



## مدل سازی نیروی برشی در فرزکاری به کمک ارتعاش آلتراسونیک و بررسی تجربی آن

محمد مهدی ابوترابی زارچی<sup>1\*</sup>، امیر عبدالله<sup>2</sup>، محمد رضا رازفر<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

\* یزد، صندوق پستی 741-89195، abootorabi@yazd.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 30 بهمن 1392  
پذیرش: 20 اسفند 1392  
ارائه در سایت: 30 شهریور 1393  
کلید واژگان:  
فرزکاری به کمک آلتراسونیک  
فرزکاری معمولی  
نیروی برشی  
ضخامت براده

### چکیده

محاسبه نیروی برشی در همه فرآیندهای ماشینکاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله، ضخامت براده تغییر شکل نیافته در فرآیند فرزکاری به کمک ارتعاش آلتراسونیک یک بُعدی محاسبه و سپس، مدلی برای تعیین نیروی برشی در این فرآیند ارائه شده است. روابط تحلیلی نشان می‌دهند که بیشینه نیروی برشی در فرزکاری آلتراسونیک بیشتر از فرزکاری معمولی است ولی، میانگین نیروی برشی در فرزکاری آلتراسونیک کاهش یافته است. برای راستی آزمایی مدلسازی پیشنهاد شده، به کمک یک تنظیم تجربی خاص و اعمال ارتعاش یک بُعدی در راستای پیشروی به قطعه کار، نیروی برشی در فرزکاری معمولی و ارتعاشی به صورت تجربی اندازه‌گیری شده است. بزرگتر بودن بیشینه نیروی برشی در فرزکاری آلتراسونیک و کاهش میانگین نیروی برشی در آن نسبت به فرزکاری معمولی، در نتایج تجربی نیز مشاهده می‌شود. مقایسه مقادیر متوسط نیروی برشی نشان می‌دهد که روابط تحلیلی برای پیش‌بینی نیروی برشی در فرزکاری معمولی به طور متوسط 16% و در فرزکاری آلتراسونیک به طور متوسط 40% خطا دارد. با توجه به اینکه محاسبه تحلیلی ضخامت براده تغییر شکل نیافته و نیروی برشی در فرزکاری آلتراسونیک و همچنین مقایسه نیروهای تجربی با نیروهای مدلسازی شده، برای نخستین بار در این مقاله انجام شده است، می‌توان دقت روابط ارائه شده را قابل قبول دانست.

## Modeling the cutting force in ultrasonic-vibration assisted milling and its empirical study

Mohammad Mehdi Abootorabi Zarchi<sup>1\*</sup>, Amir Abdullah<sup>2</sup>, Mohammad Reza Razfar<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 89195-741 Yazd, Iran. abootorabi@yazd.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 19 February 2014  
Accepted 11 March 2014  
Available Online 21 September 2014

#### Keywords:

Ultrasonic Assisted Milling  
Conventional Milling  
Cutting Force  
Chip Thickness

### ABSTRACT

Calculation the cutting force in machining processes is of great importance. In this paper, undeformed chip thickness in one-dimensional ultrasonic vibration assisted milling is calculated and then, a model for determining the cutting force in this process is presented. Analytical relations show that in ultrasonic assisted milling (UAM), the maximum cutting force is greater than in conventional milling (CM), but the average cutting force is decreased. To verify the proposed relations, with the aid of a particular experimental setup, one-dimensional vibration in feed direction is applied to workpiece and cutting force in CM and UAM is measured experimentally. Greater maximum cutting force in UAM and decrease of average cutting force in UAM compared to CM is observed experimentally as well. Comparison of average values of cutting force shows that the analytical relations for predicting the cutting force have 16% average error in CM and 40% average error in UAM. Given that the analytical calculation of undeformed chip thickness and cutting force in UAM and also comparison of experimental forces with the modeled ones has been done in this paper for the first time, the accuracy of proposed relations are acceptable.

### 1- مقدمه

آلتراسونیک به فرآیندهای ماشینکاری، کاهش نیروی برشی در آنها است [7] که معمولاً به صورت تجربی مشاهده شده است. سایر مزایای ماشینکاری ارتعاشی عبارتند از: بهبود قابل توجه در سایش ابزار، صافی سطح، پایداری برش، اندازه پلیسه و نوع براده‌های تشکیل شده [3، 6-1]. علاوه بر این، ماشینکاری برخی موادی که براده‌برداری آنها با روش‌های معمولی ماشینکاری به سختی انجام می‌شود، با روش‌های ماشینکاری به کمک ارتعاش قابل انجام است [3، 5، 8].

اضافه کردن ارتعاش آلتراسونیک به فرآیندهای سنتی براده برداری نظیر تراشکاری، فرزکاری، سوراخکاری و سنگ زنی موضوع تحقیقات متعددی در سال‌های اخیر بوده است [1-4]. در فرآیندهای ماشینکاری به کمک آلتراسونیک، ارتعاش با دامنه در حد چند میکرون و فرکانس معمولاً بالای 20 kHz به حرکت اصلی ابزار یا قطعه کار اضافه می‌شود [5] و سبب جدایش آنها از یکدیگر می‌گردد [6]. یکی از مهمترین مزایای اعمال ارتعاش

ارتعاشی قطعه کار در فرزکاری آلتراسونیک به صورت رابطه (2) بیان می شود:

$$y(t) = a \sin \omega t = a \sin 2\pi f t \quad (2)$$

که  $a$  و  $f$  به ترتیب دامنه و فرکانس ارتعاش و  $\omega$  فرکانس زاویه ای است. در فرزکاری آلتراسونیک، علاوه بر حرکت پیشروی میز ماشین فرز، قطعه کار نیز به دلیل حرکت ارتعاشی، دارای یک سرعت ارتعاشی است؛ بنابراین، میزان کل سرعت قطعه کار ( $a_{f,T}$ ) را می توان به صورت رابطه (3) نوشت:

$$a_{f,T} = a_{fm} + 2\pi a f \cos 2\pi f t \quad (3)$$

مشابه فرزکاری معمولی، برای فرزکاری به کمک ارتعاش آلتراسونیک نیز می توان پیشروی به ازای یک دندانه را به دست آورد. طبق رابطه (4) داریم:

$$a_{fz,T} = \frac{a_{fm} + 2\pi a f \cos 2\pi f t}{NZ} \quad (4)$$

نشان دهنده پیشروی به ازای یک دندانه در فرآیند فرزکاری آلتراسونیک است. در فرزکاری معمولی، ضخامت براده تغییرشکل نیافته در زاویه  $\theta$  که در شکل 1 نشان داده شده است، به صورت رابطه (5) می آید [16]:

$$a_c = a_{fz} \sin \theta \quad (5)$$

در فرزکاری به کمک آلتراسونیک نیز می توان رابطه مشابهی به صورت رابطه (6) نوشت:

$$a_{cv} = a_{fz,T} \sin \theta = \left( \frac{a_{fm} + 2\pi a f \cos 2\pi f t}{NZ} \right) \sin \theta \quad (6)$$

