ماەنامە علمى پژوھشى

مهندسی ساخت و تولید ایران www.smeir.org

بررسی تئوری و تجربی ارتعاشات چتر در شرایط ماشینکاری خشک و تر در فرایند تراشکاری

محسن امامی'*، عطیه کریمی پور ٔ

۱- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان
 ۲- مربی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان
 * بهبهان، صندوق پستی ۲۹۱۹۹- ۶۳۶۱۶، ۶۳۶۱۶

دعات مقاله چک	چکیدہ
له پژوهشی کامل تراز افت: ۲۱ تیر ۱۳۹۸ شد رش: ۱۵ شهریور ۱۳۹۸ پایا مان مایت: خرداد ۱۳۹۹ مان	تراش کاری یکی از رایجترین فرایندهای برادهبرداری میباشد. چتر خودتحریک که از متداول ترین عوامل ناپایداری برش است میتواند به شدت موجب پایین آمدن راندمان برادهبرداری و کاهش کیفیت سطح ماشین کاری شود. با تعیین نمودار حد پایداری، میتوان نواحی پایدار و ناپایدار برش را پیشبینی کرد. با کمک این نمودار و با انتخاب مناسب ترین سرعت اسپیندل و عمق برش میتوان به راندمان ماشین کاری بالاتری دست یافت. علی رغم اهمیت خنک کاری با سیال برش، تاکنون کمتر به بررسی تأثیر خنک کاری بر پایداری چتر در
دواژگان: فرا بند تراش کاری صو ال برش جد مدار حد پایداری براز چت چت	فرایندهای ماشین کاری پرداخته شده است. ازاینرو در پژوهش حاضر، با توجه به اهمیت موضوع، ارتعاشات چتر در فرایند تراش کاری به صورت تئوری و تجربی برای دو شرایط خنک کاری شامل ۱- ماشین کاری خشک و ۲- ماشین کاری تر بررسی شده است. ابتدا یک مدل جدید جهت پیش بینی نیروی تراش کاری به روش نیمه تجربی و با استفاده از برنامه ریزی بیان ژن توسعه داده شده است. در این مدل سازی، نیروی تراش کاری به صورت تابعی از پارامترهای برش و شرایط خنک کاری بدست میآید. سپس از مدل نیروی بدست آمده برای پیش بینی منحنی حد پایداری برای دو حالت خنک کاری (خشک و تر) استفاده شده است. در مرحله بعد، نمودارهای حد پایداری توسط داده های تجربی، ارزیابی شدهاند. نتایج این پژوهش نشان می دهد که تطابق خوبی بین منحنیهای حد پایداری و داده های تجربی چتر وجود دارد. همچنین خنک کاری با سیال برش در تراش کاری تأثیر قابل ملاحظه ای بر جابه جایی نمودار حد پایداری دارد. از طرف دیگر در محدوده آزمایش های این پژوهش دو ناحیه عملیاتی مجزا با پایداری متفاوت قابل شناسایی است که با انتخاب نواحی پایدار می توان به توانایی ماشین کاری مطلوب تری دست یافتی.

Theoretical and Experimental Study of the Chatter Vibration in Dry and Wet Machining Conditions in the Turning Process

Mohsen Emami^{*}, Atiyeh Karimi Pour

Department of Mechanical Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran. * P.O.B. 63616-47189 Behbahan, Iran, dr.emami@bkatu.ac.ir

Article Information	Abstract				
Original Research Paper Received 12 July 2019 Accepted 6 September 2019 Available June 2020	Turning is one of the most commonly used material removal processes. The self-excited chatter, which is of the most common causes of cutting instability, decreases machining efficiency and surface que extremely. The stable and unstable regions of the cutting are predicted by determining the stability diagram (SLD). With the aid of this diagram and choosing the most suitable spindle speed and depth of c				
Keywords: Turning process Cutting fluid Force model Stability limit diagram (SLD).	higher machining efficiency can be achieved. Despite the importance of cooling with cutting fluid, less attention has been paid to the effect of cooling on the chatter stability in machining processes. Therefore, in the present study, due to the importance of the subject, the chatter vibration in the turning process has been theoretically and experimentally investigated for two cooling conditions including 1- dry machining and 2-wet machining. First, a new model has been semi-empirically developed for prediction of turning force using Genetic Expression Planning (GEP). In this modeling, the turning force is obtained as a function of cutting parameters and cooling conditions. Then, the extracted force model is used to predict the chatter stability limit diagram (SLD) for two cooling conditions (dry & wet). In the next step, the SLDs have been evaluated by empirical data. The results of this research show that there is a good agreement between the SLDs and experimental chatter data. Moreover, the cooling with cutting fluid in turning process has a significant effect on the displacement of the SLD. On the other hand, within the scope of the experiments of this study, two distinct operational regions with different stability can be identified. With the choice of stable regions, a more				
Cutting fluid Force model Stability limit diagram (SLD).	the present study, due to the importance of the subject, the chatter vibration in the turning process has been theoretically and experimentally investigated for two cooling conditions including 1- dry machining and 2- wet machining. First, a new model has been semi-empirically developed for prediction of turning force using Genetic Expression Planning (GEP). In this modeling, the turning force is obtained as a function of cutting parameters and cooling conditions. Then, the extracted force model is used to predict the chatter stability limit diagram (SLD) for two cooling conditions (dry & wet). In the next step, the SLDs have been evaluated by empirical data. The results of this research show that there is a good agreement between the SLDs and experimental chatter data. Moreover, the cooling with cutting fluid in turning process has a significant effect on the displacement of the SLD. On the other hand, within the scope of the experiments of this study, two distinct operational regions with different stability can be identified. With the choice of stable regions, a more favorable machinability is achieved.				

Please cite this article using:

مهندس محصمهم ساخت و تولید ایران

۱– مقدمه

فرایند تراش کاری یکی از متداول ترین فرایندهای ماشین کاری است که در صنعت ساخت و تولید به طور گسترده استفاده میشود. در شکل ۱ شماتیک یک فرایند تراش کاری متداول (روتراشی) نشان داده شده است. در این فرایند سرعت محیطی قطعه کار در محل تماس با نوک ابزار را سرعت برش، عمق نفوذ شعاعی ابزار به درون قطعه کار را عمق برش شعاعی و مقدار حرکت پیشروی طولی ابزار به ازای هر دور چرخش قطعه کار را نرخ پیشروی طولی مینامند.

موضوع چتر در ماشینکاری از آن جهت از اهمیت بالایی برخوردار است که وقوع آن سبب کاهش شدید راندمان ماشینکاری، کاهش صافی سطح، و افزایش سایش ابزار می-گردد [۱]. چتر احیاء شونده مهمترین شکل ارتعاشات چتر محسوب میشود و بیشتر تحقیقات نیز در رابطه با آنالیز و تشخیص پدیده چتر احیاء شونده میباشد [۱، ۲]. پژوهشهای تشخیص پدیده چتر احیاء شونده میباشد [۱، ۲]. پژوهشهای گذشته نشان داده است که مشخصات سازه ماشین ابزار (از جمله جرم، فنریت و میرایی سیستم ابزار- قطعهکار) [۳]، هندسه و سایش ابزار [۴، ۵] از جمله فاکتورهای مؤثر بر ارتعاشات چتر هستند.

در فرایند تراش کاری نیز مانند سایر فرایندهای ماشین کاری، با افزایش سرعت برش، حرارت در ناحیه برش افزایش پیدا کرده و این موضوع بر فرایند برادهبرداری به طور نامطلوبی تأثیر می گذارد. با افزایش دمای ماشین کاری، عمر ابزار کاهش یافته و کیفیت سطح نیز تنزل مییابد. افزایش دما در موضع برش بر اصطکاک در فصل مشترک ابزار- قطعه کار و به موضع برش بر اسطکاک در فصل مشترک ابزار- قطعه کار و به بع آن بر نیروهای ماشین کاری تأثیر می گذارد. ویرا و همکاران [۶] نشان دادند که در فرایند میکرو فرز کاری سرعت بالا، تغییرات دینامیکی در نیروهای برش به دلیل تغییرات در دما و اصطکاک می تواند موجب بروز ناپایداری دینامیکی در سیستم گردد.



Fig. 1 Schematic of Turning process

ویرکیگروچ و کریستوف [۷] نشان دادند که اصطکاک بین ابزار و قطعه کار بر دینامیک فرایند برش تأثیر گذاشته و می تواند سبب ارتعاشات خود تحریک گردد. ویرکیگروچ و بوداک [۸] به منظور تحلیل چتر در فرایند براده برداری، اصطکاک بین ابزار و قطعه کار و اصطکاک بین براده و ابزار را به صورت تابعی غیر خطی از سرعت نسبی مدل سازی کردند. داوودی و تازه کندی [۹] اشاره نمودند که اصطکاک و چسبندگی بین براده و ابزار تمایل به افزایش دارند، به طوری که می توانند سبب بروز دماهای بالاتر و سایش ابزار بیشتر گردند.

