



مطالعه تجربی و مدل سازی تفاضل محدود توزیع درجه حرارت ابزار برش در فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی

ناصر عباسی، محمدرضا رازفر، محسن خواجهزاده*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۷ دی ۱۳۹۵
بازنگری: ۲۴ اسفند ۱۳۹۵
پذیرش: ۲۷ فروردین ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۳ اردیبهشت ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی
روش تفاضل محدود
توزیع درجه حرارت
ترموکوپل
فولاد سخت کاری شده

چکیده: مقاله حاضر به حل عددی و مطالعه تجربی توزیع درجه حرارت در فرآیند تراشکاری متعامد به کمک ارتعاشات فراصوتی اختصاص یافته است. در حل عددی، از روش تفاضل محدود برای پیش‌بینی توزیع درجه حرارت در ابزار برش استفاده شده و سپس نتایج حل عددی، با مجموعه‌ای از آزمون‌های تجربی صحنه‌سنجی شده است. برای حصول به این مقصود، ابتدا یک مدل تفاضل محدود پیش‌بینی درجه حرارت در فرآیند برش سنتی توسعه داده شد و سپس از نتایج آن برای ایجاد یک مدل توسعه یافته در فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی، استفاده شد. در نهایت نتایج حل عددی، با نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی اندازه‌گیری درجه حرارت ابزار برش در حین فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات، صحنه‌گذاری شد. همچنین با استفاده از نتایج حل عددی، اثر متغیرهای ماشین‌کاری و ارتعاشی شامل سرعت برش، پیشروی و دامنه ارتعاشات بر روی توزیع درجه حرارت ابزار برش مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، در فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی فولاد سخت‌کاری شده ۴۱۴۰ با سختی HRC ۵۰، به ازای پیشروی ۰/۱۱ میلی‌متر بر دور، سرعت برش ۳۰ متر بر دقیقه و دامنه ارتعاش ۱۰ میکرومتر، حداکثر درجه حرارت ابزار برش نسبت به تراشکاری سنتی ۳۷ درصد کاهش می‌یابد.

۱- مقدمه

تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی، حرکت برش در فرآیند تراشکاری سنتی را با یک حرکت ارتعاشی با دامنه پائین و فرکانس بالا، ترکیب می‌کند. چنانچه ارتعاشات در یک راستا اعمال شوند، به فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی یک‌بعدی گفته می‌شود که اصول آن در شکل ۱ نشان داده شده است.

تاکنون بر اساس تحقیقات صورت‌گرفته، مزایایی چون افزایش طول عمر ابزار، بهبود صافی سطح و کاهش نیروهای برش برای این تکنولوژی ذکر شده و دلیل اصلی این مزایا، به جدایش متناوب سطح براده ابزار از قطعه در حال برش، نسبت داده شده است [۱].

امروزه اندازه‌گیری دما و توانایی پیش‌بینی آن به یکی از مسائل با اهمیت در فرآیندهای ماشین‌کاری، تبدیل شده است [۲]. دلیل این اهمیت از آنجا ناشی می‌شود که حرارت تولیدشده در جریان برش فلز، به شدت بر روی عمر، فرسایش و شکست ابزار و همچنین بر بزرگی تنش‌های پسماند ماشین‌کاری اثر می‌گذارد. از طرف دیگر، انتظار می‌رود تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی به دلیل بهبود شرایط خنک‌کاری و توانمندی در کاهش ماکزیمم دمای نوک ابزار، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای قابلیت کاهش فرسایش ابزار را نیز داشته باشد [۲]. درعین حال بایستی به این مسأله نیز توجه داشت که اضافه

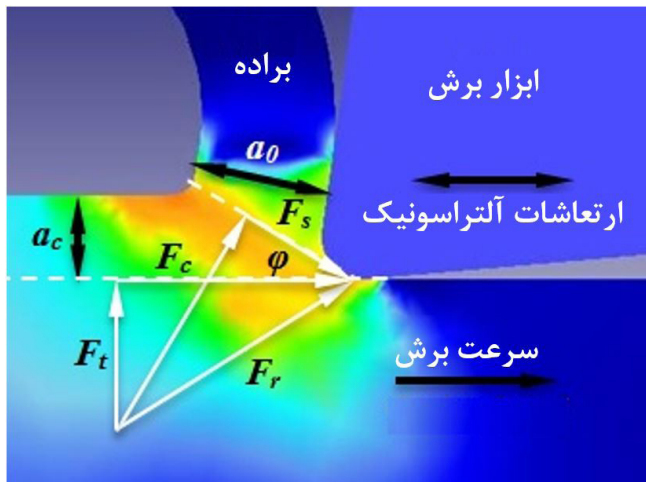


Fig. 1. A scheme of relative movements of workpiece and cutting tool in ID UAT

شکل ۱: شماتیک جابجایی‌های قطعه و ابزار در تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی یک‌بعدی.

کردن ارتعاشات فراصوتی، به دلیل اثرات احتمالی آن بر مکانیسم‌های تولید حرارت در برش فلزات و یا ایجاد منابع حرارتی جدید، می‌تواند بسته به شرایط و سطح پارامترهای ماشین‌کاری، در نهایت منجر به بهبود و یا افت توانمندی‌های ماشین‌کاری هیبریدی بشود.

اولین تحقیقات انجام‌شده در زمینه درجه حرارت در برش فلزات، به

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mo.khajehzadeh@aut.ac.ir

نتایج آن، اثر سرعت و عمق برش را بر روی نیروهای ماشین کاری و توزیع درجه حرارت ابزار در حین فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی مطالعه کردند. در تحقیق دیگری، پاتیل و همکارانش [۱۷]، اثر ماشین کاری به کمک ارتعاشات فراصوتی را به صورت دوبعدی برای آلیاژ تیتانیوم در نرم افزار DEFORM شبیه سازی کردند. نتایج شبیه سازی حاکی از کاهش ۴۸ درصدی نیروها و کاهش ۴۰ تا ۴۵ درصدی درجه حرارت فرآیند نسبت به فرآیند ماشین کاری پیوسته داشت. ساکر و همکارانش [۱۸] تحلیل المان محدود دوبعدی برای ماشین کاری آلیاژ تیتانیوم ارائه کردند. در این تحقیق نیروها و درجه حرارت های به دست آمده از شبیه سازی تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی با نتایج تحقیقات پیشین مقایسه شده است. در آخرین پژوهش های انجام شده لطفی و همکاران [۱۹]، مدل المان محدودی برای بررسی قابلیت ماشین کاری تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی قطعه کار استیل ۳۰۴ ارائه کردند. در این تحقیق، نیروها و درجه حرارت به دست آمده از شبیه سازی این فرآیند با نتایج شبیه سازی شده تراشکاری پیوسته مقایسه شده و زاویه برش و ضخامت براده به صورت تجربی اندازه گیری و با نتایج مدل ارائه شده صحت گذاری گردید.

با وجود تحقیقات صورت گرفته، هنوز جنبه های مختلف ترمومکانیکی این فرآیند هنوز به روشنی مشخص نشده و بنابراین تحقیقات بیشتری در راستای مطالعه تأثیر پارامترهای ماشین کاری و ارتعاشی به ویژه برای مطالعه تأثیر سرعت برش و دامنه ارتعاش بر درجه حرارت ابزار مورد نیاز است. از طرف دیگر مطالعه تجربی جنبه های مختلف این تغییرات مستلزم صرف زمان و هزینه بالایی بوده و بنابراین ضروری است که مدل سازی فرآیند چه به صورت عددی و چه تحلیلی، مورد توجه محققین قرار بگیرد.

استفاده از روش های تحلیلی در صورت وجود مسائل غیرخطی در هندسه، شرایط مرزی و رفتار مکانیکی جنس قطعه کار در برش فلزات با محدودیت جدی روبرو است. در عین حال با استفاده از روش های عددی مانند تفاضل محدود، راحت تر می توان این گونه مسائل را مورد مطالعه قرار داد.

حل عددی به روش المان محدود به شدت به مشخصه ها و ثوابت معادله ساختاری ماده وابسته است. تعیین مقدار دقیق این ثوابت در فرآیند ماشین کاری که در بردارنده رفتارهای غیرخطی و نرخ کرنش های بالائی است با دشواری و خطای زیادی همراه بوده و دقت حل را به شدت تحت تأثیر قرار می دهد. خطای به وجود آمده در این حالت در صورت استفاده از روش تفاضل محدود تا حدودی کاهش می یابد [۶].

با در نظر گرفتن موارد فوق، مقاله حاضر به مطالعه عددی توزیع درجه حرارت در فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی، با استفاده از روش تفاضل محدود و کد نویسی در نرم افزار متلب اختصاص یافته است.

۲- توسعه مدل تئوری

مقاله حاضر به مطالعه توزیع درجه حرارت در فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی با استفاده از روش تفاضل محدود اختصاص یافته است.

مطالعات تجربی تیلور در ۱۹۰۷ میلادی برمی گردد. پس از آن تریگر و چائو [۳] تلاش کردند که یک مدل تحلیلی را در زمینه درجه حرارت در برش فلز ارائه دهند. روش تفاضل محدود در این زمینه نیز، اولین بار توسط یوسای و همکاران [۴] و تلاستی و همکاران [۵] مورد استفاده قرار گرفت. در پژوهشی دیگر، استرانکوفسکی و مون [۶] از شبیه سازی المان محدود برای پیش بینی دمای برش فلزات استفاده کردند.

همه تحقیقات اشاره شده در بالا، مربوط به مطالعه توزیع درجه حرارت در فرآیند ماشین کاری پیوسته می باشند. در سال ۱۹۹۲، استفنسون و علی [۷] اولین تلاش ها را جهت تعیین درجه حرارت فرآیند برش منقطع فلزات با فرض ثابت بودن ضخامت براده، انجام دادند. آلتینتاس و لازوگلو [۸] دمای برش فلز را در حالت پایدار برای ابزار و براده مورد مطالعه قرارداد و سپس با استفاده از مدل توسعه یافته، درجه حرارت حالت گذرا در ماشین کاری پیوسته و منقطع را بررسی کردند.

موارد اشاره شده در بالا مربوط به تولید حرارت در فرآیند ماشین کاری سنتی (بدون اعمال ارتعاشات) می باشند. از سوی دیگر، اندازه گیری تجربی درجه حرارت دمای برش فلز در فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی نشان می دهد که منابع تولید حرارت و همچنین توزیع درجه حرارت در این فرآیند تا حدود زیادی با فرآیند ماشین کاری سنتی متفاوت است. تاکنون، تئوری های مختلفی برای تشریح این پدیده ارائه شده است. برخی محققین معتقدند اعمال ارتعاشات فراصوتی، نحوه انتقال حرارت در سطح براده ابزار را تغییر می دهد [۹]. برخی دیگر بر این باور هستند که اصولاً اعمال ارتعاشات آلتراسونیک، رژیم اصطکاک بر سطح براده ابزار را تغییر داده و این امر باعث کاهش مقدار حرارت تولید شده می شود [۱۰]. در این بین اما محققینی هستند که مدت زمان کوتاه تر برای درگیری بین ابزار برش و قطعه کار در فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی را عامل اصلی کاهش درجه حرارت ابزار پیشنهاد می کنند [۱].

