دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده مهندسی مکانیک

تحلیل المان محدود فرایند براده برداری با نرم افزار *Deform-3D* و بررسی سایش ابزار

پایان‌نامه کارشناسی ارشد ساخت و تولید

محمد رضایی رجایی
۸۸۰۳۰٤٤

استاد راهنما
دکتر مهران مرادی

۱۳۹۰

به نام یزدان
بخشایشگر مهربان

تشکر و قدردانی

در اینجا، برخود لازم می‌دانم از کلیه‌ی عزیزانی که اینجانب را به نحوی در انجام این پروژه یاری رساندند تشکر و قدردانی نمایم. از زحمات و راهنمایی‌های با ارزش استاد راهنمای خود آقای دکتر مهران مرادی و همچنین استاد مشاور گرانقدرم آقای دکتر محمدرضا فروزان کمال تشکر وسپاسگزاری را دارم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع
این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به

خانواده عزیزم

فهرست مطالب

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه ۲

۱-۱- اهمیت تحقیق ۲

۱-۲- کار حاضر ۵

فصل دوم: پیشینه‌ی تحقیق ۷

۲-۱- مقدمه ۷

۲-۲- روش های تحقیق ۷

۲-۲-۱- روش های تجربی ۷

۲-۲-۲- روش های تحلیلی ۸

۲-۲-۳-روش اجزای محدود ۹

۲-۲-۴- مقایسه ی روش ها ۱۱

۲-۳- مطالعات صورت گرفته بر اساس زمینه ی ماشین کاری ۱۲

۲-۳-۱ بار برداری و فرآیند ماشینکاری به صورت عمومی ۱۲

۲-۳-۲-تاثیرات هندسه ی ابزار و پارامترهای ماشینکاری در فرآیند براده برداری ۱۳

۲-۳-۳- جنبه های دمایی در ماشینکاری ۱۳

۲-۳-۴-تنش های پسماند در ماشینکاری ۱۴

۲-۳-۵-سایش و خرابی ابزار ۱۴

۲-۳-۶- مکانیزم شکل گیری براده ۱۵

۲-۳-۷- آنالیز دینامیکی و کنترل ماشین ابزار ۱۶

۲-۳-۸-بهینه سازی و سایر موضوعات ۱۷

فصل سوم: مقدمه‌ای بر فرآیند براده‌برداری ۱۸

۳-۱- مقدمه ۱۸

۳-۲- براده برداری متعامد و مورب ۱۹

۳-۳- مکانیک تراش متعامد ۲۱

۳-۴- انواع روش های ماشینکاری متعامد ۲۶

۳-۵- تجهیزات اندازه گیری در فرآیند براده برداری ۲۷
فصل چهارم: شبیه‌سازی المان محدود فرآیند براده‌برداری ۳۱
۴-۱- مقدمه ۳۱
۴-۲- جنبه‌های عددی ۳۱
۴-۲-۱-روش لاگرانژی ۳۲
۴-۲-۲- روش اویلری ۳۴
۴-۲-۳- روش اویلری-لاگرانژی اختیاری(ALE) ۳۵
۴-۲-۴- روش لاگرانژی ارتقاء یافته ۳۶
۴-۳- جنبه‌های مکانیکی ۴۰
۴-۳-۱-ماهیت اصطکاک ۴۰
۴-۳-۲-مدل‌های اصطکاکی در فرآیند براده‌برداری ۴۱
۴-۳-۳-مدل ساختاری ماده ۴۳
۴-۳-۴- جدایش براده ۵۰
فصل پنجم: سایش ابزار ۵۳
۵-۲- معیار های سایش ۵۴
۵-۲-۱- سایش صفحه‌ی براده ۵۴
۵-۲-۲- سایش لبه‌ی برنده ۵۵
۵-۲-۳-کنده شدن ابزار ۵۵
۵-۲-۴- شکستگی ۵۶
۵-۳- مکانیزم سایش ۵۶
۵-۳-۱- سایش چسبنده ۵۶
۵-۳-۲-سایش ساینده ۵۷
۵-۳-۳- سایش نفوذی ۵۸
۵-۳-۴- سایش اکسیداسیون ۵۸
۵-۳-۵- سایش شیمیایی ۵۸
۵- ۳- ۶- سایش خستگی ۵۸
۵-۴- میزان سایش و مکان وقوع انواع مکانیزم های سایش ۵۹

