



تعیین میرایی فرآیندی فرآیند تراشکاری با استفاده از تحلیل سری زمانی

مسعود پور^{۱*}، آسیه علی آبادی^۲ و سعید رحمان نی^۳

^۱ استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان، قوچان، ایران
^۲ دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان، قوچان، ایران
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۳/۰۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۴/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۸/۰۶

چکیده

در اکثر شبیه‌سازی‌هایی که در زمینه فرآیند تراشکاری تاکنون توسط محققان انجام گرفته است، میرایی سیستم در زمان برش با میرایی بدست آمده از آزمایشات مودال، یکسان در نظر گرفته شده است. به این ترتیب اثر تماس ابزار با قطعه‌کار در نظر گرفته نشده است و این ساده‌سازی می‌تواند سبب کاهش دقت شبیه‌سازی شود. در این مقاله، به تعیین میرایی زمان برش در فرآیند تراشکاری به روش تحلیل سری‌زمانی پرداخته شده است. این روش، برپایه مقایسه بعد همبستگی سیگنال جابجایی ابزار در راستای پیشروی در آزمایش و شبیه‌سازی است. بدین ترتیب میرایی زمان برش قابل محاسبه خواهد بود که با شرایط تماس بین ابزار و سطح قطعه کار در زمان ماشینکاری در پیشروی‌ها و سرعت‌های برشی مختلف تغییر می‌کند. مقایسه نتایج شبیه‌سازی جابجایی ابزار در نرم‌افزار متلب با جابجایی‌های بدست آمده از آزمایش، حاکی از دقت قابل توجه روش پیشنهادی، به منظور تعیین جابجایی ابزار در فرآیند تراشکاری است. از نتایج روش پیشنهاد شده، می‌توان جهت پیشگویی بافت سطح قطعات تولید شده در فرآیند تراشکاری استفاده کرد.

کلمات کلیدی: فرآیند تراشکاری؛ میرایی فرآیندی؛ بعد همبستگی؛ تحلیل سری زمانی.

Identifying Process Damping of Turning Process using Time Series Analysis

M. Pour^{1,*}, A. Aliabadi², and S. Rahman nia³

¹ Assistant Professor, Mech. Eng. Dept., Quchan University of Advanced Technology, Quchan, Iran.
^{2,3} BSc Student, Mech. Eng. Dept., Quchan University of Advanced Technology, Quchan, Iran.

Abstract

In most of the simulation works conducted by the researchers on the turning process, the process damping of a system is considered by the modal analysis. Indeed, in these studies, the contact of the tool with the work-piece is not taken into account, which can reduce the accuracy of the simulation. In this work, the process damping of the turning process is defined using the time series analysis. The recommended method is based upon comparison with the correlation dimension of the simulation to experiment displacement signal in the feed direction. Therefore, the variation in process damping is calculated based on the variation feed and spindle speed. The simulation results of displacement of the tool in the feed direction in the MATLAB software against displacement of the tool in experiments indicate the significant accuracy of the proposed method in determining displacement of the tool in the turning process. The results of the suggested approach can be used for predicting the surface roughness of the manufactured work-piece using the turning process.

Keywords: Turning Process; Process Damping; Correlation Dimension; Time Series Analysis.

۱- مقدمه

امروزه تولید قطعات صنعتی با خطای ابعادی کم و کیفیت سطح بالا به همراه کاهش زمان تولید، به عنوان یکی از روش‌های غلبه به مشکلات اقتصادی ماشینکاری مدنظر قرار گرفته است. به این ترتیب، بررسی و مدل‌سازی مرحله پایانی تولید در قطعاتی که با فرآیندهای برداشت فلز به تولید می‌رسند، مورد توجه محققان قرار گرفته است.

شبیه‌سازی عملیات ماشینکاری، مورد توجه بسیاری از محققان در زمینه برش فلز و دینامیک ماشین ابزار بوده است. از آنجا که عملیات تراشکاری عمومیت خاصی داشته، نتایج آن را می‌توان به خوبی برای سایر فرآیندها تعمیم داد، لذا تحقیقات صورت گرفته مرتبط با فرآیند تراشکاری بیش از سایر فرآیندها است. در این راستا، تحقیقات زیادی در زمینه پایداری فرآیند ماشینکاری و به ویژه پیش‌بینی و اجتناب از ارتعاشات خود برانگیخته صورت گرفته است.

پدیده ناپایداری در فرآیندهای برش، اولین بار توسط تلاستی^۱ [۱] و توبیاس^۲ [۲] مطرح شد. آنها مشاهده کردند که ضخامت براده متأثر از ارتعاشات به طور دینامیکی نیروهای ماشینکاری را تحت تأثیر قرار می‌دهد که در برگشت این نیروها، خود موجب بدتر شدن شرایط ارتعاشی می‌شود و پدیده بازیابی ارتعاشات رخ می‌دهد. همچنین آنها دریافتند که یکی از پارامترهای مهم در پایداری فرآیند، عمق برش است. تلاستی، دیدگاه تابع تبدیل جهت دار را پیشنهاد داد که در آن نیروها و جابجایی دینامیکی در راستای مورد نظر تصویر می‌شوند [۱]. این مدل برای فرآیندی صادق است که تنها یک بعد داشته باشد. مینیس و یانوشسکی^۳ [۳]، در سال ۱۹۹۳ و بوداک و التینتاس^۴ [۴]، در سال ۱۹۹۸ نشان دادند که مدل یک بعدی، نتایج دقیقی برای فرآیندهای هندسی پیچیده نظیر تراشکاری و فرزکاری ندارد و این موضوع را برای پایداری فرزکاری نشان دادند. در ادامه کانکو^۵، ارتعاشات خود بر انگیزه تراشکاری را با استفاده از یک مدل دو بعدی

ارائه داد که نتایج آن بیشتر بر پایه مشاهدات تجربی استوار بود [۵].