به منظور کاهش اصطکاک بین ابزار و سطح قطعه کار و به تبع آن کاهش دما در ناحیه برش، استفاده از سیال برش در سیستم ماشین کاری توصیه شده است. مهتا و همکاران [۱۰] تأثیر شرایط خنککاری/روانکاری را بر فرایند تراش کاری اینکونل ۲۱۸ بررسی نمودند و نتیجه گرفتند که در شرایط برادهبرداری با روانکار نسبت به شرایط ماشین کاری خشک، سایش ابزار و زبری سطح کاهش می یابد. میتال و همکاران [۱۱، سایش ابزار و زبری سطح کاهش می یابد. میتال و همکاران [۱۱ فرایند میکروفرزکاری آلیاژ تیتانیوم Ti6Al4V بررسی کردند. آنها پایداری فرایند را برای دو حالت ماشین کاری خشک و ماشین کاری با روانکار به صورت تئوری و تجربی بررسی کردند. پژوهش آنها نشان داده است که در برخی محدودههای سرعت اسپیندل، روان کاری ناحیه ماشین کاری حد پایداری را افزایش

تاکنون تحقیقات بسیاری در رابطه با تأثیر روانکاری بر سایش ابزار و کیفیت سطح ماشینکاری، گزارش شده است. در حالی که در زمینه تأثیر خنککاری/روانکاری بر ناپایداری دینامیکی (چتر) در فرایندهای ماشینکاری تحقیقات بسیار اندکی انجام شده است.

باید توجه داشت که برای انجام آنالیز پایداری و بدست آوردن منحنی حد پایداری برای فرایند برش، ابتدا لازم است مدلسازی مکانیک برادهبرداری صورت پذیرد و ضرایب نیروی برش یا نیروی پیشروی (به عبارت دیگر نیروی مخصوص برش یا نیروی مخصوص پیشروی) مشخص گردند. لازم به ذکر است ضرایب نیروی ماشینکاری در بسیاری از منابع به صورت ثابت مرایب نیروی ماشینکاری در بسیاری از منابع به صورت ثابت در نظر گرفته شدهاند [۲]، در حالی که ثابت لحاظ شدن آن یک سادهسازی است و ممکن است صحت منحنی حد پایداری بدست آمده را تحت تأثیر قرار دهد. از این رو برخی از پژوهشها بدست آمده را تحت تأثیر قرار دهد. از این رو برخی از پژوهشها به منظور تولید منحنیهای دقیقتر حد پایداری، از ضرایب نیروی ماشینکاری متغیر استفاده نمودهاند. گروسی و

شکل ۱ شماتیک فرایند تراش کاری

همکاران [۱۳] جهت تولید منحنیهای حد پایداری، از ضرایب نيروى وابسته به سرعت برش استفاده كردند. سينگ و همکاران [۱۴، ۱۵] آنالیز پایداری یک فرایند میکروفرز کاری را با استفاده از مدل ضریب نیروی ماشین کاری وابسته به پارامترهای برش (شامل سرعت برش، عمق برش و نرخ پیشروی) انجام دادند. همچنین آنها از معیار نایکوئیست جهت تعیین مرز پایداری سیستم استفاده نمودند. در واقع با توجه به فیزیک مسأله، ضریب نیروی ماشین کاری (یا به عبارتی نیروی مخصوص ماشین کاری) نه تنها به پارامترهای برش (سرعت برش، عمق برش و نرخ پیشروی) بلکه به سایر شرایط ماشین کاری از جمله اصطکاک و خنککاری/روانکاری نیز وابسته است. میتال و همکاران [۱۱، ۱۲] تأثیر روانکاری را بر نیروی برش و پایداری ديناميكي فرايند ميكروفرزكاري بررسي كردند. أنها جهت انجام مدلسازی تئوری حد پایداری، مدل نیروی مخصوص ماشین کاری متغیر را به کار بردند که برای هر حالت روان کاری به طور مجزا بدست آمده بود. همچنین آنها از روش رگرسیون خطی برای مدلسازی نیروی مخصوص ماشین کاری و تعیین ثوابت آن بهره بردند.

مروری بر پژوهشهای پیشین نشان داده است که در زمینه تأثیر خنککاری/روانکاری بر پایداری دینامیکی (چتر) در فرایند تراشکاری، تحقیقات چندانی انجام نشده است و لازم است موضوع به جهت درک کاملتر، بیشتر بررسی گردد. در واقع آنالیز پایداری چتر در شرایط مختلف روان کاری و خنک کاری به منظور دستیابی به راندمان ماشین کاری بالاتر حائز اهمیت می-باشد. بدین منظور در این مقاله تأثیر خنککاری/روانکاری بر پایداری دینامیکی (چتر) در فرایند تراشکاری به صورت تئوری و تجربی بررسی شده است. از طرفی در مدلسازی نیروی مخصوص ماشین کاری، در صورت بکار گیری روش های پیشرفتهتر از جمله روشهای بر پایه الگوریتم ژنتیک میتوان با دقت بیشتری نیروی مخصوص ماشین کاری و به تبع آن نمودارهای حد پایداری را پیشبینی نمود. از جمله این روشها الگوریتم بهینهسازی برنامه نویسی بیان ژن⁽(GEP) است که مدل گسترش یافته از الگوریتم ژنتیک^۲(GA) و برنامه ریزی ژنتیک (GP) میباشد و کاربردهای روزافزونی در زمینههای مختلف مهندسی پیدا کرده است [۱۶، ۱۷]. از مدل GEP تاکنون جهت پیشبینی زبری سطح در فرایند واترجت [۱۸] و پیشبینی انرژی مصرفی در فرزکاری [۱۹] استفاده شده است،

اما تاکنون مقالهای در زمینه پیشبینی نیروهای تراش کاری با این مدل گزارش نشده است. لذا در این پژوهش از الگوریتم بهینهسازی (GEP) جهت تولید رابطه (فرمولاسیون) ریاضی برای نیروی ماشین کاری (تابع هدف) استفاده شده است که یکی از نوآوریهای این پژوهش میباشد. در مرحله بعد با استفاده از مدل نیروی بدست آمده، رابطه نیروی مخصوص ماشین کاری برای هر دو شرایط ماشین کاری خشک و ماشین کاری با سیال فرایند برش یک درجه آزادی جهت تعیین نمودار حد پایداری فرایند برش یک درجه آزادی جهت تعیین نمودار حد پایداری نمودارهای حد پایداری نیز یک فلوچارت تدوین شده است. در نهایت نمودارهای حد پایداری برای هر دو حالت ماشین کاری نهایت نمودارهای حد پایداری برای هر دو حالت ماشین کاری زمایشهای تجربی، ارزیابی شده است.

۲- مدلسازی تئوری چتر

I-T- آنالیز پایداری چتر برای یک مدل برش یک درجه آزادی در شکل ۲ شماتیک مکانیرم چتر خودتحریک برای یک فرایند تراش کاری متعامد نمونه نشان داده شده است. ارتعاشات چتر خود تحریک احیاءشونده به دلیل اثر متقابل بین فرایند براده برداری و سازه ماشین ابزار بوجود می آید. فرض کنید ابزار در جهت پیشروی (y) انعطاف پذیر است و به دلیل نیروی پیشروی تراش کاری ارتعاش می کند. پارامترهای ابزار m برش یک درجه ترتیب جرم، سفتی و ضریب میرایی در سیستم برش یک درجه آزادی هستند و V سرعت برشی قطعه کار می باشد.



 Fig. 2 A schematic of regeneration mechanism for a typical orthogonal cutting [2]

 شکل ۲ شماتیک مکانیزم چتر خود تحریک برای یک فرایند برش متعامد نمونه [۲]

¹ Gene Expression Programming

² Genetic Algorithm

³ Genetic programing

⁴ Unit Step Response

در اینجا، (t) (یا به عبارتی موج داخلی سطح براده) معادله موجی است که در حین دوران فعلی قطعه کار ایجاد می شود و y(t - T) (یا به عبارتی موج بیرونی سطح براده) معادله موجی است که در حین دوران یک دور قبل قطعه کار ایجاد شده است. از این رو ضخامت براده دینامیکی حاصل، دیگر با ضخامت براده تعیین شده در فرایند برابر نخواهد بود بلکه به عنوان تابعی از فرکانس ارتعاشات و سرعت قطعه کار تغییر می کند. بنابراین ضخامت براده دینامیکی کلی را میتوان به صورت رابطه (۱)

$$h(t) = h_0 - [y(t) - y(t - T)]$$
(1)

در این رابطه h_0 ضخامت براده تعیین شده در فرایند است و برابر با نرخ پیشروی ابزار میباشد. عبارت [y(t) - y(t - T)] تغییرات دینامیکی ضخامت براده است که به دلیل رخداد ارتعاشات در لحظه t و در زمان یک دور قبل قطعهکار (t - T)بوجود میآید. با توجه به اینکه دوره تناوب (s)T، مدت زمان یک دور قطعهکار و بسامد n(rpm)، تعداد چرخش قطعهکار در واحد زمان تعریف میشود، رابطه (۲) را میتوان برای آنها نوشت.

$$= 60/T$$

п

با این فرض که ابزار با یک سیستم یک درجه آزادی در جهت پیشروی تقریب زده شود، معادله دیفرانسیل حرکت آن به صورت رابطه (۳) بدست میآید.

