



بررسی تحلیلی و عددی نیروهای ماشین کاری فرایند فرزکاری به کمک نوسان فراصوتی

عباس پاک^{1*}، علی فراهانی²

1- استادیار، مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

* همدان، صندوق پستی 651754161، a.pak@basu.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 19 مرداد 1398

پذیرش: 7 آذر 1398

ارائه در سایت: تیر 1399

کلیدواژگان:

فرزکاری

نوسان فراصوتی

شبیه‌سازی عددی

نیروی‌های ماشین کاری

امروزه با پیشرفت علم مواد و با تولید مواد با خواص ویژه از قبیل سوپر آلیاژها، کامپوزیت‌ها و سرامیک‌های مورد کاربرد در صنایع پیشرفته استفاده از روش‌های سنتی براده برداری برای تولید این قطعات امکان‌پذیر نمی‌باشد. لذا استفاده از روش‌های نوین مورد توجه قرار گرفته است. یکی از این روش‌ها که قابلیت اضافه شدن به فرایندهای براده‌برداری سنتی را دارد، استفاده از ارتعاشات فراصوتی در حین فرایند ماشین کاری است. در این مقاله روابط تحلیلی محاسبه نیروهای ماشین کاری مربوط به فرزکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی بر اساس ضخامت براده تغییر شکل نیافته استخراج گردیده است. سپس شبیه‌سازی عددی فرایند فرزکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی با اعمال ارتعاشات به قطعه کار در جهت پیشروی توسط نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام و نیروهای ماشین کاری تعیین شده است. نتایج بدست آمده بصورت تحلیلی و عددی نشان می‌دهد که استفاده از ارتعاشات فراصوتی باعث تغییر مسیر حرکت ابزار و تغییر ضخامت براده تغییر شکل نیافته و در نتیجه کاهش نیروهای ماشین کاری در فرایند فرزکاری می‌گردد. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده مشاهده گردید که تطابق خوبی بین نتایج تحلیلی و شبیه‌سازی عددی بصورت سه بعدی در مقیاس ماکرو وجود دارد.

Analytical and Numerical Investigation of Machining Forces of Ultrasonic Assisted Milling

Abbas Pak^{1*}, Ali Farahani²

1- Department of Mechanical Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

* P.O.B. 681754161 Hamedan, Iran, a.pak@basu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 9 August 2019
Accepted 28 November 2019
Available July 2020

Keywords:

Milling
Ultrasonic Vibration
FEM Modeling
Machining Forces

Abstract

Nowadays, with the advancement of materials science and the production of materials with special properties such as super alloys, composites and ceramics used in advanced industries, the use of traditional machining methods for the production of these parts is not possible. Therefore, the use of modern methods has been considered. One of these methods, which has the ability to add to traditional cutting processes, is the use of ultrasonic vibrations during the machining process. In this paper, analytical relations have been derived to calculate machining forces associated with ultrasonic vibration based on the undeformed chip thickness. Then numerical simulation of ultrasonic assisted milling process is performed by applying the vibrations to the workpiece in the feed direction by using the ABAQUS finite element software and the machining forces are determined. The results obtained by analytical and numerical data show that the use of ultrasonic vibrations can change the direction of movement of the tool and change the thickness of the undeformed chip and thus reduce the machining forces in the milling process. Also, based on the results, it was found that there is a good agreement between the results obtained from analytical analysis and 3D FEM modeling in macro scale.

1- مقدمه

ماشین کاری است. در این روش، ارتعاشات با فرکانس‌های بالا و دامنه کم به قطعه کار یا ابزار اعمال می‌گردد. کاهش متوسط نیروهای برشی و نیروهای وارد به ابزار، کاهش فرسایش ابزار، بهبود کیفیت سطح، کاهش پدیده چتر و کاهش شعاع انحنای براده از نتایج بدست آمده در استفاده از ارتعاشات فراصوتی در فرایندهای براده‌برداری سنتی بوده است [1-4]. سلیمانی و همکارانش نشان دادند که مقدار برگشت فتری در تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی نسبت

امروزه با پیشرفت علم مواد و با تولید مواد با خواص ویژه از قبیل سوپر آلیاژها، کامپوزیت‌ها و سرامیک‌های مورد کاربرد در صنایع پیشرفته همچون هوافضا، پزشکی و غیره استفاده از روش‌های سنتی براده‌برداری برای تولید این قطعات امکان‌پذیر نمی‌باشد. لذا استفاده از روش‌های نوین مورد توجه قرار گرفته است. یکی از این روش‌ها که قابلیت اضافه شدن به فرایند براده‌برداری سنتی را دارد، استفاده از ارتعاشات فراصوتی در حین فرایند

Please cite this article using:

Abbas Pak, Ali Farahani, Analytical and Numerical Investigation of Machining Forces of Ultrasonic Assisted Milling, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 4, pp. 31- 38, 2020 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Abbas Pak, Ali Farahani, Analytical and Numerical Investigation of Machining Forces of Ultrasonic Assisted Milling, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 4, pp. 31- 38, 2020 (in Persian)

محدود آباکوس توسط غلامزاده و همکاران با بررسی پارامترهای ارتعاشی (دامنه و فرکانس ارتعاشات) روی مقدار دمای ابزار انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی المان محدود نشان داد که با افزایش دامنه و فرکانس ارتعاش، دمای بیشینه ابزار نیز افزایش یافته و به منظور کاهش دما می‌بایست از دامنه ارتعاشی پایین و فرکانس بالا استفاده نمود [14].

هو و همکارانش با شبیه‌سازی فرایند فرزکاری در مقیاس میکرو با اعمال ارتعاشات پیچشی به ابزار فرزکاری نشان دادند که اعمال ارتعاشات فراصوتی سبب کاهش تنش‌های پسماند می‌گردد بهبود اثر شکست دینامیکی و راحت‌تر جدا شدن براده و در نتیجه کاهش نیروهای براده برداری دلیل این کاهش بیان شده است [15]. مدل‌سازی عددی فرایند تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی نیز توسط کاکیر و همکارانش بصورت دوبعدی انجام و با تراشکاری معمولی مقایسه گردیده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که استفاده از نوسان فراصوتی باعث کاهش نیروهای ماشین کاری به‌ویژه در سرعت‌های پیشروی کم شده است از طرفی استفاده از این نوسانات باعث افزایش دمای فرایند می‌گردد [16].