تحلیل المان محدود فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی، اولین بار توسط میتراوانوف و همکارانش ارائه شد [۱۱ و ۱۲]؛ آن ها از آلیاژ پایه نیکل اینکونل ۷۱۸ به عنوان قطعه کار استفاده کردند و کاهش نیروها و درجه حرارت برش را گزارش نمودند. همین محققین در پژوهشی دیگر [۱۳]، تحلیل المان محدود را در حالت سه بعدی، برای مطالعه ترمومکانیکی فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی ارائه کردند. امینی و همکاران [۱۴] از اینکونل ۷۳۸ به عنوان قطعه کار استفاده کرده و شبیه سازی المان محدود فرآیند ماشین کاری هیبریدی را به کمک نرم افزار سوپر فُرم انجام دادند. اُورکاش و کاتینو [۱۵] از شبیه سازی المان محدود فرآیند تراشکاری سنتی به منظور توسعه مدلی برای بررسی درجه حرارت برش فلز در فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی استفاده کردند؛ این محققین در ادامه از نتایج به دست آمده برای تشریح مکانیسم کاهش فرسایش ابزار در فرآیند هیبریدی استفاده کردند. در دیگر پژوهش صورت گرفته در این راستا، محمد و همکارانش [۱۶] یک مدل المان محدود را ارائه کردند و با استفاده از

۲-۱- سینماتیک فرایند تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی
مدل سازی سینماتیکی فرایند تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک
با مدل سازی حرکت ارتعاشی ابزار شروع می شود. فرض بر این است که
حرکت اصلی برش در راستای محور x بوده، محور y راستای حرکت پیشروی
و محور z در راستای عمق برش باشد، شکل ۲.

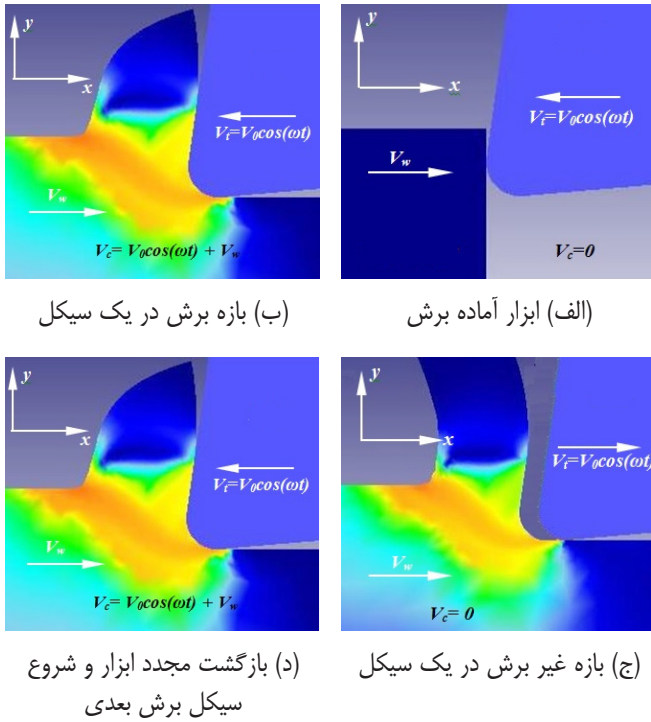


Fig. 2. Idealized 1D vibration-assisted turning
شکل ۲: مدل ایده آل تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی

بنابراین در طول فرایند تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک، ابزار
در طول محور x حرکت ارتعاشی دارد و این حرکت ارتعاشی با حرکت اصلی
برش قطعه کار ترکیب می شود. با فرض اینکه سرعت برش قطعه کار V_w
باشد، می توان نوشت:

$$x_t(t) = a \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$V_c(t) = V_t(t) + V_w = \omega a \cos(\omega t) + V_w \quad (2)$$

در روابط فوق $x_t(t)$ و $V_t(t)$ به ترتیب نشان دهنده موقعیت و سرعت
لحظه ای ابزار برش در لحظه t ، دامنه ارتعاش ابزار و $\omega = 2\pi f$ فرکانس
زاویه ای حرکت ارتعاشی ابزار می باشد. همچنین $V_c(t)$ نشان دهنده سرعت
برش در هر لحظه است که از ترکیب حرکت خطی قطعه کار و حرکت
ارتعاشی ابزار به دست می آید.

بر اساس معادله (۲)، چنانچه فرکانس حرکت ارتعاشی ابزار ثابت باشد،
یک مقدار بحرانی برای سرعت حرکت برش قطعه کار وجود دارد که در
مقادیر کوچک تر از آن نوعی جدایش متناوب بین ابزار برش و قطعه کار

برای حصول به این مقصود مراحل زیر در توسعه مدل تئوری دنبال شده
است:

(الف) توسعه مدل تفاضل محدود برای فرایند تراشکاری سنتی (بدون
ارتعاشات فراصوتی)، با هدف به دست آوردن درجه حرارت حالت پایدار در
فرایند ماشین کاری.

(ب) تعیین ثابت زمانی سیستم با هدف پیش بینی تغییرات دمای حالت
گذرا در سطح براده و ابزار.

(ج) در تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی، هر سیکل ارتعاشی
مشمول بر زمان های برشی و غیر برشی است. در حین زمان برش، درجه
حرارت در نواحی برش اولیه و ثانویه افزایش می یابد اما در زمان های غیر
برشی، درجه حرارت به دلیل انتقال حرارت همرفت با محیط اطراف، کاهش
می یابد.

(د) زمان برشی در هر سیکل برش، به چندین فاصله زمانی کوچک تر
تقسیم می شود؛ هر یک از این فواصل زمانی کوچک، به عنوان یک فرایند
تراش با سرعت برش ثابت اما متفاوت با سرعت برش بازه زمانی قبل از
آن در نظر گرفته می شود. بنابراین ضروری است که رابطه ای برای محاسبه
سرعت برش در فرایند تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک توسعه داده
شود تا در هر بازه زمانی بتوان مقداری متوسط برای سرعت برش محاسبه
کرد. با داشتن سرعت در هر بازه زمانی کوچک و با استفاده از روش تفاضل
محدود، درجه حرارت حالت پایدار و ثابت زمانی برای آن بازه زمانی کوچک
به راحتی قابل محاسبه است.

(ح) مسئله انتقال حرارت در این فرایند، یک سیستم مرتبه اول می باشد.
لذا می توان برای رسیدن به پاسخ گذرای سیستم، تحلیل های تکه ای برای
بازه های زمانی کوچک برش را با هم ترکیب کرد تا نمودار تغییرات زمانی
درجه حرارت در کل بازه زمانی فرایند ماشین کاری هیبریدی، ایجاد گردد.
(ط) در طول بازه زمانی برش در هر سیکل، افزایش دمای برش مطابق
با گام (ح) محاسبه شده و سپس در طول مدت زمان جدایش، درجه حرارت
ناحیه برش به دلیل همرفت با محیط اطراف کاهش می یابد. در این پژوهش
منحنی خنک شدن در هوا، با استفاده از داده های تجربی درجه حرارت در
فرایند تراشکاری سنتی استخراج شده است.

(ی) پس از اتمام هر سیکل خنک کاری، ابزار برش به درجه حرارت اولیه
خود (یعنی) نمی رسد و فرض می شود که ابزار، سیکل برش بعدی را با درجه
حرارتی بالاتر از درجه حرارت اولیه شروع می کند؛ بنابراین دمای اولیه در هر
مرحله برش نسبت به مرحله قبل از آن، به طور پیوسته افزایش می یابد. .
در نهایت نتایج مدل با استفاده از نتایج تجربی اندازه گیری درجه حرارت
ابزار با استفاده از ترموکوپل جای گذاری شده در ابزار در ماشین کاری فولاد
سخت کاری شده ۴۱۴۰ در سطوح مختلف برای سرعت برش (۰/۵ و ۰/۷۵
متر بر ثانیه) و دامنه ارتعاش (۰، ۸ و ۱۰ میکرومتر) و به ازای پیشروی ۰/۱۱
میلی متر بر دور صحه گذاری شد.

دوم برش بعد از مدت زمان جدایش $t_{ret.} + t_{dwell}$ شروع شده و برش تا آخر سیکل ادامه می‌یابد.

اگر $x_{dwell} < 0$ باشد، قطعه کار با ابزار درگیر شده و برای پیدا کردن زمان جدایش t_s ، بایستی معادله غیرخطی زیر حل شود:

$$V_w t_s = \int_{t_{up}}^{t_{up} + t_s} a \omega \cos(\omega t) dt \quad (۸)$$

تقریباً در تمامی پژوهش‌های صورت گرفته پارامترهای ارتعاشی و سرعت خطی قطعه کار به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که فقط یک جدایش در هر سیکل برشی اتفاق بیفتند و بنابراین معادله (۸) حاکم باشد. اکنون با محاسبه زمان جدایش (t_s) ، مدل سرعت برشی در فرایند تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک، به کمک معادله (۹) بیان می‌شود. همان‌طور که در این معادله نشان داده شده، زمانی که ابزار از قطعه جدا می‌شود، برشی صورت نگرفته و بنابراین سرعت برشی صفر می‌شود:

$$V_c(\tau) = \begin{cases} a\omega \cos(\omega\tau) + V_w & nT < \tau < nT + t_{up} \\ 0 & nT + t_{up} < \tau < nT + t_{up} + t_s \\ a\omega \cos(\omega\tau) + V_w & nT + t_{up} + t_s < \tau < (n+1)T \end{cases} \quad (۹)$$

بر اساس معادله (۹)، یک زیر برنامه در نرم‌افزار متلب تهیه شده که زمان درگیری ابزار $(t'_{up}$ و $t_{up})$ را محاسبه کرده و سپس با داشتن فرکانس ارتعاشات آلتراسونیک، زمان جدایش ابزار و قطعه (t_s) را محاسبه می‌کند. زمان جدایش را می‌توان بر اساس سرعت خطی قطعه کار و پارامترهای ارتعاشی تفسیر کرد، شکل ۳.

در شکل ۳ (الف)، سرعت برش در طول یک سیکل را در حالتی که فرکانس ارتعاش ابزار ۳۱/۲۵ kHz کیلوهرتز، دامنه $8 \mu\text{m}$ و سرعت حرکت خطی قطعه کار ۰/۷۵، ۰/۵ و ۱ متر بر ثانیه تنظیم شده، نشان می‌دهد. در این حالت، مدت زمان جدایش تابعی از سرعت خطی قطعه کار بوده و با افزایش آن، زمان جدایش کاهش می‌یابد.

