



تعیین دمپینگ زمان برش فرایند فرزکاری و بهینه‌سازی چندهدفه زبری سطح و نرخ برداشت ماده

علی قدوسیان^۱، مسعود پور^{۲*}، مجتبی شیخی^۳

۱- دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان
 ۲- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان، قوچان
 ۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
 * قوچان، کدپستی ۹۴۷۷۱-۶۷۳۳۵ m.pour@qiet.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۷ اردیبهشت ۱۳۹۲

پذیرش: ۲۶ خرداد ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۳۱ فروردین ۱۳۹۳

کلید واژگان:

بهینه‌سازی

نرخ برداشت ماده

بافت سطح

میرایی فرایند

فرزکاری با بارچاقی کم

در این تحقیق، اثرات پارامترهای برش در فرایند فرزکاری با بارچاقی کم، بر نرخ برداشت ماده و زبری سطح، بررسی شده و شرایط ماشین‌کاری بهینه‌سازی شده است. برای این منظور ابتدا مدلی جامع از فرایند ماشین‌کاری با بارچاقی کم ارائه می‌شود. در این مدل پارامتر میرایی فرایند برای اولین بار به روش تحلیل سری‌زمانی مدل‌سازی شده و شبیه‌سازی فرایند به صورت دقیق انجام شده است. با توجه به اثرات پارامترهای برش بر روی فاکتورهای نرخ برداشت ماده و زبری سطح، برای بدست آوردن شرایط مطلوب ماشین‌کاری، از بهینه‌سازی چندهدفه استفاده می‌شود. قید پایداری به عنوان محدودیت بهینه‌سازی مطرح شده و مقدار آن توسط روش المان محدود زمانی محاسبه شده است. برای جستجوی پارامترهای برش مطلوب از سه الگوریتم ژنتیک، گروه ذرات و رقابت استعماری استفاده شده است. با مقایسه نتایج حاصله از این سه روش، مشخص شده است که الگوریتم رقابت استعماری در غلبه به ترم‌های غیرخطی و مینیم‌های محلی مسأله قدرتمندتر بوده و سرعت بیشتر همگرایی در این الگوریتم، نسبت به دو روش دیگر در این مسأله اثبات شده است. در پایان آزمایش‌هایی برای تأیید تغییرات تابع هدف در مسیر میل به نقطه بهینه انجام شده و درصد خطای تابع هدف در نقطه بهینه با نتایج آزمایشگاهی تعیین شده است.

Identifying process damping of milling process and multi objective optimization of surface roughness and material removal rate

Ali Ghoddosian¹, Masoud Pour^{2*}, Mojtaba Sheikhi³

1- Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- Mechanical Engineering, Department, Quchan University of Advance Technologies Engineering, Quchan, Iran

3- Mechanical Engineering Department, Birjand University, Birjand, Iran

* P.O.B. 94771-67335 Quchan, Iran, m.pour@qiet.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 17 May 2013
 Accepted 13 June 2013
 Available Online 20 April 2014

Keywords:

Optimization
 Material Removal Rate
 Surface Texture
 Process Damping
 Low Immersion Milling

ABSTRACT

In this research, the effects of cutting parameters on material removal rate and surface roughness, are investigated. Therefore, after that the comprehensive model of low-immersion milling is developed, the optimum cutting conditions has to be found for optimizing all of them. The stability criterion is considered as the optimization constraint which is calculated by TFEA. On the other hand, instead of using explicit equation for calculating surface roughness, such as previous works, surface roughness is calculated by TFEA for all of the cases that are needed. Finally, the ability of Genetic algorithm, Particle Swarm Optimization and Imperialist Competitive Algorithm for searching optimum cutting parameters are compared and the results are reported. By comparing the results of the three algorithms it is shown that the ICA is more powerful to deal with nonlinearity aspects of the problem and to tackle sticking in local minimums. Also it is demonstrated that the convergence rate of the ICA is faster than the other two methods. Finally, experiments to confirm the changes of the objective function toward optimal point are done and error percentage of objective function at obtained optimal point compared with experimental result is determined.

۱- مقدمه

کیفیت سطح قطعات تولید شده بستگی دارد. بدین ترتیب، کیفیت سطح و نرخ برداشت ماده از محصول تولیدی از عوامل مورد نظر شرکت‌های تولیدی برای این هدف می‌باشند. با توجه به این که بهبود هر یک از عوامل، کیفیت سطح و نرخ برداشت براده، می‌تواند سبب تضعیف دیگری شود بنابراین باید

در جهان رقابتی امروز، تمامی شرکت‌ها برای مقابله با مشکلات اقتصادی خود سعی دارند راندمان تولید و کیفیت محصول تولیدی خود را به صورت هم‌زمان افزایش دهند. معمولاً، هزینه اقتصادی یک فرایند به زمان تولید و

Please cite this article using:

A. Ghoddosian, M. Pour, M. Sheikhi, Identifying process damping of milling process and multi objective optimization of surface roughness and material removal rate, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 97-106, 2014 (In Persian)

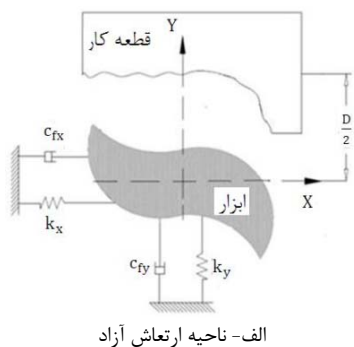
برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

برنده ابزار و اثرات ارتعاشات ابزار در میرایی ایجاد شده در زمان برش، از روش تحلیل سری زمانی سیگنال نیرو استفاده شده است. به این ترتیب دقت بهینه‌سازی انجام شده افزایش یافته و از سوی دیگر، محدودیت‌های مدل‌های سنتی بهینه‌سازی حذف می‌شود. با توجه به توضیحات بیان شده ساختار مقاله به صورتی که در ادامه بیان می‌شود سازمان‌دهی شده است.

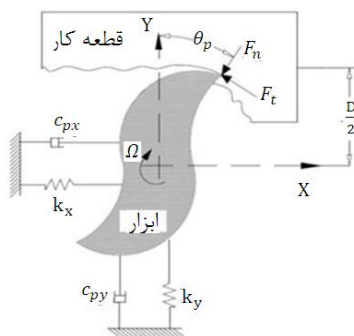
در قسمت اول روش المان محدود زمانی به منظور شبیه‌سازی فرایند فرزکاری با بار جانبی کم معرفی می‌شود و اثر خروج از مرکزی ابزار به مدل‌های قبلی این روش شبیه‌سازی اضافه شده است. در قسمت دوم تئوری جدیدی با استفاده از تحلیل سری زمانی و معیار بعد همبستگی برای تعیین تغییرات پارامترهای دینامیکی سیستم در زمان برش معرفی شده است. سپس در قسمت بعد، تجهیزات آزمایش و آزمایشات اولیه به منظور تعیین پارامترهای برش ابزار و میرایی زمان برش ابزار ارائه شده است و تغییرات پارامترهای مذکور با تغییر عمق برش و سرعت دورانی اسپیندل مشخص می‌شود. در پایان، با استفاده از سه الگوریتم ژنتیک (GA)، گروه ذرات (PSO) و رقابت استعماری (ICA) نقطه بهینه ماشین‌کاری مشخص شده و توانایی هر یک از روش‌های مذکور در تعیین نقطه بهینه فرزکاری با بار جانبی کم ارزیابی می‌شود و نتیجه بدست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است.

۲- دینامیک فرزکاری

مدل‌سازی فرایند فرزکاری با توجه به خصوصیات دینامیکی سیستم و با استفاده از مدل‌های ارتعاشاتی انجام می‌شود. در این مدل‌ها معمولاً به منظور بالا بردن دقت نتایج بدست آمده از مدل دینامیکی با دو درجه آزادی همانند شکل ۱ استفاده می‌شود. در این مدل، دینامیک ابزار - اسپیندل در دو جهت عمود بر هم (یکی در راستای پیش‌روی ابزار و دیگری در راستای عمود بر پیش‌روی) در نظر گرفته می‌شود. در حالی که با فرض صلب بودن قطعه‌کار نسبت به ابزار، از دینامیک قطعه کار صرف‌نظر می‌شود و جرم معادل m ، ضریب میرایی c_f و سختی ابزار k می‌تواند با استفاده از آنالیز مودال به روش آزمایشگاهی تعیین می‌شوند.



الف- ناحیه ارتعاش آزاد



ب- ناحیه ارتعاش اجباری

شکل ۱ مدل دینامیکی فرایند فرزکاری

یک حالت تعادل بین آنها بدست آید.

تاکنون مدل‌های مختلفی از شبیه‌سازی عملیات فرزکاری، که منجر به بهبود کیفیت، افزایش سرعت تولید و کاهش هزینه‌های تولید شده است، ارائه شده‌اند. شبیه‌سازی واقع‌گرایانه فرایند فرزکاری با توجه به هندسه پیچیده ابزار نسبت به سایر فرایندهای ماشین‌کاری، بسیار چالش‌برانگیز است. از طرف دیگر تأثیر غیرخطی پارامترهای برش بر روی میزان زبری سطح و نرخ برداشت ماده پیچیدگی شبیه‌سازی را افزایش می‌دهد.