با توجه به پیشینه تحقیقات انجام شده استفاده از ارتعاشات فراصوتی در فرایندهای براده‌برداری سنتی باعث بهبود قابل توجه خروجی‌های فرایند به‌ویژه نیروهای ماشین کاری گردیده و در این راستا بررسی تحلیلی و عددی می‌تواند ابزار مناسبی برای بررسی اثر پارامترهای ورودی فرایند بر خروجی آن باشد. لذا هدف از این مقاله با توجه به کاربرد فراوان فرایند فرزکاری در ساخت قطعات از جنس مواد پیشرفته، استخراج روابط تحلیلی محاسبه نیروهای ماشین کاری مربوط به فرزکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی بر اساس ضخامت براده تغییر شکل نیافته است.

در این تحقیق در مرحله اول با استفاده از روابط تحلیلی در فرزکاری سنتی و ضخامت براده تغییر شکل نیافته مقدار نیروهای فرزکاری سنتی تعیین و سپس بر اساس این روابط تعیین مسیر حرکت ابزار در فرایند فرزکاری به کمک نوسانات فراصوتی روابط مربوط به محاسبه نیروی ماشین کاری در هنگام استفاده از نوسانات فراصوتی در فرزکاری استخراج گردیده است. در مرحله بعدی شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی فرزکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی با اعمال ارتعاشات به قطعه‌کار در مقیاس ماکرو توسط نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام و نتایج بدست آمده با نتایج تحلیلی مقایسه شده است.

به تراش کاری معمولی کمتر و در نتیجه خطای ناشی از آن نیز کمتر خواهد بود [5]. بررسی تحلیلی و تجربی سینماتیک تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی توسط رضوی و همکارانش انجام و مشاهده گردید که میکروسختی سطح ماشین کاری شده در مقایسه با تراشکاری سنتی افزایش یافته است [6]. در بررسی استفاده از ارتعاشات فراصوتی در فرایند سنگزنی نشان داده شد که علاوه بر کاهش نیروهای سنگزنی و فرسایش چرخ سنگ و افزایش کیفیت سطح، درجه حرارت تولیدی کاهش و صدمات ناشی از آن کمتر گردیده است [7-9]. یانگ‌بو و همکارانش مدل‌سازی عددی ماشین کاری آلیاژ Ti-6Al-4V با استفاده از نرم‌افزار تخصصی ماشین کاری ادونتج¹، بصورت دو بعدی را بررسی و نشان دادند که اعمال ارتعاشات فراصوتی به ابزار و در راستای سرعت برشی باعث کاهش نیرو در اثر تغییر مسیر حرکت ابزار در نتیجه جدا شدن ابزار و قطعه کار می‌گردد. در این تحقیق برای مدل‌سازی فرایند فرزکاری از محیط تراشکاری نرم‌افزار و با مدل‌سازی فرایند تراشکاری با عمق برش متغیر به عنوان فرزکاری استفاده شده است [10]. مدل فیزیکی برای فرایند فرزکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی هنگام اعمال ارتعاش به ابزار توسط برستچی و همکارانش ارائه گردید. مدل ارائه شده اثر پارامترهای ماشین کاری شامل سرعت برشی و پیشروی، هندسه ابزار و دامنه و فرکانس ارتعاش را بر روی مقدار زاویه برخورد، مسیر حرکت ابزار و ضخامت براده نشان می‌دهد. این مدل نشان می‌دهد که استفاده از ارتعاشات فراصوتی باعث تغییر در زاویه برخورد و طول مسی برش می‌گردد و با افزایش دامنه و فرکانس ارتعاش زاویه برخورد و طول مسیر برشی افزایش می‌یابد [11]. ابوترابی و همکاران نیز با بررسی فرایند فرزکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی و انجام آزمون‌های تجربی نشان دادند که اعمال ارتعاشات فراصوتی به قطعه کار سبب کاهش نیروهای فرزکاری می‌شود [12].

بررسی تجربی اعمال ارتعاشات طولی به ابزار فرزکاری بر روی کامپوزیتی پلاستیک تقویت شده توسط الیاف کربنی توسط هدا عبد بررسی گردید. در این تحقیق نیرو، دمای ماشین کاری، فرسایش ابزار و زبری سطح مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که اعمال ارتعاشات فراصوتی طولی به ابزار باعث کاهش نیرو تا 20 درصد، کاهش دما به مقدار 15 درصد، افزایش 5 درصدی زبری سطح و افزایش فرسایش ابزار گردیده است [13]. بررسی تغییرات دمای تراشکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی آلیاژ Al7075-T6 با استفاده از نرم‌افزار المان

¹ Advantedge

$$x_{k-1} = R \sin(\omega t_{k-1} - \frac{2\pi(k-1)}{Z}) \quad (6)$$

$$y_{k-1} = R \cos(\omega t_{k-1} - \frac{2\pi(k-1)}{Z}) + V_f t_{k-1} \quad (7)$$

x_{k-1} مختصات لبه برش در راستای محور x و y_{k-1} مختصات لبه برش در راستای محور y می باشد.

2-1- تعیین ضخامت براده تغییر شکل نیافته در فرایند فرزکاری سنتی

برای محاسبه ضخامت براده تغییر شکل نیافته نیاز به تعیین مختصات نوک ابزار می باشد. موقعیت نوک ابزار بستگی به مقدار شعاع ابزار، سرعت پیشروی، سرعت دورانی ابزار و تعداد دندانه های تیغه فرز دارد.

رابطه (8) از نوشتن معادله خط بین نقطه مرکز ابزار و محل قرارگیری لبه ابزار (OA) بدست می آید:

$$\tan(\theta) = \frac{x - x_0}{y - y_0} \quad (8)$$

که x و y مختصات نقطه لبه ابزار، A و x_0 و y_0 مختصات نقطه مرکز ابزار، O می باشد. با جایگذاری روابط (4) و (5) در رابطه (8) معادله خط OA به صورت زیر نتیجه می شود.

$$\tan(\omega t_k - \frac{2\pi k}{Z})(y) - (x + V_f t_k) = 0 \quad (9)$$

با جایگزینی روابط (6) و (7) مربوط به مختصات نقطه $B(x_{k1}, y_{k-1})$ در رابطه (9) رابطه نهایی (10) حاصل می شود:

$$\tan(\omega t_k - \frac{2\pi k}{Z}) \times [R \cos(\omega t_{k-1} - \frac{2\pi(k-1)}{Z})] - [R \sin(\omega t_{k-1} - \frac{2\pi(k-1)}{Z}) + V_f(t_{k-1} - t_k)] = 0 \quad (10)$$

