

مدل سازی مکانیستیک نیروهای برش در فرز کاری با ابزار فرز انگشتی با لبه برنده مستقیم

غلامرضا جوزدانی^۱ و سید احسان میرمحمد صادقی^{۲*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۱۶ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۲۴	پیش بینی نیروهای برش با روش های مدل سازی تحلیلی در فرآیند ماشین کاری از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. در این پژوهش از مدل سازی مکانیستیک برای پیش بینی نیروهای برش در فرآیند فرز کاری با ابزار فرز انگشتی دو لبه با لبه برنده مستقیم $\kappa = 90^\circ$ استفاده گردید. این روش مدل سازی به دلیل عدم نیاز به آزمایش های پرهزینه به منظور دستیابی به اطلاعات رفتار ماده در فرآیند براده برداری با نرخ کرنش زیاد و عدم نیاز به تحلیل های زمان بر در نرم افزارهای عددی و همچنین اعمال ویژگی های مربوط به جنس، اصطکاک و شرایط براده برداری با ضرایب برش و لبه برنده از کارایی و دقت قابل قبولی بر خوردار است. در این پژوهش برای اولین بار طراحی ویژه ای برای قطعه در نظر گرفته شد به گونه ای که تأثیر گردی نوک اینسرت های برش در خطای مدل سازی حذف گردد. نتایج مقایسه منحنی های نیروی برش مدل پیش بینی و تجربی به دست آمده از دینامومتر برای سه مؤلفه نیروی برش F_x ، F_y و F_z تطابق قابل قبولی را نشان می دهد.
واژگان کلیدی: مدل سازی مکانیستیک، نیروهای برش، ابزار فرز انگشتی، لبه برنده مستقیم، ضرایب برش و لبه برنده، گردی نوک اینسرت.	

۱- مقدمه

پیش بینی مقادیر نیروهای برش در عملیات فرز کاری به منظور سنجش توان، گشتاور، ارتعاشات ماشین کاری، کیفیت سطوح، دقت ابعادی قطعه و همچنین دستیابی به پارامترهای برشی بهینه در فرآیند براده برداری از اهمیت زیادی برخوردار است. مدل های برشی گوناگونی عموماً برای این منظور استفاده می شوند. یکی از روش های محاسبه نیروهای برش، تحلیل های اجزاء محدود با نرم افزارهای مربوطه می باشد [۱ و ۲]. استفاده از روش اجزاء محدود برای تحلیل فرآیند ماشین کاری نیاز به انجام آزمایش های پرهزینه و خاص مانند آزمایش های پیکینسون به منظور تعریف اطلاعات رفتاری ماده قطعه کار حین فرآیند برش با نرخ کرنش زیاد به صورت معادله ای مانند معادله جانسون - کوک برای نرم افزار عددی اجزاء محدود می باشد [۳ و ۴]. از

طرف دیگر حجم و زمان زیاد محاسبات برای تحلیل اجزاء محدود، این نوع تحلیل ها را به خصوص برای فرآیند ماشین کاری با نرخ کرنش زیاد، بسیار زمان بر و پرهزینه می نماید. روش های تحلیل دیگری نیز برای محاسبه نیروهای برش در فرآیند ماشین کاری وجود دارند که محاسبه دقیق آنها بستگی زیادی به محاسبه دقیق اصطکاک در فرآیند برش دارد. به دلیل پیچیدگی و غیرخطی بودن اصطکاک، در فرآیند ماشین کاری و تشکیل لبه های برنده با میزان سایش مختلف [۵] و یا منظور نمودن خطاهای هندسی، تغییر شکل های الاستیک ابزار و قطعه کار و یا پدیده انباشت ضخامت براده که در هر دوران ابزار در اثر گرم شدن و بازیابی الاستیک براده از دوران های قبلی ابزار به وجود می آید [۶]، باعث می شوند نتایج محاسبات در این روش ها چندان، دقیق حاصل نشوند.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: e.mirmohammadsadeghi@iaukhsh.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران

۲. استادیار، گروه مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، اصفهان، ایران

به مدل‌های گروه اول می‌باشد ولی به دلیل اینکه در این روش، اثرات اصطکاک و نرخ کرنش به طور مستقیم در ضرایب نیرویی لحاظ می‌گردد، این روش از دقت قابل قبولی در پیش‌بینی نیروهای برش برخوردار است. در این پژوهش سعی بر آن است که محاسبات مؤلفه‌های نیروی برش در سه راستا بر اساس مدل‌سازی مکانیستیک صورت پذیرد. ضرایب برش و لبه برنده برای هر مؤلفه نیروی برش را می‌توان با استفاده از روابط مکانیک برش و یا آزمایش‌های ماشین‌کاری به دست آورد.

در پیش‌بینی ضرایب، بر مبنای مکانیک برش متعامد، نیاز به دانستن پارامترهای اصلی، همچون جنس قطعه کار، تنش برشی، زاویه صفحه برش و ضریب اصطکاک می‌باشد [۱۳]. این مقادیر را باید از نتایج تجربی برش متعامد ارزیابی نمود و پایگاه داده‌ای از برش متعامد، برای زوج ابزار-قطعه کار با جنس‌های مربوطه استخراج نمود. زمانی که داده‌های برش متعامد در دسترس نباشند ضرایب را باید به روش مکانیستیک به دست آورد.

روش بکاررفته در این پژوهش، نیاز به مجموعه‌ای از آزمایش‌ها در نرخ‌های پیشروی مختلف، ولی با زوایای درگیری محوری و شعاعی یکسان دارد.

با در نظر گرفتن وابستگی خطی نیروی برش میانگین به نرخ پیشروی، ضرایب را می‌توان با مساوی قراردادن معادلات نیروهای میانگین برش و لبه‌های نیروهای اندازه‌گیری شده متناظر با آن‌ها به دست آورد [۱۳]. در صورتی که دستیابی به ضرایب به صورت تحلیلی مقدور نباشد می‌توان ضرایب را به صورت تجربی به دست آورد. این کار از طریق کمینه‌سازی اختلاف بین نیروهای اندازه‌گیری شده و نیروهای پیش‌بینی شده، با توجه به زوایای درگیری شعاعی ابزار انجام می‌شود [۱۴ و ۱۵].

مشکل اصلی در روش مکانیستیک، برای محاسبه نیروهای برش و لبه برنده، استخراج عبارت‌های تحلیلی برای نیروهای برش میانگین فرزکاری می‌باشد که بر اساس این نیروها، ضرایب برش به دست می‌آیند. برخی تحقیقات ماشین‌کاری موجود، عبارت‌های تحلیلی را برای محاسبه ضرایب برش و نیروهای برش فرزکاری مقدور می‌سازد [۱۳] و در برخی دیگر ضرایب برش توسط تراش متعامد استخراج شده‌اند [۱۶ و ۱۷] و یا به صورت تجربی به روش برازش

در این پژوهش از روش مدل‌سازی مکانیستیک برای محاسبه نیروهای برش استفاده گردید. در این روش با در نظر گرفتن سطح مقطع هندسی برش و همچنین هندسه و طول لبه برش، نیروهای برش متناسب با ضرایبی موسوم به ضرایب برش و لبه برنده به دست می‌آیند [۷]. این ضرایب برش و لبه برنده، تمامی اثرات برش، اصطکاک، نیروی شکافنده لبه برنده، جنس قطعه و هندسه و مکانیک تراش را در خود جای می‌دهند؛ بنابراین در این روش بدون محاسبه مستقیم و چالش برانگیز و همراه با خطای پارامترهایی چون ضریب اصطکاک و نرخ کرنش، اثرات این پارامترها را به طور غیرمستقیم با محاسبه ضرایب برش و لبه برنده از روی نیروی برش اندازه‌گیری شده در تعدادی آزمایش ماشین‌کاری با دقت قابل قبولی تخمین می‌زنند.

۱-۱- ضرایب در مدل‌سازی مکانیستیک^۱

دو روش مدل‌سازی تحلیلی نیروی برش در فرآیند ماشین‌کاری در پژوهش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در گروه نخست، اثرات مکانیزم‌های برش در شکل‌گیری براده بر روی سطح ابزار و همچنین اثرات ناشی از مکانیزم اصطکاک و شخم بر روی سطح آزاد ابزار منجر به یک ضریب نیروی مخصوص برای هر کدام از مؤلفه‌های نیروی مماسی، شعاعی و محوری می‌شوند. این مدل مکانیستیک برای فرزکاری با فرز انگشتی سرکروی، نیروهای برش را روی یک سطح آزاد با اجزای انابوسته پیش‌بینی می‌کند [۸]. این کار، گاهی با تغییر پارامترهایی چون سرعت دورانی مختلف برای ابزار [۹] یا محاسبات بردارهای نیرو به صورت تحلیلی در هر نقطه از مسیر حرکت ابزار انجام می‌گیرد. این مدل‌ها توسط بسیاری از پژوهشگران استفاده گردیده است [۱۰-۱۲]. عیب این رویکرد در نوسان فراوان ضرایب نیرو نسبت به ضخامت براده میانگین است که این مسئله، محاسبات تحلیلی را پیچیده می‌سازد.

