Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 55(4) (2023) 93-96
DOI: 10.22060/mej.2023.5172.7490

Chatter Suppression in turning by applying a tooling mechanism with the ability to change the tool angles

H. Behrouz[1], H. Baseri[1*] , H. Nourmohammadi[2]

[1] Faculty of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.
[2] Northern research center of science and technology,Fereydunkenar, Iran

ABSTRACT: Tool angles have a great impact on cutting mechanics and the machining parameters such as surface quality, tool life, specific cutting energy, and dynamic stability of the cutting process. One of the research topics in this field is the development of mechanisms that can be used to create more control on the machining process, such as the tool angles, simultaneously in the process. In this research, a tooling mechanism has been presented for the turning machine, which provides the ability to adjust the normal rake and clearance angles, during the turning process. This mechanism is used to develop a new active control system for chatter suppression for increasing the dynamic stability of the turning process. In this technique, the controller detects the chatter through the acceleration sensor and then reduces the clearance angle of the tool by using the mechanism, this increases the process damping and by increasing the overall damping, it suppresses the vibrations. To design the active controller, the simulation was done in the MATLAB-Simulink and then according to the simulation results, an on/off controller was designed and implemented. Then, experimental tests were performed to evaluate the performance of the chatter suppression control system. The test results showed that the proposed method can have a good effect in reducing chatter vibrations in the turning process and leads to a significant increase in the stability of the tuning process.

Review History:

Received: Aug. 16, 2022
Revised: May, 21, 2023
Accepted: May, 22, 2023
Available Online: Jun. 20, 2023

Keywords:

Tooling mechanism
normal rake angle
Clearance angle
active Chatter suppression
Process damping

1- Introduction

The tool geometry, especially the tool angles, has significant effects on the machining parameters such as surface finish, tool life, specific cutting energy, and dynamic stability of the cutting process [1]. An interesting study in this field was conducted by Mi. *et al.* [2][2], where the tooling mechanism was proposed to develop an active control technique for chatter suppression in the turning process. The main idea in their research was the interesting for chatter suppression, which has advantages in comparison to other chatter suppression/control methods in the turning process. This technique needs no reduction in the spindle speed nor feed rate; thus, the metal removal rate is not reduced. Also, the energy consumption in this technique is very low. Therefore, according to mentioned advantages, the present study aims to extend and develop the chatter active suppression/control technique proposed by Mi *et al*. Thus, a new tooling mechanism is presented, which allows the normal/true rake and clearance angles to be adjusted Simultaneously in the turning process. Next, a chatter suppression system is proposed that is based on using the tooling mechanism, After the tooling mechanism was built, the chatter suppression system was implemented and then the experimental test was performed.

2- 2DOF tooling mechanism

In the mechanics of metal cutting, the true rake (normal rake) angle and clearance angle, are defined in the plane perpendicular to the main cutting edge [3]. Now, if we want to have a tooling mechanism that can adjust the normal rake and clearance angles in the conventional turning tools, this mechanism should rotate the tool around the main cutting edge. The proposed mechanism is a series configuration and consists of two inner and outer mechanisms; the inner mechanism is a simple two-members mechanism and adjusts the side inclination angle, whereas the outer mechanism is a four-links mechanism that rotates the inner mechanism around the instantaneous center using two circular slots. In Fig.1 the proposed tooling mechanism is shown.

3- Chatter suppression system

The implemented chatter suppression system is based on changing the tool clearance angle using the proposed tooling mechanism. So, when chatter occurs, the chatter suppression system informs the controller, and the system status is examined by measuring the amplitude of the signal via the accelerometer, when the acceleration amplitude exceeds the allowable threshold, the controller is activated and issues

*Corresponding author's email: h.baseri@nit.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Fig. 1. The proposed tooling mechanism

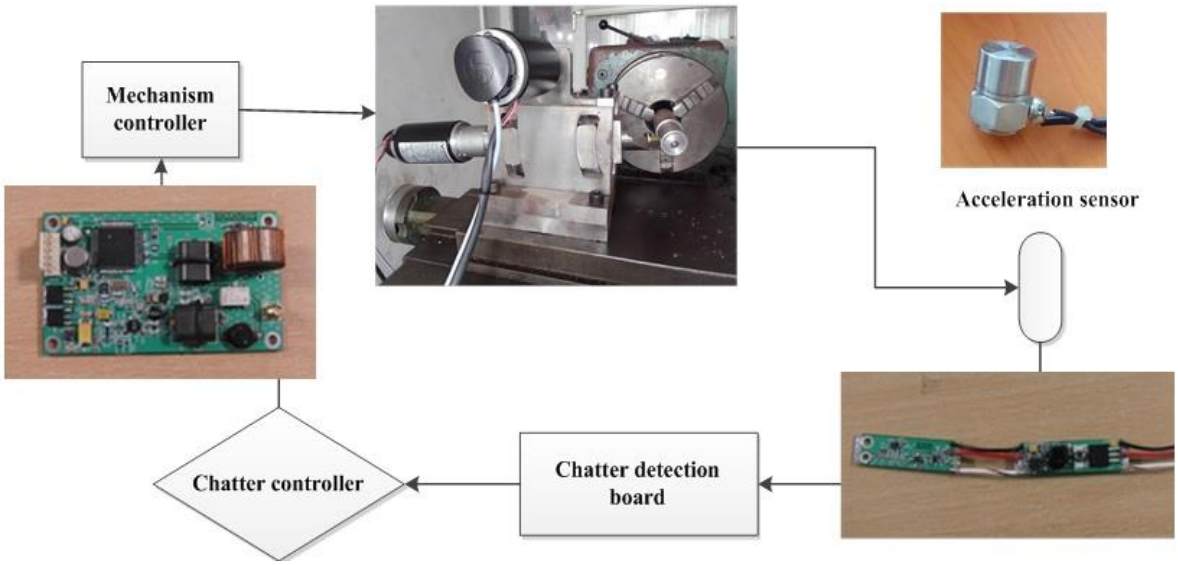


Fig. 2. The implemented chatter suppression system

the angle alteration command to the tooling mechanism. Therefore, the higher the acceleration amplitude relative to the allowable value, the more extreme command is issued for the control operator. In Fig.2 the implemented chatter suppression system is shown.

4- Results

Experimental tests were conducted for the evaluation of the proposed chatter suppression system. In Fig.3 the results of the experimental test are shown in the form of the depth of cutt graphs.

5- Conclusion

The experimental test results show that the proposed technique can be effective in increasing the dynamic stability of the turning process and can easily be implemented on the turning machine with only a change in the tooling mechanism.

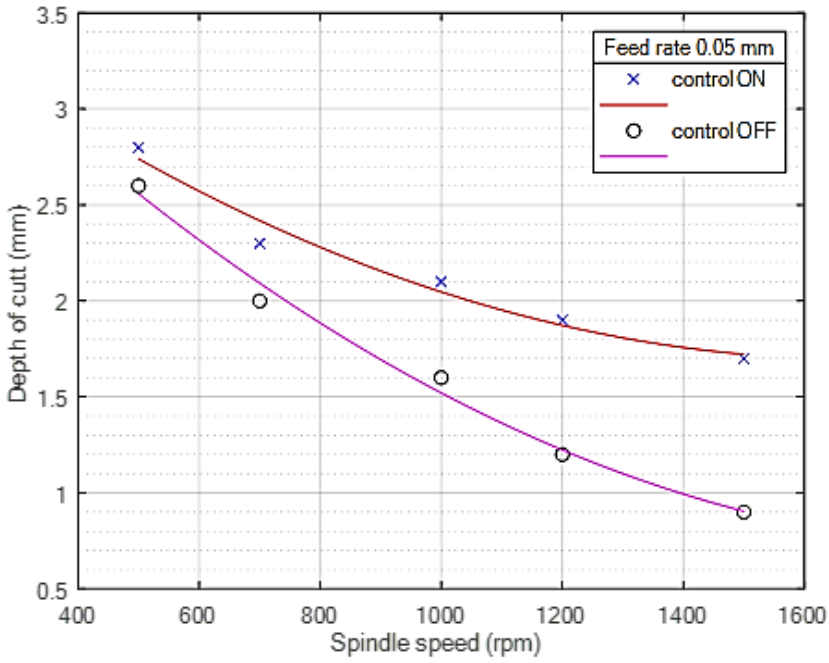


Fig. 3. The depth of the cut graph in two conditions: with and without of chatter suppression system

References

[1] L. Tunc, Y. Budak, Effect of cutting conditions and tool geometry on process damping in machining, International Journal of Machine Tools & Manufacture 57 (2012) 10–19.

