

# پیش‌گویی نیروهای برشی در امتداد لبه‌های برش مت‌مارپیچ

دکتر محمد رضا رازفر<sup>i</sup>، رضا صائبی راد<sup>ii</sup>

## چکیده

در این مقاله با اعمال اصل بقای انرژی در فرآیند سوراخ‌کاری، یک مدل ریاضی برای پیش‌گویی مقادیر نیروی محوری و گشتاور پیچشی و همچنین نحوه توزیع آنها در مقاطع مختلف لبه‌های برش مت‌مارپیچ ارائه شده است. با اعمال روش خط مربعات حداقل، ثابت‌های مدل ریاضی اخیر در شرایط سوراخ‌کاری قطعه کار چدنی با مت‌های مارپیچ فولاد تندبر محاسبه و نشان داده شده است که با اطلاعات حاصل از آزمایش‌های نیروسنجی تطابق خوبی دارند. حداکثر خطای ملاحظه شده برای حالتی که کل پیشانی مت‌مارپیچ (شامل مناطق سه گانه برش) با قطعه کار چدنی درگیر باشد ۷/۲۹ درصد است.

## کلمات کلیدی

فرآیند سوراخ‌کاری، مت‌مارپیچ، نیروی برشی، نیروی محوری، گشتاور پیچشی

## *Presenting the optimal formulas for calculation of cutting forces and torque in drilling process*

M.R. Razfar ; R. Saebi rad

### ABSTRACT

The goal of this paper is presenting the optimal formulas and calculation of cutting forces and torque in drilling process. The presented mathematical models are developed to predict the thrust and torque forces at the different regions of cutting on a twist drill. The geometry of the drilling process (chipload, cutting angles,..) was exploited for developing this models.

The input to the model is the machining conditions and the tool geometry and the model predicts the thrust and torque profile along the cutting lips and the chisel edge of the twist drill.

### KEYWORDS

Drilling process , Twist drill , Cutting force , Thrust force , Torque force

<sup>i</sup> استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر دانشکده مهندسی مکانیک Razfar@aut.ac.ir

<sup>ii</sup> کارشناس ارشد مکانیک ساخت و تولید استاد مدعو دانشگاه صنعتی امیرکبیر دانشکده مهندسی مکانیک کارگاه ماشین 2  
[reza\\_saebirad@yahoo.com](mailto:reza_saebirad@yahoo.com)

ماشینها از قطعات و اجزای متعددی ساخته و به وسیله پیچ و مهره ها، پینها و ... روی هم سوار می شوند. برای مونتاژ این اجزا و استفاده از وسایل اتصال، در داخل قطعات سوراخ‌هایی ایجاد می شود؛ سوراخ‌هایی که مقطع دایره‌ای دارند و با روش براده برداری و به وسیله ابزاری به نام مته ایجاد می شوند. این عمل را سوراخ‌کاری می‌نامند و علاوه بر موارد فوق به منظور عبور مایعات و گازها و همچنین محل قرار گرفتن پیستون‌ها و محورها و سیستم‌های انطباقی و راهنماها و کاربردهای دیگری در قطعات مختلف استفاده می شود. آگاهی از اندازه نیروی محوری و گشتاور پیچشی عملیات سوراخ‌کاری در انتخاب نوع ماشین ابزار و مقادیر پارامترهای ماشین‌کاری پر اهمیت است. چنانچه توان ماشین مته برای اجرای عملیات سوراخ‌کاری کافی نباشد، طراحی و اجرای سوراخ‌های پیش مته مناسب ضرورت پیدا می کند. برای این کار لازم است آگاهی کافی از توزیع نیروهای برشی در امتداد لبه های برش ابزار سوراخ‌کاری حاصل شود. مقاله حاضر به این موضوع پرداخته و نحوه توزیع نیروهای برشی در امتداد لبه های برش مته مارپیچ را به صورت فرمولهای ریاضی انتگرالی ارائه داده است.

## ۲- اصول مدل‌سازی نیروهای برشی در عملیات

### سوراخ‌کاری و در امتداد لبه‌های برش مته مارپیچ

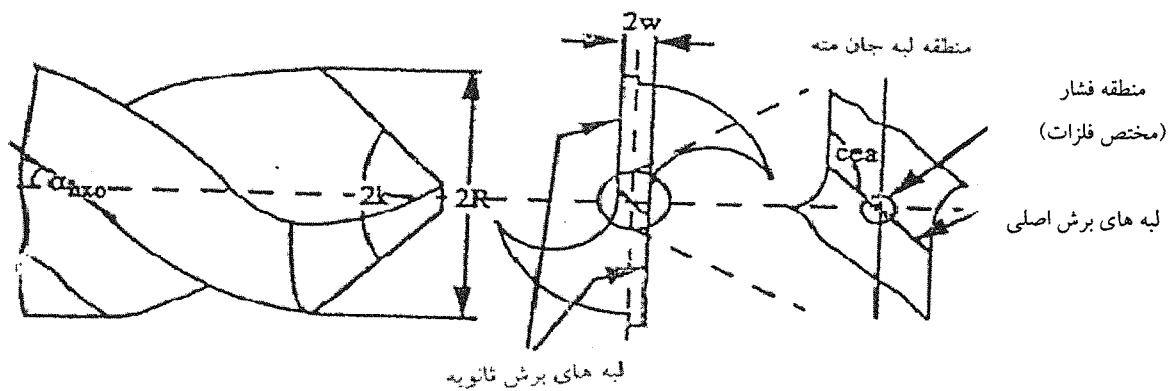
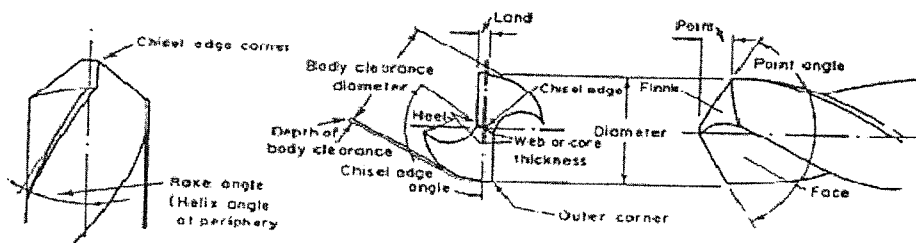
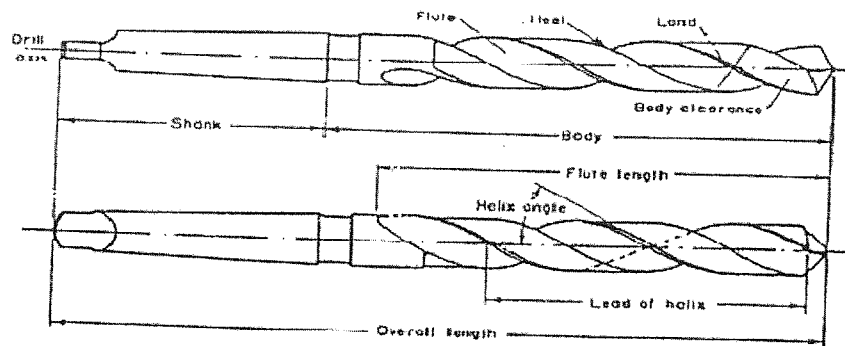
مرچنت با به کار بردن روش اصل بقای انرژی نشان داد که اگر براده در اثر برآیند نیروی ماشین‌کاری در تعادل باشد، نیروهای برشی متناسب با سطح مقطع براده تغییرشکل نیافته خواهد شد. سطح مقطع براده تراشیده، سطح فرضی منطبق بر صفحه برش است که در صفحه‌ای عمود بر محور سرعت برشی اندازه گیری می‌شود. ثابت این تناسب، فشار مخصوص برش است که تابعی از شرایط ماشین‌کاری، هندسه ابزار برش، ضخامت براده تراشیده ( $t_c$ )، زاویه براده نرمال ( $\alpha_n$ ) و سرعت برشی (V) می‌باشد [۵].

پارامترهای مهمی که هندسه مته مارپیچ را توصیف می‌کنند عبارتند از: قطر مته (2R)، زاویه رأس مته (2K)، زاویه مارپیچ

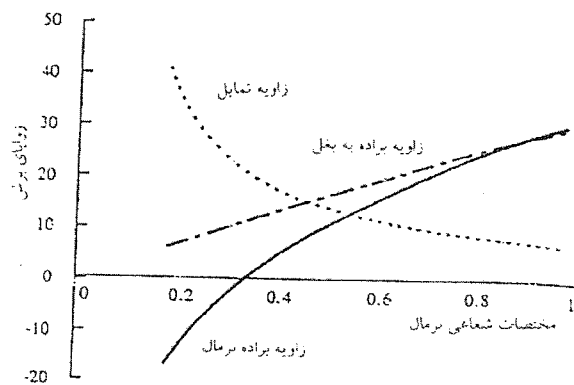
مته ( $\alpha_{nxo}$ )، ضخامت جان مته (2W)، زاویه لبه جان مته (Cea) و زاویه آزاد مته ( $\beta_0$ ). عمل برش در پیشانی مته مارپیچ و در مناطق سه گانه واقع بر لبه‌های برنده اصلی و لبه جان مته انجام می‌شود.

