



دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی مکانیک

رساله دکتری

مهندسی مکانیک-ساخت و تولید

فرآیند سنگ زنی با روانکاری کمینه و بررسی خصوصیات سطحی

نگارنده

محمد جعفر حداد

استاد راهنما

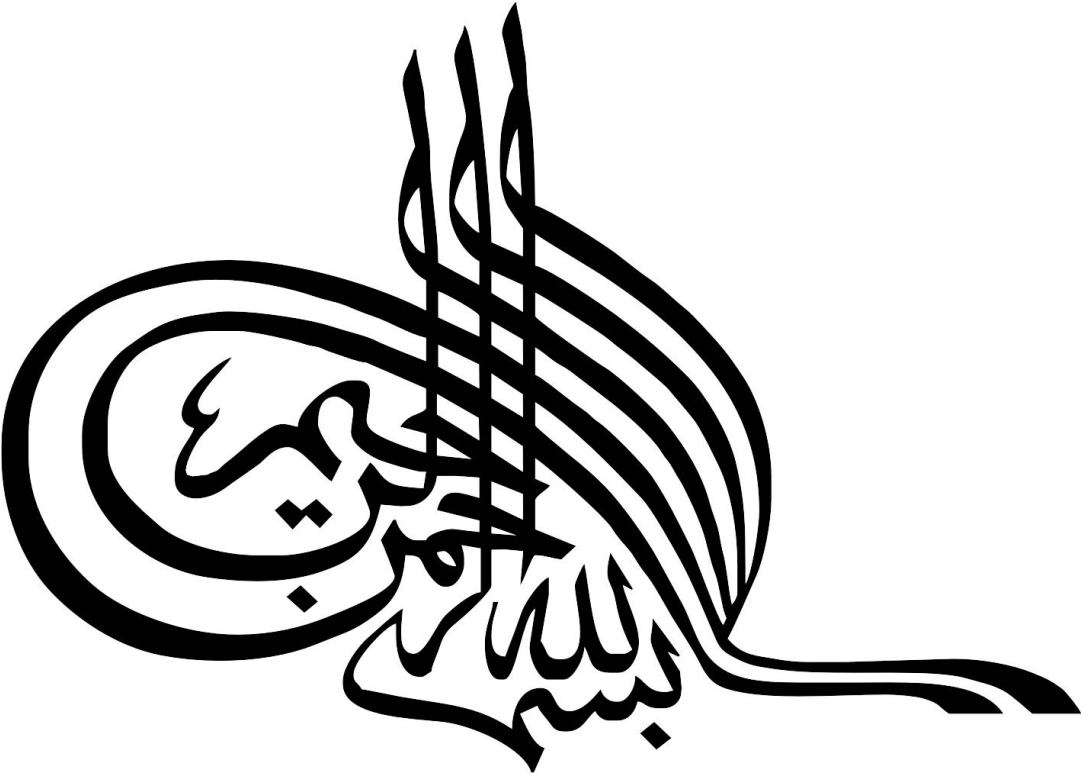
پروفسور محمد حسین صادقی

اساتید مشاور

پروفسور تقی توکلی

دکتر مهدی معرفت

آذرماه ۱۳۸۹



آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهش‌های علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرح‌های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان‌نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان‌نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین‌نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب محمد جعفر حداد دانشجوی رشته مکانیک-ساخت و تولید ورودی سال تحصیلی ۱۳۸۵ مقطع دکتری دانشکده فنی و مهندسی متعهد می شوم کلیه نکات مندرج در آئین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته‌های علمی مستخرج از پایان‌نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین‌نامه فوق‌الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می‌دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا:
تاریخ: ۱۳۸۹/۹/۱۳

آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته مکانیک-ساخت و تولید است که در سال ۱۳۸۹ در دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای **پروفسور محمد حسین صادقی**، مشاوره جناب آقای **پروفسور تقی توکلی** و مشاوره جناب آقای **دکتر مهدی معرفت** از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب **محمد جعفر حداد** دانشجوی رشته **مکانیک ساخت و تولید** مقطع **دکتری** تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی:

محمد جعفر حداد

تاریخ و امضا:

۱۳۸۹/۹/۱۳

تقدیم به

پدر و مادر عزیز و بزرگوارم

که هر چه دارم از وجود زیبای آنهاست...

بسمه تعالی

برخود لازم می‌دانم از زحمات‌های اساتید بزرگوار و کلیه دوستان و عزیزانی که اینجانب را در انجام هر چه بهتر این تحقیق همراهی کردند، تشکر و سپاس فراوان داشته باشم.

امتنان و سپاس می‌گذارم تلاشها، زحمات و راهنمایی‌های ارزشمند جناب آقای پروفیسور محمد حسین صادقی را که با حمیت و جدیت، مرا به دقت، اندیشه و درک و امی داشتند. از جناب آقایان دکتر مهدی معرفت و دکتر امیر امیدوار به خاطر مشاوره در شبیه‌سازی انتقال حرارت که با اینجانب کمال همکاری را مبدول داشتند، سپاس فراوان دارم.

مطمئناً تعریف، انجام و اتمام پروژه حاضر بدون راهنمایی، مشاوره و همکاری استاد بزرگوار و ارجمندم جناب آقای پروفیسور تقی توکلی صورت نمی‌پذیرفت. در مدت دوران فرصت مطالعاتی در انستیتوی سنگ‌زنی و فوق پرداخت پروفیسور توکلی در آلمان (*KSF*)، و با هزینه‌های آن مؤسسه، آزمایش‌های رساله حاضر انجام شد. لازم است تشکر فراوان از زحمات و راهنمایی‌های علمی ایشان و همکاران در انستیتو *KSF*، بخصوص آقایان عبدالرضا راثی‌فرد، بهمن آذرهوشنگ، علیرضا وصالی، امیر دانشی و نیما جندقی را داشته باشم.

از دوستان و سروران بزرگوارم در آزمایشگاه *CAD/CAM* دانشگاه تربیت مدرس بخصوص آقایان دکتر محمد کاظمی، دکتر داوود شهریاری، محسن امامی، عارف حبیب‌زاده و امیر امیری به خاطر کمکهای بیدریغشان سپاسگزارم.