شکل ۳ (ب)، سرعت برش در طول یک سیکل را در حالتی که فرکانس ارتعاش ابزار ۳۱/۲۵ kHz کیلوهرتز، سرعت حرکت خطی قطعه کار ۱ m/s و دامنه ارتعاش ۸، ۱۰ و ۱۲ میکرومتر تنظیم شده، نشان می‌دهد. در این حالت، مدت زمان جدایش تابعی از دامنه ارتعاش بوده و با افزایش آن، زمان جدایش بیشتر می‌شود.

۲-۲- تولید حرارت در تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک

در برش متعامد، حرارت در دو ناحیه اصلی تولید می‌شود: ناحیه برش اولیه و ثانویه که در شکل ۴ نشان داده شده است.

اگر ابزار کاملاً تیز نباشد منبع حرارتی سومی نیز به دلیل اصطکاک بین سطح آزاد ابزار و سطح ماشین‌کاری شده ایجاد می‌شود. این منابع حرارتی در تراشکاری هیبریدی نیز ممکن است وجود داشته باشد. علاوه بر منابع حرارتی یادشده در بالا، در فرایند تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک،

در حین برش اتفاق خواهد افتاد؛ بنابراین، مقدار سرعت بحرانی قطعه کار، به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$V_{w, crit.} = 2\pi f a \quad (۳)$$

در رابطه فوق چنانچه $V_w < V_{w, crit.}$ باشد، نوعی جدایش متناوب بین ابزار و قطعه کار اتفاق می‌افتد و در صورتی که $V_w > V_{w, crit.}$ باشد، این جدایش وجود نخواهد داشت. در تحقیقات صورت گرفته عمدتاً مزایایی که به فرایند تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک نسبت می‌دهند را به همین جدایش متناوب نسبت می‌دهند. در شکل ۲ (الف)، سطح براده ابزار در تماس با قطعه قرار گرفته و برش فلز در آستانه شروع شدن قرار گرفته است. در بخش (ب) از این تصویر، ابزار برش در حال ماشین‌کاری است و سرعت برش قطعه از جمع سرعت حرکت ارتعاشی ابزار و حرکت خطی قطعه کار به دست می‌آید. مدت زمان اولین بازه برش در یک سیکل با t_{up} نمایش داده می‌شود. در بخش (ج) از تصویر، ابزار رو به عقب حرکت و بنابراین از درگیری با قطعه کار خارج شده است. مدت زمان بازه غیر برشی در یک سیکل با t_s نمایش داده می‌شود. در بخش (د) از تصویر، ابزار مجدداً در آستانه تماس با قطعه و شروع سیکل دوم برش قرار گرفته است. اگر مدت زمان کل سیکل T در نظر گرفته شود، برای محاسبه زمان دومین بازه برش (t'_{up}) می‌توان رابطه زیر استفاده کرد:

$$t'_{up} = T - (t_s + t_{up}) \quad (۴)$$

در طول فرایند تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک، مدت زمان جدایش و برش بایستی بر اساس پارامترهای ارتعاشی (فرکانس و دامنه ارتعاش) و سرعت حرکت خطی قطعه کار، محاسبه شوند. قطعه کار در یک مسیر خطی و با سرعت ثابت حرکت می‌کند. لذا، فاصله‌ای که قطعه کار تا رسیدن به ابزار طی می‌کند، به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\Delta x_{wp} = V_w t_{ret.} \quad (۵)$$

که در آن $t_{ret.}$ مدت زمان حرکت رو به عقب ابزار است. از طرف دیگر، ابزار برش به صورت متناوب در محدوده $+a$ تا $-a$ جابجا می‌شود. لذا مسافتی که ابزار در کل بازه زمانی حرکت رو به عقب طی می‌کند، برابر $2a$ خواهد بود. بنابراین، مسافتی که قطعه کار باید برای رسیدن به ابزار طی کند، برابر است با:

$$x_{dwell} = 2a - \Delta x_{wp} \quad (۶)$$

در معادله (۶) مادامی که $x_{dwell} > 0$ باشد، قطعه کار هنوز با ابزار درگیر نشده و برای پیدا کردن زمان لازم برای شروع مجدد درگیری t_{dwell} بایستی معادله غیرخطی زیر را حل کرد:

$$x_{dwell} = V_w t_{dwell} + \int_{t_{up} + t_{ret.}}^{t_{up} + t_{ret.} + t_{dwell}} a \omega \cos(\omega t) dt \quad (۷)$$

اگر برای این معادله در بازه $(0, T/۴)$ ریشه‌ای وجود داشته باشد، سیکل

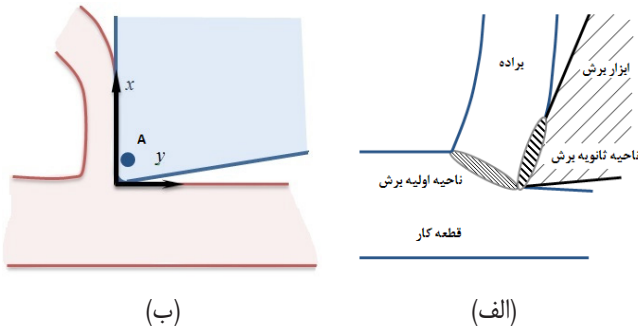


Fig. 4. (a) Primary and secondary shear zone (b) maximum temperature occurs some distance along the tool face (A)

شکل ۴: (الف) نواحی برش اولیه و ثانویه، (ب) نقطه A موقعیت تقریبی ماکزیمم درجه حرارت در سطح براده.

$$\dot{q}_s = F_s V_s = \frac{\tau_s a_c V_c \cos(\alpha_n)}{\cos(\varphi_n - \alpha_n) \sin(\varphi_n)} \quad (W) \quad (10)$$

که در آن F_s ، V_s ، V_c و a_c به ترتیب مؤلفه نیروی برش در صفحه برش، مؤلفه سرعت برش در صفحه برشی، سرعت برش و ضخامت براده تغییر شکل نیافته می‌باشند. همچنین φ_n زاویه صفحه برش نرمال و α_n زاویه براده نرمال می‌باشد.

رفتار جنس قطعه کار نیز با استفاده از مدل جانسون کوک، مدل سازی شده است [۱۴]:

$$\tau_s = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(A + B \left(\frac{\dot{\gamma}}{\sqrt{3}} \right)^n \right) \left(I + C \ln \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right) \left(I - \left(\frac{T_w - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right) \quad (11)$$

در رابطه فوق τ_s ، $\dot{\gamma}$ و $\dot{\gamma}_0$ به ترتیب تنش برشی ماده برحسب معیار تسلیم فون میسز، کرنش برشی پلاستیک معادل، نرخ کرنش برشی و نرخ کرنش برشی مرجع می‌باشند. همچنین T_w ، T_r و T_m به ترتیب نشان‌دهنده درجه حرارت در ناحیه اولیه برش، دمای محیط آزمایش و نقطه ذوب قطعه کار هستند.

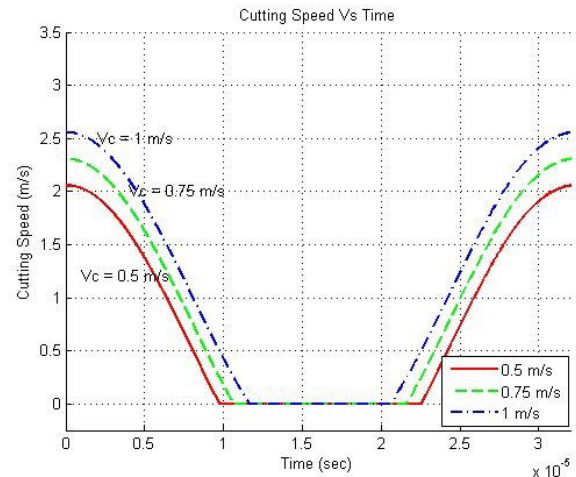
در برش متعامد (سنتی و هیبریدی)، بین کرنش برشی ($\dot{\gamma}$)، زاویه براده نرمال (α_n) و زاویه صفحه برش نرمال (φ_n) رابطه زیر برقرار است [۲۰]:

$$\dot{\gamma} = \frac{\cos \alpha_n}{\sin \varphi_n \cos(\varphi_n - \alpha_n)} \quad (12)$$

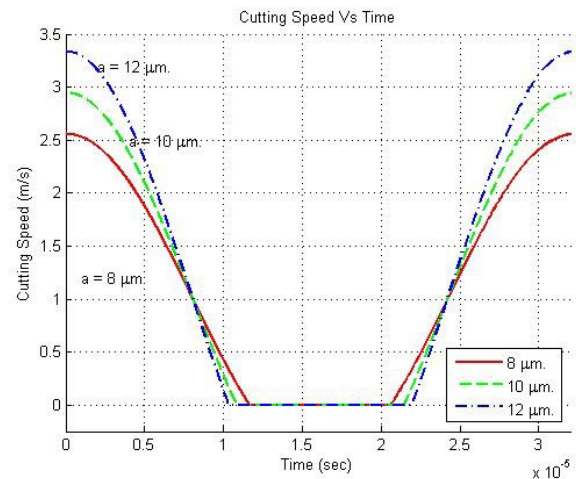
همچنین نرخ کرنش برشی نیز در برش متعامد از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۰]:

$$\dot{\gamma} = \frac{\cos \alpha_n}{\cos(\varphi_n - \alpha_n)} \cdot \frac{V_c}{t_{s,z}} \quad (13)$$

که در آن کمیت $t_{s,z}$ نشان‌دهنده ضخامت صفحه برش بوده و مقدار متوسطی برابر با ۲۵ میکرومتر برای آن پیشنهاد شده است [۲۰]. اکنون با ترکیب معادلات (۹) و (۱۳)، برای معادله نرخ کرنش در



(الف) دامنه ارتعاش $8 \mu\text{m}$ در مقادیر مختلف سرعت خطی قطعه



(ب) سرعت خطی قطعه 1 m/s در مقادیر مختلف دامنه ارتعاش

Fig. 3. Cutting speed profiles generated for tool vibration set to 31.25 kHz (a) vibration amplitude $8 \mu\text{m}$ and work velocity of 0.5, 0.75, 1 m/s (b) work velocity 1 m/s and vibration amplitude of 8, 10, 12 μm

شکل ۳: نمودار سرعت برشی در یک سیکل ارتعاش ابزار با فرکانس $31/25$ کیلوهرتز در فرایندهای تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی.