در شکل (۱) هندسه مته مارپیچ و مناطق سه گانه برش در عملیات سوراخ‌کاری مطابق استاندارد BS 328 نمایش داده شده است، عمل برش در طول لبه های برنده مته مارپیچ، یک فرآیند ماشین‌کاری سه بعدی است. سرعت برشی، زاویه تمایل و زاویه براده در امتداد لبه‌های برش ابزار نسبت به فاصله شعاعی (r) از محور مته مارپیچ تغییر می‌کند فاصله شعاعی، مسافت نقاط واقع بر لبه‌های برش مته مارپیچ است که نسبت به محور ابزار و در صفحه ای عمود بر آن اندازه گیری می شود معادلاتی که پارامترهای یاد شده را در امتداد لبه‌های برش مته مارپیچ توصیف می کنند، تابعی از مختصات شعاعی نرمال ( $\rho = r/R$ ) می باشند ویژگی مهم معادلات اخیر این است که برای دو مته مارپیچ با قطرهای متفاوت و نسبت ضخامت جان مته به قطر یکسان برای نقاط دارای مختصات شعاعی نرمال برابر، کلیه زوایای برش (زاویه‌های براده، مارپیچ و تمایل) در امتداد لبه‌های برنده ابزار برابر است. این ویژگی به تشابه هندسی مته‌های مارپیچ معروف است. در شکل (۲) تغییرات زوایای برش نسبت به مختصات شعاعی نرمال ( $\rho$ ) و در امتداد لبه‌های برش مته مارپیچ ترسیم شده است.

همچنانکه در شکل مشاهده می شود، زاویه براده نرمال به طور قابل ملاحظه‌ای در امتداد لبه‌های برش مته مارپیچ تغییر می کند، مقدار این زاویه در اطراف مرکز مته منفی و در محیط ابزار بیشترین مقدار مثبت را داراست. سرعت برشی یک تابع خطی از فاصله شعاعی نرمال است که مقدار آن در مرکز مته صفر و در دورترین نقطه ( $\rho = 1$ ) دارای مقدار حداکثر است؛ تغییرات زاویه براده نرمال و سرعت برشی در امتداد لبه‌های برش مته مارپیچ سبب تغییر در فشارهای مخصوص برش (در هر دو راستای قائم و مماس بر لبه‌های برش) می‌شود؛ بنابراین نیروهای برشی در امتداد لبه‌های برنده ابزار تغییر می‌کند.



شکل (۱) هندسه مته مارپیچ و مناطق سه گانه برش در عملیات سوراخکاری [۲]



شکل (۲) تغییرات زوایای برش مته مارپیچ نسبت به مختصات شعاعی نرمال [۴]

عمل برش در محیط بیرونی مته مارپیچ ( که دارای حداکثر زاویه براده و سرعت برش است ) نسبت به مرکز آن ( که زاویه براده بیشترین مقدار منفی را شامل بوده و سرعت برشی حداقل است ) ، مؤثرتر است. فشارهای مخصوص برش به سمت مرکز مته افزایش و در امتداد قطر خارجی آن کاهش می‌یابد، برای همین مدلی برای پیش‌گویی نیروهای برشی در امتداد لبه‌های برنده مته مارپیچ مناسب است که برای تغییرات پارامترهای برشی ( شامل زاویه براده نرمال و سرعت برشی ) عدد ارایه داده و در صورت امکان تغییرات فشارهای مخصوص برش را در امتداد لبه‌های برش پیش‌گویی کند.

با توجه به اینکه فشارهای مخصوص برش بر روی لبه‌های برنده تابعی از مختصات شعاعی نرمال ( $\rho$ ) است، نیروهای برشی در هر نقطه از لبه های برش حاصل ضرب فشارهای مخصوص برش در سطح مقطع المانی براده تراشیده در همان نقطه است. مطابق شکل (۳) سطح مقطع براده تراشیده برای این المان برابر  $\frac{a_f}{2} dx$  و  $d_x$  تصویر لبه برش در مقطع المانی بر روی سطح عمود بر محور مته است مطابق شکل  $dx = \cos i(\rho) \cdot dr$  بوده و  $i(\rho)$  زاویه تمایل لبه برش مته مارپیچ در موقعیت  $\rho$  است تعادل المانی نیروهای برشی در دو راستای نرمال و مماسی بشرح روابط زیر نوشته می‌شود [۵]:

$$\begin{aligned} df_n(\rho) &= K_n(\rho) \frac{a_f}{2} d_x = K_n(\rho) \cos i(\rho) R dp \\ df_t(\rho) &= K_t(\rho) \frac{a_f}{2} d_x = K_t(\rho) \frac{a_f}{2} \cos i(\rho) R dp \end{aligned} \quad (1)$$

در رابطه اخیر  $K_n(\rho)$  و  $K_t(\rho)$  فشارهای مخصوص برش در دو جهت نرمال بر لبه‌های برش مته مارپیچ می باشد.

$$K_n = a_0 t_c^{a_1} V^{a_2} e^{a_3 \alpha_n}, K_t = b_0 t_c^{b_1} V^{b_2} e^{b_3 \alpha_n} \quad (2)$$

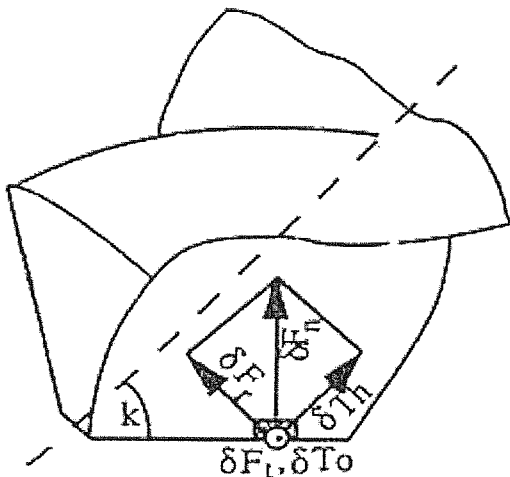
با توجه به اینکه معادلات سرعت برشی (V) و زاویه براده نرمال ( $\alpha_n$ ) به عنوان تابعی از مختصات شعاعی نرمال معلوم

هستند بنابراین فشارهای مخصوص برش در نقاطی واقع بر لبه‌های برش مته مارپیچ و با معلوم بودن ضرایب معادله (۲) محاسبه می شوند. این ضرایب به روش تجربی قابل محاسبه است در عملیات ماشین‌کاری با ابزار برش تک لبه مثل تراشکاری و ... امکان طراحی مجموعه ساده‌ای از آزمایشها جهت محاسبه ضرایب معادلات فشارهای مخصوص برش وجود دارد ولی طرح چنین مجموعه ای از آزمایشها برای عملیات سوراخ‌کاری امکان پذیر نیست. زیرا هندسه مته مارپیچ بسیار پیچیده است. تغییرات سرعت برشی ، زاویه براده و زاویه تمایل در امتداد لبه های برش مته مارپیچ این ابزار را از سایر ابزارهای برشی متمایز کرده است. اخیراً محققانی چون Stephenson و Agapiou با بکارگیری روشهای نیمه تجربی ، نیروهای برشی را در امتداد لبه های برنده مته مارپیچ مدل‌سازی کرده اند اما ضرایب مدل آنها از اجرای آزمایش‌های تراشکاری حاصل شده است روشی که این دانشمندان به کار برده اند نیازمند اجرای آزمایش‌های بسیار زیادی است تا بدین ترتیب محدوده تغییرات زوایای برش و سرعت برشی در امتداد لبه‌های برنده مته مارپیچ در معادلات نهایی لحاظ شود [۷]. برای ساده سازی روش محاسبه ضرایب معادله (۲) و فرمول بندی معادلات فشارهای مخصوص برش از تشابه هندسی مته‌های مارپیچ استفاده می گردد. دو مته مارپیچ با قطر مختلف و هندسه مشابه را در نظر بگیرید . در صورتی که نسبت دور اسپیندل به قطر مته برابر باشد در این صورت سرعتهای برشی با مختصات شعاعی نرمال برابر ، یکسان خواهد بود و بدین ترتیب توزیع فشارهای مخصوص برش نسبت به مختصات شعاعی نرمال در امتداد لبه‌های برش این دو مته کاملاً مشابه است. زاویه براده نرمال و سرعت برشی مماسی تابع های پیوسته ای از مختصات شعاعی نرمال است؛ بنابراین فشارهای مخصوص برش بر حسب مختصات شعاعی نرمال مدل‌سازی شده و به شرح روابط زیر بیان می‌شود. [۵]:

$$K_n(\rho) = c_1 \rho^a, K_t(\rho) = c_2 \rho^b \quad (3)$$

ضرایب  $a, c_2, c_1$  و  $b$  وابسته هندسه مته مارپیچ و شرایط سوراخ‌کاری می باشند .

$$\cos i(\rho) = \{1 - \sin^2 i(\rho)\}^{1/2} = \left\{1 - \left(\frac{w}{R\rho} \sin k\right)^2\right\}^{1/2} \cong \left\{1 - \frac{w^2 \sin^2 k}{2R^2 \rho^2}\right\} \quad (6)$$



شکل (۳) جهت مؤلفه نیروهای برشی اعمال شده بر المان لبه های برش مته مارپیچ [۴]

