرات خنک کنندگی و روانکاری غبار روغن¹ در MQL است بگونه ای که اثر روانکاری سبب کاهش نیروها و انرژی برشی می گردد. بعلاوه، بخشی از حرارت تولید شده از طریق انتقال حرارت همرفت و یا تبخیر قطرات روغن در سطح دفع می گردد. علاوه بر این، دمای کمتری در عملیات سنگ زنی با فشار 4 bar و دبی جریان 100 ml/min در وضعیت MQL مشاهده گردیده است. این امر به کاهش نیروی مماسی در حین فرآیند سنگ زنی در شرایط دبی بالاتر سیال روانکار نسبت داده شده است. به عبارت دیگر، برای دستیابی به عملیات روانکاری مؤثر لازم است که قطرات روغن در MQL سطح تحت سایش از دانه های ساییده² در ناحیه تماس را پوشش دهند. بعلاوه، مطابق نتایج منتشر شده، حداکثر افزایش دما در شرایط خنک کاری جریان سیال برای حالت استفاده از چرخ سنگ Al_2O_3 و CBN بترتیب برابر 55 و 32 °C گزارش شده است. این دما کمتر از دمای نقطه جوش سیال خنک کاری پایه آب بوده و در این شرایط عدم حضور فیلم بخار، طبق توضیح داده شده، نشان دهنده خنک کاری مناسب ناحیه تماس توسط سیال خنک کاری است. در مورد زبری سطوح سنگ زنی شده نیز چنین گزارش داده اند که قطعات سنگ زنی در فرآیند سنگ زنی MQL بترتیب دارای زبری سطح 30٪ و 15٪ کمتر از حالت سنگ زنی خشک و سنگ زنی با خنک کاری جریان سیال است.

ربیعی و همکاران [61] به مطالعه نقش خواص مکانیکی قطعه کار در عملکرد MQL در فرآیند سنگ زنی پرداختند. ایشان برای این منظور به بررسی ویژگی های فرآیند و خواص سطحی قطعاتی از جنس دو فولاد نرم CK45 و S305 و دو فولاد سخت HSS و 100Cr6 توسط چرخ سنگ زنی اکسید آلومینیم در پارامترهای برشی سرعت چرخ 30 m/s، سرعت قطعه کار 3 m/min، عمق بار 5، 20، 35 و 50 μm پرداختند. نیروهای سنگ زنی و زبری سطح را در فرآیند سنگ زنی خشک، سنگ زنی در حالت جریان سیال با سیال روانکار پایه آب با غلظت 10 و 100 MQL با سیال بهران RS 1642 با نرخ جریان 120 ml/min را با هم مقایسه گردید. مطابق نتایج گزارش شده، استفاده از تکنیک MQL سبب کاهش قابل ملاحظه ضریب اصطکاک یا عبارتی نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی (F_t/F_N) نسبت به وضعیت خنک کاری جریان سیال و یا سنگ زنی خشک می گردد. ایشان این نتایج را به اثرات روانکاری و تحویل دقیق غبار روغن در فصل مشترک قطعه کار-دانه ساییده توسط جت MQL مرتبط دانسته اند. همچنین، نیروی مماسی سنگ زنی بدلیل نفوذ مؤثر غبار روغن توسط سیستم MQL در ناحیه سنگ زنی و تشکیل فیلم سطحی روانکار بادوام و با مقاومت برشی کمتر نسبت به فولاد پایه در سنگ زنی تمام

¹ Oil mist

² Wear flat area of abrasive grains

قطعات کاهش یافته و به تبع آن انرژی مصرفی ماشین سنگ زنی تقلیل می یابد. در نقطه مقابل، نیروی عمودی حاصل در سنگ زنی MQL برای مواد سخت بالاتر از نیروی متعامد حاصل در سنگ زنی به روش شستشوی سیالی و سنگ زنی خشک است، در حالی که عکس این حالت برای مواد نرم حاکم است. بطور مشابه، زبری بدست آمده در سنگ زنی با استفاده از تکنیک MQL در مورد مواد سخت کمترین میزان و در مورد مواد نرم بالاترین میزان را نسبت به شرایط سنگ زنی خشک و سنگ زنی با خنک کاری جریان سیال داراست. طبق توجیه ارائه شده، در مورد مواد سخت، شرایط اصطکاک، تیزی لبه های برشی و خواص جریان مواد و قابلیت فرم پذیری آنها¹ سبب افزایش عمق برش دانه ساینده (T_{μ}) و کاهش ضخامت مؤثر براده ($h_{cu\ eff}$) می گردد (شکل 2-20). نیروی سنگ متعامد بالا در مواد سخت سبب اعمال تنش های برشی بسیار بالایی در لبه های برشی می گردد که منجر به اثرات خود تیزکنی دانه های ساینده در سطح چرخ از طریق شکست دانه ها² می گردد. این اثرات منجر به تولید براده های نازکتر و صافی سطح بهتر در تکنیک MQL می شود. در مورد مواد نرم، با کاهش ضریب اصطکاک با بکارگیری تکنیک MQL، میزان $h_{cu\ eff}$ کاهش یافته، میزان تغییر شکل مواد افزایش می یابد، و جریان جانبی مواد و اثر شخم زنی بدلیل قابلیت تغییر شکل پلاستیکی مواد نرم منجر به زبری سطح بالا و کیفیت سطحی نامناسب می گردد. همچنین نیروی سنگ زنی متعامد پایین در مورد مواد نرم باعث کاهش مکانیزم خود تیزکنی دانه های ساینده در سطح چرخ می گردد که خود سبب افزایش زبری سطح قطعات می شود.



شکل 2-20 نقش اصطکاک در عمق برش و راندمان ماشینکاری [61].

افزایش دمای سیال خنک کاری در شرایط خنک کاری جریان سیال در حین انجام پروسه سنگ زنی تاثیر نامطلوبی بر روی دقت پروسه ماشینکاری گذاشته و سبب عدم پایداری محصول نهایی می گردد [62]. از طرف

¹ Flow properties and malleability of materials

² Self-sharpening of wheel surface through grain breakage

دیگر، استفاده از روش خنک کاری برودتی¹ سبب ایجاد گرادیان شدید حرارتی در ناحیه سنگ زنی می شود که منجر به ایجاد سطح بالایی از تنش های پسماند در سطح قطعات می گردد [63]. این امر می تواند بر روی عملکرد قطعه نهایی تأثیر نامطلوبی داشته و دقت ماشینکاری را تحت تأثیر قرار دهد. علاوه بر آن جایگزینی مداوم نیتروژن مایع بسیار هزینه بر بوده و دقت بسیار بالایی از نظر ایمنی بایستی لحاظ گردد [64].

برای پاسخ گویی به مشکلات فوق الذکر، چائو و لای² [65] مطالعه ای را در زمینه مقایسه روانکاری فعال³ (روانکاری در شرایطی که دمای روانکار تا 2°C کاهش یافته است) و روانکار فعال شده⁴ (سیال خنک شده تحت فشار) انجام دادند. سیکل خنک کاری بکار برده شده توسط این محققین در شکل 2-21 قابل مشاهده است. این سیستم قادر به کاهش دمای سیال در حالت بدون بار تا 2°C و در حالت تحت بار تا دمای 9°C می باشد. ایشان همچنین آنالیز المان محدود توسط نرم افزار ANSYS CFX10 را برای بررسی عملکرد انتقال حرارت همرفت اجباری⁵ سیال فعال شده در فرآیند سنگ زنی انجام دادند. طبق نتایج منتشر شده، سرعت میز پایین به همراه سرعت چرخ بالا عموماً سبب ایجاد کیفیت سطح بهتر می گردد. در شرایط سنگ زنی با جریان خنک کاری متداول، نشانه های سنگ زنی قابل ملاحظه ای در امتداد جهت سنگ زنی مشاهده شده و نقاط برجسته و فرورفته ای در سطح نمونه ظاهر می شوند. در نقطه مقابل، گزارش داده اند که در شرایط خنک کاری پیشنهاد شده نه تنها نشانه های سنگ زنی کمتر هستند، بلکه سطح تخت تر بوده و لکه های کمتری بصورت پستی و بلندی در سطح کار دیده می شود. بعلاوه، این محققین اندازه گیری تنش های پسماند توسط روش پراش اشعه اکس تا عمق $10\text{ }\mu\text{m}$ از سطح کار را انجام دادند. نتایج حاصله نشان داد که در عمق بار $5\text{ }\mu\text{m}$ و سرعت میز کار 80 mm/s ، سطح تنش پسماند از $324/2\text{ MPa}$ برای حالت روانکاری جریان سیال به $275/15\text{ MPa}$ برای حالت روانکاری فعال شده کاهش می یابد. با این حال، در شرایط کاهش عمق بار تا $1\text{ }\mu\text{m}$ و سرعت میز کار 120 mm/s تنش پسماند افزایشی را از $208/75\text{ MPa}$ تا $238/9\text{ MPa}$ نمایش می دهد. زبری سطح اندازه گیری شده نیز نشان دهنده کاهشی تا حدود 40% در میزان R_a در شرایط خنک کاری فعال شده می باشد. چائو و لای چنین نشان دادند که به ازای هر کاهش 3°C از دمای سیال خنک کاری از 21°C تا 9°C ، زبری سطح در حدود $6\% - 5\%$ کاهش می یابد و نیز میزان زبری سطح حاصله در خنک کاری فعال شده کمتر از خنک کاری فعال است.

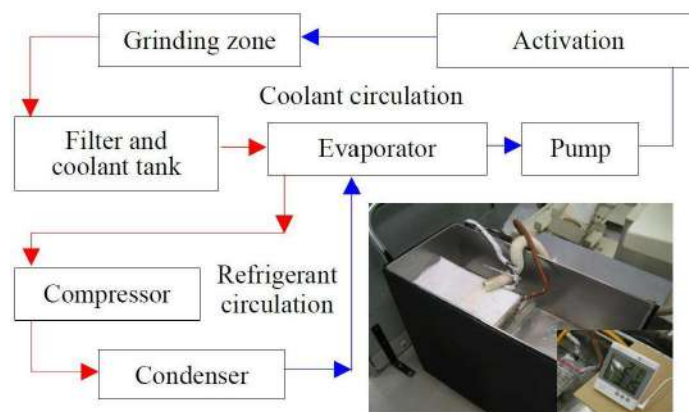
¹ Cryogenic cooling

² Chao and Lai

³ Actively cooled approach

⁴ Activated coolant approach

⁵ Forced convection



شکل 2-21 سیستم طراحی شده برای فراهم سازی خنک کاری فعال و خنک کاری فعال شده در حین سنگ زنی [65].

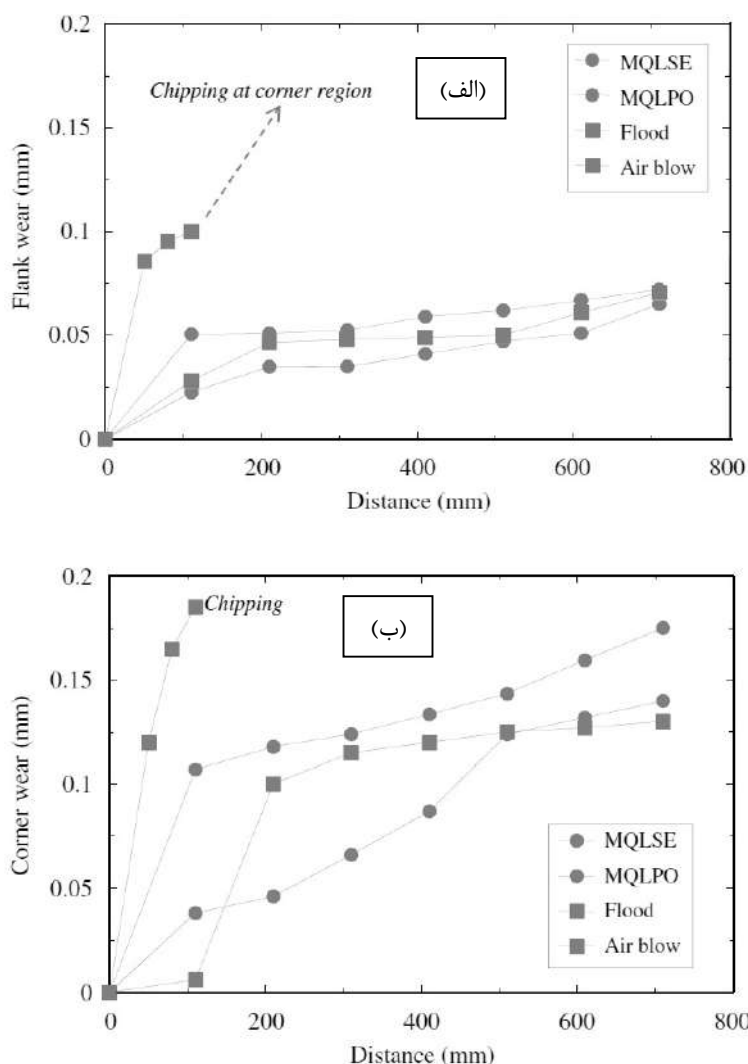
رحیم و ساحارا¹ [66] مطالعه ای را در جهت بررسی کاربرد روغن خرما و استر مصنوعی در فرم روانکار ($MQLP^2$ و $QMLSE^3$) در سوراخکاری سرعت بالای آلیاژ Ti-6Al-4V انجام دادند. سایش سطح آزاد، جدا شدن تکه های ابزار، و ترک های حرارتی به عنوان معیارهای طول عمر ابزار مورد مطالعه قرار گرفتند. حرارت قطعه کار در حین سوراخ کاری در دو عمق 9 mm و 17 mm توسط ترموکوپلی که در فاصله 1/25 mm از سطح سوراخ موقعیت داده شده بودند، اندازه گیری شدند. سرعت های برشی 60، 80 و 100 m/min و نرخ پیشروی 0/1 و 0/2 mm/rev به عنوان پارامترهای ماشینکاری بررسی شدند. نتایج بدست آمده نشان دادند که در شرایط خنک کاری از طریق جریان هوا، سایش در سطح آزاد بسرعت گسترش یافته و جدا شدن مواد ابزار در فرم تکه های کوچک با شدت بالایی اتفاق می افتد. طول عمر ابزار در این حالت 48 s گزارش شده است. در شرایط بکارگیری $MQLP$ و $QMLSE$ طول عمر ابزار تا 314 s بیشتر شده و $MQLP$ سبب کاهش بیشتر نرخ سایش ابزار نسبت به $QMLSE$ می گردد. این کاهش در رشد سایش در سطح آزاد و سایش گوشه به اثر خنک کاری-روانکاری بالاتر $MQLP$ نسبت داده شده است بگونه ای که حتی میزان سایش ابزار کمتری نسبت به شرایط روانکاری جریان سیال گزارش شده است. مطابق توجیه ارائه شده، از آنجایی که روغن خرما دارای درصد بالایی از اسیدهای چرب است و طول زنجیره کربنی آن بلندتر از استر مصنوعی است، دارای پایداری بالاتری در ناحیه تماس بین ابزار و قطعه کار می باشد. عکس العمل بین اسید چرب و لایه اکسید فلزی سبب ایجاد صابون فلزی⁴ در وجه مشترک ابزار-قطعه کار می گردد که سبب کاهش اصطکاک و حرارت تولید شده و به تبع آن باعث کاهش سایش ابزار می گردد. ویسکوزیته بالای روغن خرما نیز باعث افزایش مقاومت آن در برابر جریان، انجام روانکاری بهتر، کاهش اصطکاک و جلوگیری از فرسایش سریع ابزار می گردد (شکل 2-22).

¹ Rahim and Sahara

² Palm oil MQL

³ Synthetic ester oil MQL

⁴ Metal soap



شکل 2-22 افزایش سایش در (الف) سطح آزاد و (ب) گوشه ابزار در ادامه فرآیند برش با سرعت برشی 60 m/min و عده پیشروی 0/1 mm/rev [66].

رحیم و ساحارا [66] گزارش نمودند که روش MQLPO¹ سبب کاهش نیروی پیشروی مته به میزان 30٪ نسبت به حالت روانکاری با استفاده از جریان باد می گردد و کاهش در میزان این نیرو توسط MQLPO بمراتب بیشتر از روش MQLSE² می باشد. نتایج مشابهی برای کاهش گشتاور لازم برای مته کاری در شرایط بکارگیری MQLPO گزارش شده است. تری گلیسرین موجود در روغن های طبیعی از طریق اتصال مولکول تری-گلیسرول به سطح فلز و شکل دهی فیلم تک لایه ای از زنجیره های اسید چرب غیر قطبی³ سبب ایجاد لغزش در سطح تماس شده و از این طریق باعث کاهش اصطکاک و نیروهای برشی می گردد. کاهش نیروهای برشی در بکارگیری روغن های گیاهی بیشتر از روغن های معدنی گزارش شده است [67]. افزایش سرعت برش نیز از طریق کاهش ناحیه سطح تماس بین ابزار و قطعه کار و کاهش انرژی ویژه برش سبب کاهش نیروی پیشروی و گشتاور مورد نیاز می گردد. از طرف دیگر، افزایش سرعت برش سبب افزایش دما و کاهش سختی قطعه کار می شود که می تواند در

¹ Palm oil MQL

² Synthetic easter oil MQL

³ Non-polar fatty acids

کاهش نیروهای برشی یک عامل موثر باشد. در نقطه مقابل، افزایش نرخ پیشروی با افزایش مقطع عرضی براده تغییر شکل نیافته، سبب افزایش نیروی پیشروی و گشتاور می گردد [68]. مطابق نتایج حاصل از تحقیق رحیم و ساحارا، روش MQLPO از نظر حداکثر دمای منتقل شده به قطعه کار در حین فرآیند مته کاری با شرایط روانکاری جریان سیال قابل مقایسه می باشد به نحوی که دمای ثبت شده در عمق سوراخ 9 mm بترتیب به میزان 16/5 % و 27/5 برای حالت MQLPO و خنک کاری جریان سیال نسبت به حالت خنک کاری با جریان هوا کاهش یافته است. این مقادیر برای عمق سوراخ 17 mm بترتیب برابر 21/6 % و 7/3 گزارش شده است که نشان دهنده عمق نفوذ بالاتر در سیستم MQLPO نسبت به خنک کاری جریان سیال می باشد.

بلوک و چیفره¹ [69] به مطالعه نقش روغن گیاهی بر روی سلامتی سطح و دقت قطعات در فرآیندهای برقکاری و قلاویزکاری در فولاد ضد زنگ AISI 316 پرداختند. زبری سطح، میکروسختی، و متالوگرافی بعنوان روش های مطالعه سلامتی سطح و دستگاه CMM² بعنوان روش بررسی دقت قطعات استفاده گردید. مطابق گزارش داده شده، سیال برشی نقش مهمی را بر روی سلامت سطح و ضخامت لایه سخت شده کرنشی در زیر لایه سطح قطعات و دقت ابعادی آنها دارند. میزان کرنش سختی، زبری سطح و ضخامت کمتر زیر لایه ای که بصورت پلاستیکی تغییر شکل پیدا کرده است و دقت ابعادی بهتر قطعه کار از جمله مواردی هستند که در عملکرد یک سیال مطلوب بعنوان ملاک انتخاب مطرح شده اند. کمترین زبری سطح در بکارگیری نانوسیال گیاهی حاوی 10 % افزودنی های سولفور و فسفر گزارش شده است. همچنین این سیال سبب ایجاد لایه سخت شده ناشی از کرنش سختی در فاصله نزدیکتری از سطح کار گردیده است که بطور کامل سبب عملکرد مؤثرتر لایه سطحی کار می گردد. در مجموع این محققین چنین بیان کرده اند که روغن های گیاهی دارای عملکرد قابل مقایسه یا بهتر نسبت به روغن های معدنی هستند.

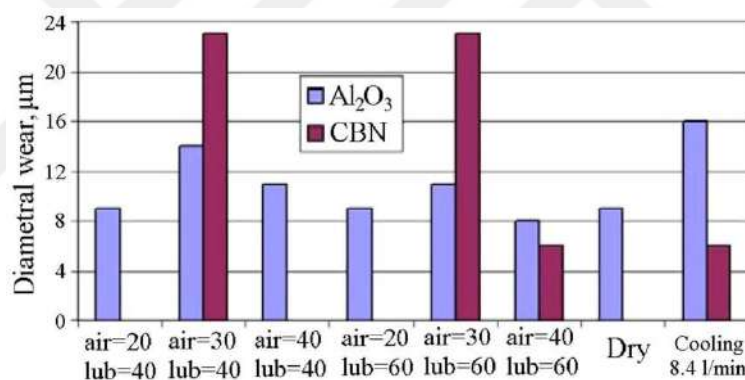
سیلوا و همکاران³ [70] به مطالعه عملکرد سیستم MQL در فرآیند سنگ زنی گرد فولاد AISI 4340 با استفاده از چرخ سنگ اکسید آلومینیم و سوپر ساینده CBN پرداختند. در تست های تجربی از روانکار تجاری LB 1000 به عنوان سیال خنک کار در سیستم MQL با سرعت پاشش 30 و 40 m/s استفاده گردید. برای انجام مقایسه، آزمایشات تجربی برای سیال خنک کار تجاری متشکل از امولسیون 5 % با نرخ جریان 8/41 l/min تکرار شدند. نتایج حاصل از اندازه گیری نیروهای برشی حین پروسه ماشینکاری نمایش دهنده کاهش نیروهای برشی در فرآیند سنگ زنی با استفاده از مکانیزم MQL در مقایسه با حالت خنک کاری جریان سیال است. این پدیده به نفوذ مؤثر روانکار در ناحیه سنگ زنی توسط سیستم MQL نسبت داده شده است. این محققین بر تأثیر موقعیت دقیق نازل اسپری در ظرفیت روانکاری و خنک کاری مکانیزم MQL تأکید نمودند. ایشان گزارش نموده اند که روانکاری مناسب ناحیه برش سبب کاهش اصطکاک در ناحیه تماس چرخ سنگ با قطعه کار شده، از این طریق دمای ایجاد شده در حین فرآیند ماشینکاری کاهش یافته، دانه های ساینده بطور مؤثرتری بر روی سطح ابزار لغزش نموده و در مجموع انرژی مصرفی و نیروی برشی در پروسه سنگ زنی کاهش می یابد. با این حال، تفاوت قابل ملاحظه ای در

¹ Bellucco and Chiffree

² Coordinate measuring technique

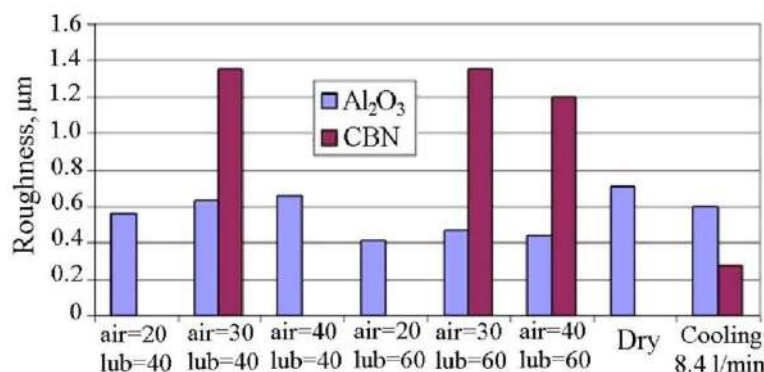
³ Silva et al.

نیروهای برشی ایجاد شده حین سنگ زنی با استفاده از چرخ سنگ Al_2O_3 نسبت به حالت سنگ زنی با چرخ CBN گزارش نشده است. در نقطه مقابل، میزان سایش چرخ CBN در حالت MQL نسبت به چرخ Al_2O_3 مقادیر بمراتب بالاتری را از خود نمایش داده است (شکل 2-23). این سایش بالای چرخ CBN به سختی بالای آن نسبت داده شده است، که سبب سایش ماکرو¹ در شرایط اصطکاک بالای بین براده و چسب اتصال سنگ² گردیده است. در مجموع بخاطر خنک کاری و روانکاری ضعیف فرآیند MQL، بکارگیری چرخ سنگ با سختی متوسط به پایین³ توصیه گردیده است. در نقطه مقابل بکارگیری چرخ های سوپر ساینده در سرعت های برشی بسیار بالا با نرخ براده برداری و صلبیت بالای قطعه کار مناسب دانسته شده است. نتایج مشابهی برای زبری سطح قطعات سنگ زنی شده گزارش شده است که در شکل 2-24 مشاهده می شود. همچنین، این محققین نشان دادند که تنش های پسماند فشاری ایجاد شده در سنگ زنی MQL با بهره گیری از چرخ سنگ Al_2O_3 تا میزان 135٪ و با استفاده از چرخ سنگ CBN تا مقادیر 39/5٪ نسبت به حالت خنک کاری جریان سیال افزایش یافته است. این افزایش در میزان تنش پسماند فشاری در افزایش طول عمر خستگی و استحکام در برابر ضربه در قطعه کار بسیار مؤثر می باشند. (در شکل های ارائه شده، V_{air} سرعت هوای فشرده، $V_{lubricant}$ سرعت سیال، V_s سرعت چرخ ساینده، V_w سرعت قطعه کار، V_f سرعت پیشروی چرخ سنگ، a عمق برش و t_s زمان درگیری با قطعه کار می باشد).



شکل 2-23 سایش قطری چرخ سنگ Al_2O_3 و CBN بعد از 90 سیکل سنگ زنی گرد [70].

(V_{air} =m/s, $V_{lubricant}$ =ml/h, v_s =30m/s, v_w =20m/min, v_f =1mm/min, a =100μm, t_s =10s)



شکل 2-24 زبری سطح قطعه کار در سنگ زنی گرد با چرخ سنگ Al_2O_3 و CBN بعد از 90 سیکل سنگ زنی [70].

(V_{air} =m/s, $V_{lubricant}$ =ml/h, v_s =30m/s, v_w =20m/min, v_f =1mm/min, a =100μm, t_s =10s)

¹ Macro wear

² Intense friction between chips and binder

³ Medium to soft hardness

2-3-2- نقش نانوسیال به عنوان روانکار در ویژگی های فرآیند ماشینکاری

تلفات اصطکاکی مابین ذرات ساینده و قطعه کار به عنوان یک فاکتور عمده در تعیین خروجی نهایی پروسه سنگ زنی شناخته شده است [71]. اصطکاک لغزشی بالا سبب ایجاد نیروهای برشی و دمای بالا در حین سنگ زنی و سایش سریع دانه های ساینده و کاهش نرخ سنگ زنی می گردد [72]. بنابراین انرژی ویژه¹ بالا و دمای بالای سنگ زنی از ویژگی های این فرآیند محسوب می گردد. برای بهبود راندمان این پروسه، روانکاری بعنوان یکی از الزامات مهم سیالات سنگ زنی در کنار زدودن براده و خنک کاری ناحیه سنگ زنی بحساب می آید. در روش خنک کاری جریان سیال با وجود حجم بالای سیال، این سیال قادر به نفوذ مؤثر در ناحیه سنگ زنی تحت فشار بالای هیدرودینامیکی² نمی باشد [73]. هزینه های مرتبط با بکارگیری و جریان مجدد حجم بالای سیال به هزینه نهایی تولید افزوده و دفع این سیال با مشکلات زیست محیطی بسیاری همراه است. بکارگیری روانکاری MQL، که با عنوان روانکاری نزدیک به حالت خشک³ نیز شناخته می شود، بعنوان یک جایگزین عملی برای روش شستشوی جریان سیال مطرح گردیده است. این فرآیند نسبت به روانکاری سنتی دارای میزان مصرف روانکار بسیار کمتری می باشد. با این حال قابلیت روانکاری این مکانیزم خنک کننده بشدت تحت تاثیر شرایط مکانیکی-حرارتی ناحیه سنگ زنی قرار دارد. برای کاهش این وابستگی و افزایش قابلیت فرآیند MQL، نانو روانکارها در فرم سوسپانسیون ذرات جامد، با خواص ویژه تریبولوژی، مورد توجه قرار گرفته اند [74 و 75]. این ذرات جامد در ابعاد نانو می توانند توسط سیستم تحویل سیال MQL به ناحیه سنگ زنی نفوذ کرده و سبب ایجاد یک فیلم روانکار با ضریب اصطکاک پایین گردند. ارتقاء خواص تریبولوژی روانکارها در شرایط ماشینکاری، بخصوص با لحاظ نمودن شرایط خشن حاکم از لحاظ مکانیکی-حرارتی در حین فرآیندی نظیر سنگ زنی، یک امر ضروری است.

در مطالعه ای که توسط شن و همکاران⁴ [76] انجام گرفت نشان داده شد که نانو سیالات حاوی نانو ذرات دی سولفید مولیبدن (MoS_2) غیر اورگانیک⁵ که توسط لایه های مولکولی اورگانیک تری گلیسیریدها و فوسفولیپیدها⁶ احاطه شده اند دارای ویژگی های تریبولوژی برجسته ای است که می تواند در شرایط حاکم بر فرآیند ماشینکاری سایشی با انرژی بالا نظیر سنگ زنی بعنوان سیال روانکار مورد توجه قرار گیرد. این ذرات با ساختار لایه ای متراکم نزدیک به هگزاگونال⁷ (HCP) خواص تریبولوژی و فشار-بالای بسیار خوبی را از خود به نمایش گذاردند. این محققین توضیح داده اند که نانوذرات MoS_2 که در داخل سیال سنگ زنی معلق هستند به ناحیه تماس باریک بین چرخ سنگ و قطعه کار بدلیل اندازه بسیار کوچک و انرژی سطحی بالایی که دارند، راه می یابد. این امر بطور قابل ملاحظه ای سبب ارتقاء روانکاری در حین فرآیند سنگ زنی و در شرایطی که دانه های ساینده در حال شخم زنی⁸ قطعه کار هستند، می گردد. شن و همکاران بمنظور ارزیابی فرضیات خود اقدام به مقایسه نتایج سنگ زنی در

¹ انرژی مورد نیاز برای برداشت واحد حجم ماده

² High hydrodynamic pressure in grinding zone

³ Near-dry lubrication

⁴ Shen et al.

⁵ Inorganic MoS_2 nanoparticles

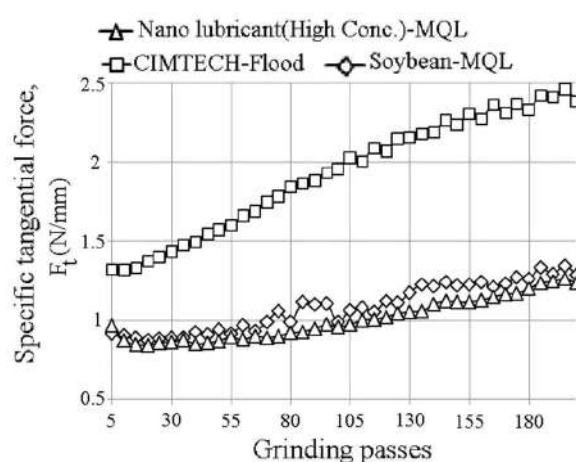
⁶ Organic molecular layers of triglycerides and phospholipids

⁷ Hexagonal close packed

⁸ Plunging

شرایط روانکاری جریان سیال و روانکاری MQL با استفاده از روغن صنعتی سمنیست¹، روغن پارافین، و روغن سویا، با و بدون حضور نانو ذرات افزوده شده MoS₂ نمودند. مقیاس عملکرد در مقایسه انجام شده دو فاکتور عمده نیروی سنگ زنی و سایش چرخ سنگ را شامل می شد. نتایج حاصل از سنجش نیرو مماسی (F_t) در شرایط بکارگیری MQL توسط سیال روغن سویا، در شرایط بکارگیری نانو-روانکار با افزودن 20٪ وزنی از نانو ذرات به سیال پایه، و شرایط شستشوی متداول توسط روانکار صنعتی CIMTECH 500 در شکل 2-25 نشان داده است. همچنین شکل 2-26 نمایش دهنده نتایج حاصل از نرخ سنگ زنی² در حالت سنگ زنی با شرایط فوق الذکر می باشد.

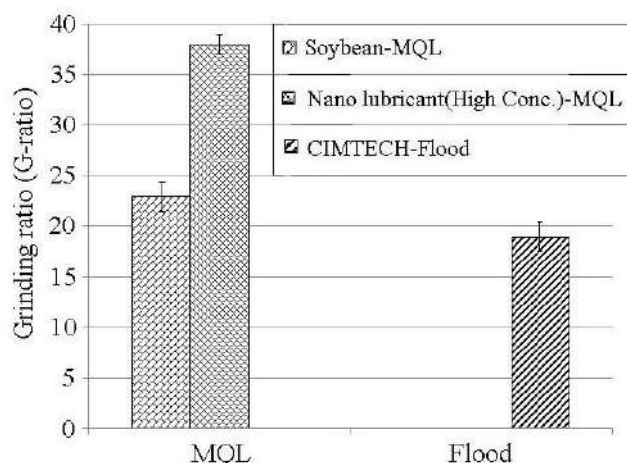
با مراجعه به منحنی های نمایش داده شده در شکل 2-25 می توان دریافت که بکارگیری سیال پایه روغن سویا در فرآیند MQL سبب کاهش قابل ملاحظه ای در میزان نیروی مماسی در حین فرآیند سنگ زنی نسبت به حالت روانکاری جریان سیال می گردد. بکارگیری نانوذرات MoS₂ در سیال پایه روغن سویا با درصد وزنی بالا به میزان 20٪ در فرآیند MQL حتی سبب کاهش بیشتر نیروی مماسی در حین سنگ زنی می شود. در طرف مقابل، با مراجعه به گراف های نمایش داده شده در شکل 2-26 می توان دریافت که بکارگیری نانوذرات در سیال پایه در فرآیند سنگ زنی MQL بطور قابل ملاحظه ای سبب افزایش نرخ سنگ زنی می گردد. ن و همکاران [76] گزارش نمودند که نانو روانکارها بطور عمده ای سبب کاهش نیروهای سنگ زنی می شوند بطوریکه این نیروها در شرایط بکارگیری سیال پایه روغن صنعتی سمنیست به میزان 27٪، در سیال پایه روغن پارافین به میزان 21٪ و در سیال پایه روغن سویا به میزان 9٪ کاهش می یابند. نتیجه عمده دیگر مشاهده شده، افزایش طول عمر چرخ های سنگ زنی از طریق افزایش نرخ سنگ زنی به میزان 46٪ در سیال پایه روغن سمنیست، 35٪ در سیال پایه روغن پارافین و 15٪ در سیال پایه روغن سویا می باشد. این امر سبب صرفه جویی قابل ملاحظه ای در هزینه های سنگ زنی از طریق افزایش عمر کاری چرخ سنگ، که عموماً گران بها است، می شود.



شکل 2-25 نیروهای سنگ زنی مماسی در شرایط MQL خالص، MQL با استفاده از نانو سیال پایه روغن سویا با غلظت وزنی 20٪ نانوذرات، و خنک کاری از نوع شستشو با استفاده از CIMTECH 500 [76].

¹ Canmist

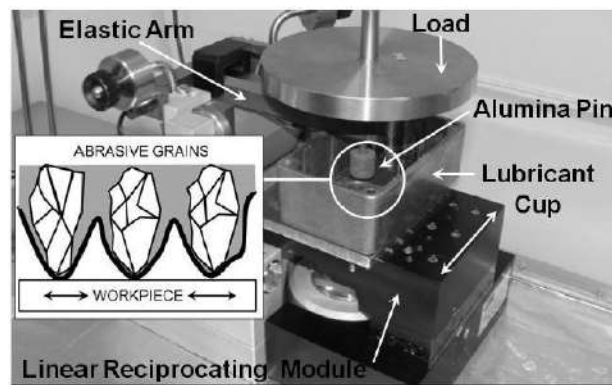
² نرخ سنگ زنی به معنی حجم ماده برداشته شده از قطعه کار توسط فرآیند سنگ زنی به حجم ماده برداشته شده از سنگ ساینده می باشد



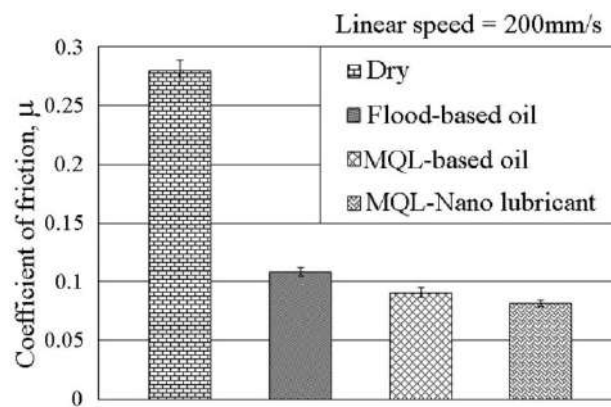
شکل 2-26 نرخ سنگ زنی در شرایط روانکاری MQL خالص، MQL با استفاده از نانوسیال پایه روغن سویا با 20٪ غلظت وزنی نانوذرات، و خنک کاری از نوع جریان سیال با استفاده از CIMTECH 500 [76].

در مطالعه ای که توسط شین و همکاران¹ [77] انجام گرفت، ارتقاء عملکرد نانو روانکار حاوی نانو ذرات دی سولفید مولیبدن (MoS_2) غیر اورگانیک که توسط لایه های مولکولی اورگانیک تری گلیسیریدها و فوسفولیپیدها احاطه شده است در سنگ زنی MQL با استفاده از تست های تریبولوژی جهت شبیه سازی عکس العمل بین ذرات ساینده با قطعه کار در فرآیند سنگ زنی تخت، مورد بررسی قرار گرفت. هدف از مطالعه انجام گرفته توسعه دانش در ارتباط با مکانیزم های مرتبط با روانکاری در نانوسیالات، که در ارتقاء راندمان فرآیند سنگ زنی MQL دخیل می باشد، بیان شده است. در این راستا از روش تست تریبولوژی با مکانیزم رفت و برگشتی پین-روی سطح تخت، با استفاده از پین ساینده آلومینیا (Al_2O_3) بر روی نمونه های چدنی در شرایط پرداختکاری تحت روانکاری MQL و جریان سیال استفاده گردیده است (شکل 2-27). عملکرد تریبولوژی روغن خالص سویا اندازه گیری شده و شرایط حاکم بر روانکاری از نوع MQL با حضور نانوذرات MoS_2 ، و روانکاری از نوع جریان سیال مقایسه شده است. اندازه نانو ذرات MoS_2 در سیال پایه کمتر از 100 nm گزارش شده است. تست های تریبولوژی تحت شرایط خشک و بدون استفاده از روانکار نیز انجام شده اند. ضریب اصطکاک خط سایش ایجاد شده بر روی سطح قطعه کار و مشخصات شیمیایی و مورفولوژی فیلم سطحی ایجاد شده در فصل مشترک سنگ زنی بعد از تست تریبولوژی مورد آنالیز قرار گرفته اند. در سیستم مورد استفاده از طریق اعمال نیروی مشخص عمودی و اندازه گیری میزان انحراف بازوی نگه دارنده ابزار ساینده، ضریب اصطکاک بین پین ساینده و قطعه کار محاسبه گردیده است (شکل 2-28).

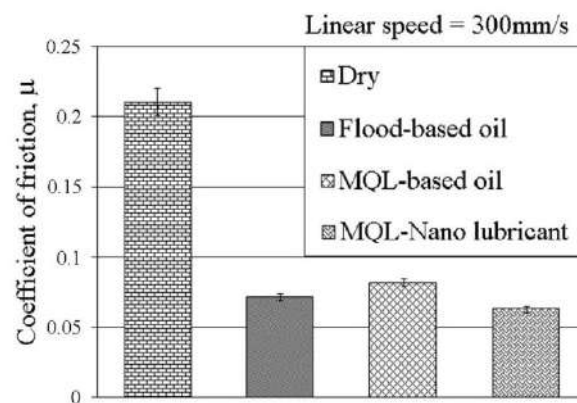
¹ Shin et al.



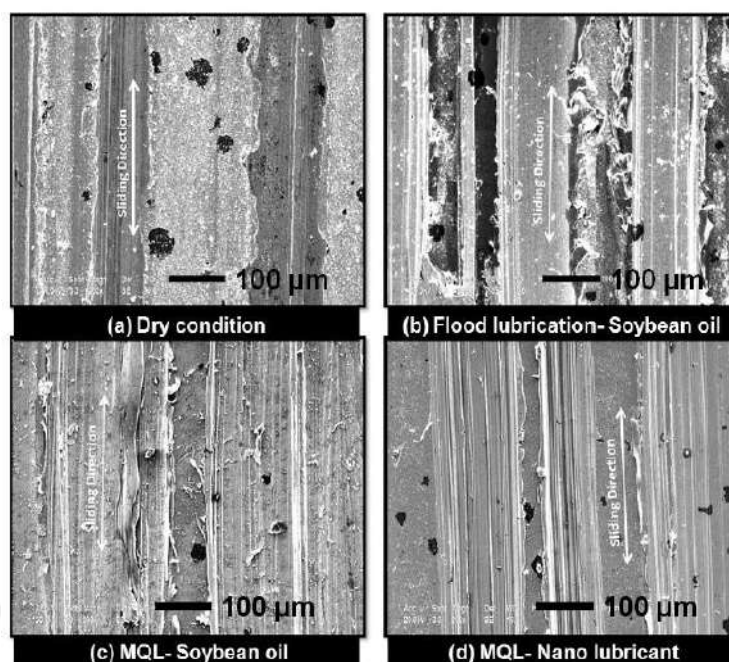
شکل 2-27 سیستم تست تریبولوژی پین-روی-سطح [77].



شکل 2-27 متوسط ضریب اصطکاک پس از 6000 سیکل رفت و برگشتی در شرایط تست تریبولوژی (میزان بار برابر 20 N و سرعت خطی برابر 200 mm/s) [77].



شکل 2-28 متوسط ضریب اصطکاک پس از 6000 سیکل رفت و برگشتی در شرایط تست تریبولوژی (میزان بار برابر 20 N و سرعت خطی برابر 300 mm/s) [77].

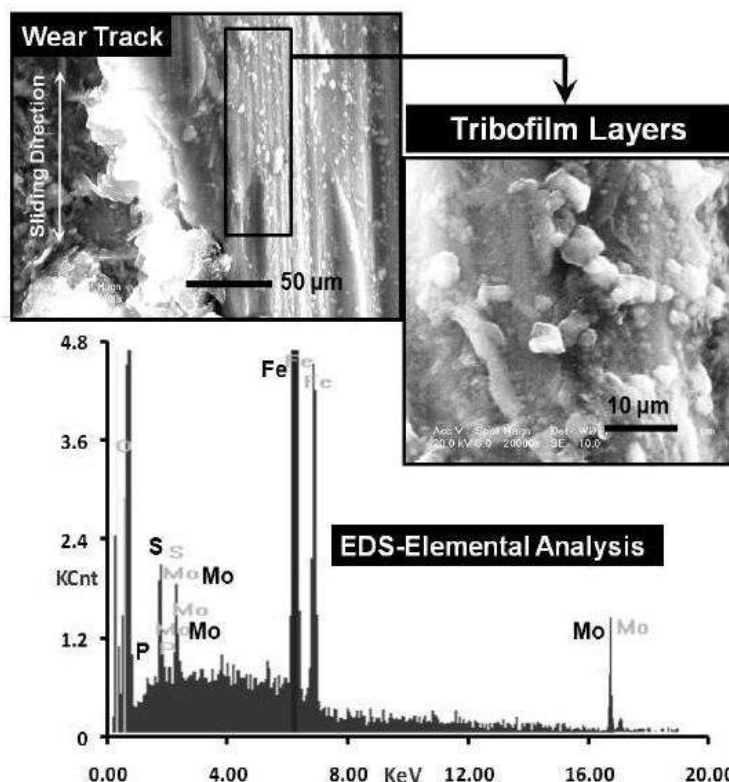


شکل 2-29 تصاویر میکروسکوپ الکترونی از خطوط سایش پس از 6000 سیکل تست تریبولوژی (شرایط تست پین-روی-سطح: میزان بار برابر 20 N و سرعت خطی برابر 200 mm/s) [77].

طبق نتایج منتشر شده، بالاترین میزان ضریب اصطکاک مربوط به شرایط سنگ زنی خشک می باشد. با بکارگیری روغن سویا به عنوان سیال روانکار در شرایط روانکاری جریان سیال و MQL، میزان ضریب اصطکاک بطور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد. با بکارگیری نانو سیال پایه روغن سویا در شرایط MQL حتی میزان ضریب اصطکاک بیشتر کاهش می یابد. این کاهش در ضریب اصطکاک بدلیل کاهش نیروی مماسی در فرآیند سنگ زنی بیان شده است. شین و همکاران [77] چنین ذکر می نمایند که بکارگیری MQL نسبت به حالت روانکاری جریان سیال سبب کاهش بیشتری در ضریب اصطکاک نسبت به حالت خشک به میزان 25٪ بوده و بکارگیری نانوذرات اضافه شده به سیال روانکار در MQL سبب کاهش مضاعف 10٪ ضریب اصطکاک می گردد. در وضعیت سرعت خطی بالاتر برابر 300 mm/s ضریب اصطکاک در شرایط MQL نسبت به روانکاری جریان سیال بالاتر است (شکل 2-28). این امر به روانکاری محدود MQL در شرایط سرعت و نیروی ماشینکاری بالاتر نسبت داده شده است. با این حال، ضریب اصطکاک حاصله در فرآیند تست تریبولوژی که با حضور نانوذرات در سیال پایه در MQL انجام گرفته است، نشان دهنده کاهش قابل توجهی در ضریب اصطکاک در شرایط افزایش سرعت و نیروی فرآیند است. این کاهش در ضریب اصطکاک لغزشی به تشکیل فیلم سطحی پایدار و پیوسته که می تواند شرایط فشار بالا را در فصل مشترک دانه های ساینده و قطعه کار تحمل نماید، نسبت داده شده است. این پدیده در خطوط سایشی نشان داده شده از سطح کار در شکل 2-29 قابل مشاهده است. می توان کاهش در خطوط سایش ایجاد شده در سطح کار با بکارگیری نانو ذرات MoS_2 در سیال پایه روغن سویا در فرآیند MQL را در این شکل مشاهده نمود. این کاهش در خطوط سایش به تشکیل فیلم سطحی با اصطکاک پایین، حتی در شرایط ماشینکاری خشن در فصل مشترک دانه های ساینده با سطح کار، در سطح ساییده دانه های ساینده¹ نسبت داده شده است. حضور این فیلم

¹ Wear-flat area

سطحی سبب کاهش میزان نیروهای مماسی در حین فرآیند می گردد. نتایج آنالیز شیمیایی¹ EDS انجام گرفته از خطوط سایش مشاهده شده در سطح کار، حضور عناصری چون مولیبدن (Mo) و سولفور (S) را از MoS_2 و فسفور (P) را از فسفولیپید تأیید می نماید (شکل 2-30).



شکل 2-30 تصاویر SEM و آنالیز شیمیایی EDS از خط سایش تولید شده پس از 6000 سیکل تست تریبولوژی تحت شرایط بکارگیری نانوسیال MoS_2 در فرآیند روانکاری MQL (شرایط تست: نیروی عمودی 20 N و سرعت خطی 300 mm/s) [77].

کالیتا و همکاران² [78] مطالعه تجربی را در جهت بررسی نقش نانوسیالات پایه روغن در سنگ زنی فولاد EN 24 و چدن داکتیل انجام دادند. نانوسیال مورد استفاده از توزیع افزودنی های چند جزئی اورگانیک و غیر اورگانیک در ابعاد نانو، شامل نانوذرات MoS_2 و ترکیبات تری گلیسرین و فوسفولیپید، در دو روغن پایه متفاوت شامل روغن سویا (روغن گیاهی) و روغن پارافین (روغن معدنی) تشکیل یافته بود. در نانو افزودنی نوع یک و دو بترتیب از روغن کانولا و سویا به عنوان منبع تری-گلیسرین استفاده نمودند. نانوذرات MoS_2 در دو درصد متفاوت 2 و 8٪ به روغن پایه اضافه گردید. برای توزیع یکنواخت ذرات در داخل سیال پایه از 4 ساعت حمامอัลتراسونیک استفاده گردید. نانوذرات حاصله پس از فرآیند آلتراسونیک بصورت نانوذرات MoS_2 پوشش یافته با لایه های تری-گلیسرین و شکل نارگیل کش-آمده³ با اندازه های قطری 40 و 70 nm در امتداد محورهای اصلی و فرعی گزارش شده اند. این ذرات با صفحات برشی متعدد در شکل 2-31 قابل مشاهده است که مربوط به ساختار لایه ای هگزاگونال بسته

¹ Energy diffraction spectroscopy

² Kalita et al.

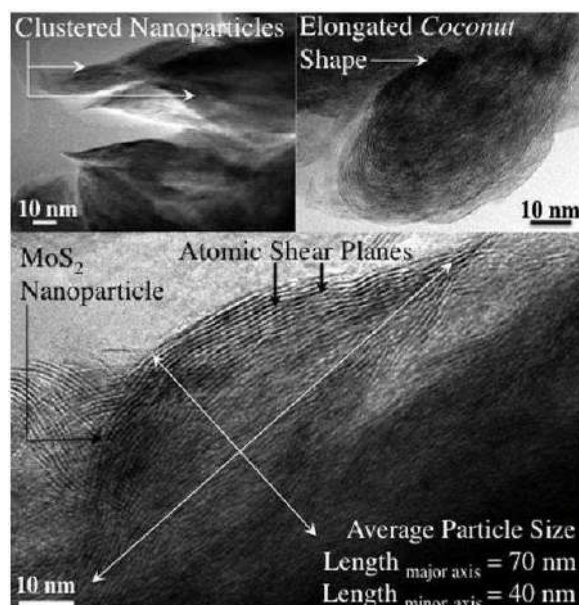
³ Elongated coconut

متراکم¹ (HCP) نانوذرات MoS_2 می باشد. بعلاوه این محققین برای مطالعه نقش اندازه ذرات در روانکاری، ذراتی را با ابعاد میکرو ($3 - 5 \mu\text{m}$) از جنس MoS_2 در سیال پایه مشابه اضافه نموده و به عنوان سیال خنک کار در سیستم MQL استفاده کردند. مشخصات فرآیند سنگ زنی برای انجام تست ها در جدول 2-3 ارائه شده است. مطابق نتایج منتشر شده، سیستم خنک کاری جریان سیال بالاترین ضریب اصطکاک را بترتیب برابر 0/76 و 0/73 در سنگ زنی فولاد EN 24 و چدن داکتیل از خود نمایش داد. در شرایط روانکاری با روغن پارافین و سویا، ضرایب اصطکاک بدست آمده برای فولاد EN 24 بترتیب برابر 0/63 و 0/6 گزارش شده است. این مقادیر برای چدن داکتیل 0/46 می باشد. کاهش ضریب اصطکاک با بکارگیری سیستم MQL به افزایش قابلیت نفوذ روانکار در ناحیه سنگ زنی توسط سیستم تحویل سیال تحت فشار نسبت داده شده است. کمترین میزان زبری سطح برای فولاد EN 24 برابر 0/41 در شرایط سنگ زنی MQL با نانو روانکار متشکل از 8٪ وزنی MoS_2 در روغن سویا و برای چدن داکتیل برابر 0/22 در شرایط بکارگیری MQL با نانو روانکار 8٪ وزنی MoS_2 در روغن پارافین گزارش شده است. بیشترین میزان کاهش انرژی ویژه سنگ زنی فولاد EN 24 و چدن داکتیل بترتیب برابر 38٪ و 53٪ در شرایط بکارگیری نانو روانکار 8٪ وزنی MoS_2 در روغن سویا و 8٪ وزنی MoS_2 در پارافین در خنک کاری به روش MQL نسبت به حالت خنک کاری جریان سیال بدست آمده است. نتایج مشابهی برای نرخ سنگ زنی گزارش شده است به نحوی که بالاترین میزان نرخ سنگ زنی برای فولاد EN 24 و چدن داکتیل بترتیب برابر 39٪ و 36٪ در شرایط سنگ زنی با بهره گیری از نانو روانکار 8٪ وزنی MoS_2 در روغن سویا و 8٪ وزنی MoS_2 در روغن پارافین بدست آمده است. محققین این نتایج را به شکل گیری فیلم روانکار سطحی از نانوذرات MoS_2 در ناحیه سنگ زنی نسبت داده اند. چنین بیان شده است که تحت شرایط تحویل نانو روانکار توسط سیستم MQL در حین پروسه سنگ زنی، ذرات نانو روانکار بطور مؤثری در ناحیه سنگ زنی نفوذ می نمایند. لغزش پیوسته سطح ساییده شده دانه های ساییده بر روی سطح قطعه کار سبب برش نانوذرات MoS_2 و مولکولهای اورگانیک روانکار در ناحیه برش می گردد. تنش برشی پایین ساختار لایه ای هگزاگونال متراکم ذراتی که در بین ذرات ساییده و سطح کار قرار گرفته اند، سبب ایجاد یک فیلم روانکار و کاهش ضریب اصطکاک در ناحیه سنگ زنی می گردد. تفاوت مشاهده شده در عملکرد روغن پارافین و سویا در سنگ زنی فولاد EN 24 و چدن داکتیل به واکنش تری گلیسرین موجود در روغن گیاهی و ایجاد یک لجن روانکار² در سطح قطعه کار نسبت داده شده است. طبق گزارش منتشر شده، سنگ زنی با تولید ذرات بسیار ریز همراه است. این ذرات در لجن متشکل از واکنش تری-گلیسرین با سطح فلز محبوس شده و سبب افزایش ضریب اصطکاک بدلیل پرمودن بیش از حد فضای دانه های ساییده چرخ سنگ زنی³ می گردد.

¹ Hexagonal closed packed

² Lubricating sludge

³ Over-clogging of grinding zone



شکل 31-2 تصویر TEM از نانو ذره دی-سولفید مولیبدن (MoS_2) [78].

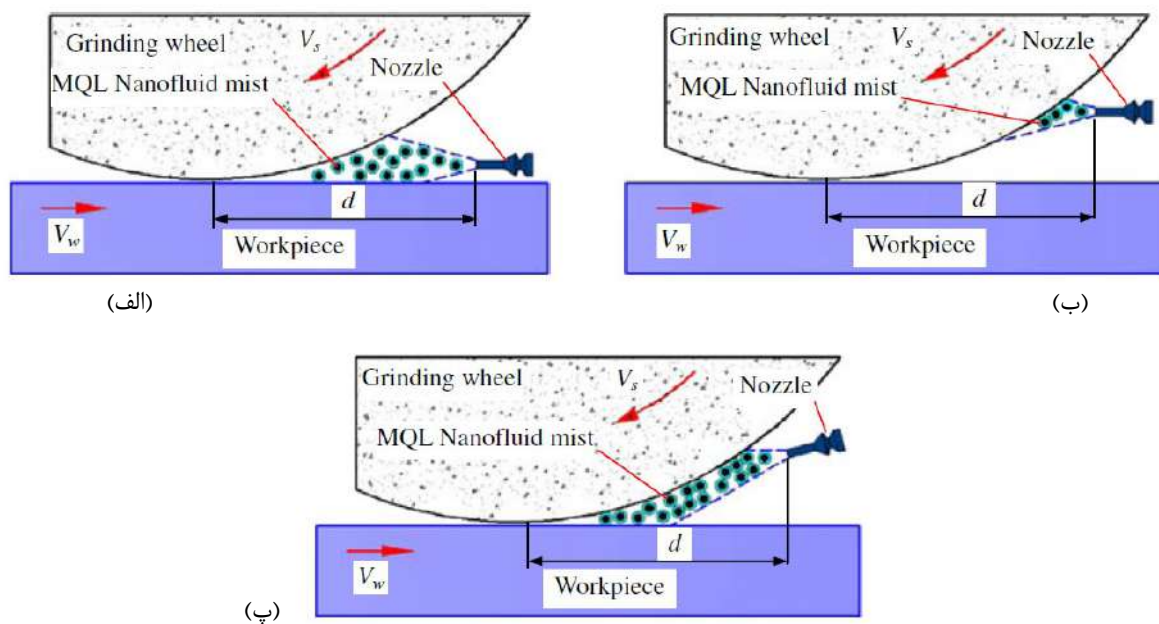
جدول 3-2 ورودی های مورد مطالعه در ضمن فرآیند سنگ زنی در تحقیق کالیتا و همکاران [78].

چدن داکتیل	فولاد EN 24	پارامتر
30	30	سرعت چرخ ساینده (m/s)
0/06	0/1	سرعت قطعه کار (m/s)
20	20	عمق برش (μm)
100	100	تعداد پاس سنگ زنی (n)
7/2	7/5	پهنای سنگ زنی، b_w (mm)
2/5	2/5	نرخ جریان MQL (ml/min)
6	6	فشار هوا در MQL (bar)
8450	8450	نرخ جریان سیال در شستشوی متداول (ml/min)

مائو و همکاران¹ [79] به مطالعه فرآیند سنگ زنی فولاد سخت کاری شده AISI 52100 با بهره گیری از روش حداقل کاربرد نانوسیال و بررسی نقش پارامترهای مختلف پاشش در خروجی های این فرآیند پرداختند. ایشان از نانو سیال اکسید آلومینیم که از طریق توزیع پودر Al_2O_3 در آب دی یونیزه شده بدست آمده بود استفاده نمودند. قطر و کسر وزنی پودر اکسید آلومینیم بترتیب برابر 60 nm و 75٪ گزارش شده است. در تحقیق انجام گرفته اثرات ورودی های فرآیند بر روی نیروهای سنگ زنی، زبری سطح و دمای سنگ زنی بررسی شده و نتایج حاصله مقایسه گردیدند. نتایج تجربی بدست آمده نشان دادند که جهت پاشش نازل اثرات بسیار عمده ای در شرایط بکارگیری نانوسیال به عنوان سیال برشی از جهت روانکاری و خنک کاری ناحیه سنگ زنی بجای می گذارد. برای این منظور محققین سه جهت پاشش متفاوت نازل را مورد بررسی قرار دادند که عبارت اند از، جهت نازل به موازات سطح قطعه کار، به فاصله 20 mm از و به موازات سطح قطعه کار و 15° درجه نسبت به سطح کار که در شکل 32-2 ارائه شده است. ایشان گزارش دادند که عملکرد بهینه سنگ زنی در شرایط قرارگیری نازل تحت زاویه به سمت چرخ

¹ Mao et al.

سنگ قابل دستیابی بوده و فشار هوا و فاصله پاشش نقش عمده ای را در ارتقاء قابلیت نفوذ ذرات نانو سیال به ناحیه ماشینکاری ایفا می کند. مائو و همکاران از نرخ جریان ثابت 60 ml/h در سه فشار متفاوت شامل 0/2، 0/4 و 0/6 MPa جهت پاشش نانوسیال به موضع ماشینکاری توسط مکانیزم MQL استفاده کردند. ایشان گزارش نمودند که با افزایش فشار هوا، میزان نیروهای سنگ زنی، زبری سطح و دمای سنگ زنی کاهش می یابد و عملکرد فرآیند سنگ زنی در شرایط فاصله کمتر نازل نسبت به موضع سنگ زنی بهبود می یابد.



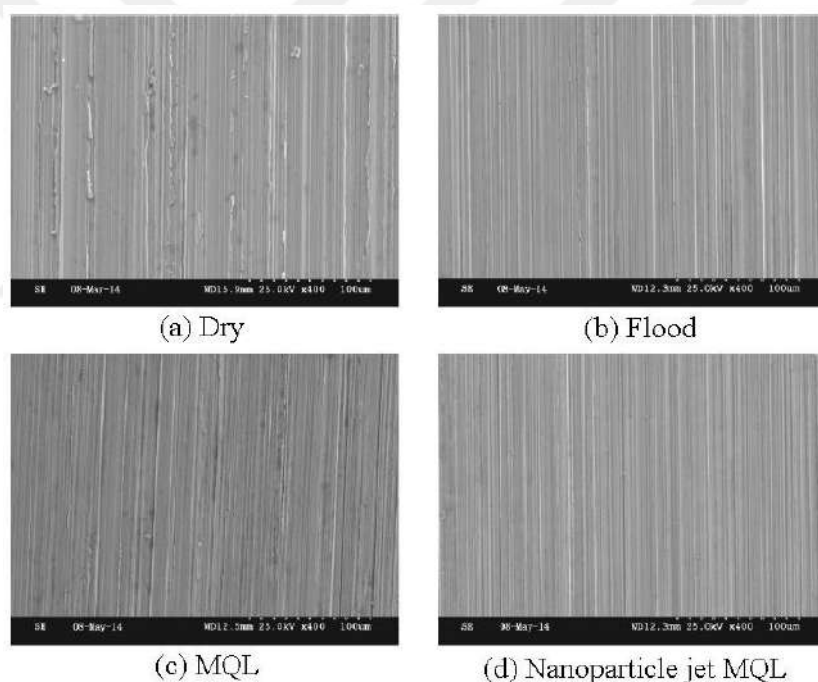
شکل 2-32 جهت نازل پاشش سیستم MQL نسبت به امتداد سنگ زنی؛ (الف) نازل به موازات سطح کار، (ب) نازل به موازات و در فاصله 20mm از سطح کار، (پ) نازل تحت زاویه نسبت به امتداد سنگ زنی [79].

دوگونگون و همکاران¹ [80] به مطالعه اثر ضدسایشی و کاهش اصطکاک نانوسیال حاصل از اضافه نمودن نانوذرات MoS₂، نانولوله کربنی و ZrO₂ در سیال پایه گیاهی روغنی کولزا بصورت جت MQL در سنگ زنی تخت فولاد سخت کاری شده AISI 1045 پرداختند. طبق نتایج حاصله، نیروی مماسی و ضریب اصطکاک در حالت سنگ زنی بدون استفاده از روانکار بالاترین مقادیر را دارا هستند. این مقادیر در شرایط سنگ زنی با عمق بار 20 μm، سرعت چرخ 35 m/s و سرعت قطعه کار 0/05 m/s بترتیب برابر 48 N و 0/45 گزارش شده اند. مقادیر مربوطه در شرایط سنگ زنی با MQL بترتیب برابر 26 N و 0/29 بوده که با بکارگیری نانوسیال حاضر از حضور 1٪ وزنی ذرات MoS₂ در روغن پایه یکسان به 19 N و 0/23 کاهش می یابد. مقادیر مشاهده شده برای حالت بکارگیری این نانوسیال دارای اختلاف بسیار جزئی با مقادیر حاصل برای حالت بکارگیری جریان خنک کار Synti 109930 با نرخ جریان 100 l/min می باشد. این محققین کاهش نیروی برشی و به تبع آن انرژی ویژه سنگ زنی در حالت بکارگیری نانوسیال را به عملکرد ذرات بصورت بلبرینگ ها، ایجاد فیلم روانکار در فصل مشترک ابزار-قطعه کار و خاصیت ضدسایش آن مرتبط دانسته اند. بعلاوه، مطابق نتایج حاصل از مشاهدات میکروسکوپی از سطح سنگ زنی شده (شکل 2-33)، سطح حاصل از بکارگیری نانوسیال در شرایط سنگ زنی از درجه کیفیت بالایی بصورت قابل

¹ Dongkun et al.

مقایسه با شرایط خنک کاری جریان سیال برخورداری بوده و اثرات چسبندگی مواد بر روی آن¹ مشاهده نمی گردد. اثر بهبود صافی سطح بنحوی است که میزان زبری سطح در حالت سنگ زنی با بکارگیری جت MQL نانوسیال و خنک کاری جریان سیال نسبت به حالت سنگ زنی خشک به ترتیب 10 و 11٪ کاهش پیدا نموده است که بسیار به هم نزدیک می باشند.

دونگکون و همکاران [80] در ادامه با مقایسه نقش اثرات سه نانوذرات مختلف حاصل از پودر ذرات MoS_2 ، ZrO_2 و CNT در سیال پایه روغن کولزا مشاهده نمودند که نتایج حاصل از زبری سطح، ضریب اصطکاک و نیروی برشی برای هر سه حالت روانکاری مقادیر بسیار نزدیکی به هم دارند. با این حال، نانوسیال MoS_2 سبب کاهش بیشتر انرژی ویژه سنگ زنی و بهبود کیفیت سطح سنگ زنی شده می گردد. در میان درصدهای متفاوت از غلظت وزنی نانوذرات MoS_2 در روغن پایه با مقادیر 1، 2 و 3٪، در حالت استفاده از نانوسیال با غلظت MoS_2 برابر 2٪ نتایج بهتری از جنبه کاهش نیروی برش، ضریب اصطکاک و بهبود کیفیت سطح سنگ زنی شده مشاهده گردیده است.



شکل 2-33 توپوگرافی سطحی از سطح قطعات سنگ زنی شده در شرایط روانکاری متفاوت [80].

آلبرت و همکاران² [81] به مطالعه نقش نانوذرات صفحه ای گرافیت به عنوان روانکار در فرآیند سنگ زنی فولاد ابزار D2 با سختی 62 HRC پرداختند. این ذرات بخاطر داشتن خواص روانکاری ویژه ناشی از مورفولوژی لایه ای³ و ساختار کریستالی هگزاگونال در فرم اتم های کربن در صفحات کریستالی و وجود نیروی کوالانسی قوی بین آنها به عنوان روانکار مورد بررسی قرار گرفتند. این صفحات اتمی بواسطه اتصال ضعیف بین لایه ای، غالباً از نوع واندروالانسی، در کنار هم قرار گرفته اند. نیروی اصطکاک مماسی در حین فرآیند سنگ زنی سبب شکسته شدن

¹ Surface material accumulation and adhesion

² Albert et al.

³ Layered morphology

پیوندهای الکترونی ضعیف بین لایه ای و لغزش این لایه ها بر روی هم می گردد [82]. در کنار ساختار ذرات گرافیتی، تأثیر نحوه اعمال این ذرات در وجه مشترک چرخ-قطعه کار و اندازه و میزان آنها نیز در مشخصات روانکاری در حین فرآیند سنگ زنی مورد بررسی قرار گرفت. نانوذرات گرافیتی تحت نام تجاری $xGnP^{TM}$ با ضخامت صفحات 5–10 nm و قطر $1 \mu m$ ($xGnP-1$) و $15 \mu m$ ($xGnP-15$) با سطح ویژه بزرگ² در حدود $60 m^2/g$ مورد آزمایش قرار گرفتند. این محققین از دو سیال پایه متفاوت الکل ایزوپروپیل³ (IPA) و امولسیون پایه آب متداول Trim SC200 استفاده نمودند. طبق گزارش منتشر شده، بدلیل هایدروفوبیک بودن گرافیک، صفحات گرافیتی دارای تمایل بالاتری به کلوخه ای شدن در حین توزیع نمودن آنها در سیال پایه Trim SC200 دارند. در نقطه مقابل IPA سبب توزیع یکنواخت تر گرافیت و ایجاد فیلم روانکار پیوسته در حین فرآیند سنگ زنی می گردد. مزیت دیگر IPA، گرانروی پایین تر آن نسبت به Trim SC200 گزارش شده است که سبب نفوذ مؤثرتر ذرات روانکار در ناحیه سنگ زنی می شود. نانوذرات گرافیت با غلظت 0/5 تا 2٪ وزنی در سیال پایه آماده و تحت سیستم MQL به ناحیه سنگ زنی با نرخ 200 ml/min اسپری گردیده اند. نتایج حاصله نشان داد که نیروی متعامد و مماس سنگ زنی و نیز انرژی ویژه برش در استفاده از نانو روانکار گرافیتی در سیال پایه IPA بطور قابل محسوسی کمتر از مقادیر گزارش شده برای حالت استفاده از سیال پایه Trim SC200 می باشد. بعلاوه، ذراتی با قطر $15 \mu m$ عملکرد بهتری نسبت به ذرات با قطر $1 \mu m$ دارند. این پدیده به روانکاری مؤثرتر نانوذرات صفحه ای با ابعاد درشت در وجه مشترک ابزار-قطعه کار نسبت داده شده است. بعلاوه، البرت و همکاران گزارش نموده اند که افزایش درصد نانوذرات گرافیت در سیال پایه تاثیر قابل ملاحظه ای در کاهش نیروهای سنگ زنی و انرژی ویژه برش نداشته و بهترین شرایط برای روانکار با 1٪ وزنی گرافیت در سیال پایه مشاهده گردیده است. همچنین نتایج اندازه گیری زبری سطح نشان دهنده کاهش زبری 30٪ و 35٪ بترتیب برای نانوذرات $xGnP-1$ و $xGnP-15$ در حالت بکارگیری IPA به عنوان سیال پایه نسبت به Trim SC200 می باشد.

واسو و کومار-ردی⁴ [83] به مطالعه نقش نانوسیال اکسید آلومینیم در فرآیند تراشکاری اینکونل 600 با بهره گیری از سیستم MQL پرداختند. نانوسیال آماده شده از نانوذرات اکسید آلومینیم با غلظت 4٪ و 6٪ حجمی در سیال پایه ای از جنس روغن گیاهی با نام تجاری Coolube 2210 تشکیل یافته و تحت فشار 5 bar توسط سیستم MQL به موضع تراشکاری با نرخ 100 ml/h تزریق گردیده است. سوپر آلیاژ نیکل در شرایط ماشینکاری از طریق خنک کاری جریان سیال بدلیل ایجاد دمای بسیار بالا در حین فرآیند برش و تمایل چسبندگی بالا بین ابزار و قطعه کار بخاطر هدایت حرارتی پایین این آلیاژ و واکنش پذیری بالای آن سبب سایش سریع ابزار می گردد. مطابق نتایج تجربی منتشر شده، قطعات تراشکاری شده در شرایط MQL با بکارگیری نانوسیال حاوی 6٪ حجمی اکسید آلومینیم زبری سطح کمتری را نسبت به MQL با استفاده از نانوسیال حاوی 4٪ حجمی اکسید آلومینیم و نیز نسبت به شرایط خنک کاری با جریان سیال و یا شرایط تراشکاری خشک از خود نمایش می دهند. این پدیده به خصوصیات هدایت حرارتی بالاتر نانوسیال حاوی 6٪ حجمی اکسید آلومینیم و شرایط اصطکاک در ناحیه تماس

¹ XG Sciences, East Lansing, Michigan

² Large specific area

³ Isopropyl alcohol

⁴ Vasu and Kumar Reddy

ابزار با قطعه کار نسبت داده شده است. همچنین نتایج مشابهی از جنبه حرارت تولید شده در نوک ابزار در حین پروسه ماشینکاری گزارش شده است بنحوی که MQL با بهره گیری از نانوسیال 6٪ حجمی اکسید آلومینیم سبب کاهش دمای نوک ابزار به میزان 12 الی 20٪ درصد نسبت به شرایط MQL با نانوسیال 4٪ حجمی اکسید آلومینیم و نیز خنک کاری با جریان سیال می گردد. این محققین گزارش نموده اند که این کاهش دمای نوک ابزار سبب کاهش ضریب اصطکاک و کاهش نیروهای تراشکاری به میزان 30 تا 35٪ در شرایط روانکاری MQL با بهره گیری از نانوسیال 6٪ حجمی اکسید آلومینیم نسبت به خنک کاری جریان سیال می گردد. بعلاوه عمر ابزار در شرایط تراشکاری MQL با نانوسیال 6٪ حجمی اکسید آلومینیم تا حدود 45٪ نسبت به شرایط خنک کاری جریان سیال افزایش می یابد. این پدیده به کاهش دمای ابزار، کاهش احتمال تشکیل لبه انباشته در حین ماشینکاری و کاهش ضرایب اصطکاک در وجه مشترک ابزار با قطعه کار مرتبط دانسته شده است. مشاهدات انجام گرفته از شکل براده های حاصل از فرآیند تراشکاری نشان از تولید براده های طویل به رنگ قهوه ای در شرایط تراشکاری خشک دارد. این در حالی است که طبق گزارش منتشر شده، در شرایط بهره گیری از مکانیزم MQL طول براده ها بطور قابل ملاحظه ای کاهش یافته و رنگ آنها روشن تر گردیده است.