منبع حرارتی جدیدی نیز وجود دارد که در اثر اعمال ارتعاشات ایجاد می‌شود؛ به عبارت دیگر، اعمال ارتعاشات فراصوتی، حرارت متمرکزی را در نواحی مرزی مانند مرز جدایش بین دانه‌های تنگستن و کبالت، مرز لایه‌های پوشش ابزار با یکدیگر و به طور کلی در هر مرزی جدایشی ایجاد می‌کند. تولید این حرارت عمدتاً به دلیل اختلاف امپدانس مکانیکی در طرفین مرز جدایش بوده که از این بعد در مقاله حاضر از آن تحت عنوان گرم شدگی هورن در اثر ارتعاشات فراصوتی نام برده می‌شود.

۲-۱-۲ مدل سازی منبع حرارتی در ناحیه اولیه برش
حرارت تولید شده در ناحیه اولیه برش به ازای عمق واحد، از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۸]:

۲-۲-۲- مدل سازی تولید حرارت در سطح تماس ابزار و براده

معادلاتی که نخستین بار توسط زورف معرفی شدند و توزیع تنش برشی در طول تماس ابزار و براده را نشان می دهند، کمابیش شبیه معادلات مربوط به تابع توزیع شار حرارتی بر روی این سطح می باشند [۲۱]. بنابراین برای یافتن تابع توزیع شار حرارتی در ناحیه تماس ابزار و براده، باید ابتدا تابع توزیع تنش برشی بر روی سطح براده تعیین شده و سپس تابع توزیع شار حرارتی در هر نقطه را به صورت ضریبی از تنش برشی در نقطه مورد نظر بیان کرد، شکل ۵.

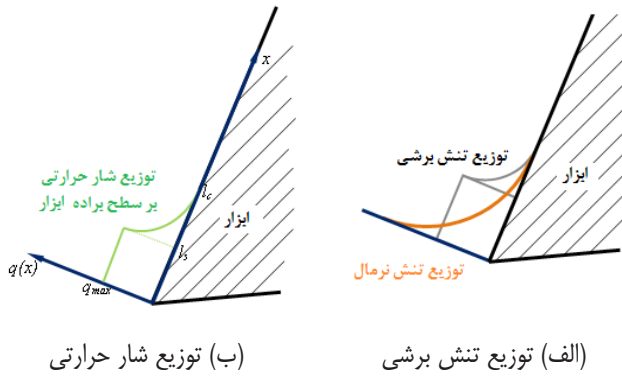


Fig. 5. (a) Stress distribution and (b) Heat flux distribution on the tool-chip contact length in Turning

شکل ۵: تابع توزیع تنش برشی و شار حرارتی بر سطح براده ابزار

شکل ۵ (الف) مدلی از توزیع تنش برشی را نشان می دهد که نخستین بار توسط زورف پیشنهاد شد؛ در این حالت مطابق شکل، تنش برشی ناشی از اصطکاکی در طول ناحیه چسبیده (l_s) ثابت بوده اما با ورود به ناحیه لغزنده، مقدار آن به تدریج کاهش یافته و در نهایت به صفر می رسد. رفتاری مشابه را می توان برای تابع توزیع شار حرارتی مشاهده کرد. بنابراین تابع شار حرارتی در حالت کلی به صورت رابطه زیر بیان می شود:

$$q_l(x) = \begin{cases} q_{max} & 0 \leq x \leq l_s \\ q_{max} \left(\frac{l_c - x}{l_c - l_s} \right) e^{\left(\frac{l_s - x}{l_c} \right)} & l_s \leq x \leq l_c \end{cases} \quad (18)$$

از طرف دیگر، میزان تولید حرارت به ازای عمق برش واحد در ناحیه ثانویه برابر است با [۸]:

$$\dot{q}_f = F_f V_f = \frac{\tau_s a_c V_c \sin(\beta_n)}{\cos(\varphi_n + \beta_n - \alpha_n) \sin(\varphi_n - \alpha_n)} \quad (W) \quad (19)$$

که در آن F_f نیروی اصطکاک، V_f مؤلفه سرعت برش در سطح براده و β_n زاویه اصطکاک نرمال است.

در رابطه با ناحیه ثانویه برش با در نظر گرفتن رابطه (۱۹) مشاهده می شود که اعمال ارتعاشات فراصوتی، رفتار ماده و رژیم اصطکاکی در سطح براده را تغییر داده و در نتیجه تولید حرارت در ناحیه ثانویه برش را متأثر خواهد

تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی می توان نوشت:

$$\dot{\gamma}(\tau) = \begin{cases} \frac{\cos \alpha_n \times (a \omega \cos(\omega \tau) + V_w)}{\cos(\varphi_n - \alpha_n) t_{s,z}} & nT < \tau < nT + t_{up} \\ 0 & nT + t_{up} < \tau < nT + t_{up} + t_s \\ \frac{\cos \alpha_n \times (a \omega \cos(\omega \tau) + V_w)}{\cos(\varphi_n - \alpha_n) t_{s,z}} & nT + t_{up} + t_s < \tau < (n+1)T \end{cases} \quad (14)$$

چنانچه ثوابت A ، B و C در معادله جانسون کوک مشخص باشند، با استفاده از معادلات (۱۲)، (۱۳) و (۱۴)، مقدار تنش برشی ماده در معادله (۱۱) محاسبه شده و با استفاده از آن می توان میانگین درجه حرارت در صفحه برش را از رابطه زیر محاسبه کرد [۸]:

$$\bar{T}_w = \frac{1 - \chi}{\rho C} \times \frac{\tau_s \cos(\alpha_n)}{\cos(\varphi_n - \alpha_n) \sin(\varphi_n)} + T_0 \quad (15)$$

که در آن φ و C و T_0 به ترتیب دانسیته قطعه کار، ظرفیت گرمایی ویژه و دمای اولیه قطعه می باشند. مقدار افزایش دمای متوسط در صفحه برش که با معادله (۱۵) محاسبه می شود، در حل تفاضل محدود به عنوان شرط مرزی در نوک ابزار مورد استفاده قرار خواهد گرفت. همچنین در معادله (۱۵)، کمیت χ نشان دهنده سهمی از شار حرارتی تولید شده در ناحیه اولیه برش است که به قطعه کار وارد می شود [۸]:

$$\chi = \begin{cases} 0.5 - 0.35 \log_{10}(R_t \cdot \text{tg} \varphi_n) & 0.004 \leq R_t \cdot \text{tg} \varphi_n \leq 10 \\ 0.3 - 0.15 \log_{10}(R_t \cdot \text{tg} \varphi_n) & R_t \cdot \text{tg} \varphi_n \geq 10 \end{cases} \quad (16)$$

در معادله فوق $R_t = \frac{a_c V_c}{\xi}$ عدد حرارتی و $\xi = \frac{k}{\rho C}$ نشان دهنده نفوذ حرارتی است. در عین حال در فرایند تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک، سرعت برشی به صورت یک تابع متناوب بر اساس معادله (۹) با زمان تغییر می کند و در نتیجه بایستی در محاسبه عدد حرارتی از مقدار مؤثر سرعت برش استفاده شود:

$$R_{t, \text{uat}} = \frac{a_c V_{c, \text{eff}}}{\xi} = \frac{a_c \int_0^T V_c(\tau) d\tau}{\xi T} \quad (17)$$

اکنون با محاسبه عدد حرارتی، با استفاده از معادله (۱۶)، سهم شار حرارتی وارد به قطعه کار محاسبه شده و دمای متوسط صفحه برش در طول فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک با کاربرد معادله (۱۵)، تخمین زده می شود.

به طور کلی اضافه شدن ارتعاشات فراصوتی به تراشکاری سنتی، مقدار نهایی سرعت برش را تغییر می دهد و همان گونه که از روابط (۱۳)، (۱۵) و (۱۷) مشخص است، هر تغییری در مقدار سرعت منجر به تغییر نرخ کرنش، عدد حرارتی و دمای میانگین صفحه برش خواهد شد؛ بنابراین می توان نتیجه گرفت که اعمال ارتعاشات فراصوتی نوع رفتار ماده را متأثر کرده و متعاقباً حرارت تولید شده در ناحیه اولیه برش اصلی را تحت تأثیر قرار می دهد.

جدول ۲: ثوابت مدل جانسون کوک برای فولاد ۴۱۴۰ [۲۳]

Table 2. Johnson-Cook Constants of 4140 steel [23]

A	B	N	C	m
۱۵۳۹	۴۷۷	۰/۱۸	۰/۰۱۲	۱

۲-۳- مدل سازی تفاضل محدود توزیع درجه حرارت در تراش متعامد
معادله تعادل حرارتی در مدل کرنش صفحه‌ای تراش متعامد، شکل ۶، به صورت زیر نوشته می‌شود [۸]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\dot{Q}}{k} = \frac{1}{\xi} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (22)$$

معادله فوق با فرضیات ساده کننده‌ای از قبیل دوبعدی بودن انتقال حرارت و یک‌بعدی بودن انتقال جرم نوشته شده است. همچنین از تغییرات هدایت حرارتی با دما صرف‌نظر شده است. در این معادله، کمیت $\xi = k/\rho C$ نشان‌دهنده نفوذ حرارتی است. معادله (۲۲) برای ناحیه برش ثانویه نوشته شده و در نتیجه شار حرارتی دو منبع دارد؛ منبع اول مربوط به تغییر شکل پلاستیک ناشی از ماشین کاری و منبع دوم به اعمال ارتعاشات فراصوتی مربوط است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، حرارت ناشی از ارتعاشات فراصوتی مربوط به نواحی ناپیوسته‌ای است که در طرفین یک مرز اختلاف امپدانس وجود دارد. این منابع حرارتی در هنگام محاسبه دمای ابزار بایستی به حساب آیند. در پژوهش حاضر، از دو ترموکوپل به صورت هم‌زمان استفاده شد تا افزایش دمای ابزار به دلیل اعمال ارتعاشات آلتراسونیک حذف شود؛ در این حالت یکی از ترموکوپل‌ها

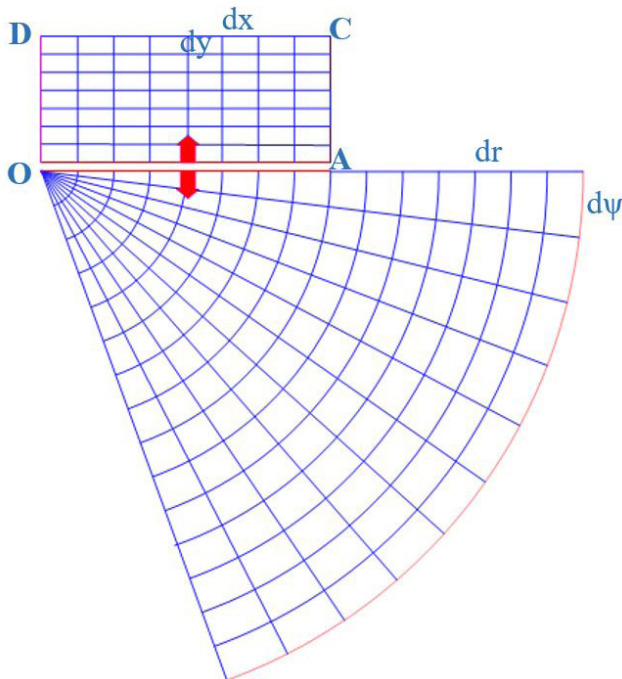


Fig. 6. Tool and chip meshing for finite difference modeling in case of orthogonal cutting [9]

شکل ۶: مش‌بندی ابزار و براده در مدل تفاضل محدود متعامد [۹].