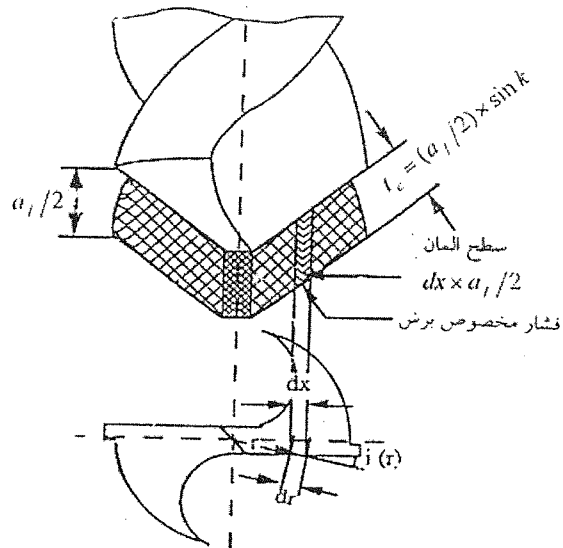
چنانچه رابطه های (۳) و (۶) در رابطه (۴) جای گذاری شود و در محدوده  $\rho = \tau$  تا  $\rho$  انتگرال گیری شود فرمولهای زیر جهت محاسبه مقادیر نیروی محوری و گشتاور پیچشی در محدوده مذکور واقع بر لبه های برش مته مارپیچ ارایه می شود:

$$F_{Acl} = \frac{c_1 R a_f \sin k}{(a+1)} \{1 - \tau^{(a+1)}\} - \frac{c_1 a_f w^2 \sin^3 k}{2R(a-1)} \{1 - \tau^{(a-1)}\} \quad (7)$$

$$M_{icl} = \frac{c_2 R^2 a_f}{(b+2)} \{1 - \tau^{(b+2)}\} - \frac{c_2 a_f w^2 \sin^2 k}{2b} \{1 - \tau^b\}$$

#### ۲-۱- مدل سازی نیروهای برشی واقع بر لبه های برنده اصلی مته مارپیچ

در مدل پیشنهادی برای لبه های برنده اصلی مته مارپیچ (رابطه ۷) تنها پنج آزمایش جهت تخمین ضرایب مدل کافی است بدین ترتیب خاصیت تغییر زوایای برش و سرعت برشی در امتداد لبه های برنده مته مارپیچ در نظر گرفته می شود. با ایجاد سوراخ پیش مته عملیات برش لبه جان مته حذف می شود. روش کار بدین نحو است که یک سوراخ پیش مته در قطعه کار ایجاد شده و همزمان با ورود مته مارپیچ اطلاعات نیروی ثابت



شکل (۴) سطح مقطع براده نتراشیده در عملیات سوراخ کاری با مته مارپیچ [۴]

مطابق شکل (۴) المان نیروهای برشی به فرم گشتاور پیچشی و نیروی محوری نوشته شده است و با انتگرال گیری از این المان ها در محدوده های معین واقع بر لبه های برش مته مارپیچ نیروهای برشی محاسبه می شود. معادلات نیروی محوری و گشتاور پیچشی برای لبه های برنده اصلی مته مارپیچ به صورت روابط زیر خلاصه می شود:

$$F_{Acl} = F_n \sin k = \int_{\tau}^1 2 dF_n(\rho) \sin k$$

$$= \int_{\tau}^1 2 K_n(\rho) \times \frac{a_f}{2} \sin k \cos i(\rho) R d\rho$$

$$M_{icl} = \int_{\tau}^1 2 dF_t(\rho) R \rho \quad (8)$$

$$= \int_{\tau}^1 2 K_t(\rho) \times \frac{a_f}{2} \cos i(\rho) R d\rho$$

در روابط فوق  $\tau$  نسبت طول لبه جان مته:

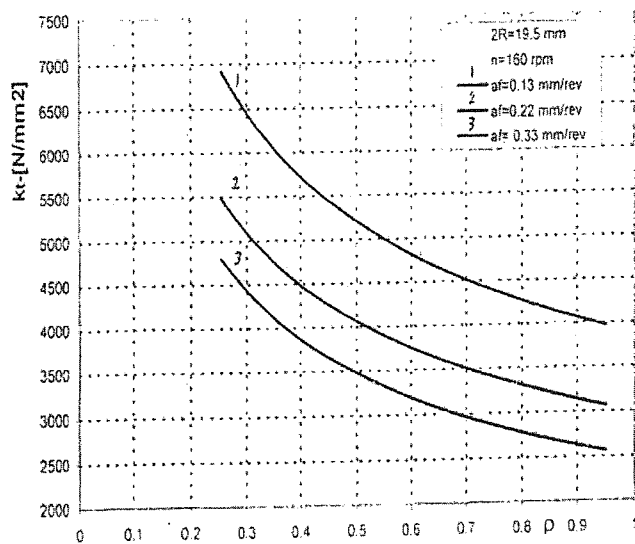
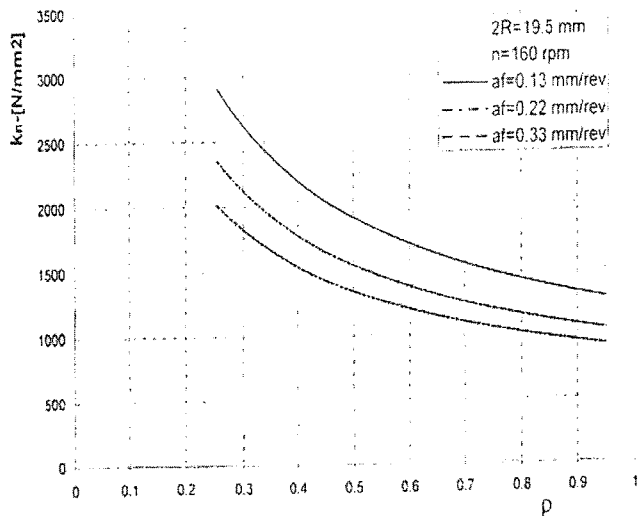
$$(2w / \cos(\pi - cea))$$

به قطر مته مارپیچ است. زاویه تمایل (i) به عنوان تابعی از مختصات شعاعی نرمال با رابطه (۵) بیان می شود.

$$i(\rho) = \sin^{-1} \left\{ \frac{w}{R\rho} \sin k \right\} \quad (5)$$

و مقدار  $\cos i(\rho)$  با رابطه زیر محاسبه می شود. [۴]:



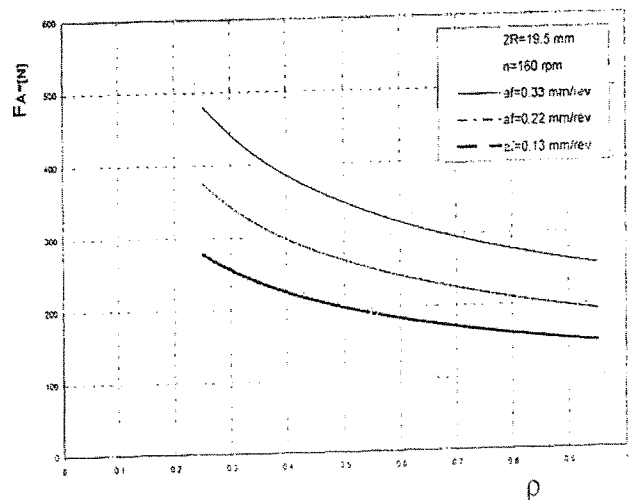
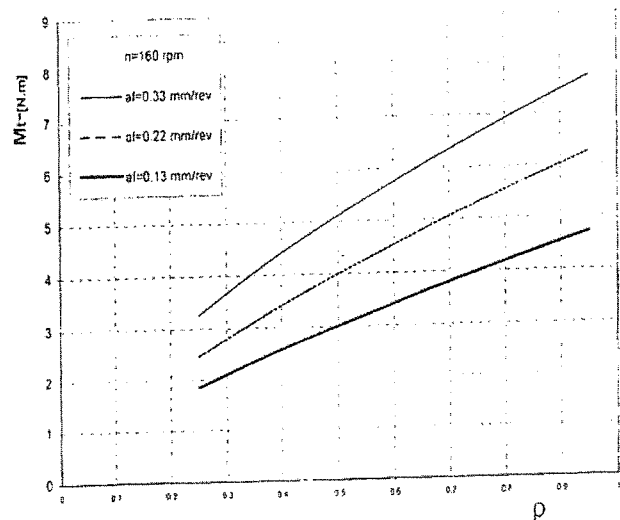


شکل (۷) تغییرات فشارهای مخصوص برش ( $K_t, K_n$ ) بر حسب فاصله شعاعی نرمال ( $\rho$ ) در طول لبه های برش مته مارپیچ قطر مته 19.5mm، سرعت دورانی ثابت 160rpm و نرخ پیشروی متغیر 0.13 mm/rev, 0.22 mm/rev, 0.33 mm/rev