ارتعاشات خود بر انگیزه^۶ (چتر) در ماشینکاری، معمولاً موجب کم شدن عمر ابزار و کاهش کیفیت سطح نهایی قطعه‌کار می‌شود و در عمل باید از اجتناب کرد [۶]. ارتعاشات بین ابزار و قطعه‌کار، نقش مهمی در ایجاد سطح ماشینکاری شده دارد، در تراشکاری نیز وجود این ارتعاشات، باعث کاهش کیفیت سطح و همچنین از بین رفتن تلرانس‌های مورد نیاز می‌شود. همچنین وجود ارتعاشات، محدودیتی را برای نرخ براده برداری ایجاد می‌کند؛ از این رو پیش‌بینی و جلوگیری از وقوع چتر از اهمیت بالایی برخوردار است. برای پیش‌بینی و جلوگیری از چتر، مدل‌سازی دقیق فرآیند مورد نیاز است. بوداک و ازولو^۷ [۷]، مدل‌سازی تحلیلی از فرآیند تراشکاری را جهت بررسی تأثیر شعاع نوک، ارتعاش ابزار و قطعه‌کار را انجام دادند. همچنین آنان محدوده پایداری در عملیات تراشکاری را به طور تحلیلی پیش‌بینی کردند. در سالهای اخیر به منظور بالا بردن دقت مدل‌های ارائه شده، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه تعیین شرایط تماس ابزار و قطعه‌کار انجام گرفته است که بیشتر آن‌ها بر اساس مدل ارائه شده توسط وو^۸ [۸] می‌باشند. از آن جمله می‌توان به مدل‌سازی میرایی^۹ فرآیند در [۹-۱۲] اشاره کرد. آلتینتاش^{۱۰} و همکارانش [۹]، اثرات سایش نوک ابزار، سرعت برش و نیز سرعت و شتاب در راستای پیشروی ابزار را در ایجاد میرایی فرآیندی، مورد بررسی قرار دادند. بوداک و همکارش [۱۰]، تحقیقات خود را روی اثر پارامترهای هندسی ابزار، شامل شعاع نوک، زاویه آزاد ابزار و طول ابزارگیر، و پارامترهای مودال ابزار متمرکز کردند. عینیان و همکارش [۱۱]، به بررسی اثرات نرخ پیشروی، زوایای ابزار، شعاع نوک ابزار و عمق برش در ایجاد میرایی فرآیندی و تعیین پایداری فرآیند تراشکاری پرداختند. در ادامه احمدی و همکارش [۱۲ و ۱۳]، به بررسی آزمایشگاهی و تحلیلی اثرات زاویه آزاد ابزار، طول موج و سایش نوک ابزار در تغییر حجم تداخل سطح آزاد ابزار

⁶ Chatter

⁷ Ozlu , Budak

⁸ Wu

⁹ Damping

¹⁰ Altintas

¹ Tlusty

² Tobias

³ Minis , Yanushevsky

⁴ Budak , Altintas

⁵ Kaneko

در این تحقیق با فرض صلب بودن قطعه‌کار نسبت به ابزار، از دینامیک قطعه کار صرف‌نظر شده و جرم معادل m ضریب میرایی زمان ارتعاش آزاد c_f و سختی ابزار k با استفاده از آنالیز مودال به روش آزمایشگاهی، در حالت بدون درگیری ابزار با قطعه‌کار، تعیین می‌گردند؛ اما ضریب میرایی بدست آمده تنها در شرایط ارتعاش آزاد می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. دلیل آن اعمال شرایط ناحیه شخم‌زنی روی ابزار، در زمان ماشینکاری است که در شکل ۲، نشان داده شده است. در بسیاری از تحقیقات به منظور وارد کردن اثرات تماس ایجاد شده در ناحیه شخم زنی، از نیرویی معادل نیروی شخم‌زنی F_p در نیروی ماشینکاری F در سمت راست معادله دیفرانسیل حرکت سیستم استفاده شده است [۸]. به این ترتیب، نیروی ناشی از فرآیند برش در معادله (۱) مطابق معادله (۲) در نظر گرفته شده است.

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = F_z \quad (1)$$

$$F(t) = F_S(t) + F_p(t) \quad (2)$$

در این رابطه برای هر راستا F_S نیروی برش و F_p بیان کننده نیروهای شخم زنی^۱ است که هر یک با روابط زیر محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است به دلیل آنکه در مقالات گذشته راستای Z و Y را به ترتیب r و t در نظر گرفته‌اند، در این مقاله نیز از این اندیس‌گذاری استفاده شده است.

$$F_r = K_{rc}bt + K_{re}b \quad (3)$$

$$F_t = K_{tc}bt + K_{te}b \quad (4)$$

در روابط فوق b عرض برش، k_{rc} و k_{tc} ضرایب برشی در راستاهای r و t ، k_{re} و k_{te} ضرایب لبه‌ای ابزار در راستاهای r و t و همچنین $h(t)$ ضخامت براده لحظه‌ای است که مقدار آن در هر لحظه با رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$h(t) = \max(0, S_t + z(t + \tau) - z(t)) \quad (5)$$

نیروی شخم‌زنی که با اندیس p نشان داده شده‌اند، با استفاده از مدل سطح موج دار شده^۲ [۸] محاسبه می‌شود. در روابط (۶) و (۷)، تعاریف اولیه نیروهای شخم‌زنی شعاعی و مماسی بیان شده است [۹].

$$F_{rp} = k_{sp}V(x), V(x) = S(x)b \quad (6)$$

$$F_{tp} = \mu F_{rp} \quad (7)$$

و قطعه کار در دو مدل خطی و تقریبی پرداخته‌اند. در مدل‌های ارائه شده، از دو مدل میرایی خطی و غیرخطی استفاده شده است. مدل‌های خطی اگرچه به سادگی قابل پیاده‌سازی می‌باشند، اما دارای دقت پایینی می‌باشند و از طرف دیگر، مدل‌های غیرخطی که دارای دقت مناسبی هستند، دارای پارامترهای مختلفی هستند که تعیین هر یک از آنان به سادگی امکان‌پذیر نیست [۱۰].

با توجه به توضیحات فوق، در این مقاله برای اولین بار در تراشکاری به منظور وارد کردن اثرات متقابل بین قطعه‌کار و لبه برنده ابزار، از روش تحلیل سری زمانی سیگنال جابجایی استفاده شده است. بدین ترتیب، دقت شبیه‌سازی انجام شده افزایش یافته و از سوی دیگر، محدودیت‌های مدل‌های پیشین در تعیین میرایی زمان برش حذف می‌شود. با توجه به توضیحات بیان شده، ساختار مقاله به صورتی سازمان‌دهی می‌شود که در ادامه بیان می‌شود.

در قسمت اول، مدل دینامیکی سیستم به منظور تعیین رفتار ارتعاشی در زمان ماشینکاری ارائه شده است. در قسمت دوم، تئوری جدیدی با استفاده از تحلیل سری زمانی و معیار بعد همبستگی برای تعیین میرایی سیستم در زمان برش معرفی می‌شود. سپس، تجهیزات آزمایش و آزمایش‌های انجام شده به منظور تعیین پارامترهای برش، پارامترهای مودال ابزار و تعیین میرایی زمان برش ارائه شده است. در پایان مقایسه‌ای بین نتایج جابجایی نوک ابزار در دو نمونه شبیه‌سازی و آزمایش انجام شده است.