در مدل‌های گروه دوم، اثرات برش و شخم به صورت جداگانه توسط ضرایب نیروی برش و ضرایب لبه برنده توصیف می‌شوند [۱۳ و ۱۴]. به دلیل اینکه این ضرایب به صورت نسبی، مستقل از ضخامت براده میانگین هستند لذا برای کارهای تحلیلی مناسب‌تر می‌باشند [۱۳]. از این رو تحت عنوان مدل‌سازی مکانیستیک بیان می‌گردند. با وجود اینکه تعداد ضرایب مورد نیاز برای شناسایی، دو برابر ضرایب مربوط

^۱ Mechanistic

$$K_{tc} = \frac{2\pi}{NA_1} \cdot \frac{C_3 \bar{F}_{xc} - (C_2 - C_1) \bar{F}_{yc}}{C_3^2 + (C_2 - C_1)^2} \quad (3-1)$$

$$K_{rc} = \frac{2\pi}{N(A_2^2 + A_3^2)} \cdot \left[\frac{A_2 \left((C_2 - C_1) \bar{F}_{xc} + C_3 \bar{F}_{yc} \right)}{C_3^2 + (C_2 - C_1)^2} - \frac{A_3 \bar{F}_{zc}}{C_5} \right]$$

$$K_{ac} = \frac{2\pi}{N(A_2^2 + A_3^2)} \cdot \left[\frac{A_3 \left((C_2 - C_1) \bar{F}_{xc} + C_3 \bar{F}_{yc} \right)}{C_3^2 + (C_2 - C_1)^2} + \frac{A_2 \bar{F}_{zc}}{C_5} \right]$$

$$K_{te} = \frac{-2\pi}{NB_1} \cdot \frac{C_4 \bar{F}_{xe} + C_5 \bar{F}_{ye}}{C_4^2 + C_5^2}$$

$$K_{re} = \frac{2\pi}{N(B_2^2 + B_3^2)} \cdot \left[\frac{B_2 (C_5 \bar{F}_{xe} - C_4 \bar{F}_{ye})}{C_4^2 + C_5^2} + \frac{B_3 \bar{F}_{ze}}{2C_1} \right]$$

$$K_{ae} = \frac{2\pi}{N(B_2^2 + B_3^2)} \cdot \left[\frac{B_3 (C_5 \bar{F}_{xe} - C_4 \bar{F}_{ye})}{C_4^2 + C_5^2} - \frac{B_2 \bar{F}_{ze}}{2C_1} \right]$$

N ، تعداد لبه برنده ابزار که در این پژوهش ۲ می‌باشد. همان‌طور که در این روابط مشهود است، ضرایب برش و لبه-نیروی مماسی (K_{te} و K_{tc}) متأثر از نیروها در راستای Z نمی‌باشند. همچنین عبارتهای K_{ac} و K_{ae} را می‌توان از روی ضرایب K_{rc} و K_{re} ، صرفاً با تغییر علامت \bar{F}_z و جابجانی A_2 و A_3 و همچنین B_2 و B_3 به دست آورد. در روابط بالا ثوابت درگیری C، عبارتهای مربوط به زوایای درگیری را شامل می‌شوند که روابط پارامتری مربوط به آن‌ها به صورت زیر است.

$$C_1 = \frac{1}{2} \phi \left| \frac{\phi_{ex}}{\phi_{st}} \right|$$

$$C_2 = \frac{1}{4} \sin 2\phi \left| \frac{\phi_{ex}}{\phi_{st}} \right| \quad (4-1)$$

$$C_3 = \frac{1}{4} \cos 2\phi \left| \frac{\phi_{ex}}{\phi_{st}} \right|$$

$$C_4 = \sin \phi \left| \frac{\phi_{ex}}{\phi_{st}} \right|$$

$$C_5 = \cos \phi \left| \frac{\phi_{ex}}{\phi_{st}} \right|$$

ϕ_{st} ، زاویه ورود ابزار به قطعه کار، برابر یا صفر درجه.

کمترین مربعات شناسایی گردیده‌اند [۱۷ و ۱۵].

روش دیگری در مدل‌سازی مکانیستیک نیروهای برش توسط بعضی پژوهشگران ارائه گردیده که ارتباط غیرخطی ضرایب برش را با پیشروی به‌ازای یک دندان، سرعت برش و درگیری شعاعی بیان می‌کند [۱۸]. در این روش ضرایب برش با دوروش رگرسیون خطی و بهینه‌سازی غیرخطی مقایسه و با نتایج تجربی اعتبارسنجی می‌شوند [۱۹]. روابط مکانیستیک نیروهای دیفرانسیلی مماسی (dF_t)، شعاعی (dF_r) و محوری (dF_a) [۲۰] به صورت زیر می‌باشند:

$$\begin{cases} dF_t = K_{tc} \cdot h(\phi) \cdot db + K_{te} \cdot ds \\ dF_r = K_{rc} \cdot h(\phi) \cdot db + K_{re} \cdot ds \\ dF_a = K_{ac} \cdot h(\phi) \cdot db + K_{ae} \cdot ds \end{cases} \quad (1-1)$$

که در آن‌ها پارامترهای K_{tc} ، K_{rc} و K_{ac} ، به ترتیب ضرایب برشی مماسی، شعاعی، محوری و K_{te} ، K_{re} و K_{ae} ضرایب لبه مماسی، شعاعی و محوری می‌باشند. همچنین $h(\phi)$ ضخامت براده لحظه‌ای و db و ds ، به ترتیب عمق دیفرانسیلی برش و طول دیفرانسیلی درگیری ابزار با قطعه کار می‌باشند.

روابط نیروهای میانگین برشی برای هر لبه‌ی برنده‌ی ابزار به صورت تابعی از f_t (پیشروی به‌ازای هر لبه برنده) بیان شده‌اند.

$$\bar{F}_* = \bar{F}_{*c} \cdot f_t + \bar{F}_{*e} \quad (2-1)$$

که در آن \bar{F}_{*c} و \bar{F}_{*e} ، به ترتیب، میانگین نیروهای برش و لبه در هر یک از راستاهای محورهای مختصات می‌باشند که مقادیر آن‌ها را می‌توان به صورت تجربی از روی نتایج آزمایش‌های فرکاری انجام شده در نرخ‌های پیشروی مختلف اما زوایای درگیری ورودی و خروجی ثابت به دست آورد. \bar{F}_{*c} و \bar{F}_{*e} به ترتیب متناظر با شیب و عرض از مبدأ خطوط مستقیمی هستند که وابستگی نیروهای برش میانگین اندازه‌گیری شده را به نرخ پیشروی، تخمین می‌زنند. همچنین \bar{F}_* ، مقادیر نیروهای میانگینی هستند که برای هر راستا، در هر مرحله آزمایش به کمک دینامومتر اندازه‌گیری می‌شوند.

در معادلات (۳-۱) روابط پارامتری مربوط به هر ضریب نیرویی ارائه شده است:

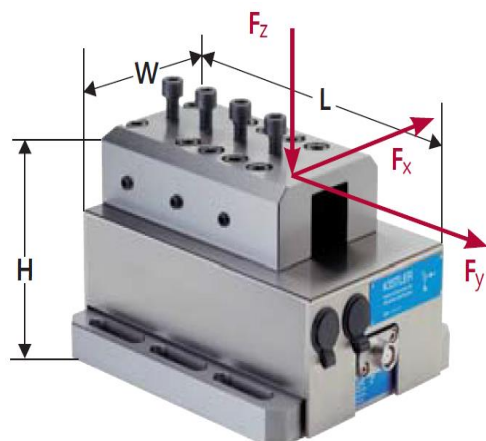
در یک عمق برش ثابت، با تغییر دادن مقدار پیشروی به ازای هر دندان، پیش‌بینی و با نیروهای تجربی مقایسه - گردید. در این پژوهش برای اولین بار با حذف اثر شعاع نوک ابزار در درگیری ابزار یا قطعه‌کار خطای محاسباتی ناشی از گرد بودن نوک ابزار حذف گردید و نتایج دقیق‌تری در پیش-بینی نیروهای برش به روش مدل‌سازی مکانیستیک به-دست آمد.

۲- مواد، تجهیزات و روش پژوهش

در این بخش مشخصات ابزار و تجهیزات و قطعه‌کار مورد استفاده آورده شده است.

۲-۱- مشخصات دستگاه فرز و دینامومتر استفاده-شده در آزمایش‌ها

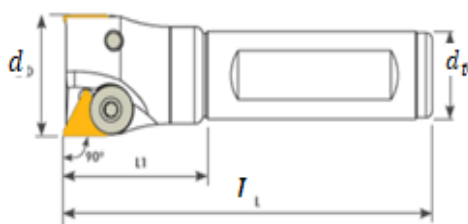
در این تحقیق از دستگاه فرز FP4M به‌منظور انجام آزمایش‌های ماشین‌کاری و از دینامومتر 9265B (ساخت شرکت Kistler) به‌منظور اندازه‌گیری نیروهای برش استفاده شده است. در شکل (۲-۱) این تجهیز نشان داده شده است.



شکل ۲-۱- دینامومتر 9265B ساخت شرکت Kistler

۲-۲- مشخصات فنی ابزارها و اینسرت‌های برش

در شکل (۲-۲) و همچنین در جدول ۱-۲ مشخصات هندسی ابزار برش فرز انگشتی دو لبه با زاویه‌ی درگیری محوری $\kappa = 90^\circ$ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲- ابزار فرز انگشتی، با ابزارهای اینسرتی

ϕ_{ex} ، زاویه خروج ابزار از قطعه‌کار برابر با 180° درجه ثابت A_* و B_* نیز به‌صورت زیر قابل محاسبه می‌باشند.

$$\begin{aligned} A_1 &= \int_{z_1}^{z_2} dz \\ A_2 &= \int_{z_1}^{z_2} \sin \kappa(z) dz \\ A_3 &= \int_{z_1}^{z_2} \cos \kappa(z) dz \\ B_1 &= \int_{z_1}^{z_2} ds(z) \\ B_2 &= \int_{z_1}^{z_2} \sin \kappa(z) ds(z) \\ B_3 &= \int_{z_1}^{z_2} \cos \kappa(z) ds(z) \end{aligned} \quad (5-1)$$

مدل مکانیستیک فوق برای محاسبه نیروی برش [۲۱] بر مبنای تناسب خطی نیروهای برشی با سطح مقطع براده تغییرشکل نیافته استوار است. مدل خطی نیروهای برشی، برآیند دو پدیده زیر را در نظر می‌گیرد:

۱- برش براده: در این فرض، اندازه نیروهای برشی متناسب با سطح مقطع براده تغییرشکل نیافته در نظر گرفته می‌شود.

۲- اصطکاک لبه برنده ابزار: بر طبق این فرض، نیروی برش، متناسب با طول لبه برش ارزیابی می‌شود.