$a_{cv}$  ضخامت براده تغییرشکل نیافته در زاویه درگیری  $\theta$  در فرزکاری ارتعاشی است که در آن، جهت ارتعاش در راستای پیشروی میز ماشین فرز است. با استفاده از جاگذاری های رابطه (7):

$$A = \frac{a_{fm}}{NZ} = a_{fz}, B = \frac{2\pi a f}{NZ} \quad (7)$$

می توان رابطه (6) را به صورت رابطه (8) نوشت.

$$a_{cv} = (A + B \cos \omega t) \sin \theta \quad (8)$$

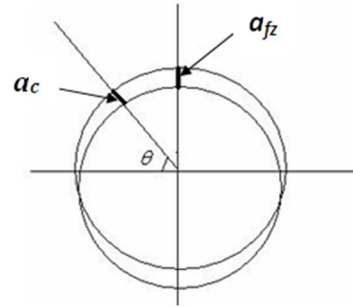
در فرزکاری معمولی، اگر میزان ضخامت براده تغییرشکل نیافته در یک موقعیت زاویه ای در دور اول چرخش ابزار برشی یک عدد ثابت باشد، در دوره های دیگر نیز در این موقعیت زاویه ای، ضخامت براده تغییر شکل نیافته به همان میزان خواهد بود و تغییری نخواهد کرد. شکل 2 ضخامت براده تغییر شکل نیافته در موقعیت زاویه ای  $\theta=30^\circ$  را در 30 دور گردش متوالی ابزار با شرایط  $N=500\text{rpm}$ ،  $a=5\ \mu\text{m}$ ،  $f=21732\text{Hz}$  برای فرزکاری به کمک آلتراسونیک نشان می دهد.

در شکل 2 مشاهده می شود که در موقعیت زاویه ای  $\theta=30^\circ$ ، در دوره های مختلف متوالی گردش ابزار، ضخامت براده تغییر شکل نیافته متغیر است. این موضوع نشان می دهد که بر خلاف فرزکاری معمولی، برای محاسبه نیروهای برشی در فرزکاری آلتراسونیک نمی توان میزان نیروها در یک دور گردش ابزار را به دست آورد و آن را به کل فرآیند تعمیم داد. به عبارت دیگر، در فرزکاری آلتراسونیک در هر دور گردش ابزار، نمودارهای نیرویی مختلفی به دست خواهد آمد. شکل 2 نشان می دهد که طبیعت فرآیند فرزکاری آلتراسونیک به طور کلی متفاوت از فرزکاری معمولی است.

شکل 3 نیروی مماسی ( $F_t$ ) وارد بر لبه ابزار برشی در فرزکاری با تیغ فرز انگشتی را نشان می دهد. با داشتن ضخامت براده تغییر شکل نیافته در فرزکاری آلتراسونیک می توان برای نیروی اصلی برش (نیروی مماسی) در موقعیت زاویه ای  $\theta$  رابطه ای به صورت رابطه (9) نوشت:

$$F_{t,v} = K_t a_a a_{cv} \quad (9)$$

که  $a_a$  عمق برش محوری و  $K_t$  ثابت برشی است. با جاگذاری  $a_{cv}$  از معادله 8 در معادله 9 رابطه (10) را داریم:



شکل 1 ضخامت براده تغییرشکل نیافته در زاویه  $\theta$  در فرزکاری معمولی

بایستی و دیگران [8] به کمک آنالیز المان محدود نشان دادند که حداکثر تنش در فرآیندهای تراشکاری معمولی و تراشکاری آلتراسونیک برابر است ولی میانگین نیروهای برشی در تراشکاری آلتراسونیک چندین مرتبه کوچکتر است. نیوگبر و استول [9] بیان کردند که در سوراخکاری آلیاژهای آلومینیوم به کمک آلتراسونیک، کاهش نیروی برشی و گشتاور پیشروی تا حداکثر 50% امکان پذیر است. توکلی و آذرهوشنگ [10] نیز نتایج مشابهی برای فرآیند سنگ زنی خشک Cr6 100C برای کمک ارتعاش آلتراسونیک به دست آوردند. چرن و چانگ [11] اثرات اعمال ارتعاش آلتراسونیک دو بُعدی بر کیفیت میکرو فرزکاری آلیاژ آلومینیم Al6061-T6 را به صورت تجربی بررسی و مشاهده کردند که دقت عرض و صافی سطح شیارها بهبود یافت و به دلیل شرایط بهتر ماشینکاری و همچنین کاهش نیروهای برشی، عمر ابزار افزایش پیدا کرد. سو و دیگران [12] ویژگی های فرزکاری سوپر آلیاژ پایه نیکل MAR-M247 با ترکیب ارتعاش آلتراسونیک و برش داغ را مطالعه کردند و نتیجه گرفتند که فرکانس ارتعاش تأثیر اندکی بر نیروی برشی دارد. دینگ و دیگران [13] مدلی برای پیش بینی نیروی برشی در فرآیند میکرو فرزکاری به کمک ارتعاش دو بُعدی ارائه و بیان کردند که افزایش دامنه ارتعاش موجب افزایش ماکزیمم نیروی برشی می گردد. شن و دیگران [14] اثرات ارتعاش آلتراسونیک در عملیات میکرو فرزکاری آلیاژ آلومینیم را بررسی کردند. آنها با اعمال ارتعاش آلتراسونیک به قطعه کار همزمان با عملیات شیارتراشی نتیجه گرفتند که میکرو فرزکاری همراه با ارتعاش آلتراسونیک در جهت پیشروی، نیروی برشی پالسی شکل و براده های کوچکتر بوجود می آورد.

در این مقاله، مدلی برای محاسبه ضخامت براده تغییر شکل نیافته و نیروی برشی در فرآیند فرزکاری به کمک آلتراسونیک<sup>1</sup> ارائه شده و نتایج به دست آمده از روابط تحلیلی، با انجام آزمایش های تجربی مورد راستی آزمایی قرار گرفته است. مقایسه داده های تحلیلی و تجربی نشان دهنده دقت قابل قبول روابط پیشنهاد شده است.

