

شبیه‌سازی المان محدود فرایند برش متعامد و تعیین ضخامت لایه چسبنده به ابزار در ناحیه دوم برش

وحید نوروزی فرد^۱ و عقیل یوسفی کما^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری آزمایشگاه سیستم‌های دینامیکی و کنترلی پیشرفته - دانشکده مهندسی مکانیک

پرديس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۵/۱۱/۲۵، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۸/۵/۲۳، تاریخ تصویب ۸۸/۶/۲۲)

چکیده

در این مقاله، با استفاده از یک مدل دوبعدی با شرایط کرنش صفحه‌ای و کد المان محدود LS-DYNA آنالیز مکانیکی-حرارتی همزمان بر فرایند برش متعامد انجام شده است. تنش سیلان ماده با استفاده از مدل ترکیبی جانسون-کوک و اصطکاک در فصل مشترک ابزار-براده به کمک مدل اصطکاک چسبنده-لغزنده تعریف شده است. تکنیک مش‌ریزی تطبیقی در طول فرایند و در فواصل زمانی معین برای شبیه‌سازی جدایش براده مورد استفاده قرار گرفته است. توزیع دما و توزیع کرنش‌های پلاستیک در ناحیه دوم برش در سرعت‌های برشی مختلف بررسی شده و در انتها روشی برای تعیین ضخامت لایه چسبنده به ابزار در ناحیه دوم برش (BUL) با توجه به نمودار تغییرات گرادیان کرنش پلاستیک در ناحیه دوم ارائه شده است. نتایج به دست آمده برای ضخامت لایه چسبنده با نتایج تجربی مطابقت خوبی را نشان می‌دهد. در نهایت با استفاده از مدل ایجادشده، ضخامت لایه چسبنده در سرعت‌های برشی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده، کاهش ضخامت این لایه با افزایش سرعت برشی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: برش متعامد، المان محدود، لایه چسبنده (BUL)

مقدمه

چسبیدن ماده قطعه‌کار به سطح ابزار می‌شود. بنابراین در برش‌های بعدی، این لایه باعث افزایش زبری سطح ماشین‌کاری شده و باعث ایجاد لبه انباشته^۱ در ابزار می‌شود. با افزایش ضخامت این لایه در برش‌های متوالی، ماده چسبیده به ابزار کنده شده و قسمتی از سطح ابزار را با خود جدا می‌کند. این پدیده باعث سایش ابزار در سطح براده و ایجاد گودال سایش^۲ در این ناحیه می‌شود. چون افزایش ضخامت این لایه سبب بیشتر شدن اثرات مخرب آن می‌شود، عوامل ماشین‌کاری تا حد امکان باید در جهت کاهش ضخامت این لایه انتخاب شود [۲].

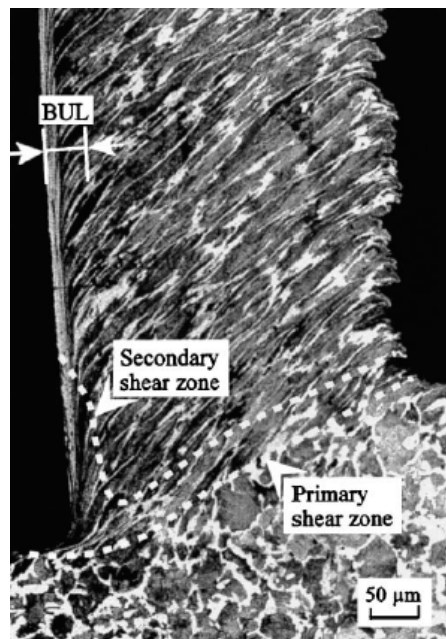
شکل (۱) سطح مقطع حکاکی‌شده^۳ براده فولاد AISI ۱۰۴۵ را نشان می‌دهد که با شرایط برش متعامد و با سرعت برشی ۲m/s و عمق براده تغییرشکل نیافته ۰/۲mm ماشین‌کاری شده است. در این شکل، نواحی اول و دوم برش و لایه BUL نشان داده شده‌اند [۳]. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، دانه‌های (ریز ساختار) قطعه‌کار در نزدیکی فصل مشترک خود با ابزار، در لایه‌ای به ضخامت در حدود ۲۰ الی ۵۰ میکرومتر با

هدف نهایی تولیدکنندگان، تولید قطعات با کیفیت بالا با صرف هزینه کمتر و نرخ تولید بالا است. از این رو ایجاد یک فرآیند ماشین‌کاری جدید مستلزم دانستن عوامل بهینه برش نظیر سرعت برشی و مشخصات هندسی ابزار برای شروع فرآیند است. این عوامل تأثیر مستقیمی بر شکل براده، نیروی برشی، عمر ابزار و اندازه نهایی قطعه‌کار دارند [۱]. علاوه بر این، بررسی پدیده‌هایی مانند اصطکاک و دما در فصل مشترک ابزار و قطعه‌کار از نظر تأثیرگذاری آنها بر کیفیت سطح ایجادشده توسط فرآیند ماشین‌کاری و عمر ابزار مورد توجه تولیدکنندگان و سازندگان ابزارهای برشی قرار گرفته است. یکی از پدیده‌های ایجادشده در فصل مشترک ابزار-براده در فرایند ماشین‌کاری لایه چسبنده به ابزار^۱ (BUL) در فصل مشترک ابزار و براده است که تأثیر مستقیمی بر درستی اندازه ابعادی محصول، کیفیت سطح ماشین‌کاری شده و میزان سایش ابزار دارد. در این پدیده، لایه نازکی از ماده قطعه‌کار با کرنش‌های پلاستیک بالایی قرار می‌گیرد که در ماشین‌کاری فلزات نرم مانند آلومینیوم و فولادهای با درصد کربن پایین، باعث

آنها عبور می‌کند، بنابراین خواص ماده در گره‌ها که ثابت هستند در حین حرکت ماده محاسبه می‌شود. استفاده از ترکیب فرمول‌بندی لاگرانژی و اولری در یک آنالیز که روش ALE^۵ نامیده شده است نیز در سال‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است [۱۸، ۱۷، ۱۶]. در این نوع آنالیز، المان‌ها نه به ماده متصل هستند و نه در فضا ثابت می‌مانند و در حالت کلی در فضا حرکت دارند، ولی این حرکت، مستقل از ماده است. روش اولری، فرآیند برش را در حالت پایدار شبیه‌سازی می‌کند؛ بنابراین هنگام شبیه‌سازی با این روش، شکل نهایی براده در حالت پایدار باید معلوم باشد که این عامل به طور معمول به وسیله سعی و خطا تعیین می‌شود که این یکی از معایب روش اولری است. از دیگر معایب این روش این است که نمی‌توان به وسیله آن تولید براده‌های ناپیوسته و منقطع را شبیه‌سازی کرد. همچنین به دست آوردن تنش‌های پسماند توسط این روش غیر ممکن است [۱۳]. در روش لاگرانژی، المان‌ها، ناحیه آنالیز را به طور واقعی پوشش می‌دهند و به همراه ماده قطعه‌کار حرکت کرده و تغییر شکل می‌دهند [۴]. این روش به ما اجازه می‌دهد که فرآیند ماشین‌کاری را از هنگام برخورد ابزار با قطعه‌کار تا رسیدن فرآیند به حالت پایا شبیه‌سازی کنیم. بنابراین شکل براده (ضخامت، میزان انحنا و غیره) را می‌توانیم در این روش به وسیله شبیه‌سازی المان محدود پیش‌بینی کنیم. اما برای شبیه‌سازی فرآیند برش متعامد با این روش نیاز به معیاری برای جدایش براده از قطعه‌کار وجود دارد. روش ALE شبیه‌سازی جریان ماده در نوک ابزار به وسیله فرمول‌بندی اولری، نیاز به معیار جدایش و مشکلات روش لاگرانژی را رفع می‌کند و همچنین با شبیه‌سازی لاگرانژی مرزهای ماده محدودیت روش اولری در این زمینه را از بین می‌برد. تنها نقطه ضعف این روش در این است که شکل اولیه براده باید از قبل تعیین شود و این کار با انجام تکرارها و سعی و خطا انجام می‌شود [۱۹].