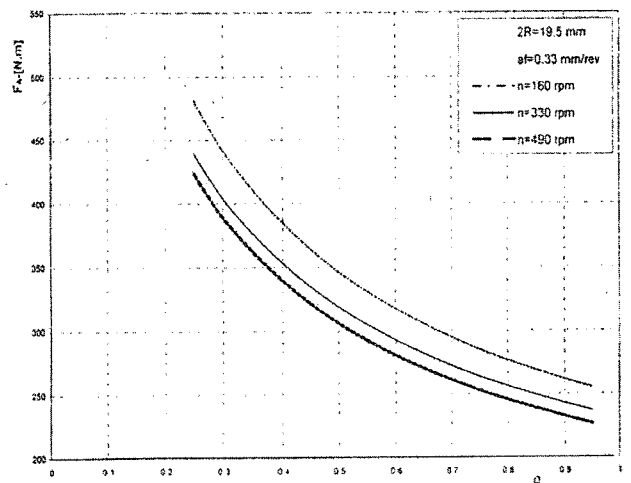
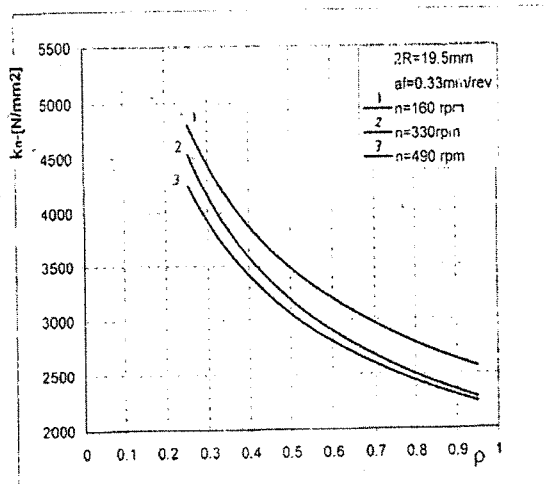
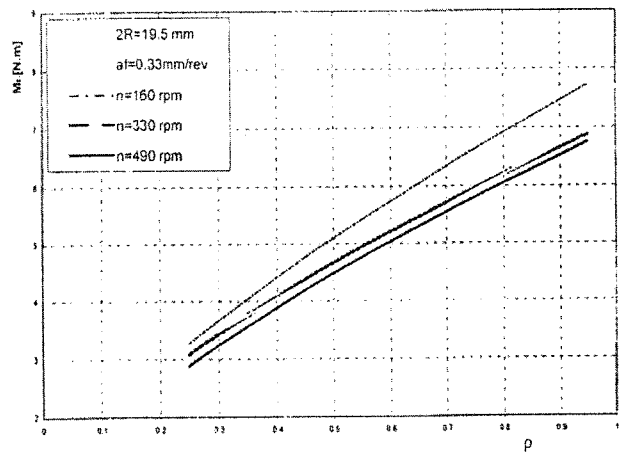
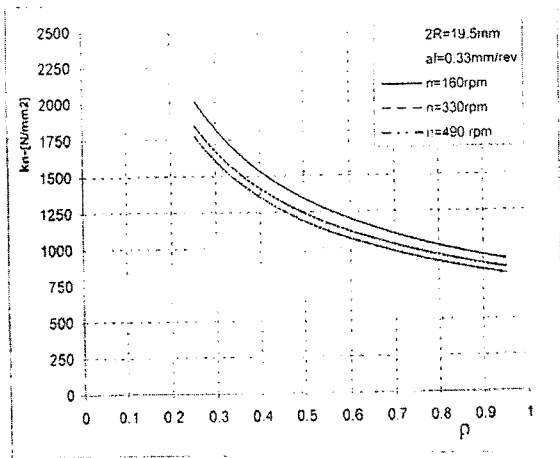
$$\left(\frac{c_1 \rho^a}{t_c^{a_1} V^{a_2}(\rho)}\right) = a_0 e^{a_3 \alpha_n(\rho)} \quad (9)$$

$$\left(\frac{c_2 \rho^b}{t_c^{b_1} V^{b_2}(\rho)}\right) = b_0 e^{b_3 \alpha_n(\rho)}$$

کلیه ضرایب موجود در طرف چپ معادلات فوق معلوم هستند و همچنین رابطه زاویه براده نرمال با مختصات شعاعی نرمال مشخص است، بنابراین طرف چپ معادلات و همچنین زاویه براده نرمال برای مقادیر متفاوت  $\rho$  محاسبه و با لگاریتم گیری از طرفین معادله (۹) و اجرای روش LSL ضرایب  $b_3, a_3, b_0, a_0$  محاسبه می شود [۵].



شکل (۶) تغییرات نیروی محوری (FA) و گشتاور پیشروی (Mt) بر حسب فاصله شعاعی نرمال ( $\rho$ ) در طول لبه های برش مته مارپیچ قطر مته 19.5mm، سرعت دورانی ثابت 160rpm و نرخ پیشروی متغیر 0.13 mm/rev, 0.22 mm/rev, 0.33 mm/rev



شکل (۹) تغییرات فشارهای مخصوص برش ( $K_t, K_n$ ) بر حسب فاصله شعاعی نرمال ( $\rho$ ) در طول لبه های برش مته مارپیچ قطر مته 19.5mm، سرعت دورانی ثابت 160rpm و نرخ پیشروی متغیر 0.13 mm/rev, 0.22 mm/rev, 0.33 mm/rev

شکل (۸) تغییرات نیروی محوری ( $F_A$ ) و گشتاور پیچشی ( $M_t$ ) بر حسب فاصله شعاعی نرمال ( $\rho$ ) در طول لبه های برش مته مارپیچ قطر مته 19.5mm، سرعت دورانی ثابت 160rpm و نرخ پیشروی متغیر 0.13 mm/rev, 0.22 mm/rev, 0.33 mm/rev

معادلات (۲) برای محاسبه فشارهای مخصوص برش در امتداد لبه های برش ثانویه واقع بر لبه جان مته کاربرد دارد. با توجه به اینکه ضخامت براده نتراشیده و زاویه براده نرمال در طول لبه جان مته ثابت است و تنها سرعت برشی تغییر می کند برای همین معادلات فشار مخصوص برش به فرم روابط زیر بازنویسی می شود:

$$\ln K_n(r) = \ln a_0 + a_1 \ln t_c + a_2 \left\{ \ln \left( \frac{2\pi N}{60} \right) + \ln r \right\} + a_3 \alpha_n \quad (10)$$

$$\ln K_t(r) = \ln b_0 + b_1 \ln t_c + b_2 \left\{ \ln \left( \frac{2\pi N}{60} \right) + \ln r \right\} + b_3 \alpha_n$$

## ۲-۲- مدل سازی نیروهای برشی واقع بر لبه جان مته (منطقه برش ثانویه و منطقه فشار)

oxford در نتیجه تحقیقاتی که در مورد سوراخ کاری فلزات انجام داده است نشان داد که در منطقه ای کوچک واقع بر اطراف محور مته مارپیچ و بر روی لبه جان مته، عمل براده برداری انجام نشده بلکه مواد این منطقه تحت فشار جریان می یابد. این منطقه به منطقه فشار معروف است. در راستای لبه های برنده ثانویه (یعنی لبه جان مته منهای ناحیه فشار) عمل برش با بیشترین زاویه براده منفی اجرا می شود. لازم به ذکر است که هنگام سوراخ کاری مواد ترد غیرفلزی منطقه فشار وجود ندارد و برای کل لبه جان مته عملیات برش متعامد با بیشترین زاویه براده منفی فرض می شود.



### ۳- تنظیم آزمایش‌های سوراخ‌کاری و نمایش دقیق روش محاسبه ضرایب معادله نیروهای برشی

آزمایش‌های سوراخ‌کاری با مته رادیال مدل TRO-1250 اجر شدند. دینامومتر کیستلر مدل 9273A با سنسورهای سوراخ‌کاری مخصوص جهت محاسبه نیروهای برشی به کار گرفته شده است. در مدل تنظیم شده روش مورد بحث در بخش (۱) استفاده شده است. جزئیات هندسه ابزار سوراخ‌کاری (مته مارپیچ) و مواد قطعه کار مطابق جدول (۱) ارائه شده است. گزارش کالیبراسیون مؤلفه قائم سنسور سوراخ‌کاری دستگاه دینامومتر مورد استفاده با دستگاه تست مقاومت کشش مدل ZWICK 1494 در دو وضعیت بارگذاری و باربرداری مطابق جدول (۲) ارائه شده است. کوچکترین واحد نمایش دستگاه تست مقاومت 0.001kg است. قبل از اجرای تست کالیبراسیون سنسور سوراخ‌کاری دستگاه تست مقاومت باوزنه‌های استاندارد 5kg تا 50kg تست می‌شود و خطای نمایش داده شده در حد صفر بود. آزمایش‌های سوراخ‌کاری تنظیم شده برای چدن ریخته‌گی شامل سرعت‌های دورانی 160rpm، 330rpm و 490rpm و نرخ‌های پیش‌شروی 0.13mm/rev، 0.22mm/rev و 0.33mm/rev است. این آزمایش‌ها با سوراخ‌های پیش‌مته متعدد و با اختلاف حداکثر 2mm در قطر اجرا شده‌اند. قطعات چدنی مورد استفاده پس از ریخته‌گری با ابعاد تقریبی  $40 \times 40 \times 400 \text{mm}^3$  ماشین‌کاری شده‌اند. نیروی محوری ( $F_A$ ) و گشتاور پیچشی ( $M_t$ ) در هر مرحله از آزمایش از دینامومتر قرائت می‌شود. این مقادیر در ستون‌های دوم و سوم جدول (۳) درج شده‌اند. چنانچه مقادیر نیروهای برشی بر سطح مقطع براده نتراشیده در مقاطع مختلف لبه‌های برش مته مارپیچ تقسیم گردد. فشارهای مخصوص برش در دو راستای قائم و مماسی ( $K_n, K_t [N/mm^2]$ ) محاسبه می‌شود. مقادیر ذکر شده مطابق رابطه (۱۵) محاسبه شده و در ستون‌های چهارم و پنجم جدول (۳) ثبت شده‌اند.

$$K_n(\rho) = \frac{F_A}{2 \sin \frac{a_f}{2} \cos i(\rho) R \Delta \rho}$$

$$K_t(\rho) = \frac{M_t \times 1000}{2 R \rho \frac{a_f}{2} \cos i(\rho) R \Delta \rho}$$

در این رابطه N سرعت دورانی اسپیندل بر حسب rpm است زاویه براده لبه جان مته تابعی از زاویه رأس مته و زاویه لبه جان مته است که با رابطه:

$$\alpha_{n, ch} = -\{\tan^{-1}[\tan(k) \cos(\pi - cea)]\} \quad (11)$$

بیان می‌شود.