معمولاً در تحقیقات گذشته، اثر پارامترهای برش را بر روی یکی از فاکتورهای تولیدی نظیر زبری سطح، نرخ برداشت ماده و یا خطای موقعیت سطح تعیین شده است. در این تحقیقات با توجه به استفاده از مدل‌های ریاضی برازش داده شده به نتایج آزمایشگاهی و خطاهای آماری وارد شده در محاسبات، نقطه بهینه بدست آمده در نزدیکی نقطه بهینه واقعی سیستم قرار می‌گیرد [۱]، که برای بهبود دستیابی به نقطه بهینه شبکه‌های عصبی مصنوعی [۲]، پیشنهاد و پیاده‌سازی شده‌اند. تکنیک‌های بهینه‌سازی بکار گرفته شده معمولاً بر پایه، طراحی سطح پاسخ [۳]، برنامه‌های ریاضی [۴]، الگوریتم ژنتیک [۵] و انجماد فلزات [۶] می‌باشند که هر یک دارای محدودیت‌ها و فرضیات خاص خود می‌باشند.

لیلونگ و همکاران [۷] ادعا کردند که یک مدل پایه‌ای ریاضی که بتواند رفتار برش در یک طیف گسترده‌ای از شرایط برش را پیش‌بینی کند وجود ندارد. ردی و رآ [۸] یک مدل ریاضی برای بیان ارتباط بین زبری سطح و پارامترهای برش و هندسه ابزار، در فرزکاری فولاد کربن متوسط، با استفاده از روش RSM ارائه کردند. اخیراً آزلیک و بایراموگلو [۹] مدلی برای تعیین زبری سطح، در فرزکاری فولاد با فرزانگشتی در سرعت بالا، شامل زمان ماشین‌کاری، سرعت اسپیندل، نرخ پیش‌روی، عمق برش و تعداد دفعات ماشین‌کاری ارائه کردند.

مسئله بهینه‌سازی چند هدفه در فرایندهای ماشین‌کاری برای اولین بار توسط جآ مطرح شده است [۱۰]. او در تحقیق خود توابع هدف، هزینه و نرخ تولید را با قيود محدودیت‌های قدرت ماشین، برش محدودیت سرعت، عمق برش و پیش‌روی بهینه کرد. پس از آن، کردی و همکارانش [۱۱] بهینه‌سازی چند هدفه برای خطای موقعیت سطح و نرخ برداشت ماده به همراه قید مرز پایداری در فرایند فرزکاری با بار جانبی کم را مطرح کردند. آنها روش المان محدود زمانی را به جای مدل‌های پیشنهاد شده در مقالات گذشته بکار گرفته‌اند. این روش در حقیقت روشی برای شبیه‌سازی فرایند فرزکاری با بار جانبی کم می‌باشد که در آن تمامی عوامل خطی و غیرخطی تأثیرگذار در ایجاد زبری سطح و نرخ برداشت ماده در نظر گرفته شده است. روش کردی اگرچه یک گام رو به جلو در تعیین نقطه بهینه ماشین‌کاری به شمار می‌رود، اما در این روش تغییر پارامترهای دینامیکی و پارامترهای برش سیستم، به ترتیب مانند تغییر میرایی زمان برش و ضرایب برشی، به ازای تغییر عمق برش و سرعت اسپیندل نادیده گرفته شده است.

در این مقاله برای تعیین نقطه بهینه پارامترهای برش، در توابع هدف زبری سطح و نرخ برداشت ماده، از مدل‌های تعیین تغییرات ضرایب برشی و پارامتر دمینگ زمان برش، براساس تغییرات سرعت دورانی اسپیندل و عمق برش استفاده شده است. تعیین تغییرات پارامترهای فوق‌الذکر به ترتیب با استفاده از مدل‌های رگرسیون غیر خطی و روش جدید ارائه شده در این مقاله بر پایه سری زمانی انجام شده است.

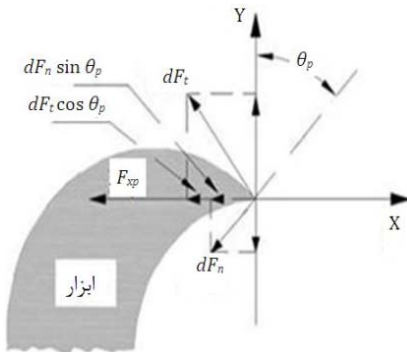
با توجه به توضیحات فوق، در این مقاله برای اولین بار به منظور وارد کردن اثرات متقابل بین قطعه کار و لبه برنده ابزار، اثرات نیروی شخم زنی و شعاع لبه

در معادلات (۲) و (۳)، نیروهای برش می‌توانند به صورت معادله (۱۰) محاسبه شوند. در این رابطه $s = \sin\theta(z,t)$ ، $c = \cos\theta(z,t)$ ، $\Delta x = x(z,t) - x(z,t-\tau)$ و $\Delta y = y(z,t) - y(z,t-\tau)$ می‌باشند. با استفاده از شکل ۳، محدوده درگیری ابزار با قطعه کار در راستای امتداد طولی ابزار، برای هر موقعیت φ نسبت به φ_{st} و φ_{ex} (به ترتیب زاویه ورود و خروج ابزار به ناحیه برش)، با استفاده از پارامترهای z_1 و z_2 مشخص می‌شود [۱۳، ۱۴]. معادله (۱۰) می‌تواند به مؤلفه‌های استاتیکی و دینامیکی برش مطابق معادلات (۱۱) و (۱۲) تجزیه شود:

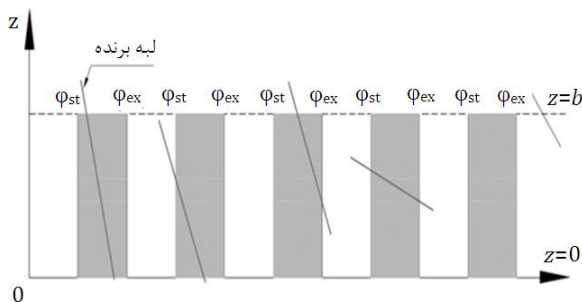
$$\begin{bmatrix} F_x(t) \\ F_y(t) \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^N g_j(t) \begin{bmatrix} \int_{z_1(t)}^{z_2(t)} h(-K_{tc}sc - K_{nc}s^2) dz \\ \int_{z_1(t)}^{z_2(t)} h(K_{tc}s^2 - K_{nc}cs) dz \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \int_{z_1(t)}^{z_2(t)} h(-K_{te}c - K_{ne}s) dz \\ \int_{z_1(t)}^{z_2(t)} h(K_{te}s - K_{ne}c) dz \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \int_{z_1(t)}^{z_2(t)} (-K_{tc}sc - K_{nc}s^2) dz & \int_{z_1(t)}^{z_2(t)} (K_{tc}c^2 - K_{nc}sc) dz \\ \int_{z_1(t)}^{z_2(t)} (K_{tc}s^2 - K_{nc}cs) dz & \int_{z_1(t)}^{z_2(t)} (K_{tc}sc - K_{nc}c^2) dz \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$f_s(t) = \sum_{j=1}^N g_j(t) \cdot \left(\int_{z_1(t)}^{z_2(t)} h_j(z,t) \begin{bmatrix} -K_{tc}sc - K_{nc}s^2 \\ K_{tc}s^2 - K_{nc}sc \end{bmatrix} + \int_{z_1(t)}^{z_2(t)} h_j(z,t) \begin{bmatrix} -K_{te}c - K_{ne}s \\ K_{te}s - K_{ne}c \end{bmatrix} dz \right) \quad (11)$$

$$f_d(t) = \sum_{j=1}^N g_j(t) \cdot \left(\int_{z_1(t)}^{z_2(t)} \begin{bmatrix} -K_{tc}sc - K_{nc}s^2 & K_{tc}c^2 - K_{nc}sc \\ K_{tc}s^2 - K_{nc}cs & K_{tc}sc - K_{nc}c^2 \end{bmatrix} dz \right) \quad (12)$$



شکل ۲ مؤلفه‌های نیروهای برش



شکل ۳ محدوده انتگرال‌گیری در حالت‌های مختلف زاویه ورودی و خروجی ابزار [۱۳، ۱۴]

ضرب میرایی که از آنالیز مودال بدست آمده است، در معادله دیفرانسیلی حرکت در خارج منطقه برش (ارتعاش آزاد) سیستم بکار گرفته می‌شود (شکل ۱- الف). تداخل بین سطح آزاد ابزار و سطح موج‌دار قطعه ماشین‌کاری شده سبب تغییر در میرایی سیستم ارتعاشی در داخل ناحیه برش می‌شود. بنابراین، ضریب میرایی فرایند c_p ، که از روش تحلیل سری زمانی سیگنال نیروی آزمایش به صورت تجربی بدست می‌آید، جایگزین ضریب میرایی فرایند c_f در معادله دیفرانسیلی حرکت سیستم در داخل منطقه برش می‌شود (شکل ۱- ب).

