

## بررسی نیروی ماشینکاری در فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاش اولتراسونیک بر روی قطعه کار AI7075

سعید امینی<sup>۱</sup>، محمد جواد ناطق<sup>۲</sup> و امیر عبدالله<sup>۳</sup>  
amini@iaun.ac.ir

پذیرش مقاله: ۸۹/۰۵/۲۵

دریافت مقاله: ۸۹/۰۳/۱۵

### چکیده

در این مقاله به بررسی فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاش اولتراسونیک پرداخته می شود. این روش تراشکاری از جمله روش‌های پیشرفته است که باعث بهبود توانایی ماشینکاری مواد می‌شود. ابزار ارتعاشی تحت مود طولی با دامنه ارتعاش ۱۰ میکرون و فرکانس ۲۰ کیلوهرتز ساخته شده است بطوریکه ارتعاش در جهت سرعت برشی اعمال گردد. آزمایشی که بر روی آلومینیوم (AL7075) انجام گرفته منجر به کاهش نیروی ماشینکاری در فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاش اولتراسونیک نسبت به فرآیند تراشکاری سنتی گردیده است. همچنین آزمایشاتی به هدف مطالعه پارامترهای موثر بر فرآیند ماشینکاری با قطعه کار از جنس AI7075 انجام شد. این پارامترها شامل سرعت برشی، نرخ پیشروی، عمق برش و دامنه ارتعاش می‌باشد. تحلیل آماری بر روی نتایج آزمایش انجام و مدل‌های ریاضی مختلف برای پیش‌بینی نیروی ماشینکاری و بهینه‌سازی پارامترهای ماشینکاری برای دستیابی به حداقل نیروی ماشینکاری ارائه می‌گردد. جهت انجام آزمایش‌ها از روش Full Factorial استفاده شده است. در نهایت مقایسه نیروی ماشینکاری در دو فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاش اولتراسونیک و تراشکاری سنتی انجام گرفته است.

### کلید واژه:

ارتعاش اولتراسونیک - تراشکاری AI7075 - نیروی ماشینکاری - تحلیل آماری

۱- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

## ۱- مقدمه

و هورن به ابزار اعمال گردید. ابزار ارتعاشی تحت مود طولی طراحی و ساخته شده است بطوریکه ارتعاش در جهت سرعت برشی اعمال گردد. آزمایش‌هایی بر روی جنس آلومینیوم (AL7075) انجام شد و تاثیر تغییر پارامترهای ماشینکاری بر نیروی ماشینکاری در تراشکاری به کمک ارتعاش اولتراسونیک بدست آمده و با فرآیند تراشکاری سنتی مقایسه گردید.

## ۲- طراحی و آماده‌سازی فرآیند

ابزار ارتعاشی با طراحی مود ارتعاش طولی طراحی و ساخته شده است. با طراحی ابزار ارتعاشی توسط نرم‌افزار Ansys و تحلیل مودال و بدست آوردن بهترین شرایط مود طولی در فرکانس مورد نظر ابعاد و هندسه ابزار ارتعاشی بدست می‌آید. [9]

شکل (۱) ابزار ارتعاشی به همراه کله‌گی اولتراسونیک و سیستم کنترل آن را نشان می‌دهد. این ابزار دارای فرکانس ارتعاشی 20KHz و دامنه  $0 - 20 \mu m (p - p)$  می‌باشد. سیستم کنترل شامل یک ژنراتور می‌باشد. با کنترل ژنراتور یک مود ارتعاشی طولی در کله‌گی اولتراسونیک تحت کنترل قرار می‌گیرد و شکل ارتعاش مورد نظر به‌صورت خطی حاصل می‌گردد.



شکل (۱): ابزار ارتعاشی و ژنراتور اولتراسونیک

تجهیزات لازم جهت انجام آزمایش‌ها عبارتست از:

- دستگاه تراش (مدل TN50D ماشین‌سازی تبریز) جهت انجام آزمایش‌های فرآیندهای UAT و CT.
- ابزار ارتعاشی که قابلیت اعمال ارتعاش طولی و در جهت سرعت برشی را دارد، این ابزار دارای فرکانس ارتعاشی ۲۰ KHz و دامنه  $0 - 20 \mu m (p - p)$  می‌باشد.
- دینامومتر با تحمل نیرویی 5000 N ساخت شرکت Kistler
- اینسرت تراشکاری شامل اینسرت کاربیدی لوزی با طول ضلع ۱۱ میلی‌متر
- قطعه کار: آلومینیوم 7075

فرآیند برش به کمک ارتعاشات اولتراسونیک (Ultrasonic assisted turning-UAT) روشی جدید جهت ماشینکاری می‌باشد در این روش به ابزار برشی حین عملیات ماشینکاری، ارتعاشی تحت فرکانس و دامنه ثابت اعمال می‌گردد. فرآیند UAT نسبت به فرآیند تراشکاری سنتی (Conventional cutting-CT) مزیت‌های زیادی دارد که در تحقیقات مختلف به آن پرداخته شده است.