با انتگرال‌گیری از فشارهای مخصوص برش از فاصله شعاع منطقه فشار تا شعاع سوراخ پیش‌مته و در طول لبه جان مته، نیروهای برشی (نیروی محوری و گشتاور پیچشی) اعمال شده بر لبه های برش ثانویه مته مارپیچ محاسبه می‌شود. شعاع منطقه فشار، تابعی از نرخ پیش‌شروی و زاویه رأس مته مارپیچ است. رابطه زیر جهت پیشگویی شعاع منطقه فشار فلزات ارائه شده است [۶]:

$$R_a = \frac{a_f}{2 \tan(90 - k)} \quad (12)$$

برای محاسبه نیروهای برشی منطقه فشار، تئوری لغزش کاربرد دارد. مطابق تئوری لغزش نیروهای برشی منطقه فشار واقع در مرکز لبه جان مته مارپیچ به شرح روابط زیر قابل محاسبه است [۶]:

$$F_{Aind} = \frac{4k(1 + \varepsilon)a_f R_a \sin \alpha_{n, ch}}{[\cos \alpha_{n, ch} - \sin(\alpha_{n, ch} - \varepsilon)]} \quad (13)$$

$$M_{tind} = \frac{2k(1 + \varepsilon)a_f \cos \alpha_{n, ch} R_a^2}{[\cos \alpha_{n, ch} - \sin(\alpha_{n, ch} - \varepsilon)]}$$

در این رابطه K حد تنش برشی ماده کار است. مقدار عددی  $\varepsilon$  نیز از شرایط مرزی مسأله حاصل می‌شود.

$$\varepsilon = 2\alpha_{n, ch} (\text{rads}) - \cos^{-1} \left\{ \tan \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\varepsilon}{2} \right) \right\} \quad (14)$$

مقادیر نیروی برشی در منطقه فشار با کسر کردن مجموع نیروهای برشی واقع بر لبه‌های برش ثانویه از لبه جان مته حاصل می‌شود. حدود نیروهای برشی در مناطق سه گانه مته مارپیچ به طرق تجربی حاصل و با پیشگویی‌های ناشی از معادلات برشی مقایسه می‌شود. اطلاعات نیروی برشی برای کل مته مارپیچ موقعی ناشی می‌شود که ابزار به انتهای سوراخ پیش‌مته می‌رسد و مناطق سه گانه پیشانی آن (لبه های برنده اصلی، لبه های برش ثانویه و منطقه فشار) با قطعه کار درگیر شود (شکل ۵).

برابر  $e^{a_2}$  می‌گردد، در ادامه شرح ریاضی این مرحله ذکر می‌شود:

$$k_n = a_0 t_c^{a_1} \cdot v^{a_2} \cdot e^{a_3 a_n}$$

$$A = \ln c_1 = a_1 = 7.074 \rightarrow c_1 = 1181.254$$

$$B = a = -0.609$$

در حالت سوم محاسبات ضرایب  $a_3, a_0$  بشرح روابط زیر و مطابق جدول (۵) و اجرای روش خط مربع حداقل (LSL) محاسبه می‌شود:

$$k_n = c_1 \rho^a$$

$$k_n = a_0 t_c^{a_1} \cdot v^{a_2} \cdot e^{a_3 a_n}$$

$$c_1 \rho^a = a_0 t_c^{a_1} \cdot v^{a_2} \cdot e^{a_3 a_n}$$

$$A = \frac{c_1 \rho^a}{t_c^{a_1} \cdot v^{a_2}} = \frac{c_1 \rho^a}{(0.5 a_f \sin k)^{a_2} \cdot v^{a_2}}$$

$$A = a_0 e^{a_3 a_n} \rightarrow \ln A = a_3 a_n + \ln a_0$$

$$A = \ln a_0 = -32.573 \rightarrow a_0 = 7.141 \times 10^{-15}$$

$$B = a_3 = -17.866$$

معادله نهایی زیر برای محاسبه نیروی محوری در مقاطع مختلف لبه‌های برش اصلی و لبه‌های مته ماریچ با مشخصات ذکر شده در جدول (۱) و بهنگام سوراخ‌کاری چدن ریخته‌گری ارایه می‌شود:

$$F_A(t) = \int_{r/R}^{(t)/R} 2K_n(\rho) \frac{a_f}{2} \sin k \cos i(\rho) R d\rho$$

$$= \frac{1077.331 R a_f \sin k}{0.393} \left\{ \left( \frac{r(t)}{R} \right)^{0.393} - \left( \frac{r_p}{R} \right)^{0.393} \right\}$$

$$+ \frac{1077.331 a_f w^2 \sin^3 k}{2R \times 1.607} \left\{ \left( \frac{r(t)}{R} \right)^{-1.607} - \left( \frac{r_p}{R} \right)^{-1.607} \right\}$$

مرحله دوم: محاسبه ضرایب مجهول  $c_2, b, b_3, b_2, b_1, b_0$  در حالت اول مطابق جدول (۳) و شکل (۹) خط مربعات حداقل (LSL) محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه در این حالت سرعت برشی ثابت و نرخ پیشروی متغیر است لذا عرض از مبدا و شیب خط معرف  $b, b_1$  خواهد شد. ضریب  $c_2$  مساوی  $e^{b_1}$  بوده و بشرح زیر محاسبه می‌شود:

$$2R = 19.5mm$$

$$n = 330rpm$$

$$a_{f1} = 0.13mm/rev, a_{f2} = 0.22mm/rev,$$

$$a_{f3} = 0.33mm/rev$$

$$k_t = c_2 \rho^b \rightarrow \ln k_t = b \ln \rho + \ln c_2$$

در رابطه فوق  $K_t(\rho), K_n(\rho)$  بر حسب  $N/mm^2$  است. در جدول (۴) مقادیر زوایای براده نرمال و تمایل و همچنین سطح مقطع براده نتراشیده درمقاطع مختلف لبه‌های برش مته ماریچ محاسبه شده است. مقادیر جدول اخیر محاسبه فشارهای مخصوص برش را مطابق رابطه (۱۵) ساده‌تر می‌کند. مجهولات معادلات فشارهای مخصوص برش  $(a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3)$  و معادلات نیروهای برشی  $(c_1, a, c_2, b)$  با روش تشریح شده در بخش ۱ و با اعمال روش خط مربعات حداقل (LSL) محاسبه می‌شود. برای محاسبه این ضرایب حداقل باید پنج سری آزمایش طراحی و اجرا شود. سرعت دورانی ثابت 330rpm با نرخ پیشروی 0.13mm/rev, 0.22mm/rev, 0.33mm/rev و پیشروی ثابت 0.13mm/rev با سرعتهای دورانی 490rpm, 330rpm, 160rpm بعنوان اولین سری آزمایشها انتخاب می‌شود. اطلاعات نیرویی این آزمایشها در جدول (۳) و اشکال (نمودارهای) (۶) تا (۱۷) ثبت شده‌اند. عرض از مبدا و شیب نمودارهای  $K_t - \rho, K_n - \rho$  با اعمال روش خط مربعات حداقل محاسبه می‌شود. وقتی عملیات سوراخ‌کاری با سرعت برشی ثابت و نرخ پیشروی متغیر اجرا گردد عرض از مبدا و شیب خط بترتیب برابر  $a_1$  (یا  $b_2$ ) و  $a$  (یا  $b$ ) خواهد شد. ضرایب مجهول در طی دو مرحله عملیات و بشرح زیر محاسبه می‌شود:

مرحله اول: محاسبه ضرایب مجهول  $c_1, a, a_3, a_2, a_1, a_0$  در حالت اول مطابق جدول (۳) و شکل (۹) خط مربعات حداقل محاسبه می‌شود. با توجه به این نکته که در این حالت سرعت برشی ثابت و نرخ پیشروی متغیر است لذا عرض از مبدا و شیب خط معرف  $a, a_1$  شده و ضریب  $c_1$  نیز برابر  $e^{a_1}$  بوده و بشرح زیر محاسبه می‌شود:

$$2R = 19.5mm$$

$$n = 330rpm$$

$$a_{f1} = 0.13mm/rev, a_{f2} = 0.22mm/rev,$$

$$a_{f3} = 0.33mm/rev$$

$$k_n = c_1 \rho^a \rightarrow \ln k_n = a \ln \rho + \ln c_1$$

$$k_n = a_0 t_c^{a_1} \cdot v^{a_2} \cdot e^{a_3 a_n}$$

$$A = \ln c_1 = a_1 = 6.881 \rightarrow c_1 = 973.408$$

$$B = a = -0.605$$

در حالت دوم مطابق جدول (۳) و شکل (۱۲) خط مربعات حداقل محاسبه می‌شود. با توجه به این نکته که در این حالت نرخ پیشروی ثابت و سرعت برشی متغیر است لذا عرض از مبدا و شیب خط بترتیب معرف  $a, a_2$  شده و ضریب  $c_1$  نیز