## 2- مدل سازی تحلیلی

در فرآیند فرزکاری، نیروی برشی تابعی از سطح مقطع براده تغییر شکل نیافته<sup>2</sup> است [15] که خود به عمق برش و ضخامت براده بستگی دارد [16]. بنابراین، پیش نیاز لازم برای بدست آوردن تحلیلی نیروها در فرزکاری آلتراسونیک، محاسبه ضخامت براده در هر موقعیت مکانی و زمانی از درگیری ابزار با قطعه کار است. اگر سرعت پیشروی میز ماشین فرز  $a_{fm}$  باشد، پیشروی به ازای هر دندانه ( $a_{fz}$ ) در فرزکاری معمولی<sup>3</sup> به صورت رابطه (1) به دست می آید [16]:

$$a_{fz} = \frac{a_{fm}}{NZ} \quad (1)$$

که  $N$  میزان دوران اسپیندل و  $Z$  تعداد دندانه ابزار برشی است. حرکت

1- Ultrasonic assisted milling (UAM)  
2- Undeformed chip thickness  
3- Conventional milling (CM)

نیروی برشی مماسی در فرزکاری معمولی در موقعیت زاویه‌ای  $\theta$  از رابطه (11) به دست می‌آید [17]:

$$F_{t,c} = K_t a_a a_c = K_t a_a a_{tz} \sin \theta \quad (11)$$

اگر  $D=BK_t a_a$  و  $C=BK_t a_a$  باشد، آنگاه:

$$F_{t,v} = F_{t,c} + C \sin \theta \cos \omega t = [D + C \cos \omega t] \sin \theta \quad (12)$$

اگر زمان درگیر شدن ابزار و قطعه کار در یک سیکل ارتعاشی،  $t_1$  و لحظه جدا شدن آنها از هم،  $t_2$  باشد، می‌توان رابطه (13) را برای نیروی اصلی برش در فرزکاری به کمک ارتعاش آلتراسونیک و برای سیکل ارتعاشی  $t_1$  تا  $t_2$  نوشت:

$$F_{t,v} = F_{t,c} + C \sin \theta \cos \omega t \quad t_{1,i} \leq t \leq t_{2,i} \quad (13)$$

$$F_{t,v} = 0 \quad t_{2,i} \leq t \leq t_{1,i+1}$$

در زمان درگیری ابزار و قطعه کار بسته به موقعیت زمانی و مکانی آن، ممکن است میزان نیروی برشی در فرزکاری ارتعاشی بیشتر از فرزکاری معمولی (اگر  $\cos \omega t > 0$ ) یا کمتر از آن (اگر  $\cos \omega t < 0$ ) باشد. مقدار ثابت  $K_t$  از آزمایش‌های تجربی به دست می‌آید و تابعی از جنس ابزار و جنس قطعه کار است [18]. لازم به ذکر است که زمان‌های  $t_1$  و  $t_2$  دارای دقت میکروثانیه هستند ولی دینامومتر بکار رفته جهت اندازه‌گیری نیروی برشی در آزمایش‌های تجربی توانایی اندازه‌گیری در فواصل میکرو ثانیه را ندارد و فرکانس اندازه‌گیری آن 1000Hz است؛ بنابراین، نمی‌توان از نمودار نیروی برشی تحلیلی حاصل از رابطه 13 برای مقایسه با نمودارهای حاصل از دینامومتر استفاده نمود. روابط تحلیلی به دست آمده در این بخش، مکانیزم برش به کمک ارتعاش آلتراسونیک و دلیل کاهش نیروی برشی در آن نسبت به برش معمولی را شرح می‌دهند.

اگر مبدأ زمان و مکان یکسان فرض شود یعنی در لحظه  $t=0$ s، موقعیت زاویه‌ای  $\theta=0$  rad باشد، می‌توان رابطه (14) را نوشت:

$$\theta = \frac{N\pi t}{30} \quad (14)$$

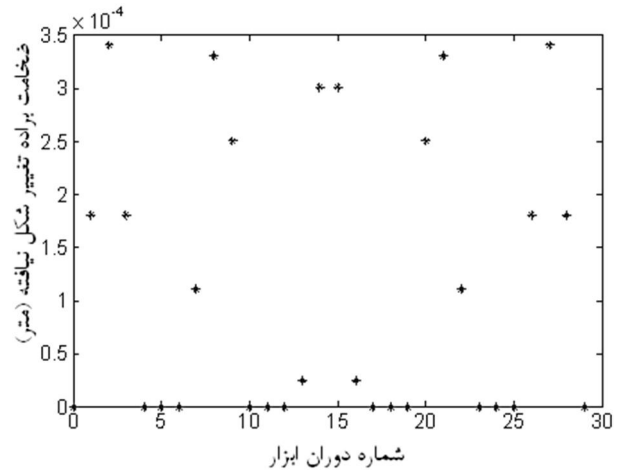
که  $N$  بر حسب rpm است. با جاگذاری رابطه 14 در رابطه 12 می‌توان رابطه (15) را نوشت:

$$F_{t,v} = [D + C \cos \omega t] \sin \left( \frac{N\pi t}{30} \right) \quad (15)$$

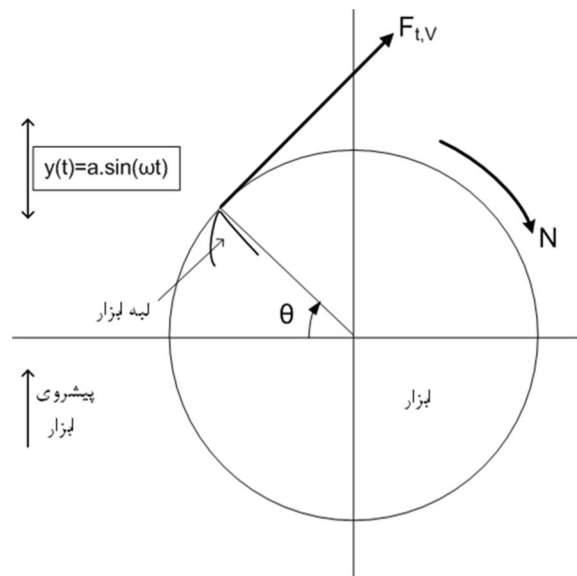
با توجه به اینکه  $\omega$  در فرزکاری آلتراسونیکی خیلی بزرگتر از  $\frac{N\pi}{30}$  است، می‌توان نتیجه گرفت که شکل کلی نیرو در فرزکاری آلتراسونیکی همانند فرزکاری معمولی از یک رابطه سینوسی پیروی می‌کند با این تفاوت که ضریب این نمودار سینوسی، تابعی از زمان و متغیر است.

شکل 4 نیروی برش مماسی در اولین نیم دور گردش ابزار برای فرآیندهای فرزکاری معمولی و فرزکاری آلتراسونیکی را نشان می‌دهد و به کمک روابط 11 و 13 رسم شده است. پارامترهای ثابت بکار رفته در رسم نمودارها عبارتند از: قطر ابزار  $D=10$ mm، تعداد دندان  $Z=4$ ، پیشروی به ازای هر دندان  $N/mm^2$ ، عمق برش محوری  $a_a=0/3$  mm، ثابت برشی  $K_t=5000$ ، سرعت اسپیندل  $N=2500$  rpm، دامنه ارتعاش  $a=20$   $\mu$ m و فرکانس ارتعاش  $f=23$  kHz. مقدار  $K_t$  از آزمایش‌های تجربی تعیین شده است.