مطالعه این فرآیند توسط kumabe شروع شد [1] او نشان داد که نیروی برشی پالسی مزیت‌های زیادی از جمله کاهش نیروی برشی، جابجایی گرمای برشی و افزایش عمر ابزار را به دنبال دارد [2-4] او و همکارانش علاوه بر انجام عملیات برش به کمک ارتعاش اولتراسونیک برای فلزات مختلف مثل فولاد کربنی، چدن، فولاد ضدزنگ و فولاد سخت شده، عملیات پرداخت نهایی و دنده‌زنی داخلی نیز با این روش انجام دادند.

Shamoto و Moriwaki فرآیند برش ارتعاشی را در دو جهت تحت عنوان ماشینکاری ارتعاشی بیضوی انجام دادند. این نوع فرآیند باعث حرکت ارتعاش بیضوی ابزار می‌شود که ضخامت براده و نیروی برشی را کاهش می‌دهد [5] آنان توسط عمل کننده پیزوالکتریک ابزار تراشکاری را در دو جهت (با فرکانس 19KHz) مرتعش کردند و در تحلیل تئوری و عملی نشان دادند که نیروهای ماشینکاری بسیار کمتر از حالتی است که ارتعاش اولتراسونیک در یک جهت اعمال گردد. Lee, Kao, Trang با نصب یک پیزو الکتریک (به‌عنوان جذب کننده ارتعاشی) بر روی ابزار تراشکاری و انجام آزمایش ارتعاشی بر روی دستگاه تراش، نشان دادند که جذب کننده ارتعاشی هماهنگ (پیزوالکتریک متصل به ابزار) می‌تواند تابع پاسخ فرکانسی ابزار برشی را بهینه کند و بنابر این پایداری ماشینکاری در عملیات تراشکاری بهینه می‌گردد. [6,7]

Babitsky و همکارانش تحلیل غیرخطی به‌صورت Vibro-Impact بر روی فرآیند ماشینکاری به کمک اولتراسونیک انجام دادند [8]. تحت تاثیر ارتعاش با فرکانس بالا، پدیده انتقال الاستوپلاستیک به ویسکوپلاستیک و ایجاد جریان اصطکاک خشک تحقق می‌یابد. آنها نشان دادند که با اعمال مود Vibro-Impact بر قطعه کار تغییرات زیادی بر ویژگی‌های دینامیکی در این فرآیند حاصل می‌شود و پاسخ دامنه غیر خطی ابزار برشی را بدست آوردند.

در این تحقیق به بررسی نیروی ماشینکاری در فرآیند تراشکاری به کمک اولتراسونیک بر روی آلیاژ Al7075 پرداخته می‌شود. ابتدا آماده‌سازی فرآیند ماشینکاری ارتعاشی انجام شد. دامنه ارتعاش ۱۰ میکرون و فرکانس ارتعاش ۲۰ کیلوهرتز توسط دستگاه اولتراسونیک



شکل (۳): اندازه‌گیری دامنه ارتعاش

پس از آماده‌سازی فرآیندها آزمایش‌های اولیه با هدف بررسی تاثیر فرآیندهای UAT و CT بر نیرو با قطعه کار آلومینیوم 7075 اجرا شد. سپس تاثیر تغییر پارامترهای ماشینکاری مثل سرعت برشی و سرعت پیشروی بر نیرو و زبری سطح در فرآیندهای UAT و CT با قطعه کار آلومینیوم 7075 بررسی شد. جدول (۱) پارامترهای ماشینکاری در فرآیندهای UAT و CT را نشان می‌دهد.

