



مدل سازی یک پارچه مکترونیک و کنترل نیمه فعال ارتعاشات چتر در فرایند تراشکاری، به وسیله میراگر مگنتورئولوژیک

داود ساجدی پور^۱، سعید بهبهانی^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

* اصفهان، صندوق پستی ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶، behbahani@cc.iut.ac.ir

چکیده- ارتعاشات چتر یکی از عوامل محدود کننده در افزایش نرخ براده برداری در فرایندهای ماشین کاری می باشد. در این مقاله، مدل سازی مکترونیک یک پارچه دستگاه تراش تجهیز شده به میراگر هوشمند مگنتورئولوژیک و طراحی کنترل فازی نیمه فعال برای جلوگیری از ارتعاشات چتر ارائه می شود. کاهش ارتعاشات چتر با تغییر دادن نیمه فعال مشخصات دینامیکی سازه ماشین ابزار (مانند قسمت های حقیقی و موهومی تابع پاسخ فرکانسی) که پارامترهای اصلی مشخص کننده دیاگرام پایداری هستند حاصل می شود. از مدل بوک-ون اصلاح شده برای مدل سازی رفتار میراگر مگنتورئولوژیک استفاده شده است، که این امکان را می دهد که ولتاژ ورودی به دمپر به عنوان ورودی کنترلی سیستم بکار رود. از آنجا که مدل یک پارچه سیستم در حضور میراگر مگنتورئولوژیک غیر خطی می شود، روشی برای ایجاد دیاگرام پایداری با تحلیل در حوزه زمان ارائه می شود. در طراحی کنترلر و به عنوان بازخورد از میزان وقوع چتر، یک شاخص جدید به نام شاخص تشخیص چتر ارائه شده است که در تشخیص وقوع چتر بصورت تجربی نیز کاربرد دارد. نتایج بدست آمده نشان می دهد که سیستم پیشنهادی در بهبود پایداری ماشین تراش موفق بوده است.

کلیدواژگان: ماشین تراش، کنترل فازی، شاخص تشخیص چتر، پایداری.

Integrated mechatronic modeling and semi-active control of chatter vibration in turning, using MR damper

D. Sajedi Pour¹, S. Behbahani^{2*}

1- MSc., Mech. Eng., Isfahan Univ. of Tech., Isfahan, Iran

2- Assis. Prof., Mech. Eng., Isfahan Univ. of Tech., Isfahan, Iran

* P.O.B. 84156-83111 Isfahan, Iran. behbahani@cc.iut.ac.ir

Abstract- Chatter vibration is one of the limiting factors in increasing the material removing rate in machining operations. In this paper, the integrated mechatronic modeling of a lathe machine equipped with MR damper, and design of a fuzzy semi-active controller are presented. To suppress chatter, the structural dynamic characteristics (i.e., real and imaginary part of the frequency response function), which are the main parameters in drawing the stability lobes, are varied semi-actively using magnetorheological damper. Modified Bouc-Wen model is employed for MR damper modeling, which enables us to account for the input voltage to the damper as the control input of the system. Since the structure becomes nonlinear in the presence of MR damper, a time-domain approach for generation of stability lobes is presented. In controller design and as a feedback of the chatter level, a novel chatter detection index (CDI) is developed, which can also be employed for experimental chatter detection. The obtained results show that the proposed system has been successful in enhancing the stability of the lathe machine.

Keywords: Lathe, Chatter Detection Index, Fuzzy Control, Stability.

۱- مقدمه

کنترل نیمه فعال ارتعاشات یک روش شناخته شده در کاهش ارتعاشات نامطلوب انواع ماشین آلات محسوب می شود؛ ولی استفاده از تجهیزات نیمه فعال در کاهش ارتعاش ماشین های ابزار یک روش جدید است که هنوز از نظر مدل سازی و طراحی کنترلر ضعف های عمده ای دارد.

ماشین کاری قطعات صنعتی با سرعت زیاد و حجم بالای براده برداری، یکی از نیازهای شرکت های قطعه ساز می باشد که می تواند آنها را در تولید قطعات با حداقل هزینه و رقابت با سایر تولید کنندگان یاری کند. در این میان، ارتعاشات چتر^۱ یک عامل محدود کننده بر سر راه افزایش نرخ براده برداری می باشد. چتر ارتعاش خود- تحریک نامطلوبی است که موجب مضراتی همچون سطوح نهایی نامطلوب، سایش زود هنگام ابزار، خرابی ماشین و تولید صدای ناهنجار می شود.

به علت اهمیت کاهش چتر، تحقیقات گسترده ای در این زمینه انجام شده است. منابع تحقیقاتی موجود در این زمینه، می توانند به سه گروه تقسیم بندی شوند. گروه اول مربوط به تحقیقاتی است که از روش های غیر فعال برای رفع این مشکل استفاده کرده اند. در این تحقیقات تلاش می شود که با بهبود طرح سازه ای ابزار یا ماشین، تا حد امکان شرایط چتر کاهش داده شود. به طور مثال، افزایش صلبیت سیستم، تغییر شکل هندسی ابزار براده برداری [۱]، قرار دادن جاذب های ارتعاشات [۲]، و بکارگیری میراگرهای ضربه ای [۳]، نمونه هایی از روش های مورد استفاده می باشند. عدم هوشمندی و انعطاف پذیری و در نتیجه طراحی غیر بهینه برای ماشین های مختلف در شرایط براده برداری متفاوت، ضعف عمده این گونه سیستم ها می باشد. دومین گروه، مربوط به تحقیقاتی است که از روش های فعال برای جلوگیری از ارتعاشات چتر استفاده می کنند. در این روش ها، معمولاً از عملگرهایی استفاده می شود که با سرعت بالا قادر به پاسخ گویی به سیستم می باشند و مستقیماً نیروی کنترلی را با فرکانس بالا به سیستم وارد می آورند. در این زمینه می توان به بکارگیری عملگرهای پیزوالکتریک [۴] و مگنتواستریکتیو [۵] در کنترل فعال اشاره کرد. این روش ها انعطاف پذیری بالایی را برای تطابق با شرایط مختلف عملیات در سیستم های گوناگون، در کاهش ارتعاشات چتر فراهم