با حل معادله (10) به روش عددی نیوتن رافسون زاویه گردش θ_{k-1} بر حسب θ_k و یا بر حسب زمان t_{k-1} بدست می آید. برای حل رابطه (10) از حدس اولیه رابطه (11) استفاده می شود.

$$(t_{k-1})_0 = (t_k)_0 - \frac{\pi}{\omega} \quad (11)$$

با استفاده از الگوریتم پیشنهاد شده در مرجع [18] با مقدار اولیه برای t_{k-1} طبق رابطه (11) مختصات نقطه B بر حسب t_k محاسبه و سپس ضخامت براده تغییر شکل نیافته طبق رابطه (12) محاسبه می شود.

$$h = |AB| = \sqrt{(x_A - x_B)^2 - (y_A - y_B)^2} \quad (12)$$

h ضخامت براده تغییر شکل نیافته و x_A و x_B مختصات لبه برش A و B در راستای محور x و y_A و y_B مختصات لبه برش A و B در راستای محور y می باشد.

1-1- روابط تحلیلی در فرزکاری سنتی

در فرایند فرزکاری مسیر حرکت ابزار تابع دو پارامتر سرعت دورانی ابزار و سرعت پیشروی قطعه کار می باشد. در شکل 1 موقعیت نوک ابزار (مسیر حرکت) برای لبه k و $(k-1)$ نشان داده شده است.

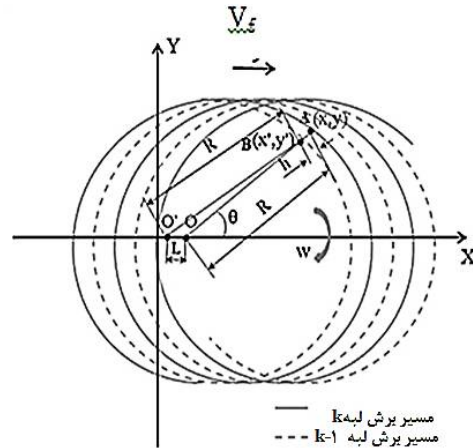


Fig. 1 Tool movement path for $k, k-1$ edge and nondeformed chip thickness in up milling.

شکل 1 مسیر حرکت ابزار برای لبه k و $k-1$ و ضخامت براده تغییر شکل نیافته در فرزکاری رو به بالا [17]

موقعیت نوک ابزار برای لبه k در فرایند فرزکاری رو به بالا در راستای محور x و y از روابط (1) و (2) محاسبه می شود [17]:

$$x_k = R \sin(\omega t_{k-1} - \frac{2\pi k}{Z}) + V_f t_k \quad (1)$$

$$y_k = R \cos(\omega t_k - \frac{2\pi k}{Z}) \quad (2)$$

x_k مختصات لبه برش در راستای محور x و y_k مختصات لبه برش در راستای محور y می باشد. ω سرعت دورانی ابزار، t_k زمان متناظر، Z تعداد دندانه های تیغه فرز، V_f سرعت پیشروی ابزار و R شعاع ابزار می باشد.

روابط (1) و (2) را می توان بر حسب زاویه دوران ابزار، θ_k نیز بدست آورد:

$$\theta_k = (\omega t_k - \frac{2\pi k}{Z}) \quad (3)$$

رابطه جابجایی مرکز ابزار نیز بر حسب زمان در راستای محور x و y از رابطه (4) و (5) حاصل می شود.

$$x_0 = V_f t_k \quad (4)$$

$$y_0 = 0 \quad (5)$$

x_0 مختصات مرکز ابزار در راستای محور x و y_0 مختصات مرکز ابزار در راستای محور y و t_k زمان می باشد. موقعیت نوک ابزار برای لبه $k-1$ با جایگزینی $k-1$ به جای k در روابط (1) و (2) و زمان t_{k-1} بدست می آید.

1-2-1- محاسبه نیروهای فرزکاری سنتی

پس از تعیین ضخامت براده تغییر شکل نیافته و با استفاده از روابط (13) تا (16) نیروهای براده برداری محاسبه می‌گردد [19].

$$F_x = -h(K_{tc} a_p \sin(\theta) + K_{te}) \cos(\theta) - h(K_{rc} a_p \sin(\theta) + K_{re}) \sin(\theta) \quad (13)$$

$$F_z = K_{ae} h + K_{ac} a_p \sin(\theta) h \quad (14)$$

$$F_y = h(K_{tc} a_p \sin(\theta) + K_{te}) \sin(\theta) - h(K_{rc} a_p \sin(\theta) + K_{re}) \cos(\theta) \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = [B][A][K] \quad (16)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -\cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & -\cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[B] = h a_p \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[K] = [K_{tc} \ K_{rc} \ K_{ac} \ K_{te} \ K_{re} \ K_{ae}]^T$$

بر حسب K_{ac} و K_{tc} ، K_{rc} شعاعی و محوری بر حسب N/mm^2 و N/mm به ترتیب ثابت‌های برشی مماسی، شعاعی و شخم مماسی، شعاعی و محوری بر حسب N/mm می‌باشند. F_x نیروی برشی در جهت محور x ، F_y نیروی برشی در جهت محور y و F_z نیروی برشی در جهت محور z و a_p عمق برش در جهت محور ابزار و θ زاویه دوران ابزار و h ضخامت براده تغییر شکل نیافته می‌باشد. نیروهای ماشین کاری محاسبه شده در فرزکاری سنتی رو به بالا با مقادیر ارائه شده در مرجع [19] برابر با:

$$K_{tc} = 549.6, \quad K_{rc} = 170.112, \quad K_{te} = 10.02, \\ K_{re} = 10.22, \quad K_{ac} = -60.86, \\ K_{ae} = 0.127$$

در شرایطی که پیشروی به ازای یک دندانه $a_f=0.15$ mm/tooth شعاع ابزار $R=4$ mm دوران ابزار $n=2000$ rpm و عمق برش در جهت محور ابزار $a_p=1$ mm در شکل 2 نشان داده شده است.

2- روابط تحلیلی فرزکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی

سینماتیک حرکت ابزار در مسیر برش در فرایند فرزکاری با اعمال ارتعاشات فراصوتی به قطعه کار سبب تغییر شکل مسیر

حرکت ابزار می‌گردد. در این تحقیق ارتعاشات فراصوتی در فرایند فرزکاری رو به بالا و در جهت پیشروی به قطعه کار اعمال شده است.