جدول (۱): پارامترهای ماشینکاری فرایند UAT و CT

پارامتر	1	2	3
$a(\mu m)$	6	12	.
$d(mm)$	0.4	0.8	1.4
$f_r(mm/rev)$	0.11	0.2	0.4
$v_c(m/min)$	13.56	37.68	75.36

در جدول (۱)،  $a$  دامنه ارتعاش اولتراسونیک ( $\mu m$ ) برای فرآیند UAT و  $d$  عمق برش (mm)،  $f_r$  نرخ پیشروی (mm/rev) و  $v_c$  سرعت برشی (m/min) برای فرآیندهای UAT و CT می‌باشد. مطابق پارامترهای ماشینکاری و روش طراحی آزمایش (Full factorial) تعداد ۲۷ آزمایش برای فرآیند CT و تعداد ۵۴ آزمایش برای فرآیند UAT انجام شد. جدول‌های (۲) و (۳) شرایط اجرای آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

#### ۴- نتایج آزمایش‌ها

##### ۴-۱- نتایج آزمایش اولیه

پس از آماده‌سازی فرآیند، آزمایش اولیه بر روی جنس آلومینیوم (AL7075) انجام پذیرفت و مقایسه نیروی ماشینکاری در فرآیندهای UAT و CT انجام گردید. دامنه ارتعاش اولتراسونیک در این آزمایش  $10 \mu m$  می‌باشد. شکل ۴ نیروهای ماشینکاری بدست آمده از دو فرآیند UAT و CT را نشان می‌دهد. در آزمایش‌های انجام شده برای ایجاد فرآیند UAT کله‌گی اولتراسونیک روشن و برای ایجاد فرآیند CT کله‌گی اولتراسونیک خاموش می‌شود.

#### ۳- انجام آزمایش‌ها

ابزار ارتعاشی و قید و بند لازم جهت اتصال مجموعه فوق به دستگاه تراش، آماده و بر روی دستگاه تراش نصب گردید بطوریکه ابزار در جهت سرعت برشی ارتعاش می‌نماید. شکل ۲ آماده‌سازی فرآیند شامل استراکچر ابزار، ابزار گیر و قید و بند آن به دینامومتر را نشان می‌دهد.



شکل (۲): آماده‌سازی فرایند VC

مطابق شکل (۲) ابتدا هورن به کله‌گی اولتراسونیک متصل می‌شود. سپس ابزار تراشکاری بر سر هورن بسته شده و مجموعه در نقطه گره ارتعاشی گیره‌بندی می‌شود ابزار ماشینکاری حین عمل براده برداری در جهت سرعت برشی می‌تواند ارتعاش انجام دهد. فرکانس ارتعاشی کله‌گی اولتراسونیک ۲۰ KHz و دامنه ارتعاش آن قابل تنظیم تا حد ۲۰ میکرون است. فرکانس ارتعاش در ابزار بایستی کاملاً هماهنگ با فرکانس ارتعاش کله‌گی اولتراسونیک ( $20 \pm 0.5$  KHz) باشد. برای این کار دو ولوم بر روی دستگاه ژنراتور اولتراسونیک قرار دارد که پس از بستن هورن به کله‌گی اولتراسونیک و گیره‌بندی آن در نقطه گره ارتعاشی، با تنظیم دقیق آنها فرکانس مجموعه هماهنگ می‌شود که در این موقع چراغ مربوطه روشن می‌شود.

در فرآیند آماده شده فوق اگر کله‌گی اولتراسونیک روشن شود فرآیند UAT و اگر کله‌گی اولتراسونیک خاموش باشد فرآیند CT می‌باشد. نیروی ماشینکاری توسط دینامومتر اندازه‌گیری می‌شود. ابزار کاربیدی لوزی شکل و گرد متناسب با جنس ماشینکاری از شرکت SECO انتخاب شده است.

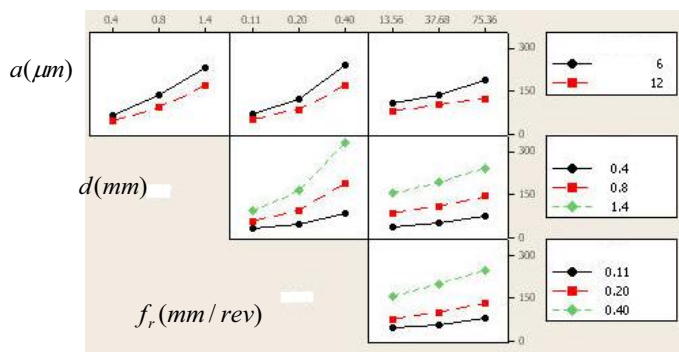
جهت اندازه‌گیری دامنه ارتعاش ابزار ارتعاشی از یک ساعت اندازه‌گیری با رزولوشن ۲ میکرون استفاده شد. (شکل (۳)) ژنراتور کله‌گی اولتراسونیک دارای یک ولوم است که با تغییر ولتاژ دامنه ارتعاش کله‌گی اولتراسونیک را تغییر می‌دهد. محدوده دامنه ارتعاش قابل تنظیم ۰ تا ۲۰ میکرون می‌باشد.

