



طراحی و شبیه سازی میراکننده سیال مغناطیسی و بررسی تجربی تأثیر آن بر ارتعاشات ابزار در عملیات برش

محسن امامی^{1*}، وحید حسن نسب²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء بهبهان، بهبهان

2- دانش‌آموخته کارشناس ارشد مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز

* بهبهان، صندوق پستی 47189-63616، dr.emami@bkatu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

ارتعاشات چتر یکی از پدیده‌های نامطلوب در فرایندهای ماشین‌کاری به شمار می‌آید. وقوع چتر در براده‌برداری معمولاً سبب ایجاد سر و صدای شدید، کاهش کیفیت سطح قطعه‌کار، کاهش عمر ابزار، و کاهش قابل ملاحظه در راندمان ماشین‌کاری می‌گردد. از این رو توسعه روش‌های مناسب که باعث افزایش پایداری و همچنین بهبود عملکرد برش شود، برای کاهش ارتعاشات ابزار در فرایندهای ماشین‌کاری ضروری است. میراکننده‌های سیال مغناطیسی از جمله تجهیزاتی هستند که با هدف استهلاک انرژی ارتعاشات در صنایع مختلف توسعه داده شده‌اند و توانایی بالقوه‌ای جهت بکارگیری در فرایندهای ماشین‌کاری دارند. در این پژوهش، یک میراکننده سیال مغناطیسی حاوی نانوذرات Fe_2O_3 به منظور میرا کردن ارتعاشات چتر در عملیات برشکاری، طراحی و ساخته می‌شود. سپس میراکننده ساخته شده به طور تجربی در عملیات برشکاری نمونه قطعه‌کارهای فولادی، تست می‌گردد. در آزمایش‌های تجربی این پژوهش، ارتعاشات ابزار در حالت‌های با میراکننده و بدون میراکننده، با اندازه‌گیری سیگنال شتاب ابزار ارزیابی و مقایسه می‌شود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با استفاده از میراکننده سیال مغناطیسی، ارتعاشات ابزار به ویژه در حالت‌های وقوع چتر به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 19 خرداد 1399
داوری اولیه: 2 شهریور 1399
پذیرش: 6 آبان 1399

کلیدواژگان:

برشکاری
میراکننده سیال مغناطیسی
ارتعاشات ابزار

Design and Simulation of Magneto-Rheological (MR) Fluid Damper and Experimental Study of its Effect on Tool Vibrations in Cut-off Operation

Mohsen Emami^{1*}, Vahid Hasan Nasab²

1- Department of Mechanical Engineering, Behbahan Khatam Alanbia University of Technology, Behbahan, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

* P.O.B. 63616-47189 Behbahan, Iran, dr.emami@bkatu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 8 January 2020
First Decision: 23 August 2020
Accepted: 27 October 2020

Keywords:

Cut-off Turning
Magneto-Rheological (MR) Damper
Tool Vibrations

Abstract

Chatter vibration is one of the undesirable phenomena in machining processes. The chatter in metal cutting typically causes severe noise, reduced workpiece surface quality, reduced tool life, and a significant reduction in machining efficiency. Therefore, developing suitable methods that increase stability and improve cutting performance is necessary to control tool vibrations in machining processes. Magneto-Rheological (MR) fluid damper is among the equipment developed to dissipate vibration energy in various industries and has the potential to be used in machining processes. In this study, an MR fluid damper containing Fe_2O_3 nanoparticles is designed and fabricated to dampen the chatter vibrations during the cut-off turning process. The fabricated damper is then experimentally tested in the cut-off turning operation of steel work samples. In the empirical experiments of this research, the tool vibration in damped and non-damped modes is evaluated and compared through measuring the tool acceleration signals. The obtained results show that by using the MR fluid damper, the tool vibrations are significantly reduced, especially in the case of chatter occurrence.

1- مقدمه

و قطعه‌کار انجام می‌شود، مجموعه ابزار و قطعه‌کار یک سیستم دینامیکی را تشکیل می‌دهند. گاهی اوقات در فرایند ماشین‌کاری یک آشفتگی اولیه رخ داده و در آن حرکت ابزار یا قطعه‌کار با حرکات نوسانی (ارتعاشی) توأم می‌شود. در این حالت با ایجاد ناپایداری در برش، ضخامت براده تغییر شکل نیافته نیز در اثر ارتعاشات تغییر کرده و یک ضخامت براده موجی شکل بوجود می‌آید که به طور دینامیکی بر نیروهای برش تأثیر می‌گذارد. تغییر نیروهای برش به نوبه خود بر دامنه ارتعاشات اثر

ماشین‌کاری یک فرایند براده‌برداری محسوب می‌شود که در آن با استفاده از یک ابزار سخت از قطعه‌کار دارای جنس نرم‌تر، براده جدا می‌شود. از جمله مهم‌ترین فرایندهای ماشین‌کاری می‌توان به تراشکاری، فرزکاری، سوراخکاری، و سنگ‌زنی اشاره کرد. در این فرایندها با نفوذ ابزار به درون قطعه‌کار، براده با مکانیزم برش (تغییر شکل پلاستیک شدید) از ماده قطعه‌کار جدا می‌شود. از آنجا که عملیات برش بواسطه وجود نیروهای مکانیکی بین ابزار

Please cite this article using:

M. Emami, V. Hasan Nasab, Experimental Investigation of the Effects of Magneto-Rheological (MR) Fluid Damper on Tool Vibrations in Cut-off Operation, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 12, pp. 24-36, 2021 (in Persian)

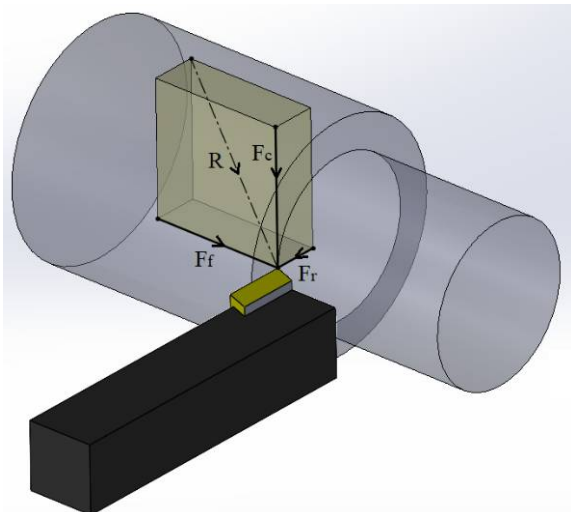
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

گذاشته و آن را افزایش می‌دهد و پدیده‌ای را بوجود می‌آورد که به چتر خودتحریک¹ معروف است [1، 2]. چتر خود تحریک در فرایندهای ماشین کاری به طور مستقیم بر دقت ابعادی و کیفیت سطح قطعه کار و همچنین بر نرخ براده برداری تأثیر منفی می‌گذارد [1]. ارتعاشات بیش از حد در فرایندهای ماشین کاری، سبب افزایش سایش ابزار، کاهش راندمان براده برداری، کاهش صافی سطح قطعه کار، و آسیب به یاتاقان‌های ماشین ابزار می‌شود [2، 3]. با توجه به اهمیت موضوع ارتعاشات چتر و لزوم ارائه راه کارهایی جهت جلوگیری از رخ دادن یا کاهش اثرات مخرب حاصل از آن، تاکنون پژوهش‌های مختلفی در این رابطه انجام شده است. از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به کنترل فعال، غیر فعال و نیمه فعال چتر جهت میرا کردن ارتعاشات ابزار یا قطعه کار اشاره کرد [4].

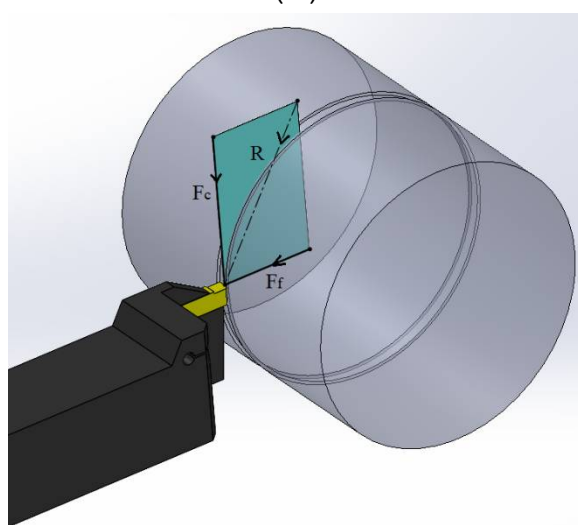
میراکننده‌های سیال مغناطیسی از جمله میراکننده‌هایی هستند که معمولاً به روش‌های غیر فعال یا نیمه فعال جهت کاهش دامنه ارتعاشات سیستم‌های مکانیکی استفاده می‌شوند و تاکنون در کنترل ارتعاشات سازه‌های عمرانی، ماشین‌های لباسشویی، و اتومبیل‌ها کاربرد داشته‌اند. این میراکننده‌ها به دلیل سادگی، مصرف کم انرژی، مقیاس پذیری و توانایی دستیابی به پاسخ‌های کوتاه مدت، پتانسیل بالقوه‌ای برای کاربرد در فرایندهای ماشین کاری دارند [5، 6]. ساتیانارایانان و همکاران [7] بهبود احتمالی قابلیت میرایی چتر در ابزارهای داخل تراشی با استفاده از میراکننده سیال مغناطیسی را بررسی کردند و دریافتند که بکارگیری این نوع میراکننده امکان وقوع چتر را کاهش می‌دهد و پایداری عملیات داخل تراشی را بهبود می‌بخشد. موهان و ناتاراجان [8] از یک میراکننده سیال مغناطیسی در فرایند داخل تراشی استفاده نمودند و با اندازه‌گیری تجربی ارتعاشات ابزار و زبری سطح قطعه کار در تست‌های مختلف به این نتیجه رسیدند که میراکننده سیال مغناطیسی می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای ارتعاشات ابزار و زبری سطح قطعه کار را کاهش دهد. می و همکاران [9] یک میراکننده سیال مغناطیسی با قابلیت اعمال شدت جریان وابسته به زمان برای فرایند داخل تراشی طراحی نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که اعمال شدت جریان متغیر (با امواج مربعی) در میراکننده سبب ایجاد فرکانس طبیعی متغیر در سیستم شده و می‌تواند به طور مؤثرتری ارتعاشات چتر را میرا کند. می و همکاران [10] برای ابزار داخل تراشی با استفاده از روش اجزای محدود یک میراکننده سیال مغناطیسی طراحی و به صورت