۵-۵- عوامل بوجود آمدن سایش ابزار ۶۰
۵-۵-۱- شرایط قطعه کار ۶۰
۵-۵-۲- شرایط تماسی ۶۰
۵-۵-۳ - شرایط ابزار برش ۶۰
۵-۵-۴ - رفتار دینامیکی ماشین..... ۶۰
۵-۶- مدل های سایش ابزار ۶۱
۵-۶-۲- مدل نرخ سایش ابزار..... ۶۳
۵-۷- روش های بدست آوردن سایش در لبه ی ابزار..... ۶۷
۵-۷-۱- روش مستقیم ۶۷
۵-۷-۲- روش غیر مستقیم ۶۷
۵-۸- پیامد های سایش ابزار ۶۸
فصل ششم: بررسی تاثیر پارامترهای ماشینکاری بر سایش ابزار به کمک آنالیز المان محدود ۶۹
۶-۱- مقدمه..... ۶۹
۶-۲- شبیه‌سازی سه بعدی فرآیند ماشینکاری..... ۶۹
۶-۲-۱- آماده سازی ابزار و قطعه‌کار برای شبیه سازی ۶۹
۶-۲-۲- خواص مکانیکی و حرارتی ابزار و قطعه‌کار ۷۱
۶-۲-۳- اصطکاک و ضریب انتقال حرارت..... ۷۵
۶-۲-۴-مراحل شبیه‌سازی..... ۷۶
۶-۳- مقایسه بین سه مدل سایش ابزار ۷۷
۶-۳-۱- نتایج شبیه‌سازی جهت بررسی عمق گودال فرسایش با استفاده از سه مدل سایش ابزار..... ۷۸
۶-۴- بررسی تاثیر پارامترهای ماشینکاری و هندسی ابزار بر سایش ابزار ۸۳
۶-۴-۱- آنالیز واریانس و رگرسیون برای بررسی نحوه‌ی تاثیر پارامترهای برش بر دمای حداکثر ابزار..... ۸۶
۶-۴-۲- استفاده از نمودار تاثیرات اصلی برای آنالیز دمای حداکثر ابزار ۸۷
۶-۴-۳- آنالیز واریانس و رگرسیون برای بررسی نحوه‌ی تاثیر پارامترهای برش و هندسه ابزار بر سایش ابزار ۸۸
۶-۴-۴- استفاده از نمودار تاثیرات اصلی برای آنالیز سایش ابزار ۸۹
۶-۴-۵- تحلیل نتایج..... ۸۹
فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۹۱

۷-۱- نتیجه گیری ۹۱
۷-۲- پیشنهادات ۹۳

چکیده

از آنجایی که انجام مطالعات تجربی در زمینه عملیات براده‌برداری امری هزینه‌بر، وقت‌گیر و دارای محدودیت می‌باشد. امروزه محققین از روش های اجزا محدود به عنوان ابزاری کارآمد جهت انجام مطالعات خود بهره برده‌اند. سایش ابزار یک موضوع مهم در صنعت ساخت و تولید است زیرا روی کیفیت قطعات تولیدی، عمر ابزار و هزینه‌های ماشینکاری تاثیر می گذارد. بیشتر کارهای انجام شده بر اساس روشهای تجربی و یا بررسی های آزمایشی هستند در حالیکه فقط تعداد کمی به شبیه‌سازی عددی سایش ابزار توجه کرده اند. بعلاوه، تاکنون توجه بیشتر روی شبیه‌سازی دوبعدی در شرایط متعامد برش متمرکز شده است. ولی امروزه افزایش راندمان سخت افزارها و نرم افزارها مدلهای سه‌بعدی موثری را برای شبیه‌سازی فرآیندهای ماشینکاری واقعی فراهم می سازد. در این تحقیق ابتدا به کمک روش المان محدود توسط نرم افزار ***Deform-3D*** به پیش‌بینی سایش ابزار توسط سه مدل سایش پرداخته می‌شود و نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نتایج آزمایش مقایسه شده و مدل سایش ترکیبی به عنوان بهترین مدل سایش ابزار معرفی می‌گردد. برای پیاده‌سازی مدل سایش ابزار از یک زیر برنامه به زبان فرترن استفاده شده است. در ادامه تحقیق با توجه به اینکه یک شبیه‌سازی سه بعدی از فرآیند ماشینکاری انجام می‌شود، علاوه بر بررسی تاثیر پارامترهای سرعت برشی ، نرخ پیشروی و زاویه براده، امکان بررسی تاثیر پارامترهایی همچون عمق برش، شعاع نوک قلم و زاویه تنظیم که در شبیه‌سازی دوبعدی بر سایش ابزار امکان پذیر نبود، فراهم می‌شود. بعد از پیش‌بینی سایش ابزار با مدل ترکیبی سایش ابزار یوسویی و تاکایاما برای آزمایش‌های طراحی‌شده برای پارامترهای مختلف ماشینکاری، به کمک آنالیز واریانس تاثیر پارامترهای ماشینکاری و هندسی ابزار بر روی سایش ابزار بررسی می‌گردد. آنالیز واریانس انجام شده نشان می‌دهد که سرعت برشی بیشترین تاثیر را روی سایش ابزار دارد که با رابطه تجربی تیلور هم خوانی دارد. بعد از سرعت برشی به ترتیب نرخ پیشروی، شعاع نوک قلم و عمق برش بیشترین تاثیر را دارند. اثرات زاویه براده و زاویه تنظیم بر روی سایش ابزار کم می‌باشد.