پیشروی متغیر  $0.22\text{mm/rev}, 0.13\text{mm/rev}$  و همچنین نرخهای پیشروی ثابت  $0.33\text{mm/rev}$  و سرعتهای برشی  $0.22\text{mm/rev}, 0.13\text{mm/rev}$  متفاوت  $490\text{rpm}$  و  $330\text{rpm}, 160\text{rpm}$  بر روی مته مارپیچ به قطر  $19.5\text{mm}$  و قطعه کار چدنی اجرا شده است. نتیجه این محاسبات در جدول (۷) برای دور  $160\text{rpm}$  ارائه شده است. میانگین مقادیر حاصل از آزمایشهای مذکور بعنوان مقدار نهایی مجهولات در نظر گرفته می شود. بدین ترتیب فرم نهایی معادلات نیروهای برشی بشرح معادلات زیر ارائه می گردد:

$$F_A(t) = \int_{r_p/R}^{r(t)/R} 2K_n(\rho) \frac{a_f}{2} \sin k \cos i(\rho) R d\rho$$

$$= \frac{1077.331 R a_f \sin k}{0.393} \left\{ \left( \frac{r(t)}{R} \right)^{0.393} - \left( \frac{r_p}{R} \right)^{0.393} \right\} \quad (16)$$

$$+ \frac{1077.331 a_f w^2 \sin^3 k}{2R \times 1.607} \left\{ \left( \frac{r(t)}{R} \right)^{-1.607} - \left( \frac{r_p}{R} \right)^{-1.607} \right\}$$

در جدول (۸) حداکثر خطای مقادیر حقیقی نیروهای برشی حاصل از شرایط سوراخ کاری مختلف در مقاطع متعدد لبه های برش اصلی و همچنین لبه جان مته مارپیچ با مقادیر پیشگویی شده به وسیله معادلات نیروی برشی محاسبه شده است. همچنین در شکل (۱۰) پروفیل نیروی محوری و گشتاور پیشی حاصل از شرایط نمونه عملیات سوراخ کاری با مقادیر واقعی حاصل از آزمایشهای سوراخ کاری مقایسه شده است.

نتیجه گیری و پیشنهادها

حداکثر خطای مقادیر نیروهای برشی پیشگویی شده در مقاطع مختلف لبه های برش مته مارپیچ  $15/52$  درصد است. مطابق مثالهای مطرح شده حداکثر خطای مقادیر نیروهای برشی منطقه برش ثانویه و لبه های برنده اصلی مته مارپیچ بترتیب  $12/58$  و  $15/52$  درصد است.

به تجربه ثابت شده است که پروفیل نیروی محوری و گشتاور پیشی در هنگام ورود مته به قطعه کار بترتیب محذب و مقعر است. انحرافات مذکور در معادلات مدل های پیشگو نیز کاملاً مستتر است. بیشترین مقدار فشارهای مخصوص برش در پیرامون محور مته مارپیچ بوده و این مقادیر در راستای شعاع ابزار کاهش می یابد. نیروی محوری مجموع انتگرالی حاصل ضرب فشار مخصوص برش در سطح مقطع براده تراشیده است در حالیکه گشتاور پیشی مجموع حاصل ضرب فاصله شعاعی در المان نیروی مماسی است. مقدار نیروی محوری بسمت مرکز مته مارپیچ بزرگتر و گشتاور

$$k_1 = b_0 . t_c^{b_1} . v^{b_2} . e^{b_3 \alpha_n}$$

$$A = \ln c_2 = b_1 = 7.945 \rightarrow c_2 = 2822.432$$

$$B = b = -0.456$$

در حالت دوم که نرخ پیشروی ثابت و سرعت برشی متغیر است، مطابق جدول (۳) و شکل (۱۲) خط مربعات حداقل (LSL) محاسبه می شود. عرض از مبدا و شیب خط اخیر معرف  $b_2, b_3$  می شود ضریب  $c_2$  هم مساوی  $e^{b_2}$  بوده و مشابه موارد قبلی بشرح زیر محاسبه می شود:

$$2R = 19.5\text{mm}$$

$$a_f = 0.13\text{mm/rev}$$

$$n_1 = 160\text{rpm}, n_2 = 330\text{rpm}, n_3 = 490\text{rpm}$$

$$k_1 = c_2 \rho^b \rightarrow \ln k_1 = b \ln \rho + \ln c_2$$

$$k_1 = b_0 . t_c^{b_1} . v^{b_2} . e^{b_3 \alpha_n}$$

$$A = \ln c_2 = b_2 = 8.157 \rightarrow c_2 = 3486.034$$

$$B = b = -0.440$$

در حالت سوم ضرایب  $b_3, b_0$  بشرح روابط زیر و

جدول (۶) و اجرای روش خط مربعات حداقل محاسبه می شود:

$$k_1 = c_2 \rho^b$$

$$k_1 = b_0 . t_c^{b_1} . v^{b_2} . e^{b_3 \alpha_n}$$

$$c_2 \rho^b = b_0 . t_c^{b_1} . v^{b_2} . e^{b_3 \alpha_n}$$

$$B = \frac{c_2 \rho^b}{(0.5 a_f \sin k)^{b_1} . v^{b_2}}$$

$$B = b_0 e^{b_3 \alpha_n} \rightarrow \ln B = b_3 \alpha_n + \ln b_0$$

$$B = b_3 = -20.016$$

$$A = \ln b_0 = -37.920 \rightarrow b_0 = 3.40 \times 10^{-17}$$

معادله نهایی زیر جهت محاسبه گشتاور پیشی اعمال شده در مقاطع مختلف لبه های برش اصلی و لبه جان مته مارپیچ با مشخصات ذکر شده در جدول (۱) و هنگام سوراخ کاری چدن ریخته گی ارائه می شود:

$$M_t = \int_{r_p/R}^{r(t)/R} 2K_t(\rho) \frac{a_f}{2} R \rho \cos i(\rho) R d\rho$$

$$= \frac{3152.330 R^2 a_f}{1.552} \left\{ \left( \frac{r(t)}{R} \right)^{1.552} - \left( \frac{r_p}{R} \right)^{1.552} \right\}$$

$$+ \frac{3152.330 a_f w^2 \sin^2 k}{0.896} \left\{ \left( \frac{r(t)}{R} \right)^{-0.448} - \left( \frac{r_p}{R} \right)^{-0.448} \right\}$$

مشابه محاسبات تشریح شده برای شرایط سوراخ کاری با سرعت های برشی ثابت  $490\text{rpm}, 160\text{rpm}$  و نرخ های

فولاد تند بر بر روی قطعه کار چدنی) با اطلاعات حاصل از منحنی پیشگو: قطر مته 19.5 mm سرعت دورانی 330 و نرخ پیشروی 0.33mm/rev

معادلات نیروی برشی ارایه شده برای محاسبه مقادیر نیروی محوری و گشتاور پیشی اعمال شده به هر نوع مته مارپیچ HSS و بهنگام سوراخکاری چدن ریختگی کاربرد دارد.

#### پیشنهادهای:

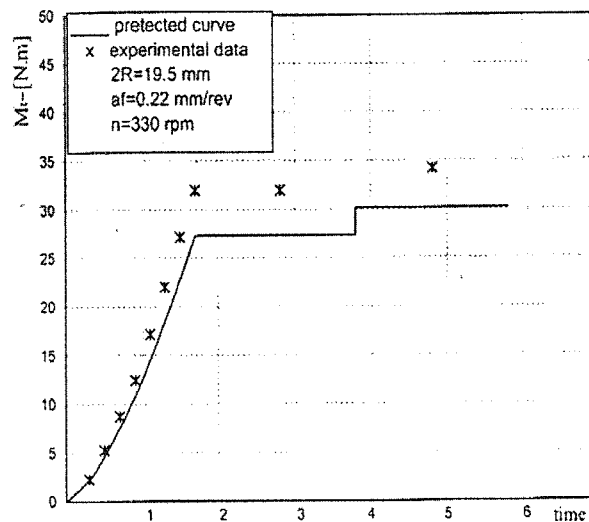
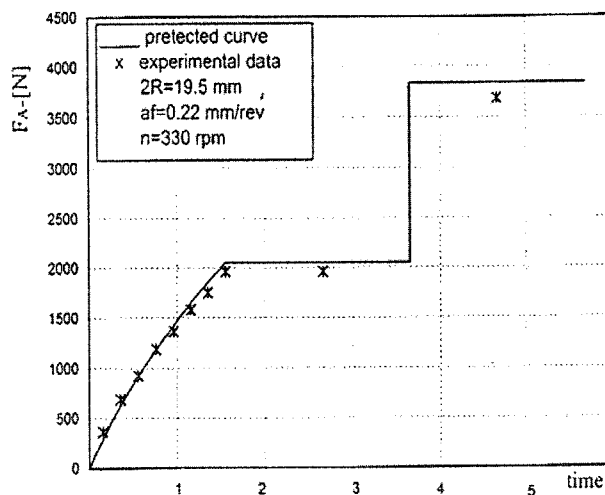
- ۱- اعمال پارامتر جنس ابزار و قطعه کار در معادلات نیروهای برشی.
- ۲- تحقیق دربارهٔ نیروهای برشی اعمال شده بر مته مارپیچ در منطقه فشار.
- ۳- چنانچه قابلیت ثبت پیوسته اطلاعات نیروی برشی مهیا گردد آزمایشهای سوراخکاری با دقت بیشتر و در مدت زمان کوتاهتری اجرا می‌گردد.
- ۴- ارائه رابطه افزایش نیروی محوری و گشتاور پیشی نسبت به طول عمر مته مارپیچ.
- ۵- اعمال پارامتر عمق برش در معادلات نیروی محوری و گشتاور پیشی