برای جدایش براده از قطعه‌کار می‌توان از دو روش عمده به کار گرفته شده در شبیه‌سازی‌های محققان پیشین استفاده کرد که شامل تعریف معیار جدایش و انجام مش‌ریزی تطبیقی هستند. در روش تعریف معیار جدایش در مدل قطعه‌کار، لایه‌ای تعریف می‌شود که وظیفه آن جدایش براده از قطعه‌کار است. این لایه به طور معمول به شکل یک خط مدل‌سازی می‌شود که روی آن گره‌های

کرنش بالایی قرار گرفته‌اند که خمیدگی در دانه‌ها را پدید آورده است.



شکل ۱: مقطع حکاکی شده براده حاصل از برش متعامد فولاد [۳]

مروری بر پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه شبیه‌سازی فرآیند ماشین‌کاری، با استفاده از روش المان محدود نشان داد که مطالعه فرآیند ماشین‌کاری با استفاده از این روش در زمینه تأثیر هندسه ابزار [۶-۴] و سختی اولیه قطعه‌کار [۷، ۸] بر فرآیند ماشین‌کاری و شبیه‌سازی توزیع دما [۹، ۱۰]، تنش‌های پسماند [۱۱، ۱۲]، تشکیل براده منقطع [۱۳، ۱۴] در این فرآیند و ماشین‌کاری با سرعت بالا [۱، ۱۵] انجام شده است. ولی تا کنون از روش المان محدود برای تعیین ضخامت لایه چسبنده در فصل مشترک ابزار-براده استفاده نشده است. بنابراین در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود برش متعامد و تحلیل توزیع کرنش پلاستیک در نواحی نزدیک فصل مشترک ابزار-براده و شیب تغییرات کرنش پلاستیک سعی شده است، ضخامت لایه چسبنده به ابزار تعیین شود. همچنین تأثیر سرعت برشی بر ضخامت این لایه بررسی شده است.

به طور کلی دو نوع فرمول‌بندی لاگرانژی و اولری برای حل مسائل المان محدود وجود دارد. در فرمول‌بندی اولری، المان‌ها در فضا ثابت هستند و جریان ماده از روی

در انتها روشی برای تعیین ضخامت لایه چسبنده به ابزار با توجه به توزیع کرنش پلاستیک ارائه شده است. از این روش برای مطالعه اثر سرعت برشی بر ضخامت لایه چسبنده استفاده شده است. نتایج عددی با نتایج تجربی موجود در مقالات منتشر شده مقایسه شده است و مطابقت خوبی مشاهده شده است.

مدل المان محدود

شرایط شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این مقاله شامل تراشکاری لوله‌ای به ضخامت ۲ mm و به قطر ۸۰ mm از جنس فولاد AISI ۱۰۴۵ به وسیله ابزار با سطح براده تخت و بدون براده‌شکن از جنس کاربید تنگستن بدون پوشش با شماره استاندارد ISO-P ۲۰ است که به شکل فرآیند برش متعامد انجام شده است. سرعت برشی ابزار برابر ۱۰۵ الی ۲۱۰ متر بر دقیقه و سرعت پیشروی ۰/۱۶ میلی‌متر بر دور است. زوایای براده، آزاد و تنظیم اصلی ابزار به ترتیب ۵، ۵ و ۹۰ درجه هستند. شعاع گردی لبه برنده ابزار با استفاده از میکروسکوپ نوری اندازه‌گیری شده است و برابر ۳۳ μm است [۲۳]. آزمایش‌های تجربی مربوط به این شبیه‌سازی‌ها توسط گریزیک^۸ و همکارانش [۲۳-۲۵] انجام شده است و نتایج مربوط به این آزمایش‌ها شامل نیروی برشی، دمای متوسط براده در سطح تماس با ابزار، ضریب اصطکاک متوسط در سطح براده در مقالات معتبر به چاپ رسیده است. در این مقاله از نتایج تجربی مربوط به نیروی برشی برای تعیین تنش اصطکاکی در ناحیه اصطکاک چسبنده استفاده شده است. مشخصات ابزار، قطعه‌کار و فرآیند در جدول (۱) آمده است.

از المان‌های چهار گرهی با فرمول‌بندی کرنش صفحه‌ای برای مدل‌سازی برش متعامد استفاده شده است.

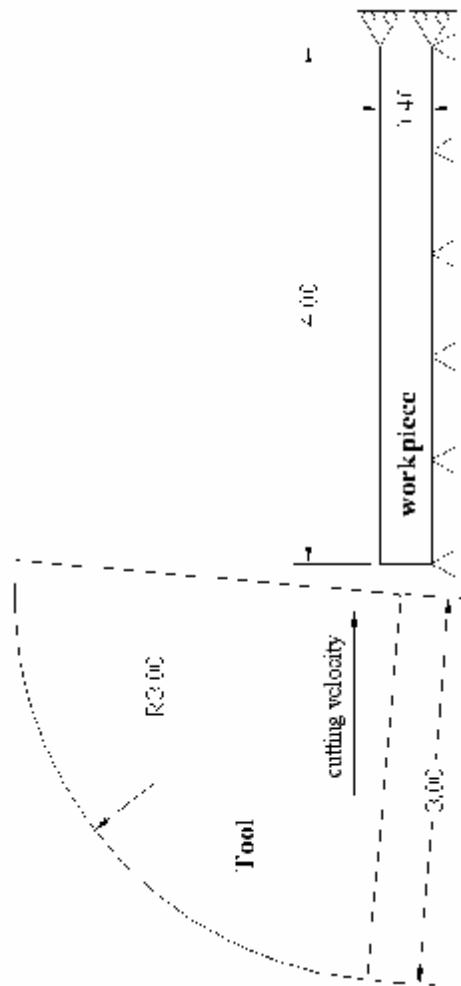
شکل (۲) نمای شماتیک مدل ایجاد شده را با اندازه‌گذاری و قیود اعمال شده نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، به دلیل محدودیت رایانه‌های حاضر، تنها قسمت کوچکی از ابزار و قطعه‌کار و در اندازه‌های مورد نیاز شبیه‌سازی شده است. ضخامت قطعه کار شبیه‌سازی شده در این مقاله، ۲/۵ برابر عمق برش است. برای اطمینان از کم بودن آثار مربوط به

براده و قطعه‌کار بر هم منطبق‌اند و به هم متصل شده‌اند. هنگامی که معیار جدایش ارضا شود، براده از قطعه‌کار جدا خواهد شد [۲۰]. مشکلات این روش ایجاد گپ در جلوی ابزار، توقف شبیه‌سازی در صورت جابه‌جا شدن لایه تعریف‌شده از محل خود در تغییر شکل‌های خشن و محدودیت آن در شبیه‌سازی ابزارهای دارای نوک با شعاع گردی و زاویه براده منفی هستند. روش دیگر برای شبیه‌سازی جدایش براده این است که فرآیند ماشین‌کاری را به صورت یک کنگره‌گذاری^۶ و تغییر شکل پیوسته در نظر بگیریم [۲۱] و از تکنیک مش‌ریزی تطبیقی برای شبیه‌سازی جدایش براده استفاده کنیم. در این نوع جدایش، هیچ ترک و رشد ترکی در نوک ابزار اتفاق نمی‌افتد. برخی از نتایج تجربی [۲۲] نیز کنگره‌گذاری را به عنوان یک مکانیزم واقعی تشکیل براده پیشنهاد کرده‌اند. در این روش، ابزار به داخل قطعه‌کار وارد می‌شود و پیشروی می‌کند تا جریان مواد در جلوی ابزار ایجاد شود. در نتیجه پیشروی ابزار المان‌ها شکل اولیه خود را از دست می‌دهند. بنابراین لازم است که المان‌بندی دوباره تجدید شود. استفاده از روش مش‌ریزی تطبیقی، مشکلات و محدودیت‌های روش معیار جدایش را ندارد و به وسیله آن هر نوع هندسه ابزار و زوایای براده منفی قابل تحلیل است. اما استفاده از این روش نیاز به زمان محاسبه زیاد دارد و پرهزینه است.