کلمات کلیدی:

ماشینکاری، سایش ابزار، المان محدود، طراحی آزمایش، آنالیز واریانس

فصل اول: مقدمه

۱-۱- اهمیت تحقیق

هر چند تکنولوژی‌های جدیدی در سال‌های اخیر جهت فرآیندهای ساخت و تولید بکار گرفته شده‌اند اما همچنان ماشینکاری (تراشکاری) نقش مهمی را در این زمینه ایفا می‌کند. امروزه حدود ۱۵٪ قطعات مکانیکی توسط فرآیندهای ماشینکاری تولید می‌شوند[۱]. تحقیقات نشان می‌دهد که مجموع سرمایه‌گذاری سالیانه صنایع آمریکا در زمینه ماشینکاری بین ۳٪ تا ۱۰٪ تولید ناخالص ملی[1] این کشور است[۲]. علی‌رغم اهمیت اقتصادی و صنعتی آشکار، این فرآیند هنوز به اندازه کافی شناخته شده نیست و در صنعت شرایط برش به کمک آزمایش، سعی و خطا و یا با تکیه بر تجربه صنعتگران انتخاب می‌شود که هم بر هزینه و هم بر زمان ساخت اثر خواهد گذاشت. مشکل روش‌های تجربی این است که با تغییر جنس ابزار، قطعه کار، شرایط برش و حتی نوع ماشین تراش این مجموعه داده‌های تجربی اعتبار خود را از دست داده و نیاز به انجام آزمایش‌های مجدد است[۵-۳]. مطالعات اخیر در بخش‌های مختلف صنعت ضعف‌های بکارگیری این روش‌های تجربی را مشخص‌تر می‌کند. برای مثال، کنامتال که خود سازنده ابزار و الماسه است اطلاعات مربوط به یک سال (۱۹۹۳-۱۹۹۲) را از محیط‌های صنعتی جمع‌آوری کرده است. این داده‌ها نشان می‌دهد که در صنعت آمریکا [۶]:

۱- در ۵۰٪ کاربردها ابزار نامناسب انتخاب شده است.

۲- ۴۲٪ ابزارها در محدوده سرعت برش مناسب بکار نرفته است.

۳- در ۶۲٪ موارد از ابزار تا انتهای عمرش استفاده نشده است.

---

[1] *GDP*

همچنین تحقیقات در صنایع خودروسازی آمریکا نشان می‌دهد که در بررسی کار با ۱۱۱ ماشین تراش مختلف، ۳۵٪ از کل زمان اتلافی مربوط به مشکلات ناشی از انتخاب ناصحیح شرایط برش است[۶]. با توجه به این آمار اهمیت انتخاب صحیح ابزار و شرایط برش در اقتصاد تولید مشخص می‌شود. این ارتباط از تأثیر این تصمیمات بر سرعت فرسایش ابزار، دقت ابعادی قطعه تراشیده شده و کیفیت سطح بجامانده ناشی می‌شود.

گستردگی و پیچیدگی مدل‌های موجود به حدی است که مقایسه و ارزیابی نتایج آنها را مشکل می‌سازد[۸-۷]. یکی از این پیچیدگی‌ها که فرآیند تشکیل براده را به عنوان پدیده خاص فیزیکی در محدوده‌ای فراتر از سایر پدیده‌های شکل‌دهی فلزات معرفی می‌کند تفاوت محدوده تنش، کرنش، نرخ‌کرنش و دمای ایجاد شده در این فرآیند در مقایسه با سایر فرآیندهای شکل‌دهی است. نتایج این مقایسه در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱-۱): مقایسه کرنش، نرخ کرنش و دمای بی‌بعد معمول در فرآیندهای ساخت و تولید

روش ساخت	کرنش	نرخ کرنش (S^{-1})	دمای بی‌بعد $T_h = T/T_{melt}$
اکستروژن	۲-۵	$۱۰^{-۱}$ تا $۱۰^{۲}$	۰/۱۶-۰/۷
فورج/ نورد	۰/۱-۰/۵	۱ تا $۱۰^{۳}$	۰/۱۶-۰/۷
شکل‌دهی ورق	۰/۱-۰/۵	۱ تا $۱۰^{۲}$	۰/۱۶-۰/۷
ماشینکاری	۱-۱۰	$۱۰^{۳}$ تا $۱۰^{۶}$	۰/۱۶-۰/۹

این وجه تمایز که دربردارنده تفاوت رفتار ماده در سرعت‌های بالای گرمادهی و کرنش‌دهی است باعث شده هنوز مدل قابل اطمینانی برای ماشینکاری ارائه نشود. هر چند که مدل‌های زیادی از تئوری تا تجربی تدوین شده‌است اما هرکدام برای نوع براده، ماده و محدوده شرایط برش خاص بنا نهاده شده‌است و برای استفاده نیازمند پارامترهایی هستند که بعد از انجام آزمایش مشخص می‌شوند. به هرحال عوامل محدودکننده‌ای در استفاده از مدل‌ها وجود خواهند داشت زیرا باید در نظر داشته باشیم به طور مثال برای ماده و ابزار مشخص، هندسه برش خاص، عمق و پهنای برش معین و فقط با تغییر سرعت برش، نوع براده از براده همراه با لبه انباشته[1] به براده پیوسته و سپس براده تکه‌تکه تغییر می‌کند که هرکدام با توجه به تفاوت پروسه تشکیل براده، شرایط مدل جداگانه‌ای نیاز دارند. درحال‌حاضر برای مقابله با این مشکل یا نوع ابزار و شرایط تعویض ابزار محافظه‌کارانه انتخاب می‌شود و یا برای تعیین شرایط بهینه، مجموعه وسیع و پرهزینه‌ای از آزمایش‌ها بر روی ابزارها و روانسازهای مختلف انجام می‌گیرد. در این شرایط با انتخاب محتاطانه شرایط برش دور از ذهن نخواهد بود که فرآیند برش حتی در نصف سرعت تولید ممکن و نصف

