



Development of an Analytical and Numerical Model of Torque Estimation in Drilling of Hard Steel



ARTICLE INFO

Authors

Yazdani Khameneh M.¹,

Rasti A.^{1*}

¹ Mechanical Engineering Department, Tarbiat Modares university, Tehran, Iran.

* Correspondence

Address: Mechanical Engineering Department, Tarbiat Modares university, Tehran, Iran.
a.rasti@modares.ac.ir

How to cite this article

Yazdani Khameneh M, Rasti A. Development of an Analytical and Numerical Model of Torque Estimation in Drilling of Hard Steel. Modares Mechanical Engineering. Proceedings of 2nd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools (CAMMT).2022;22(10):73-79.

ABSTRACT

In this article, the improved Oxley model, which is actually a combination of the Oxley and Johnson-Cook models, was introduced. The Oxley model does not take into account the effects of strain rate, hardness and heat increase, so by linking the Johnson-Cook model with this model, the Oxley model was developed. In this article, a program was written with Matlab software, which performed the analytical solution of the drilling process with the improved Oxley model, and according to the classical torque formula, the amount of this parameter was calculated according to the tangential force output from the Matlab code. Then the value of torque was compared with the value of this parameter in numerical modeling using AdvantEdge software, The difference between the numerical and analytical solutions is 12.5%, which indicates that the approximation in the presented analytical model is acceptable.

Keywords: Drilling, Analytical Model, Oxley Improved, Numerical Solution

ماهنامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه‌نامه مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته. مهر ۱۴۰۱، دوره ۲۲، شماره ۱۰، صفحه ۷۳-۷۹.



توسعه مدل تحلیلی و عددی تخمین گشتاور در فرایند سوراخ‌کاری فولاد سخت



چکیده

در این مقاله مدل آکسلی بهبود یافته که در واقع ترکیب مدل آکسلی و جانسون-کوک می باشد معرفی شد. مدل آکسلی، اثرات نرخ کرنش، کارسختی و افزایش حرارت را در نظر نمی گیرد به همین دلیل با مرتبط کردن مدل جانسون-کوک با این مدل، مدل آکسلی توسعه داده شد. در این مقاله برنامه ای با نرم افزار Matlab نوشته شد که حل تحلیلی فرایند سوراخ کاری را با مدل آکسلی بهبود یافته انجام می داد و طبق فرمول کلاسیک گشتاور، میزان این پارامتر را با توجه به نیروی مماسی خروجی گرفته شده از کد Matlab محاسبه کرد. سپس مقدار گشتاور با مقدار این پارامتر در مدلسازی عددی با استفاده از نرم افزار AdvantEdge مقایسه شد که میزان اختلاف حل عددی و تحلیلی ۱۲/۵ درصد است که نشان دهنده تقریب قابل قبول در مدل تحلیلی ارائه شده است.

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها

محمد یزدانی خامنه^۱
امیر راستی^{۱*}

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول

آدرس: دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.
a.rasti@modares.ac.ir

کلیدواژه‌ها: سوراخ‌کاری، مدل تحلیلی، آکسلی بهبود یافته، حل عددی

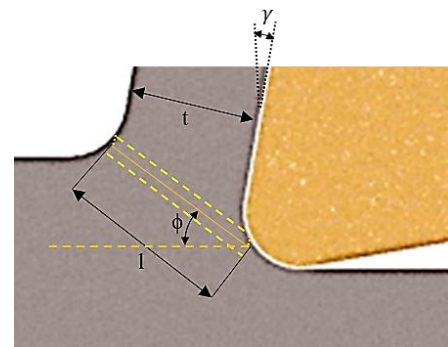
۱- مقدمه

مدلسازی فرایند ماشین کاری به سه صورت تحلیلی، عددی و تجربی انجام می پذیرد. مدلسازی عددی، تقریبی و بسیار پیچیده به همراه هزینه محاسباتی بالا است، مدلسازی تجربی، اگر چه روش و رویکردی مستقیم است ولی زمان بر و پرهزینه است. اما با مدلسازی تحلیلی، با صرف هزینه حداقلی میتوان مدل مدنظر را توسعه داد و پاسخ مدل را متناسب با تغییرات اعمالی در پارامترها بدست آورد و حساسیت سنجی پارامترها بسیار ساده می شود. یکی از اهداف توسعه مدلسازی تحلیلی، تخمین نیرو به عنوان یکی از خروجی های مهم فرایند ماشینکاری است که در واقع نیرو درک صحیحی از قابلیت ماشینکاری بدست می دهد [1].

مدلسازی تحلیلی به سه رویکرد ناحیه ضخیم، ناحیه نازک و نیروی شخم زنی انجام می شود. در مدل ناحیه نازک بعد از گذر ماده از صفحه برش، تنش به آن وارد نمی شود و تغییر شکل های پلاستیک و کرنش در ناحیه ای باریک با سرعت برشی بالا اتفاق می افتد. در این مدل، از اثرات کرنش، نرخ کرنش و دما چشم پوشی می کنیم [2].