[2] Z. Mei, S. Yang, H. Shi, S. Chang, K.F. Ehman, Active chatter suppression by on-line variation of rake and …, International Journal of Machine Tools & Manufacture 4 (1994) 981–990.

[3] Geoffrey Boothroyd, Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools, CRC Press (1988).

HOW TO CITE THIS ARTICLE

H. Behrouz, H. Baseri, H. Nourmohammadi, Chatter Suppression in turning by applying a tooling mechanism with the ability to change the tool angles, Amirkabir J. Mech Eng., 55(4) (2023) 93-96.

DOI: 10.22060/mej.2023.5172.7490

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۵، شماره ۴، سال ۱۴۰۲، صفحات ۴۶۱ تا ۴۷۴
DOI: 10.22060/mej.2023.5172.7490

کاهش ارتعاشات ابزار در تراشکاری به‌کمک ابزارگیر با قابلیت تغییر زاویه ابزار حین فرآیند

حسین بهروز[۱]، حمید باصری[۱] ، حسین نورمحمدی[۲]

۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل، ایران
۲ پژوهشکده علوم و فناوری شمال، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، فریدونکنار، ایران

خلاصه: زوایای ابزار تاثیر زیادی بر مکانیک برش و پارامترهای اصلی ماشینکاری مانند کیفیت سطح قطعه، عمر ابزار، انرژی مخصوص برش و پایداری دینامیکی فرآیند دارد، یکی از موضوعات پژوهشی دراین زمینه، توسعه مکانیزم‌هایی است که به کمک آنها بتوان کنترل بیشتری روی فرآیند ماشینکاری از جمله زوایای ابزار، بصورت همزمان با اجرای فرآیند ایجاد کرد. در پژوهش پیش‌رو مکانیزم ابزارگیر دو درجه آزادی جدید برای دستگاه تراش ارائه شده که قابلیت تنظیم زاویه آزاد و براده حقیقی ابزار را حین فرآیند تراشکاری فراهم می‌کند. هدف از طراحی این مکانیزم استفاده از آن برای توسعه یک روش جدید کنترل فعال برای کاهش ارتعاشات چتر و افزایش پایداری دینامیکی در فرآیند تراشکاری است. در این روش کنترلر از طریق حسگر ارتعاش، بروز چتر را تشخیص می‌دهد و با استفاده از مکانیزم، زاویه آزاد ابزار را کاهش می‌دهد، این‌امر باعث افزایش میرایی فرآیندی شده و با افزایش میرایی کل، موجب مهار ارتعاشات چتر می‌شود. برای طراحی کنترل فعال چتر، ابتدا شبیه‌سازی در محیط MATLAB-Simulink انجام شد و سپس با توجه به نتایج شبیه‌سازی، یک کنترلر on/off طراحی و پیاده‌سازی شد. در ادامه برای ارزیابی عملکرد سیستم کنترل چتر، آزمون‌های تجربی انجام شد. نتایج حاصل از تست‌ها نشان داد که روش پیشنهادی عملکرد مناسبی در کاهش ارتعاشات چتر در فرآیند تراشکاری می‌تواند داشته باشد و منجر به افزایش قابل ملاحظه‌ای در دامنه پایداری فرآیند می‌شود.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۵
بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۳۱
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۰۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۳/۳۰

کلمات کلیدی:
مکانیزم ابزارگیر
زاویه براده حقیقی
زاویه آزاد ابزار
کنترل فعال چتر
میرایی فرآیندی

۱- مقدمه

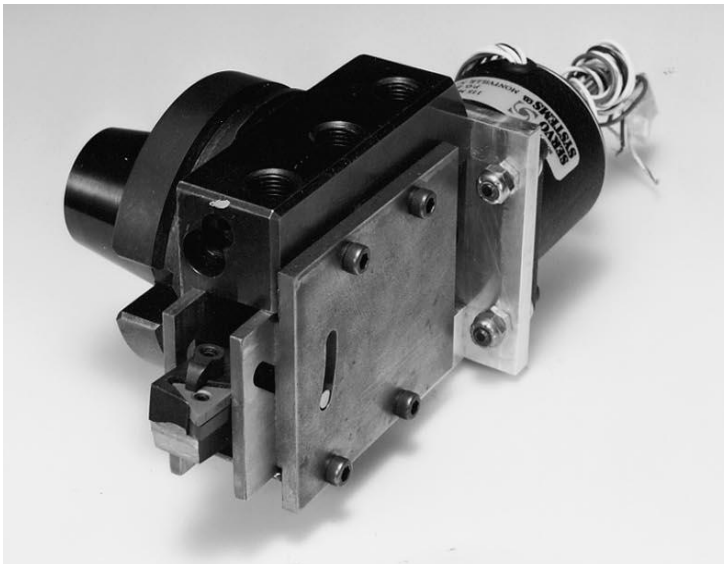
هندسه ابزار خصوصاً زوایای ابزار تاثیر زیادی بر پارامترهای اساسی ماشینکاری مانند کیفیت سطح قطعه، عمر ابزار، انرژی مخصوص برش و پایداری دینامیکی فرآیند برش دارد [۱]. در مکانیک برش فلزات، تحقیقات زیادی روی زوایای ابزار انجام شده و تئوری‌های معتبری مانند تئوری برش ارنست- مرچنت[۱] و تئوری برش لی- شافر[۲] برای توصیف رابطه‌ی زاویه براده ابزار با نحوه تشکیل براده و نیروهای وارد بر ابزار، ارائه شده است [۲]. اما، غالباً در این پژوهش‌ها، استفاده از ابزارهای مختلف با زوایای متفاوت پیشنهاد شده است؛ تا اینکه اولین بار کولدر-بور از یک مکانیزم ابزارگیر با قابلیت تنظیم زاویه ابزار در حین ماشینکاری با دستگاه تراش، استفاده کرده اند[۳]. البته این مکانیزم به صورت دستی بوده و انحراف نوک ابزار به صورت دستی جبران می‌شد. اولین مکانیزم ابزارگیر با قابلیت تنظیم زاویه به صورت خودکار توسط فنگ-نجم السادات ارائه شد [۴] که در آن برای تنظیم زاویه تمایل پیشانی ابزار از مکانیزم سه لینکی استفاده شده است. لازم به ذکر است که در مکانیزم پیشنهادی، حداکثر زاویه قابل تنظیم برابر با ۵ درجه است. در ادامه، مکانیزم دیگری توسط فنگ- لی [۵] ارائه شد که در آن مشکلات مکانیزم قبلی برطرف شده و برای جبران انحراف نوک ابزار از شیارهای مخصوص استفاده شده است. با استفاده از مکانیزم پیشنهادی، امکان جبران انحراف نوک ابزار به صورت کامل در محدوده ۶ درجه فراهم شد. بدین ترتیب، در زمانی که زاویه تمایل ابزار تغییر می‌کند، موقعیت نوک ابزار ثابت مانده و در نتیجه عمق بار تغییر نخواهد داشت. مهم‌ترین کاربردی که آنها برای این مکانیزم پیشنهاد کردند، استفاده از آن برای توسعه دستگاه‌های CNC با قابلیت معماری باز است که در آن امکان کنترل و تنظیم پارامترهای ماشینکاری مانند توان مصرفی فراهم می‌شود. در شکل۱ تصویر مکانیزم ساخته شده توسط فنگ- لی نشان داده می‌شود.

از پژوهش‌های مهم دیگری که در این زمینه انجام شد، می‌توان به کار می و همکاران اشاره کرد[۶]، که در آن مکانیزم ابزارگیر با قابلیت تغییر زاویه

1 Ernst-Merchant Theory
2 Lee-Shaffer Theory

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: h.baseri@nit.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.



شکل ۱. مکانیزم ابزارگیر ارائه شده توسط لی- فنگ[۵]

Fig. 1. Tooling mechanism proposed by fang-lee.

ابزار ارائه شده است. هدف اصلی این پژوهش، توسعه یک روش کنترل فعال ارتعاش چتر در فرآیند تراشکاری بوده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، تغییر در زاویه ابزار در زمان بروز چتر می‌تواند بر روی دینامیک پدیده چتر تاثیر بگذارد و باعث جلوگیری از بروز آن شود. در مکانیزم ارائه شده در این پژوهش، بجای تنظیم زاویه براده، زاویه تمایل جانبی ابزار تغییر می‌کند. هرچند که با اعمال این تغییر، زاویه براده و آزاد ابزار نیز دچار تغییر می‌شود. موضوع دیگر در خصوص این پژوهش، ایده مطرح شده برای کنترل چتر است، که نسبت به روش‌های دیگر کنترل فعال چتر مزایای مهمی دارد. اولاً، در این روش برای کنترل چتر نیازی به کاهش سرعت اسپیندل یا سرعت پیشروی نیست. در نتیجه نرخ براده برداری تغییر نمی‌کند. دوماً، پاسخ زمانی سیستم کنترل چتر می‌تواند بسیار سریع باشد. ثالثاً، انرژی مصرفی این روش در مقایسه با دیگر روش‌ها مانند ماشینکاری ارتعاشی بسیار کمتر است.