می کنند، اما نسبت به روش های دیگر کنترلی گران تر می باشند که این عامل به هزینه عملگرهای هوشمند و میزان انرژی مصرفی در بکارگیری فعال آنها مربوط می شود. گروه سوم از روش های جلوگیری از چتر مربوط به کاهش چتر با استفاده از روش های نیمه فعال است. در این روش، خواص دینامیکی برخی اجزاء ماشین می توانند به منظور دستیابی به پایداری بیشتر، با فرکانس محدودی تغییر داده شوند. قرار دادن میراگرهای متغیر در سیستم، یکی از رایج ترین اقدامات در این زمینه است. میراگرهای مگنتورئولوژیک نمونه مناسبی از میراگرهای متغیر هستند که خواص میرایی آنها با تغییر ولتاژ اعمال شده به میراگر، قابل تغییر است. مزیت این روش این است که ضمن اینکه میراگر بطور دائم تاثیر میراکنندگی در سیستم دارد، تغییر خواص آن در فرکانسی پایین تر از فرکانس ارتعاش سیستم صورت می گیرد. منابع تحقیقاتی فراوانی در راستای بکارگیری میراگرهای مگنتورئولوژیک برای کاهش ارتعاشات در سیستم های با فرکانس پائین و متوسط از جمله ساختمانها، پل های کابلی، سیستم تعلیق وسایل نقلیه و فونداسیون ماشین لباسشویی موجود می باشند، ولی مطالعات قابل توجهی در زمینه بکارگیری میراگرهای مگنتورئولوژیک در سیستم های با فرکانس بالا مشاهده نشده است.

منابع تحقیقاتی بسیار اندکی در زمینه کنترل نیمه فعال چتر در دست است. استفاده از سیالات الکتروئولوژیک، سرآغاز استفاده از این روش می باشد [۶]. استفاده از سیال مگنتورئولوژیک به جای سیال الکتروئولوژیک برای کاهش ارتعاشات چتر در عملیات داخل تراشی [۷]، تازه ترین کار تحقیقاتی گزارش شده می باشد که نتایج آن حاکی از عملکرد بهتر سیال مگنتورئولوژیک حول میله مت داخل تراشی، برای تغییر سختی مته است. هرچند این تاثیر مثبت، بیشتر مربوط به سرعت های پایین اسپیندل بوده و در سرعت های بالاتر، به علت نیاز به افزایش خیلی زیاد سختی، این ابزار به تنهایی پاسخگو نمی باشد. میراگر مگنتورئولوژیک به علت توانایی در تغییر میرایی سیستم می تواند ابزاری در جهت رفع این نیاز باشد. تاثیر مثبت احتمالی استفاده از این میراگر در سیستم ماشین ابزار، با انجام آزمایشات گزارش شده است [۸]. در این آزمایش ها، با اعمال یک ولتاژ ثابت به میراگر تعبیه شده در سیستم ماشین ابزار در یک فرایند داخل تراشی، بهبود نتایج پایداری مشاهده شده، ولی هیچ گونه کار تحلیلی در مورد

1. Chatter

چتر، اثر امواج احیا شونده و کوپل شدن مودها می باشند. در اغلب فرایندهای ماشین کاری، چتر نوع احیا شونده زودتر از کوپل شدن مودها اتفاق می افتد [۹]. این نوع چتر نتیجه اختلاف فاز به وجود آمده بین دو موج ارتعاشی متوالی روی سطح قطعه کار است (شکل ۲). این اختلاف فاز باعث به وجود آمدن ضخامت براده متغیری می شود که می تواند به صورت نمایی رشد کرده و به خرابی ابزار یا قطعه کار منجر شود. مدل های مختلفی برای توصیف چتر در فرایند تراشکاری به وسیله محققان ارائه شده، که در اغلب آنها از تئوری و مدل های خطی استفاده شده است [۹]، و در برخی نیز مدل های غیر خطی ترجیح داده شده است [۱۰].

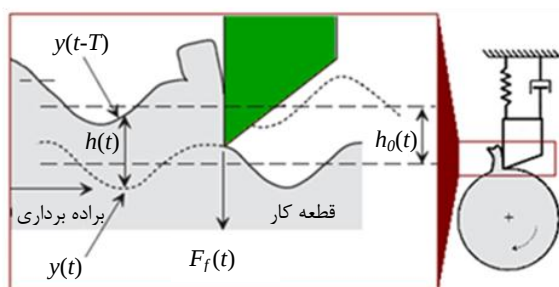
فرض می شود که مؤلفه ای از نیروی براده برداری که موجب ارتعاش نسبی می شود تنها در جهت شعاعی وارد می شود و جابجایی نسبی بین ابزار و قطعه کار، در این راستا اتفاق می افتد (شکل ۲)، ضخامت دینامیکی نهایی براده می تواند به صورت رابطه (۱) بیان شود.