تجربی تست کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که با تنظیم میرایی و فرکانس طبیعی سیستم، می‌توان ارتعاشات چتر را به طور قابل توجهی فرو نشاند. پاول و همکاران [11] تأثیر میراکننده سیال مغناطیسی را بر ارتعاشات ابزار در فرایند فرزکاری بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که با استفاده از میراکننده سیال مغناطیسی، ارتعاشات ابزار فرز کاهش پیدا کرده، صافی سطح بهبود یافته، و نیروهای ماشین کاری و سایش ابزار کاهش می‌یابد. پاول و همکاران [12] جهت کنترل ارتعاشات ابزار در عملیات روتراشی فولاد سخت کاری شده AISI 4340 از یک میراکننده سیال مغناطیسی استفاده کردند. همچنین با استفاده از سیگنال‌های انتشار صوتی² ارتعاشات ابزار را پایش نمودند. پژوهش آنها نشان داد که وجود میراکننده سیال مغناطیسی در هنگام تراشکاری سخت باعث کاهش ارتعاشات ابزار می‌شود و بین ارتعاشات ابزار و سیگنال‌های انتشار صوتی ارتباطی قوی برای پایش وضعیت ابزار وجود دارد. در پژوهشی دیگر پاول و همکاران [13] از میراکننده سیال مغناطیسی در عملیات روتراشی فرایند تراشکاری استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود ابزارگیر تراش را در دو حالت با و بدون میراکننده به صورت استاتیکی و دینامیکی آنالیز کردند. نتایج آنها نشان داد که وجود میراکننده سبب افزایش فرکانس طبیعی ابزار می‌شود. همچنین آزمایش‌های تجربی آنها نشان داد که با استفاده از میراکننده سیال مغناطیسی، ارتعاشات ابزار برش کاهش یافته و عملکرد براده برداری به طور مؤثری بهبود می‌یابد. پاول و همکاران [14] با استفاده از روابط تحلیلی و آزمایش‌های تجربی تأثیر پارامترهای برش را بر ارتعاشات ابزار کنترل شده با سیال مغناطیسی برای فرایند تراشکاری بررسی نمودند. در آن پژوهش با استفاده از یک مدل ریاضی، دامنه ارتعاش ابزار و ضخامت براده محاسبه شد. تست‌های آنها نشان داد که استفاده از میراکننده سیال مغناطیسی ارتعاش ابزار را در عملیات روتراشی به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. همچنین بین نتایج روش تحلیلی و نتایج تجربی آنها مطابقت خوبی وجود داشت. کیشور و همکاران [15] جهت کنترل ارتعاشات ابزار در فرایند تراشکاری، یک میراکننده سیال مغناطیسی را طراحی و استفاده نمودند. در آن پژوهش جهت بررسی و نمایش توزیع چگالی شار مغناطیسی در میراکننده، از شبیه‌سازی المان محدود استفاده شد. نتایج آنها نشان داد که استفاده از میراکننده سیال مغناطیسی می‌تواند ارتعاشات ابزار را کاهش دهد و راندمان ماشین کاری را از نظر

² Acoustic Emission (AE)¹ Self-excited chatter



(الف)



(ب)

Fig. 1 (a) Straight turning operation forces, (b) Slotting/Cut off operation forces

شکل 1 الف) نیروهای عملیات روتراشی و ب) نیروهای عملیات شیارتراشی یا برش

با توجه به مقدمه بالا در این پژوهش ابتدا یک میراکننده سیال مغناطیسی جهت بکارگیری در عملیات‌های شیارزنی یا برش، طراحی و مدل‌سازی می‌شود. در فرایند طراحی این میراکننده با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود، توزیع چگالی شار مغناطیسی در محفظه سیال میراکننده ارزیابی می‌شود. در این شبیه‌سازی تأثیر جنس ماده بدنه محفظه سیال میراکننده بر چگالی شار مغناطیسی بوجود آمده در آن بررسی شده و جنس مطلوب انتخاب می‌گردد. میراکننده پس از طراحی، ساخته شده و جهت ارزیابی عملکرد آن در عملیات برشکاری، به طور تجربی تست می‌گردد. در آزمایش‌های تجربی این پژوهش با استفاده از شاخص‌هایی چون سیگنال شتاب ابزار، انحراف معیار داده‌های شتاب ابزار، و نمودار FFT، قابلیت ماشین‌کاری در دو حالت با میراکننده و بدون میراکننده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

صافی سطح قطعه‌کار، سایش ابزار، و نیروهای براده‌برداری بهبود بخشد. بررسی پژوهش‌های انجام شده در زمینه بکارگیری میراکننده سیال مغناطیسی در فرایند تراشکاری [12-15]، نشان می‌دهد که هدف از استفاده از میراکننده در آنها برای عملیات روتراشی بوده است. در حالی که نیاز مبرمی به طراحی میراکننده برای سایر عملیات‌های تراشکاری از جمله شیارزنی یا برش نیز وجود دارد. لازم به ذکر است طراحی میراکننده برای هر عملیات باید متناسب با راستای نیروهای موجود در آن عملیات صورت پذیرد. ویژگی که عملیات‌های شیارزنی یا برش دارند این است که در آنها نیروی اصلی برش که ایجاد ارتعاش می‌کند تنها در یک راستا وجود دارد و لذا فقط یک میراکننده برای آنها کافی است. در حالی که در عملیات روتراشی نیروی برش و نیروی پیشروی هر دو ایجاد ارتعاش می‌کنند و از این رو تعداد دو میراکننده برای آن نیاز است. با این وجود این موضوع در تحقیقات گذشته چندان مورد توجه قرار نگرفته است. در شکل 1 تفاوت نیروها در دو عملیات روتراشی و شیارتراشی (برش) نمایش داده شده است. در عملیات روتراشی که در شکل 1-الف نشان داده شده است، در مجموع سه نیروی ماشین‌کاری وجود دارد که عبارتند از 1- نیروی برش (F_c) ، 2- نیروی پیشروی (F_f) و 3- نیروی شعاعی (F_r) ، به طوری که R برآیند این نیروهاست. در این عملیات در راستای دو نیروی برش و پیشروی میزان ارتعاشات ابزار قابل توجه است زیرا صلبیت ابزار در این راستاها کمتر است. در حالی که در راستای محور ابزار، صلبیت ابزار بیشتر و ارتعاشات آن بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است. از این رو ایده آل این است که دو عدد میراکننده برای عملیات روتراشی طراحی شود. اما در عملیات شیارتراشی یا برش (شکل 1-ب) در مجموع دو نیروی برش (F_c) و پیشروی (F_f) وجود دارد (R برآیند این نیروهاست). در اینجا نیروی شعاعی (F_r) همان نیروی پیشروی (F_f) است و حذف می‌گردد. در این عملیات ارتعاشات ابزار فقط در راستای نیروی برش (F_c) قابل ملاحظه است و لذا نصب یک میراکننده در این راستا کافی می‌باشد.

از طرف دیگر در پژوهش‌های پیشین در رابطه با بکارگیری میراکننده سیال مغناطیسی در تراشکاری، کمتر به بررسی تأثیر مؤلفه‌های طراحی بر شدت چگالی شار مغناطیسی بوجود آمده در میراکننده پرداخته شده است. از جمله اینکه در تمام مقالات [12-15]، از فولاد زنگ نزن AISI 410 آنیل شده جهت ساخت محفظه سیال میراکننده استفاده شده است. در حالی که می‌توان تأثیر استفاده از سایر مواد مهندسی بر شدت میدان ایجاد شده در میراکننده را نیز بررسی نمود.