جدول (۲): شرایط اجرایی آزمایش فرآیند CT

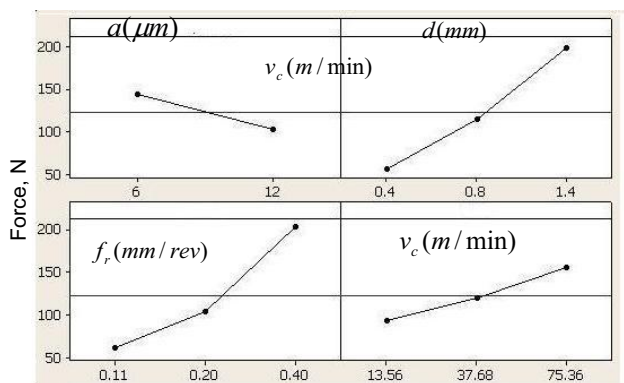
No.	$d(mm)$	$f_r(mm/rev)$	$v_c(m/min)$	No.	$d(mm)$	$f_r(mm/rev)$	$v_c(m/min)$
1	0.4	0.11	13.56	15	0.8	0.2	75.36
2	0.4	0.11	37.68	16	0.8	0.4	13.56
3	0.4	0.11	75.36	17	0.8	0.4	37.68
4	0.4	0.2	13.56	18	0.8	0.4	75.36
5	0.4	0.2	37.68	19	1.4	0.11	13.56
6	0.4	0.2	75.36	20	1.4	0.11	37.68
7	0.4	0.4	13.56	21	1.4	0.11	75.36
8	0.4	0.4	37.68	22	1.4	0.2	13.56
9	0.4	0.4	75.36	23	1.4	0.2	37.68
10	0.8	0.11	13.56	24	1.4	0.2	75.36
11	0.8	0.11	37.68	25	1.4	0.4	13.56
12	0.8	0.11	75.36	26	1.4	0.4	37.68
13	0.8	0.2	13.56	27	1.4	0.4	75.36
14	0.8	0.2	37.68				

جدول (۳): شرایط اجرایی آزمایش فرآیند UAT

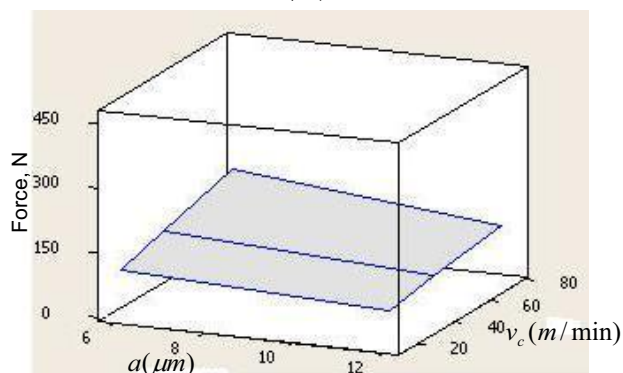
No.	$a(\mu m)$	$d(mm)$	$f_r(mm/rev)$	$v_c(m/min)$	No.	$a(\mu m)$	$d(mm)$	$f_r(mm/rev)$	$v_c(m/min)$
1	6	0.4	0.11	13.56	28	12	0.4	0.11	90
2	6	0.4	0.11	37.68	29	12	0.4	0.11	250
3	6	0.4	0.11	75.36	30	12	0.4	0.11	75.36
4	6	0.4	0.2	13.56	31	12	0.4	0.2	13.56
5	6	0.4	0.2	37.68	32	12	0.4	0.2	37.68
6	6	0.4	0.2	75.36	33	12	0.4	0.2	75.36
7	6	0.4	0.4	13.56	34	12	0.4	0.4	13.56
8	6	0.4	0.4	37.68	35	12	0.4	0.4	37.68
9	6	0.4	0.4	75.36	36	12	0.4	0.4	75.36
10	6	0.6	0.11	13.56	37	12	0.8	0.11	13.56
11	6	0.8	0.11	37.68	38	12	0.8	0.11	37.68
12	6	0.8	0.11	75.36	39	12	0.8	0.11	75.36
13	6	0.8	0.2	13.56	40	12	0.8	0.2	13.56
14	6	0.8	0.2	37.68	41	12	0.8	0.2	37.68
15	6	0.8	0.2	75.36	42	12	0.8	0.2	75.36
16	6	0.8	0.4	13.56	43	12	0.8	0.4	13.56
17	6	0.8	0.4	37.68	44	12	0.8	0.4	37.68
18	6	0.8	0.4	75.36	45	12	0.8	0.4	75.36
19	6	1.4	0.11	13.56	46	12	1.4	0.11	13.56
20	6	1.4	0.11	37.68	47	12	1.4	0.11	37.68
21	6	1.4	0.11	75.36	48	12	1.4	0.11	75.36
22	6	1.4	0.2	13.56	49	12	1.4	0.2	13.56
23	6	1.4	0.2	37.68	50	12	1.4	0.2	37.68
24	6	1.4	0.2	500	51	12	1.4	0.2	75.36
25	6	1.4	0.4	90	52	12	1.4	0.4	13.56
26	6	1.4	0.4	250	53	12	1.4	0.4	37.68
27	6	1.4	0.4	500	54	12	1.4	0.4	75.36