۲- دینامیک تراشکاری

مدل‌سازی فرآیند تراشکاری با توجه به خصوصیات دینامیکی سیستم و با استفاده از مدل ارتعاشاتی انجام می‌شود. در این مقاله، بررسی‌ها روی یک مدل یک درجه آزادی انجام شده است (شکل ۱). نوع فرآیند تراشکاری، رو تراشی انتخاب شده است که به منظور ثابت ماندن عرض برش، قطعه‌کار به شکل لوله‌ای با ضخامت ثابت ۵mm طراحی شده است. کل ضخامت قطعه‌کار، به عنوان عرض برش در نظر گرفته شده است (شکل ۱). با توجه به نوع تماس ابزار با سطح ماشینکاری شده، جهت ارتعاش ابزار در جهت پیشروی در نظر گرفته شده است.

¹ Ploughing

² Regeneration of waviness

$$F_{rp} = bk_{sp} \frac{w^2}{2V_t} \dot{r} \approx C_{eq} \dot{r} \quad (9)$$

در این رابطه V_t سرعت برش در جهت مماس، w عرض سایش نوک ابزار و C_{eq} میرایی معادل ناشی از تماس ابزار و قطعه کار می‌باشند [۱۳]. با توجه به تقریب فوق، C_{eq} براساس رابطه (۱۰) تقریب زده شده است که در آن C_d فاکتور میرایی شکل است و براساس زاویه آزاد ابزار، دامنه ارتعاش، عرض سایش نوک ابزار و طول موج سطح ماشینکاری شده تغییر می‌کند. برای جزئیات بیشتر به [۱۳] مراجعه شود.

$$C_{eq} = \frac{k_{sp} L C_d}{V_t} \quad (10)$$

در این مقالات، فرض شده است که دامنه نوسانات در ناحیه پایدار برش، کوچک باشد. بر این اساس، مشکل اصلی تمامی تحقیقات انجام شده در زمانی به وجود می‌آید که ابزار دچار ارتعاشاتی در خارج از ناحیه پایداری شود. در این صورت، امکان محاسبه ضریب C_d وجود ندارد. از طرف دیگر، در شرایط برش پایدار، محاسبه پارامترهای k_{sp} و C_{eq} به سادگی امکانپذیر نیست.

برای حل مشکلات فوق، در این مقاله با استناد به رفتار دینامیکی سیستم در حالت ارتعاشات پایدار و ناپایدار، سعی خواهد شد که میرایی ویسکوزی، معادل با میرایی اعمال شده در ناحیه برش، برای سیستم تعیین شود. به این ترتیب، فرضیات در نظر گرفته شده در تحقیقات گذشته حذف و رفتار سیستم در جهت مورد بررسی با دقت بالاتری تعیین می‌شود. برای این منظور، جهت تعیین ضریب میرایی فرآیند، C_{eq} از تحلیل سری زمانی سیگنال جابجایی ابزار در راستای r (در آزمایش و شبیه‌سازی) استفاده می‌شود. این روش در بخش بعد توضیح داده شده است. به این ترتیب، نویسندگان مقاله راستای r را برای انجام شبیه‌سازی و بررسی‌ها انتخاب کرده‌اند.

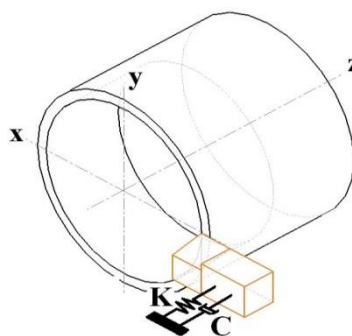
۳- تحلیل سری زمانی

تحلیل سری‌های زمانی به منظور تعیین دینامیک سیستم و نیز به منظور پیشگویی رفتار آینده سیستم، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در علم مکانیک، شاخه جامدات، رفتار دینامیکی سیستم به معنی رفتار حرکتی سیستم است که تابعی از پارامترهای دینامیکی سیستم نظیر، جرم، سختی، میرایی و نیروی وارده به آن است. اگر در مجموعه‌ای

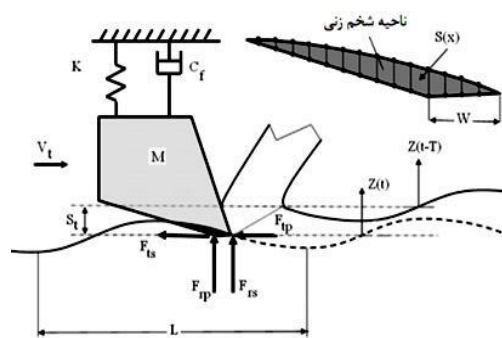
در روابط فوق $V(x)$ ، حجم ماده قرار گرفته در فصل مشترک واقع در سطح زیرین ابزار و سطح قطعه کار، μ ضریب اصطکاک بین ابزار و قطعه کار و k_{sp} ضریب ویژه می‌باشند. وو در [۱۴] مقدار k_{sp} را که وابسته به مشخصات ماده است برای مواد مختلف تعیین کرده است. مقدار k_{sp} با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود.

$$k_{sp} = \frac{E}{1.29 \rho (1 - 2\nu)} \quad (8)$$

در این رابطه (۸)، E مدول یانگ، ν نسبت پوسان و ρ مقدار تغییر شکل قطعه کار است که براساس اندازه‌گیری تنش‌های پسماند تعیین می‌شود.



شکل ۱- مدل یک درجه آزادی فرآیند تراشکاری



شکل ۲- مدل دینامیکی فرآیند تراشکاری [۱۳]

چایو^۱ و همکارانش [۱۵]، نشان دادند که اگر جهت \dot{r} به سمت قطعه کار باشد، می‌توان نیروی شخم‌زنی در جهت r را به صورت رابطه (۹) بیان کرد.

^۱Chiou

برای محاسبه جمع همبستگی سیگنال جابجایی، پس از ترسیم فضای حالت، برای هر نقطه i روی مسیر حرکت^۲، تعداد نقاط واقع در فاصله R از نقطه مورد نظر، بجز خود نقطه مورد نظر، باید تعیین شوند که رابطه آن به صورت معادله (۱۲) است:

$$C(R) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i}^N \theta(R - |x_i - x_j|) \quad (12)$$

در این رابطه، N تعداد کل نقاط بکار گرفته شده برای ترسیم فضای حالت، R فاصله شعاعی بین نقاط می‌باشند. برای تعیین مقدار بعد همبستگی، از رابطه (۱۳) استفاده می‌شود.

$$D_c = \lim_{R \rightarrow 0} \frac{\log C(R)}{\log R} \quad (13)$$

مقدار D_c با تغییر مقدار R تغییر می‌کند [۱۸]. به منظور برطرف کردن این مشکل، پیشنهاد شده است تا بعد همبستگی در ناحیه میانی R دیاگرام جمع همبستگی تعیین شود. کلیه محاسبات تحلیل سری زمانی با استفاده از جعبه ابزار Opentstool در نرم‌افزار MATLAB انجام شده است.