مدل های ناحیه نازک در امتداد یک صفحه برشی اتفاق می افتد. از این رو، نرخ کرنش در این صفحه در حالت ایده آل به بی نهایت تمایل دارد، که عملاً امکان پذیر نیست.

در مدل ناحیه ضخیم، در سرعت برشی پایین تر، ناحیه تغییر شکل و تنش ضخیم تر است، در این مدل کار سختی ماده را در نظر میگیریم. عملیات ماشین کاری فرآیندی غیرخطی و پیچیده برای مدل سازی و شبیه سازی هست. در میان رویکردهای متداول برای تجزیه و تحلیل فرآیندهای ماشینکاری، بسیاری از روشها به چندین آزمایش تکیه دارند تا ثابت های تجربی که برای ترکیب مواد کاری منحصر به فرد هستند را تعیین کنند اما تئوری ماشینکاری توسعه یافته آکسلی (Oxley) نیازی به این ثوابت تجربی ندارد. در مدل ناحیه برشی موازی آکسلی، عمل برش در منطقه ای با عرض محدود اتفاق می افتد. مطابق (شکل ۱) صفحه ای که عمل برش در آن شروع می شود صفحه برشی ورودی و صفحه ای که عمل برشی در آن متوقف می شود صفحه برشی خروجی نامیده می شود [3].



شکل ۱) مدل ناحیه برشی موازی آکسلی

در ادامه به برخی پژوهش های انجام شده در این زمینه می پردازیم.

هاپکینز و حسینی [3]، یک مدل نیرو را بر اساس تئوری ماشین کاری آکسلی برای پیش بینی نیروهای برش در طول فرزکاری فولادهای سخت شده ۴۳۴۰ با استفاده از ابزار اینسرت خور، (که قابلیت اتصال اینسرت خشن کاری و اینسرت پرداخت کاری را دارد)، ارائه کردند. آزمایش هایی با در نظر گرفتن شش سطح مختلف از سرعت برشی و نرخ پیشروی های مختلف برای اعتبارسنجی مدل ریاضی استفاده شده است.

مدهاوان و ادیبی سده [4]، تجزیه و تحلیل اجزای محدود ترمومکانیکی کوپل دقیق ماشین کاری را با استفاده از قابلیت تحلیل اوبلیرین لاگرانژی در نرم افزار ABAQUS/Explicit انجام دادند و این اطلاعات در چارچوب بهترین مدل تحلیلی موجود یعنی مدل ماشینکاری آکسلی مشاهده شد تا به درک بهتری از فیزیک ماشینکاری منجر شود. مقایسه نشان داد که مدل آکسلی به خوبی فیزیک ماشینکاری را به تصویر می کشد، در ضمن مشاهده شد که نیروهای برشی و زاویه صفحه برشی پیش بینی شده توسط مدل آکسلی نزدیک مقادیر متناظر بدست آمده از تحلیل نرم افزاری هستند. همچنین دما در امتداد صفحه برشی اسمی به خوبی با مدل آکسلی تقریب زده شده است. با این حال، اقدامات دیگری مانند افزایش نرخ کرنش در ناحیه برشی اولیه و ضخامت ناحیه برشی ثانویه پیش بینی شده توسط مدل آکسلی با نتایج به دست آمده از FEA متفاوت هستند.

کیران ساغر و همکاران [5]، برای پیش بینی نیروها تحت سطوح مختلف سرعت های برشی و نرخ پیشروی های مختلف در حین ماشین کاری آلایژ تنگستن، از مدل تحلیلی آکسلی استفاده کرده اند و ترکیب بهینه ای از پارامترهای برش (سرعت برش و نرخ پیشروی) را با استفاده از روش RSM برای این جنس یافتند.

۲- تشریح مدل آکسلی

۲-۱- مدل آکسلی ساده

این مقاله یکی از رویکردهای مذکور را در نظر می گیرد، که رویکرد مدل سازی است که توسط آکسلی و همکارانش ایجاد شده است. نظریه ماشین کاری آکسلی به عنوان روشی برای پیش بینی نیروهای برش و دما با در نظر گرفتن ماهیت نرخ کرنش بالا در فرآیندهای ماشین کاری توصیف شد.

در مدل آکسلی برای در نظر گرفتن اثر کار سختی ماده، صفحه برش به صورت یک نوار برش ضخیم فرض می شود. در نتیجه برای تغییر شکل و سخت شدن ماده، فضا و مکان کافی وجود دارد. مطابق مدل ساده شده آکسلی در شکل ۱، ناحیه برش اولیه به صورت یک نوار با وجوه موازی و ناحیه برش ثانویه به صورت یک مستطیل با ضخامت ثابت فرض می شود. این مدل بر اساس تئوری نوار لغزش و مشاهدات تجربی در فرایند برش می باشد. فرض این مدل بر