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

که در آن، h_0 ضخامت براده مورد انتظار، یعنی نرخ پیش روی ابزار ماشین کاری، $y(t)$ جابجایی نسبی ابزار - قطعه کار در زمان جاری و در راستای نیروی ماشین کاری مذکور (عمود بر سطح قطعه کار)، و $y(t - T)$ جابجایی نسبی در دور قبلی براده برداری می باشد. همچنین T دوره تناوب یک دور اسپیندل است که عامل اصلی روی دادن چتر نوع احیا شونده می باشد. بر اساس این تئوری، معادله ارتعاش سیستم می تواند به این صورت رابطه (۲) شود:

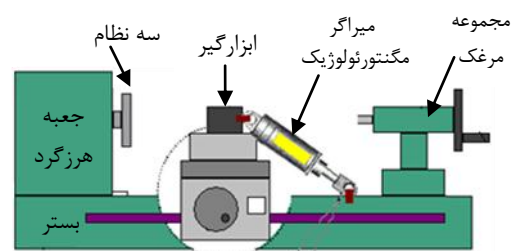
$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = F_f(t) \quad (2)$$

که در آن، m ، c ، و k به ترتیب جرم، میرایی، و سختی معادل سیستم بوده و $F_f(t)$ نیروی ماشین کاری در زمان حاضر است که با رابطه (۳) قابل بیان است.



شکل ۲ نمای شماتیک مکانیزم چتر امواج احیا شونده.

ارتعاشات چتر، مدل سازی، شبیه سازی و کنترل در این پژوهش ارائه نشده است. به طور قطع موارد مذکور، نیازهای اساسی بکارگیری میراگرهای مگنتورئولوژیک در کنترل ارتعاشات چتر می باشند که در این مقاله به آنها پرداخته شده است. در کار حاضر یک مدل یک پارچه از ماشین تراش مجهز به میراگر مگنتورئولوژیک که شماتیک آن در شکل ۱ نشان داده شده است، ارائه می شود تا اثر میراگر در پایداری ماشین کاری نسبت به شرایط چتر بررسی شود و صحت مدل ارائه شده در پیش بینی نتایج در مقایسه با کار تجربی ذکر شده، روشن شود. بدیهی است که استفاده از ولتاژ ثابت، همیشه نمی تواند به عنوان یک روش بهینه مورد استفاده قرار گیرد. لذا در مرحله بعد، با آنالیز پارامترهای تأثیرگذار گوناگون، یک کنترلر فازی طراحی می شود، تا در هر لحظه مناسب ترین ولتاژ برای میراگر مگنتورئولوژیک فراهم شود. کنترلر پیشنهادی یک کنترلر نیمه فعال می باشد که در مقایسه با دیگر روش های کنترلی، انرژی بسیار کمتری صرف می کند. همچنین این سیستم، راه حل مطمئن تری نسبت به کنترلرهای فعال ارائه می کند، زیرا در صورتی که اشکالی در منبع انرژی یا سیستم کنترلی ایجاد شود، میراگر مگنتورئولوژیک به یک میراگر غیر فعال تبدیل می شود، که همواره می تواند در افزایش پایداری سیستم مؤثر باشد. در کار پیش رو، یک روش جدید نیز برای شناسایی روی خط چتر، بر اساس تعریف معیاری به نام شاخص شناسایی چتر (CDI)^۱ ارائه می شود که بر پایه آنالیز سیگنال های ارتعاشی سیستم استوار است.



شکل ۱ شماتیک سیستم پیشنهادی

۲- ارتعاشات چتر و دیاگرام پایداری

چتر در ماشین کاری، ارتعاش مضر است که در نتیجه مکانیزم خود-تحریک، هنگام تولید براده رخ می دهد. دو منشأ اصلی

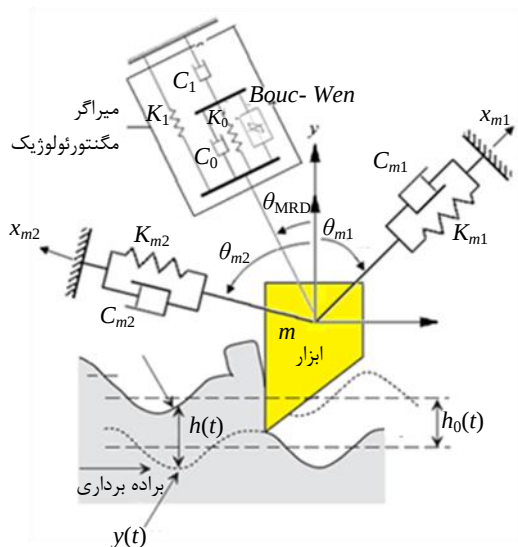
1. Chatter Detection Index (CDI)

مسأله مورد مطالعه در پژوهش حاضر، مربوط به یک ماشین تراش با دو درجه آزادی غالب با فرکانس های طبیعی ۱۵۰ و ۲۵۰ هرتز است که برای بررسی صحت نتایج، همانند سیستم بررسی شده در مرجع [۹] انتخاب شده است.