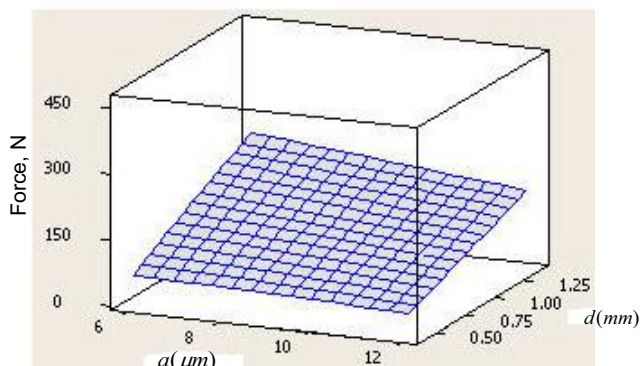
شکل (۵): تاثیر متقابل فاکتورها برای نیروی ماشینکاری



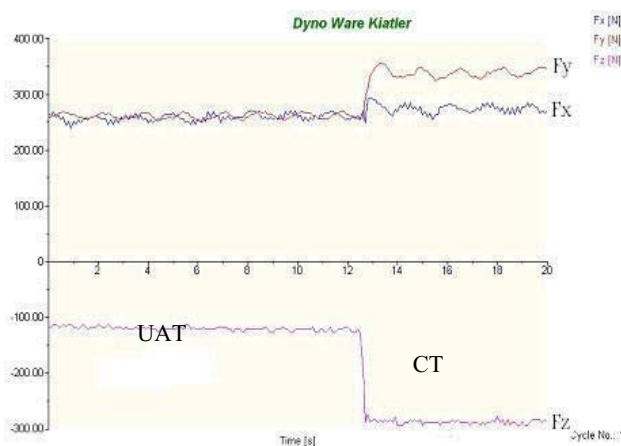
(الف)



(ب)



(ج)



شکل (۴): نیروهای ماشینکاری فرآیند UAT و CT بر روی جنس Al7075  
 $f = 0.18 \text{ mm/rev}$  و  $N = 500 \text{ rpm}$  و  $d = 0.5 \text{ mm}$

در شکل (۴)،  $N$  دوران قطعه کار می‌باشد و در ابتدا فرآیند UAT است و سپس (پس از زمان حدود ۱۲ ثانیه) فرآیند CT می‌باشد. با بررسی شکل (۴) ملاحظه می‌شود که نیروی ماشینکاری در جهت سرعت برشی ( $F_z$ ) در فرآیند UAT کاهش چشمگیری دارد. البته فرآیند UAT بر نیروی محوری ( $F_y$ ) و نیروی شعاعی ( $F_x$ ) نیز تاثیر گذاشته است، ولی به علت اینکه اعمال ارتعاش اولتراسونیک در جهت سرعت برشی می‌باشد، نیروی اصلی در جهت سرعت برشی ( $F_z$ ) بررسی می‌گردد.

#### ۴-۲- نتایج آزمایش‌ها بر روی Al7075

پس از طراحی آزمایش‌ها و انجام آزمایش‌ها مطابق جداول (۲) و (۳) داده‌های آزمایشی شامل نیروی ماشینکاری بدست آمد. جدول (۴) نتایج اندازه‌گیری نیروها در فرآیند UAT را نشان می‌دهد. با توجه به پارامترهای ماشینکاری آزمایش‌های انجام شده (جدول ۳) و نتایج نیرویی بدست آمده (جدول ۴) تحلیل آماری توسط نرم‌افزار Minitab بر روی داده‌ها انجام شد. جدول ۵ آنالیز واریانس نیروی ماشینکاری حاصل از تحلیل را نشان می‌دهد.

مطابق جدول (۵) هرکدام از پارامترهایی که مقدار  $P$  آن کمتر از 0.05 باشد تاثیر بالایی بر خروجی (نیروی ماشینکاری) دارد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که همه پارامترهای ماشینکاری شامل دامنه ارتعاش، عمق برش، نرخ پیشروی و سرعت برشی و تعاملات دوتایی بین آنها بیشترین تاثیر را بر نیروی ماشینکاری دارد.