بکارگیری سیالات خنک کاری علیرغم اینکه باعث دفع حرارت می گردد، سبب ایجاد آسیب های زیادی به محیط زیست و سلامت کارکنان می شود. در این جهت کریشنا و همکاران¹ [84] به مطالعه بکارگیری نانو سیال حاصل از حضور تا 1٪ وزنی از نانو ذرات اسید بوریک در داخل روغن نارگیل به عنوان سیال پایه در تراشکاری فولاد AISI 1040 با استفاده از ابزار کاربیدی پرداختند. ایشان به بررسی خواص نانوسیال از جمله نقطه اشتعال، ویسکوزیته، هدایت حرارتی و ضریب انتقال حرارت پرداختند. دمای ابزار برش، سایش متوسط سطح آزاد ابزار²، و زبری سطح قطعه کار از جمله مشخصه های خروجی مورد مطالعه ایشان بشمار می آید. نتایج حاصله نشان دادند که نقطه اشتعال سیال با اضافه نمودن اسید بوریک به روغن پایه افزایش می یابد. در کنار این، افزایش ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی سیال پایه نیز گزارش شده است. این محققین بیشترین تأثیر در افزایش ضریب هدایت حرارتی سیال را در درصدهای خاصی از حضور نانوذرات اسیدبوریک در روغن پایه مشاهده نمودند. ایشان گزارش نموده اند که در دماهای بالا، روانکارهای جامد حاضر در روغن پایه نرم گشته، سبب افزایش قابلیت روانکاری و ظرفیت انتقال حرارت سیال روانکار می گردد، که در مجموع باعث کاهش حرارت ناشی از فرآیند ماشینکاری می شود. بعلاوه، جریان روانکار جامد در فصل مشترک ابزار-قطعه کار سبب کاهش تماس پلاستیکی و در نتیجه آن سبب کاهش سایش سطح آزاد ابزار می گردد.

سوداودیا و ماکوانا³ [85] به مطالعه نقش نانوسیال به عنوان روانکار در فرآیند تراشکاری فولاد ضدزنگ آستینیتی AISI 304 پرداختند. نانوسیال مورد مطالعه از سوسپانسیون حاصل از اضافه نمودن نانوذرات اسید بوریک در اندازه 50 nm با درصدهای 0/25، 0/5 و 1٪ وزنی در روغن نارگیل به عنوان سیال پایه تشکیل شده بود. برای توزیع یکنواخت نانوذرات در روغن پایه از حمام آلتراسونیک با فرکانس 20 kHz استفاده گردیده است. همچنین برای

¹ Krishna et al.

² Average tool flank wear

³ Sodavadia and Makwana

اندازه گیری دما در حین فرآیند براده برداری از ترموکوپل جازنی شده در زیر ابزار کاربردی استفاده شده است. مطابق نتایج منتشر شده، به ازای سرعت های برشی و پیشروی متفاوت، دمای اندازه گیری شده در فرآیند تراشکاری با بکارگیری نانوسیال حاصل از $0/5\%$ وزنی از نانوذرات اسید بوریک در روغن نارگیل کمترین مقدار را دارا می باشد. بطور مشابه، کمترین میزان سایش در سطح آزاد ابزار و کمترین میزان زبری سطح در حین فرآیند تراشکاری فولاد AISI 304 در شرایط بکارگیری نانوسیال $0/5\%$ اسیدبوریک در روغن نارگیل برای پارامترهای مختلف سرعت برشی و نرخ پیشروی گزارش شده است.

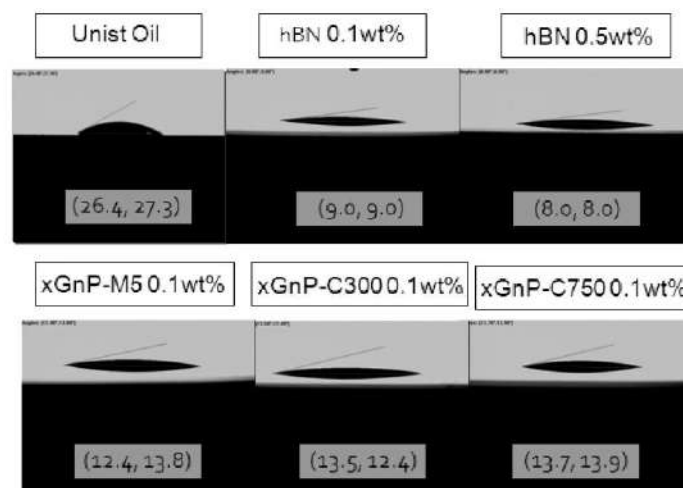
کین گوین و همکاران¹ [86] به مطالعه خواص تریبولوژی نانوروانکار حاصل از حضور نانو صفحات گرافیت اصلاح شده حرارتی² (xGnP) و بورن نیتراید هگزاگونال (XGS hBN) در روغن گیاهی بعنوان سیال پایه در فرآیند تست سایش ساچمه روی دیسک پرداختند. همچنین خواص نانوسیالات تهیه شده در فرآیند فرزکاری MQL بر روی قطعاتی از جنس فولاد AISI 1045 مورد مطالعه قرار گرفتند. درصد نانوذرات اضافه شده در سیال پایه برای xGnP برابر $0/1\%$ و 1% وزنی و برای hBN برابر $0/1\%$ و $0/5\%$ وزنی گزارش شده است. مطابق استدلال مطرح شده، نانوصفحات بدلیل ساختار چند لایه می توانند براحتی تحت پروسه لغزش سبب ایجاد روانکاری بهتری گردند. دمای تجزیه³ xGnP نسبت به نانوذراتی مثل MoS_2 بمراتب بالاتر است. حتی دمای تجزیه hBN بالاتر از xGnP است که برای فرآیندهای ماشینکاری سرعت بالا در شرایط فشار و دمای بالا مناسب هستند. مطابق مشاهدات حاصل از تست خیس کنندگی⁴، حضور نانوذرات صفحه ای در روغن پایه سبب کاهش زاویه خیس کنندگی روانکار می گردد و اینکه زاویه خیس کنندگی در حضور نانوذرات hBN کمتر از زاویه خیس کنندگی حاصل از حضور xGnP در روغن پایه است (شکل 2-34). مطابق نتایج حاصل از تست سایش، تفاوت چندانی در رفتار اصطکاکی نانوسیال حاوی xGnP و hBN تحت بارهای متعادل مختلف مشاهده نگردیده است. با این حال، بهبود قابل ملاحظه ای در میزان سایش در شرایط بکارگیری نانو روانکار حاوی نانوذرات hBN در مقایسه با نانوذرات xGnP گزارش شده است. در تست MQL میزان نرخ سیال و فشار هوا بترتیب برابر $1/5 \text{ ml/min}$ و 8 psi انتخاب شده بود. مطابق تست های سایش ابزار در فرآیند فرزکاری با استفاده از ابزاری از جنس کاربید پوشش داده شده با TiAlN ، عملکرد بهتر نانو روانکار حاوی ذرات hBN نسبت به ذرات xGnP گزارش شده است (شکل 2-35). در مجموع کین گوین و همکاران نتیجه گیری نموده اند که بکارگیری هر دو مخلوط نانوصفحات xGnP و نیز hBN در فرم MQL در فرآیند ماشینکاری سبب کاهش قابل ملاحظه ای در میزان سایش ابزار می گردد.

¹ Kien Nguyen

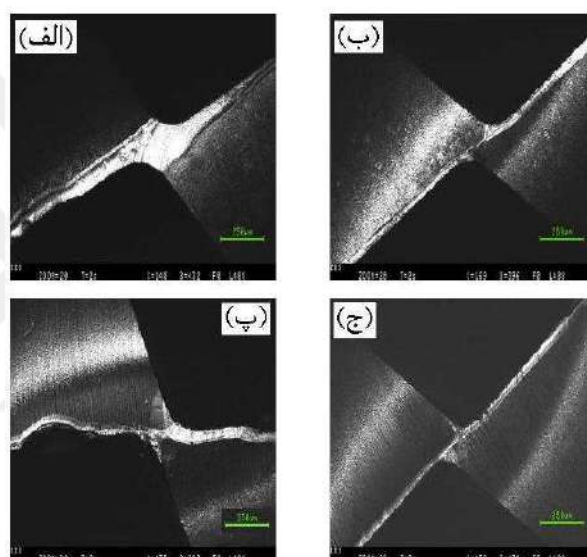
² Exfoliated graphite nano-platelet

³ Dissociation temperature

⁴ Wetting test



شکل 2-34 زاویه خیس کنندگی نانوسیال حاوی نانوذرات hBN و xGnP بر روی ابزار کاربیدی با پوشش TiAlN [86].



شکل 2-35 سایش مرکزی ابزار فرزکاری در شرایط (الف) خشک، (ب) روانکاری با نانوسیال حاوی xGnP با غلظت 0/1٪ وزنی، (پ) روانکاری با نانوسیال حاوی hBN با غلظت 0/1٪ وزنی، و روانکاری با نانوسیال hBN با غلظت 0/5٪ وزنی [86].

سایوتی و همکاران¹ [87] کاهش 21/99 و 46/32٪ در نیروی برشی و زبری سطح در فرآیند فرزکاری آلیاژ دuralumin² Al-2017-T4 در نتیجه بکارگیری نانوسیال متشکل از نانوذرات آنیون کربن³ در روانکار صنعتی آلومینات⁴ را گزارش نموده اند. غلظت های مختلف نانوذرات آنیون کربن در این روغن معدنی در مقادیر 0، 0/5، 1 و 1/5 درصد وزنی در حین فرآیند براده برداری مورد آزمایش قرار گرفته است. این محققین کاهش نیرو و زبری سطح در حین فرآیند فرزکاری ناشی از بکارگیری نانوروانکار را به خواص تریبولوژی این روانکار ناشی از حضور نانوذرات آنیون کربن که در فرم میلیون ها غلتک کوچک در ابعاد نانو در وجه مشترک ابزار و قطعه کار عمل کرده و سبب کاهش ضریب اصطکاک در حین پروسه ماشینکاری می شود نسبت داده اند.

¹ Sayuti et al.

² Duralumin alloy

³ Carbon onion

⁴ Alumican mineral oil

سو و همکاران¹ [88] به مطالعه نقش نانوذرات گرافیتی در ابعاد 35 و 80 nm در سیال پایه روغن گیاهی LB 2000 در قالب نانو روانکار در جهت کاهش ضریب اصطکاک و میزان سایش در تست پین روی دیسک پرداختند. درصد حجمی نانوذرات اضافه شده به سیال پایه در دو مقدار 0/05 و 0/25٪ و نوع پین و دیسک بکار رفته در تست سایش بترتیب کاربید سمانته شده YG8 و آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V گزارش شده است. طبق نتایج بدست آمده، ضریب اصطکاک در شرایط روانکاری با روغن گیاهی خالص و نانو روانکار تهیه شده نسبت به حالت اصطکاک خشک دارای مقادیر پایین تری هستند. پایین ترین ضریب اصطکاک در شرایط استفاده از نانو روانکار حاوی نانوذرات به ابعاد 35 nm در روغن پایه گیاهی مشاهده گردیده است. این پدیده به نفوذ مؤثرتر نانوذرات با ابعاد ریزتر در وجه مشترک بین سطوح سایشی نسبت داده شده است. بعلاوه، ایشان گزارش داده اند که با افزایش غلظت نانوذرات در سیال پایه، بدون توجه به ابعاد ذرات، میزان ضریب اصطکاک کاهش می یابد. بطور مشابه، افزایش درصد نانوذرات در سیال پایه سبب کاهش بیشتر سایش حجمی دیسک سایشی می شود. مطابق نتایج منتشر شده، نانوذرات با ابعاد کوچکتر سبب کاهش مؤثرتر نرخ سایش حجمی دیسک در طی فرآیند تست سایش می گردد.

2-4- مدل سازی نحوه توزیع حرارت در فرآیند سنگ زنی

2-4-1- تعاریف اولیه

2-4-1-1- شکل غیریکنواخت قوس حرارتی در ناحیه سنگ زنی

مطابق تئوری مطرح شده توسط مالکین² [25] در مورد نحوه توزیع حرارت در ناحیه سنگ زنی، علاوه بر دمای موضعی ناشی از سنگ زنی توسط هر کدام از دانه های ساینده مستقل، افزایش دمای دیگری بخاطر عمل براده برداری مجموع دانه های ساینده در ناحیه سنگ زنی وجود دارد. در حقیقت انرژی در نقاط مجزا از هم که در آنها دانه های ساینده در عکس العمل با قطعه کار هستند، وارد قطعه می شود. در نتیجه شار حرارتی ناشی از دانه های مستقل بسیار بالاتر از شار حرارتی متوسط در ناحیه سنگ زنی می باشد. این امر سبب توزیع غیریکنواخت شار حرارتی در ناحیه سنگ زنی می گردد.

2-4-1-2- سوختن قطعه کار

یک محدودیت عمده در سنگ زنی دقیق فولادها، سوختن قطعه کار می باشد. مشاهده چشمی سوختن قطعه کار ناشی از رنگ های بازپختی³ است که از لایه های اکسیدی در سطح کار ناشی می شود. در آغاز سوختن قطعه کار، نیروی سنگ زنی و نرخ سایش چرخ شدت افزایش می یابد و صافی سطح تخریب می شود. در عملیات سنگ زنی فولادهای مختلف، پدیده سوختن در لحظه ای که سطح ناحیه سایش به یک مقدار بحرانی می رسد اتفاق می افتد و گسترده گی آن به شرایط عملیات و نوع فولادی که تحت عملیات سنگ زنی است بستگی دارد. قبل از ادامه دادن این

¹ Su et al.

² S. Malkin

³ Temper colors

فرآیند سنگ زنی لازم است تا چرخ ساینده اصلاح گردد. در این شرایط سوختن قطعه کار می تواند به عنوان ملاکی برای تعیین طول عمر چرخ سنگ زنی استفاده شود. بنابراین شرایط سنگ زنی که در آن سوختن قطعه کار اتفاق می افتد از اهمیت کاربردی بالایی برخوردار است. طبق مطالعات قبلی انجام یافته، در شرایطی که سوختن قطعه کار برای فولادهای سخت کاری شده اتفاق می افتد، زیر لایه سطحی قطعه کار شامل یک لایه مجدداً سخت کاری شده در نزدیکی سطح و ناحیه تمپر شده نرم در زیر آن است. این امر نشان میدهد که شروع سوختن با تشکیل آستنیت در ناحیه ای در زیر سطح قطعه کار همراه است. سخت شدن مجدد سطح قطعه کار ناشی از کوئینچ سطح توسط ماده خنک کاری و تشکیل ساختار مارتنزیت است. بنابراین سوختن زمانی اتفاق می افتد که یک دمای بحرانی برای تشکیل آستنیت در بخش وسیعی از ناحیه سنگ زنی فراهم شود. برای فولادهای کربنی و کم آلیاژ، دمای تشکیل آستنیت تحت شرایط تعادلی تفاوت چندانی نداشته و سوختن قطعه کار تقریباً در محدوده دمای سنگ زنی یکسانی اتفاق می افتد [89].

2-4-2- پیشینه تحقیق در زمینه مدل سازی توزیع حرارت در سنگ زنی

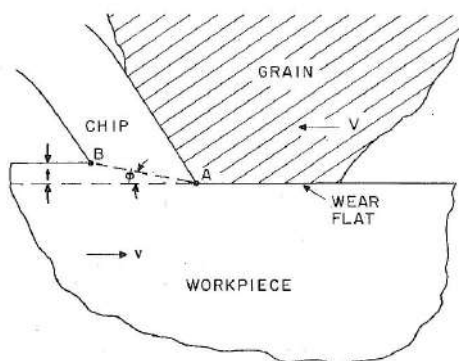
مالکین¹ [25] در مقاله ای که در سال 1974 تحت عنوان "دماهای سطحی و سوختن قطعه" منتشر نمود از نحوه توزیع انرژی سنگ زنی بین اجزاء شکل گیری براده، شخم زنی² و لغزش سطح آزاد دانه های ساینده بر روی سطح کار، جهت محاسبه توزیع دمای سطحی قطعه کار در حین سنگ زنی بهره گرفت. این نحوه توزیع حرارت بین اجزاء مذکور در دستیابی به مدل صحیح تری از توزیع حرارت در سنگ زنی بسیار موثر است چرا که تمام انرژی سنگ زنی که سهم قطعه کار است در صفحه برش متمرکز نمی گردد. ایشان محاسبه توزیع دما در سطح قطعه کار را بصورت قراردادی توزیع دمای موضعی در نزدیکی دانه های ساینده مجزا و توزیع دمای متوسط در ناحیه سنگ زنی انجام داد. توزیع دمای موضعی محاسبه شده در موضع دانه ساینده بصورت مجموع منابع حرارتی جابجا شونده³، یکی مربوط به انرژی تشکیل براده در صفحه برش و دیگری بخاطر لغزش مابین سطح آزاد دانه ساینده و قطعه کار است. توزیع دمای سطحی متوسط نیز بصورت منبع حرارتی جابجا شونده در ناحیه سنگ زنی می باشد. این محققین مکانیزم برش در فرآیند سنگ زنی، منابع تولید انرژی حرارتی و نحوه توزیع حرارت در آنها را در قالب شکل های 2-36 و 2-37 ارائه نمودند. ایشان برای لحاظ نمودن منبع حرارتی گذرا در حین مدل سازی انجام شده از سیستم مختصات نسبی برای منبع حرارتی جابجا شونده استفاده کردند. همچنین از مشخصات فیزیکی جنس قطعه کار در نصف دمای حداکثر ایجاد شده ناشی از سنگ زنی (704°C) برای رسیدن به نتایج دقیق تر استفاده گردید. براساس مقاله منتشر شده، انرژی ناشی از تشکیل براده در امتداد صفحه AB و انرژی ناشی از لغزش از طریق صفحه سایش وارد قطعه کار می گردد. دمای موضعی ایجاد شده از طریق تشکیل براده به دو مکانیزم تغییر شکل برشی در صفحه برش و اصطکاک در وجه مشترک براده-دانه ساینده نسبت داده شده است. ایشان چنین گزارش نموده اند که با توجه به اینکه زاویه برش ϕ بسیار کوچک است، می توان صفحه برش را به عنوان یک منبع حرارت صفحه ای دانست که در امتداد سطح قطعه کار با سرعتی برابر سرعت چرخ حرکت می نماید. همچنین دمای ناشی

¹ S. Malkin

² Plowing

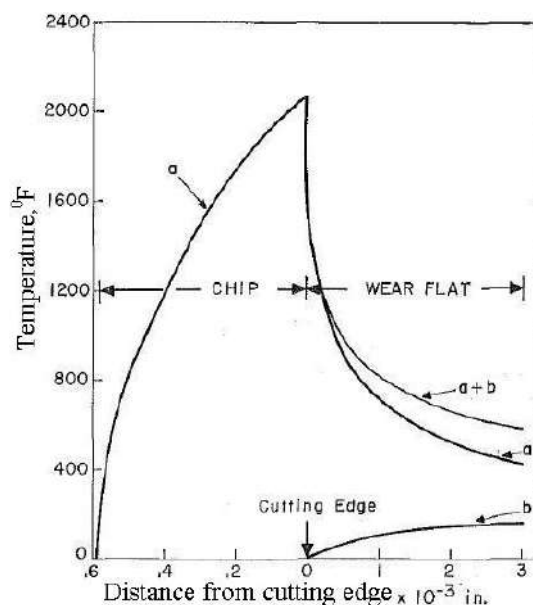
³ Moving heat source

از انرژی منتقل شده به قطعه کار در صفحه لغزش بصورت یک منبع حرارتی متحرک با سرعت چرخ، بمراتب کمتر (65°C) از دمای ناشی از تشکیل براده ذکر شده است. دمای ناحیه سنگ زنی نیز دمای ناشی از عمل سنگ زنی دیگر دانه های ساینده در ناحیه سنگ زنی بوده و به عنوان منبع حرارتی که با سرعت قطعه کار جابجا می شود، لحاظ گردیده است.



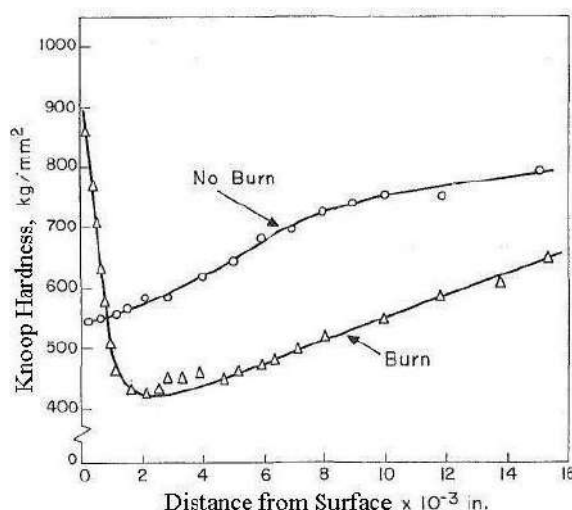
شکل 2-36 پروسه تشکیل براده در سنگ زنی و نحوه لغزش دانه ساینده بر روی سطح کار [25].

در شکل 2-38، نحوه توزیع میکرو سختی بدست آمده از آزمایشات مالکین [25] برای سنگ زنی دو نمونه از جنس فولاد AISI 52100 نمایش داده شده است. طبق منحنی های تغییر میکروسختی، در نمونه ای که دچار سوختگی شده است، سخت شدگی مجدد و تمپر شدن اتفاق افتاده، ولی در نمونه ای که دچار سوختگی نشده است، تنها تمپر شدن در ناحیه سطحی آن اتفاق افتاده است که نمایش دهنده ارتباط سوختگی و تشکیل مارتنزیت در زیر لایه سطحی قطعه کار است.



شکل 2-37 نحوه توزیع دمای موضعی در پیرامون یک دانه ساینده [25].

a: منحنی افزایش دما بخاطر تشکیل براده؛ b: منحنی افزایش دما ناشی از لغزش سطح آزاد دانه ساینده بر روی سطح کار؛ c: منحنی حاصل از مجموع منحنی های a و b.



شکل 2-38 توزیع میکروسختی در زیر لایه فولاد سخت شده AISI 52100 [25]. شرایط سنگ زنی: نوع چرخ ساینده 32A-46K8VBE، سرعت چرخ 6000 ft/min، سرعت قطعه کار 20 ft/min، عمق بار 0/001 in، تعداد کل پاسها 10، سرعت عرضی اصلاح چرخ¹ 10 in/min، عمق اصلاح برای سوختن کار² 0/0002 in، عمق اصلاح برای عدم سوختن کار 0/0005 in

جینگ و لی³ [90] به مطالعه نحوه توزیع حرارت در فرآیند تراشیدن بیسموت توسط نوک تنگستنی و سنگ زنی سیلیکون شیشه ای توسط ابزار الماس در اتصال برنج از طریق مدل سازی المان محدود در نرم افزار ABAQUS پرداختند. ایشان در شبیه سازی منبع حرارتی جابجا شونده از زیر برنامه DFLUX استفاده نمودند. مطابق نتایج منتشر شده، در شرایط خنک کاری با آب و خنک کاری با جریان هوا کسر حرارتی بترتیب برابر 2/2٪ و 3/4٪ از حرارت اصطکاکی در شرایط سنگ زنی با ابزار الماسه وارد زیره شیشه ای⁴ می شود. این محققین گزارش داده اند که برای منبع حرارتی یکسان، شکل کانتورهای دما در ناحیه تماس ابزار و شیشه به ضریب انتقال حرارت همرفت مکانیزم خنک کاری وابسته نیست. بعلاوه با افزایش سرعت جابجایی، حداکثر و متوسط دمای ایجاد شده در این فصل مشترک افزایش می یابد. ایشان همچنین مشاهده کردند که عمق لایه حرارتی که طبق تعریف ارائه شده عمقی است که در آن دما نصف دمای حداکثر است، که با افزایش سرعت جابجایی منبع حرارتی کاهش می یابد.

واسو و کومار⁵ [91] به مطالعه تجربی و تحلیلی توزیع حرارت و صافی سطح در فرآیند سنگ زنی فولاد EN31 در شرایط بکارگیری نانوسیال حاصل از حضور 1٪ وزنی نانوذرات اکسید آلومینیم در امولسیون TRIM E709 پرداختند. سطوح پارامترهای مورد مطالعه در ضمن فرآیند سنگ زنی شامل سرعت حرکت خطی قطعه کار و عمق برش در جدول 2-4 ارائه گردیده است. سرعت چرخ ساینده برابر 1400 rpm در تمام تست ها ثابت در نظر گرفته شده است. از ترموکوپل نوع J که در فاصله 5 mm از لبه های قطعه کار قرار گرفته اند برای اندازه گیری حرارت استفاده شده است (شکل 2-39). خروجی های فرآیند در شرایط مختلف مذکور مطابق جدول 2-5 گزارش شده است. مطابق نتایج منتشر شده، حرارت تولید شده و زبری سطح در شرایط بکارگیری سوسپانسیون نانوذرات Al_2O_3 کاهش می یابند.

¹ Wheel dressing cross-feed velocity

² Dressing depth for burn

³ Jing and Li

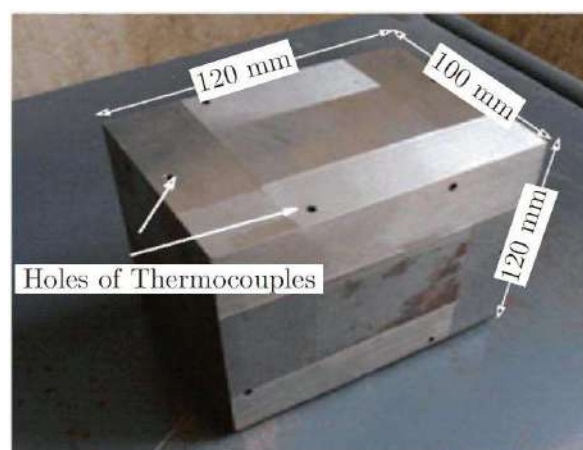
⁴ Glass substrate

⁵ Vasu and Kumar

واسو و کومار [91] در بخش تحلیلی مطالعات خود از مدلسازی المان محدود برای شبیه سازی هدایت حرارتی در فرآیند سنگ زنی استفاده کردند. این محققین جهت انجام شبیه سازی مذکور چرخ ساینده را به عنوان منبع حرارت مستطیلی با طول تماس هندسی¹ (L_c) مابین چرخ ساینده و قطعه کار فرض نمودند بطوریکه طول منبع حرارت ورودی که نصف طول تماس در نظر گرفته شده بود در امتداد ناحیه سنگ زنی با سرعتی برابر با سرعت خطی قطعه کار به حرکت می نماید (شکل 2-40). بمنظور شبیه سازی خنک کاری از شرایط مرزی همرفت حرارتی استفاده گردید بطوریکه ضریب همرفت حرارتی سیال برای سطح فوقانی و ضریب همرفت حرارتی هوا برای سطوح جانبی برابر با $11/43 \text{ W/mK}$ در نظر گرفته شد. مطابق مشاهدات حاصله، افزایش عمق برش و سرعت خطی قطعه کار به سبب آنکه باعث افزایش انرژی سنگ زنی می گردد به ازدیاد حرارت تولیدی در ناحیه سنگ زنی منجر می شود. با این حال، مشخصات فیزیکی-حرارتی بالاتر امولسیون Al_2O_3 در سیال TRIM E709 سبب کاهش دمای ناحیه سنگ زنی در مقایسه با شرایط سنگ زنی خشک و خنک کاری با سیال پایه مذکور می گردد. چنین گزارش شده است که کاهش در حرارت تولیدی در فصل مشترک چرخ ساینده - قطعه کار با خروجی های شبیه سازی المان محدود مطابقت دارد.

جدول 2-4 سطوح متغیرهای مورد مطالعه در مطالعات انجام گرفته توسط واسو و کومار [91].

متغیر کنترلی	سطوح فاکتورها		
	1	2	3
سرعت خطی میز (mm/sec)	100	150	200
عمق برش (μm)	25	50	75

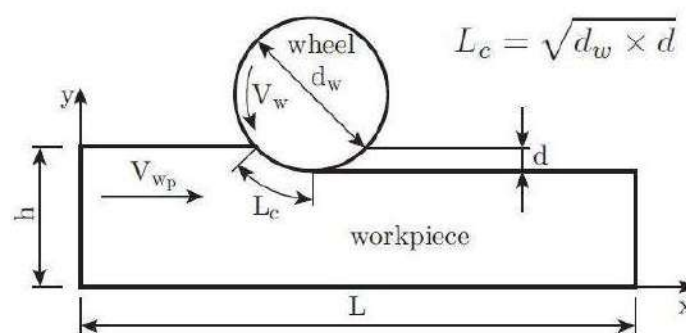


شکل 2-39 ابعاد قطعه کار به همراه موقعیت ترموکوپل های نوع J [91].

¹ Geometrical contact length

جدول 2-5 نتایج بدست آمده در شرایط سنگ زنی مختلف تحت پارامترهای متفاوت ورودی [91].

شماره تست	دمای سنگ زنی (°C)			زبری سطح R_a (μm)		
	برش خشک	برش جریان سیال	برش جریان سیال با نانوسیال 1 % Al_2O_3	برش خشک	برش جریان سیال	برش جریان سیال با نانوسیال 1 % Al_2O_3
1	145	118	92	1/03	0/77	0/57
2	149	121	99	1/06	0/79	0/6
3	154	126	103	1/11	0/79	0/63
4	146	119	98	1/02	0/76	0/57
5	157	129	109	1/04	0/82	0/62
6	163	134	114	1/14	0/89	0/68
7	160	129	108	1/12	0/93	0/69
8	166	136	114	1/16	0/96	0/78
9	170	143	120	1/17	0/98	0/81



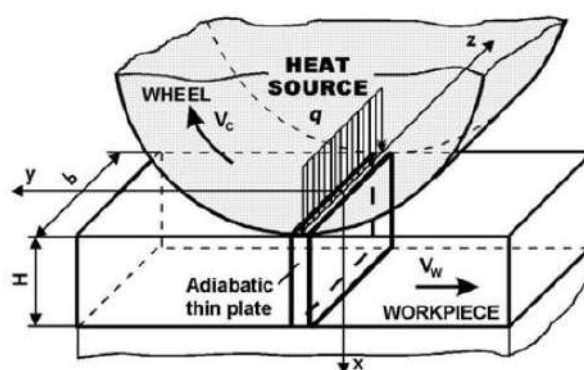
شکل 2-40 شماتیکی از متغیرها و ابعاد مطرح در فرآیند سنگ زنی [91].

لی و همکاران¹ [92] مطالعه ای را در زمینه مدلسازی میدان حرارتی در سنگ زنی تخت بر روی قطعاتی از جنس فولاد ضدزنگ 2Cr13، فولاد CK45 و سرامیک زیرکونیا² با جریان جت نانوسیال به روش MQL و بررسی سهم حرارتی قطعه کار از حرارت تولید شده انجام دادند. نانوسیال مورد استفاده از 1 % وزنی نانولوله های کربن در روغن گیاهی با نرخ تحویل 15 ml/min تشکیل شده بود. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان دادند که اختلاف دمایی زیادی بین سطح و لایه زیرسطحی در قطعه تحت سنگ زنی بوجود می آید که سبب ایجاد گرادیان دمایی بالایی در جهت عمق قطعه کار می گردد. در نقطه مقابل، تغییرات دمایی در امتداد عرضی قطعه کار بسیار ناچیز گزارش شده است. ایشان نشان دادند که بکارگیری نانوسیال در MQL بجای سیال خالص سبب جبران اثرات خنک

¹ Li et al.² Zirconia ceramics

کاری ضعیف MQL گردیده، باعث کاهش قابل ملاحظه سهم حرارتی قطعه کار و کاهش مصرف انرژی می گردد. حضور ذرات جامد باعث شکستن مؤثرتر مرز هوایی¹ در اطراف چرخ ساینده و نفوذ مؤثر جریان خنک کاری در مرز مشترک چرخ و قطعه کار می گردد. بعلاوه خواص روانکاری ویژه و مشخصات تریبولوژی ذرات جامد در جریان خنک کاری سبب تشکیل لایه برشی از نانوذرات در فصل مشترک ابزار-قطعه کار گردیده و باعث بهبود خواص روانکاری MQL می شود. طبق نتایج منتشر شده، میزان شار حرارتی تولیدی در حین فرآیند سنگ زنی فولاد CK45 در عمق بار 1، 5 و 10 μm بترتیب برابر 17/8، 21/6 و 23 W/mm^2 می باشد. این درحالی است که مقادیر مشابه برای سنگ زنی سرامیک بترتیب برابر 10/3، 12/5 و 14/5 W/mm^2 گزارش شده است. تفاوت مشاهده شده به ماهیت براده برداری از ماده سرامیکی از طریق مکانیزم شکست ترد نسبت داده شده است. براده برداری از طریق مکانیزم شکست ترد سبب کاهش انرژی ویژه سنگ زنی و کاهش حرارت تولید شده در ناحیه سنگ زنی می گردد.

روش مدل سازی معکوس در مسائل انتقال حرارت برای یافتن مشخصات ورودی پروسه در شرایطی که میدان حرارتی مشخص است مورد استفاده قرار می گیرد. در این زمینه، گوستی میرویک و همکاران² [93] مطالعه عددی را در زمینه توزیع حرارت در فرآیند سنگ زنی با استفاده از روش انتقال حرارت معکوس انجام دادند. در مدل بکار رفته توسط این محققین منبع حرارتی بصورت یک نوار با طول مشخص³ و توزیع حرارت یکنواخت که با سرعتی برابر با سرعت حرکت قطعه کار در سطح فوقانی ناحیه محاسباتی جابجا می گردد در نظر گرفته شده است (شکل 2-41). ایشان قطعه کار را بصورت یک صفحه نیمه نامحدود در نظر گرفتند که بصورت یک سری از صفحات نازک آدیاباتیک تقسیم شده است. سپس از مدل انتقال حرارت یک بعدی و روش تفاضل محدود بصورت ضمنی برای حل این معادله حرارتی استفاده نمودند. ایشان نتایج حاصل از مدل سازی انجام گرفته را با نتایج تجربی حاصل از سنگ زنی فولاد DIN 50-10-1-8 توسط چرخ سنگ زنی از جنس اکسید آلومینیم در شرایط عمق بار 5 μm ، سرعت چرخ 30 m/s و سرعت خطی 5 mm/s مورد مقایسه قرار دادند.



شکل 2-41 مدل انتقال حرارت ابتدایی بکار رفته در شبیه سازی توزیع حرارت در فرآیند سنگ زنی تخت [93].

مورگان و همکاران⁴ [59] در مدل ارائه شده برای پیش بینی توزیع حرارت در فرآیند سنگ زنی MQL از روابط پیشنهاد شده توسط راؤ و همکاران¹ [94] استفاده نمودند. با توجه به اینکه میزان سهم حرارتی سیال در حالت

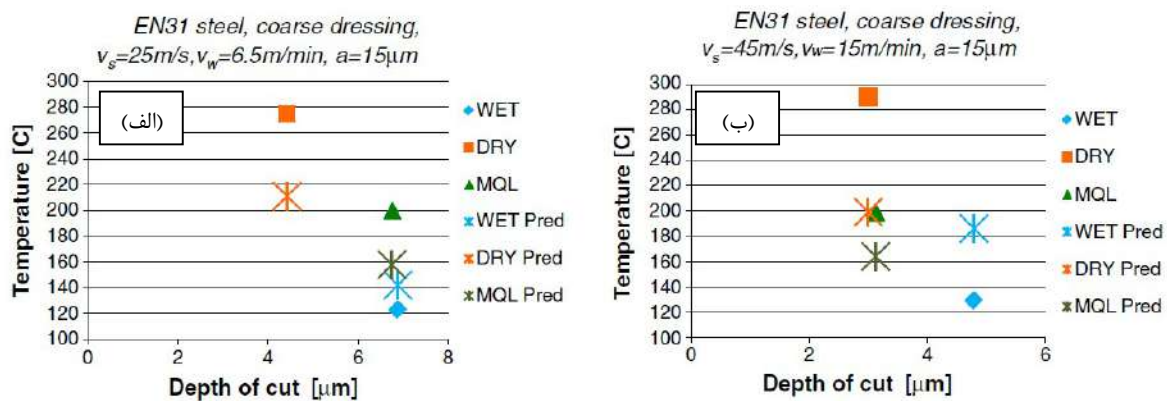
¹ Breaking the airbond

² Gostimirovic et al.

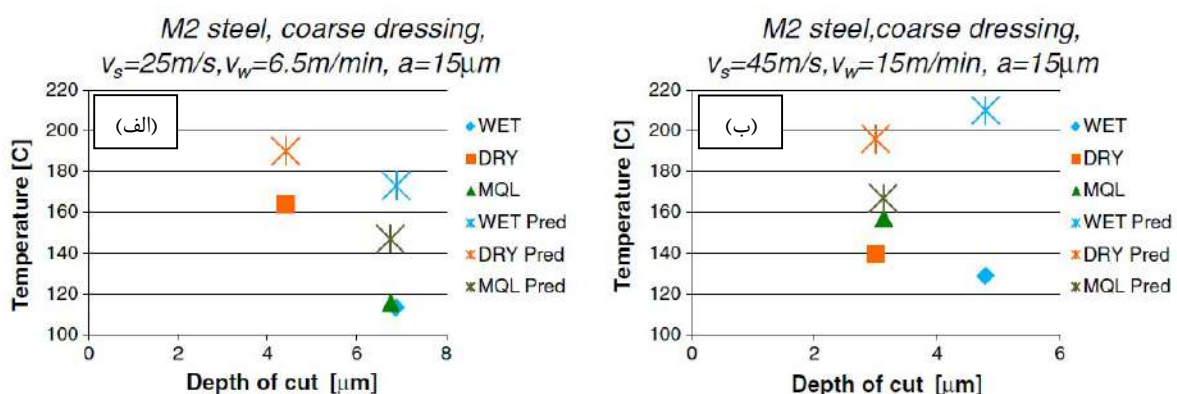
³ Strip with specific length

⁴ Morgan et al.

روانکاری جریان سیال برابر 5 تا 10٪ گزارش شده بود [95]، مورگان و همکاران مدل پیشنهاد شده برای حالت DRY را جهت تفسیر توزیع حرارت در شرایط MQL انتخاب کردند [94]. در این شرایط حرارت تولید شده قدری از حرارت واقعی منتقل شده به سطح کار بالاتر محاسبه می شود چرا که سهم فیلم روانکار در حرارت تولید شده لحاظ نمی گردد. مطابق نتایج ارائه شده در مورد فولاد EN31، M2 و EN8 تحت شرایط و پارامترهای سنگ زنی متفاوت، پراکندگی زیادی در اختلاف مشاهده شده بین مقادیر تجربی و مقادیر پیش بینی شده از دمای سطحی قطعه کار در حین پروسه سنگ زنی گزارش شده است. اختلاف مشاهده شده برای MQL و DRY به متنوع بودن ثابت های مرتبط با قطعه کار در منابع مختلف نسبت داده شده است و چنین ذکر شده است که با انتخاب حدود بالای ثابت های در دسترس برای جنس ماده کار، مدل ارائه گردیده با دقت بالاتری مقادیر واقعی را تخمین می زند. این نتایج در شکل های 2-42 تا 2-44 برای فولاد EN31، M2 و EN8 تحت پارامترهای فرآیند مختلف نمایش داده شده اند.

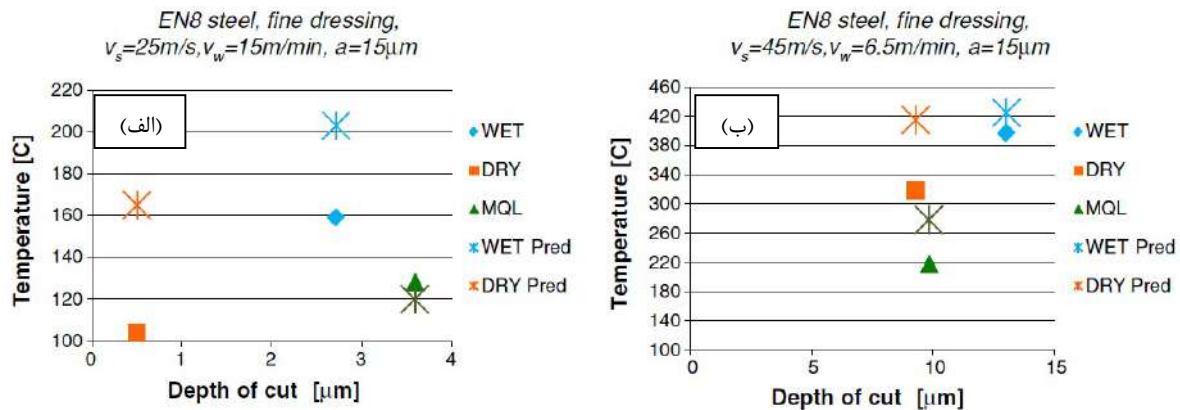


شکل 2-42 دماهای بدست آمده از نتایج تجربی و مدل پیشنهادی برای پیش بینی شده دمای قطعه کار بصورت تابعی از عمق برش برای فولاد EN31 [59].



شکل 2-43 دماهای بدست آمده از نتایج تجربی و مدل پیشنهادی برای پیش بینی شده دمای قطعه کار بصورت تابعی از عمق برش برای فولاد M2 [59].

¹ Rowe et al.



شکل 2-44 دماهای بدست آمده از نتایج تجربی و مدل پیشنهادی برای پیش بینی شده دمای قطعه کار بصورت تابعی از عمق برش برای فولاد EN8 [59].

کیم و همکاران¹ [96] به مدل سازی نحوه توزیع فلاکس حرارتی در فرآیند سنگ زنی عمیق² پرداختند. این محققین از روش الگوریتم متناوب انتقال حرارت معکوس³ در مدل سازی خود استفاده نموده و از نتایج حاصله برای تعیین سهم انرژی قطعه کار در فرآیند سنگ زنی و ضرایب انتقال حرارت همرفت در لبه پیش رو (h_f) و لبه پس رو (h_b) از فلاکس حرارتی بهره گرفتند. طبق نتایج حاصل از مدل سازی انجام گرفته، شکل فلاکس حرارتی در ضمن فرآیند سنگ زنی عمیق با عمق براده 0/5 mm تقریباً بصورت مثلثی می باشد. لذا، مدل فلاکس حرارتی مثلثی به عنوان مدلی مناسب در آنالیز حرارتی فرآیند سنگ زنی معرفی گردیده است. این محققین از مقایسه میزان انرژی حرارتی منتقل شده به قطعه کار از طریق انتگرال گیری شار حرارتی محاسبه گردیده در امتداد طولی قطعه کار و اندازه گیری توان سنگ زنی برای محاسبه سهم انرژی قطعه کار (ϵ_w) استفاده نمودند. نتایج حاصله نشان دادند که حرارت منتقل شده به قطعه کار در واحد عرض برای شرایط سنگ زنی رو به پایین⁴ برابر 5/35 W/mK و برای شرایط سنگ زنی رو به بالا⁵ 5/63 W/mK می باشد و سهم حرارتی قطعه کار بترتیب برابر 3/5 و 4/3 است. همچنین براساس نحوه توزیع فلاکس حرارتی محاسبه شده، توزیع دما در قطعه کار از طریق مقایسه سه مدل مستطیلی، مثلث قائم الزاویه و مثلث با اضلاع نامساوی محاسبه گردیده و نتایج حاصله با نتایج تجربی بدست آمده از تست سنگ زنی عمیق در حالت رو به بالا و رو به پایین با سرعت چرخ 30 m/s، سرعت عرضی قطعه کار 5 mm/s و نرخ جریان خنک کاری 200 ml/s مورد مقایسه قرار گرفتند. چنین گزارش داده شده است که مدل فلاکس حرارتی مثلثی با اضلاع نابرابر تخمین بهتری را از نحوه توزیع حرارت در فرآیند سنگ زنی عمیق فراهم می آورد. بعلاوه، ضرایب انتقال حرارت همرفت h_f و h_b مقادیر متفاوتی را دارا هستند. مقادیر h_b برابر 10 kW/m² و h_f برابر 30 kW/m² در حالت سنگ زنی رو به پایین نتایج توزیع حرارت بسیار نزدیکی را با مقادیر اندازه گیری شده تجربی فراهم ساختند. با این حال، طبق گزارش منتشر شده، در حالت سنگ زنی رو به بالا مقدار h_f بمراتب کمتر از حالت سنگ زنی رو به پایین بوده، به نحوی که انتخاب h_f برابر 5 kW/m²K برای سنگ زنی رو به بالا سبب ایجاد

¹Kim et al.

²Creep feed grinding

³Sequential algorithm in inverse heat transfer

⁴Down-creep-feed grinding

⁵Up-creep feed grinding

منحنی توزیع حرارت پایین تری نسبت به مقادیر تجربی گردیده است. بعلاوه، نتایج نشان دهنده بالاتر بودن دمای حداکثر ایجاد شده به میزان 50٪ در حالت سنگ زنی عمیق رو به بالا نسبت به رو به پایین می باشد.

هونگ ولو¹ [97] به مدلسازی عددی توزیع حرارت در فرآیند سنگ زنی پرداختند. این محققین توسط روش تفاضل محدود مسئله توزیع حرارت را در محدوده زمان و مکان جزء بندی نموده² و سپس از مدل معکوس خطی بدون تکرار³ برای بدست آوردن توزیع فلاکس حرارتی و نیز نحوه توزیع حرارت در مسیر سنگ زنی استفاده کردند. ایشان در مدلسازی انجام گرفته از ضرایب همرفت ثابت که توسط دیراسیواکس و زرکل⁴ [98] پیشنهاد شده بود استفاده نمودند، بدین نحوه که ضریب همرفت حرارتی بصورت یک تابع خطی برای ناحیه پشت شار حرارتی در نظر گرفته شد و این مقدار با افزایش فاصله از شار حرارتی کمتر می گردید. با توجه به اینکه بخش کوچکی از سیال خنک کاری در حین پروسه سنگ زنی از ناحیه سنگ زنی عبور کرده و به ناحیه جلوی شار حرارتی می رسد، ضریب انتقال حرارت برای ناحیه جلوی شار حرارتی برابر صفر در نظر گرفته شد. بقیه شرایط مرزی در مدلسازی انجام گرفته بصورت آدیاباتیک فرض گردید. مدل استفاده شده برای شار حرارتی از نوع توزیع یکنواخت مستطیلی گزارش شده است. مطابق مقاله منتشر شده، پس از جزء به جزء نمودن مسئله توسط روش تفاضل محدود، مجهولات مسئله، شامل ضرایب انتقال همرفت حرارتی، شار حرارتی، و درجه حرارت، از طریق حل ماتریس $AT=BC$ محاسبه گردیدند. در این رابطه A بعنوان ماتریس مقادیر ثابت، که شامل ΔX ، ΔZ ، ΔT و خواص ماده می باشد، T بعنوان داده های اندازه گیری شده، شامل دمای نقاط در عمق مشخص، B بعنوان ماتریس ضرایب و C بعنوان بردار مجهولات معرفی گردیده اند. مقادیر مجهول با استفاده از روش کمترین مجموع مربعات خطاء بدست آمده اند. طبق نتایج منتشر شده، مدل پیشنهادی قادر به پیش بینی شار حرارتی و ضریب انتقال حرارت همرفت در حین فرآیند سنگ زنی تحت شرایط خنک کاری متفاوت، تنها با در دست داشتن داده های محدودی از درجه حرارت در عمق و طول مشخص از قطعه کار تحت فرآیند سنگ زنی است.

شن و همکاران⁵ [99] مطالعه عددی را در زمینه مدلسازی انتقال حرارت در فرآیند سنگ زنی با استفاده از روش تفاضل محدود انجام دادند. ایشان از این مدل برای تحقیق در زمینه تاثیر اندازه قطعه کار، نرخ باردهی و شرایط مرزی خنک کاری بر روی نحوه توزیع حرارت در فرآیند سنگ زنی استفاده کرده و از مطالعات عددی انجام گرفته برای تخمین سهم انرژی قطعه کار و ضریب همرفت حرارتی در فرآیند سنگ زنی بهره گرفتند. مدل حرارتی ارائه شده توسط این محققین بر مبنای گره کامل⁶ است که سبب کاهش مدت زمان محاسبات می گردد (شکل 2-45). ایشان برای ارزیابی صحت مدل توسعه یافته بر اساس روش تفاضل محدود، نتایج حاصل از شبیه سازی انجام گرفته را با مدل ها انتقال حرارت پیشین مقایسه نمودند. براساس نتایج حاصله، نحوه توزیع حرارت در فرآیند سنگ زنی به سه دسته تقسیم می گردد (شکل 2-46). در ناحیه ابتدای درگیری⁷ که در آن دمای قطعه کار بشدت افزایش می

¹Hong and Lo

²Discretization time and space domain

³Linear inverse model with no iteration

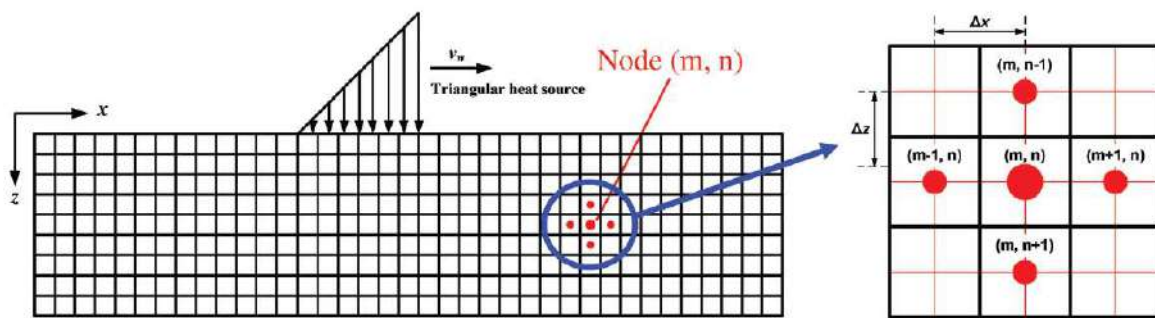
⁴DesRuisseaux and Zerkle

⁵ Shen et al.

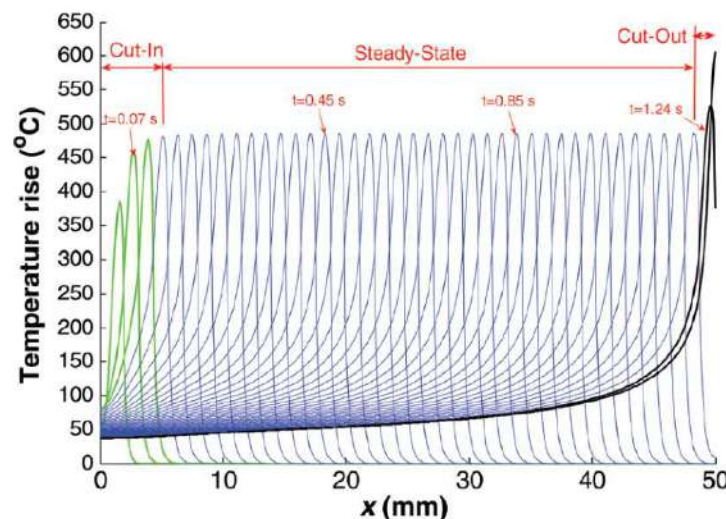
⁶ Full size grid

⁷ Cut-in region

یابد، ناحیه حالت پایا که در آن پروفیل دمای سطحی به یک حالت باثبات می رسد و ناحیه خروج از درگیری¹ که در آن مجدداً دما افزایش می یابد و پیک دمایی در آن نقطه مشاهده می گردد. در ادامه با مقایسه شرایط خنک کاری همرفت در لبه پیش رو²، لبه پس رو³، و ناحیه تماس سنگ زنی دریافتند که اثر خنک کاری در لبه پیش رو حداقل بوده و دمای حداکثر با نرخ خنک کاری بالای برابر $10^5 \text{ W/m}^2\text{K}$ تنها 5٪ کاهش می یابد. خنک کاری در لبه پس رو با اینکه دارای اثر قابل ملاحظه ای بر روی پروفیل حرارتی است، دمای حداکثر حتی در شرایط نرخ خنک کاری بالا نیز تقریباً بدون تغییر باقی می ماند. در نقطه مقابل، خنک کاری مؤثر در ناحیه تماس سنگ زنی دارای یک تأثیر قابل توجهی بر روی دمای حداکثر و نیز دمای لبه پس رو است. همچنین این محققین با استفاده از تکنیک انطباق توزیع حرارت بدست آمده از مدل تفاضل محدود و نتایج تجربی برای تخمین ضریب هدایت حرارتی همرفت در لبه پس رو (h_1) و ناحیه تماس سنگ زنی (h_{contact}) استفاده نموده و گزارش دادند که h_{contact} بدلیل بالاتر بودن سرعت سیال در ناحیه تماس بمراتب از h_1 بزرگتر است (شکل 2-47). همچنین نتایج نشان دادند که ضرایب h_1 و h_{contact} برای شرایط خنک کاری با جریان سیال بمراتب از شرایط MQL بالاتر است.



شکل 2-45 مش بندی و شبکه گره مدل انتقال حرارت براساس روش تفاضل محدود [99].

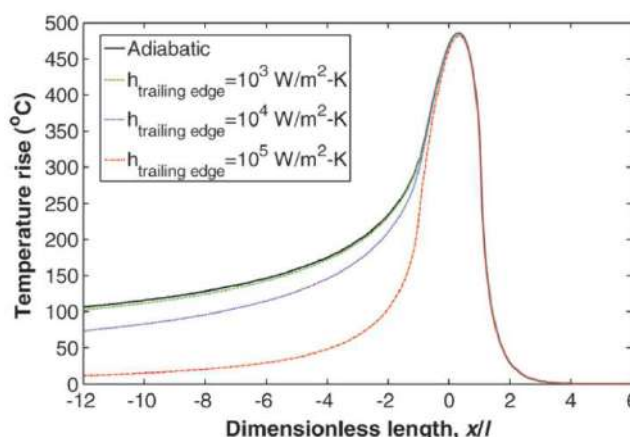


شکل 2-46 نحوه توزیع دمای گذرا و حالت پایا در قطعه ای به طول 50 mm، عمق 10 mm و سرعت پیشروی 2/4 m/min [99].

¹ Cut-out region

² Leading edge

³ Trailing edge



شکل 2-47 تأثیر خنک کاری در لبه پس رو بر روی منحنی توزیع حرارت سطحی در فرآیند سنگ زنی [99].

2-5- لزوم انجام تحقیق و اهداف پژوهش

سیالات برشی در فرآیند سنگ زنی برای اهداف متعددی از قبیل بهبود عمرسنگ، کاهش اعوجاج حرارتی قطعه کار، بهبود صافی سطح، و دور نمودن براده ها از موضع ماشینکاری بکار گرفته می شود. نرخ بکارگیری سیال در حجم بالا¹ در سیستم های خنک کاری در کارگاه های تولیدی بسیار بارز است. اسرجیس و نیگوی² [100] نشان دادند که هزینه های مرتبط با سیالات برشی برابر 17٪ کل هزینه های تولید را شامل می شود. این در حالی است که تجهیزات و ابزارهای برشی تنها 7/5٪ از کل هزینه تولید را دربر می گیرند. بعلاوه، حجم قابل ملاحظه ای از گرد و غبار در طی پروسه های ماشینکاری در اثر بکارگیری سیالات برشی تولید می شود. این مسئله در مورد فرآیندهایی مثل فرآیندهای سنگ زنی که از دسته فرآیندهای سایشی محسوب می شوند بسیار مشهودتر است بگونه ای که فرآیند سنگ زنی بعنوان یکی از فرآیندهای تولیدی که شدیداً ناسازگار با طبیعت می باشد شناخته شده است. نرخ تولید غبار در فرآیند سنگ زنی عموماً چندین برابر بالاتر از شرایط حاکم در تراشکاری است [29]. خطرات سلامتی اپراتورهای ماشین و دیگر کارگرانی که در محیط حاوی غبارهای مضر تنفس می کنند به همراه هزینه بالای دفع و بازیابی سیال سنگ زنی مواردی است که بر روی قیمت نهایی محصول تمام شده تاثیر گذار خواهد بود. طبق قوانین وضع شده توسط سازمان سلامت و ایمنی کارکنان³ (OHS) حد مجاز غبار و ریزگردهای موجود در کارگاههای تولیدی برابر 5 mg/m^3 به ازای 8 ساعت برای غبار روغن های صنعتی و برابر 15 mg/m^3 برای دیگر ریزگردهایی که طبقه بندی نشده اند⁴ (PNOC) می باشد. بنابراین، لازم است که میزان آلاینده ها و سطح غبار معلق در محیط کارگاههای صنعتی در کشور ما نیز در حدود استاندارد کاهش داده شود چرا که حضور این آلاینده ها هزینه های بالاتری را از جهت بیماری های پوستی و تنفسی کارکنان بر جامعه تحمیل می نماید.

¹ Large fluid delivery

² Sreejith and Ngoi

³ Occupational Safety and Health Administration

⁴ Particulates Not Otherwise Classified

مهمترین مانع در برابر جایگزینی یا حذف سیال برشی، انرژی تولید شده در حین فرآیند سنگ زنی است که بصورت حرارت در قطعه کار پخش می شود و سبب افزایش دما، آسیب های حرارتی، و عدم دقت ابعادی قطعه تمام شده می گردد. مطابق مطالب ارائه شده در این بخش، سیالات برشی عمدتاً از طریق فراهم سازی روانکاری و خنک کاری در حین پروسه ماشینکاری، یک فاکتور مهم در کنترل آثار نامطلوب ذکر شده می باشند. روانکاری باعث کاهش توان مصرفی ماشینکاری و حرارت تولیدی ناشی از آن می گردد و درعین حال باعث ارتقاء کیفیت سطحی قطعه کار و کاهش سایش چرخ ساینده می شود. خنک کاری انجام شده توسط سیال سبب دور ساختن حرارت از ابزار و قطعه کار می گردد [33]. یک جایگزین برای بکارگیری سیال برشی در حجم گسترده، ماشینکاری خشک (ماشینکاری بدون استفاده از هرنوع سیال برشی) می باشد. اگرچه ماشینکاری خشک در برخی از شرایط امکان پذیر است، بسیاری از موارد در زمینه روانکاری، شامل عمرازار، آسیب حرارتی قطعه کار، و غیره، هنوز بصورت موانعی عمده در سر راه این پروسه وجود دارند. مالکین و گوو¹ [35] در جمع بندی مشاهدات خود چنین آورده اند که حذف سیال سنگ زنی سبب می گردد که سرعت پرشدن خلل و فرج در سطح ساینده چرخ سنگ زنی بشدت بالا رفته و تمایل برای تراکم و جمع شدن² ذرات براده در این فرورفتگی ها بالاتر رود. این امر یک فاکتور منفی در فرآیند سنگ زنی بحساب آمده و سبب می گردد تا سنگ زنی خشک تنها در حالت ماشینکاری قطعات با ابعاد بسیار کوچک مورد توجه باشد. محدودیت های حاکم در فرآیند سنگ زنی خشک می تواند در بسیاری از موارد توسط بکارگیری مکانیزم روانکاری با حداقل سیال خنک کاری مرتفع گردد. فرآیند MQL قادر است تا حرارت تولید شده ناشی از اصطکاک را کاهش داده و سبب خنک کاری در وجه مشترک ابزار و قطعه کار گردد که این امر باعث می شود تا دمای قطعه کار در سطوح پایین تری نسبت به حالت ماشین کاری خشک نگه داشته شود. ویژگی دیگر این فرآیند آن است که در شرایط بکارگیری صحیح آن، قطعات و براده ها بصورت خشک باقی می مانند که سبب بهبود قابلیت جابجایی آنها می شود. با این حال، از آنجایی که سنگ زنی یک فرآیند سایشی است، سبب تولید حرارت بسیار بالایی در فصل مشترک ابزار قطعه کار می گردد. بکارگیری MQL در سنگ زنی نسبت به سایر فرآیندهای براده برداری دارای چالش های بیشتری بوده و در سالهای اخیر مطالعاتی جهت بسط دانش مربوط به سنگ زنی با سیستم حداقل جریان سیال روانکاری (MQL) انجام گرفته است.

بعلاوه، در تلاش برای ارتقاء انتقال حرارت همرفت سیال ها جهت پاسخ گویی به نیازهای روز افزون تجهیزات و فرآیندهای مختلف که همراه با شار حرارتی بالایی در حین پروسه هستند، سوسپانسیون هایی از نانو ذرات مختلف معلق در سیال ها بعنوان یک جایگزینی با پتانسیل بالا ظهور یافتند. هر کدام از نانو سیال ها دارای ویژگی های هدایت حرارتی و تریبولوژی منحصر بفردی هستند که بسته به کاربرد مورد نظر استفاده قرار می گیرند. یکی از ویژگی های عمده ای که در نانوسیال های مورد نظر برای فرآیندهای ماشینکاری، نظیر فرآیند سنگ زنی، بایستی لحاظ گردد کاهش ضریب اصطکاک بین سطوح لغزنده در کنار بحث ارتقاء ضریب انتقال حرارت همرفت سیال روانکار می باشد. از این جهت کاهش دمای تولید شده در حین فرآیند از طریق کاهش ضریب اصطکاک سطوح لغزشی، و در نتیجه آن کاهش میزان سایش و افزایش عمر ابزار، و کاهش آسیب های سطحی به قطعه کار با حفظ

¹ Malkin and Guo

² Clog and aggregation

راندمان ماشینکاری دارای اهمیت بالایی می باشد. در این راستا، توسعه دانش مرتبط با بکارگیری نانو سیالات در فرآیند سنگ زنی در سالهای اخیر جایگاه ویژه ای را در امر تحقیقات در زمینه سنگ زنی فراهم کرده است. در این روش، نانو روانکار در شکل غبار توأم با هوای فشرده به فصل مشترک سنگ ساینده و قطعه کار پاشیده می شود و انتظار می رود که سبب بهبود عملکرد فرآیند سنگ زنی، کاهش انرژی ویژه سنگ زنی و حرارت تولید شده در ناحیه سنگ زنی گردد. از این رو، انتقال حرارت بالاتر و خصوصیات تریبولوژی بهتر نانو سیال ها سبب می گردد تا خنک کاری و روانکاری بهتری را در حین فرآیند سنگ زنی نسبت به MQL با سیال ساده فراهم ساخته و این فرآیند را از نظر تولید عملی سازد.

فولاد AISI 1045، یک فولاد کربنی با درصد کربن متوسط 0/43 تا 0/5 می باشد که دارای استحکام کششی متوسط بوده و در شرایط نورد شده به رنگ سیاه و یا در وضعیت نرمالیزه شده به بازار عرضه می شود. میزان استحکام کششی این فولاد در محدوده 570 تا 700 MPa بوده و سختی آن در بازه 170 تا 210 HB قرار می گیرد. سختی سطحی قطعات تولید شده از این جنس را می توان با انجام عملیات سختکاری سطحی تا 620 HB (58 HRC) افزایش داد. این فولاد دارای ویژگی های مطلوبی از جهت قابلیت جوشکاری و ماشینکاری بوده و مقاومت به ضربه خوبی را در شرایط نرمالیزه شده یا نورد گرم شده دارا می باشد. این فولاد بصورت گسترده در ساخت اکسل ها، پیچ، شاتون های فورج شده، میل لنگ، میله های تحت کشش، چرخ دنده، میل راهنما و ... بکار رفته و نمونه ای از فولادهایی است که دارای کاربردهای وسیع در صنایع مختلف هستند [101 و 105].

فولاد AISI 1045 دارای محدودیت در قابلیت سختکاری بصورت کامل¹ بوده و تنها مقاطعی با ابعاد کمتر از 60 mm برای انجام عملیات سختکاری کامل توصیه می شوند. با این حال، قطعات ساخته شده از این جنس را می توان تحت عملیات سختکاری سطحی نظیر عملیات سختکاری شعله ای یا القایی قرار داده و سختی سطحی آن را بسته به شرایطی چون ابعاد قطعه کار، محیط کوئینچ و غیره در محدوده 54 تا 60 HRC افزایش داد. عملیات سخت کاری با حرارت دهی در دمای 820 تا 860 °C و سپس کوئینچ در آب یا روغن برحسب سختی موردنظر انجام می گیرد. پس از عملیات سختکاری، قطعه کار تحت عملیات تمپر نمودن در دمای بالای 300 °C قرار می گیرد. این عملیات باعث آزاد شدن تنش های حاصل از عملیات سختکاری و کوئینچ شده و در عین حال سبب کاهش سختی سطحی به میزان جزئی می گردد [101 و 102].

عملیات سنگ زنی بعنوان یک مرحله پایانی تولید محسوب می شود که هدف از آن رسیدن به دقت ابعادی و صافی سطح قطعات موردنظر است. با استناد به مباحث قبل می توان گفت که عملیات سنگ زنی خود در شرایطی که دمای تولید شده درحین فرآیند براده برداری مهار نشود می تواند سبب انجام تمپر مجدد سطحی و کاهش نامطلوب سختی سطحی قطعات تولیدی تا سوختن لایه سطحی و تشکیل فازهای نامطلوب در سطح قطعه کار گردد. لذا، با در نظر گرفتن مسائل زیست محیطی و ویژگی های فنی مورد انتظار از قطعات سنگ زنی شده، روش خنک کاری جایگزین برای روش جریان سیال بایستی قادر به کنترل دمای سطحی درحین براده برداری بوده و مانع از افزایش حرارت تولید شده در حین سنگ زنی به مقادیر بحرانی از جهت مشخصات سطحی قطعه کار گردد.

¹ Limited through hardening capability

انتظاری که از نانوسیال های تشکیل یافته از نانوذراتی چون گرافیت و اکسیدهای فلزی در سیالات پایه موردنظر، که بعنوان نانو روانکار بکار گرفته می شوند، این است که بطور مؤثری باعث کاهش هدر روی ناشی از اصطکاک لغزشی از طریق تأمین نانوذرات فعال اضافه شده به روانکار¹ و تشکیل یک فیلم سطحی پایدار و با اصطکاک پایین² در وجه مشترک لغزشی دانه های ساینده و سطح قطعه کار گردد. در مطالعه پیش رو، هدف بررسی قابلیت نانوسیال گرافیت و نانوسیال اکسید مس، که به روش تخلیه الکتریکی غوطه ور (SEDP) تولید شده اند، بعنوان روانکار در فرآیند سنگ زنی فولاد AISI 1045 با بکارگیری سیستم حداقل جریان روانکار می باشد. دستیابی به مشخصات ویژه ای از جهت ارتقاء ضریب انتقال حرارت همرفت سیستم خنک کاری و مشخصات مطلوب سلامت سطحی قطعات ماشینکاری شده با هدف کاهش مصرف سیال برشی در فرآیند سنگ زنی اهداف مطالعاتی این پژوهش خواهند بود.

با درنظر گرفتن مطالب فوق الذکر، موارد زیر را می توان بعنوان بخش های مطالعاتی اصلی تحقیق پیش رو بیان نمود:

- سنتز نانوسیالات گرافیت و مس به روش تخلیه الکتریکی غوطه ور (SEDM) در سیال پایه حاوی روغن گیاهی و بررسی تجربی ویژگی های نانوسیال حاصله از جهت اندازه ذرات تشکیل یافته، میزان بهم چسبیدگی ذرات در سیال پایه، میزان پایداری سوسپانسیون حاصله، و ضرایب هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانوسیالات تولید شده.
- مطالعه ویژگی های تریبولوژی نانوسیالات تولید شده با فرمول بندی جدید بعنوان روانکار در فرآیند سنگ زنی MQL فولاد AISI 1045. با توجه به تحقیقات قبلی صورت گرفته، نقش نانوسیال گرافیتی بصورت محدود در فرآیند ماشینکاری بحث شده است در حالی که خواص تریبولوژی نانوسیال مس بخصوص بعنوان سیال برشی در فرآیند ماشینکاری بررسی نشده است.
- بررسی تجربی نقش نانوسیال تولید شده در جهت کاهش میزان توان مصرفی فرآیند سنگ زنی، و نحوه توزیع حرارت در قطعه کار از طریق انجام آزمایشات تجربی و اندازه گیری همزمان حرارت منتقل شده به قطعه کار و نیروهای برش در حین پروسه سنگ زنی، و
- شبیه سازی عددی توزیع حرارت در قطعه کار با استفاده از روش تفاضل محدود و استفاده از نتایج حاصله در شناخت بیشتر نقش نانوسیال در سهم حرارتی قطعه کار و محاسبه ضرایب همرفت حرارتی سیستم خنک کاری MQL با بهره گیری از نانوسیالات سنتز شده در حین فرآیند سنگ زنی. تلفیقی از روش تجربی و شبیه سازی تفاضل محدود در بدست آوردن ضرایب انتقال حرارت همرفت سیستم خنک کاری استفاده شده و از روش شبیه سازی تفاضل محدود برای تعیین توزیع دما در قطعه کار و سهم حرارتی آن از حرارت تولید شده حین پروسه سنگ زنی استفاده شده است. درنظر گرفتن منبع حرارتی بصورت جابجا شونده و شکل قوس حرارتی نمایی برای حالت سنگ زنی مخالف از ویژگی های شبیه سازی تفاضل محدود است که از این ویژگی ها در درک بهتر مکانیزم حاکم بر انتقال حرارت در فرآیند سنگ زنی استفاده می شود. امکان انجام آنالیز حرارتی با در نظر گرفتن

¹ Active lubricant additives

² Stable, low friction tribofilm

وضعیت انتقال حرارت از مرزهای نمونه بدون فرض شرایط آدیاباتیک¹ و نیمه نامحدود بودن قطعه کار² از قابلیت های این شبیه سازی می باشد.



¹ Adiabatic boundary condition

² Semi-infinite workpiece

بخش دوم

مبانی و روش‌های کار

فصل سوم

مواد و روش‌ها

فصل سوم

مواد و روش ها

3-1- مقدمه

با توجه به تحقیقات قبلی صورت گرفته که بخشی از آنها در قالب فصل دوم ارائه شدند، بکارگیری نانوسیالات در فرآیند سنگ زنی با استفاده از سیستم حداقل جریان سیال روانکار (MQL) می تواند بصورت یک روش مؤثر در برابر اثرات منفی افزایش دما در حین پروسه سنگ زنی مورد توجه قرار گیرد. با این حال، خواص خنک کاری و تریبولوژی نانوسیالات، خواصی مرتبط با ویژگی های فیزیکی¹ نانوذرات شامل شکل، ساختار اتمی و خواص فیزیکی نانوذرات اضافه شده به سیال پایه می باشند. در این پروژه خواص خنک کاری و تریبولوژی نانوسیالات گرافیت و اکسید مس در پروسه سنگ زنی فولاد AISI 1045 از طریق بکارگیری سیستم حداقل جریان سیال روانکار با فشار متغیر جریان پاشش مورد مطالعه قرار می گیرد. نانوذرات گرافیت و اکسید مس نماینده نانوذرات با ساختار اتمی و خواص تریبولوژی متفاوت هستند. جهت مطالعه نقش ساختار اتمی و خواص فیزیکی نانوذرات بر روی خواص تریبولوژی نانوسیالات مذکور، نیروهای سنگ زنی، زبری سطح، مشاهدات میکروسکوپی و میکروسختی سطوح سنگ زنی شده مورد ارزیابی قرار می گیرند. جهت محاسبه و ارزیابی سهم انرژی قطعه کار و شبیه سازی نحوه توزیع دما در آن، مدلی با استفاده از روش تفاضل محدود بر اساس منبع حرارتی نمایی در وجه تماس ابزار با قطعه کار که با سرعتی برابر با سرعت قطعه کار در وجه فوقانی ناحیه محاسباتی حرکت می کند، توسعه داده شده است. دمای سطح سنگ زنی و نیروی برشی که از طریق تست های تجربی بدست آمده اند به عنوان ورودی مورد نیاز این مدل بکار گرفته می شوند. این فصل دربر گیرنده تجهیزات مورد نیاز جهت سنتز نانوسیالات گرافیت و اکسید مس، نحوه انجام تست های تجربی سنگ زنی، پارامترهای فرآیند، و نحوه سنجش خروجی های مورد نظر است.