2- تئوری

1-2- میدان مغناطیسی

هنگامی که جریان الکتریکی از یک سیم پیچ عبور می‌کند، یک میدان مغناطیسی در اطراف آن القا می‌شود. با توجه به قانون ماکسول - آمپر، شدت میدان مغناطیسی $H(A/m)$ ، از رابطه (1) حاصل می‌شود:

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

به طوریکه $J(A/m^2)$ چگالی جریان است. همچنین، چگالی شار مغناطیسی $B(A/m)$ را می‌توان از رابطه (2) بدست آورد:

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (2)$$

واحد چگالی شار مغناطیسی تسلا T نیز می‌باشد. در رابطه (2) μ_0 نفوذپذیری فضای آزاد و μ_r نفوذپذیری نسبی مواد است. در صورت عبور میدان از یک محیط، ضریب نفوذپذیری نسبی آن محیط بر چگالی شار مغناطیسی تأثیر می‌گذارد. با رسم مقادیر چگالی شار مغناطیسی (B) بر حسب شدت میدان (H) می‌توان یک مجموعه منحنی تولید کرد که به عنوان منحنی مغناطیس شونده یا منحنی‌های $B-H$ شناخته می‌شوند. این منحنی چگونگی تغییرات تراوایی مغناطیسی یک ماده را با چگالی شار مشخص می‌کند.

3- طراحی و ساخت میراکننده سیال مغناطیسی

1-3- طراحی قطعات

در این بخش ابتدا قطعات یک میراکننده سیال مغناطیسی جهت کاربرد در عملیات شیارتراشی یا برش تراشکاری، طراحی و ساخته می‌شود. شکل 2 نمای برش دو بعدی و شماره اجزای این میراکننده که در نرم افزار سالیدورکس¹ ترسیم شده است را نشان می‌دهد.

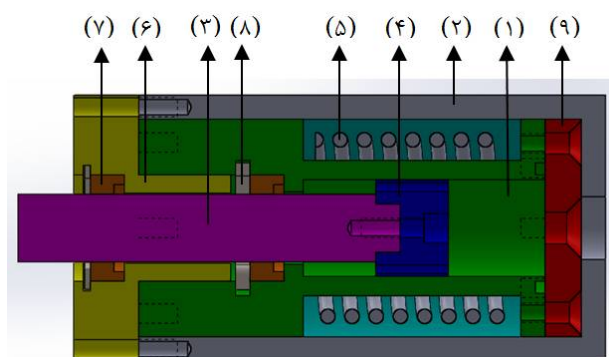


Fig. 2 Two-dimensional model of the designed damper with the name of body parts

شکل 2 مدل دو بعدی میراکننده طراحی شده به همراه نام قطعات بدنه

در جدول 1 نیز نام اجزای تشکیل دهنده میراکننده سیال مغناطیسی به همراه شماره هر قطعه و توضیحات مربوطه آورده شده است. همان گونه که در مقدمه نیز اشاره شد در این پژوهش برای تعیین جنس مناسب برای محفظه سیال مغناطیسی میراکننده، از شبیه سازی المان محدود استفاده می‌شود. زیرا جنس محفظه سیال بر میزان چگالی شار مغناطیسی ایجاد شده در آن و بر ضریب میرایی میراکننده تأثیر زیادی می‌گذارد. اما سایر قسمت‌های این میراکننده از آلیاژ آلومینیوم 7075 یا تفلون ساخته می‌شود تا وزن کل آن کاهش یابد. میدان مغناطیسی توسط سیم پیچ (کوئل) پیچیده شده در اطراف محفظه سیال تولید می‌شود. این میراکننده به گونه‌ای طراحی شده که به راحتی در زیر ابزار برش روی میز سوپورت ماشین تراش نصب شود. از این رو، ارتفاع پیستون میراکننده مطابق با محل نصب آن تعیین شده است. قطعات میراکننده پس از ساخت مونتاژ می‌شوند، سپس میراکننده در زیر ابزار نصب می‌گردد. اتصال میراکننده به ابزار نیز توسط چسب مخصوص تکنو فیکس² صورت می‌پذیرد.

Table 1 MR fluid damper components

جدول 1 اجزای تشکیل دهنده میراکننده سیال مغناطیسی

شماره قطعه	نام قطعه	توضیحات
1	محفظة داخلی	سیلندر اصلی (محفظة سیال) که پیستون در آن حرکت رفت و برگشتی دارد
2	پوسته بیرونی	پوشش خارجی و دربرگیرنده قطعات داخلی
3	شفت پیستون	رابط متصل کننده ابزار تراش به پیستون
4	پیستون	متراکم کننده سیال مغناطیسی جهت ایجاد نیروی میرایی
5	سیم پیچ	هدایت کننده جریان الکتریکی DC جهت تولید میدان مغناطیسی
6	راهنمای شفت و درپوش	جلوگیری کننده از انحراف شفت پیستون هنگام حرکت رفت و برگشتی - درپوش بالا
7	کاسه نمد	جهت آب بندی و جلوگیری از خروج سیال از اطراف شفت پیستون
8	خار فنری	نگهدارنده کاسه نمد
9	فلنج	جهت بستن و آب بندی کف محفظه داخلی (درپوش کف)

از آنجا که نیروی اصلی وارد شده به ابزار در فرایند شیارتراشی یا برش، همان نیروی برش (F_c) است به همین دلیل میراکننده به گونه‌ای طراحی و نصب می‌شود که بتواند ارتعاشات

² Techno Fix

¹ SolidWorks

ویژگی‌های این سیال مغناطیسی منطبق بر خواص سیال استاندارد MRF-132DG است که در پژوهش‌های [18، 19] جهت بکارگیری در ترمز مغناطیسی استفاده شده است.

3-3- شبیه‌سازی

روش طراحی در این پژوهش مبتنی بر شبیه‌سازی المان محدود¹ با استفاده از نرم‌افزار کامسول² V5.2 است. این نرم‌افزار توسط بسیاری از محققان برای شبیه‌سازی پدیده‌های مختلف از جمله شبیه‌سازی توزیع چگالی شار میدان مغناطیسی در میراکننده‌های مغناطیسی استفاده شده است [20]. در اینجا به منظور درک صحیح از تغییرات شار میدان مغناطیسی درون محفظه سیال سیستم، از شبیه‌سازی المان محدود استفاده می‌شود. شبیه‌سازی این مزیت را دارد که قبل از ساخت میراکننده، می‌توان در طراحی آن تغییراتی ایجاد کرد تا بدون صرف هزینه ساخت و سعی و خطا، خصوصیات میرایی آن را بهبود بخشد. به عبارت دیگر می‌توان با انجام شبیه‌سازی و در صورت نیاز اصلاح طراحی از توزیع و شدت مطلوب شار میدان مغناطیسی در محفظه سیال میراکننده اطمینان حاصل نمود. از طرف دیگر انتخاب جنس ماده برای ساخت محفظه سیال می‌تواند بر چگالی شار میدان مغناطیسی بوجود آمده در میراکننده تأثیرگذار باشد و خصوصیات میرایی آن را تحت الشعاع قرار دهد. قابل توجه است که در اکثر پژوهش‌های گذشته که در زمینه طراحی و ساخت میراکننده برای فرایند تراشکاری منتشر شده است کمتر به مسئله شبیه‌سازی میراکننده و انتخاب بهینه مواد برای ساخت آن توجه شده است. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد در مقالات بررسی شده مربوط به تراشکاری در مقدمه این پژوهش [12-15]، از ماده فولاد زنگ‌نزن AISI 410 آنیل شده جهت ساخت محفظه سیال مغناطیسی استفاده شده است. در حالی که لازم است با انجام شبیه‌سازی المان محدود، تأثیر انتخاب جنس محفظه سیال را بر چگالی شار میدان مغناطیسی در این نوع میراکننده بیشتر مورد مطالعه قرار داد. زیرا در صورت رسیدن به چگالی بالاتر در شار میدان مغناطیسی گذرنده از محفظه سیال، می‌توان به ظرفیت‌های میرایی بالاتری دست یافت. در این مطالعه فولاد کم کربن AISI 1018 آنیل شده به دلیل دارا بودن نفوذپذیری مغناطیسی بالا جهت ساخت محفظه سیال میراکننده پیشنهاد شده است.

شرایط مرزی بکار رفته در این شبیه‌سازی عبارتند از: 1-

ابزار را در راستای نیروی برش به بیشترین میزان کاهش دهد. در اینجا میراکننده سیال مغناطیسی در زیر ابزار نزدیک به تیغچه برش نصب می‌گردد تا صلبیت ابزار را در آن ناحیه افزایش و ارتعاشات ایجاد شده در اثر نیروی برش را کاهش داده و میرا کند.

3-2- سیال مغناطیسی

سیالات مغناطیسی مواد هوشمندی هستند که با اعمال یک میدان مغناطیسی می‌توان خصوصیات آنها را کنترل کرد. این سیالات با اضافه نمودن ذرات کرووی فرومغناطیس به یک مایع هیدروکربنی تشکیل می‌شوند. هنگامی که هیچ میدان مغناطیسی وجود ندارد، ذرات فرومغناطیس بطور تصادفی در محیط پراکنده هستند. اما با برقرار شدن میدان مغناطیسی، ذرات دارای قطبش مغناطیسی شده و یکدیگر را در امتداد خطوط شار مغناطیسی جذب می‌کنند و زنجیره‌ای خطی به موازات میدان مغناطیسی تشکیل می‌دهند. ویسکوزیته و مقاومت برشی سیال مغناطیسی را می‌توان با توان یک میدان مغناطیسی کنترل کرد. شماتیک سوسپانسیون سیال مغناطیسی قبل و بعد از استفاده از میدان در شکل 3 نشان داده شده است. سوسپانسیون ذره-مایع تشکیل دهنده سیال مغناطیسی قبل از اعمال میدان، دارای خاصیت ویسکوز است در حالی که در حضور میدان شبه جامد می‌شود. این پدیده، حرکت سیال مغناطیسی را محدود کرده و استحکام برشی آن را افزایش می‌دهد [16]. استحکام برشی سیال مغناطیسی به چندین عامل از جمله اندازه، هندسه، ترکیب و کسر حجمی ذرات، و توان میدان مغناطیسی اعمال شده وابسته است [17]. در اینجا سیال مغناطیسی از مخلوط نانوذرات Fe_2O_3 با نسبت 35 درصد وزنی، روغن سیلیکون با نسبت 60 درصد وزنی، و مایع فعال‌کننده سطح با نسبت 5 درصد وزنی تهیه می‌شود.