شکل 3 شمایی از حرکت ابزار و قطعه کار در فرزکاری رو به بالا با اعمال ارتعاشات در جهت پیشروی را نمایش می‌دهد. در شکل 3 $V_u = B \cos(2\pi f t)$ سرعت ارتعاشی قطعه کار و $B = 2A\pi f$ می‌باشد. مسیر حرکت لبه k در فرایند فرزکاری رو به بالا به کمک ارتعاشات فراصوتی در راستای محور x و y با توجه به مقدار جابجایی ارتعاشی قطعه کار $X_u = A \sin(2\pi f t)$ از روابط (17) و (18) بدست می‌آید.

$$x_k = R \sin(\omega t_A - \frac{2\pi k}{Z}) + A \sin(2\pi f t) + V_f t_A \quad (17)$$

$$y_k = R \cos(\omega t_A - \frac{2\pi k}{Z}) \quad (18)$$

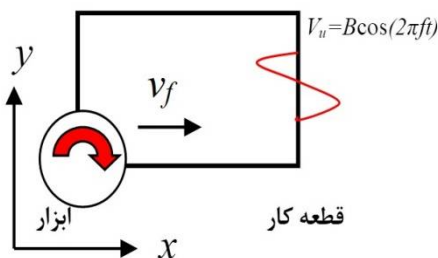


Fig. 3 Move the tool in the ultrasonic assisted up milling شکل 3 حرکت ابزار در فرایند فرزکاری رو به بالا به کمک ارتعاشات فراصوتی

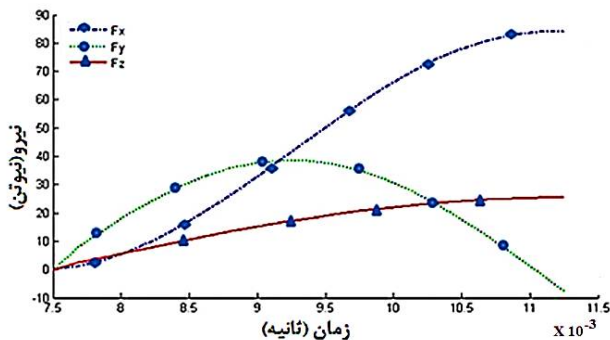


Fig 2. Machining forces in traditional up milling ($a_p = 1$ mm, $a_f = 0.15$ mm/tooth, $n = 4000$ rpm, $R = 4$ mm)

شکل 2 نیروهای ماشین کاری در فرزکاری سنتی رو به بالا ($a_p=1$ mm) ($n=4000$ rpm, $R=4$ mm, $a_f=0.15$ mm/tooth)

رابطه جابجایی مرکز ابزار نیز بر حسب زمان در راستای محور x و y از روابط (19) و (20) بدست می‌آید:

$$x_0 = A \sin(2\pi f t_k) + V_f t_k \quad (19)$$

$$y_0 = 0 \quad (20)$$

معادله جابجایی لبه $k-1$ با جایگزینی $k-1$ به جای k در زمان t_{k-1} حاصل می‌شود.

ضخامت براده تغییر شکل نیافته درمقایسه با تراشکاری از پیچیدگی بیشتری برخوردار است. همچنین با توجه به زاویه ماریچ ابزار، فرایند فرزکاری یک فرایند برش مایل است لذا در این مقاله جهت مدل سازی از یک مدل سه بعدی ماکرو استفاده شده است.

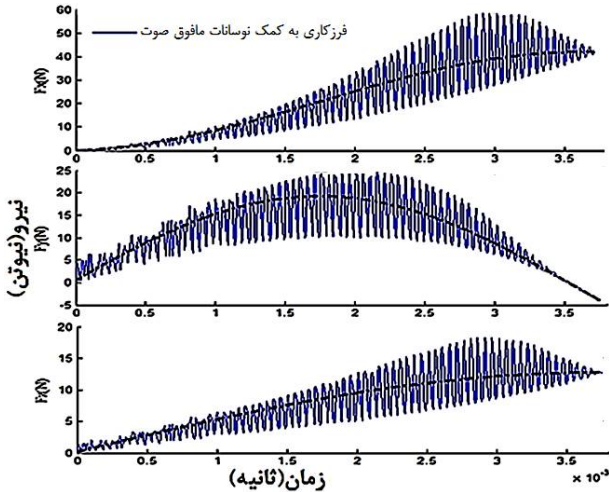


Fig. 5 Milling forces in ultrasonic assisted in feed direction ($a_p=1$ mm, $a_{fz}=0.15$ mm/tooth, $n=4000$ rpm, $R=4$ mm, $A=0.03$ mm, $f=20$ kHz)

شکل 5 نیروهای فرزکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی در جهت پیشروی در فرزکاری رو به بالا، $a_p=1$ mm, $a_{fz}=0.15$ mm/tooth, $n=4000$ rpm, $R=4$ mm, $A=0.03$ mm, $f=20$ kHz

به منظور محاسبه نیروها توسط روابط تحلیلی و انجام شبیه سازی جنس قطعه کار از آلیاژ آلومینیوم AL2024-T3 انتخاب گردیده است. این آلیاژ به دلیل قابلیت ماشین کاری و استحکام بالا و در نتیجه کاربردهای فراوان آن در صنایع مختلف و مشخص بودن ضرایب مورد نیاز انتخاب شده است. برای مدل سازی مدل ساختاری ماده AL2024-T3 با توجه به مدل جانسون کوک طبق رابطه (24) در نظر گرفته می شود [19].

$$\sigma = [A + B(\epsilon_p)^n] \left[1 + C \ln\left(\frac{\epsilon_p}{\epsilon_0}\right) \right] \left[1 - \left(\frac{T_W - T_0}{T_m - T_0}\right)^m \right] \quad (24)$$

A, B, C, m و n ثوابت پلاستیک جانسون کوک و T_W دمای قطعه کار و T_0 دمای محیط است.