۴- آزمایش و ارزیابی روش

۴-۱ تجهیزات آزمایش

تجهیزات آزمایشگاهی در شکل ۳ نشان داده شده است. ابزار از جنس HSS سنگ‌زنی شده با مشخصات ابعادی و زاویه‌ای نشان داده شده در جدول ۱، قطعه‌کار از آلیاژ آلومینیوم T6-۷۰۷۵، دینامومتر کیسلر B ۹۲۵۵ و دستگاه تراش مدل TN۵۰BR، ساخت تبریز است.

به منظور تعیین میرایی زمان برش، از مدل‌های تعیین تغییرات ضرایب برشی و آزمایش مودال، در مدل‌های شبیه‌سازی نیروهای برشی استفاده شده است. برای بدست آوردن ضرایب برشی و لبه‌ای مماسی و عمودی ابزار، آزمایش‌های تراشکاری قائم در عرض برش ثابت و پیشروی‌های متغیر انجام شده است. با در نظر گرفتن حداکثر دامنه نیرویی بوجود آمده درجهت‌های مماسی و عمودی در هر آزمایش و انجام رگرسیون خطی روی نتایج، ضرایب برشی و لبه‌ای مماسی و عمودی ابزار بدست آمده است. شیب

تمامی پارامترهای تاثیرگذار در رفتار دینامیکی سیستم یکی باشند، آنگاه انتظار می‌رود که دو سیستم دارای رفتار دینامیکی یکسانی باشند.

در میان پارامترهای دینامیکی سیستم، تنها میرایی سیستم در زمان برش دچار تغییر می‌شود [۱۶ و ۱۷]. به منظور تعیین میرایی معادل سیستم در ناحیه برش از مقایسه تحلیل سری زمانی سیگنال‌های جابجایی آزمایش‌ها و شبیه‌سازی‌ها استفاده می‌شود. معیارهای متنوعی نظیر بعد همبستگی، بعد فرکتال و انتروپی [۱۸] برای تحلیل یک سیگنال وجود دارند که در این مقاله، معیار بعد همبستگی برای مقایسه دو سیگنال بکار گرفته شده است. جزئیات بیشتر در مراجع [۱۹ و ۲۰] ارائه شده است.

به منظور محاسبه بعد همبستگی، ابتدا باید تأخیر زمانی سیگنال محاسبه شود که برای محاسبه آن از بیان خودهمبستگی استفاده می‌شود. در روش خودهمبستگی، یک تابع همبستگی به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود:

$$\rho(T) = \frac{\sum_{n=1}^N (y_{n+T} - \bar{y})(y_n - \bar{y})}{\sum_{n=1}^N (y_n - \bar{y})^2} \quad (11)$$

\bar{y} میانگین داده‌ها است. کوچک‌ترین مقدار مثبت T که به ازای آن $\rho(T) \leq 0$ است، به عنوان تأخیر زمانی محسوب می‌شود. پس از آن کمترین بعدجایگزینی با استفاده از روش کاو^۱ تعیین می‌شود. سپس با استفاده از کمترین بعد جایگزینی، بعد کافی برای تعیین فضای حالت سیستم مشخص شده، در نهایت دیاگرام جمع همبستگی سیگنال ترسیم می‌شود.

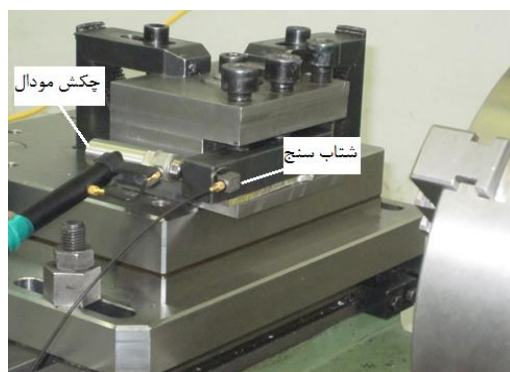
شیب ناحیه میانی این نمودار که اصطلاحاً ناحیه مقیاس‌گذاری نامیده می‌شود، بیان‌کننده بعد همبستگی است. اگر تغییرات زمانی دو سیگنال (شبیه‌سازی و آزمایش) و یا به عبارت دیگر، دینامیک دو سیستم مشابه یکدیگر باشد، آنگاه دیاگرام جمع همبستگی آنها همانند یکدیگر خواهد بود [۲۱]. به منظور مقایسه کمی مشابهت دینامیکی دو سیگنال از شیب دیاگرام جمع همبستگی استفاده می‌شود که بعد همبستگی نامیده می‌شود [۱۸]. در واقع بعد همبستگی، بیان‌کننده میزان پیچیدگی سیگنال غیرخطی است [۲۱].

² Trajectory

¹ Cao method

با توجه به روابط ۳ و ۴ و در نظرگرفتن عرض برش 5mm مقادیر ضرایب برشی و لبه‌ای به صورت جدول ۲ تعیین شده‌اند.

از دیگر پارامترهای تأثیرگذار در شبیه‌سازی صحیح، پارامترهای مودال ابزار است. پارامترهای مودال نوک ابزار با استفاده از آزمایش‌های مودال تعیین شده‌اند. لازم به ذکر است که به دلیل صلب بودن قطعه کار نسبت به ابزار، از اندازه‌گیری پارامترهای مودال و محاسبه ارتعاشات آن در شبیه‌سازی صرف‌نظر شده است. سیستم آنالایزر مودال شامل، یک چکش (B&K۸۲۰۲) به عنوان تحریک‌کننده و یک شتاب‌سنج تک محوره پیزوالکتریک (B&K۴۳۹۳) برای اندازه‌گیری شتاب است. تبدیل سیگنال‌های جمع‌آوری شده به حوزه فرکانس از طریق تجزیه و تحلیل سیگنال توسط آنالایزر دو کاناله (B&K۲۰۳۲) محقق شده است. در شکل ۵، شتاب‌سنج و چکش مودال در جهت اندازه‌گیری پارامترهای مودال نشان داده شده است. تابع پاسخ فرکانسی نوک ابزار در اثر تحریک ضربه در شکل ۶ ارائه شده است. پارامترهای مودال ابزار بکار رفته در آزمایش‌ها از بخش حقیقی و موهومی، تابع پاسخ فرکانسی^۱ از روش برداشتن قله‌ها^۲ تعیین می‌شود [۲۲].