از پدر و مادر عزیزم که با دعای خیر و توصیه من به ایمان به خدای متعال، معرفت و صبر موجبات خیر و برکت در زندگی‌ام هستند، صمیمانه سپاسگزارم و از خدای بزرگ برای آنها طلب طول عمر با عزت و سعادت را خواستارم.

چکیده

استفاده از مایع برشی به منظور خنک‌کاری و روانکاری در فرآیند سنگ‌زنی گریز ناپذیر است. این مایع‌ها با هدف خنک‌کاری ناحیه تماس و جلوگیری از سوختگی سطحی، روانکاری و کاهش اصطکاک بین دانه‌های چرخ سنگ و سطح قطعه‌کار، کاهش انرژی مصرفی، افزایش عمر سنگ، کاهش تغییر شکل حرارتی قطعه‌کار، افزایش صافی سطح و نیز دفع براده بکار گرفته می‌شوند.

مصرف مایع برشی در فرآیند سنگ‌زنی به ویژه برای سنگ‌زنی سوپر آلیاژها (به دلیل ضرورت خنک‌کاری ناحیه تماس سنگ و قطعه‌کار)، بسیار زیاد است. علاوه بر آن ذره‌های ریز مایع برشی به هنگام سنگ‌زنی در محیط پخش شده و سبب آلودگی زیست محیطی می‌شوند. هزینه‌های گزاف تهیه، بازیابی و یا نابودسازی مایع‌های برشی و اثرات زیان‌بار آن بر محیط زیست و کارگران، پژوهشگران را وامی‌دارد تا روش‌های کاهش مصرف آن‌را جستجو کنند. یکی از راه‌کارهای مطرح، فرآیند سنگ‌زنی با روانکاری کمینه (حداقل مقدار روانکار یا MQL)¹، می‌باشد که بجای سنگ‌زنی خشک و نیز سنگ‌زنی با پاشش پیوسته مایع برشی پیشنهاد شده است.

هدف از این پژوهش، بررسی فراگیر و پایه‌ای فرآیند سنگ‌زنی با روانکاری کمینه، به منظور شناخت پارامترهای این فرآیند و روابط حاکم میان آنهاست. در این راستا آزمایش‌های فراوانی انجام شد تا مقدار بهینه هر کدام از پارامترهای فرآیند، قطعه‌کار، نوع مایع برشی مورد استفاده، پارامترهای روانکاری کمینه و نوع سنگ برای دستیابی به بهره‌وری و عملکرد بهینه فرآیند سنگ‌زنی با روانکاری کمینه، ارزیابی و تعیین شود. همچنین، تحلیل حرارتی فرآیند سنگ‌زنی با روانکاری کمینه و اندازه‌گیری دما در شرایط مختلف سنگ‌زنی جهت مطالعه و درک عمیق‌تر فرآیند مورد بررسی قرار گرفت. با تجزیه و تحلیل نتایج بدست آمده مشخص شد که فاصله بهینه نوک نازل روانکاری و زاویه پاشش، سبب چیره‌گی مه‌پاشی (اسپری) روانکاری کمینه بر لایه مرزی هوای اطراف سنگ و نفوذ آن به ناحیه درگیری و در نتیجه بهبود روانکاری می‌شود. نتایج مدل‌سازی و آزمایش‌های تجربی نشان داد که بکارگیری روانکاری کمینه به همراه سنگ‌های سایشی سنتی می‌تواند تولید گرمای ناشی از

اصطکاک را کاهش داده و با خنک‌کاری فصل مشترک ابزار-قطعه‌کار، دمای قطعه را پایین‌تر از دمای ماشین‌کاری خشک نگه‌دارد، در صورتیکه خنک‌کاری ناحیه سنگ‌زنی توسط روانکاری کمینه نسبت به سنگ‌زنی با پاشش پیوسته مایع برشی ناچیز است. در نتیجه استفاده از سنگ‌های CBN در فرآیند روانکاری کمینه به دلیل هدایت گرمایی بالای دانه های CBN و انتقال بیشتر گرمای منطقه سنگ‌زنی به سنگ که سبب کاهش عیوب گرمایی سطح قطعه‌کار می‌شود، توصیه می‌گردد. همچنین نتایج آزمایش‌های مختلف با استفاده از انواع مایع برشی و سنگ نشان می‌دهد که کاربرد روغن در سنگ‌زنی با روانکاری کمینه، بهره‌وری فرآیند سنگ‌زنی و کیفیت سطح قطعه‌کار را (در مقایسه با محیط‌های دیگر خنک‌کار/روانکار مورد بررسی در این پژوهش) افزایش داده و از این نگاه می‌تواند جایگزین مناسبی برای سنگ‌زنی با پاشش پیوسته مایع برشی باشد. علاوه بر آن، روانکاری کمینه می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های مصرفی و نیز زیان‌های زیست محیطی گردیده و جایگزین مناسبی برای سنگ‌زنی با پاشش پیوسته روغن یا روغن حل‌شونده در آب باشد.

کلمات کلیدی: سنگ‌زنی، حداقل مقدار روانکار، روانکاری کمینه، تحلیل گرمایی، کیفیت سطح،

نیروهای سنگ‌زنی، مخلوط هوا/روغن، راندمان سنگ‌زنی

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب.....	أ
فهرست جداول.....	ه
فهرست شکل‌ها.....	و
فهرست علائم.....	م
فصل ۱ مقدمه.....	۱
۱-۱ فرآیند سنگ‌زنی.....	۲
۲-۱ سیال برشی در فرآیند سنگ‌زنی.....	۳
۱-۲-۱ وظایف سیال برشی در فرآیند سنگ‌زنی.....	۳
۲-۲-۱ معایب استفاده از سیال برشی در سنگ‌زنی.....	۳
۱-۲-۲-۱ مشکلات زیست محیطی.....	۳
۲-۲-۲-۱ هزینه های مصرف سیال.....	۴
۳-۲-۱ نقش خنک‌کار/روانکار در سنگ‌زنی فلزات.....	۵
۴-۲-۱ انواع اصلی سیالات سنگ‌زنی.....	۵
۱-۴-۲-۱ سیالات گازی شکل.....	۵
۲-۴-۲-۱ روغن‌های حل‌شونده در آب.....	۶
۳-۴-۲-۱ روغن‌های خالص (غیرحل‌شونده) معدنی.....	۶
۴-۴-۲-۱ روغن‌های چرب.....	۷
۵-۴-۲-۱ روغن‌های سینتتیک.....	۸
۵-۲-۱ خواص شیمیایی سیال سنگ‌زنی.....	۸
۱-۵-۲-۱ افزودنی‌ها.....	۸
۲-۵-۲-۱ خاصیت روانکاری سیال.....	۹
۱-۲-۵-۲-۱ بهبود دهنده‌های اصطکاک (FM).....	۹
۲-۲-۵-۲-۱ افزودنی‌های ضد سایش (AW).....	۱۰
۳-۵-۲-۱ خاصیت فشار نهایی سیال (EP).....	۱۰
۳-۱ فرآیندهای سنگ‌زنی از نظر محیط خنک‌کاری.....	۱۲
۱-۳-۱ سنگ‌زنی با پاشش پیوسته خنک‌کار/روانکار.....	۱۲