۳- مدل سازی یک پارچه سیستم

مطالعه چتر در یک ماشین ابزار معمولاً با بررسی دیاگرام پایداری آن انجام می گیرد. بررسی فرایند رسم این دیاگرام [۹] نشان می دهد که چتر نتیجه تقابل شرایط ماشین کاری و مشخصات دینامیکی سازه ماشین ابزار می باشد. دینامیک سازه های ماشین ابزار، در قالب تابع پاسخ فرکانسی بین نیرو و جابجایی نسبی نوک ابزار و قطعه کار، قابل بیان است. قسمت های حقیقی، موهومی و فاز تابع پاسخ فرکانسی، پارامترهای اصلی مؤثر در دیاگرام پایداری می باشند. آشکار است که تغییر مشخصه های سازه های ماشین ابزار با ابزاری خارجی می تواند بر روی دیاگرام پایداری تأثیرگذار باشد، که ایده استفاده از میراگر مگنتورئولوژیک به این منظور می باشد.

به منظور مطالعه اثر میراگر مگنتورئولوژیک بر پایداری ماشین تراش، معادلات حاکم باید به صورت کوپل با یکدیگر حل شوند. شکل ۴ نشان دهنده نمای شماتیک مدل پیشنهاد شده می باشد که در آن θ_{MRD} زاویه بین محور طولی میراگر و جهت ارتعاش نسبی بین ابزار و قطعه کار می باشد، که در این جا صفر در نظر گرفته شده است.



شکل ۴ شماتیک مدل پیشنهادی بکارگیری میراگر در ماشین تراش

$$F_f(t) = K_f a h(t) = K_f a [h_0 + y(t-T) - y(t)] \quad (3)$$

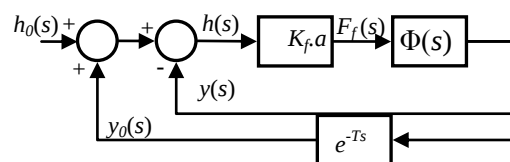
K_f ثابت برشی نیروی ماشین کاری و a عمق محوری براده برداری را بیان می کند. با استفاده از تبدیل لاپلاس، ضخامت دینامیکی براده در حوزه لاپلاس به صورت رابطه (۴) بیان می شود.

$$h(s) = h_0 - y(s) + e^{-sT} y(s) = h_0 + (e^{-sT} - 1)y(s), \\ y(s) = F_f(s) \Phi(s) = K_f a h(s) \Phi(s) \quad (4)$$

که در آن $\Phi(s)$ تابع تبدیل سیستم می باشد. بنابراین دیاگرام بلوکی ارتعاشات چتر می تواند به صورتی که در شکل ۳ نشان داده شده است، بیان شود.

در این تئوری، دیاگرام پایداری^۱ سیستم که گویای حداکثر عمق محوری براده برداری مجاز در شرایط پایدار به ازای هر سرعت دورانی اسپیندل می باشد، قابل ترسیم است. فرایند ایجاد دیاگرام پایداری در مرجع [۹] شرح داده شده است که مبتنی بر تحلیل سیستم در حوزه لاپلاس است و فقط در صورتی قابل استفاده است که معادله دیفرانسیل سازه های سیستم خطی باشند.

روش دیگر ترسیم منحنی های پایداری، رسم نقطه به نقطه، با تحلیل ارتعاشات سیستم در شرایط مختلف ماشین کاری است. برای تشخیص مرز پایداری در هر سرعت دورانی اسپیندل، باید مقدار عمق محوری براده برداری به تدریج افزایش داده شود تا با بررسی همگرایی یا واگرایی سیگنال های ارتعاشی، مرز بین شرایط ماشین کاری پایدار و ناپایدار در آن سرعت دورانی، شناسایی شود. این فرایند برای سرعت های دورانی مختلف تکرار می شود و به این ترتیب نمودار پایداری رسم می شود. در این پژوهش، به دلیل وجود جزء غیر خطی میراگر مگنتورئولوژیک و کنترلر غیر خطی و عدم امکان تحلیل در حوزه لاپلاس، از این روش استفاده شده است.



شکل ۳ دیاگرام بلوکی چتر نوع احیا شونده.

1. Stability Lobes Diagram

پژوهش از مدل بوک-ون اصلاح شده که در مرجع [۱۱] معرفی شده است، بهره گرفته شد. دلیل این انتخاب، تطابق بهتر نتایج شبیه سازی این مدل و نتایج تجربی است که در مرجع مذکور گزارش شده است. همچنین با در نظر گرفتن این مسأله که چتر معمولاً در فرکانس های بالا اتفاق می افتد، مدل مورد استفاده برای میراگر، باید قابلیت در نظر گرفتن انواع بازه های فرکانسی و دامنه های ارتعاشی را دارا باشد، که مدل بوک-ون اصلاح شده در مقایسه با سایر مدل ها، بهتر پاسخگوی این نیاز می باشد. قسمت شکل ۵- ب سیستم مکانیکی معادل مورد استفاده در مدل بوک-ون اصلاح شده را نمایش می دهد.

معادلات حاکم بر این مدل، به صورت زیر بیان می شوند:

$$F = \alpha z + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0) \quad (5)$$

$$z = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}|z|z|^{n-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + \delta(\dot{x} - \dot{y}) \quad (6)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1}[\alpha z + c_0\dot{x} + k_0(x - y)] \quad (7)$$

که در آن، F نیروی تولید شده به وسیله میراگر است، z متغیر تحولی پسماند می باشد که برای در نظر گرفتن تاریخچه زمانی پاسخ منظور می شود، k_1 سختی انباشتگر، c_0 میرایی لزجی می باشد که در سرعت های بالاتر مشاهده می شود و c_1 اثر میرایی است که در آزمایش های مربوط به سرعت های پایین در میراگر مشاهده شده است [۱۱]. در این مدل، وابستگی پارامترها به ولتاژ القایی، با روابط زیر قابل بیان است.