۳- روش المان محدود زمانی

در روش المان محدود زمانی، حرکت در جهت‌های پیش‌روی x و نرمال y به صورت مستقل از هم فرض می‌شود. به این ترتیب ماتریس‌های $[m]$ ، $[c]$ و $[k]$ می‌توانند به صورت قطری درن نظر گرفته شوند. فرض فوق سبب می‌شود معادله ماتریسی حرکت برای داخل منطقه برش به صورت معادله (۱) نوشته شود [۱۲].

$$\begin{bmatrix} m_x & 0 \\ 0 & m_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}(t) \\ \ddot{y}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{px} & 0 \\ 0 & c_{py} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x(t) \\ F_y(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

توجه شود که در معادله فوق، ضریب میرایی فرایند c_p برای داخل منطقه برش در نظر گرفته شده است. شکل ۲ مؤلفه‌های نیروی برش در هر دو جهت x و y را نشان می‌دهد. مؤلفه‌های راستای x و y نیروی برش در هر المان دلخواه از ناحیه برش، با استفاده از معادلات (۲) و (۳) قابل محاسبه می‌باشند.

$$dF_{xj}(z,t) = g_j(t) [-dF_{tj}(z,t) \cos\theta_j(z,t) - dF_{nj}(z,t) \sin\theta_j(z,t)] \quad (2)$$

$$dF_{yj}(z,t) = g_j(t) [dF_{tj}(z,t) \sin\theta_j(z,t) - dF_{nj}(z,t) \cos\theta_j(z,t)] \quad (3)$$

در صورتی که لبه برنده در داخل منطقه برش باشد مقدار تابع پله $g_j(t)$ یک و در صورتی که لبه خارج ناحیه برش باشد، مقدارش صفر در نظر گرفته می‌شود. مؤلفه‌های مماس $dF_{tj}(z,t)$ و شعاعی $dF_{nj}(z,t)$ نیروی برش، در صورت مشخص بودن ضرایب سختی برشی (K_{nc} و K_{tc}) و ضرایب سختی لبه‌ای (K_{ne} و K_{te})، عمق برش b و ضخامت براده لحظه‌ای $h_j(z,t)$ به صورت معادلات (۴) و (۵) قابل محاسبه می‌باشند.

$$dF_{tj}(z,t) = K_{tc}bw_j(z,t) + K_{te}b \quad (4)$$

$$dF_{nj}(z,t) = K_{nc}bw_j(z,t) + K_{ne}b \quad (5)$$

زمانی که z امین لبه برنده در داخل ناحیه برش قرار بگیرد، آنگاه $w_j(z,t)$ می‌تواند به صورت تابعی از پیش‌روی به ازای دندان h زاویه دوران ابزار $\theta_j(z,t)$ ، اثر بازیابی موج $D_j(z,t)$ و خروج از مرکز ابزار $R_j(z,t)$ محاسبه شود.

$$w_j(z,t) = h \sin\theta_j(z,t) + D_j(z,t) + R_j(z,t) \quad (6)$$

برای ابزار فرز انگشتی با شعاع R ، زاویه مارپیچ β ، زاویه دوران $\theta_j(z,t)$ ، برای یک المان دلخواه از z امین لبه برنده می‌تواند با استفاده از معادله (۷) محاسبه شود.

$$\theta_j(z,t) = \left(\frac{2\pi\Omega}{60}\right)t + j\frac{2\pi}{N} + z\frac{\tan\beta}{R} \quad (7)$$

بیان ریاضی هر یک از پارامترهای $D_j(z,t)$ و $R_j(z,t)$ را می‌توان به صورت معادلات (۸) و (۹) در نظر گرفت.

$$D_j(z,t) = [x(z,t) - x(z,t-\tau)] \sin\theta_j(z,t) + [y(z,t) - y(z,t-\tau)] \cos\theta_j(z,t) \quad (8)$$

$$R_j(z,t) = \rho \cos(\theta_j(z,t) + \lambda) + \rho \sin(\theta_j(z,t) + \lambda) \quad (9)$$

در روابط فوق ρ و λ به ترتیب فاصله و زاویه خروج از مرکزی می‌باشند که برای هر یک از لبه‌های ابزار قابل اندازه‌گیری می‌باشند. با جایگزینی معادلات (۴-۶)

در میان پارامترهای دینامیکی سیستم، تنها میرایی سیستم در زمان برش دچار تغییر می‌شود [۱۶، ۱۷]. به منظور تعیین میرایی معادل سیستم در ناحیه برش از مقایسه تحلیل سری زمانی سیگنال‌های نیروی آزمایشات 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، ۲۰] ارائه شده است.

به منظور محاسبه بعد همبستگی، ابتدا باید تاخیر زمانی سیگنال محاسبه شود که برای محاسبه آن از بیان خودهمبستگی استفاده می‌شود. در روش خود همبستگی یک تابع همبستگی به صورت رابطه (۱۷) تعریف می‌شود.

$$\rho(T) = \frac{\sum_{n=1}^N (y_{n+T} - \bar{y})(y_n - \bar{y})}{\sum_{n=1}^N (y_n - \bar{y})^2} \quad (17)$$

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

شیب ناحیه میانی این نمودار که اصطلاحاً ناحیه مقیاس‌گذاری نامیده می‌شود، بیان‌کننده بعد همبستگی می‌باشد. 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 که بعدهمبستگی نامیده می‌شود، استفاده می‌گردد [۱۸]. در واقع بعد همبستگی بیان‌کننده میزان پیچیدگی سیگنال غیرخطی است [۲۱]. برای محاسبه جمع همبستگی سیگنال نیرو، پس از ترسیم فضای حالت، برای هر نقطه i بر روی تراکتوری، تعداد نقاط واقع در فاصله R از نقطه مورد نظر، به جز خود نقطه مورد نظر، باید تعیین شوند که رابطه آن به صورت معادله (۱۸) می‌باشد.

$$C(R) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \theta(R - |x_i - x_j|) \quad (18)$$

در این رابطه N تعداد کل نقاط و R فاصله شعاعی بین نقاط می‌باشند. برای تعیین مقدار بعد همبستگی از رابطه (۱۹) استفاده می‌شود.

$$D_c = \lim_{R \rightarrow 0} \frac{\log C(R)}{\log R} \quad (19)$$

مقدار D_c با تغییر مقدار R تغییر می‌کند [۱۸]. به منظور برطرف کردن این مشکل، پیشنهاد شده است، بعد همبستگی در ناحیه میانی R دیاگرام جمع همبستگی تعیین شود. کلیه محاسبات تحلیل سری زمانی با استفاده از جعبه ابزار اپن تی اس تول^۱ در نرم‌افزار متلب انجام می‌شود.

در این مقاله در بررسی میزان شباهت سیگنال نیروی شبیه‌سازی و آزمایش، از دیاگرام جمع همبستگی استفاده می‌شود. از آنجا که 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 آن می‌تواند سیگنال شبیه‌سازی شده‌ای، مطابق سیگنال آزمایش فراهم کند. در شکل ۴، روند تعیین میرایی سیستم با استفاده از معیار بعد همبستگی نشان داده شده است.

به منظور تعیین نیروی برش برای هر موقعیت زاویه‌ای از هر دندانه، مؤلفه‌های نیروی استاتیکی و دینامیکی تمامی لبه‌ها از z_1 تا z_r با یکدیگر جمع زده می‌شوند.

در داخل ناحیه برش، رفتار دینامیکی فرایند ماشین‌کاری به شدت وابسته به معادله تأخیر زمانی است که راه حل تحلیلی برای آن وجود ندارد [۱۲]. از سوی دیگر، یک حل صریح (با استفاده از حل معادله دیفرانسیل همگن) برای شبیه‌سازی دینامیک فرایند فرسکاری در ناحیه خارج منطقه برش (ارتعاش آزاد) وجود دارد. روش المان محدود زمانی براساس بکارگیری راه حل تحلیلی برای ناحیه بدون برش و کوپل کردن نتایج آن با حل تقریبی برای ناحیه برش مورد استفاده قرار می‌گیرد. راه حل تقریبی به وسیله تقسیم زمان برش به تعدادی المان محدود انجام می‌شود. به این ترتیب نتایج این روش به شدت به تعداد المان‌های در نظر گرفته شده برای ناحیه داخل منطقه برش وابسته است. زمانی که ابزار از ناحیه برش خارج است، معادله دیفرانسیلی حرکت می‌تواند به صورت معادله (۱۳) بیان شود.

$$\begin{bmatrix} m_x & 0 \\ 0 & m_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{fx} & 0 \\ 0 & c_{fy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

ضریب میرایی c_f برای ناحیه ارتعاشات آزاد ابزار استفاده می‌شود. این معادله در فضای حالت می‌تواند به صورت معادله (۱۴) تغییر کند [۱۵].

$$\begin{bmatrix} \dot{X}(t) \\ \dot{X}(t) \end{bmatrix} = [G] \begin{bmatrix} X(t) \\ \dot{X}(t) \end{bmatrix}, [G] = \begin{bmatrix} 0 & [I] \\ -[m]^{-1}[k] & -[m]^{-1}[c_f] \end{bmatrix} \quad (14)$$