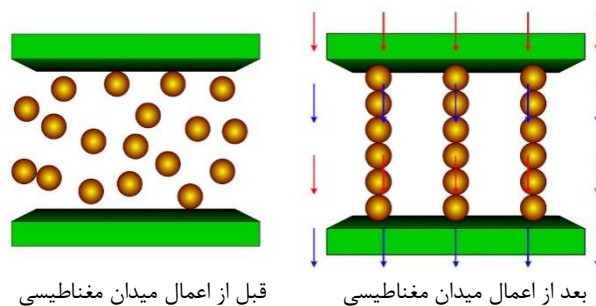


Fig. 3 Schematic of magnetic fluid suspension before and after the use of the magnetic field [18]

شکل 3 شماتیک سوسپانسیون سیال مغناطیسی قبل و بعد از استفاده از میدان مغناطیسی [18]

¹ Finite Element Method (FEM)

² COMSOL Multiphysics

توزیع چگالی شار مغناطیسی در محفظه سیال میراکننده برای هر دو جنس فولاد زنگ‌نزن AISI 410 و فولاد کم کربن AISI 1018 به ترتیب در شکل‌های 5- الف و ب با طیف رنگی نشان داده شده است. از تصویر شکل 5- الف این نتیجه بدست می‌آید که چگالی شار مغناطیسی در محفظه سیال طراحی شده از جنس فولاد زنگ‌نزن AISI 410 به حداکثر مقدار $0/28T$ می‌رسد. در حالی که با توجه به شکل 5- ب حداکثر چگالی شار مغناطیسی در محفظه سیال طراحی شده از جنس فولاد کم کربن AISI 1018 به $0/7T$ می‌رسد. این بدین معناست که فولاد کم کربن AISI 1018 در مقایسه با فولاد زنگ‌نزن AISI 410 به چگالی شار مغناطیسی بالاتری در محفظه سیال میراکننده منجر می‌گردد. این نتیجه از مقایسه تعداد و رنگ خطوط شار مغناطیسی عبوری از محفظه سیال برای هر دو حالت مذکور نیز مشهود است. از این رو به دلیل داشتن خواص نفوذپذیری مغناطیسی بالا و قابلیت عبور حداکثری میدان مغناطیسی، جهت ساخت محفظه داخلی میراکننده ماده فولاد AISI 1018 آنیل شده انتخاب شد. علاوه بر آن مشاهده می‌شود که با طراحی مناسب محفظه سیال در این میراکننده تمامی قسمت‌های آن تحت الشعاع میدان مغناطیسی قرار گرفته‌اند. در این شبیه‌سازی دوبعدی شدت میدان نسبتاً یکنواختی در قسمت محفظه سیال میراکننده مشاهده می‌شود.

4- آزمایش‌های تجربی

چیدمان آزمایشگاهی این پژوهش در شکل 6 نشان داده شده است.

در اینجا تست‌های ماشین‌کاری با استفاده از ماشین تراش اونیورسال مدل TOS SN 50 انجام شدند. همچنین از میله‌های استوانه‌ای از جنس فولاد کربنی ST50 با قطر 50mm به عنوان قطعه‌کار استفاده شد. طول کل هر قطعه‌کار که بین سه نظام و مرغک قرار می‌گیرد 550mm تعیین شد. از آنجا که ارتعاشات ابزار به شدت به موقعیت مکانی ابزار بر روی قطعه‌کار بستگی دارد، لذا نمونه‌برداری داده‌های ارتعاشات در همه آزمایش‌ها در محدوده مکان مشخصی از قطعه‌کار (در وسط طول قطعه‌کار که بین سه نظام و مرغک دستگاه قرار گرفته است) انجام شد و برای هر تست از قطعه جداگانه‌ای استفاده گردید. البته برای اینکه عمق برش هر تست مطابق جدول طراحی آزمایش روی قطعه ایجاد شود قبل از شروع تست شیارهایی در دو طرف ناحیه برش روی قطعه تراشیده شد به گونه‌ای که پهنای برش ایجاد شده برابر با عمق برش مورد نظر باشد.

سیم پیچ با تعداد 120 دور، 2- عایق مغناطیسی لحاظ کردن محیط اطراف میراکننده، و 3- میدان مغناطیسی صفر به عنوان مقدار اولیه. علاوه بر تعیین شرایط مرزی میراکننده، لازم است ضرایب نفوذپذیری مغناطیسی جنس محفظه داخلی و سیال مورد استفاده را در شبیه‌سازی وارد کرد. در اینجا دو نوع فولاد آنیل شده که عبارتند از 1- فولاد زنگ‌نزن AISI 410 و 2- فولاد کم کربن AISI 1018، جهت ساخت محفظه داخلی در شبیه‌سازی مقایسه شدند. خواص سیال مغناطیسی تهیه شده نیز مطابق با سیال استاندارد MRF-132DG است. در این تحقیق ضرایب نفوذپذیری مغناطیسی مواد ذکر شده در بالا از منحنی‌های $B - H$ مطابق شکل 4 بدست آمدند. با استفاده از منحنی‌های $B - H$ برای فولادهای AISI 410 و AISI 1018 و سیال مغناطیسی MRF-132DG مطابق نمودارهای شکل 4 و حل معادله ماکسول - آمپر (روابط 1 و 2) برای المان‌های قطعه در نرم‌افزار کامسول V.5.2، چگالی شار مغناطیسی در محفظه سیال بدست آمد.

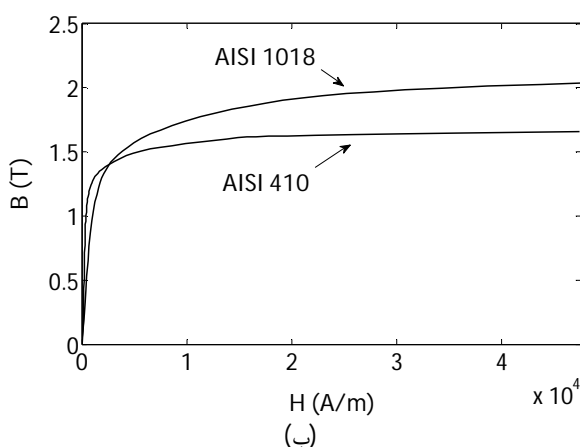
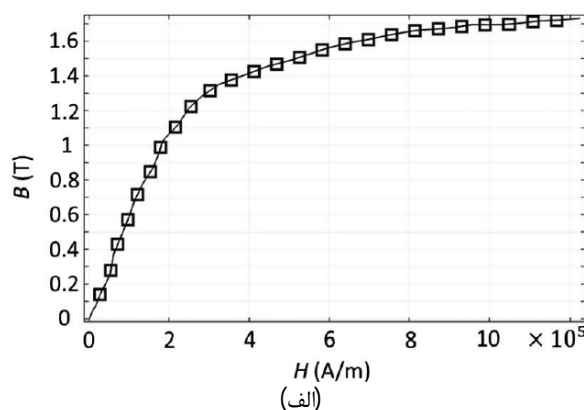


Fig. 4 (a) $B - H$ curves for (a) MRF-132DG [21] and (b) AISI 1018 and AISI 410 steels [22]

شکل 4 منحنی‌های $B - H$ برای الف) سیال مغناطیسی MRF-132DG [21] و ب) فولادهای AISI 1018 و AISI 410 [22]