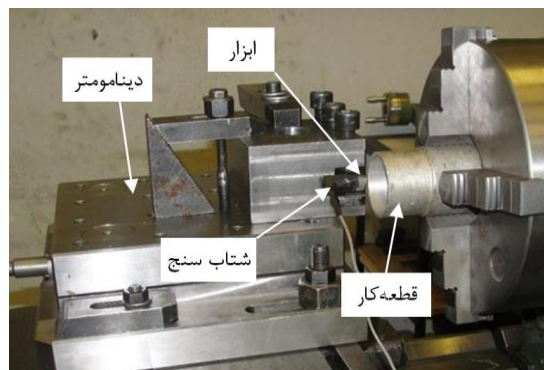
شکل ۵- نحوه انجام تست مودال ابزار

در این روش برای تعیین نسبت میرایی، ابتدا فرکانسی که کمترین دامنه را در دیگرام اعداد مختلط- فرکانس دارد، به عنوان فرکانس طبیعی (ω_n) سیستم مشخص می‌شود.

¹ Frequency Response Function (FRF)

² Peak Peaking

هریک از نمودارهای ترسیم شده در تعیین ضرایب برشی و برونمایی نمودارها تا پیشروی صفر، در تعیین ضرایب لبه‌ای استفاده می‌شود. در شکل ۴، تغییر نیروهای F_t و F_r به ازای پیشروی‌های مختلف نشان داده شده است.



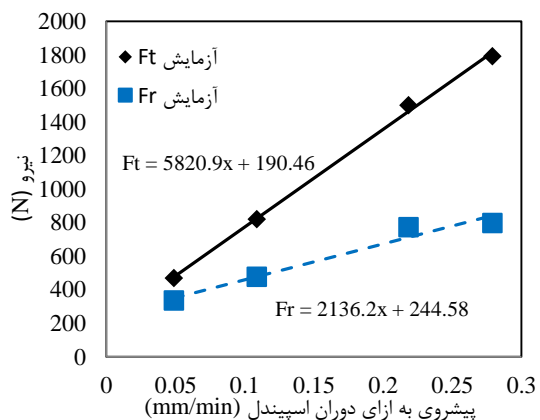
شکل ۳- تجهیزات آزمایش

جدول ۱- مشخصات هندسی ابزار

ابعاد (mm)	زاویه آزاد اصلی (Deg.)	زاویه برش (Deg.)	زاویه تنظیم (Deg.)
۸۰×۱۰×۱۰	۱۲	۳۵	۰

جدول ۲- ضرایب برشی

Kre(N/mm)	Kte(N/mm)	Krc(N/mm ²)	Ktc(N/mm ²)
۴۸/۹۲	۳۸/۱	۱/۰۶×۱۰ ^۶	۲/۹۱×۱۰ ^۶

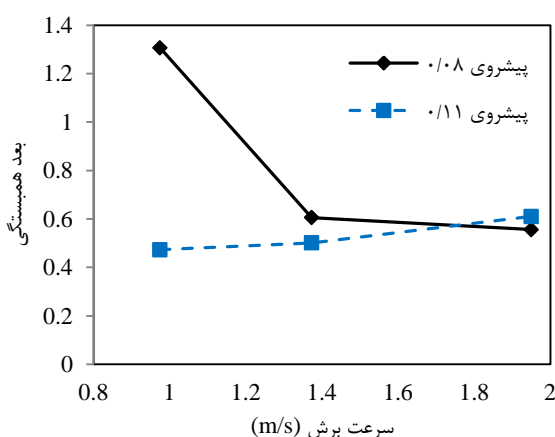


شکل ۴- تغییر نیروهای تراشکاری به ازای تغییر پیشروی

جدول ۳- شرایط برشی

پیشروی (mm/min)	سرعت برش (m/s)
۰/۱۱-۰/۰۸	۱/۳۷۳ ۰/۹۷۵ ۱/۹۵۰

مقدار میرایی داخل منطقه برش با استفاده از تحلیل سری زمانی، مطابق توضیحات ارائه شده در بخش (۳) مشخص می‌شود. برای این منظور، ابتدا بعد همبستگی سیگنال جابجایی مشخص گردیده که در شکل ۷ مقادیر آن‌ها برای آزمایش‌های جدول ۳ مشخص شده است.



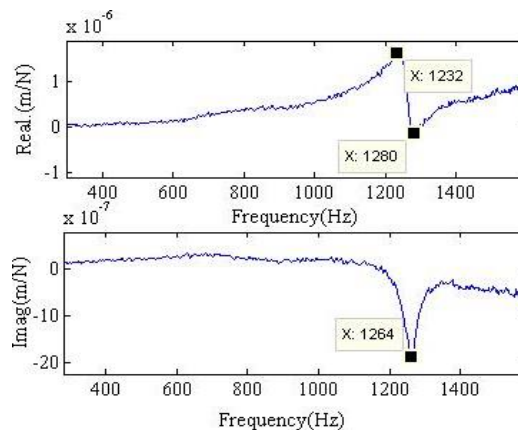
شکل ۷- روند تغییرات بعد همبستگی سیگنال جابجایی به ازای تغییرات سرعت برشی و پیشروی

با بررسی‌های انجام شده روی ابزار مشاهده گردید که در سرعت برشی ۰/۹۷۵ m/s و پیشروی ۰/۰۸ mm/min روی ابزار، براده با لبه انباشته تشکیل شده است. وجود لبه انباشته شده، سبب تغییرات نامنظم براده برداری از قطعه کار می‌شود. به این ترتیب در آزمایش سرعت برشی ۰/۹۷۵ m/s و پیشروی ۰/۰۸ mm/min افزایش بعدهمبستگی مشاهده گردیده است. با افزایش سرعت برش و حذف براده با لبه انباشته از روی ابزار، کاهش بعد همبستگی ایجاد شده است.