با در نظر گرفتن وابستگی خطی نیروهای میانگین به نرخ پیشروی و با دو فرض مذکور و در نظر گرفتن عمق بار و هندسه ابزار مشخص و ثابت، ولی نرخ‌های پیشروی متفاوت، می‌توان ضرایب نیرویی (برش و لبه) را با مساوی قرار دادن معادلات نیروهای میانگین برش و لبه با نیروهای اندازه‌گیری شده متناظر با آن‌ها به‌دست آورد. این مدل می‌تواند منحنی مؤلفه‌های نیروی برش، متناسب با تغییرات محلی ضخامت براده تغییرشکل نیافته در فرزکاری برای هر زاویه دلخواه چرخش تیغه فرز را محاسبه نموده و نتایج را در سه راستای محورهای متعامد نشان دهد [۲۲]. استفاده از روش حداقل مربعات برای به‌دست آوردن مقادیر نیروهای برش و لبه در مدل‌سازی‌های تحلیلی، هنگامی است که تعداد مجهولات بیشتر از تعداد معادلات موجود باشند [۲۳].

در این پژوهش با استفاده از روابط مکانیستیک، ضمن محاسبه ضرایب نیرویی برش و لبه، با مدل نمودن قطعه‌کار و ابزار فرز انگشتی با زاویه تنظیم 90° درجه، نیروهای برش،

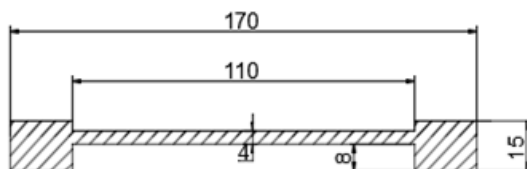
و سازه بسیاری از ماشین‌آلات صنعتی می‌باشد که با- توجه به شرایط ساخت و سهولت ماشین‌کاری، قابلیت اتصال (جوشکاری) و صرفه اقتصادی، یکی از جنس‌های پرکاربرد در ساخت تجهیزات است. از این رو پیش‌بینی نیروهای برش در فرآیند تولید آن‌ها خالی از اهمیت نیست. برای حذف خطای ناشی از گرد بودن نوک اینسرت‌ها در فرزکاری، قطعه‌کار به‌گونه‌ای از قبل، ماشین‌کاری گردید.

جدول ۲-۲- مشخصات فنی اینسرت TPMR 110308 ساخت

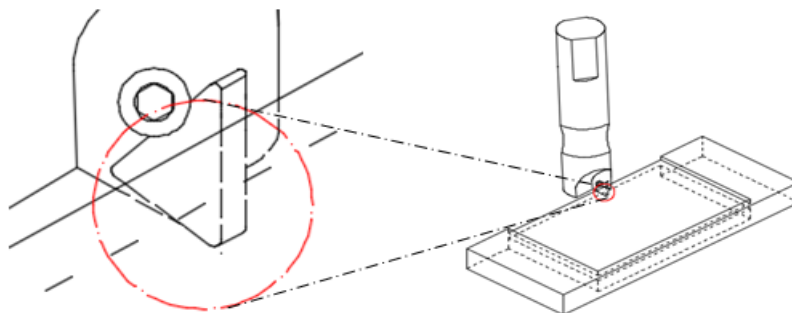
شرکت ISCAR

طول مؤثر لبه‌برنده (LE)	۱۱ میلی‌متر
قطر دایره‌محاطی (IC)	۶/۳۵ میلی‌متر
ضخامت اینسرت (S)	۳/۱۸ میلی‌متر
شعاع گوشه‌اینسرت (RE)	۰/۸ میلی‌متر
زاویه آزاد اینسرت (AN)	۱۱ درجه
درجه‌بندی	IC830
پوشش	PVD TiAlN/AlTiN+TiN
دسته‌بندی مواد	(P20-P40)(M25-M35)

که تنها یک ضخامت ۴ میلی‌متری قطعه با لبه برنده مستقیم اینسرت‌های ابزار فرز انگشتی در تماس باشد. شکل‌های (۲-۲) و (۴-۲) طرح آماده‌سازی شده قطعه را نشان می‌دهند.



(الف)



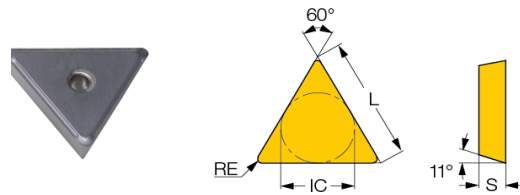
(ب)

شکل ۲-۴- (الف) شماتیک مقطع طراحی شده قطعه‌کار. (ب) نمای سه‌بعدی درگیری ابزار با قطعه‌کار

جدول ۲-۱- مشخصات هندسی ابزار مورد استفاده برای انجام آزمایش‌های تجربی برای حالت درگیری $\kappa = 90^\circ$

طول کلی ابزار	قطر مؤثر ابزار	درگیری محوری κ°	قطر دنباله‌ای ابزار
L (mm)	D (mm)		d_f (mm)
۱۲۰	۲۵	۹۰	۲۵

در شکل (۲-۳) و همچنین در جدول ۲-۲ مشخصات هندسی و جنس ماده پایه و پوشش اینسرت‌های برش، برای زاویه‌ی درگیری محوری $\kappa = 90^\circ$ آورده شده است.



شکل ۲-۳- ابزارهای اینسرتی ساخت شرکت ISCAR

۲-۳- آماده‌سازی نمونه‌های مورد آزمایش

به‌منظور آماده‌سازی قطعه کار برای آزمایش با ابزار $\kappa=90^\circ$ ، قطعه‌کاری از فولاد St37 به ابعاد اولیه $15 \times 70 \times 170$ استفاده گردید. انتخاب این جنس، به‌دلیل استفاده فراوان آن در صنعت ماشین‌سازی از جمله بدنه

آن (ابزار گیر و فشننگی به قطر ۲۵ میلی‌متر) به گلوبی دستگاه فرز بسته تا بتوان با حرکت‌های دورانی ابزار و پیشروی طولی میز (در جهت X)، مؤلفه نیروهای برش (F_x و F_y و F_z) را برای هر مرحله آزمایش به دست آورد. مقادیر نیروهای برش میانگین از روی نمودار مؤلفه‌های نیروی برش اندازه‌گیری شده توسط دینامومتر محاسبه می‌شوند.

با داشتن مقادیر میانگین مؤلفه‌های نیروی برش برای ۸ مرحله آزمایش صورت گرفته مطابق جدول (۲-۳) ضرایب نیروی برش و لبه قابل محاسبه می‌باشند.

۲-۵- تنظیمات دستگاه فرز و انجام محاسبات اولیه برای به دست آوردن نیروهای برش میانگین.

تنظیمات دستگاه فرز روی دور اسپیندل ۴۰۰ rpm (دور اسپیندل برای جلوگیری از اثر متقابل سرعت برش و پیشروی برای همه آزمایش‌ها ثابت در نظر گرفته شده - است.) و پیشروی‌های (V_f)، ۱۲، ۱۶، ۲۵، ۳۱/۵، ۴۰ و ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه به ترتیب برای ۸ مرحله آزمایش برای به دست آوردن نیروهای برش با استفاده از دینامومتر تعیین گردیدند.

لازم به ذکر است با توجه به این که در روابط مربوط برای به دست آوردن نیروهای برش و لبه به کمک حل از طریق کمترین مربعات، مقادیر پیشروی باید بر اساس میلی‌متر بر دور به ازای یک دندان (f_t) باشند، لذا با انجام محاسبات، مطابق با جدول ۲-۳ مقادیر پیشروی به شکل دلخواه تبدیل گردیدند.

جدول ۲-۳- مقادیر دور، پیشروی دستگاه و پیشروی به ازای هر دندان برای هر آزمایش

ردیف	$N_{(rpm)}$	$V_f(mm/min)$	$f_t(mm/rev)$	$T_{(tooth)}$	$f_t(mm/rev.tooth)$
۱	۴۰۰	۸	۰/۰۲	۲	۰/۰۱
۲	۴۰۰	۱۲	۰/۰۳	۲	۰/۰۱۵
۳	۴۰۰	۱۶	۰/۰۴	۲	۰/۰۲
۴	۴۰۰	۲۰	۰/۰۵	۲	۰/۰۲۵
۵	۴۰۰	۲۵	۰/۰۶۲۵	۲	۰/۰۳۱۲۵
۶	۴۰۰	۳۱/۵	۰/۰۷۸۵	۲	۰/۰۳۹۳۷۵
۷	۴۰۰	۴۰	۰/۱	۲	۰/۰۵
۸	۴۰۰	۵۰	۰/۱۲۵	۲	۰/۰۶۲۵

ضرایب نیرویی، نهایتاً به اجرای برنامه مدل‌سازی و پیش بینی نیروهای برش در نرم‌افزار متلب^۱ ختم می‌گردد لذا لازم

نظر به این که نوآوری این پژوهش حذف خطای محاسباتی گردی نوک اینسرت‌های برش، حین فرآیند ماشین‌کاری می‌باشد، لذا با انجام عملیاتی طرح قطعه کار مطابق شکل (۲-۴ الف) به منظور حذف خطای گردی نوک اینسرت، در محاسبات مؤلفه‌های نیروی ماشین‌کاری آماده گردید. باتوجه به شکل (۲-۴ ب) همان‌طور که نمای درگیری ابزار با قطعه کار مشخص می‌باشد به دلیل پایین‌تر بودن گردی نوک ابزار از مقطع آماده شده قطعه کار، حین فرآیند براده برداری، خطای ناشی از تغییرات اصطکاک در گردی نوک اینسرت‌ها در آزمایش‌های انجام شده حذف گردیده است؛ که در نتیجه با انجام این عمل، دقت محاسبات بهبود پیدا نمود.



شکل ۲-۵- بستن ابزار، قطعه و انجام تنظیمات لازم.