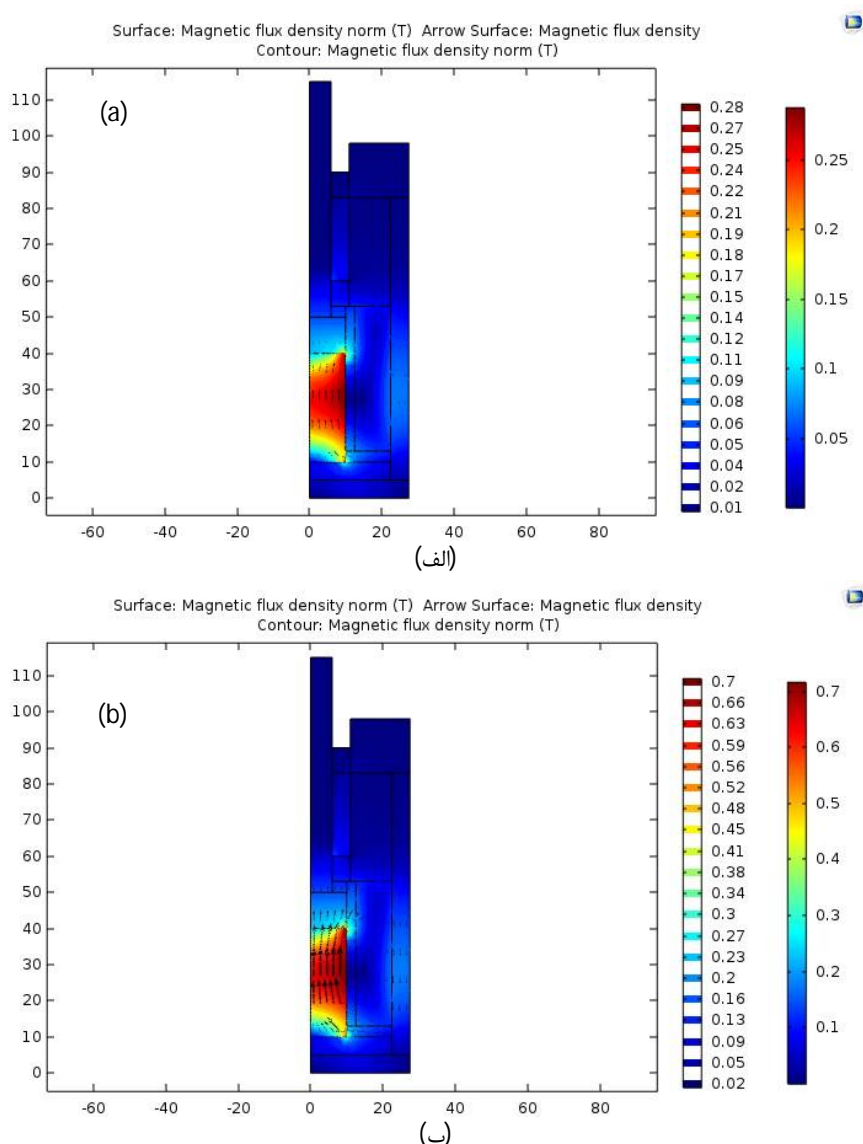


Fig. 5 Magnetic flux density distribution in the fluid chamber of the MR damper for (a) AISI 410 and (b) AISI 1018

شکل 5 توزیع چگالی شار مغناطیسی در محفظه سیال میراکننده سیال مغناطیسی برای الف) فولاد AISI 410 و ب) AISI 1018

4431 ساخت شرکت نشنال اینسترومنتس⁴ با نرخ داده برداری 5260Hz جهت ثبت داده‌های شتاب استفاده شد. در اینجا پارامترهای براده برداری هر آزمایش عبارتند از: سرعت اسپیندل (n)، عمق برش (a_p) و نرخ پیشروی (f) و وضعیت میراکننده (خاموش/روشن). در جدول 2 تعداد آزمایش‌ها و پارامترهای مربوط به هر آزمایش نشان داده شده است.

5- نتایج و بحث

در این بخش نتایج آزمایش‌های انجام شده به صورت نمودار در سه گروه شامل 1- سیگنال شتاب ابزار، 2- نمودارهای FFT و 3- انحراف معیار سیگنال شتاب، ارائه و تشریح شده‌اند.

از تیغچه برش با کد KGMI-T و پهنای 4 mm ساخت شرکت کورلوی¹ و ابزارگیر با کد استاندارد G1011.2020R-4T21GX24 ساخت شرکت والتر² برای فرایند برشکاری استفاده شد. همچنین کلیه آزمایش‌ها در شرایط ماشین‌کاری خشک انجام شدند. از مجموعه چکش ضربه ICP مدل PCB 086C01 با وزن 0/1 kg و حساسیت 11/2 mV/N به همراه سنسور شتاب‌سنج پیزو ساخت شرکت پی‌سی‌بی پیزوترونیکس³ جهت انجام 1- آنالیز مودال، و 2- ثبت داده‌های شتاب ابزار در حین فرایند ماشین‌کاری استفاده شد. از سیستم داده‌برداری-USB

¹ Korloy

² Walter

³ PCB Piezotronics

⁴ National Instruments

در دو حالت بدون میراکننده و با میراکننده برای شرایط برشکاری $n=500$ rpm، $f=0/08$ mm/rev و $a=3$ mm نشان داده شده است. مقایسه سیگنال‌های شتاب در این شکل نشان می‌دهد که در حالت وجود میراکننده دامنه سیگنال‌های شتاب کاهش یافته است. با توجه به اینکه تست مودال (تست چکش) انجام شده در این فرایند نشان داده است که فرکانس طبیعی سیستم در محدوده 280Hz رخ می‌دهد، لذا از نمودارهای FFT این شکل این نتیجه بدست می‌آید که در این تست چتر اتفاق نیفتاده است. زیرا اگر چتر رخ می‌داد در فرکانس‌های نزدیک به فرکانس طبیعی سیستم (حدود 280Hz) می‌بایست دامنه فرکانس به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یافت در صورتی که در اینجا افزایش در شدت دامنه فرکانس رخ نداده است. به طور مشابه در شکل‌های 8 تا 11 نیز سیگنال‌های شتاب ابزار و نمودارهای FFT مربوطه، برای شرایط مختلف ماشین‌کاری (ذکر شده در جدول 2) مقایسه شده‌اند. به طور کلی با توجه به شکل‌های 7 تا 11، مقایسه سیگنال‌های شتاب ابزار در دو حالت بدون میراکننده و با میراکننده برای شرایط مختلف ماشین‌کاری نشان می‌دهد که وجود میراکننده سیال مغناطیسی در کاهش شدت دامنه سیگنال شتاب مؤثر است. البته این میزان کاهش دامنه در شتاب ابزار بسته به شرایط ماشین‌کاری متفاوت است. برای کمی کردن این مقدار کاهش در دامنه سیگنال شتاب از تابع انحراف معیار (standard deviation) استفاده شده است. قابل توجه است که تابع انحراف معیار (σ)، می‌تواند مستقیماً به عنوان یک پارامتر مشخصه برای ارزیابی سیگنال شتاب استفاده شود [23، 24]. روابط (3) و (4) به ترتیب چگونگی محاسبه میانگین و انحراف معیار یک سیگنال را نشان می‌دهند.

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x_i \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \mu)^2 \quad (4)$$

در روابط بالا μ میانگین، σ انحراف معیار، N تعداد داده‌های سیگنال، و x_i مقدار هر داده می‌باشد. در اینجا از انحراف معیار سیگنال شتاب به عنوان یک شاخص در ارزیابی کیفیت ارتعاشات ابزار استفاده می‌شود. هر چه میزان انحراف معیار سیگنال شتاب کمتر باشد نشان دهنده آن است که ارتعاشات ابزار بیشتر میرا شده است. به منظور ارزیابی بهتر سیگنال‌های شتاب ابزار در دو حالت با میراکننده و بدون میراکننده، در شکل 12 برای هر کدام از تست‌های انجام شده این شاخص استخراج و در نمودار ستونی نمایش داده شده است.

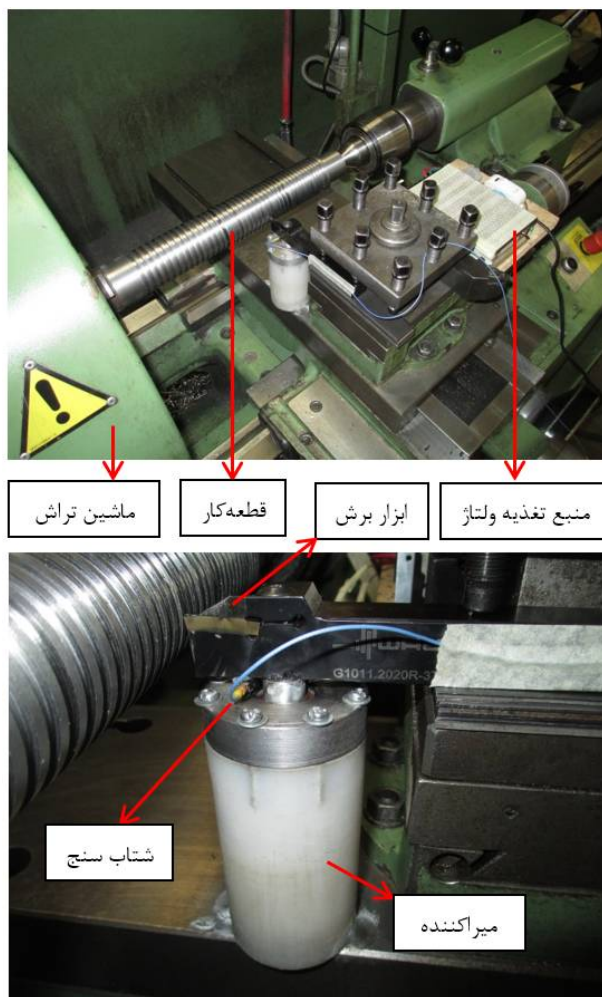


Fig. 6 Experimental setup including the turning machine, workpiece, tool, MR damper, accelerometer, and power supply.

شکل 6 چیدمان آزمایشگاهی شامل ماشین تراش، قطعه کار، ابزار، میراکننده سیال مغناطیسی، شتاب‌سنج و منبع تغذیه ولتاژ.