برش بر اساس الگوریتم مطرح شده، زاویه برش و ثابت الگوریتم به صورت نمودی افزایش داده شده و برای تمامی مقادیر آن، تنش برشی در سطح تماس براده (τ_{int}) مورد محاسبه قرار می‌گیرد. بیشترین مقدار به دست آمده برای ϕ که در آن مقدار تنش برشی (τ_{int}) با تنش تسلیم ماده (k_{chip}) برابر شدند به عنوان مقدار زاویه برش تعیین می‌گردد. ثابت الگوریتم نیز به صورت پله‌ای-بازگشتی در یک چرخه بالاتر از زاویه برش تغییر کرده و مقداری که در آن تنش نرمال در صفحه برش (σ'_N) و تنش نرمال در سطح تماس براده با ابزار (σ_N) برابر شد، به عنوان مقدار ثابت الگوریتم خواهد بود. تنش نرمال در صفحه برش (σ'_N) به صورت زیر محاسبه می‌شود [5]:

$$\sigma'_N = k_{AB} \left(1 + \frac{\pi}{2} - 2\alpha - 2C_0 n_{eq} \right) \quad (14)$$

کار انجام شده در ناحیه برشی $V_s V_s$ و جرم براده در واحد زمان، $m_{chip} = \rho V t_1 w$ است، بنابراین، ΔT_{SZ} افزایش دما در ناحیه برشی را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود [5]:

$$\Delta T_{SZ} = \frac{(1 - \beta) F_s V_s}{m_{chip} C_p} \quad (15)$$

β ضریب پارتیشن حرارتی است [3].

دمای میانگین در سطح براده و ابزار (T_{INT}) که از آن میانگین تنش جریان برشی در فصل مشترک تعیین می‌شود، به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود [3]

$$T_{INT} = T_{ref} + \Delta T_{SZ} + \psi \Delta T_M \quad (16)$$

ΔT_M حداکثر افزایش دما در داخل سطح براده است. ψ عاملی است که تغییرات دما را در امتداد سطح مشترک ابزار و براده نشان می‌دهد.

نشان داده می‌شود که رابطه $\frac{\Delta T_M}{\Delta T_c}$ بین پارامترهای مواد و فرآیند ماشینکاری را می‌توان به صورت معادله زیر بیان کرد [5]:

$$\log \frac{T_M}{T_c} = 0.06 - 0.195 \frac{1}{2} \delta R_T t_2 h + 0.5 \log R_T t_2 h \quad (17)$$

R_T عددی وابسته به گرما و t_2 ضخامت براده تغییر شکل یافته و δ نسبت ضخامت منطقه پلاستیک سطح مشترک براده ابزار به ضخامت براده است.

T_c با در نظر گرفتن کار پلاستیک انجام شده در براده در سطح مشترک براده و ابزار محاسبه می‌شود.

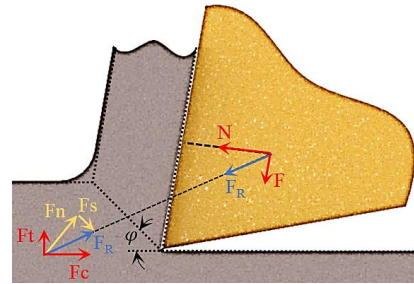
$$T_c = \frac{F \sin \phi}{\rho S t_1 \cos(\phi - \alpha)} \quad (18)$$

ρ چگالی ماده قطعه کار، α زاویه براده و t_1 ضخامت براده تغییر شکل نیافته است.

۲-۲- مدل آکسلی بهبود یافته

ماشینکاری یک فرایند کوپل حرارتی-مکانیکی بوده و این دو تحلیل از هم قابل تفکیک نمی‌باشند. در مدل آکسلی، اثر نرخ کرنش، کارسختی و افزایش حرارت در نظر گرفته نشده است. لذا در این پژوهش به منظور لحاظ کردن اثر پارامترهای مذکور و تخمین دقیق‌تر نیرو، مدل جانسون-کوک برای تخمین تنش

برقراری حالت کرنش صفحه‌ای و پایداری فرایند می‌باشد [3]. شماتیک این مدل نیرویی در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲) مدل نیرویی ناحیه نازک

تئوری آکسلی توزیع تنش را در طول صفحه برش (AB) و ناحیه تماس ابزار با براده بررسی نموده و زاویه برش ϕ را به نحوی انتخاب می‌کند که نیروهای برآیند تولید شده در این دو ناحیه با یکدیگر در تعادل باشند. معادلات مؤلفه‌های نیرو در صفحه برش (AB) از روابط (۱) تا (۱۰) قابل دستیابی است.