۲-۴- طراحی آزمایش

برای انجام آزمایش با تیغه فرز انگشتی دو لبه با لبه برنده مستقیم $\kappa = 90$ ، بعد از آماده‌سازی قطعه و بستن آن روی دینامومتر با گیره‌های مناسب، ابزار را نیز با متعلقات

۲-۶- معرفی برنامه مدل‌سازی.

با توجه به اینکه انجام آزمایش‌های عملی به منظور استخراج

^۱MATLAB

جدول ۳-۱- مقادیر نیروهای میانگین استخراج شده بر حسب نیوتن

آزمایش	$F_{x(N)}$	$F_{y(N)}$	$F_{z(N)}$
۱	۴۴۸/۵	۲۶۶/۱	۰/۴۲۱۳
۲	۵۸۹/۹	۳۲۵/۲	۲/۳۷۸
۳	۶۴۶/۸	۳۵۸/۱	۲/۲۲۳
۴	۷۰۴/۷	۳۶۹/۵	۲/۸۳۲
۵	۷۹۶/۵	۴۴۳/۹	۱۹/۹
۶	۸۸۱/۴	۴۸۹/۹	۱۳/۴
۷	۱۰۱۴	۵۵۷/۷	۲۲/۶۲
۸	۱۰۸۹	۶۰۳/۷	۱۴/۷۹

۳-۲- تحلیل بر نیروهای استخراج شده تجربی.

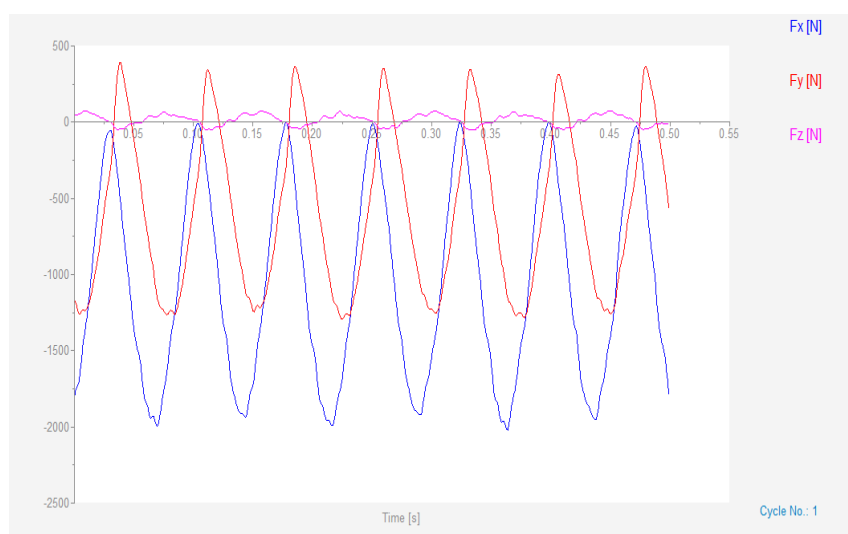
از نتایج مربوط به سه مؤلفه نیروی برش برای پیشروی های متفاوت مطابق جدول ۳-۱ مشاهده می گردد که با افزایش نرخ پیشروی مقادیر نیروهای برش نیز در هر سه راستا افزایش می یابد. این پدیده وابستگی نیروهای برش به نرخ پیشروی را نشان می دهد. همچنین ملاحظه می شود مقادیر نیروی برش در راستای محور X بیشتر از دو راستای دیگر است و این به دلیل پیشروی میز در راستای X بوده که باید ابزار بر نیروهای مقاوم در این راستا غلبه کند.

۳-۳- محاسبه نیروهای برش F_{xc} و F_{yc} و F_{zc}

و لبه ابزار F_{xe} و F_{ye} و F_{ze}

با داشتن نیروهای میانگین روی هر محور، مقادیر نیرو های برش و لبه ابزار از طریق حل دستگاه معادلات (۳-۱) به دست می آیند. [۲۱].

$$\bar{F}_* = \bar{F}_{*c} f_t + \bar{F}_{*e}$$



شکل ۳-۱- نمودار به دست آمده از دینامومتر برای نرخ پیشروی ۰/۰۶۲۵ میلی متر به ازای یک دندان در هر دور ابزار.

است در اینجا اشاره ای نیز به برنامه مدل سازی نیروها شود. محاسبات لازم برای ضرایب نیرویی مطابق روابط (۳-۱)، (۴-۱) و (۵-۱) و همچنین محاسبات دیفرانسیلی نیروها، مطابق روابط (۱-۱) انجام شد و در نهایت منحنی سه مؤلفه نیروی پیش بینی F_x ، F_y و F_z برای هر مرحله به دست آمد که به عنوان نمونه برای سه مرحله آزمایش در شکل های (۳-۳) تا (۵-۳) به صورت مقایسه مؤلفه های نیروهای برش پیش بینی و تجربی آورده شده است.

۳- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج نیروهای به دست آمده از آزمایش های تجربی و مدل سازی مکانیستیک آورده شده است.

۳-۱- مقادیر نیروهای برش، استخراج از دینامومتر.

برای هر مرحله آزمایش سه نیرو در جهت X، Y و Z در قالب یک نمودار، توسط دینامومتر استخراج گردید. هر مرحله در بازه زمانی ۰/۵ ثانیه انجام گرفت که در این بازه زمانی نیروهای برشی میانگین برای هر آزمایش به دست آمد. در شکل ۳-۱ نمودار استخراج شده برای نرخ پیشروی ۰/۰۶۲۵ میلی متر در هر دور به ازای یک دندان نشان داده شده است.

مقادیر خروجی دینامومتر که با هدف اندازه گیری نیرو های میانگین تجربی ثبت گردیده اند شامل سه منحنی، F_x ، F_y و F_z بوده که برای هر نرخ پیشروی مقدار میانگین سه مؤلفه نیروی اندازه گیری شده در جدول ۳-۱ به تفکیک آورده شده اند.

برای نیروهای برش و لبه در جدول ۳-۲ گردآوری شده‌اند.

جدول ۳-۲- مقادیر نیروهای برش و لبه	
نیروهای برش و لبه	مقادیر
$F_{xc} \left(\frac{N \cdot rev \cdot tooth}{mm} \right)$	۱۱۸۷۱
$F_{xe(N)}$	۳۹۵/۶۲۶۴
$F_{yc} \left(\frac{N \cdot rev \cdot tooth}{mm} \right)$	۶۴۶۰/۱۵
$F_{ye(N)}$	۲۲۲/۲۸۶۶
$F_{zc} \left(\frac{N \cdot rev \cdot tooth}{mm} \right)$	۳۸۴/۶۰۳۳
$F_{ze(N)}$	-۲/۳۵۲۲

۴-۳- استخراج ضرایب نیروها

قبل از آنکه بتوانیم ضرایب را استخراج کنیم، ابتدا باید ثوابتی که در روابط بکار برده شده‌اند را محاسبه کنیم. این ثوابت، شامل A و B و C بوده و از روابط (۳-۴) و (۳-۵) و (۳-۶) در بازه زاویه چرخش هرلبه با تفکیک نمودن نیرو-های برش و لبه، به‌دست آمده‌اند. به‌طوری‌که ثابت‌های A از معادلات برش، B از معادلات لبه و C با توجه به زاویه درگیری ابزار و قطعه‌کار حاصل شده‌اند [۲۱].

(۳-۳)

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \frac{f_t}{\phi_p} \begin{bmatrix} C_3 A_1 & (C_2 - C_1) A_2 & (C_2 - C_1) A_3 \\ -(C_2 - C_1) A_1 & C_3 A_2 & C_3 A_3 \\ 0 & -C_5 A_3 & C_5 A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{rc} \\ K_{rc} \\ K_{ac} \end{bmatrix} +$$

$$\frac{1}{\phi_p} \begin{bmatrix} -C_4 B_1 & C_5 B_2 & C_5 B_3 \\ -C_5 B_1 & -C_4 B_2 & -C_4 B_3 \\ 0 & 2C_1 B_3 & -2C_1 B_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{re} \\ K_{re} \\ K_{ae} \end{bmatrix}$$

ϕ_p ، گام زاویه‌ای درگیری ابزار که برابر است با $\frac{2\pi}{N}$

مقادیر ثابت‌های C از روابط زیر به‌دست می‌آیند.

$$C_1 = \frac{1}{2} \phi \left| \frac{\phi_{ex}}{\phi_{st}} \right| = \frac{\pi}{2}$$

$$C_2 = \frac{1}{4} \sin 2\phi \left| \frac{\phi_{ex}}{\phi_{st}} \right| = 0$$

$$C_3 = \frac{1}{4} \cos 2\phi \left| \frac{\phi_{ex}}{\phi_{st}} \right| = 0$$

$$C_4 = \sin \phi \left| \frac{\phi_{ex}}{\phi_{st}} \right| = 0 \quad (۴-۳)$$

$$C_5 = \cos \phi \left| \frac{\phi_{ex}}{\phi_{st}} \right| = -2$$

مقادیر ثوابت A که از روابط مربوطه به‌دست آمده‌اند.

۳-۳- محاسبه نیروهای برش F_{zc} و F_{yc} و F_{xc} و لبه-

ابزار F_{xe} و F_{ye} و F_{ze}

با داشتن نیروهای میانگین روی هر محور، مقادیر نیروهای برش و لبه‌ابزار از طریق حل دستگاه معادلات (۳-۱) به-دستی می‌آیند. [۲۱].

$$\bar{F}_* = \bar{F}_{*c} f_t + \bar{F}_{*e}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{F}_{*1} \\ \bar{F}_{*2} \\ \vdots \\ \bar{F}_{*n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{t1} & 1 \\ f_{t1} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ f_{tn} & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{F}_{*c} \\ \bar{F}_{*e} \end{bmatrix} \quad (۱-۳)$$

حل دستگاه معادلات (۱-۳) از روش کمترین مربعات به صورت زیر خواهد بود.

$$\begin{bmatrix} \bar{F}_{*c} \\ \bar{F}_{*e} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} f_{t1} & 1 \\ f_{t1} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ f_{tn} & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} f_{t1} & 1 \\ f_{t1} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ f_{tn} & 1 \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} f_{t1} & 1 \\ f_{t1} & 1 \\ \vdots & \vdots \\ f_{tn} & 1 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \bar{F}_{*1} \\ \bar{F}_{*2} \\ \vdots \\ \bar{F}_{*n} \end{bmatrix} \quad (۲-۳)$$

در رابطه (۲-۳) برای به دست آوردن نیروهای میانگین برش و لبه، مراحل زیر انجام گردید.