در اینجا $[m]$ ، $[c_f]$ و $[k]$ به ترتیب ماتریس‌های جرم، میرایی و سختی می‌باشند. زمان برش و ارتعاش آزاد، به ترتیب با استفاده از t_c و t_r مشخص می‌شوند. بنابراین ماتریس انتقال $[\Phi] = \exp([G] t)$ می‌تواند برای ایجاد ارتباط بین پارامترهای موقعیت و سرعت ابزار در زمان ورود به ناحیه برش، با پارامترهای موقعیت و سرعت ابزار در زمان خروج از ناحیه برش مورد استفاده قرار بگیرد [۱۵].

$$\begin{bmatrix} X(n\tau) \\ \dot{X}(n\tau) \end{bmatrix} = [G] \begin{bmatrix} X((n-1)\tau + t_c) \\ \dot{X}((n-1)\tau + t_c) \end{bmatrix} \quad (15)$$

همان‌طور که گفته شد، در روش آنالیز المان محدود زمانی، زمان برش به تعدادی المان تقسیم شده و بردار جابجایی روی هر المان به وسیله ترکیب خطی از چند جمله‌ای‌های هرمیت درجه سه تقریب زده می‌شود. روش آنالیز المان محدود زمانی به طور کامل در مراجع [۱۵-۱۲] توصیف شده است. رابطه حاصله برای نگاشت خطی گسسته بصورت رابطه (۱۶) می‌باشد.

$$[A]\{a\}^n = [B]\{a\}^{n-1} + [C] \quad (16)$$

مقادیر ویژه ماتریس انتقال $[Q] = [A]^{-1}[B]$ مضارب مشخصه (CMS) نامیده می‌شوند و با توان مشخصه که پایداری سیستم‌های پیوسته را نشان می‌دهند، قابل مقایسه می‌باشند. شرط پایداری سیستم دینامیکی گسسته فوق، برای سرعت اسپیندل (Ω) و عمق برش (b) مشخص، آن است که اندازه کلیه مضارب مشخصه کوچک‌تر از ۱ باشند [۱۵].

۴- 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 می‌باشد که تابعی از پارامترهای دینامیکی سیستم نظیر جرم، سختی، میرایی و نیروی وارده به سیستم می‌باشد. اگر در مجموعه‌ای تمامی پارامترهای تأثیرگذار در رفتار دینامیکی سیستم یکی باشند، آنگاه انتظار می‌رود که دو سیستم دارای رفتار دینامیکی یکسانی باشند.

1- Opentstool

۵- آزمایش و ارزیابی روش

۱-۵ تجهیزات آزمایش

تجهیزات آزمایشگاهی در شکل ۵ نشان داده شده است. تیغه فرز انگشتی با چهار لبه برنده از جنس HSS با قطر ۱۰mm و زاویه ماریج از ۳۰ درجه استفاده شده است. طول تماس ابزار با ابزارگیر ۲۵mm، نسبت طول آزاد ابزار به قطر آن ۵ و گشتاور بستن ابزارگیر ۸۵N.m می‌باشد. قطعه کار، از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵-T۶ می‌باشد. ماشین فرز سی ان سی عمودی ساخت شرکت اسام‌تی‌سی‌ال از نوع وی‌ام‌سی ۸۵۰ می‌باشد.

در این مقاله، ضرایب برشی و لبه‌ای مورد استفاده برای محدوده تغییرات عمق برش و سرعت اسپیندل با استفاده از روش ارائه شده در [۲۲] محاسبه شده است. در جدول ۱ آزمایش‌های انجام شده برای تعیین ضرایب برشی و لبه‌ای ابزار در تست درگیری کامل نشان داده شده‌اند. تعداد تکرار هر آزمایش ۴ بار می‌باشد. نیروهای برش در جهات، نرمال و موازی سطح ماشین‌کاری شده توسط دینامومتر کیستلر ۹۲۵۵ اندازه‌گیری می‌شود. سیگنال‌های آزمایش با فرکانس ۳۰ کیلوهرتز نمونه‌برداری شده است. تمام آزمایش‌ها بدون مایع خنک‌کننده انجام شده‌اند. با توجه به نتایج بدست آمده، ضرایب برشی و لبه‌ای ابزار به صورت معادلات (۲۰-۲۳) می‌باشند.

جدول ۱ شرایط برشی آزمایشات تعیین ضرایب سختی برشی

سرعت دورانی اسپیندل (rpm)	نرخ پیش‌روی (دندانه/پیش‌روی)	عرض برش (mm)	عمق برش (mm)
۱۰۰۰، ۲۰۰۰، ۳۰۰۰	۰/۰۲، ۰/۰۴، ۰/۰۶	۱۰	۲، ۳، ۴ و ۵

$$K_{tc} = (708 + 272345 b - 0.222 \Omega + 0.000052 \Omega^2 - 16.9 b) \times 10^6 \quad (20)$$

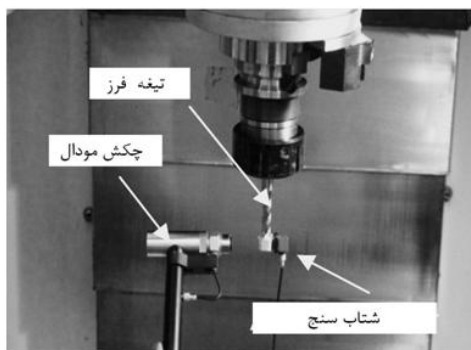
$$K_{nc} = (59 + 313443 b - 0.195 \Omega + 0.000047 \Omega^2 - 31.8 b^2) \times 10^6 \quad (21)$$

$$K_{te} = (65.4 - 70053 b + 0.0221 \Omega + 21.7 b^2 - 2.04 b^3 - 0.000005 \Omega^2) \times 10^3 \quad (22)$$

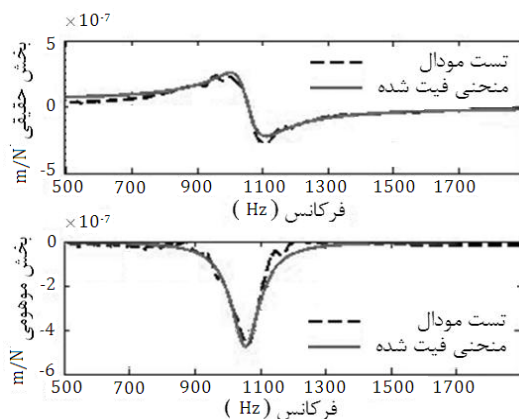
$$K_{ne} = -101382 b + 0.184 \Omega + 29.8 b^2 - 2.79 b^3 - 0.000088 \Omega^2 \quad (23)$$

در روابط فوق b و Ω به ترتیب نشان دهنده عمق برش و سرعت اسپیندل می‌باشند. پارامترهای مودال نوک ابزار با استفاده از آزمایش‌های مودال تعیین شده‌اند. لازم به ذکر است که به دلیل صلب بودن قطعه‌کار نسبت به ابزار، از اندازه‌گیری و واردسازی پارامترهای مودال آن در شبیه‌سازی صرف‌نظر شده است. سیستم آنالایزر مودال شامل یک چکش (بی‌اندکی ۸۲۰۲) به عنوان تحریک کننده و یک شتاب‌سنج تک محوره پیزوالکتریک (بی‌اندکی ۴۳۹۳) برای اندازه‌گیری شتاب است. تبدیل سیگنال‌های جمع‌آوری شده به حوزه فرکانس از طریق تجزیه و تحلیل سیگنال توسط آنالایزر دو کاناله (بی‌اندکی ۲۰۳۲) محقق شده است.

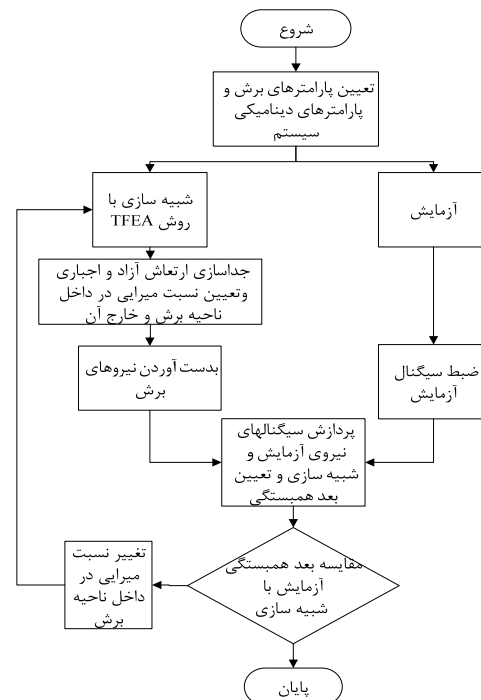
ماشین فرز، شتاب‌سنج و چکش استفاده شده در آزمایش، در شکل ۶ نشان داده شده است. تابع پاسخ فرکانسی نوک ابزار در اثر تحریک ضربه در هر یک از دو جهت x و y در شکل‌های ۷-الف و ب ارائه شده است. پارامترهای مودال ابزار بکار رفته در آزمایش‌ها از بخش حقیقی و موهومی تابع پاسخ فرکانسی (FRF) توسط تکنیک‌های برازش منحنی ارائه شده در [۲۳] تعیین و در جدول ۲ گزارش شده‌اند.