$$t_c = \frac{t \cos(\phi - \alpha)}{\sin(\phi)} \quad (1)$$

$$F_c = R \cos(\lambda - \alpha) \quad (2)$$

$$F_T = R \sin(\lambda - \alpha) \quad (3)$$

$$F = R \sin \lambda \quad (4)$$

$$N = R \cos \lambda \quad (5)$$

$$R = \frac{F_s}{\cos(\theta)} = \frac{k_{AB}}{\sin(\phi) \cos(\theta)} \quad (6)$$

$$\sigma'_N = k_{AB} \left(1 + \frac{\pi}{2} - 2\alpha - 2C_0 n_{eq} \right) \quad (7)$$

$$\lambda = \theta + \alpha - \phi \quad (8)$$

$$\tan \theta = 1 + 2 \left(\frac{\pi}{4} - \phi \right) - C_0 n \quad (9)$$

$$R_t = \frac{\rho C_p V t_1}{K} \quad (10)$$

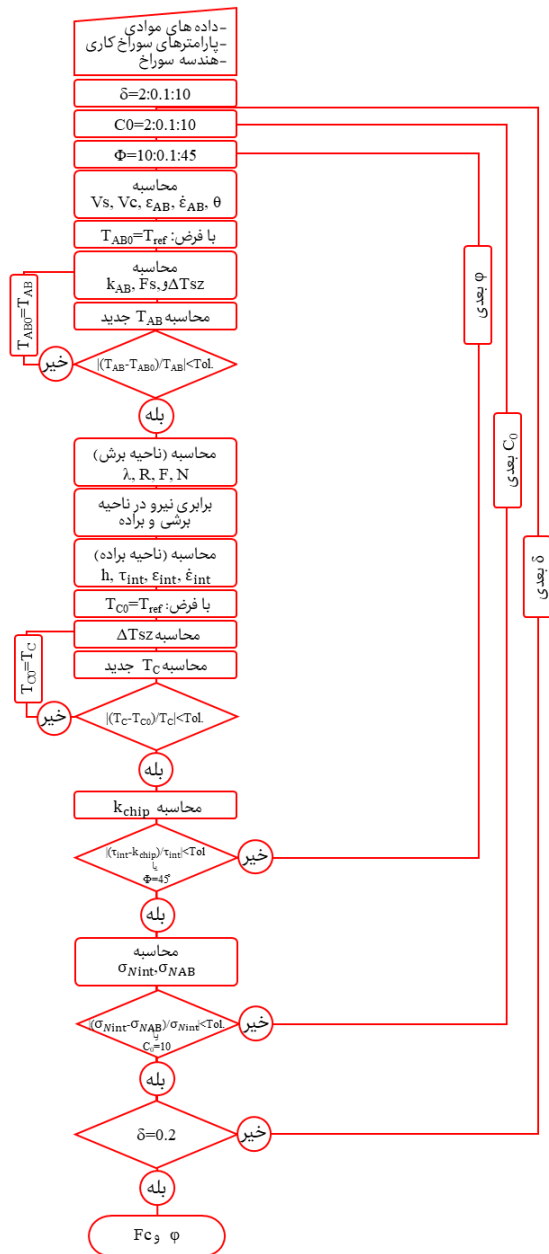
که در آن t ضخامت براده نتراشیده، t_c ضخامت براده، R نیروی برآیند، F_c و F_T مؤلفه‌های نیروی برش، F و N نیروهای مماسی و عمودی در سطح مشترک براده با ابزار برش، k_{AB} تنش تسلیم ماده، λ زاویه اصطکاک، ϕ زاویه برش، α زاویه براده و θ زاویه تمایل می‌باشند. C_n نیز ثابت الگوریتم است که به صورت بازگشتی محاسبه می‌گردد [5]. از سوی دیگر، تنش برشی و تنش نرمال در ناحیه تماس براده با ابزار (روی سطح براده)، به ترتیب با معادله ۱۴ و ۱۵ قابل محاسبه است:

$$\tau_{int} = \frac{F}{hw} \quad (11)$$

$$\sigma_N = \frac{N}{hw} \quad (12)$$

$$h = \frac{t \sin \theta}{\cos \lambda \sin \phi} \left(1 + \frac{C_0 n_{eq}}{3 \tan \theta} \right) \quad (13)$$

که در آن w عرض ناحیه برش و h طول ناحیه تماس می‌باشند. در این الگوریتم، تعیین زاویه برش به صورت پله‌ای-بازگشتی انجام می‌شود. زمانی که زاویه برش به دست آمد، ضخامت براده و دیگر مؤلفه‌های نیرو قابل دستیابی هستند. برای به دست آوردن زاویه



شکل ۳) الگوریتم تخمین نیروهای برش توسط مدل آکسلی [7]

۳- مدل برش متعامد معادل فرایند سوراخ‌کاری

در فرایند سوراخ‌کاری دو ناحیه اصلی مته، شامل لبه برنده اصلی ابزار و نوک مته حرارت و نیرو را در سوراخ‌کاری تولید می‌کنند. جان مته نقش مهمی در استحکام ابزار مته نسبت به خمش جانبی و بارهای نامتعادل ایفا می‌کند. باین‌حال، برش در راستای این لبه به علت زاویه براده منفی بزرگ و سرعت برشی پایین نزدیک به مرکز مته مؤثر نیست [8]. لذا اثر این لبه در مدل‌سازی حذف شد. علاوه بر این، با توجه به بالا بودن مدول الاستیک و ضریب انتقال حرارت پایین، ابزار در مدل‌سازی تحلیلی به صورت صلب در نظر گرفته شد. این فرض اثرات در نظر نگرفتن لبه جان مته را کمتر می‌کند، اما بارهای حرارتی-مکانیکی را تشدید می‌کند. باین‌حال