در این مقاله با استفاده از یک مدل المان محدود لاگرانژی و به کارگیری تکنیک مش‌ریزی تطبیقی، فرآیند برش متعامد شبیه‌سازی شده است. از نرم‌افزار المان محدود صریح^۷ LS-DYNA و آنالیز حرارتی-مکانیکی هم‌زمان استفاده شده است. فاصله زمانی بین دو مش‌ریزی با توجه به تغییر شکل‌های پلاستیک ایجادشده در نواحی برش در زمان شبیه‌سازی و انجام آزمایش‌های سعی و خطا به شکل تابعی از زمان شبیه‌سازی تعیین شده است. برای شبیه‌سازی شرایط پیچیده اصطکاک در فصل مشترک ابزار- براده، مدل اصطکاک چسبنده- لغزنده به کار گرفته شده است. تنش برشی اصطکاکی در ناحیه چسبنده، با توجه به اندازه‌گیری‌های تجربی نیروی برشی منتشرشده در مقالات، تعیین شده است و مقدار ضریب اصطکاک در ناحیه لغزنده با توجه به شبیه‌سازی‌های پیشین محققان، برای همه شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این مقاله، ثابت در نظر گرفته شده است.

جدول ۱: مشخصات کلی فرایند ماشینکاری شبیه‌سازی شده.

مشخصات قطعه‌کار:	
AISI ۱۰۴۵	جنس
۲mm	ضخامت
۸۰mm	قطر متوسط
مشخصات فرایند:	
۱۰۵-۲۱۰m/min	سرعت برشی
۰/۱۶mm	ضخامت براده تغییر شکل نیافته
مشخصات ابزار:	
-۵°	زاویه براده
۵°	زاویه آزاد
۹۰°	زاویه تنظیم اصلی
۳۳μm	شعاع گردی لبه برنده



شکل ۲: شماتیک ابزار و قطعه‌کار شبیه‌سازی شده.

از مدل رفتار ماده جانسون-کوک برای تعریف تنش سیلان در ماده قطعه‌کار استفاده شده است که به این ترتیب تعریف می‌شود:

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (2)$$

که در آن ε_p کرنش پلاستیک، $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش، $\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنش مرجع، T_{room} دمای محیط، T_{melt} دمای ذوب قطعه و T دما را نشان می‌دهد. m, n, C, B, A ثابت‌های ماده هستند که با استفاده از آزمایش تعیین می‌شوند. ثابت‌های ماده برای فولاد AISI ۱۰۴۵ توسط جاسپرز [۲۶] به کمک آزمایش SHPB^۱ تعیین شده‌اند که در

شرایط مرزی بر نتایج شبیه‌سازی یک مدل با ضخامت قطعه‌کار، ۵ برابر عمق برش تحلیل المان محدود و نتایج با هم مقایسه شد که میزان تغییر در نتایج به دست آمده قابل ملاحظه نبود. در این شبیه‌سازی‌ها، سرعت برشی به ابزار اعمال می‌شود و قطعه‌کار به وسیله قیود نشان داده شده در شکل (۲) در جای خود ثابت شده است. تغییر شکل قطعه‌کار به صورت الاستیک - پلاستیک و اندازه المان‌های آن ۹/۵ میکرومتر در نظر گرفته شده است. رفتار ماده ابزار به صورت صلب شبیه‌سازی شده است و المان‌بندی آن در فصل مشترک ریز و با فاصله گرفتن از آن درشت‌تر می‌شود، زیرا در فصل مشترک گرادیان تغییرات دما بالا است و تنها آنالیز حرارتی روی ابزار انجام می‌گیرد. ابزار با ۱۳۴۴ و قطعه‌کار با ۱۷۶۷۰ المان چهار گرهی المان‌بندی شدند که روی المان‌های ابزار تحلیل حرارتی خالص و برای قطعه‌کار تحلیل حرارتی- مکانیکی انجام شد. زمان حل هر شبیه‌سازی توسط رایانه‌ای با قدرت پردازشگر ۳ گیگا هرتز برابر ۲۰ الی ۲۴ ساعت به طول می‌انجامید.

اینکه به سرعت حرکت براده برسد. با چنین شرایطی (اصطکاک چسبنده) سطح تماس واقعی ابزار با براده به مقدار ظاهری آن نزدیک می‌شود و تنش اصطکاکی برابر تنش تسلیم برشی در ماده براده خواهد شد. بنابراین حرکت براده بر سطح براده ابزار با استفاده از واژه اصطکاک لغزنده و قانون کولمب قابل توضیح نیست. بعد از ناحیه چسبنده، ناحیه لغزنده قرار دارد که در انتهای این ناحیه براده از ابزار جدا می‌شود. در این ناحیه به دلیل کاهش تنش‌های عمودی شرایط اصطکاک چسبنده در آن وجود ندارد و دو سطح روی هم می‌لغزند. اصطکاک در این ناحیه با استفاده از قانون کولمب قابل توضیح است.

از میان مدل‌های تعریف اصطکاک مدل اصطکاک چسبنده - لغزنده واقع‌گرایانه‌تر بوده و با توزیع تجربی تنش‌های اصطکاکی در فصل مشترک ابزار براده مطابقت بیشتری دارد. این مدل، اصطکاک را در دو ناحیه مجزا که به آنها ناحیه اصطکاک چسبنده و لغزنده گفته می‌شود، به طور جداگانه به این ترتیب محاسبه می‌کند:

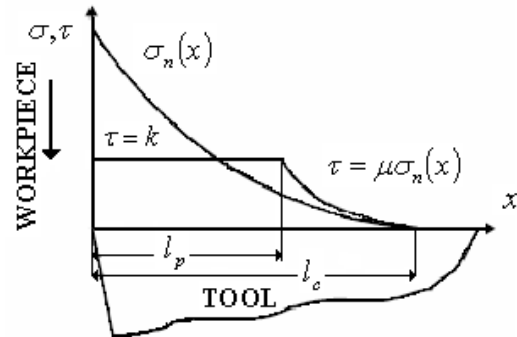
$$\tau = \mu \sigma_n, \quad \mu \sigma_n < k \quad (3)$$

$$\tau = k, \quad \mu \sigma_n \geq k \quad (4)$$

که در آن τ تنش اصطکاکی، σ_n تنش عمودی، μ ضریب اصطکاک و k تنش برش سیلان ماده براده هستند. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در این مقاله از این مدل برای تعریف اصطکاک در فصل مشترک ابزار-براده استفاده شده است. از ضریب اصطکاک 0.65 در شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است و تنش برشی حداکثر در ناحیه چسبنده از مقایسه نیروی برشی اصطکاکی حاصل از شبیه‌سازی با نتایج تجربی برای سرعت‌های برشی مختلف تعیین شده است که تنش‌های به دست آمده در جدول (۴) نشان داده شده است.