 $m\ddot{y}(t) + c_y \dot{y}(t) + k_y y(t) = F_f(t),$ (۳) به طوری که نیروی پیشروی تراش کاری ($(F_f(t))$ مطابق رابطه (۴)، حاصل ضرب ضریب نیروی پیشروی (K_f) و سطح مقطع دینامیکی براده ((A(t)) است. ضریب نیروی پیشروی را نیروی پیشروی ویژه نیز مینامند[

$$F_f(t) = K_f A(t) \tag{f}$$

$$F_f(t) = K_f a h(t) \tag{9}$$

همچنین با جایگذاری معادلات (۱) و (۶) در رابطه (۳)، معادله حرکت سیستم با رابطه (۷) برابر خواهد بود:

$$m\ddot{y}(t) + c_{y}\dot{y}(t) + k_{y}y(t) = K_{f}a[h_{0} + y(t - T) - y(t)]$$
(Y)

$$\varphi(s) = \frac{y(s)}{F_f(s)} = \frac{1}{ms^2 + c_y s + k_y}$$
(17)

پارامترهای $m_n \in \zeta$ به ترتیب به عنوان فرکانس طبیعی و نسبت میرایی سازه سیستم، با استفاده از روابط (۱۳) و (۱۴) تعریف می شوند.

$$\omega_n^2 = \frac{k_y}{m} \tag{17}$$

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} \tag{14}$$

با جایگذاری روابط (۱۳) و (۱۴) در رابطه (۱۲)، تابع تبدیل از ((۵))) به و متر اواه (۱۸) در تر مآر [۲]

$$\varphi(s) = \frac{\omega_n^2}{k_y(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)}$$
(1۵)

همچنین با جایگذاری (F(s) از معادله (۹) در معادله (۱۱) و سپس جایگذاری معادله حاصل در معادله (۸) نتیجه میشود: (۱۶) $h(s) = h_0 + (e^{-sT} - 1)K_f ah(s)\varphi(s)$ با توجه به رابطه (۱۶)، تابع تبدیل حاصل بین ضخامت براده با توجه به رابطه (۱۶)، تابع تبدیل حاصل بین ضخامت براده با دینامیکی و ضخامت براده مبنا برابر است با [T]: $\frac{h(s)}{h_0(s)} = \frac{1}{1 + (1 - e^{-sT})K_f a\varphi(s)}$

محاسبه تابع تبدیل جهت تعیین پایداری سیستم دینامیکی ابزار-قطعهکار حائز اهمیت است. معادله (۱۷) همان تابع تبدیل سیستم مدار بسته نام دارد که در رابطه (۱۸) نیز نشان داده شده است. همچنین تابع تبدیل مدار باز این سیستم در رابطه (۱۹) نشان داده شده است [۲]. پایداری یک سیستم کنترلی بوسیله بررسی تابع تبدیل مدار بسته یا مدار باز آن صورت می پذیرد. (٢)

$$\text{CLTF} = \frac{1}{1 + (1 - e^{-sT})K_f a\varphi(s)} \tag{1A}$$

$$\text{`OLTF} = (1 - e^{-sT})K_f a\varphi(s) \tag{19}$$

نیروی پیشروی ویژه (F_f) در معادلات (1Λ) و (1Λ) و (1Λ) مبارت است از نیروی پیشروی در واحد سطح مقطع ضخامت براده تغییر شکل نیافته. در بیشتر مراجع، جهت تحلیل دینامیکی چتر یک مقدار ثابت برای F_f لحاظ شده است. در حالی که نتایج آزمایشهای تجربی تراش کاری در این پژوهش نشان می دهد که مقادیر F_f با تغییر پارامترهای برش (سرعت برشی V، عمق برشa، و نرخ پیشروی f) و نسبت به شرایط روان کاری تغییر می کند. ازاین و در این مطالعه، به منظور تخمین دقیق تر F_f است. این مدل سازی با هدف افزایش صحت نمودار حد پایداری زیری (SLD) انجام شده است پیشبینی نمودار حد پایداری چتر ترسیم شده است.

۲-۲- مدل نیرو بر پایه برنامه نویسی بیان ژن (GEP)

برنامه ریزی بیان ژن (GEP)، شاخهای گسترش یافته از الگوریتم ژنتیک (GA) و برنامه ریزی ژنتیک (GP) است که مزایای هر دو روش را با هم داراست. GEP یک تکنیک جستجوی جدید است که برنامه های کامپیوتری را به صورت عبارات ریاضی، درخت های تصمیم گیری و اصطلاحات منطقی توسعه میدهد [۱۶]. از سوی دیگر، مدل بیان ژن (GEP) تاکنون به طور موفقیت آمیزی برای پیشبینی بسیاری از مشخصهها و روابط بین آنها در مسائل مهندسی مورد استفاده قرار گرفته است. اما باوجود دقت مطلوب این روش، هنوز به ندرت برای پیشبینی مشخصههای ماشین کاری از آن استفاده شده است. در این تحقیق از مدلهای بیان ژن (GEP) برای پیشبینی نیروی پیشروی ویژه (K_f) که در تئوری چتر بکار می رود، استفاده شده است. در مدل های بیان ژن، جمعیت افراد با توجه به سازواری (Fitness) انتخاب می شوند و تنوع ژنتیکی با استفاده از یک یا چند اپراتور ژنتیک معرفی می گردد. برنامههای کامپیوتری GEP، از کروموزومهای خطى مشخصهدار استفاده مىكنند. اين كروموزومها متشكل از ژنهای ساختاری هستند که در یک سر و یک دم مرتب شدهاند. کروموزومها به عنوان یک ژن عمل میکنند و با استفاده از جهش، انتقال، انتقال ریشه، انتقال ژن، نوترکیب ژن، و نوترکیب یک و دو نقطه اصلاح می شوند. سپس در این الگوریتم، برنامه

های GEP به درختهای بیان (ETs) ترجمه می شوند. درخت-های بیان نهادهایی هستند که براساس سازواری خود برای اصلاح و بازتولید انتخاب می شوند (به عبارت دیگر درختهای بیان (ETs) معمولاً برای حل یک مسأله خاص تکامل می یابند) [۱۶]. ایجاد این واحدهای جداگانه (ژنوم و درخت بیان) با کارکردهای مشخص این الگوریتم را قادر می سازد با راندمان بالایی عمل کرده و از تکنیکهای سازگار موجود (مانند الگوریتم ژنتیک یا برنامهریزی ژنتیک) بسیار فراتر رود. جزئیات مربوط به معماری روش برنامهریزی بیان ژن (GEP) در مرجع [۱۶] به طور کامل تشریح شده است. در این مقاله از GeneXproTools 5.0 که یک بسته نرمافزاری قدرتمند در محاسبات نرم محسوب می شود، برای اجرای مدل GEP استفاده شده است. استفاده از نرمافزار GeneXproTools 5.0 ساده بوده و امکانات مختلفی را در رابطه با انجام بهینهسازی و استخراج مدل پیشبینی در اختیار کاربر قرار میدهد. در اینجا مراحل پیشبینی نیروی پیشروی ویژه به شرح زیر است: اولین گام تعیین تابع سازواری میباشد. برای این مسأله، از تابع سازواری خطای ریشه متوسط مربعات (RMSE) به منظور بهینهسازی و استخراج فرمولاسیون ریاضی استفاده می شود. گام دوم شامل انتخاب مجموعهای از ترمینالها (متغیرها و ثابتهای مورد استفاده در یک مسأله) (T) و مجموعه ای از توابع (F)، برای تولید کروموزومها است. در مسئله فعلی، مجموعه ترمینال شامل پارامترهای برش: $\{(f)$ و نرخ پیشروی (n) و (f) و (f)مى باشد. قابل توجه است كه انتخاب توابع رياضى مناسب بستگی به دیدگاه کاربر دارد. این توابع معمولاً با چند بار اجرای عملیات بهینهسازی نرم افزار، و با سعی و خطا به گونهای انتخاب می شوند که مدلی با خطای بسیار کم که برای کاربر قابل قبول باشد حاصل شود. در اینجا چهار اپراتور اساسی (+، -، *، /) و همچنین توابع ریاضی پایه (Inverse, square root, quartic) برای مدل پیشبینی (root, natural logarithm, x^2, x^3, x^4, x^5 نیروی پیشروی ویژه انتخاب شده است. در واقع در این مدل، نرم افزار می تواند از اپراتورها و توابع ریاضی ذکر شده جهت بهینه-سازی و استخراج رابطه ریاضی که دارای کمترین فاصله با نتایج تجربی هستند استفاده کند. معماری کروموزومی از جمله تعداد کروموزومها، اندازه سر و تعداد ژنها در مرحله سوم مشخص می شود. مرحله چهارم انتخاب تابع پیوند است، که برای این تحقيق تابع پيوند "addition" انتخاب شده است. مرحله نهايي (پنجم) انتخاب عملگرهای ژنتیکی است. معمولاً تنظیمات مربوط به معماری کروموزومی و عملگرهای ژنتیک بر اساس

¹ Closed-loop transfer function

² Open-loop transfer function

مهندسی ساخت و تولید ایران، خرداد ۱۳۹۹، دوره ۷ شماره ۳

پیش فرض نرم افزار انتخاب می شوند. مجموعه توابع، پارامترهای ج عملیاتی و همچنین تنظیمات کلی از جمله معماری کروموزومی د و نمونه گیری های به کار رفته در مدل پیشنهادی GEP برای این ا تحقیق، در جدول ۱ خلاصه شده است. در اینجا برای هر کدام از شرایط خنک کاری (به عبارت دیگر ماشین کاری خشک و تر) تعداد ۱۰ آزمون به عنوان داده های آموزشی و ۱۰ آزمون نیز به عنوان داده های سنجش اعتبار مورد استفاده قرار گرفته است. برای هر شرایط خنک کاری، لازم است هر دو گروه داده های آموزش و سنجش اعتبار در مدل GEP اعمال شوند. نتیجه این مدل سازی، استخراج روابط ریاضی تکامل یافته برای نیروی با پیشروی ویژه (K_f) است که تابعی از سرعت چرخش اسپیندل و مقاله این نتایج استخراج شده و در جدول ۴ نشان داده شده اند.