3-2- مواد، روش ها و طراحی آزمایش ها

تست های سنگ زنی بدون باردهی عرضی بر روی دستگاه سنگ تخت STANKO 3D711WF-11 که مجهز به باردهی عمودی اتوماتیک است انجام گرفتند. چرخ سنگ زنی اکسید آلومینیم زینتر شده² WA46K5V با مقیاس سختی میانی³ و متوسط اندازه ذرات ساینده $355 \mu\text{m}$ می باشد. مواد قطعه کار از فولاد AISI 1045 است که در ابعاد نهایی $60 \times 20 \times 10 \text{ mm}$ آماده سازی شده اند بگونه ای که طول و عرض سطح سنگ زنی بترتیب برابر با 60 mm و 10 mm می باشد. ترکیبات کربن متوسط و عناصر موجود در ساختار این فولاد سبب ایجاد مقاومت به ضربه خوب در شرایط نرمالیزه یا نورد گرم شده، استحکام کششی در محدوده 570 MPa تا 700 MPa و سختی در بازه 170

¹ Physical synergetic

² Vitrified bond alumina

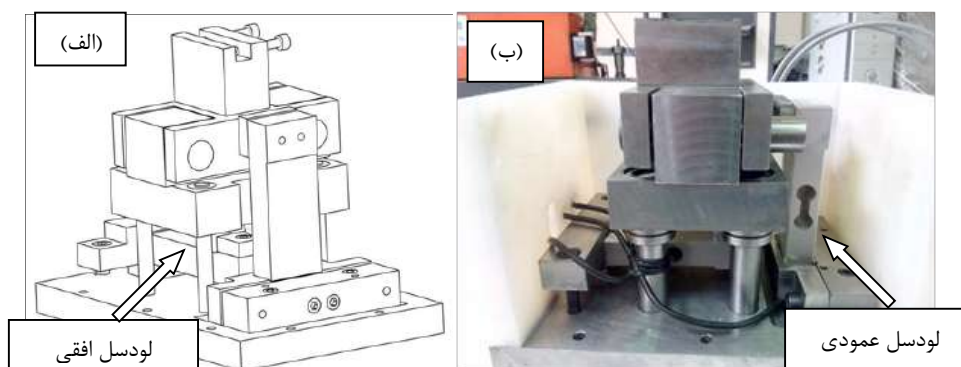
³ Medium grade scale

تا HB 210 می گردد. سختی سطحی قطعات تولید شده از این جنس را می توان با انجام عملیات سختکاری سطحی تا HB 620 (58 HRC) افزایش داد. این فولاد بصورت گسترده ای در صنایع مختلف از جمله ساخت اکسل ها، پیچ، شاتون های فورج شده، میل لنگ، میله های تحت کشش، چرخ دنده، میل راهنما و ... بکار برده می شود [101 و 102]. برخی از مشخصات فیزیکی و شیمیایی ماده قطعه کار در جدول 1-3 ارائه شده اند. تمامی نمونه ها پیش از عملیات سنگ زنی تحت عملیات حرارتی قرار گرفته، تمپر شده و سختی متوسط آنها به HRC 48 رسانده شده است.

جدول 1-3 ویژگی های پایه فولاد AISI 1045 [101 و 102].

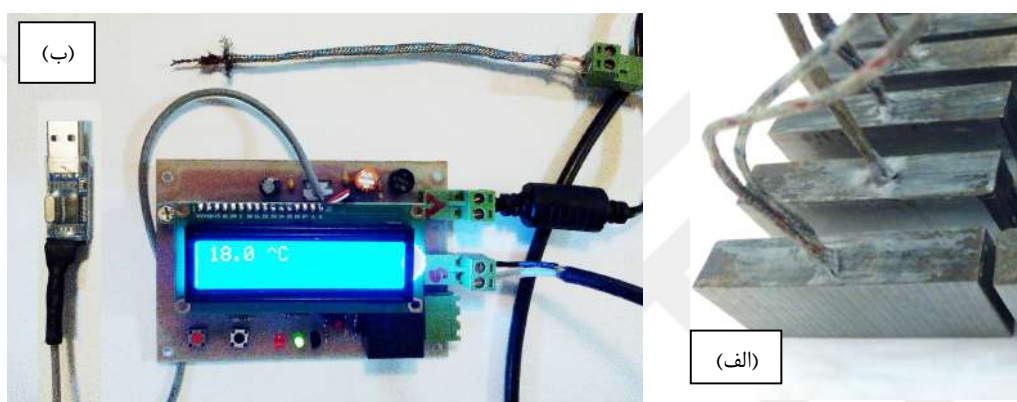
خواص مکانیکی	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	ازدیاد طول تا شکست (%)
	700 – 570	450 – 300	210 – 190	0/3 – 0/27	16
خواص فیزیکی	چگالی (kg/m^3)	هدایت حرارتی (W/m.K)	ظرفیت حرارتی ویژه (J/kg.K)	نفوذ حرارتی (m^2/s)	
	7850	50/7	486	$1/357 \times 10^5$	
ترکیب شیمیایی	نوع عنصر	Fe	C	Mn	Si
	درصد (%)	99 – 98/6	0/44 – 0/37	0/9 – 0/6	0/35 – 0/1

نیروهای افقی و عمودی در حین سنگ زنی توسط دینامومتری که در شکل 1-3 نمایش داده شده است اندازه گیری شده اند. این وسیله بر اساس بکارگیری لودسل های نوع L6D8 طراحی و ساخته شده است [103]. کالیبراسیون این وسیله بصورت خودکار از طریق دستورالعمل ارائه شده از سوی شرکت تامین کننده لودسل ها و استفاده از وزنه های استاندارد انجام گرفته است. این وسیله دارای گیره مخصوص جهت نگه داری قطعه کار بوده و بر روی میز دستگاه سنگ تخت قرار می گیرد. دقت اندازه گیری نیروها بر اساس نوع لودسل های بکارگرفته شده برابر 0/1 N می باشد.



شکل 1-3 دینامومتر اندازه گیری نیروهای سنگ زنی؛ الف) نمای ایزومتریک از مکانیزم طراحی شده و ب) قطعات مونتاژ شده پس از ساخت.

دمای قطعات در حین سنگ زنی توسط ترموکوپل های نوع J که در داخل قطعه کار جازنی شده اند، اندازه گیری می شوند.¹ برای این منظور، یک سوراخ ته بسته در بخش تحتانی نمونه تا فاصله 1 mm از سطح سنگ زنی به قطر 1/2 mm توسط سوپر دریل ایجاد شد. ترموکوپل نوع J از اتصال آهن - کنستانتان² تشکیل شده و دارای حساسیت بالاتری نسبت به ترموکوپل های نوع K تا حدود $50 \mu V/^{\circ}C$ می باشد [104]. کالیبراسیون ترموکوپل ها با استفاده از کوره ترموکوپل جعبه سیلیکونی³ که مجهز به پروب کنترل PtRh-Pt (S tape) است انجام گرفتند [105]. اندازه تقریبی اتصالات برابر با 1/1 mm بوده و بصورت تماس کامل با استفاده از چسب سیلیکونی دمای بالا در داخل سوراخ های ایجاد شده در قطعات جازنی شده اند. شکل 2-3 نمایش دهنده ترموکوپل های جازنی شده در قطعات و دیتالاگر⁴ مربوطه است. مقادیر اندازه گیری شده نیروهای سنگ زنی و دمای قطعه کار با نرخ ثبت اطلاعات 1 kHz توسط برنامه نوشته شده در Labview ثبت و ذخیره شد.



شکل 2-3 اندازه گیری دمای سنگ زنی؛ الف) ترموکوپل های جازنی شده در قطعات و ب) دیتالاگر.

بعلاوه، سیستم تحویل جریان حداقل سیال روانکار (MQL) شامل گیج فشار، شیرهای قطع و وصل، شیرهای کنترل جریان، مخزن، مخلوط کن و نازل است که بر اساس طرح SKF مطابق شماتیک نمایش داده شده در شکل 3-4 ساخته شده و مورد استفاده قرار گرفتند [106].

تست های سنگ زنی تحت شرایط روانکاری مختلف شامل؛ سنگ زنی خشک (dry)، جریان سیال (flood cooling)، MQL خالص (pure MQL)، MQL با نانوسیال گرافیت (Gr-MQL)، و MQL با نانوسیال اکسید مس (CuO-MQL) انجام گرفتند. در سنگ زنی با جریان سیال یا بعیارتی روش خنک کاری سنتی، سیال برش صنعتی VIYER-3000 با غلظت درصد حجمی 5 درصد (5 vol. %) با نرخ جریان 5 l/min مورد استفاده قرار گرفتند. در سنگ زنی با روش خنک کاری MQL، از نرخ جریان سیال 5 ml/min با جریان فشار هوای 4 و 6 bar استفاده شده است. متغیرهای سنگ زنی شامل عمق برش (a_p) و سرعت قطعه کار (v_w) هر کدام در سه سطح بوده

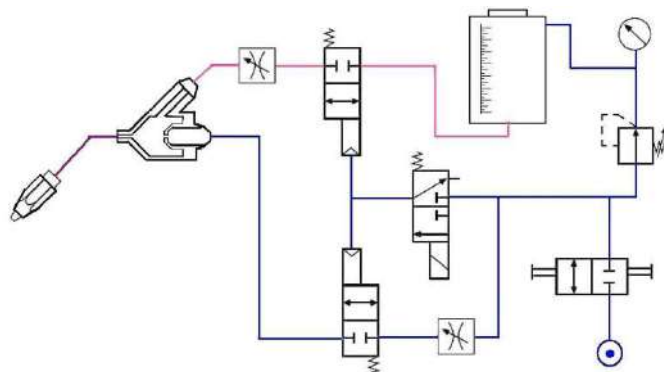
¹ ترموکوپل ها بصورت کسترده ای بعنوان سنسورهای دمایی استفاده می شوند. ترموکوپل وسیله الکتریکی متشکل از دو رسانای الکتریکی متفاوت است که یک اتصال الکتریکی را جهت اندازه گیری دماهای مختلف تشکیل می دهد. این وسیله ولتاژ وابسته به دمایی را در نتیجه اثر الکتریکی-گرمایی (thermoelectric effect) تولید می نماید که از این ولتاژ می توان جهت اندازه گیری دما استفاده کرد [104].

² Constantan (copper-nickel)

³ Silicon-box thermocouple calibration furnace

⁴ Datalogger

اند. عملیات سنگ زنی بصورت سنگ زنی مخالف تا عمقی که ترموکوپل ها جازنی شده اند ادامه می یابند. تست های تجربی تحت شرایط فول فاکتوریل انجام گرفتند. جزئیات تست های تجربی در جدول 2-3 ارائه شده اند.



شکل 3-3 شماتیکی از سیستم تامین جریان حداقل سیال روانکار بر اساس طرح SKF.

جدول 2-3 مشخصات تست های سنگ زنی

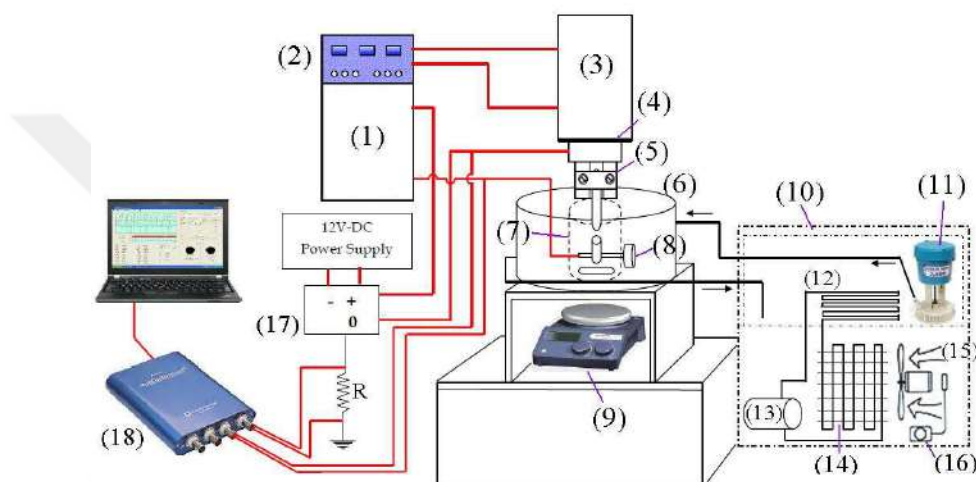
نوع چرخ سنگ	اکسید آلومینیم زینتر شده، WA46K5V
طول و عرض سطح سنگ زنی (mm)	60 × 10
روش های خنک کاری (نوع سیال)	- روش خشک - جریان سیال (5 vol. % VIYER-3000) - MQL خالص (سوسپانسیون آب خالص و روغن کانولا) - MQL نانوسیال (نانوسیال گرافیت و نانوسیال مس با غلظت های حجمی 0/15، 0/25 و 0/35 vol. %)
فشار هوا در سیستم MQL (bar)	4 و 6
سرعت چرخ سنگ، v_s (m/s)	30
سرعت قطعه کار، v_w (m/min)	5، 10 و 15
عمق برش، a_p (μm)	10، 25 و 40

زبری قطعات پس از پروسه سنگ زنی توسط زبری سنج پرتابل M2 Perthometer اندازه گیری شدند. برای این منظور، قبل از انجام زبری سنجی نمونه ها در داخل اتانول در حمام آلتراسونیک به مدت 30 دقیقه شستشو شدند. زبری سنجی در امتداد سه مسیر انجام گرفته و میانگین اندازه های معدل حسابی ارتفاعات سطحی¹ (R_a) به عنوان زبری سطح قطعات انتخاب شده اند. میکروسکوپ روبشی نشر میدانی Mira 3 – XMU و میکروسکوپ نوری وارون Olympus GX51 برای انجام مشاهدات میکروسکوپی سطوح سنگ زنی شده مورد استفاده قرار گرفتند. تغییرات سختی سطوح قطعات پس از پروسه سنگ زنی توسط دستگاه میکروسختی سنجی Olympus LM 700 اندازه گیری می شود.

¹ The arithmetic average surface roughness of asperities

3-3- سنتز و آماده سازی نانوسیالات گرافیت و اکسید مس

نانوسیالات گرافیت و اکسید مس با استفاده از روش تخلیه الکتریکی غوطه ور¹ (SEDP) تولید شدند. این روش یک پروسه از بالا-به-پایین² جهت فرسایش موادی است که هادی جریان الکتریکی هستند و تبدیل آنها به ذرات در ابعاد نانو می باشد [55]. این روش دارای مزایای سادگی سیستم، عدم نیاز به محفظه خلاء، درجه بالای خلوص³، و نرخ بالای تولید نانوذرات می باشد [108]. این پروسه قادر به تولید نانوذراتی با ثبات سوسپانسیون بالا، توزیع یکنواخت اندازه ذرات، و مورفولوژی کروی ذرات تولید شده می باشد. نانوذراتی با مورفولوژی کروی دارای خصوصیات ویژه تریبولوژی بوده و به عنوان افزودنی های مؤثر در مصارف روانکاری مطرح هستند [109]. این سیستم در شکل 3-4 نمایش داده شده و جزئیات آن به قرار زیر است:



شکل 3-3 شماتیکی از اجزاء سیستم SEDP مورد استفاده در سنتز نانوسیالات گرافیت و اکسید مس.

- سیستم تخلیه الکتریکی و کنترل سروو⁴ که برای تأمین توان تخلیه الکتریکی و کنترل فاصله گپ بکار گرفته می شود (1 و 2). برای این منظور از دستگاه تخلیه الکتریکی تهران-اکرام مدل TA-E.DM.204H استفاده شده است. حفظ فاصله گپ توسط کُلگی سروو⁵ (3) انجام می شود. یک قطعه استاندارد V-شکل (5) برای مهار و ایجاد اطمینان از عمود بودن الکترود بر روی این کُلگی سوار شده است و توسط یک صفحه عایق (4) نسبت به دیگر قسمت های سیستم ایزوله می شود.
- محفظه ای که جهت استقرار محفظه سیال دی الکتریک در آن و ایجاد شرایط چرخش سیال خنک کاری ضد انجماد حول این محفظه بکار گرفته می شود (6).
- محفظه سیال دی الکتریک برای نگهداری سیال پایه مورد استفاده به عنوان محیط تخلیه الکتریکی بین دو الکترود (7).

¹ Submerged electro discharge process

² Top-down process

³ Low-impurity introduction

⁴ Servo-control system

⁵ Servo head

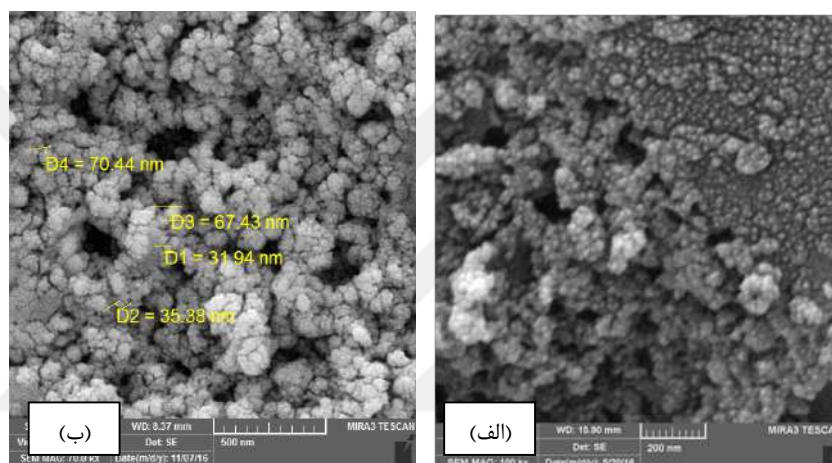
- یک میله مغناطیسی کوچک در کف محفظه سیال دی الکتریک (7) و یک هم زن مغناطیسی (9) در زیر محفظه چرخش سیال خنک کاری (6) جهت ایجاد جریان سیال دی الکتریک در حین تخلیه و شستشوی فاصله گپ جهت ایجاد شرایط تخلیه پایدار.
 - سیستم خنک کننده (10). این سیستم شامل بخش فوقانی که یک محفظه عایق بندی شده برای خنک کاری سیال ضدیخ با استفاده از سیستم کندانسور¹ (12) و فراهم سازی جریان چرخشی این سیال به و از محفظه (6) برای کنترل پیوسته دمای سیال دی الکتریک می باشد. بخش پایین این برج شامل مکانیزم اوپراتور² می باشد که از کمپرسور (13)، اوپراتور (14)، فن (15) و ترموست (16) تشکیل یافته است.
 - الکترودهای مورد استفاده در فرآیند تخلیه الکتریکی از جنس مس و گرافیت با هدف تولید نانو سیالات گرافیت و اکسید مس در داخل سیال دی الکتریک به عنوان سیال پایه بکار گرفته می شوند. این الکترودها در طول های 30 و 10 mm و به قطر 5 mm آماده سازی شده و در محل استقرار تعبیه شده بر روی قطعه استاندارد V- شکل و نیز در داخل قید مهار الکتروود درون محفظه (7) سوار می شوند.
- جزئیات پروسه تولید نانوسیالات گرافیت و اکسید مس در جدول 3-3 ارائه شده است. غلظت نانوذرات در سوسپانسیون از طریق در نظر گرفتن مدت زمان پروسه تخلیه الکتریکی و مقدار جابجایی رو به پایین کَلگی سروو در دستگاه تخلیه الکتریکی تنظیم می شود. همچنین الکترودها قبل و بعد از فرآیند تخلیه الکتریکی توسط ترازویی با دقت 0/0001 g وزن شدند تا از این طریق از میزان ذرات موجود در داخل نانوسیال تولیدی اطمینان حاصل شود. لازم است که الکترودهای گرافیتی قبل و بعد از فرآیند در داخل خشک کن قرار گیرند تا رطوبت جذب شده در آنها دفع و باعث ایجاد خطا در مرحله وزن نمودن نگردد. بعد از پروسه تخلیه الکتریکی، به میزان 20 درصد حجمی سوسپانسیون، روغن کانولا به عنوان منبع تری گلیسرید و اسیدهای چرب و 10 درصد حجمی تویین³ 20 (پلی سوربیت 20) به عنوان عامل شکل دهی سوسپانسیون روغن گیاهی به عنوان سیال پایه و عامل پایدار کننده نانوذرات گرافیت و اکسید مس در سوسپانسیون اضافه می گردد. سوسپانسیون های آماده شد جهت دستیابی به نانوسیالات پایدار به مدت 5 ساعت در داخل حمام آلتراسونیک قرار می گیرند. نتایج حاصل از تصاویر SEM از نانوذرات سنتز شده گرافیت و اکسید مس در شکل 3-4 نمایش داده شده است. همچنین نتایج توزیع اندازه خوشه های شکل یافته از چسبیدن نانوذرات به هم بر اساس اندازه گیری با استفاده از سیستم آنالیز اندازه ذرات⁴ در شکل 3-5 ارائه شده است. مطابق نتایج حاصله، 80٪ از خوشه های شکل یافته در داخل نانوسیالات گرافیت و اکسید مس بترتیب دارای اندازه های کمتر از 163 و 131 نانومتر هستند. همچنین از طیف سنجی پرتو ماوراء بنفش⁵ جهت تعیین میزان پایداری نانوسیالات سنتز شده استفاده شده است. نتایج حاصل از اندازه گیری های انجام گرفته در شکل 3-6 نمایش داده شده است. بر این اساس کاهش محسوسی در شدت جذب پرتو در بازه های زمانی

¹ Condensation system² Evaporator system³ Tween20⁴ Particle size analyzer⁵ UV-vis spectroscopy

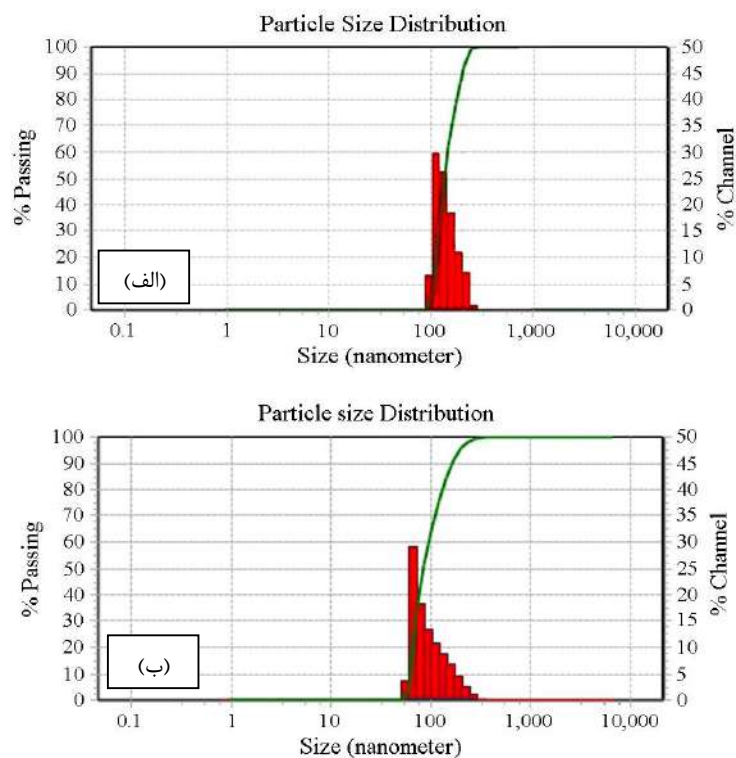
متفاوت مشاهده نمی شود که نمایش دهنده پایداری نانوسیالات سنتز شده در بازه های زمانی مورد مطالعه می باشد.

جدول 3-3 پارامترهای پروسه SEDP در سنتز نانوسیالات گرافیت و اکسید مس.

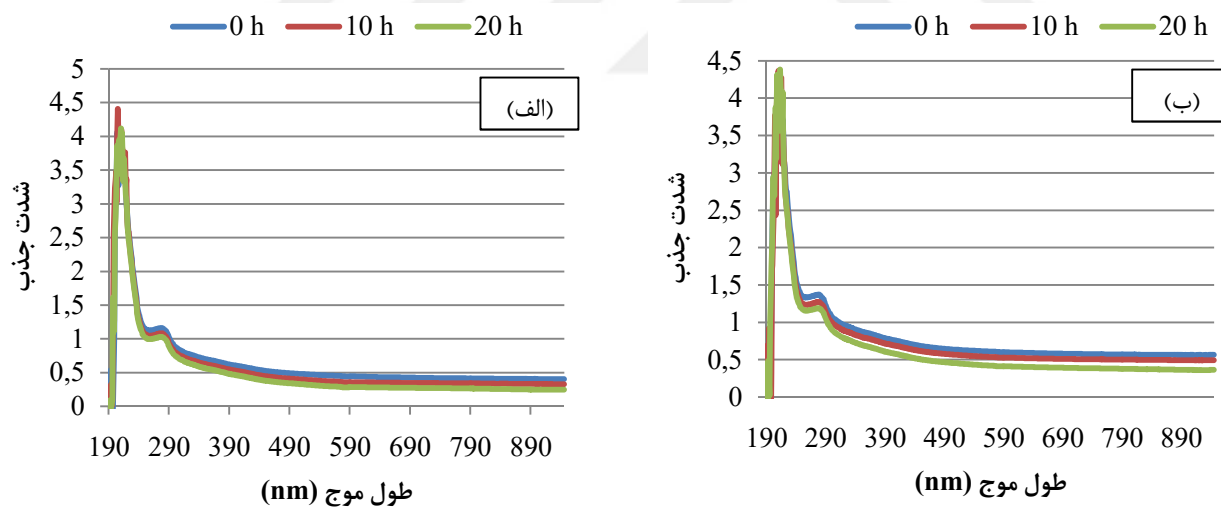
شدت جریان تخلیه الکتریکی (A)	10 ، در سنتز نانوسیال گرافیت 20 ، در سنتز نانوسیال اکسید مس
مدت زمان روشنی پالس (μ s)	2
نوع سیال پایه	آب مقطر به همراه 20 درصد حجمی روغن کانولا
درصد حجمی نانوذرات در نانوسیالات (vol. %)	0/15 ، 0/25 و 0/35

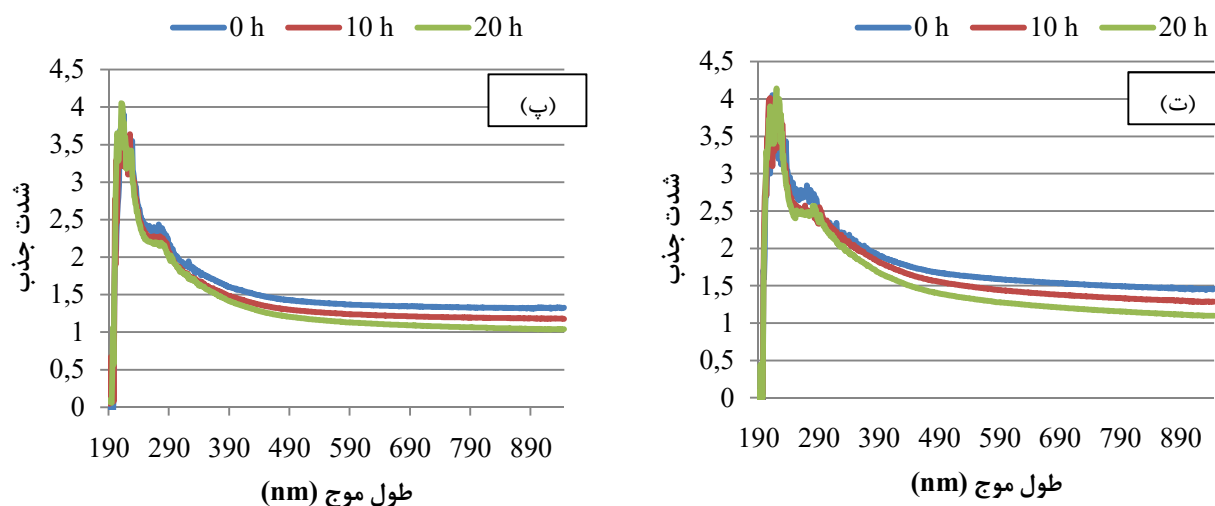


شکل 3-4 تصاویر SEM از نانوذرات سنتز شده؛ الف) نانوذرات گرافیت و ب) نانوذرات اکسید مس.



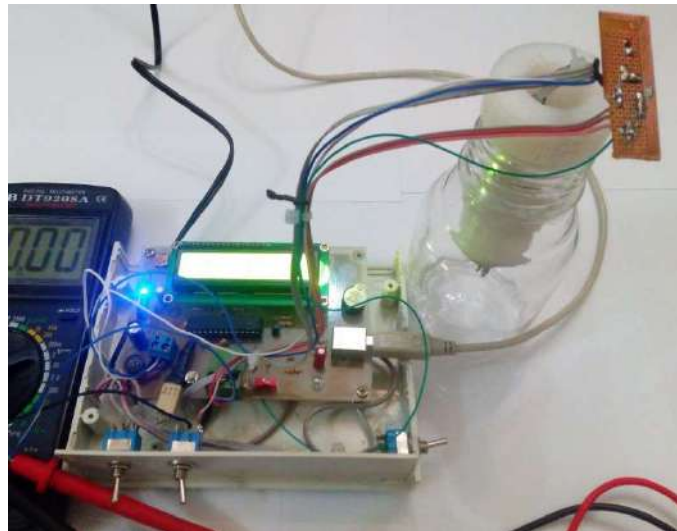
شکل 3-5 توزیع اندازه خوشه ها در نانوسیالات سنتز شده؛ الف) نانوسیال گرافیت و ب) نانوسیال اکسید مس.





شکل 3-6 نمودار طیف سنجی پرتو ماوراء بنفش در بازه های زمانی 10 ساعته جهت بررسی پایداری نانوسیالات سنتز شده؛ الف) نانوسیال گرافیت 0/25 vol% ، ب) نانوسیال گرافیت 0/35 vol% ، پ) نانوسیال اکسید مس 0/25 vol% ، ت) نانوسیال اکسید مس 0/35 vol% .

بعلاوه، اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات سنتز شده با استفاده از سیستم ساخته شده بر مبنای روش سیم داغ گذرا که در شکل 3-7 نمایش داده شده است، انجام می شود. در این سیستم از ترمیستور مدل NTCLE 100E 339JB0 به عنوان جایگزین سیم پلاتینی در مدار پل وتستون استفاده شده است. این واحد بعنوان هیتر و سنسور بطور همزمان از لحظه برقراری جریان عمل نموده و داده های پایه پل وتستون به واسطه یک پردازشگر توسط اتصال USB با نرخ انتقال داده ها برابر 100 Hz به کامپیوتر منتقل می گردد و از طریق برنامه نوشته شده در متلب، این داده ها تفسیر و منحنی خطی تغییرات دمای ترمیستور در برابر لگاریتم طبیعی زمان بدست می آید. از این منحنی و روابط حاکم برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی سیال استفاده می شود. جزئیات این سیستم و نحوه انجام محاسبات در ضمیمه (الف) ارائه شده است.



شکل 3-7 سیستم اندازه گیری هدایت حرارتی سیال بر مبنای روش سیم داغ گذرای اصلاح شده

بخش دوم

مبانی و روش‌های کار

فصل چهارم

مدلسازی توزیع حرارت در پروسه سنگ زنی به روش

تفاضل محدود

فصل چهارم

مدلسازی توزیع حرارت در پروسه سنگ زنی به روش تفاضل محدود

1-4- مقدمه

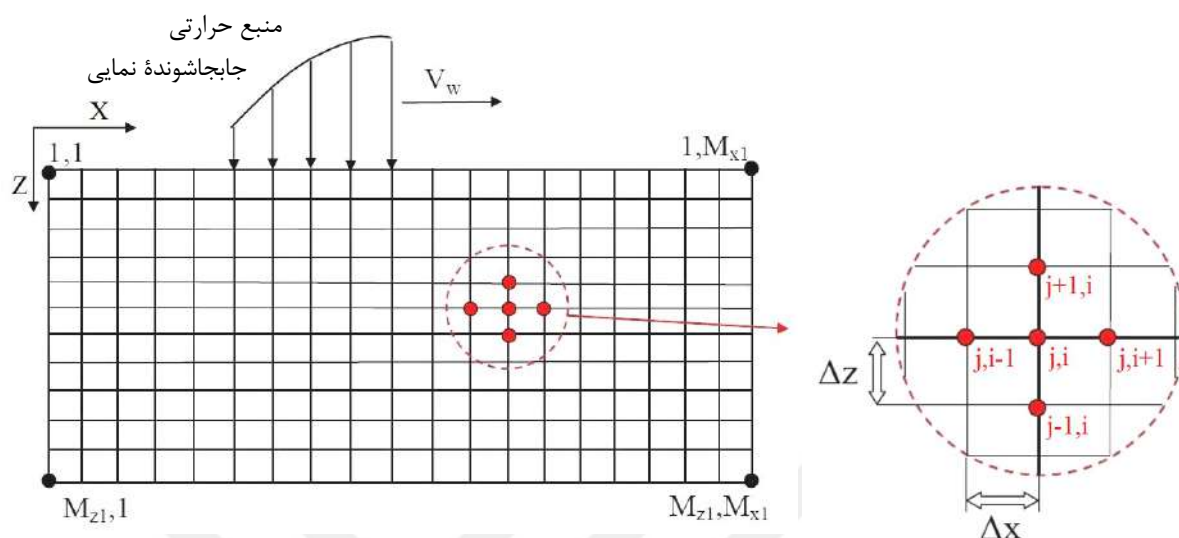
شرایط خنک کاری متفاوت در پروسه سنگ زنی سبب ایجاد افزایش دمای حداکثر متفاوتی در قطعه کار می گردد. این تفاوت ها ناشی از میزان انرژی حرارتی متفاوتی است که در حین سنگ زنی از ناحیه تماس چرخ سنگ با قطعه کار وارد قطعه کار می شود [110]. از این لحاظ بررسی میزان سهم انرژی قطعه کار در حین سنگ زنی توسط روش های متفاوت خنک کاری حائز اهمیت است. با در نظر گرفتن تحقیقات قبلی صورت گرفته که از نظریه منبع حرارتی جابجا شونده با توزیع یکنواخت از سوی مالکین و گیو آغاز می گردد [111]، روش تفاضل محدود¹ (FDM) به عنوان یک ابزار قدرتمند در شبیه سازی توزیع حرارت و سهم انرژی قطعه کار در پروسه سنگ زنی شناخته شده است. محاسبه سهم انرژی قطعه کار از حرارت تولید شده در حین پروسه سنگ زنی نه تنها تعیین کننده میزان انرژی ورودی به قطعه کار می باشد، بلکه بیان کننده تاثیر شرایط خنک کاری در پروسه سنگ زنی است.

2-4- شبیه سازی توزیع حرارت در قطعه کار در حین سنگ زنی

محدوده محاسباتی مدل FDM در شکل 1-4 نمایش داده شده است. این محدوده مطابق شکل به شبکه های کوچکی تقسیم شده و در محل طلاق شبکه های مجاور گره هایی به عنوان نقاط رفرنس اختصاص داده شده اند. ابعاد این شبکه ها در امتداد محورهای X و Z بترتیب برابر با Δx و Δz مشخص شده اند. معادله حاکم در این ناحیه محاسباتی، معادله دو بعدی انتقال حرارت بدون عبارت تولید حرارت در آن می باشد (معادله 1-4). در این معادله چنین فرض می شود که هدایت حرارتی در جهات X و Z همگن می باشند. همچنین فرض می شود که منبع حرارتی در حین سنگ زنی با توزیع نمایی در محل تماس چرخ سنگ با قطعه کار با سرعتی برابر با سرعت قطعه کار در امتداد لبه فوقانی ناحیه محاسباتی در حرکت است. مبنای این فرضیه آن است که عمق حقیقی برش در ناحیه تماس از لبه دنباله رو² تا لبه پیش رو³ بخاطر درگیری تدریجی دانه های چرخ سنگ با مواد قطعه کار در سنگ زنی رو-به-بالا افزایش می یابد. نحوه تخمین رابطه 1-4 به روش صریح با استفاده از قائده اولر-پیش رو⁴ در بخش ضمیمه (ب) ارائه شده است. تعداد تقسیمات در امتداد جهات X و Z بر اساس معیار ثبات آنالیز بر پایه I_x و I_z که در رابطه 2-4 ارائه شده اند کمتر از 0/5 و نیز در نظر گرفتن هم گرایی خروجی آنالیز تفاضل محدود انتخاب گردید. بر

¹ Finite difference method² Trailing edge³ Leading edge⁴ Forward-Euler

این اساس چگالی مش¹ در امتداد جهات X و Z به ترتیب برابر با 280 و 200 بعنوان ورودی برنامه متلب وارد شد. تقسیمات زمان نیز بر اساس رعایت معیارهای بیان شده برابر با 10000 بعنوان ورودی برنامه متلب اعمال گردید.



شکل 1-4 تقسیم بندی ناحیه محاسباتی در مدل FDM با استفاده از شبکه های کامل².

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right) + k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

(1)

که در آن k , p و c_p به ترتیب ضرایب هدایت حرارتی، چگالی و ظرفیت ویژه حرارتی قطعه کار هستند که تابعی از جنس آن می باشند.

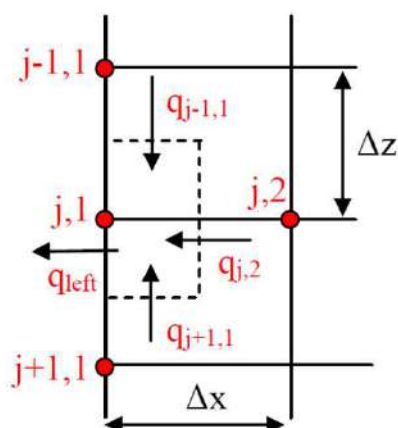
$$r_x = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \text{ و } r_z = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta z^2} \quad (2-4)$$

شرایط مرزی در مدل FDM شامل انتقال حرارت همرفت آزاد در لبه های ناحیه محاسباتی بجز لبه فوقانی می باشد. در لبه فوقانی شرایط انتقال حرارت همرفت اجباری و منبع حرارتی جابجاشونده حاکم هستند. بعنوان نمونه، شرایط مرزی در لبه سمت چپ از ناحیه محاسباتی در شکل 2-4 نمایش داده شده است. پایداری انرژی³ در شبکه نمایش داده شده در این شکل بر اساس رابطه ریاضی ارائه شده در معادله 3-4 می باشد. همچنین دمای دیگر نقاط در امتداد لبه های تحتانی و سمت راست ناحیه محاسباتی به شیوه مشابهی بدست آمده و در بخش ضمیمه (ب) ارائه شده اند.

¹ Mesh density

² Full grids

³ Energy conservation



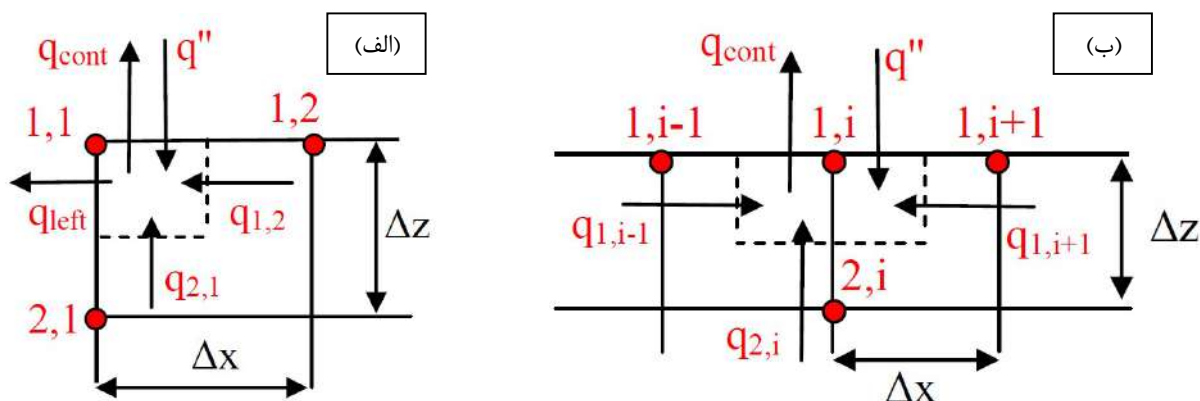
شکل 2-4 پایداری انرژی برای یک شبکه نمونه در امتداد لبه سمت چپ از ناحیه محاسباتی.

$$q_{j-1,1} + q_{j,2} + q_{j+1,1} - q_{left} = \rho c_p V_0 \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3-4)$$

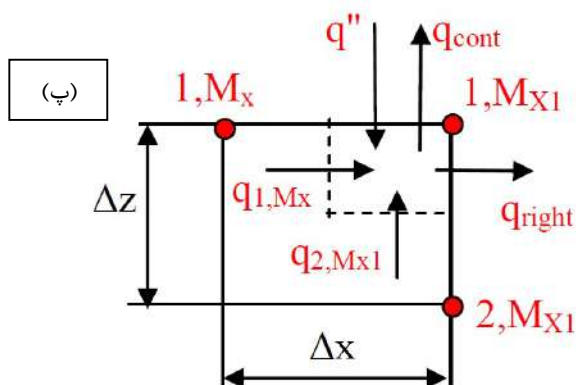
که در آن $q_{j+1,1}$ و $q_{j,2}$ ، $q_{j-1,1}$ نمایش دهنده فلاکس حرارتی منتقل شونده به داخل شبکه ناشی از هدایت حرارتی و q_{left} فلاکس حرارتی منتقل شونده به خارج از شبکه بدلیل همرفت حرارتی می باشد. $V_0 = (\Delta x * \Delta z * 1)/2$ برابر با حجم نیم شبکه¹ در امتداد لبه سمت چپ از ناحیه محاسباتی است که در شکل 2-4 نمایش داده شده است. نحوه تخمین رابطه 2-4 بصورت صریح با استفاده از روش اولر-پیش رو مطابق رابطه 4-4 است.

$$k \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{T^n(j-1,1) - T^n(j,1)}{\Delta z} \right) + k \Delta z \left(\frac{T^n(j,2) - T^n(j,1)}{\Delta x} \right) + k \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{T^n(j+1,1) - T^n(j,1)}{\Delta z} \right) - h_{left} \Delta z (T^n(j,1) - T_a) = \rho c_p \frac{\Delta x \Delta z}{2} \left(\frac{T^{n+1}(j,1) - T^n(j,1)}{\Delta t} \right) \quad (4-4)$$

که در آن n تعداد تکرارها در حین پروسه محاسباتی و T_a دمای محیط پیرامون می باشد.



¹ Half grid



شکل 3-4 پایداری انرژی در امتداد لبه فوقانی از ناحیه محاسباتی؛ الف) گوشه سمت چپ از لبه فوقانی، ب) گره های میانی از لبه فوقانی، پ) گوشه سمت راست از لبه فوقانی.

بعلاوه، با استفاده از روش پایداری انرژی شبکه های واقع در امتداد لبه فوقانی ناحیه محاسباتی که در شکل 3-4 نمایش داده شده اند، دما در گره های $(1,1)$ ، $(1,i)$ و $(1,Mx1)$ بدست می آیند. نمادهای $(1,1)$ و $(1,Mx1)$ بترتیب نمایش دهنده گره های اول و آخر در امتداد لبه فوقانی از ناحیه محاسباتی می باشند. نماد $(1,i)$ نمایش دهنده گره های میانی در امتداد لبه فوقانی ناحیه محاسباتی هستند. رابطه 4-5 بیان ریاضی پایداری انرژی در شبکه های میانی از لبه فوقانی هستند که توسط قاعده اول-پیش رو مطابق رابطه 4-6 تخمین زده می شوند. دمای گره ها در لبه فوقانی و در دو انتها بصورت مشابه محاسبه گردیده و بخش ضمیمه ارائه شده اند.

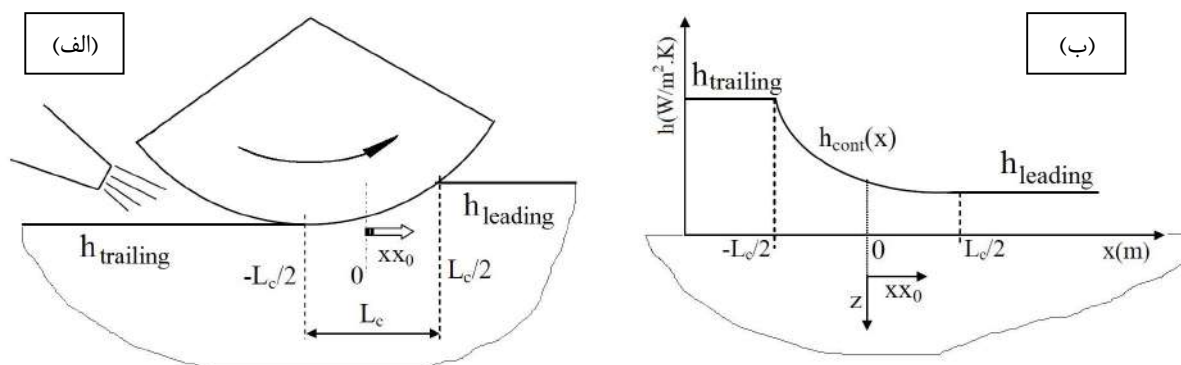
$$q_{1,i+1} + q_{2,i} + q_{1,i-1} + q''A - q_{cont} = \rho c_p v_0 \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5-4)$$

که در آن $q_{1,i-1}$ و $q_{2,i}$ نمایش دهنده فلاکس حرارتی منتقل شونده به داخل شبکه ناشی از هدایت حرارتی، q_{cont} فلاکس حرارتی خارج شونده از شبکه بدلیل همرفت حرارتی و q'' فلاکس حرارتی وارد شونده به داخل شبکه بخاطر منبع حرارتی جابجا شونده در لبه فوقانی ناحیه محاسباتی می باشد.

$$k \frac{\Delta z}{2} \left(\frac{T^n(1,i+1) - T^n(1,i)}{\Delta x} \right) + k \Delta x \left(\frac{T^n(2,i) - T^n(1,i)}{\Delta z} \right) + k \frac{\Delta z}{2} \left(\frac{T^n(1,i-1) - T^n(1,i)}{\Delta x} \right) + q'' \cdot \Delta x - h_{cont} \Delta x (T(1,i) - T_a) = \rho c_p \frac{\Delta x \Delta z}{2} \left(\frac{T^{n+1}(1,i) - T^n(1,i)}{\Delta t} \right) \quad (6-4)$$

که در آن h_{cont} ضریب همرفت حرارتی در ناحیه تماس سنگ زنی است. با توجه به اینکه ضخامت واقعی برش در سنگ زنی رو به بالا در طول ناحیه تماس (L_c) از لبه دنباله رو تا لبه پیش رو افزایش می یابد، عملکرد خنک کاری غیریکنواخت¹ در ناحیه تماس حاکم است. بنابراین، چنانچه در شکل 4-4 نمایش داده شده است، فرض تابع نمایی برای h_{cont} جهت مطابقت با توزیع حرارت غیر یکنواخت در وجه مشترک چرخ سنگ-قطعه کار در نظر گرفته شده است.

¹ Nonuniform cooling action



شکل 4-4 شماتیکی از عملکرد خنک‌کاری در ناحیه سنگ زنی؛ الف) درگیری چرخ سنگ با قطعه کار، ب) توزیع نمایی ضریب همرفت حرارتی در ناحیه تماس.

فرض توزیع نمایی h_{cont} بصورت ریاضی مطابق رابطه 4-7 می باشد.

$$h_{cont}(x) = (h_{trailing} - h_{leading}) \cdot \exp(-1.5e3(x x_0 + L_c/2)) + h_{leading} \quad (7-4)$$

که در آن $h_{trailing}$ ضریب همرفت حرارتی در لبه پس رو، $h_{leading}$ ضریب همرفت حرارتی در لبه پیش رو، $x x_0$ مرکز سیستم مختصات محلی در مرکز ناحیه تماس که با سرعتی برابر با سرعت قطعه کار جابجا می شود، و L_c طول ناحیه تماس که از طریق رابطه $L_c = (D_s \times L_c)^{1/2}$ محاسبه می شود. D_s قطر چرخ سنگ زنی و a_p عمق برش می باشد.

انرژی کل تولید شده در طی سنگ زنی که توسط q_{total} نمایش داده می شود، تابعی از نیروی برش (F_t)، سرعت برش (V_s)، پهنا (b_w) و طول (L_c) ناحیه درگیری چرخ سنگ با قطعه کار می باشد. معادله 4-8 بیان کننده انرژی سنگ زنی بصورت رابطه ریاضی می باشد. در حین سنگ زنی تنها بخشی از این حرارت وارد قطعه کار می شود که سهم حرارتی قطعه کار (ε_w) خوانده می شود و تابع شرایط خنک کاری استفاده شده در حین سنگ زنی است. سهم حرارتی قطعه کار از طریق تطابق دمای حداکثر بدست آمده در حین تست های تجربی و دمای حداکثر محاسبه شده از طریق شبیه سازی تفاضل محدود برای شرایط خنک کاری متفاوت تحت پارامترهای سنگ زنی مختلف بدست می آید.

$$q_{total} = F_t V_s / b_w L_c \quad (8-4)$$

موارد زیر در برگیرنده فرضیات صورت گرفته در مدل FDM جهت شبیه سازی توزیع حرارت در قطعه کار در حین پروسه سنگ زنی می باشد:

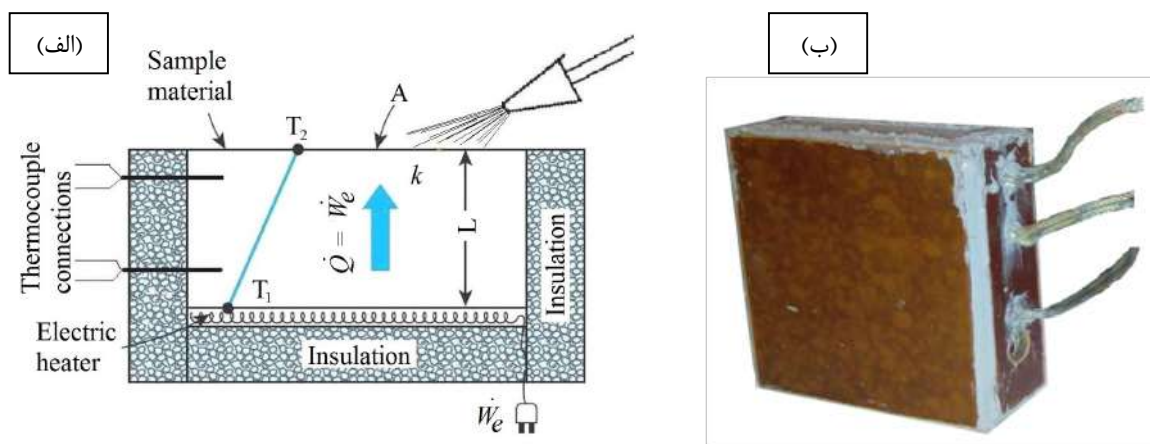
- تولید حرارت در پروسه سنگ زنی از طریق منبع حرارتی جابجا شونده در لبه فوقانی ناحیه محاسباتی شبیه سازی می شود [3].
- انتقال حرارت همرفت آزاد در لبه های جانبی از ناحیه محاسباتی، بغیر از لبه فوقانی، حاکم است.

- ضریب انتقال حرارت همرفت در لبه های جانبی از ناحیه محاسباتی برابر با ضریب انتقال حرارت همرفت محیط پیرامون در دمای اطاق در نظر گرفته می شود.
 - ضریب انتقال حرارت همرفت در لبه فوقانی از ناحیه محاسباتی مستقل از سرعت چرخ سنگ می باشد.
 - تابع نمایی برای h_{cont} جهت مطابقت با توزیع حرارت غیر یکنواخت در وجه تماس چرخ سنگ-قطعه کار در نظر گرفته می شود.
 - براساس بکارگیری سیستم خنک کاری در پروسه سنگ زنی، در وجه پس رو از لبه فوقانی ناحیه محاسباتی انتقال حرارت همرفت اجباری حاکم است [4]. مقدار این ضریب برای شرایط خنک کاری مختلف براساس نتایج مدل نیمه تجربی که در قسمت بعد توضیح داده خواهد شد، بدست می آید.
 - در شرایط سنگ زنی خشک، $h_{leading}$ و $h_{trailing}$ برابر با $100 \text{ W/m}^2\text{K}$ می باشد [3].
 - در بکارگیری سیستم های خنک کاری در پروسه سنگ زنی، ضریب انتقال حرارت همرفت در لبه پیش رو برابر با $10^3 \text{ W/m}^2\text{K}$ می باشد [3].
 - ضریب هدایت حرارتی ناحیه محاسباتی برابر با ضریب هدایت حرارتی قطعه کار در دمای محیط بصورت ثابت در نظر گرفته می شود.
- صحت مدل FDM از طریق تخمین عمقی از لبه فوقانی ناحیه محاسباتی که در آن افزایش دما سبب تغییر سختی نمونه می گردد و مقایسه آن با نتایج اندازه گیری میکروسختی در امتداد عمقی مقطع سنگ زنی صورت می گیرد. همچنین، نتایج توزیع دما در امتداد عمقی قطعه کار حاصل از مدل FDM با نتایج تجربی افزایش دما در حین پروسه سنگ زنی در پاس های سنگ زنی متوالی مقایسه شده و قابلیت مدل ارائه شده در پیش بینی توزیع حرارت از طریق مقیاس R-square سنجیده می شود.

3-4 مدل نیمه تجربی اندازه گیری ضریب انتقال حرارت همرفت سیستم خنک کاری

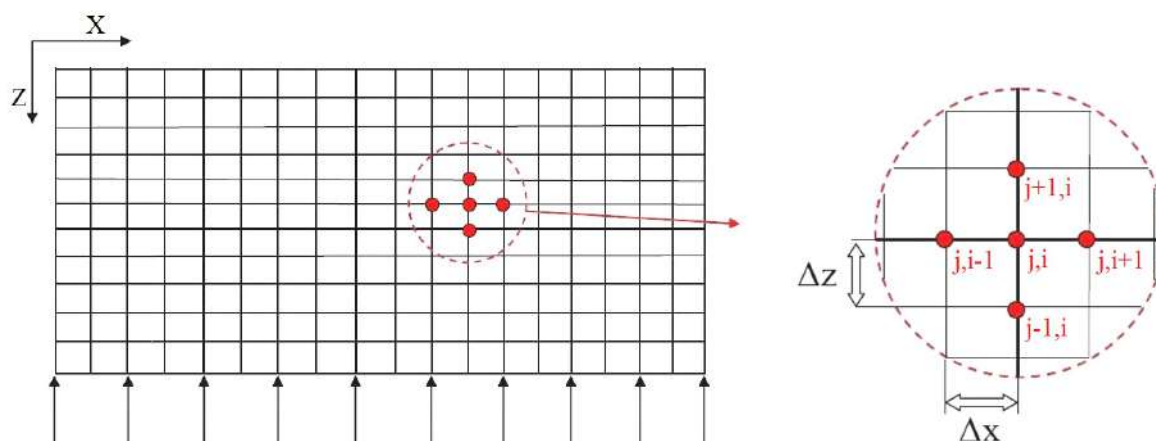
جهت تعیین ضریب انتقال حرارت همرفت¹ (CHTC) سیستم خنک کاری مورد استفاده در پروسه سنگ زنی، یک مدل نیمه تجربی از شرایط خنک کاری حاکم بر روی قطعه کار توسعه یافته است [5]. جهت بکارگیری نتایج حاصل از محاسبات صورت گرفته برای تعیین مقادیر CHTC در مدل تفاضل محدود جهت شبیه سازی توزیع حرارت در قطعه کار در حین پروسه سنگ زنی، چنین فرض می شود که ضریب انتقال حرارت همرفت سیستم خنک کاری مورد استفاده مستقل از سرعت چرخ سنگ می باشد. اساس این روش در شکل 4-5 نمایش داده شده است. مطابق این شکل، قطعه ای از جنس فولاد AISI 1045 از تمام جهات بجز سطح فوقانی عایق می شود. یک هیتر الکتریکی با توان خروجی $70 \text{ W/m}^2\text{K}$ در قسمت تحتانی این قطعه جاسازی می شود. بدلیل آنکه تمام سطوح جانبی بصورت کامل عایق بندی شده است، حرارت تولید شده توسط هیتر از سطح فوقانی نمونه دفع می شود.

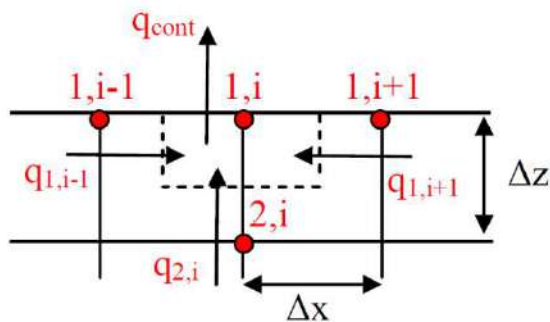
¹ Convection heat transfer coefficient



شکل 4-6 ستاپ تجربی برای تعیین ضریب انتقال حرارت همرفت سیستم خنک کاری؛ (الف) شماتیکی از فیزیک مسئله [5]، (ب) نمونه عایق شده از وجوه جانبی و ترموکوپل های جازنی شده.

با برقراری جریان الکتریکی هیتر، دمای قطعه کار بصورت مرتب افزایش می یابد تا به یک حالت پایدار برسد. در لحظه برقراری وضعیت پایداری دما، سیستم خنک کاری موردنظر به سطح فوقانی نمونه اعمال می شود. تغییرات دمایی برحسب زمان توسط ترموکوپل نوع J که در فاصله مشخصی از سطح فوقانی نمونه نصب شده است اندازه گیری شده و ذخیره می شود. این شرایط یک مسئله انتقال حرارت دو بعدی است که با در دست داشتن مشخصات فیزیکی جنس نمونه می توان توسط روش تفاضل محدود و برنامه نویسی در متلب حل نمود. معادله حاکم پایداری انرژی در لبه فوقانی ناحیه شبیه سازی که در شکل 4-7 نمایش داده شده است بصورت رابطه 4-9 به بیان ریاضی مطرح می شود. مقادیر محاسبه شده از ضریب انتقال همرفت حاکم در سطح فوقانی نمونه بعنوان $h_{trailing}$ در مدل FDM برای شبیه سازی توزیع حرارت در قطعه کار در حین پروسه سنگ زنی بکار برده می شود. جهت بررسی صحت نتایج حاصله از برنامه متلب نوشته شده بر اساس مدل تفاضل محدود، از مقایسه نتایج توزیع حرارت حاصل از مدل عددی و دمای ثبت شده توسط ترموکوپل ها در قطعه عایق شده در شرایطی که ضریب همرفت آزاد محیط پیرامون بدون اعمال سیستم خنک کاری بر روی سطح فوقانی نمونه حاکم است استفاده گردید. بر این اساس، میزان اختلاف در توزیع دمای حاصل از نتایج تجربی و عددی کمتر از 1/4 درصد است.





شکل 4-7 بیان گرافیکی مدل انتقال حرارت جهت محاسبه CHTC سیستم خنک کاری در پروسه سنگ زنی؛ الف) تقسیم بندی تفاضل محدود ناحیه شبیه سازی بصورت شبکه کامل، ب) پایداری انرژی حرارتی در امتداد لبه فوقانی از ناحیه محاسباتی.

$$q_{1,i+1} + q_{2,i} + q_{1,i-1} - q_{\text{cont}} = \rho c_p v_0 \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

9

بخش سوم

نتایج و بحث

فصل پنجم

نتایج و بحث

فصل پنجم

نتایج و بحث

5-1- مقدمه

شیوه سنتز نانوسیالات گرافیت و اکسید مس با استفاده از روش تخلیه الکتریکی غوطه ور (SEDP) جهت استفاده در سیستم روانکاری حداقل جریان سیال (MQL) در پروسه سنگ زنی تخت در فصل سوم ارائه شد. هدف از بکارگیری نانوسیالات سنتز شده، ارتقاء خواص تریبولوژی و خنک کاری سیال مورد استفاده در پروسه سنگ زنی MQL می باشد. تجهیزات مورد استفاده در پروسه سنگ زنی، پارامترهای ورودی و متغیرهای خروجی مورد مطالعه در این پروسه در فصل سوم شرح داده شد. نحوه شبیه سازی توزیع حرارت در قطعه کار به روش تفاضل محدود (FDM) و مدل ارائه شده جهت تعیین ضرایب انتقال حرارت همرفت سیستم خنک کاری مورد استفاده در پروسه سنگ زنی و کسر حرارتی قطعه کار از انرژی حرارتی تولید شده در حین سنگ زنی به تفصیل در فصل چهارم ارائه شدند. این فصل به نتایج تجربی و عددی حاصل از مطالعات صورت گرفته و بحث و بررسی این نتایج اختصاص دارد. خواص تریبولوژی و خنک کاری نانوسیال گرافیت، نانوسیال اکسید مس، و مقایسه خواص این نانوسیالات در پروسه سنگ زنی MQL بترتیب ارائه شده و مورد بحث قرار گرفته اند.

5-2- نتایج تجربی نیروی برش و دمای سنگ زنی

نتایج تجربی نیروی برش (F_t) و دمای سطح سنگ زنی قطعات (T_{max}) برای شرایط خنک کاری مختلف و به ازای پارامترهای مختلف سنگ زنی در جداول 5-1 تا 5-3 ارائه شده اند. نیروهای برشی و یا مماسی سنگ زنی، متوسط مقادیر اندازه گیری شده در پاس های متوالی تا عمقی که ترموکوپل ها جازنی شده اند می باشد. این مقادیر به عنوان پارامترهای ورودی مدل FDM جهت محاسبه سهم انرژی قطعه کار و شبیه سازی توزیع حرارت در قطعه کار تحت شرایط سنگ زنی و خنک کاری مختلف می باشند. در بخش های بعد به بحث های پیرامون این یافته های تجربی پرداخته شده است.

جدول 5-1 نتایج تجربی نیروی مماسی (F_t) و دمای سطح سنگ زنی (T_{max}) در شرایط خشک و جریان سیال..

15		10		5		سرعت قطعه کار (m/min)	
T_{max} (°C)	F_t (N)	T_{max} (°C)	F_t (N)	T_{max} (°C)	F_t (N)	عمق بار a_p (μm)	شرایط خنک کاری
127/4	27/7	113/8	19/8	93/8	12/5	10	Dry
300/2	44/4	210/6	34	174/6	26/9	25	
373/2	53/8	326/6	50/6	266/6	40/3	40	
54/6	19/2	53	15/3	46/6	9/3	10	Flood cooling
93/8	52/8	77/8	41/6	66/6	30/5	25	
124/2	82/7	99/4	67/2	69/8	40/0	40	

جدول 5-2 نتایج تجربی نیروی مماسی (F_t) و دمای سطح سنگ زنی (T_{max}) در شرایط خنک کاری MQL با فشار 4 bar.

15		10		5		سرعت قطعه کار (m/min)	
T_{max} (°C)	F_t (N)	T_{max} (°C)	F_t (N)	T_{max} (°C)	F_t (N)	عمق بار a_p (μm)	شرایط خنک کاری
87/4	14/5	80/4	14/2	73	11/2	10	MQL-Gr-0.15 vol. %
158/6	47/8	124/4	32	84	26/3	25	
210/6	69/2	167/4	55/8	117/8	41/7	40	
75/4	14/8	73/2	13/1	70/6	10/9	10	MQL-Gr-0.25 vol. %
131/4	42/5	110/4	36/7	85/4	24/4	25	
160/2	66/9	143/4	52/6	124/2	37/7	40	
64/2	17/3	67/4	13/7	65	10/2	10	MQL-Gr-0.35 vol. %
129	48/5	108/6	38/0	96/38	28/3	25	
149	69/8	140/5	55/8	126/2	36/3	40	
58/6	14/4	54/4	12/0	50/6	5/5	10	MQL-CuO-0.15 vol. %
137	48/4	105	36/2	63/4	22/8	25	
203/4	66/7	151/6	60/0	89/8	38/1	40	
57/8	16/5	55/4	15/1	45/8	5/9	10	MQL-CuO-0.25 vol. %
114/2	50/5	85	39/0	53/8	24/9	25	
155/4	80/3	117/4	67/0	93/8	49/1	40	
65/8	20/7	60/2	18/6	52/2	11/3	10	MQL-CuO-0.35 vol. %
122/6	63/5	94/4	44/1	81	28/5	25	
137/8	89/4	131/9	68/8	121	52/0	40	
77	23/9	71/4	18/2	52/2	10/3	10	Pure-MQL
195/4	57/2	123/4	42/2	84/2	29/5	25	
223/4	80/1	179/8	64/7	122/6	42/9	40	

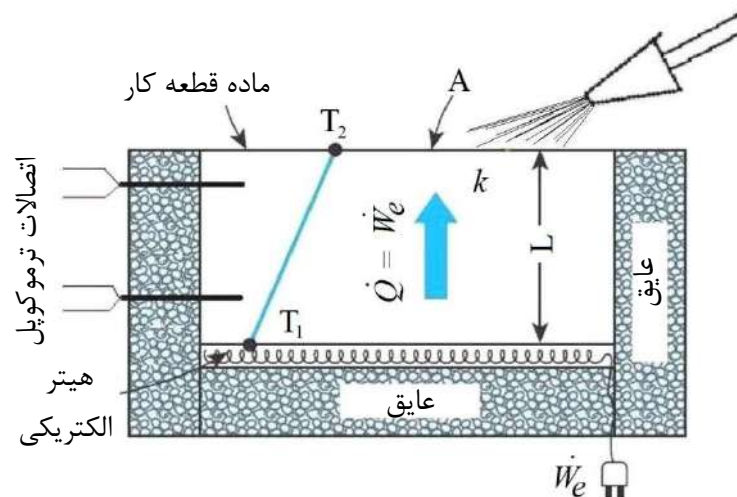
جدول 3-5 نتایج تجربی نیروی دمای (F_t) و دمای سطح سنگ زنی (T_{max}) در شرایط خنک کاری MQL با فشار 6 bar.

15		10		5		سرعت قطعه کار (m/min)	
T_{max} (°C)	F_t (N)	T_{max} (°C)	F_t (N)	T_{max} (°C)	F_t (N)	عمق بار a_p (μm)	شرایط خنک کاری
79/4	13/3	73/1	12/7	64/2	10/5	10	MQL-Gr-0.15 vol. %
151	45/5	112/5	33/7	79/4	25/0	25	
192/2	68/7	154/3	54/7	109/9	39/1	40	
70/4	13	66/4	12/6	61/4	11	10	MQL-Gr-0.25 vol. %
125/6	40/1	100/8	31/3	78	23/6	25	
152/6	62/8	136/3	49/9	117	35/9	40	
59/4	16/5	62/8	14/7	61	9/8	10	MQL-Gr-0.35 vol. %
118/6	46/1	97	33/4	84	26/7	25	
135/4	66/6	129/5	52/2	118/4	34/8	40	
57	17/4	61	16/6	61	11/3	10	MQL-CuO-0.15 vol. %
127/6	55/3	93/2	34/9	74/6	23/6	25	
138/6	54/9	123/3	53/1	100	46/8	40	
54/8	24/2	55/9	18/8	55/4	9/1	10	MQL-CuO-0.25 vol. %
112/2	62/4	88/5	40/9	68/2	28/1	25	
130	71/9	120/9	63/0	110/2	49/6	40	
58/6	25/0	56/2	16/4	48/2	8/5	10	MQL-CuO-0.35 vol. %
110/8	49/6	87/4	39/9	74/6	26/6	25	
126	75/4	117/8	61/4	104/2	47/2	40	
72	24/1	67/2	20/6	51/4	9/8	10	Pure-MQL
177/8	67/8	117/3	39/4	78/6	29/4	25	
209/8	68/7	167/4	58/9	114	39/3	40	

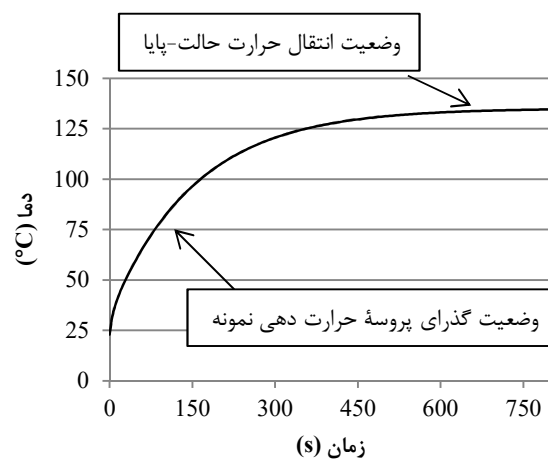
3-5- ضریب انتقال حرارت همرفت سیستم خنک کاری

تخمین مقادیر ضریب انتقال حرارت همرفت سیستم خنک کاری¹ (CHTC) از اهمیت بسیار بالایی در فهم ماهیت پروسه خنک کاری و روانکاری در فرآیند سنگ زنی برخوردار است. مدل ارائه شده جهت تعیین مقادیر CHTC که در بخش 3-4 توضیح داده شد مجدداً بصورت شماتیک در شکل 1-5 نمایش داده شده است. شکل های 2-5 تا 5-4 نمایش دهنده تغییرات دمای نمونه، که توسط ترموکوپل جازنی شده در عمق 39 mm از سطح فوقانی این مدل اندازه گیری شده است، در برابر زمان می باشد.

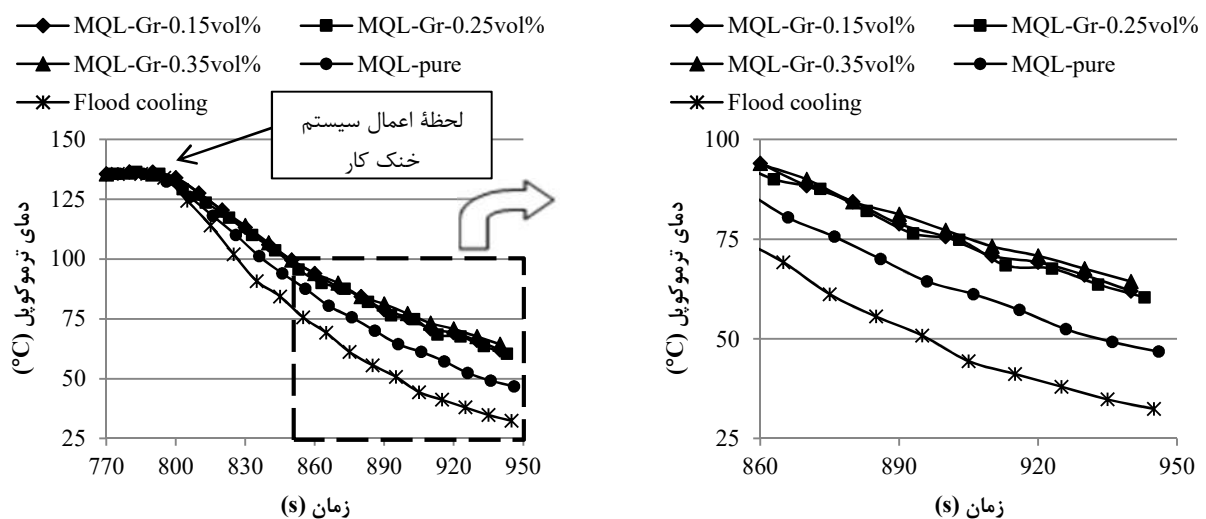
¹ Convection heat transfer coefficient



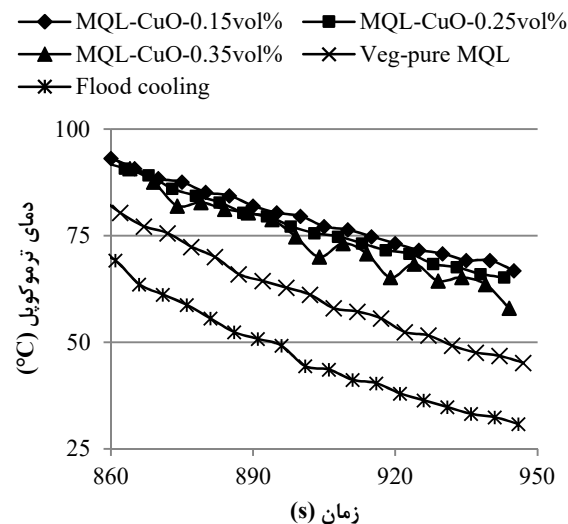
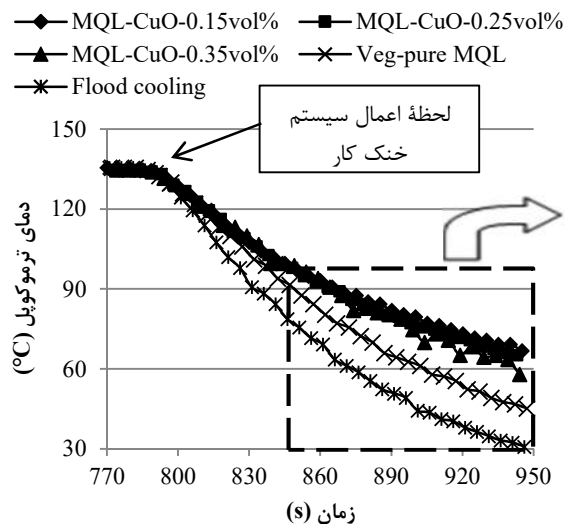
شکل 5-1 شماتیکی از شرایط تجربی برای تعیین ضریب انتقال حرارت همرفت سیستم خنک کاری.