در شبیه سازی عددی فرایند فرزکاری از روش جدایش براده با روش برداشت المان استفاده شده است مدل سازی جدایش براده بر مبنای تئوری شکست جانسون کوک می باشد. در این مدل بر مبنای کرنش پلاستیک معادل، با توجه به نقاط انتگرال گیری المان، شکست هنگامی اتفاق می افتد که پارامتر شکست ω از 1 بیشتر شود [19].

$$x_{k-1} = R \sin\left(\omega t_{k-1} - \frac{2\pi(k-1)}{Z}\right) + A \sin(2\pi f t_{k-1}) + V_f t_{k-1} \quad (21)$$

$$y_{k-1} = R \cos\left(\omega t_{k-1} - \frac{2\pi(k-1)}{Z}\right) \quad (22)$$

با کمک روابط استخراج شده، مسیر حرکت ابزار برای فرایند فرزکاری سنتی و به کمک ارتعاشات فراصوتی توسط نرم افزار متلب رسم و در شکل 4 نمایش داده شده است.

2-1- ضخامت براده تغییر شکل نیافته در فرایند فرزکاری روبه بالا به کمک ارتعاشات فراصوتی

با توجه به روابط ارائه شده در فرزکاری سنتی با جایگزینی معادلات مربوط به مختصات نقطه $B(x_{k-1}, y_{k-1})$ در رابطه (9) می توان زمان t_{k-1} و یا زاویه گردش را برای لبه $k-1$ رابرحسب زمان بدست آورد که در نهایت رابطه (23) حاصل می شود:

$$\tan\left(\omega t_k - \frac{2\pi k}{Z}\right) \left[R \cos\left(\omega t_{k-1} - \frac{2\pi(k-1)}{Z}\right) \right] - [R \sin\left(\omega t_{k-1} - \frac{2\pi(k-1)}{Z}\right)] + A \sin(2\pi f t_{k-1}) - A \sin(2\pi f t_k) + V_f (t_{k-1} - t_k) = 0 \quad (23)$$

پس از محاسبه t_{k-1} با کمک روش نیوتن رافسون، ضخامت براده تغییر شکل نیافته طبق رابطه (12) محاسبه می شود. در نتیجه نیروهای براده برداری برای فرایند فرزکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی رو به بالا به کمک روابط (13) تا (16) محاسبه می گردد [19]. در شکل 5 نتایج بدست آمده برای نیروهای ماشین کاری بصورت نمودار نشان داده شده است.



Fig. 4 The tool moves in traditional milling and ultrasonic assisted milling

شکل 4 مسیر حرکت ابزار در فرزکاری سنتی و به کمک ارتعاشات فراصوتی

3- شبیه سازی عددی فرایند فرزکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی

مدل سازی فرایند فرزکاری به دلیل هندسه ابزار و تغییرات

شرایط مرزی اعمالی بدین گونه است که سطح زیرین قطعه کار در جهات x, y, z مقید شده است که x جهت عمود بر راستای پیشروی، y در جهت پیشروی و z در جهت محور ابزار می باشد. در شکل 7 شرایط مرزی اعمال شده به ابزار و قطعه کار نمایش داده شده است. در مرحله پایانی با انجام تحلیل عددی مقدار تغییرات نیروهای ماشین کاری در فرایند فرزکاری سنتی و به کمک ارتعاشات فراصوتی در بازه های زمانی معین بدست می آید.

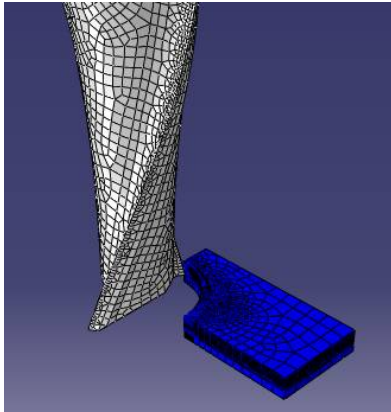


Fig. 6 Modeling tool and workpiece in milling process

شکل 6 مدل سازی انجام شده برای ابزار و قطعه کار در فرایند فرزکاری

Table 3 Machining parameters in ultrasonic assisted milling

جدول 3 شرایط ماشین کاری در مدل سازی فرزکاری به کمک ارتعاشات مافوق صوت

n (rpm)	f (kHz)	a_{fc} (mm)	A (μ m)	a_p (mm)
4000	20	0/15	30	1

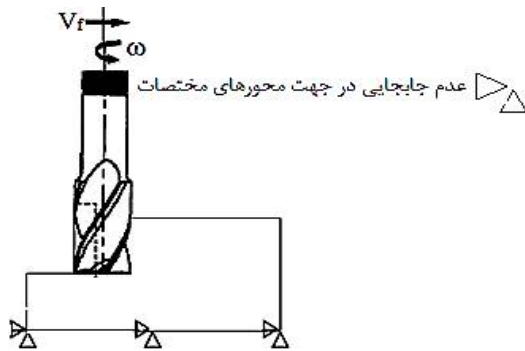


Fig. 7 Boundary conditions applied to tool and workpiece in milling process

شکل 7 شرایط مرزی اعمال شده به ابزار و قطعه کار در فرایند فرزکاری

4- تحلیل نتایج شبیه سازی فرایند فرزکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی

در شکل 8 نتایج بدست آمده از شبیه سازی و نتایج تحلیلی در شرایط یکسان ماشین کاری نشان داده شده است. مقدار نیروی میانگین بدست آمده در جهت Z, Y, X (F_x, F_y, F_z) با استفاده از

$$\omega = \sum \left(\frac{\Delta \varepsilon_p}{\Delta (\varepsilon_p)_f} \right) \quad (25)$$

که $\Delta \varepsilon_p$ نمو کرنش پلاستیک معادل و $\Delta (\varepsilon_p)_f$ نمو کرنش پلاستیک معادل در شکست است. کرنش در شکست $\Delta (\varepsilon_p)_f$ از رابطه (26) محاسبه می شود:

$$\Delta (\varepsilon_p)_f = \left[d_1 + d_2 \exp\left(d_3 \frac{p}{q}\right) \right] \left[1 + d_4 \ln\left(\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0}\right) \right] \left[1 + d_5 T_0 \right] \quad (26)$$

که d_1 تا d_5 ضرایب شکست جانسون کوک محاسبه شده در دمای اتاق، ε_p نرخ کرنش پلاستیک، و T_0 دمای محیط و $\frac{p}{q}$ نسبت بی بعد فشار به تنش انحرافی می باشند. p متوسط تنش های نرمال و q تنش معادل فون میسز است. در جدول 1 ضرایب شکست d_1 تا d_5 برای آلومینیوم AL2024-T3 آورده شده است.