فرایند برش متعامد فلزات شامل تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ همراه با تولید مقادیر قابل توجهی گرما است. منبع گرمای تولیدشده اصطکاک بین ابزار و براده، همچنین اصطکاک بین ابزار و سطح ماشین‌کاری شده و تغییر شکل‌های پلاستیک است. از سوی دیگر افزایش دما در فلزات، باعث کاهش تنش سیلان در ماده می‌شود که به آن نرمی حاصل از دما گفته می‌شود. این فرایند یک مسئله پیچیده حرارتی و مکانیکی همزمان است. بنابراین در این تحقیق آنالیز حرارتی-مکانیکی همزمان روی آن انجام شده است. خواص حرارتی ابزار و قطعه‌کار که برای

جدول (۲) آمده است. ضرایب مربوط به خواص الاستیک ابزار و قطعه‌کار شامل مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و چگالی نیز در جدول (۳) نشان داده شده‌اند.



شکل ۳: تنش‌های عمودی و اصطکاکی در سطح براده ابزار.

جدول ۲: ثابت‌های مدل ماده جانسون - کوک.

A	B	C	m	n
۵۵۳MPa	۶۰۰MPa	۰/۰۱۳۴	۱	۰/۲۳۴

جدول ۳: ثابت‌های الاستیک ابزار و قطعه‌کار.

	E	ν	ρ
ابزار	۸۰۰GPa	۰/۲	۱۵۰۰۰Kg/m ³
قطعه‌کار	۲۰۷GPa	۰/۳	۷۸۳۰Kg/m ³

جدول ۴: تنش اصطکاکی در ناحیه چسبنده.

سرعت برشی m/min	۲۱۰	۱۵۰	۱۰۵
k (MPa)	۳۹۰	۴۵۰	۵۱۰

شرایط اصطکاکی بین ابزار و براده در فصل مشترک ابزار- براده بسیار پیچیده است و تعیین صحیح آن در شبیه‌سازی المان محدود مهم‌تر و تأثیرگذارتر از عوامل دیگر همچون خواص تنش سیلان در ماده است. شکل (۳) سطح مقطع ابزار و براده را نشان می‌دهد که در آن، توزیع تنش‌های عمودی و اصطکاکی در فصل مشترک ابزار- براده نیز نشان داده شده است. با توجه به این شکل، ناحیه تماس بین ابزار و براده را می‌توان به دو ناحیه اصطکاک چسبنده و لغزنده تقسیم کرد. در ناحیه چسبنده، آخرین لایه از اتم‌های ماده براده ساکن هستند، سرعت لایه‌های همسایه با شیب زیاد افزایش می‌یابد تا

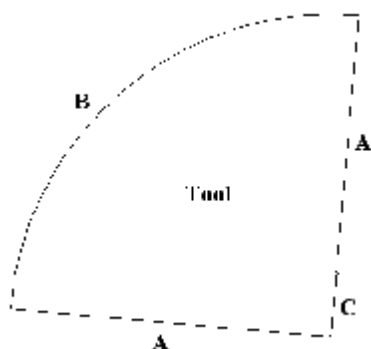
زمان‌های مختلف شبیه‌سازی در شکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۷) در زمان‌های ابتدای شبیه‌سازی تغییر شکل المان‌ها بیشتر در نواحی اطراف نوک ابزار اتفاق می‌افتد، ولی در ادامه این تغییر شکل‌ها به فصل مشترک ابزار - براده منتقل می‌شود و مقدار آنها نیز افزایش می‌یابد. بنابراین کاهش فاصله زمانی بین دو مش‌ریزی در زمان‌های بعد از $350 \mu\text{s}$ به عنوان یک راه حل در نظر گرفته شد.

جدول ۵: خواص فیزیکی ابزار و قطعه‌کار.

قطعه‌کار AISI ۱۰۴۵	ابزار کاربردی	
۷۸۳۰	۱۵۰۰۰	ρ (Kg/m ³)
۴۵۲	۲۰۳	c (J/Kg.°C)
۴۷	۴۵	k (W/m.°C)

جدول ۶: عوامل مربوط به شرایط اولیه و شرایط مرزی.

دمای اولیه قطعه‌کار	۲۵
دمای محیط	۲۵
ضریب همرفتی هوا	$20 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
ضریب هدایت حرارتی تماس	$1/9 \times 10^5 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$



شکل ۴: سطوح مختلف ابزار برای اعمال شرایط مرزی آنالیز حرارتی.

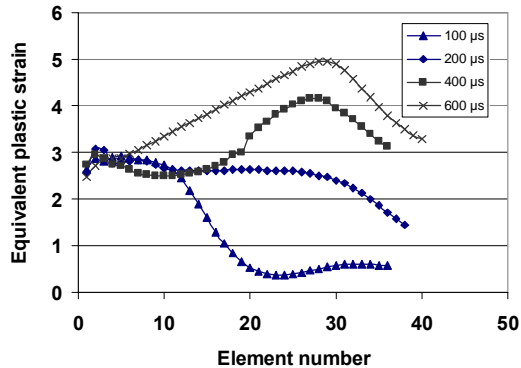
برای حذف نوسانات از نیروی برشی مش‌ریزی تطبیقی با فرکانس متغیر انجام شد و در $300 \mu\text{s}$ ، اول شبیه‌سازی از فاصله زمانی بین دو مش‌ریزی $3/5 \mu\text{s}$ و در ادامه از مقدار $2 \mu\text{s}$ استفاده شده است. شکل (۸) نمودار مؤلفه‌های عمودی و اصطکاکی نیروی برشی را برای شبیه‌سازی برش متعامد با سرعت برشی 210 متر بر دقیقه نشان می‌دهد. مقایسه شکل‌های (۵) و (۸) مناسب

مدل‌سازی قسمت حرارتی آنالیز استفاده شده است. در جدول (۵) آمده است. تمام سطوح قطعه‌کار به جز سطح در تماس با ابزار به صورت آدیاباتیکی در نظر گرفته شده است. در فصل مشترک ابزار با براده تماس حرارتی با اعمال ضریب هدایت حرارتی تماس شبیه‌سازی شده است. برای سطوح آزاد ابزار که با هوا در تماس هستند، شرایط همرفتی با ضریب همرفتی $20 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ و دمای محیط $25 \text{ } ^\circ\text{C}$ درجه در نظر گرفته شده است. این سطوح با حرف A در شکل (۴) نشان داده شده است. شرایط مرزی سطح B به صورت دما ثابت و با دمای 125 درجه انتخاب شده است. این انتخاب برای نزدیک‌تر شدن شرایط توزیع دما در نوک ابزار و فصل مشترک به شرایط واقعی انجام گرفته است. سطح C نیز سطح در تماس با ابزار است. عوامل مربوط به شرایط مرزی نیز در جدول (۶) نشان داده شده‌اند.