شکل ۶ نحوه انجام تست مودال ابزار



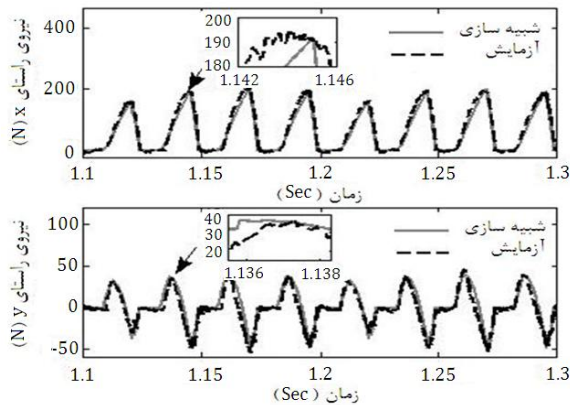
شکل ۷-الف تابع پاسخ ابزار اندازه‌گیری شده در راستای x



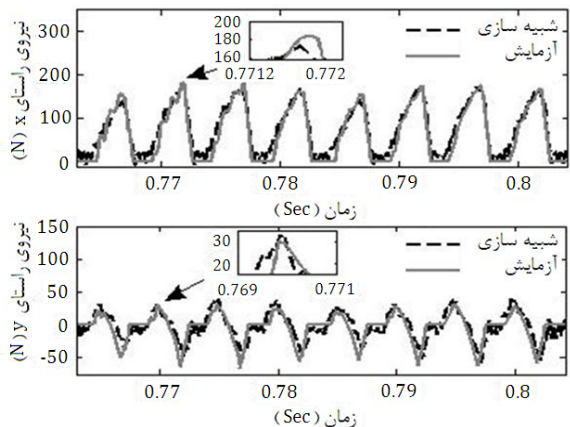
شکل ۴ الگوریتم تخمین نسبت میرایی معادل زمان برش



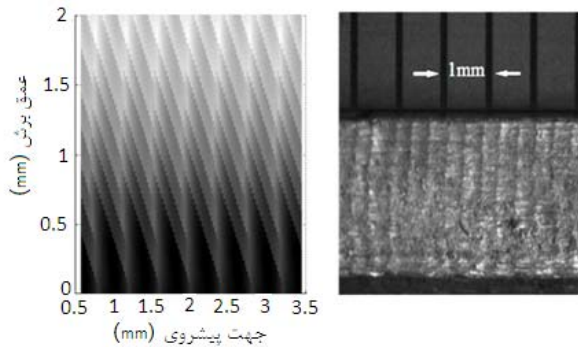
شکل ۵ تجهیزات آزمایش



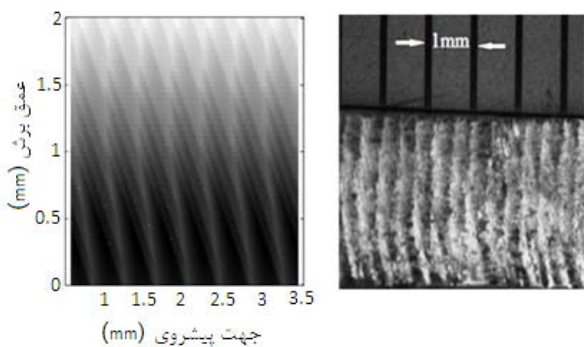
شکل ۸ مقایسه نیروهای شبیه‌سازی و آزمایش در ۶۰۰ rpm



شکل ۹ مقایسه نیروهای شبیه‌سازی و آزمایش در ۳۰۰۰ rpm

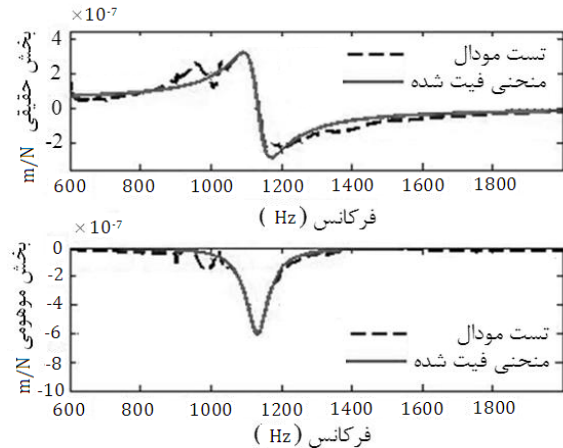


شکل ۱۰ مقایسه بافت سطح آزمایش و شبیه‌سازی شده (۶۰۰ rpm)



شکل ۱۱ مقایسه بافت سطح آزمایش و شبیه‌سازی شده (۳۰۰۰ rpm)

بافت سطح شبیه‌سازی شده به صورت کیفی به خوبی با بافت سطح ماشین‌کاری شده از لحاظ اثر پیش‌روی، زاویه، شکل اعوجاج و زبری تطابق



شکل ۷- ب تابع پاسخ ابزار اندازه گیری شده در راستای y

جدول ۲ پارامترهای مودال در نوک ابزار

X	Y	
۱۰۴۴	۱۱۳۸	فرکانس طبیعی (Hz)
۰/۰۳۵	۰/۰۴۲	نسبت میرایی
۷/۲۳	۴	سختی (MN/m)

جدول ۳ شرایط برشی

خروج از مرکز (μm)	عرض برش (mm)	پیش‌روی (mm/tooth)	عمق برش (mm)	زاویه (deg)	تعداد لبه برنده دورانی (rpm)	سرعت مرکزی (rpm)
۶	۱/۵	۰/۱	۲	۳۰	۴	۶۰۰
۶	۱/۵	۰/۱	۲	۳۰	۴	۳۰۰۰

۲-۵- شبیه‌سازی نیروی برش

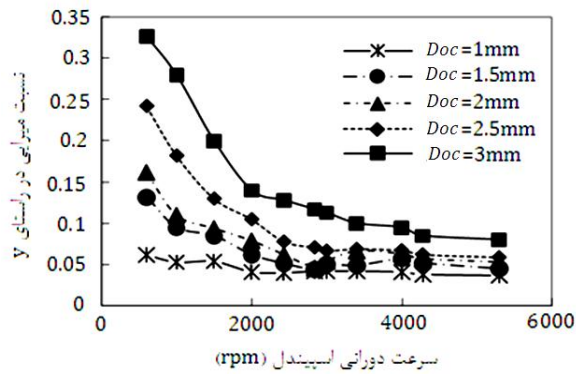
به منظور تایید روش پیشنهاد شده آزمایشاتی مطابق شرایط برشی جدول ۳ انجام شده است.

مقدار نسبت میرایی در داخل منطقه برش با استفاده از تحلیل سری زمانی مطابق توضیحات ارائه شده در بخش ۴ مشخص می‌شود. بدین ترتیب نسبت میرایی مشخص شده فرایند برای هر دو جهت x و y در حالت اول (سرعت دوران ۶۰۰ rpm)، $\zeta_x=0/16$ و $\zeta_y=0/16$ و در حالت دوم (سرعت دوران ۳۰۰۰ rpm)، $\zeta_x=0/054$ و $\zeta_y=0/054$ تعیین می‌شوند.

با استفاده از دمپینگ‌های تعیین شده، شبیه‌سازی نیرویی و بافت سطح آزمایشات جدول ۳ انجام می‌شود. شکل‌های ۸ و ۹ مقایسه‌ای بین نیروهای پیش‌گویی شده به وسیله مدل پیشنهادی و نتایج آزمایشگاهی برای حالت‌های اول و دوم را نشان می‌دهند که تطابق قابل قبولی بین نیروهای شبیه‌سازی و آزمایش از لحاظ شکل و اندازه مشاهده می‌شود. حداکثر خطای شبیه‌سازی در ماکزیمم نیروی شبیه‌سازی شده با سیگنال آزمایش، ۱۰ درصد در شبیه‌سازی نیروی راستای y برای آزمایش حالت دوم مشاهده شده و در سایر شبیه‌سازی‌ها، حداکثر خطای ایجاد شده در ماکزیمم نیروی شبیه‌سازی شده کمتر از ۶ درصد می‌باشد. این خطاها در نماهای بزرگ شده در شکل‌های ۸ و ۹ قابل مشاهده می‌باشد.

۳-۵- شبیه‌سازی بافت سطح

مدل‌سازی بافت سطح با استفاده از مدل ابزار انعطاف‌پذیر که در [۲۴] پیشنهاد شده است انجام شده است و در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب بافت سطح قطعه ماشین‌کاری شده و بافت سطح شبیه‌سازی شده برای هر یک از حالت‌های اول و دوم با هم مقایسه شده‌اند.