جدول (۱) مشخصات هندسی و جنس مته مارپیچ مورد استفاده برای مدلسازی نیروهای برشی بر روی قطعه کار چدنی

قطر مته مارپیچ	۱۹/۵ میلیمتر
زاویه مارپیچ مته	۲۲ درجه
زاویه لبه جان مته	۱۳۰ درجه
جنس مته مارپیچ	فولاد تندبر
زاویه راس مته	۱۱۸ درجه
ضخامت جان مته	۲/۲ میلیمتر
زاویه آزاد مته	۱۴ درجه
جنس قطعه کار	چدن ریختگی

پیشی کم می‌شود لذا پروفیل گشتاور پیشی نسبت به مختصات شعاعی نرمال مقرر می‌شود.

نمودارهای شبیه‌سازی شده با معادلات نیروهای برشی در شرایط سوراخکاری متعدد با اطلاعات تجربی حاصله تطابق نسبتاً خوبی دارد. نتایج حاصل از اجرای آزمایشهای سوراخکاری با شرایط مختلف عمومیت مدل ارایه شده را اثبات می‌نماید.



شکل (۱۰): مقایسه مقادیر نیروی محوری و گشتاور پیشی حاصل از آزمایشهای سوراخکاری (با مته مارپیچ از جنس

جدول (۲) گزارش کالیبراسیون مؤلفه قایم سنسور سوراخ کاری دستگاه دینامومتر

بار نمایشگر واقعی	رنج 10KN		رنج 3KN		رنج 1KN	
	بارگذاری	باربرداری	بارگذاری	باربرداری	بارگذاری	باربرداری
0.2	0.2		0.14		0.19	0.19
0.3	0.3		0.23		0.27	0.27
0.4	0.4		0.32		0.35	0.35
0.5	0.5		0.4	0.6	0.43	0.43
0.6	0.6		0.49		0.52	0.53
0.7	0.7		0.58		0.6	0.66
0.8	0.8		0.66		0.68	
0.9	0.91		0.75		0.77	
1	1.02	0.92	0.83			
1.2	1.23		1	1		
1.4	1.44		1.17	1.53		
1.6	1.65		1.32	1.82		
1.8	1.84		1.48			
2	2.02	1.82	1.65	2.42		
2.5	2.32		2.05			
3	2.62	2.75	2.43	2.93		
4	3.36	3.65	3.19			
5	4.31	4.53	3.95			
6	5.22		4.71			

جدول (۳) مقادیر نیروی محوری و گشتاور پیچشی و فشارهای مخصوص برش در دو راستای قایم و مماس بر لبه های برش مته مارپیچ (بخشی از نمودار)

2R=19.5 mm , N=160 rpm , a <sub>r</sub> =0.13 mm/rev				
$\rho$	M <sub>t</sub> [N.m]	F <sub>A</sub> [N]	K <sub>t</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	K <sub>n</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
0.25	1.80	285.00	7007.108	3154.932
0.35	2.43	249.38	6146.600	2511.291
0.45	2.84	178.05	5387.092	1728.738
0.55	3.03	204.76	4618.692	1952.645
0.65	3.84	136.58	4902.630	1289.252
0.75	4.05	170.72	4453.000	1601.335
0.85	4.15	136.58	4009.185	1275.711
0.95	4.77	164.00	4110.938	1527.314

جدول (۴) مقادیر زاویه براده نرمال و زاویه تمایل و همچنین سطح مقطع براده نتراشیده در مقاطع مختلف لبه های مته مارپیچ [۵]

P	زاویه تمایل $i(\rho)$		زاویه براده نرمال $\alpha_n(\rho)$		سطح مقطع المانی براده تغییر شکل نیافته ( $\times 10^{-6}$ )		
	rad	deg	rad	deg	0.13 mm/rev	0.22 mm/rev	0.33 mm/rev
	0.25	0.589	33.751	0.142	8.125	5269	8917
0.35	0.418	23.934	0.211	12.097	5793	9803	14704
0.45	0.324	18.562	0.295	16.894	6008	10167	15251
0.55	0.265	15.162	0.377	21.626	6117	10352	15527
0.65	0.224	12.821	0.458	26.267	6180	10458	15686
0.75	0.194	11.107	0.538	30.798	6219	10524	15786
0.85	0.171	9.796	0.614	35.202	6245	10569	15853
0.95	0.153	8.762	0.689	39.467	6264	10600	15900

جدول (۵) مقادیر سرعتهای برشی و پارامتر A ( $\frac{C_1 \rho^a}{t_c^a V a^2 \langle \rho \rangle}$ ) در مقاطع مختلف لبه های برنده مته مارپیچ بازای سرعتها و پیشروی های مختلف

$\rho$	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85	0.95
$\alpha_n$ [rad]	-0.819	0.211	0.295	0.377	0.458	0.538	0.614	0.689
V160 [mm/rev]	2450.442	3430.619	4410.796	5390.973	6371.150	7351.327	8331.504	9311.681
V330 [mm/rev]	5054.037	7075.652	9097.267	11118.882	13140.497	15162.112	17183.726	19205.341
V490 [mm/rev]	7504.479	10506.271	13508.063	16509.855	19511.647	22513.438	25515.230	28517.022
A1 V330.a1	6.052E-15	4.569E-16	6.633E-17	1.421E-17	3.939E-18	1.313E-18	5.020E-19	2.137E-19
A2 V330.a2	1.621E-16	1.224E-17	1.776E-18	3.804E-19	1.055E-19	3.515E-20	1.344E-20	5.723E-21
A3 V330.a3	9.956E-18	7.515E-19	1.091E-19	2.337E-20	6.479E-21	2.159E-21	8.257E-22	3.515E-22
A4 V160.a1	1.237E-12	9.326E-14	1.353E-14	2.894E-15	8.020E-16	2.671E-16	1.021E-16	4.344E-17
A5 V330.a1	7.385E-15	5.568E-16	8.075E-17	1.728E-17	4.788E-18	1.595E-18	6.096E-19	2.594E-19
A6 V490.a1	4.507E-16	3.398E-17	4.928E-18	1.055E-18	2.922E-19	9.731E-20	3.720E-20	1.583E-20

جدول (۶) مقادیر سرعت‌های برشی و پارامتر B  $(\frac{C_2 \rho^b}{l_c^{b1} V^{b2} \langle \rho \rangle})$  در مقاطع مختلف لبه‌های برنده مته مارپیچ

بازای سرعتها و پیشرویهای مختلف

p	0.25	0.35	0.45	0.55	0.65	0.75	0.85	0.95
$\alpha_m$ [rad]	-0.819	0.211	0.295	0.377	0.458	0.538	0.614	0.689
V160 [mm/rev]	2450.442	3430.619	4410.796	5390.973	6371.150	7351.327	8331.504	9311.681
V330 [mm/rev]	5054.037	7075.652	9097.267	11118.882	13140.497	15162.112	17183.726	19205.341
V490 [mm/rev]	7504.479	10506.271	13508.063	16509.855	19511.647	22513.438	25515.230	28517.022
B1 v330.af1	3.005E-17	1.656E-18	1.902E-19	3.377E-20	8.010E-21	2.335E-21	7.946E-22	3.049E-22
B2 v330.af2	4.597E-19	2.535E-20	2.910E-21	5.167E-22	1.226E-22	3.573E-23	1.216E-23	4.665E-24
B3 v330.af3	1.834E-20	1.011E-21	1.161E-22	2.061E-23	4.890E-24	1.426E-24	4.851E-25	1.861E-25
B4 v160.af1	1.332E-14	7.371E-16	8.507E-17	1.516E-17	3.604E-18	1.053E-18	3.591E-19	1.380E-19
B5 v330.af1	3.630E-17	2.012E-18	2.319E-19	4.131E-20	9.825E-21	2.871E-21	9.789E-22	3.762E-22
B6 v490.af1	1.444E-18	8.002E-20	9.223E-21	1.643E-21	3.908E-22	1.142E-22	3.893E-23	1.496E-23

جدول (۷) ترتیب محاسبه ضرایب معادلات نیروی محوری و گشتاور پیچشی و فشارهای مخصوص برش