۳–۲– نمودار بلوکی جهت پیشبینی نمودار حد پایداری چتر ابزارهای طراحی کنترلر کلاسیک مختلفی از جمله نمودار نایکوئیست، نمودار بد، نمودار نیکولز، تابع پله واحد برای تحلیل پایداری یک سیستم ارتعاشی وجود دارد [۲۰]. در اینجا، از تابع پله واحد به عنوان ورودی جهت تعیین پایداری سیستم استفاده میشود. اگر چه استفاده از تابع پله واحد در تعیین پایداری چتر میتواند راحت و قابل اعتماد باشد، اما تاکنون در این مورد استفاده نشده و یا حداقل استفاده از آن گزارش نشده است. در تحقیق حاضر از پاسخ پله واحد به عنوان یک ابزار

کنترلکننده جهت تعیین پایداری چتر در فرایند تراشکاری استفاده شده است. برای اعمال ورودی پله واحد به تابع تبدیل

اقد بالتجام بالتخام بالخآب كرنيا بالتعا
للله بسته، و استخراج تمودار پاسخ آن، تدنویسی ریز به ترتیب
ر نرمافزار متلب انجام میگردد.
) تعریف تابع تبدیل حلقه باز با استفاده از رابطه (۱۹)
sys = $(1 - e^{-sT})K_f a\varphi(s)$ (Y.
) تعریف تابع تبدیل حلقه بسته با استفاده از دستور feedback
cl = feedback(sys, 1, -1) (1)
) تعیین پاسخ پله واحد تابع تبدیل حلقه بسته و ترسیم نمودار
step(cl) (۲۲

با اجرای دستور (۲۲) در متلب، نمودار تغییرات دامنه پاسخ پله واحد نمایش داده میشود. تغییرات دامنه پاسخ پله واحد، پایداری یک سیستم دینامیکی را نشان میدهد. شکل ۳ پاسخ پله واحد بدست آمده برای سیستم ارتعاشی برادهبرداری این تحقیق را در دو شرایط؛ (الف) ماشینکاری پایدار و (ب) ماشینکاری ناپایدار نشان میدهد. در شکل ۳۵ واضح است که برای شرایط برش پایدار، دامنه پاسخ سیستم با زمان کاهش مییابد. برعکس، برای شرایط برش ناپایدار، با افزایش زمان، دامنه پاسخ سیستم پیوسته افزایش مییابد (شکل ۳۵). عمق عمق بحرانی برش (a_{lim}) نامیده میشود. بر این اساس، وضعیت برش پایدار برای عمقهای زیر حد عمق بحرانی برش حاصل میشود. در اینجا، عمق بحرانی برش با مقایسه انتگرال تابع پاسخ سیستم (به عبارت دیگر با مقایسه مساحت زیر منحنی پاسخ سیستم) در عمق برشهای مختلف تعیین میشود.

Table 1 Parameters of the optimized GEP model

	جدول ۱ پارامترهای مدل GEP بهینهسازی شده
موارد تنظيمات فرعى	موارد تنظيمات اصلى
مجموعه تابع	توابع
نرخ جهش	
نرخ تبديل	
نرخ نوترکیب یک نقطه و دو نقطه	عملگرهای ژنتیک
نرخ نوتركيب ژن	
نرخ انتقال ژن	
تعداد كروموزوم	
اندازه سر کروموزوم	
تعداد ژنھا	تنظیمات کلی (معماری کروموزومی)
تابع پيوند	
تعداد نمونههای آموزش	(=
تعداد نمونههای سنجش اعتبار	تنظیمات کلی (ہمونہ دیری)
	موارد تنظیمات فرعی مجموعه تابع نرخ جهش نرخ تبدیل نرخ نوترکیب یک نقطه و دو نقطه نرخ انتقال ژن تعداد کروموزوم تعداد ژنها تابع پیوند تعداد نمونههای آموزش تعداد نمونههای سنجش اعتبار

مهندسی ساخت و تولید ایران، خرداد ۱۳۹۹، دوره ۷ شماره ۳



شکل ۳ پاسخ پله واحد سیستم برادهبرداری، (الف) ماشین کاری پایدار، (ب) ماشین کاری ناپایدار

محاسبات نشان میدهد که در مقادیر $a > a_{lim}$ ، مقدار انتگرال قدرمطلق تابع پاسخ سیستم (مجموع مساحت مثبت زیر نمودار) شروع به افزایش شدید میکند. بنابراین، در این مطالعه، عمق برشی که در آن مقدار انتگرال ذکر شده از یک حد آستانه تجاوز کند به عنوان عمق بحرانی برش در نظر گرفته میشود.

در اینجا، مساحت زیر نمودار پاسخ پله واحد با استفاده از کد انتگرالگیری زیر در متلب محاسبه می شود.

$$S = trapz(abs(step(cl)))$$
 (TT)

با محاسبه عمق بحرانی برش برای هر سرعت اسپیندل و رسم نمودار سرعت اسپیندل در مقابل عمق برش، دیاگرام حد پایداری (SLD) بدست میآید. این دیاگرام یک روش بسیار سریع و راحت برای پیشبینی منطقه پایدار بدون چتر میباشد به طوری که انتخاب مناسبترین سرعت چرخش اسپیندل و عمق برش را برای بهرهوری بالاتر ممکن میسازد. در شکل ۴ فلوچارت طراحی شده برای پیشبینی دیاگرام SLD نشان داده شده و در آن تمام مراحل لازم برای استخراج SLD به طور کامل شرح داده شده است. در این فلوچارت، دو مستطیل بالا

ورودی هایی هستند که لازم است برای مدل تحلیلی چتر مشخص گردند. $n_f \,_{0} n_f$ به ترتیب سرعت اولیه و نهایی چرخش اسپیندل میباشند. در اینجا مقادیر اولیه تعیین شده برای عمق بحرانی برش و شمارنده j عبارتند از: j = i - j و n_i

 M^* نیز یک مقدار آستانه است و مساحت زیر منحنی پاسخ M^* پله واحد (S) با آن مقایسه میشود. *3 مقدار جزء افزایشی عمق برش را برای هر سیکل مشخص میکند. مقادیر تعیین شده در این M^* , $n_0 n_f$, $m_0 n_f$,



شکل ۴ نمودار بلوکی (فلوچارت) جهت پیش بینی حد پایداری سیستم

۳- آزمایشهای تجربی شکل ۵ ستاپ آزمایشگاهی مورد استفاده را نشان میدهد. در

Fig. 4 The block chart for the stability limit prediction of the system

این تحقیق جهت انجام آزمایشها از ماشین تراش CNC نوع TME40 استفاده شد. میلههای استوانهای از جنس فولاد کربنی

St50 با قطر ۵۰mm و طول ۲۵۰mm به عنوان نمونههای قطعه-کار تهیه شدند. تستهای روتراشی در قطر ثابت ۴۵mm انجام شدند و طول بیرون از سه نظام قطعهکار برای کلیه آزمایشها ۱۷۰mm تنظیم شد. همچنین جهت محکم کردن قطعه در سه

نظام ماشین تراش ۸۰N.m گشتاور اعمال شد. از ابزار برش با کد استاندارد ایزو DNMG 15 06 08-PR 4225 مساخت شرکت PDJNR2020K15 و ابزارگیر مدل Sandvik [™] Coromant برای فرایند برادهبرداری استفاده شد.