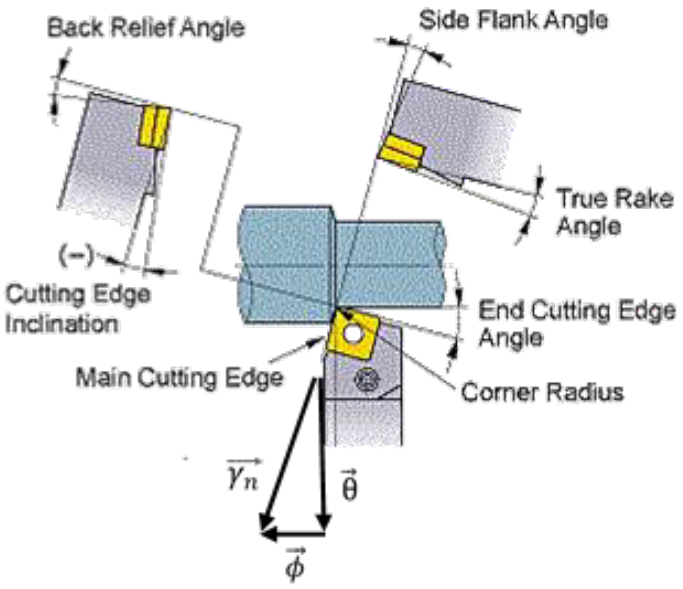
در پژوهش حاضر نیز با توجه به مزایای مطرح شده در فوق، روش پیشنهادیِ می-همکاران مورد توجه قرار خواهد گرفت. در واقع، مکانیزم ابزارگیر جدیدی با قابلیت تنظیم زاویه ابزار به صورت خودکار و با هدف توسعه‌ی روش کنترل فعال چترِ مطرح شده توسط می- همکاران، ارائه می‌شود. همچنین، در زمینه تکنیک کنترلی برای پیاده‌سازی یک سیستم کنترل فعال برای مهار چتر، از روش جدیدی استفاده خواهد شد.

۲- طراحی مکانیزم ابزارگیر دو درجه آزادی

در مکانیک برش زوایای آزاد و براده نرمال، در صفحه عمود بر لبه برش اصلی ابزار تعریف می‌شوند. برای تنظیم زاویه‌ی آزاد و براده نرمال در ابزارهای متداول در فرآیند تراشکاری که دارای زاویه تمایل لبه برش اصلی هستند، نیاز به طراحی یک مکانیزم دو درجه آزادی است. دلیل نیاز به دو درجه آزادی این است که مقدار زاویه تمایل لبه برش برای ابزارهای مختلف متفاوت است. بنابراین با طراحی یک مکانیزم دو درجه آزادی و با ترکیب (جمع برداری) دو زاویه تمایل پیشانی و تمایل جانبی می‌توان زاویه آزاد و براده نرمال را تنظیم کرد. همان طور که در شکل۲ نشان داده می‌شود، ترکیب زوایای ابزار برای تنظیم زاویه آزاد و براده حقیقی به صورت رابطه۱ انجام می‌گیرد.

$$\vec{\gamma}_n = \vec{\phi} + \vec{\theta} \qquad (۱)$$

که در آن ϕ زاویه تمایل پیشانی، θ زاویه تمایل جانبی و γ_n زاویه براده نرمال است.



شکل ۲. محورهای تنظیم زوایا در مکانیزم ابزارگیر دو درجه آزادی

Fig .2. Adjustmnet axes in the two-degree-of-freedom tooling mechanism

مهم‌ترین نکاتی که در طراحی مکانیزم ابزارگیر باید مورد توجه قرار گیرند، به شرح زیر هستند.

- ثابت نگه‌داشتن نوک ابزار در فضا برای جلوگیری از تغییر عمق بار در زمان تنظیم زاویه، ضروری است. برای تحقق این مهم لازم است که مرکز آنی دوران مکانیزم روی نوک ابزار منطبق باشد.
- کنترل همزمان زوایای مکانیزم پیشنهادی برای تنظیم زاویه ابزار در حین فرآیند ماشینکاری در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه، در زمان تغییر زاویه نباید هیچ گونه جابجایی در موقعیت نوک ابزار اتفاق بیافتد؛ در غیر اینصورت عمق بار تغییر خواهد کرد.
- برای تنظیم زاویه براده نرمال، دو محور مکانیزم باید به صورت همزمان تنظیم شوند. در نتیجه باید از سیستم کنترل همزمان دو محور استفاده شود.
- با توجه به اینکه مکانیزم ابزارگیر پیشنهادی، به عنوان جایگزین ابزارگیر دستگاه تراش و با هدف مهار ارتعاشات چتر استفاده می‌شود، در نتیجه لازم است که سختی دینامیکی و صلبیت[1] آن معادل ابزارگیر خود دستگاه باشد و اضافه شدن آن نباید موجب تغییر قابل توجه در ضرایب دینامیکی دستگاه تراش شود و فرکانس‌های ارتعاشات چتر تحت تاثیر این موضوع تغییر نکند.

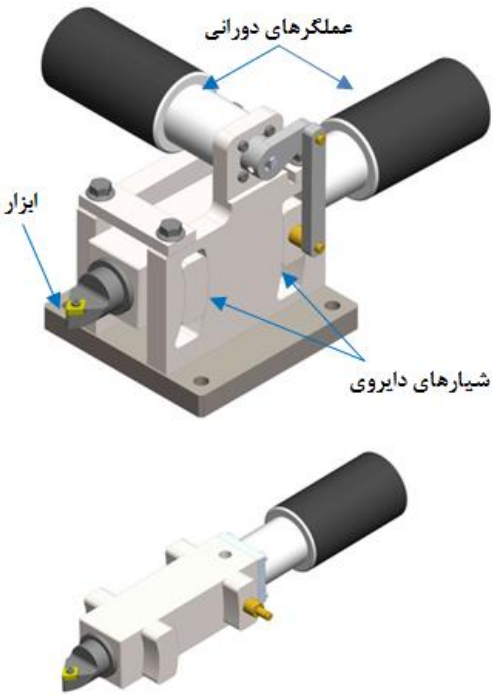
1 Stiffness

با در نظر گرفتن ویژگی‌های مکانیزم مد نظر در این پژوهش و نیز با توجه به مزایا و معایب مکانیزم‌های تشریح شده در پژوهش‌های پیشین، طرح کلی مکانیزم پیشنهادی از دو مکانیزم مستقل که به صورت سری[2] با یکدیگر اتصال دارند، تشکیل می‌شود. در شکل۳ مدل سه بعدی نرم افزاری مکانیزم پیشنهادی نمایش داده می‌شود.

همان طور که در شکل۳ مشخص شده است، مکانیزم از دو قسمت درونی و بیرونی تشکیل می‌شود. قسمت درونی یک مکانیزم ساده دو عضوی است و زاویه تمایل جانبی ابزار را تنظیم می‌کند. قسمت بیرونی نیز یک مکانیزم چهار لینکی است که کل مکانیزم درونی در نقش یکی از لینک‌های آن محسوب می‌شود. طراحی اجزاء قطعات به گونه‌ای انجام شده است که مرکز دوران هر دو مکانیزم بر روی نوک ابزار منطبق شود. در شکل۴ نحوه اعمال تغییر زاویه و ثابت ماندن لبه برش اصلی ابزار نمایش داده می‌شود.