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u$$

$$c_1 = c_1(u) = c_{1a} + c_{1b} u$$

$$c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \quad (8)$$

که در آن u از رابطه (۹) پیروی می کند.

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (9)$$

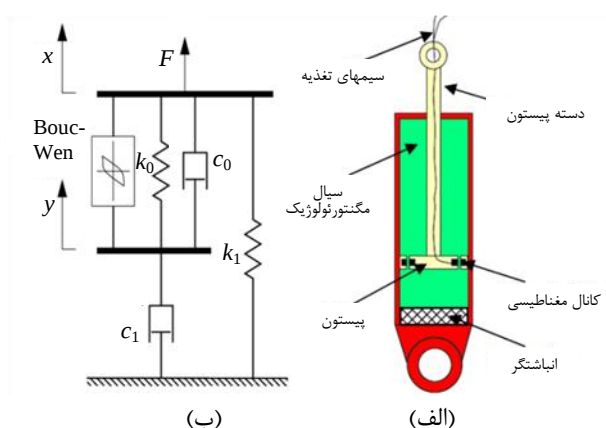
v ولتاژ اعمال شده به میراگر است. مقادیر عددی ۱۴ پارامتر مربوط به مدل بوک-ون برای میراگر مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ بیان شده اند [۱۱]. این میراگر در حالت باز شده، دارای طول تقریبی ۲۱/۵ سانتی متر و کورس $\pm 2/5$ سانتی متر می باشد.

بر اساس معادلات حرکت میراگر مگنتورئولوژیک و معادلات حرکت ارتعاشی در فرایند تراشکاری، یعنی روابط (۲) تا (۷)، معادله حرکت کلی سیستم به شکل رابطه (۱۰) بیان می شود.

جرم m و فنر-دمپرهای قرار گرفته در دو راستای دیگر، منعکس کننده رفتار ارتعاشی خود سازه ماشین ابزار و تابع تبدیل آن $\Phi(s)$ می باشد.

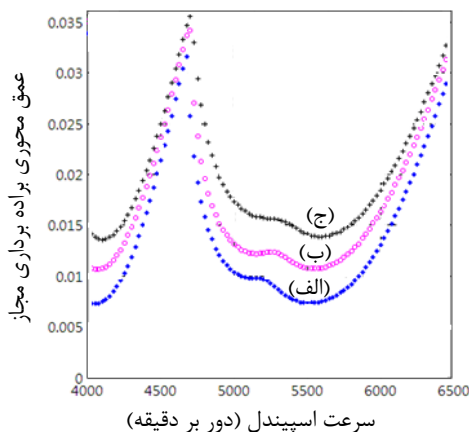
کاملاً روشن است که سیستم تحت مطالعه یک سیستم مکترونیک است که اجزای آن شامل ماشین ابزار، میراگر مگنتورئولوژیک، مکانیزم امواج احیا شونده و کنترلر بر هم تأثیرگذاری دینامیکی دارند. بنابراین، تحلیل سیستم نیازمند ارائه یک مدل یک پارچه مکترونیک از سیستم است که بتواند رفتار ارتعاشی سیستم را تحت ولتاژهای مختلف اعمالی به میراگر پیش بینی کند. لازم به ذکر است که مدل سازی یک پارچه و تحلیل چتر در حضور میراگر مگنتورئولوژیک در مقالات موجود نبوده و از نوآوری های این مقاله محسوب می شود. مدل و روش تحلیل چتر ارائه شده در این پژوهش با مقایسه نتایج حاصله با نتایج آزمایشگاهی موجود در کارهای قبلی [۸] صحت گذاری می شود.

نمای شماتیک یک میراگر مگنتورئولوژیک در شکل ۵- الف ارائه شده است. روغن مورد استفاده در این میراگر، حاوی ذرات بسیار ریز مغناطیسی قابل قطبی شدن می باشد. بنابراین ویسکوزیته ظاهری آن هنگام قرار گرفتن در یک میدان مغناطیسی، قابل تغییر است. در این میراگر از یک سیم پیچ حاوی جریان برای تولید میدان مغناطیسی استفاده می شود. بر این اساس، میرایی میراگر می تواند به صورت تابعی از ولتاژ اعمال شده به این سیم پیچ، متغیر باشد.



شکل ۵- الف- نمای شماتیک میراگر مگنتورئولوژیک، ب- سیستم مکانیکی معادل آن در مدل بوک-ون اصلاح شده.

مدل های متعددی در منابع تحقیقاتی برای توصیف رفتار میراگر مگنتورئولوژیک ارائه شده است [۱۲، ۱۱]. در این



شکل ۷ جایابی دیاگرام پایداری با اعمال ولتاژ ثابت به میراگر الف- بدون میراگر؛ ب- تحت ولتاژ صفر؛ ج- تحت ولتاژ ۲/۵