[1] ***Build up edge (BUE)***

عمر مفید ابزار صورت می‌پذیرد[۶]. رویکرد مدل‌های کارآمد استفاده بهتر از توانائی روش‌های ساخت و تولید است به‌گونه‌ای که اهداف زیر حاصل گردند[۶]:

۱- به حداقل رساندن آزمایش‌های تجربی در تعیین مراحل ساخت قطعات جدید

۲- شناسایی محدودیت‌های فیزیکی فرآیند نظیر تغییر ریزساختار و آسیب حرارتی در لایه سطحی ماشین‌شده

۳- بهینه نمودن روش‌های اجرا و ساخت با حداکثر استفاده از ابزار و بدست آوردن دقت ابعادی مطلوب

۴- استفاده از ماکزیمم قابلیت فرآیند براده‌برداری با تعیین دقیق مراحل براده‌برداری خشن و پرداختکاری

امروزه با توجه به گسترش تحقیقات صورت پذیرفته در زمینه ماشینکاری، مطالعات تجربی صرفا به‌دلیل هزینه‌بر، محدود و طولانی بودن قادر به پاسخگویی به نیازمندی‌های این بخش نمی‌باشد، به همین منظور جهت رفع این مسئله از روش‌های کامپیوتری بهره‌گرفته‌شده‌است. در این میان روش‌های اجزای محدود به عنوان ابزاری کارآمد همگام با گسترش تکنولوژی مورد استفاده قرار گرفته‌اند تا جایی که امروزه نقش بسیار مهمی در کاهش زمان، هزینه و پیشرفت این فناوری ایفا می‌کنند. تاکنون تلاش‌های زیادی جهت شبیه‌سازی فرآیند ماشینکاری صورت پذیرفته است [۹]. به طور کلی دو هدف از شبیه سازی فرآیندها وجود دارد:۱- پیش بینی یک فرآیند یا رخداد فیزیکی که هنوز انجام نشده است . ۲- بدست آوردن درک بهتر از فرایندی که انجام شده است . در مورد فرایند ماشینکاری هر دو هدف بالا دنبال می شود، هم می خواهیم درک بهتری از فرایند شکل گیری براده داشته باشیم و هم در فرایند طراحی ابزار های جدید قصد داریم سعی و خطای عملی را به حداقل برسانیم و نوعی پیش بینی از کارکرد ابزار طراحی شده را داشته باشیم. اما مسئله بسیار حائز اهمیت در این زمینه, صحت نتایج شبیه‌سازی می‌باشد. پارامترهایی همچون ارائه مدل ساختاری دقیقی از قطعه‌کار (که به منحنی تنش سیلان ماده‌ی قطعه‌کار بستگی دارد) و همچنین ارائه مدل اصطکاکی مناسب بین سطح تماس ابزار و براده، از جمله مهمترین عوامل اثرگذار در نتایج حاصل از شبیه‌سازی می‌باشند [۱۰].

امروزه به لطف استفاده از شبیه‌سازی در تحقیقات به عمل آمده در زمینه ماشینکاری، امکان بررسی مواردی که اندازه‌گیری تجربی آنها هزینه‌بر و طولانی می‌باشد, میسر شده‌است. از جمله این موارد می توان به بررسی میزان و نرخ سایش ابزار اشاره نمود. هنگامیکه میزان سایش در ابزار از یک حدی بالاتر رود, کیفیت سطح قطعه ماشینکاری شده به طورقابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا می‌کند و همچنین منجر به عدم یکنواختی ابعاد هندسی قطعات تولید شده می‌گردد[۱۱]. از اینرو پیش‌بینی نرخ سایش ابزار و تعویض به موقع آن قبل از رسیدن به حد بحرانی سایش در ابزار، می‌تواند نقش بسزایی در تولید قطعاتی با کیفیت سطح مورد انتظار و یکنواختی محصول گردد. همچنین خاطر نشان می‌شود که تعویض زود هنگام ابزار, علاوه بر افزایش هزینه مصرفی ابزار، منجر به افزایش توقف خط تولید (جهت

تعویض ابزار) می‌گردد, که این امر هزینه‌ی تولید محصول را افزایش می‌دهد. همانطور که ملاحظه گردید, پیش‌بینی دقیق میزان سایش و عمر ابزار به‌شدت با مسائل اقتصادی تولید مرتبط بوده و می‌تواند منجر به افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های تمام‌شده تولید هر قطعه گردد. به همین منظور ضرورت و اهمیت مطالعه در راستای بررسی سایش در ابزار احساس می‌شود. تاکنون تحقیقاتی بصورت تجربی در این زمینه صورت پذیرفته‌است, که این امر علاوه بر صرف زمان طولانی, مستلزم هزینه‌های بالایی جهت انجام آزمایش‌ها می‌باشد[۱۲]. اما در سال‌های اخیر امکان انجام تحقیقاتی جهت شبیه‌سازی نرخ و میزان سایش ابزار میسرشده‌است و مراکز تحقیقاتی و دانشگاهی در کشورهای صنعتی جهان همچون ایتالیا و آمریکا در این امر پیش قدم شده‌اند[۱۳].