Table 2 The parameters of experimental design

جدول 2 پارامترهای طراحی آزمایش				
شماره آزمایش	سرعت اسپیندل (n) rpm	عمق برش (a _p) mm	نرخ پیشروی	وضعیت میراکننده
1	500	3	0/08	خاموش
2	500	3	0/08	روشن
3	500	4	0/08	خاموش
4	500	4	0/08	روشن
5	710	4	0/08	خاموش
6	710	4	0/08	روشن
7	1000	3/5	0/08	خاموش
8	1000	3/5	0/08	روشن
9	1000	4	0/08	خاموش
10	1000	4	0/08	روشن

در شکل 7 نتایج سیگنال شتاب ابزار و نمودارهای FFT مربوطه

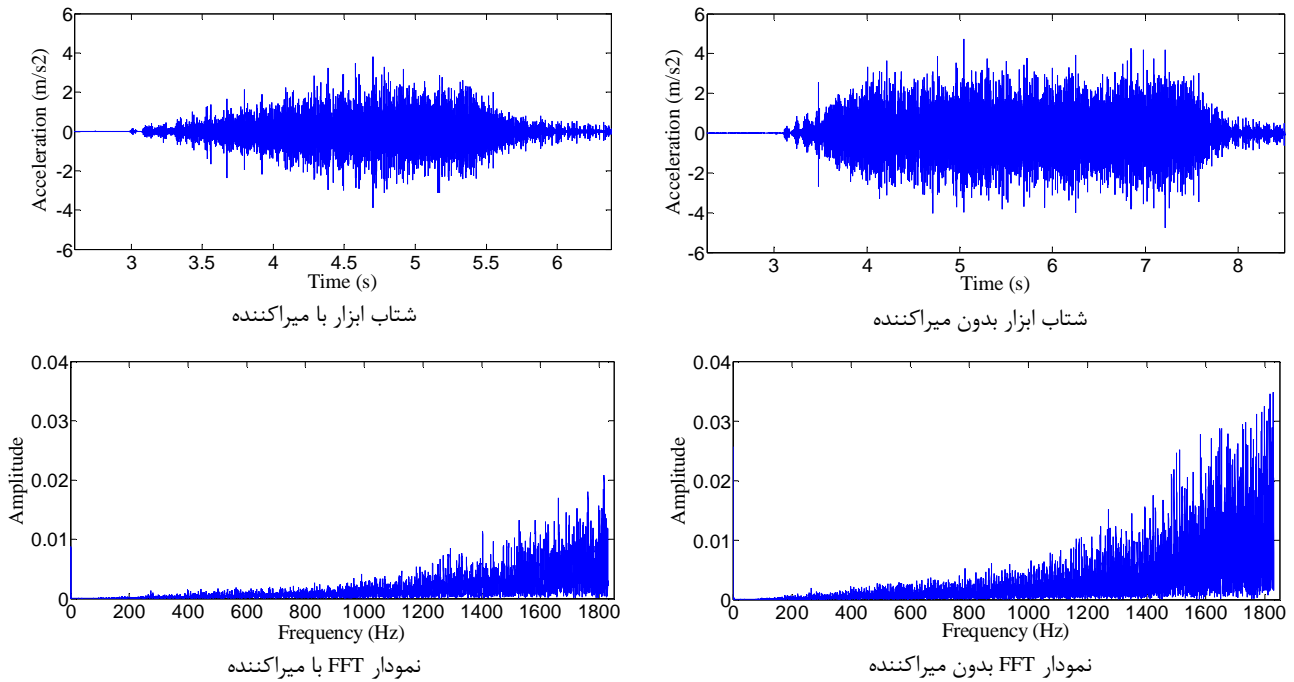


Fig. 7 Comparison of the tool acceleration signals and their corresponding FFT graphs obtained for two modes "without damper" and "with damper"- (machining parameters $n=500$ rpm $f=0.08$ mm/rev, $a=3$ mm)

شکل 7 مقایسه نتایج سیگنال‌های شتاب ابزار و نمودارهای FFT مربوطه در دو حالت بدون میراکننده و با میراکننده - (شرایط برشکاری $n=500$ rpm و $f=0.08$ mm/rev, $a=3$ mm)

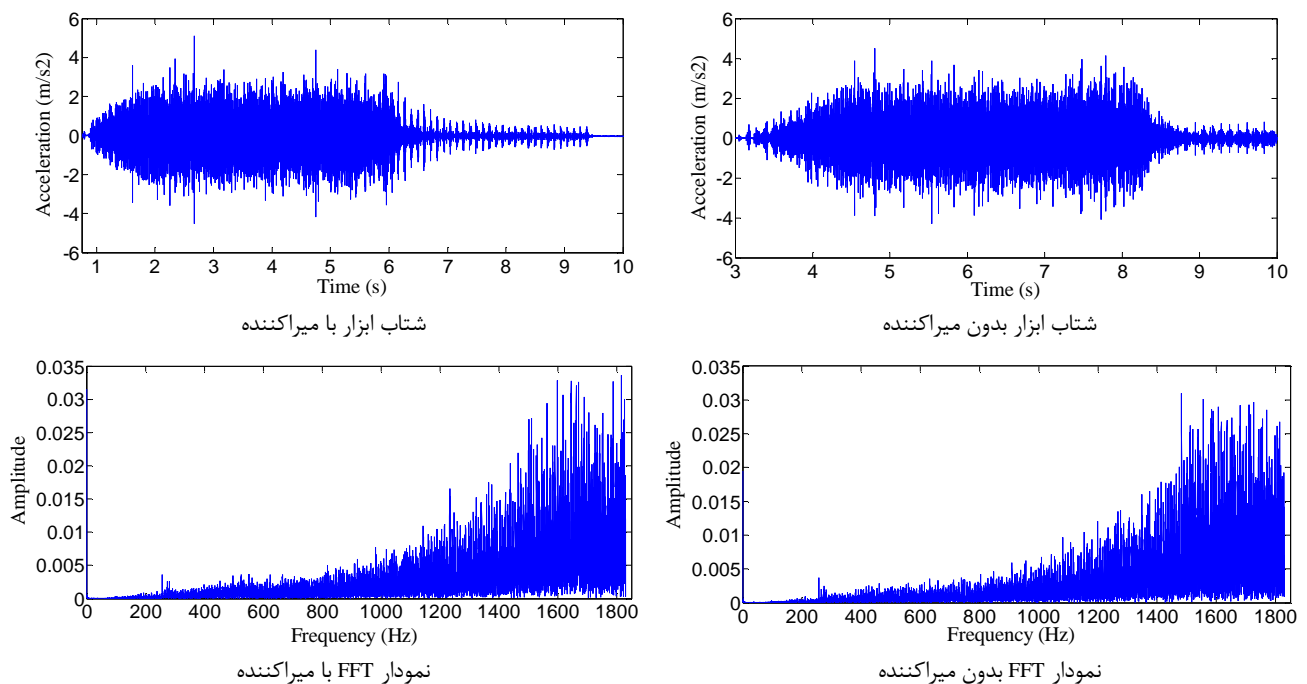


Fig. 8 Comparison of the tool acceleration signals and their corresponding FFT graphs obtained for two modes "without damper" and "with damper"- (machining parameters $n=500$ rpm $f=0.08$ mm/rev, $a=4$ mm)

شکل 8 مقایسه نتایج سیگنال‌های شتاب ابزار و نمودارهای FFT مربوطه در دو حالت بدون میراکننده و با میراکننده - (شرایط برشکاری $n=500$ rpm و $f=0.08$ mm/rev, $a=4$ mm)

مشاهده می‌شود که در کلیه تست‌های انجام شده، میراکننده به طور قابل ملاحظه‌ای مقادیر انحراف معیار سیگنال‌های شتاب

ابزار را کاهش داده است. از طرف دیگر مقایسه نمودارهای FFT در شکل‌های 7 تا 11 نشان می‌دهد که تنها در شرایط

در فرکانس‌های حدود 280Hz (نزدیک به فرکانس طبیعی سیستم) دامنه فرکانس به شدت افزایش یافته است که نشان دهنده رخداد چتر است.

ماشین‌کاری بدون میراکننده شکل‌های 10 و 11 چتر رخ داده است و در سایر موارد چتر رخ نداده است. زیرا در نمودارهای FFT بدون میراکننده شکل‌های 10 و 11 مشاهده می‌شود که