Fig. 5 The experimental setup (1-CNC lathe, 2-Workpiece, 3- Tool, 4- Dynamometer, 5- Accelerometer in the feed direction, 6- Accelerometer in the cutting direction, 7- Flood cooling (wet machining) nozzle, 8- Charge amplifier, 9- DynoWare software شکل ۵ ستاپ آزمایشگاهی (۱- ماشین CNC، ۲- قطعه کار، ۳- ابزار، ۴- دینامومتر، ۵- شتاب سنج در جهت پیشروی، ۶- شتاب سنج در جهت برش، ۲- نازل

ماشین کاری تر، ۸-شارژ آمپلی فایر، ۹- نرم افزار Dynoware

هر آزمایش ماشین کاری در حالت روتراشی و بر طول ۵۰mm از سطح قطعه کار انجام شد. در اینجا پارامترهای برادهبرداری عبارتند از سرعت اسپیندل (n)، عمق برش (a) و نرخ پیشروی (f). تمام آزمایشها در دو حالت مختلف روان کاری شامل (fشرایط خشک، و با سیال برشی (تر) انجام شدند. در آزمایش-های تراش کاری تر، روغن حل شونده Mobilcut100 با غلظت ۵ درصد و نرخ جریان ۲ لیتر بر دقیقه مورد استفاده قرار گرفت. این روغن برای طیف گستردهای از عملیات برادهبرداری فلزات، از جمله تراشکاری مواد آهنی، پیشنهاد شده است [۲۱]. همچنین خلاصه مجموعهای از پارامترهای طراحی آزمایش برای مدل نیرو که شامل ۲۰ آزمایش (۱۰ داده آموزشی و ۱۰ داده سنجش اعتبار) است، در جدول ۲ نشان داده شده است. علاوه بر این، تعدادی آزمایش تجربی پایداری چتر نیز جهت ارزیابی نمودارهای SLD بدست آمده از مدلسازی، انجام شده است (رجوع شود به شکل ۹). در آزمایشهای پایداری چتر، شتاب و نیروهای وارد بر تیغچه در جهت پیشروی طولی ابزار در حین برادهبرداری اندازه گیری شدند. از شتاب سنج نوع AC 102-1A با حساسیت ۱۰۰mV/g و وزن ۹۰gr همراه با تقویت کننده ولتاژ IEPE و سيستم اكتساب داده NI USB 6009 جهت اندازه-گیری ارتعاشات ابزار استفاده شد. نرخ دادهبرداری، ۱۰۰۰Hz تنظیم شد و شتاب سنج در جهت نیروهای پیشروی به ابزار متصل شد. نیروهای تراش کاری نیز با استفاده از دینامومتر Kistler پيزوالكتريك سه محوره نوع 9257B همراه با تقويت کننده شارژ نوع 5019A اندازه گیری شد. همچنین از نرمافزار

جمع آوری داده DynoWare نوع 2825A برای نمایش، محاسبه و ثبت دادههای نیرو استفاده شد. (لازم به ذکر است نیروی پیشروی ویژه (K_f) از تقسیم نیروی پیشروی بر سطح مقطع Mahr پیشروی ویژه رکل نیافته براده بدست می آید). از زبری سنج Nahr تغییر شکل نیافته براده بدست می آید). از زبری سنج ماشین کاری مدل PS1 جهت اندازه گیری زبری سطح نمونههای ماشین کاری استفاده شد. پارامترهای مودال سازه ماشین ابزار نیز با استفاده از چکش مدل 2021 مشتاب سنج نوع BJB و یک تحلیلگر سیگنال (AU02 A

۴- نتايج

۱-۴- نتایج نیروی پیشروی ویژه و توسعه مدل نیرو

نتایج اندازه گیری تجربی نیروی پیشروی تراش کاری برای هر کدام از شرایط روان کاری خشک و تر در جدول ۳ نشان داده شده است. از این نتایج تعداد ۱۰ آزمایش تجربی به عنوان دادههای آموزش و ۱۰ آزمایش تجربی نیز به عنوان دادههای سنجش اعتبار مورد استفاده قرار می گیرد. لازم است هر دو گروه دادههای آموزش و دادههای سنجش اعتبار در مدل GEP اعمال شوند.

در اینجا ابتدا دادههای آموزش و سنجش اعتبار بدست آمده از یک شرایط روانکاری وارد نرمافزار GeneXproTools 5.0 میتوان شده و پس از انجام تنظیمات ذکر شده در بخش ۲-۲، میتوان مدل GEP را در نرمافزار ایجاد نمود.

Table 2 The sets of the experimental design parameters, including the training and validation tests for the turning force model **جدول ۲** مجموعه پارامترهای طراحی آزمایش شامل تستهای آموزش و سنجش اعتبار برای مدل نیروی تراش کاری

تستهای سنجش اعتبار						ں	ستهای آموزش	ت	
روش خنک	نرخ پیشروی mm	عمق برش (mm)	سرعت اسپيندل (rnm)	شماره	روش خنک	نرخ پیشروی mm	عمق برش (mm)	سرعت اسپيندل (rnm)	شماره
کاری	$f(\frac{1}{\text{rev}})$	u(iiiii)	<i>n</i> (1piii)	ازمايش	کاری	$f(\frac{1}{\text{rev}})$	u(iiiii)	<i>n</i> (1pm)	ازمایش
خشک- تر	٠/٢	١	۲۰۰	١	خشک- تر	• /٢	• /۵	۲۰۰	١
خشک- تر	٠/٢	۰/۲۵	1	٢	خشک- تر	٠/٢	٢	۲	٢
خشک- تر	٠/٢	١	1	٣	خشک- تر	٠/٢	۴	۲	٣
خشک- تر	٠/٢	٢	1	۴	خشک- تر	٠/٢	٢	۶	۴
خشک- تر	٠/٢	۴	1	۵	خشک- تر	٠/٢	• /۵	1	۵
خشک- تر	٠/٢	• /۵	14	۶	خشک- تر	٠/٢	۰/۲۵	14	۶
خشک- تر	٠/٢	٢	14	٧	خشک- تر	٠/٢	١	14	٧
خشک- تر	٠/٢	۰/۲۵	۱۸۰۰	٨	خشک- تر	٠/٢	۴	14	٨
خشک- تر	٠/٢	• /۵	۱۸۰۰	٩	خشک- تر	• /٢	١	۱۸۰۰	٩
خشک- تر	٠/٢	٢	۱۸۰۰	١٠	خشک- تر	٠/٢	۴	۱۸۰۰	١٠

محسن امامی، عطیه کریمی پور

					نجش اعتبار	ں آموزش و س	ی در تستهای	وی تراشکار	ی نیروی پیشر	نایج اندازه گیر	جدول ۳ نا
تستهای سنجش اعتبار								، آموزش	تستهای		
نیروی پیشروی (N)		mm			شماره	روی (N)	نیروی پیش	e mm			شماره
F_{Wet}	F_{Dry}	$f(\frac{1}{\text{rev}})$	a(mm)	n(rpm)	آزمايش	F_{Wet}	F_{Dry}	rev)	<i>a</i> (mm)	n(rpm)	آزمايش
98/90	187/78	٠/٢	١	۲۰۰	١	۱۵/۱	8V/81	٠/٢	• /۵	۲۰۰	١
۱۶/۹۵	۱۵/۸۷	٠/٢	۰/۲۵	١٠٠٠	۲	۲۴۷/۳۸	397/15	٠/٢	۲	۲۰۰	۲
1.4/58	140/08	٠/٢	١	۱۰۰۰	٣	544/93	۷۷۴/۹۶	٠/٢	۴	۲۰۰	٣
۲٩٩/٣	3/777	٠/٢	۲	۱۰۰۰	۴	۱۵۵/۳۹	408/3	٠/٢	۲	۶	۴
848/44	४४१/४	٠/٢	۴	۱۰۰۰	۵	۵۰/۳۴	۶۰/۵۵	٠/٢	• /۵	۱۰۰۰	۵
41/14	44/30	٠/٢	•/۵	14	۶	17/24	22/21	٠/٢	۰/۲۵	14	۶
59F/85	۲۸۶/۱۱	٠/٢	۲	14	٧	۱ • ۵/۳	۱۵۶/۹۵	٠/٢	١	14	٧
14/8	17/18	٠/٢	۰/۲۵	۱۸۰۰	٨	811/8	۶۵۴/۵۷	٠/٢	۴	14	٨
41/18	۳٩/۴٨	٠/٢	• /۵	۱۸۰۰	٩	۱۱۱/۸۹	88/42	٠/٢	١	۱۸۰۰	٩
۳۰۵/۸۸	77./14	٠/٢	٢	۱۸۰۰	١.	۶۸۷/۵۱	44.101	٠/٢	۴	۱۸۰۰	١٠

Table 3 The results of the feed force measurements in the training and validation tests

پس از ایجاد مدل GEP در نرمافزار، لازم است مدل را برای انجام آنالیز و بهینه-سازی اجرا نمود. در عملیات بهینهسازی، مدل GEP با استفاده از توابع ریاضی پیش فرض خود که توسط کاربر تعیین شده اند، اقدام به جستجوی حالتهایی مینماید که کمترین فاصله را با دادههای تجربی داشته باشد. به عبارتی نرم افزار با استفاده از تابع سازواری خطای ریشه متوسط مربعات (RMSE) اقدام به بهینهسازی مینماید. نتیجه این بهینهسازی، یک مدل رگرسیون (رابطه ریاضی) است که میتواند جهت پیش بینی خروجی مورد نظر استفاده گردد. در اینجا خروجی مورد نظر، نیروی پیشروی تراش کاری است. در جدول ۴ مدل پیشروی تراش کاری به تفکیک هر شرایط روان کاری نشان داده شده است. در ستون سوم این جدول ضریب تعیین نشان داده شده است. با توجه به اینکه ضریب تعیین در اینجا نشان داده شده است. با توجه به اینکه ضریب تعیین در اینجا

بیشتر از ۲۹۹۹ بدست آمده است، از این رو می توان به دقت مدل نیروی حاصل پی برد. در شکل ۶ با استفاده از نمودار ستونی مقایسه بین نتایج تجربی و پیش بینی شده نیرو انجام شده است. در شکلهای ۶۹ و ۶۲ به ترتیب برای شرایط خشک و تر، دادههای تجربی آموزشی نیرو با نتایج مدل نیرو مقایسه شده است. در شکلهای ۶۹ و ۶۵ نیز به ترتیب برای شرایط خشک و تر، نتایج مدل نیرو با دادههای تجربی سنجش اعتبار نیرو مقایسه شده است. متوسط درصد خطای بین دادههای مدل سازی و تجربی برای قسمت آموزش، برابر با ۵/۴۶ درصد و برای قسمت سنجش اعتبار ۱۸/۲۴ درصد بدست آمده است.