۱- تشکیل ماتریس نیروهای میانگین تجربی برای هر راستا.

۲- نوشتن ماتریس پیشروی‌های هشت‌گانه.

۳- تعیین ترانهاده ماتریس پیشروی‌ها.

۴- ضرب ماتریس ترانهاده در ماتریس پیشروی و معکوس نمودن حاصل آن‌ها.

۵- معکوس به‌دست‌آمده در ماتریس ترانهاده ضرب می‌گردد.

۶- حاصل بند ۵، در ماتریس نیروهای میانگین تجربی که برای هر راستا جداگانه تشکیل شده است ضرب می‌شود که نتیجه آن یک ماتریس دو در یک خواهد بود که سطر اول

آن \bar{F}_{*c} یا همان میانگین نیروی برش و سطر دوم آن \bar{F}_{*e} یا میانگین نیروی لبه در جهت راستای مورد نظر می‌باشد.

با انجام محاسبات به کمک حل، با روش کمترین مربعات، مطابق آنچه شرح داده شد، مقادیر به‌دست آمده

مرحله آزمایش تجربی و استفاده از روابط (۷-۳) و (۸-۳) پایه‌ریزی شده است. [۲۱]

مقدار پیشروی به‌ازای یک دندان در هر دور ابزار با توجه به مقادیر مندرج در جدول ۳-۲ می‌باشد.

مقدار بار عمقی ابزار بوده که در این برنامه ۴ میلی متر منظور شده است.

مقدار پیشروی زاویه‌ای لحظه‌ای با توجه به گام ۰/۱ درجه می‌باشد.

مقدار dz عرض دیفرانسیلی براده است که برای ابزار $\kappa = 90^\circ$ با هم برابرند.

طول لبه برنده ابزار، درگیر با قطعه کار می‌باشد ds ، ماتریس نیروهای لحظه‌ای برش و لبه (مماسی، شعاعی و محوری) است.

ماتریس نیروهای انتقال داده شده برش و لبه روی محورهای کارترین است. (۷-۳)

با یافتن نیروهای برش و لبه مندرج در جدول ۳-۲، به تفکیک برای هر راستا به روش حل از طریق کمترین مربعات و محاسبه ثوابت C از روابط (۴-۳) و A و B (مطابق روابط (۵-۳) و (۶-۳) تعریف شده با توجه به هندسه ابزار)، محاسبات ضرایب نیرویی برش و لبه در سه جهت مماسی، شعاعی و محوری به کمک معادلات (۳-۱) انجام شد و در جدول ۳-۳ مرتب گردید.

$$\begin{bmatrix} -\cos \phi_j & -\sin \kappa \sin \phi_j & -\cos \kappa \sin \phi_j \\ \sin \phi_j & -\sin \kappa \cos \phi_j & -\cos \kappa \cos \phi_j \\ 0 & \cos \kappa & -\sin \kappa \end{bmatrix} \quad (۸-۳)$$

$$\begin{bmatrix} dF_{x,j}(\phi_j, z) \\ dF_{y,j}(\phi_j, z) \\ dF_{z,j}(\phi_j, z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \phi_j & -\sin \kappa \sin \phi_j & -\cos \kappa \sin \phi_j \\ \sin \phi_j & -\sin \kappa \cos \phi_j & -\cos \kappa \cos \phi_j \\ 0 & \cos \kappa & -\sin \kappa \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_{t,j}(\phi_j, z) \\ dF_{r,j}(\phi_j, z) \\ dF_{a,j}(\phi_j, z) \end{bmatrix}$$

محاسبه نیروها همان‌طور که اشاره گردید بر اساس معادلات (۷-۳) و (۸-۳) صورت گرفته است. اطلاعات ثابت و اولیه، همان مقادیر ضرایب نیرویی برای برش و لبه، زاویه درگیری محوری ابزار κ ، عمق بار Z و بازه زاویه درگیری شعاعی ابزار ϕ است. مقدار گام‌هایی که برای المان‌های دیفرانسیلی در نظر گرفته می‌شود دلخواه است ولی سعی می‌گردد این

طول دیفرانسیلی لبه ابزار $ds(z)$ = عمق براده که در تمام آزمایش‌ها مقدار آن ۴ میلی‌متر منظور شده است.

$$\begin{aligned} Z_1 &= 0 \\ Z_2 &= 4_{mm} \\ ds(z) &= dz \\ A_1 &= Z \left| \frac{Z_2}{Z_1} = 4_{mm} \right. \end{aligned} \quad (۵-۳)$$

$$\begin{aligned} A_2 &= Z \left| \frac{Z_2}{Z_1} = 4_{mm} \right. \\ A_3 &= 0 \end{aligned}$$

مقادیر ثوابت B که از روابط مربوطه به دست آمده‌اند.

$$B_1 = Z \left| \frac{Z_2}{Z_1} = 4_{mm} \right. \quad (۶-۳)$$

$$\begin{aligned} B_2 &= Z \left| \frac{Z_2}{Z_1} = 4_{mm} \right. \\ B_3 &= 0 \end{aligned}$$

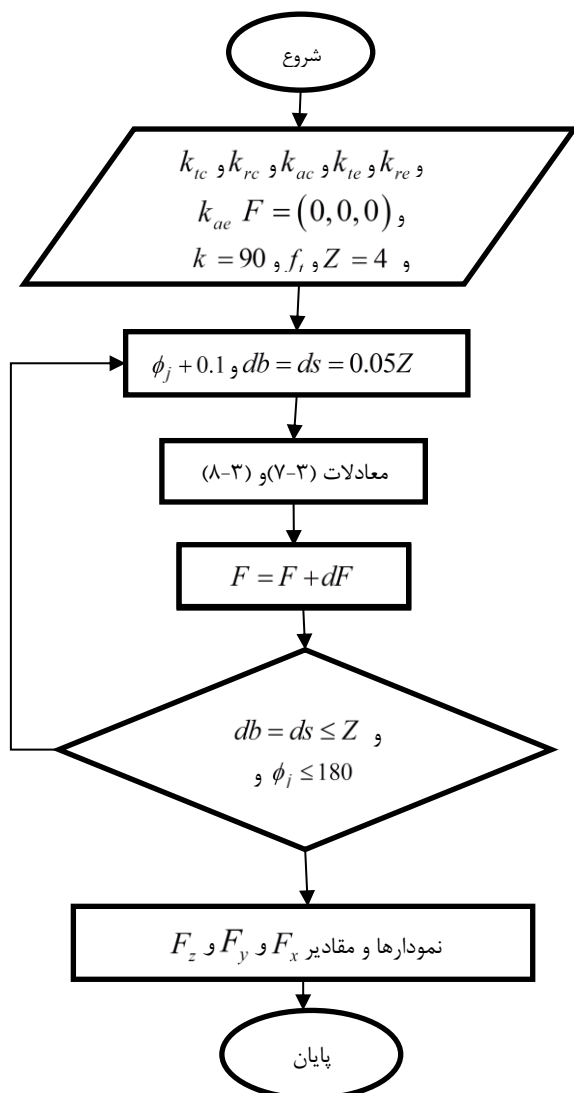
جدول ۳-۳-۳ ضرایب نیرویی

مقادیر	ضرایب نیرویی
۳۲۳۰/۳	$K_{tc} \left(\frac{N}{mm^2} \right)$
۸۷/۲۹۱۷	$K_{te} \left(\frac{N}{mm} \right)$
-۱۵۵/۳۶۲۱	$K_{re} \left(\frac{N}{mm} \right)$
۵۹۳۵/۶	$K_{rc} \left(\frac{N}{mm^2} \right)$
۰/۵۸۸۰	$K_{ae} \left(\frac{N}{mm} \right)$
-۱۵۱/۰۳۳۴	$K_{ac} \left(\frac{N}{mm^2} \right)$

در نهایت، پیش‌بینی نیروهای برش بر اساس داده‌هایی - شامل عمق بار، پیشروی ابزار به‌ازای یک دندان در هر دور و ضرایب نیرویی برش، به کمک روابط و معادلات (۷-۳) و (۸-۳) با برنامه‌نویسی در نرم‌افزار متلب اجرا گردید.

۵-۳ برنامه مدل‌سازی نیروهای برش ابزار
اساس برنامه در نرم‌افزار متلب بر مبنای ضرایب شش گانه K_{ae} ، K_{re} ، K_{te} ، K_{ac} ، K_{rc} ، K_{tc} محاسبه شده از روی ۸

با بررسی نمودارهای مقایسه‌ای F_z مشخص می‌گردد که-
 مقادیر نیروی پیش‌بینی کمتر از نیروی تجربی اندازه‌گیری-
 شده توسط دینامومتر است که این پدیده به دلیل انباشته-
 شدن پلیسه‌ها در مسیر حرکت ابزار می‌باشد [۶] که باعث
 افزایش نیروی مقاوم در راستای Z در حالت تجربی و اندازه
 گیری شده توسط دینامومتر می‌باشد که در مدل‌سازی
 چنین شرایطی در نظر گرفته نمی‌شود. به دلیل کوچک -
 بودن مقادیر مؤلفه نیروی F_z نسبت به دو مؤلفه نیرویی
 F_y و F_x مقدار اختلاف نیرویی تجربی و پیش‌بینی F_z
 (بسیار کم، حداکثر ۴۰ نیوتن) مشهودتر از دو مؤلفه F_y و
 F_x بر روی نمودارها می‌باشد (به دلیل مقیاس کوچک‌تر
 نیروی F_z) ولی همین اختلاف کم نیز می‌تواند ناشی از
 انباشته شدن پلیسه‌ها در مسیر حرکت ابزار باشد که باعث
 افزایش ضخامت براده و نهایتاً از دید نیروی برش می‌گردد.