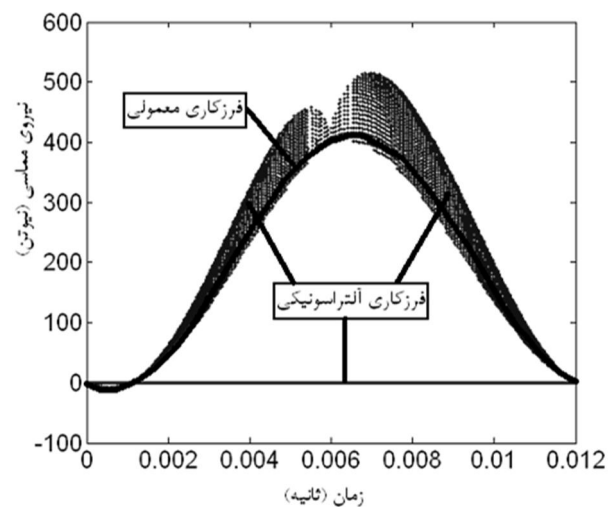
نیروی در فرزکاری معمولی از یک رابطه سینوسی با دامنه ثابت پیروی می‌کند ولی در فرزکاری آلتراسونیکی به صورت رابطه سینوسی با دامنه متغیر با زمان و مکان است. مقادیر بیشینه نیروی برشی مماسی فرزکاری آلتراسونیکی در هر سیکل ارتعاشی بزرگتر از نیروی برش مماسی فرزکاری معمولی در زمان متناظر با آن سیکل است. دلیل نشان دادن نیرو در فرزکاری آلتراسونیکی به صورت چند قسمت جداگانه در شکل 4 آن است که در هر سیکل ارتعاشی وقتی ابزار و قطعه کار با یکدیگر درگیر باشند، نیروی برشی وجود دارد و وقتی از هم جدا می‌شوند، نیرو به صورت تئوری صفر فرض می‌شود.



شکل 2 ضخامت براده تغییر شکل نیافته در موقعیت زاویه‌ای  $\theta=30$  در 30 دور گردش متوالی ابزار با شرایط  $f=21732$  Hz و  $a=5$   $\mu$ m،  $N=500$ rpm



شکل 3 نیروی مماسی وارد بر تیغ فرز انگشتی



شکل 4 نیروی برشی مماسی در فرزکاری معمولی و آلتراسونیکی با پارامترهای  $N=2500$  rpm،  $K_t=5000$  N/mm<sup>2</sup>،  $a_a=0.4$  mm،  $a_{tz}=0.2$  mm/tooth،  $Z=4$ ،  $D=10$  mm  $f=23$  kHz و  $a=20$   $\mu$ m

$$F_{t,v} = K_t a_a a_{tz} \sin \theta + BK_t a_a \sin \theta \cos \omega t \quad (10)$$

انگشتی از جنس فولاد تندبر با قطر 10 mm و دارای چهار دندانه برشی است. سایر تجهیزات بکار رفته در آزمایش ها عبارتند از: ژنراتور آلتراسونیک با توان 2kW، دینامومتر کیستلر مدل 9255B، سنسور القایی اندازه گیری فاصله مدل PU-09 جهت اندازه گیری دامنه ارتعاش و یک اسپیلوسکوپ جهت مشاهده خروجی سنسور. آزمایش ها بدون وجود روانکار و در حالت فرزکاری موافق انجام شده اند و عمق برش محوری در آنها  $a_p=5$  mm بوده است.

فرآیند کنارتراشی روی قطعه کار از جنس فولاد ضد زنگ مارتنزیتی 420 به صورتی انجام شده است که جهت پیشروی میز ماشین فرز همراستا با جهت ارتعاش طولی یک بُعدی قطعه کار باشد. فولاد ضد زنگ 420 در مواردی استفاده می شود که ترکیبی از مقاومت به خوردگی و استحکام بالا مورد نیاز است نظیر پرده های توربین و لوازم جراحی. این فولاد در شرایط آبیل شده به راحتی ماشینکاری می شود اما اگر تا بالای 30HRC سخت کاری گردد، ماشینکاری آن بسیار سخت می شود. در فرزکاری معمولی فولادهای ضدزنگ، ماشین ابزار باید استحکام و توان کافی داشته باشد، لبه برشی باید همواره تیز نگه داشته شود و خنک کارها و روانکارهای مناسب باید ابزار و قطعه کار را کاملاً در بر بگیرد. برای بهبود شرایط ماشینکاری فولادهای ضد زنگ نظیر فولاد 420، استفاده از ارتعاش آلتراسونیک همراه با براده برداری می تواند یکی از تکنیک های مؤثر باشد. روی سطح جانبی قطعه کار شیاری ایجاد شده است (شکل 6). ابتدا برش به صورت ارتعاشی انجام می شود و سپس در وسط شیار با خاموش شدن ژنراتور آلتراسونیک، برش به صورت فرزکاری معمولی ادامه می یابد. برای راستی آزمایشی مدل سازی تحلیلی، سه آزمایش مختلف انجام شده است که پارامترهای برشی مربوط به آنها در جدول 1 آمده است.

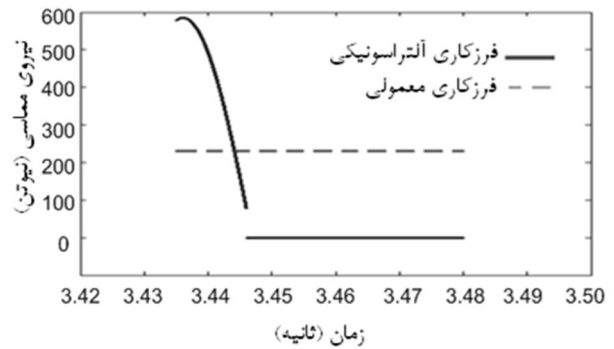
شکل 7 مؤلفه های عمودی ( $F_x$ ) و پیشروی ( $F_y$ ) نیروی برش اندازه گیری شده توسط دینامومتر در آزمایش شماره 2 را نشان می دهد. طول زمان انجام آزمایش 80 ثانیه است و نمودارها از قسمت های مختلفی به این شرح تشکیل شده است: A: روشن شدن دینامومتر، B: روشن شدن ترانسدیوسر آلتراسونیک، C: روشن شدن اسپیندل دستگاه فرز، D: برش در حالت فرزکاری آلتراسونیک، E: خارج شدن از برش در حالیکه هنوز ترانسدیوسر روشن است، F: خاموش شدن ترانسدیوسر، G: برش در حالت فرزکاری معمولی، H: خروج از برش در حالیکه اسپیندل روشن است، I: خاموش شدن اسپیندل. بیشتر بودن مقادیر بیشینه نیروی برشی در فرزکاری آلتراسونیک نسبت به فرزکاری معمولی که در شکل های 4 و 5 به صورت تحلیلی دیده می شد، در شکل 7 و از نتایج تجربی نیز قابل مشاهده است.