شکل 5-2 تغییرات دمای ترموکوپل در زمان برای وضعیت انتقال حرارت همرفت آزاد در سطح فوقانی نمونه.

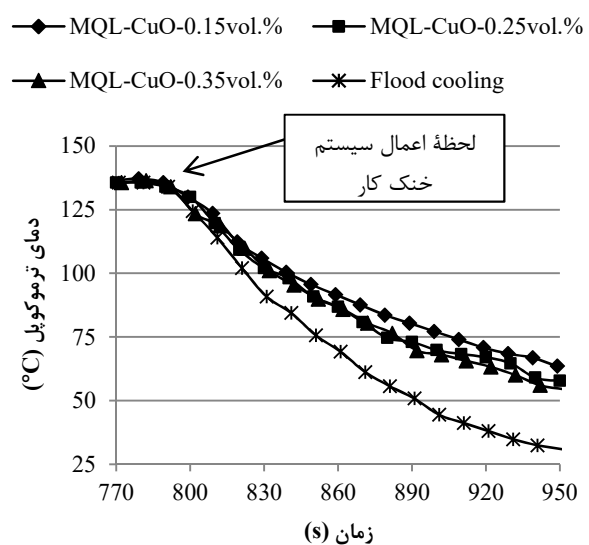
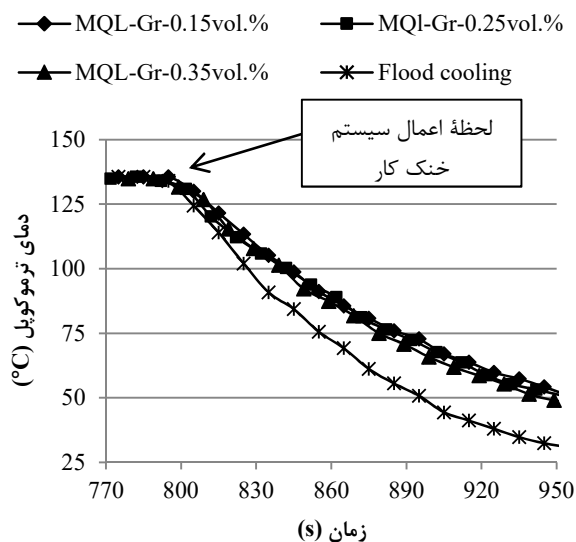


شکل 5-3 تغییرات دمای ثبت شده توسط ترموکوپل در برابر زمان در شرایط خنک کاری جریان سیال و سیستم MQL خالص و MQL با نانوسیال گرافیت با فشار جریان 4 bar.



شکل 4-5 تغییرات دمای ثبت شده توسط ترموکوپل در برابر زمان در شرایط خنک کاری جریان سیال و سیستم MQL خالص و MQL با نانوسیال اکسید مس با فشار جریان 4 bar.

چنانچه در بخش 3-4 توضیح داده شد، نمونه عایق شده بدون اعمال سیستم خنک کاری تا رسیدن قطعه کار به شرایط ثبات دمایی و وضعیت انتقال حرارت پایا حرارت داده شد. دیاگرام تغییرات دمایی نمونه تا رسیدن به این وضعیت ثبات دمایی در شکل 2-5 نمایش داده شده است. در این شرایط، سیستم خنک کاری به سطح بالای نمونه اعمال شده و تغییرات دمایی نمونه توسط ترموکوپل جازنی شده ثبت گردید. این تغییرات دمایی برای حالات مختلف جریان سیستم خنک کار در شکل های 3-5 تا 5-5 نمایش داده شده است. از طریق شبیه سازی توسط مدل FDM و برنامه نویسی در متلب مقادیر CHTC برای شرایط خنک کاری مختلف محاسبه گردید. این مقادیر در جدول 4-5 ارائه شده اند.



شکل 5-5 تغییرات دمای ثبت شده توسط ترموکوپل در برابر زمان در شرایط خنک کاری جریان سیال و سیستم MQL خالص و MQL با نانوسیالات گرافیت و اکسید مس با فشار جریان 6 bar.

جدول 4-5 مقادیر ضریب همرفت حرارتی (CHTC) برای شرایط مختلف خنک کاری.

شرایط خنک کاری	جریان سیال	MQL با استفاده از سوسپانسون خالص گیاهی		MQL با استفاده از نانوسیال گرافیت		MQL با استفاده از نانوسیال اکسید مس	
		فشار هوای 4 bar	فشار هوای 6 bar	فشار هوای 4 bar	فشار هوای 6 bar	فشار هوای 4 bar	فشار هوای 6 bar
$\text{CHTC} \times 10^5$ (W/m ² .K)	5	2	2/4	1/5	2	1	1/4

براساس نتایج حاصله، CHTC در خنک کاری جریان سیال دارای بالاترین مقدار نسبت به سایر روش های خنک کاری برابر با $5 \times 10^5 \text{ W/m}^2\text{K}$ می باشد. همچنین مقدار CHTC برای حالت MQL خالص در شرایط فشار جریان 4 و 6 bar بترتیب برابر با 2 و $2/4 \times 10^5 \text{ W/m}^2\text{K}$ بوده و بالاتر از مقادیر مربوط به سیستم خنک کاری MQL با نانوسیالات گرافیت و اکسید مس می باشد. مطابق نتایج حاصله، بکارگیری نانوسیالات به جای سیال خالص در سیستم MQL سبب افزایش ضریب انتقال حرارت همرفت نمی گردد. همچنین مقادیر CHTC برای درصدهای حجمی مختلف نانوذرات در سیال پایه از نانوسیالات هم جنس تقریباً یکسان هستند. از طرف دیگر، ضریب انتقال حرارت همرفت در شرایط بکارگیری نانوسیال گرافیت بالاتر از مقادیر مربوطه در بکارگیری نانوسیال مس می باشد. جهت آنالیز بهتر نتایج حاصله، ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته سیال پایه و نانوسیالات گرافیت و اکسید مس با درصدهای مختلف حجمی نانوذرات در سیال پایه توسط روش های سیم داغ گذرای اصلاح شده¹ و سایبولت یونیورسال² اندازه گیری شده اند [108 و 112]. نتایج اندازه گیری های انجام گرفته در جدول 5-5 ارائه شده است.

جدول 5-5 ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته سینماتیکی سیال پایه و نانوسیالات گرافیت و اکسید مس در دمای محیط

درصد حجمی نانوذرات در سیال پایه				نوع نانوسیال	نوع خصوصیت
0/35	0/25	0/15	0		
0/453	0/439	0/398	0/327	نانوسیال گرافیت	هدایت حرارتی (W/mK)
0/463	0/435	0/41		نانوسیال اکسید مس	
5/49	5/33	5/24	5/18	نانوسیال گرافیت	ویسکوزیته سینماتیکی $\times 10^{-2}$ (St)
13/03	10/2	8/04		نانوسیال اکسید مس	

مطابق نتایج ارائه شده، ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته سیال پایه با افزایش درصد حجمی نانوذرات در نانوسیالات گرافیت و اکسید مس افزایش می یابد. ارتقاء ضریب هدایت حرارتی با افزایش درصد حجمی نانوذرات در نانوسیالات گرافیت و اکسید مس تقریباً یکسان می باشد. با این حال، ارتقاء ویسکوزیته سینماتیکی نانوسیال اکسید

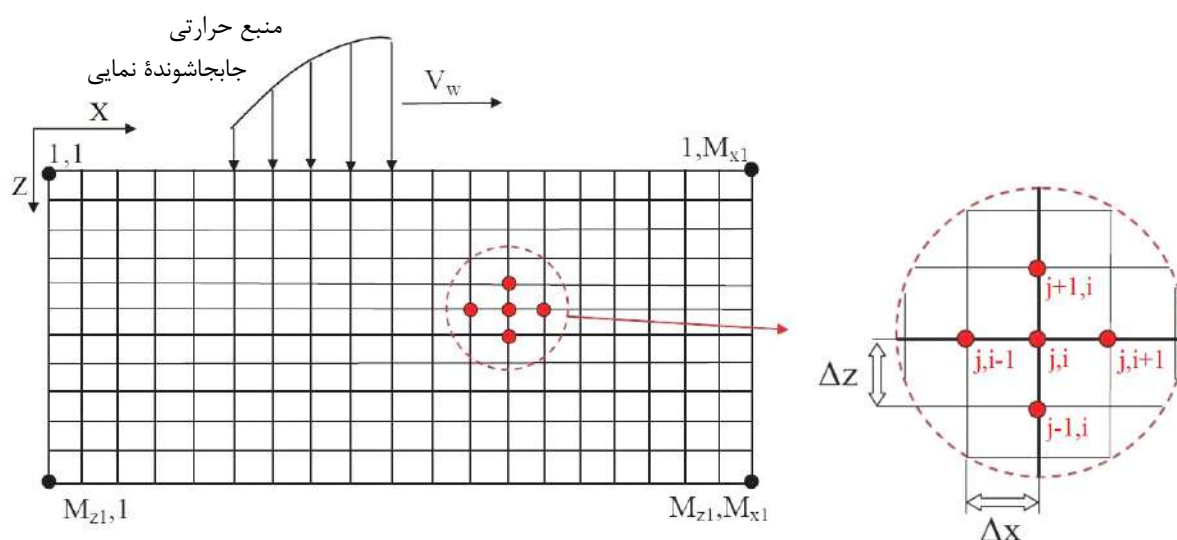
¹ Modified transient hot wire method² Saybolt Universal

مس با افزایش درصد حجمی نانوذرات بصورت قابل ملاحظه ای بیش از مقادیر مشابه در نانوسیال گرافیت می باشد. این پدیده به نقش سرعت جریان اسپری خنک کاری¹ در شرایط خنک کاری MQL به عنوان یک عامل تعیین کننده در ضخامت و ضریب هدایت حرارتی همرفت لایه² حرارتی² بر روی سطح کار دلالت دارد. در مورد نانوسیال اکسید مس در مقایسه با نانوسیال گرافیت، انرژی بالاتری از جریان سیال صرف شتاب دهی نانوذرات در جهت جریان اسپری گردیده و از این جهت سرعت اسپری خنک کاری و ضخامت لایه² حرارتی بر روی سطح کار کاهش می یابد [113]. به این دلیل ضریب CHTC در MQL نانوسیال مس کمتر از مقادیر مشابه در MQL نانوسیال گرافیت می باشد. همچنین ضرایب تقریباً یکسان CHTC در مورد نانوسیالات هم جنس با درصدهای حجمی متفاوت نانوذرات در سیال پایه در سیستم MQL را می توان چنین توجیه نمود که کاهش سرعت جریان و ضخامت لایه² گرمایی در سطح کار با افزایش ضریب هدایت حرارتی ناشی از افزایش درصد حجمی نانوذرات جبران شده و از این جهت CHTC ثابت می ماند.

4-5- نتایج شبیه سازی حرارتی براساس مدل FDM

1-4-5- توزیع دما در قطعه کار و ارزیابی صحت مدل FDM

محدوده شبیه سازی حرارتی یا ناحیه محاسباتی که در بخش 2-4 بدان پرداخته شد مجدداً در شکل 2-5 نمایش داده شده است. تغییرات دما در سطح سنگ زنی در امتداد محور افق (محور X) و توزیع دما در ناحیه محاسباتی در میانه مدت زمان درگیری چرخ سنگ با قطعه کار براساس نتایج مدل FDM در شرایط سنگ زنی خشک و سرعت قطعه کار 15 m/min و عمق برش 40 μm در شکل 3-5 ارائه شده است.

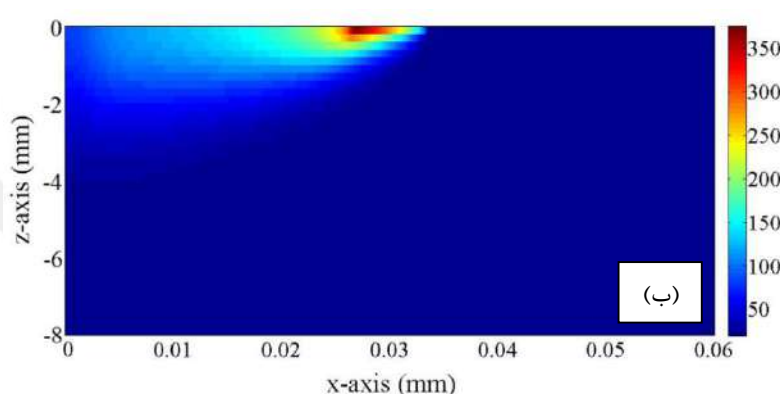
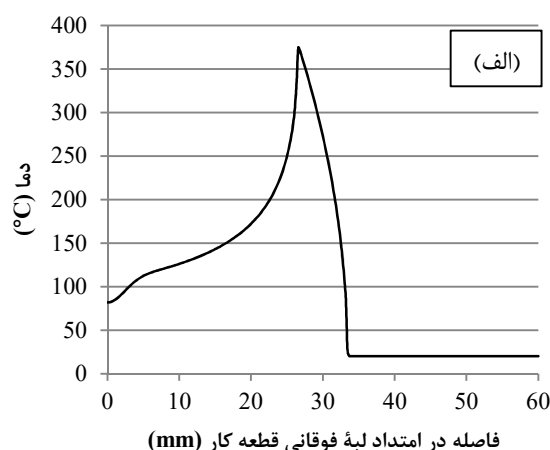


شکل 2-5 تقسیم بندی ناحیه محاسباتی در مدل FDM با استفاده از شبکه های کامل³

¹ Cooling spray

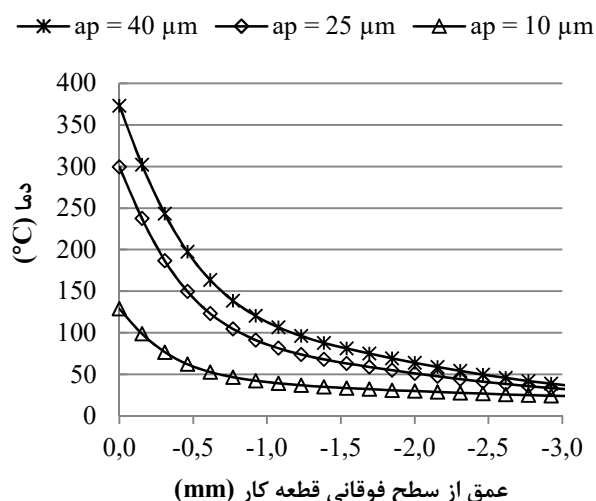
² Thermal layer

³ Full grids



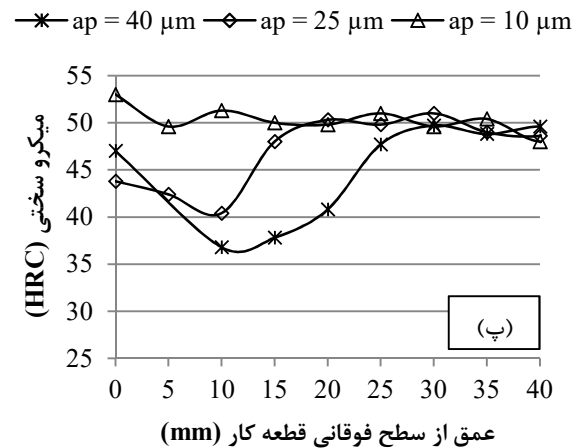
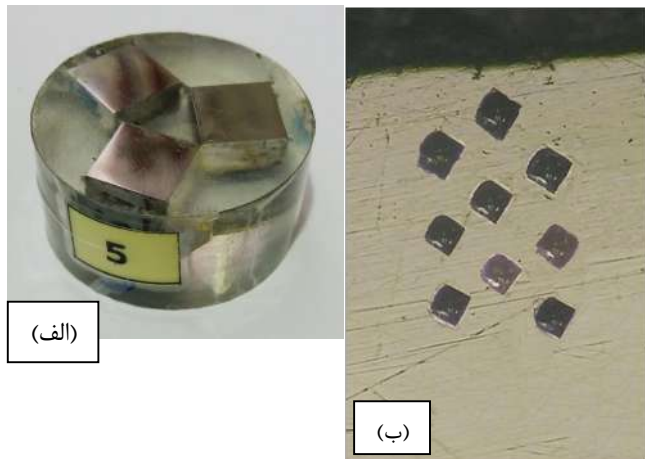
شکل 3-5 نحوه توزیع دما در شرایط سنگ زنی خشک؛ الف) دمای سنگ زنی در امتداد طولی لبه فوقانی قطعه کار و ب) توزیع دما در نمونه حین پروسه سنگ زنی ($v_w = 15 \text{ m/min}$ و $a_p = 40 \mu\text{m}$).

صحت مدل FDM از طریق تخمین عمق از لبه فوقانی ناحیه محاسباتی که در آن افزایش دما سبب تغییر میکروسختی نمونه می شود و مقایسه نتایج تخمین زده شده با نتایج حاصل از اندازه گیری های میکروسختی ارزیابی می شود. برای این منظور، متوسط دمای تمپر قطعه کار برابر 240°C به عنوان معیار تخمین عمقی که در آن میکروسختی قطعه کار سخت شده از جنس AISI 1045 کاهش می یابد و تخمین این عمق بر روی منحنی توزیع دما در امتداد عمقی قطعه کار براساس نتایج FDM استفاده می شود [114]. بر این اساس، نتایج مدل FDM توزیع دمای قطعه کار در امتداد عمق از لبه فوقانی ناحیه محاسباتی و تغییرات میکروسختی قطعات سنگ زنی شده در امتداد عمق از لبه سنگ زنی شده در شرایط سنگ زنی خشک با سرعت قطعه کار 15 m/min بترتیب در شکل های 4-5 و 5-5 ارائه شده اند. برای این منظور قطعات پس از پروسه سنگ زنی در ابعاد $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}$ از لبه فوقانی توسط وایرکات بریده شده و در مانت گرم مطابق شکل 5-5-پ قرار می گیرند. میکروسختی قطعات توسط میکروسختی سنج LM700 اندازه گیری می شود. مطابق نتایج حاصله، مدل FDM ارائه شده قادر به تخمین میدان حرارتی قطعه کار با صحت 97٪ می باشد.

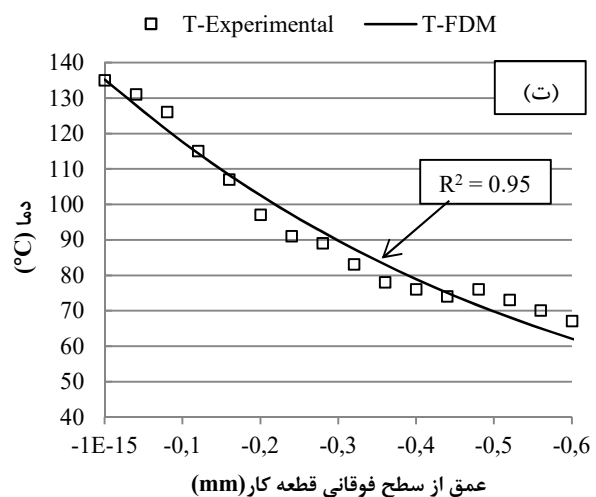
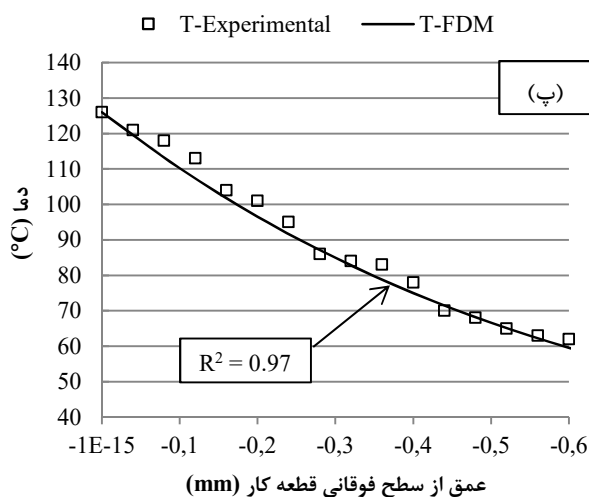
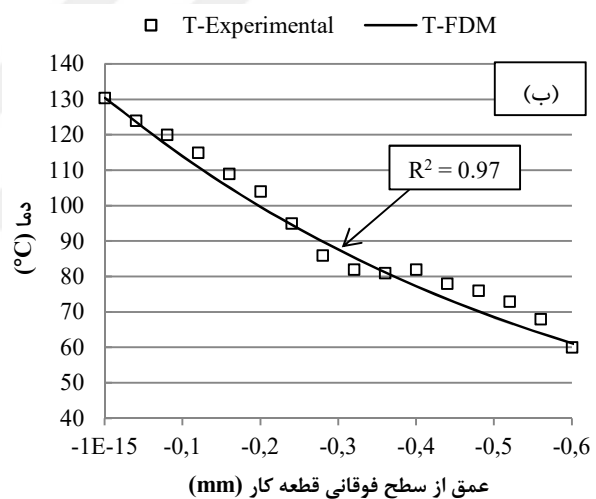
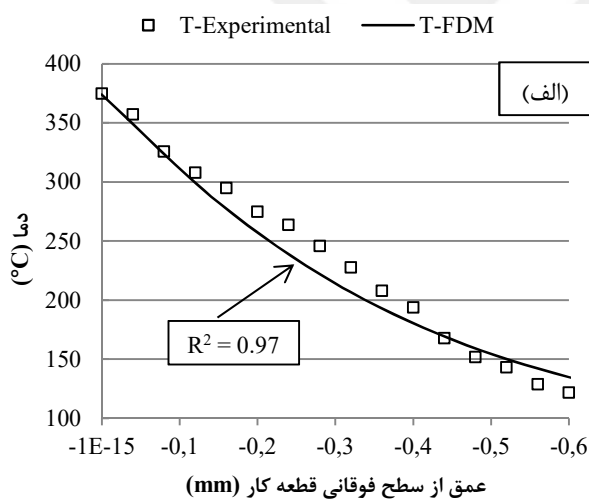


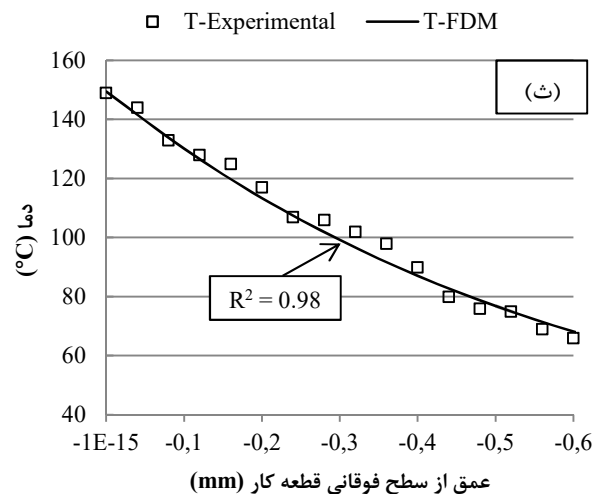
شکل 4-5 نتایج شبیه سازی FDM از نحوه توزیع حرارت در امتداد عمق از سطح قطعه کار در شرایط سنگ زنی خشک
($v_w = 15 \text{ m/min}$).

بعلاوه نتایج مدل FDM و نتایج تجربی توزیع دما در امتداد عمقی قطعه کار در شرایط خنک کاری مختلف در شکل 5-6 ارائه شده اند. با مقایسه نتایج حاصله مشاهده می شود که تطابق بالایی مابین توزیع دمای حاصل از مدل FDM و داده های تجربی اندازه گیری شده برای پاس های متوالی سنگ زنی با مقدار R-square فراتر از 95٪ وجود دارد. بعبارت دیگر می توان چنین بیان کرد که 95٪ از نحوه توزیع دما در سنگ زنی در شرایط مختلف خنک کاری تحت پارامترهای متفاوت سنگ زنی را می توان از طریق مدل FDM ارائه شده تفسیر نمود. تفاوت مابین نتایج تجربی و مقادیر حاصل از مدل تفاضل محدود می تواند ناشی از فرض های انجام گرفته در پروسه شبیه سازی و بخصوص در نظر گرفتن ضریب هدایت حرارتی ثابت برای قطعه کار در دماهای مختلف برابر با مقدار ضریب هدایت حرارتی در دمای محیط باشد. از نتایج حاصله اثبات می شود که مدل FDM ارائه شده قادر به حل مسائل توزیع حرارت در قطعه کار در پروسه سنگ زنی و پیش بینی توزیع دما و سهم حرارتی قطعه کار با صحت بالا می باشد. این پیش بینی ها می توانند در کنترل سلامت سطح قطعات سنگ زنی بخصوص تحت شرایط سنگ زنی خشن از اهمیت بالایی برخوردار باشند.



شکل 5-5 میکروسختی قطعات در مقطع عرضی سطوح سنگ زنی شده در حالت خشک؛ (الف) قطعات بریده شده توسط وایرکات پس از پروسه سنگ زنی در داخل مانت گرم، (ب) تصویر میکروسکوپ نوری از اثرات نفوذ نوک فرورنده میکروسختی سنج در مقطع عرضی قطعات سنگ زنی شده و (پ) تغییرات میکروسختی در امتداد عمق قطعات سنگ زنی شده در عمق بارهای مختلف در شرایط سنگ زنی خشک ($v_w = 15 \text{ m/min}$).



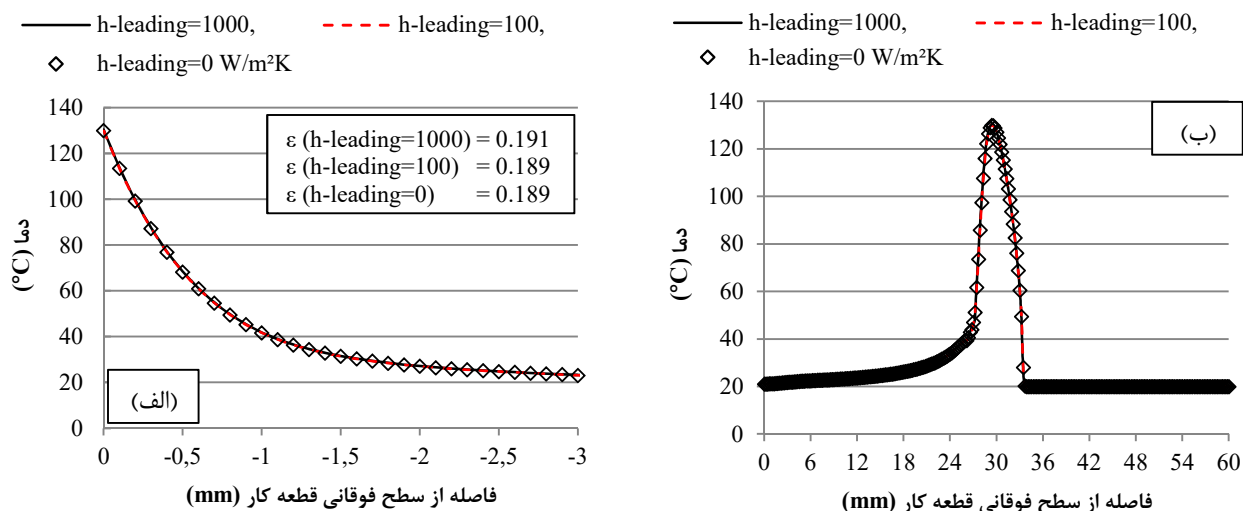


شکل 5-6 نتایج تجربی و نتایج مدل FDM نحوه توزیع دما در امتداد عمقی از مقطع عرضی سطوح قطعات در حالت سنگ زنی؛ الف) خشک، ب) MQL با نانوسیال اکسید مس با درصد حجمی 0/25 vol. % و فشار جریان 6 bar، پ) MQL با نانوسیال اکسید مس با درصد حجمی 0/35 vol. % و فشار جریان 6 bar، ت) MQL با نانوسیال گرافیت با درصد حجمی 0/35 vol. % و فشار جریان 6 bar و ث) MQL با نانوسیال گرافیت با درصد حجمی 0/35 vol. % و فشار جریان 4 bar ($a_p = 40 \mu m$ و $v_w = 15 m/min$).

5-4-2- اثرات خنک کاری در لبه پیش رو و پس رو از ناحیه سنگ زنی بر روی نحوه توزیع دمای قطعات

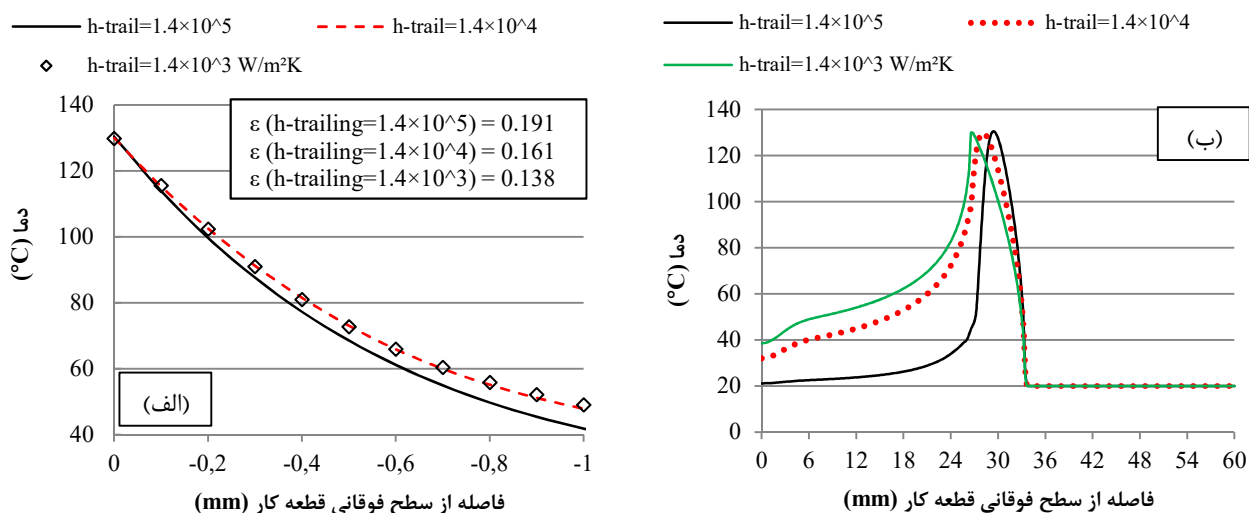
چنانچه بطور شماتیک در شکل 4-4 الف نمایش داده شد، نقش اصلی سیستم خنک کاری در سنگ زنی برحسب موقعیت نازل خنک کاری بر روی لبه پس رو از سطح سنگ زنی بوده و اثر آن بر روی لبه پیش رو بسیار محدود و ناچیز است [115]. جین و همکاران [116] چنین گزارش نمودند که ضریب انتقال حرارت همرفت در ناحیه تماس برای سیالات برشی پایه آبی¹ می تواند در حدود $2/9 \times 10^5 W/m^2K$ باشد. با این حال، برای لبه پیش رو، ضریب انتقال حرارت همرفت آزاد در محدوده $10^3 \sim 10^4 W/m^2K$ از سوی شن و همکاران اثبات شده است [99]. با فرض آنکه خنک کاری همرفت بر روی لبه های پس رو و جانبی ناحیه محاسباتی ثابت هستند، نقش ضریب انتقال حرارت همرفت لبه پیش رو ($h_{leading}$) بر روی نحوه توزیع دما در امتداد عمقی و طولی سطح سنگ زنی در شکل 5-7 ارائه شده است. چنانچه در این شکل مشاهده می شود، عمل خنک کاری بر روی لبه پیش رو هیچ تاثیر مشخصی بر روی توزیع دما در قطعه کار ندارد و اختلاف مابین مقادیر سهم حرارتی قطعه کار (ε_w) که به ازای مقادیر مختلف $h_{leading}$ بدست آمده است کمتر از 1/05 می باشد. این نتایج گویای این امر است که انتقال حرارت همرفت آزاد با ضریب $10^3 W/m^2K$ برای لبه پیش رو یک فرض معتبر در شبیه سازی انتقال حرارت در پروسه سنگ زنی می باشد.

¹ Water based cutting fluids



شکل 5-7 نقش h_{leading} بر روی توزیع دما در قطعه کار؛ الف) در امتداد عمقی و ب) در امتداد طولی سطح سنگ زنی در شرایط خنک کاری MQL با نانوسیال اکسید مس با درصد حجمی 0/25 vol. % و فشار جریان 6 bar ($a_p = 40 \mu\text{m}$ و $v_w = 15 \text{ m/min}$)

در نقطه مقابل، نقش ضریب انتقال حرارت همرفت لبه پس رو (h_{trailing}) بر روی نحوه توزیع دما در امتداد عمقی و طولی سطح سنگ زنی در شرایطی که خنک کاری همرفت بر روی لبه های پیش رو و جانبی ناحیه محاسباتی ثابت می باشد، در شکل 5-8 نمایش داده شده است. مقدار h_{trailing} برابر $1/4 \times 10^5 \text{ W/m}^2\text{K}$ برای شرایط خنک کاری MQL با استفاده از نانوسیال اکسید مس در فشار جریان 6 bar براساس نتایج مدل نیمه تجربی ارائه شده در بخش 3-4 محاسبه شده است. چنانچه در شکل 5-8 مشاهده می شود، خنک کاری بر روی لبه پس رو دارای تاثیر قابل ملاحظه ای بر روی توزیع دما و سهم انرژی قطعه کار (ε_w) می باشد، بطوریکه ε_w به ازای مقادیر مختلف h_{trailing} اختلافی در حدود 27/8 % را نمایش میدهد.



شکل 5-8 نقش h_{trailing} بر روی توزیع دما در قطعه کار؛ الف) در امتداد عمقی و ب) در امتداد طولی سطح سنگ زنی در شرایط خنک کاری MQL با نانوسیال با درصد حجمی 0/25 vol. % و فشار جریان 6 bar ($a_p = 40 \mu\text{m}$ و $v_w = 15 \text{ m/min}$)

5-4-3- اثرات شرایط خنک کاری در حین سنگ زنی بر روی سهم انرژی قطعه کار

براساس نتایج مدل FDM، مقادیر سهم قطعه کار از انرژی حرارتی تولید شده در طی پروسه سنگ زنی در شرایط مختلف خنک کاری و پارامترهای مختلف سنگ زنی در قالب جداول 5-6، 5-7 و 5-8 ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصل از مطالعات مالکین و جیو [111] انرژی کل ورودی به قطعه کار و سهم انرژی حرارتی قطعه کار را می توان براساس نیروی مماسی سنگ زنی (F_t) و حداکثر دمای قطعه کار (T_{max}) بصورت رابطه 5-1 محاسبه نمود.

$$q = \{ (k v_w^{1/2}) / (\beta \alpha_w^{1/2} a_p^{1/4} D_s^{1/4}) \} * T_{max}$$

$$q_{total} = F_t V_s / b_w L_C$$

$$\varepsilon_w = q / q_{total} \quad (1-5)$$

که در آن k ضریب هدایت حرارتی قطعه کار، v_w سرعت قطعه کار، α_w نفوذ پذیری حرارتی قطعه کار، a_p عمق برش، D_s قطر چرخ سنگ زنی، v_s سرعت برش، b_w پهنای سنگ زنی و L_C طول ناحیه درگیری چرخ سنگ با قطعه کار می باشد. B ضریب ثابتی است که به شکل منبع حرارتی بستگی دارد. برای منبع حرارتی با شکل نمایی که برای سنگ زنی روبه بالا پیشنهاد شده است، مقادیر ضریب β برابر با 1/2 سبب ایجاد تقریب نزدیکی بین مقادیر سهم انرژی حرارتی قطعه کار که از مدل FDM بدست آمده است و مقادیری که از رابطه 5-1 بدست می آید با میانگین درصد اختلاف 8/9٪ می گردد.

جدول 5-6 نتایج مدل FDM برای تعیین سهم انرژی حرارتی قطعه کار (ε_w %) در شرایط خنک کاری خشک، جریان سیال و MQL خالص.

شرایط خنک کاری				عمق برش (µm)	سرعت قطعه کار (m/min)
MQL با سوسپانسیون خالص گیاهی		جریان سیال	خشک		
فشار هوای 6 bar	فشار هوای 4 bar				
24/8	20/5	23	22	10	5
15	16	12/7	26/5	25	
18/6	18/7	10/7	31/3	40	
20/6	24/8	23	24/4	10	10
25/2	24/4	15/5	36/5	25	
27/1	26/4	13/8	44	40	
23	24/8	22/2	24/8	10	15
30/5	36/5	18/6	49/9	25	
31/5	32/6	17/6	58/3	40	

جدول 5-7 نتایج مدل FDM برای تعیین سهم انرژی حرارتی قطعه کار (ε_w %) در شرایط خنک کاری MQL نانوسیال گرافیت.

درصد حجمی نانوذرات گرافیت در سیال پایه						عمق برش (μm)	سرعت قطعه کار (m/min)
0/35 vol. %		0/25 vol. %		0/15 vol. %			
فشار هوای 6 bar	فشار هوای 4 bar	فشار هوای 6 bar	فشار هوای 4 bar	فشار هوای 6 bar	فشار هوای 4 bar		
28	27/9	25	29	28	30	10	5
17/6	19/2	18/2	19	17/6	17/5	25	
22	22/2	21	21/2	18	18	40	
25/5	28/6	32	33/6	36/5	35/2	10	10
23	22/5	25/6	23/7	27/4	31/4	25	
22/5	22/5	24/9	24/5	26/2	27/5	40	
20	25/4	39/8	37	46	45/5	10	15
25/5	25/9	30/7	28	34/2	33/4	25	
22/2	23/2	27/1	26/4	33/2	34/5	40	

جدول 5-8 نتایج مدل FDM برای تعیین سهم انرژی حرارتی قطعه کار (ε_w %) در شرایط خنک کاری MQL نانوسیال اکسید مس.

درصد حجمی نانوذرات گرافیت در سیال پایه						عمق برش (μm)	سرعت قطعه کار (m/min)
0/35 vol. %		0/25 vol. %		0/15 vol. %			
فشار هوای 6 bar	فشار هوای 4 bar	فشار هوای 6 bar	فشار هوای 4 bar	فشار هوای 6 bar	فشار هوای 4 bar		
21	17	24/5	25/8	22/5	32/3	10	5
14/5	14/5	12/2	9/3	16/4	13	25	
13/5	14/3	13/8	11	13	13/5	40	
18	16/8	15/5	18/4	20/4	22/4	10	10
16/1	15/6	15/9	15/4	20/1	21/7	25	
16/4	16/4	16/5	14/7	20/1	22/1	40	
15	20/4	14	21	21	25	10	15
21	17/9	16/9	20/7	22/3	26/7	25	
17/5	16	19/1	20/5	22/8	33/4	40	

5-5- نتایج سنگ زنی MQL با استفاده از نانوسیال گرافیت در فشار جریان 4 bar

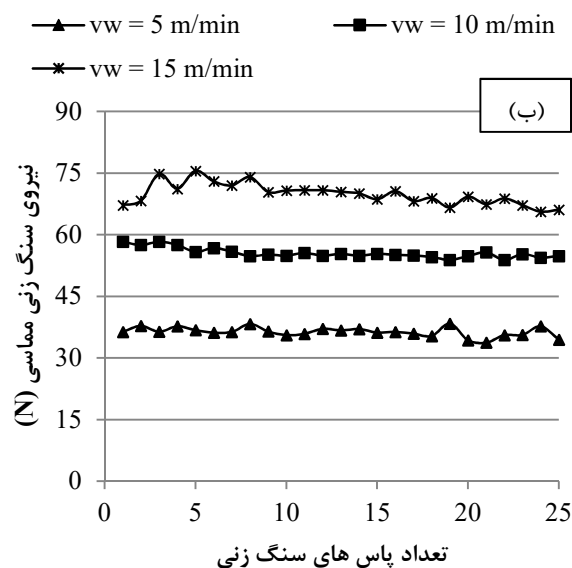
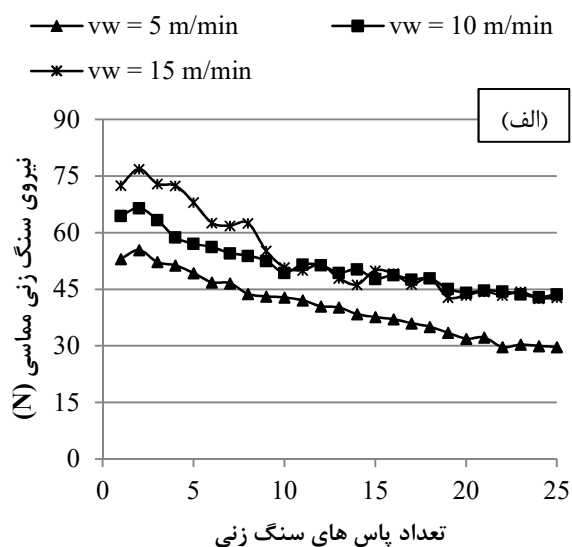
5-5-1- نقش روش روانکاری بر روی نیروهای سنگ زنی

تغییرات نیروهای سنگ زنی مماسی و عمودی در پاس های مختلف سنگ زنی در شرایط سنگ زنی خشک و سنگ زنی با استفاده از MQL با نانوسیال گرافیت 0/35 vol. % در عمق بار $40 \mu\text{m}$ بترتیب در شکل های 5-9 و 5-10 ارائه شده اند. مطابق نتایج حاصله، کاهش قابل ملاحظه ای در نیروهای سنگ زنی برای پاس های متوالی سنگ زنی در شرایط خشک بخصوص در سرعت قطعه کار 15 m/min اتفاق می افتد. این پدیده می تواند بدلیل افزایش

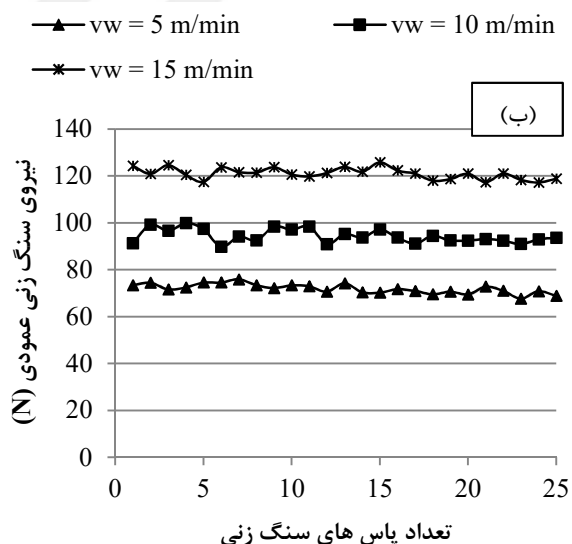
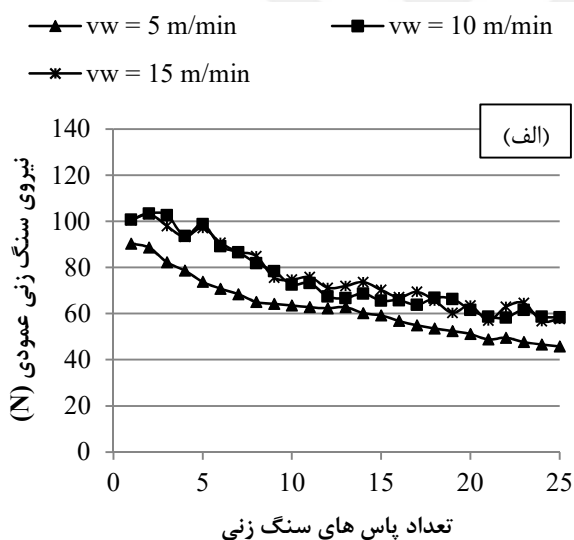
دمای سطح سنگ زنی ناشی از عدم حضور سیستم خنک کاری مؤثر و در نتیجه آن نرم شدن مواد کار باشد. در نقطه مقابل، در سنگ زنی با استفاده از سیستم MQL نانوسیال گرافیتی با غلظت حجمی % 0/35 نانوذرات در سیال پایه، نیروهای سنگ زنی در پاس های مختلف دارای ثبات نسبی هستند. جهت بررسی بهتر، نیروهای سنگ زنی مماسی ویژه¹ (F_t) و نسبت نیروها یا عبارتی ضریب اصطکاک (F_t/F_n) که نسبت نیروی مماسی سنگ زنی به نیروی عمودی است تحت شرایط مختلف سنگ زنی در شکل های 5-11 و 5-12 ارائه شده اند. این نتایج، متوسط مقادیر اندازه گیری شده در پاس های متوالی سنگ زنی تا عمقی که در آن ترموکوپل ها نصب شده اند می باشد. نیروی سنگ زنی مماسی ویژه بصورت نسبت نیروی برشی سنگ زنی بر پهنای درگیری قطعه کار - چرخ سنگ تعریف می شود.

چنانچه در شکل 5-11 مشاهده می شود، F_t بالاترین مقادیر در تمام شرایط سنگ زنی خشک به غیر از حالت سنگ زنی خشن با عمق بار و سرعت قطعه کار زیاد را داراست. این پدیده بدلیل عدم وجود فیلم روانکار در ناحیه تماس سنگ زنی و عمل لغزش سطوح آزاد ذرات ساینده بر روی سطح سنگ زنی شده می باشد. در این شرایط بجای عمل برش، تغییر شکل پلاستیکی مواد و ایجاد حفره ها در سطح سنگ زنی روی می دهد که در تصویر SEM نمایش داده شده در شکل 5-13 قابل مشاهده است. تغییر شکل زیاد و عمل لغزش سبب افزایش نسبت F_t/F_n می گردد. با این حال، در شرایط سنگ زنی خشن، F_t در حالت خشک بدلیل ایجاد فیلم اکسیدی ناشی از دما و فشار بالا در ناحیه تماس در حین سنگ زنی کاهش یافته و در نتیجه آن نسبت F_t/F_n کاهش می یابد [117].

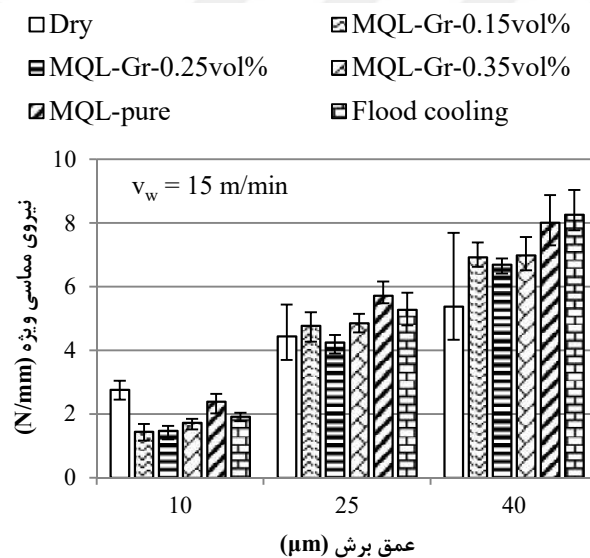
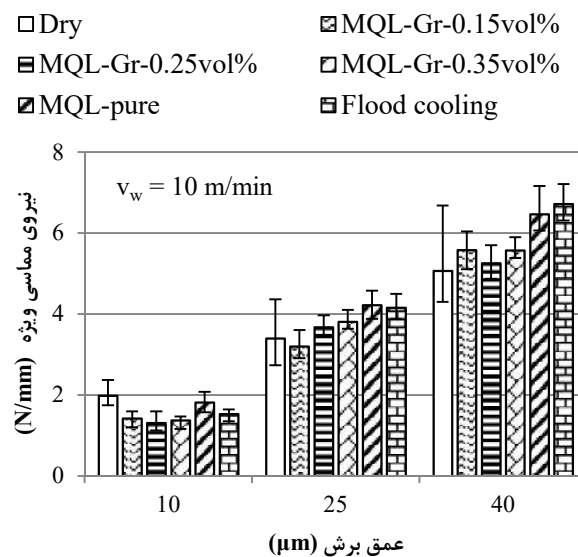
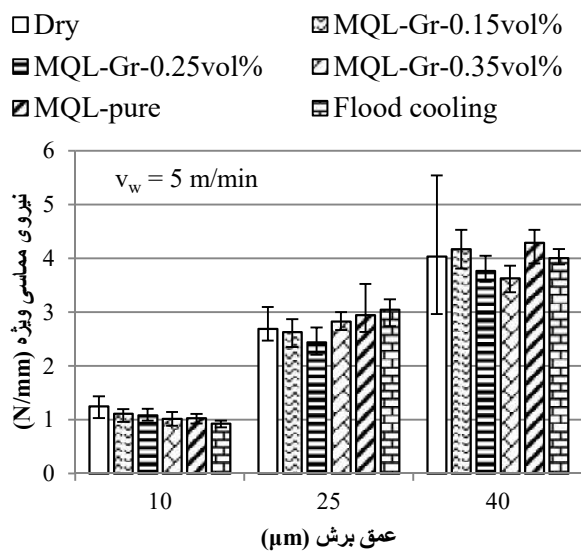
¹ Special tangential grinding force



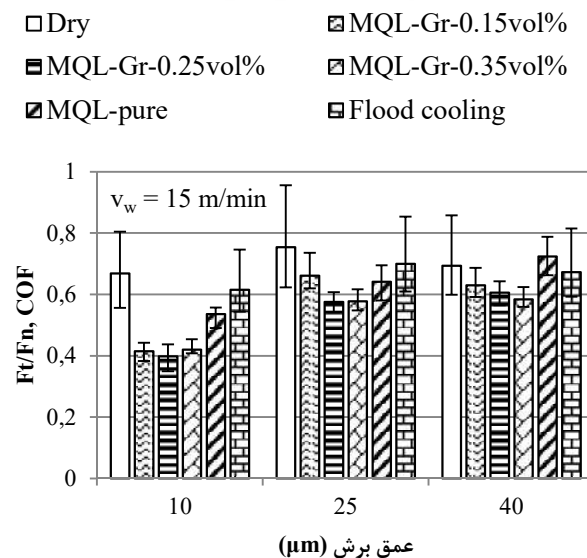
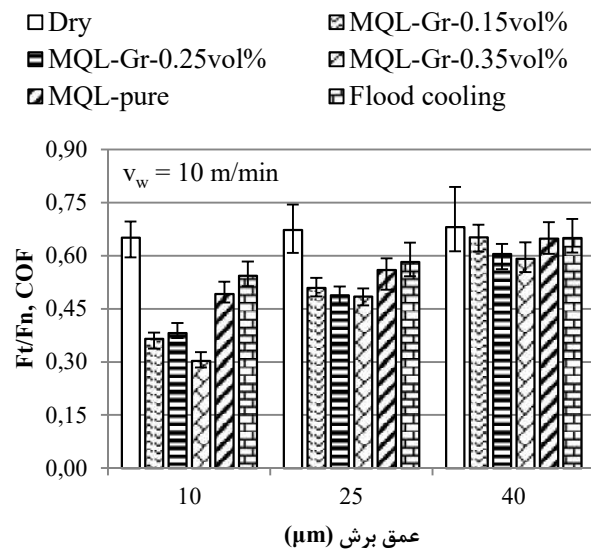
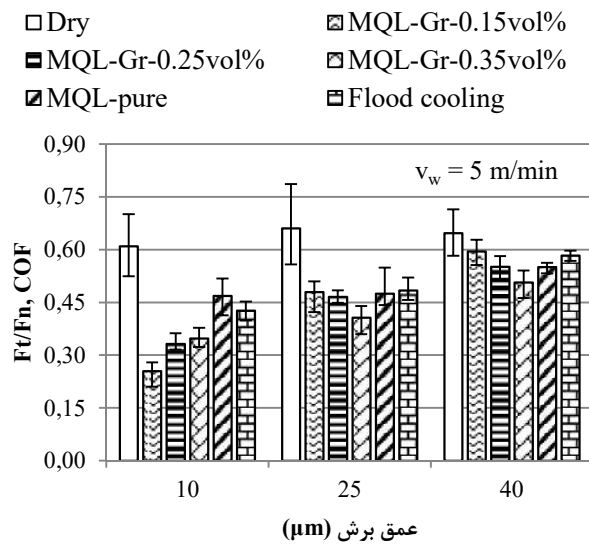
شکل 5-9 نیروی سنگ زنی مماسی در برابر پاس های سنگ زنی در عمق بار $40 \mu\text{m}$ ؛ الف) سنگ زنی خشک و ب) سنگ زنی MQL با نانوسیال گرافیت 0/35 vol. %



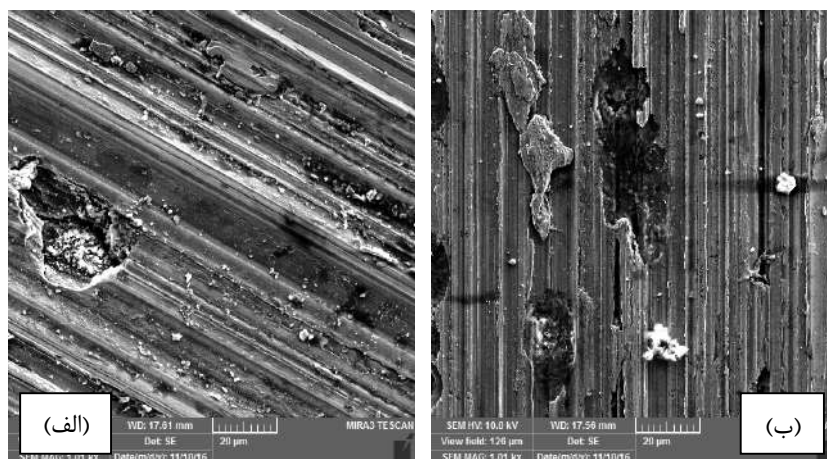
شکل 5-10 نیروی سنگ زنی عمودی در برابر پاس های سنگ زنی در عمق بار $40 \mu\text{m}$ ؛ الف) سنگ زنی خشک و ب) سنگ زنی MQL با نانوسیال گرافیت 0/35 vol. %



شکل 5-11 نیروی سنگ زنی مماسی ویژه در برابر عمق بار تحت شرایط خنک کاری مختلف.



شکل 5-12 نسبت نیروهای سنگ زنی در برابر عمق بار تحت شرایط خنک کاری مختلف.



شکل 5-13 تصاویر SEM از سطوح سنگ زنی شده تحت شرایط خشک در عمق بار 40 μm (الف) و $v_w = 10 \text{ m/min}$ و (ب) $v_w = 15 \text{ m/min}$.

بعلاوه، MQL خالص با استفاده از سوسپانسیون روغن کانولا عملکرد بهتری را نسبت به جریان سیال با استفاده از سیال برش VIYER-3000 در پروسه سنگ زنی نمایش می دهد. این امر نمایش دهنده خواص روانکاری بهتر روغن گیاهی در مقایسه با روانکارهای متداول در اکثر پارامترهای برشی علارغم نرخ مصرف بسیار پایین سیال در سیستم MQL می باشد. زنجیره های مولکولی اسیدچرب طویل و حضور ترکیبات حاوی سولفور، کلرین و فسفر در روغن کانولا، فیلم مولکولی را شکل می دهد که به سطح فلز کار می چسبد. این فیلم، فیلم روانکاری مرزی¹ یا تریبوفیلیم خوانده می شود [118]. همچنین تری گلسیراید موجود در روغن گیاهی دارای قطبیت بیشتری نسبت به روغن های پایه نفتی بوده و از این جهت دارای تمایل بیشتری برای چسبیدن به سطح فلز می باشند. مولکول های تری گلیسرول خود را به سطوح تحت سنگ زنی چسبانده، سبب شکل گیری فیلم سطحی از ردیف های مولکولی منظم که دارای خواص روانکاری خوبی هستند می گردد [119 و 120].

از طرف دیگر، خواص روانکاری نانوسیالات گرافیت بهتر از سیستم جریان سیال و MQL خالص می باشد. چنانچه در شکل 5-11 مشاهده می شود، نیروهای سنگ زنی مماسی ویژه با استفاده از سیستم MQL با نانوسیال گرافیت کمتر از دیگر روش های روانکاری بخصوص تحت پارامترهای سنگ زنی خشن می باشد. مطابق نتایج حاصله، در سنگ زنی با سرعت قطعه کار 15 m/min و عمق برش 40 μm ، بکارگیری سیستم MQL با نانوسیال گرافیت در مقایسه با جریان سیال سبب کاهش حداکثر برابر با 19 و 18٪ به ترتیب در نیروهای سنگ زنی مماسی و نسبت نیروی سنگ زنی می گردد. کاهش نیروی سنگ زنی و ضریب اصطکاک به شکل گیری لایه روانکار بر روی سطوح سایش مرتبط است. حضور ترکیبات موجود در روغن گیاهی نیز به چسبیدن نانوذرات گرافیت به سطح فلز کمک می نماید [121]. گرافیت بدلیل داشتن ساختار لایه ای² یک روانکار خوب محسوب می شود. در حضور نیروهای برشی، صفحات اتمی موجود در ساختار گرافیت می توانند بر روی یکدیگر لغزش نمایند که این امر سبب کاهش نیروهای اصطکاکی در وجه تماس چرخ ساینده - قطعه کار می گردد [122]. در عمق برش کم و سطح مقطع کوچک خراش های سطحی³، بهبود روانکاری بدلیل افزایش نسبی تغییر شکل مواد قطعه کار سبب افزایش انرژی مخصوص برش می شود. این پدیده در شکل 5-11 تحت سرعت قطعه کار 5 m/min و عمق بار 10 μm قابل مشاهده است بطوریکه نیروی مماسی سنگ زنی در شرایط بکارگیری MQL با نانوسیال گرافیت بطور جزئی فراتر از مقادیر مشابه برای MQL خالص و جریان سیال است. با این حال، در عمق برش زیاد و در نتیجه خراش هایی با مقطع عرضی بزرگتر در سطح سنگ زنی، کاهش هدر روی اصطکاک از طریق تشکیل فیلم روانکار پیوسته در سطح تماس پدیده غالب است که سبب کاهش نیروی سنگ زنی ویژه در مقایسه با سنگ زنی جریان سیال و یا MQL خالص می گردد [117]. بعلاوه، نقش شکل گیری فیلم روانکار در سنگ زنی MQL با نانوروانکار گرافیت در کاهش نسبت نیروهای سنگ زنی F_t/F_n بیشتر در شرایط سنگ زنی خشن مشخص است بطوریکه این نسبت با افزایش درصد حجمی نانوذرات در سیال پایه کاهش می یابد. با افزایش غلظت نانوذرات در نانوسیالات گرافیت، جمعیت نانوذرات در ناحیه

¹ Boundary lubricating film

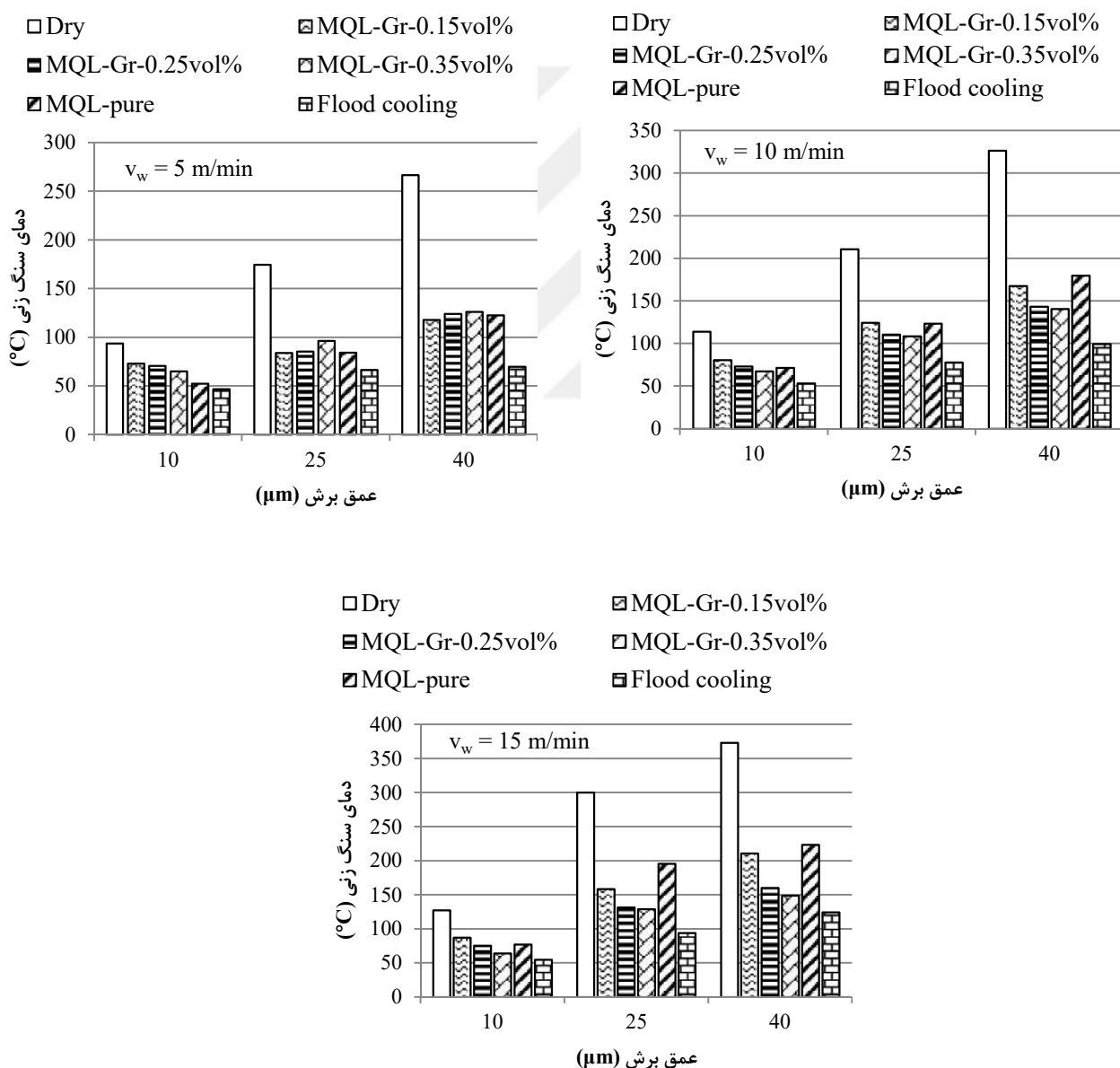
² Layered structure

³ Small scratch cross-sections

تماس سنگ زنی افزایش می یابد که سبب شکل گیری فیلم روانکار بهتر و کاهش بیشتر نیروهای مماسی سنگ زنی و نسبت نیروهای F_t/F_n می گردد.

5-5-2- نقش روش روانکاری بر روی دمای سنگ زنی

دمای سنگ زنی قطعات در شرایط روانکاری مختلف در شکل 5-14 نمایش داده شده است. مطابق نتایج حاصله، دما در سنگ زنی خشک بالاترین مقادیر را در بین دیگر روش های سنگ زنی بدلیل عدم وجود عمل روانکاری و خنک کاری در وضعیت خشک دارا می باشد. دمای بالا در حالت سنگ زنی خشک سبب ایجاد آسیب های جدی در سلامت سطح قطعات سنگ زنی از جمله اثرات سوختگی، جریان پلاستیکی مواد، ترک ها و چاله ها در سطح قطعات می گردد (شکل 5-13).



شکل 5-14 دمای سنگ زنی در برابر عمق بار تحت شرایط خنک کاری مختلف.

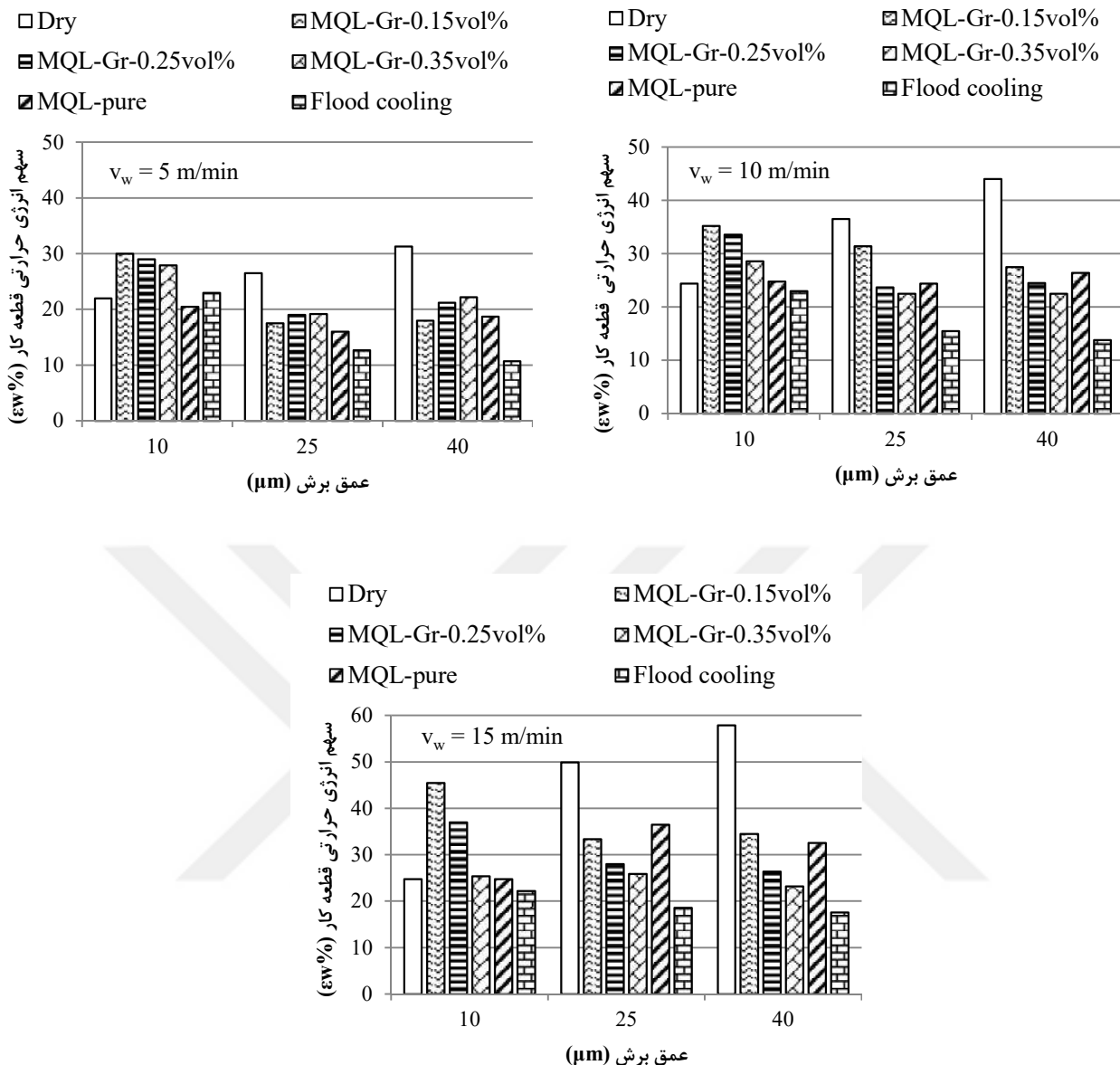
در نقطه مقابل روش جریان سیال در سنگ زنی سبب ایجاد کمترین دمای قطعه کار در بین دیگر روش های خنک کاری می گردد. با توجه به اینکه نیروی سنگ زنی مماسی ویژه و نسبت F_t/F_n در شرایط روانکاری جریان سیال و MQL خالص باهم قابل مقایسه می باشند، دلیل دمای کمتر قطعات در پروسه سنگ زنی با جریان سیال، ارتقاء قابلیت دفع حرارت از ناحیه تماس چرخ سنگ با قطعه کار در این روش است. نرخ جریان بالای سیال در روش جریان سیال سبب دفع بهتر حرارت از موقعیت درگیری چرخ سنگ با قطعه کار شده و باعث کاهش سهم انرژی قطعه کار از حرارت تولید شده در حین پروسه سنگ زنی می گردد. چنانچه در جدول 4-5 نمایش داده شده است، مقدار ضریب انتقال حرارت همرفت (CHTC) در شرایط سنگ زنی جریان سیال برابر با $5 \times 10^5 \text{ W/m}^2\text{K}$ می باشد که بالاترین مقدار را در بین دیگر روش های خنک کاری مورد بررسی داراست. این پدیده توجیه کننده دمای کمتر قطعات در پروسه سنگ زنی به روش جریان سیال است.

بعلاوه، ضریب CHTC برای MQL خالص برابر $2 \times 10^5 \text{ W/m}^2\text{K}$ است که بصورت قابل ملاحظه ای کمتر از مقدار مشابه برای شرایط خنک کاری جریان سیال است. این پدیده عامل دمای سنگ زنی بالاتر در شرایط خنک کاری با استفاده از MQL خالص نسبت به حالت بکارگیری جریان سیال می باشد.

از طرف دیگر، چنانچه در بخش 3-5 ارائه گردید، بهره گیری از نانوسیالات در سیستم MQL سبب ارتقاء ضریب انتقال حرارت همرفت جریان اسپری در مقایسه با سوسپانسیون خالص نمی گردد بطوریکه ضریب CHTC برای MQL با نانوسیال گرافیت و در شرایط فشار هوای 4 bar برابر $1/5 \times 10^5 \text{ W/m}^2\text{K}$ است. چنانچه در بخش 3-5 توضیح داده شد، در MQL با استفاده از نانوسیال گرافیت بخشی از انرژی اسپری صرف شتاب دهی ذرات جامد در جهت جریان سیال می گردد که به نوبه خود باعث کاهش سرعت جریان و ضخامت لایه حرارتی بر روی سطح کار می گردد. این پدیده دلیل افزایش جزئی دمای سنگ زنی در سرعت قطعه کار 5 m/min با افزایش درصد حجمی نانوذرات در نانوسیال گرافیت می باشد (شکل 5-14). با این حال، در سرعت های بالاتر قطعه کار، عمل روانکاری بهتر نانوسیالات گرافیت موجب کاهش نسبت نیروهای سنگ زنی می گردد که باعث کاهش دمای سنگ زنی می شود. مطابق نتایج حاصله، در شرایط سنگ زنی خشن با سرعت قطعه کار 15 m/min و عمق برش $40 \mu\text{m}$ ، بکارگیری سیستم MQL با نانوسیال گرافیت 0/35 vol. % سبب عملکرد قابل مقایسه ای با روش جریان سیال در کاهش دمای سنگ زنی می گردد، بگونه ای که دمای سنگ زنی در شرایط بکارگیری این دو سیستم نسبت به حالت سنگ زنی خشک بترتیب 60 و 66/7 % کاهش می یابد.