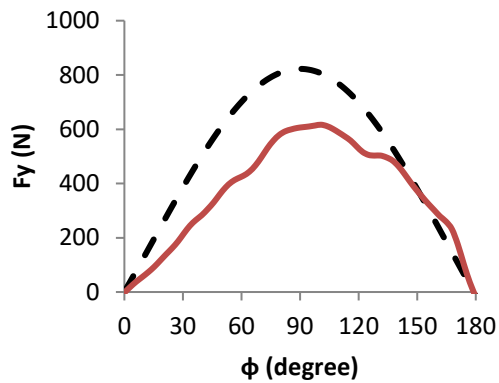


شکل ۳-۲- روند انجام برنامه‌نویسی در متلب

مقادیر حتی‌الامکان کوچک انتخاب گردند تا نمودارها با
 دقت بالاتری ترسیم گردند. سیکل‌های برنامه هر بار مقدار
 نیروهای جزء را با توجه به زاویه طی شده محاسبه می‌نماید
 تا به انتهای بازه زاویه درگیری شعاعی تعریف‌شده برای ابزار
 رسیده، سپس در نهایت نمودار نیروهای F_x و F_y و F_z
 ترسیم می‌گردند. به‌طور خلاصه می‌توان گفت خروجی‌های
 این برنامه که همان نمودارهای نیروهای پیش‌بینی شده می
 باشند برای هر ابزاری فقط تابع پیشروی به‌ازاء هر دندان
 خواهند بود. روند انجام محاسبات و برنامه‌نویسی برای مدل-
 سازی مکانیستیک نیروهای برش در شکل (۳-۲) آورده -
 شده است.

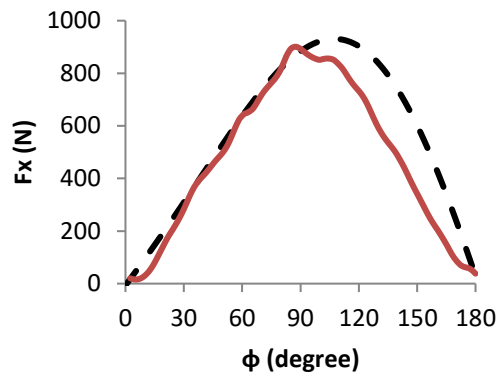
۳-۶- مقایسه نتایج تجربی با خروجی‌های مدل شده $\kappa = 90$

پس از استخراج مؤلفه‌های نیروی برش تجربی به‌کمک
 دینامومتر و نیروهای برش پیش‌بینی، منحنی‌های حاصل از
 نتایج آن‌ها مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. برای مقایسه، منحنی
 نیروها در هر راستا در یک نیم سیکل چرخش ابزار فرز (۱۸۰
 درجه) ترسیم شده‌اند. شکل‌های (۳-۳) تا (۵-۳) مقایسه
 منحنی مؤلفه‌های نیروی برش تجربی و پیش‌بینی مدل را
 در سه راستای F_x ، F_y و F_z در یک نیم سیکل چرخش
 لبه برنده، برای سه نرخ پیشروی مورد آزمایش، نشان می
 دهند. با بررسی شکل‌های (۳-۳) تا (۵-۳) مشخص است که
 در هر نیم سیکل چرخش ابزار به‌دلیل اینکه در زاویه $\phi = 0$
 ضخامت براده صفر می‌باشد هرکدام از مؤلفه‌های نیروی
 برش از مقدار صفر آغاز شده و به‌تدریج با افزایش زاویه
 چرخش ϕ ضخامت براده تغییر شکل نیافته افزایش یافته
 به‌گونه‌ای که در زاویه $\phi = 90^\circ$ به حداکثر ضخامت که
 معادل حداکثر نیروی برش در میانه نیم سیکل است
 می‌رسد و با افزایش بیشتر زاویه چرخش ϕ به‌تدریج
 ضخامت براده و نیروی برش متناظر با آن کاهش می‌یابد تا
 در انتهای نیم سیکل ($\phi = 180^\circ$)، باز به مقدار صفر برسد.
 با مقایسه مؤلفه نیروهای برش مشخص می‌گردد که اندازه
 مؤلفه نیروی F_x از دو مؤلفه دیگر بزرگ‌تر می‌باشد زیرا
 حرکت پیشروی ابزار در جهت X بوده که ناگزیر است بر
 نیروهای مقاوم در مسیر حرکت، غلبه کند. با بررسی نمودار-
 های مقایسه‌ای مؤلفه‌های نیرویی F_x و F_y مشخص می
 گردد که عمدتاً در طول یک نیم سیکل براده برداری، مقدار
 نیروی پیش‌بینی بالاتر از مقادیر نیروی تجربی می‌باشند ولی



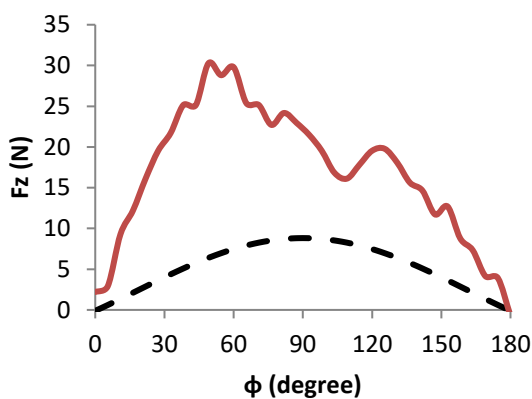
--- Fy(predict) — Fy(experimental)

(ب)



--- Fx(predict) — Fx(experimental)

(الف)

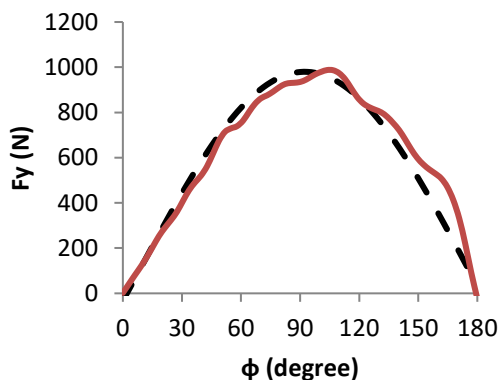


--- Fz(predict) — Fz(experimental)

(ج)

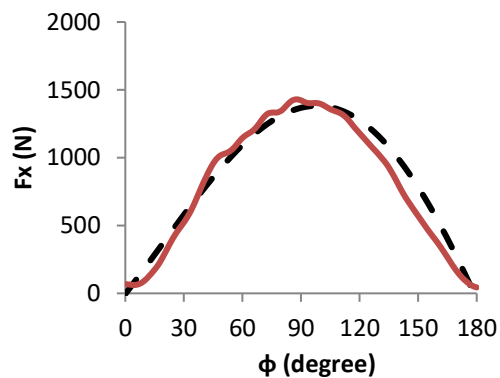
شکل ۳-۳- مقایسه نتایج به دست آمده از دینامومتر و پیش‌بینی مدل، برای نرخ پیشروی ۰/۰۱ میلی‌متر به ازای یک دندان در هر دور ابزار.

F_x (الف)، F_y (ب) و F_z (ج)



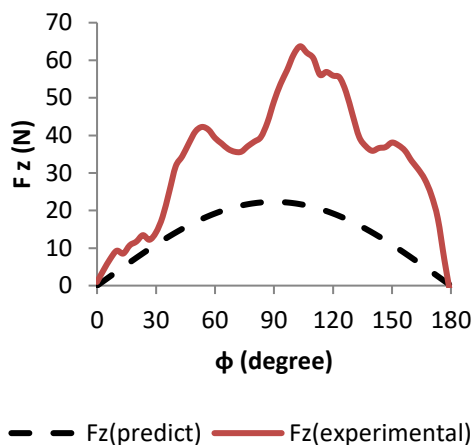
--- Fy(predict) — Fy(experimental)

(ب)



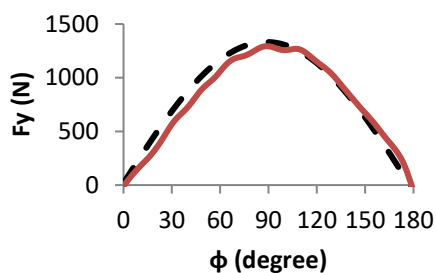
--- Fx(predict) — Fx(experimental)

(الف)



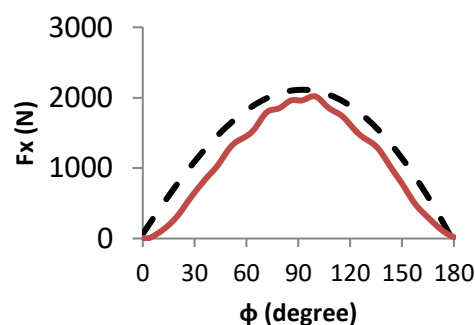
(ج)

شکل ۳-۴- مقایسه نتایج به دست آمده از دینامومتر و پیش‌بینی مدل، برای نرخ پیشروی 0.3125 میلی‌متر به‌ازای یک دندانه در هر دور ابزار. (الف) F_x ، (ب) F_y و (ج) F_z



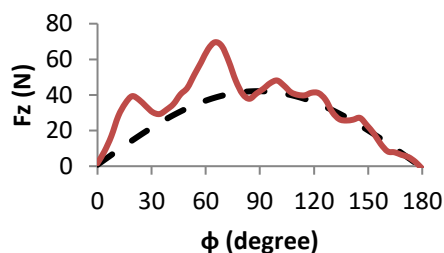
— — Fy(predict)
 — Fy(experimental)

(ب)



— — Fx(predict) — Fx(experimental)

(الف)



— — Fz(predict)
 — Fz(experimental)