۴- شاخص شناسایی چتر

در این جا روش تازه ای برای شناسایی چتر بر اساس معرفی مفهومی به نام شاخص شناسایی چتر ارائه می شود که برای شناسایی چتر در فرایندهای واقعی به صورت روی خط و همچنین تشخیص وقوع چتر و رسم نمودارهای پایداری در مدل سازی ها، قابل استفاده می باشد. این در حالی است که یکی از روش های معمول مشاهده شده در پژوهش های پیشین در زمینه شناسایی روی خط چتر، تحلیل سیگنال های صوتی سیستم می باشد [۱۳]. نمودار گردش کار روش پیشنهادی در شکل ۸ نشان داده شده است. در ابتدا واریانس سیگنال مورد نظر در طول زمان یک گام (۰/۳ ثانیه) محاسبه می شود، سپس محتویات سیگنال به دو فاصله زمانی تفکیک می شود که اولین بازه بین ۰/۲۶ ثانیه و ۰/۲۸ ثانیه، و دومین بازه بین ۰/۲۸ ثانیه و ۰/۳ ثانیه می باشد. هر یک از این دو شاخه سیگنال وارد بلوکی می شود که جمع تمامی مقادیر آن در طول بازه محاسبه شود. سپس شاخص شناسایی چتر با تقسیم کردن دو مقدار به دست آمده بر یکدیگر ایجاد می شود. مقدار این شاخص در زمان ۰/۳ ثانیه نشان دهنده وقوع، عدم وقوع و میزان فاصله از شرایط چتر می باشد.

۵- کنترل نیمه فعال

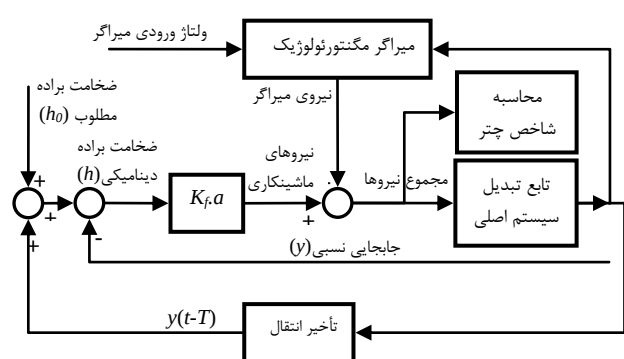
طراحی یک سیستم کنترلی فازی که وقوع چتر را تشخیص دهد و ولتاژ مناسب را به میراگر مگنتورئولوژیک اعمال کند در

جدول ۱ پارامترهای مدل بوک-ون اصلاح شده

پارامتر	مقدار	واحد
C_{oa}	۲۱	N.sec/cm
C_{ob}	۳/۵	N.sec/cm.V
k_o	۴۶/۹	N/cm
C_{1a}	۳۸۳	N.sec/cm
C_{1b}	۲/۹۵	N.sec/cm.V
k_I	۵	N/cm
x_0	۱۴/۳	cm
a_a	۱۴۰	N/cm
a_b	۶۹۵	N/cm.V
Γ	۳۶۳	cm ⁻²
B	۳۶۳	cm ⁻²
A	۳۰۱	-
N	۲	-
H	۱۹۰	Sec ⁻¹

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = K_f a [h_0 + y(t-T) + y(t)] - F_{MRD}(t) \quad (10)$$

که در آن F_{MRD} نیروی اعمال شده به وسیله میراگر است که همواره در جهت خلاف ارتعاش نسبی به ابزار وارد می شود. شکل ۶ بلوک دیاگرام سیستم یک پارچه حاصل را نمایش می دهد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که منحنی های پایداری حتی تحت ولتاژ به سمت بالا منتقل می شوند (شکل ۷) که به معنی بهبود پایداری در مقابل چتر می باشد.



شکل ۶ بلوک دیاگرام سیستم یک پارچه ماشین تراش و میراگر مگنتورئولوژیک جهت مطالعه چتر

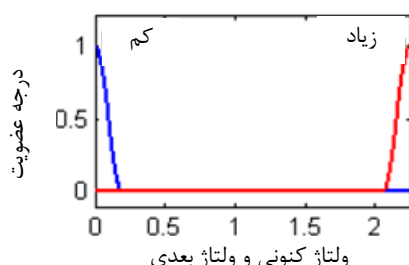
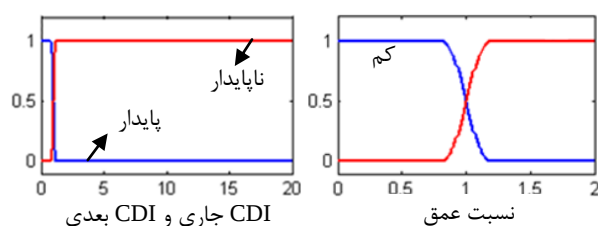
این نتایج با مشاهدات تجربی گزارش شده در مرجع [۸] تطابق دارد، در حالی که در این مرجع هیچ تحلیلی برای توجیه این امر ارائه نشده بود.

پیشنهادی این است که حتی در صورت تغییر نوع ماشین ابزار یا مشخصه های سازه ای آن و یا مشخصه های میراگر مگنتورئولوژیک، کنترلر به خوبی قادر به تطابق با شرایط جدید خواهد بود. علت این است که کنترلر بر اساس شاخص شناسایی چتر پایه ریزی شده است، که معیاری از وقوع یا دوری و نزدیکی به شرایط چتر می باشد و دیگر ورودی های کنترلر نیز فقط به شرایط ماشین کاری وابسته اند.

توابع عضویت ورودی ها و خروجی کنترلر فازی در شکل ۱۰ نشان داده شده اند. دو تابع عضویت S- شکل و Z- شکل برای هر ورودی و خروجی در نظر گرفته شده است. بر اساس دانش شهودی در مورد دینامیک سیستم و وظیفه کنترلر، یک پایگاه قوانین فازی مطابق جدول ۲ ارائه شد.