5-3-5- نقش روش روانکاری بر روی سهم انرژی قطعه کار

سهم قطعه کار از انرژی تولید شده در طی سنگ زنی تحت شرایط خنک کاری مختلف و در پارامترهای سرعت قطعه کار و عمق بار متفاوت براساس نتایج مدل FDM در شکل 5-15 ارائه شده است. چنانچه مشاهده می شود، ε_w در خنک کاری جریان سیال دارای کمترین مقدار در بین مکانیزم های دیگر خنک کاری می باشد. این پدیده از این جهت که CHTC در شرایط جریان سیال بطور قابل ملاحظه ای بیشتر از حالت MQL خالص و MQL با نانوسیال گرافیتی می باشد، قابل انتظار است.



شکل 5-15 سهم انرژی حرارتی قطعه کار در برابر عمق بار تحت شرایط خنک کاری مختلف.

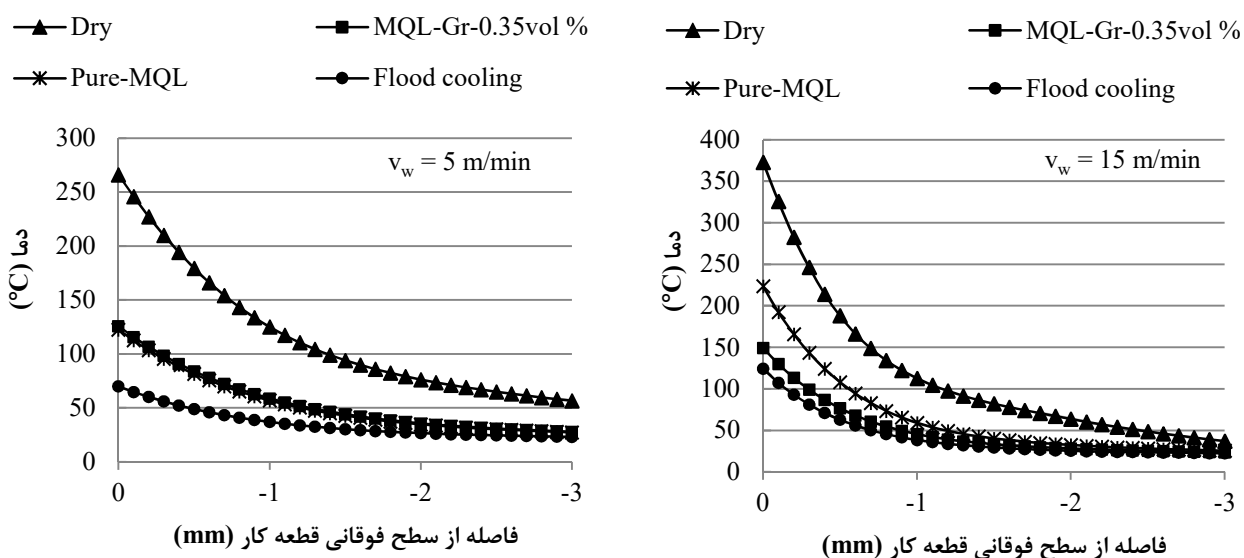
از طرف دیگر، سهم حرارتی قطعه کار در سیستم MQL با نانوسیال گرافیت در شرایط عمق بار 10 μm بیش از مقادیر مشابه در دیگر روش های خنک کاری بجز حالت سنگ زنی خشک می باشد. با درنظر گرفتن این امر که نیروهای مماسی در سنگ زنی تحت عمق بار 10 μm برای شرایط خنک کاری مختلف مقادیر تقریباً یکسانی را دارا هستند (شکل 5-11)، ϵ_w بالاتر می تواند بدین دلیل باشد که نانوذرات گرافیت بسته های هوایی کوچک را بین چرخ ساینده و قطعه کار در ناحیه تماس سنگ زنی پر می کند و این پدیده سبب کاهش مقاومت حرارتی تماسی¹ مابین چرخ و قطعه کار می شود. چنانچه هدایت حرارتی چرخ ساینده Al_2O_3 بطور قابل ملاحظه ای از هدایت حرارتی

¹ Contact thermal resistance

فولاد AISI 1045 کمتر است [123]، کاهش مقاومت تماسی سبب تسهیل دفع حرارت در قطعه کار می گردد و این امر باعث افزایش سهم انرژی قطعه کار می شود.

همچنین در سنگ زنی با عمق بار 25 و $40 \mu\text{m}$ و در سرعت قطعه کار 5 m/min ، سهم انرژی قطعه کار با افزایش درصد حجمی نانوذرات گرافیت در سیال پایه در سیستم MQL با نانوسیال گرافیت افزایش می یابد. این افزایش می تواند بدلیل کاهش مقاومت حرارتی تماسی در ناحیه تماس سنگ زنی با افزایش درصد حجمی نانوذرات در نانوسیال گرافیت درحالی که نیروهای مماسی سنگ زنی تقریباً ثابت بوده و یا حتی کاهش می یابند (شکل 5-11)، باشد.

از سوی دیگر، مطابق آنچه که در شکل 5-15 نمایش داده شده است، کاهش پیوسته ای در مقادیر ε_w با افزایش درصد حجمی نانوذرات در نانوسیال گرافیت تحت شرایط سنگ زنی MQL در سرعت قطعه کار 10 و 15 m/min اتفاق می افتد. این پدیده به مزیت بکارگیری نانوسیال گرافیت تحت پارامترهای سنگ زنی خشن تاکید دارد. این مزیت از عمل لغزش صفحات اتمی در ساختار هگزاگونال نانوذرات گرافیت و کاهش هدر روی اصطکاکی مابین سطح آزاد ذرات ساینده و سطح سنگ زنی شده ناشی می شود. این شرایط به کاهش سهم حرارتی قطعه کار می انجامد. همچنین، مقادیر سهم انرژی قطعه کار در سنگ زنی با استفاده از MQL خالص و MQL با نانوسیال گرافیت می توانند بدین دلیل بهم نزدیک باشند که ضریب انتقال حرارت همرفت در MQL خالص بالاتر از مقدار مشابه در MQL با نانوسیال گرافیت است. نتایج مدل FDM از نحوه توزیع دما در امتداد عمقی قطعه کار از سطح تحت سنگ زنی که در شکل 5-16 ارائه شده اند نمایش دهنده تاثیر قابل ملاحظه سیستم MQL با نانوسیال گرافیت در کاهش دمای سنگ زنی در شرایط خشن با عمق بار $40 \mu\text{m}$ و سرعت قطعه کار 15 m/min می باشد. این در حالی است که MQL خالص دارای گرادیان حرارتی بالاتر و عمق نفوذ بیشتر در قطعه کار نسبت به MQL با نانوسیال گرافیتی در شرایط سنگ زنی خشن است.

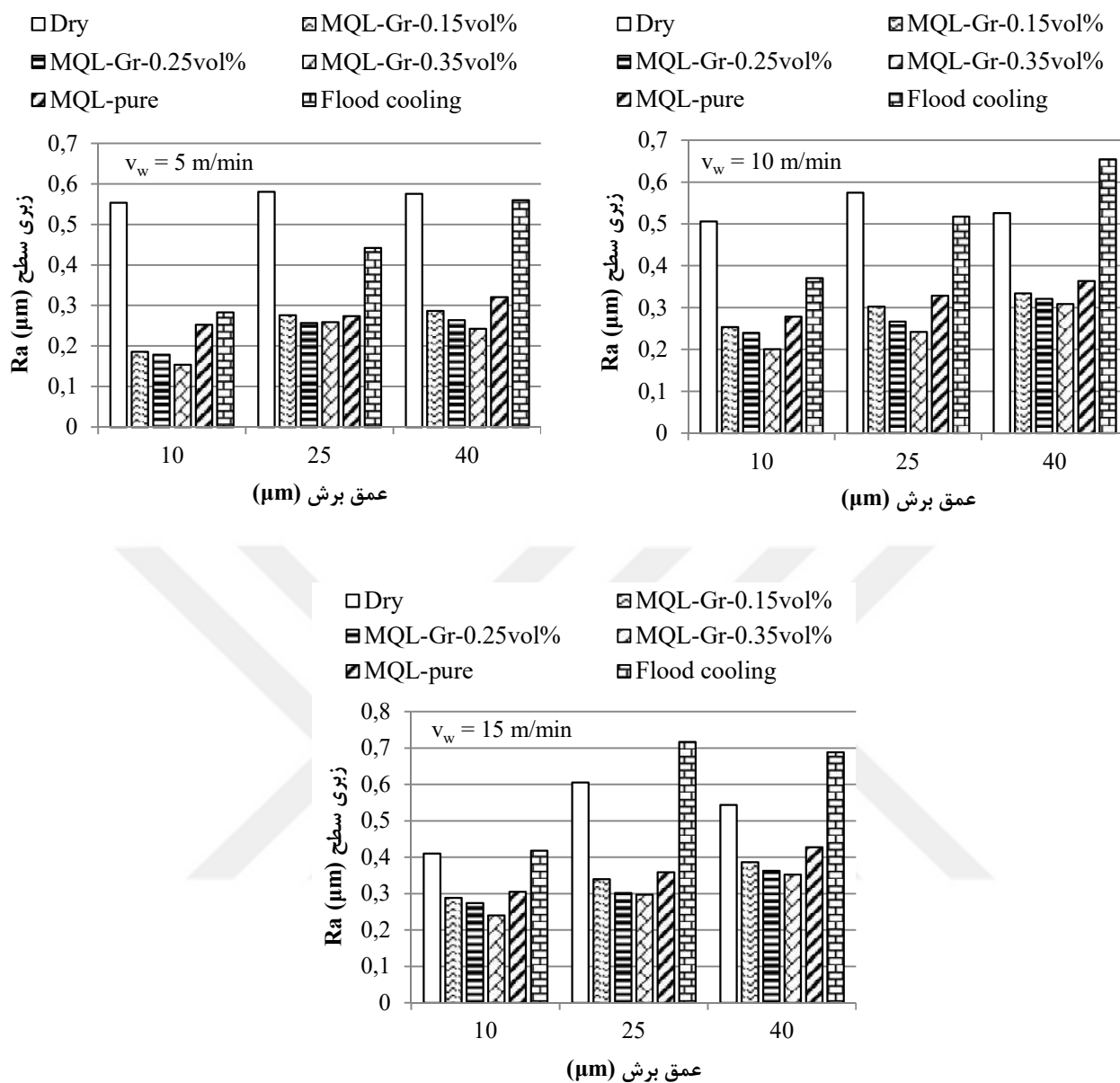


شکل 5-16 نحوه توزیع دما در امتداد عمقی قطعه کار تحت شرایط خنک کاری مختلف ($a_p = 40 \mu\text{m}$).

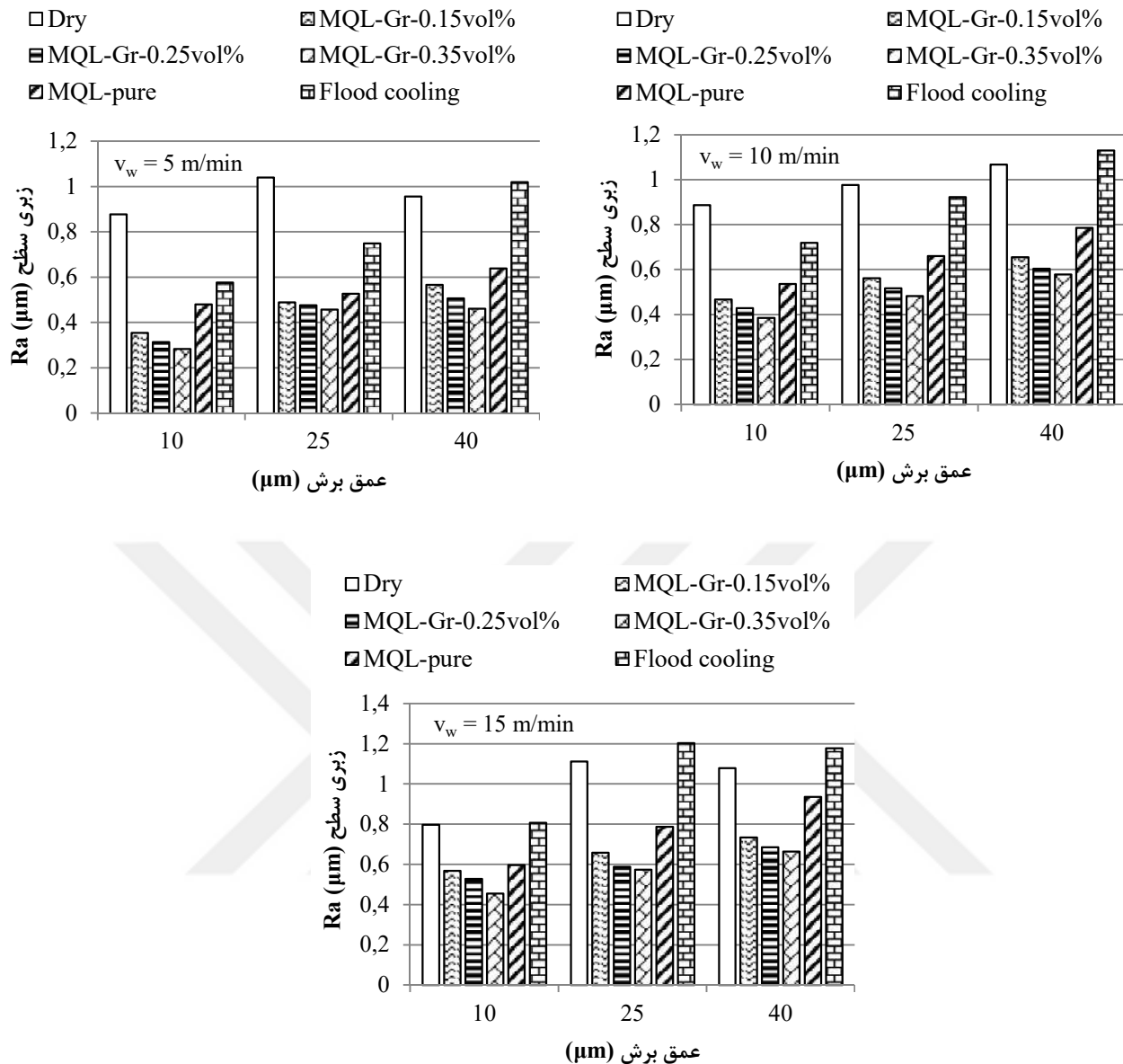
5-3-4- نقش روش روانکاری بر روی سلامت سطح قطعه کار

زبری سطح در جهت سنگ زنی یک پارامتر مهم در سطوح لغزشی نظیر سطوح یاتاقان ها محسوب می شود بطوریکه نتایج تحقیقات گذشته نشان دادند که حداقل سایش در شرایطی که جهت سنگ زنی با جهت لغزش سطوح هم امتداد باشند، قابل دستیابی است. همچنین، زبری سطح در جهت عرضی امتداد سنگ زنی یک فاکتور مهم از سطوح تحت بررسی است بگونه ای که میکروشیارها¹ بر روی سطوح سنگ زنی شده بعنوان میکروکانالهایی عمل می کنند که سبب تسریع در جریان روانکار و کاهش سایش سطوح لغزش می گردند [124]. میانگین حسابی ارتفاعات زبری سطحی (R_a) در جهات طولی و عرضی امتداد سنگ زنی تحت پارامترهای سنگ زنی مختلف و شرایط روانکاری متفاوت در شکل های 5-17 و 5-18 نمایش داده شده اند. چنانچه مشاهده می شود، زبری سطح قطعات در شرایط سنگ زنی خشک بالاترین مقادیر را تحت تمامی پارامترهای سنگ زنی بغیر از سنگ زنی جریان سیال در شرایط سنگ زنی خشن دارا می باشد. عدم وجود عمل خنک کاری و روانکاری و افزایش دمای قطعه کار در سنگ زنی خشک سبب جریان پلاستیکی مواد در طی درگیری ذرات ساینده و فلز شده و باعث ایجاد حفره هایی در سطح قطعه کار می گردد (شکل 5-19 و 5-20). با این وجود، دمای بالاتر ایجاد شده در سنگ زنی با مقادیر بالای پارامترهای عمق بار و سرعت قطعه کار سبب ایجاد یک لایه اکسیدی در سطح فلز در طی سنگ زنی می گردد [117]. این پدیده باعث کاهش نسبی زبری سطح در شرایط سنگ زنی خشک با عمق بار $40 \mu m$ و سرعت قطعه کار m/min 15 می شود.

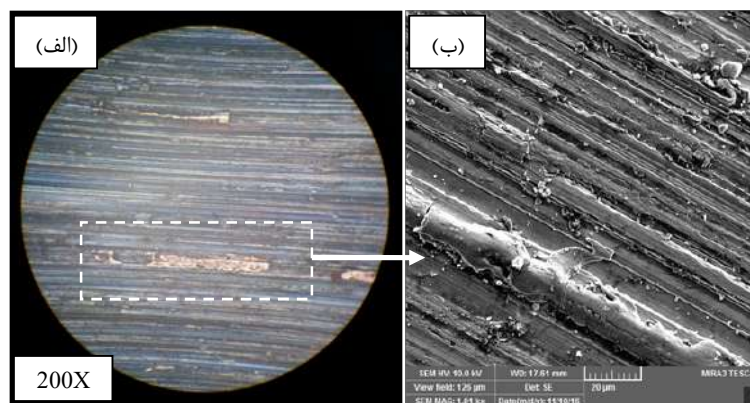
¹ Micro grooves



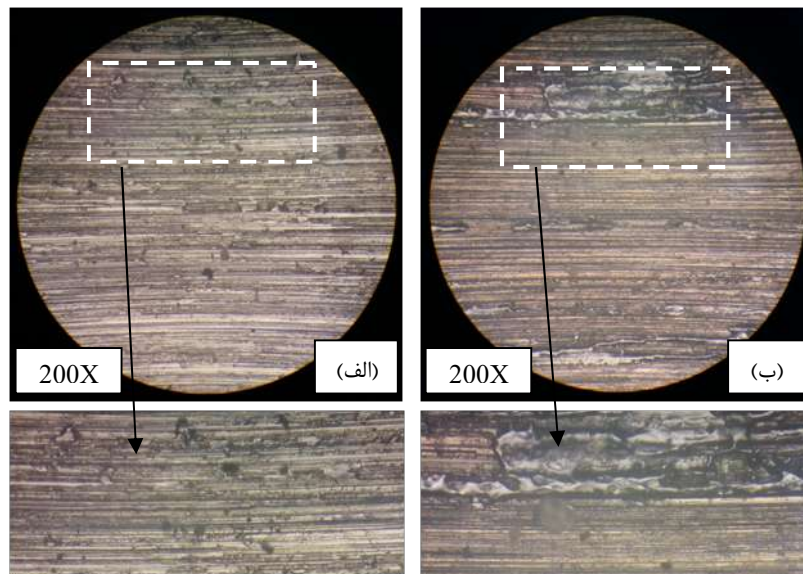
شکل 5-17 زبری سطح قطعات در امتداد جهت سنگ زنی در برابر عمق بار تحت شرایط خنک کاری مختلف.



شکل 5-18 زبری سطح قطعات در جهت عرضی امتداد سنگ زنی در برابر عمق بار تحت شرایط خنک کاری مختلف.



شکل 5-19 تصاویر میکروسکوپی سطوح سنگ زنی شده در شرایط خشک در عمق بار $25 \mu\text{m}$ و سرعت قطعه کار m/min 15؛ (الف) تصویر میکروسکوپ نوری و (ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی.

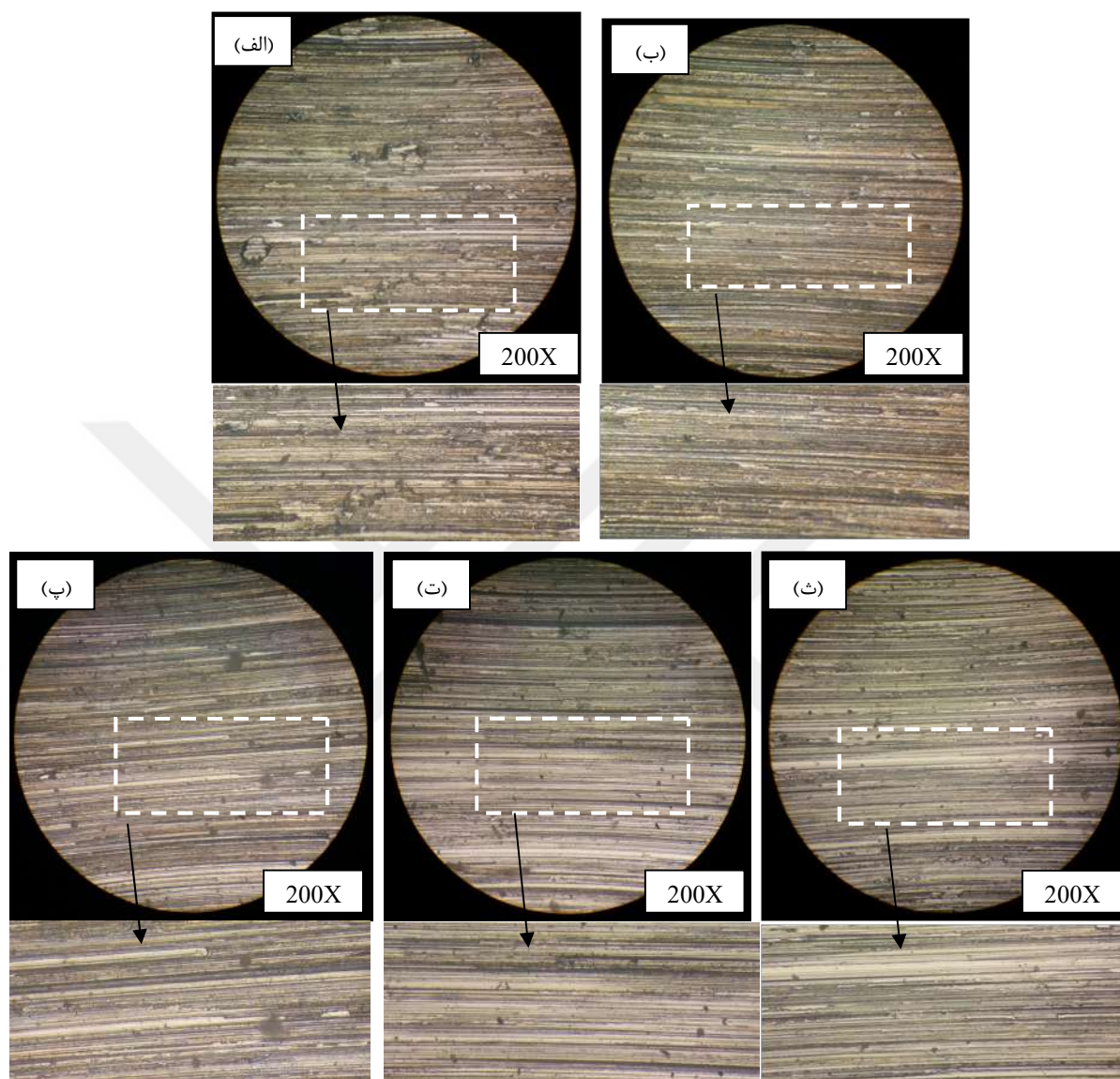


شکل 20-5 تصاویر میکروسکوپ نوری از سطوح سنگ زنی در شرایط سنگ زنی خشک و سرعت قطعه کار 15 m/min؛
(الف) $a_p = 10 \mu m$ و (ب) $a_p = 40 \mu m$.

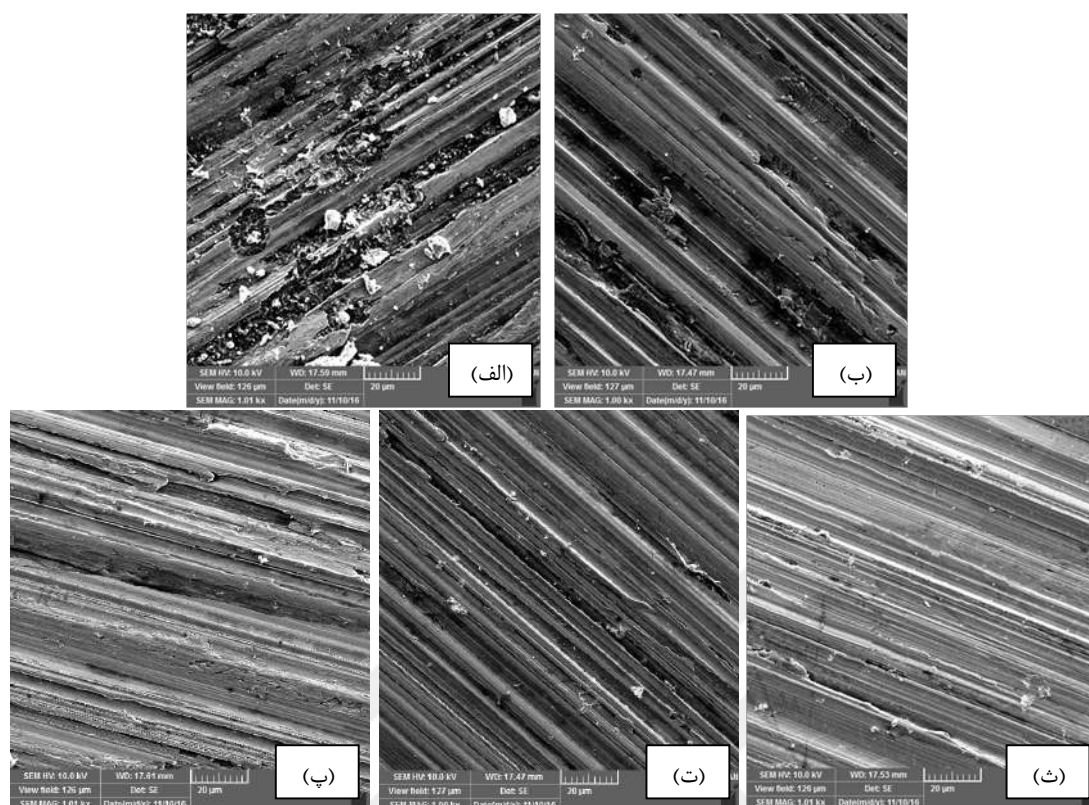
از سوی دیگر، با وجود اینکه در شرایط جریان سیال دمای سنگ زنی پایین است، عدم وجود روانکار مناسب باعث ایجاد زبری سطح بالای قطعه کار در مقایسه با روش های MQL خالص و MQL با نانوسیال گرافیت می شود. چنانچه در شکل 5-21 الف مشاهده می شود، ناکارایی مکانیزم روانکاری در شرایط جریان سیال تحت پارامترهای سنگ زنی خشن کاملاً آشکار است. با افزایش عمق برش، عمل شخم زنی ذرات ساییده تشدید شده و باعث تغییر شکل پلاستیکی فلز می شود که این تغییرات بر روی تصویر SEM در شکل 5-22 الف قابل مشاهده است. این شرایط منجر به زبری سطح بالاتر بخصوص در امتداد عرضی جهت سنگ زنی با ایجاد شیارهای عمیق تر در سطوح سنگ زنی می گردد.

بعلاوه، چنانچه در شکل های 5-21 تا 5-23 مشاهده می شود، سیستم MQL خالص در سنگ زنی دارای خواص روانکاری بهتری در مقایسه با خنک کاری جریان سیال با استفاده از روغن برش VIYER-3000 می باشد بگونه ای که شیارهای سایش و حفره های کمتری بر روی سطوح سنگ زنی شده مشاهده می شوند. مطابق نتایج ارائه شده در شکل های 5-17 و 5-18، در سنگ زنی با عمق بار $10 \mu m$ و سرعت قطعه کار 5 m/min، بکارگیری MQL خالص در مقایسه با روش جریان سیال سبب کاهش زبری سطح بترتیب به میزان 10/6 و 16٪ در امتداد طولی و عرضی نسبت به جهت سنگ زنی می گردد. بعلاوه، در شرایط سنگ زنی تحت پارامترهای خشن تر شامل عمق بار $25 \mu m$ و سرعت قطعه کار 15 m/min، بکارگیری MQL خالص در مقایسه با حالت جریان سیال سبب کاهش قابل ملاحظه ای در زبری سطح قطعات بترتیب برابر با 49/9 و 34/6٪ در امتداد طولی و عرضی نسبت به جهت سنگ زنی می شود. زنجیره های اسید چرب طولانی مولکول ها و حضور ترکیبات حاوی سولفور، کلرین و فسفر در روغن کانولا سبب ایجاد فیلم مولکولی می گردد که به سطح فلز کار می چسبد [119]. این فیلم روانکاری خوبی را در فشارهای کم تا متوسط ناحیه تماس در سنگ زنی از طریق عمق بار و سرعت کم فراهم می کند (شکل 5-23). با این حال، این فیلم نمی تواند فشارهای زیاد ناشی از عمق بار و سرعت قطعه کار بالا را تحمل

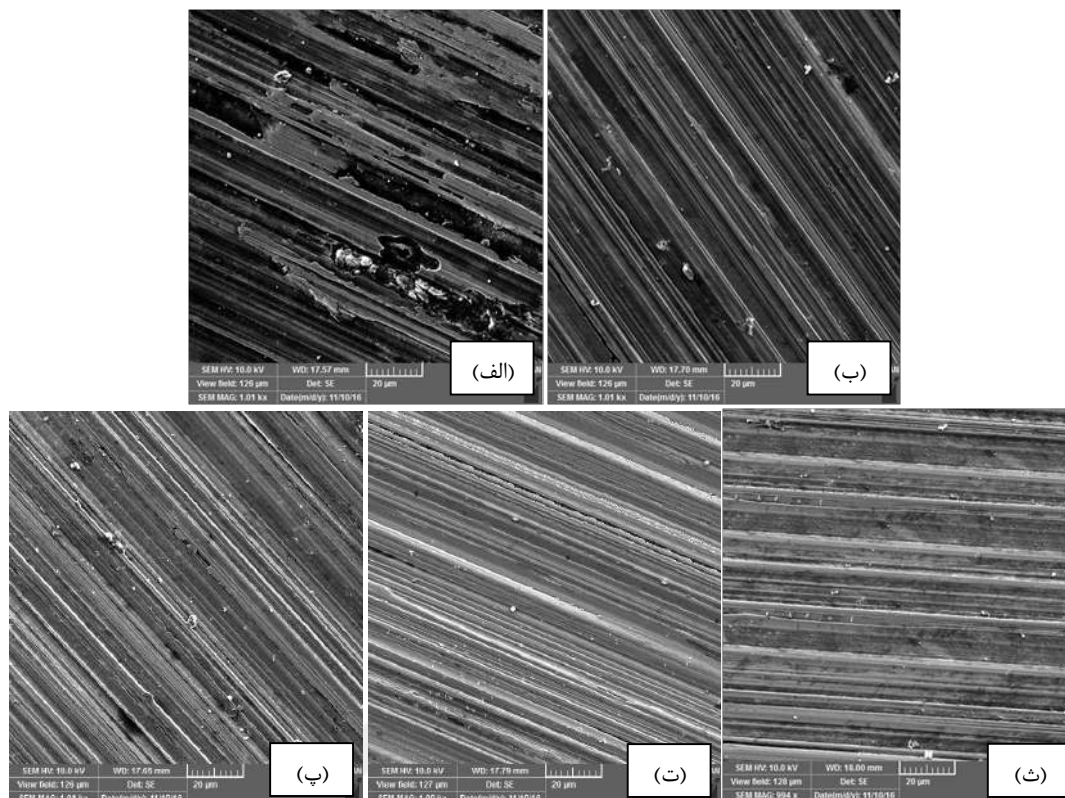
کند بطوریکه در این شرایط سیستم MQL خالص عملکرد ضعیفی را در مقایسه با MQL با نانوسیال گرافیت نمایش می دهد (شکل های 5-21 و 5-22).



شکل 5-21 تصاویر میکروسکوپ نوری از سطوح سنگ زنی شده تحت شرایط؛ الف) جریان سیال، ب) MQL خالص، پ) MQL با نانوسیال گرافیت 0/15 vol %، ت) MQL با نانوسیال گرافیت 0/25 vol %، ث) MQL با نانوسیال گرافیت 0/35 vol % ($v_w = 15 \text{ m/min}$ و $a_p = 40 \mu\text{m}$).



شکل 5-22 تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطوح سنگ زنی شده تحت شرایط؛ الف) جریان سیال، ب) MQL خالص، پ) MQL با نانوسیال گرافیت 0/15 vol %، ت) MQL با نانوسیال گرافیت 0/25 vol %، ث) MQL با نانوسیال گرافیت 0/35 vol % ($v_w = 15 \text{ m/min}$ و $a_p = 40 \mu\text{m}$).

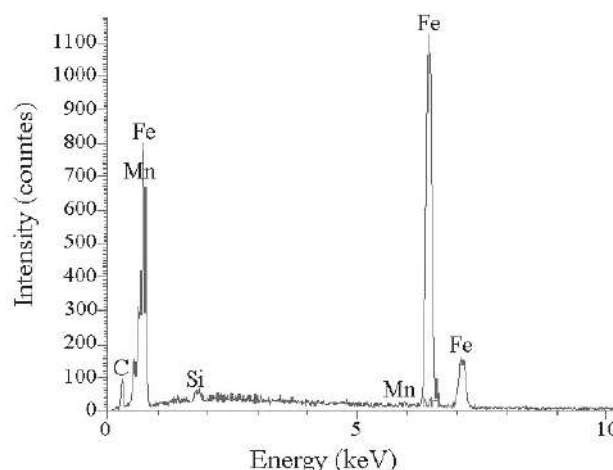


شکل 5-23 تصاویر میکروسکوپ الکترونی از سطوح سنگ زنی شده تحت شرایط: الف) جریان سیال، ب) MQL خالص، پ) MQL با نانوسیال گرافیت 0/15 vol %، ت) MQL با نانوسیال گرافیت 0/25 vol %، ث) MQL با نانوسیال گرافیت 0/35 vol % ($v_w = 5 \text{ m/min}$ و $a_p = 10 \text{ µm}$).

در شرایط استفاده از سیستم MQL با نانوسیال گرافیت، عمل لغزش صفحات در ساختار نانوذرات گرافیت سبب ایجاد یک فیلم روانکار مؤثر در ناحیه تماس مابین سطح آزاد ذرات ساینده و سطح سنگ زنی شده می گردد. بعلاوه، عکس العمل مابین تری گلیسراید در روغن کانولا و سطح فلز محیط ویسکوزی را برای نانوذرات گرافیت فراهم می کند که سبب تسریع در شکل گیری یک فیلم روانکاری مناسب می شود. این شرایط سبب بهبود کیفیت سطح قطعه کار از طریق ایجاد سطحی صاف در پروسه سنگ زنی می گردد. چنانچه در شکل های 5-22 تا 5-23 مشاهده می شود، کیفیت سطح قطعات سنگ زنی شده توسط سیستم MQL با نانوسیال گرافیت بهتر از سطوح مشابه از طریق بکارگیری شرایط MQL خالص و یا جریان سیال تحت پارامترهای مختلف سنگ زنی می باشد. مطابق آنچه که در تصاویر میکروسکوپی مشاهده می شود، سطوح سنگ زنی شده با استفاده از MQL با نانوسیال گرافیت نسبت به سطوح سنگ زنی شده با بهره گیری از MQL خالص و جریان سیال دارای شیارهای منظم تر با خطوط سایش کم عمق تر هستند. بعبارتی، شیارهای سطحی محو شده و سطح زنگ زنی هموار می گردد. مطابق نتایج حاصله، در سنگ زنی با عمق بار 10 µm و سرعت قطعه کار 5 m/min ، زبری سطح در امتداد سنگ زنی با افزایش درصد نانوذرات گرافیت از 0/15 تا 0/35 vol % در سیستم MQL نسبت به مقادیر مشابه در سنگ زنی با جریان سیال بترتیب به میزان 34/3، 36/7 و 45/6 کاهش می یابد. در مقایسه با سنگ زنی MQL خالص، این میزان کاهش در زبری سطح بترتیب برابر با 26/5، 29/3 و 39/1 می باشد. بعلاوه، در مقایسه با حالت بکارگیری سیستم جریان

سیال، استفاده از MQL با نانوسیال گرافیت سبب کاهش بیشتر زبری سطح قطعات سنگ زنی شده در شرایط سنگ زنی خشن می گردد. در سنگ زنی با عمق بار $40\text{ }\mu\text{m}$ و سرعت قطعه کار 15 m/min ، زبری سطح در امتداد سنگ زنی از طریق بکارگیری سیستم MQL با نانوسیال گرافیت نسبت به سیستم جریان سیال و با افزایش درصد حجمی نانوذرات در نانوسیال گرافیت مورد استفاده از $0/15$ تا $0/35\text{ vol \%}$ بترتیب به میزان $43/8$ ، $47/3$ و $48/8\%$ کاهش می یابد.

بعلاوه میکروسختی سطوح سنگ زنی شده نیز از طریق نفوذ نانوذرات گرافیت در سطوح سنگ زنی قطعات و عمل لغزش سطح آزاد ذرات ساییده بر روی سطح سنگ زنی شده بواسطه تشکیل فیلم روانکار مؤثر در سطح کار، افزایش می یابد. مطابق شکل 5-24، نتایج اسپکتروسکوپی تفرق الکترون¹ (EDS) تأیید کننده نفوذ نانوذرات گرافیت در سطح سنگ زنی شده هستند بگونه ای که درصد کربن از مقدار پایه $0/37\sim 0/44\text{ wt. \%}$ برای فولاد AISI 1045 تا حدود $8/17\text{ wt. \%}$ در سطوح سنگ زنی شده توسط سیستم MQL با نانوسیال گرافیت $0/35\text{ vol \%}$ افزایش می یابد [125]. مطابق نتایج میکروسختی سنجی که در جدول 5-9 ارائه شده است، سختی سطحی از طریق بکارگیری نانوسیال گرافیت با درصد حجمی $0/15$ تا $0/35\text{ vol \%}$ در سنگ زنی MQL از میزان $53/7\text{ HRC}$ تا حدود 56 HRC در شرایط عمق بار و سرعت قطعه کار کم تا مقادیر $58/5\text{ HRC}$ در سنگ زنی با عمق بار و سرعت قطعه کار زیاد افزایش می یابد. علت افزایش میکروسختی سطوح سنگ زنی شده با استفاده از سیستم MQL با نانوسیال گرافیت می تواند علاوه بر نفوذ عنصر کربن در سطح سنگ زنی شده، بدلیل تغییر شکل پلاستیکی لایه سطحی قطعه کار تحت فشار سنگ زنی باشد. این تغییر شکل پلاستیکی در تصاویر SEM از مقطع عرضی قطعات سنگ زنی شده که در شکل 5-25 نمایش داده شده اند قابل مشاهده می باشد.

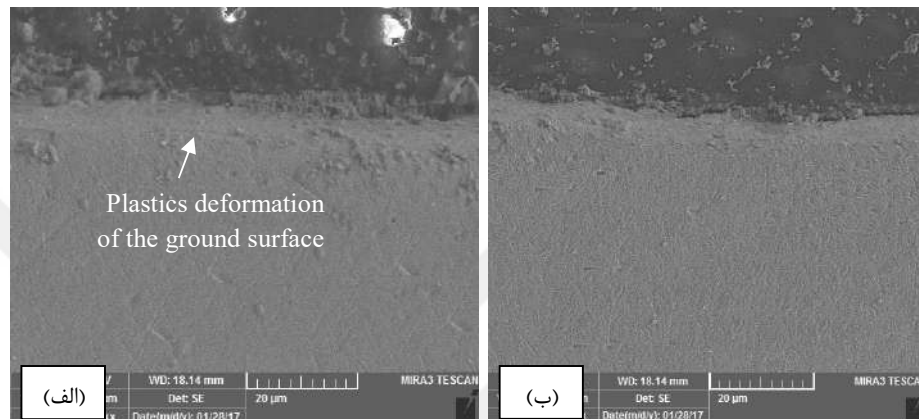


شکل 5-24 نتیجه EDS از سطح سنگ زنی شده با استفاده از سیستم MQL با نانوسیال گرافیت $0/35\text{ vol \%}$ تحت پارامتر سنگ زنی عمق بار $40\text{ }\mu\text{m}$ و سرعت قطعه کار 15 m/min .

¹ Electron dispersive spectroscopy

جدول 5-9 میکروسختی سطوح سنگ زنی شده (HRC) تحت شرایط روانکاری و پارامترهای سنگ زنی مختلف.

جریان سیال	MQL با نانوسیال گرافیت 0/35 vol %	MQL با نانوسیال گرافیت 0/25 vol %	MQL با نانوسیال گرافیت 0/15 vol %	MQL خالص	خشک	روش روانکاری	پارامتر سنگ زنی
53	57	55	53/7	52/9	51	$a_p = 10 \mu m$ $v_w = 5 \text{ m/min}$	
52/5	58/5	56/7	54	52	47	$a_p = 40 \mu m$ $v_w = 15 \text{ m/min}$	



شکل 5-25 تصاویر SEM از مقطع عرضی سطوح سنگ زنی شده تحت شرایط؛ الف) جریان سیال و ب) سیستم MQL با نانوسیال گرافیت 0/35 vol % ($a_p = 40 \mu m$ و $v_w = 15 \text{ m/min}$).

در کنار جنبه های مثبت ذکر شده در بکارگیری نانوسیال گرافیت در قالب سیستم MQL در پروسه سنگ زنی، نفوذ کربن در لایه سطحی قطعه کار می تواند نتایج ناخواسته ای را در سنگ زنی برخی از آلیاژها به همراه داشته باشد. به عنوان مثال، در مورد سوپر آلیاژهای پایه نیکل، نفوذ کربن در سطح کار می تواند پدیده جدایش و میکروساختار آلیاژ¹ را بخصوص در دماهای بالا تحت تاثیر قرار دهد [126]. شکل گیری شبکه پیوسته ای از کاربیدها در امتداد مرزدانه ها می تواند بطور قابل ملاحظه ای سبب کاهش مقاومت در برابر خزش این سوپر آلیاژها گردد. بعلاوه رسوب کاربید کروم در مرزدانه ها سبب کاهش فاز γ' ، که عامل اصلی حفظ استحکام در دماهای بالا است، می گردد. همچنین، تشکیل ناحیه های تهی از عنصر کروم در مرزدانه ها از طریق رسوب کاربید کروم در سوپر آلیاژهای نیکل و فولادهای ضد زنگ آستنیتی خطر خوردگی داخل دانه ای² (IGC) را در کاربردهایی که با مواد خورنده در ارتباط است افزایش می دهد و می تواند سبب ایجاد ترک در شرایط بارگذاری کششی و نیروهای رفت و برگشتی³ گردد [127, 128].

¹ Segregation and microstructure of alloy

² Intergranular corrosion

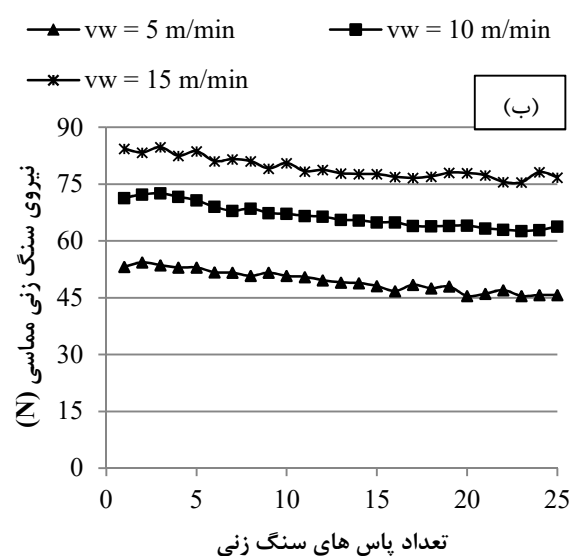
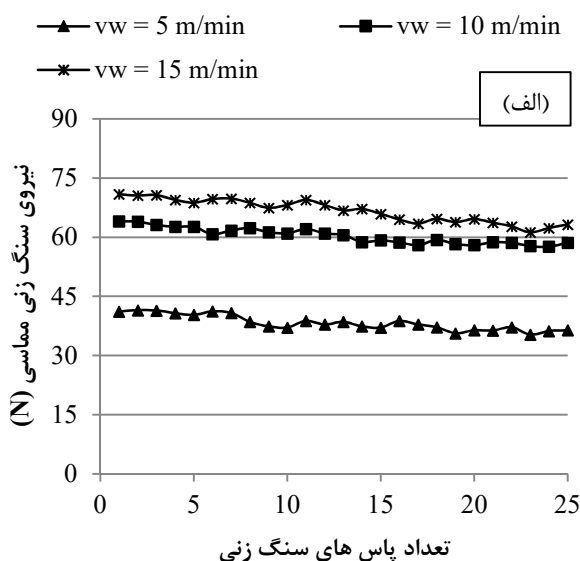
³ Reciprocating loads

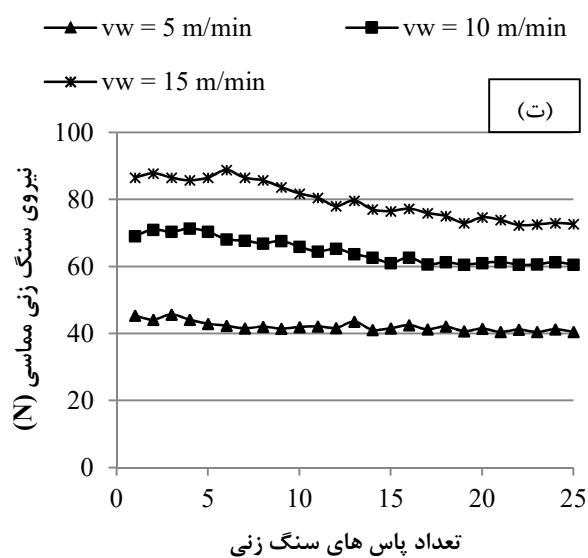
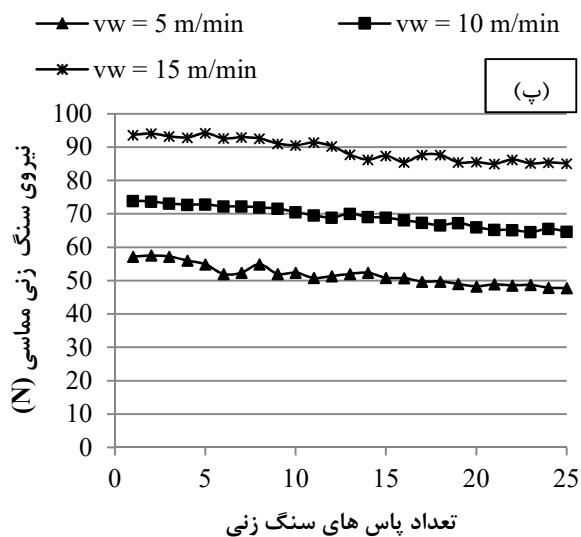
از سوی دیگر، با توجه به نتایج میکروسختی سنجی ارائه شده در جدول 5-9، تغییر شکل پلاستیکی مواد در شرایط سنگ زنی خشک با عمق بار و سرعت قطعه کار کم سبب افزایش میکروسختی سطوح سنگ زنی می گردد. با این حال، میکروسختی نسبتاً ثابت سطوح سنگ زنی شده در شرایط خشک با عمق بار و سرعت قطعه کار زیاد می تواند بدلیل پدیده تمپر مجدد قطعات سخت کاری شده از طریق افزایش دمای سطوح در طی سنگ زنی باشد که اثر سخت کاری سطحی قطعات ناشی از تغییر شکل پلاستیکی مواد را جبران می کند.

5-6- نتایج سنگ زنی MQL با استفاده از نانوسیال اکسید مس در فشار جریان 4 bar

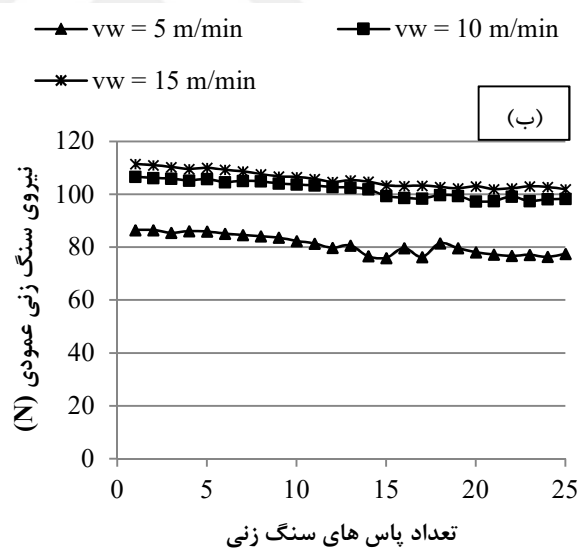
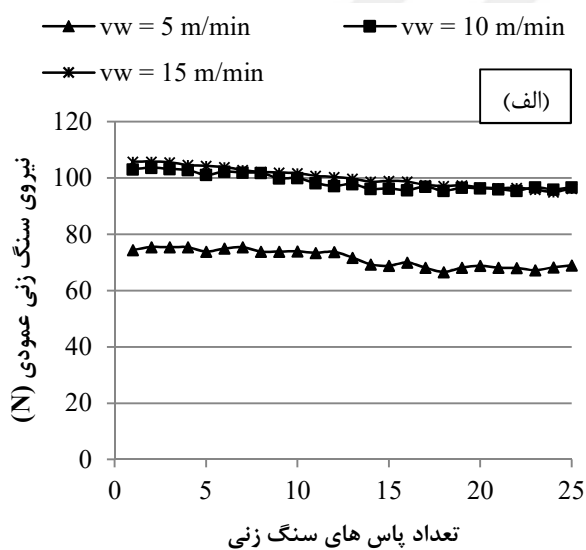
5-6-1- نقش روش روانکاری بر روی نیروی سنگ زنی

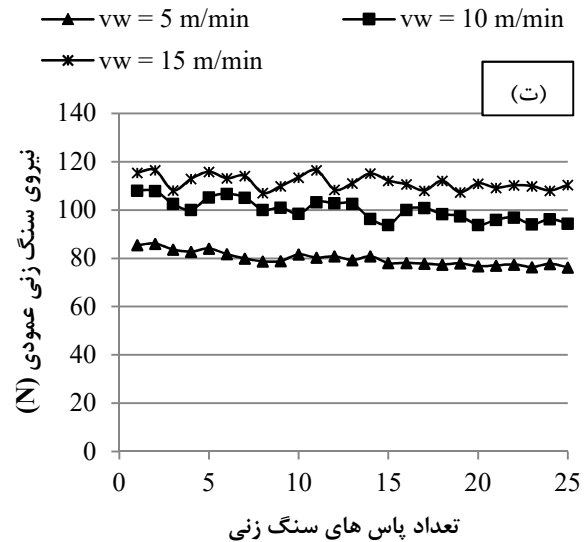
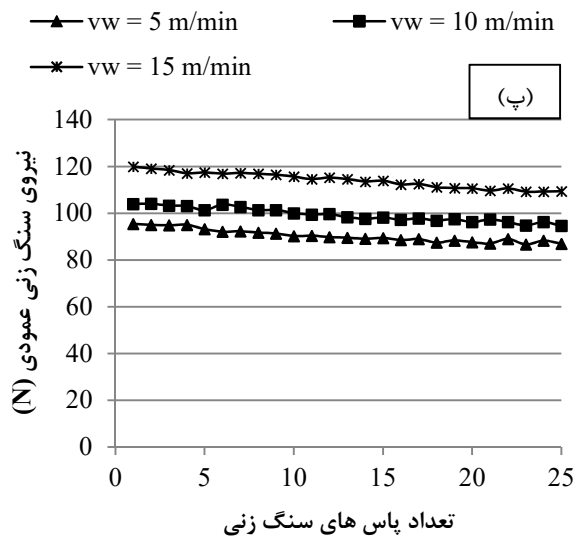
تغییرات نیروهای سنگ زنی مماسی و عمودی در پاس های متوالی سنگ زنی تحت شرایط MQL خالص و MQL با نانوسیال اکسید مس در عمق بار $40 \mu\text{m}$ به ترتیب در شکل های 5-26 و 5-27 نمایش داده شده اند. مطابق نتایج حاصله، در سنگ زنی MQL با نانوسیال اکسید مس یکنواختی بیشتری بین نیروهای مماسی و عمودی در پاس های متوالی بخصوص در سرعت بالای قطعه کار نسبت به حالت سنگ زنی با MQL خالص وجود دارد. با این حال، مقادیر نیروی سنگ زنی مماسی تحت شرایط روانکاری MQL با نانوسیال اکسید مس نسبت به حالت استفاده از سوسپانسیون خالص بالاتر بوده و این میزان اختلاف با افزایش درصد حجمی نانوذرات در سیال پایه افزایش می یابد. جهت بررسی بهتر مکانیزم حاکم در روانکاری نانوسیال اکسید مس، نیروهای سنگ زنی مماسی ویژه (F_t) و نسبت نیروها یا عبارتی ضریب اصطکاک (F_t/F_n) که نسبت نیروی مماسی سنگ زنی به نیروی عمودی است تحت شرایط مختلف سنگ زنی به ترتیب در شکل های 5-28 و 5-29 ارائه شده اند. این نتایج متوسط مقادیر اندازه گیری شده در پاس های متوالی سنگ زنی را تا عمقی که در آن ترموکوپل ها جازنی شده اند می باشد. نیروهای سنگ زنی مماسی ویژه بصورت نسبت نیروی برشی سنگ زنی بر پهنای درگیری قطعه کار-چرخ سنگ تعریف می شود.



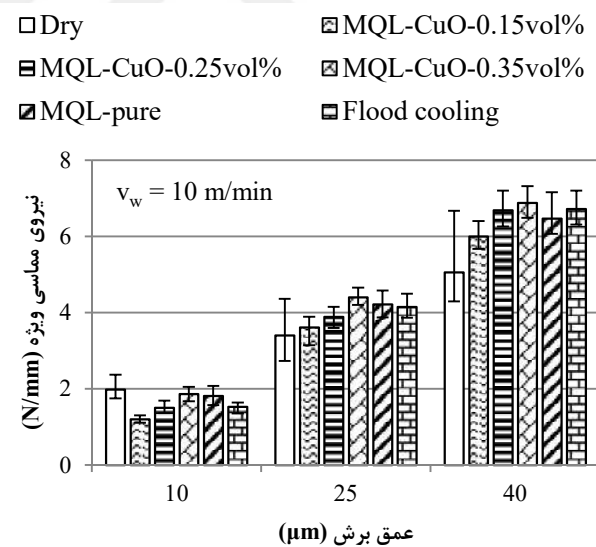
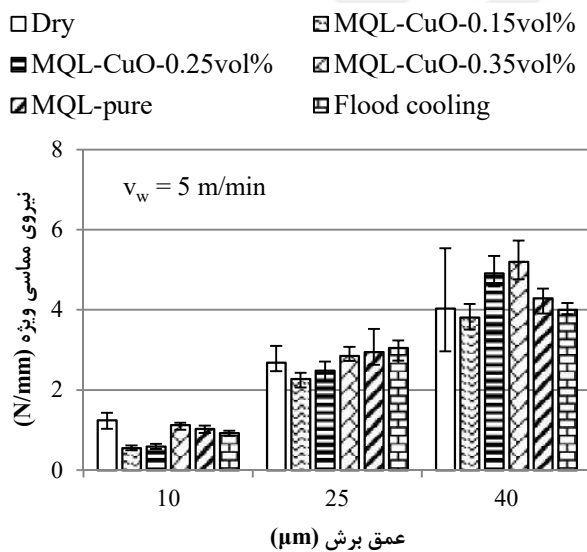


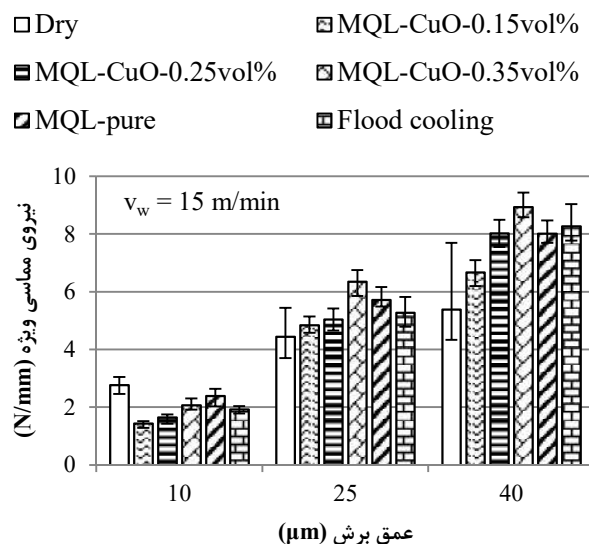
شکل 5-26 نیروی سنگ زنی مماسی در برابر پاس های سنگ زنی در عمق بار $40 \mu\text{m}$ تحت شرایط؛ الف) MQL با نانوسیال اکسید مس $0.15 \text{ vol } \%$ ، ب) MQL با نانوسیال اکسید مس $0.25 \text{ vol } \%$ ، پ) MQL با نانوسیال اکسید مس $0.35 \text{ vol } \%$ و ت) MQL خالص.



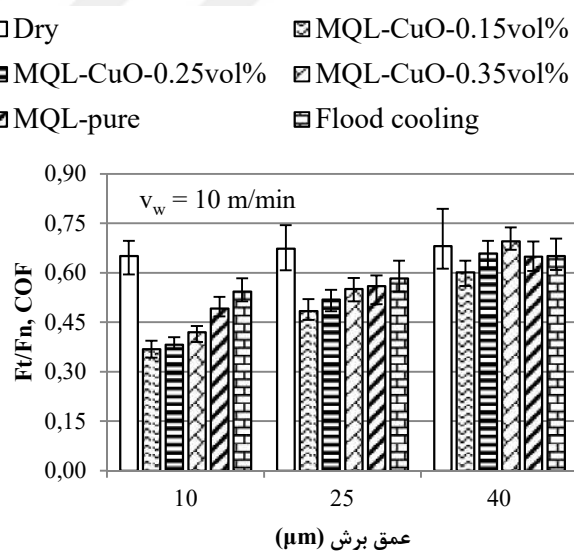
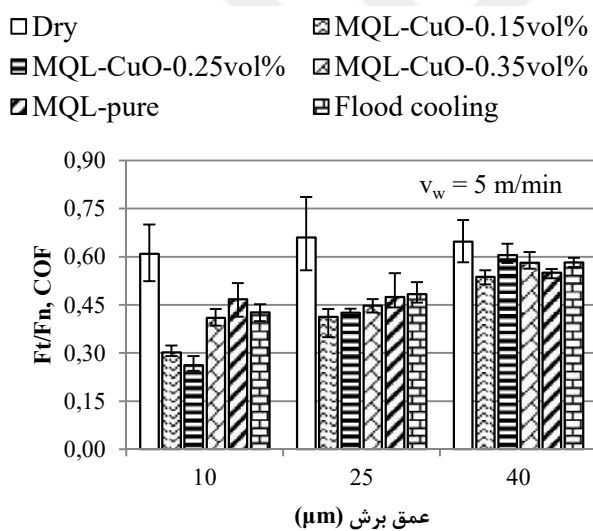


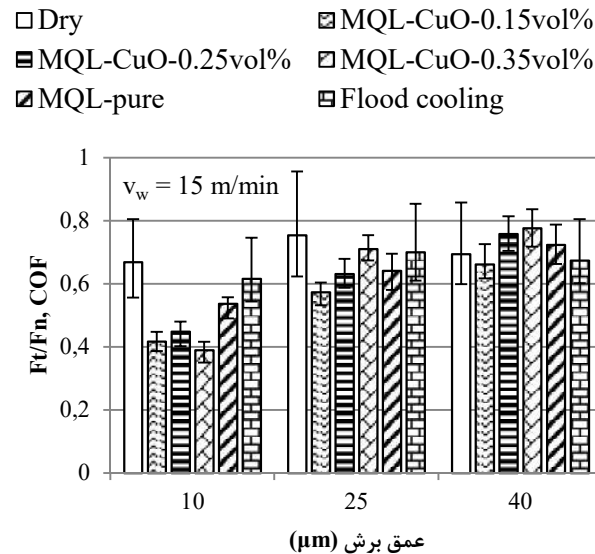
شکل 5-27 نیروی سنگ زنی عمودی در برابر پاس های سنگ زنی در عمق بار $40 \mu\text{m}$ تحت شرایط؛ الف) با MQL با نانوسیال اکسید مس $0.25 \text{ vol} \%$ (پ) ب) با MQL با نانوسیال اکسید مس $0.15 \text{ vol} \%$ (ت) ج) با MQL خالص (ت) و $0.35 \text{ vol} \%$ (ت).





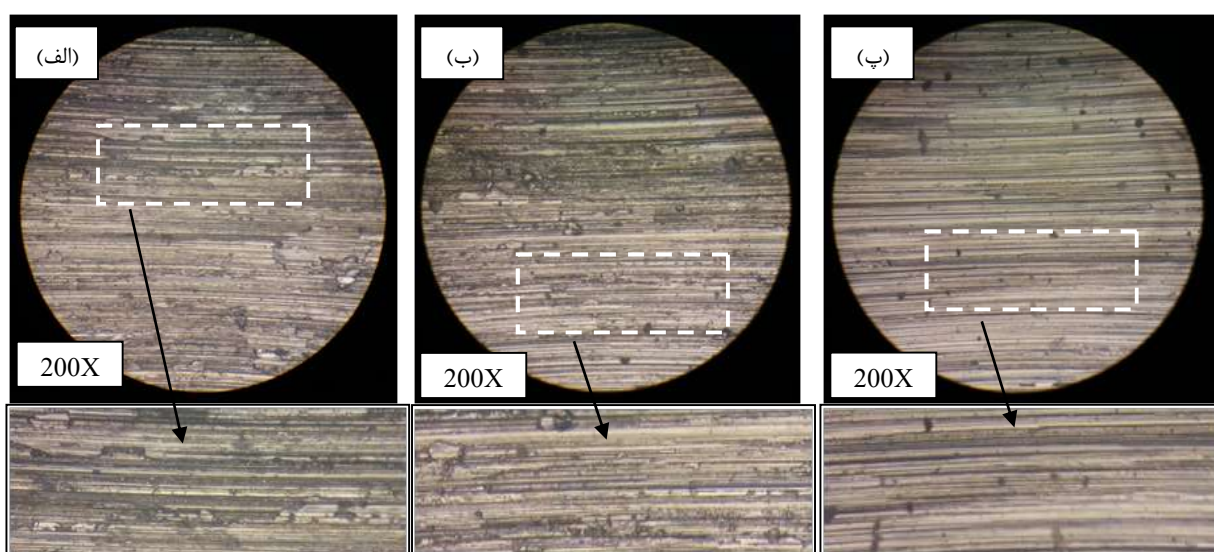
شکل 5-28 نیروی سنگ زنی مماسی ویژه در برابر عمق بار تحت شرایط خنک کاری مختلف.





شکل 5-29 نسبت نیروهای سنگ زنی در برابر عمق بار تحت شرایط خنک کاری مختلف.

مطابق تحقیقات صورت گرفته، نیروهای سنگ زنی به شکل گیری براده، عمل شخم زنی و لغزش ذرات ساینده بر روی سطح قطعه کار بستگی دارد [118]. چنانچه در بخش 5-5-1 نیز توضیح داده شد، نیروی سنگ زنی در حالت خشک بیشترین مقادیر را در عمق بار کم و سرعت های قطعه کار مختلف نسبت به دیگر حالت های روانکاری داشته و افزایش نسبتاً کمتری را با افزایش عمق بار نمایش می دهد. این پدیده ناشی از عمل لغزش ذرات ساینده بر روی سطح قطعه کار بدون حضور فیلم روانکار در ناحیه تماس سنگ زنی، تغییر شکل پلاستیکی فلز بجای عمل برش و افزایش دمای سطح کار است. این افزایش دما سبب شکل گیری فیلم اکسید فلزی در وجه مشترک چرخ سنگ-قطعه کار می شود که به عنوان روانکار عمل نموده و سبب کاهش نیروی مماسی سنگ زنی و ضریب اصطکاک (COF) می گردد.



شکل 5-30 تصاویر میکروسکوپ نوری از خطوط سایش سطوح سنگ زنی شده در شرایط روانکاری؛ (الف) خشک، (ب) جریان سیال و (پ) MQL خالص ($v_w = 5 \text{ m/min}$ و $a_p = 25 \text{ μm}$).

شکل 5-30 نمایش دهنده تصاویر میکروسکوپ نوری از سطوح سنگ زنی شده تحت شرایط روانکاری خشک، جریان سیال و MQL خالص در سرعت قطعه کار 5 m/min و عمق بار 25 μm می باشد. با توجه به این تصاویر چنانچه پیشتر نیز توضیح داده شد، عملکرد بهتر روغن گیاهی در سنگ زنی با پارامترهای برش متوسط نسبت به حالت روانکاری جریان سیال آشکار است. حضور ترکیبات سولفور، کلرین و فسفر در روغن کانولا و وجود مولکول های اسید چرب با زنجیره های طولانی سبب ایجاد فیلم روانکاری می گردد که به سطح فلز کار می چسبد که اصطلاحاً روانکاری مرزی یا تریبوفیلیم خوانده می شود [118]. شکل گیری ترکیبات آهنی سولفیدها، کلریدها و فسفیدها و اتصال انتهای قطبی مولکول های تری گلیسرید روغن گیاهی به سطح فلز کار سبب کاهش نیروی مماسی سنگ زنی و به طبع آن ضریب اصطکاک تحت پارامترهای متوسط عمق بار و سرعت قطعه کار نسبت به شرایط سنگ زنی با جریان سیال می گردد.

از سوی دیگر، در شرایط سنگ زنی MQL با نانوسیال اکسید مس، نیروی مماسی ویژه و نسبت نیروهای سنگ زنی (F_t/F_n) در اکثر پارامترهای برشی نسبت به شرایط MQL خالص و جریان سیال کمتر است. این کاهش در انرژی سنگ زنی و ضریب اصطکاک به شکل گیری یک فیلم روانکار در سطح فلز از طریق نفوذ نانوذرات اکسید مس در ناحیه تماس چرخ سنگ-قطعه کار مرتبط است. دو مکانیزم در ارتباط با ارتقاء قابلیت روانکاری از طریق بکارگیری نانوسیال حاوی نانوذرات اکسید مس مطرح است [109]. (1) ذرات کروی بصورت میکرو-بلبرینگ¹ عمل کرده و سبب روانکاری غلظتی² در وجه مشترک چرخ سنگ-قطعه کار گردیده و از این رو باعث کاهش نیروهای لغزشی و کاهش ضریب اصطکاک می گردد. (2) شکل گیری فیلم محافظ شیشه ای³ در ناحیه تماس از طریق چسبیدن برخی از نانوذرات به سطح ساییده شده قطعه کار. نتایج اسپکتروسکوپی تفرق الکترون (EDS) تایید کننده نفوذ نانوذرات اکسید مس در سطح سنگ زنی شده نمونه ها هستند (شکل 5-31). این نتایج برای شرایط بکارگیری نانوسیال اکسید مس با درصدهای مختلف حجمی نانوذرات در سیال پایه در سنگ زنی MQL با عمق بار 25 μm و سرعت قطعه کار 5 m/min در جدول 5-10 ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصله کسر وزنی عنصر مس در شرایط روانکاری MQL با نانوسیال CuO افزایش می یابد. حضور نانوذرات سبب کاهش تماس مابین وجه آزاد ذرات ساییده و سطح فلز گردیده، باعث کاهش نیروی لغزشی و ضریب اصطکاک می گردد.

از سوی دیگر، بزرگی نیروی لغزشی با غلظت نانوذرات اکسید مس و فشار تماس مابین چرخ سنگ و قطعه کار تغییر می نماید. در درصدهای حجمی پایین نانوذرات اکسید مس در سیال پایه، روانکاری مؤثری از طریق اثر ساچمه های غلظتی⁴ ناشی از عملکرد نانوذرات مس بصورت ساچمه هایی در ابعاد نانو در ناحیه تماس حاصل می شود. همچنین این اثر در نانوسیالاتی با درصدهای بالای حجمی نانوذرات در نانوسیال اکسید مس در شرایط فشار تماس نسبتاً پایین که در نتیجه عمق بار کم حاصل می شود، قابل مشاهده است. در نقطه مقابل، در شرایط بکارگیری

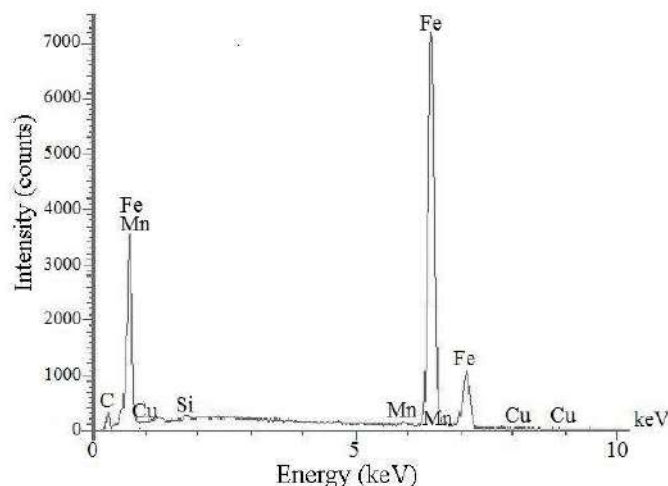
¹ Micro-balls

² Bearing action

³ Glossy protection film

⁴ Ball-bearing effect

نانوسیال اکسید مس با درصد حجمی بالای نانوذرات در سیال پایه و فشار بالا در ناحیه تماس در نتیجه عمق بار زیاد، نانوذرات پستی و بلندی های سطح فلز را پر می کنند¹. در این شرایط، عکس العمل و بهم چسبیدگی نانوذرات منجر به تشکیل فیلم لایه ای جامد² مابین سطوح تماس شده و جریان پلاستیکی قله برجستگی های سطح فلز³ منجر به پهنای کمتر سطح مقطع خطوط سایش در سطوح سنگ زنی شده می گردد. در این شرایط، مطابق نتایج ارائه شده در شکل های 5-28 و 5-29، نیروی سنگ زنی ویژه و ضریب اصطکاک در مقایسه با شرایط سنگ زنی MQL با نانوسیال اکسید مس حاوی درصد حجمی پایین نانوذرات در سیال پایه، افزایش می یابد. همچنین تصاویر میکروسکوپی از سطوح سنگ زنی شده تحت شرایط روانکاری مختلف در عمق بار $40 \mu\text{m}$ و سرعت قطعه کار 15 m/min در شکل 5-33 نمایش داده شده است. بر اساس این تصاویر SEM، حضور خطوط سایش در شرایط روانکاری MQL خالص و جریان پلاستیکی نوک قله های برجستگی های سطحی در شرایط روانکاری MQL با نانوسیال اکسید مس حاوی غلظت بالای نانوذرات در سیال پایه تایید کننده توضیحات داده شده است. این نتایج در مطابقت با نتایج مشاهده شده از سوی توتاکات⁴ و همکاران می باشد [129].



شکل 5-31 نتایج اسپکتروسکوپی تفرق الکترون (EDS) از سطح سنگ زنی شده تحت شرایط روانکاری MQL با نانوسیال اکسید مس 0/25 vol % ($v_w = 5 \text{ m/min}$ و $a_p = 25 \mu\text{m}$).

جدول 5-10 کسر وزنی عنصر مس در سطح سنگ زنی شده با استفاده از روانکاری MQL با نانوسیال اکسید مس در غلظت های حجمی مختلف نانوذرات در سیال پایه ($v_w = 5 \text{ m/min}$ و $a_p = 25 \mu\text{m}$).