کرد. اکنون با ترکیب معادلات (۹) و (۱۹)، میزان تولید حرارت در ناحیه ثانویه برش به ازای عمق واحد، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\dot{q}_f(\tau) = \begin{cases} \frac{\tau_s a_c \cdot (A \omega \cos(\omega \tau) + V_w) \cdot \sin(\beta_n)}{\cos(\varphi_n + \beta_n - \alpha_n) \sin(\varphi_n - \alpha_n)} & nT < \tau < nT + t_{up} \\ 0 & nT + t_{up} < \tau < nT + t_{up} + t_s \quad (W) \quad (20) \\ \frac{\tau_s a_c \cdot (A \omega \cos(\omega \tau) + V_w) \cdot \sin(\beta_n)}{\cos(\varphi_n + \beta_n - \alpha_n) \sin(\varphi_n - \alpha_n)} & nT + t_{up} + t_s < \tau < (n+1)T \end{cases}$$

با در نظر گرفتن معادلات (۱۸) و (۲۰) روشن است که تابع شار حرارتی در سطح براده در فرایند تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک تابعی از زمان و مکان بوده و به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\dot{Q}_f(x, \tau) = q_I(x) \cdot \dot{q}_f(\tau) \quad (21)$$

معادله (۲۱) تابعی از پارامترهای ماشین کاری و ارتعاشی بوده و می‌توان آن را برای مطالعه اثر این پارامترها بر توزیع درجه حرارت در فرایند تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک مورد استفاده قرارداد.

۲-۲-۲- مدل رفتاری جنس قطعه کار

در پژوهش حاضر فولاد ۴۱۴۰ به عنوان قطعه کار انتخاب شده است. انتخاب این جنس عمدتاً به واسطه کاربردهای زیاد آن در صنعت اتومبیل‌سازی جهت ساخت تجهیزات همچون شفت، میل‌لنگ، بادامک، چرخنده و ... می‌باشد. در فرایند تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک دمای نواحی برش، کرنش و نرخ کرنش به دلیل تغییرات سریع و متناوب سرعت برش به صورت مداوم در حال تغییر است و لذا بایستی تأثیر این تغییرات بر رفتار مکانیکی ماده لحاظ شود. با توجه به ملاحظات فوق و همچنین در نظر گرفتن این نکته که نرخ کرنش، کرنش و دما روی میزان تغییر شکل پلاستیک تأثیر مستقیمی دارد، مدل جانسون کوک برای مدل سازی رفتار جنس قطعه کار در شرایط ماشین کاری، مناسب‌ترین گزینه موجود است. خواص فیزیکی و ثوابت مورد نیاز در مدل جانسون کوک برای فولاد ۴۱۴۰ در کارهای قبلی منتشر شده [۲۲ و ۲۳] و در جداول ۱ و ۲ گردآوری شده است.

جدول ۱: خواص فیزیکی فولاد ۴۱۴۰ [۲۲]

Table 1. Physical Properties of 4140 steel [22]

درجه حرارت (°C)	۲۵	۱۰۰	۳۰۰	۵۰۰
مدول الاستیک (GPa)	۲۱۰	۲۰۵	۱۸۵	۱۶۵
ضریب پواسن	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۲۹
چگالی (kg/m ³)	۷۸۵۰			
ضریب انبساط حرارتی (×10 ⁻⁶ K ⁻¹)	۱۱	۱۱/۱	۱۲/۹	۱۳/۹
ضریب هدایت حرارتی (W/m°C)	۴۲	۴۲	۴۲	۴۲
ظرفیت گرمائی ویژه (N/mm ² °C)	۴۶۰	۴۶۰	۴۶۰	۴۶۰

$$l_c \approx \frac{2a_c \sin(\varphi_n + \beta_n - \alpha_n)}{\cos(\beta_n) \sin(\varphi_n)} \quad (27)$$

با استفاده از سیستم مختصات قطبی، معادلات حاکم بر انتقال حرارت نقاط گره‌ای ابزار به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial^2 T_t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_t}{\partial \psi^2} + \frac{\dot{Q}_t}{k_t} = 0 \quad (28)$$

در این معادله T_t نشان‌دهنده درجه حرارت ابزار و متغیرهای r و ψ برای نشان دادن موقعیت شعاعی و زاویه‌ای هر گره نسبت به نوک ابزار استفاده می‌شوند. با استفاده از تقریب مرتبه دوم، معادله (۲۸) به فرم تفاضل محدود زیر بازنویسی می‌شود:

$$\frac{T_{i(r+\delta r, \psi)} + T_{i(r-\delta r, \psi)} - 2T_{i(r, \psi)}}{\delta r^2} + \frac{T_{i(r+\delta r, \psi)} + T_{i(r-\delta r, \psi)} - 2T_{c(x, y)}}{2r\delta r} + \frac{T_{i(r, \psi+\delta \psi)} + T_{i(r, \psi-\delta \psi)} - 2T_{i(r, \psi)}}{r^2 \delta \psi^2} + \frac{\dot{Q}_t(r, \psi)}{k_t} = 0 \quad (29)$$

در معادله (۲۹)، شار حرارتی ناشی از اصطکاک که به گره شماره i منتقل می‌شود، از رابطه زیر به دست می‌آید [۸]:

$$\dot{Q}_{t(i)} = \Gamma_i \frac{\dot{Q}_f \delta x}{l_c} \quad 1 \leq i \leq N_x + 1 \quad (30)$$

در این حالت نیز در گره‌های داخلی تولید حرارت وجود ندارد و در نتیجه مقدار $\dot{Q}_{f(i)}$ برای این گره‌ها صفر خواهد بود. اکنون می‌توان با بازنویسی معادلات تعادل، فرم ماتریسی زیر تشکیل داد:

$$[D] \cdot \{T_i\} = \{E\} \quad (31)$$

که در آن $[D]$ ماتریس مربعی ضرایب، $\{T_i\}$ بردار درجه حرارت گره‌های ابزار و $\{E\}$ بردار حرارت تولیدشده در گره‌ها می‌باشد.

در معادلات (۲۵) و (۳۰)، سهم گره‌های ابزار از شار حرارتی اصطکاک (Γ_i) در گره‌های واقع در سطح تماس براده و ابزار در ابتدا مشخص نبوده و با یک روش بازگشتی تعیین می‌شود. روش کار به این صورت است که ابتدا یک مقدار تصادفی بین صفر و یک به Γ_i در هر گره نسبت داده می‌شود و با استفاده از آن، توزیع درجه حرارت در گره‌های ابزار و براده محاسبه می‌شود. سپس درجه حرارت محاسبه شده در گره‌های واقع در سطح تماس ابزار و براده که به صورت جداگانه از مدل ابزار و براده محاسبه شده‌اند، با هم مقایسه می‌شوند. مطلوب آن است که این مقادیر با یکدیگر برابر باشند اما اگر اختلاف این مقادیر از یک حد تعیین شده بزرگ‌تر باشد، در این صورت مقدار ضریب در هر گره با استفاده از روابط زیر اصلاح می‌شود [۸]:

$$\Gamma_i = \Gamma_i + d\Gamma_i \quad 1 < i < N_x + 1 \quad (32)$$

نزدیک لبه برش بوده و افزایش دما در اثر هر دو منبع (ماشین کاری و اعمال ارتعاشات فراصوتی) را ثبت کرده و ترموکوپل دیگر به اندازه کافی از لبه برش فاصله داشته و صرفاً افزایش دما در اثر اعمال ارتعاشات را اندازه‌گیری می‌کند.

در نتیجه در مدل‌سازی تفاضل محدود، تنها حرارت تولیدشده در ناحیه ثانویه در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در تحلیل ارائه شده از اثر افزایش حرارت ناحیه برش اولیه صرف نظر نشده و پس از محاسبه مقدار متوسط درجه حرارت در صفحه برش، از آن دما به عنوان شرط مرزی در نوک ابزار (O) و لبه OD از براده استفاده شده است.

با در نظر گرفتن براده به صورت یک ناحیه مستطیل شکل که در مدت زمان بی‌نهایت کوچک، در حالت تعادل حرارتی شبه استاتیکی قرار دارد، معادله (۲۲) در مختصات کارتزین به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_c}{\partial y^2} + \frac{\dot{Q}_c}{k_c} = \frac{1}{\xi_c} \frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{1}{\xi_c} V_c \frac{\partial T_c}{\partial x} \quad (23)$$

با استفاده از تقریب مرتبه دوم، معادله بالا به فرم تفاضل محدود زیر بازنویسی می‌شود:

$$\frac{T_{c(x+\delta x, y)} + T_{c(x-\delta x, y)} - 2T_{c(x, y)}}{\delta x^2} + \frac{T_{c(x, y+\delta y)} + T_{c(x, y-\delta y)} - 2T_{c(x, y)}}{\delta y^2} + \frac{\dot{Q}_c(x, y)}{k_c} = \frac{1}{\xi_c} V_c \frac{\partial T_{c(x, y)}}{\partial x} \quad (24)$$

معادله فوق برای هر گره از ناحیه براده نوشته می‌شود. شار حرارت اصطکاک منتقل شده به گره شماره i از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۸]:

$$\dot{Q}_{c(i)} = (1 - \Gamma_i) \frac{\dot{Q}_f \delta x}{l_c} \quad 1 \leq i \leq N_x + 1 \quad (25)$$

در رابطه (۲۵)، کمیت Γ_i نشان‌دهنده سهمی از شار حرارتی ناشی از اصطکاک است که به گره شماره از ابزار برش می‌رسد و در ابتدا مقدار آن کاملاً مشخص نیست. همچنین، کمیت‌های \dot{Q}_f ، l_c و N_x به ترتیب نرخ تولید حرارت اصطکاک، طول تماس براده و ابزار و تعداد گره‌ها در امتداد محور x می‌باشند. در گره‌های داخلی، تولید حرارتی وجود ندارد در نتیجه مقدار $\dot{Q}_{c(i)}$ در این نقاط صفر است.

اکنون می‌توان با بازنویسی معادلات تعادل، فرم ماتریسی زیر تشکیل داد:

$$[A] \cdot \{T_c\} = \{C\} \quad (26)$$

که در آن $[A]$ ماتریس مربعی ضرایب، $\{T_c\}$ بردار درجه حرارت گره‌های براده و $\{C\}$ بردار حرارت تولیدشده در گره‌ها می‌باشد.