جدول ۲ قوانین فازی بکار رفته برای کنترل نیمه فعال چتر

ولتاژ بعدی (خروجی)	ولتاژ کنونی	نسبت عمق	CDI قبلی	CDI کنونی
کم	کم	--	پایدار	پایدار
کم	--	کم	ناپایدار	پایدار
زیاد	--	زیاد	ناپایدار	پایدار
زیاد	--	--	--	ناپایدار
کم	زیاد	کم	پایدار	پایدار
زیاد	زیاد	زیاد	پایدار	پایدار

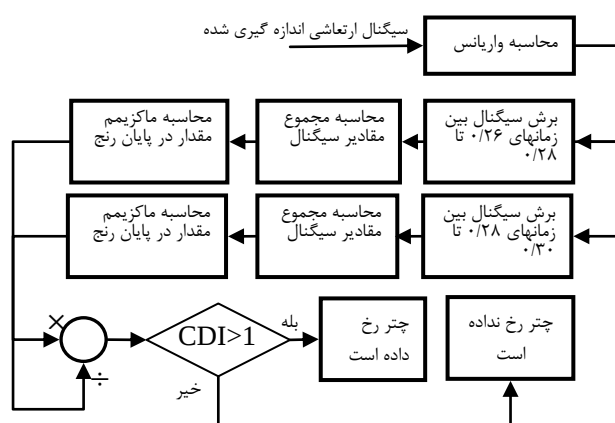


شکل ۱۰ توابع عضویت ورودی ها و خروجی کنترلر فازی

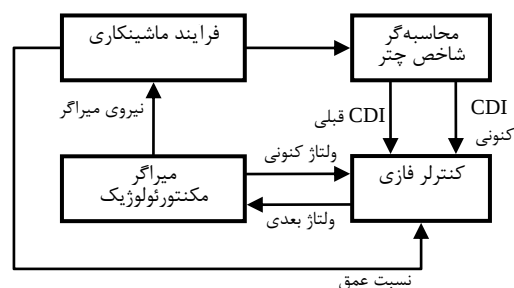
۶- بحث و تحلیل نتایج

با اضافه کردن میراگر مگنتورئولوژیک به سیستم ماشین تراش،

این قسمت بیان می شود. فرایند محاسبه ولتاژ مناسب (نمودار گردش کار شکل ۹) به این صورت می باشد که برای هر شرایط ماشین کاری خاص، یک مقدار به عنوان شاخص شناسایی چتر، بر اساس تحلیل سیگنال های ارتعاشی سیستم محاسبه می شود. ورودی های کنترلر فازی شامل مقدار محاسبه شده شاخص شناسایی چتر در گام فعلی و گام قبلی، ولتاژ کنونی میراگر، و شرایط ماشین کاری (مانند نسبت عمق محوری در گام فعلی به گام قبلی) می باشند. خروجی کنترلر فازی نیز مقدار ولتاژی است که باید در گام بعد به میراگر اعمال شود. مجموعه ای از قوانین فازی برای محاسبه ولتاژ خروجی مورد استفاده قرار می گیرد. در صورتی که وقوع چتر تشخیص داده شود، در گام بعدی (یعنی ۰/۳ ثانیه بعد)، اصلاح ولتاژ برای خروج از شرایط چتر انجام می گیرد.



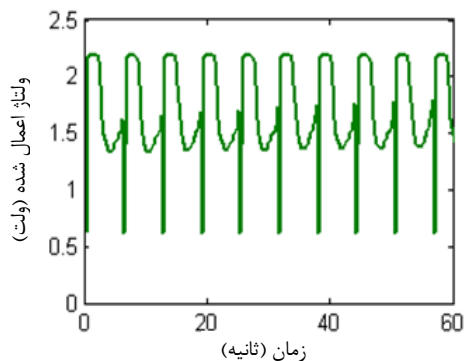
شکل ۸ نمودار گردش کار روش پیشنهادی برای شناسایی روی خط چتر



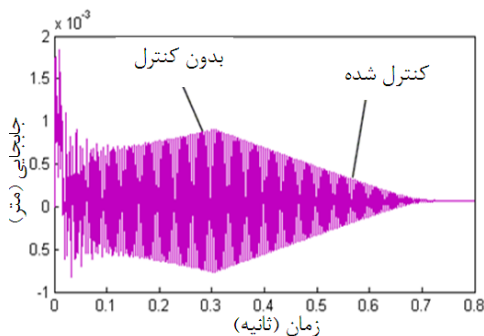
شکل ۹ فرایند محاسبه ولتاژ مورد نیاز در سیستم کنترلی

این نرخ تغییر ولتاژ نباید از محدودیت های پهنای باند میراگر مگنتورئولوژیک تجاوز کند. مزیت دیگر کنترلر

تراش با کنترلر فازی مناسب، در پژوهش حاضر ارائه شد.



شکل ۱۲ ولتاژ اعمال شده به میراگر در حالت کنترل شده، در یک دقیقه از زمان شبیه سازی



شکل ۱۳ نمودار ارتعاشات نسبی برای شرایط ناپایدار اولیه و کنترل شده

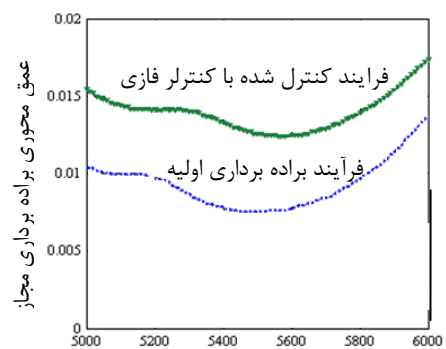
مدل سازی و ابزارهای تحلیلی برای آنالیز و طراحی کنترلر مورد بررسی قرار گرفت و نتایج شبیه سازی، نتایج تجربی مربوط به ایده مقدماتی استفاده از این میراگر در کاهش ارتعاشات چتر ماشین ابزار را تأیید کرد. یک کنترلر فازی به منظور محاسبه ولتاژ مورد نیاز میراگر، بر اساس رفتار ارتعاشی سیستم طراحی شد و با بکارگیری آن، مشخصه های پایداری سیستم به طور قابل توجهی بهبود یافت. نتایج به دست آمده نشان دهنده عملکرد موفق ایده پیشنهادی، در بهبود پایداری در فرایند تراشکاری، با حداقل مصرف انرژی می باشند.