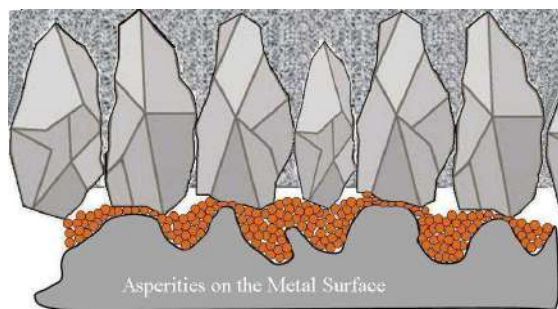
0/35	0/25	0/15	درصد حجمی نانوذرات اکسید مس در سیال پایه (vol.%)
0/42	0/14	0/08	کسر وزنی عنصر مس در سطح سنگ زنی شده (wt.%)

¹ Fill the asperity valleys on the metal surface

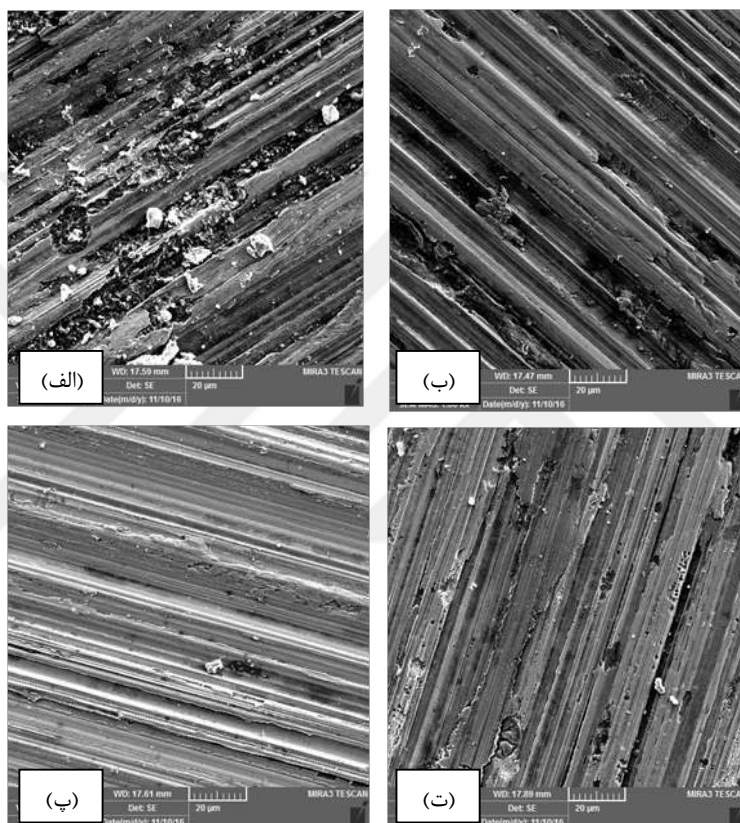
² Solid lamellar film

³ Plastic flow of the tips of metal surface asperities

⁴ Thottackkad et al.



شکل 5-32 شماتیکی از پر شدن پستی و بلندی های سطح تحت سنگ زنی توسط نانوذرات اکسید مس [130].



شکل 5-33 تصاویر SEM از سطوح سنگ زنی شده در شرایط؛ (الف) جریان سیال، (ب) MQL خالص، (پ) MQL با نانوسیال اکسید مس 0/15 vol % و (ت) MQL با نانوسیال اکسید مس 0/35 vol %
($v_w = 15 \text{ m/min}$ و $a_p = 40 \mu\text{m}$).

5-6-2- نقش روش روانکاری بر روی دمای سنگ زنی

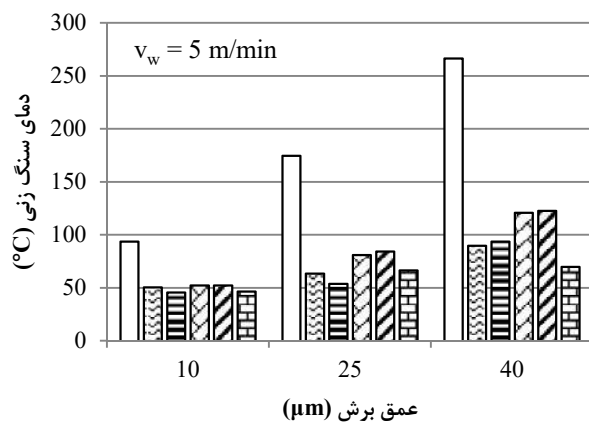
دمای سطح سنگ زنی در شرایط مختلف روانکاری و تحت پارامترهای مختلف برش در شکل 5-34 نمایش داده شده است. چنانچه در بخش 5-5-2 نیز توضیح داده شد، دمای سنگ زنی در حالت روانکاری خشک بالاترین مقادیر را در بین دیگر روش های روانکاری بدلیل نبود عمل خنک کاری و روانکاری در این روش دارا می باشد. اثرات سوختگی و جریان پلاستیکی مواد در سطح کار از جمله آسیب های حرارتی روش سنگ زنی خشک محسوب می

شوند. در نقطه مقابل، سنگ زنی به روش جریان سیال کمترین دما را در حین پروسه براده برداری تولید می نماید. با توجه به نزدیک بودن مقادیر انرژی برش در روش روانکاری جریان سیال با روش MQL خالص، دلیل دمای کمتر در پروسه سنگ زنی با استفاده از روش جریان سیال قابلیت دفع حرارتی بالاتر این روش از ناحیه سنگ زنی می باشد. نتایج عددی محاسبه شده برای ضریب همرفت حرارتی سیستم های خنک کاری مختلف که در بخش 3-5 ارائه گردید، بالاترین مقدار CHTC را برای حالت جریان سیال نمایش می دهد. مجدداً مقدار CHTC برای سیستم MQL خالص بالاتر از مقدار مشابه در مورد سیستم MQL با نانوسیال اکسید مس می باشد. با این وجود، دمای سطوح سنگ زنی در حالت روانکاری MQL خالص کمتر از MQL با نانوسیال CuO نمی باشد. این امر به نیروی مماسی سنگ زنی و سهم انرژی قطعه کار از حرارت تولید شده در حین پروسه سنگ زنی مرتبط است. سهم انرژی حرارتی قطعه کار تحت شرایط مختلف روانکاری در شکل 5-35 نمایش داده شده است. مطابق نتایج ارائه شده، سهم انرژی قطعه کار با افزایش درصد نانوذرات در سیال پایه در سیستم روانکاری MQL با نانوسیال اکسید مس کاهش می یابد. این پدیده به کاهش دمای سطح سنگ زنی علاوه بر افزایش نیروی مماسی سنگ زنی با افزایش درصد حجمی نانوذرات در سیال پایه در شرایط روانکاری MQL با نانوسیال اکسید مس نسبت به روانکاری جریان سیال و MQL خالص منجر می شود. دلیل این امر می تواند تغییر مکانیزم حاکم در حین عمل سنگ زنی با کاهش عمل شخم زنی¹ و افزایش برش بدلیل شکل گیری فیلم لایه ای روانکار بر روی سطح فلز باشد. حضور نانوذرات اکسید مس بسته های هوایی کوچک مابین چرخ ساینده و قطعه کار را در ناحیه تماس سنگ زنی پر می کند که سبب کاهش مقاومت حرارتی تماسی مابین چرخ و قطعه کار می شود. این پدیده بدلیل آنکه ضریب هدایت حرارتی چرخ سنگ Al_2O_3 کمتر از فولاد AISI 1045 است باعث کاهش مقاومت حرارتی تماسی و تسهیل در نفوذ حرارت به قطعه کار می شود. اما در مجموع بدلیل آنکه پدیده اصطکاک غلتشی بجای اصطکاک لغزشی در ناحیه تماس سنگ زنی ناشی از عملکرد نانوذرات CuO در ناحیه تماس بصورت نانو-ساچمه ها حاکم است، دمای سنگ زنی نسبت به حالت روانکاری جریان سیال و MQL خالص کاهش می یابد. افزایش نیروی مماسی سنگ زنی با افزایش درصد حجمی نانوذرات در سیال پایه در نانوسیالات اکسید مس مورد استفاده در سیستم روانکاری MQL مربوط به عکس العمل مابین نانوذرات و افزایش نیروی غلتشی مورد نیاز در سیستم روانکاری غلتشی در وجه مشترک بین ابزار و قطعه کار است. این درحالی است که نقش اصطکاک لغزشی کاهش یافته و از این جهت سهم حرارتی قطعه کار و دمای سنگ زنی با بکارگیری نانوسیال اکسید مس با درصد بالاتر حجمی نانوذرات در سیال پایه کاهش می یابد. نتایج مدل FDM از نحوه توزیع حرارت در امتداد عمقی قطعه کار از سطح سنگ زنی تحت عمق بار $40\text{ }\mu\text{m}$ که در شکل 5-36 ارائه شده اند نمایش دهنده نقش سیستم خنک کاری بر روی افزایش دمای قطعه کار در حین پروسه سنگ زنی می باشد. مطابق نتایج حاصله، با افزایش درصد حجمی نانوذرات در سیال پایه در سیستم MQL با نانوسیال اکسید مس، گرادیان حرارتی و عمق نفوذ حرارت در قطعه کار در حین پروسه سنگ زنی در شرایط سرعت بالای قطعه کار کاهش می یابد.

¹ Ploughing action

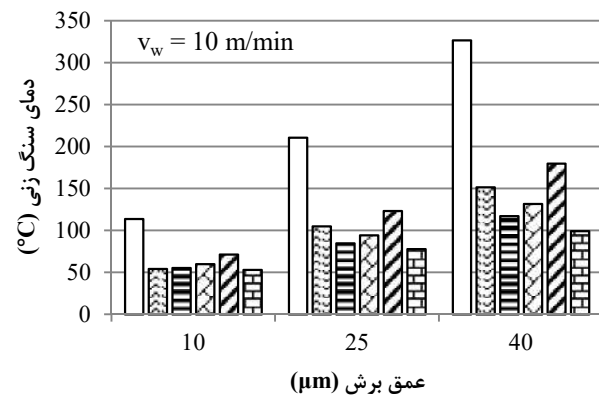
□ Dry
 ■ MQL-CuO-0.25vol%
 ▨ MQL-pure

▩ MQL-CuO-0.15vol%
 ▤ MQL-CuO-0.35vol%
 ▧ Flood cooling



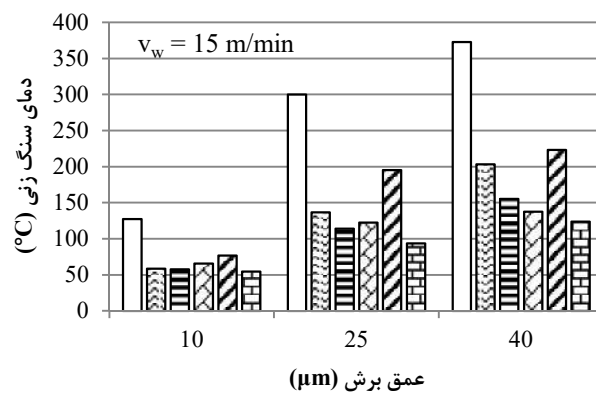
□ Dry
 ■ MQL-CuO-0.25vol%
 ▨ MQL-pure

▩ MQL-CuO-0.15vol%
 ▤ MQL-CuO-0.35vol%
 ▧ Flood cooling



□ Dry
 ■ MQL-CuO-0.25vol%
 ▨ Veg-pure MQL

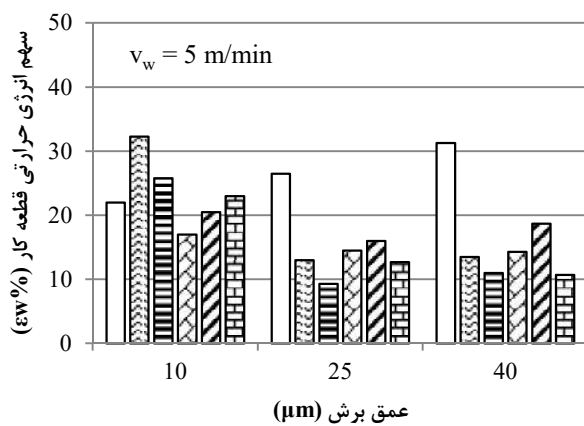
▩ MQL-CuO-0.15vol%
 ▤ MQL-CuO-0.35vol%
 ▧ Flood cooling



شکل 5-34 دمای سنگ زنی در برابر عمق بار تحت شرایط خنک کاری مختلف.

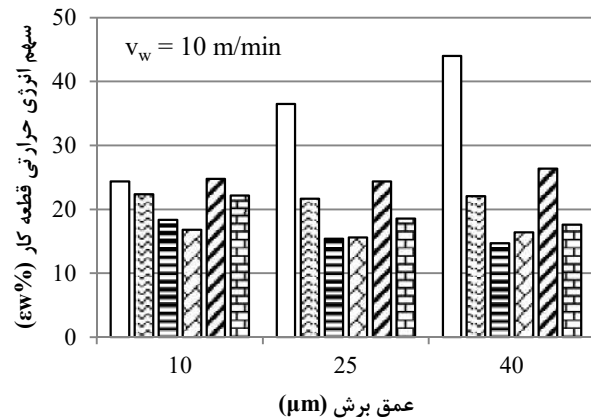
□ Dry
 ■ MQL-CuO-0.25vol%
 ▨ MQL-pure

▩ MQL-CuO-0.15vol%
 ▤ MQL-CuO-0.35vol%
 ▧ Flood cooling



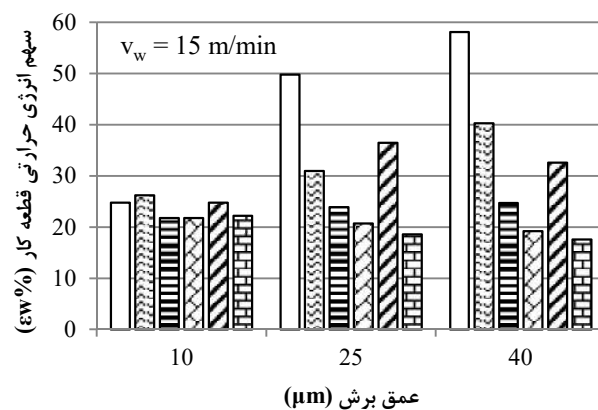
□ Dry
 ■ MQL-CuO-0.25vol%
 ▨ MQL-pure

▩ MQL-CuO-0.15vol%
 ▤ MQL-CuO-0.35vol%
 ▧ Flood cooling

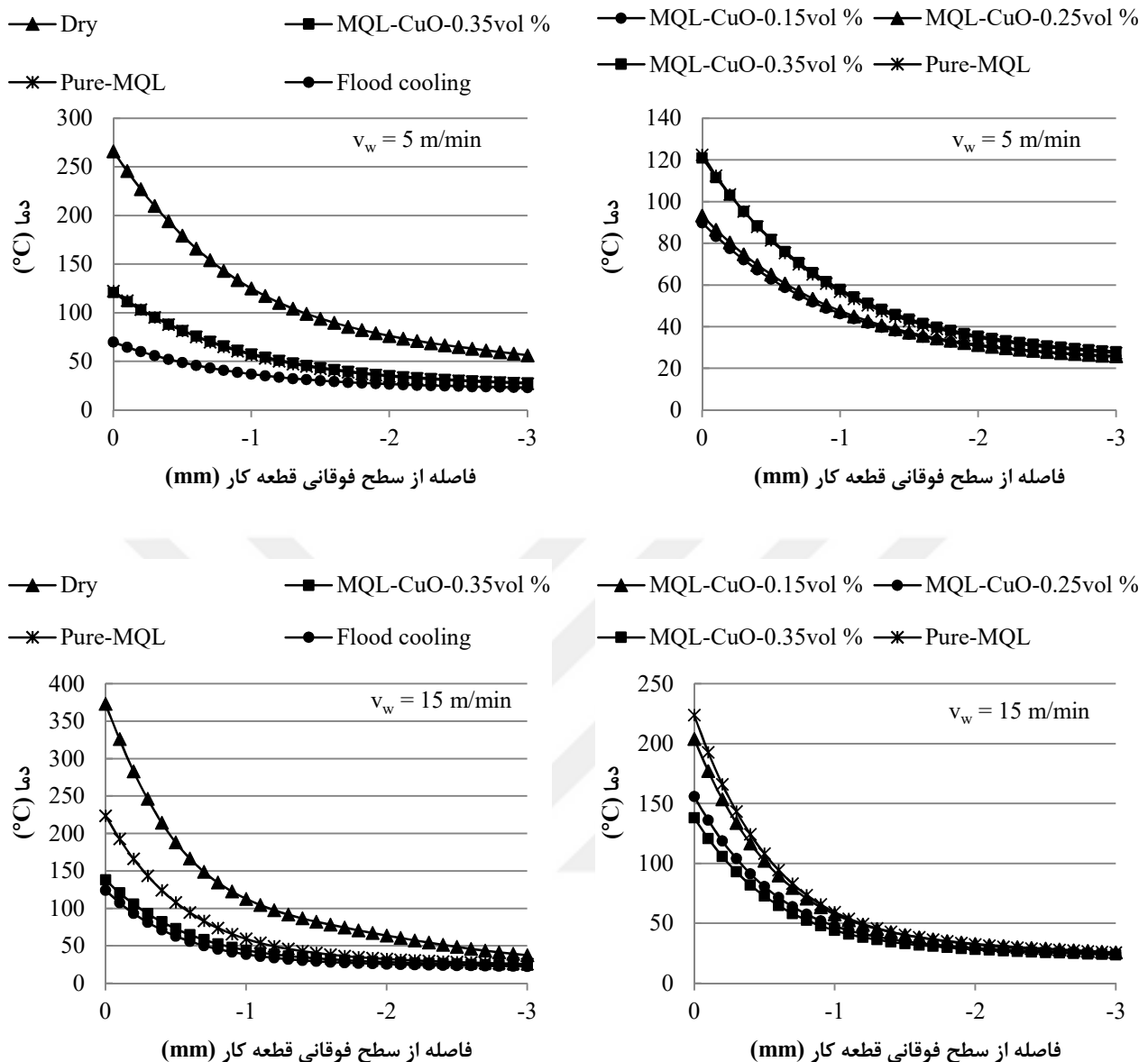


□ Dry
 ■ MQL-CuO-0.25vol%
 ▨ MQL-pure

▩ MQL-CuO-0.15vol%
 ▤ MQL-CuO-0.35vol%
 ▧ Flood cooling



شکل 5-35 سهم انرژی حرارتی قطعه کار در برابر عمق بار تحت شرایط خنک کاری مختلف.

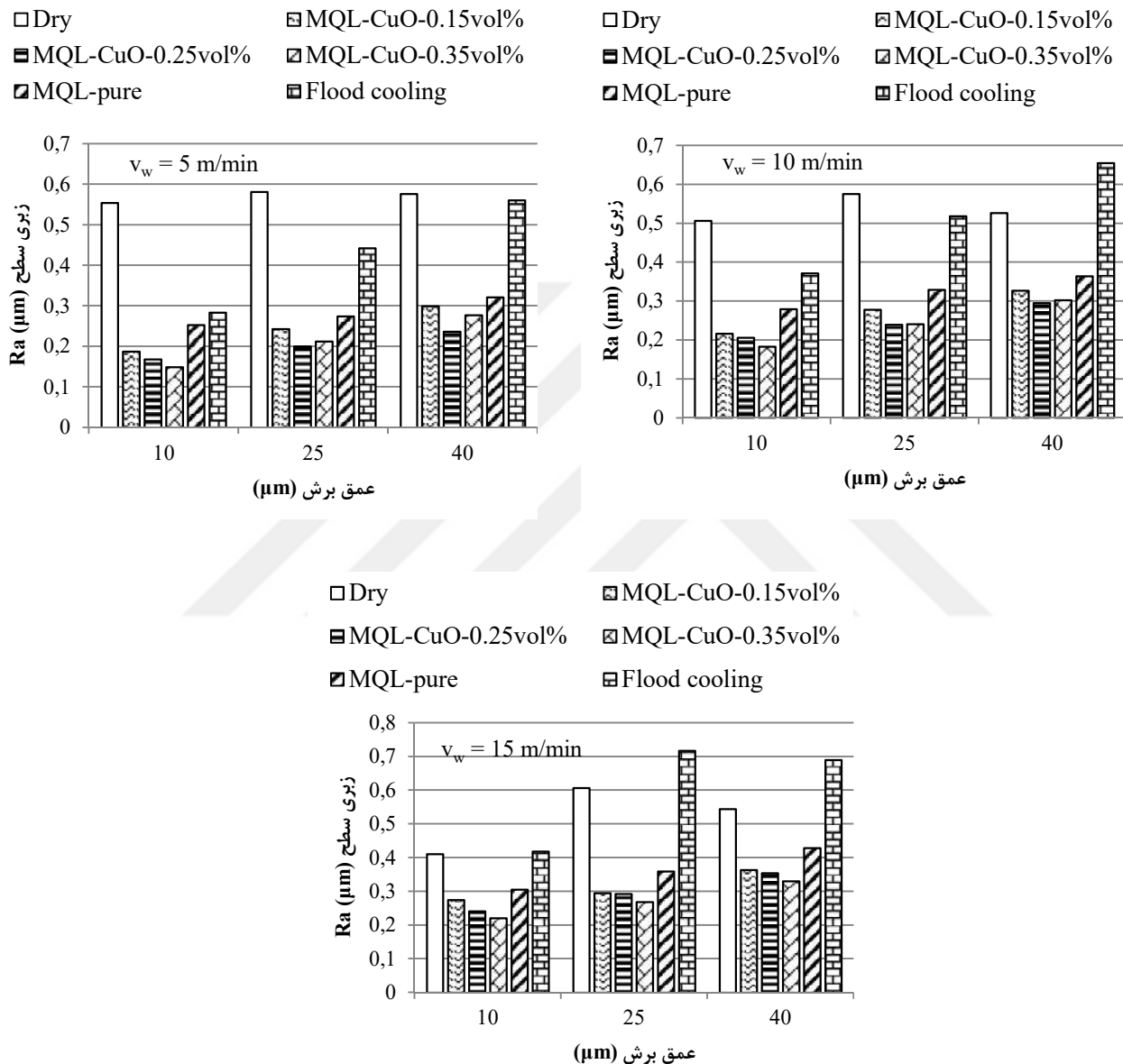


شکل 5-36 نحوه توزیع دما در امتداد عمقی قطعه کار تحت شرایط خنک کاری مختلف ($a_p = 40 \mu\text{m}$).

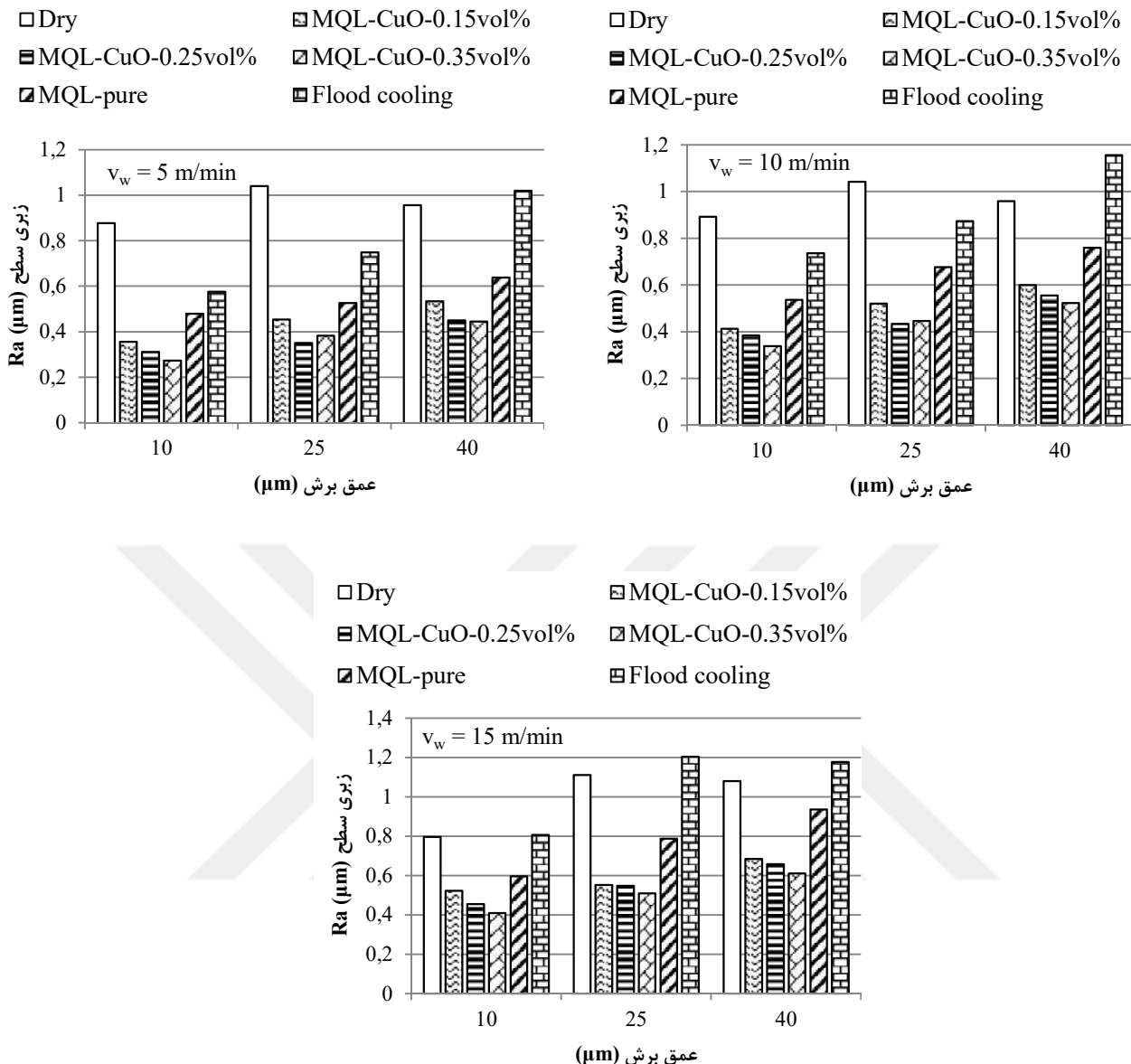
5-6-3 نقش روش روانکاری بر روی سلامت سطح قطعه کار

میانگین حسابی ارتفاعات زبری سطح (R_a) در جهات طولی و عرضی نسبت به امتداد سنگ زنی تحت پارامترهای سنگ زنی مختلف و در شرایط روانکاری متفاوت بترتیب در شکل های 5-37 و 5-38 نمایش داده شده اند. مطابق نتایج حاصله، قطعات سنگ زنی شده در شرایط روانکاری خشک بالاترین زبری سطح را در تمامی پارامترهای سنگ زنی نسبت به دیگر روش های روانکاری به جز روانکاری جریان سیال تحت پارامترهای سنگ زنی خشن دارا می باشد. افزایش دما در حین سنگ زنی خشک و به تبع آن جریان پلاستیکی فلز و ایجاد حفره ها در سطح سنگ زنی شده از دلایل افزایش زبری سطح در حالت سنگ زنی خشک می باشد. این اثرات منفی در تصویر SEM از سطوح سنگ زنی شده در عمق بار $40 \mu\text{m}$ در شکل 5-13 قابل مشاهده است. بعلاوه، در سنگ زنی با استفاده از روش

روانکاری جریان سیال، عدم وجود روانکاری مناسب در وجه مشترک چرخ سنگ - قطعه کار سبب ایجاد سطحی خشن ناشی از عمل شخم زنی تحت شرایط عمق بار و سرعت قطعه کار بالا می گردد. ایجاد ناهمواری های سطحی و اثرات شخم زنی ذرات ساینده بر روی سطح فلز کار در شرایط سنگ زنی جریان سیال در تصویر SEM سطح قطعه کار که در شکل 5-33 الف نمایش داده شده است، قابل مشاهده می باشد.



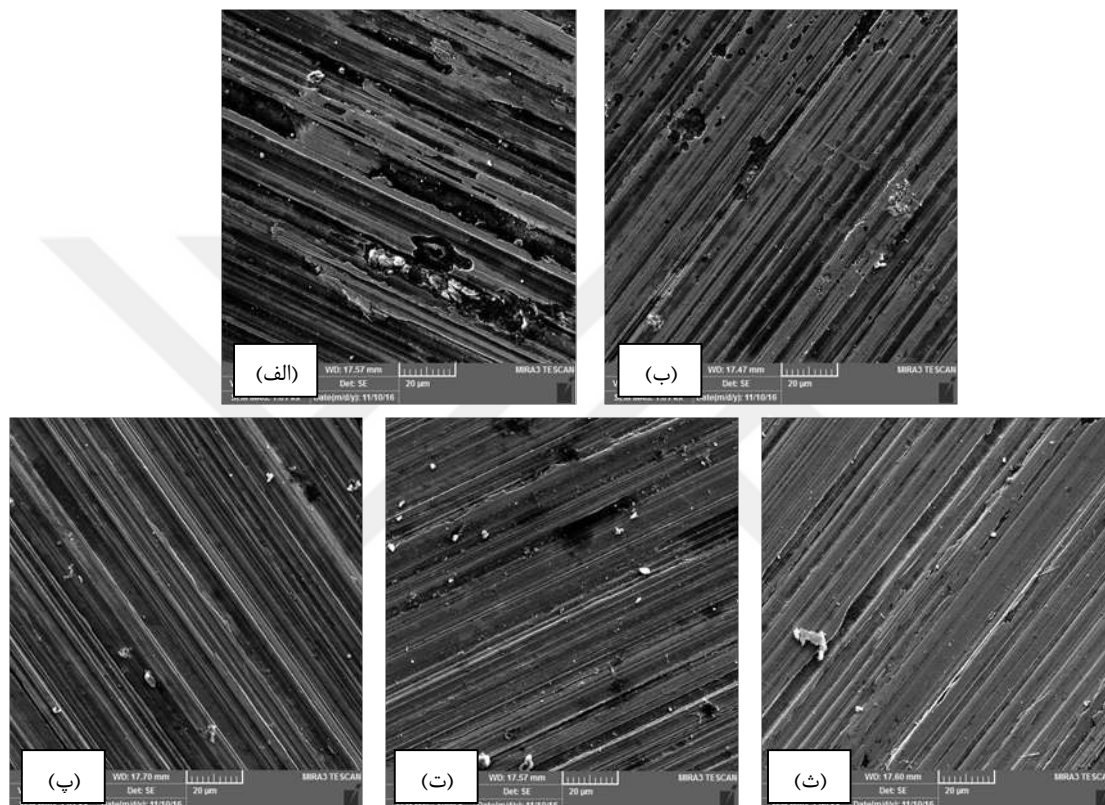
شکل 5-37 زبری سطح قطعات در امتداد جهت سنگ زنی در برابر عمق بار تحت شرایط خنک کاری مختلف.



شکل 5-38 زبری سطح قطعات در جهت عرضی امتداد سنگ زنی در برابر عمق بار تحت شرایط خنک کاری مختلف.

از سوی دیگر، در شرایط سنگ زنی تحت روانکاری MQL با استفاده از نانوسیال اکسید مس، سطح هموارتری در مقایسه با روش سنگ زنی جریان سیال و MQL خالص ایجاد می شود. مطابق تصاویر SEM از سطوح سنگ زنی شده در شکل 5-39، عمل غلتش نانوذرات اکسید مس سبب ایجاد سطحی هموار در سنگ زنی MQL حتی تحت شرایط عمق بار و سرعت قطعه کار بالا می گردد. فشار هوا در سیستم MQL سبب تسریع در نفوذ نانوذرات در وجه مشترک چرخ سنگ با قطعه کار گشته و وجود مولکول های اسید چرب و تری گلیسرید در روغن کانولا سبب ایجاد فیلم ویسکوز در سطح فلز کار می گردد که سبب تسریع در ایجاد فیلم روانکار حاوی نانوذرات اکسید مس می شود. این شرایط سبب بهبود در عمل غلتشی نانوذرات در وجه مشترک ذرات ساینده با سطح فلز گردیده و باعث بهبود کیفیت سطوح سنگ زنی شده می شود.

چنانچه در شکل 5-39 مشاهده می شود، افزایش درصد حجمی نانوذرات در سیال پایه در سنگ زنی MQL با نانوسیال اکسید مس سبب بهبود کیفیت سطح از طریق حذف بهتر شیارهای سطحی و ایجاد سطحی یکنواخت تر می گردد. این امر ناشی از افزایش تعداد نانوذرات در ناحیه تماس و عمل غلتشی بهتر آنها در حین پروسه سنگ زنی می باشد. این پدیده مطابق تصاویر SEM نمایش داده شده در شکل 5-39 در شرایط عمق بار و سرعت قطعه کار پایین نیز اتفاق می افتد.



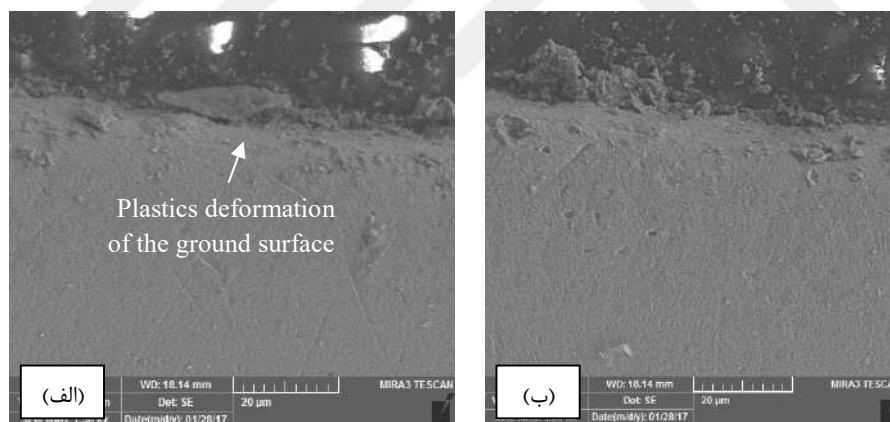
شکل 5-39 تصاویر SEM از سطوح سنگ زنی شده در شرایط؛ الف) جریان سیال، ب) MQL با نانوسیال اکسید مس 0/15 vol %، پ) MQL با نانوسیال اکسید مس 0/25 vol %، ت) MQL با نانوسیال اکسید مس 0/35 vol % و ث) MQL خالص ($a_p = 10 \mu m$ و $v_w = 5 m/min$).

عمل غلتشی نانوذرات اکسید مس همچنین می تواند دلیل افزایش میکروسختی سطحی قطعات تحت سنگ زنی باشد. مطابق نتایج میکروسختی سطوح سنگ زنی شده که در جدول 5-11 ارائه شده اند، سختی سطحی قطعات از طریق بکارگیری نانوسیال اکسید مس بعنوان روانکار در سنگ زنی MQL افزایش می یابد. این افزایش از مقدار اولیه 48 HRC برای قطعات پیش از پروسه سنگ زنی تا 52 HRC در سنگ زنی با عمق بار $10 \mu m$ و سرعت قطعه کار $5 m/min$ و تا 58 HRC در سنگ زنی با عمق بار $40 \mu m$ و سرعت قطعه کار $15 m/min$ و در شرایط بکارگیری نانوسیال اکسید مس با درصد حجمی بالای نانوذرات در سیال پایه افزایش می یابد. یکی از دلایل افزایش سختی سطحی قطعات می تواند نفوذ نانوذرات اکسید مس در لایه سطحی قطعات در نتیجه فشار موجود در ناحیه تماس حین پروسه سنگ زنی باشد. نفوذ این نانوذرات در سطح فلز توسط نتایج اسپکتروسکوپی تفرق الکترون

(EDS) که در شکل 5-31 ارائه شده است تأیید می شود. دلیل دیگر افزایش میکروسختی می تواند تغییر شکل پلاستیکی لایه سطحی کار در اثر فشار سنگ زنی بخصوص تحت شرایط عمق بار بالا و عمل غلتش نانوذات در ناحیه سنگ زنی باشد که بصورت یک مکانیزم نورد عمل می نماید. این تغییر شکل پلاستیکی در تصاویر SEM نمایش داده شده از مقطع عرضی سطوح سنگ زنی شده در شکل 5-40 قابل مشاهده است. همچنین در حالت سنگ زنی خشک، چنانچه پیشتر نیز توضیح داده شد، تغییر شکل پلاستیکی مواد سطح کار سبب افزایش میکروسختی در شرایط عمق بار و سرعت قطعه کار پایین می گردد. این در حالی است که در عمق بار و سرعت قطعه کار زیاد، اثرات افزایش میکروسختی ناشی از تغییر شکل پلاستیک و کاهش میکروسختی ناشی از افزایش دما و پدیده تمپر مجدد همدیگر را خنثی کرده و از این جهت سختی سطحی قطعات سنگ زنی شده تقریباً ثابت می ماند.

جدول 5-11 میکروسختی سطوح سنگ زنی شده (HRC) تحت شرایط روانکاری و پارامترهای سنگ زنی مختلف.

جریان سیال	MQL با نانوسیال اکسید مس 0/35 vol %	MQL با نانوسیال اکسید مس 0/25 vol %	MQL با نانوسیال اکسید مس 0/15 vol %	MQL خالص	خشک	روش روانکاری	پارامتر سنگ زنی
53	56	54	52	52/9	51	$a_p = 10 \mu m$ $v_w = 5 \text{ m/min}$	
52/5	58/5	56	55	52	47	$a_p = 40 \mu m$ $v_w = 15 \text{ m/min}$	



شکل 5-40 تصاویر SEM از مقطع عرضی سطوح سنگ زنی شده تحت شرایط روانکاری MQL با نانوسیال اکسید مس 0/25 vol % در سرعت قطعه کار 5 m/min (الف) و $a_p = 40 \mu m$ (ب).

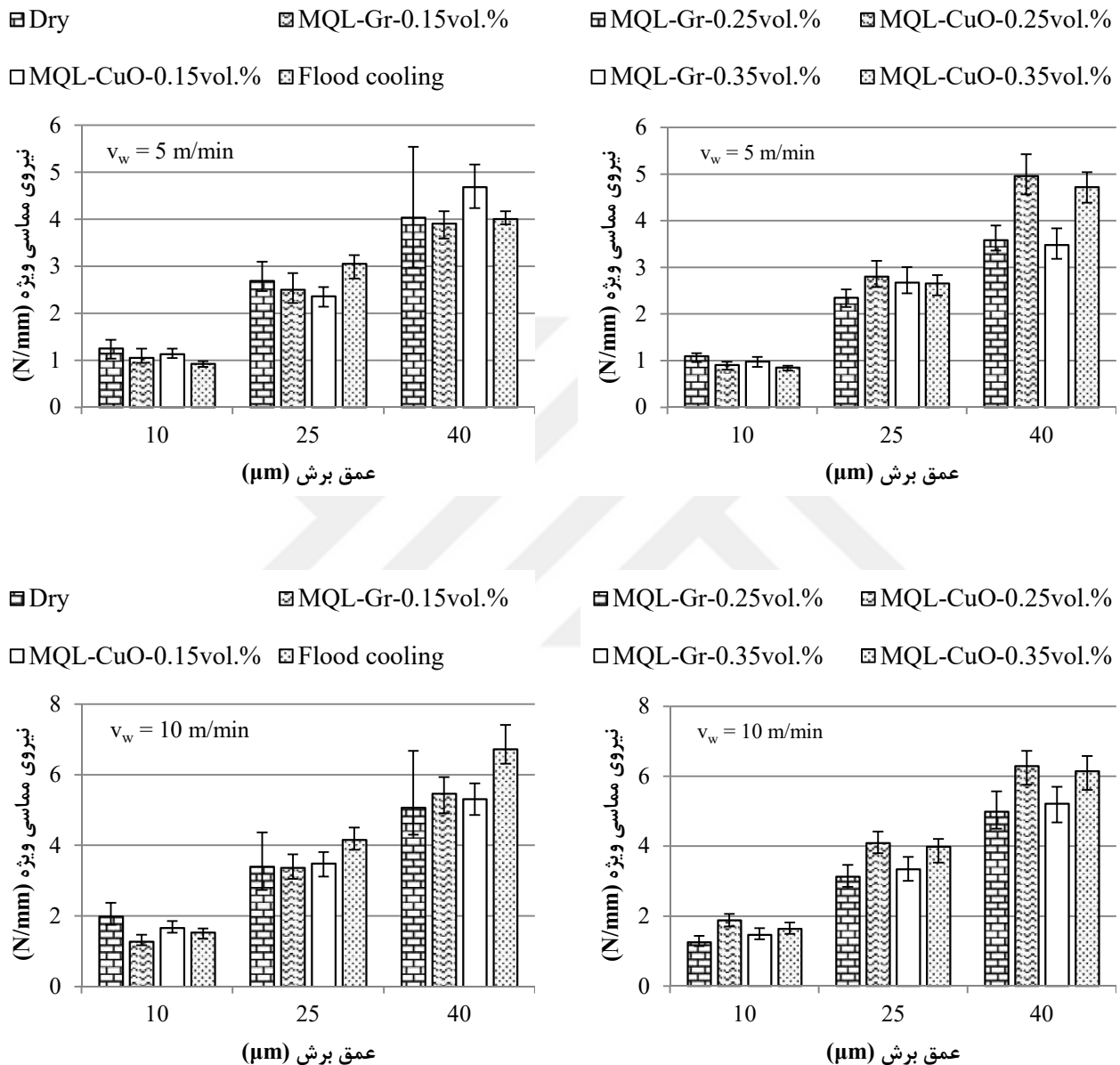
5-7- مقایسه عملکرد نانوسیالات گرافیت و اکسید مس به عنوان روانکار در شرایط سنگ زنی MQL تحت فشار جریان 6 bar

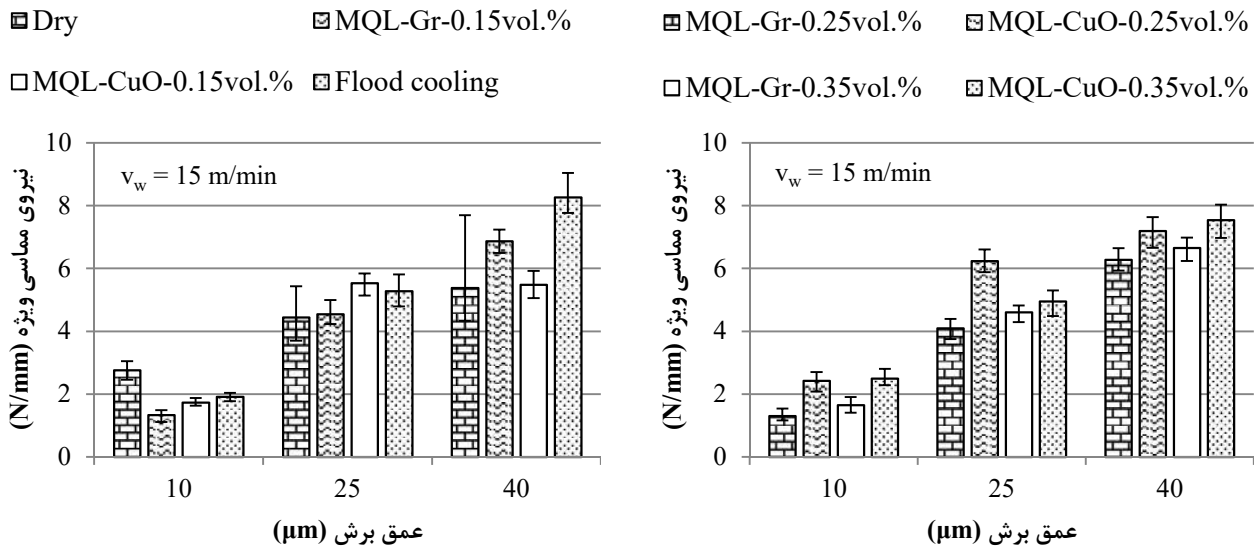
5-7-1- نقش خواص تریبولوژی نانوسیال بر روی نیروهای سنگ زنی

جهت بررسی اثرات مکانیزم روانکاری مرتبط با نانوسیالات گرافیت و اکسید مس در فرآیند سنگ زنی MQL، نیروی سنگ زنی مماسی ویژه (F_t') و نسبت نیروهای سنگ زنی (F_t/F_n) (یا ضریب اصطکاک، COF) تحت پارامترهای

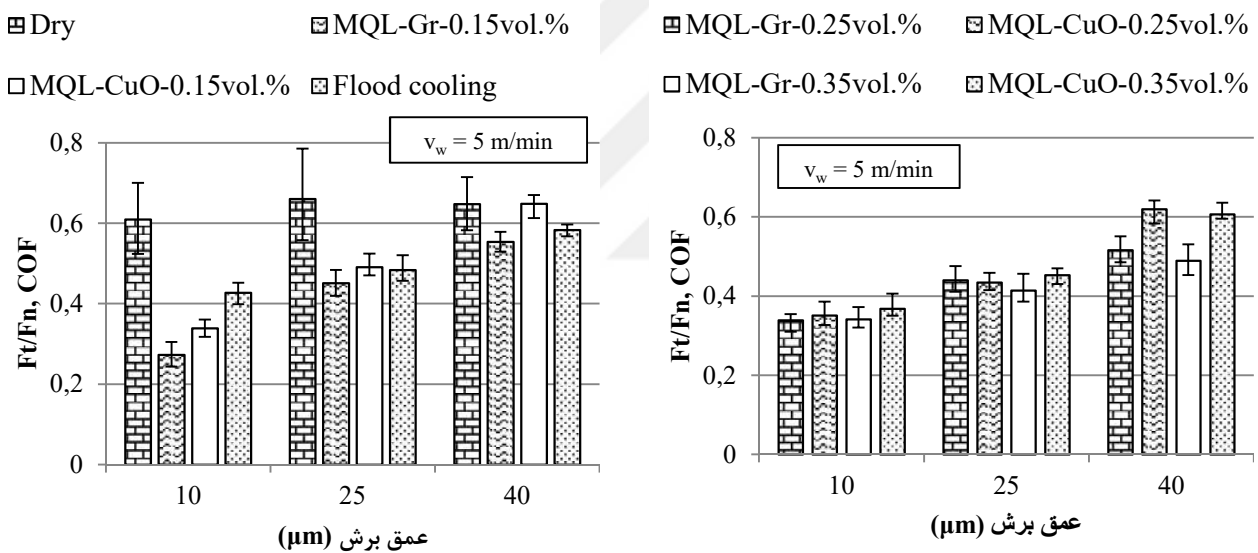
مختلف سنگ زنی بترتیب در شکل های 5-41 و 5-42 نمایش داده شده اند. مطابق نتایج حاصله، نانوسیالات گرافیت و اکسید مس خواص روانکاری متفاوتی را در شرایط سنگ زنی MQL دارا هستند. این تفاوت ها به ساختار اتمی متفاوت نانوذرات گرافیت و اکسید مس مرتبط می باشد. بعبارت دیگر، خواص تریبولوژی نانوروانکارها به ساختار اتمی، شکل هندسی و خواص فیزیکی نانوذرات تشکیل دهنده آنها وابسته است. چنانچه در شکل 5-41 مشاهده می شود، در اکثر پارامترهای برشی، نیروی مماسی ویژه سنگ زنی با استفاده از سیستم روانکاری MQL با نانوسیال گرافیت کمتر از مقادیر مشابه در سیستم روانکاری MQL با نانوسیال اکسید مس و نیز جریان سیال است. گرافیت دارای ساختار لایه ای است که در حضور نیروی های برشی صفحات اتمی بر روی یکدیگر لغزیده و از این جهت سبب کاهش نیروهای برشی در وجه مشترک چرخ سنگ-قطعه کار می گردد. مطابق شکل 5-41، کاهش پیوسته ای در نسبت نیروی سنگ زنی با افزایش درصد حجمی نانوذرات گرافیت در سیال پایه در سیستم روانکاری MQL با نانوسیال گرافیت اتفاق می افتد. همچنین ترکیبات روغن گیاهی بدلیل ایجاد فیلم محافظ سطحی باعث بهبود چسبندگی نانوذرات گرافیت به سطح فلز شده و از این جهت باعث ارتقاء روانکاری می گردد [119 و 120]. با این حال، نیروی مماسی ویژه در سنگ زنی MQL با استفاده از نانوسیال اکسید مس در شرایط عمق بار و سرعت قطعه کار پایین، کمتر از مقادیر مشابه در شرایط بکارگیری نانوسیال گرافیت می باشد. در مقایسه با حالت روانکاری خشک، سنگ زنی با استفاده از سیستم روانکاری جریان سیال، MQL با نانوسیال گرافیت و MQL با نانوسیال اکسید مس در شرایط عمق بار $10 \mu\text{m}$ و سرعت قطعه کار 5 m/min بترتیب سبب کاهش $25/8$ ، $24/9$ و $31/8$ در نیروی مماس ویژه می گردد. این میزان کاهش در شرایط عمق بار یکسان و سرعت قطعه کار 15 m/min بترتیب برابر با $30/5$ ، $52/3$ و $12/4$ می باشد. این پدیده گویای این مطلب است که مکانیزم های روانکاری متفاوتی در بکارگیری نانوسیالات گرافیت و اکسید مس در ناحیه تماس چرخ سنگ - قطعه کار حاکم است. برخلاف نانوذرات گرافیت، نانوذرات مس دارای ساختار لایه ای نبوده و روانکاری از طریق عمل غلتشی نانوذرات کروی در وجه تماس چرخ سنگ - قطعه کار اتفاق می افتد. با توجه به اینکه در فشار کم ناحیه تماس سنگ زنی ناشی از عمق بار کم، عمل غلتشی نانوذرات اکسید مس نیازمند انرژی کمتری در مقایسه با عمل برش در ساختار لایه ای نانوذرات گرافیت است، نیروهای ویژه مماسی در سنگ زنی MQL با استفاده از نانوسیال اکسید مس کمتر از مقادیر مشابه با استفاده از نانوسیال گرافیت می باشد. با این وجود، با افزایش فشار در ناحیه تماس ناشی از عمق بار بیشتر، نیروهای مورد نیاز برای عمل غلتش نانوذرات کروی اکسید مس افزایش می یابد که منجر به افزایش نیروی مماسی در سنگ زنی MQL می گردد. این پدیده با افزایش درصد حجمی نانوذرات در سیال پایه نانوسیالات مورد استفاده جهت روانکاری MQL تشدید می شود. در مقایسه با حالت روانکاری جریان سیال، نیروی مماسی ویژه در سنگ زنی با استفاده از سیستم روانکاری MQL با نانوسیال گرافیت و نانوسیال اکسید مس با درصد حجمی $0/15 \text{ vol } \%$ ذرات جامد در سیال پایه در شرایط عمق بار $40 \mu\text{m}$ و سرعت قطعه کار 15 m/min بترتیب به میزان $16/9$ و $33/6$ کاهش می یابد. این میزان کاهش در شرایط بکارگیری نانوسیالات گرافیت و اکسید مس با درصد حجمی $0/35 \text{ vol } \%$ از نانوذرات جامد در سیال پایه در سیستم روانکاری MQL و تحت پارامترهای برشی ثابت بترتیب برابر با $19/5$ و $8/8$ می باشد. این پدیده را می توان چنین توجیه نمود که در غلظت های بالای نانوذرات در سیستم

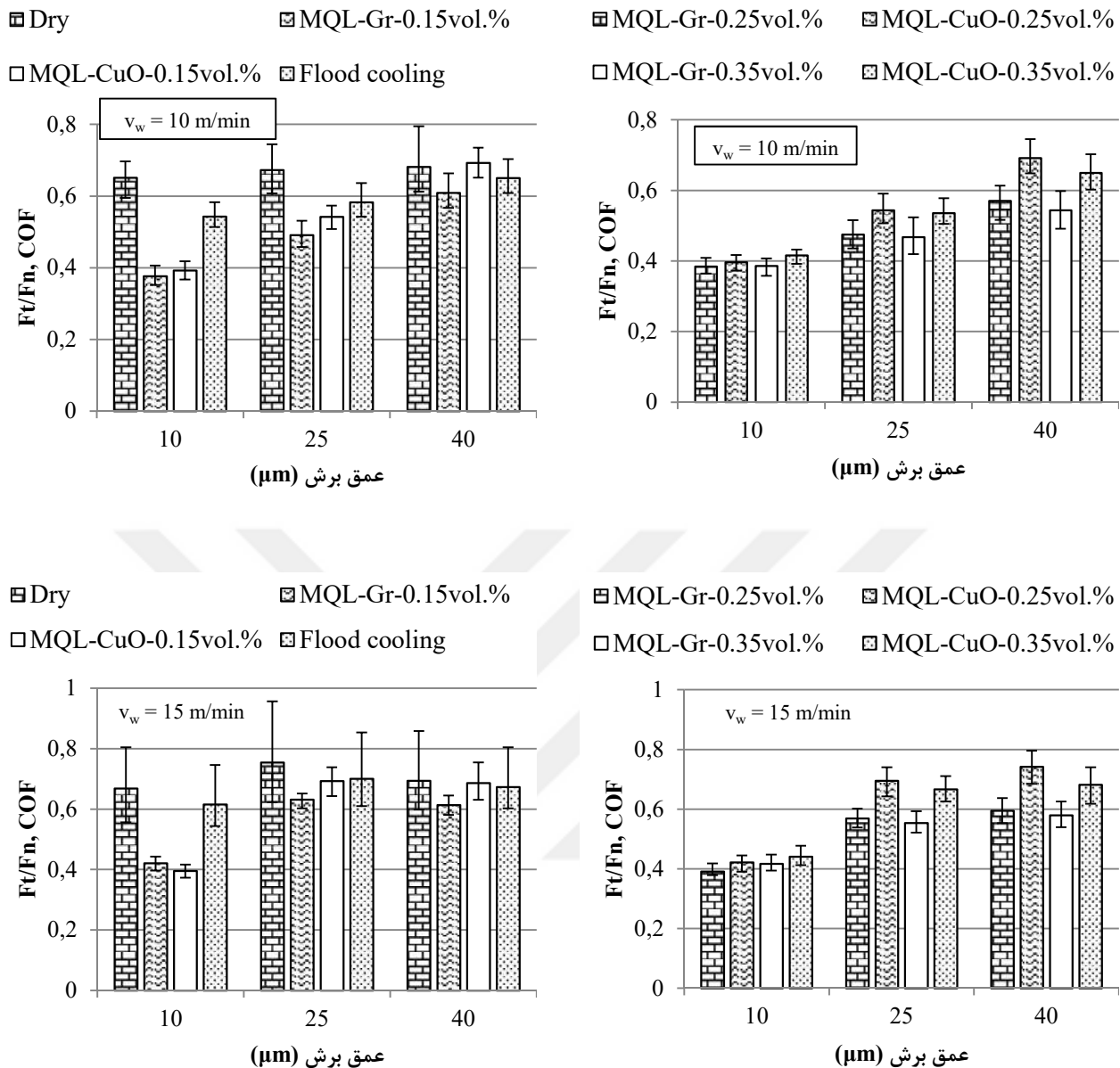
روانکاری MQL با نانوسیال اکسید مس، نانوذرات ذره های زبری در سطوح فلز را پر می کنند. شکل گیری فیلم لایه ای جامد در ناحیه تماس سنگ زنی و جریان پلاستیکی نوک قله های زبری سطح فلز منجر به ایجاد نیروهای مماسی بالاتر در سنگ زنی MQL با نانوسیال اکسید مس می گردد [112].





شکل 5-41 نیروی سنگ زنی مماسی ویژه در برابر عمق بار تحت شرایط خنک کاری مختلف.





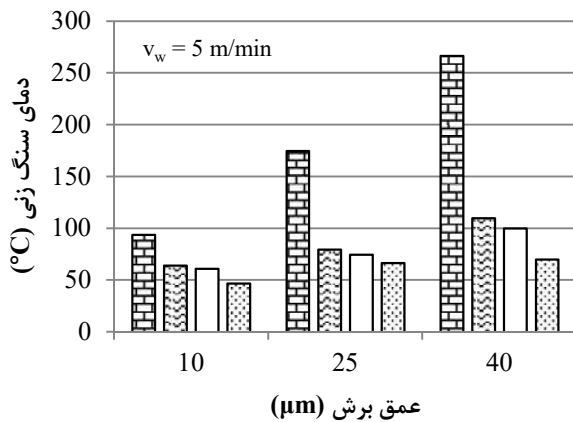
شکل 5-42 نسبت نیروهای سنگ زنی در برابر عمق بار تحت شرایط خنک کاری مختلف.

5-7-2- نقش خواص فیزیکی نانوسیال بر روی دمای سنگ زنی

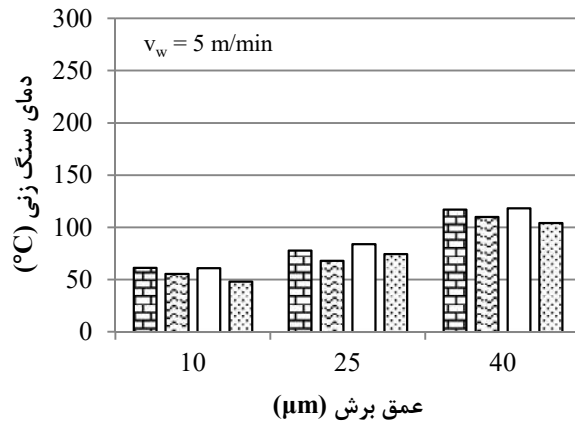
دمای سنگ زنی تحت شرایط روانکاری مختلف و در پارامترهای برشی متفاوت در شکل 5-43 نمایش داده شده است. مطابق این شکل، دمای سنگ زنی در حالت روانکاری خشک در تمام پارامترهای برشی بدلیل نبود عمل روانکاری و خنک کاری در این روش بالاترین مقادیر را نسبت به دیگر روش های روانکاری دارا می باشد. در نقطه مقابل، دمای سنگ زنی در روش روانکاری جریان سیال بدلیل نرخ بالای تحویل سیال برش به ناحیه سنگ زنی و ضریب انتقال حرارت همرفت بالا در این روش کمترین مقادیر را در اکثر پارامترهای برشی نسبت به دیگر روش های روانکاری دارا می باشد. از طرف دیگر، دمای سطوح سنگ زنی در حالت روانکاری MQL با استفاده از نانوسیالات گرافیت و اکسید مس بطور قابل ملاحظه ای از روش خشک کمتر بوده و در برخی از پارامترهای برشی بخصوص در

شرایط سنگ زنی با عمق بار و سرعت قطعه کار بالا با مقادیر مشابه در روش سنگ زنی جریان سیال قابل مقایسه می باشند. با توجه به نتایج اندازه گیری ضریب همرفت حرارتی سیستم های روانکاری مختلف که در بخش 3-5 ارائه گردید، ضرایب CHTC برای سیستم های خنک کاری MQL با نانوسیالات گرافیت و اکسید مس و فشار جریان 6 bar بترتیب برابر با 2×10^5 و $1/4 \times 10^5 \text{ W/m}^2\text{K}$ است که بصورت قابل ملاحظه ای از مقدار محاسبه شده برای روش جریان سیال برابر $5 \times 10^5 \text{ W/m}^2\text{K}$ کمتر می باشند. با این حال، دما در سنگ زنی MQL با نانوسیال اکسید مس کمتر از مقادیر مشابه برای حالت روانکاری MQL با نانوسیال گرافیت بوده و در پارامترهای سنگ زنی خشن نتایجی نزدیک به حالت روانکاری جریان سیال ارائه می دهد. بعنوان مثال، در مقایسه با حالت سنگ زنی خشک، استفاده از روش روانکاری جریان سیال، MQL با نانوسیال گرافیت 0/15 vol % و MQL با نانوسیال اکسید مس 0/15 vol % در شرایط عمق بار $10 \mu\text{m}$ و سرعت قطعه کار 5 m/min سبب کاهش دمای سنگ زنی بترتیب به میزان 31/6 و 35٪ می گردد. این میزان کاهش در شرایط بکارگیری نانوسیالات گرافیت و اکسید مس با درصد حجمی بالاتر 0/35 vol % از نانوذرات در سیال پایه در سیستم روانکاری MQL و تحت پارامترهای برشی ثابت بترتیب برابر با 35 و 48/6٪ می باشد. در شرایط سنگ زنی خشن با سرعت قطعه کار 15 m/min و عمق برش $40 \mu\text{m}$ دمای سنگ زنی در شرایط روانکاری جریان سیال، MQL با نانوسیال گرافیت 0/15 vol % و MQL با نانوسیال اکسید مس 0/15 vol % نسبت به شرایط روانکاری خشک بترتیب به میزان 66/7، 45/8 و 66/8 کاهش می یابد. این میزان کاهش در شرایط بکارگیری نانوسیالات گرافیت و اکسید مس با درصد حجمی بالاتر 0/35 vol % از نانوذرات در سیال پایه در سنگ زنی MQL و تحت پارامترهای برشی ثابت بترتیب برابر با 63/7 و 66/2٪ است. دمای پایین سطوح سنگ زنی در روش روانکاری MQL با استفاده از نانوسیال اکسید مس در مقایسه با مقادیر مشابه در روانکاری MQL با نانوسیال گرافیت می تواند بدلیل سهم حرارتی کمتر قطعه کار در بکارگیری نانوسیال اکسید مس نسبت به حالت استفاده از نانوسیال گرافیت باشد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل 44-5، سهم انرژی حرارتی قطعه کار (ε_w) در سنگ زنی با استفاده از روانکاری MQL با نانوسیال اکسید مس کمتر از مقادیر مشابه در شرایط روانکاری خشک و MQL با نانوسیال گرافیت بوده و این مقادیر به سهم حرارتی قطعه کار در شرایط روانکاری جریان سیال بخصوص تحت پارامترهای سنگ زنی خشن بسیار نزدیک می باشند. این پدیده را بدین صورت می توان توجیه نمود که نانوذرات گرافیت و مس فاصله های هوایی بین چرخ سنگ و قطعه کار را در ناحیه تماس سنگ زنی پر کرده و سبب کاهش مقاومت حرارتی تماسی بین چرخ ساینده و قطعه کار می گردند. بدلیل آنکه ضریب هدایت حرارتی گرافیت بطور قابل ملاحظه ای از ضریب هدایت حرارتی اکسید مس بالاتر است، حضور نانوذرات گرافیت سبب تسریع بیشتری در نفوذ حرارت به قطعه کار نسبت به نانوذرات اکسید مس در ناحیه تماس گردیده و از این رو سهم حرارتی قطعه کار در سنگ زنی MQL با نانوسیال گرافیت فراتر از مقادیر مشابه در روانکاری MQL با استفاده از نانوسیال اکسید مس می باشد.

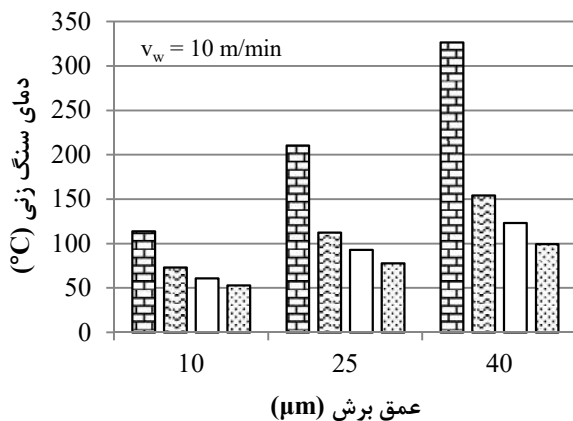
■ Dry ■ MQL-Gr-0.15vol.%
□ MQL-CuO-0.15vol.% ■ Flood cooling



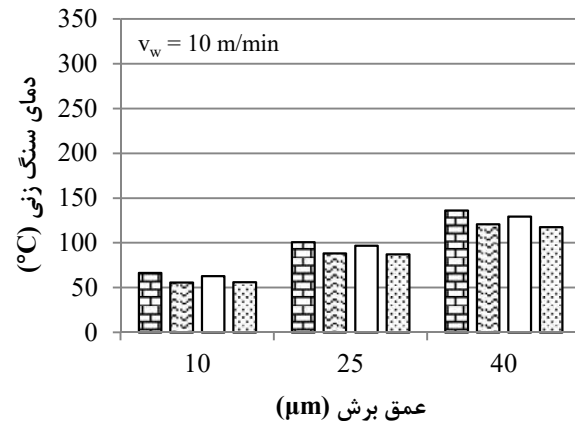
■ MQL-Gr-0.25vol.% ■ MQL-CuO-0.25vol.%
□ MQL-Gr-0.35vol.% ■ MQL-CuO-0.35vol.%



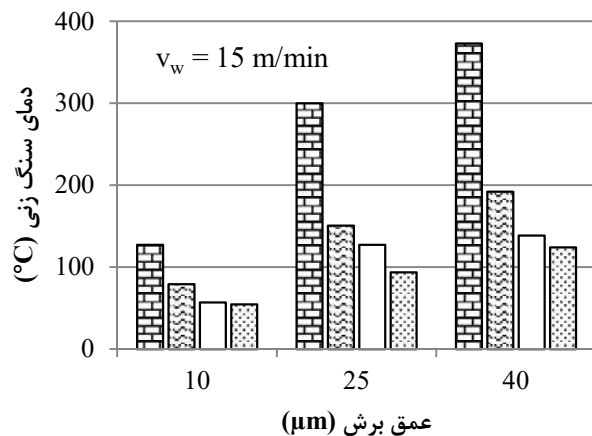
■ Dry ■ MQL-Gr-0.15vol.%
□ MQL-CuO-0.15vol.% ■ Flood cooling



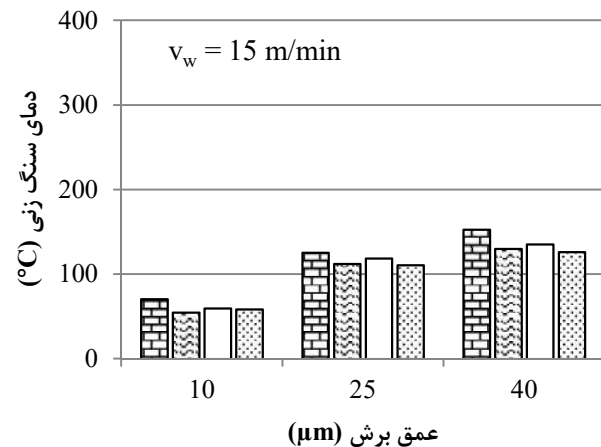
■ MQL-Gr-0.25vol.% ■ MQL-CuO-0.25vol.%
□ MQL-Gr-0.35vol.% ■ MQL-CuO-0.35vol.%



■ Dry ■ MQL-Gr-0.15vol.%
□ MQL-CuO-0.15vol.% ■ Flood cooling

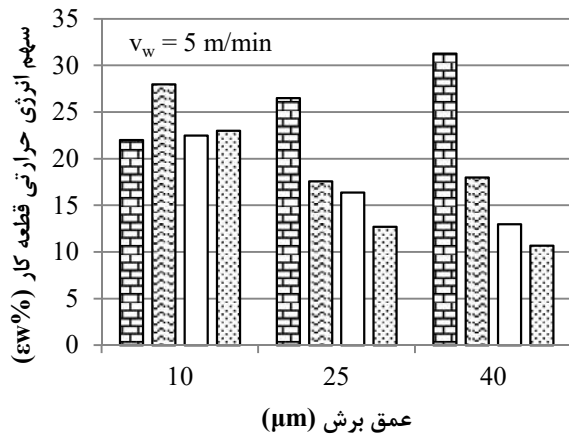


■ MQL-Gr-0.25vol.% ■ MQL-CuO-0.25vol.%
□ MQL-Gr-0.35vol.% ■ MQL-CuO-0.35vol.%

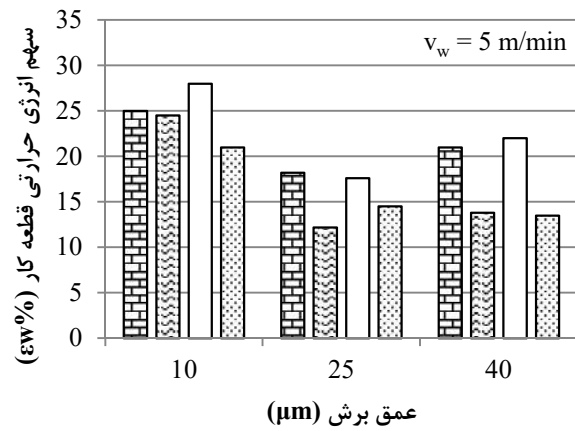


شکل 5-43 دمای سنگ زنی در برابر عمق بار تحت شرایط خنک کاری مختلف.