به منظور بررسی این موضوع، آزمایشی با سرعت برشی ۰/۹۷۵ m/s و پیشروی ۰/۱۶ mm/min به آزمایش‌های جدول ۳ اضافه گردید که روند تغییرات بعد همبستگی را با افزایش پیشروی در این سرعت برشی را نشان می‌دهد (شکل ۸ مشاهده گردد). لازم به ذکر است که افزایش بعد همبستگی

فرکانس‌های اطراف این فرکانس در دیاگرام اعداد حقیقی-فرکانس که دارای بیشترین و کمترین دامنه حول ω_n هستند، به ترتیب ω_2 و ω_3 نامیده می‌شوند، آنگاه مقدار نسبت میرایی در آن فرکانس با استفاده از رابطه (۱۴) مشخص می‌شود.

$$\xi = \frac{\omega_3 - \omega_2}{\omega_n} \quad (14)$$



شکل ۶- دیاگرام FRF ابزار برشی در ماشین تراش در جهت پیشروی

برای تعیین مقدار سختی معادل در فرکانس مورد نظر، از دامنه فرکانس طبیعی (A) در دیاگرام اعداد مختلط-فرکانس و همچنین نسبت میرایی مطابق با رابطه (۱۵) استفاده می‌شود.

$$K = \frac{-1}{2A\xi} \quad (15)$$

پس از مشخص شدن این پارامترهای مودال، سایر پارامترها جرم m و ضریب میرایی C به ترتیب با روابط (۱۶) و (۱۷) محاسبه می‌شوند.

$$m = \frac{K}{\omega_n^2} \quad (16)$$

$$C = 2\xi m \omega_n \quad (17)$$

به این ترتیب مشخصات مودال سیستم مورد بررسی در راستای پیشروی $m=17.204\text{kg}$ ، $c=739.44\text{N.s/m}$ و $k=2.74910^7\text{N/m}$ می‌باشند.

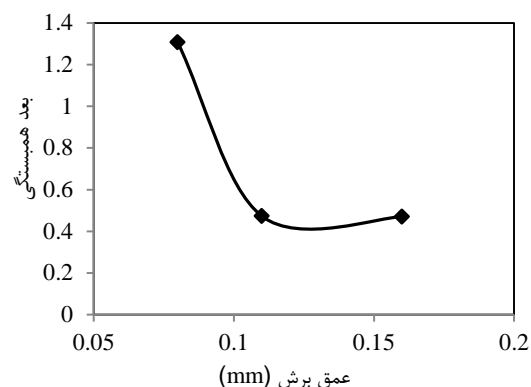
۴-۲- تعیین بعد همبستگی

به منظور تایید روش پیشنهاد شده، آزمایش‌هایی مطابق شرایط برشی جدول ۳ انجام شده است.

سیگنال، سبب میل دادن سیگنال به سمت ناپایداری می شود [۱۸].

سیگنال، سبب میل دادن سیگنال به سمت ناپایداری می شود [۱۸].

در سرعت برشی 0.975 m/s و مقدار آن 0.5% است و در شکل ۱۱، حداکثر خطا در سرعت برشی 0.975 m/s و مقدار آن 1.16% است. همانطور که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود، بعد همبستگی آزمایش با شبیه‌سازی بسیار به یکدیگر نزدیک می‌باشند؛ بنابراین می‌توان استنباط کرد، میرایی معادل بدست آمده، میرایی فرآیندی است. در شکل ۱۲، ضرایب میرایی ناحیه برش برای دو پیشروی 0.08 mm/min و 0.11 mm/min ارائه شده است.



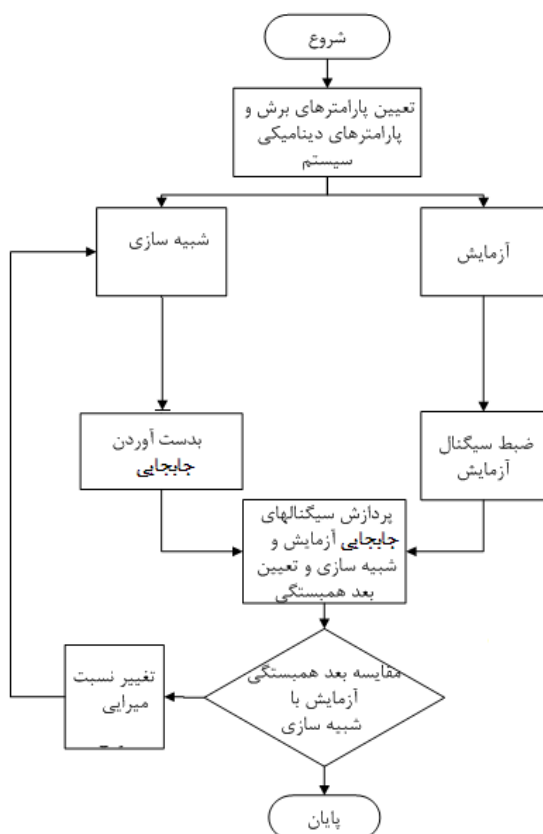
شکل ۸- روند تغییرات بعد همبستگی سیگنال جابجایی به ازای سرعت برشی 0.975 m/s در پیشروی $(0.08-0.11-0.16) \text{ mm/min}$

با توجه به آنکه، کاهش و افزایش بعد همبستگی به ترتیب همراه با افزایش و کاهش پایداری سیستم است [۱۴]، بررسی شکل‌های ۱۰ و ۱۱ انجام می‌شود. به این ترتیب، در شکل ۱۰، در پیشروی 0.08 mm/min ، افزایش سرعت برش سبب افزایش پایداری می‌شود؛ چون مقدار بعد همبستگی آن کاهش یافته است. از طرف دیگر در شکل ۱۱، در پیشروی 0.11 mm/min ، افزایش سرعت برشی سبب کاهش پایداری می‌شود؛ زیرا مقدار بعد همبستگی آن افزایش یافته است.

۵- تعیین میرایی زمان برش

میرایی زمان برش از مقایسه بعد همبستگی یا همان شیب ناحیه میانی دیاگرام جمع همبستگی آزمایش و شبیه‌سازی تعیین می‌شود. به دلیل آنکه میرایی سیستم به شدت در پاسخ دینامیکی سیستم تأثیرگذار است و تنها پارامتر متغیر در زمان قرارگیری ابزار در ناحیه برش میرایی سیستم است، لذا تعیین مناسب آن می‌تواند سبب تشابه بیشتر سیگنال شبیه‌سازی با سیگنال آزمایش شود [۲۳ و ۲۴]. برای این منظور، میرایی زمان برش فرآیند تراشکاری، با استفاده از بعد همبستگی سیگنال آزمایش محاسبه می‌شود. سپس در شبیه‌سازی با تغییر میرایی زمان برش تا زمانی که بعد همبستگی سیگنال جابجایی شبیه‌سازی، برابر بعد همبستگی سیگنال آزمایش گردد، تغییر در میرایی زمان برش انجام می‌شود. میرایی نهایی بدست آمده، میرایی معادل فرآیندی سیستم در زمان برش است. در شکل ۹، روند تعیین میرایی سیستم با استفاده از معیار بعد همبستگی نشان داده شده است.