شکل (۵) تاثیر متقابل فاکتورها برای نیروی ماشینکاری را نشان می‌دهد همچنین تاثیر همزمان فاکتورها بر نیروی ماشینکاری به صورت نمودارهای دو بعدی و سه بعدی در شکل (۶) آمده است.

رابطه (۳)، مدل درجه ۳ نیروی ماشینکاری را نشان می‌دهد:

$$F = -4.6 + 2.85a - 29.1d - 182f_r + 0.653v_c - 5.20d^2 + 98f_r^2 - 0.00227v_c^2 + 0.51a \times d - 1.19a \times f_r - 0.0610a \times v_c + 831d \times f_r + 0.720d \times v_c + 2.37f_r \times v_c - 26.7a \times d \times f_r - 0.0960a \times f_r \times v_c - 0.0250a \times d \times v_c + 1.55d \times f_r \times v_c \quad (3)$$

جدول (۶) مقادیر  $R^2$  و  $R^2_{adj}$  را برای درجه‌های مختلف معادله رگرسیون نشان می‌دهد.

جدول (۶): مقادیر  $R^2$  و  $R^2_{adj}$  برای درجه‌های مختلف رگرسیون

Degree	$R^2$ نیرو	$R^2_{adj}$ نیرو
1	84.1	82.8
2	99.5	99.3
3	99.7	99.6

مطابق جدول (۶)، از آنجاییکه مقدار  $R^2_{adj}$  برای مدل درجه سوم بیشترین مقدار است، مدل درجه سه برای نیروی ماشینکاری بهترین مدل می‌باشد.

#### ۴-۴- بهینه‌سازی پارامترها

برای بهینه‌سازی پارامترها از روش نسبت S/N (Signal to noise ratio) استفاده شده است. نسبت S/N از رابطه (۴) بدست می‌آید.

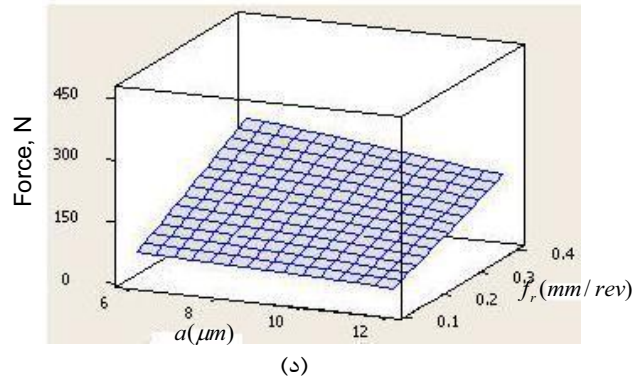
$$\frac{S}{N} = -10 \log_{10} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (4)$$

در رابطه (۴)  $y_i$  مقادیر خروجی (Responses) و  $n$  تعداد تکرارها است. مقدار S/N برای هر مقدار فاکتور بدست می‌آید. مقادیر S/N برای هر مقدار فاکتور بدست می‌آید. مقادیر S/N بیشینه، به‌عنوان مقدار بهینه هر فاکتور تشخیص داده می‌شود. [10] مقادیر S/N برای سطوح هر فاکتور در جدول (۷) آورده شده است.

جدول ۷: مقادیر نسبت S به N فاکتورها برای F

سطح	$a$	$d$	$f_r$	$v_c$
1	-40.76	-33.89	-34.65	-37.04
2	-37.98	-39.75	-38.92	-39.27
3		-44.48	-44.54	-41.80

مطابق جدول (۷)، سطح اول فاکتور سرعت برشی، سطح اول فاکتور نرخ پیشروی، سطح اول فاکتور عمق برش و سطح دوم فاکتور دامنه ارتعاش اولتراسونیک بعنوان مقادیر بهینه فاکتورها برای دستیابی به کمترین نیروی ماشینکاری بشمار می‌روند.



شکل (۶): تاثیر همزمان فاکتورها (الف) تاثیر پارامترهای فرآیند UAT (ب) تاثیر دامنه ارتعاش و سرعت ماشینکاری (ج) تاثیر دامنه ارتعاش و عمق برش بر نیروی ماشینکاری (د) تاثیر دامنه ارتعاش و سرعت پیشروی بر نیروی ماشینکاری

مطابق شکل (۵) تاثیر پارامترهای دوتایی بر نیروی ماشینکاری که به‌صورت خطوط متقاطع می‌باشد بیشتر است. از اینرو تعامل بین دامنه ارتعاش-عمق برش، دامنه ارتعاش-نرخ پیشروی، دامنه ارتعاش-سرعت برشی، عمق برش-نرخ پیشروی و عمق برش-سرعت برشی بیشترین تاثیر را بر نیروی ماشینکاری دارند. همچنین این تاثیرات را می‌توان در شکل (۶) مشاهده نمود و از آنجا مقادیر عددی تاثیر تغییر پارامترهای ماشینکاری بر نیروی ماشینکاری را بدست آورد.