۲-۳-۱ سنگ‌زنی خشک.....	۱۲
۳-۳-۱ روانکاری جامد.....	۱۳
۴-۳-۱ خنک‌کاری برودتی.....	۱۴
۵-۳-۱ سنگ‌زنی با روانکاری کمینه.....	۱۵
۴-۱ اهداف و جنبه‌های نوآوری تحقیق حاضر.....	۲۳
۵-۱ روش انجام تحقیق.....	۲۵
۶-۱ رئوس مطالب تحقیق.....	۲۷
فصل ۲ مروری بر ادبیات موضوع.....	۲۹
۱-۲ مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه سنگ‌زنی با روانکاری کمینه.....	۲۹
۲-۲ تحلیل گرمایی فرآیند سنگ‌زنی.....	۳۲
۳-۲ طرح نیازها و مشکلات در زمینه سنگ‌زنی با روانکاری کمینه.....	۳۹
فصل ۳ مشخصات مواد، تجهیزات و روش انجام آزمایش‌ها.....	۴۲
۱-۳ سیستم روانکاری کمینه.....	۴۲
۲-۳ دستگاه اندازه‌گیری نیرو (دینامومتر).....	۴۵
۳-۳ دستگاه سنگ‌زنی.....	۴۶
۴-۳ تجهیزات جانبی برای انجام آزمایش‌ها.....	۴۸
۵-۳ نوع خنک‌کار/روانکار در سنگ‌زنی با سیال برشی و روانکاری کمینه.....	۵۲
فصل ۴ اثر متغیرهای سنگ‌زنی بر فرآیند سنگ‌زنی با روانکاری کمینه.....	۵۴
۱-۴ مکانیزم براده برداری در فرآیند سنگ‌زنی.....	۵۴
۲-۴ شرایط آزمایش‌ها.....	۵۹
۳-۴ نتایج آزمایش‌ها.....	۶۰
۴-۴ سنگ‌زنی نمونه‌های تیتانیومی.....	۸۳
۱-۴-۴ پدیده رسوب مجدد در سنگ‌زنی آلیاژهای تیتانیوم.....	۸۴
۲-۴-۴ نتایج سنگ‌زنی آلیاژ تیتانیوم.....	۸۴
۵-۴ نتیجه‌گیری.....	۸۷
فصل ۵ اثر پارامترهای مخلوط هوا/روغن بر فرآیند سنگ‌زنی با روانکاری کمینه.....	۸۹
۱-۵ شرایط آزمایش‌ها.....	۸۹
۲-۵ نتایج عملکرد سنگ‌زنی با روانکاری کمینه.....	۹۱

۵-۲-۱ اثر موقعیت نازل روانکاری کمینه.....	۹۱
۵-۲-۲ اثرات فشار هوا و نرخ جریان روانکاری کمینه (اندازه قطرات).....	۱۰۵
۵-۲-۳ اثرات فاصله رسوب قطرات روغن.....	۱۱۳
۵-۳ نتیجه‌گیری.....	۱۱۸
فصل ۶ اثر نوع سنگ و خنک‌کار/روانکار بر سنگ‌زنی با روانکاری کمینه/۱.....	۱۲۰
۶-۱ مکانیزم روانکاری در سنگ‌زنی با روانکاری کمینه.....	۱۲۰
۶-۲ مشخصات سنگهای ساینده.....	۱۲۷
۶-۳ سنگهای SG.....	۱۲۸
۶-۴ روش انجام آزمایش‌ها.....	۱۳۰
۶-۵ نتایج آزمایش‌ها.....	۱۳۳
۶-۶ نتیجه‌گیری.....	۱۴۶
فصل ۷ اثر نوع سنگ و خنک‌کار/روانکار بر سنگ‌زنی با روانکاری کمینه/۲.....	۱۵۰
۷-۱ روش انجام آزمایش‌ها.....	۱۵۰
۷-۲ بحث و نتیجه‌گیری آزمایش‌ها.....	۱۵۳
۷-۳ نتیجه‌گیری.....	۱۶۵
فصل ۸ تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌های فرآیند سنگ‌زنی با روانکاری کمینه.....	۱۷۰
۸-۱ طرح و تحلیل آزمایش‌ها.....	۱۷۰
۸-۲ تعاریف.....	۱۷۳
۸-۳ مدل رگرسیون نیروی مماسی و زبری سطح در سنگ‌زنی با روانکاری کمینه.....	۱۷۴
۸-۴ انرژی مخصوص و راندمان سنگ‌زنی با روانکاری کمینه.....	۱۹۰
۸-۵ نتیجه‌گیری.....	۱۹۶
فصل ۹ مدل‌سازی انتقال حرارت در فرآیند سنگ‌زنی.....	۱۹۸
۹-۱ انتقال حرارت در سنگ‌زنی.....	۱۹۸
۹-۲ مدل تقسیم حرارت در فرآیند سنگ‌زنی.....	۲۰۰
۹-۳ محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال روانکاری کمینه.....	۲۱۲
۹-۴ بررسی اثر سیال در داخل و خارج منطقه سنگ‌زنی.....	۲۱۵
۹-۵ محاسبه تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی روانکاری کمینه.....	۲۱۷
۹-۶ محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی در سنگ‌زنی با سیال برشی.....	۲۲۰

صفحه

عنوان

۲۲۲.....	۷-۹ ارزیابی مدل گرمایی.....
۲۲۶.....	۹-۷-۱ افزایش دما.....
۲۳۲.....	۹-۷-۲ تقسیم انرژی در سنگ زنی.....
۲۳۶.....	۹-۷-۳ توزیع دما در فرآیند سنگ زنی.....
۲۴۸.....	۹-۸ نتیجه گیری.....
۲۵۰.....	فصل ۱۰ نتیجه گیری و پیشنهادها.....
۲۵۰.....	۱۰-۱ نتیجه گیری.....
۲۵۴.....	۱۰-۲ پیشنهادها.....
۲۵۷.....	مراجع.....
۲۶۴.....	پیوست الف.....
۲۷۳.....	پیوست ب.....
۲۷۷.....	واژه نامه انگلیسی-فارسی.....
۲۸۰.....	واژه نامه فارسی-انگلیسی.....