#### 4- راستی آزمایشی روابط تحلیلی و بحث

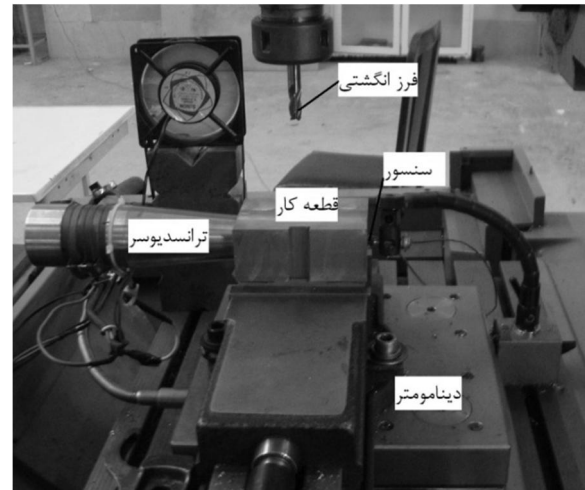
محاسبه تحلیلی نیروی برش مماسی در فرزکاری معمولی با رابطه 11 و در فرزکاری به کمک آلتراسونیک با رابطه 13 انجام می شود. چون داده های تجربی نیروی برشی مربوط به مقادیر نیرو در جهت های X و Y هستند، برای مقایسه داده های تحلیلی و تجربی باید ابتدا مقادیر تحلیلی نیروی برشی در جهت های X و Y را به دست آورد.

جدول 1 پارامترهای برشی در آزمایش های تجربی انجام شده در فرزکاری معمولی و آلتراسونیک

شماره آزمایش	سرعت اسپیندل (rpm)	پیشروی به ازای هر دندانه (mm/tooth)	عمق برش شعاعی (mm)
1	500	0/1	0/3
2	800	0/1	0/9
3	1250	0/2	0/6



شکل 5 نیروی برش مماسی در سیکل ارتعاشی شماره 80 با پارامترهای شکل 4



شکل 6 تنظیم تجربی برای آزمایش های فرزکاری معمولی و آلتراسونیک

برای مشاهده بهتر این موضوع، شکل 5 نیروی برش مماسی در یک سیکل ارتعاشی را نشان می دهد که مربوط به سیکل شماره 80 است. با توجه به فرکانس ارتعاش  $f=23$  kHz، زمان هر سیکل ارتعاش قطعه کار  $s^{-5}$   $T=4/348 \times 10$  است.

در شکل 4، میانگین نیروی برش مماسی در فرزکاری آلتراسونیک، 77/9 نیوتن و در فرزکاری معمولی، 191/0 نیوتن است. نکته ای که باید به آن توجه شود آن است که در فرزکاری آلتراسونیک متوسط نیروی برش مماسی نسبت به فرزکاری معمولی کاهش می یابد ولی مقادیر بیشینه نیرو در آن بزرگتر از فرزکاری معمولی است که خود می تواند مشکلاتی برای عمر ابزار و کیفیت سطح بوجود آورد. به کمک رابطه 13 می توان پارامترهای برشی و ارتعاشی را به گونه ای انتخاب نمود که مقادیر بیشینه نیرو در فرزکاری آلتراسونیک کمتر از مقدار بحرانی باشند.

#### 3- آزمون تجربی

آزمایش های فرزکاری ارتعاشی و معمولی روی یک ماشین فرز 2/5 محوره با کنترل عددی ساخت شرکت دکل انجام شده است. یک ترانسدیوسر آلتراسونیک که با یک پیچ دو سر رزوه به قطعه کار متصل شده است، قطعه کار را با فرکانس  $f=23$  kHz و دامنه بیشینه  $a=20$   $\mu$ m به ارتعاش در می آورد. شکل 6 تنظیم تجربی استفاده شده را نشان می دهد.

طراحی ابعاد قطعه کار به کمک آنالیز المان محدود به گونه ای انجام شده است که در دو انتهای آن، شکم ارتعاشی و در وسط آن، گره ارتعاشی وجود دارد. قطعه کار در محل گره ارتعاشی با دو پیچ و دو پین به یک قطعه فولادی متصل و این قطعه فولادی داخل گیره ماشین فرز محکم شده است. ابزار فرز



در هر موقعیت زاویه‌ای  $\theta$  از درگیری ابزار و قطعه کار شکل 3، برای به دست آوردن مؤلفه‌های  $F_x$  (عمودی) و  $F_y$  (پیشروی) از مؤلفه‌های  $F_t$  (مماسی) و  $F_r$  (شعاعی)، می‌توان از رابطه (16) استفاده نمود:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_r & F_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta & \cos \theta \\ -\cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \quad (16)$$

مؤلفه  $F_r$  با تقریب مناسبی از رابطه (17):

$$F_r = 0.3F_t \quad (17)$$

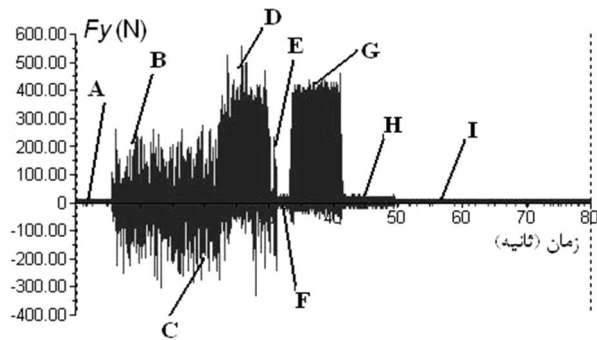
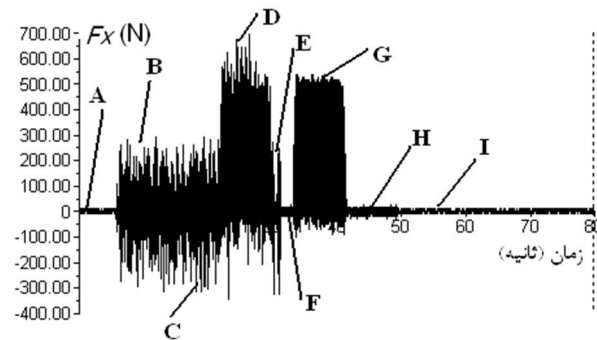
قابل محاسبه است [19]. به کمک روابط 16 و 17، می‌توان نمودارهای تحلیلی مؤلفه‌های نیروی برشی  $F_x$  و  $F_y$  را در هر دو فرآیند فرزکاری معمولی و آلتراسونیک رسم نمود. شکل 8 مؤلفه عمودی نیروی برشی ( $F_x$ ) تجربی و تحلیلی در هر دو فرآیند را در آزمایش شماره 1 نشان می‌دهد. ابزار برشی در همه آزمایش‌ها دارای چهار دندان است و همه شکل‌های این قسمت برای رُبع دوران ابزار برشی یعنی در حالتی که یک دندان از ابزار برشی براده برداری را انجام می‌دهد، رسم شده‌اند. در همه شکل‌های این مقاله، نیروی تجربی در فرزکاری معمولی با مربع و نیروی تجربی در فرزکاری آلتراسونیک با ستاره نشان داده شده است. مشابه نمودارهای موجود در شکل 4، نیروی برشی تحلیلی در فرزکاری معمولی با یک نمودار سینوسی و نیروی برشی تحلیلی در فرزکاری آلتراسونیک با یک نمودار دارای قسمت‌های مختلف نشان داده شده است. شکل 8 نشان می‌دهد که مقادیر مؤلفه عمودی نیروی برشی ( $F_x$ ) تجربی و تحلیلی در آزمایش شماره 1 در فرزکاری معمولی تطابق بسیار خوبی با یکدیگر دارد.