تسلیم به الگوریتم فوق اضافه گردید. در واقع مدل جانسون-کوک، تنش تسلیم را به عنوان تابعی از نرخ کرنش و دمای فرایند مطرح می‌کند (معادله ۲۳ و ۲۴). که به صورت زیر می‌شود:

$$k_{AB} = \frac{1}{\sqrt{3}} (A + B \epsilon_{AB}^n) (1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}_{AB}}{\dot{\epsilon}_0}) (1 - \frac{T_{AB} - T_0}{T_m - T_0})^m \quad (19)$$

$$k_{chip} = \frac{1}{\sqrt{3}} (A + B \epsilon_{int}^n) (1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}_{int}}{\dot{\epsilon}_0}) (1 - \frac{T_{int} - T_0}{T_m - T_0})^m \quad (20)$$

رابطه جانسون-کوک به طور گسترده برای تجزیه و تحلیل تغییر شکل و نرخ کرنش بالا در فلزات استفاده می‌شود. این یک رابطه تجربی برای تنش جریان (σ) ماده فراهم می‌کند این معادله به صورت زیر ایجاد شد:

$$\sigma = (A + B \epsilon^n) (1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}) (1 - \frac{T - T_r}{T_m - T_r})^m \quad (21)$$

در معادله بالا ε کرنش معادل، ε̇ نرخ کرنش معادل، ε̇₀ نرخ کرنش مرجع، T دمای لحظه ای ماده، T_r دمای اتاق و T_m دمای ذوب یک ماده معین است. A, B, C, n و m ثابت هایی هستند که با آزمایش ماده به دست می‌آیند.

تنش جریان مواد، زمانی افزایش می‌یابد که مواد در معرض نرخ کرنش بالا هستند.

مدل مواد جانسون کوک فرض می‌کند که تنش جریان به طور مستقل تحت تأثیر کرنش، نرخ کرنش و دما قرار می‌گیرد.

مدل آکسلی با معادله بنیادی جانسون - کوک سازگار است و اجازه می‌دهد تا از خواص مواد برای تعیین نیروهای برشی استفاده کند، که بسیار مفید است زیرا تنها پارامترهای جانسون کوک برای یک ماده خاص به منظور پیش‌بینی نیروهای برشی در طول ماشین کاری این ماده مورد نیاز است [6].

کرنش و نرخ کرنش نیز از روابط ۲۳ تا ۲۴ قابل محاسبه است:

$$\epsilon_{AB} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \left(\frac{\cos \alpha}{\sin \phi \cos(\phi - \alpha)} \right) \quad (22)$$

$$\dot{\epsilon}_{AB} = \frac{C_n V_s}{\sqrt{3} l} \quad (23)$$

$$C'_n = C_n n \frac{B \epsilon_{AB}^n}{A + B \epsilon_{AB}^n} \quad (24)$$

$$\epsilon_{int} = 2\epsilon_{AB} + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{h}{\delta t_c} \quad (25)$$

$$\dot{\epsilon}_{int} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_c}{\delta t_c} \quad (26)$$

که در آن ε_{AB} کرنش موثر در امتداد AB، ε̇_{AB} نرخ کرنش موثر در امتداد AB، ε_{int} کرنش معادل در سطح مشترک براده و ابزار، ε̇_{int} نرخ کرنش معادل در سطح مشترک براده و ابزار، نرخ کرنش موثر در مدل تنش جریان جانسون کوک، T_m دمای نقطه ذوب ماده و T_{AB} دما در امتداد AB، T₀ دمای مرجع می‌باشد. A, B, C, n, m و ε̇₀ نیز ثوابت موادی هستند [3].

الگوریتم آکسلی توسعه داده شده در این مقاله در شکل ۳ آمده است.

$$\cot \alpha_{oMe} = \frac{\cot(\alpha_{fMe}) - \tan \lambda_{sMe} \cos k_{rMe}}{\sin k_{rMe}} \quad (31)$$

عمق برش مدل معادل f در فرایند برش متعامد نیز از رابطه (۳۲) قابل محاسبه است.

$$f = \frac{f_z}{2} \cdot \sin k_{rMe} \quad (32)$$

۴- نتایج و بحث

همانطور که اشاره گردید، در این پژوهش مدل آکسلی بهبودیافته توسط مدل موادی جانسون-کوک ارائه گردید. به همین منظور و بر اساس الگوریتم ارائه شده، یک برنامه کامپیوتری برای پیش‌بینی نیروهای برش در نرم افزار MATLAB توسعه داده شد. ماده مورد مطالعه فولاد AISI ۴۳۴۰ با سختی متوسط ۴۵۰ ویکرز (HV) می باشد که خواص فیزیکی و مکانیکی ماده مذکور در جدول ۱ ارائه شده است. برای افزایش دقت مدل، مدول الاستیسیته و تنش تسلیم ماده با استفاده از مدل جانسون-کوک، وابسته به دما در نظر گرفته شده است.