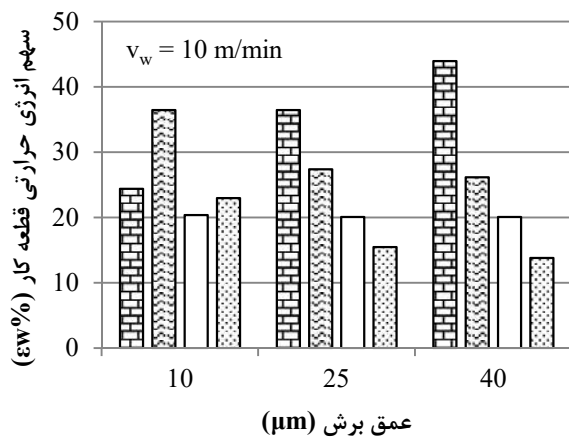
■ Dry ■ MQL-Gr-0.15vol.%
 □ MQL-CuO-0.15vol.% ■ Flood cooling



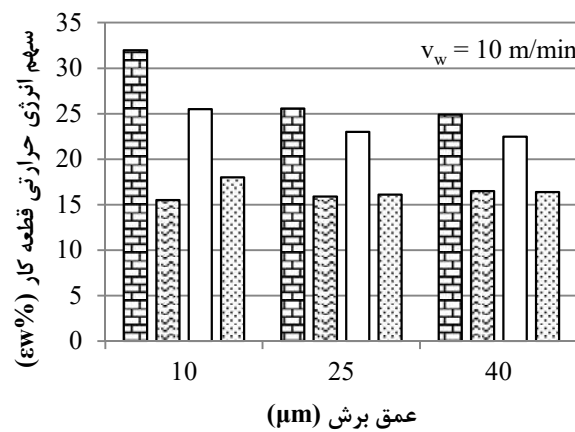
■ MQL-Gr-0.25vol.% ■ MQL-CuO-0.25vol.%
 □ MQL-Gr-0.35vol.% ■ MQL-CuO-0.35vol.%



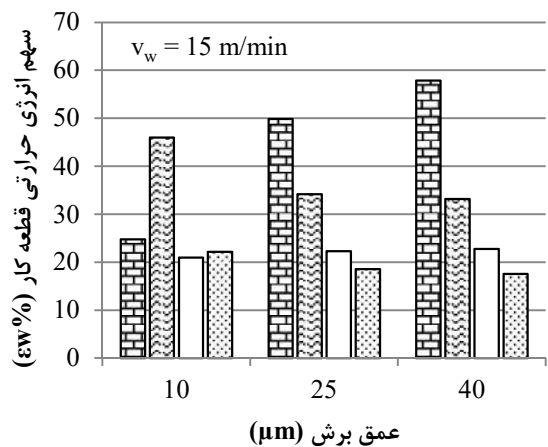
■ Dry ■ MQL-Gr-0.15vol.%
 □ MQL-CuO-0.15vol.% ■ Flood cooling



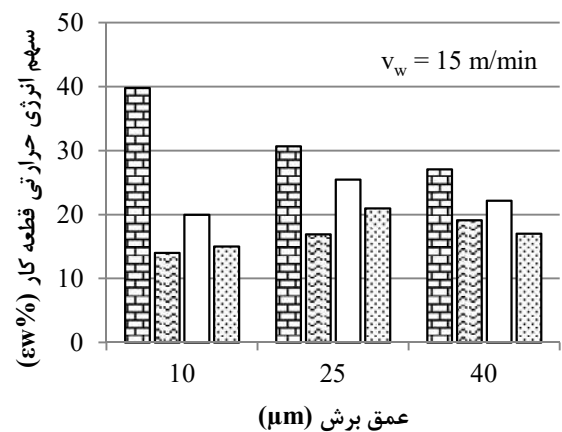
■ MQL-Gr-0.25vol.% ■ MQL-CuO-0.25vol.%
 □ MQL-Gr-0.35vol.% ■ MQL-CuO-0.35vol.%



■ Dry ■ MQL-Gr-0.15vol.%
 □ MQL-CuO-0.15vol.% ■ Flood cooling



■ MQL-Gr-0.25vol.% ■ MQL-CuO-0.25vol.%
 □ MQL-Gr-0.35vol.% ■ MQL-CuO-0.35vol.%



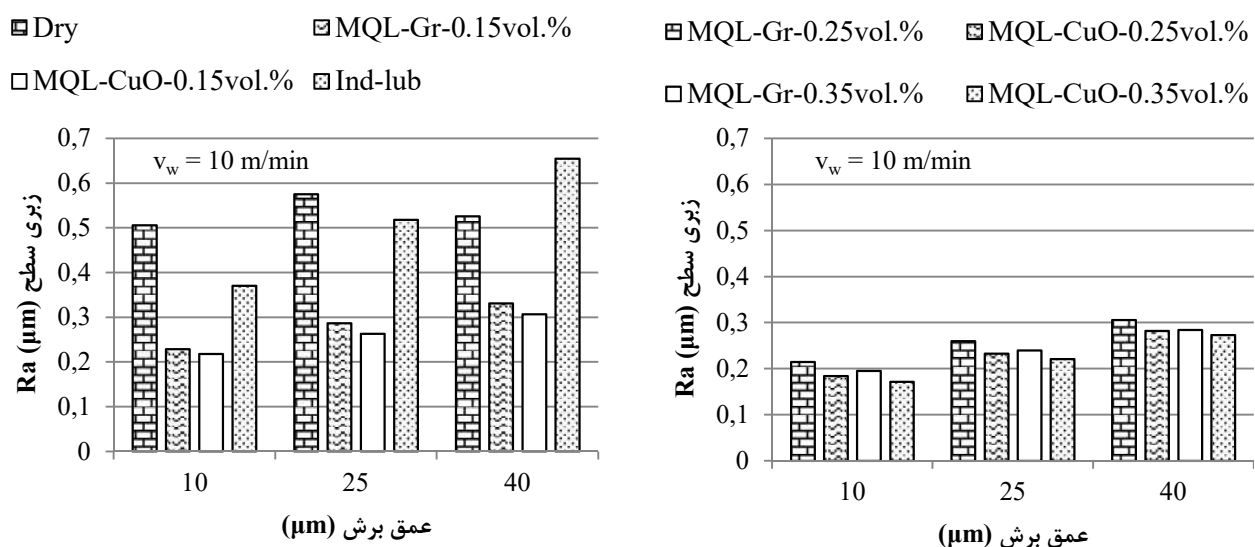
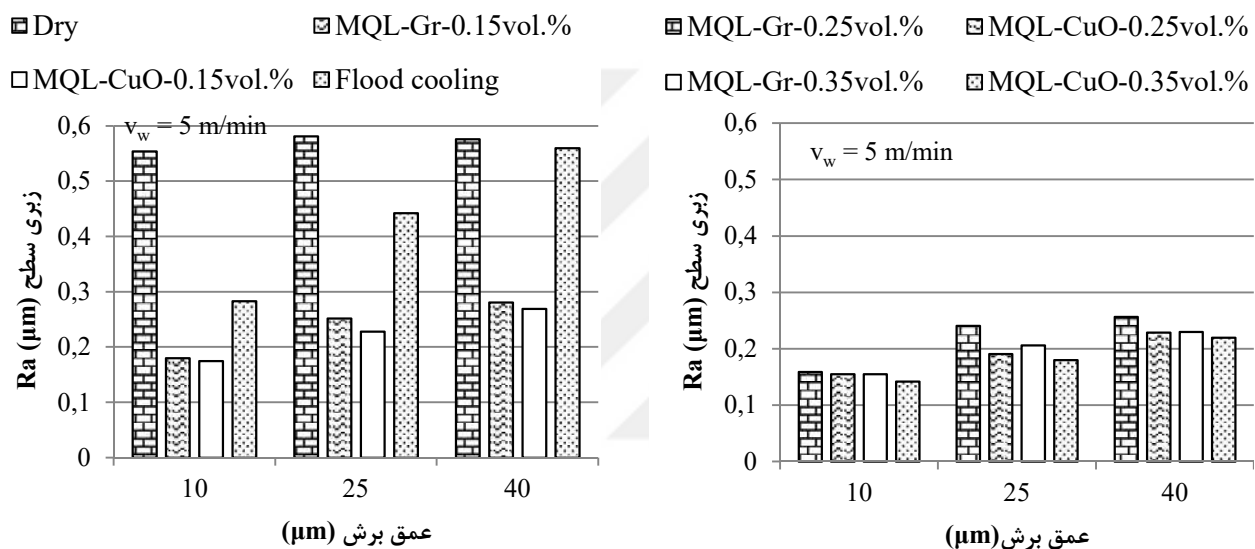
شکل 5-44 سهم انرژی حرارتی قطعه کار در برابر عمق بار تحت شرایط خنک کاری مختلف.

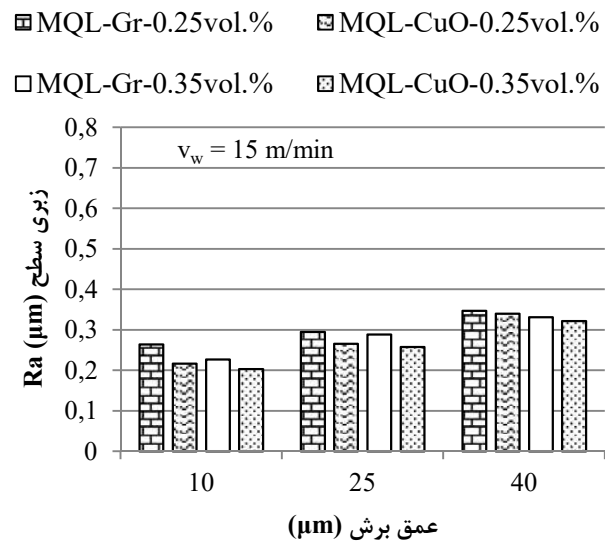
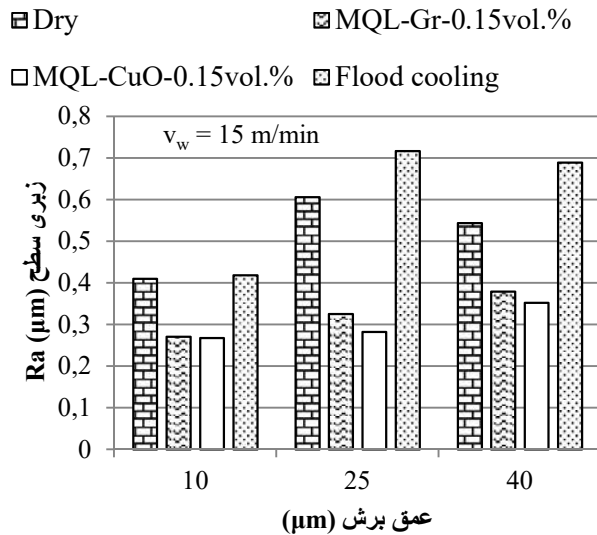
5-7-3- نقش خواص تریبولوژی نانوسیال بر روی سلامت سطح قطعه کار

میانگین حسابی ارتفاعات زبری سطح (R_a) در جهات طولی و عرضی نسبت به امتداد سنگ زنی تحت پارامترهای برشی مختلف و در شرایط روانکاری متفاوت بترتیب در شکل های 5-45 و 5-46 نمایش داده شده اند. مطابق نتایج ارائه شده، روش روانکاری خشک در تمامی پارامترهای سنگ زنی دارای زبری سطح بالاتری نسبت به دیگر روش های روانکاری به جز روانکاری جریان سیال تحت پارامترهای برشی عمق بار و سرعت قطعه کار بالا، است. عدم وجود عمل روانکاری در روش سنگ زنی خشک و روانکاری نامطلوب و شکل گیری فیلم روانکار ضعیف در روش روانکاری جریان سیال از دلایل نتایج زبری سطح حاصله می باشند. در مقایسه با شرایط روانکاری خشک و جریان سیال، بکارگیری MQL نانوسیال در پروسه سنگ زنی سبب کاهش قابل ملاحظه ای در زبری سطح در تمامی پارامترهای برشی می گردد. بعنوان مثال، در مقایسه با حالت سنگ زنی خشک، بکارگیری روش جریان سیال، MQL با نانوسیال گرافیت 0/15 vol % و MQL با نانوسیال اکسید مس 0/15 vol % در سرعت قطعه کار 5 m/min و عمق برش 10 μm سبب کاهش قابل ملاحظه ای در زبری سطح قطعات در جهات طولی سنگ زنی بترتیب برابر با 48/9، 67/5 و 68 % می شود. این میزان کاهش با بکارگیری نانوسیالات گرافیت و اکسید مس با غلظت حجمی 0/35 vol% از نانوذرات در سیال پایه در شرایط روانکاری MQL و تحت پارامترهای سنگ زنی ثابت بترتیب برابر با 72 و 74/4 % می باشد. در سنگ زنی تحت پارامترهای برش خشن تر شامل سرعت قطعه کار 15 m/min و عمق بار 40 μm ، میزان کاهش در زبری سطح در جهت طولی سنگ زنی تحت شرایط روانکاری MQL با نانوسیال گرافیت 0/15 vol % و MQL با نانوسیال اکسید مس 0/15 vol % نسبت به حالت خشک بترتیب برابر با 30 و 35/3 % می باشد. این میزان کاهش با بکارگیری نانوسیالات گرافیت و اکسید مس با غلظت حجمی 0/35 vol % از نانوذرات در سیال پایه در شرایط روانکاری MQL و تحت پارامترهای سنگ زنی ثابت بترتیب برابر با 39 و 40/8 % است. خواص روانکاری بهتر نانوسیالات گرافیت و اکسید مس در سیستم روانکاری MQL دلیل کاهش زبری سطوح سنگ زنی شده تحت پارامترهای برش متفاوت است.

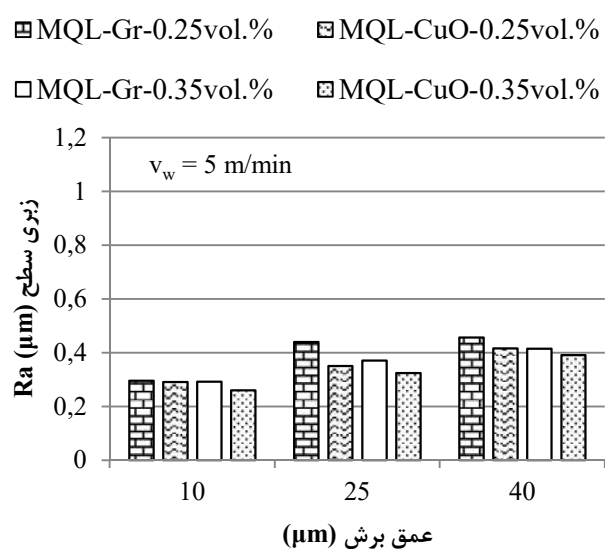
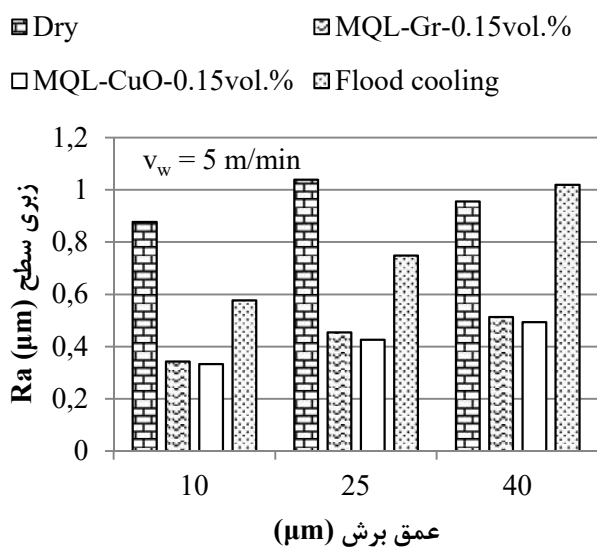
فشار بالای جریان سیال سبب تسهیل در نفوذ نانوذرات در ناحیه تماس ذرات ساینده با فلز کار می گردد. همچنین شکل گیری فیلم مولکولی مناسب بر روی سطح فلز بخاطر حضور زنجیره های اسید چرب طولانی و ترکیبات حاوی سولفور، کلرین و فسفر در روغن کانولا، که از اجزاء سازنده سیال پایه می باشد، و عکس العمل مابین تری گلیسراید با سطح فلز یک محیط ویسکوزی را برای نانوذرات فراهم کرده و سبب تسریع در شکل گیری فیلم روانکاری مناسب در ناحیه تماس می شود [120 و 131]. با این حال، تفاوت در زبری سطح قطعات در بکارگیری نانوسیالات گرافیت و اکسید مس در سنگ زنی MQL ناشی از مکانیزم های متفاوت روانکاری نانوذرات اکسید مس و گرافیت می باشد. این تفاوت ها در تصاویر SEM از سطوح سنگ زنی شده که در شکل های 5-47 و 5-48 نمایش داده شده اند مشخص می شود. در مجموع، بکارگیری نانوسیال اکسید مس کیفیت سطح بهتری را در مقایسه با نانوسیال گرافیت در پروسه سنگ زنی فولاد AISI 1045 ایجاد می نماید. در مورد نانوسیال گرافیت، عمل لغزش صفحات اتمی در ساختار نانوذرات سبب ایجاد یک مکانیزم روانکاری مؤثر در ناحیه تماس سنگ زنی بین سطوح آزاد

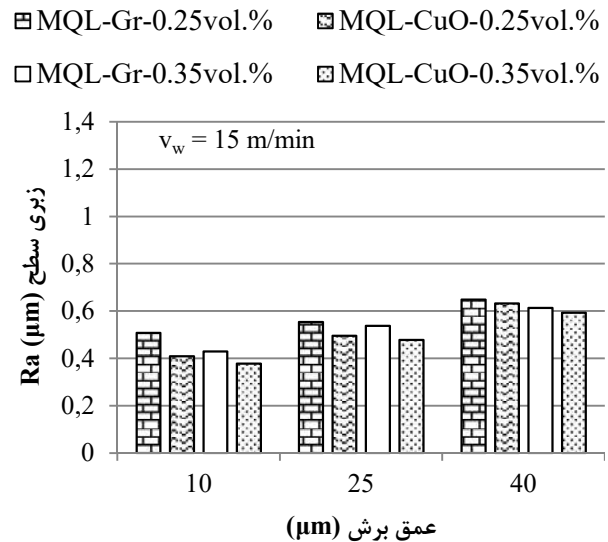
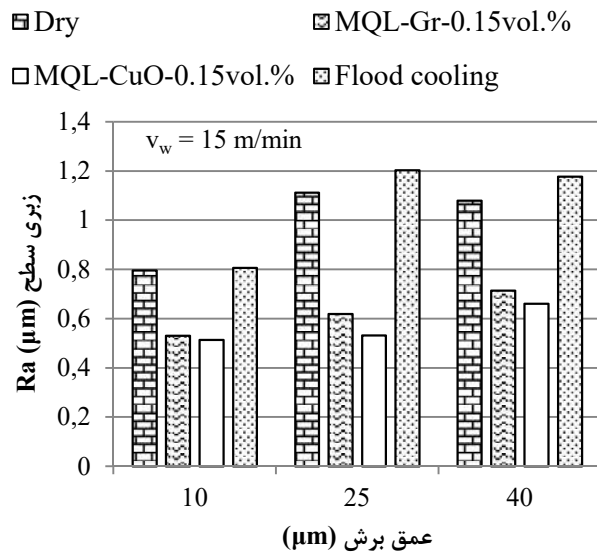
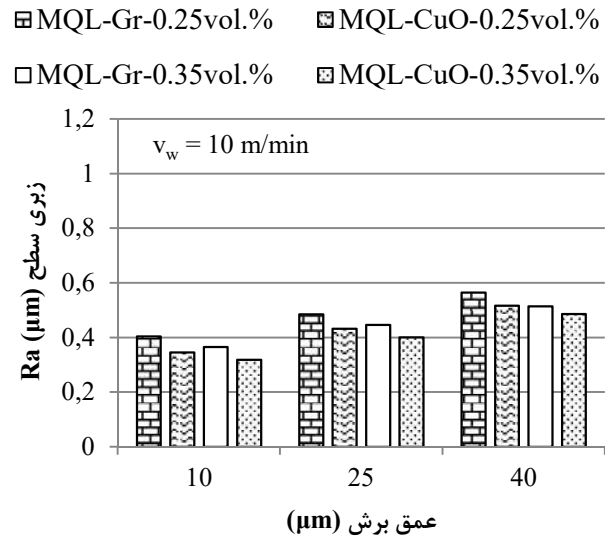
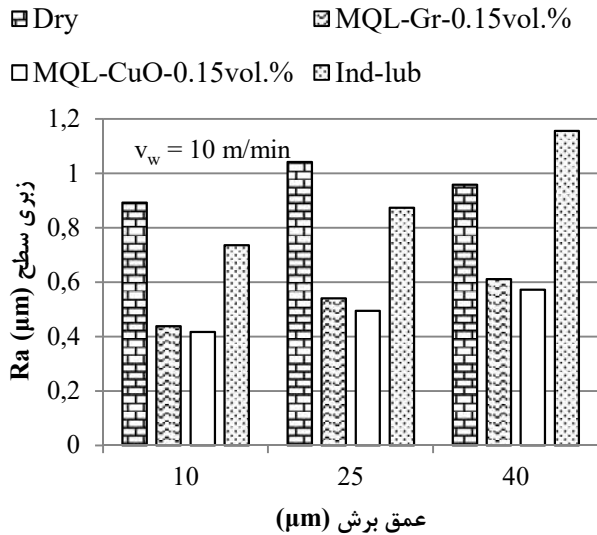
ذرات ساینده و سطح سنگ زنی شده می گردد. در نقطه مقابل، عمل غلتشی نانوذرات اکسید مس مابین ذرات ساینده و سطح سنگ زنی شده از طریق اعمال این نانوذرات در ناحیه تماس مابین چرخ سنگ و قطعه کار با بکارگیری سیستم MQL با نانوسیال اکسید مس سبب ایجاد یک سطح هموار بر روی قطعه کار حتی تحت پارامترهای سنگ زنی خشن با عمق بار و سرعت قطعه کار بالا می گردد. چنانچه در تصاویر میکروسکوپی در شکل های 47-5 و 48-5 مشاهده می شود، مکانیزم غلتشی نانوذرات اکسید مس نسبت به عمل لغزشی صفحات اتمی در ساختار نانوذرات گرافیت در حذف خطوط سایش از سطوح سنگ زنی مؤثرتر می باشد. در مجموع، افزایش درصد حجمی نانوذرات در سیال پایه و در نتیجه آن، حضور تعداد بیشتری از نانوذرات در ناحیه تماس سبب حذف بهتر خطوط سایش از سطوح سنگ زنی و افزایش کیفیت سطح قطعات می شود.



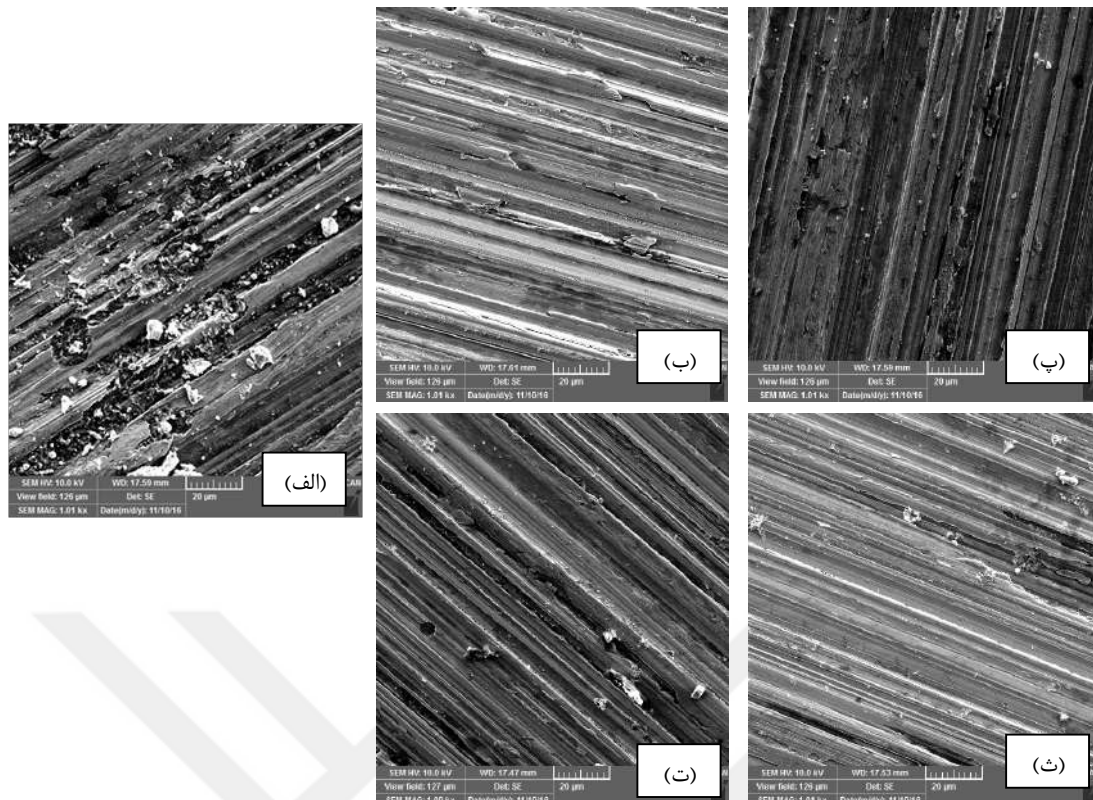


شکل 5-45 زبری سطح قطعات در امتداد جهت سنگ زنی در برابر عمق بار تحت شرایط خنک کاری مختلف.

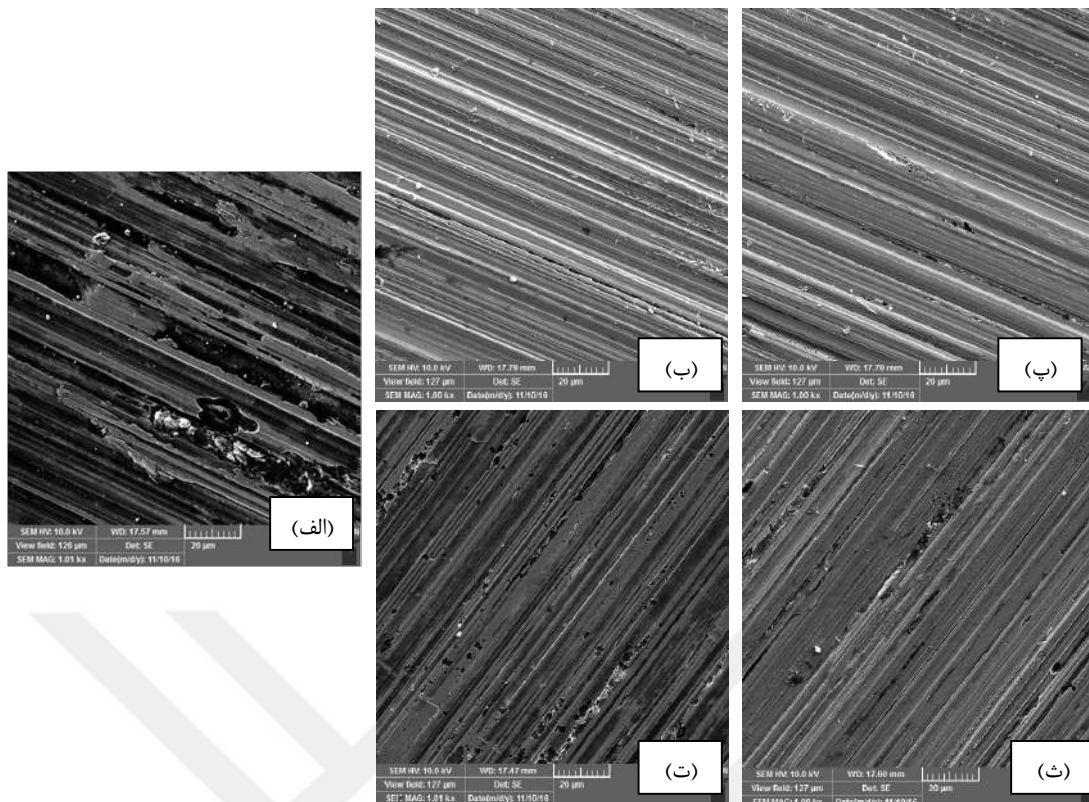




شکل 5-46 زبری سطح قطعات در جهت عرضی امتداد سنگ زنی در برابر عمق بار تحت شرایط خنک کاری مختلف.



شکل 5-47 تصاویر SEM از سطوح سنگ زنی شده در شرایط؛ الف) جریان سیال، ب) MQL با نانوسیال گرافیت 0/15 vol %، پ) MQL با نانوسیال گرافیت 0/35 vol %، ت) MQL با نانوسیال اکسید مس 0/15 vol % و ث) MQL با نانوسیال اکسید مس 0/35 vol % ($v_w = 15 \text{ m/min}$ و $a_p = 40 \mu\text{m}$).



شکل 5-48 تصاویر SEM از سطوح سنگ زنی شده در شرایط؛ الف) جریان سیال، ب) MQL با نانوسیال گرافیت 0/15 vol %، پ) MQL با نانوسیال گرافیت 0/35 vol %، ت) MQL با نانوسیال اکسید مس 0/15 vol % و ث) MQL با نانوسیال اکسید مس 0/35 vol % ($v_w = 5 \text{ m/min}$ و $a_p = 10 \text{ µm}$).

بخش سوم

نتایج و بحث

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات

6-1- مقدمه

خواص خنک کاری و تریبولوژی نانوروانکارها ویژگی‌هایی وابسته به خواص فیزیکی نانوذرات هستند بگونه‌ای که مورفولوژی، ساختار اتمی و خواص فیزیکی نانوذرات فاکتورهایی تعیین کننده در عملکرد سیستم های MQL مورد استفاده در فرآیندهای ماشینکاری هستند. در پروژه حاضر خواص خنک کاری و تریبولوژی نانوسیالات گرافیت و اکسید مس در پروسه سنگ زنی فولاد AISI 1045 با بکارگیری سیستم حداقل جریان سیال روانکار (MQL) مورد مطالعه قرار گرفته است. نانوذرات گرافیت و اکسید مس بعنوان نماینده نانوذراتی با ساختار اتمی و خواص تریبولوژی متفاوت هستند. این نانوسیالات از طریق پروسه تخلیه الکتریکی غوطه ور سنتز شده و پس از اضافه نمودن tween20 بعنوان سورفکتانت و روغن کانولا بعنوان روغن گیاهی و منبع تری گلیسرید در معرض ارتعاش آلتراسونیک قرار گرفتند. به منظور تحقیق در سهم انرژی قطعه کار از حرارت تولید شده در ضمن سنگ زنی و نحوه توزیع دما در آن، شبیه سازی بر اساس مدل تفاضل محدود و با استفاده از منبع حرارتی با توزیع نمایی در ناحیه تماس چرخ سنگ - قطعه کار که با سرعتی برابر با سرعت قطعه کار جابجا می شود، انجام شده است. بمنظور مطالعه اثرات ساختار اتمی نانوذرات در خواص تریبولوژی نانوسیالات گرافیت و اکسید مس، نیروهای سنگ زنی، زبری سطح قطعات، میکروسختی و تصاویر میکروسکوپی از سطوح سنگ زنی شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. مواردی که در ادامه بیان می شوند از جمله نتایج برجسته مطالعات تجربی و عددی انجام شده هستند.

6-2- نتیجه گیری

6-2-1- نیروی ویژه مماسی و نسبت نیروی سنگ زنی در شرایط استفاده از سیستم روانکاری MQL با نانوسیال گرافیت کمترین مقادیر را در مقایسه با دیگر روش های روانکاری بخصوص در حالت سنگ زنی با پارامترهای برشی بالا را داراست. بعنوان مثال، در حالت سنگ زنی با نانوسیال گرافیت و فشار جریان 4 bar، نیروی مماسی ویژه و نسبت نیروهای سنگ زنی در مقایسه با حالت سنگ زنی با جریان سیال بترتیب کاهشی را تا 19 و 18/1٪ نمایش می دهد. این کاهش به شکل گیری فیلم روانکار مؤثر در ناحیه تماس چرخ سنگ با قطعه کار مرتبط می باشد. گرافیت دارای ساختار لایه ای است که در حضور نیروهای برشی صفحات اتمی بر روی یکدیگر لغزیده و باعث کاهش نیروی اصطکاکی در وجه تماس چرخ ساینده با قطعه کار می گردد. حضور ترکیبات روغن گیاهی در نانوسیال گرافیت در شکل گیری فیلم روانکار حاوی نانوذرات گرافیت بسیار مؤثر می باشد.

6-2-2- نیروی مماسی ویژه و نسبت نیروهای سنگ زنی در شرایط استفاده از سیستم روانکار MQL با نانوسیال اکسید مس با درصد حجمی پایین نانوذرات در سیال پایه کمتر از مقادیر مشابه در روانکاری MQL خالص و جریان سیال است. مقادیر این متغیرها با غلظت حجمی نانوسیال اکسید مس مورد استفاده و فشار مابین ذرات ساینده و سطح کار تغییر می نماید. در شرایط استفاده از نانوسیال اکسید مس با غلظت حجمی بالا در سنگ زنی MQL، نانوذرات ناهموازی های سطح کار را پر کرده و شکل گیری فیلم روانکار لایه ای و تغییر شکل پلاستیکی قله های ناهموازی های سطحی سبب افزایش نیروی مماسی ویژه و نسبت نیروهای سنگ زنی می گردد.

6-2-3- برخلاف نانوذرات گرافیت، نانوذرات اکسید مس دارای ساختار لایه ای نمی باشند و روانکاری از طریق عمل غلتشی نانوذرات کروی در وجه مشترک چرخ ساینده - قطعه کار اتفاق می افتد. در شرایط فشار پایین در ناحیه تماس سنگ زنی ناشی از عمق بار کم، عمل غلتشی نانوذرات اکسید مس نیازمند انرژی کمتری نسبت به عمل برش در ساختار لایه ای نانوذرات گرافیت است و از این رو نیروهای مماسی ویژه در سنگ زنی MQL با استفاده از نانوسیالات اکسید مس کمتر از مقادیر مشابه در سنگ زنی با استفاده از نانوسیالات گرافیت می باشد. با این حال، با افزایش فشار تماس در ناحیه سنگ زنی ناشی از عمق بار بالاتر، نیروی مورد نیاز برای عمل غلتش نانوذرات اکسید مس کروی افزایش یافته و منجر به نیروی مماسی ویژه بالاتری نسبت به سنگ زنی MQL با استفاده از نانوسیالات گرافیت می گردد.

6-2-4- علایم جریان پلاستیکی مواد و اثرات سوختن سطح کار تقریباً در تمام شرایط سنگ زنی خشک مشاهده می شود. در نقطه مقابل، تقریباً هیچ نشانه سوختگی در سطح قطعات سنگ زنی شده با روش های خنک کاری جریان سیال، MQL خالص و یا MQL با نانوسیالات گرافیت و اکسید مس مشاهده نمی گردد.

6-2-5- سیستم خنک کاری جریان سیال دارای بالاترین ضریب انتقال حرارت همرفت در بین دیگر روش های روانکاری برابر با $5 \times 10^5 \text{ W/m}^2\text{K}$ می باشد. این مقادیر برای سیستم MQL با نانوسیال اکسید مس در فشارهای جریان 4 و 6 bar به ترتیب برابر با 1×10^5 و $1/4 \times 10^5 \text{ W/m}^2\text{K}$ است. مقادیر ضرایب انتقال حرارت همرفت در شرایط روانکاری MQL با نانوسیال گرافیت در فشارهای جریان 4 و 6 bar به ترتیب برابر با $1/5 \times 10^5$ و $2 \times 10^5 \text{ W/m}^2\text{K}$ می باشد. از این جهت، سهم انرژی قطعه کار از حرارت تولید شده در سنگ زنی و دمای قطعات در شرایط روانکاری جریان سیال کمتر از مقادیر مشابه در سیستم های روانکاری دیگر می باشد.

6-2-6- افزایش دمای سطح کار در سنگ زنی MQL با نانوسیال اکسید مس بطور نسبی کمتر از مقادیر مشابه در سنگ زنی با استفاده از نانوسیال گرافیت می باشد، در حالی که ضریب انتقال حرارت همرفت سیستم MQL نانوسیال گرافیت بالاتر از مقدار مشابه در سیستم MQL نانوسیال اکسید مس است. براساس نتایج مدل FDM، سهم انرژی قطعه کار در سنگ زنی با استفاده از سیستم MQL نانوسیال اکسید مس کمترین مقادیر را نسبت به مقادیر مشابه در سنگ زنی با استفاده از سیستم روانکار MQL نانوسیال گرافیت و جریان سیال دارا می باشد. در طی سنگ زنی MQL، نانوذرات گرافیت و اکسید مس بسته های هوایی کوچک مابین چرخ سنگ و قطعه کار را در ناحیه تماس سنگ زنی پر می کنند. چنانچه هدایت حرارتی نانوذرات گرافیت بالاتر از نانوذرات اکسید مس است،

هدایت حرارتی بالاتر سبب تسهیل در پخش حرارتی به قطعه کار در ناحیه تماس شده و در نتیجه آن سهم حرارتی قطعه کار افزایش می یابد.

6-2-7- عدم تشکیل فیلم روانکار مؤثر در شرایط سنگ زنی با استفاده از سیستم روانکاری جریان سیال سبب ایجاد زبری سطح بالاتر قطعات در مقایسه با سنگ زنی تحت شرایط روانکاری MQL خالص، با نانوسیال گرافیت و MQL با نانوسیال اکسید مس می گردد. این پدیده تحت شرایط سنگ زنی با سطوح بالاتر پارامترهای برشی عمق بار و سرعت قطعه کار تشدید شده، سبب ایجاد زبری سطح بالاتر قطعات از طریق تشدید در عمل شخم زنی و ایجاد شیارهای سطحی عمیق تر می گردد.

6-2-8- در مقایسه با شرایط سنگ زنی خشک و سنگ زنی با جریان سیال، بکارگیری روش روانکاری MQL با استفاده از نانوسیال، سبب کاهش قابل ملاحظه زبری سطح قطعات تحت پارامترهای سنگ زنی مختلف می گردد. در سنگ زنی با روانکاری MQL نانوسیال گرافیت، شکل گیری فیلم روانکاری مؤثر در وجه مشترک چرخ سنگ و قطعه کار در ناحیه سنگ زنی از طریق عکس العمل بین ترکیبات موجود در روغن گیاهی با سطح فلز و عملکرد لغزشی صفحات اتمی نانوذرات گرافیت سبب کاهش قابل ملاحظه زبری سطح قطعات حتی تحت شرایط سنگ زنی با سطوح بالای پارامترهای برشی عمق بار و سرعت قطعه کار می گردد. بعنوان مثال، در سنگ زنی با MQL نانوسیال گرافیت با غلظت حجمی % 0/35 vol نانوذرات در سیال پایه و فشار جریان 4 bar، زبری سطح قطعات در امتداد طولی و عرضی سنگ زنی نسبت به مقادیر مشابه تحت شرایط سنگ زنی با روانکاری جریان سیال بترتیب به میزان 48/8 و % 43/6 کاهش می یابد.

6-2-9- در سنگ زنی MQL با نانوسیال اکسید مس، عملکرد غلظتی نانوذرات سبب ایجاد سطوح سنگ زنی هموار با زبری سطح پایین حتی تحت شرایط سنگ زنی با سطوح بالای پارامترهای برشی عمق بار و سرعت قطعه کار می گردد. ترکیبات موجود در روغن گیاهی از طریق تشکیل ترکیبات فلزی فسفیدها، کلریدها، و سولفیدها و نیز اتصال تری گلیسریدها با انتهای قطبی به سطح فلز کار در شکل گیری فیلم ویسکوز در برگیرنده نانوذرات اکسید مس و شکل گیری فیلم روانکار، مؤثر می باشند. در این شرایط تعداد و عمق خطوط ساییش بر روی سطح کار با افزایش غلظت حجمی نانوذرات در سیال پایه از 0/15 تا % 0/35 vol کاهش می یابد.

6-2-10- در مقایسه نتایج سنگ زنی در شرایط MQL با نانوسیالات گرافیت و اکسید مس، استفاده از نانوسیال اکسید مس با غلظت بالای نانوذرات در سیال پایه از جهت پایین تر بودن دمای سطوح سنگ زنی و ایجاد فیلم روانکار مؤثرتر در شرایط سنگ زنی خشن توصیه می شود.

6-2-11- میکروسختی سطوح قطعات در سنگ زنی MQL با استفاده از نانوسیال گرافیت از طریق نفوذ نانوذرات گرافیت در سطح سنگ زنی قطعات و نیز در نتیجه لغزش سطوح آزاد دانه های ساینده بر روی سطح کار بواسطه شکل گیری فیلم روانکار مؤثر در وجه مشترک چرخ سنگ با قطعه کار افزایش می یابد. این عمل لغزش از طریق ارتقاء تغییر شکل پلاستیکی زیر لایه سطح کار تحت فشار بالای موجود در ناحیه تماس سنگ زنی سبب افزایش میزان میکروسختی سطوح سنگ زنی شده می گردد. همچنین تحت شرایط روانکاری MQL با نانوسیال اکسید

مس، عمل تغییر شکل پلاستیکی زیر لایه سطحی کار ذکر شده به همراه نفوذ نانوذرات اکسید مس در سطح سنگ زنی سبب افزایش میکروسختی سطوح کار می گردد. این میزان میکروسختی با افزایش درصد حجمی نانوذرات در سیال پایه نانوسیالات مورد استفاده افزایش می یابد.

6-3- پیشنهادات

در این مطالعه موارد متعددی جهت ادامه تحقیقات در زمینه سنتز نانوسیالات و سنگ زنی MQL مشخص می گردند که از جمله آنها عبارتند از :

6-3-1- مطالعه دقت ابعادی قطعات سنگ زنی شده به روش MQL با استفاده از نانوسیالات گرافیت و اکسید مس.

6-3-2- بررسی نقش ارتعاشات آلتراسونیک میز ماشین در عملکرد روانکاری نانوسیالات گرافیت و اکسید مس در فرآیندهای سنگ زنی و میکرو سنگ زنی.

6-3-3- مطالعه ویژگی های پروسه سنگ زنی فولادهای آستنیتی و آلیاژهای پایه نیکل با استفاده از روانکاری نانوسیالات گرافیت و اکسید مس از جهت سلامت سطح قطعات و ترک های بین دانه ای در سطوح سنگ زنی شده.

6-3-4- بررسی خواص روانکاری نانوسیال دوجزئی متشکل از نانوذرات اکسید مس و گرافیت در پروسه سنگ زنی.

6-3-5- بررسی نقش ترکیبات روغن گیاهی با خصوصیات متفاوت اسیدهای چرب اشیاء شده در سیال پایه نانوسیالات مورد استفاده در پروسه سنگ زنی از جنبه ویژگی های روانکاری نانوذرات و سلامت سطح قطعات حاصله.

6-3-6- سنتز نانوسیالات متشکل از نانوذراتی با درجه سختی بالا نظیر تنگستن کارباید، کروم کارباید و یا زیرکونیم اکساید بر روی خواص روانکاری این نانوسیالات در پروسه سنگ زنی.

6-3-7- طراحی، ساخت و تست سیستم مکنده غبار سنگ زنی جهت کاهش میزان پخش ذرات براده ها و غبار نانوسیالات در اثر فشار جریان در سیستم MQL در طی فرآیند سنگ زنی.

مراجع و منابع



1. Y. Xuan, W. Roetzel, 2000. Conception of heat transfer correlation of nanofluids. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 43 (19), pp. 3701–3707.
2. M. Rahman, A. Senthil Kumar, M.U. Salam, 2002. Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 42 (5), pp. 539–547.
3. L.R. Silva, E.C. Bianchi, R.E. Catai, R.Y. Fosse, T.V. França, P.R. Aguiar, 2005. Study on the behavior of the minimum quantity lubricant - MQL technique under different lubricating and cooling conditions when grinding ABNT 4340 steel. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 27 (2), 192–199.
4. Y. Xuan, Q. Li, 2003. Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids. Journal of Heat Transfer, Vol. 125 (1), pp. 151–155.
5. C. Kleinstreuer, Y. Feng, 2011. Experimental and theoretical studies of nanofluid thermal conductivity enhancement: A review. Nanoscale Research Letters, Vol. 6 (1), pp. 229–241.
6. J.H. Lee, K.S. Hwang, S.P. Jang, B.H. Lee, J.H. Kim, S.U.S. Choi, C.J. Choi, 2008. Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al_2O_3 nanoparticles. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 51, pp. 2651–2656.
7. S.U.S. Choi, Z.G. Zhang, W. Yu, F.E. Lockwood, E.A. Grulke, 2001. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. Applied Physics Letters, Vol. 79, 2252–2254.
8. A. Verma, W. Jiang, H.H. Abu Safe, W.D. Brown, A.P. Malshe, 2008. Tribological behavior of deagglomerated active inorganic nanoparticles for advanced lubrication. Tribology Transactions, Vol. 51 (5), pp. 673–678.
9. S.M. You, G.H. Kim, K.H. Kim, 2003. Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer. Applied Physics Letters, Vol. 83(16), pp. 3374–3376.
10. S.L. Sundar, K.V. Sharma, 2010. Heat transfer enhancements of low volume concentration Al_2O_3 nanofluid and with longitudinal strip inserts in a circular tube. International Journal Heat Mass Transfer, Vol. 53 (19–20), pp. 4280–4286.
11. M.N. Pantzali, A.A. Mouza, S.V. Paras, 2009. Investigating the efficacy of nanofluids as coolants in plate heat exchangers (PHE). Chemical Engineering Sciences, Vol. 64 (14), pp. 3290–3300.
12. B.H. Kim, M.J. Hackett, J. Park, T. Hyeon, 2014, Synthesis, Characterization, and Application of Ultrasmall Nanoparticles, Chemistry of Materials, Vol. 26 (1), pp. 59–71.
13. R.K. Sahu, S.S. Hiremath, P.V. Manivannan, M. Singaperumal, 2014. Generation and characterization of copper nanoparticles using micro-electrical discharge machining. Materials and Manufacturing Processes, Vol. 29 (4), pp. 477–486.
14. S.M.S. Murshed, K.C. Leong, C. Yang, N.T. Nguyen, 2008. Convective heat transfer characteristics of aqueous TiO_2 nanofluid under laminar flow conditions. International Journal of Nanoscience, Vol. 7 (6), pp. 325–331.
15. Y. Xuan, Q. Li, 2000. Heat transfer enhancement of nanofluids. International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 21, pp. 58–64.

16. P. Ibrahim, M. Zenfira, W. Sanjeeva, D. Yulong, 2011. Dispersion stability and thermal conductivity of propylene glycol based nanofluids. *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 13, pp. 5049–5055.
17. S.P. Jang, S.U.S. Choi, 2004. Role of brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids. *Applied Physics Letters*, Vol. 84, pp. 4316–4318.
18. P. Vadasz, 2006. Heat conduction in nanofluid suspensions. *Journal of Heat Transfer*, Vol. 128, pp. 465–477.
19. X. Li, D. Zhu, X. Wang, 2007. Evaluation on dispersion behavior of the aqueous copper nano-suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 310, pp. 456–63.
20. A.E.I. Elshwain, N. Redzuan, 2014. Effect of cooling/lubrication using cooled air, MQL + cooled air, N₂ and CO₂ gases on tool life and surface finish in machining: A review. *Advanced Materials Research*, Vol. 845, pp 889–893.
21. J.P. Davim, P.S. Sreejith, R. Gomes, C. Peixoto, 2006. Experimental studies on drilling of sluminium (AA1050) under dry, minimum quantity of lubricant, and flood-lubricated conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 220, pp. 1605–1611.
22. K.V. Wong, O.D. Leon, 2010. Review article, applications of nanofluids: current and future. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 2010, pp. 1–11.
23. T. Howes, 1990, Assessment of the Cooling and Lubricative Properties of Grinding Fluids, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 39 (1), pp. 313–316.
24. S. Malkin, R.B. Anderson, 1974. Thermal aspects of grinding: Part 1–energy partition. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 96 (4), pp. 1177–1183.
25. S. Malkin, 1974, Thermal aspects of grinding: Part 2–surface temperatures and workpiece burn. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 96 (4), pp. 1184–1191.
26. R.J. Gu, M. Shillor, G.C. Barber, T. Jen, 2004. Thermal analysis of the grinding process. *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 39 (9–10), pp. 991–1003.
27. J. Hwang, S. Kompella, S. Chandrasekar, T.N. Farris, 2003. Measurement of temperature field in surface grinding using Infra-red (IR) imaging system. *Journal of Tribology*, Vol. 125 (2), pp. 377–383.
28. S. Malkin, 1989, *Theory and Applications of Machining with Abrasives*, Ellis Horwood, Chichester, and John Wiley & Sons, New York.
29. Z. Chen, H. Yamaguchi, S.Y. Liang, 2002. Predictive modeling of cutting fluid aerosol in grinding process. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution, Society of Manufacturing Engineers*, pp. 277-285.
30. OSHA Technical Manual (OTM) Section VIII, United States Department of Labor, <https://www.osha.gov/>
31. Industrial Dust, Air Pollution and related Occupational Diseases, National Institute for Occupational Safety and Health, <https://www.cdc.gov/niosh/>
32. J.F.G. Oliveira, S.M. Alves, 2006. Development of environmentally friendly fluid for CBN grinding. *Annals of the CIRP*, Vol. 55 (1), pp. 343–346.

33. M.J. Hadad, T. Tawakoli, M.H. Sadeghi, B. Sadeghi, 2012. Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 54–55, pp. 10–17.
34. J.C. Aurich, P. Herzenstiel, H. Sudermann, T. Magg, 2008. High-performance dry grinding using a grinding wheel with a defined grain pattern. CIRP Annals–Manufacturing Technology, Vol. 57, pp. 357–362.
35. S. Malkin and C. Guo, 2008. Theory and applications of machining with abrasives. Industrial Press, New York.
36. K. Weinert, I. Inasaki, J.W. Sutherland, T. Wakabayashi, 2004. Dry machining and minimum quantity lubrication. CIRP Annals–Manufacturing Technology, Vol. 57, pp. 357–362.
37. J.H. Wu, B.S. Philips, W. Jiang, J.H. Sanders, J.S. Zabinski, A.P. Malshe, 2006. Bio-inspired surface engineering and tribology of MoS₂ overcoated CBN-TiN composite coatings. Wear, Vol. 261, pp. 592–599.
38. M. Rafati, A.A. Hamidi, M. Shariati Niaser, 2012. Application of nanofluids in computer cooling systems (heat transfer performance of nanofluids). Applied Thermal Engineering, Vol. 45–46, pp. 9–14.
39. A.S. Ahuja, 1975. Augmentation of heat transport in laminar flow of polystyrene suspensions, I. experiments and results. Journal of Applied Physics, Vol. 46 (8), pp. 3408–3416.
40. B. Metzger, O. Rahli, X. Yin, 2013. Heat transfer across sheared suspensions: role of the shear-induced diffusion. Journal of Fluid Mechanics, Vol. 724, pp. 527–552.
41. H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae, N. Hishinuma, 1993. Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles: Dispersion of Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂ ultra-fine particles. Netsu Bussei, Vol. 7 (4), pp. 227–233.
42. S.U.S. Choi, J.A. Eastman, 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. ASME International Mechanical Engineering Conference on Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles, Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers, Vol. 66, pp. 99–106.
43. J. Garg, B. Poudel, M. Chiesa, J. B. Gordon, J.J. Ma, J.B. Wang, Z.F. Ren, Y.T. Kang, H. Ohtani, J. Nanda, G.H. McKinley, and G. Chen, 2008, Enhanced Thermal Conductivity and Viscosity of Copper Nanoparticles in Ethylene Glycol Nanofluid, Journal of Applied Physics, Vol. 103, 074301.
44. S. Lee, S.U.S. Choi, S. Li, J.A. Eastman, 1999. Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles. Journal of Heat Transfer, Vol. 121 (2), pp. 280–289.
45. H. Xie, H. Lee, W. Youn, M. Choi, 2003. Nanofluids containing multiwalled carbon nanotubes and their enhanced thermal conductivities. Journal of Applied Physics, Vol. 94 (8), pp. 4967–4971.
46. M.S. Liu, M.C.C. Lin, C.Y. Tsai, C.C. Wang, 2006. Enhancement of thermal conductivity with Cu for nanofluids using chemical reduction method. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, pp. 3028–3033.
47. C.Y. Lin, J.C. Wang, T.C. Chen, 2011. Analysis of suspension and heat transfer characteristics of Al₂O₃ nanofluids prepared through ultrasonic vibration. Applied Energy, Vol. 88, pp. 4527–4533.
48. A. Einstein, 1956. Investigation on the theory of brownian movement. Dover, New York.
49. H. Chen, S. Witharana, Y. Jin, C. Kimd, Y. Ding, 2009. Predicting thermal conductivity of liquid suspensions of nanoparticles (nanofluids) based on rheology. Particuology, Vol. 7, pp. 151–157.

50. R.L. Hamilton, O.K. Crosser, 1962. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, Vol. 1 (3), pp. 187–191.
51. D.A.G. Bruggeman, 1935. Calculation of various physics constants in heterogenous substances: I. dielectricity constants and conductivity of mixed bodies from isotropic substances. *Annalen der Physik*, Vol. 24 (7), pp. 636–664.
52. C.W. Nan, Z. Shi, Y. Lin, 2003. A simple model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites. *Chemical Physics Letters*, Vol. 375, pp. 666–669.
53. D.C. Tien, K.H. Tseng, C.Y. Liao, J.C. Huang, T.T. Tsung, 2008. Discovery of ionic silver in silver nanoparticle suspension fabricated by arc discharge method. *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 463, pp. 408–411.
54. K.H. Tseng, C.Y. Liao, J.C. Huang, D.C. Tien, T.T. Tsung, 2008. Characterization of gold nanoparticles in organic or inorganic medium (ethanol/water) fabricated by spark discharge method. *Materials Letters*, Vol. 62, pp. 3341–3344.
55. C.H. Lo, T.T. Tsung, L.C. Chen, C.H. Su., H.M. Lin, 2005. Fabrication of copper oxide nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS). *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 7, pp. 313–320.
56. K.H. Tseng, J.C. Huang, K.C. Chen, C.Y. Liao, 2011. Preparation of metal nano-fluid via electrical discharge machining. Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 6th IEEE Conference, pp. 1085–1089.
57. R.K. Sahoo, S.H. Somashekhar, P.V. Manivannan, 2013. Investigation on copper nanofluid obtained through micro electrical discharge machining for dispersion stability and thermal conductivity. *International Conference on Design and Manufacturing, IConDM, Procedia Engineering*, Vol. 64, pp. 946–955.
58. T. Tawakoli, M.J. Hadad, M.H. Sadeghi, A. Daneshi, S. Stöckert, A. Rasifard, 2009. An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication–MQL grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, pp. 924–932.
59. M.N. Morgan, L. Barczak, A. Batako, 2012. Temperatures in fine grinding with minimum quantity lubrication (MQL). *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 60, pp. 95–958.
60. M. Vashista, S. Paul, 2014. Effect of process parameters on convective heat transfer coefficient of fluid and heat partitioning in high efficiency deep grinding with water based coolant. *5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference (AIMTDR 2014) December 12th–14th, 2014, IIT Guwahati, Assam, India.*
61. F. Rabiei, A.R. Rahimi, M.J. Hadad, M. Ashrafi, 2015. Performance improvement of minimum quantity lubrication (MQL) technique in surface grinding by modeling and optimization. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 86, pp. 447–460.
62. H.Z. Choi, S.W. Lee, H.D. Jeong, 2002. The cooling effects of compressed air in cylindrical grinding with alumina and CBN wheels. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 127, pp. 155–158.
63. H.H. Tsai, H. Hocheng, 1998. Investigation of the transient thermal deflection and stresses of workpiece in surface grinding with the application of a cryogenic magnetic chuck. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 79, pp. 177–184.

64. S. Paul, A.B. Chattopadhyay, 1996. Determination and control of grinding zone temperature under cryogenic cooling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 36, pp. 491–501.
65. Y. Gao, H. Lai, 2008. Use of actively cooled and activated coolant for surface quality improvement in ductile material grinding. *International Journal of Materials and Product Technology*, Vol. 31 (1), pp. 14–26.
66. E.A. Rahim, H. Sasahara, 2011. A study of the effect of palm oil as MQL lubricant on high speed drilling of titanium alloys. *Tribology International*, Vol. 44, pp. 309–317.
67. R. Yunus, A.F. Razi, T.L. Ooi, S.E. Iyuke, J.M. Peraz, 2004. Lubrication properties of trimethylolpropane esters based on palm oil and palm kernel oils. *European Journal of Lipid Science and Technology*, Vol. 106 (1), pp. 52–60.
68. J. Wang, Q. Zhang, 2008. A study of high-performance plane rake faced twist drills. Part 1: geometrical analysis and experimental investigation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, pp. 1276–1285.
69. W. Belluco, L. De Chiffre, 2002. Surface integrity and part accuracy in reaming and tapping stainless steel with new vegetable based cutting oils. *Tribology International*, Vol. 35, pp. 865–870.
70. L.R. Silva, E.C. Bianchi, R.E. Catai, R.Y. Fosse, T.V. França, P.R. Aguiar, 2005. Study on the behavior of the minimum quantity lubricant – MQL technique under different lubricating and cooling conditions when grinding ABNT 4340 steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 27 (2), pp. 192–199.
71. G.Q. Cai, B.F. Feng, T. Jin, Y.D. Gong, 2002, Study on the Friction Coefficient in Grinding, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 129, p.p. 25–29.
72. G. Srihari, G.K. Lal, 1994. Mechanics of vertical surface grinding. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 44, pp. 14–28.
73. C.H. Li, Y.L. Hou, S.C. Xiu, G.Q. Cai, 2008. Application of lubrication theory to near-dry-green grinding: Feasibility analysis. *Advanced Materials Research*, Vol. 44–46, pp. 135–42.
74. B. Shen, P. Kalita, A.J. Shih, A.P. Malshe, 2008. Performance of novel MoS₂ nanoparticles based grinding fluids in minimum quantity lubrication grinding. *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME*, Vol. 36, pp. 357–364.
75. P. Kalita, 2009. Testing of nano-engineered lubricants for minimum quantity lubrication (MQL) grinding: Performance testing and fundamental understanding. University of Arkansas, Fayetteville, Master's Thesis.
76. B. Shen, P. Kalita, A.J. Shih, A.P. Malshe, 2008. Performance of novel MoS₂ nanoparticles based grinding fluids in minimum quantity lubrication grinding. *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 36, pp. 357–364.
77. A.J. Shih, P. Kalita, A.P. Malshe, 2010. Tribological study of nano lubricant integrated soybean oil for minimum quantity lubrication (MQL) grinding. *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 38, pp. 137–144.
78. P. Kalita, A.P. Malshea, S.A. Kumarb, V.G. Yoganathb, T. Gurumurthy, 2012. Study of specific energy and friction coefficient in minimum quantity lubrication grinding using oil-based nano-lubricants. *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 14, pp. 160–166.

79. C. Mao, H. Zou, X. Huang, J. Zhang, Z. Zhou, 2013. The influence of spraying parameters on grinding performance for nanofluid minimum quantity lubrication. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 64, pp. 1791–1799.
80. Z. Dongkun, L. Changhe, J. Dongzhou, Z. Yanbin, Z. Xiaowei, 2015. Specific grinding energy and surface roughness of nanoparticle jet minimum quantity lubrication in grinding. *Chinese Society of Aeronautics and Astronautics & Beihang University, Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 28 (2), pp. 570–581.
81. M. Alberts, K. Kalaitzidou, S. Melkote, 2009. An investigation of graphite nanoplatelets as lubricant in grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, pp. 966–970.
82. P.J. Bryant, P.L. Gutshall, L.H. Taylor, 1964. A study on mechanisms of graphite friction and wear. *Wear*, Vol. 7 (3), pp. 118–119.
83. V. Vasu, G.P. Kumar Reddy, 2011. Effect of minimum quantity lubrication with Al_2O_3 nanoparticles on surface roughness, tool wear and temperature dissipation in machining inconel 600 alloy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: Journal of Nanoengineering and Nanosystems*, Vol. 225 (1), 3–16.
84. P. Vamsi Krishna, R. R. Srikant, R. Padmini and Bharat Parakh, 2012. Basic properties and performance of vegetable oil-based boric acid nanofluids in machining. *Emerging Trends in Science, Engineering and Technology*, pp. 197–206.
85. K.P. Sodavadia, A.H. Makwana, 2014. Experimental investigation on the performance of coconut oil based nanoFluid as lubricants during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, Vol. 4 (1), pp. 55–60.
86. T. Kien Nguyen, I. Do, P. Kwon, 2012. A tribological study of vegetable oil enhanced by nanoplatelets and implication in MQL machining. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 13 (7), pp. 1077–1083.
87. M. Sayuti, A.A.D. Sarhan, T. Tanaka, M. Hamdi, Y. Saito, 2013. Cutting force reduction and surface quality improvement in machining of aerospace duralumin AL-2017-T4 using carbon onion nanolubrication system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 65, pp. 1493–1500.
88. Y. Su, L. Gong, D. Chen, 2015. An investigation on tribological properties and lubrication mechanism of graphite nanoparticles as vegetable based oil additive. *Hindawi Publishing Corporation, Journal of Nanomaterials*, Vol. 2015, pp. 2–7.
89. L.P., Tarasov, 1950. Some metallurgical aspects of grinding. *Machining Theory and Practice*, ASM, pp. 409–464.
90. Jing Li, J.C.M. Li, 2005. Temperature distribution in workpiece during scratching and grinding. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 409, pp. 108–119.
91. V. Vasu, K. Manoj Kumar, 2011. Analysis of nanofluids as cutting fluid in grinding EN-31 steel. *Nano-Micro Letters*, Vol. 3 (4), pp. 209–214.
92. C.H. Li, J.Y. Li, S. Wang, Q. Zhang, 2013. Modeling and numerical simulation of the grinding temperature field with nanoparticle jet of MQL. *Hindawi Publishing Corporation, Advances in Mechanical Engineering*, doi: 10.1155/2013/986984.
93. Gostimirovic, M., Kovac, P., Sekulic, M., Savkovic B., 2009. An inverse heat transfer method for determination of the workpiece temperature in grinding. *Journal of Production Engineering*, Vol. 12 (1), pp. 5–8.

94. W.B. Rowe, M.N. Morgan, D.R. Allanson, 1991. An advance in the modelling of thermal effects in the grinding process. CIRP General Assembly, Annals of the CIRP, Vol. 40 (1), pp. 339–342.
95. W.B. Rowe, M.N. Morgan, S.E. Black, B. Mills, 1996. A simplified approach to control of thermal damage in grinding. Annals of the CIRP, Vol. 45, pp. 299–302.
96. H.J. Kim, N.K. Kim, J.S. Kwak, 2006. Heat flux distribution model by sequential algorithm of inverse heat transfer for determining workpiece temperature in creep feed grinding. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, pp. 2086–2093.
97. K.K. Hong, C.Y. Lo, 2000. An inverse analysis for the heat conduction during a grinding process. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 105, pp. 87–94.
98. N.R. DesRuisseaux, R.D. Zerkle, 1970. Temperature in semi-infinite and cylindrical bodies subjected to moving heat sources and surface cooling. Journal of Heat Transfer, Vol. 92, pp. 456–464.
99. B. Shen, A.J. Shih, G. Xiao, 2011. A heat transfer model based on finite difference method for grinding. Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 133, pp. 1–10.
100. P.S. Sreejith, B.K.A. Ngoi, 2000. Dry machining: Machining of the future. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 101 (1–3), pp. 287–291.
101. Carbon Steel SAE/AISI 1045, SAAJ Steel Corporation, <http://saajsteel.com/>
102. AISI 1045 Carbon Steel, All Metals & Forge Group, <http://www.steelforge.com/>
103. Datasheet: L6D8 load cell, [Zemic Europe BV. http://loadcell.ir/document/Zemic/L6D8/Datasheet%20L6D8/](http://loadcell.ir/document/Zemic/L6D8/Datasheet%20L6D8/)
104. Ramsden, E.d., 2000. Temperature measurement. Sensorslytics LLC. <http://www.sensorsmag.com/components/temperature-measurement>
105. High Temperature Systems, Laboratory Furnace Manufacturing, Exciton Co., <http://excitonco.ir/fa/>
106. Minimal Quantity Lubrication (MQL) for Dry Machining Processes, SKF Group. <http://www.skf.com/binary/79-32233/1-5102-EN/>
107. L. Ding, J. Stilwell, T. Zhang, O. Elboundwarej, H. Jiang, J.P. Selegue, P.A. Cooke, J.W. Gray, F.F. Chen, 2005. Molecular characterization of the cytotoxic mechanism of multiwall carbon nanotubes and nano-onions on human skin fibroblast. Nano Letters, Vol. 5, pp. 2448–2464.
108. M. Shabgard, M. Seyedzavvar, H. Abbasi, 2017. Investigation into features of graphite nanofluid synthesized using electro discharge process. International Journal of Advanced Manufacturing Technolog, Vol. 90, pp. 1203–1216.
109. H. Chang, C.W. Lan, C.H. Chen, M.J. Kao, J.B. Guo, 2014. Anti-wear and friction properties of nanoparticles as additives in the lithium grease. International Journal of Precision Engineering Manufacture, Vol. 15, pp. 2059–2063.
110. Y. Zhang, C. Li, D. Jia, D. Zhang, X. Zhang, 2015. Experimental evaluation of the lubrication performance of MoS₂/CNT nanofluid for minimal quantity lubrication in Ni-based alloy grinding. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 99, pp. 19–33.
111. S. Malkin, C. Guo, 2007. Thermal analysis of grinding. CIRP Annals, Manufacturing Technology, Vol. 56, pp. 760–782.
112. G.E. Leblanc Leblanc, R.A. Secco, M. Kostic, 1999. Viscosity measurement. CRC Press LLC.

113. Y.A. Çengel, A.J. Ghajar, 2015. Heat and mass transfer, fundamentals and application. McGraw-Hill Education. New York.
114. Materials Grades, Meusburger Georg GmbH & Co KG.
115. J.O. Outwater, M.C. Shaw, 1952. Surface temperatures in grinding, Transactions ASME, Vol. 74, pp. 73–86.
116. T. Jin, D.J. Stephenson, W.B. Rowe, 2003. Estimation of the convection heat transfer coefficient of coolant within the grinding zone. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 217, pp. 397–407.
117. P. Kalita, A.P. Malshe, W. Jiang, A.J. Shih, 2010. Tribological study of nano lubricant integrated soybean oil for minimum quantity lubrication (MQL) grinding. Transactions NAMRI/SME, Vol. 38, pp. 137–144.
118. G.W. Stachowiak, A.W. Batchelor, 2005. Engineering Tribology, 3rd edition. Elsevier, Oxford.
119. D. Kenbeck, D.T.F. Bunemann, 2009. Organic Friction Modifiers. Lubricant Additives Chemistry and Applications, 2nd edition. CRC Press Taylor & Francis Group, Florida.
120. 49. Suarez AN, Grahm M, Pasaribu R, Larsson R. The influence of base oil polarity on the tribological performance of zinc dialkyl dithiophosphate additives. Trib Int 2010;43:2268–2278.
121. W. Liew, Y. Hsien, 2015. Towards Green Lubrication in Machining. Springer.
122. Graphite (C) - Classifications, Properties and Applications of Graphit, AZO Materials. <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1630>
123. M. Neslušán M, I. Mrkvica, R. Čep, P. Raos, 2012. Heat distribution when nickel alloy grinding. Tehnicki Vjesnik, Vol. 19, pp. 947–951.
124. S.M. Muzakkir, H. Hirani, 2015. Experimental investigation on effect of grinding direction on wear under heavy load and slow speed conditions with molybdenum disulphide (MoS₂) as additive in commercial lubricant. International Journal of Engineering Research, Vol. 4, pp. 102–104.
125. AISI 1045 Medium Carbon Steel, AZO Materials. <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6130>
126. S. Petronić, A. Milosavljević, 2007. Heat treatment effect on multicomponent nickel alloys structure. FME Transactions, Vol. 35, pp. 189–193.
127. O.V. Kasparova, 2000. Intergranular corrosion of nickel alloys (Review). Protection of Metals, Vol. 36, pp. 524–532.
128. B. Gwinner, M. Auroya, F. Balbaud-Célérrier, P. Fauvet, N. Larabi-Gruet, P. Laghoutaris, R. Robin, 2016. Towards a reliable determination of the intergranular corrosion rate of austenitic stainless steel in oxidizing media. Corrosion Science, Vol. 107, pp. 60–75.
129. M.V. Thottackkad, R.K. Perikinalil, P.N. Kumarapillai, 2012. Experimental evaluation on the tribological properties of coconut oil by the addition of CuO nanoparticles. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 13, pp. 111–116.
130. M.R. Lovell, M.A. Kabir, P.L. Menezes, C.F. Higgs III, 2010. Influence of boric acid additive size on green lubricant performance. Philosophical Transactions of Royal Society A, Vol. 368, pp. 4851–4868.
131. L.R. Rudnick, 2009. Additives for industrial lubricant applications, Lubricant Additives Chemistry and Applications. CRC Press Taylor & Francis Group, Florida.

132. M. Kostic, K.C. Simham, 2009. Computerized, transient hot-wire thermal conductivity (HWTC) apparatus for nanofluids. *The 6th IASME/WSEAS International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment*, Rhodes Island (Rodos Island), Greece.
133. C. Codreanu, N.I. Codreanu, VVN. Obreja, 2007. Experimental set-up for the measurement of the thermal conductivity of liquids. *Romanian Journal of Information Science and Technology*, Vol. 10 (3), pp. 215–231.
134. G.C. Lowenthal, A.F.A. Harper, 1960. Resistance-temperature relationship of platinum at low temperatures and its influence on precision thermometry. *Journal of Applied Physics*, Vol. 11, pp. 205–208.
135. Discrete Semiconductors and Passive Electronic Components, Vishay Corporation, www.vishay.com/company/.
136. Practical Temperature Measurement, Agilent Application Note, Agilent Semiconductor, 2012, SSBN 5965-7822E.
137. Innovative Temperature Sensing Solutions, U.S. Sensor Corporation, www.ist-ag.com/
138. G104 - Guide for Estimation of Measurement Uncertainty in Testing. American Association for Laboratory Accreditation, 2014.
139. Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods. NASA Measurement Quality Assurance Handbook, National Aeronautics and Space Administration, 2010.

ضمیمه الف

طراحی و ساخت وسیله اندازه گیری ضریب هدایت

حرارتی سیال

ضمیمه الف

طراحی و ساخت وسیله اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی سیال

ض.م-الف-1- مقدمه

بطور کلی نانوسیال به سوسپانسیونی از نانوذرات فلزی یا اکسیدفلزی و یا غیرفلزاتی در فرم کروی، صفحه ای و یا لوله ای در ابعاد زیر 100 nm در سیال یک پایه، عموماً از آب خالص، اتیلن گلیکول، روغن و ... گفته می شود. انتظاراتی که از نانو سیالات در مقایسه با سیالات متداول وجود دارد، ویژگی انتقال حرارت بالای آنها است. بعبارت دیگر، ارتقاء قابلیت هدایت حرارتی نانوسیالات حاصل از حضور ذراتی در ابعاد نانو در داخل سیال پایه، ازجمله مواردی است که در تولید نانوسیالات مؤثر مورد توجه است. تعیین این کمیت از طریق روابط تئوری تقریباً غیرعلمی و غیر دقیق است و عمدتاً از روش های تجربی برای این منظور استفاده می شود. روش سیم داغ گذرا¹ از جمله روش هایی که در اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات بر اساس تئوری منبع خطی گذرا توسعه یافته است [132]. در این بخش ابتدا تکنیک روش سیم داغ گذرا توضیح داده شده و سپس تغییرات انجام گرفته بر روی این سیستم جهت سهولت و دقت بالاتر در دستیابی به ضریب هدایت حرارتی سیالات ارائه شده است. سیستم طراحی و ساخته شده به همراه جزئیات مربوطه در این بخش مورد بحث قرار گرفته اند.

ض.م-الف-2- اندازه گیری هدایت حرارتی سیالات بر مبنای سیم داغ گذرا (THW)

ض.م-الف-2-1- اساس روش اندازه گیری هدایت حرارتی بر مبنای سیم داغ گذرا

روش سیم داغ گذرا تکنیکی برای اندازه گیری هدایت حرارتی سیالات بر مبنای اندازه گیری افزایش دمای سیم غوطه ور در داخل مایع با عبور جریان الکتریکی از آن است. این سیم در ابتدا در داخل مایع قرار گرفته و در حالت تعادل دمایی با آن می رسد. سپس با عبور جریان، یک افزایش دمای وابسته به زمان در آن اتفاق افتاده و سپس دمای این سیم در داخل سیال به یک حالت پایا می رسد. بعبارت دیگر، حرارت تولید شده با گذر جریان از سیم و دمای دفع شده از آن با هدایت و همرفت طبیعی² حرارت توسط محیط سیال به حالت تعادل می رسند. مدل تئوری که برای تفسیر تکنیک THW بکار برده می شود بر اساس حل تحلیلی معادله هدایت حرارتی برای یک منبع حرارت خطی در شرایطی که $r \rightarrow 0$, $L \rightarrow \infty$ میل کرده و بطور کامل بدون مقاومت تماس حرارتی³ در داخل حوضچه حرارتی نامحدود⁴ در دمای اولیه T_0 غوطه ور است. این حوضچه بصورت ماده همگن و ایزوتروپ با خصوصیات انتقال حرارت ثابت در نظر گرفته می شود. زمانی که جریان الکتریکی مشخص از این سیم عبور داده می شود، حرارت تولید شده در سیم ناشی از آن توسط سیال اطراف دفع می گردد. تغییرات حرارتی سیم در این حالت

¹ Transient hot wire² Natural convection³ Thermal contact resistance⁴ Infinite heat sink

با توان الکتریکی خروجی در واحد طول سیم (q) متناسب است. در این حالت افزایش دما در فاصله شعاعی r از منبع حرارتی توسط رابطه (ض.م-الف-1) بیان می شود [133].

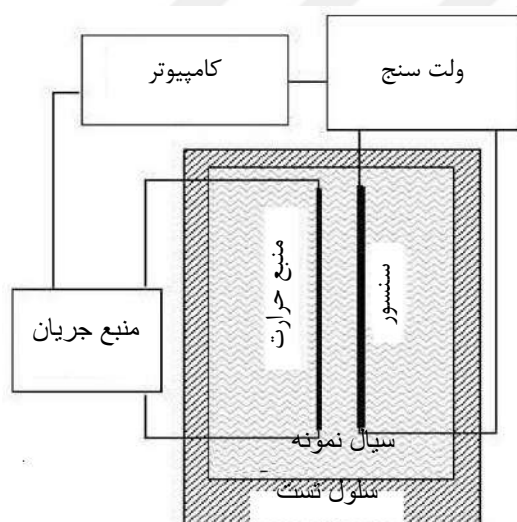
$$\Delta T(t, r) = \frac{q}{4\pi k} \ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2 C}\right) \quad (\text{ض.م-الف-1})$$

که در آن t عبارت است از زمان (s)، k ضریب هدایت حرارتی ($W/m.K$)، α ضریب پخش حرارتی (m^2/s)، و C برابر $\exp(\gamma)$ است که γ ثابت اولر¹ برابر 0.57722 می باشد.

منحنی دما $T(t, r)$ در برابر زمان در مقیاس لگاریتمی بصورت خطی خواهد بود که شیب این خط برابر $S = q/(4\pi k)$ است. در این شرایط می توان ضریب هدایت حرارتی را با استفاده از رابطه (ض.م-الف-2) بدست آورد.

$$k = \frac{q}{S} \quad (\text{ض.م-الف-2})$$

شکل (ض.م-الف-1) در برگرنده شماتیکی از سیستم اندازه گیری هدایت حرارتی بر مبنای سیم داغ گذرا می باشد.