۸- مراجع

- [1] Stone, B. J., "The Effect on the Chatter Behavior of Machine Tools of Cutters with Different Helix Angles on Adjacent Teeth", *Proc. 11th MTD R*, University of Birmingham, Vol. A, 1970, pp. 169-180.

نمودارهای پایداری آن به سمت بالا و مقداری به راست انتقال می یابند. این به معنی عمق براده برداری مجاز بیشتر در هر سرعت دورانی، یعنی بهبود پایداری است. به دلیل وجود میراگر، نسبت میرایی معادل سیستم (ک) افزایش می یابد، بنابراین قسمت حقیقی تابع پاسخ فرکانسی کاهش یافته و موجب افزایش پهنای مجاز می شود و نمودارها به سمت بالا انتقال می یابند. حرکت اندک نمودارها به سمت راست، به دلیل افزایش کم فرکانس طبیعی سیستم به علت افزایش سختی معادل، به واسطه وجود میراگر مگنتورئولوژیک می باشد. چون فرکانس چتر نزدیک به فرکانس طبیعی سیستم، اما اندکی بیشتر از آن است [۹]، f_c نیز افزایش می یابد که موجب حرکت اندک نمودارهای پایداری به سمت راست می شود. این اثرات با افزایش ولتاژ میراگر، مقداری تشدید می شوند.

شکل ۱۱ قسمتی از دیاگرام پایداری سیستم اولیه و سیستم کنترل شده را پس از طراحی کنترلر فازی، و شکل ۱۲ ولتاژ اعمال شده به میراگر را در حالت کنترل شده، در یک دقیقه از زمان شبیه سازی نشان می دهد. نتایج گویای این مطلب است که کنترلر پیشنهادی، اثر مثبت قابل توجهی بر مشخصه های پایداری سیستم و نمودارهای پایداری آن، با مصرف انرژی ناچیز داشته است. شکل ۱۳ شبیه سازی ارتعاشات در حوزه زمان برای شرایط ویژه ای است که ابتدا در حالت ناپایدار قرار داشته و با تشخیص کنترلر و توقف رشد ارتعاشات، به شرایط پایدار تبدیل شده است.



سرعت اسپیندل (دور بر دقیقه)

شکل ۱۱ دیاگرام پایداری سیستم اولیه و سیستم کنترل شده

۷- نتیجه گیری

بکارگیری یک میراگر مگنتورئولوژیک در سیستم ماشین

- [8] Sathianarayanan, D., Karunamoorthy, L., Srinivasan, J., Kandasami, G. S., and Palanikamur, K., "Chatter Suppression in Boring Operation Using Magnetorheological Fluid Damper", *Materials & Manuf. Processes*, Vol. 23, No. 4, 2008, pp. 329-335.
- [9] Altintas, Y., *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000..
- [10] Tlustý, J., and Ismail, F., "Basic Nonlinearity in Machining Chatter", *Annals of the CIRP*, Vol. 30, No. 1, 1981, pp. 21-25.
- [11] Spencer, B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K., and Carlson, J. D., "Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers", *J. Eng. Mech.*, Vol. 123, No. 3, 1997, pp. 230-238.
- [12] Liao, W. H., and Lai, C. Y., "Harmonic Analysis of a Magnetorheological Damper for Vibration Control", *J. Smart Mater. Structural*, Vol. 11, 2002, pp. 288-296.
- [13] Altintas, Y., and Chan, P. K., "In Process Detection and Suppression of Chatter in Milling", *J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 32, No. 3, 1992, pp. 329-347.
- [2] Tarng, Y. S., Kao, J. Y., and Lee, E. C., "Chatter Suppression in Turning Operations with Tuned Vibration Absorber", *J. of Materials Proc. Tech.*, Vol. 105, No. 1, 2000, pp. 55-60.
- [3] Ema, S., and Marui, E., "Suppression of Chatter Vibration of Boring Tools Using Impact Dampers", *Int. J. Machine Tools & Manuf.*, Vol. 40, No. 8, 2000, pp. 1141-1156.
- [4] Mei, C., Cherng, J. G., and Wang, Y., "Active Control of Regenerative Chatter during Metal Cutting Process", *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vol. 128, No. 1, 1970, pp. 246-349.
- [5] Song, S., 1998., *Intelligent Machining Control for Turning Process*, PhD Thesis, Fac. Grad. School Univ. Texas, Austin.
- [6] Wang, B., and Fei, R., "On-line Chatter Detection and Control in Boring Based on an Electrorheological Fluid", *J. Mechatronics*, Vol. 11, No. 7, 2001, pp. 779-792.
- [7] Mei, D., Kong, T., Shih, A. J., and Chen, Z., "Magnetorheological Fluid-controlled Boring Bar for Chatter Suppression", *J. Materials Processing Tech.*, Vol. 209, 2009, pp. 1861-1870.