ضرایب مجهول	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$c_1$	$a$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$c_2$	$b$
شرایط تست												
$n=160\text{rpm}$ $a_{11}=0.13$ $a_{12}=0.22$ $a_{13}=0.33$		6.941			1033.287	-0.612		8.039			3100.005	-0.436
$a_1=0.13\text{mm/rev}$ $n_1=160\text{rpm}$ $n_2=330\text{rpm}$ $n_3=490\text{rpm}$			7.073		1179.682	-0.611			8.157		3486.034	-0.44
$c_1 \rho^a = a_0 t_c a_1 v a_2 e a_3 \alpha_n$ $c_2 \rho^b = b_0 t_c b_1 v b_2 e b_3 \alpha_n$	$1.12 \times 10^{-13}$			-17.76			$8.620 \times 10^{-16}$			-19.992		
مقادیر نهایی ضرایب مجهول	$1.120 \times 10^{-13}$	6.941	7.073	-17.76	1106.485	-0.611	$8.620 \times 10^{-17}$	8.039	8.157	-19.992	3293.02	-0.438
فرم نیروی محوری و گشتاور پیچشی بر اساس ضرایب فوق	$F_{Acl}(t) = \int_{r_p}^{r(t)/R} \frac{R}{2K_n(\rho)} \frac{a_f}{2} \sin k \cos i(\rho) R d\rho = \frac{1106485 R a_f \sin k}{0.389} \left\{ \left( \frac{r(t)}{R} \right)^{0.389} - \left( \frac{r_p}{R} \right)^{0.389} \right\}$ $+ \frac{1106485 a_f w^2 \sin^3 k}{2R(1.611)} \left\{ \left( \frac{r(t)}{R} \right)^{-1.611} - \left( \frac{r_p}{R} \right)^{-1.611} \right\}$ $M_{tcl}(t) = \int_{r_p}^{r(t)/R} \frac{R}{2K_t(\rho)} \frac{a_f}{2} R \rho \cos i(\rho) R d\rho = \frac{3293.02 R^2 a_f}{(1.562)} \left\{ \left( \frac{r(t)}{R} \right)^{1.562} - \left( \frac{r_p}{R} \right)^{1.562} \right\}$ $+ \frac{3293.02 a_f w^2 \sin^2 k}{0.876} \left\{ \left( \frac{r(t)}{R} \right)^{-0.438} - \left( \frac{r_p}{R} \right)^{-0.438} \right\}$											
فرم نیروی محوری و گشتاور پیچشی بر اساس میانگین ضرایب حاصل از آزمایشها	$F_{Acl}(t) = \int_{r_p}^{r(t)/R} \frac{R}{2K_n(\rho)} \frac{a_f}{2} \sin k \cos i(\rho) R d\rho = \frac{1036542 R a_f \sin k}{0.388} \left\{ \left( \frac{r(t)}{R} \right)^{0.388} - \left( \frac{r_p}{R} \right)^{0.388} \right\}$ $+ \frac{1036542 a_f w^2 \sin^3 k}{2R(1.612)} \left\{ \left( \frac{r(t)}{R} \right)^{-1.612} - \left( \frac{r_p}{R} \right)^{-1.612} \right\}$ $M_{tcl}(t) = \int_{r_p}^{r(t)/R} \frac{R}{2K_t(\rho)} \frac{a_f}{2} R \rho \cos i(\rho) R d\rho = \frac{2272.139 R^2 a_f}{(1.551)} \left\{ \left( \frac{r(t)}{R} \right)^{1.551} - \left( \frac{r_p}{R} \right)^{1.551} \right\}$ $+ \frac{2272.139 a_f w^2 \sin^2 k}{0.898} \left\{ \left( \frac{r(t)}{R} \right)^{-0.449} - \left( \frac{r_p}{R} \right)^{-0.449} \right\}$											



جدول (۸) مقایسه حدود حقیقی نیروهای برشی با مقادیر حاصل از معادلات پیشگو  
در مناطق سه گانه متنه مارپیچ جنس ایزان فولاد تند بر جنس قطعه کار: چدن

ردیف	2R mm	n rpm	ar mm/rev	2w mm	2Ra mm	2Rp mm	$\Delta\rho$ $\rho_2-\rho_1$	F <sub>At</sub> N	F <sub>Ac</sub> N	M <sub>It</sub> N.m	$\Delta F_{\Delta}$ درصد خطا	درصد خطا $\Delta M_i$	مناطق سه گانه برشی متنه مارپیچ
1	19.5	-	0.08	3.3	0.133	4.3	0.007-0	16.82	-	-	-	-	منطقه کنار
2	16	-	0.08	2.3	0.133	3	0.008-0	16.82	-	-	-	-	منطقه کنار
3	10	-	0.08	1.5	0.133	2	0.013-0	16.82	-	-	-	-	منطقه کنار
4	19.5	-	0.13	3.3	0.216	4.3	0.011-0	44.40	-	-	-	-	منطقه کنار
5	16	-	0.13	2.3	0.216	3	0.014-0	44.40	-	-	-	-	منطقه کنار
6	10	-	0.13	1.5	0.216	2	0.022-0	44.40	-	-	-	-	منطقه کنار
7	19.5	-	0.22	3.3	0.366	4.3	0.019-0	127.31	-	-	-	-	منطقه کنار
8	16	-	0.22	2.3	0.366	3	0.023-0	127.31	-	-	-	-	منطقه کنار
9	10	-	0.22	1.5	0.366	2	0.037-0	127.31	-	-	-	-	منطقه کنار
10	19.5	-	0.33	3.3	0.549	4.3	0.028-0	286.46	-	-	-	-	منطقه کنار
11	16	-	0.33	2.3	0.549	3	0.034-0	286.46	-	-	-	-	منطقه کنار
12	10	-	0.33	1.5	0.549	2	0.055-0	286.46	-	-	-	-	منطقه کنار
13	19.5	330	0.22	3.3	0.366	4.3	22-019	1660.43	1595.83	2.361	3.90	6.82	منطقه پایه
14	19.5	330	0.33	3.3	0.549	4.3	22-028	2254.41	2083.10	4.291	7.60	6.32	منطقه پایه
15	16	720	0.08	2.3	0.133	3	19-008	544.30	563.27	0.567	3.37	8.55	منطقه پایه
16	10	1000	0.08	1.5	0.133	2	0.2-013	320.69	362.00	0.238	11.41	8.46	منطقه پایه
17	19.5	330	0.22	3.3	0.366	4.3	1-0.22	2051.85	1961.94	29.322	4.38	8.15	منطقه پایه
18	19.5	330	0.33	3.3	0.549	4.3	1-0.22	3077.77	2878.80	40.983	6.46	2.19	منطقه پایه
19	19.5	490	0.22	3.3	0.366	4.3	0.8-0.3	1357.00	1145.56	16.259	15.58	7.30	منطقه پایه
20	19.5	160	0.33	3.3	0.549	4.3	0.7-0.2	2253.11	1975.61	21.163	12.32	10.01	منطقه پایه
21	16	720	0.08	2.3	0.133	3	1-0.19	659.88	723.70	6.712	8.19	2.72	منطقه پایه
22	10	1000	0.08	1.5	0.133	2	1-0.2	402.85	412.50	2.600	2.34	7.70	منطقه پایه
23	16	720	0.08	2.3	0.133	3	0.9-0.3	481.67	457.30	5.080	5.06	2.31	منطقه پایه
24	19.5	330	0.22	3.3	0.366	4.3	1-0.0	3839.59	3685.08	31.68	4.02	7.29	منطقه مارپیچ
25	19.5	330	0.33	3.3	0.549	4.3	1-0.0	5618.64	5248.56	43.766	6.59	4.68	منطقه مارپیچ
26	16	720	0.08	2.3	0.133	3	1-0.0	1221.00	1303.92	7.280	6.35	3.19	منطقه مارپیچ
27	10	1000	0.08	1.5	0.133	2	1-0.0	740.36	791.32	2.838	6.44	6.27	منطقه مارپیچ

- L. M. KACHANOV ,” *Foundation of the theory of plasticity* “, North holland publishing company , amsterdam , 1971 [٦]
- K. JEMIELNIAK ,”*Modelling of dynamic cutting coefficients in three-dimensional cutting* “ , International journal of machine tools manufacturings , vol. 32 , 1991 [٧]
- R.A.WILLIAMS ,” *A Study of drilling process* ,” *Journal of engineering for industry* ” , november 1974 [٨]
- A. R. WATSON ,” *Geometry of drill elements* ”, International journal of machine tool design research , vol. 25 , 1984 [٩]
- ASM ,” *Tool and manufacturing engineering handbook*” [١٠]
- A. J. P. SABBERWAL ,” *Chip section and cutting forces during the milling operation* “, Annals of the CIRP , 1961 , VOL. 10 [١١]
- P. L. B. OXLEY ,” *Rate of strain effect in metal cutting* “, ASME journal of engineering for industry , 1963 , vol. 85 [١٢]
- W. T. WHITE , J. E. NEELY ,” *Machine tools and machining practices* “, vol. 2 [١٣]
- V. CHANDRASEKHARAN , R. E. DEVOR ,” *A Mechanistic approach to predicting the cutting forces in drilling : with application to fiber-reinforced composite materials* “, Journal of engineering for industry , november , 1995 [١٤]
- W. J. ENDRES ,” *A Dynamic model of the cutting force system in the turning process* “, M. S. Thesis , univercity of ilinois at urbana – champaign [١٥]