در مجموع، نمودارهای نشان داده شده در شکل ۶ نشان میدهند که نتایج مدلسازی نیرو سازگاری قابل قبولی با داده-های تجربی دارند. علاوه بر این، در ستون آخر جدول ۴ رابطه نیروی پیشروی ویژه (*K*f) نیز که توسط رابطه (۶) محاسبه میشود، برای هر حالت روانکاری نشان داده شده است.

Table 4 The math formulations obtained from the GEP model for feed force and specific feed force for dry and wet cooling conditions **جدول ۴** روابط ریاضی بدست آمده از مدل GEP برای نیروی پیشروی و نیروی پیشروی ویژه برای شرایط خنک کاری خشک و تر

$K_f\left(\frac{N}{mm^2}\right)$	ضریب تعیین R-squared	رابطه نیروی پیشروی، (F(N	شرايط روانكاري
$K_{f_{Dry}} = \frac{F_{Dry}}{a \cdot f}$	0.9978	$\begin{split} F_{Dry} &= (226.0688896n - 22312.25215)a/n - 0.4116888714f^2 \cdot n^{1.25} \cdot a + \\ \frac{1}{a} \Big((f + 7.00607988346662 - a - 2.564913501^{0.25})(11.81953336a^3 - \\ 0.2136943305f) \Big) \end{split}$	خشک
$K_{f_{Wet}} = \frac{F_{Wet}}{a \cdot f}$	0.9999	$\begin{split} F_{Wet} &= 0.009949847734(a^2 + f - 6.883066438488)(-897.767677878274 + n) + ((2930.207876 - 18.4827878838932 \cdot n + 4047.65915065197 \cdot a)^2)^{0.25} + 7.4574724570452 \ln(a^5)(2 \cdot a + 1.40944891234216) \end{split}$	تر



Fig. 6 a,c) Comparison between the force training data and the GEP predicting data for dry and wet cutting conditions. b,d) Comparison between the GEP predicting data and the experimental validating force data for dry and wet cutting conditions شکل ۶ (a) و (c) مقایسه بین دادههای آموزشی نیرو و نتایج پیش،بینی مدل نیروی GEP برای شرایط برش خشک و تر. (b) و (b) مقایسه بین نتایج پیش،بینی مدل نیروی GEP و دادههای تجربی سنجش اعتبار مدل نیرو برای شرایط برش خشک و تر

برش پایدار (بدون چتر) و برش ناپایدار (با چتر) است.

۲-۴- مقایسه بین نتایج تئوری و تجربی پایداری چتر

شکل ۷ نتایج مدلسازی پایداری چتر را که با ترسیم نمودارهای SLD بدست آمده است برای دو شرایط مختلف روان کاری خشک و تر نشان می دهد. در این اشکال، نمودارهای SLD با استفاده از مقادیر پارامترهای مودال (m, k_y, c)، نرخ پیشروی ۰/۲ mm/rev و سرعت اسپیندل ۴۶۰ ۲۶۰۰-۲۰۰۰ ترسیم شده-اند. در هر مورد، منطقه پایدار در زیر منحنی و منطقه ناپایدار در بالای منحنی SLD واقع شده است. مقایسه نمودارهای SLD در دو حالت تراشکاری خشک و تر نشان میدهد که شرایط خنککاری در فرایند ماشینکاری میتواند مرز پایداری را تحت تأثیر قرار داده و آن را تا حد قابلملاحظهای جابهجا نماید. شکل ۷ نشان میدهد که در نقطه (rpm, *a*=۲/۶۲mm n=۱۶۵۵) دو منحنی با یکدیگر تلاقی دارند. در محدوده سرعت

پس از تعیین روابط (K_f) اکنون می توان آن ها را در نمودار بلوکی ترسیم شده در شکل ۴ لحاظ نموده و مراحل انجام مدلسازی چتر را ادامه داد. تنها پارامترهای ورودی باقیمانده در الگوریتم، پارامترهای مودال سازه ماشین ابزار هستند. یارامترهای مودال (m, k_v, c_v) اندازه گیری شده در اینجا عبارتند 186m -16910

$$k_y = /r \eta \times 1 \cdot \sqrt{N/m}$$

$$f \Delta r_y = /\Delta N.s/m$$

الگوریتم نشان داده شده در شکل ۴ توسط نرمافزار متلب کدنویسی شده است. خروجیهای این مدل، نمودارهای پایداری (SLD) برای دو شرایط تراش کاری خشک و تر می باشد. در نمودارهای SLD عمق بحرانی برش (a_{lim}) بر حسب سرعت چرخش اسپیندل(n) ترسیم می گردد. شایان ذکر است که SLD یک ابزار گرافیکی ساده جهت مشخص نمودن مرز بین

:;|

نیروی پیشروی ویژه (K_f) برای ماشین کاری خشک بیشتر از ماشین کاری تر بدست آمده است. اما در سرعت اسپیندل بیش از ۱۶۵۵۲pm ، برعکس نیروی پیشروی ویژه (K_f) برای ماشین کاری خشک کمتر از ماشین کاری تر میباشد. در واقع در سرعتهای بالای برش، نیروی پیشروی ماشین کاری در تراش کاری تر بدست کمتر از نیروی پیشروی ماشین کاری در تراش کاری تر بدست آمده است. این نتیجه با نتایج بدست آمده در مرجع [۲۲] ساز گار است. از دلایل عمده در این رابطه میتوان به کاهش اصطکاک در سرعتهای بالا و در حرارتهای بالای برش اشاره کرد [۲۲] (با توجه به این نکته که حرارت برش در ماشین کاری خشک نسبت به ماشین کاری تر بیشتر میباشد). از دیگر دلایل کاهش نیروهای ماشین کاری تر بیشتر میباشد). از دیگر دلایل کاهش نیروهای ماشین کاری تر بیشتر میباشد). از دیگر دلایل کاهش چرخش اسپیندل ۴۶۰rpm تا ۱۶۵۵rpm، منحنی حد پایداری تراش کاری تر بالاتر از منحنی متناظر در شرایط خشک واقع شده است. به عبارت دیگر در این محدوده پایداری برش در ماشین کاری تر بیشتر از شرایط خشک بدست آمده است. بالعکس در سرعت چرخش اسپیندل ۲۰۰۲pm تا ۲۰۰۰rpm منحنی حد پایداری تراش کاری خشک بالاتر از منحنی متناظر در شرایط تر قرار می گیرد. این نتیجه را میتوان عمدتاً به تغییرات نیروی پیشروی ویژه (K_f) نسبت به متغیرهای برش تغییرات نیروی مخصوص پیشروی (K_f) با پارامترهای برش و شرایط خنک کاری، مرتبط دانست. به عبارت دیگر تشرایط خنک کاری، مرتبط دانست. به عبارت دیگر می گذارد. در شکل ۸ تغییرات نیروی پیشروی ویژه K_f) (نسبت به سرعت اسپیندل برای دو حالت ماشین کاری خشک و تر نشان می هده است. نمودارهای شکل ۸ نشان می دهند که در مدوده سرعت اسپیندل ایری شکل ۸ نشان می دهند که در



Fig. 7 Comparison of stability lobe diagrams for dry and wet machining

شکل ۷ مقایسه نمودارهای پایداری SLD برای ماشین کاری خشک و تر



Fig. 8 Specific feed force (K_f) graph versus the spindle speed for a depth of 2.62 mm, in two modes of dry and wet machining شکل ۸ نمودار نیروی پیشروی ویژه (K_f) نسبت به سرعت اسپیندل برای عمق برش ۲*a* =/۶۲mm. در دو حالت ماشین کاری خشک و تر