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱ ترکیبات پایه روغن های معدنی.....	۷
جدول ۱-۲ خواص افزودنی ها.....	۱۰
جدول ۱-۲ پیشینه پژوهش در زمینه سنگ زنی با روانکاری کمینه.....	۳۱
جدول ۲-۲ پیشینه پژوهش در زمینه تحلیل گرمایی فرآیند سنگ زنی.....	۳۶
جدول ۱-۴ پارامترهای مختلف سنگ زنی.....	۶۱
جدول ۱-۵ پارامترهای مختلف سنگ زنی.....	۹۰
جدول ۲-۵ پارامترهای مختلف دانه ساینده.....	۱۱۰
جدول ۱-۶ پارامترهای مختلف سنگ زنی.....	۱۳۲
جدول ۲-۶ سیالات مورد استفاده در فرآیند سنگ زنی با روانکاری کمینه.....	۱۳۲
جدول ۱-۷ پارامترهای مختلف سنگ زنی.....	۱۵۲
جدول ۲-۷ سیالات مورد استفاده در فرآیند سنگ زنی با روانکاری کمینه.....	۱۵۳
جدول ۱-۸ فاکتورهای ورودی متغیر و سطوح آنها.....	۱۷۶
جدول ۲-۸ جدول طراحی آزمایش فاکتوریل کامل و نتایج بدست آمده از آزمایش ها.....	۱۷۶
جدول ۳-۸ مقادیر R^2 و R_{adj}^2 برای درجات مختلف معادله رگرسیون نیروی مماسی.....	۱۸۰
جدول ۴-۸ مقادیر R^2 و R_{adj}^2 برای درجات مختلف معادله رگرسیون زبری سطح.....	۱۸۰
جدول ۵-۸ ثابت تجربی اثر نوع سنگ و خنک کار/روانکار بر نیروی مماسی سنگ زنی با روانکاری کمینه.....	۱۸۶
جدول ۱-۹ پارامترهای آزمایش های اندازه گیری دما.....	۲۲۴
جدول ۲-۹ خواص گرمایی قطعه کار.....	۲۲۷
جدول ۳-۹ خواص گرمایی سنگهای مورد استفاده در آزمایش ها.....	۲۲۷
جدول ۴-۹ خواص گرمایی سیالات مورد استفاده در آزمایش ها.....	۲۲۸
جدول ۵-۹ نرخ جریان حجمی و سرعت هوای دستگاه روانکاری کمینه مورد استفاده در آزمایش ها.....	۲۲۸
جدول ۶-۹ نرخ جریان حجمی روغن دستگاه روانکاری کمینه مورد استفاده در آزمایش ها.....	۲۲۸
جدول ۷-۹ پارامترهای آزمایش های سنگ زنی با روانکاری کمینه برای اندازه گیری دما.....	۲۳۴
جدول ۸-۹ نتایج مدل سازی گرمایی و آزمایش های اندازه گیری دما برای سنگ Al_2O_3	۲۳۵
جدول ۹-۹ نتایج آزمایش های اندازه گیری دما برای سنگ CBN	۲۳۵
جدول ۹-۱۰ ضرایب انتقال حرارت جابجایی محاسبه شده برای شرایط مختلف خنک کاری.....	۲۳۵

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۴.....	شکل ۱-۱ هزینه های ناشی از مصرف سیال برشی در فرآیندهای ماشین کاری.....
۱۰.....	شکل ۲-۱ مکانیزم جذب افزودنی های (FM).....
۱۱.....	شکل ۳-۱ جذب سولفور فعال بر سطح فولاد.....
۱۳.....	شکل ۴-۱ ساختار سطحی ایجاد شده روی سنگ توسط فرآیند تیز کردن و فرآیند لیزر.....
۱۶.....	شکل ۵-۱ قطرات روغن روی سطح ابزار و روی شیشه توسط روش روانکاری کمینه.....
۱۸.....	شکل ۶-۱ طرز کار سیستمهای تأمین داخلی مخلوط هوا/روغن با سیستم تمیزه کننده خارجی.....
۱۸.....	شکل ۷-۱ طرز کار سیستمهای تأمین داخلی مخلوط هوا/روغن با سیستم تمیزه کننده داخلی.....
۱۹.....	شکل ۸-۱ طرز کار سیستمهای تأمین خارجی مخلوط هوا/روغن با ایجاد مخلوط هوا/روغن: در نازل مخصوص (سمت چپ)، در سیستم تمیزه کننده خارجی (سمت راست).....
۲۰.....	شکل ۹-۱ طرح نازل مخصوص برای سیستمهای تأمین خارجی مخلوط هوا/روغن با ایجاد مخلوط هوا/روغن در سر نازل.....
۲۱.....	شکل ۱۰-۱ طرز کار سیستمهای تأمین خارجی مخلوط هوا/روغن با ایجاد مخلوط هوا/روغن در نازل مخصوص.....
۲۲.....	شکل ۱۱-۱ سیستمهای تأمین خارجی مخلوط هوا/روغن با ایجاد مخلوط هوا/روغن در سیستم خارجی.....
۲۲.....	شکل ۱۲-۱ سیستم مکش براده در روانکاری کمینه خارجی (سمت راست) و داخلی (سمت چپ).....
۲۴.....	شکل ۱۳-۱ رویکرد پژوهش حاضر.....
۲۶.....	شکل ۱۴-۱ روند انجام پژوهش حاضر.....
۳۲.....	شکل ۱-۲ منبع حرارتی فصل مشترک دانه/قطعه کار.....
۳۴.....	شکل ۲-۲ تقسیم شار حرارتی در منطقه سنگزنی.....
۳۵.....	شکل ۳-۲ منبع حرارتی فصل مشترک سنگ/قطعه کار.....
۳۸.....	شکل ۴-۲ شار گرمایی به قطعه کار و کامپوزیت صلب در مدل <i>Lavine</i>
۴۰.....	شکل ۵-۲ مؤلفه های سیستم ماشین کاری با روانکاری کمینه.....
۴۴.....	شکل ۱-۳ سیستم روانکاری کمینه مورد استفاده در پژوهش حاضر.....
۴۴.....	شکل ۲-۳ نازل روانکاری کمینه مورد استفاده هنگام سنگزنی قطعه کار.....
۴۵.....	شکل ۳-۳ توزیع و اندازه قطرات روغن در روانکاری کمینه.....
۴۶.....	شکل ۴-۳ دینامومتر و تجهیزات مربوطه مورد استفاده در آزمایش‌ها.....
۴۷.....	شکل ۵-۳ ماشین سنگزنی <i>Hahn & Kolb - NC</i> مورد استفاده در آزمایش‌های اولیه.....