شکل ض.م-الف-1 شماتیکی از مکانیزم اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی سیال به روش سیم داغ گذرا [133].

در عمل تعدادی از روش های اصلاح شده بر مبنای روش سیم داغ گذرا جهت رفع مشکلات مرتبط با این سیستم ارائه شده اند. برجسته ترین این مشکلات عبارتند از طول محدود سیم، ظرفیت گرمایی ذاتی سیم و ابعاد محدود نمونه مورد آزمایشی. طول محدود سیم، به همراه مهارهای دو انتهای آن سبب ایجاد هدر روی حرارتی در امتداد طولی شده و باعث ایجاد انحراف از پروفیل حرارت یکنواخت بصورت ایزوترمال متمرکز² در اطراف سیم می گردد. برای حذف این نوع از خطاها می توان دما را در وسط سیم که پروفیل حرارتی آن دچار آشفتگی نشده است اندازه گیری نمود. یک روش خوب استفاده از دو سیم با قطرهای مختلف $L_1 > L_2$ در حالت سری است. در این حالت اختلاف ولتاژ در محل طلاقی سیم ها، به عنوان معیاری از دما در بخش وسطی مجازی³ به طول $L_1 - L_2$ است.

¹ Euler's constant

² Concentric isothermal

³ Virtual central section

ظرفیت گرمایی سیم سبب می گردد تا کسر مشخصی از توان ورودی، بجای آنکه توسط نمونه تحت آزمایش دفع گردد، در خود سیم ذخیره شود. از طرف دیگر، در مدت زمان های آزمایش طولانی، اثر مرزهای سیال تحت آزمایش، بدلیل محدود بودن اندازه نمونه، اثر خود را نمایش می دهد. در هر دو مورد رابطه بین دما و لگاریتم طبیعی زمان ($\ln(t)$) بصورت شبه خطی نخواهد بود. منابع دیگر خطا در نمونه واقعی شامل انتقال حرارت بصورت همرفت و جابجایی جرمی¹ هستند.

با در نظر گرفتن خطای سیستماتیک در محدوده 0/1 تا 0/5، محدوده زمانی محاسبات در روش سیم داغ گذرا مطابق رابطه (ض.م-الف-3) پیشنهاد شده است:

$$t_{min} \geq 10 \frac{r^2}{\alpha}, \quad t_{max} \leq 0.2 \frac{R^2}{\alpha} \quad (\text{ض.م-الف-3})$$

که در آن R حداقل فاصله مابین سیم و سطح خارجی نمونه است.

بطور متداول، رابطه ساده سازی شده (ض.م-الف-3) برای اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی نمونه توسط سیم داغ گذرا، مطابق مقالات چاپ شده در این زمینه، بصورت رابطه (ض.م-الف-4) آورده شده است [133].

$$k = \frac{q}{4\pi} \frac{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}{T_2 - T_1} \quad (\text{ض.م-الف-4})$$

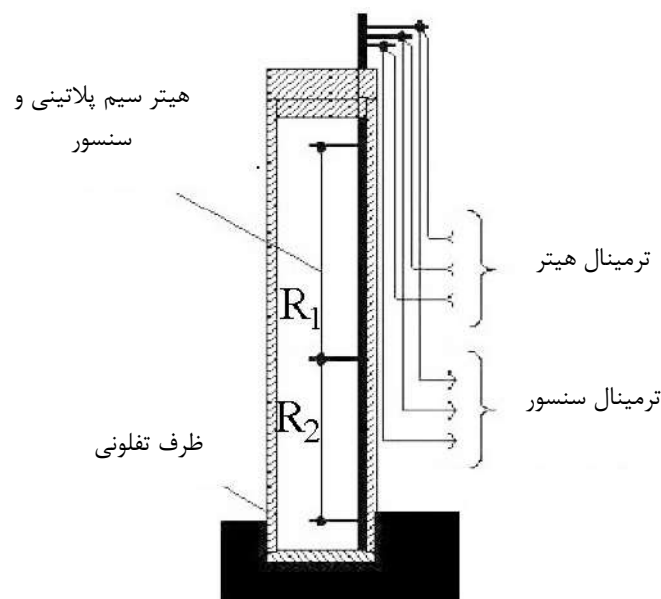
ض.م-الف-2-2- سیستم اصلاح شده THW برای اندازه گیری هدایت حرارتی سیال

هنگام بکارگیری روش THW برای اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی، بسیاری از خطاها ناشی از ترکیب بندی و ویژگی های ساختاری سلول طراحی شده² برای انجام اندازه گیری است. ساختاری که بتواند مواد فوق الذکر را در برگیرد، توسط کودرینانو و همکاران³ پیشنهاد گردید که در شکل (ض.م-الف-2) نمایش داده شده است. در این ساختار، یک سیم پلاتینی به قطر $35 \mu\text{m}$ استفاده شده است که بصورت دوتکه در حالت سری بصورت مقاومت های R_1 و R_2 بهم متصل گشته اند. از مهارهایی که عایق الکتریکی و گرمایی هستند جهت عایق نمودن این اتصالات استفاده می شود. این سیم پلاتینی هم در نقش منبع گرمایی و هم سنسور حرارتی عمل می نماید [133].

¹ Mass transfer

² Testing cell configuration

³ Codreanu et al.



شکل ض.م-الف-2 شماتیکی از ساختار سلول تست برای اندازه گیری هدایت حرارتی [133].

وابستگی گرمایی مقاومت پلاتینی بصورت خطی بوده و در محدوده وسیعی از درجه حرارت (در بازه °C 200~850) با گذر زمان بصورت ثابت باقی می ماند. این امر سبب می گردد تا این ماده در بسیاری از موارد عملی کاربرد داشته باشد. جهت انجام اندازه گیری، این سلول بایستی در داخل نمونه تحت آزمایش غوطه ور گردد و ظرف حاوی نمونه بایستی عایق حرارتی باشد تا ثبات حرارتی در حین آزمایش به حداکثر میزان خود برسد. پیرامون سیم پلاتینی نیز لایه ای عموماً از جنس تفلون برای عایق سازی الکتریکی و جلوگیری از الکترولیز سیال تحت آزمایش ایجاد می گردد. رابطه بین مقاومت الکتریکی و درجه حرارت مطابق معادله کلیندر¹ بصورت رابطه (ض.م-الف-5) می باشد.

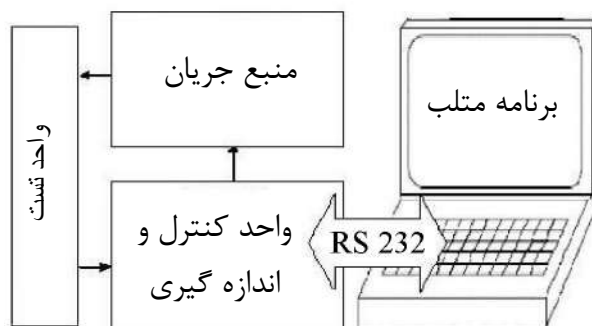
$$R(T) = R(0)(1 + aT + bT^2) \quad (\text{ض.م-الف-5})$$

که در آن $R(T)$ مقاومت سیم پلاتینی در درجه حرارت T و $R(0)$ مقاومت همان سیم در دمای صفر درجه سانتی گراد است. a و b تحت عنوان ضرایب کلیندر-وان دیوسن² شناخته شده اند. طبق استاندارد ASTM E1137، مقادیر a و b بترتیب برابر $(^{\circ}\text{C}^{-1}) 3/9083 \times 10^{-3}$ و $(^{\circ}\text{C}^{-2}) 5/775 \times 10^{-7}$ می باشند [134].

اساس سیستم اندازه گیری هدایت حرارتی به روش سیم داغ گذرا در بلوک دیاگرام نمایش داده شده در شکل (ض.م-الف-3) آورده شده است. این سیستم که توسط کودریانو و همکاران ارائه شده است، شماتیک کلی یک نمونه آزمایشگاهی برای اندازه گیری هدایت حرارتی می باشد [133].

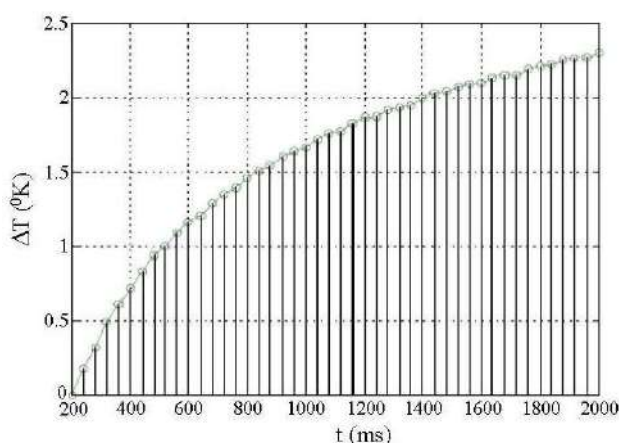
¹ Callendar

² Callender-Van Dusen coefficients

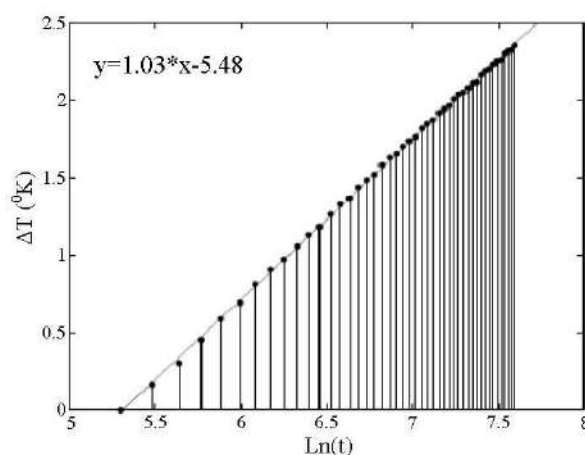


شکل ض.م-الف-3 بلوک دیاگرام مجموعه آزمایشگاهی اندازه گیری هدایت حرارتی به روش سیم داغ گذرا.

در این سیستم، جریان الکتریکی توسط واحد کنترل و اندازه گیری در سلول تست برقرار می شود. این زمان بگونه ای است تا محدوده زمانی ذکر شده در رابطه (ض.م-الف-3) رعایت گردد. با برقراری جریان، دمای سیم پلاتینی در کسری از ثانیه بر اساس روابط موجود برای مقاومت الکتریکی در مسیر عبور جریان محاسبه و بصورت داده های عددی از طریق اتصال کامپیوتری RS 232 به کامپیوتر ارسال می گردد. این اطلاعات در کامپیوتر توسط برنامه نوشته شده در متلب پردازش شده و منحنی گرافیکی مربوطه بر حسب تغییرات دمای سیم پلاتینی در برابر مدت زمان رسم می گردد. نمونه ای از این منحنی در شکل (ض.م-الف-4) نمایش داده شده است. هرکدام از داده ها در این منحنی در بازه های زمانی 40 ms ذخیره شده اند. لازم به ذکر است که، طبق رابطه (ض.م-الف-4) شیب منحنی تغییرات دما در برابر لگاریتم طبیعی مدت زمان جهت اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی سیال مورد نظر لازم است که محاسبه گردد. داده های ارائه شده در شکل (ض.م-الف-4) در فرم لگاریتمی برای مدت زمان اندازه گیری در شکل (ض.م-الف-5) ارائه گردیده اند.



شکل ض.م-الف-4 اندازه گیری افزایش دمای سیم پلاتینی در بازه های زمانی 40 ms در برابر زمان.



شکل ض.م-الف-5 نمایش گرافیکی داده های خروجی سیستم اندازه گیری هدایت حرارتی در برابر زمان.

ض.م-الف-3- طراحی و ساخت سیستم اندازه گیری هدایت حرارتی بر مبنای ترمیستور¹

در این قسمت، سیستم اندازه گیری هدایت حرارتی که با بهره گیری از مکانیزم سیم داغ گذرا و با اعمال تغییراتی در آن جهت افزایش دقت فرآیند طراحی و ساخته شده است، ارائه می گردد. تغییر عمده شامل جایگزینی سیم پلاتینی در تکنیک سیم داغ گذرا با یک ترمیستور است. ترمیستور یک نوع مقاومت الکتریکی است که رفتار مقاومتی آن بیش از مقاومت های متداول به دما وابسته است. کلمه ترمیستور واژه مرکبی از حرارت و مقاومت می باشد. ترمیستورها بطور متداول در محدود کننده های اضافه بار، سنسورهای حرارتی، و امان های حرارتی خود تنظیم مورد استفاده قرار می گیرند [135].

ترمیستورها متفاوت از تشخیص دهنده های دمای مقاومتی² (RTDs) هستند که در آنها از فلزات خالص استفاده می شود در حالی که در ترمیستورها از نیمه هادی ها، سرامیک یا پلیمر، استفاده می گردد. پاسخ دمایی آنها نیز متفاوت از RTDs است بگونه ای که RTDs در محدوده دمایی وسیعی عمل می نمایند درحالی که ترمیستورها از دقت بسیار بالاتری برخوردار بوده و در محدوده دمایی عموماً 90- تا 130°C عمل می کنند.

ترمیستور بکار رفته در طراحی سیستم حاضر از نوع ضریب گرمایی منفی³ (NTC) می باشد که در آن مقاومت با افزایش درجه حرارت کاهش می یابد. این امان با کد NTCLE 100E 3339JB0 مشخص می گردد و از یک چیپ با دو سیم انتها صفحه ای از جنس مس-قلع⁴ ساخته شده است. شماتیکی از این واحد الکتریکی در شکل (ض.م-الف-6) نمایش داده شده است.

¹ Thermistor based thermal conductivity measurement system

² Resistance temperature detectors

³ Negative temperature coefficient

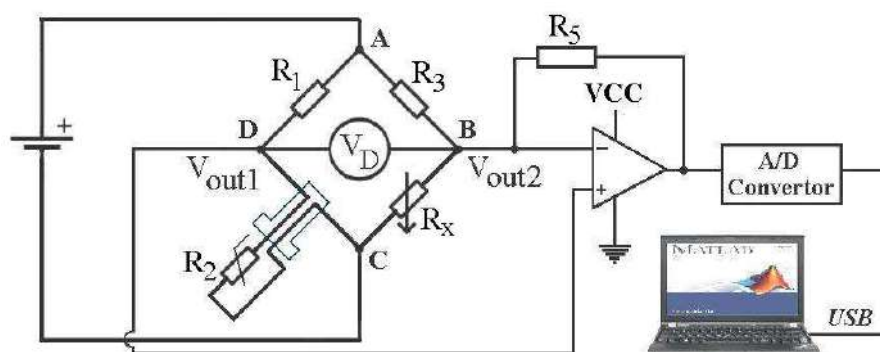
⁴ Solid copper-lead plated leads

پل وتستون¹ اساساً برای اندازه گیری مقدار مقاومت نامشخص و به عنوان وسیله ای برای کالیبره نمودن وسایل اندازه گیری، ولت مترها، آمپر مترها و غیره با استفاده از یک مقاومت متغیر² توسعه پیدا نمود. پل وتستون قادر است تا مقادیر بسیار پایینی از مقاومت را در محدوده چند میلی-اهم اندازه گیری نماید. این اتصال الکتریکی یک چیدمان ساده ای از دو سری موازی از مقاومت های اتصال یافته بین ترمینال تأمین ولتاژ و اتصال زمین است که سبب ایجاد اختلاف ولتاژ صفر مابین دو انشعاب در شرایط تعادل می گردد. این پل از دو ترمینال ورودی و دو ترمینال خروجی و چهار مقاومت در یک ترکیب بندی به شکل الماس می باشد [136].



شکل ض.م-الف-6 ترمیستور مورد استفاده در سیستم اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی سیال، مدل NTCLE 100E 339JB0 [135].

ترمیستورها بطور متداول در مدار پل وتستون به عنوان مقاومت نامشخص قرار می گیرند. این نحوه اتصال در شکل ض.م-الف-7 ارائه گردیده است. این شکل در برگیرنده سیستم هدایت حرارتی طراحی شده بصورت شماتیک است.



شکل ض.م-الف-7 شماتیکی از مدار الکتریکی سیستم اندازه گیری هدایت حرارتی سیال.

مهمترین ویژگی ترمیستور، رابطه خطی مابین مقاومت و دما در آن می باشد که در رابطه (ض.م-الف-6) ارائه شده است:

$$\Delta R = k' \times \Delta T \quad (\text{ض.م-الف-6})$$

¹ Wheatstone bridge

² Long resistance slide wire

که در آن k' ضریب دمایی مقاومت و ΔT تغییرات درجه حرارت است. با این وجود، تقریب خطی تنها در محدوده دمایی کوچکی عمل می نماید. برای اندازه گیری صحیح درجه حرارت، معادله استین هارت-هانت¹ منحنی دمایی مقاومتی این المان را بهتر تفسیر می نماید. برای ترمیستور NTC بکار رفته در سیستم طراحی شده، معادله پارامتر² β ، که اساساً معادله استین هارت-هانت است، نتایج دقیق تری را ارائه می نماید. این معادله طبق رابطه (ض.م-الف-7) می باشد [137].

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad (\text{ض.م-الف-7})$$

که در آن T دمای مطلق، R_0 مقاومت در دمای T_0 (برابر 298/15 K)، R مقاومتی که در آن دمای ترمیستور اندازه گیری می شود، هستند. بر اساس داده هایی که توسط شرکت سازنده ترمیستور، تکنو اینتر ویشی³، ارائه گردیده است و با استفاده از روش رگرسیون خطی با ضریب اطمینان 95٪ و عدد P برابر $1/1102 \times 10^{-43}$ ، مقدار β برابر با رابطه (ض.م-الف-8) محاسبه گردیده است.

$$\beta \approx 3392.93 - 1.406R \quad (\text{ض.م-الف-8})$$

خطای این رابطه در بازه دمایی کاربرد مورد انتظار از ترمیستور در سیستم طراحی شده ($10 \sim 110^\circ\text{C}$) کمتر از 1٪ است. ترمیستورها دارای یک اثر خودگرمایی⁴ با عبور جریان هستند. زمانی که جریان الکتریکی از ترمیستور عبور می نماید، حرارتی در داخل ترمیستور ایجاد می شود و سبب افزایش دمای آن نسبت به محیط اطراف می گردد. این اثر در سیستم طراحی شده برای اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی مورد استفاده قرار گرفته است. قانون اهم عبارت است از $V=RI$ در اینجا نیز صادق بوده و در محاسبه دمای ترمیستور بصورت تابعی از درجه حرارت بکار گرفته می شود.

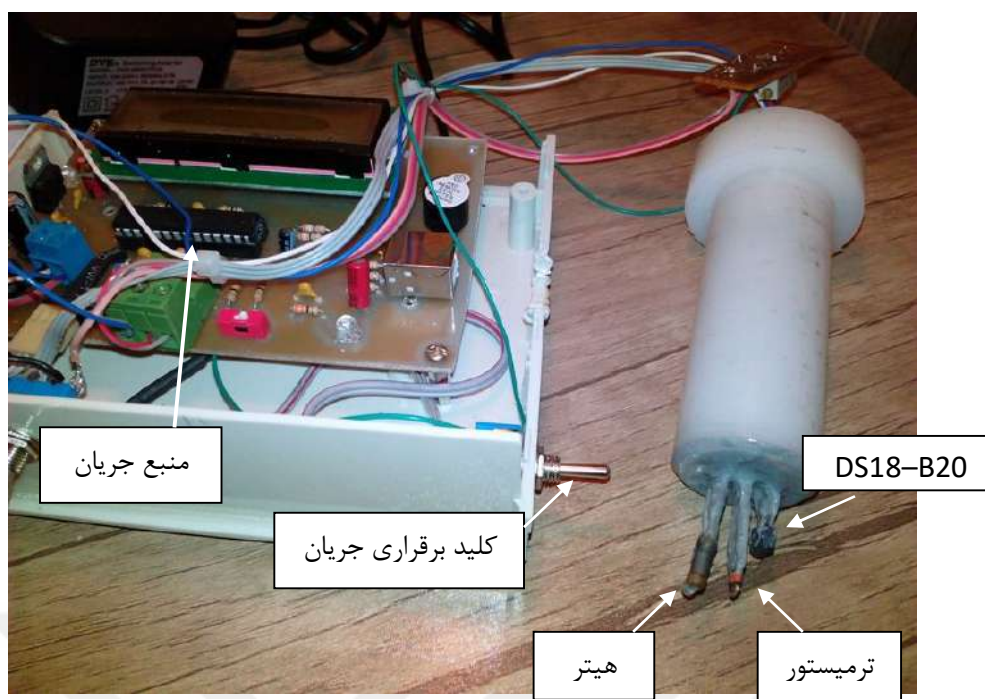
پروب ساخته شده برای این سیستم شامل یک ترمیستور و یک سنسور حرارتی DS18-B20 می باشد که در فاصله کمی از آن در انتهای قطعه ماشین کاری شده از جنس PVC نصب گردیده است. تمام اتصالات در انتهای این پروب توسط لایه نازکی از چسب سیلیکونی برای ایجاد عایق الکتریکی در داخل سیال تحت تست پوشش داده شده است. شکل (ض.م-الف-8) تصویری از این سیستم ساخته شده را نمایش می دهد. در این شکل، پروب اندازه گیری، اتصال پل و تستون و مدار ارسال کننده داده ها به کامپیوتر از طریق پردازنده FTR 232 قابل مشاهده هستند. نحوه قرار گیری پروب در داخل جانمونه نیز در شکل (ض.م-الف-9) ارائه گردیده است.

¹ Steinhart-Hart

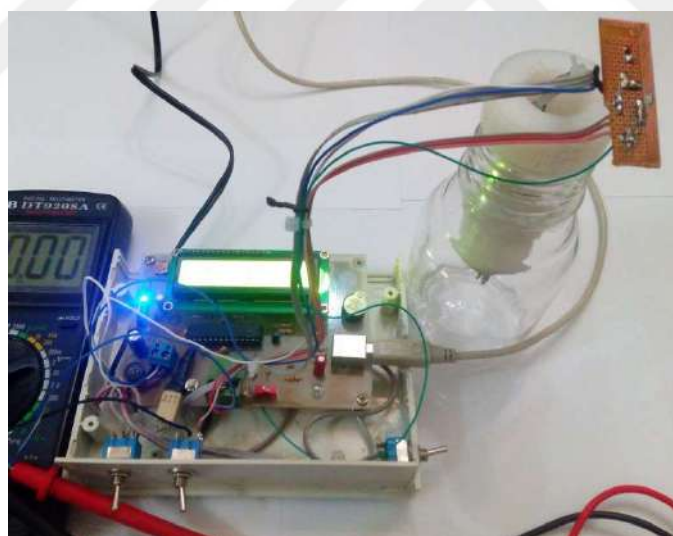
² β parameter equation

³ Vishay Inter Technology

⁴ Self-heating effect



شکل ض.م-الف-8 نمایی از سیستم طراحی و ساخته شده برای اندازه گیری هدایت حرارتی سیال.



شکل ض.م-الف-9 نحوه قرارگیری پروب سیستم اندازه گیری هدایت حرارتی در داخل جانمونه مربوطه.

چنانچه پیش تر نیز ذکر گردید، طراحی انجام شده بر اساس تئوری حاکم در روش سیم داغ گذرا می باشد که در آن سنسور به عنوان عضو نامشخص در مدار الکتریکی پل وتستون قرار گرفته است. مطابق شماتیک نمایش داده شده از این سیستم در شکل (ض.م-الف-7)، یک منبع DC با توان 5 V به عنوان ولتاژ تحریک استفاده شده است. ولتاژ در دو نقطه وسط از دو انشعاب پل وتستون در نقاط B و D اندازه گیری شده و داده ها توسط سیستم پردازش

و جمع آوری اطلاعات¹ با فرکانس 100 Hz به کامپیوتر توسط اتصال USB ارسال می گردد. روابط (ض.م-الف-9) برای محاسبه مقاومت ترمیستور که در داخل سیال 200 ml غوطه ور است بکار گرفته می شود.

$$\text{(ض.م-الف-9)} \quad \text{در گره B: } -I_3 - I_D + I_x = 0, \quad \text{در گره D: } -I_1 + I_2 + I_D = 0$$

با در نظر گرفتن V_{in} به عنوان ولتاژ تغذیه و با فرض آنکه ولتاژ اختلافی تشخیص دهنده² (V_D) به اندازه ای بالاست که جریان الکتریکی به سمت تشخیص دهنده (I_D) قابل اغماض باشد، در این حالت از روابط زیر می توان برای تعیین مقاومت ترمیستور با عبور جریان الکتریکی از آن استفاده نمود.

$$I_D \approx \text{فابل صرف نظر} \quad I_1 = I_2, \quad I_3 = I_x$$

$$\text{(ض.م-الف-10)} \quad V_{out1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in}, \quad V_{out2} = \frac{R_x}{R_3 + R_x} V_{in}$$

$$\text{(ض.م-الف-)} \quad V_D = V_{out1} - V_{out2} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_x}{R_3 + R_x} \right) V_{in}$$

(11)

$$\frac{V_{out1}}{R_2} = \frac{V_{in}}{R_1 + R_2} = I_2; \quad V_{out1}(R_1 + R_2) = V_{in}R_2 \rightarrow V_{out1}R_1 = R_2(V_{in} - V_{out1})$$

$$\rightarrow \frac{V_{out1}}{R_2} = \frac{V_{in} - V_{out1}}{R_1} = I_2 \quad \text{(ض.م-الف-12)}$$

برای بدست آوردن مقدار شار حرارتی ترمیستور، علاوه بر دانستن ولتاژ، نیاز به جریان عبوری از آن داریم. برای این منظور، از ساده سازی رابطه (ض.م-الف-10) و طرفین وسطین نمودن، رابطه (ض.م-الف-12) را بدست می آوریم.

چیپ ترمیستور از یک جفت سیم هادی آلیاژ پلاتینی که بصورت جدا از هم قرار گرفته و مستقیماً در بدنه سرامیکی زینتر شده اند، تشکیل یافته است. مقاومت حرارتی داخلی این المان در مقایسه با مقاومت حرارتی محیط پیرامون آن (در اینجا سیال) به مراتب کمتر است. به عبارت دیگر عدد بیوت³ مربوطه بسیار کوچک بوده و می توان این سنسور را معادل یک منبع حرارت خطی با شعاع r که توسط محیط سیال نا محدود⁴ احاطه شده است، در نظر گرفت. در این حالت معادله حاکم بر افزایش حرارت منبع حرارت خطی سنسور غوطه ور در محیط سیال، شامل معادله انتقال حرارت تک بعدی خواهد بود (رابطه ض.م-الف-13).

$$\text{(ض.م-الف-13)} \quad \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial T}{\partial R} \right) = \frac{1}{\alpha_f} \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\text{BC: } \begin{cases} \lim_{R \rightarrow 0} \left\{ R \frac{\partial T}{\partial R} \right\} = -\frac{q}{2\pi k_f} \\ \lim_{R \rightarrow \infty} \{ \Delta T(R, t) \} = 0; \quad t \geq 0 \text{ and } R = \infty \end{cases}$$

$$\Delta T = T - T_0$$

¹ Data acquisition system

² Differential voltage of detector

³ Biot number

⁴ Infinite liquid medium

که در اینجا R مختصات شعاعی از مرکز منبع حرارت خطی مفروض می باشد.

راه حل برای معادله فوق از طریق حل سری های نامحدود¹ توسط کارسلاو و جاگر² پیشنهاد شده است. یک تقریب مناسب برای راه حل، استفاده از جمله اول سری بی نهایت و صرفنظر از جملاتی با درجات بالاتر است. این تقریب در رابطه (ض.م-الف-14) آورده شده است.

$$T(t, r) - T_0 = \frac{q}{4\pi k_f} (-\gamma + \ln\left(\frac{4\alpha_f t}{r^2}\right)) \quad \text{(ض.م-الف-14)}$$

که در اینجا T_0 دمای اولیه محیط سیال، q حرارت پخش شده در واحد طول، α_f و k_f بترتیب برابر با ضرایب پخش حرارتی و هدایت حرارتی سیال تحت تست، و γ ثابت اولر برابر با 0/5772 می باشد. این معادله در فرم رابطه (ض.م-الف-15) برای استفاده از آن در بدست آوردن ضریب هدایت حرارتی سیال ساده سازی می شود.

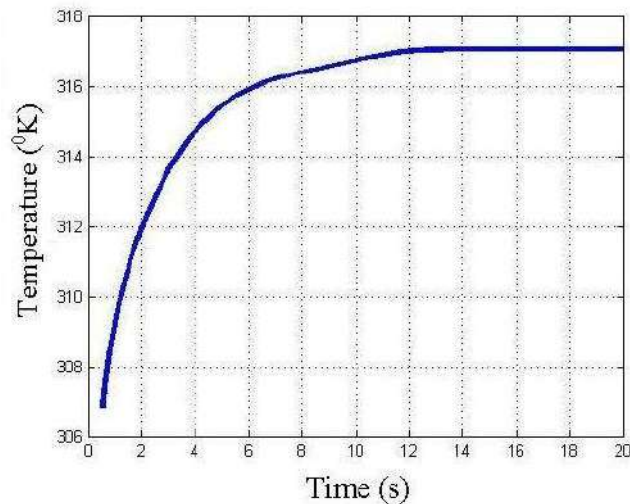
$$\begin{cases} T_1 - T_0 = \frac{q}{4\pi k_f} (-\gamma + \ln\left(\frac{4\alpha_f t_1}{r^2}\right)) \\ T_2 - T_0 = \frac{q}{4\pi k_f} (-\gamma + \ln\left(\frac{4\alpha_f t_2}{r^2}\right)) \end{cases}$$

$$\rightarrow \Delta T = T_2 - T_1 = \frac{q}{4\pi k_f} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \rightarrow k_f = \frac{q}{4\pi \Delta T} \ln\frac{t_2}{t_1} \quad \text{(ض.م-الف-15)}$$

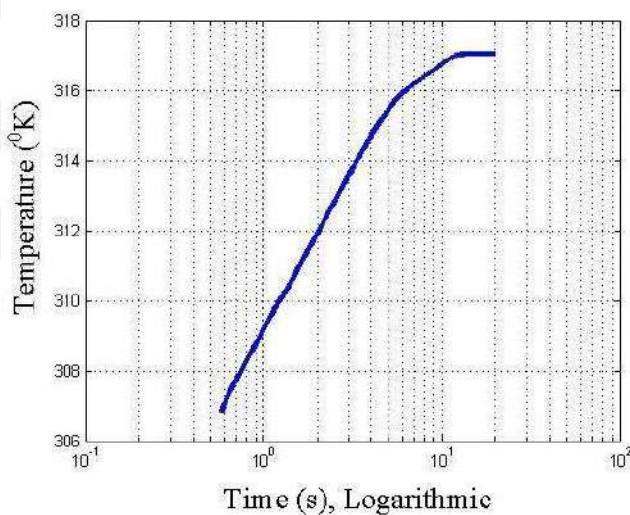
چنانچه پیش تر ذکر شد، مطابق سیستم نمایش داده شده در شکل (ض.م-الف-7)، این سیستم از یک منبع تأمین توان DC، پل وتستون، و سیستم پردازش داده ها تشکیل شده است. با عبور جریان الکتریکی از ترمیستور مقاومت آن با تغییر دما تغییر یافته و این امر سبب تغییرات در ولتاژ خروجی (V_{out1}) می گردد. تغییرات ولتاژ ترمیستور بدست آمده توسط سیستم پردازش داده ها و اتصال USB به کامپیوتر منتقل می گردد و توسط یک برنامه نوشته شده در متلب ولحاظ نمودن روابط (ض.م-الف-7) و (ض.م-الف-12) تبدیل به تغییرات دمای ترمیستور می گردد.

¹ Infinite series

² Carslaw and Jaeger



شکل ض.م-الف-10 منحنی تغییرات دمای ترمیستور در برابر زمان در داخل آب مقطر 30°C در مرحله کالیبراسیون.



شکل ض.م-الف-11 منحنی تغییرات دمای ترمیستور در برابر زمان در پایه لگاریتمی در داخل آب مقطر 30°C در مرحله کالیبراسیون.

در شکل (ض.م-الف-10) نمونه ای از این تغییرات دمایی برای آب مقطر در دمای 30°C نمایش داده شده است. از این ماده می توان برای کالیبره نمودن سیستم استفاده نمود، بدین صورت که مقادیر طبق رابطه (ض.م-الف-16) عبارتند از ولتاژ الکتریکی (V_{out1})، جریان عبوری (I_2)، راندمان ترمیستور (μ)، و طول منبع خطی معادل L . با توجه به اینکه مقادیر V_{out1} و I_2 از خروجی بدست آمده از پل وتستون محاسبه می گردند و مقادیر μ و L معادل ثابت هستند، می توان نسبت این مقادیر ثابت را با انجام تست برای آب مقطر در دمای 30°C و با اعمال ضریب هدایت حرارتی آن، بدست آورد.

$$q = \mu \frac{V.I}{L} = \frac{\mu}{L} V.I = Z.V.I \quad , \quad Z = \frac{\mu}{L} = cto. \quad (\text{ض.م-الف-16})$$

برای به حداقل رساندن اثر همرفت اجباری¹ و جابجایی حجیم مواد² در خطای اندازه گیری هدایت حرارتی، لازم است که ماده تحت آزمایش نسبت به سنسور در وضعیت ساکن باشد. همچنین همرفت آزاد³ زمانی که یک جسم با دمایی پایین تر یا بالاتر در یک سیال قرار می گیرد اتفاق می افتد. برای جلوگیری از رسانش در داخل سیال، مطلوب است که دمای ترمیستور در طی پروسه اندازه گیری به میزان کمی افزایش یابد. بعلاوه، چنانچه افزایش دمای بیش از حد نمونه سبب ایجاد خطای ناشی از همرفت آزاد می گردد، کوتاه بودن زمان خواندن اطلاعات ترمیستور بسیار مهم است.

مطابق رابطه (ض.م-الف-14) شیب منحنی تغییرات دما در برابر لگاریتم طبیعی مدت زمان $(\Delta T / \ln(t_2/t_1))$ برای بدست آوردن ضریب هدایت حرارتی سیال تحت آزمایش مورد نیاز است. در شکل (ض.م-الف-11) منحنی نیمه لگاریتمی تغییرات دمای ترمیستور در برابر مدت زمان ثبت داده ها برای آب مقطر در دمای 30°C نمایش داده شده است. به منظور بهره گیری از رابطه (ض.م-الف-14) در محاسبه هدایت حرارتی سیال، بخش خطی افزایش دمای ترمیستور در برابر زمان در نظر گرفته شده و مقدار Z برابر $55/5 \text{ m}^{-1}$ بدست آمده است. از این مقدار و مقادیر حاصل از ولتاژ و جریان بدست آمده از پل وتستون در حین پروسه اندازه گیری، می توان ضریب هدایت حرارتی سیالات دیگر را محاسبه نمود.

¹ Forced convection

² Bulk movement

³ Free convection

ضمیمهٔ ب

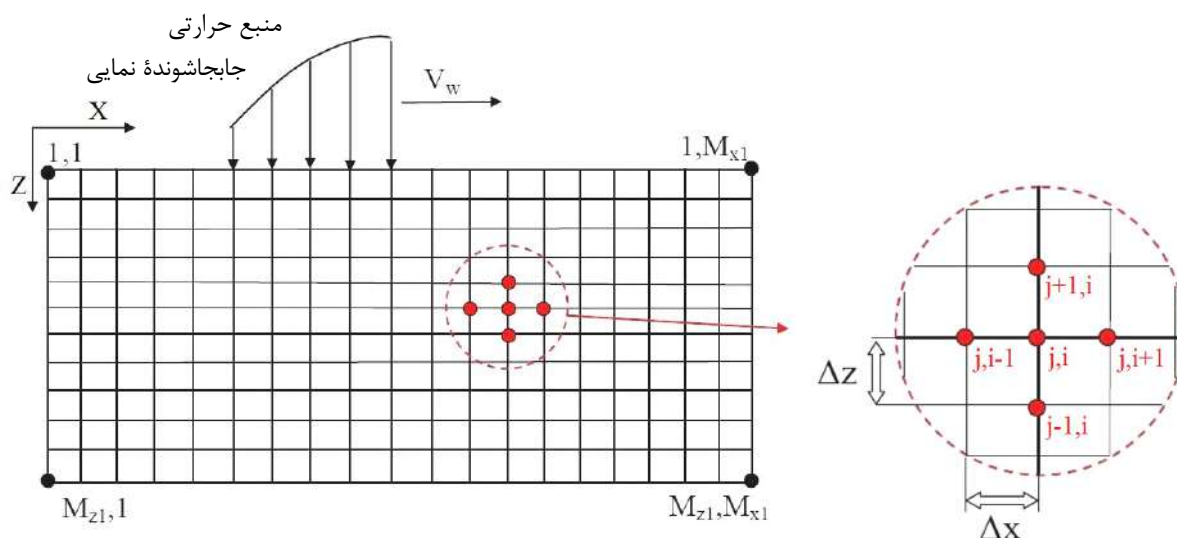
مدل تفاضل محدود برای شبیه سازی توزیع حرارت
در قطعه کار در پروسه سنگ زنی

ضمیمه ب

مدل تفاضل محدود برای شبیه سازی توزیع حرارت در قطعه کار در پروسه سنگ زنی

ض.م-ب-1- معادله حاکم انتقال حرارت در ناحیه محاسباتی

محدوده محاسباتی مدل تفاضل محدود (FDM) برای شبیه سازی توزیع حرارت در قطعه کار در پروسه سنگ زنی در شکل (ض.م-ب-1) نمایش داده شده است. این محدوده مطابق شکل به شبکه های کوچکی تقسیم شده و در محل تلاقی شبکه های مجاور گره هایی به عنوان نقاط رفرنس اختصاص داده شده اند. ابعاد این شبکه ها در امتداد محورهای X و Z به ترتیب برابر با Δx و Δz مشخص شده اند. معادله حاکم در این ناحیه محاسباتی، معادله دوبعدی انتقال حرارت بدون عبارت تولید حرارت در آن می باشد (معادله ض.م-ب-1). در این معادله چنین فرض می شود که هدایت حرارتی در جهات X و Z همگن می باشند. همچنین فرض می شود که منبع حرارتی در حین سنگ زنی با توزیع نمایی در محل تماس چرخ سنگ با قطعه کار با سرعتی برابر با سرعت قطعه کار در امتداد لبه فوقانی ناحیه محاسباتی در حرکت است. مبنای این فرضیه آن است که عمق حقیقی برش در ناحیه تماس از لبه دنباله رو¹ تا لبه پیش رو² بخاطر درگیری تدریجی دانه های چرخ سنگ با مواد قطعه کار در سنگ زنی رو-به-بالا افزایش می یابد. نحوه تخمین رابطه (ض.م-ب-1) به روش صریح با استفاده از قاعده اولر-پیش رو³ مطابق رابطه (ض.م-ب-2) می باشد.



شکل ض.م-ب-1 تقسیم بندی ناحیه محاسباتی در مدل FDM با استفاده از شبکه های کامل⁴.

¹ Trailing edge

² Leading edge

³ Forward-Euler

⁴ Full grids

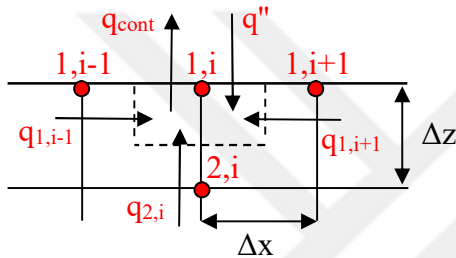
$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right) + k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{ض.م.ب-1})$$

$$k\left(\frac{T^n(j,i+1) - 2T^n(j,i) + T^n(j,i-1))}{\Delta x^2}\right) + k\left(\frac{T^n(j+1,i) - 2T^n(j,i) + T^n(j-1,i))}{\Delta z^2}\right) = \rho c_p \frac{T^{n+1}(j,i) - T^n(j,i)}{\Delta t} \times \frac{\Delta t}{\rho c_p} \rightarrow$$

$$\alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T^n(j,i+1) - 2T^n(j,i) + T^n(j,i-1)) + \alpha \frac{\Delta t}{\Delta z^2} (T^n(j+1,i) - 2T^n(j,i) + T^n(j-1,i)) = T^{n+1}(j,i) - T^n(j,i) \rightarrow$$

$$T^{n+1}(j,i) = r_x(T^n(j,i+1) + T^n(j,i-1)) + r_z(T^n(j+1,i) + T^n(j-1,i)) + (1 - 2r_x - 2r_z)T^n(j,i) \quad (\text{ض.م.ب-2})$$

ض.م.ب-2- معادله پایداری انرژی در لبه فوقانی ناحیه محاسباتی



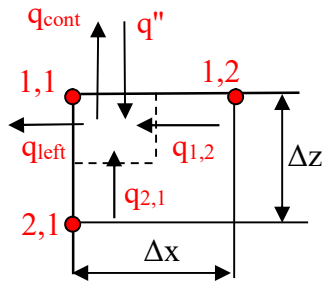
$$q_{1,i+1} + q_{2,i} + q_{1,i-1} + q''A - q_{cont} = \rho c_p v_0 \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{ض.م.ب-3})$$

$$k \frac{\Delta z}{2} \left(\frac{T^n(1,i+1) - T^n(1,i)}{\Delta x} \right) + k \Delta x \left(\frac{T^n(2,i) - T^n(1,i)}{\Delta z} \right) + k \frac{\Delta z}{2} \left(\frac{T^n(1,i-1) - T^n(1,i)}{\Delta x} \right) + q'' \cdot \Delta x - h_{cont} \Delta x (T(1,i) - T_a) = \rho c_p \frac{\Delta x \Delta z}{2} \left(\frac{T^{n+1}(1,i) - T^n(1,i)}{\Delta t} \right) \times \frac{2\Delta t}{\rho c_p \Delta x \Delta z} \rightarrow$$

$$\alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T^n(1,i+1) - T^n(1,i)) + 2\alpha \frac{\Delta t}{\Delta z^2} (T^n(2,i) - T^n(1,i)) + \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T^n(1,i-1) - T^n(1,i)) + q'' \frac{2\Delta t}{\rho c_p \Delta z} - h_{cont} \frac{2\Delta t}{\rho c_p \Delta z} (T^n(1,i) - T_a) = T^{n+1}(1,i) - T^n(1,i) \rightarrow$$

$$T^{n+1}(1,i) = r_x(T^n(1,i+1) + T^n(1,i-1)) + 2r_z T^n(2,i) + (1 - 2r_x - 2r_z - 2h_{cont} r_z \frac{\Delta z}{k}) T^n(1,i) + 2q'' r_z \frac{\Delta z}{k} + 2h_{cont} r_z \frac{\Delta z}{k} T_a \quad (\text{ض.م.ب-4})$$

ض.م-ب-3- معادله پایداری انرژی در گوشه سمت چپ لبه فوقانی ناحیه محاسباتی



$$q_{1,2} + q_{2,1} - q_{left} + q''A - q_{cont} = \rho c_p v_0 \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{ض.م-ب-5})$$

$$k \frac{\Delta z}{2} \left(\frac{T^n(1,2) - T^n(1,1)}{\Delta x} \right) + k \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{T^n(2,1) - T^n(1,1)}{\Delta z} \right) - h_{left} \frac{\Delta z}{2} (T^n(1,1) - T_a) + q'' \frac{\Delta x}{2} -$$

$$h_{cont} \frac{\Delta x}{2} (T(1,1) - T_a) = \rho c_p \frac{\Delta x \Delta z}{4} \left(\frac{T^{n+1}(1,1) - T^n(1,1)}{\Delta t} \right) \times \frac{4\Delta t}{\rho c_p \Delta x \Delta z} \rightarrow$$

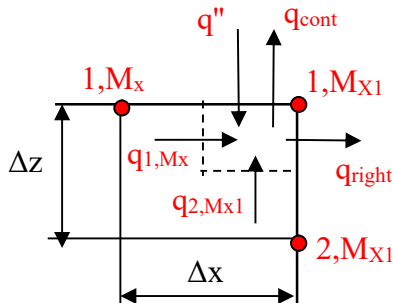
$$2\alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T^n(1,2) - T^n(1,1)) + 2\alpha \frac{\Delta t}{\Delta z^2} (T^n(2,1) - T^n(1,1)) - 2h_{left} \frac{\Delta t}{\rho c_p \Delta x} (T^n(1,1) - T_a) +$$

$$q'' \frac{2\Delta t}{\rho c_p \Delta z} - h_{cont} \frac{2\Delta t}{\rho c_p \Delta z} (T^n(1,1) - T_a) = T^{n+1}(1,1) - T^n(1,1) \rightarrow$$

$$T^{n+1}(1,1) = 2r_x T^n(1,2) + 2r_z T^n(2,1) + \left(1 - 2r_x - 2r_z - 2h_{left} r_x \frac{\Delta x}{k} - 2h_{cont} r_z \frac{\Delta z}{k} \right) T^n(1,1)$$

$$+ 2q'' r_z \frac{\Delta z}{k} + 2(h_{left} r_x \frac{\Delta x}{k} + h_{cont} r_z \frac{\Delta z}{k}) T_a \quad (\text{ض.م-ب-6})$$

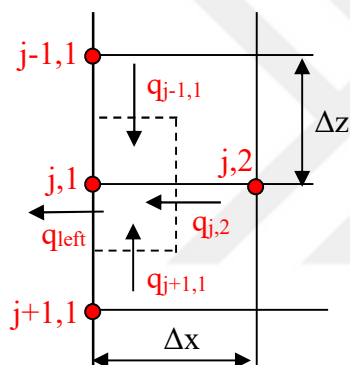
ض.م-ب-4- معادله پایداری انرژی در گوشه سمت راست لبه فوقانی ناحیه محاسباتی



$$q_{1,M_x} + q_{2,M_{x1}} - q_{right} + q''A - q_{cont} = \rho c_p v_0 \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{ض.م-ب-7})$$

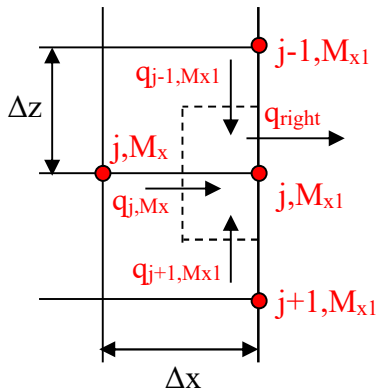
$$\begin{aligned}
 & k \frac{\Delta z}{2} \left(\frac{T^n(1, M_x) - T^n(1, M_{x1})}{\Delta x} \right) + k \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{T^n(2, M_{x1}) - T^n(1, M_{x1})}{\Delta z} \right) - h_{right} \frac{\Delta z}{2} (T^n(1, M_{x1}) - T_a) + q'' \frac{\Delta x}{2} - \\
 & h_{cont} \frac{\Delta x}{2} (T(1, M_{x1}) - T_a) = \rho c_p \frac{\Delta x \Delta z}{4} \left(\frac{T^{n+1}(1, M_{x1}) - T^n(1, M_{x1})}{\Delta t} \right) \times \frac{4 \Delta t}{\rho c_p \Delta x \Delta z} \rightarrow \\
 & 2\alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T^n(1, M_x) - T^n(1, M_{x1})) + 2\alpha \frac{\Delta t}{\Delta z^2} (T^n(2, M_{x1}) - T^n(1, M_{x1})) - \\
 & 2h_{right} \frac{\Delta t}{\rho c_p \Delta x} (T^n(1, M_{x1}) - T_a) + q'' \frac{2 \Delta t}{\rho c_p \Delta z} - h_{cont} \frac{2 \Delta t}{\rho c_p \Delta z} (T^n(1, M_{x1}) - T_a) = T^{n+1}(1, M_{x1}) - \\
 & T^n(1, M_{x1}) \rightarrow \\
 & T^{n+1}(1, M_{x1}) = 2r_x T^n(1, M_x) + 2r_z T^n(2, M_{x1}) + \left(1 - 2r_x - 2r_z - 2h_{right} r_x \frac{\Delta x}{k} - \right. \\
 & \left. 2h_{cont} r_z \frac{\Delta z}{k} \right) T^n(1, M_{x1}) + 2q'' r_z \frac{\Delta z}{k} + 2(h_{right} r_x \frac{\Delta x}{k} + h_{cont} r_z \frac{\Delta z}{k}) T_a \quad (\text{ض.م.ب-8})
 \end{aligned}$$

ض.م.ب-5- معادله پایدار انرژی در لبه سمت چپ ناحیه محاسباتی



$$\begin{aligned}
 & q_{j-1,1} + q_{j,2} + q_{j+1,1} - q_{left} = \rho c_p v_0 \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{ض.م.ب-9}) \\
 & k \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{T^n(j-1,1) - T^n(j,1)}{\Delta z} \right) + k \Delta z \left(\frac{T^n(j,2) - T^n(j,1)}{\Delta x} \right) + k \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{T^n(j+1,1) - T^n(j,1)}{\Delta z} \right) - h_{left} \Delta z (T^n(j,1) - T_a) \\
 & = \rho c_p \frac{\Delta x \Delta z}{2} \left(\frac{T^{n+1}(j,1) - T^n(j,1)}{\Delta t} \right) \times \frac{2 \Delta t}{\rho c_p \Delta x \Delta z} \rightarrow \\
 & \alpha \frac{\Delta t}{\Delta z^2} (T^n(j-1,1) - T^n(j,1)) + 2\alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T^n(j,2) - T^n(j,1)) + \alpha \frac{\Delta t}{\Delta z^2} (T^n(j+1,1) - T^n(j,1)) \\
 & - 2h_{left} \frac{\Delta t}{\rho c_p \Delta x} (T^n(j,1) - T_a) = T^{n+1}(j,1) - T^n(j,1) \rightarrow \\
 & T^{n+1}(j,1) = r_z (T^n(j-1,1) + T^n(j+1,1)) + 2r_x T^n(j,2) + \left(1 - 2r_x - 2r_z - \right. \\
 & \left. 2h_{left} r_x \frac{\Delta x}{k} \right) T^n(j,1) + 2h_{left} r_x \frac{\Delta x}{k} T_a \quad (\text{ض.م.ب-10})
 \end{aligned}$$

ض.م-ب-6- معادله پایداری انرژی در لبه سمت راست ناحیه محاسباتی



$$q_{j-1, M_{x1}} + q_{j, M_x} + q_{j+1, M_{x1}} - q_{right} = \rho c_p v_0 \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{ض.م-ب-11})$$

$$k \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{T^n(j-1, M_{x1}) - T^n(j, M_{x1})}{\Delta z} \right) + k \Delta z \left(\frac{T^n(j, M_x) - T^n(j, M_{x1})}{\Delta x} \right) + k \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{T^n(j+1, M_{x1}) - T^n(j, M_{x1})}{\Delta z} \right) -$$

$$h_{right} \Delta z (T^n(j, M_{x1}) - T_a) = \rho c_p \frac{\Delta x \Delta z}{2} \left(\frac{T^{n+1}(j, M_{x1}) - T^n(j, M_{x1})}{\Delta t} \right) \times \frac{2 \Delta t}{\rho c_p \Delta x \Delta z} \rightarrow$$

$$\alpha \frac{\Delta t}{\Delta z^2} (T^n(j-1, M_{x1}) - T^n(j, M_{x1})) + 2\alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T^n(j, M_x) - T^n(j, M_{x1})) + \alpha \frac{\Delta t}{\Delta z^2} (T^n(j+1, M_{x1}) - T^n(j, M_{x1})) -$$

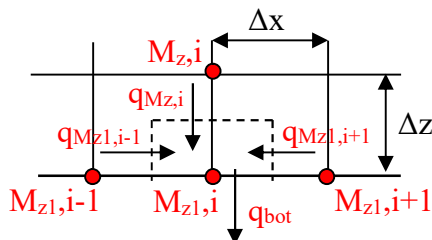
$$2h_{right} \frac{\Delta t}{\rho c_p \Delta x} (T^n(j, M_{x1}) - T_a) = T^{n+1}(j, M_{x1}) - T^n(j, M_{x1}) \rightarrow$$

$$T^{n+1}(j, M_{x1}) = r_z (T^n(j-1, M_{x1}) + T^n(j+1, M_{x1})) + 2r_x T^n(j, M_x) + \left(1 - 2r_x - 2r_z - \right.$$

$$\left. 2h_{right} r_x \frac{\Delta x}{k} \right) T^n(j, M_{x1}) + 2h_{right} r_x \frac{\Delta x}{k} T_a \quad (\text{ض.م-ب-})$$

(12)

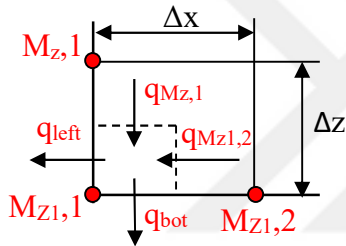
ض.م-ب-7- معادله پایداری انرژی در لبه تحتانی ناحیه محاسباتی



$$q_{M_{z1}, i-1} + q_{M_z, i} + q_{M_{z1}, i+1} - q_{bot} = \rho c_p v_0 \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{ض.م-ب-13})$$

$$\begin{aligned}
& k \frac{\Delta z}{2} \left(\frac{T^n(M_{z1,i-1}) - T^n(M_{z1,i})}{\Delta x} \right) + k \Delta x \left(\frac{T^n(M_{z,i}) - T^n(M_{z1,i})}{\Delta z} \right) + k \frac{\Delta z}{2} \left(\frac{T^n(M_{z1,i+1}) - T^n(M_{z1,i})}{\Delta x} \right) - \\
& h_{bot} \Delta x (T(M_{z1,i}) - T_a) = \rho c_p \frac{\Delta x \Delta z}{2} \left(\frac{T^{n+1}(M_{z1,i}) - T^n(M_{z1,i})}{\Delta t} \right) \times \frac{2\Delta t}{\rho c_p \Delta x \Delta z} \rightarrow \\
& \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T^n(M_{z1,i-1}) - T^n(M_{z1,i})) + 2\alpha \frac{\Delta t}{\Delta z^2} (T^n(M_{z,i}) - T^n(M_{z1,i})) + \alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T^n(M_{z1,i+1}) - T^n(M_{z1,i})) - \\
& h_{bot} \frac{2\Delta t}{\rho c_p \Delta z} (T^n(M_{z1,i}) - T_a) = T^{n+1}(M_{z1,i}) - T^n(M_{z1,i}) \rightarrow \\
& T^{n+1}(M_{z1,i}) = r_x (T^n(M_{z1,i-1}) + T^n(M_{z1,i+1})) + 2r_z T^n(M_{z,i}) + \left(1 - 2r_x - 2r_z - \right. \\
& \left. 2h_{bot} r_z \frac{\Delta z}{k} \right) T^n(M_{z1,i}) + 2h_{bot} r_z \frac{\Delta z}{k} T_a \quad \text{ض.م.ب-} \\
& (14)
\end{aligned}$$

ض.م.ب-8- معادله پایداری انرژی در گوشه سمت چپ لبه تحتانی ناحیه محاسباتی

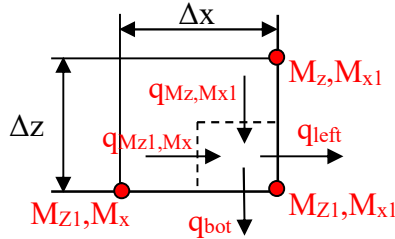


$$q_{Mz,1} + q_{Mz1,2} - q_{bot} - q_{left} = \rho c_p v_0 \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{ض.م.ب-}$$

(15)

$$\begin{aligned}
& k \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{T^n(M_{z,1}) - T^n(M_{z1,1})}{\Delta z} \right) + k \frac{\Delta z}{2} \left(\frac{T^n(M_{z1,2}) - T^n(M_{z1,1})}{\Delta x} \right) - h_{bot} \frac{\Delta x}{2} (T^n(M_{z1,1}) - T_a) - \\
& h_{left} \frac{\Delta z}{2} (T^n(M_{z1,1}) - T_a) = \rho c_p \frac{\Delta x \Delta z}{4} \left(\frac{T^{n+1}(M_{z1,1}) - T^n(M_{z1,1})}{\Delta t} \right) \times \frac{4\Delta t}{\rho c_p \Delta x \Delta z} \rightarrow \\
& 2\alpha \frac{\Delta t}{\Delta z^2} (T^n(M_{z,1}) - T^n(M_{z1,1})) + 2\alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T^n(M_{z1,2}) - T^n(M_{z1,1})) - \\
& h_{bot} \frac{2\Delta t}{\rho c_p \Delta z} (T^n(M_{z1,1}) - T_a) - h_{left} \frac{2\Delta t}{\rho c_p \Delta x} (T^n(M_{z1,1}) - T_a) = T^{n+1}(M_{z1,1}) - T^n(M_{z1,1}) \rightarrow \\
& T^{n+1}(M_{z1,1}) = 2r_z T^n(M_{z,1}) + 2r_x T^n(M_{z1,2}) + \left(1 - 2r_x - 2r_z - 2h_{bot} r_z \frac{\Delta z}{k} - 2h_{left} r_x \frac{\Delta x}{k} \right) \\
& \times T^n(M_{z1,1}) + 2(h_{bot} r_z \frac{\Delta z}{k} + h_{left} r_x \frac{\Delta x}{k}) T_a \quad \text{ض.م.ب-} \\
& (16)
\end{aligned}$$

ض.م-ب-9- معادله پایداری انرژی در گوشه سمت راست لبه تحتانی ناحیه محاسباتی



$$q_{M_z, M_{x1}} + q_{M_{z1}, M_x} - q_{bot} - q_{right} = \rho c_p v_0 \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{ض.م-ب-17})$$

$$k \frac{\Delta x}{2} \left(\frac{T^n(M_z, M_{x1}) - T^n(M_{z1}, M_{x1})}{\Delta z} \right) + k \frac{\Delta z}{2} \left(\frac{T^n(M_{z1}, M_x) - T^n(M_{z1}, M_{x1})}{\Delta x} \right) - h_{bot} \frac{\Delta x}{2} (T^n(M_{z1}, M_{x1}) - T_a) -$$

$$h_{right} \frac{\Delta z}{2} (T^n(M_{z1}, M_{x1}) - T_a) = \rho c_p \frac{\Delta x \Delta z}{4} \left(\frac{T^{n+1}(M_{z1}, M_{x1}) - T^n(M_{z1}, M_{x1})}{\Delta t} \right) \times \frac{4\Delta t}{\rho c_p \Delta x \Delta z} \rightarrow$$

$$2\alpha \frac{\Delta t}{\Delta z^2} (T^n(M_z, M_{x1}) - T^n(M_{z1}, M_{x1})) + 2\alpha \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (T^n(M_{z1}, M_x) - T^n(M_{z1}, M_{x1})) -$$

$$h_{bot} \frac{2\Delta t}{\rho c_p \Delta z} (T^n(M_{z1}, M_{x1}) - T_a) - h_{right} \frac{2\Delta t}{\rho c_p \Delta x} (T^n(M_{z1}, M_{x1}) - T_a) = T^{n+1}(M_{z1}, M_{x1}) -$$

$$T^n(M_{z1}, M_{x1}) \rightarrow$$

$$T^{n+1}(M_{z1}, M_{x1}) = 2r_z T^n(M_z, M_{x1}) + 2r_x T^n(M_{z1}, M_x) + \left(1 - 2r_x - 2r_z - 2h_{bot} r_z \frac{\Delta z}{k} - \right.$$

$$\left. 2h_{right} r_x \frac{\Delta x}{k} \right) T^n(M_{z1}, M_{x1}) + 2(h_{bot} r_z \frac{\Delta z}{k} + h_{right} r_x \frac{\Delta x}{k}) T_a \quad (\text{ض.م-ب-})$$

(18)

ضمیمہ پ

عدم قطعیت نتائج تجربی

ضمیمه پ

عدم قطعیت نتایج تجربی

ض.م-پ-1- مقدمه

در تست های تجربی که همراه با اندازه گیری است عدم قطعیت اندازه گیری های انجام شده یک موضوع مهمی بشمار می رود. در هنگام گزارش نتایج یک اندازه گیری، گزارش مقدار و عدم قطعیت مرتبط با آن در درک این نتایج نقش تعیین کننده ای دارند. هر اندازه گیری توأم با عدم قطعیت است. وسایل اندازه گیری، روش های کالیبراسیون و ابزارهای مورد استفاده هیچ کدام ایده آل نمی باشند. همچنین شرایط جوی، روند انجام تست های تجربی، و نیروی انسانی هرکدام بعنوان یک منبع خطا بحساب می آیند [138].

ض.م-پ-2- پروسه تعیین عدم قطعیت اندازه گیری ها

پروسه ارزیابی عدم قطعیت اندازه گیری های انجام شده با لیست نمودن تمام منابعی که می تواند سبب عدم قطعیت در پروسه اندازه گیری گردد آغاز می شود. برخی از منابع عدم قطعیت می تواند مهمتر از منابع دیگر باشد، اما همه این منابع بایستی لیست گردند [139]. در پروسه سنگ زنی منابع خطا در اندازه گیری های انجام شده می تواند شامل موارد زیر باشد:

- خطای وسیله اندازه گیری نیروی سنگ زنی
- خطای وسیله اندازه گیری دمای سنگ زنی
- خطای وسیله اندازه گیری دبی جریان سیال و فشار هوا در سیستم جریان MQL
- خطای دبی سنج در اندازه گیری جریان در روش خنک کاری جریان سیال
- خطای ساعت اندازه گیری تراز نمودن قطعات قبل از تست های سنگ زنی
- فرضیات مسئله در حل عددی توزیع حرارت در قطعات در حین سنگ زنی
- فرضیات مسئله در بدست آوردن ضرایب همرفت حرارتی سیستم خنک کاری
- خطای زبری سنج در بدست آوردن مقادیر زبری سطوح قطعات پس از پروسه سنگ زنی
- خطا سیستم های اندازه گیری نظیر DLS در بدست آوردن ویژگی های نانوسیالات مورد استفاده در حین پروسه سنگ زنی.
- خطای دستگاه سنگ زنی از جهت عمق بار و سرعت میز کار تنظیم شده.
- خطای ناشی از تغییرات دمای محیط لابراتوار در حین انجام تست های سنگ زنی.

ض.م-پ-3- ارزیابی عدم قطعیت استاندارد

روش های ارزیابی عدم قطعیت استاندارد به دو دسته "گروه A" و "گروه B" تقسیم می شوند. در نوع A، از یک سری اندازه گیری ها برای تخمین انحراف استاندارد بصورت تجربی استفاده می شود. تمامی روش های دیگر غیر از این روش در گروه B از ارزیابی عدم قطعیت نتایج بدست آمده قرار می گیرند.

در حالت کلی، عدم قطعیت استاندارد یک ورودی x_i عبارت است از تخمین انحراف استاندارد مقادیر بدست آمده برای x_i . در صورتی که تعداد n بار تکرار برای شرایط یکسان آزمایش مقادیر $x_1, x_2, \dots, x_n$ بدست آمده اند، مقدار میانگین بعنوان بهترین تقریب از مقادیر اندازه گیری شده می باشند که از طریق رابطه (ض.م-پ-1) بدست می آیند [139].

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{i,k} \quad (\text{ض.م-پ-1})$$

در این حالت واریانس تجربی¹ حاصل از مقادیر اندازه گیری شده مطابق رابطه (ض.م-پ-2) محاسبه می شود.

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{i,k} - \bar{x}_i)^2 \quad (\text{ض.م-پ-2})$$

و انحراف استاندارد تجربی حاصل جزر واریانس تجربی تقسیم بر جزر تعداد دفعات تکرار تست ها (n) محاسبه می شود.

$$s = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (\text{ض.م-پ-3})$$

انحراف استاندارد تجربی مقدار میانه همچنین بصورت متداول بعنوان خطای استاندارد میانه² شناخته می شود.

در گروه A عدم قطعیت ورودی های اندازه گیری شده بعنوان انحراف استاندارد تجربی مقادیر میانی تعریف می شود. با ترکیب روابط (ض.م-پ-1 تا 3) رابطه (ض.م-پ-4) برای بیان عدم قطعیت استاندارد $u(x)$ استفاده می شود که در آن x متغیر مورد بررسی است [139].

$$u(x) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_{i,k} - \bar{x}_i)^2} \quad (\text{ض.م-پ-4})$$

که در این رابطه درجه آزادی برابر با $n-1$ است که یک واحد کمتر از تعداد دفعات تکرار آزمایش می باشد. با توجه به توضیحات داده شده، مقادیر ارائه شده در جدول (ض.م-پ-1) نمایش دهنده عدم قطعیت محاسبه شده برای برخی از شرایط تجربی انجام تست های سنگ زنی می باشد. تعداد دفعات تکرار آزمایش 5 بار می باشد. منابع اصلی خطا در این اندازه گیری ها عبارتند از خطای وسیله اندازه گیری نیرو، اندازه گیری دما، خطای عمق بار و سرعت پیشروی ماشین، و دبی سنج سیستم خنک کاری. براساس نتایج حاصله، حداکثر میزان عدم قطعیت نیروی سنگ زنی و دمای سطح کار بترتیب برابر 0/15 N و 0/15 °C است. این بدان معناست که نتایج تجربی با در نظر گرفتن

¹ Experimental variance

² Standard error of mean

حداکثر میزان عدم قطعیت بدست آمده، نیرو و دمای سنگ زنی در شرایط مختلف انجام تست های تجربی معنادار می شوند.

جدول ض.م-پ-1. نتایج تجربی عدم قطعیت استاندارد نیروی مماسی ($u(F_t)$) و دمای سطح سنگ زنی ($u(T)$) در شرایط خنک کاری MQL با فشار 4 bar و جریان سیال.

15		5		سرعت قطعه کار (m/min)	
$u(T)$ (°C)	$u(F_t)$ (N)	$u(T)$ (°C)	$u(F_t)$ (N)	عمق بار (μm) a_p	شرایط خنک کاری
0/13	0/11	0/13	0/11	10	MQL-Gr-0.15 vol. %
0/08	0/14	0/07	0/14	25	
0/09	0/10	0/15	0/14	40	
0/14	0/06	0/13	0/06	10	MQL-Gr-0.35 vol. %
0/13	0/12	0/10	0/12	25	
0/10	0/13	0/15	0/11	40	
0/12	0/05	0/10	0/06	10	MQL-CuO-0.15 vol. %
0/15	0/13	0/15	0/12	25	
0/16	0/15	0/15	0/12	40	
0/14	0/13	0/13	0/10	10	MQL-CuO-0.35 vol. %
0/15	0/14	0/10	0/13	25	
0/15	0/14	0/14	0/13	40	
0/13	0/08	0/12	0/06	10	Flood cooling
0/14	0/11	0/13	0/14	25	
0/10	0/12	0/14	0/10	40	

Surname: Seyedzavvar		Name: Mirsadegh
Thesis Title: Experimental and Numerical Study of the Effects of Graphite and Copper Vegetable Based Nanofluids in Surface Integrity of AISI 1045 Steel in Minimum Quantity Lubrication Grinding Process		
Supervisor: Professor Mohammadreza Shabgard Advisors: Dr. Mehran Mahbobkhah, Dr. Mousa Mohammadpourfard		
Degree: PhD	Major: Mechanical Engineering	Field: Manufacturing Engineering
University: University of Tabriz	Faculty: Mechanical Engineering	
Graduation Date: January 14, 2018	Number of Pages: 193	
Keywords: graphite nanofluid, copper oxide nanofluid, vegetable oil, minimum quantity lubrication grinding, cutting force, coefficient of friction, convection heat transfer coefficient, energy partition of workpiece.		
Abstract: From the aspect of environmental and economic problems, the high consumption of cooling fluid in machining processes, especially in grinding, is of paramount concern. Results of previous investigations revealed that the minimum quantity lubrication (MQL) technique could be considered as a potential substitute to flood cooling system. Along these lines, the conducted researches illuminated the importance of cooling fluid properties, in terms of thermal conductivity enhancement and tribological properties, in the success of MQL method. The researches in this area are in preliminary stages and only the effects of limited types of nanofluids on the characteristics of grinding parts have been evaluated. In this study, the properties of graphite and copper oxide nanofluids, synthesized by electro discharge process, have been investigated as cooling fluid in the MQL grinding of AISI 1045 steel. For synthesis of graphite and CuO nanofluids, three levels of electro discharge process periods were selected to acquire various concentrations of nanoparticles in the base fluids. During grinding experiments, three levels of linear velocity of workpiece and depth of cut and two levels of air flow pressure of MQL system were studied. Furthermore, the discharge current, pulse on-time, and type of base fluid in the submerged electro discharge process and grinding wheel velocity in the grinding process were considered as constant parameters. Type-J thermocouples embedded in workpiece for measurement of grinding temperature, and a designed and manufactured mechanism based on load-cells for measurement of grinding forces, were employed. Acquisition of these outputs were essential to determine the grinding forces, coefficient of friction between the grinding wheel and workpiece, heat flux generated in grinding, and energy partition of workpiece during grinding process. In order to evaluate the surface integrity of ground parts, measurements of surface roughness, microhardness and microscopic observations of ground surfaces and their cross-sections were employed. Heat transfer simulations based on finite difference method (FDM) were conducted to study the energy partition and temperature distribution of workpiece during grinding process. Convection coefficients of cooling systems were quantified based on a semi-empirical method and the values were used in the FDM simulations. In these simulations, the heat flux generated during grinding process was considered as an exponential function and the influence of this assumption on the accuracy of predicted temperature distribution within the workpiece was evaluated. Based on the results, the tangential force and the grinding force ratio using graphite nanofluid MQL system experienced the maximum reduction of 48.8 % as compared to other lubrication conditions,		

especially under extreme grinding parameters. Graphite has a layered structure that in the presence of the shear forces the atomic plates slip over each other which results in reduction of the frictional force in the contact surface of the abrasive wheel with the workpiece. Tangential grinding forces and force ratio using CuO nanofluid MQL cooling condition with a low concentration of nanoparticles in the base fluid were less than the equivalent values for pure MQL lubrication and flood cooling conditions. The value of these variables changed with the concentration of nanoparticles in CuO nanofluids and the pressure between the abrasive grits and the surface of the work. Unlike graphite nanoparticles, copper oxide nanoparticles do not have a layered structure, and lubrication occurs through the rolling of spherical nanoparticles in the contact area of abrasive wheel and workpiece. There were almost no burning signs on the surface of workpieces ground under MQL conditions using the graphite and CuO nanofluids. The increase of surface temperature in MQL grinding with CuO nanofluid represented the maximum reduction of 66.2 % in comparison to the that of dry grinding and 2.5 % as compared with that of graphite MQL condition, while the convective heating coefficient of the graphite nanofluid MQL system was higher than the equivalent value for the CuO nanofluid MQL system. Based on the results of the FDM model, the energy partition of workpiece in grinding under the CuO nanofluid MQL condition had the lowest values compared to the same values for grinding using the graphite nanofluid MQL and the flood cooling systems.

Additionally, the microhardness of work surfaces in MQL grinding using graphite nanofluid were increased through the penetration of graphite nanoparticles in the grinding surface and plastic deformation of the subsurface layer as a result of the sliding of free surfaces of abrasive grits on the grinding surface. The latter was caused by the formation of an effective lubrication film in the contact area of grinding wheel and workpiece. Similarly, under CuO nanofluid MQL lubrication condition, the plastic deformation of the subsurface layer under the pressure of abrasive grits and the penetration of copper oxide nanoparticles in the grinding surface resulted in the increase of the microhardness of the surface of workpiece. The amount of microhardness of the ground surface increased with increasing the concentration of the nanoparticles in the base fluid of the nanofluids that were utilized in MQL system.



University of Tabriz

Faculty of Mechanical Engineering

Department of Manufacturing Engineering

Thesis is approved for the degree of PhD of Sciences

Title

Experimental and Numerical Study of the Effects of Graphite and Copper Vegetable Based Nanofluids in Surface Integrity of AISI 1045 Steel in Minimum Quantity Lubrication Grinding Process

Supervisor

Professor Mohammadreza Shabgard

Advisors

Dr Mehran Mahbobkhah, Dr Mousa Mohammadpourfard

Researcher

Mirsadegh Seyedzavvar

Date

January 14, 2018