۱-۲- کار حاضر

هدف از انجام این پروژه به کار بردن روش المان محدود با استفاده از نرم افزار ***Deform-3D*** برای پیش‌بینی سایش ابزار و بررسی تاثیر پارامترهای ماشین‌کاری (سرعت برشی، نرخ پیشروی و عمق برش) و پارامترهای هندسی ابزار (زاویه براده، زاویه تنظیم و شعاع نوک قلم) بر روی سایش ابزار می‌باشد. برای پیاده‌سازی مدل سایش ابزار از یک زیربرنامه به زبان فرترن استفاده می‌شود و بعد از پیش‌بینی سایش ابزار به کمک روش طراحی آزمایش و آنالیز واریانس تاثیرات پارامترهای مختلف بر روی سایش ابزار بررسی می‌شود.

در فصل دوم پیشینه تحقیقاتی که در زمینه ماشینکاری صورت پذیرفته است با دو نوع دسته بندی مطرح می‌گردد. اولین دسته بندی بر اساس نوع تحقیقات صورت پذیرفته که می تواند به صورت تجربی، تحلیلی یا شبیه سازی باشد، عنوان گردیده است. در دسته‌بندی دوم پیشینه تحقیقات صورت پذیرفته، بر اساس زمینه‌های مطالعاتی مختلفی که در راستای فرآیند براده برداری صورت گرفته است مطرح می‌گردد.

در فصل سوم از این تحقیق، ابتدا در مورد فرآیند ماشینکاری متعامد و مورب صحبت شده است و سپس توضیح مختصری در مورد مکانیک تراش ارائه شده و در ادامه انواع روش‌های ماشینکاری متعامد و تجهیزات رایجی که جهت انجام آزمایشات تجربی در زمینه ماشینکاری مورد استفاده قرار می‌گیرد، مطرح شده است.

در فصل چهارم به بیان شبیه‌سازی اجزا محدود فرآیند براده برداری از دو جنبه عددی و مکانیکی پرداخته شده است و انواع روش‌های حل عددی به کار گرفته شده در این راستا و مدل‌های ارائه شده برای اصطکاک و رفتار ساختاری ماده بیان می‌شود.

در فصل پنجم به بررسی سایش در ابزار پرداخته شده و انواع معیارها، مکانیزم‌ها و مدل‌های سایش ابزار مطرح شده است.

فصل ششم به مطالعات و بررسی‌های صورت پذیرفته اختصاص یافته است. در ابتدا نحوه شبیه‌سازی سه بعدی فرآیند براده‌برداری با نرم افزار ***Deform-3D*** بیان‌شده، سپس یک مقایسه ای بین سه مدل نرخ سایش ابزار انجام شده و در پایان بعد از پیش‌بینی سایش ابزار برای آزمایش‌های طراحی شده به بررسی نحوه تاثیر پارامترها بر سایش ابزار، پرداخته شده است. در فصل آخر به بیان نتایج بدست آمده از تحقیق پرداخته شده و در انتها نیز پیشنهاداتی برای کارهای آتی آورده شده است.

فصل دوم: پیشینه‌ی تحقیق

۲-۱- مقدمه

در این فصل پیشینه‌ی تحقیقات صورت گرفته در زمینه‌ی ماشینکاری با دو نوع دسته‌بندی بیان می‌شود. اولی بر اساس روش‌هایی که برای انجام تحقیقات در این زمینه استفاده‌شده و دیگری بر اساس دسته‌بندی زمینه‌های مختلف مطالعاتی که تاکنون در این راستا صورت گرفته، مطرح می‌شود.

۲-۲- روش‌های تحقیق

تا کنون به منظور بررسی فرآیند ماشینکاری و انجام مطالعات در این زمینه از سه روش بهره گرفته شده است.

۱-روش‌های تجربی

۲- روش‌های تحلیلی

۳- روش شبیه‌سازی اجزای محدود

۲-۲-۱- روش های تجربی

اولین و قدیمی‌ترین روش برای بررسی فرآیند ماشینکاری، روش‌های تجربی می‌باشند. این روش‌ها مبتنی بر اندازه-گیری پارامترها و شرایط ماشینکاری با تجهیزات و امکانات آزمایشگاهی می‌باشند و این امکان را برای محققین فراهم می‌سازند که به بررسی تحقیقات خود بپردازند. به کمک امکانات و تجهیزات در این زمینه، می‌توان نیروهای ماشینکاری، دمای حاصل از فرآیند براده‌برداری، توزیع دما در ابزار، صافی سطح قطعه‌ی ماشینکاری شده، میزان سایش در ابزار، شکل و هندسه‌ی براده را اندازه‌گیری نمود.