صورت نقاط ستاره و مثلث نشان داده شده است. نقاط ستاره نواحی برش پایدار و نقاط مثلث نواحی برش ناپایدار را نشان میدهند. برای نمونه در شرایط ماشین کاری خشک (شکل ۹۵)، در سرعت اسپیندل ثابت ۱۰۰۰ rpm و عمق برشهای ۸/۵mm، ۱mm و ۲mm شرایط برش پایدار به دست آمده است، در حالی که افزایش عمق برش به ۳mm و بیشتر در همان سرعت اسپیندل سبب ایجاد ناپایداری چتر شده است. اما در شرایط ماشین کاری با سیال برش (شکل ۹b)، در سرعت اسپیندل ثابت ۱۰۰۰ rpm شرایط برش پایدار در عمق برشهای ۸۳۰۰، ۲mm، ۱mm و ۳mm، به دست آمده است، در حالی که در همان سرعت اسپیندل، افزایش عمق برش به ۴mm سبب ایجاد ناپایداری چتر شده است. در مجموع شکلهای ۹۵ و ۹۶ نشان میدهند که نتایج مدل پیشبینی چتر با نتایج تستهای تجربی سازگاری خوبی دارند. قابل توجه است که در آزمایشهای تجربی تراشکاری، حالتهای پایداری یا ناپایداری برش (وقوع یا عدم وقوع چتر) توسط چندین روش که ذیلاً به آنها اشاره شده، تشخيص داده شده است. همان طور که در این شکل ۸ مشاهده می شود در $K_f = \gamma/\cdot \gamma \pi x$. ۲۰^۸ ۸۰۱× $K_f = \gamma/\cdot \gamma \pi x$ یک نقطه تلاقی برای دو منحنی وجود دارد که متناظر با پارامترهای برشی متناظر با نقطه تلاقی دو منحنی n = 1/9 mm/rev دو منحنی n = 199 است. این پارامترهای برشی متناظر با نقطه تلاقی دو منحنی SLD در شکل ۷ نیز می باشند و از این رو نقاط تلاقی نمودارهای شکلهای ۷ و ۸ با هم یکسان هستند. هر چه نیروی پیشروی ویژه (K_f) در فرایند ماشین کاری بیشتر باشد حد پایداری چتر کاهش می یابد و بالعکس. به عبارت دیگر مقایسه پایداری چتر کاهش می یابد و بالعکس. به عبارت دیگر مقایسه نمودارهای نشان داده شده در شکلهای ۷ و ۸ نشان می دهد که با پارامترهای برشی ثابت، نیروی پیشروی مخصوص (K_f)

در این پژوهش به منظور بررسی نتایج مدلسازی نمودار حد پایداری (SLD)، آزمایشهای تجربی پایداری چتر در تراش کاری انجام شده است. در شکل ۹۵ نمودار SLD بدست آمده برای تراش کاری خشک با نتایج تجربی پایداری چتر مقایسه شده است. همچنین شکل ۹۵ مقایسه بین نتایج مدلسازی SLD با نتایج تجربی پایداری چتر را برای تراش کاری تر نشان میدهد. نتایج آزمایشهای تجربی پایداری چتر در شکلهای ۹۵ و ۹۶ به



شکل۹۵ مقایسه نتایج مدل تئوری با آزمایش های تجربی برای ماشین کاری خشک



شکل ۹b مقایسه نتایج مدل تئوری با آزمایشهای تجربی برای ماشین کاری تر

در اینجا مهمترین روشهای به کار رفته جهت تعیین وقوع چتر عبارتند از: ثبت ارتعاشات ابزار با استفاده از شتابسنج، زبریسنجی سطح نمونهها پس از تراش کاری، ضبط صدا در فرایند برادهبرداری، و بررسی شکل برادههای تولید شده.

معمولاً در حالتهای وقوع چتر نسبت به شرایط برش پایدار، دادههای شتابسنج مقادیر انحراف معیار بالاتری را نشان میدهند، سر و صدای ناشی از ارتعاشات فرایند به طور قابل توجهی افزایش می یابد. همچنین زبری سطح قطعاتی که در شرایط برش ناپایدار ماشین کاری شدهاند، به طور قابل ملاحظه-ای افزایش می یابد. در شرایط چتر، به دلیل وجود ارتعاشات ابزار، شکل برادههای تولید شده نیز تغییر میکند، به طوری که در برش مواد داکتیل معمولاً برادههای پیوسته با شکل اعوجاج یافته ناهمگون بدست می آید. در شکلهای ۱۰ و ۱۱ به ترتیب برای دو حالت برش پایدار و ناپایدار، مقادیر شاخصهای ذکر شده (از جمله سیگنال شتاب و انحراف معیار آن، زبری سطح، شکل براده، و بافت سطحی قطعه کار) که از آزمایش بدست آمدهاند، نمایش داده شده است. شکل ۱۰ نتایج مربوط به تست ماشین کاری یک نمونه با سیال برش و پارامترهای برشی n=۱۴۰۰rpm ،a=۲mm ،f=۰/۲mm/rev است. در این شکل مشاهده میشود که دامنه سیگنال شتاب ابزار تقریباً یکنواخت است و تغییرات برجستهای در دامنه سیگنال شتاب در این فرایند بوجود نیامده است. در اینجا انحراف معیار سیگنال شتاب،

شاخصی کمی است که پراکندگی دادههای شتاب را از مقدار میانگین نشان میدهد. با افزایش ارتعاشات ابزار، انحراف معیار سیگنال شتاب نیز افزایش مییابد. در شکل ۱۰ مشاهده میشود که بافت سطحی نمونه در این تست تقریباً هموار است. لازم به ذکر است که بافت سطحی ماشینکاری به عنوان نواحی ماکروسکوپی یک سطح ماشینکاری شده همراه با الگوی تکراری تعریف میشود و میتواند شامل اطلاعاتی در رابطه با ارتعاشات ابزار (چتر) باشد. به عبارتی ارتعاشات چتر میتواند سبب تغییر بافت سطحی قطعه کار شده و زبری سطح را افزایش دهد.

در شکل ۱۰ مشاهده می شود که در این آزمایش، برادههای لولهای شکل بدست آمده است. قابل توجه است که برادههای لولهای شکل مطابق مرجع [۲] جزء برادههای قابل پذیرش ماشین کاری می باشند. در مجموع نتایج بدست آمده از این شکل گویای پایدار بودن فرایند هستند. به طور کلی توصیه می شود عملیات خنک کاری در شرایط برش پایدار مورد استفاده قرار گیرد تا نتیجه مؤثری داشته باشد و از آسیب به کیفیت سطح قطعه کار و کاهش عمر ابزار ناشی از چتر اجتناب گردد. از طرف دیگر، شکل ۱۱ نتایج بدست آمده از یک مورد فرایند ماشین کاری ناپایدار را نشان می دهد که در شرایط خنک کاری خشک و با پارامترهای برشی ۳۷–۳۰ (Tmm/rev مشاهده می شود، سیگنال شتاب بدست آمده دارای تغییرات دامنه نسبتاً بالایی است.

پایدار با سیال برش (تر) ۱۴۰۰ ۲ ۰/۲ ۲/۴۴ ۲۷/۹۸	شرایط برش شرایط خنک کاری سرعت چرخش اسپیندل (n(rpm عمق برش (mm) عمق برش (mm) نرخ پیشروی (f(<u>mm</u> rev) انرخ پیشروی (grm rev) R _a (μm انحراف معیار سیگنال شتاب (std(<u>m</u>)	
	·	سطح ماشین کاری شده قطعه کار
$\begin{array}{c} 500 \\ 350 \\ - \\ (28) \\ \text{Im} \\ 50 \\ \text{min} \\ 50 \\ - \\ - \\ 100 \\ - \\ - \\ - \\ - \\ - \\ - \\ - \\ - \\ 50 \\ 0 \\ - \\ - \\ 5 \end{array}$		A State of the sta
5	سیکنال شتاب سن	شکل برادهها

Fig. 10 The results of a stable turning performed in wet condition

شکل ۱۰ نتایج یک آزمایش برش پایدار که در شرایط ماشین کاری تر انجام شده است

انحراف معیار این سیگنال شتاب برابر ۴۷/۱۰ m/s² است و تقریباً حدود ۷۰ درصد بیشتر از انحراف معیار سیگنال شتاب شکل ۱۰ است. همچنین شکل ۱۱ نشان میدهد که در شرایط برش ناپایدار، برادههای پیوسته با شکل اعوجاج یافته ناهمگون (برادههایی با تغییر شکلهای شدید) بدست آمده است که مرفولوژی آنها متفاوت با شکلهای متداول براده میباشد. قابل توجه است که برادههای با تغییر شکلهای بسیار شدید معمولاً در شرایط برش ناپایدار بدست میآیند [۲۴]. علاوه بر آن، در این شکل نشانههای چتر بر سطح ماشین کاری شده قطعه کار مشاهده میشود. در واقع ارتعاشات چتر

سبب غیر یکنواخت شدن و موجدار شدن بافت سطحی قطعه کار شده و ناهمواریهای به جا مانده از چتر، سبب افزایش زبری سطح نمونه شده است. در شکل ۱۲۵ زبری سطح برای دو حالت برش پایدار و ناپایدار مطرح شده در شکلهای ۱۰و ۱۱، در نمودار ستونی نمایش داده شده است. زبری سطح در حالت برش ناپایدار برابر با سلم ۲/۴۹ هاست که در مقایسه با زبری سطح در حالت برش پایدار (Ra=۲/۴۴ μm) حدود ۴۳ درصد بیشتر می باشد. همچنین در شکل ۱۲b انحراف معیار سیگنال شتاب برای دو حالت برش پایدار و ناپایدار قبل، در نمودار ستونی نشان داده شده است.