۴-۱- نتایج مدل تحلیلی

کد تحلیلی توسعه داده شده در Matlab 2021b روی کامپیوتری با CPU Core i7 (۲/۶۶ گیگاهرتز) و ۱۶ گیگابایت حافظه اجرا شد. طبق برنامه نوشته شده در متلب، نیروی مماسی وارد بر مته ۱۷۵۰ نیوتن بدست می آید.

بر این اساس و برای بدست آوردن گشتاور مته در فرایند سوراخ‌کاری از رابطه کلاسیک محاسبه گشتاور استفاده می کنیم:

$$M_c = f_c \times \frac{d_c}{2} \quad (33)$$

$$M_c = 1750 N \times \frac{0.008 m}{2} = 7 N.m$$

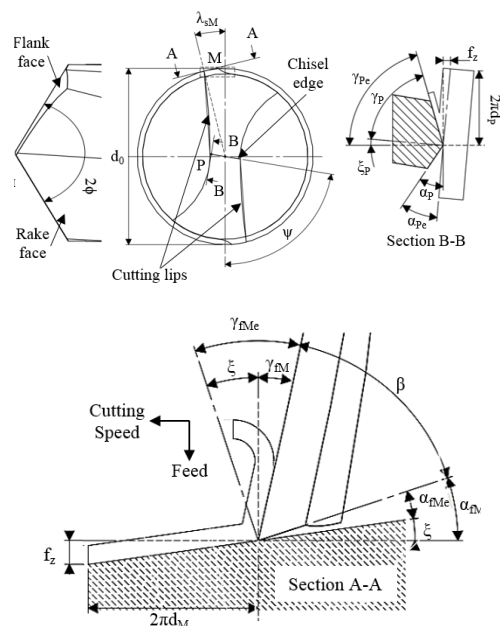
بر طبق محاسبات، گشتاور مته سوراخ‌کاری حدود ۷ نیوتن متر بدست می آید.

جدول ۱) خواص فیزیکی و مکانیکی AISI 4340 مورد استفاده در مدلسازی تحلیلی

مقدار	واحد	ویژگی های فیزیکی		
7850	kg/m ³	چگالی ($\rho_{workpiece}$)		
0.3	-	ضریب پواسون (ν)		
1	-	نرخ کرنش مرجع (ϵ_0)		
293	K	دمای مرجع (T_0)		
1793	K	نقطه ذوب (T_m)		
361	J/kg.K	ظرفیت گرمایی ویژه (C_p)		
41.7	W/m.K	ضریب رسانایی حرارتی ($k_{workpiece}$)		
1.13×10^{-5}	1/K	ضریب انبساط حرارتی ($\alpha_{workpiece}$)		
پارامترهای موادی مدل جانسون-کوک				
A(MPa)	B(MPa)	C	n	m
1029	510	0.014	0.26	1.03

به علت ساده‌سازی، فرض ابزار صلب حتی در روش‌های عددی نیز متداول است [9].

همچنین فرض گردید که مته دارای شکلی مخروط با بیشترین قطر در نوک ابزار بوده و دیواره ابزار تأثیری بر فرایند برش ندارد. بنابراین، فرایند برش تنها در گوشه لبه برش اصلی مته در نظر گرفته شد. بر اساس تئوری برش، در این ناحیه می‌توان از مدل فرایند برش متعامد استفاده کرد (شکل ۴). تخمین فرایند سوراخ‌کاری با فرایند برش متعامد در لبه اصلی ابزار [10]. با توجه به اینکه هدف به دست آوردن تنش‌های پسماند در دیواره سوراخ است و با فرض راه به در بودن سوراخ، این معادل‌سازی صحت بیشتری پیدا می‌کند. از سوی دیگر، با توجه به هندسه متقارن محوری مسئله، مدل تحلیلی به صورت دوبعدی در نظر گرفته شد.



شکل ۴) تخمین فرایند سوراخ‌کاری با فرایند برش متعامد در لبه اصلی ابزار

بر این اساس نیاز است تا زوایای معادل مدل برش متعامد بر اساس زوایای مته به دست آید. در صفحه کاری فرضی، زوایای براده و آزاد مؤثر در مقطع A-A و انتهای لبه برش اصلی روی (نقطه M) از معادله‌های (۲۷) تا (۲۹) قابل محاسبه است [10].