عنوان

صفحه

- شکل ۳-۶ ماشین سنگزنی *FAVRETTO MB100 CNC* و سیستم روانکاری کمینه طراحی شده..... ۴۷
- شکل ۳-۷ ماشین سنگزنی *ELB - AC8 - CNC* جهت انجام آزمایش‌های نهایی..... ۴۸
- شکل ۳-۸ میکروسکوپ دیجیتال *Keyence : VHX* جهت مشاهده سطح سنگ و قطعات سنگزنی شده..... ۴۹
- شکل ۳-۹ نازل طراحی شده برای سیستم روانکاری کمینه جهت استفاده در سنگزنی آلیاژ تیتانیوم..... ۵۰
- شکل ۳-۱۰ نحوه قرار گرفتن سطح سنگزنی شده داخل مانع جهت مشاهده سطح مقطع عرضی..... ۵۱
- شکل ۳-۱۱ قلم دولبه الماس جهت تیز کردن سنگ‌های اکسید آلومینیوم..... ۵۲
- شکل ۳-۱۲ دیسک الماس جهت تیز کردن سنگ *CBN*..... ۵۲
- شکل ۴-۱ اثرات برخورد دانه ساینده با سطح قطعه کار..... ۵۵
- شکل ۴-۲ میکرو شکست در فرآیند برش مواد ترد توسط دانه های ساینده..... ۵۵
- شکل ۴-۳ مناطق تغییر شکل الاستیکی و پلاستیکی در براده برداری توسط دانه ساینده..... ۵۶
- شکل ۴-۴ اثر اصطکاک بر عمق برش و راندمان براده برداری..... ۵۷
- شکل ۴-۵ فرآیند براده برداری هنگام ماشینکاری با سرعت برشی بالا..... ۵۹
- شکل ۴-۶ الف) سیستم تأمین خنک کار در سنگزنی با سیال برشی، ب) دستگاه *MQL* مجهز به دو پمپ پنوماتیکی جهت تأمین روانکار، ج) سنگزنی با سیال برشی، د) موقعیت دهی نازل *MQL* نزدیک منطقه سنگزنی..... ۶۰
- شکل ۴-۷ زبری سطح اندازه گیری شده برای فولاد سخت کاری شده *100 Cr 6*: الف، ب) R_a و R_z عمود بر جهت سنگزنی..... ۶۳
- ادامه شکل ۴-۷ زبری سطح اندازه گیری شده برای فولاد سخت کاری شده *100 Cr 6*: ج، د) R_a و R_z در راستای سنگزنی..... ۶۴
- شکل ۴-۸ زبری سطح اندازه گیری شده برای فولاد نرم: الف، ب) R_a و R_z عمود بر جهت سنگزنی..... ۶۵
- ادامه شکل ۴-۸ زبری سطح اندازه گیری شده برای فولاد نرم: ج، د) R_a و R_z در راستای سنگزنی..... ۶۶
- شکل ۴-۹ زبری سطح اندازه گیری شده برای فولاد سخت کاری شده *100 Cr 6* در نرخ براده برداری بالا: الف) R_a و R_z عمود بر جهت سنگزنی، ب) R_a و R_z در راستای سنگزنی..... ۶۷
- ادامه شکل ۴-۹ زبری سطح اندازه گیری شده برای فولاد نرم *42 CrMo 4* در نرخ براده برداری بالا: ج) R_a و R_z عمود بر جهت سنگزنی، د) R_a و R_z در راستای سنگزنی..... ۶۸
- شکل ۴-۱۰ نیروهای مماسی و عمودی سنگزنی فولاد سخت کاری شده *100 Cr 6*: الف) در نرخ براده برداری پایین، ب) در نرخ براده برداری بالا..... ۷۱
- ادامه شکل ۴-۱۰ نیروهای مماسی و عمودی سنگزنی فولاد نرم *42 CrMo 4*: ج) در نرخ براده برداری پایین، د) در نرخ براده برداری بالا..... ۷۲
- ادامه شکل ۴-۱۰ اثر سرعت سنگ بر نیروها در سنگزنی فولاد سخت کاری شده *100 Cr 6*، و) اثر سرعت سنگ بر نیروها در سنگزنی فولاد نرم *42 CrMo 4*..... ۷۳