طول تماس ابزار و براده از رابطه زیر قابل محاسبه است، [۸]:

آلتراسونیک به دست می‌آید. بدین منظور، نتایج تحلیل‌های صورت گرفته برای بازه‌های زمانی کوچک با هم ترکیب شده تا نمودار تغییرات زمانی درجه حرارت ابزار ایجاد شود.

در طول زمان برش در هر سیکل، دمای برش به دلیل تولید حرارت در نواحی اولیه و ثانویه برش، افزایش می‌یابد. سپس در طول زمان جدایش، دمای برش به دلیل همرفت با محیط اطراف و بر طبق منحنی خنک کاری، کاهش می‌یابد. منحنی خنک شدن در هوا، از داده‌های تجربی اندازه‌گیری درجه حرارت در آزمایش تراشکاری سنتی استخراج می‌شوند، شکل ۱۰. پس از اتمام سیکل خنک کاری، ابزار برش به دمای اولیه (T_0) رسیده و فرض می‌شود که سیکل برش بعدی را با دمایی بالاتر از دمای اولیه سیکل قبل شروع می‌کند؛ بنابراین بیشینه دما در هر مرحله بعدی برش به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. در شکل ۷، نحوه توزیع درجه حرارت در ابزار و براده و همچنین خطوط هم‌دما در فرایند تراش متعامد و سنتی فولاد سخت‌کاری شده ۴۱۴۰، به ازای سرعت خطی قطعه‌کار برابر با ۳۰ m/min، پیشروی ۰/۱۱ میلی‌متر بر دور، زاویه براده صفر و زاویه آزاد ۵ درجه و بر اساس اطلاعات موجود در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

بر اساس نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی درجه حرارت، حداکثر مقدار اندازه‌گیری شده در سطح براده در حدود ۲۶۰ درجه سلسیوس و حداکثر دما در نتایج شبیه‌سازی نیز ۲۵۲ درجه سلسیوس بود. نتایج شبیه‌سازی کمی پایین‌تر از مقادیر تجربی بود. این اختلاف را می‌توان به خطاهای موقعیت دهی ترموکوپل مربوط دانست.

۲-۵- آزمون‌های تجربی

۲-۵-۱- آزمون‌های تراش متعامد

آزمایش تجربی بر روی دستگاه تراش تبریز مدل TB50NR با توان ۵/۵ کیلووات و حداکثر سرعت اسپیندل ۲۰۰۰ دور بر دقیقه انجام شد. برش متعامد در حالت خشک بر روی فولاد ۴۱۴۰ با اینسرت‌های تنگستن کارباید و با ابزار گیر با زاویه براده صفر و به ازای دو سرعت برش ۳۰ و ۴۵ متر بر دقیقه و پیشروی ۰/۱۱ میلی‌متر بر دور انجام گرفت. بعد از هر آزمون، اینسرت جدیدی برای حذف اثر فرسایش ابزار استفاده شد. نیروهای برش با استفاده از دینامومتر کیستلر همراه با تقویت‌کننده مدل ۵۰۷۰ اندازه‌گیری شد. دینامومتر قبل از انجام آزمایش، با استفاده از وزنه‌های مشخص کالیبره شده بود. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۳ آمده است.

۲-۵-۲- اندازه‌گیری دمای برش

دمای برش به‌وسیله ترموکوپل تستو که در ابزار برش جایگذاری شده بود، اندازه‌گیری شد، شکل ۸. کالیبراسیون سیستم اندازه‌گیری دما قبل از انجام آزمایش و برای اطمینان از صحت اندازه‌گیری‌ها انجام شد. اگر اتصال بین نوک ترموکوپل و سوراخ ایجادشده در اینسرت به اندازه کافی محکم نباشد، ممکن است در فرکانس بالای ارتعاشات فراصوتی،

$$d\Gamma_i = \left(\frac{T_{c(I:N_x+I)} - T_{t(I:N_x+I)}}{\frac{T_{c(I:N_x+I)} + T_{t(I:N_x+I)}}{2}} \right) \quad (33)$$

اکنون با استفاده از روش تفاضل محدود که در بالا بیان شد، درجه حرارت حالت پایدار به ازای پارامترهای ماشین‌کاری سیستم تعیین می‌شود. سیستم انتقال حرارت در تراشکاری یک سیستم مرتبه اول است. بنابراین با داشتن ثابت زمانی سیستم، می‌توان پاسخ گذرای آن را پیش‌بینی کرد. لازاغلو و همکاران [۸]، نشان دادند که در برش متعامد، پاسخ گذرای مسئله انتقال حرارت به‌صورت رابطه زیر نوشته می‌شود:

$$e^{-\zeta\pi^2 \left(\frac{l_c}{l_c^2} + \frac{l_s}{l_s^2} \right) t} \quad (34)$$

که در آن l_c و l_s به ترتیب طول تماس ابزار و براده، نفوذ حرارتی و طول صفحه برش می‌باشند. از طرف دیگر، با در نظر گرفتن مدل کرنش صفحه‌ای برای برش متعامد شکل ۱، رابطه طول صفحه برش به‌صورت زیر نوشته می‌شود [۲۰]:

$$l_s = \frac{a_f \cos(\varphi_n - \alpha_n)}{\sin(\varphi_n)} \quad (35)$$

با دانستن درجه حرارت حالت پایدار، طول تماس ابزار و براده، نفوذ حرارتی و طول صفحه برش، می‌توان پاسخ گذرای مسئله انتقال حرارت را یافت.

۲-۴- مدل‌سازی تفاضل محدود درجه حرارت ابزار در تراشکاری به کمک

ارتعاشات فراصوتی

در فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک، هر سیکل ارتعاشی به زمان‌های برش و غیر برش تقسیم می‌شود. در طول زمان برش، دمای ابزار برش در نواحی اولیه و ثانویه افزایش می‌یابد؛ اما در زمانی که برش اتفاق نمی‌افتد، دمای ابزار به دلیل همرفت با محیط اطراف (هوا یا سیال خنک‌کار)، کاهش می‌یابد.

زمان مرحله برش در هر سیکل را می‌توان به چند بازه زمانی کوچک‌تر تقسیم کرد؛ هر یک از این بازه‌های زمانی کوچک را می‌توان به مثابه یک فرآیند تراشکاری با سرعت برش و نرخ کرنش و شرایط مرزی متفاوت در نظر گرفت. مقدار سرعت برش در هر بازه زمانی کوچک با استفاده از مدل سرعت برشی، معادله (۹)، محاسبه می‌شود. همچنین نرخ کرنش و شرط مرزی درجه حرارت در نوک ابزار در هر بازه زمانی کوچک به ترتیب با معادلات (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌شوند. اکنون با استفاده از مدل تفاضل محدود توسعه‌یافته، درجه حرارت حالت پایدار و ثابت زمانی برای هر یک از بازه‌های زمانی کوچک محاسبه می‌شود. حال با استفاده از تحلیل سیستم مرتبه اول، پاسخ گذرای سیستم برای فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات

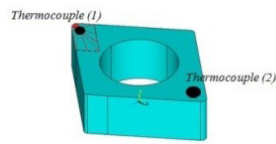
جدول ۳: نتایج آزمون‌های برش متعامد

Table 3. Results of orthogonal cutting tests

اصطکاک	نیروی برش (نیوتن)		زاویه برش	سرعت m/s	پیشروی mm/rev	ردیف
	اصلی	پیشروی				
۳۵/۳۹	۳۰۱	۳۴۶	۲۳/۷۵	۰/۵	۰/۱۱	۱
۳۳/۴۴	۲۶۷	۳۳۰	۲۳/۸۶	۰/۷۵	۰/۱۱	۲



(ب)



(الف)

Fig. 8. Set up of the thermocouple (a) Schematic diagram (b) Experimental set up

شکل ۸: نحوه جایگذاری ترموکوپل در ابزار برش، (الف) شماتیک، (ب) چیدمان مورد استفاده.

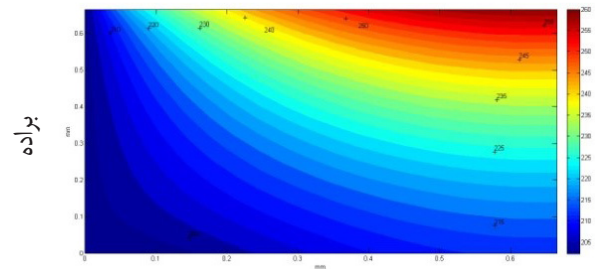
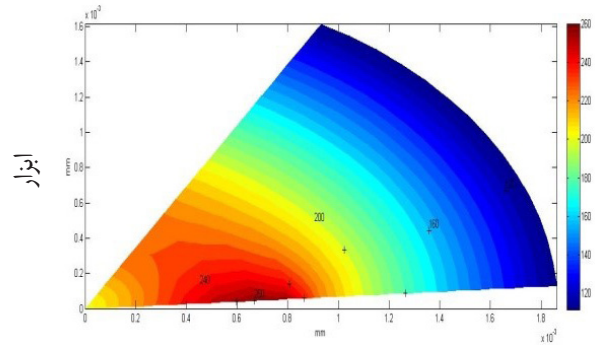
ایجادشده با استفاده از اتصال جوشی متصل شد. همچنین برای یافتن محل مناسب برای نصب ترموکوپل، آزمایش‌های اولیه‌ای انجام شد. در طول این آزمایش‌ها حداکثر مقدار سایش روی سطح براده ابزار به وسیله میکروسکوپ اندازه‌گیری شده و نقطه مذکور برای نصب ترموکوپل انتخاب شد. نقطه انتخابی، احتمالاً موقعیتی از ابزار است که در حین برش در آن حداکثر درجه حرارت ایجاد خواهد شد، نقطه A شکل ۴ (ب).