شکل ۱۳- ب روند تغییرات R_a معادل در زمان برش

جدول ۴ شرایط آزمایش‌ها جهت تعیین نسبت میرایی زمان برش

عمق برش (mm)	سرعت دورانی اسپیندل (rpm)
۰/۵-۱-۱/۵-۲-۲/۵-۳	۲۴۳۰-۲۸۴۰-۳۰۰۰-۳۴۰۰-۴۲۸۰-۵۳۰۰

بررسی شکل‌های ۱۳ حاکی از آن است که هرچه عمق برش افزایش می‌یابد، مقدار نسبت میرایی زمان برش در هر دو راستای x و y افزایش می‌یابد. از طرف دیگر افزایش سرعت دورانی اسپیندل سبب کاهش دمپینگ زمان برش می‌شود.

۶- بهینه‌سازی

در فرایند ماشین‌کاری برای کاهش زمان تولید، طراح باید بالاترین نرخ برداشت ماده را به دست آورد. نرخ برداشت ماده به عواملی نظیر عمر ابزار، بافت سطح، زبری سطح وابسته می‌باشد. در بیشتر مقاله‌های قبلی از تکنیک‌های رگرسیون خطی یا غیرخطی برای ارائه یک تابع پاسخ مناسب از سیستم در تعیین مقدار زبری سطح استفاده شده است. این روش‌ها اگرچه دارای مزیت‌های زیادی است اما به دلیل وجود شرایط غیرخطی در مساله، توانایی لازم جهت تعیین تابع پاسخ دقیق، زبری سطح وابسته به پارامترهای برش، را ندارد.

با توجه به توضیحات ارائه شده، در این مقاله از یک برنامه شبیه‌سازی که تمامی عوامل شناخته شده و تأثیرگذار در تعیین مرزهای پایداری و زبری سطح در آن لحاظ شده است، استفاده می‌شود. اگرچه در این روش، زمان دستیابی به نقطه بهینه نسبت به استفاده از یک مدل رگرسیونی، بسیار بالاتر است، اما نتایج آن دارای اعتبار بیشتری می‌باشند.

کنترل هم‌زمان دو تابع پاسخ که هر یک دارای ارزشی یکسان می‌باشند، مسأله بهینه‌سازی را به مساله بهینه‌سازی چند هدفه تبدیل می‌کند. به این ترتیب بیان ریاضی مسأله به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$|F_{Ra}(b, \Omega) - F_{MRR}(b, \Omega)|$$

$$g\lambda(b, \Omega) = \max\{|\lambda(b, \Omega)| \leq 1 \mid 0 \text{ mm} < b < 5 \text{ mm}\}$$

$$2000 \text{ rpm} < \Omega < 5500 \text{ rpm} \quad (24)$$

در بهینه‌سازی مطرح شده، دو متغیر طراحی b و Ω و قید طراحی λ که مقدار ویژه ماتریس Q می‌باشد، وجود دارند. در روابط فوق F_{Ra} ، زبری سطح و F_{MRR} ، نرخ برداشت ماده می‌باشند. مقدار MRR با معادله (۲۵) تعیین می‌شود.

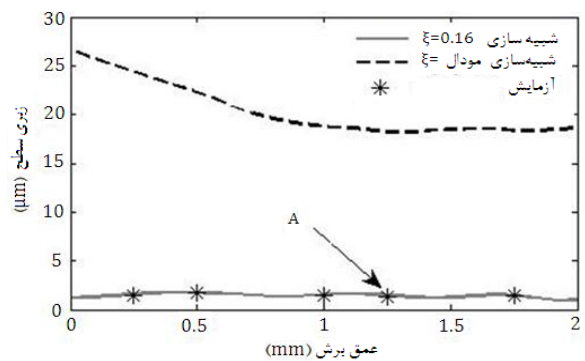
$$F_{MRR} = abcN\Omega \quad (25)$$

در معادله (۲۵)، a ، c و N به ترتیب، عرض برش، پیش‌روی به ازای دندانه و تعداد لبه برنده می‌باشند.

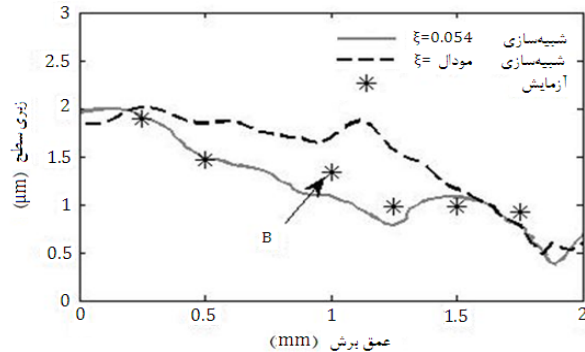
محدوده قابل قبول نتایج با استفاده از قید پایداری $g\lambda$ که مرزهای پایداری می‌باشد، تعیین می‌شود. مقادیر $g\lambda$ از رابطه (۱۶) قابل محاسبه

دارد. زبری سطح ماشین‌کاری شده با استفاده از دستگاه زبری‌سنج تیلور هابسون مدل (سورترانیک ۲۵) در چند نقطه از عمق برش اندازه‌گیری شده است. حداکثر تفاوت بین زبری سطح آزمایش و شبیه‌سازی در نقاط A و B شکل ۱۲ ایجاد شده‌اند که به ترتیب ۵/۴۴٪ و ۱۸٪ می‌باشند. همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود، تغییرات زبری سطح در امتداد عمق برش با نتایج آزمایشگاهی مطابقت قابل قبولی دارد و می‌توان زبری سطح را با این روش مدل‌سازی کرد. در شکل ۱۲ تفاوت بافت سطح ایجاد شده بر اساس دمپینگ مودال و ترکیب نتایج مودال و دمپینگ زمان برش قابل مشاهده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در سرعت‌های پایین دوران اسپیندل، اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین مقدار زبری سطح در حالت دمپینگ مودال و دمپینگ اصلاح شده زمان برش وجود دارد.

با انجام روند فوق برای آزمایش‌های انجام شده در جدول ۴، نحوه تغییر میرایی سیستم در محدوده عمق برش ۳ mm - ۰/۵ mm و در محدوده سرعت دورانی اسپیندل ۲۴۳۰ - ۵۳۰۰ rpm تعیین می‌شود. در شکل‌های ۱۳- الف و ب، تغییرات میرایی سیستم نشان داده شده است.

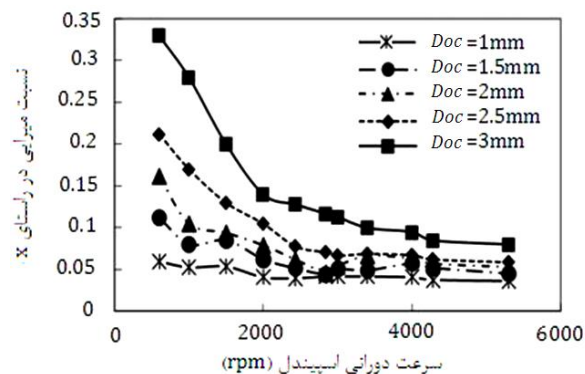


الف- حالت اول (۶۰۰ rpm)



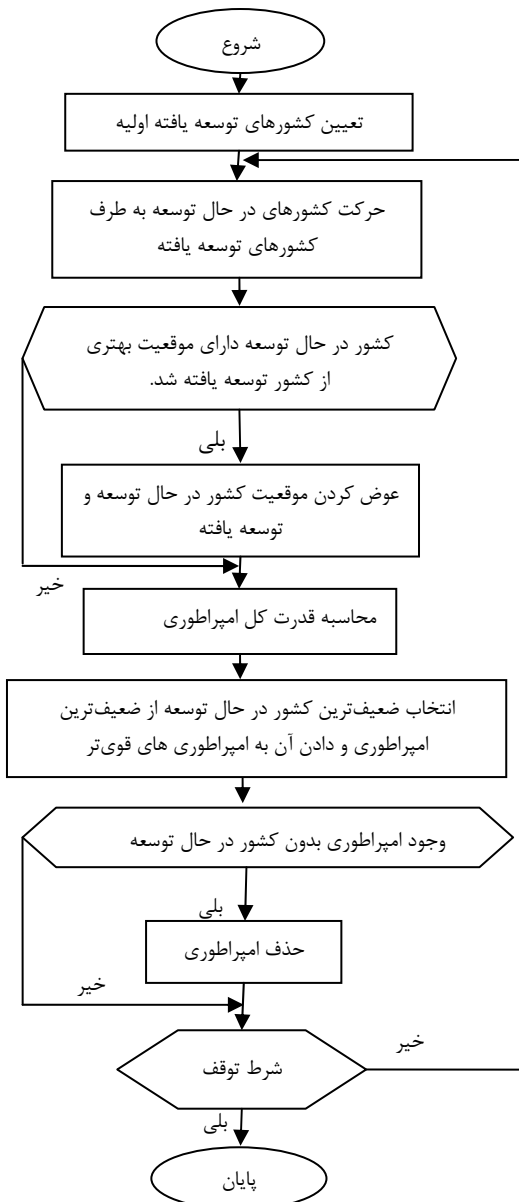
ب- حالت دوم (۳۰۰۰ rpm)

شکل ۱۲ تغییرات زبری سطح در امتداد عمق برش



شکل ۱۳- الف روند تغییرات R_a معادل در زمان برش

محاسبه شده و در نقطه بهینه، مقدار خطای تابع هدف شبیه‌سازی نسبت به آزمایش به میزان ۱۳/۶۴٪ تعیین شده است.