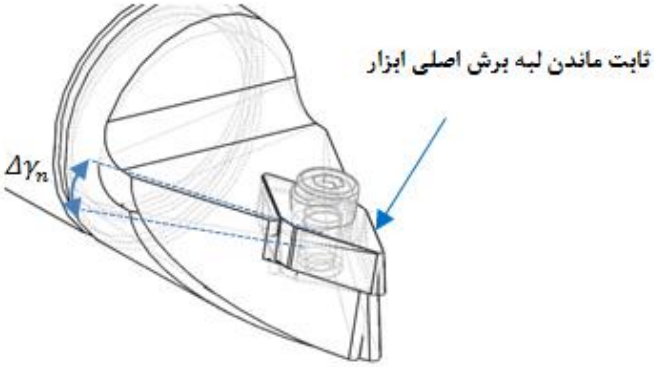
طراحی مکانیزم پیشنهادی فوق، برای نصب و بکارگیری در دستگاه تراش تبریز TN40 درنظرگرفته شده است. همچنین در فاز طراحی اجزاء، تحلیل سازه‌ای قطعات با استفاده از شبیه‌سازی با نرم‌افزار ABAQUS با هدف رسیدن به استحکام سازه‌ای معادل نگهدارنده‌های[3] متداول ابزار انجام شد. بدین منظور، ابتدا سختی دینامیکی یک نمونه نگهدارنده ابزار استاندارد به

2 Series mechanism
3 Tool holder



شکل ۳. مدل سه بعدی مکانیزم ابزارگیر (بالا)، مکانیزم درونی (پایین)

Fig.3. 3D model of the tooling mechanism (up)- inner mechanism (bottom)



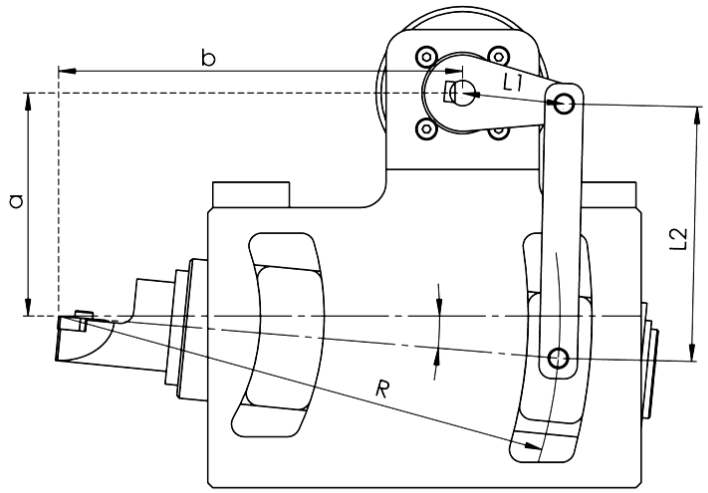
شکل ۴. ثابت ماندن لبه برش اصلی ابزار حین اعمال تغییر زاویه ابزار

Fig. 4. Keeping the main cutting edge fixed while changing the angle of the tool.

کمک شبیه‌سازی محاسبه شد و رسیدن به میزان سختی معادل آن به عنوان معیار پذیرش طراحی، مد نظر قرار گرفت. در ادامه برای محاسبه گشتاور وارده به عملگرها شبیه‌سازی سینماتیکی مکانیزم انجام شد. همچنین، برای محاسبه رابطه بین مقدار چرخش عملگر و زاویه خروجی مکانیزم از روابط هندسی استفاده شد. در شکل۵ ساختار مکانیزم چهارلینکی استفاده شده در مکانیزم ابزارگیر نشان داده شده است.

در این شکل R شعاع انحناء شیارها، L طول بازوی عملگر و α مقدار زاویه عملگر است بدین‌ترتیب زاویه تمایل پیشانی به صورت رابطه۲ محاسبه می‌شود.

$$\phi = \sin^{-1}(\frac{l_1}{R}\sin(\alpha)) \quad (۲)$$



شکل ۵. ساختار مکانیزم چهار لینکی استفاده شده در مکانیزم ابزارگیر

Fig. 5. The four-link mechanism used in the tooling mechanism.

با توجه به اینکه محدوده تغییرات زاویه، بسیار کوچک است ($2 \leq \phi \leq ۱۰$) در نتیجه می‌توان مقدار زاویه را با سینوس آن برابر گرفت.

$$\phi = \frac{l_1}{R}\alpha \qquad (۳)$$

تغییرات زاویه براده نرمال ابزار به صورت حاصل جمع برداری از زوایای تمایل جانبی و پیشانی ابزار ایجاد می‌شود. در نتیجه، برای کنترل همزمان دو محور لازم است برای رسیدن به تغییر مشخص در زاویه براده نرمال، مقدار تغییر زوایای عملگرها محاسبه شود. بدین ترتیب مقدار زاویه پیمایش عملگرها از رابطه۴ محاسبه می‌شود.

$$\gamma_n = \frac{\theta}{\sin(\psi)} = \frac{\phi}{\cos(\psi)} \qquad (۴)$$

برای انتخاب عملگر و درایور مناسب، ابتدا گشتاور وارده بر عملگرها به کمک شبیه سازی دینامیکی در محیط نرم‌افزار ADAMS محاسبه شد و سپس بر اساس گشتاور و سرعتِ تخمین زده شده، عملگرهای مناسب انتخاب گردید. با توجه به نوع عملگرها و وجود رابطه خطی بین حرکت دو عملگر و با در نظر گرفتن سرعت پایین مکانیزم، از یک برد آردوینو صنعتی به عنوان درایور عملگرها استفاده شد. در شکل۶ تصویر مکانیزم ابزارگیر ساخته شده که بر روی دستگاه تراش TN40 تبریز نصب شده است، نشان داده می‌شود.

۳- رابطه دینامیک پدیده چتر با هندسه ابزار

روش پیشنهادی برای کنترل چتر، بر مبنای اعمال تغییر زاویه ابزار در زمان بروز چتر پایه‌ریزی شده است. بدین ترتیب برای شبیه سازی نحوه ارتباط و چگونگی اعمال این تغییرات با دینامیک پدیده چتر لازم است مدل ریاضی مناسبی برای شبیه‌سازی انتخاب شود؛ به گونه‌ای که در آن اثر پارامترهای هندسی در دینامیک چتر در نظر گرفته شده باشد. بر این اساس می‌توان گفت تاثیر تغییر زاویه ابزار بر روی دینامیک برش می‌تواند از سه طریق انجام گیرد.

تاثیر اول، این است که با تغییر زاویه براده و آزاد ابزار مقدار مولفه‌های نیروی برش در راستای مماس و عمود بر جهت برش تغییر می‌کند. تاثیر دوم، این است که بر اساس تمام تئوری‌های برش شناخته شده، تغییر زاویه براده منجر به تغییر زاویه صفحه برش می‌شود. اما، سومین مکانیزم اثر که بیشترین تاثیر را در دینامیک برش دارد، مربوط به اثر میرایی فرآیندی[1] است. در مورد مکانیزم اثر اول و دوم می‌توان گفت با توجه به کوچک بودن میزان تغییرات زاویه ابزار و نیز با توجه با اینکه این تغییرات منجر به تغییر نیروی

1 Process damping

شکل ۶. مکانیزم ابزارگیر نصب شده روی دستگاه تراش TN40

Fig. 6. Tooling mechanism installed on TN40 lathe.

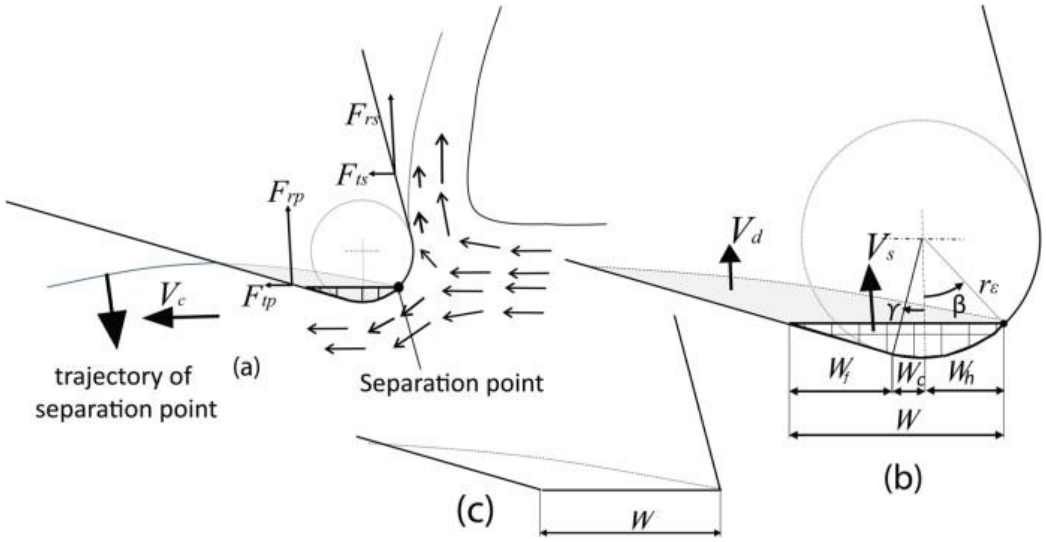
استاتیکی برش می‌شود، پس دارای ماهیت استاتیکی بوده و می‌توان از اثرات آن در شبیه سازی دینامیکی که برای ارزیابی پایداری دینامیکی فرآیند برش تهیه می‌شود، چشم پوشی کرد. اما در مورد مکانیزم اثر سوم لازم است برای مدل سازی آن از یک مدل ریاضی دقیق و کامل استفاده کرد که در ادامه، برای رسیدن به این مدل، به بررسی اثر هندسه و زوایای ابزار روی میرایی فرآیندی پرداخته می‌شود.