در شبیه سازی سه بعدی فرایند فرزکاری در حالت سنتی و به کمک ارتعاشات فراصوتی از روش تحلیل صریح¹ و المان نوع سه بعدی 8 گره ای استفاده شده است. از آنجا که تغییر شکل ابزار نسبت به قطعه کار خیلی کمتر است، ابزار به صورت صلب در نظر گرفته شده است. در مدل سازی از اثر تغییرات دما صرف نظر شده است. مقدار ضریب اصطکاک با توجه به جنس قطعه کار و ابزار بر اساس مدل Zorev برابر با مقدار 0/32 در نظر گرفته شده است [19]. این مدل بر اساس تغییر شکل پلاستیک در ناحیه صفحه برش و تئوری ارنست مرچنت و همچنین صرف نظر کردن از اثر دما در شکل گیری براده بدست آمده است [20]. مشخصات هندسی ابزار در جدول 2 آورده شده است.

Table 1 Johnson-Cook material properties for Al2021-T3

جدول 1 ضرایب شکست جانسون کوک آلیاژ Al2024-T3 [19]

ماده	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
AL2024-T3	0/13	0/13	-1/5	0/011	0

Table 2 Milling tool geometry

جدول 2 مشخصات هندسی ابزار فرزکاری

γ°	ψ°	α°	D (mm)
زاویه براده	زاویه ماریچ	زاویه آزاد	قطر ابزار
30	20	15	8

در شکل 6 مدل سازی انجام شده برای ابزار و قطعه کار در فرایند فرزکاری نشان داده شده است. ارتعاشات فراصوتی به قطعه کار و در جهت پیشروی اعمال شده است. شرایط ماشین کاری در نظر گرفته شده در شبیه سازی فرایند در جدول 3 آورده شده است.

¹ Explicit Dynamic

همان‌طور که مشاهده می‌شود میانگین نیروهای محاسبه شده برای فرزکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی کمتر از مقادیر نیروها در حالت فرزکاری سنتی است. دلیل این موضوع را مطابق شکل 4 می‌توان، تغییر مکانیزم براده‌برداری در اثر تغییر مسیر حرکت ابزار در حین فرزکاری و همچنین تغییر ضخامت براده تغییر شکل نیافته بیان نمود [21].

در شکل‌های 10 و 11 مقادیر نیروهای بدست آمده در شبیه‌سازی فرایند فرزکاری سنتی و فرزکاری به کمک امواج فراصوتی آورده شده است.

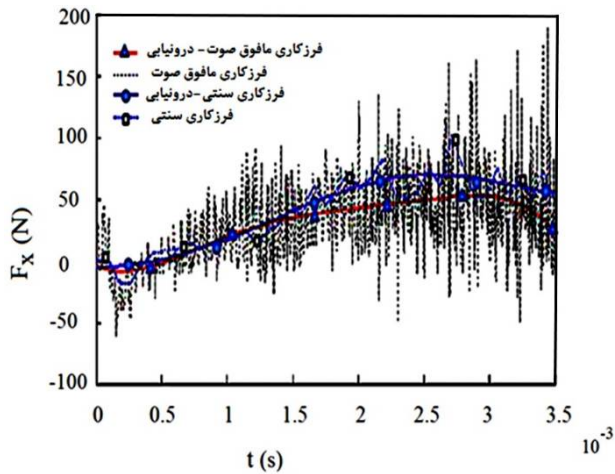


Fig. 10 The force obtained in the X-axis by simulating traditional milling and ultrasonic assisted milling ($A=0.03$ mm, $f=20$ kHz, $a_{fc}=0.15$ mm/tooth, $n=4000$ rpm, $a_p=1$ mm)

شکل 10 نیروی بدست آمده در جهت محور x توسط شبیه‌سازی فرزکاری سنتی و فرزکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی در شرایط ماشین کاری ($A=0.03$ mm, $f=20$ kHz, $a_{fc}=0.15$ mm/tooth, $n=4000$ rpm, $a_p=1$ mm)

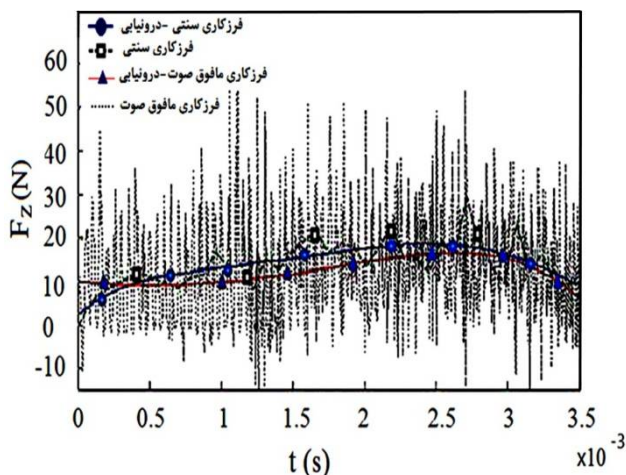


Fig. 11 The force obtained in the Z-axis by simulating traditional milling and ultrasonic assisted milling ($A=0.03$ mm, $f=20$ kHz, $a_{fc}=0.15$ mm/tooth, $n=4000$ rpm, $a_p=1$ mm)

شکل 11 نیرو بدست آمده در جهت محور z توسط شبیه‌سازی عددی فرزکاری سنتی و فرزکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی در شرایط ماشین کاری ($A=0.03$ mm, $f=20$ kHz, $a_{fc}=0.15$ mm/tooth, $n=4000$ rpm, $a_p=1$ mm)

روابط تحلیلی به ترتیب برابر با $16/45$ و $10/25$ نیوتن و مقادیر بدست آمده از مدل‌سازی به ترتیب $24/42$ ، $25/3$ و $10/45$ نیوتن است. در نتیجه خطای بدست آمده در جهت Z, Y, X به ترتیب $2/95$ ، $34/9$ و $1/95$ درصد بوده است.

در شکل 9 نتایج محاسبه شده از روابط تحلیلی استخراج شده برای نیروهای فرزکاری سنتی و فرزکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی نشان داده شده است.