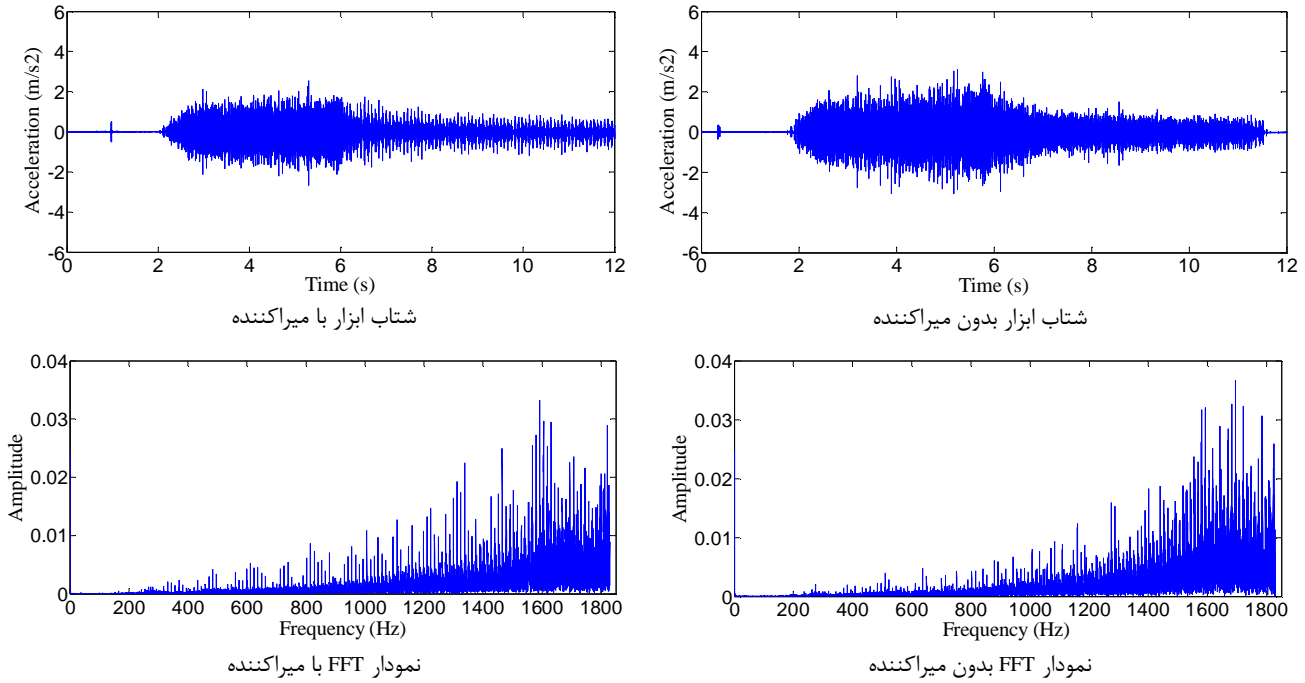


Fig. 9 Comparison of the tool acceleration signals and their corresponding FFT graphs obtained for two modes "without damper" and "with damper" - (machining parameters $n=710$ rpm $f=0.08$ mm/rev, $a=4$ mm)

شکل 9 مقایسه نتایج سیگنال‌های شتاب ابزار و نمودارهای FFT مربوطه در دو حالت بدون میراکننده و با میراکننده - (شرایط برشکاری $n=710$ rpm، $f=0.08$ mm/rev و $a=4$ mm)

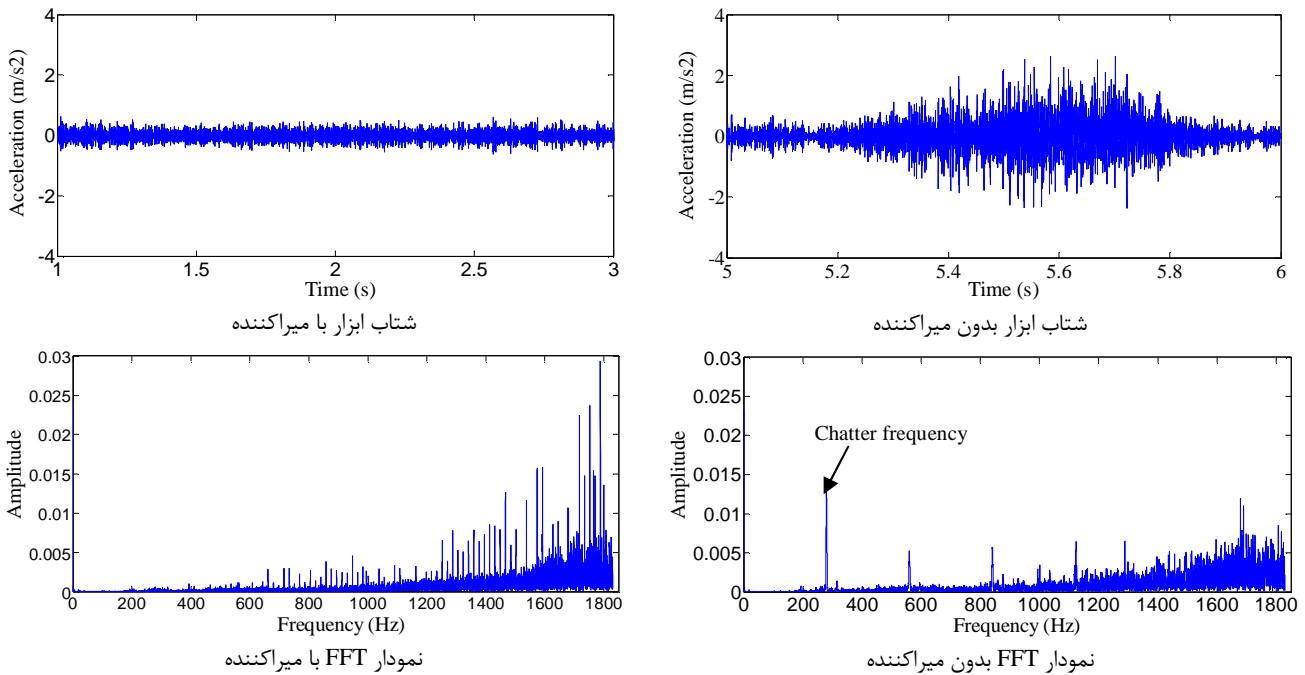


Fig. 10 Comparison of the tool acceleration signals and their corresponding FFT graphs obtained for two modes "without damper" and "with damper" - (machining parameters $n=1000$ rpm $f=0.08$ mm/rev, $a=3.5$ mm)

شکل 10 مقایسه نتایج سیگنال‌های شتاب ابزار و نمودارهای FFT مربوطه در دو حالت بدون میراکننده و با میراکننده - (شرایط برشکاری $n=1000$ rpm، $f=0.08$ mm/rev و $a=3.5$ mm)

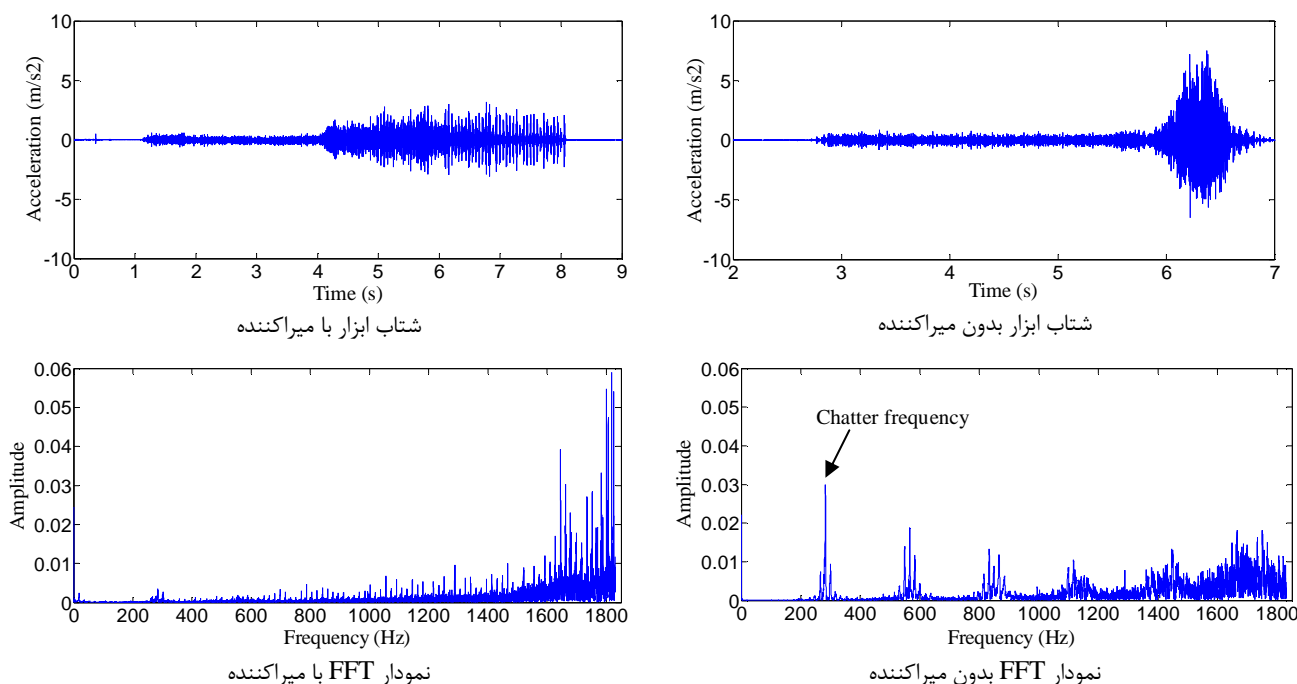


Fig. 11 Comparison of the tool acceleration signals and their corresponding FFT graphs obtained for two modes "without damper" and "with damper"- (machining parameters $n=1000$ rpm $f=0.08$ mm/rev, $a=4$ mm)

شکل 11 مقایسه نتایج سیگنال‌های شتاب ابزار و نمودارهای FFT مربوطه در دو حالت بدون میراکننده و با میراکننده - (شرایط برشکاری $n=1000$ rpm $f=0.08$ mm/rev و $a=4$ mm)

پژوهش توانسته است علاوه بر جلوگیری از رخداد چتر در برشکاری، سبب کاهش دامنه شتاب ارتعاشات ابزار نیز گردد.