$$\gamma_{fMe} = \gamma_{fM} + \xi \quad (27)$$

$$\alpha_{fMe} = \alpha_{fM} - \xi \quad (28)$$

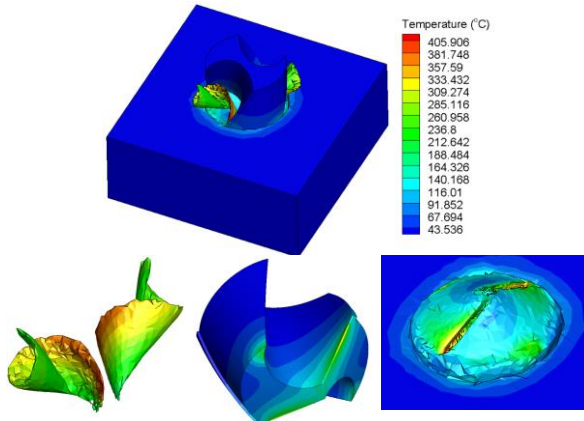
$$\xi = \arctan\left(\frac{f}{\pi d_M}\right) \quad (29)$$

که در نقطه M، زاویه لبه برش، γ_{oM} زاویه براده در صفحه عمودئو λ_{sM} زاویه تمایل ابزار می‌باشند. سپس زاویه براده مؤثر γ_{oMe} و زاویه آزاد مؤثر α_{oMe} در لبه ابزار و در صفحه برش متعامد و در نقطه M به صورت معادله‌های (۳۰) و (۳۱) تعریف می‌گردد.

$$\tan \gamma_{oMe} = \frac{\tan \gamma_{fMe} - \tan \lambda_{sMe} \cos k_{rMe}}{\sin k_{rMe}} \quad (30)$$

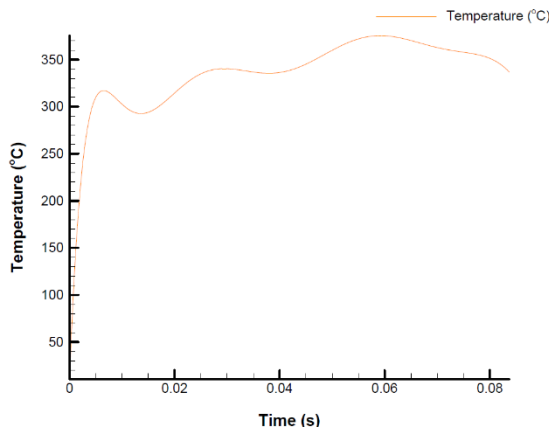
بیشترین میزان دما در لبه های برش ابزار وجود دارد که در این نواحی، سایش ابزار رخ می دهد. که با مشاهدات تجربی سایش ابزار در فرایند مطابقت داشت.

برای ابزار، دما در ناحیه ماشینکاری یکی از عوامل مهم در عمر ابزار و کیفیت سطح است حرارت ایجاد شده در ناحیه برش، ناشی از تغییر شکل پلاستیک مواد هنگام تشکیل براده و همچنین اصطکاک بین ابزار با براده و سطح قطعه کار است. دما علاوه بر سایش ابزار، باعث تغییر شکل براده و کاهش کیفیت سطح قطعه کار می شود.



شکل ۵) قطعه کار قبل از انجام سوراخ کاری

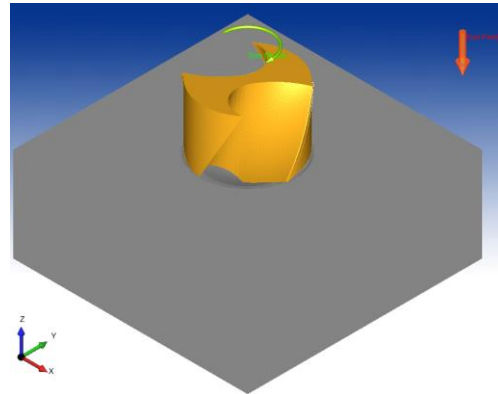
شکل ۷) کانتور دمایی فرایند سوراخکاری بر روی قطعه کاری با جنس AISI4340 از راست به چپ به تفکیک عبارتند از: الف) کانتور دمایی قطعه کار، ب) کانتور دمایی مته، ج) کانتور دمایی براده



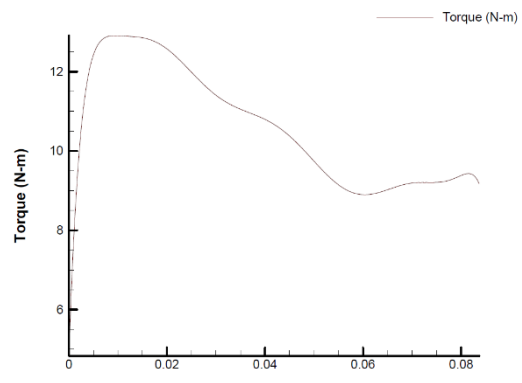
شکل ۸) نمودار دما ابزار بر حسب زمان

نرخ کرنش پلاستیک طبق تحلیل شکل ۹ بیشترین مقدارش در براده های حاصل از فرایند است که مقدار ماکزیمم آن حدود ۲۰۰۰ واحد بر ثانیه می باشد.

۴-۲- شبیه سازی المان محدود و اعتبارسنجی مدل تحلیلی
به منظور اعتبارسنجی مدل تحلیلی توسعه یافته، از مدلسازی عددی در نرم افزار المان محدود AdvantEdge و تعریف پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مشابه جدول ۱ استفاده گردید. در این مدل، به منظور حذف اثرات ناخواسته ناشی از ورود ابزار مته به قطعه کار، مته در حالت میانی درگیری با قطعه کار شبیه سازی شد (شکل ۵).