در پژوهش‌های حوزه ماشینکاری این موضوع شناخته شده است که میرایی فرآیندی در اثر فرورفتگی[1] و تماس سطح آزاد ابزار[2] بر روی سطح ماشینکاری شده قطعه کار به وجود می‌آید و تلفات ناشی از انرژی کرنشی حاصل از این برخورد موجب ایجاد خاصیت میرایی بسیار قوی می‌شود که نتیجه آن موجب افزایش پایداری دینامیکی فرآیند ماشینکاری در سرعت‌های پایین می‌شود[۷].

تاکنون چندین پژوهش در زمینه شناخت تاثیر میرایی فرآیندی بر روی ارتعاشات چتر انجام شده است[۷ و ۸] و مدل‌سازی‌های مختلفی نیز برای توصیف این پدیده ارائه شده است. در مرجع[۹]، به صورت ویژه به بررسی اثر پارامترهای هندسی ابزار روی میرایی فرآیندی پرداخته شد. در این پژوهش رابطه بین پارامترهایی مانند فرم هندسی سطح آزاد ابزار، شعاع نوک ابزار، مقدار زاویه آزاد با میرایی فرآیندی در فرآیند تراشکاری و فرزکاری مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در پژوهشی دیگری که توسط آلتینتاش–همکاران[۱۰] انجام شد، نتایج تحقیق نشان داد که میرایی فرآیندی ابزاری با طول ناحیه سایش‌یافته[3] به میزان ۰/۰۸ میلیمتر، چهار برابر بیشتر از ابزار با لبه تیز و سالم است.

آلتینتاش– احمدی[۱۱] در پژوهش دیگر مدل کامل‌تری برای توصیف میرایی فرآیندی ارائه کردند که در آن میرایی فرآیندی به صورت مقدار معادل با میرایی سازه‌ای در معادلات وارد می‌شود. همچنین در این مدل‌سازی اثر زاویه آزاد براده به خوبی قابل توصیف است. در مدل آلتینتاش–احمدی میرایی فرایندی به طور مستقیم به انرژی تلف شده در اثر برخورد و فرو رفتن سطح آزاد ابزار در سطح ماشینکاری شده قطعه کار وابسته شده است. در نتیجه اگر بتوان میزان این نفوذ و برخورد را محاسبه کرد، می‌توان مقدار میرایی فرآیندی را تعیین نمود. برای این کار مدل‌سازی هندسی ناحیه فرو رفتگی ابزار در قطعه کار به صورت شکل۷، تعریف شده است.

1 Indentation
2 Flank face
3 Flank wear length



شکل ۷. فرورفتگی ابزار در سطح قطعه‌کار[۱۱]

Fig. 7. Tool indentation at the workpiece surface [11].

مقدار حجم ناحیه فرورفتگی ابزار در قطعه کار از رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$V_d = b\frac{w^2.dr}{2.V_c.dt} \qquad (۵)$$

که در آن w طول ناحیه فرورفتگی است و به سه قسمت تقسیم شده است، که در آن w_h به شعاع نوک ابزار و نقطه جدایش براده از قطعه‌کار وابسته است، اما w_c و w_f به طور مستقیم به زاویه آزاد ابزار وابسته هستند و با کاهش زاویه آزاد طول ناحیه فرورفتگی افزایش خواهد یافت. در این مدل مقدار میرایی فرآیندی معادل‌شده با میرایی سازه‌ای بر اساس رابطه ۶، محاسبه می‌شود.

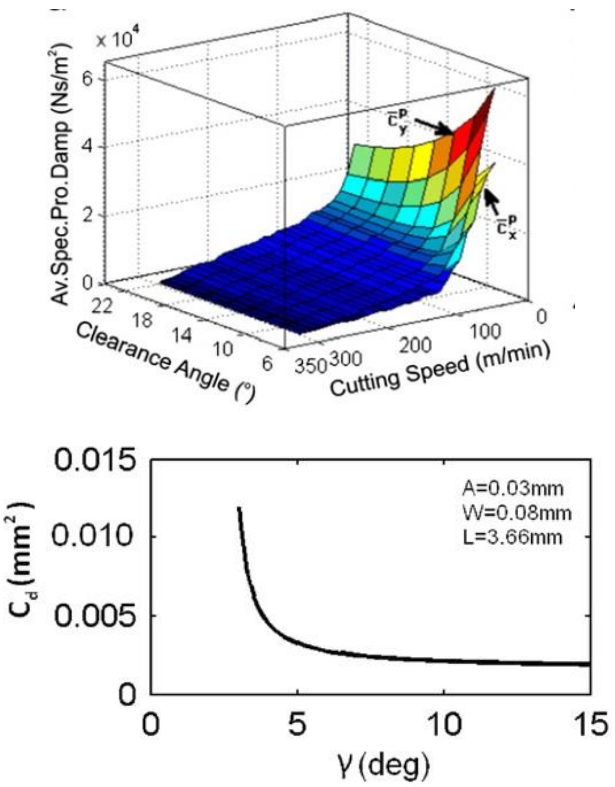
$$C_{rp} = K_{sp}\frac{b.W^2}{2.V_c} \qquad (۶)$$

در رابطه۶، W طول ناحیه فرورفتگی، K_{sp} ضریب استحکام ماده قطعه کار در مقابل فرورفتگی ابزار[1]، b عرض براده و v_c سرعت برش است. این روش مدل‌سازی که در آن مقدار میرایی فرآیندی به صورت مقدار معادل شده با میرایی سازه‌ای توصیف می‌شود، در چند پژوهش دیگر نیز برای محاسبه و مدل سازی میرایی فرآیندی استفاده شده است. در مرجع[۱۲] مقدار K_{sp} با استفاده از روش FEM محاسبه شد. همچنین مسعودپور و همکاران، با استفاده از تکنیک تحلیل سری زمانی میرایی فرآیندی معادل را محاسبه کردند[۱۳] .

به طور کلی این موضوع بخوبی شناخته شده است، که با کاهش زاویه آزاد مقدار میرایی فرآیندی افزایش می‌یابد و در پژوهش‌های مختلف نتایج تست‌های تجربی صحت این موضوع به اثبات رسیده است، در شکل۸، نتایج تست‌های تجربی دو پژوهش مرتبط ارائه می‌شود.

اهمیت میرایی فرآیندی در پژوهش حاضر از این جهت است که اساس کار روش پیشنهادی کنترل چتر بر مبنای افزایش میرایی فرآیندی به عنوان یک پارامتر کنترلی جهت جلوگیری از بروز چتر است. بدین ترتیب با توجه به مرور پژوهش‌های فوق، از روش مدل سازی آلتینتاش- احمدی و نتایج پژوهش تیلور و همکاران، برای تهیه شبیه‌سازی استفاده خواهد شد.

1 Material's specific indentation force



شکل ۸. اثر زاویه آزاد بر میرایی فرآیندی، (بالا) پژوهش تونک-بوداک [۹]،(پایین) پژوهش احمدی-اسماعیل[۱۱]

Fig. 8. Effect of clearance angle on process damping, (up) Tunc-Budak study [9]- (bottom) Ahmadi-Ismail [11]

۴- طراحی سیستم کنترل فعال چتر

به طور کلی در روش‌های کنترل فعال چتر، سه موضوع اصلی وجود دارد:

- موضوع اول روش تشخیص وقوع چتر است که در آن مساله، انتخاب حسگر و نوع تکنیک پردازش سیگنال‌های دریافتی از حسگر است.
- موضوع دوم، انتخاب پارامتر کنترلی و نوع عملگر است که از طریق آن بر دینامیک پدیده اثر گذاشته و از ادامه چتر جلوگیری می‌شود.
- موضوع سوم، روش کنترل یا منطق کنترلی است که با توجه به داده‌های حسگر، فرامین را به عملگر صادر کرده و پس از عبور از شرایط ماشینکاری ناپایدار، وضعیت سیستم را به حالت اولیه باز می‌گرداند.

۴- ۱- سیستم تشخیص بروز چتر

یکی از اصول بنیادی در روش‌های کنترل فعال چتر این است که تشخیص وقوع چتر باید به صورت همزمان و با کمترین تاخیر، انجام شود. تاکنون روش‌های زیادی برای تشخیص بروز چتر ارائه شده که از نظر نوع حسگر و نوع الگوریتم‌ها و تکنیک‌های پردازش سیگنال، از تنوع زیادی برخوردار است[۷ و ۱۴].