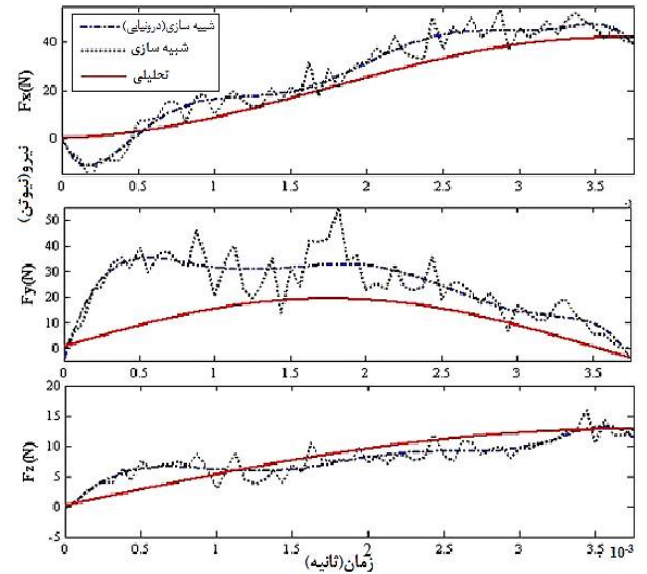


Fig. 8 The forces obtained from analytical and simulation methods in traditional milling ($a_{fc}=0.075$ mm/tooth, $n=4000$ rpm, $a_p=1$ mm)

شکل 8 مقادیر نیروهای بدست آمده از محاسبات تحلیلی و شبیه‌سازی فرزکاری سنتی ($a_{fc}=0.075$ mm/tooth, $n=4000$ rpm, $a_p=1$ mm)

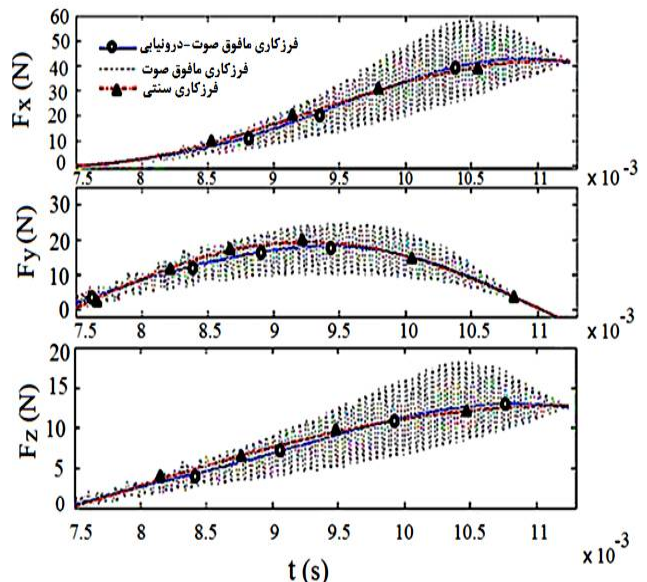


Fig. 9 Calculated forces from analytical relationships for traditional milling and milling using ultrasonic vibration ($A=0.03$ mm, $f=20$ kHz, $a_{fc}=0.15$ mm/tooth, $n=4000$ rpm, $a_p=1$ mm)

شکل 9 مقادیر نیروهای محاسبه شده از روابط تحلیلی برای فرزکاری سنتی و فرزکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی ($A=0.03$ mm, $f=20$ kHz, $a_{fc}=0.15$ mm/tooth, $n=4000$ rpm, $a_p=1$ mm)

فرزکاری به کمک نوسان‌های فراصوتی را پیشنهاد نمود.

6- فهرست علائم

A	دامنه ارتعاشی (mm)
E	مدول الاستیسیته (Nm^{-2})
a_{fz}	پیشروی به ازای هر دندانه (mmtooth^{-1})
a_p	عمق درگیری درجهت محور ابزار (mm)
f	فرکانس طبیعی (kHz)
h	ضخامت براده تغییر شکل نیافته (mm)
k	شماره لبه ابزار
K_{ij}	ثابتهای برشی
n	تعداد دوران ابزار (rpm)
p	متوسط تنش نرمال (MPa)
q	تنش معادل فون میسر (MPa)
R	شعاع ابزار (mm)
t	زمان (sec)
T	دما، ($^{\circ}\text{C}$)
V	سرعت برشی (ms^{-1})
V_f	سرعت پیشروی (mmmin^{-1})

علائم یونانی

ω	فرکانس زاویه‌ای (radsec^{-1})
ε_p	نرخ کرنش پلاستیک
$\Delta\varepsilon_p$	نمو کرنش پلاستیک معادل
$\Delta(\varepsilon_p)_f$	نمو کرنش پلاستیک معادل در شکست

7- مراجع

- [1] D.E. Breh, and T.A. Dow, Review of Vibration-Assisted Machining, *Precis. Eng.*, Vol. 32, No. 3, pp. 153-172, 2008.
- [2] F. Feucht, J. Ketelaer, A. Wolff, M. Mori, and M. Fujishim, Latest Machining Technologies of Hard-to-cut Materials by Ultrasonic Machine Tool, *Procedia CIRP*, Vol. 14 pp. 148 – 152, 2014.
- [3] D. Geng, D. Zhang, Y. Xu, F. He, D. Liu and Z. Duan, Rotary Ultrasonic Elliptical Machining for Side Milling of CFRP: Tool Performance and Surface Integrity, *Ultrason.*, Vol. 59, pp. 128–137, 2015.
- [4] N.F Huda Abd Halim, H. Ascroft, and S. Barnes, Analysis of Tool Wear, Cutting Force, Surface Roughness and Machining Temperature During Finishing Operation of Ultrasonic Assisted Milling (UAM) of Carbon Fibre Reinforced Plastic (CFRP), *Procedia Eng.* Vol. 184 , pp. 185 – 191, 2017.
- [5] H. Soleimanimehr, and M.J. Nategh, Machining Error Due to Spring-Back of Workpiece in conventional and Ultrasonic Vibration Assisted

همان‌طور که مشاهده می‌گردد، در فرزکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی مقادیر لحظه‌ای نیروها بیشتر از نیروهای فرزکاری سنتی است لیکن میانگین نیروهای ماشین کاری نسبت به حالت فرزکاری سنتی کمتر است. میانگین نیروی F_x در فرایند فرزکاری سنتی و به کمک نوسانات فراصوتی به ترتیب 42/15 و 29/7 نیوتن و برای نیروی F_z به ترتیب 13/9 و 11/9 نیوتن بدست آمده است. در نتیجه 29/53 درصد کاهش نیروی میانگین F_x و 14/3 درصد کاهش نیروی میانگین F_z بوده است. دلیل این موضوع را همان‌طور که بیان شد می‌توان تغییر مکانیزم براده‌برداری در اثر تغییر مسیر حرکت ابزار و تغییر ضخامت براده تغییر شکل نیافته بیان نمود.