همان‌گونه که در شکل ۸ نشان داده شده، در هر اینسرت دو نقطه برای نصب ترموکوپل انتخاب شد. موقعیت سوراخ‌های ایجادشده بایستی در همه اینسرت‌ها یکسان باشد. در غیر این صورت، منحنی درجه حرارت-زمان در آزمون‌های مختلف، قابل مقایسه نخواهند بود؛ بنابراین در این تحقیق توجه ویژه‌ای به فرآیند سوراخ‌کاری معطوف شد. پس از ایجاد سوراخ‌ها، موقعیت مرکز هر سوراخ با تله‌انس هندسی موقعیت ۰/۰۲ میلی‌متر کنترل شد. جدول ۴ مشخصات ترموکوپل مورد استفاده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

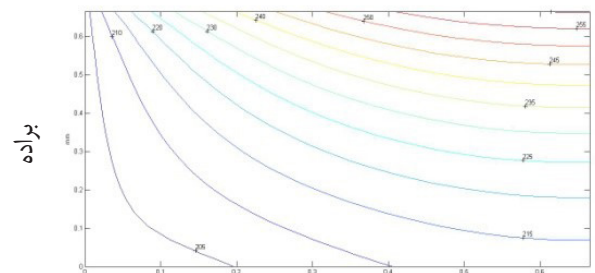
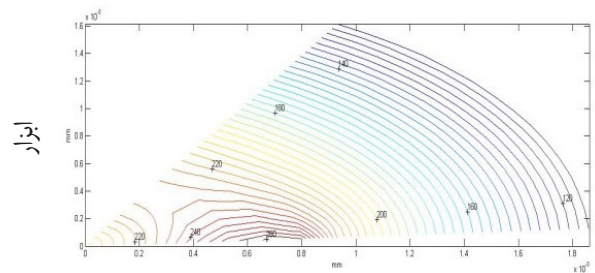
جدول ۴: مشخصات ترموکوپل مورد استفاده در آزمون‌های تجربی

Table 4. Thermocouple specifications used in experimental tests

محدوده	مشخصات
-۲۰۰ تا +۱۳۷.۰°C	محدوده اندازه‌گیری نوک در حالت غوطه‌وری
(+۶۰.۰°C تا -۶۰.۰°C) ±۰/۳°C	
±(۰/۲°C + ۰/۳% of mv) (remaining range)	دقت
۰/۱°C	تفکیک پذیری



(الف) توزیع درجه حرارت در ابزار و براده



(ب) خطوط هم‌دما و هم‌گرایی درجه حرارت در سطح تماس ابزار و براده

Fig. 7. Simulated results of temperature for 4140 Hardened steel work-piece material at $V_w = 30$ m/min (shear plane angle=23.75°).

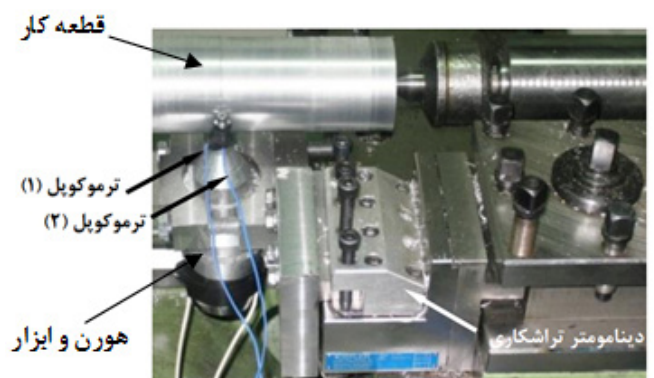
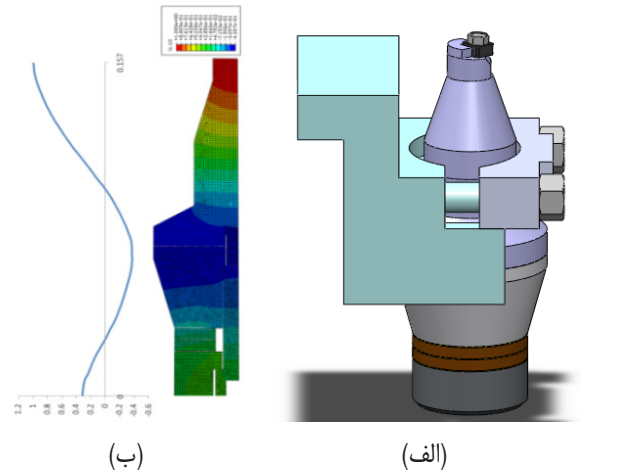
(a) Simulated tool and chip temperature field. (b) Isotherm patterns and Convergence in temperature fields of the tool and chip at the contact region.

شکل ۷: نمایش توزیع درجه حرارت (الف) و خطوط هم‌دما و هم‌گرایی آن در سطح ابزار و براده (ب) در تراشکاری فولاد سخت‌کاری شده ۴۱۴۰ در سرعت ۳۰ متر بر دقیقه (زاویه صفحه برش ۲۳/۷۵ درجه)

اتصال شکسته شده و نوک ترموکوپل در محل سوراخ بلغزد که این لغزش متناوب می‌تواند سبب ایجاد یک منبع حرارتی اصطکاکی شده و در نتیجه آن، دمای اندازه‌گیری شده مقداری غیرواقعی و بالا داشته باشد؛ بنابراین در تحقیق حاضر، برای از بین بردن این اثر، نوک ترموکوپل در سوراخ

۲-۵-۳- تجهیزات ماشین کاری به کمک ارتعاشات فراصوتی

برای ایجاد ارتعاشات یک‌بعدی آلتراسونیک، از یک ترانسدیوسر پیزوالکتریک با توان ۴۰۰ وات استفاده شد. منبع تغذیه فراصوتی دارای توان ۱/۵ کیلووات بوده و برای تبدیل فرکانس ورودی ۵۰ هرتز به پالس‌های الکتریکی ۲۰ تا ۳۰ کیلوهرتز استفاده می‌شود. ترانسدیوسر از پالس‌های فرکانس بالا برای ایجاد ارتعاشات مکانیکی با فرکانس ۳۱/۲۵ کیلوهرتز استفاده می‌کند. با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود، هورن به‌گونه‌ای طراحی شد که در آزمون‌های تجربی، مود طولی ارتعاش در هورن ایجاد شده و شکم در دو انتها و گره در وسط آن ایجاد شود. محل گرفتن هورن از محل همین گره می‌باشد. شکل ۹ سیستم گرفتن ابزار و توزیع جابجایی ابزار که از آنالیز مودال به دست آمده است را نشان می‌دهد. همچنین فرکانس تولید امواج فراصوتی در هر شرایطی، به نحوی تنظیم شد که ترانسدیوسر در حالت تشدید باشد. برای اندازه‌گیری حداکثر دامنه ارتعاش، از یک گپ سنسور PU-09 (۰/۴mm/V)، یک مبدل AEC-5509 و یک اسپیلوسکوپ استفاده شد.



شکل ۹: تجهیزات ماشین کاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک. (الف) فیکسچر ابزار و هورن، (ب) شبیه‌سازی هورن و توزیع جابجایی، (ج) نحوه بستن تجهیزات تراشکاری مورد استفاده

۲-۵-۴- طراحی آزمایش‌ها

در این پژوهش در مجموع ۶ آزمایش تجربی به روش فول فاکتوریل و بر اساس دو پارامتر ماشین کاری و یک پارامتر ارتعاشی انجام شد، جدول ۵. بر اساس توصیه کتابچه فنی سازنده اینسرت برش و همچنین انجام چند آزمایش اولیه، دو سطح برای سرعت برش و یک سطح برای پیشروی انتخاب شد. بالاترین سطح سرعت برش به‌گونه‌ای انتخاب شد که از مقدار سرعت بحرانی برای تراشکاری به کمک فراصوتی کوچک‌تر باشد تا از وقوع جدایش اطمینان حاصل شود. همچنین عمق برش ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد و هر آزمایش ۳ بار تکرار شد.

جدول ۵: طراحی آزمایش و سطوح انتخابی برای متغیرها

Table 5. Experiment factors and their levels

پارامتر	عنوان	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳
a	دامنه (میکرومتر)	۰	۸	۱۰
V_w	سرعت قطعه (متر بر ثانیه)	۰/۵	۰/۷۵	-
a_f	پیشروی (میلی‌متر بر دور)	۰/۱۱	-	-

۲-۶- ارائه نتایج و بحث

کلیه آزمون‌های تجربی هم برای تراشکاری سنتی و هم برای تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی انجام شد و تحلیل تفاضل محدود با پارامترهای یکسان مشابه جهت مقایسه نتایج، انجام شد.

توزیع درجه حرارت در تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک نشان‌دهنده آن است که در هنگام شروع ماشین کاری، دمای ابزار در اولین چرخه برش افزایش یافته و در مدت زمان جدایش کاهش می‌یابد. خنک‌کاری تا لحظه رسیدن مجدد قطعه و ابزار به هم و قبل از شروع مرحله برش بعدی، تداوم می‌یابد. در طول مدت زمان جدایش، دمای ابزار پیوسته کاهش می‌یابد اما به دمای اولیه قبلی نمی‌رسد؛ بنابراین حداکثر دما پیوسته افزایش یافته و سپس روند افزایشی آن کند می‌شود. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ توزیع درجه حرارت متوسط در فرایند تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک را برای نقطه نصب ترموکوپل در مقادیر مختلف دامنه ارتعاش و سرعت برشی را نشان می‌دهد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نوعی افزایش یکنواخت در حداکثر دمای برش مشهود است. حداکثر مقدار درجه حرارت ابزار در تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک، تقریباً ۳۳/۲۱٪ کمتر از حداکثر مقدار درجه حرارت در تراش معمولی است. این کاهش دمای قابل توجه به خاطر اثر خنک‌کاری سیکلی است که در طول فرایند تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک اتفاق می‌افتد.

در مورد سرعت قطعه کار، نتایج مدل تفاضل محدود و نتایج آزمون‌های تجربی گویای این مطلب است که با افزایش سرعت، حداکثر درجه حرارت افزایش می‌یابد. دلیل این امر به‌واسطه آن است که هر چه سرعت قطعه

پارامترها، زمان جدایش را افزایش داده و زمان کلی برش در هر سیکل را کاهش می‌دهد. بنابراین انتظار می‌رود با افزایش دامنه، شرایط خنک‌کاری بهبود یافته و در نتیجه درجه حرارت کاهش یابد. به عنوان نمونه، افزایش دامنه از ۸ به ۱۰ میکرومتر، میزان کاهش حداکثر دمای برش نسبت به تراش معمولی را از ۳۳/۲۱٪ به ۳۷/۲۴٪ افزایش می‌دهد.