در مورد انتخاب حسگر با توجه به فراوانی استفاده از شتاب‌سنج در مراجع مختلف و نیز با توجه به در دسترس بودن و سهولت نصب حسگر روی ابزار، از شتاب‌سنج به عنوان حسگر سیستم تشخیص استفاده می‌شود. در شکل ۹ محل نصب حسگر روی نگهدارنده ابزار نشان داده می‌شود.

درمورد انتخاب تکنیک پردازش سیگنال می‌توان گفت، اگر بخواهیم تکنیک پردازشی مناسبی برای بکارگیری در یک سیستم کنترل فعال چتر انتخاب کنیم، مهمترین معیار، سرعت بالا در تشخیص است. از این رو، با توجه به مطالعه پژوهش‌های این حوزه، روش ارائه شده در مرجع [۱۴] مورد توجه قرار گرفت. چرا که در این تکنیک وقوع چتر در زمان کمتر از ۱ ثانیه قابل تشخیص است. در این تکنیک از روش‌های پردازش سیگنال در حوزه فرکانس استفاده شده و معیار بروز چتر چند برابر شدن حداکثر مقدار تبدیل فوریه و یا چگالی طیفی در هر مرحله نسبت به مرحله قبلی پردازش است.

شکل ۹.محل نصب حسگر شتاب‌سنج روی نگهدارنده ابزار

Fig. 9. Accelerometer sensor installation on tool holder.

۴- ۲- طراحی الگوریتم کنترل فعال چتر

سیستم کنترل فعال چتر پیشنهادی، مبتنی بر "تغییر زاویه ابزار" به کمک مکانیزم ابزارگیر پایه‌گذاری شده است. بدین صورت که وقتی بروز چتر توسط سیستم تشخیص وقوع چتر به کنترلر اعلام می‌شود، کنترلر به مکانیزم ابزارگیر (که نقش عملگر را در سیستم کنترل دارد) فرمان تغییر زاویه ابزار را ارسال می‌کند. سپس در صورتی که ارتعاشات ابزار کاهش پیدا کند و چتر برطرف شود، کنترلر فرمان بازگشت زاویه ابزار را به حالت عادی ارسال خواهد کرد.

در ادامه، برای طراحی دقیق کنترلر، ابتدا لازم بود شبیه‌سازی دینامیکی سیستم انجام شود و الگوریتم‌های مختلف کنترلی برای پایدارسازی فرآیند بررسی شوند. از این رو شبیه‌سازی در محیط MATLAB-Simulink و با استفاده از مدل آلتینتاش- احمدی[۱۵] انجام خواهد شد. در این مدل (روابط ۷ تا ۱۰)، میرایی فرآیندی به صورت معادل شده با میرایی سازه‌ای در نظر گرفته می‌شود.

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx=F_x(t) \tag{۷}$$

$$F_x(t)=a.k_f[h_0-x(t)+x(t-\tau)]-F_{pd} \tag{۸}$$

$$F_{pd}=C_{eq}.\dot{x} \tag{۹}$$

$$C_{eq}=\frac{C_0}{1+\gamma^n} \tag{۱۰}$$

در روابط فوق، F_{pd} نیروی میرایی فرآیندی و C_{eq} ضریب میرایی ویسکوز معادل شده با میرایی فرآیندی است. همچنین رابطه ۱۰، براساس نتایج مرجع [۱۱] برای مدل‌سازی اثر تغییر زاویه آزاد روی میرایی فرآیندی در نظر گرفته شده است. در ضمن، با توجه به رابطه عرض براده بحرانی b_{lim} و همچنین ثابت فرض کردن میرایی سازه‌ای می‌توان نوشت:

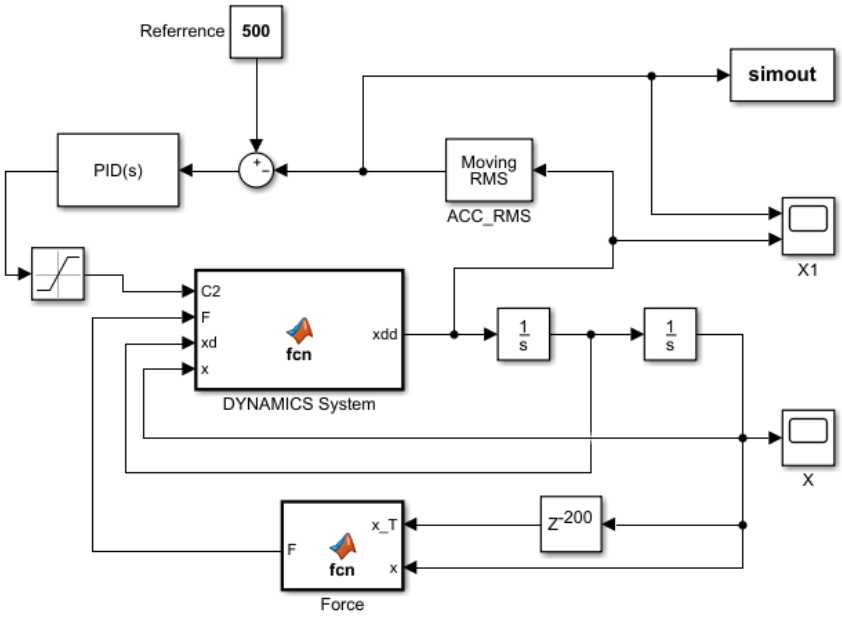
$$b_{\lim}=\frac{1}{2.k_f.\mathrm{Re}[G(\omega)]} \tag{۱۱}$$

$$\mathrm{Re}[G(\omega)]=\frac{1}{4.k.\zeta_t} \tag{۱۲}$$

$$b_{\lim}=-\frac{2.k.\zeta_t}{k_f} \tag{۱۳}$$

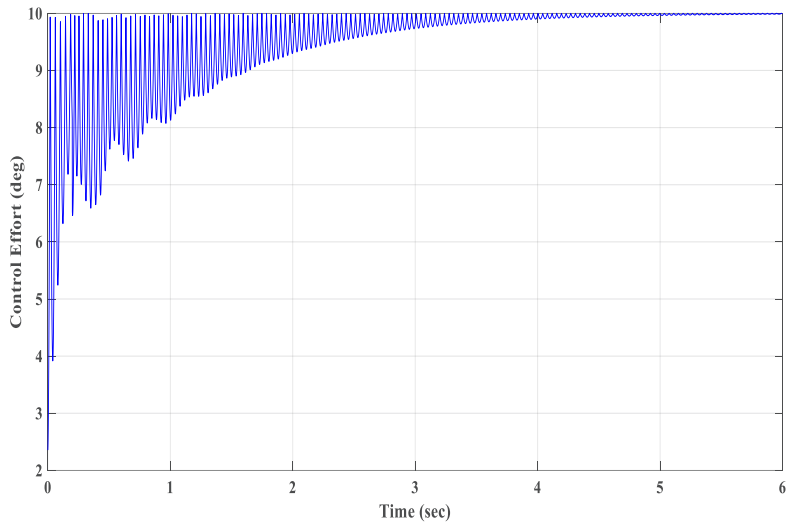
با توجه به وجود رابطه مستقیم میان زاویه آزاد ابزار و میرایی فرآیندی به راحتی می‌توان از طریق تغییر در زاویه ابزار بر دینامیک پدیده چتر تاثیر گذاشت. بدین ترتیب، ساختار کلی سیستم کنترل فعال چتر پیشنهادی بر اساس نمودار بلوکی شکل۱۰، ارائه و پیاده‌سازی شده است.