شکل ۱۴ الگوریتم روش بهینه‌سازی رقابت استعماری [۲۷]

می‌باشند و در صورتی که مقادیر ویژه رابطه مذکور بیش از یک باشند، شرط پایداری نقض شده است و جواب‌های بدست آمده غیرقابل قبول می‌باشند. در ادامه به بررسی قابلیت رقابت استعماری در تعیین نقطه بهینه و نیز سرعت همگرایی به سوی آن نقطه پرداخته می‌شود و نتایج این روش با دو روش الگوریتم ژنتیک و گروه ذرات مقایسه می‌شود. لازم به ذکر است که در بررسی‌های انجام شده به منظور ایجاد شرایط اولیه یکسان در تمامی روش‌ها، جمعیت اولیه‌ای با ۵۶ نقطه، که با استفاده از شبیه‌سازی بدست آمده است، در نظر گرفته می‌شود.

۶-۱- الگوریتم رقابت استعماری

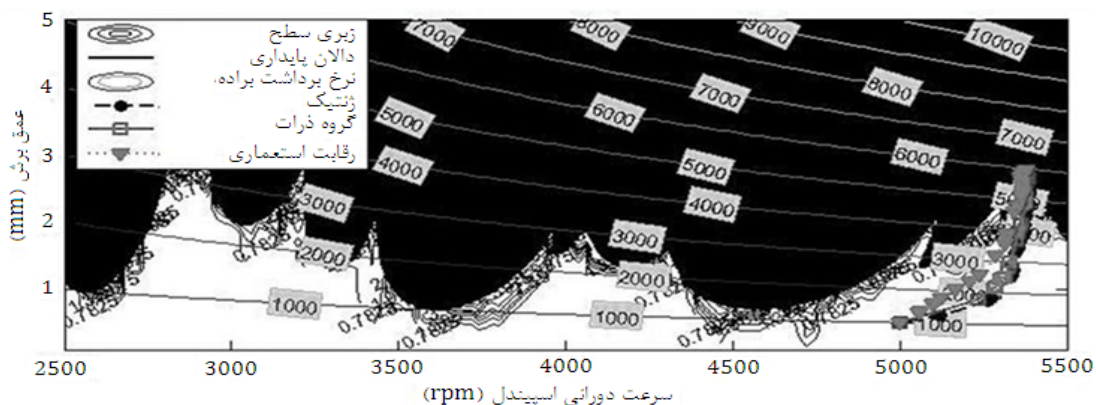
الگوریتم رقابت استعماری برای اولین بار در سال ۲۰۰۷ توسط اسماعیل آتشیپز و همکارانش [۲۵،۲۶] به کار گرفته شد. به طور ویژه این الگوریتم به فرایند استعمار، به عنوان مرحله‌ای از تکامل اجتماعی-سیاسی بشر نگریسته و با مدل‌سازی ریاضی این پدیده تاریخی، از آن به عنوان منشاء الهام یک الگوریتم قدرتمند در زمینه بهینه‌سازی بهره می‌گیرد. نو بودن ایده پایه‌ای الگوریتم، توانایی بالای یافتن نقطه بهینه سراسری مسائل در مقایسه با دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی و سرعت همگرایی بالا از جمله ویژگی‌های این الگوریتم است.

این الگوریتم نیز مانند سایر روش‌های بهینه‌سازی هیورستیک با یک جمعیت اولیه آغاز می‌شود. در این الگوریتم هر عنصر جمعیت یک کشور (معادل کروموزوم در الگوریتم ژنتیک) نامیده می‌شود. کشورها نیز در آن به دو دسته کشورهای مستعمره و کشورهای امپریالیست تقسیم می‌شوند. هر کشور امپریالیست، بسته به قدرت خود، تعدادی از کشورهای مستعمره را به سلطه خود در آورده و در مجموع یک امپراطوری را تشکیل می‌دهند. مراحل پیاده‌سازی این الگوریتم به طور کامل در مراجع [۲۷] تشریح شده است (شکل ۱۴).

تعداد امپریالیست‌ها ۴ عدد انتخاب شده است. مسیر حرکت الگوریتم‌های ژنتیک، گروه ذرات و رقابت استعماری برای رسیدن به نقطه بهینه در شکل ۱۵ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۶ نرخ همگرایی آن نشان داده شده و نتایج سه روش بهینه‌سازی در جدول ۵ ارائه شده است.

لازم به ذکر است که برای تایید تکرارپذیری روش‌های بهینه‌سازی در تعیین نقطه بهینه، هریک از روش‌ها ۵ بار اجرا شده‌اند.

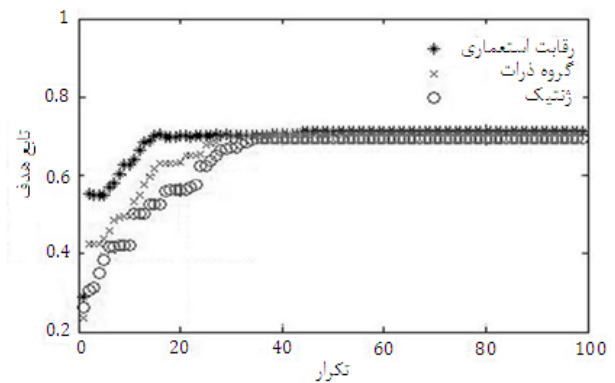
در شکل ۱۷ مقادیر زبری سطح در چند نقطه در مجاورت مسیر حرکت الگوریتم‌ها به منظور تعیین نقطه بهینه نشان داده شده است. در این نقاط که با علامت (▼) نشان داده شده است، مقدار خطای شبیه‌سازی کیفیت سطح در مقایسه با آزمایش تعیین شده‌اند. همچنین در هر نقطه مقدار تابع هدف



شکل ۱۵ روند میل به نقطه بهینه در سه الگوریتم بهینه‌سازی

سرعت دورانی اسپیندل ثابت می‌باشد. به منظور تأیید روش ابداعی از دو معیار کمی و کیفی زبری سطح تولید شده و نیروی تولید شده استفاده گردید. هر دو معیار در نظر گرفته شده مطابقت قابل قبولی را بین نتایج آزمایشگاهی و شبیه‌سازی نشان می‌دهند. به این ترتیب امکان پیش‌گویی نقطه بهینه ماشین‌کاری بدون انجام تست فراهم شده است. با این روش مشکلات ناخواسته در زمان تست، بدون داشتن شناخت از سیستم برطرف شده است. پس از آن به جستجوی نقطه بهینه ماشین‌کاری با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری پرداخته شد.

مسئله بهینه‌سازی با استفاده از دو تابع هدف، نرخ برداشت ماده و صافی سطح و یک قید مرز پایداری مطرح شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود هر سه الگوریتم از یک نقطه اولیه شروع به انجام محاسبات کرده‌اند. دو الگوریتم ژنتیک و گروه ذرات تقریباً دارای مسیر مشابهی به سمت نقطه بهینه هستند، در حالی که مسیر میل به سمت نقطه بهینه در الگوریتم رقابت استعماری کمی متفاوت می‌باشد. نقطه بهینه بدست آمده در هر سه تقریباً یکی است، اما همان‌طور که مشاهده شد، نرخ همگرایی الگوریتم رقابت استعماری از دو روش دیگر بالاتر می‌باشد. این موضوع با توجه به زمان طولانی اجرای برنامه، با توجه به نیاز به شبیه‌سازی کیفیت سطح در هر مرحله جستجو با شرایط مورد نیاز هر الگوریتم، بسیار قابل توجه می‌باشد. بدین ترتیب نویسندگان مقاله پس از انجام شبیه‌سازی‌ها و بهینه‌سازی مساله، الگوریتم رقابت استعماری را در غلبه به ترم‌های غیرخطی و مینیم‌های محلی مساله بهینه‌سازی فرایند فرزکاری با بار جانبی کم قدرتمندتر یافته، و به این ترتیب روش مذکور دارای سرعت جستجوی نقطه بهینه بیشتری نسبت به دو روش دیگر است. خطای ۱۳/۶۴٪ بین نتیجه آزمایش و شبیه‌سازی، دقت بالای روش پیشنهادی را نشان می‌دهد که می‌تواند برای پروسه‌های مشابه نیز بکار گرفته شود.