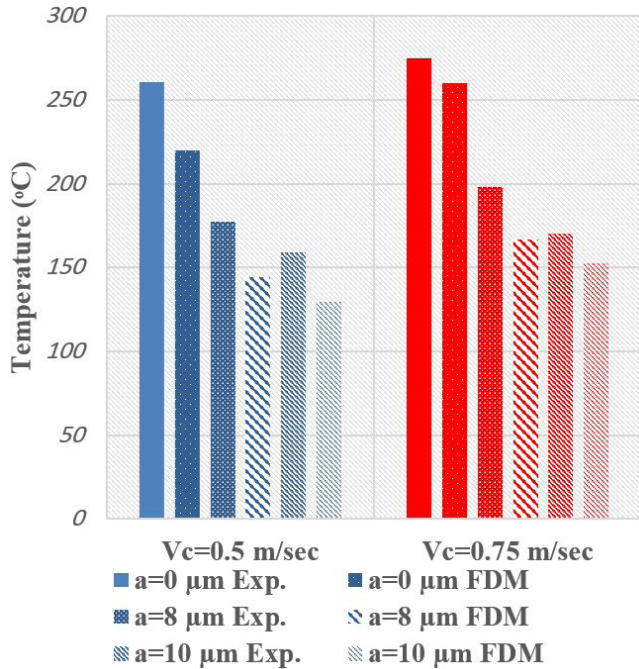
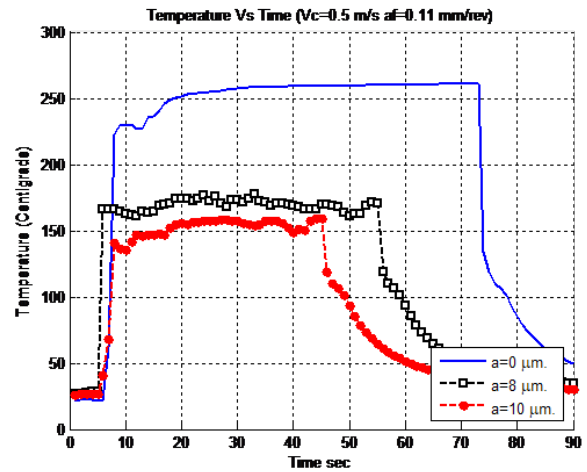
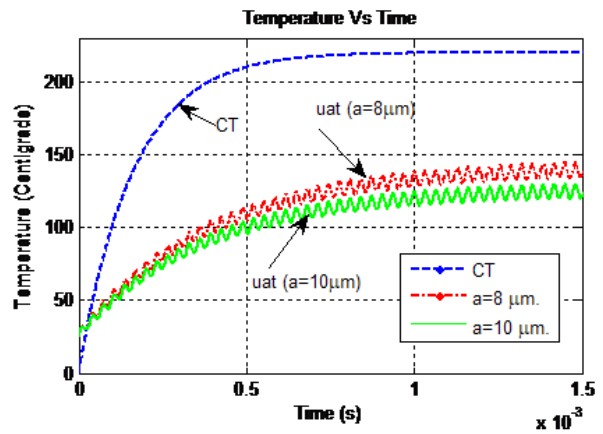


Fig. 11. Comparison of the FDM simulation and experimental test results for the steady state temperature of the Tool in accordance with Table 5

شکل ۱۱: مقایسه نتایج به دست آمده از حل عددی و آزمایش تجربی برای درجه حرارت پایدار ابزار مطابق با جدول ۵



(الف) نتایج تجربی



(ب) نتایج حل عددی

Fig. 10. The influence of vibration domain (8 and 10 μm) at $V_c=0.5$ m/s, $a_f=0.11$ mm/rev on main maximum tool temperature during UAT and CT: (a) experimental and (b) FDM simulation

شکل ۱۰: اثر دامنه ارتعاش بر درجه حرارت در تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک (سرعت قطعه ۰/۵ متر بر ثانیه و پیشروی ۰/۱۱ میلی‌متر بر دور)

۳- نتیجه گیری

هدف اصلی مقاله حاضر، مطالعه عددی و تجربی توزیع درجه حرارت ابزار برش در فرایند تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی است. برای این منظور، از روش تفاضل محدود برای ارائه مدلی برای پیش‌بینی درجه حرارت استفاده شد تا مکانیسم و چگونگی کاهش دمای ابزار در طول فرآیند توضیح داده شود. نتایج تحلیل همچنین برای مطالعه اثر سرعت قطعه و دامنه ارتعاش بر روی توزیع درجه حرارت ابزار در فرآیند ماشین‌کاری هیبریدی مورد استفاده قرار گرفت و نتایج حل عددی مطابقت بسیار خوبی با نتایج تجربی داشت.

نتایج زیر از این تحقیق قابل حصول است:

۱. اعمال ارتعاشات فراصوتی در فرایند تراشکاری، مکانیسم تولید حرارت در نواحی برش اولیه و ثانویه را به دلیل اثرگذاری بر رفتار ماده، تحت تأثیر قرار می‌دهد.
۲. افزایش سرعت قطعه، همان‌طور که نتایج عددی و تجربی مؤید آن هستند، باعث افزایش درجه حرارت ابزار برش می‌شود.

افزایش یابد، شار حرارتی منتقل شده به ابزار بیشتر شده و از سوی دیگر، زمان جدایش کمتر می‌شود. لذا، ابزار برش مدت زمان خنک‌کاری کوتاه‌تری خواهد داشت. به عنوان نمونه در شکل ۱۰، با افزایش سرعت قطعه از ۰/۵ به ۰/۷۵ متر بر ثانیه، مقدار کاهش بیشینه درجه حرارت نسبت به تراش معمولی در دامنه ۸ میکرومتر از ۳۳/۲۱ درصد به ۳۷/۲۴ درصد افت پیدا می‌کند.

تأثیر دامنه ارتعاش بر متغیرهای فرآیند بسیار پیچیده‌تر است: (الف) همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، یکی از محدودیت‌های عمده فرایند تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک، گرم شدن هورن در اثر اعمال ارتعاشات است. بر اساس آزمایش‌های تجربی، این اثر گرم‌شدگی به شدت به دامنه ارتعاشات بستگی داشته و با افزایش دامنه تشدید می‌شود. (ب) افزایش دامنه ارتعاش، حداکثر سرعت ابزار را افزایش داده و در نتیجه باعث افزایش دما در طول فرآیند می‌شود. (ج) افزایش سرعت ابزار و ثابت نگه‌داشتن سایر

- [6] J.S. Strenkowski, K.J. Moon, Finite element prediction of chip geometry and tool work-piece temperature distributions in orthogonal metal cutting, *Journal of Engineering for Industry*, 112 (1990) 313–318.
- [7] D.A. Stephenson, A. Ali, Tool temperatures in interrupted metal cutting. *Journal of Engineering for Industry*, 114 (1992).
- [8] I. Lazoglu, Y. Altintas, Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42 (9) (2002) 1011-1022.
- [9] X.D. Liu, Direct single point diamond cutting of stavax assisted with ultrasonic vibration to produce optical quality surface finish, *ASPE proceedings* (2003).
- [10] T. Moriwaki, E. Shamoto, Ultrasonic elliptical vibration cutting, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 44 (1) (1995) 31-34.
- [11] A.V. Mitrofanov, V.I. Babitsky, V.V. Silberschmidt, Finite element simulations of ultrasonically assisted turning, *Computational Materials Science*, 28 (3) (2003) 645-653.
- [12] A.V. Mitrofanov, V.I. Babitsky, V.V. Silberschmidt, Finite element analysis of ultrasonically assisted turning of Inconel 718, *Journal of materials processing technology*, 153 (2004) 233-239.
- [13] N. Ahmed, 3D finite element analysis of ultrasonically assisted turning, *Computational Materials Science*, 39 (1) (2007) 149-154.
- [14] S. Amini, FEM analysis of ultrasonic-vibration-assisted turning and the vibratory tool, *Journal of materials processing technology*, 201 (1) (2008) 43-47.
- [15] J. Overcash, J.F. Cuttino, In-process modeling of dynamic tool-tip temperatures of a tunable vibration turning device operating at ultrasonic frequencies, *Precision Engineering*, 33(4) (2009) 505-515.
- [16] R. Muhammad, Numerical modelling of vibration-assisted turning of Ti-15333, *Procedia CIRP I* (2012) 347-352.
- [17] S. Patil, Modelling and simulation of effect of ultrasonic vibrations on machining of Ti6Al4V, *Ultrasonics* 54 (2) (2014) 694-705.
- [18] F. H. Cakir, Finite element modeling of ultrasonic assisted turning of Ti6Al4V alloy, *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 195 (2015) 2839-2848.
- [19] M. Lotfi, S. Amini, Effect of ultrasonic vibration on frictional behavior of tool–chip interface: Finite element analysis and experimental study, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 232(7) (2016) 1212-1220.

۳. زمان جدایش اصلی‌ترین عامل در تعیین میزان توانمندی فرایند تراشکاری به کمک ارتعاشات و اثربخشی آن در کاهش درجه حرارت است. در دامنه ثابت، افزایش سرعت قطعه باعث کاهش زمان جدایش شده و توانمندی این فرآیند در میزان کم کردن دما نسبت به تراش سنتی را کاهش می‌دهد. در سرعت ثابت نیز با افزایش دامنه ارتعاشات، زمان جدایش بیشتر شده و عملکرد ماشین‌کاری هیبریدی در کاهش درجه حرارت بهبود می‌یابد.

فهرست علائم

a	دامنه ارتعاش، μm
a_c	ضخامت براده تغییر شکل نیافته، mm
a_f	پیشروی، mm/rev
f	فرکانس، Hz
F_s	مؤلفه نیروی برش در صفحه برش، N
l_c	طول تماس ابزار و براده
l_s	طول ناحیه چسبیده
V_c	مؤلفه اصلی سرعت برش، m/s
V_s	مؤلفه سرعت برش در صفحه برش، m/s
V_w	سرعت قطعه‌کار، m/s

علامت یونانی

φ_n	زاویه صفحه برش نرمال
α_n	زاویه براده نرمال
ζ	نفوذ حرارتی
R_t	عدد حرارتی

منابع

- [1] D. Brehl, T. Dow, Review of vibration-assisted machining, *Precision engineering*, 32(3) (2008) 153-172.
- [2] F. Klocke, O. Dambon, B. Bulla, Ultrasonic assisted diamond turning of hardened steel with mono-crystalline diamond, *Proceedings of the 10th International Euspen Conference*, Zürich, Switzerland (2008).
- [3] K. J. Trigger, B. T. Chao, *An analytical evaluation of metal-cutting temperatures*, ASME (1950).
- [4] E. Usui, T. Shirakashi, T. Kitagawa, Analytical prediction of three dimensional cutting process—Part 3: Cutting temperature and crater wear of carbide tool, *Journal of Engineering for industry*, 100 (2) (1978) 236-243.
- [5] J. Tlustý, E. Orady, Effect of thermal cycling on tool wear in milling, *9th NAMRC Conference*, Penn. State University (1981).

- roughness and oil consumption, *Journal of Cleaner Production* 67 (2014) 265-276.
- [23] F.J. Zerilli, R.W. Armstrong, Dislocation-mechanics-based constitutive relations for material dynamics calculations, *Journal of Applied Physics* 61 (5) (1987): 1816-1825.
- [20] C. Milton, M. Shaw, *Metal cutting principles*. CIAIRENDON PRIESS· OXROIRD, (1984) 224-250.
- [21] E.M. Trent, P.K. Wright, *Metal cutting*, Butterworth-Heinemann (2000).
- [22] M. Sayuti, A.A. Sarhan, F. Salem, Novel uses of SiO₂ nano-lubrication system in hard turning process of hardened steel AISI4140 for less tool wear, surface

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

N. Abbasi, M. Razfar, M. Khajehzadeh, Experimental Investigation and Finite Difference Modeling of Cutting Tool Temperature Distribution During Ultrasonically Assisted Turning, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(3) (2018) 657-670.
DOI: 10.22060/mej.2017.12414.5327