5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ابتدا روابط تحلیلی محاسبه نیروهای ماشین کاری مربوط به فرزکاری سنتی و فرزکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی بر اساس ضخامت براده تغییر شکل نیافته استخراج گردیده است. سپس شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی فرایند فرزکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی با اعمال ارتعاشات به قطعه‌کار در جهت پیشروی بصورت ماکرو توسط نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام و نیروهای ماشین کاری تعیین شده است. نتایج برای روابط تحلیلی و شبیه‌سازی با اعمال ارتعاشات به قطعه‌کار با فرکانس 20kHz و دامنه ارتعاشات 30 میکرومتر بدست آمده است.

نتایج بدست آمده از این تحقیق را می‌توان به شرح ذیل

خلاصه نمود:

- روابط تحلیلی تخمین نیروهای ماشین کاری بر اساس ضخامت براده تغییر شکل نیافته برای فرایند فرزکاری به کمک امواج فراصوتی استخراج و ارائه گردیده است.

- شبیه‌سازی عددی بصورت سه‌بعدی و در مقیاس ماکرو برای فرزکاری به کمک ارتعاشات فراصوتی انجام شده است.

- استفاده از ارتعاشات فراصوتی باعث تغییر مسیر حرکت ابزار و تغییر ضخامت براده تغییر شکل نیافته و در نتیجه کاهش نیروهای ماشین کاری (29/53 درصد کاهش نیروی میانگین F_x و 14/3 درصد کاهش نیروی میانگین F_z) نسبت به فرایند فرزکاری سنتی می‌گردد.

- با توجه به درصد خطای بین نتایج روابط تحلیلی و شبیه‌سازی عددی می‌توان با توجه به نتایج روابط تحلیلی و شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار اجزای محدود، پیش‌بینی اولیه نیروهای ماشین کاری و اثر پارامترهای ماشین کاری در فرایند

- Milling (UAM) of Carbon Fibre Reinforced Plastic (CFRP), *Procedia Engineering*. Vol. 184, pp. 185-191, 2017.
- [14] B. Gholamzadeh, M.J. Nategh, H. Soleimanimehr and M. Shankayi, An Investigation on the Effect of Vibrational Parameters on Tool Temperature in Ultrasonic Assisted Turning, *Aerospace Mech. J.*, Vol. 9, No.3, pp. 9-17, 2013. (In Persian فارسی)
- [15] H.J. Hu, Y.Z. Sun and Z.S. Lu, Simulation of Residual Stress in Ultrasonic Vibration Assisted Micro-Milling, *Adv. Mater. Research*, Vol. 188, pp. 381-384, 2011.
- [16] F. H. Cakira, S. Gurgena, M.A. Sofuoglua, O. Nuri Celika and M. Cemal, Finite Element Modeling of Ultrasonic Assisted Turning of Ti6Al4V Alloy, *Procedia – Soci. and Behav. Scienc.*, No. 195, pp. 2839-2848, 2015.
- [17] S.M. Afazov, S.M. Ratchev and J. Segal, Modeling and Simulation of Micro-Milling Cutting Forces, *J. Mater. Process. Tech.*, Vol. 210, pp. 2154-2162, 2010.
- [18] C. Li, X. Lai, H. Li, and J. Ni, Modeling of Three-Dimensional Cutting Forces in Micro-End-Milling, *J. Micromech. MicroEng.*, Vol. 17, No. 4, pp. 671-678, 2007.
- [19] F. Hu and D. Li, Modeling and Simulation of Milling Forces Using an Arbitrary Lagrangian–Eulerian Finite Element Method and Support Vector Regression, *J. Optimiz. Theory App.*, Vol. 153, pp. 461-484, 2012.
- [20] D. Stephenson, J.S. Agapiou, Metal cutting theory and practice, CRC press, 2016.
- [21] A. Farahani, *Finite Element Modeling of Ultrasonic Vibration Assisted Milling*, M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, 2016. (In Persian فارسی)
- Turning, *Modares Mech. Eng.*, Vol. 11, No. 3, pp 27-42, 2011. (In Persian فارسی)
- [6] H. Razavi, M.J. Nategh, A. Abdullah and H. Soleimanimehr, An Investigation on the Kinematics of Tool-Workpiece's Relative Movement in One-Directional Ultrasonic Vibration Assisted, *Modares Mech. Eng.* Vol. 11, No. 1, pp. 103-115, 2011. (In Persian فارسی)
- [7] T. Tawakoli, and B. Azarhoushang, Influence of Ultrasonic Vibrations on Dry Grinding of Soft Steel, *Int. J. of Mach. Tool Manu.*, Vol. 48, pp. 1585-1591, 2008.
- [8] Z.L. Yongbo Wub, X. Wanga and W.A. Zhao, New Two-Dimensional Ultrasonic Assisted Grinding (2D-UAG) Method and its Fundamental Performance in Monocrystal Silicon Machining, *Int. J. of Mach. Tool. Manuf.*, Vol. 50, No. 8, pp. 728-736, 2010.
- [9] A. Abdullah, A. Farhadi and A. Pak, Ultrasonic-Assisted Dry Creep-Feed Up-Grinding of Superalloy Inconel 738LC, *Exp. Mech.*, Vol. 52, No. 7, pp. 843-853, 2012.
- [10] H. Huang, D. Lu, Y. Wu and M. Yang, Finite Element Analysis of Ultrasonic Vibration Assisted Milling of Ti-6Al-4V, *Adv. Mater. Research*, Vol. 538, pp. 823-827, 2012.
- [11] E. Bertsche and K. Ehmman, An Analytical Model of Rotary Ultrasonic Milling, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, Vol. 65, No. 9-12, pp. 1705-1720, 2013.
- [12] M. Abootorabi Zarchi, M.R. Razfar and A. Abdullah, Influence of Ultrasonic Vibrations on Side Milling of AISI 420 Stainless Steel, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, Vol. 66, No. 1-4, pp. 83-89, 2013.
- [13] N.F. Nor Farah Huda Abd, H. Helen, H. Ascroft and S. Barnes, Analysis of Tool Wear, Cutting Force, Surface Roughness and Machining Temperature During Finishing Operation of Ultrasonic Assisted