در این ساختار کنترلی با اندازه‌گیری سطح دامنه سیگنال توسط حسگر شتاب‌سنج، وضعیت سیستم بررسی می‌شود. منطق استفاده شده در ساختار کنترلی پیشنهادی به این صورت است که زمانی که دامنه شتاب اندازه‌گیری شده توسط شتاب‌سنج بیشتر از حد مجاز شود، کنترلر فعال می‌شود و برای بازگرداندن سطح شتاب به محدوده مجاز، فرمان تغییر زاویه را به عملگر



شکل ۱۰. بلوک دیاگرام سیستم مهار چتر پیشنهادی

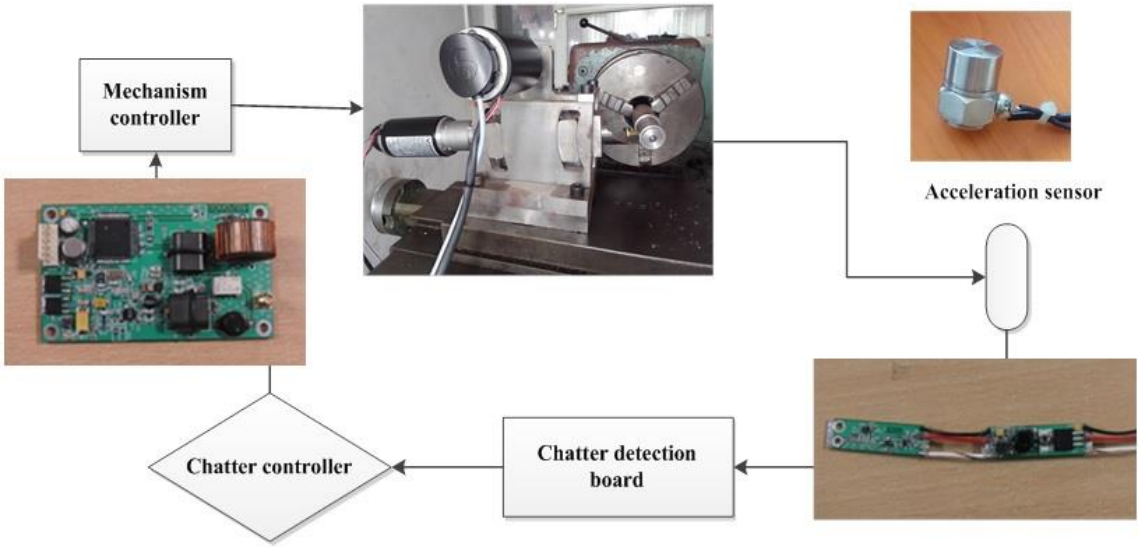
Fig. 10. Block diagram of the proposed chatter suppression system.



شکل ۱۱. نمودار تلاش کنترلی (فرمان ارسال شده به عملگر مکانیزم ابزارگیر)

Fig. 11. Controller effort graph (controller command to actuator).

کنترلی (که در اینجا همان مکانیزم ابزارگیر است) صادر می‌کند. بدین ترتیب، هر میزان سطح دامنه شتاب از مقدار مجاز بیشتر باشد، فرمان شدیدتری به عملگر کنترلی صادر می‌شود. اما از آنجایی که سرعت مکانیزم ابزارگیر در اجرای فرمان و ایجاد تغییر زاویه نسبتا کند است (۴ درجه بر ثانیه) و از طرفی سرعت رشد دامنه ارتعاشات در شرایط بروز چتر، بسیار زیاد است، در نتیجه خیلی زود فرمان اعمال حداکثر زاویه به عملگر ارسال می‌شود. برای طراحی کنترلر می‌توان از روش‌های مختلفی نظیر کنترلر PID، کنترلر دو وضعیتی و ... استفاده کرد. در شکل۱۱ فرمان ارسال شده از کنترلر PID به عملگر مکانیزم ابزارگیر در حالت بروز چتر نشان داده شده است.



شکل ۱۲. اجزا سیستم کنترل چتر پیاده‌سازی شده

Fig. 12. Parts of the implemented chatter suppression system.

در ادامه، یک کنترلر دو وضعیتی یا کنترلر on/off نیز در محیط شبیه سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد. منطق کنترلی در این حالت، بدین گونه است که، هر زمان سیستم تشخیص "وضعیت چتر" را اعلام کرد، کنترلر عملگر را در وضعیت "on" که معادل بیشترین مقدار میرایی یا همان زاویه آزاد کمینه است، قرار می‌دهد. سپس در صورتی که سیستم تشخیص "وضعیت عادی" را گزارش کند، کنترلر نیز عملگر را به وضعیت "off" باز می‌گرداند.

نتایج شبیه‌سازی دلالت بر این دارد که در عمل، تفاوت چندانی میان دو روش کنترلی (کنترلر PID و کنترلر دو وضعیتی) وجود نخواهد داشت. این امر به دو دلیل اتفاق می‌افتد: اولاً اینکه زمان تشخیص چتر با تقریباً ۱ ثانیه تاخیر همراه است (این تاخیر به علت فرآیندهای پردازشی است)، ثانیاً سرعت رشد دامنه ارتعاشات در مقابل پاسخ زمانی عملگر کنترلی سیستم (که معادل سرعت زاویه‌ای مکانیزم ابزارگیر است) بسیار سریع است. از این رو، رفتار کنترلر PIDدر مهار چتر همانند کنترلر on/off خواهد بود و پس از مدت زمان کوتاهی بعد از تشخیص بروز چتر، فرمان اعمال حداکثر میرایی به عملگر کنترلی اعمال می‌شود. بر اساس توضیحات فوق، با توجه به اینکه پیاده‌سازی کنترلر on/off از نظر سخت‌افزاری ساده‌تر و ارزان‌تر است، از این روش کنترلی برای پیاده سازی عملی سیستم کنترل فعال چتر پیشنهادی استفاده می‌شود.

۵- آزمون‌های تجربی

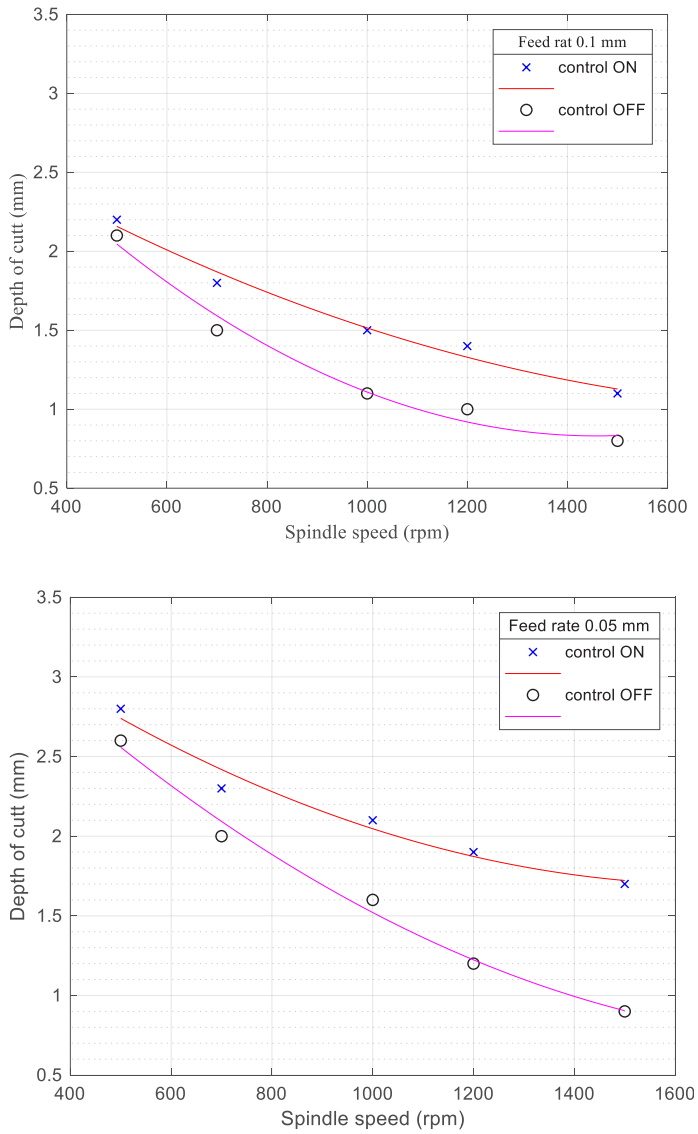
برای ارزیابی عملکرد و کارایی سیستم کنترل چتر پیشنهادی، یک سری آزمون‌های تجربی طرح‌ریزی و اجرا شده است. در این آزمون‌ها برای نزدیک شدن به شرایط ماشینکاری ناپایدار و بروز چتر، از یک قطعه کار مخروطی از جنس فولاد استفاده می‌شود. سپس برای نشان دادن میزان تاثیر سیستم کنترل چتر، هر یک از آزمون‌ها، در دو حالت عادی و حالت فعال بودن سیستم کنترل انجام می‌گیرد. شرایط مختلف ماشینکاری در آزمون‌ها با تغییر پارامترهای سرعت اسپیندل و نرخ پیشروی در نظر گرفته می‌شود. در جدول۲ شرایط ماشینکاری، مشخصات ابزار و قطعه کار استفاده شده، ارائه می‌شود. در شکل۱۲ اجزا سیستم کنترل چتر پیشنهادی مشاهده می‌شود.

در شکل۱۳ نتایج آزمون‌های انجام شده، در قالب نمودارهای عمق براده بحرانی بر حسب سرعت دورانی، ارائه شده است.