- شکل ۴-۱۱ مورفولوژی سطح فولاد سخت کاری شده $100Cr6$ سنگزنی شده تحت شرایط مختلف خنک کاری و روانکاری (بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر)..... ۷۴
- شکل ۴-۱۲ مورفولوژی سطح فولاد نرم $42CrMo4$ سنگزنی شده تحت شرایط مختلف خنک کاری و روانکاری (بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر)..... ۷۵
- شکل ۴-۱۳ مورفولوژی سطح فولاد نرم $42CrMo4$ سنگزنی شده توسط تکنیک *MQL*..... ۷۶
- شکل ۴-۱۴ براده های حاصل از فرآیندهای مختلف سنگزنی (بزرگنمایی ۲۰۰ برابر)..... ۷۶
- شکل ۴-۱۵ اثر نرخ براده برداری مخصوص بر نسبت نیرو در سنگزنی فولاد سخت کاری شده $100Cr6$ ۷۷
- ادامه شکل ۴-۱۵ اثر نرخ براده برداری مخصوص بر نسبت نیرو در سنگزنی فولاد نرم $42CrMo4$ ۷۸
- شکل ۴-۱۶ مورفولوژی سطح فولاد سخت کاری شده $42CrMo4$ سنگ زنی..... ۸۱
- شکل ۴-۱۷ میکروگراف *SEM* از زیرسطح فولاد سخت $42CrMo4$ سنگ زنی شده..... ۸۲
- شکل ۴-۱۸ نمودارهای تغییرات میکرو سختی در عمق برای سنگ کاری شده $42CrMo4$ ۸۲
- شکل ۴-۱۹ مورفولوژی سطح آلیاژ $Ti6Al4V$ سنگ زنی شده..... ۸۵
- شکل ۴-۲۰ نمودارهای تغییرات میکرو سختی در عمق برای سنگ زنی آلیاژ $Ti6Al4V$ ۸۶
- شکل ۴-۲۱ میکروگراف *SEM* از زیر سطح آلیاژ $Ti6Al4V$ سنگ زنی شده..... ۸۷
- شکل ۵-۱ موقعیت دهی نازل *MQL*: الف) روی قطعه کار، ب) در منطقه سنگزنی، ج) بصورت زاویه ای روی سنگ، د) موقعیت دهی مستقیم روی سنگ..... ۹۲
- شکل ۵-۲ موقعیت دهی نازل *MQL* در سنگزنی موافق (سمت راست) و سنگزنی مخالف (سمت چپ)..... ۹۳
- شکل ۵-۳ اثر موقعیت نازل بر عملکرد سنگزنی موافق و مخالف..... ۹۶
- ادامه شکل ۵-۳ اثر موقعیت نازل بر عملکرد سنگزنی موافق و مخالف..... ۹۷
- شکل ۵-۴ اثر سرعت میز، سرعت سنگ و موقعیت نازل بر عملکرد سنگزنی..... ۹۸
- ادامه شکل ۵-۴ اثر سرعت میز، سرعت سنگ و موقعیت نازل بر عملکرد سنگزنی..... ۹۹
- شکل ۵-۵ اثر موقعیت نازل، نرخ جریان روغن و فشار هوا بر عملکرد سنگزنی..... ۱۰۰
- شکل ۵-۶ الف) شماتیک اسپری در سنگزنی، ب) جهت‌های سرعت هوای اطراف سنگ در نزدیکی منطقه سنگزنی، ج) نتایج مدل‌سازی توزیع فشار اطراف سنگ چرخان..... ۱۰۱
- شکل ۵-۷ اثر فشار هوا، دبی روغن، و فاصله نازل از منطقه سنگزنی بر عملکرد سنگزنی..... ۱۰۲
- شکل ۵-۸ اثر فشار هوا و دبی روغن بر عملکرد سنگزنی..... ۱۰۳
- شکل ۵-۹ اثر فاصله نازل از منطقه سنگزنی بر عملکرد سنگزنی..... ۱۰۴
- شکل ۵-۱۰ شماتیک قطره تغییر شکل داده روی سطح..... ۱۰۶
- شکل ۵-۱۱ اثر اندازه و ساختار سنگ بر سطح سایش و تعداد دانه های فعال در منطقه سنگزنی..... ۱۱۱

عنوان

صفحه

- شکل ۵-۱۲ اثر اندازه قطرات بر رسوب روی سطح..... ۱۱۷
- شکل ۵-۱۳ مخروط و زاویه مؤثر اسپری در خروجی نازل تا رسیدن به جداره هدف..... ۱۱۸
- شکل ۵-۱۴ توزیع تعداد و اندازه قطرات روغن در اطراف نازل روانکاری کمینه..... ۱۱۸
- شکل ۶-۱ الف) سایش دانه های کروندوم با چسب رزین بعد از سنگزنی (بزرگنمایی ۱۷۵ برابر)، ب) شماتیک اسپری *MQL* در منطقه سنگزنی، ج) منابع روانکاری در فصل مشترک سنگ-قطعه کار..... ۱۲۲
- شکل ۶-۲ مکانیزم سایش: الف) دانه های کروندوم، ب) دانه های *SG*..... ۱۲۳
- شکل ۶-۳ سیستم تریبولوژی فرآیند سنگزنی..... ۱۲۶
- شکل ۶-۴ نیروهای مماسی اندازه گیری شده در سنگزنی توسط کروندوم با چسب سرامیکی و: الف) روغن *MQL*، ب) روغنهای حل شونده در آب، سیال برشی، خشک و جت هوا..... ۱۳۵
- ادامه شکل ۶-۴ نیروهای عمودی اندازه گیری شده در سنگزنی توسط کروندوم با چسب سرامیکی و: ج) روغن *MQL*، د) روغنهای حل شونده در آب، سیال برشی، خشک و جت هوا..... ۱۳۶
- شکل ۶-۵ نیروهای مماسی اندازه گیری شده در سنگزنی توسط کروندوم با چسب رزین و: الف) روغن *MQL*، ب) روغنهای حل شونده در آب، سیال برشی، خشک و جت هوا..... ۱۳۷
- ادامه شکل ۶-۵ نیروهای عمودی اندازه گیری شده در سنگزنی توسط کروندوم با چسب رزین و: ج) روغن *MQL*، د) روغنهای حل شونده در آب، سیال برشی، خشک و جت هوا..... ۱۳۸
- شکل ۶-۶ نیروهای مماسی اندازه گیری شده در سنگزنی توسط *SG* با چسب سرامیکی و: الف) روغن *MQL*، ب) روغنهای حل شونده در آب، سیال برشی، خشک و جت هوا..... ۱۳۹
- ادامه شکل ۶-۶ نیروهای عمودی اندازه گیری شده در سنگزنی توسط *SG* با چسب سرامیکی و: ج) روغن *MQL*، د) روغنهای حل شونده در آب، سیال برشی، خشک و جت هوا..... ۱۴۰
- شکل ۶-۷ زبری سطح عمود بر جهت سنگزنی بعد از پاس ۳۰۰ با استفاده از: الف) کروندوم با چسب سرامیکی، ب) کروندوم با چسب رزین، ج) *SG* با چسب سرامیکی..... ۱۴۱
- شکل ۶-۸ انواع مکانیزم سایش دانه و چسب..... ۱۴۲
- شکل ۶-۹ سطح سنگ قبل و بعد از پاس ۳۰۰ در سنگزنی با روغن *MQL oil* (بزرگنمایی ۱۰۰ برابر)..... ۱۴۷
- شکل ۶-۱۰ مورفولوژی سطح قطعات سنگزنی شده بعد از پاس ۳۰۰ (بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر)..... ۱۴۸
- شکل ۶-۱۱ براده های حاصل از انواع ساینده و سیال برشی در پاس ۳۰ (بزرگنمایی ۲۰۰ برابر)..... ۱۴۹
- شکل ۷-۱ دیسک الماس جهت تیز کردن سنگ *CBN*..... ۱۵۲
- شکل ۷-۲ نیروهای مماسی اندازه گیری شده در سنگزنی توسط سنگ با تخلخل پایین و: الف) روغن *MQL*، ب) روغنهای حل شونده در آب، سیال برشی، خشک و جت هوا..... ۱۵۶
- ادامه شکل ۷-۲ نیروهای عمودی اندازه گیری شده در سنگزنی توسط سنگ با تخلخل پایین و: ج) روغن *MQL*، د) روغنهای حل شونده در آب، سیال برشی، خشک و جت هوا..... ۱۵۷
- شکل ۷-۳ نیروهای مماسی اندازه گیری شده در سنگزنی توسط سنگ با تخلخل بالا و: الف) روغن *MQL*، ب) روغنهای حل شونده در آب، سیال برشی، خشک و جت هوا..... ۱۵۸