طبق شکل ۶ رنج تغییرات گشتاور در فرایند سوراخکاری ۴/۸۳ تا ۱۲/۹۱ نیوتن متر می باشد. زمانی که مته از زمان های ابتدایی فرایند سوراخکاری میگذرد و مقدار آن به یک پیوستگی می رسد که مقدار آن در این پیوستگی حدود ۸ نیوتن متر می باشد. گشتاور بدست آمده از حل عددی در مقایسه با نتیجه بدست آمده از حل تحلیلی ۱۲/۵ درصد اختلاف نتایج را نشان می دهد که نشان دهنده تقریب قابل قبول در مدل تحلیلی ارائه شده می باشد.

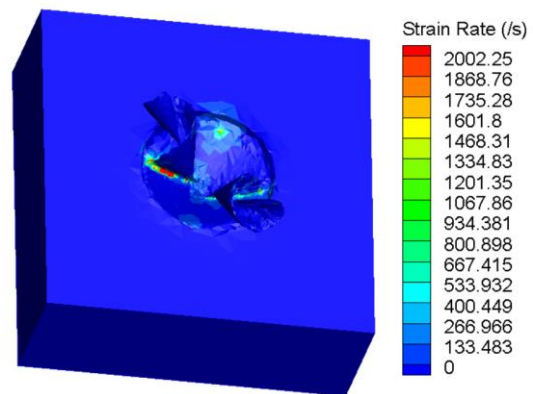


شکل ۶) نمودار گشتاور بر حسب زمان

به منظور بررسی بهتر فرایند سوراخ کاری پارامتر دما هم بررسی گردید. طبق شکل ۷ مشاهده می گردد که براده بیشترین سهم حرارتی را داراست تا بتواند به این صورت، حرارت را از منطقه ماشین کاری دور کند.

شکل ۸ تغییرات دما بر روی ابزار را نشان می دهد که دما در ابزار از ۱۰ درجه تا ۳۷۶ درجه سانتی گراد تغییر می کند. مطابق شکل ۸

- 8- Strenkowski, J, C. Hsieh, and A. Shih, *An analytical finite element technique for predicting thrust force and torque in drilling*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004. 44(12-13): p. 1413-1421.
- 9- Ehmann, K., et al., *Machining process modeling : a review*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997. 119(4B): p. 655-663.
- 10- Wu, J. and R. Di Han, *A new approach to predicting the maximum temperature in dry drilling based on a finite element model*. Journal of Manufacturing Processes, 2009:(1)11 p. 19-30.



شکل ۹) نرخ کرنش پلاستیک فرایند سوراخکاری قطعه کار جنس AISI4340

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله طبق بررسی‌های انجام شده برای اولین بار مدل آکسلی بهبود یافته که در واقع ترکیب مدل آکسلی و جانسون-کوک می‌باشد معرفی شد. که این مدل ضعف‌های مدل آکسلی که در نظر نگرفتن اثر نرخ کرنش، کارسختی و افزایش حرارت بود، رفع کرد. در این مقاله کد Matlab آکسلی بهبود یافته برای فرایند سوراخ کاری نوشته شد که نتیجه آن را با مدلسازی تحلیلی خروجی گرفته شده از نرم افزار AdvantEdge مقایسه شد. پارامتر مورد بررسی ما گشتاور بود که میزان اختلاف حل عددی و تحلیلی ۱۲/۵ درصد است که نشان دهنده تقریب قابل قبول در مدل تحلیلی ارائه شده است.

مراجع

- 1- Pang, L., *Analytical modeling and simulation of metal cutting forces for engineering alloys*. 2012: University of Ontario Institute of Technology (Canada).
- 2- Li, B., et al., *Analytical prediction of cutting forces in orthogonal cutting using unequal division shear-zone model*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011. 54(5): p. 431-443.
- 3- Chen, C.K.-M., *Analysis of the metal cutting process using the shear plane model*. 2010, Montana State University-Bozeman, College of Engineering.
- 4- Madhavan, V. and A. Adibi-Sedeh, *Understanding of finite element analysis results under the framework of Oxley's machining model*. Machining science and technology, 2005. 9(3): p. 345-368.
- 5- Sagar, C.K., et al., *Prediction and optimization of machining forces using oxley's predictive theory and RSM approach during machining of WHAs*. Defence Technology, 2019. 15(6): p. 923-935.
- 6- Saadatbakhsh M H, rasti A, Sadeghi M H, hassanpour H, omiddoodman A. Compare and study of hole quality characteristics in helical milling and drilling. Modares Mechanical Engineering 2015; 14 (16) :332-338
- 7- Rasti, A., M.H. Sadeghi, and S.S. Farshi, *An analytical study on residual stresses in drilling of hardened steel*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018. 99(9): p. 2389-2405.