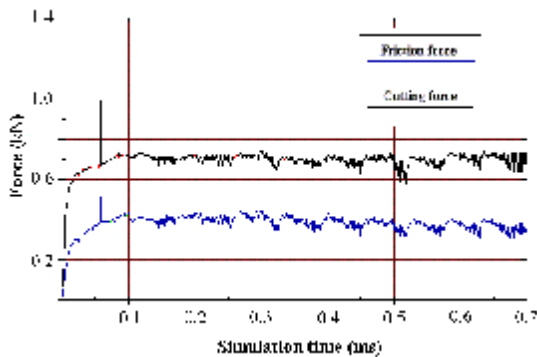
تعیین فاصله زمانی مناسب برای مش‌ریزی تطبیقی

فاصله زمانی بهینه بین دو مش‌ریزی پارامتری تعیین‌کننده برای رسیدن به شبیه‌سازی قابل اعتماد، فرایند ماشین‌کاری است. در این تحقیق، ابتدا استفاده از فرکانس مش‌ریزی ثابت در کل زمان شبیه‌سازی، مورد آزمایش قرار گرفت که این روش باعث ایجاد نوسانات شدید در انتهای منحنی نیروی برشی نسبت به زمان شبیه‌سازی می‌شود. شکل (۵) نمودار مؤلفه‌های نیروی برشی را نسبت به زمان شبیه‌سازی نشان می‌دهد که برای شبیه‌سازی برش متعامد با سرعت برشی 210 متر بر دقیقه و فاصله زمانی مش‌ریزی ثابت $3/5 \mu\text{s}$ رسم شده است که دو نوع نوسان در نیروها در نمودار مشهود است که یک نوسان با دامنه کوچک که در کل نمودار وجود دارد و دیگری نوسانات با دامنه خیلی بزرگ که در زمان‌های بعد از $350 \mu\text{s}$ ایجاد شده‌اند. یکی از دلایل به وجود آمدن این نوسانات با دامنه بزرگ، ممکن است به دلیل مناسب نبودن فرکانس مش‌ریزی برای زمان‌های انتهای شبیه‌سازی باشد. نوسانات با دامنه کوچک ممکن است به دلایل مختلف به وجود آمده باشند که در اینجا مورد بحث نیستند. در شکل (۶) فصل مشترک ابزار براده با پاره خط AB نشان داده شده است. نمودار تغییرهای کرنش پلاستیک معادل در امتداد پاره خط AB برای

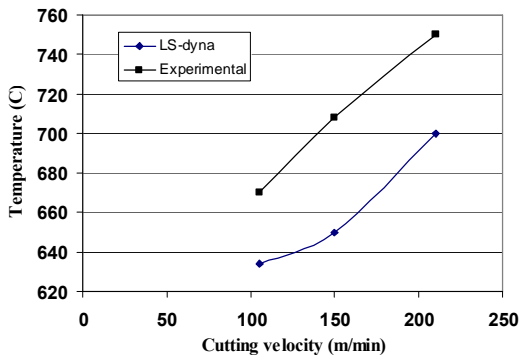
دما این فاصله نیز افزایش می یابد.



شکل ۷: کرنش پلاستیک معادل در فصل مشترک ابزار- براده.



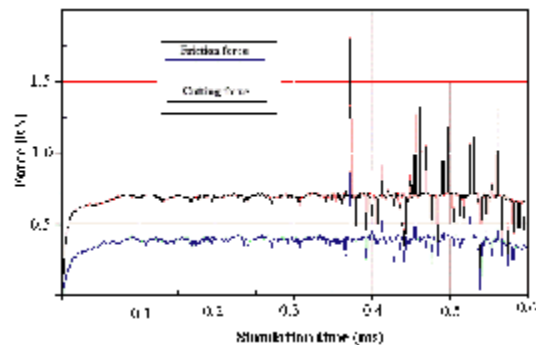
شکل ۸: نیروهای برشی در شبیه سازی با فرکانس متغییری.



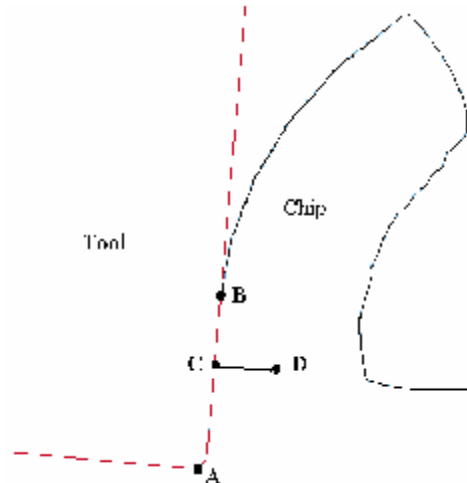
شکل ۹: دمای متوسط براده در سرعت های برشی مختلف.

ثابت های رفتار ماده جانسون- کوک که برای تعیین تنش سیلان ماده قطعه کار به کار رفته است، برای شرایط ماده در ناحیه اول برش تعیین شده اند [۲۶]. بنابراین آزمایش های انجام شده روی ماده در دمای ۲۵ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد انجام شده است که این دماها بسیار پایین تر از دمای براده در ناحیه دوم برش است. بنابراین یکی از دلایل فاصله ایجاد شده بین نتایج تجربی و عددی

بودن مشریری با فرکانس متغییر و حذف نوسانات اضافی با دامنه بزرگ را نشان می دهد.



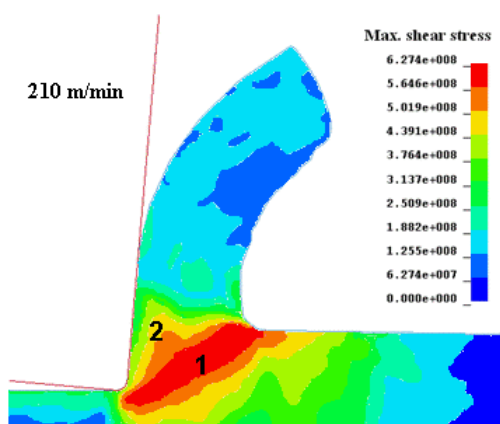
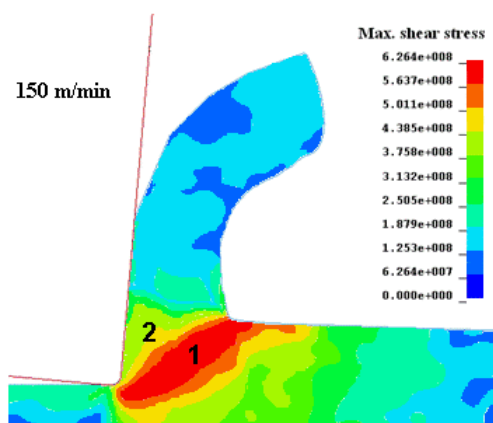
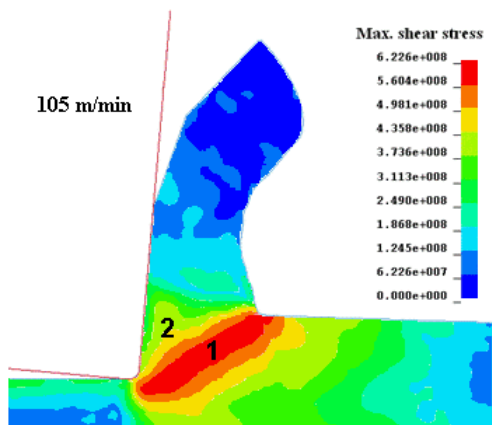
شکل ۵: نیروهای برشی برای شبیه سازی با فرکانس مشریری ثابت.



شکل ۶: فصل مشترک ابزار- براده.