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، مقایسه‌ای بین بعد همبستگی سیگنال‌های جابجایی آزمایش و شبیه‌سازی نشان داده شده است. حداکثر خطا در شکل ۱۰، مربوط به سرعت برشی



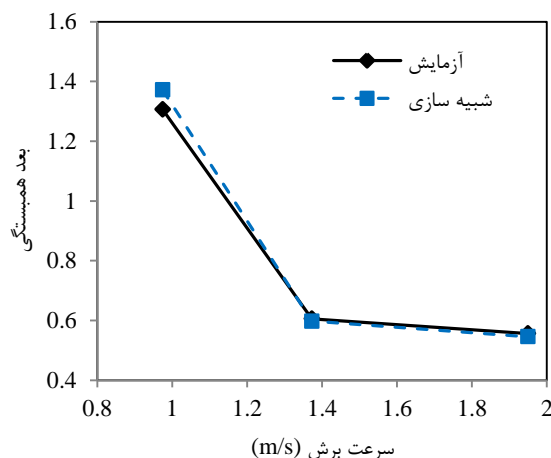
شکل ۹- فلوجارت تخمین نسبت میرایی معادل زمان برش

براساس توضیحات پاراگراف فوق و بررسی شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت برش در پیشروی 0.11 mm/min ، میرایی سیستم کاهشی تدریجی دارد. همچنین انتظار می‌رود، با افزایش سرعت برش در پیشروی 0.08 mm/min ، میرایی سیستم افزایشی تدریجی داشته باشد؛ اما به دلیل وجود براده با لبه انباشته، میرایی در سرعت برشی 0.975 m/s و پیشروی 0.08 mm/min به مراتب بیشتر از میرایی سرعت‌های برشی 1.373 m/s و 1.95 m/s است و پس از حذف آن، میرایی سیستم روند افزایش تدریجی خواهد داشت.

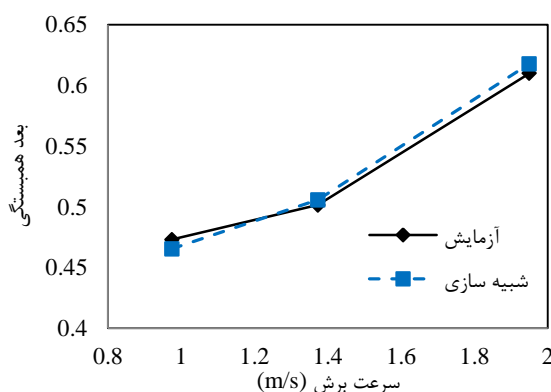
۶- شبیه‌سازی

در بخش پایانی به منظور تایید روش ارائه شده، مقایسه‌ای بین سیگنال جایجایی آزمایش و شبیه‌سازی انجام می‌شود. برای این منظور، شرایط آزمایش‌های، سرعت برشی 0.975 m/s در پیشروی 0.08 mm/min و سرعت برشی 1.373 m/s در پیشروی 0.08 mm/min شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی زمانی سیگنال جایجایی در جهت z در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است.

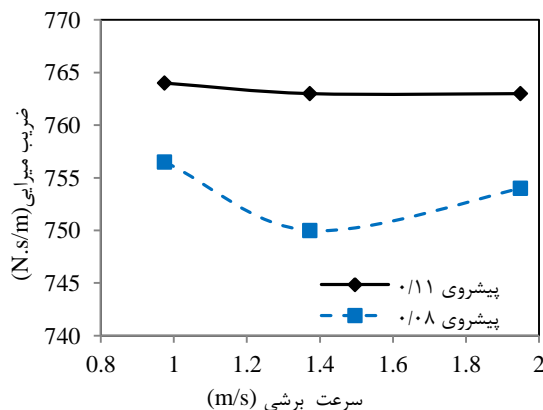
با بررسی روند تغییرات سیگنال شبیه‌سازی و آزمایش مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی می‌تواند رفتار سیستم را که به سبب تغییر میرایی زمان برش دچار تغییر شده است، به خوبی پیشگویی کند. از طرف دیگر، روش پیشنهادی می‌تواند میرایی زمان برش به همراه اثر براده با لبه انباشته شده را نیز مدل‌سازی کند (شکل ۱۳). در جدول ۴، مقایسه کمی بین برخی پارامترهای آزمایش‌های انجام شده شکل‌های ۱۳ و ۱۴ انجام شده است. به دلیل ثابت نبودن دامنه تغییرات در ۵ پرپود متوالی ماشینکاری در شکل ۱۳، مقدار متوسط حداکثر دامنه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. همچنین برای شکل ۱۴ به دلیل تغییرات دامنه به صورت افزایشی، دامنه یک پرپود ارائه شده است. در برخی از موقعیت‌ها تفاوت‌هایی در نتایج، از لحاظ دامنه جایجایی وجود دارد که می‌تواند به دلیل نویزها و اثرات به‌وجود آمده ناشی از راستای دیگر حرکت سیستم، t ، باشد.