در فصل بعدی به توضیح بیشتر در مورد انواع تجهیزات و وسایل مورد استفاده جهت انجام آزمایشات تجربی پرداخته می‌شود. از آنجایی که حجم مطالعات تجربی صورت پذیرفته در زمینه‌ی ماشینکاری بالا می‌باشد، در این قسمت

صرفاً به بیان نمونه‌هایی از تحقیقات تجربی که در زمینه‌های مختلف فرآیند ماشینکاری به عمل آمده است، اشاره می‌شود. فنگ[1] تحقیقات خود را بر اساس مطالعه بر روی تأثیر شعاع ابزار در فرآیند ماشینکاری انجام داده است[۱٤]. اوزل[2] نیروهای ماشینکاری را در حالت‌های متفاوت برشی و پیشروی ابزار بررسی کرده‌است[۱٥]. درتحقیقی که توسط ماتسوموتو[3] صورت گرفته است دمای ابزار و قطعه کار توسط ترموکوپلی که نزدیک به محل ماشینکاری تعبیه شده بود، اندازه گیری شده است[۱٦]. همچنین از این روش در تحقیقاتی جهت اندازه‌گیری دمای ماشینکاری مواد سخت بهره گرفته‌شده‌است[۱۸،۱۷] . ملکوته[4] اثر پارامترهای اصلی ماشینکاری را بر روی تنش‌های پسماند به صورت تجربی اندازه گیری نمود[۱۹]. رجینالدو[5] و همکارانش تحقیقات تجربی را به منظور بررسی سایش ابزار ***PCBN*** در ماشینکاری فولاد سخت انجام دادند که در طی آن ابزار بدون پوشش و با پوشش‌های $TiON$ ، Al_2O_3 را تحت شرایط مختلف ماشینکاری قرار دادند و سپس سایش در ابزار را توسط روش عکسبرداری میکروسکوپی[6] اندازه-گیری کردند[۲۰]. از آنجایی که روش عکسبرداری میکروسکوپی امکان مطالعه و بررسی نحوه‌ی شکل‌گیری و هندسه‌ی براده را میسر می‌سازد، ابراهیمی[7] تغییرات هندسه‌ی براده ناشی از تغییر در خواص میکروآلیاژها را مورد مطالعه قرار داد و بر اساس نتایج ایشان ، هندسه‌ی براده‌ی شکل‌گرفته، به خواص و مقدار میکروآلیاژها بستگی دارد و تغییر می‌کند[۲۱].

۲-۲-۲- روش های تحلیلی

در گذشته هم‌گام با روش‌های تجربی، از روش‌های تحلیلی که مبتنی بر روابط و فرضیات مختلفی بودند، جهت فهم و توسعه‌ی هر چه بهتر فرآیند براده‌برداری استفاده شد و از این روابط در انجام تحقیقات بهره گرفته‌شد. ارنست[8] و مرچنت[9] اولین رابطه‌ی تحلیلی را به منظور بیان ارتباط بین صفحه‌ی براده و صفحه‌ی برش بر روی نیروهای ماشینکاری مطرح کردند[۲۲]. اما این تئوری، صرفاً بر روی مواد پلیمری جواب می‌داد و بر روی مواد فلزی نتایج قابل قبولی را در بر نداشت [۲۳]. در ادامه تحقیقاتی توسط پالمر[10] و اکسلی[11] صورت گرفت که بر مبنای آن محل شکل‌گیری براده که تا قبل از آن یک صفحه در نظر گرفته می‌شد، بصورت ناحیه‌ی حجمی فرض شد[۲٤]. لی و

---

[1] *fang*
[2] *Ozel*
[3] *Matsumoto*
[4] *Melkote*
[5] *Reginaldo*
[6] *SEM*
[7] *Ebrahimi*
[8] *Ernest*
[9] *Merchant*
[10] *palmer*
[11] *Olexy*

شافر با ارائه‌ی فرضیات جدیدی برای بیان زاویه‌ی صفحه‌ی براده، تا حدی مشکلات ناشی از عدم تطابق با نتایج تجربی را بهبود بخشیدند، اما نتایج آنان صرفاً با نتایج تجربی ماشینکاری بر روی فلز مس و فلزات غیر آهنی همخوانی داشت **[۲۶]**. امروزه روابط و مدل‌های تحلیلی بسیار گسترش یافته‌اند و از انواع فرضیات گوناگون جهت همخوانی هر چه بهتر نتایج تئوری با نتایج تجربی استفاده شده‌است. از جمله‌ی تحقیقات تحلیلی صورت پذیرفته می‌توان به مواردی اشاره نمود . لیانگ و هانگ[1] برای بررسی توزیع حرارت در ناحیه‌ی اول و دوم تغییر شکل از یک مدل صفحه‌ای و بر اساس روابط ساده شده‌ی انتقال حرارت بین دو سطح، توزیع حرارت در ابزار را بررسی کرده‌اند **[۲۲]**. فنگ در ادامه‌ی مدل لی و شافر بر اساس مدل اسپیلاین[2] برای شکل‌گیری براده از روابط طولانی تحلیلی جهت پیش‌بینی فاکتور سایش برشی و در نهایت نیروهای ماشینکاری استفاده کرده‌است. ایشان در تحقیق خود، نیروهای ماشینکاری را به فاکتور سایش برشی و نسبت ضخامت براده‌ی تغییر شکل نیافته به ضخامت براده‌ی تغییر شکل یافته نسبت داده‌اند، روابط بکار گرفته شده در این تحقیق، بسیار طولانی می‌باشد. اما در نهایت با مقایسه‌ی نتایج تجربی، همخوانی مناسبی را در برداشته است**[۲۵]**. گرچه انواع روابط تحلیلی مربوط به پیش بینی نیروها و دمای ماشینکاری نسبتاً نتایج قابل قبولی را در برداشته و هم پوشانی نسبتاً مناسبی با نتایج تجربی دارند، اما این روابط با در نظر گرفتن فرضیاتی و تحت شرایط خاص می باشند**[۲۶]**.