شبیه سازی برش متعامد با سرعت های برشی مختلف

برای مطالعه تأثیر سرعت برشی بر تشکیل براده، توزیع دما و توزیع کرنش پلاستیک در ناحیه دوم برش شبیه سازی فرایند برش متعامد با سرعت های برشی ۲۱۰، ۱۵۰ و ۱۰۵ متر بر دقیقه انجام شده است. در شکل (۹) نمودار دمای براده در فصل مشترک بر حسب سرعت برشی نشان داده شده است و با مقادیر عددی به دست آمده از اندازه گیری تجربی [۲۷] مقایسه شده است. همان گونه که در شکل (۹) می بینیم، بین نتایج روش المان محدود و نتایج تجربی برای پیش بینی دمای براده در فصل مشترک فاصله ای وجود دارد که با افزایش سرعت برشی و



شکل ۱۰: توزیع تنش برشی ماگزیمم در نواحی برش در سرعت‌های مختلف برشی.

پراکندگی گرما در براده افزایش می‌یابد و از سوی دیگر تولید انرژی کاهش می‌یابد. کاهش دما در فصل مشترک، تنش تسلیم براده و نیروی اصطکاک در برش متعامد را افزایش می‌دهد. علاوه بر افزایش تنش برشی اصطکاکی در فصل مشترک، کاهش سرعت برشی، تغییراتی را در نحوه توزیع کرنش پلاستیک در ناحیه دوم برش ایجاد

در باره پیش‌بینی دمای برش اختلاف تنش سیلان در فصل مشترک ابزار- براده با مقدار واقعی، آن است که کاهش فاصله بین منحنی نتایج تجربی و عددی در شکل (۹) برای سرعت برشی ۱۰۵ m/min نسبت به سرعت ۲۱۰ m/min این موضوع را تأیید می‌کند، زیرا با کاهش سرعت برشی، دمای براده کاهش می‌یابد، بنابراین پیش‌بینی مدل ماده جانسون-کوک برای تنش سیلان به شرایط ماده در فصل مشترک نزدیک‌تر می‌شود.

در شکل (۱۰) توزیع تنش برشی ماگزیمم و شکل براده در سرعت‌های برشی مختلف نشان داده شده است. در این شکل، نواحی برش اول و دوم با توجه به ماگزیمم تنش‌های برشی به وجود آمده قابل تشخیص هستند که این نواحی با اعداد ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند.

ناحیه اول برش در ضخیم‌ترین قسمت در حدود ۸۰ الی ۹۰ میکرومتر ضخامت دارد که این اعداد با نتایج تجربی جاسپر [۳] که با استفاده از میکرو سختی‌سنجی ضخامت این ناحیه را ۷۵ میکرومتر به دست آورده است، همخوانی خوبی دارد. علاوه بر این، در شکل (۱۰) تأثیر کاهش سرعت برشی بر کاهش خمیدگی براده قابل مشاهده است که این نتایج با نتایج متالوگرافی از مقطع براده [۳] مطابقت خوبی دارد. محققان دلیل خمیدگی براده را اختلاف دمای براده در راستای ضخامت آن عنوان کرده‌اند، به طوری که اختلاف افزایش طول براده در دو سوی آن باعث خمیدگی آن می‌شود. کاهش خمیدگی براده با افزایش سرعت برشی نیز با همین استدلال قابل توضیح است. زیرا در سرعت‌های برشی پایین، دمای براده در فصل مشترک آن با ابزار کمتر است؛ بنابراین اختلاف دمای براده در امتداد ضخامت آن و در نتیجه خمیدگی نیز کاهش می‌یابد.

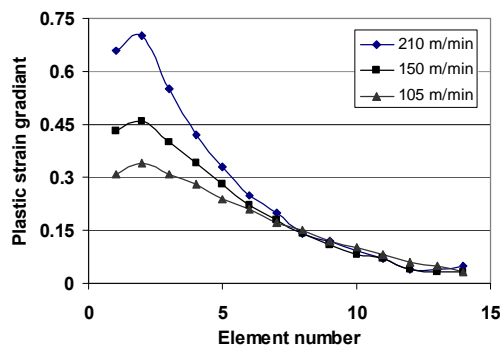
توزیع دما و کرنش پلاستیک در فصل مشترک ابزار و براده و تعیین ضخامت لایه چسبنده

شکل (۱۱) نمودار تغییرات دما در امتداد پاره خط CD از شکل (۶) را برای سرعت‌های برشی مختلف نشان می‌دهد. نقطه C واقع در شکل (۶) نقطه‌ای است که حداکثر دما و کرنش پلاستیک را دارد. در شکل (۱۱) با کاهش سرعت برشی دمای براده در فصل مشترک و گرادیان دما کاهش یافته است. با کاهش سرعت برشی، مقدار انرژی گرمایی که توسط ابزار جذب می‌شود و

پلاستیک و مقدار این عامل در پنج المان اول در سرعت‌های برشی مختلف تفاوت زیادی دارد و با دور شدن از لبه ابزار، این تفاوت‌ها کمتر می‌شود.

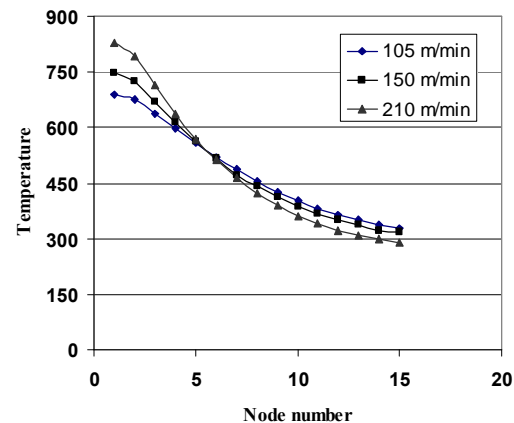
در مطالعات تجربی، مقاطع حاصل از برش متعام در سرعت‌های برشی مختلف که توسط جاسپرز^{۱۰} و داتزبرگ^{۱۱} [۳] روی فولاد AISI ۱۰۴۵ انجام شده است، به وجود لایه‌ای به نام لایه چسبنده (BUL) در مجاورت فصل مشترک ابزار- براده و در ناحیه دوم برش اشاره شده است. نتایج متالوگرافی حاکی از وجود کرنش‌های پلاستیک بالا در این لایه و خمیدگی دانه‌های (ریز ساختار) قطعه کار در این ناحیه است. در ماشین‌کاری، فلزات نرم‌تر مانند آلومینیم و فولادهای کم‌کربن این لایه اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا فلزات نرم‌تر در کرنش‌های پلاستیک بالا راحت‌تر برش خورده و ماده قطعه کار به ابزار می‌چسبد. این پدیده باعث کاهش دقت ابعادی، افزایش زبری سطح ماشین‌کاری شده و افزایش سایش ابزار می‌شود. بنابراین به دست آوردن راهی برای تعیین ضخامت این لایه به وسیله روش المان محدود، راه را برای تحقیقات بیشتر در این زمینه و تعیین عوامل مناسب ماشین‌کاری فلزات نرم با حداقل ضخامت لایه ذکر شده هموار می‌کند. در این مقاله سعی شده است با تحلیل نمودار تغییرات کرنش پلاستیک در ناحیه دوم برش به این هدف برسیم.

با توجه به شکل (۱۲) در نمودار تغییرات کرنش پلاستیک، شیب این تغییرات در نزدیکی لبه ابزار بسیار بالا بوده و به سرعت افت می‌کند. چنین به نظر می‌رسد که این گرادیان کرنش پلاستیک بالا مربوط به لایه BUL باشد.

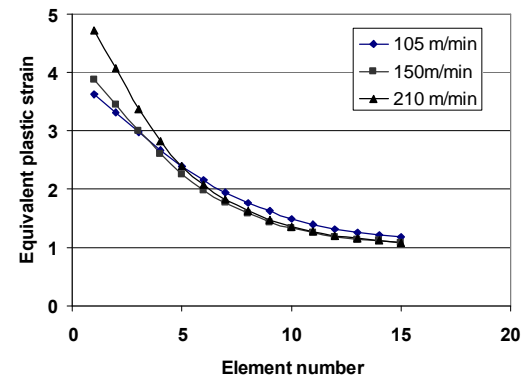


شکل ۱۳: گرادیان کرنش پلاستیک.