(ج)

شکل ۳-۵- مقایسه نتایج به دست آمده از دینامومتر و پیش‌بینی مدل، برای نرخ پیشروی 0.625 میلی‌متر به‌ازای یک دندانه در هر دور ابزار. (الف) F_x ، (ب) F_y و (ج) F_z

نیروی تجربی اندازه‌گیری شده توسط دینامومتر نزدیک‌تر شده است. دلیل آن، کاهش اصطکاک بین ابزار و براده است

با مقایسه شکل‌های (۳-۳) تا (۳-۵) مشخص می‌گردد که با افزایش پیشروی، اندازه نیروی مدل پیش‌بینی به‌مقدار

قابل حذف و یا محاسبه نخواهد بود؛ زیرا پلیسه‌ها حین عملیات براده برداری به لبه قطعه کار به‌طور غیریکنواخت می‌چسبند و موجب افزایش لحظه‌ای و غیرقابل پیش‌بینی سطح مقطع براده در بازه زمانی خاص می‌گردند به‌طوری که در لحظه‌ای بعد ممکن است براده چسبیده شده جدا گردد لذا این پدیده ناخواسته در سطح مقطع براده باعث تغییرات لحظه‌ای نیروهای تجربی خواهد شد. با توجه به مقایسه نیروهای تجربی و پیش‌بینی در سه راستا برای پیشروی‌های مختلف، مشاهده گردید با افزایش پیشروی هر سه نیرو نیز افزایش می‌یابند. در جدول ۳-۴ مقادیر ماکزیمم نیروها در دو حالت تجربی و پیش‌بینی همراه با اختلاف بین نیروی پیش‌بینی مدل و نیروی تجربی برای هر مؤلفه آمده است.

زیرا با افزایش پیشروی، سرعت براده‌برداری افزایش یافته، در نتیجه انقباض براده کاهش می‌یابد [۲۴]. این کاهش انقباض، سبب می‌گردد ضخامت لایه براده‌برداری و همچنین نیروی برش افزایش غیرمتعارف نداشته باشد. از طرف دیگر در پیشروی‌های بزرگ‌تر به‌دلیل افزایش نیروی-برش، نیروی اصطکاک سهم کوچک‌تری از نیروی برش را تشکیل می‌دهد و تأثیر آن در اختلاف نیروی پیش‌بینی و تجربی کاهش می‌یابد. نوسانات مشاهده شده در نمودارهای تجربی حاصل از آزمایش‌ها به‌دلیل ارتعاشات دستگاه، امری طبیعی است؛ بنابراین وجود اختلاف بین نمودارهای تجربی و پیش‌بینی، به علت همین ارتعاشات پیش‌بینی نشده می‌باشد. علاوه بر این تجمع پلیسه‌ها گاهی باعث افزایش سطح مقطع قطعه هنگام براده‌برداری می‌گردد که این رخداد

جدول ۳-۴- مقادیر ماکزیمم نیروهای تجربی و پیش‌بینی

آزمایش	ماکزیمم نیروهای تجربی			ماکزیمم نیروهای پیش‌بینی			اختلاف نیروی پیش‌بینی و تجربی		
	$F_x(\text{exp})$	$F_y(\text{exp})$	$F_z(\text{exp})$	$F_x(\text{pre})$	$F_y(\text{pre})$	$F_z(\text{pre})$	ΔF_x	ΔF_y	ΔF_z
۱	۸۹۳/۷۹	۶۱۶/۵۷	۳۰/۲۷	۹۳۰/۴۰	۸۲۲/۱۱	۸/۸۱	۳۶/۶۱	۲۰۵/۵۴	۲۱/۴۶
۲	۱۰۹۹	۷۵۴/۳۹	۲۸/۵۶	۹۸۸/۶۴	۸۵۹	۱۱/۹	۱۱۰/۳۶	۱۰۴/۶۱	۱۶/۶۶
۳	۱۱۲۲/۶۹	۸۳۹/۲۳	۳۱/۴۹	۱۱۴۶/۴۵	۸۹۵/۹۴	۱۵/۱۳	۲۳/۷۶	۵۶/۷۱	۱۶/۳۶
۴	۱۳۱۲/۷۴	۸۸۵/۱۳	۳۹/۰۶	۱۲۸۱/۵۱	۹۳۲/۸۲	۱۸/۲۹	۳۱/۲۳	۴۷/۶۹	۲۰/۷۷
۵	۱۴۳۰/۰۵	۹۸۶/۶۹	۶۳/۷۲	۱۴۰۱/۳۷	۹۶۸/۲۶	۲۲/۲۸	۲۸/۶۸	۱۸/۴۳	۴۱/۴۴
۶	۱۶۵۵/۱۵	۱۰۸۰/۲	۵۵/۳۷	۱۶۴۲/۲۵	۱۰۲۷/۷۱	۲۷/۴۴	۱۲/۹	۵۲/۴۹	۲۷/۹۳
۷	۱۹۰۸/۸۱	۱۲۰۹/۲۳	۶۷/۸۲	۱۸۸۱/۷۶	۱۱۶۸/۳۴	۳۴/۱۲	۲۷/۰۵	۴۰/۸۹	۳۳/۷
۸	۲۰۹۸/۱۲	۱۳۳۰/۳۴	۶۹/۵۸	۲۱۰۴/۴۰	۱۳۳۱	۴۳/۴۵	۶/۲۸	۰/۶۶	۲۶/۱۳

به نیروهای پیش‌بینی نزدیک شده‌اند. در جدول ۳-۵ مقادیر نیروهای تجربی و پیش‌بینی همراه با درصد اختلاف آن‌ها آورده شده است.

از منظر دیگر می‌توان به درصد اختلاف نیروهای پیش‌بینی و تجربی پرداخت. از مقایسه درصد اختلاف نیروهای متناظر مشاهده می‌شود با افزایش نرخ پیشروی به‌دلیل کاهش اصطکاک بین ابزار و براده، نیروهای تجربی در هر سه راستا

جدول ۳-۵- مقادیر ماکزیمم نیروهای تجربی و پیش‌بینی با درصد اختلاف بین آن‌ها

آزمایش	$F_x(\text{exp})$	$F_x(\text{pre})$	$\frac{\Delta F_x}{F_x(\text{exp})}$	$F_y(\text{exp})$	$F_y(\text{pre})$	$\frac{\Delta F_y}{F_y(\text{exp})}$	$F_z(\text{exp})$	$F_z(\text{pre})$	$\frac{\Delta F_z}{F_z(\text{exp})}$
۱	۸۹۳/۷۹	۹۳۰/۴۰	٪۴	۶۱۶/۵۷	۸۲۲/۱۱	٪۳۳	۳۰/۲۷	۸/۸۱	٪۷۰/۸
۲	۱۰۹۹	۹۸۸/۶۴	٪۱۰	۷۵۴/۳۹	۸۵۹	٪۱۳	۲۸/۵۶	۱۱/۹	٪۵۸/۳
۳	۱۱۲۲/۶۹	۱۱۴۶/۴۵	٪۲/۱	۸۳۹/۲۳	۸۹۵/۹۴	٪۶/۷	۳۱/۴۹	۱۵/۱۳	٪۵۱/۹
۴	۱۳۱۲/۷۴	۱۲۸۱/۵۱	٪۲/۳	۸۸۵/۱۳	۹۳۲/۸۲	٪۵/۳	۳۹/۰۶	۱۸/۲۹	٪۵۳
۵	۱۴۳۰/۰۵	۱۴۰۱/۳۷	٪۲	۹۸۶/۶۹	۹۶۸/۲۶	٪۱/۸	۶۳/۷۲	۲۲/۲۸	٪۶۵
۶	۱۶۵۵/۱۵	۱۶۴۲/۲۵	٪۰/۷۷	۱۰۸۰/۲	۱۰۲۷/۷۱	٪۴/۸	۵۵/۳۷	۲۷/۴۴	٪۵۰
۷	۱۹۰۸/۸۱	۱۸۸۱/۷۶	٪۱/۴	۱۲۰۹/۲۳	۱۱۶۸/۳۴	٪۳/۳	۶۷/۸۲	۳۴/۱۲	٪۴۹
۸	۲۰۹۸/۱۲	۲۱۰۴/۴۰	٪۰/۲۹	۱۳۳۰/۳۴	۱۳۳۱	٪۰/۰۴	۶۹/۵۸	۴۳/۴۵	٪۳۷

خود و آنگاه در انتها (۱۸۰ درجه) به مقدار حداقل خود می‌رسد و از آنجایی که نیروهای برش متناسب با سطح مقطع براده در هر لحظه می‌باشد، این موضوع در منحنی‌های مؤلفه‌های نیروی برش تجربی و پیش‌بینی مدل تحلیلی مکانیستیک مشخص می‌باشد.

۴- با توجه به نمودارهای تجربی و پیش‌بینی مشاهده می‌گردد که با افزایش نرخ پیشروی مقادیر نیروهای برش در هر سه راستا افزایش می‌یابد. این پدیده وابستگی نیروهای برش به نرخ پیشروی را نشان می‌دهد. همچنین ملاحظه می‌شود مقادیر نیروها در راستای محور X بیشتر از دو راستای دیگر است و این به دلیل پیشروی میز در راستای X بوده که باید ابزار بر نیروهای مقاوم در این راستا، غلبه کند.

۵- با افزایش پیشروی، اختلاف نیروهای تجربی و پیش‌بینی کمتر و در نتیجه خطای بین آن‌ها نیز کم می‌شود چون پیشروی زیاد، سرعت جدا شدن براده را افزایش داده که به تبع آن اصطکاک بین سطح تماس ابزار و براده کمتر و در نتیجه نیروهای برش، نزدیک به نیروهای پیش‌بینی می‌گردند.

۶- از آنجایی که نیروی شخم شامل نیروی لبه و همچنین ناشی از شعاع لبه برش ابزار می‌باشد، لذا افزایش شعاع لبه برش که بعضاً در اثر کند شدن ابزار اتفاق می‌افتد، باعث افزایش نیروهای برش خواهد شد.