چون قطعه کار با فرکانس تقریبی  $f \approx 23\text{kHz}$  ارتعاش می‌کند، برای آنکه بتوان رفتار واقعی نیروی برشی را مشاهده کرد، دینامومتر باید توانایی اندازه‌گیری تغییرات نیرو در هر سیکل ارتعاشی را داشته باشد و در هر ثانیه حداقل 46000 بار نیرو را اندازه بگیرد (قضیه نایکوئیست). سیستم‌های مکانیکی موجود، قابلیت این پاسخ فرکانسی بسیار بالا را ندارند. به دلیل وجود این محدودیت، مقادیر متوسط نیروی  $F_x$  تجربی و تحلیلی در فرزکاری آلتراسونیک مقایسه می‌شوند. در جدول 2، مقادیر متوسط  $F_x$  تجربی و تحلیلی در فرزکاری معمولی و آلتراسونیک و مقادیر خطای مرتبط با آن‌ها در سه آزمایش بررسی شده، ذکر گردیده است. در آزمایش شماره 1، میزان خطای متوسط نیروی برشی عمودی ( $F_x$ ) تحلیلی در فرزکاری معمولی و آلتراسونیک به ترتیب 10% و 16% است.

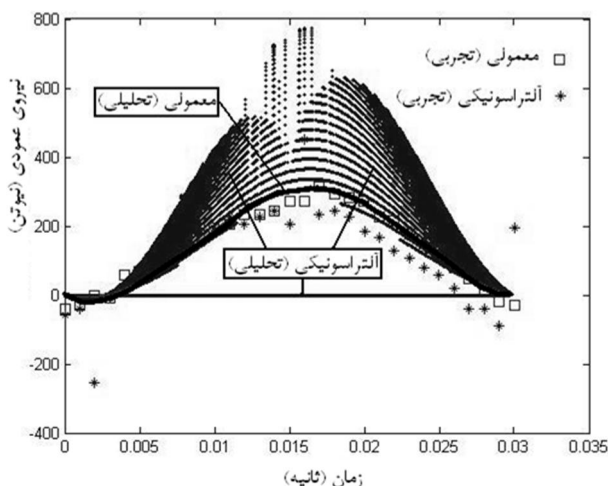
شکل 9 مؤلفه نیروی برشی در جهت پیشروی ( $F_y$ ) در هر دو فرآیند فرزکاری معمولی و آلتراسونیک که با روش‌های تجربی و تحلیلی به دست آمده است را در آزمایش شماره 1 نشان می‌دهد.

در آزمایش شماره 1 و در دو آزمایش دیگری که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرند، مشاهده می‌شود که محاسبه مؤلفه  $F_y$  نسبت به مؤلفه  $F_x$  دارای دقت کمتری است. دلیل این مسئله به تبدیل ذکر شده در رابطه 16 برمی‌گردد که باعث می‌شود مقادیر  $F_y$  تحلیلی در قسمت‌هایی منفی بشوند. مقادیر متوسط  $F_y$  در روش‌های تجربی و تحلیلی در هر دو فرآیند فرزکاری معمولی و آلتراسونیک در جدول 2 ذکر شده است. در آزمایش شماره 1، میزان خطای متوسط نیروی برشی تحلیلی در جهت پیشروی ( $F_y$ ) در فرزکاری معمولی و آلتراسونیک به ترتیب 26% و 19% است.

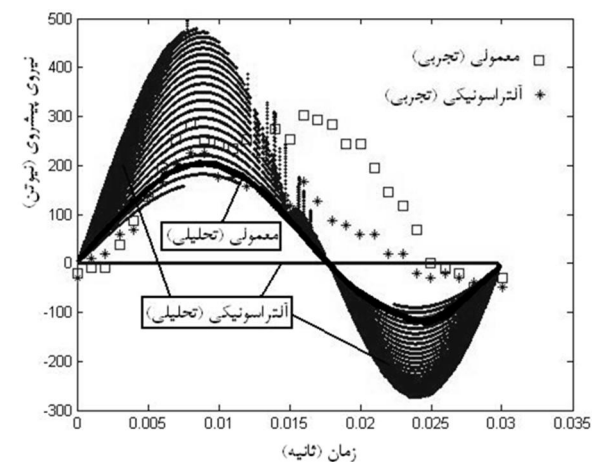
شکل‌های 10 و 11 به ترتیب مؤلفه‌های  $F_x$  و  $F_y$  نیروی برشی تجربی و تحلیلی در فرزکاری معمولی و آلتراسونیک را در آزمایش شماره 2 نشان می‌دهد. برای مقایسه مقادیر متوسط مؤلفه‌های  $F_x$  و  $F_y$  در روش‌های تجربی و تحلیلی باید به جدول 2 مراجعه نمود. مشابه روند انجام شده برای آزمایش‌های 1 و 2 می‌توان نمودارهای مربوط به آزمایش شماره 3 را نیز ذکر نمود؛ اما به دلیل رعایت اختصار، فقط نتایج مربوط به آن در جدول 2 ذکر شده است.



شکل 7 نیروهای  $F_x$  و  $F_y$  اندازه‌گیری شده توسط دینامومتر در آزمایش شماره 2



شکل 8 مؤلفه عمودی نیروی برشی ( $F_x$ ) تجربی و تحلیلی در فرزکاری معمولی و آلتراسونیک در آزمایش شماره 1



شکل 9 مؤلفه نیروی برشی در جهت پیشروی ( $F_y$ ) تجربی و تحلیلی در فرزکاری معمولی و آلتراسونیک در آزمایش شماره 1

درک مکانیزم برش ناپیوسته حاصل از اعمال ارتعاش آلتراسونیک در فرآیند فرزکاری آلتراسونیک با استفاده از روابط ساده تر، محقق گردد. با اجتناب از پیچیده شدن روابط و نیاز به محاسبه ثابت های برشی متعدد، نمودارهایی نظیر شکل های 4 و 5 رسم شده اند که می توانند دلیل کاهش متوسط و افزایش مقادیر بیشینه نیروی برشی در فرزکاری به کمک ارتعاش آلتراسونیک را شرح دهند. یکی دیگر از منابع خطا، اندازه گیری دامنه ارتعاش در حالت آزاد است. اگر در تحقیقات آینده بتوان دامنه ارتعاش قطعه کار را در حین براده برداری اندازه گیری کرد، میزان خطا کاهش خواهد یافت.