می‌کند. نمودار تغییرات کرنش پلاستیک معادل در امتداد پاره خط CD برای سرعت‌های برشی مختلف در شکل (۱۲) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش سرعت برشی، مقدار ماکزیمم کرنش پلاستیک و گرادیان آن در ناحیه دوم برش افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش سرعت برشی، برش در ناحیه دوم موضعی‌تر می‌شود. دلیل موضعی تر شدن برش در این ناحیه این است که چون گرما زمانی برای خروج از ناحیه تولید گرما ندارد در این ناحیه مانده و باعث ایجاد نرمی حاصل از دما در این ناحیه شده و تغییر شکل‌های بیشتر را باعث می‌شود. بنابراین بیشتر تغییر شکل‌های پلاستیک در ناحیه‌ای کوچک به وقوع می‌پیوندد.



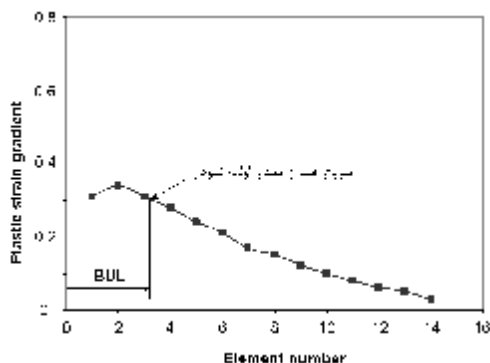
شکل ۱۱: توزیع دما در ناحیه دوم برش.



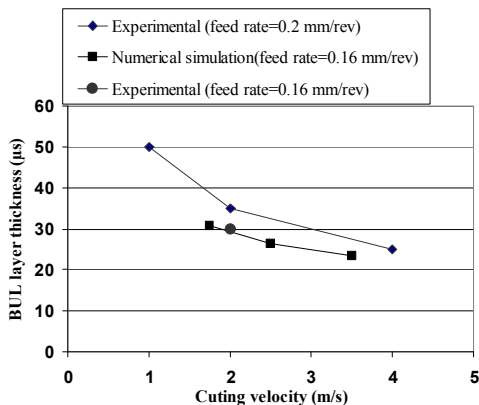
شکل ۱۲: توزیع کرنش پلاستیک در ناحیه دوم برش.

اگر شکل (۱۲) را با دقت بیشتر مورد توجه قرار دهیم، به این نتیجه می‌رسیم که گرادیان تغییرات کرنش

میلی متر بر دور انجام شده است. با توجه به این شکل، مطابقت خوبی بین نتایج عددی و نتایج تجربی با سرعت پیشروی ۰/۱۶ مشاهده می شود. این شکل، کاهش ضخامت لایه چسبنده با افزایش سرعت برشی را نشان می دهد. همچنین ضخامت این لایه با افزایش سرعت پیشروی افزایش می یابد.



شکل ۱۶: ضخامت لایه چسبنده در سرعت برشی ۱۰۵ m/min



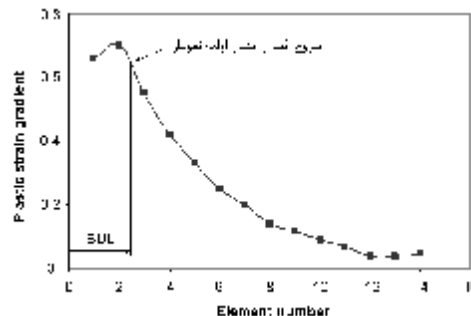
شکل ۱۷: نمودار تغییرات ضخامت لایه BUL بر حسب سرعت برشی.

نتیجه گیری

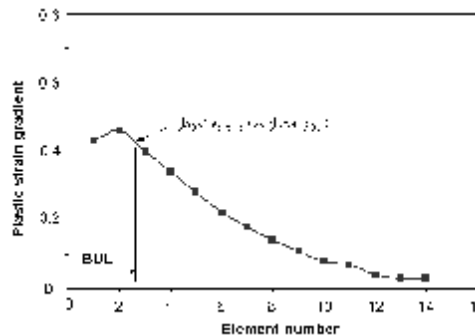
در این مقاله با استفاده از یک مدل المان محدود لاگرانژی و بهره گیری از تکنیک مش ریزی تطبیقی برش متعامد فولاد AISI ۱۰۴۵ به کمک نرم افزار LS-DYNA شبیه سازی شد. از آنالیز حرارتی- مکانیکی همزمان برای شبیه سازی شرایط پیچیده و به هم پیوسته حرارتی و مکانیکی در برش متعامد استفاده شد. با توجه به نتایج به دست آمده، می توان به نکات زیر اشاره کرد:

۱- نیروهای برشی حاصل از شبیه سازی با فرکانس مش ریزی متغیر با حالت فرکانس ثابت مقایسه شد و

در شکل (۱۳) نمودار تغییرات گرادیان کرنش پلاستیک برای سرعت های برشی مختلف نشان داده شده است. در نمودارهای این شکل، گرادیان کرنش پلاستیک در ابتدای نمودار، اندکی افزایش و سپس به شدت کاهش می یابد و متوسط تغییرات در قسمت ابتدایی نمودار کم است. در این مقاله، فاصله ابزار تا نقطه ای که گرادیان کرنش در آن نقطه بعد از یک افزایش کم به مقدار اولیه خود در ابتدای نمودار می رسد، به عنوان ضخامت لایه چسبنده به ابزار BUL پیشنهاد شده است. به عبارت دیگر نقطه شروع افت از مقدار اولیه گرادیان کرنش به عنوان مرز لایه چسبنده در نظر گرفته شده است که این نقطه و ضخامت لایه چسبنده در شکل های (۱۴) تا (۱۶) برای هر یک از منحنی های شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۴: ضخامت لایه چسبنده در سرعت برشی ۲۱۰ m/min



شکل ۱۵: ضخامت لایه چسبنده در سرعت برشی ۱۵۰ m/min

شکل (۱۷) نمودار تغییرات ضخامت لایه چسبنده به ابزار را نسبت به سرعت برشی نشان می دهد. همچنین در این شکل، نتایج تجربی مربوط به این عامل نشان داده شده است. داده های تجربی برای سرعت پیشروی ۰/۱۶ و ۰/۲۰ میلی متر دور از مرجع [۳] نشان داده شده است. شبیه سازی های عددی نیز برای سرعت پیشروی ۰/۱۶