شکل ۱۱ نتایج یک آزمایش برش ناپایدار که در شرایط ماشین کاری خشک انجام شده است

Cutting parameters: n=1400rpm, a=2mm, f=0.2mm/rev

Cutting parameters: n=1400rpm, a=2mm, f=0.2mm/rev



Fig. 12 (a) Comparison of the surface roughness Ra for stable and unstable machining, (b) Comparison of the acceleration standard deviation (Std) for stable and unstable machining

شکل۱۲ (a) مقایسه زبری سطح برای حالتهای برش پایدار و ناپایدار، (b) مقایسه انحراف معیار سیگنال شتاب برای حالتهای برش پایدار و ناپایدار

واضح است که برای هر سرعت برشی ثابت، دامنه سیگنالهای نزدیک به فرکانس طبیعی سیستم ماشین کاری حاضر (۴۱۸Hz)

در شکل ۱۳ نتایج سیگنالهای شتاب و نمودارهای FFT برای کلیه آزمایشهای ماشین کاری خشک در مرز پایداری شتاب و پراکندگی آن در شرایط بروز چتر، بیشتر از حالت-نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۱۴، برای کلیه ماشین کاری پایدار میباشد. همچنین چتر در فرکانسهایی آزمایشهای ماشینکاری تر انجام شده در مرز پایداری، سیگنالهای شتاب و نمودارهای FFT نشان داده شده است. رخ میدهد.







بررسی تئوری و تجربی ارتعاشات چتر در شرایط ماشین کاری خشک و تر در فرایند تراش کاری



شکل ۱۳ سیگنالهای شتاب و نمودارهای FFT بدست آمده در مرزهای پایداری برای ماشینکاری خشک











Fig. 14 The acceleration signals and FFT graphs obtained at stability limits for wet condition

شکل ۱۴ سیگنالهای شتاب و نمودارهای FFT بدست آمده در مرزهای پایداری برای ماشین کاری تر

۵- نتیجهگیری

در این پژوهش، برای اولین بار اثر حالتهای خنککاری (خشک و تر) بر پایداری برش در فرایند تراشکاری، به صورت تئوری و تجربی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا با استفاده از برنامهریزی بیان ژن (GEP)، یک مدل جدید نیمه تجربی نیرو جهت احتساب تأثیر حالت خنککاری بر نیروهای ماشینکاری توسعه داده شد. سپس از مدل نیروی بدست آمده جهت توسعه مدل پیش بینی پایداری چتر و در نهایت ترسیم نمودار SLD استفاده شد. نمودارهای SLD برای دو شرایط خنککاری (به عبارتی خنک کننده تر متداول و ماشینکاری خشک) ترسیم شدند. پس از آن، نمودارهای SLD که به روش تئوری پیش بینی شدهاند با آزمایشهای تجربی تأیید شدند. از این پژوهش نتایج زیر بدست میآید:

- مدل نیمه تجربی نیروی تراش کاری که با استفاده از روش برنامهریزی بیان ژن (GEP) بدست آمده است میتواند به طور قابل اعتمادی جهت پیش بینی نیرو در شرایط مختلف خنک کاری استفاده گردد.

- مقایسه بین نتایج مدلسازی و نتایج آزمایشگاهی پایداری چتر برای شرایط ماشینکاری تر و خشک نشان میدهد که نمودارهای SLD پیشبینی شده با دادههای تجربی سازگار هستند. نتایج نشان میدهد که اعمال تأثیر خنک

کاری/روانکاری در مدل چتر از طریق اصلاح مدل نیرو میتواند دقت پیش بینی SLD را افزایش دهد. - حالتهای خنککاری (خشک و تر) در فرایند ماشینکاری میتواند بر منحنی حد پایداری چتر تأثیر گذار باشد و آن را تا حد قابلملاحظهای جابهجا نماید.

۶- مراجع

- M. Siddhpura, R. Paurobally, A review of chatter vibration research in turning, *International Journal* of Machine tools and manufacture, Vol. 61, pp. 27-47, 2012.
- [2] Y. Altintas, *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*, Second Edition, Cambridge university press, 2012.
- [3] M. Eynian, and Y. Altintas, Chatter stability of general turning operations with process damping, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 131, No. 4, 041005, 2009.
- [4] E. Budak, and LT. Tunc, Identification and modeling of process damping in turning and milling using a new approach, *CIRP annals*, Vol. 59, No. 1, pp. 403-408, 2010.
- [5] LT. Tunç, E. Budak, Effect of cutting conditions and tool geometry on process damping in machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 57, pp. 10-19, 2012.
- [6] J. M. Vieira, A. R. Machado, E. O. Ezugwu, Performance of cutting fluids during face milling of

- [15] K. K.Singh V. Kartik, R. Singh, Modeling of dynamic instability via segmented cutting coefficients and chatter onset detection in high-Speed micromilling of Ti6Al4V. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. Vol. 139(5), pp. 051005, 2017.
- [16] C. Ferreria, Gene-expression programming. a new adaptive algorithm for solving problems. *Complex Systems*, Vol. 13, No. 2, pp. 87–129, 2001.
- [17] A. Zahiri, A.A. Dehghani, and H.M. Azamathulla, Application of gene-expression programming in hydraulic engineering. In *Handbook of Genetic Programming Applications, Springer, Cham*, pp. 71-97, 2015.
- [18] M. Kök, E. Kanca, and Ö. Eyercioğlu, Prediction of surface roughness in abrasive waterjet machining of particle reinforced MMCs using genetic expression programming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 55(9-12), pp.955-968, 2011.
- [19] Yang, Y., Li, X., Gao, L. and Shao, X., Modeling and impact factors analyzing of energy consumption in CNC face milling using GRASP gene expression programming. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 87(5-8), pp.1247-1263, 2016.
- [20] K. Ogata, Y. Yang, *Modern control engineering*, Fifth Edition, Prentice-Hall; 2010.
- [21] Product Data Sheets (PDS), Accessed on 21 April 2019; https://www.mobil.com/en/industrial/Lubricants/Pro

ducts/Mobilcut-100.

- [22] B. Davoodi, A.H. Tazehkandi, Experimental investigation and optimization of cutting parameters in dry and wet machining of aluminum alloy 5083 in order to remove cutting fluid. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 68, pp. 234-242, 2014.
- [23] T.H.C. Childs, Friction modeling in metal cutting. *Wear*, Vol. 260, No. 3, pp.310-318, 2006.
- [24] Y. Ning, M. Rahman, YS. Wong, Investigation of chip formation in high speed end milling. *Journal* of materials processing technology. Vol. 113(1-3): 360-7, 2001.

steels. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 116(2), pp. 244–251, 2001.

- [7] M. Wiercigroch, A. M. Krivtsov, Frictional chatter in orthogonal metal cutting. *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*. Vol. 359(1781), pp. 713-738, 2001.
- [8] M. Wiercigroch, E. Budak, Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting. *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences.* Vol. 359(1781), pp. 663-693, 2001.
- [9] B. Davoodi, A.H. Tazehkandi, Experimental investigation and optimization of cutting parameters in dry and wet machining of aluminum alloy 5083 in order to remove cutting fluid. *Journal of Cleaner Production.* Vol. 68, pp. 234–242, 2014.
- [10] A. Mehta, S. Hemakumar, A. Patil, S.P. Khandke, P. Kuppan, R. Oyyaravelu, and A.S.S. Balan, Influence of sustainable cutting environments on cutting forces, surface roughness and tool wear in turning of Inconel 718. *Mater Today Proc*, Vol. 5(2), pp. 6746-6754, 2018.
- [11] R. K. Mittal, S. S. Kulkarni, R. Singh, Effect of lubrication on machining response and dynamic instability in high-speed micromilling of Ti-6Al-4V. *Journal of Manufacturing Processes*. 28(3), pp. 413-421, 2017.
- [12] R. K. Mittal, S. S. Kulkarni, R. Singh, Characterization of Lubrication Sensitivity on Dynamic Stability in High-Speed Micromilling of Ti-6Al-4V via a Novel Numerical Scheme, *International Journal of Mechanical Sciences*, DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.04.038, 2018.
- [13] N. Grossi, L. Sallese, A. Scippa, G. Campatelli, Speed-varying cutting force coefficient identification in milling. *Precision Engineering*, Vol. 42, pp.321-334, 2015.
- [14] K. K. Singh, V. Kartik, R. Singh, Modeling dynamic stability in high-speed micromilling of Ti–6Al–4V via velocity and chip load dependent cutting coefficients. *International Journal of Machine Tools* and Manufacture. Vol. 96, pp. 56-66, 2015.