۷- نمایش نوسانات بیشتر نیروی F_z در نمودارها نسبت به دو نیروی دیگر به این علت می‌باشد که اندازه این نیرو هنگام براده‌برداری با ابزار فرز انگشتی با دو لبه‌برنده مستقیم ($\kappa = 90^\circ$) در مقایسه با دو مؤلفه دیگر نیروی برش، یعنی F_x و F_y ، بسیار کوچک است و نوسانات بیشتر نیروی F_z در نمودارهای تجربی به دلیل بزرگ‌نمایی بیشتر نمودار آن است. به طوری که اگر مقیاس نمودارهای F_x و F_y را نیز در محدوده کوچک‌تری ترسیم کنیم نیروهای آن‌ها مانند F_z خود را بیشتر نشان می‌دهند.

۸- با وجود مقادیر نزدیک به هم اختلاف نیروی پیش‌بینی و تجربی در سه راستای F_x ، F_y و F_z ولی به دلیل کوچک بودن مقادیر پایه نیروی F_z درصد اختلاف نیروی پیش‌بینی و تجربی در این راستا بیشتر است.

۹- با بررسی نمودارهای مقایسه‌ای مؤلفه‌های نیروی F_x و F_y مشخص می‌گردد که عمدتاً در طول یک نیم سیکل براده‌برداری، مقدار نیروی مدل پیش‌بینی بالاتر از

با توجه به اعداد و ارقام استخراج شده از مقادیر حداکثر نیروهای برش تجربی و پیش‌بینی مدل و مقایسه نمودن آن‌ها با یکدیگر مشاهده می‌گردد مقادیر نیروهای ماکزیمم در جهت X بیشترین مقدار را دارند زیرا جهت پیشروی ابزار در این راستا است. همچنین مقدار نیروهای برش در راستای Z در مقایسه با دو راستای دیگر بسیار کم می‌باشد؛ زیرا در ابزار $\kappa = 90^\circ$ مؤلفه‌های نیروهای F_c و F_e بر روی نیروی برش در راستای Z تأثیرگذار نیستند. به ویژه که در این پژوهش، اثر شعاع نوک ابزار با طراحی خاص قطعه نیز در آزمایش‌ها حذف گردیده است. دلیل نوسانات نیروی F_z در نمودارها نسبت به دو نیروی دیگر را می‌توان چنین بیان نمود که اندازه این نیرو هنگام براده‌برداری با ابزار فرز انگشتی با دو لبه‌برنده مستقیم ($\kappa = 90^\circ$) در مقایسه با دو مؤلفه دیگر نیروی برش، یعنی F_x و F_y ، بسیار کوچک است و نوسانات نیروی آن‌ها در نمودارهای تجربی به دلیل بزرگ‌نمایی بیشتر نمودار آن است. به طوری که اگر مقیاس نمودارهای F_x و F_y را نیز در محدوده کوچک‌تری ترسیم کنیم نوسانات نیروی آن‌ها مانند F_z خود را بیشتر نشان می‌دهند. همچنین با وجود مقادیر نزدیک به هم اختلاف نیروی پیش‌بینی و تجربی در سه راستای F_x ، F_y و F_z که در جدول ۳-۴ مشخص می‌باشد ولی به دلیل کوچک بودن مقادیر پایه نیروی F_z درصد اختلاف نیروی پیش‌بینی و تجربی در این راستا بیشتر است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل‌سازی مکانیستیک مؤلفه‌های نیروی برش F_x ، F_y و F_z انجام شد و نتایج پیش‌بینی شده مدل با نتایج تجربی اندازه‌گیری شده از طریق دینامو متر مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. بررسی‌ها نشان می‌دهد که:

۱- در صورت عمق بار یکنواخت برای هر فرآیند فرز کاری، با داشتن مقدار نرخ پیشروی به‌ازای هر دندانه برحسب میلی‌متر، انتظار می‌رود بتوان نیروهای برش را با خطای کمی پیش‌بینی نمود.

۲- با پیش‌بینی نیروهای برش و پیش‌بینی، توان و گشتاور لازم برای براده‌برداری امکان‌پذیر خواهد بود.

۳- ضخامت براده تغییر شکل نیافته در هر لحظه به هنگام دوران ابزار در هر نیم سیکل از مقدار کم شروع و در میانه نیم سیکل (پیرامون زاویه ۹۰ درجه) به مقدار ماکزیمم

متر است که این پدیده همان‌طور که بیان شد به دلیل انباشته شدن پلیسه‌ها در مسیر حرکت ابزار می‌باشد که امکان در نظر گرفتن آن در مدل پیش‌بینی نمی‌باشد.

مقادیر نیروی تجربی می‌باشند ولی با بررسی نمودارهای مقایسه‌ای F_T مشخص می‌گردد که مقادیر نیروی پیش‌بینی کمتر از نیروی تجربی اندازه‌گیری شده توسط دینامو

مراجع

- [۱] محمدرضا وزیری سرشک، محمود سلیمی و محمد مشایخی، "فرم ریاضی مدل ساختاری ماده قابل کاربرد در تحلیل رفتار پلاستیک فلزات در مدل‌سازی ماشین‌کاری"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۰، شماره ۳۱، زمستان ۱۳۹۱، صفحه ۳۷-۴۸.
- [۲] فرهاد حاجی‌ابوطالبی و شهریار محققیان، "شبیه‌سازی عددی فرآیندهای ماشین‌کاری با استفاده از معیار آسیب برشی هوپوترا"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۵، شماره ۴۹، تابستان ۱۳۹۶، صفحه ۱۰۱-۱۰۹.
- [۳] فرشید جعفریان، "تعیین ثوابت معادله جانسون کوک جهت شبیه‌سازی فرآیند ماشین‌کاری با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۷، شماره ۵۷، تابستان ۱۳۹۸، doi:10.22075/jme.2019.16596.1647.
- [4] M. Aydın, and U. Köklü, U, "Analysis of flat-end milling forces considering chip formation process in high-speed cutting of Ti6Al4V titanium alloy", Simulation Modelling Practice and Theory, (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.102039>.
- [5] L. Zhou, B. Deng, F. Peng, M. Yang and R. Yan "Semi-analytic modelling of cutting forces in micro ball-end milling of NAK80 steel with wear-varying cutting edge and associated nonlinear process characteristics", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 169, 2020, 105343.
- [6] Wojciechowski, M. Matuszak, B. Powalka, M. Madajewski, R.W. Maruda and G.M. Królczyk, "Prediction of cutting forces during micro end milling considering chip thickness accumulation", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 147, 2019, 103
- [7] Koenigsberger, F. and A. J. P. Sabberwal, "An investigation into the cutting force pulsations during milling operations", International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol. 1, No.1, 1961 pp. 15-33.
- [8] S. Jayaram, S. G. Kapoor, and R. E. DeVor, "Estimation of the specific cutting pressures for mechanistic cutting force models", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 41, No. 2, 2001, pp. 265-281.
- [9] M. K. Dikshit, A. B. Puri and A. Maity, "Analysis of cutting force coefficients in high-speed ball end milling at varying rotational speeds", Mach. Sci. Technol, Vol. 21, 2017, pp. 416-435.
- [10] R. Zhu, S.G. Kapoor, and R.E. DeVor, "Mechanistic modeling of the ball end milling process for multi-axis machining of free-form surfaces", Manufacturing Science and Engineering, Vol. 123, No. 3, 2001, pp. 369-379.
- [11] I. Lazoglu, "Sculpture surface machining: a generalized model of ball-end milling force", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 43, No. 5, 2003, pp. 453-462.
- [12] S. Wojciechowski, and et al., "Modeling of cutter displacements during ball end milling of inclined surfaces", Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 4, 2015, pp. 798-805.
- [13] E. Budak, Y. Altintas, and E.J.A. Armarego, "Prediction of milling force coefficients from orthogonal cutting data", Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118, No. 2, 1996, pp. 216-224.
- [14] T. Bailey and et al., "Generic simulation approach for multi-axis machining", Manufacturing Science and Engineering, Vol. 124, No. 3, 2002, pp. 624-642.
- [15] G. Yucesan and Y. Altintas, "Prediction of ball end milling forces", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 118, No. 1, 1996, pp. 95-103.
- [16] P. Lee, and Y. Altintaş, "Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 36, No. 9, 1996, pp. 1059-1072.
- [17] S. Engin, and Y. Altintas, "Mechanics and dynamics of general milling cutters: Part I: helical end mills", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 41, No. 15, 2001, pp. 2195-2212.
- [18] M. A. Rubeo, and T.L. Schmitz, "Milling Force Modeling: A Comparison of Two Approaches", Procedia Manufacturing, Vol. 5, 2016, pp. 90-105.

- [19] H. Wan, H., Wang, J., Zhang, J., Tao, K., and Wu, D., "Identification and analysis of cutting force coefficients in the helical milling process", *Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol. 14, 2020, Paper No.19-00395
- [20] S. Engin, and Y. Altintas, "Mechanics and dynamics of general milling cutters: Part II: inserted cutters", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, No. 15, 2001, pp. 2213-2231.
- [21] J. Gradišek, M. Kalveram, and K. Weinert, "Mechanistic identification of specific force coefficients for a general end mill", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 4, 2004, pp. 401-414.
- [22] S. Campocasso, J.P. Costes, G. Fromentin, S. Bissey-Breton and G. Poulachon, "A generalised geometrical model of turning operations for cutting force modelling using edge discretisation", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 39, No. 21, 2015, pp. 6612-6630.
- [23] R. Kountanya, C. Guo and D. Viens, "Time-averaged and Instantaneous Mechanistic Models using Artificial Force Synthesis in Helical End Milling", *Procedia Manufacturing*, Vol. 10, 2017, pp. 737-749.
- [24] G. Yucesan, Q. Xie, and A.E. Bayoumi, "Determination of process parameters through a mechanistic force model of milling operations", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 33, No. 4, 1993, pp. 627-641.