شکل ۱۰- مقایسه بعدهمبستگی در آزمایش و شبیه‌سازی با پیشروی 0.08 m/min



شکل ۱۱- مقایسه بعد همبستگی در آزمایش و شبیه‌سازی با پیشروی 0.11 mm/min

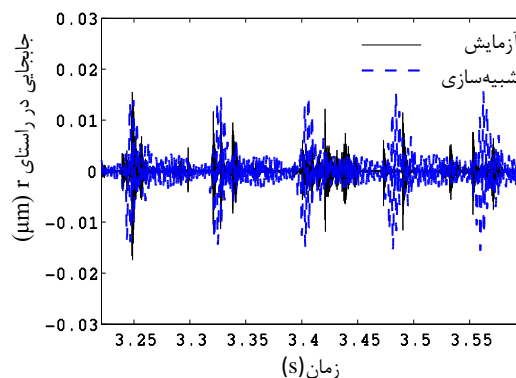


شکل ۱۲- مقایسه میرایی فرآیندی در پیشروی‌ها و سرعت‌های برشی مختلف

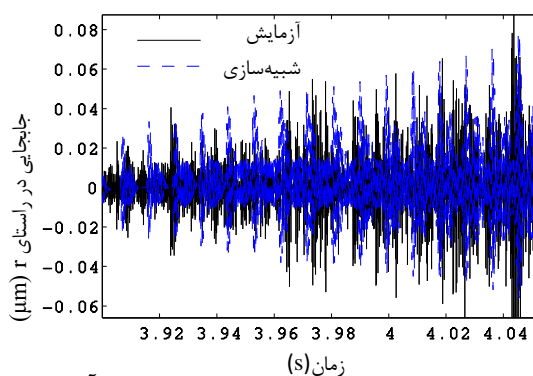
جابجایی شبیه‌سازی، با بهره‌گیری از معیار بعد همبستگی، برای تعیین میرایی زمان برش استفاده شده است. روش پیشنهادی، قابلیت بکارگیری در شرایط پایدار و ناپایدار عملیات برش را دارا است. از طرف دیگر، عدم نیاز به اندازه‌گیری فاکتورها و پارامترهای متعدد که توسط سایر مقالات بیان شده‌اند، به عنوان مزایای این روش در نظر گرفته می‌شوند. به این ترتیب با استفاده از روش پیشنهادی، بدون انجام محاسبه میزان تداخل ابزار و قطعه‌کار، میرایی زمان برش مشخص می‌شود. شبیه‌سازی حوزه زمان، حاکی از دقت قابل قبول روش پیشنهادی است. با توجه به دقت روش، روش پیشنهادی می‌تواند جهت شبیه‌سازی مناسب بافت سطح قطعه تولیدی مورد استفاده قرار بگیرد.

۸- مراجع

- [1] Tlustý J, Poláček M (1963) The stability of machine tools against self excited vibrations in machining. Prod Eng Conf, Pittsburgh. 474-465.
- [2] Tobias S, Fishwick A (1958) The chatter of lathe tools under orthogonal cutting conditions. Trans ASME (80): 1088-1079.
- [3] Minis I, Yanushevsky T (1993) A new theoretical approach for the prediction of the machine tool chatter in milling. ASME J Eng Ind (115):1-8.
- [4] Budak E, Altintas Y (1998) Analytical prediction of chatter stability in milling. ASME J Dyna Sys (120): 22-36.
- [5] Kaneko T, Sato H, Tani Y, O-hori M (1984) Self-excited chatter and its marks in turning. Trans ASME (222): 228-106.
- [6] Kurata Y, Doruk Merdol S, Altintas Y, Suzuki N, Shamoto E (2010) Chatter stability in turning and milling with in process identified process damping. J Adv Mech Des (4): 1107-1118.
- [7] Ozlu E, Budak E (2007) Comparison of one dimensional and multi-dimensional model in stability analysis of turning operations. Int J Mach Tool & Manu (47): 1883-1875.
- [8] Wu DW (1989) A new approach of formulating the transfer function for dynamic cutting process. J Eng Indu (111): 37-47.
- [9] Altintas Y, Eynian M, Onozuka H (2008) Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping. Manu Tech CIRP Ann (57): 371-374.
- [10] Budak E, Tunc LT (2009) A new method for identification and modeling of process damping in machining. J Manuf Sci E-T ASME (131): 051019-1- 051019-10.



شکل ۱۳- مقایسه جابجایی‌های شبیه‌سازی شده با آزمایش در سرعت برشی 0.975 m/s و پیشروی 0.08 mm/min



شکل ۱۴- مقایسه جابجایی‌های شبیه‌سازی شده با آزمایش در سرعت برشی 1.373 m/s در پیشروی 0.08 mm/min

جدول ۴- مقایسه کمی نتایج شبیه‌سازی و آزمایش

نوع تغییرات	آزمایش	شبیه‌سازی	پارامتر مورد بررسی
ثابت	۰/۰۱۲۱	۰/۰۱۴۶	دامنه جابجایی
ثابت	۰/۰۷۹	۰/۰۷۸	پریود زمانی
افزایشی	۰/۰۵۶۹	۰/۰۵۷۹	دامنه جابجایی
ثابت	۰/۰۸۵	۰/۰۰۹	پریود زمانی

۷- جمع بندی

میرایی زمان برش، نقش بسزایی در افزایش حد پایداری فرآیند تراشکاری دارد. میرایی زمان برش به پارامترهای مختلفی از جمله، خواص مواد قطعه‌کار، هندسه لبه برنده، سرعت پیشروی، سرعت برشی و طول تماس پشت لبه ابزار با قطعه‌کار بستگی دارد. در این مقاله برای اولین بار از روش تحلیل سری زمانی سیگنال جابجایی آزمایش و سیگنال

- [17] Turkes E, Orak S, Neseli S, Yaldiz S (2011) A new process damping model for chatter vibration. *J Measu* (44): 1342–1348.
- [18] Hilborn RC (1983) *Chaos and nonlinear dynamics*. Oxford University Press, Oxford.
- [19] Grassberger, P, Procaccia, I (1983) Characterization of strange attractors. *Phys Rev Lett* 50(5): 346-349.
- [20] Kanz H, Schriber, T (1997) *Nonlinear time series analysis*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [21] Sharif Ullah AM, Harib HK (2010) Simulation of cutting force using non-stationary gaussian process. *J Intell Manu* 681-691.
- [22] Schmitz TL (2008) *Machining Dynamics*. New York: Springer Science.
- [23] Imani BM, Pour M, Ghoddosian A, Fallah M (2012) Improved dynamic simulation of end-milling process using time series analysis. *J Scientia Iranica B* 19(2): 294– 302.
- [24] Pour M, Torabizadeh MA (2014) Improved prediction of stability lobes in milling process using time series analysis. *J Intell Manu* 27(3): 665-677.
- [11] Eynian M, Altintas Y (2009) Chatter stability of general turning operations with process damping. *J Manuf Sci E-T ASME* (131): 041005-1-041005-10.
- [12] Ahmadi K, Ismail F (2010) Experimental investigation of process damping nonlinearity in machining chatter. *Int J Mach Tools and Manu* (50): 1006–1014
- [13] Ahmadi K, Ismail F (2011) Analytical stability lobes including nonlinear process damping effect on machining chatter. *Int J Mach Tools and Manu* (51): 296-308.
- [14] Wu, DW (1988) Application of a comprehensive dynamic cutting force model to orthogonal wave-generating processes. *Int J Mech Sci* (30): 581-600.
- [15] Chiou YS, Chung ES, Liang SY (1995) Analysis of tool wear effect on chatter stability in turning. *Int J Mech Sci* (37): 391–404.
- [16] Zaghbani I, Songmene V (2009) Estimation of machine tool dynamic parameters during machining operation Through operational modal analysis. *Int J of Mach Tools and Manu* (49): 947–957.