- شکل ۳-۷ نیروهای عمودی اندازه گیری شده در سنگزنی توسط سنگ با تخلخل بالا و: (ج) روغن *MQL* ، (د) روغنهای حل شونده در آب، سیال برشی، خشک و جت هوا..... ۱۵۹
- شکل ۴-۷ نیروهای مماسی اندازه گیری شده در سنگزنی توسط سنگ دانه درشت و: (الف) روغن *MQL* ، (ب) روغنهای حل شونده در آب، سیال برشی، خشک و جت هوا..... ۱۶۰
- شکل ۴-۷ نیروهای عمودی اندازه گیری شده در سنگزنی توسط سنگ دانه درشت و: (ج) روغن *MQL* ، (د) روغنهای حل شونده در آب، سیال برشی، خشک و جت هوا..... ۱۶۱
- شکل ۵-۷ نیروهای مماسی اندازه گیری شده در سنگزنی توسط سنگ *CBN* و: (الف) روغن *MQL* ، (ب) روغنهای حل شونده در آب، سیال برشی، خشک و جت هوا..... ۱۶۲
- شکل ۵-۷ نیروهای عمودی اندازه گیری شده در سنگزنی توسط سنگ *CBN* و: (ج) روغن *MQL* ، (د) روغنهای حل شونده در آب، سیال برشی، خشک و جت هوا..... ۱۶۳
- شکل ۶-۷ سطح سنگ قبل و بعد از پاس ۳۰۰ در سنگزنی با روغن *MQL oil 1* (بزرگنمایی ۱۰۰ برابر)..... ۱۶۶
- شکل ۷-۷ زبری سطح عمود بر جهت سنگزنی بعد از پاس ۳۰۰ با استفاده از: (الف) سنگ تخلخل بالا، (ب) سنگ دانه درشت، (ج) سنگ *CBN*..... ۱۶۷
- شکل ۸-۷ مورفولوژی سطح قطعات سنگزنی شده بعد از پاس ۳۰۰ (بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر)..... ۱۶۸
- شکل ۹-۷ براده های حاصل از انواع ساینده و سیال برشی در پاس ۳۰ (بزرگنمایی ۲۰۰ برابر)..... ۱۶۹
- شکل ۸-۱ طراحی آزمایش ها برای سیستم سنگ زنی با روانکاری کمینه..... ۱۷۱
- شکل ۸-۲ اثر فشار هوا، دبی روغن، و فاصله نازل از منطقه سنگزنی بر عملکرد سنگزنی..... ۱۷۷
- شکل ۸-۳ نمودار اثرات متقابل فاکتورهای اصلی بر نیروی سنگزنی با حداقل مقدار روانکار..... ۱۷۸
- شکل ۸-۴ نمودار اثرات متقابل فاکتورهای اصلی بر زبری سطح سنگزنی با حداقل مقدار روانکار..... ۱۷۸
- شکل ۸-۵ اثر نوع سنگ و خنک کار/روانکار بر نیروی مماسی سنگزنی..... ۱۸۲
- شکل ۸-۶ اثر نوع سنگ و خنک کار/روانکار بر زبری سطح قطعه کار در فرآیند سنگزنی..... ۱۸۲
- شکل ۸-۷ نمودار تغییرات نیروی مماسی سنگزنی در مقابل نرخ براده برداری با استفاده از سنگهای مختلف..... ۱۸۳
- شکل ۸-۸ نمودار درصد کاهش نیروی سنگزنی *MQL* نسبت به سنگزنی خشک و سیال برشی..... ۱۸۴
- شکل ۸-۹ نمودار درصد کاهش زبری سطح فرآیند سنگزنی *MQL* نسبت به سنگزنی خشک و سیال برشی..... ۱۸۵
- شکل ۸-۱۰ مقایسه نیروی مماسی پیش بینی شده توسط مدل رگرسیون و مقادیر اندازه گیری شده..... ۱۸۷
- شکل ۸-۱۱ مقایسه زبری سطح پیش بینی شده توسط مدل رگرسیون و مقادیر اندازه گیری شده..... ۱۸۸
- شکل ۸-۱۲ نازل *MQL* موضع دهی شده نزدیک سطح سنگ چرخان..... ۱۸۸
- شکل ۸-۱۳ انرژی مخصوص سنگ زنی برای انواع سنگها و محیطهای خنک کار/روانکار..... ۱۹۱
- شکل ۸-۱۴ راندمان سنگ زنی برای انواع سنگها و محیطهای خنک کار/روانکار..... ۱۹۲
- شکل ۸-۱۵ نمودار درصد افزایش راندمان سنگ زنی با روانکاری کمینه با استفاده از روغن نسبت به سنگ زنی خشک و سیال برشی..... ۱۹۲