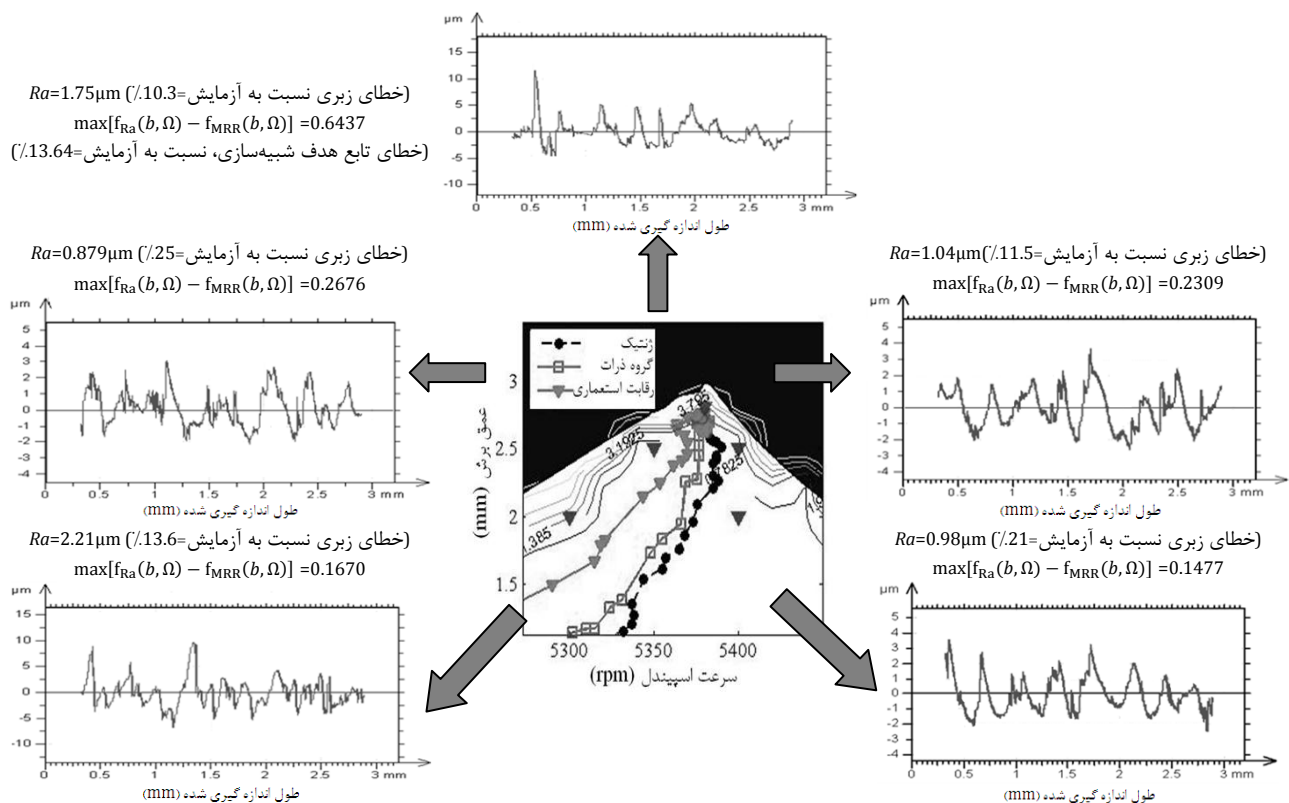
شکل ۱۶ مقایسه نرخ همگرایی سه روش، الگوریتم ژنتیک، گروه‌ذرات و رقابت استعماری

جدول ۵ نقاط بهینه و مقادیر تابع هدف در سه روش بهینه‌سازی

الگوریتم	سرعت اسپیندل (rpm)	عمق برش (mm)	مقدار تابع هدف
رقابت استعماری	۵۳۸۱/۳۵	۲/۷۵۱	۰/۷۳۱۵
گروه ذرات	۵۳۷۹/۹۶	۲/۷۴۱	۰/۷۲۸۹
ژنتیک	۵۳۷۸/۴۸	۲/۷۳۲	۰/۷۱۴۳

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور حذف خطاهای روش‌های رگرسیونی در تخمین زبری سطح، براساس آزمایشات از شبیه‌سازی جامع فرایند فرزکاری با بار جانبی کم استفاده شد. در این روش شبیه‌سازی، پارامترهای دینامیکی ابزار در زمان برش و ضرایب برشی و لبه‌ای نیروی برش، به صورت تابعی از سرعت دورانی اسپیندل و عمق برش در نظر گرفته شده‌اند. نتایج بدست آمده از یک طرف حاکی از کاهش دمینگ فرایندی با افزایش سرعت دورانی اسپیندل و از طرف دیگر افزایش آن با افزایش عمق برش در یک



شکل ۱۷ تغییرات زبری سطح در مجاورت مسیرهای بهینه‌سازی

۸- مراجع

- 122, 2008.
- [15] B.P. Mann, T. Insperger, P.V. Bayly, G. Stepan, Stability of up milling and down milling: Experimental verification, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 1, pp. 35-40, 2003.
- [16] I. Zaghbani, V. Songmene, Estimation of machine-tool dynamic parameters during machining operation Through operational modal analysis, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, pp. 947-957, 2009.
- [17] E. Turkes, S.N. Orak, S. Neseli, S. Yaldiz, A new process damping model for chatter vibration, *Measurement*, Vol. 44, pp. 1342-1348, 2011.
- [18] Hilborn, R.C. *Chaos and nonlinear dynamics*, Oxford University Press, Oxford, UK, pp 354-368, 2000.
- [19] P. Grassberger, and I. Procaccia, Characterization of strange attractors, *Physical review letter*, Vol. 50, No. 5, pp. 346-349, 1983.
- [20] H. Kanz, T. Schriber, *Nonlinear time series analysis*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 1-39, 1997.
- [21] A.M. Sharif Ullah, H.K. Harib, Simulation of cutting force using non-stationary gaussian process, *Journal of Intelligent Manufacturing*, pp. 681-691, 2010.
- [22] J. Gradisek, M. Kalveram, K. Weinert, Mechanistic identification of specific force coefficients for a general end mill, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, pp. 401-414, 2004.
- [23] T.L. Schmitz, K.S. Smith, *Machining dynamics: frequency response to improved productivity*, Springer, New York, USA, pp.41-52, 2009.
- [24] E.B. Kivanc, E. Budak, Structural modeling of end mills for form Error and Stability Analysis, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 44, pp. 1151-1161, 2004.
- [25] E. Atashpaz-Gargari, C. Lucas, Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. *IEEE congress on evolutionary computation*, Singapore, pp. 4661-4667, 2007.
- [26] E. Atashpaz-Gargari, F. Hashemzadeh, R. Rajabioun, C. Lucas, Colonial competitive algorithm: a novel approach for PID controller design in MIMO distillation column process. *International Journal of Intelligent Computing Cybernet*, Vol. 1, No. 3, pp. 337-55, 2008.
- [27] M. Sheikhi, A. Ghoddosian, M. Sheikhi, Optimal design of structural support position using ICA and MFEM, *The Modares Journal of Mechanics Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 50-59, 2012. (In Persian)
- [1] F. P. Tan, R. C. Creese, generalized multi-pass machining model for machining parameter selection in turning, *International Journal of Production Research*, Vol. 33, No.5, pp. 1467-1487, 1995.
- [2] D. C. Montgomery, E. A. Peck, *Introduction to linear regression analysis*, Second ed., New York: Wiley, 1992.
- [3] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiment*, fifth ed, New York: Wiley, 2001.
- [4] F. S. Hillier, G. J. Liebermann, *Operations research*, second ed, Delhi: CBS Publishers and Distributors, 1999.
- [5] D. E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, Boston, MA: Pearson Education Asia (fifth print), 2002.
- [6] K. Kirkpatrick, C. D. Gelett, M. P. Vecchi, Optimization by simulated annealing, *Science*, New Series, Vol. 220, No. 4598, pp.671-680, 1983.
- [7] L. H. S. Luong, T. A. Spedding, Neural-network system for predicting machining behavior, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 52, pp. 585-591, 1995.
- [8] N.S.K. Reddy, P.V. Rao, Selection of optimum tool geometry and cutting conditions using surface roughness prediction model for end milling, *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, Vol. 26, pp.1202-1210, 2005.
- [9] B. Ozcelik, M. Bayramoglu, The statistical modeling of surface roughness in high speed flat end milling, *International Journal of Machine Tools Manufacturing*, Vol. 46, pp. 1395-1402, 2006.
- [10] N.K. Jha, Optimizing the number of tools and cutting parameters in multi-tool turning for multiple objectives through geometric programming, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 10, pp. 162-169, 1986.
- [11] M. Kurdi, *Robust multi criteria optimization of surface location error and material removal rate in high speed milling under uncertainty*, PhD Thesis, Department of Mechanical and aerospace engineering, University of Florida, 2005.
- [12] P.V. Bayly, J.E. Halley, B.P. Mann, M.A. Davies, Stability of interrupted cutting by temporal finite element analysis, *18th Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise*, Pittsburgh, PA, No. VIB-21581, ASME, 2001.
- [13] B.M. Imani, M. Pour, A. Ghoddosian, M. Fallah, Improved Dynamic Simulation of End-Milling Process using Time Series Analysis, *Scientia Iranica*, Vol. 19, pp. 294-302, 2012.
- [14] B.M. Imani, M.H. Sadeghi, M. Kazemi, Effect of helix angle variations on stability of low immersion milling, *IUST international journal of Engineering Sciences*, Vol. 19, pp. 115-