۲-۲-۳-روش اجزای محدود

امروزه عمدتاً روش‌های اجزای محدود به عنوان جایگزینی برای روش‌های تحلیلی استفاده می‌شوند و با توجه به هزینه‌ی بالای آزمایشات تجربی، این روش کاربرد و استفاده‌ی فراوانی پیدا کرده‌است. یکی از کاربردهای روش اجزای محدود، استفاده در شبیه‌سازی فرآیند ماشینکاری می‌باشد که امروزه با گسترش و تکمیل انواع روش‌ها می‌توان به منظور پیش‌بینی نیروهای ماشینکاری، توزیع دما، تنش در ابزار و قطعه کار، سایش ابزار، هندسه و نحوه‌ی شکل‌گیری براده و سایر پارامترهایی که اندازه‌گیری تجربی آنها هزینه بر و طولانی می‌باشد، مورد استفاده قرار گیرد. سابقه‌ی کاربرد اجزای محدود به سال‌های حدود ۱۹۷۰ بر می‌گردد. در آن زمان کلامدسی[3] از جمله اولین افرادی بود که تحقیقاتی خود را در زمینه‌ی شبیه سازی فرآیند براده‌برداری صورت داد [۲۷]. ایشان در تحقیق خود از مدلی استفاده‌کرد که در طی آن برای مرکز براده شرایط کرنش صفحه‌ای و در سطح براده شرایط تنش صفحه‌ای فرض شده بود. همچنین تقریباً در همان زمان تحقیقاتی به منظور توزیع دمای قطعه کار در حالت پایدار ماشینکاری بدون در نظرگرفتن شرایط نخستین صورت گرفت[۲۹،۲۸]. در سال ۱۹۸۵ کارول و همکارانش شبیه سازی فرآیند ماشینکاری

---

[1] ***liang &huang***
[2] ***spline model***
[3] ***KIamedci***

را گسترش دادند و برای اولین بار شرایط نخستین ماشینکاری را تا رسیدن به حالت پایدار با استفاده از روش لاگرانژی شبیه‌سازی کردند. ایشان در تحقیقات خود از تأثیرات دما در فرآیند براده‌برداری صرفنظر کردند و صرفاً نیروهای ماشینکاری را تا رسیدن به حالت پایدار شبیه‌سازی کردند[۳۰]. در ادامه تحقیقاتی مبنی بر بررسی شرایط تعادل دمایی در شبیه سازی فرآیند براده‌برداری صورت گرفت. این روش که بر اساس روش حل اویلری بود، شرایط ماشینکاری را تنها در حالت پایدار بررسی می‌کرد. اما این روش دارای معایبی بود، از جمله آنکه هندسه‌ی براده قبل از شروع شبیه‌سازی، بر اساس سعی و خطا و مقایسه با نمونه تجربی تعیین می‌گردید . در ادامه مون[1] و همکارش این روش را بهبود بخشیدند که طی آن نیاز به تعریف هندسه‌ی براده در هر مرحله نبود، بلکه شکل براده طبق یک روند به صورت خودکار پیش بینی می‌شد و شکل می‌گرفت***[۳۱]***. تا آن زمان شبیه‌سازی‌های صورت گرفته تنها محدود به شکل‌گیری براده‌ی پیوسته بود. در ادامه محققین با گسترش دادن الگوریتم شکست که مبتنی بر شکاف گره‌ها در جهت مشخصی می‌باشد، توانستند شکل‌گیری براده را به صورت غیر پیوسته در فرآیند ماشین کاری شبیه سازی کنند[۳۲]. در همین راستا یوسویی و همکارش شبیه سازی براده‌ی غیر پیوسته را برای سوپر آلیاژ تیتانیوم انجام دادند[۳۳]. در ادامه ارپن بک و کوموپولوس[2] همکارش تاثیر لبه‌ی انباشته در فرآیند براده برداری را در شبیه سازی فرآیند ماشین کاری لحاظ کردند[۳٤]. اکثر تحقیقاتی که در زمینه‌ی شبیه سازی فرایند ماشین کاری صورت گرفته است، محدود به ماشینکاری متعامد می‌باشد، هاشیمورا و یدا توانستند شبیه سازی فرآیند ماشینکاری را در حالت سه بعدی و مورب انجام دهند[۳۵]. با توجه به وابسته بودن نتایج شبیه سازی به روش حل آن، انواع شبیه‌سازی‌های فرآیند ماشینکاری بر اساس نوع فرمول و روش حلی که برای آنالیز آنها استفاده شده است، دسته بندی می شوند. در همین راستا دو روش حل متفاوت در شبیه‌سازی فرآیند ماشینکاری مورد استفاده قرار می‌گیرد: روش حل لاگرانژی و اویلری، از روش لاگرانژی جهت شبیه‌سازی شرایط نخستین فرآیند ماشینکاری و از روش اویلری نیز جهت شبیه-سازی حالت پایدار استفاده می‌شود. همچنین از روش دیگری به نام اویلری-لاگرانژی اختیاری***(ALE)*** که ترکیبی که از دو روش فوق می‌باشد، نیز استفاده می‌شود[۳٦].