عنوان

صفحه

شکل ۸-۱۶ نیروی عمودی سنگ زنی در مقابل نیروی مماسی.....	۱۹۴
شکل ۸-۱۷ تعیین آستانه سوختگی و عدم سوختگی سطح قطعه کار.....	۱۹۵
شکل ۸-۱۸ نمونه‌هایی از سوختگی و عدم سوختگی سطح در سنگ زنی توسط کروندوم با چسب رزین.....	۱۹۶
شکل ۹-۱ هندسه تماس سنگ و قطعه کار.....	۲۰۰
شکل ۹-۲ فرآیند براده برداری و توزیع شار حرارتی در منطقه برای سنگزنی موافق.....	۲۰۱
شکل ۹-۳ شماتیک تقسیم شار حرارتی در منطقه تماس سنگ و قطعه کار.....	۲۰۲
شکل ۹-۴ دیاگرام تقسیم شار حرارتی در فرآیند سنگزنی.....	۲۰۲
شکل ۹-۵ مکانیزم براده برداری و انرژی گرمایی وارد به قطعه کار از فرآیندهای برش و اصطکاک در سطح تماس سنگ/قطعه کار.....	۲۰۵
شکل ۹-۶ مدل تقسیم شار حرارتی در تماس دانه و قطعه کار.....	۲۰۹
شکل ۹-۷ تغییرات سطح سایش دانه با افزایش نیروی مماسی.....	۲۰۹
شکل ۹-۸ مدل تقسیم شار حرارتی در تماس دانه و قطعه کار.....	۲۱۱
شکل ۹-۹ جت اسپری برخورد کننده روی جداره داغ.....	۲۱۵
شکل ۹-۱۰ مدل منبع حرارتی متحرک با در نظر گرفتن اثر جابجایی سیال در خارج منطقه سنگزنی.....	۲۱۷
شکل ۹-۱۱ تغییرات ضریب انتقال حرارت.....	۲۱۹
شکل ۹-۱۲ انواع اتصالات سر ترموکوپل.....	۲۲۴
شکل ۹-۱۳ زمان پاسخ ترموکوپل های پوشش دار.....	۲۲۵
شکل ۹-۱۴ شماتیک روش اندازه گیری و مدلسازی دما هنگام سنگزنی.....	۲۲۵
شکل ۹-۱۵ نمونه ترموکوپل سنگزنی شده در پاس نهایی.....	۲۲۶
شکل ۹-۱۶ حداکثر افزایش دما در عمق های مختلف زیر سطح برای سنگ Al_2O_3	۲۲۹
شکل ۹-۱۷ حداکثر افزایش دما در عمق های مختلف زیر سطح برای سنگ CBN	۲۲۹
شکل ۹-۱۸ مقایسه دمای سطح سنگزنی با سنگ Al_2O_3 و شرایط مختلف خنک کاری.....	۲۳۰
شکل ۹-۱۹ مقایسه دمای سطح سنگزنی با سنگ CBN و شرایط مختلف خنک کاری.....	۲۳۰
شکل ۹-۲۰ دما در عمق های مختلف در سنگزنی با سنگ Al_2O_3 و شرایط مختلف خنک کاری.....	۲۳۱
شکل ۹-۲۱ مقایسه توزیع دمای سطح قطعه کار محاسبه شده از مدل با نتایج تجربی در سنگزنی خشک.....	۲۳۷
شکل ۹-۲۲ مقایسه توزیع دمای سطح قطعه کار محاسبه شده از مدل با نتایج تجربی در سنگزنی با سیال برشی.....	۲۳۷
شکل ۹-۲۳ مقایسه توزیع دمای سطح قطعه کار محاسبه شده از مدل با نتایج تجربی در سنگزنی تحت شرایط $MQL(3)$	۲۳۸

عنوان

صفحه

- شکل ۹-۲۴ مقایسه توزیع دمای سطح قطعه کار محاسبه شده از مدل با نتایج تجربی در سنگزنی تحت شرایط $MQL(5)$ ۲۳۸
- شکل ۹-۲۵ توزیع دمای مدلسازی سطح قطعه کار در سنگزنی با سنگ Al_2O_3 و شرایط مختلف خنک کاری..... ۲۴۰
- شکل ۹-۲۶ اثر خنک کاری در لبه ورودی بر افزایش دمای سطح قطعه کار..... ۲۴۰
- شکل ۹-۲۷ اثر خنک کاری در لبه خروجی بر افزایش دمای سطح قطعه کار..... ۲۴۱
- شکل ۹-۲۸ اثر دمای اولیه سیال بر خنک کاری در لبه خروجی..... ۲۴۱
- شکل ۹-۲۹ اثر خنک کاری در منطقه تماس بر افزایش دمای سطح قطعه کار..... ۲۴۲
- شکل ۹-۳۰ اثر دمای اولیه سیال بر خنک کاری منطقه تماس در مقادیر پایین ضریب انتقال حرارت جابجایی..... ۲۴۲
- شکل ۹-۳۱ اثر دمای اولیه سیال بر خنک کاری منطقه تماس در مقادیر بالای ضریب انتقال حرارت جابجایی..... ۲۴۳
- شکل ۹-۳۲ اثر ترکیبی خنک کاری لبه ورودی، منطقه تماس و لبه خروجی بر افزایش دمای سطح قطعه کار..... ۲۴۴
- شکل ۹-۳۳ موقعیت دهی نازل MQL در سنگزنی موافق و مخالف..... ۲۴۴
- شکل ۹-۳۴ اثر توزیع شار حرارتی در منطقه سنگزنی بر دمای سطح قطعه کار..... ۲۴۵
- شکل ۹-۳۵ نمودار توزیع دمای مدل در عمق های مختلف زیر سطح قطعه کار در سنگزنی خشک..... ۲۴۶
- شکل ۹-۳۶ نمودار توزیع دمای مدل در عمق های مختلف زیر سطح قطعه کار در سنگزنی با $MQL(3)$ ۲۴۷
- شکل ۹-۳۷ حداکثر افزایش دمای محاسبه شده توسط مدل در عمق های مختلف زیر سطح سنگزنی برای سنگ Al_2O_3 ۲۴۷
- شکل ۹-۳۸ اثر پارامترهای مختلف بر ضریب انتقال حرارت سیال همگن MQL ۲۴۸