جدول ۱. شرایط آزمون‌های عملی

Table 1. Experimental test condition.

مشخصات ابزار	DNMG-150608
مشخصات قطعه کار	جنس قطعه: فولاد ساختمانی ST37 قطر: 25 mm طول: 200 mm زاویه مخروط: 200 deg
پارامترهای ماشینکاری	محدوده سرعت اسپیندل (rpm) 500-700-1000-1200-1500 سرعت پیشروی (mm/rev) 0.05 - 0.1



شکل ۱۳. نتایج آزمون‌های عملی در قالب نمودار عرض براده بحرانی

Fig. 13. The results of experimental tests in form of a critical chip width diagram.

نتایج بدست آمده از آزمون‌های عملی نشان می‌دهد، زمانی که از سیستم کنترل فعال چتر استفاده می‌شود، عرض براده بحرانی به میزان قابل توجهی می‌تواند افزایش یابد. البته عملکرد سیستم در مهار چتر با اندکی تاخیر همراه است که این امر می‌تواند با افزایش سرعت مکانیزم ابزارگیر برطرف شود.

۶- جمع‌بندی

در پژوهش حاضر، یک مکانیزم ابزارگیر دو درجه آزادی برای دستگاه تراش ارائه شد که قابلیت تنظیم زاویه آزاد و براده حقیقی یا نرمال ابزار را در حین انجام فرآیند تراشکاری فراهم می‌سازد. سپس از این مکانیزم برای توسعه یک تکنیک مهار/کنترل فعال چتر در فرآیند تراشکاری استفاده شد. ویژگی‌های اساسی روش پیشنهادی برای مهار چتر، در مقایسه با دیگر روش‌های شناخته شده‌ی مهار چتر در تراشکاری، به شرح زیر هستند.

- در تکنیک پیشنهادی، پارامتر کنترلی برای تاثیرگذاری بر دینامیک پدیده چتر، زاویه آزاد ابزار است. تغییر در این پارامتر تاثیری بر نرخ براده‌برداری ندارد. از این رو در مقایسه با دیگر روش‌ها مانند کنترل سرعت اسپیندل[1] یا کنترل نرخ پیشروی، روش پیشنهادی این مزیت را دارد که بکارگیری آن موجب کاهش نرخ براده‌برداری نمی‌شود.
- در مکانیزم پیشنهادی از دو سروموتور با توان مصرفی پایین استفاده شده است. از این رو در مقایسه با روش‌هایی مانند ماشینکاری ارتعاشی[2] که توان مصرفی بالایی دارند، دارای مزیت قابل توجهی است.
- برای نصب سیستم مهار چتر پیشنهادی بر روی دستگاه تراش، تنها کافی است مکانیزم ابزارگیر دستگاه تعویض شود و نیازی به هیچ‌گونه ارتباط الکتریکی یا تبادل اطلاعات با سیستم کنترل اصلی دستگاه نیست. بدین ترتیب می‌توان گفت، پیاده‌سازی آن نسبت به دیگر روش‌ها مانند سیستم کنترل سرعت اسپیندل (که نیازمند تغییر در سیستم درایو اسپیندل و ارتباط با کنترلر اصلی نرم افزار دستگاه است)، بسیار ساده‌تر خواهد بود.
- ساختار کلی مکانیزم پیشنهادی نسبتاً ساده است و در آن از قطعات گران مانند سروموتورهای توان بالا استفاده نشده است. همچنین سیستم تشخیص بروز چتر و کنترلر on/off نیز در بستر سخت‌افزاری ارزان قیمت قابل پیاده‌سازی است. لذا، هزینه‌ی ساخت و پیاده‌سازی این روش در مقایسه با دیگر روش‌ها کمتر خواهد بود.
- در خصوص معایب و مشکلات روش پیشنهادی همان طور که گفته شد، تاخیر زمانی بین بروز چتر و رسیدن به زاویه آزاد کمینه (که منجر به مهار چتر می‌شود) وجود دارد. این امر می‌تواند با بهینه‌سازی مکانیزم و افزایش سرعت زاویه‌ای مکانیزم ابزارگیر جبران شود.
- مشکل احتمالی دیگر در روش پیشنهادی این است که کاهش زاویه آزاد ابزار می‌تواند منجر به افزایش نرخ سایش پشت ابزار و در نتیجه کاهش عمر ابزار شود. در این خصوص لازم به توجه است، از آنجایی که زاویه آزاد ابزار بلافاصله پس از برطرف شدن چتر، به حالت عادی و مقدار استاندارد باز می‌گردد، این موضوع نمی‌تواند زیاد نگران‌کننده باشد.

در پایان لازم به ذکر است، قابلیت‌های مکانیزم پیشنهادی در تنظیم زاویه براده و آزاد ابزار به صورت همزمان با انجام فرآیند ماشینکاری، می‌تواند در زمینه بهینه‌سازی فرآیند ماشینکاری کاربردهای زیادی داشته باشد. به عنوان مثال می‌توان برای ماشین‌کاری فلزات با جنس‌های مختلف، مقدار زاویه براده بهینه را با توجه به جنس قطعه کار تنظیم کرد؛ بدون اینکه ابزار برش در دستگاه تعویض شود. همچنین از این مکانیزم می‌توان در زمینه آموزش دروس ابزارشناسی و توانایی ماشینکاری برای نشان دادن تاثیر زوایای ابزار بر روی مکانیک برش استفاده کرد.

1 Variable Spindle Speed (VSS)
2 Vibration Cutting

منابع

[1] L.T. Tunc, Y. Budak, Effect of cutting conditions and tool geometry on process damping in machining, International Journal of Machine Tools & Manufacture 57 (2012) 10–19.

[2] Geoffrey Boothroyd, Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools , CRC Press)1988).

[3] S. Kaldor, A. Ber, A criterion to optimize cutting tool geometry, Annals of the CIRP 39 (1) (1990) 53–56.

[4] X.D. Fang, S.M.R. Najmossadat, Mechanical design of a new tooling mechanism with on-line controllability of inclination angle, International Journal of Machine Tools and Manufacture 36 (1) (1996) 103–113.

[5] X.D. Fang, N.J. Lee, International Journal of Machine Tools & Manufacture 41 (2001) 89–101.

[6] Z. Mei, S. Yang, H. Shi, S. Chang, K.F. Ehman, Active chatter suppression by on-line variation of rake and clearance angle in turning principle and experimental investigation, International Journal of Machine Tools & Manufacture 4 (1994) 981–990.

[7] M. Siddhpura, R. Paurobally, A review of chatter vibration research in turning, International Journal of Machine Tools & Manufacture 61 (2012) 27–47.

[8] J. Munoa, X. Beudaert, Z. Dombovari, Y. Altintas, E. Budak, C. Brecher, G. Stepan, Chatter suppression techniques in metal cutting, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 65 (2016):785–808.

[9] L.T. Tunc, E. Budak, Effect of cutting conditions and tool geometry on process damping in machining, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 57 (2012) 10–19.

[10] Y. Altintas, M. Eynian, H. Onozuka, Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping, Annals of the CIRP 57/1 (2008) 371–374.

[11] K. Ahmadi, F. Ismail, Analytical stability lobes including nonlinear process damping effect on machining chatter, International Journal of Machine Tools & Manufacture 51 (2011) 296–308.

[12] X. Jin, Y. Altintas, Chatter Stability Model of Micro-Milling With Process Damping, ASME J. Manuf. Sci. Eng., 135(3), p. 031011(2013).

[13] M. Pour, A. Aliabadi, S. Rahman nia, Identifying process damping of turning process using time series analysis, journal of structural and fluid dynamic, Vol. 5, No. 4, 2016 (in Persian).

[14] M.C. Yesilli, F.A. Khasawneh, A. Otto, Chatter detection in turning using machine learning and similarity measures of time series via dynamic time warping, journal of manufacturing processes, 77(2022).

[15] M. Khalili Geshnigani, M. Rafeeyan and M. M. Abootorabi, The new approach to practical predicting and controlling the chatter phenomenon in the internal turning process, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 5, No. 4, pp. 56-73, 2019 (in Persian).

[16] K. Ahmadi, Y. Altintas, Identification of Machining Process Damping Using Output-Only Modal Analysis. ASME Journal of Manufacturing Science & Engineering 136(5) (2014). 051017-051017-13.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Behrouz, H. Baseri, H. Nourmohamdi, Chatter Suppression in turning by applying a tooling mechanism with the ability to change the tool angles, Amirkabir J. Mech Eng., 55(4) (2023) 461-474.

DOI: 10.22060/mej.2023.5172.7490