همان گونه که در نتایج تجربی مشاهده می شود، بیشینه نیروی برشی در فرزکاری به کمک آلتراسونیک بیشتر و میانگین نیروی برشی در آن کمتر از فرزکاری معمولی است. این روند در سایر آزمایش های تجربی با پارامترهای برشی متفاوت و مقادیر دامنه ارتعاش مختلف نیز دیده شده است [21، 2]. افزایش بیشینه نیروی برشی در فرزکاری آلتراسونیک به دلیل وجود ضربه های جانبی متوالی بین ابزار و قطعه کار و به عبارت دیگر، اثر ارتعاشی - ضربه ای در این فرآیند است که باعث اعمال نیروی ضربه ای به ابزار برشی می گردد. کاهش میانگین نیروی برشی در فرآیندهای ماشینکاری ارتعاشی به دو دلیل اصلی نسبت داده شده است: تغییر رفتار اصطکاک در فرآیندهای ارتعاشی [22] که معمولاً بدون ارائه دلایل تجربی و تحلیلی است و جدایش ابزار و قطعه کار از یکدیگر [23] که به عنوان دلیل اصلی کاهش نیروی مطرح شده است. اخیراً جمشیدی و ناطق [24] با بررسی تئوری و تجربی رفتار اصطکاک در تراشکاری به کمک آلتراسونیک نشان دادند که مقدار ضربه اصطکاک در تراشکاری آلتراسونیک بزرگتر از تراشکاری معمولی است.

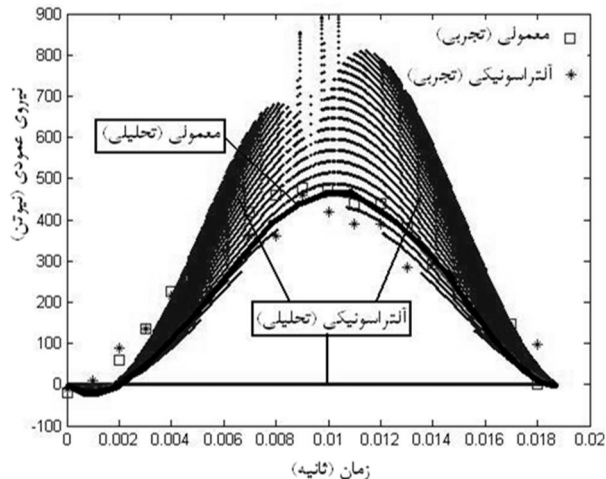
در فرزکاری به کمک آلتراسونیک، در زمان های جدایش ابزار و قطعه کار از یکدیگر، نیروی برشی به ابزار وارد نمی شود و میانگین نیروی برشی کاهش می یابد. علاوه بر این، پدیده نرم شدن آکوستیکی نیز می تواند روی کاهش میانگین نیروی برشی مؤثر باشد. در نرم شدن آکوستیکی که اثر پلاستیسیته آکوستیک نیز نامیده می شود، اعمال ارتعاش به ماده، تنش لازم برای تغییر شکل پلاستیک آن را کاهش می دهد. کلی و دیگران [25] بیان کردند که اثر نرم شدن آکوستیک، تنش تسلیم آلیاژ آلومینیم 1100-0 Al را تقریباً 86% کاهش می دهد و میزان تأثیر نرم شدن آکوستیک بیشتر از نرم شدن حرارتی است. آنها دلیل نرم شدن آکوستیکی را جذب انرژی آکوستیک در نایجایی های ماده دانستند که باعث می شود ماده بسیار آسان تر تسلیم شود.

### 5- نتیجه گیری

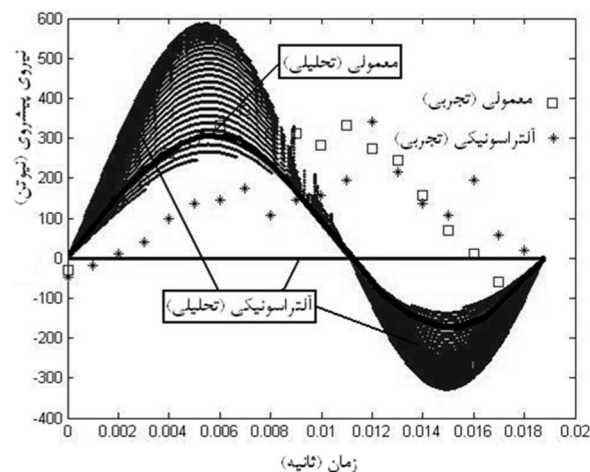
محاسبه تحلیلی ضخامت براده تغییر شکل نیافته و نیروی برشی در فرآیند فرزکاری به کمک آلتراسونیک و سپس مقایسه با نتایج تجربی، برای نخستین بار در این مقاله انجام شده است. روابط تحلیلی نشان می دهند که هر چند بیشینه نیروی برشی در فرزکاری آلتراسونیک بزرگتر از فرزکاری معمولی است ولی میانگین نیروی برشی در فرزکاری آلتراسونیک به دلیل صفر شدن نیروی برشی در هنگام جدایش ابزار و قطعه کار از یکدیگر، کمتر از فرزکاری معمولی است.

جدول 2 مقادیر متوسط مؤلفه های  $F_x$  و  $F_y$  نیروی برشی تجربی و تحلیلی در فرزکاری معمولی و آلتراسونیک بر حسب نیوتن و میزان خطا در پیش بینی مقادیر واقعی

شماره آزمایش	تجربی				تحلیلی				خطا (%)	
	فرزکاری آلتراسونیک		فرزکاری معمولی		فرزکاری آلتراسونیک		فرزکاری معمولی		$F_y$	$F_x$
	$F_y$	$F_x$	$F_y$	$F_x$	$F_y$	$F_x$	$F_y$	$F_x$		
1	139/9	168/5	73/0	107/9	104/1	151/0	86/8	91/1	19	-16
2	194/1	292/5	145/2	256/4	154/7	225/4	98/3	121/4	-33	-53
3	185/8	279/3	182/6	261/7	207/7	299/6	75/9	95/3	-58	-64



شکل 10 مؤلفه عمودی نیروی برشی ( $F_y$ ) تجربی و تحلیلی در فرزکاری معمولی و آلتراسونیک در آزمایش شماره 2



شکل 11 مؤلفه نیروی برشی در جهت پیشروی ( $F_y$ ) تجربی و تحلیلی در فرزکاری معمولی و آلتراسونیک در آزمایش شماره 2

به طور کلی در این سه آزمایش، روابط تحلیلی در فرزکاری معمولی به طور متوسط 16% و در فرزکاری آلتراسونیک به طور متوسط 40% خطا دارند. بررسی مقادیر خطا در جدول 2 نشان می دهد که مدل تحلیلی ارائه شده، با دقت قابل قبولی مقادیر متوسط مؤلفه های  $F_x$  و  $F_y$  را پیش بینی می کنند.