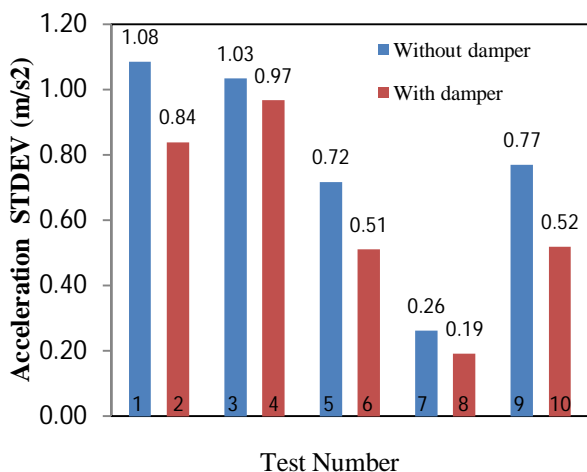


Fig. 12 Comparison of the calculated standard deviation of tool acceleration signals for two modes "without damper" and "with damper" for the different machining test conditions specified in Table 1

شکل 12 مقایسه انحراف معیار محاسبه شده برای سیگنال‌های شتاب ابزار در دو حالت با میراکننده و بدون میراکننده برای شرایط مختلف تست‌های ماشین‌کاری ذکر شده در جدول 2

6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک میراکننده سیال مغناطیسی حاوی نانوپودر

اما در نمودارهای FFT با میراکننده شکل‌های 10 و 11 اثری از افزایش شدید دامنه فرکانس در محدوده فرکانس‌های نزدیک 280Hz مشاهده نمی‌شود که نشان‌دهنده عدم رخداد چتر در این حالت‌ها است. این نتیجه نشان‌دهنده اثر بخش بودن میراکننده سیال مغناطیسی در کاهش وقوع چتر در فرایند برشکاری است. همچنین ارزیابی سیگنال‌های شتاب در شکل‌های 10 و 11 نشان می‌دهند که دامنه سیگنال‌های شتاب در حالت‌های با میراکننده کاهش قابل توجهی نسبت به حالت‌های بدون میراکننده داشته است. قابل توجه است که نتایج نشان داده شده در شکل 10 متناظر با آزمایش‌های شماره 8 و 9 این پژوهش می‌باشد. همچنین نتایج نشان داده شده در شکل 11 متناظر با آزمایش‌های شماره 10 و 11 ذکر شده در جدول 2 هستند. از طرف دیگر در نمودار ستونی شکل 12 مقادیر کمی انحراف معیار سیگنال‌های شتاب بدست آمده برای کلیه آزمایش‌های انجام شده نشان داده شده است. مقایسه مقادیر کمی انحراف معیار داده‌های سیگنال شتاب برای آزمایش‌های 7 تا 10 این مطالعه نشان می‌دهد که در حالت‌های وقوع چتر، انحراف معیار سیگنال شتاب برای برشکاری با میراکننده کاهش قابل توجهی نسبت به برشکاری بدون میراکننده دارد. به عبارت دیگر وجود میراکننده سیال مغناطیسی در آزمایش‌های این

- [4] Yuan, L., Sun, S., Pan, Z., Ding, D. and Li, W., 2017, July. Semi-Active Chatter Reduction for Robotic Machining Using Magnetorheological Elastomers (MREs). In 2017 IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER) (pp. 349-354). IEEE.
- [5] Mei, D., Kong, T., Shih, A.J. and Chen, Z., 2009. Magnetorheological fluid-controlled boring bar for chatter suppression. *Journal of materials processing technology*, 209(4), pp.1861-1870.
- [6] Sathianarayanan, D., Karunamoorthy, L., Srinivasan, J., Kandasami, G.S. and Palanikumar, K., 2008. Chatter suppression in boring operation using magnetorheological fluid damper. *Materials and Manufacturing processes*, 23(4), pp.329-335.
- [7] Sathianarayanan, D., Karunamoorthy, L., Srinivasan, J., Kandasami, G.S. and Palanikumar, K., 2008. Chatter suppression in boring operation using magnetorheological fluid damper. *Materials and Manufacturing processes*, 23(4), pp.329-335.
- [8] Mohan, E. and Natarajan, U., 2016. Experimental investigation on boring tool vibration control using MR fluid damper. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 15(01), pp.13-25.
- [9] Mei, D., Kong, T., Shih, A.J. and Chen, Z., 2009. Magnetorheological fluid-controlled boring bar for chatter suppression. *Journal of materials processing technology*, 209(4), pp.1861-1870.
- [10] Mei, D., Yao, Z., Kong, T. and Chen, Z., 2010. Parameter optimization of time-varying stiffness method for chatter suppression based on magnetorheological fluid-controlled boring bar. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(9-12), pp.1071-1083.
- [11] Paul, P.S., Kumar, C.S., Joshua, M., Vignesh, S., Saravanan, S. and Varadarajan, A.S., 2017. Study on the influence of magnetorheological fluid on tool vibration during end milling process. *International Journal of Dynamics and Control*, 5(3), pp.696-703.
- [12] Paul, P.S., Jazeel, M. and Varadarajan, A.S., 2015. Monitoring of tool vibration for magnetorheological fluid controlled bar during turning of hardened AISI4340 steel. *Archive of Mechanical Engineering*, 62(2).
- [13] Paul, P.S., Varadarajan, A.S., Lawrance, G. and Sunil, K.S., 2012. Analysis of Turning Tool holder with MR Fluid damper. *Procedia engineering*, 38, pp.2572-2578.
- [14] Paul, P.S., Sunil, K.S. and Varadarajan, A.S., 2017. The effect of cutting parameters on tool vibration during magnetorheological fluid controlled turning bar. *Int J Acoust Vib*, 22, pp.27-33.
- [15] Kishore, R., Choudhury, S.K. and Orra, K., 2018. On-line control of machine tool vibration in turning operation using electro-magneto rheological damper. *Journal of Manufacturing Processes*, 31, pp.187-198.
- [16] Genç, S. and Phulé, P.P., 2002. Rheological properties of magnetorheological fluids. *Smart Fe₂O₃ جهت بکارگیری در فرایند برشکاری طراحی و تست شد. مهمترین نتایج بدست آمده در این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:*
- نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که فولاد کم کربن AISI 1018 در مقایسه با فولاد زنگ‌نزن AISI 410، چگالی شار مغناطیسی بالاتری در محفظه سیال میراکننده ایجاد می‌کند و از این رو برای ساخت میراکننده سیال مغناطیسی پیشنهاد می‌گردد.
- مقایسه سیگنال‌های شتاب ابزار در دو حالت بدون میراکننده و با میراکننده برای شرایط مختلف ماشین‌کاری نشان می‌دهد که وجود میراکننده سیال مغناطیسی در کاهش شدت دامنه سیگنال شتاب ابزار مؤثر است. البته این میزان کاهش دامنه در شتاب ابزار بسته به شرایط ماشین‌کاری متفاوت است.
- نمودارهای FFT بدست آمده از آزمایش‌های این پژوهش در حالت‌های "بامیراکننده"، حاکی از عدم رخداد چتر هستند. این نتیجه نشان‌دهنده اثر بخش بودن میراکننده سیال مغناطیسی در کاهش وقوع چتر در فرایند برشکاری است.
- در حالت‌های وقوع چتر، انحراف معیار سیگنال شتاب برای برشکاری با میراکننده کاهش قابل توجهی نسبت به برشکاری بدون میراکننده دارد. به عبارت دیگر وجود میراکننده سیال مغناطیسی در آزمایش‌های این پژوهش توانسته است علاوه بر جلوگیری از رخداد چتر در برشکاری، سبب کاهش دامنه شتاب ارتعاشات ابزار نیز گردد.

7- تشکر و قدردانی

از گروه مهندسی ساخت و تولید دانشگاه آتلیم ترکیه و جناب آقای دکتر صمد ندیمی باویل علیایی به دلیل در اختیار نهادن تجهیزات آزمایشگاهی مورد نیاز این پژوهش تشکر و قدردانی می‌گردد.

8- مراجع

- [1] 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.

- International Mechanical Engineering Congress and Exposition (pp. 1203-1209). American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.
- [21] Nguyen, Q.H., Lang, V.T. and Choi, S.B., 2015. Optimal design and selection of magneto-rheological brake types based on braking torque and mass. *Smart Materials and Structures*, 24(6), p.067001.
- [22] COMSOL Multiphysics User's Guide, version 5.2, COMSOL AB. (2015)
- [23] Yeh, L.J. and Lai, G.J., 1995. A study of the monitoring and suppression system for turning slender workpieces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 209(3), pp.227-236.
- [24] Liu, H., Chen, Q., Li, B., Mao, X., Mao, K. and Peng, F., 2011. On-line chatter detection using servo motor current signal in turning. *Science China Technological Sciences*, 54(12), pp. 3119-3129.
- Materials and Structures, 11(1), p.140.
- [17] Bell, R.C., Karli, J.O., Vavreck, A.N., Zimmerman, D.T., Ngatu, G.T. and Wereley, N.M., 2008. Magneto-rheology of submicron diameter iron microwires dispersed in silicone oil. *Smart Materials and Structures*, 17(1), p.015028.
- [18] Truong, D.Q. and Ahn, K.K., 2012. MR fluid damper and its application to force sensorless damping control system. *Smart Actuation and Sensing Systems-Recent Advances and Future Challenges*, pp.383-425.
- [19] Hasannasab, V. and Bazargan-Lari, Y., 2019. Design and Manufacture of a Magneto-rheological Brake System Applicable for Wheelchair Manipulations. *Journal of Testing and Evaluation*, 49(3).
- [20] Case, D., Taheri, B. and Richer, E., 2011, November. Finite element modeling and analysis of magneto-rheological dampers. In *ASME 2011*