در گذشته عمدتا از روش اجزای محدود جهت شبیه‌سازی فرآیند ماشینکاری در حالت متعامد استفاده شده-است[۳۷،۳۰]. اما امروزه با گسترش و ارتقاء نرم افزارهای تجاری، امکان شبیه‌سازی سایر فرآیندهای ماشینکاری و در حالت‌های مختلف میسرشده‌است. از جمله این نرم افزارها می‌توان به ***AdvantEdge ,ABAQUS ,DEFORM*** ***FORGE , NASTARAN*** اشاره نمود. در ادامه به تحقیقاتی که با انواع نرم افزارهای تجاری جهت شبیه‌سازی اجزای محدود فرآیند براده‌برداری صورت پذیرفته اشاره می‌شود. آرازولا[3] و همکارانش با نرم افزار ***ABAQUS***

---

[1] ***Moon***
[2] ***Komvopoulos & erpenbeck***
[3] ***Arrazola***

تاثیر انواع پوشش ابزار را بر روی قابلیت ماشینکاری متعامد بررسی کردند[۳۸]. اوزل در تحقیقاتی که برای بررسی تاثیر لبه‌ی برنده‌ی ابزار بر روی نیروهای ماشینکاری صورت داده بود، از این نرم افزار جهت شبیه‌سازی‌های خود بهره برده‌است[۳۹]. نرم افزار***ABAQUS*** نسبت به سایر نرم افزارها قدمت بالاتری داشته و از دیرباز جهت شبیه‌سازی فرآیند ماشینکاری استفاده شده‌است [۴۰،۴۱،۴۲،۴۳]. اما امروزه نیز نرم افزارهایی ارائه شده‌اند که علاوه بر سرعت بالای محاسبات، از منابع بالایی جهت استفاده از خواص مواد مورد نیاز برخوردار می‌باشند که از جمله‌ی آنها نرم افزار ***DEFORM*** می‌باشد. نسخه‌های جدید این نرم افزار در تمامی زمینه‌های ماشینکاری از جمله بررسی نیروها، توزیع دما و تنش در ابزار و قطعه‌کار [۴۴،۴۵،۴۶،۴۷] بررسی سایش ابزار [۴۸] نحوه‌ی شکل‌گیری و هندسه براده [۴۹]، بررسی انواع مدل‌های اصطکاک بین ابزار و براده[۵۰]، مشخص‌کردن منحنی تنش سیلان قطعه‌کار[۵۱,۵۲] استفاده شده است. همچنین این نرم افزار قابلیت شبیه‌سازی سه بعدی فرآیند ماشینکاری با هندسه‌ی واقعی ابزار را دارا می‌باشد[۵۳]. در آخرین نسخه از این نرم افزار قابلیت شبیه‌سازی فرآیند ماشینکاری فرز کف تراش و سوراخ تراشی امکان پذیر می‌باشد[۵۴]. از جمله نرم افزار دیگری که قابلیت شبیه‌سازی سایش ابزار را دارا می‌باشد، نرم افزار تجاری ***AdvantEdge*** است[۵۵,۵۶]. در همین راستا نرم افزار ***FORGE*** هم جهت شبیه‌سازی فرایند ماشینکاری استفاده شده است[۵۷]. در تحقیقی که مناقان بر روی تاثیر پوشش ابزار در کاهش تنش‌های اصلی روی سطح ابزار و افزایش عمر ابزار صورت داد، از این نرم افزار بهره برده است[۵۸].

۲-۲-٤- مقایسه‌ی روش‌ها

همانطور که گفته‌شد روش‌های تحقیق در ماشینکاری سه نوع می‌باشند، بدیهی است که در این میان روش‌های تجربی دقیق‌ترین نتایج را به همراه دارند. اما مسئله‌ای که حائز اهمیت است، اندازه‌گیری بعضی از پارامترها نظیر توزیع دما در ابزار و قطعه‌کار تنش‌های قطعه‌کار و بررسی سایش در ابزار و بعضی پارامترهای دیگر، بسیار هزینه‌بر و طولانی می‌باشد. در این میان استفاده از روش‌های اجزای محدود می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد، با هزینه ی کم و دقت مناسب مورد استفاده قرار گیرند. به منظور استفاده‌ی هرچه بهتر از روش‌های اجزای محدود، ابتدا باید از درستی و صحت نتایج اطمینان حاصل گردد. این کار با مقایسه‌ی بخشی از نتایج شبیه‌سازی با نتایج عملی امکان پذیر می‌باشد. لازم به ذکر است که روش‌های تحلیلی توام با فرضیات زیادی می‌باشند و دارای محاسبات پیچیده و وقت‌گیری هستند که بسته به فرضیات در نظر گرفته شده، همواره نتایج دقیقی را در بر ندارند. این روش‌ها، در گذشته که روش‌های اجزای محدود گسترش نیافته بودند بیشتر مورد استفاده قرار می‌گرفت.