ذکر این نکته در اینجا ضروری است که یکی از منابع مهم خطا در روابط تحلیلی مربوط به نیروی برشی در فرزکاری آلتراسونیک، استفاده از شکل ساده فرمول نیروی برشی در رابطه 9 است که نیروی برشی را به صورت خطی به سطح مقطع براده تغییر شکل نیافته مرتبط می کند در حالی که امروزه فرمول های پیچیده تر و دقیق تری برای نیروی برشی در فرزکاری وجود دارد [20]. دلیل استفاده از شکل ساده فرمول نیروی برشی در این مقاله آن است که هدف اصلی نوشتن روابط تحلیلی در این تحقیق، یعنی کمک به

- [10] T. Tawakoli, B. Azarhoushang, Influence of ultrasonic vibrations on dry grinding of soft steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, pp. 1585-1591, 2008.
- [11] G. L. Chern, Y. C. Chang, Using two-dimensional vibration cutting for micro-milling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, pp. 659-666, 2006.
- [12] C. Y. Hsu, C. K. Huang, C. Y. Wu, Milling of MAR-M247 nickel-based superalloy with high temperature and ultrasonic aiding, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 34, pp. 857-866, 2007.
- [13] H. Ding, S. J. Chen, K. Cheng, Two-dimensional vibration-assisted micro end milling: cutting force modeling and machining process dynamics, *Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture*, Vol. 224, No. 12, pp. 1775-1783, 2010.
- [14] X. H. Shen, J. H. Zhang, H. Li, J. J. Wang, X. C. Wang, Ultrasonic vibration-assisted milling of aluminum alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 63, No. 1-4, pp. 41-49, 2012.
- [15] Y. Altintas, *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics: Machine Tool Vibrations and CNC Design*, Cambridge, Cambridge University Press, 2000.
- [16] M. R. Razfar, *Fundamentals of Machining and Cutting Tools*, pp. 29-30, Tehran: Amirkabir Press, 2001. (In Persian)
- [17] G. Boothroyd, K. A. Knight, *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, 2nd Ed., Marcel Dekker Inc., 1989.
- [18] H. Pérez, A. Vizán, J. C. Hernandez, M. Guzmán, Estimation of cutting forces in micromilling through the determination of specific cutting pressures, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 190, pp. 18-22, 2007.
- [19] T. Schmitz, J. Ziegert, Examination of Surface Location Error due to Phasing of Cutter Vibrations, *Precision Engineering*, Vol. 23, No. 1, pp. 51-62, 1999.
- [20] M. C. Yoon, Y. G. Kim, Cutting dynamic force modeling of endmilling operation, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 155-156, pp. 1383-1389, 2004.
- [21] M. M. Abootorabi Zarchi, M. R. Razfar, A. Abdullah, Influence of ultrasonic vibrations on side milling of AISI 420 stainless steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, No. 1-4, pp. 83-89, 2013.
- [22] C. L. Chou, *Wave effects of ultrasonic vibration on machining*, PhD Thesis, The Pennsylvania University, 1994.
- [23] C. Nath, M. Rahman, Effect of machining parameters in ultrasonic vibration cutting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, pp. 965-974, 2008.
- [24] H. Jamshidi, M. J. Nategh, Theoretical and experimental investigation of the frictional behavior of the tool-chip interface in ultrasonic-vibration assisted turning, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 65, pp. 1-7, 2013.
- [25] G. S. Kelly, S. G. Advani, J. W. Gillespie, *Thermo-mechanical modeling of acoustic softening during ultrasonic consolidation of thin aluminum foils*, University of Delaware, Center for Composite Materials, Department of Mechanical Engineering, 2012.

آزمایش‌های تجربی روی فولاد ضد زنگ 420 انجام شد و میانگین نیروی برشی در فرزکاری معمولی و آلتراسونیک با یکدیگر مقایسه گردید. بزرگتر بودن بیشینه نیروی برشی در فرزکاری آلتراسونیک و کاهش میانگین نیروی برشی در آن نسبت به فرزکاری معمولی، در نتایج تجربی نیز مشاهده می‌شود. روابط تحلیلی در پیش‌بینی میانگین نیروی برشی در فرزکاری معمولی به طور متوسط 16% و در فرزکاری آلتراسونیک به طور متوسط 40% خطا دارند. با توجه به اینکه مدل‌سازی تحلیلی ضخامت براده تغییر شکل نیافته و نیروی برشی در فرزکاری به کمک ارتعاش آلتراسونیک و همچنین مقایسه نیروهای تجربی با نیروهای مدل‌سازی شده، برای نخستین بار در این مقاله انجام شده است، می‌توان دقت روابط ارائه شده را قابل قبول دانست. استفاده از روابط دقیق‌تر و پیچیده‌تر برای نیروی برشی و اندازه‌گیری دامنه ارتعاش قطعه‌کار در حین براده‌برداری می‌تواند میزان خطا را کاهش دهد.

## 6- مراجع

- [1] M. J. Nategh, S. Amini, H. Soleimanimehr, Modeling the Force, Surface Roughness and Cutting Temperature in Ultrasonic Vibration-Assisted Turning of Al7075, *Advanced Materials Research*, Vol. 83-86, pp. 315-325, 2010.
- [2] M. M. Abootorabi Zarchi, M. R. Razfar, A. Abdullah, Investigation of the effect of cutting speed and vibration amplitude on cutting forces in ultrasonic-assisted milling, *Proc IMechE, Part B: J Engineering Manufacture*, Vol. 226, No. 7, pp. 1185-1191, 2012.
- [3] J. Pujana, A. Rivero, A. Celaya, L. N. Lopez de Lacalle, Analysis of ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, pp. 500-508, 2009.
- [4] Z. Liang, X. Wang, Y. Wu, L. Xie, Z. Liu, W. Zhao, An investigation on wear mechanism of resin-bonded diamond wheel in Elliptical Ultrasonic Assisted Grinding (EUAG) of monocrystal sapphire, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, pp. 868-876, 2012.
- [5] B. Azarhoushang, J. Akbari, Ultrasonic-assisted drilling of Inconel 738-LC, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, pp. 1027-1033, 2007.
- [6] M. Zhou, Y. Eow, B. Ngoi, E. Lim, Vibration-assisted precision machining of steel with PCD tools, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 18, pp. 825-834, 2003.
- [7] S. Amini, M. J. Nategh, One directional and elliptical ultrasonic vibration assisted cutting of IN738, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp. 117-123, 2012. (In Persian)
- [8] V. I. Babitsky, A. V. Mitrofanov, V. V. Silberschmidt, Ultrasonically-assisted turning of aviation materials: simulations and experimental Study, *Ultrasonics*, Vol. 42, pp. 81-86, 2004.
- [9] R. Neugebauer, A. Stoll, Ultrasonic application in drilling, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 149, pp. 633-639, 2004.