- ۵- موضعی شدن برش از دلایل کاهش ضخامت لایه چسبنده به ابزار در سرعت‌های برش بالا است. بنابراین با توجه به تغییرات ضخامت لایه چسبنده نسبت به سرعت برشی و سرعت پیشروی برای برش فلزات نرم که در آنها چسبیدن ماده قطعه کار به ابزار اهمیت بیشتری دارد، سرعت برشی بالا و سرعت پیشروی کم پیشنهاد می‌شود.
- ۶- مقایسه نتایج به دست آمده برای ضخامت لایه چسبنده به ابزار از داده‌های شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی نشان داد که استفاده از نمودار گرادیان کرنش پلاستیک برای به دست آوردن ضخامت لایه چسبنده موفقیت آمیز بوده است.
- ۷- بنابراین نتایج به دست آمده در این مقاله، نشان دهنده قابلیت روش المان محدود در پیش‌بینی لایه چسبنده است و برای انجام پژوهش‌های آتی در زمینه تعیین ضخامت لایه چسبنده به ابزار برای فلزات مختلف قابل استفاده است.
- حالت فرکانس متغیر به دلیل حذف نوسان‌ها از نیروی برش برای انجام شبیه‌سازی‌های دیگر پیشنهاد می‌شود.
- ۲- شبیه‌سازی عددی قادر به پیش‌بینی دمای براده در فصل مشترک با دقت قابل قبول است و برای افزایش دقت این پیش‌بینی نیاز به تعیین ثابت‌های مدل ماده در شرایط دما و کرنش ناحیه دوم برش است.
- ۳- سرعت برشی به دلیل افزایش اختلاف دمای سطوح براده در امتداد ضخامت میزان خمیدگی براده را افزایش می‌دهد که شبیه‌سازی المان محدود این رفتار براده را به خوبی نشان می‌دهد.
- ۴- افزایش سرعت برشی باعث کاهش رسانش گرما به ابزار و براده می‌شود. در نتیجه دما در محل تولید مانده و باعث ایجاد نرمی حاصل از دما در ماده می‌شود و تغییر شکل در فصل مشترک موضعی‌تر می‌شود. به همین دلیل در سرعت‌های برشی بالا، دمای فصل مشترک افزایش و نیروهای برشی کاهش می‌یابد. بنابراین ماشین‌کاری با سرعت بالا از نظر کاهش مصرف انرژی ارجحیت دارد.

مراجع

- 1 - Marusich, T. D and Ortiz, M. (1985). "Modelling and simulation of high-speed machining." *International Journal of numerical methods in engineering*, V. 38, No. 21, PP. 3675-3694.
- 2 - Carrilero, M. S., Bienvenido, R., Sanchez, J. M., Alverz M., Gonzalez, A. and Marcos, M. (2002). "A SEM and EDS insight into the BUL and BUE differences in the turning processes of AA2024 AL-CU alloy" *International Journal of machine tools & manufacture*, V.42, PP 215-220.
- 3 - Jaspers, S. P. F. C. and Dautzenberg, J. H. (2002). "Material behavior in metal cutting: strains, strain rates and temperatures in chip formation." *Journal of materials processing technology*, V. 121, PP. 123-135.
- 4 - LI, K., Gao, X. L. and Suterland, J. W. (2002). "Finite element simulation of the orthogonal metal cutting process for qualitative understanding of the effects of crater wear on the chip formation process." *Journal of material processing technology*, V. 127, PP. 309-324.
- 5 - Gu, L. Z., Wang, D., Xing, L., Chang, J., and Chen, G. J. (2002). "Computer simulation and optimization of metal cutting process for mild carbon steels." *Journal of materials processing technology*, V. 129, PP. 60-65.
- 6 - Yung-Chang Yen, Anurag Jain and Taylan Altan. (2004). "A finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries." *Journal of Materials Processing Technology*, V. 146, PP. 72-81.
- 7 - Guo, Y. B. and Yen, David W. (2004) "A FEM study on mechanisms of discontinuous chip formation in hard machining." *Journal of Materials Processing Technology*, V. 155, PP. 1350-1356.
- 8 - Domenico Umbrello, Jiang Hua and Rajiv Shivpuri. (2004) "Hardness-based flow stress and fracture models for numerical simulation of hard machining AISI 52100 bearing steel." *Materials Science and Engineering A*, V. 374, PP. 90-100.

- 9 - Masillamani, D. P. and Chessa, J. (2006). "Determination of optimal cutting conditions in orthogonal metal cutting using LS-DYNA with design of experiments approach." *Proc. of 8th International LS-DYNA user's conference*.
- 10 - Filice, L., Umbrello, D., Beccari, S. and Micari, F. (2006). "On the FE codes capability for tool temperature calculation in machining processes." *Journal of Materials Processing Technology*, V. 174, PP. 286–292.
- 11 - Monaghan, J. and MacGinley, T. (1999). "Modeling the orthogonal machining process using coated carbide cutting tools." *Computational Materials Science*, V.16, PP. 275-284.
- 12 - MacGinley, T. and Monaghan, J. (2001). "Modeling the orthogonal machining process using coated carbide cutting tools." *Journal of Materials Processing Technology*, V. 118, PP. 293-300.
- 13 - Bäker, M. (2002). "Joachim Rösler, Carsten Siemers, A finite element model of high speed metal cutting with adiabatic shearing." *Computers and Structures*, V. 80, PP. 495–513.
- 14 - Bäker, M. (2005). "Finite element investigation of the flow stress dependence of chip formation." *Journal of Materials Processing Technology*, V. 167, PP.1–13.
- 15 - Bäker, M. (2006). "Finite element simulation of high-speed cutting forces." *Journal of Materials Processing Technology*, V. 176, PP. 117–126.
- 16 - Tugrul Özel. (2006) "The influence of friction models on finite element simulations of machining." *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, V.46, PP. 518–530.
- 17 - Movahhedy, M., Gadala, M. S. and Altintas, Y. (2000). "Simulation of the orthogonal metal cutting process using an arbitrary Lagrangian-Eulerian finite-element method." *Journal of Materials Processing Technology*, V. 103, PP. 267-275.
- 18 - Lars Olovsson, Larsgunnar Nilsson, Kjell Simonsson, (1999) "An ALE formulation for the solution of two-dimensional metal cutting problems." *Computers and Structures*, V. 72, PP. 497-507.
- 19 - Tugrul Özel, Erol Zeren, FINITE ELEMENT MODELING OF STRESSES INDUCED BY HIGH SPEED MACHINING WITH ROUND EDGE CUTTING TOOLS, *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Orlando, Florida, November 5-11, 2005*.
- 20 - Zhang, L. (1999). "On the separation criteria in the simulation of orthogonal metal cutting using the finite element method." *Journal of Materials Processing Technology*, V. 89–90, PP. 273–278.
- 21 - Ng, E.-G., Aspinwalla, D. K., Brazil, D. and Monaghan, J. (1999). "Modeling of temperature and forces when orthogonally machining hardened steel." *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, V.39, PP. 885–903.
- 22 - Madhavan, V., Chandrasekar, S. and Farris, T.N. (1993). "Mechanistic model of machining as an indentation process." *Metals and Materials Society*, V. 2, PP. 187-209.
- 23 - Grzesik, W. (1999). "Experimental investigation of the cutting temperature when turning with coated indexable inserts" *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, V. 39, PP. 355–369.
- 24 - Grzesik, W. and Nieslony, P. (2003). "A computational approach to evaluate temperature and heat partition in machining with multilayer coated tools." *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, V. 43, PP. 1311–1317.
- 25 - Grzesik, W. (2003). "Friction behavior of heat isolating coatings in machining: mechanical, thermal and energy-based considerations." *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, V. 43, PP. 145–150.

- 26 - Rech, J. (2006). "Influence of cutting tool coatings on the tribological phenomena at the tool–chip interface in orthogonal dry turning." *Surface & Coatings Technology*, V. 200, PP. 5132 – 5139.
- 27 - Grzesik, W. (2006). "Determination of temperature distribution in the cutting zone using hybrid analytical-FEM technique." *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, V. 46, PP. 651–658.

واژه‌های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1- Built up Layer
- 2- Built up Edge
- 3- Crater Wear
- 4- Etched
- 5- Arbitrary Lagransion Eulerian
- 6- Indentation
- 7- Explicit
- 8- Grzesik
- 9- Split Hopkinson Pressure Bar
- 10- Jaspers
- 11- Dautzenberg