#### ۴-۳- ارائه مدل آماری نیروی ماشینکاری

در این مرحله با بکارگیری تحلیل رگرسیون که از روش حداقل مربعات استفاده می‌کند مدلی آماری که داده‌های آزمایشی را برازش می‌کند، ارائه شده است. در این قسمت سعی شده با استفاده از خواص توابعی از جمله درجه ۱، درجه ۲ و درجه ۳ به مدل بهینه‌ای در برابر پیش بینی نیروی ماشینکاری درست پیدا شود رابطه (۱) مدل درجه یک را نشان می‌دهد.

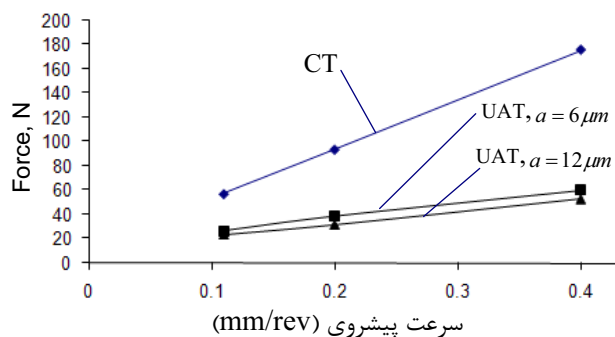
$$F = -96.4 - 6.92a + 142d + 490f_r + 1.00v_c \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $F$  نیروی ماشینکاری برحسب نیوتن می‌باشد.  $a$ ،  $d$ ،  $f_r$  و  $v_c$  همان فاکتورهای آزمایش مطابق جدول (۱) می‌باشند. رابطه (۲)، مدل درجه ۲ نیروی ماشینکاری را نشان می‌دهد:

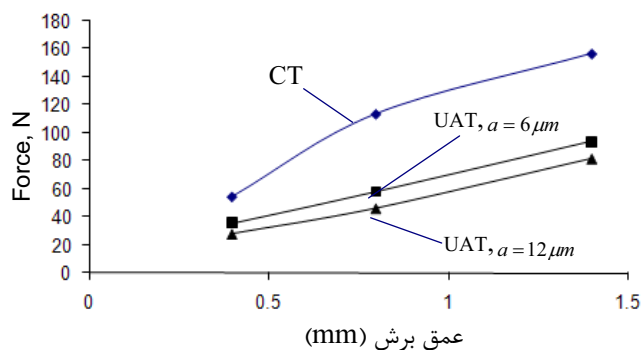
$$F = -57.4 + 10.2a + 21.9d + 5.9f_r + 0.734v_c - 5.20d^2 + 98f_r^2 - 0.00227v_c^2 - 6.87a \times d - 8.4a \times f_r - 0.105a \times v_c + 656d \times f_r + 0.863d \times v_c + 2.85f_r \times v_c \quad (2)$$



می‌گردد و علت آن است که در فرآیند UAT با افزایش سرعت برشی درگیری بین ابزار و قطعه کار بیشتر شده و منجر به افزایش نیروی ماشینکاری می‌گردد. تاثیر تغییر پارامترهای سرعت پیشروی و عمق برش بر نیروی ماشینکاری در فرآیند UAT همانند فرآیند CT می‌باشد.



شکل (۹): مقایسه نیرو در دو فرآیند UAT و CT با تغییر سرعت پیشروی  
 $v_c = 13.56 \text{ m/min}$  و  $d = 0.4 \text{ mm}$



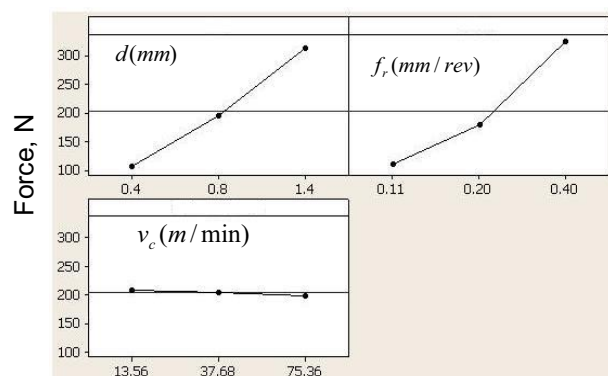
شکل (۱۰): مقایسه نیروی دو فرآیند UAT و CT با تغییر عمق برش  
 $f_r = 0.11 \text{ mm/rev}$  و  $v_c = 13.56 \text{ m/min}$

### ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق بررسی فرایندهای تراشکاری سنتی (CT) و تراشکاری به کمک ارتعاش اولتراسونیک (UAT) بر روی قطعه کار آلومینیوم 7075 انجام گردید. طراحی ابزار در مود ارتعاشی مورد نظر (20kHz) برای فرآیند UAT توسط نرم افزار Ansys انجام پذیرفت و پس از بهینه سازی طراحی، ساخت آن انجام شد. آزمایش‌های اولیه بر روی جنس آلومینیوم در فرآیند UAT انجام و همه آزمایش‌ها کاهش نیروی ماشینکاری را تایید کرد. سپس تاثیر تغییر پارامترهای ماشینکاری بر نیروهای ماشینکاری در فرایندهای UAT و CT آزمایش و تحلیل آماری بر روی داده‌ها انجام گردید. در مجموع از تحقیق انجام شده فوق نتایج زیر حاصل گردید:

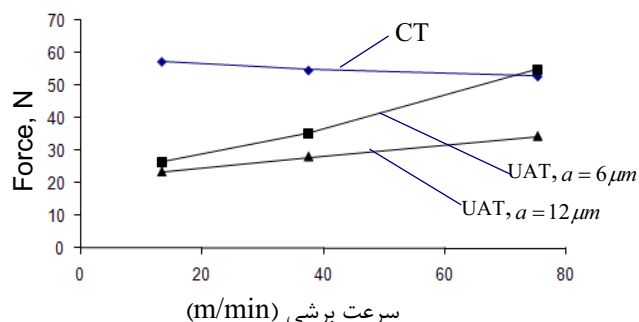
### ۵- مقایسه دو فرآیند UAT و CT

جهت مقایسه دو فرآیند UAT و CT طراحی آزمایش دیگری براساس روش Full factorial برای فرآیند CT انجام شد. پارامترهای ماشینکاری شامل عمق برش، نرخ پیشروی و سرعت برشی مطابق جدول (۱) می‌باشد. پس از انجام آزمایش‌های مربوطه و تحلیل آماری داده‌ها، تاثیر پارامترها بر نیروی ماشینکاری بدست آمد. شکل (۷) نمودارهای تاثیر پارامترهای ماشینکاری بر نیروی ماشینکاری در فرآیند CT را نشان می‌دهد.



شکل (۷): نمودارهای تاثیر فاکتورهای فرآیند CT بر نیروی ماشینکاری

مطابق شکل (۷) در فرآیند CT پارامترهای عمق برش و سرعت پیشروی بیشترین تاثیر را بر نیروی برشی دارند. شکل (۸) تا شکل (۱۰) مقایسه نیروی ماشینکاری دو فرآیند UAT و CT با اعمال پارامترهای مختلف ماشینکاری را نشان می‌دهد.



شکل ۸: مقایسه نیروی دو فرآیند UAT و CT با تغییر سرعت برشی  
 $f_r = 0.11 \text{ mm/rev}$  و  $d = 0.4 \text{ mm}$

با مقایسه نیروی شکل (۸) تا شکل (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت که نیروی ماشینکاری در فرآیند UAT کمتر از CT می‌باشد. و با افزایش دامنه ارتعاش اولتراسونیک این کاهش نیرو محسوس تر است. با افزایش سرعت برشی در فرآیند UAT نیروی ماشینکاری بیشتر می‌شود بطوریکه به نیروی ماشینکاری در فرآیند CT نزدیک

CT تقریباً مشابه است.  
 - با افزایش سرعت برشی در فرآیند UAT، نیروی برشی افزایش می‌یابد و این بدان علت است که با افزایش سرعت برشی درگیری بین ابزار و قطعه کار بیشتر شده و به سمت فرآیند CT سوق می‌یابد.  
 - با تحلیل آنالیز S/N می‌توان نتیجه گرفت که در بین پارامترهای ماشینکاری مورد آزمایش  
 $f_r = 0.11(mm/rev)$ ،  $v_c = 13.56(m/min)$   
 $a = 12(\mu m)$  و  $d = 0.4(mm)$  به‌عنوان مقادیر بهینه فاکتورها برای دستیابی به کمترین نیروی ماشینکاری بشمار می‌روند.

- نیروی ماشینکاری در فرآیند UAT کمتر از فرآیند CT می‌باشد بطوریکه در آزمایش انجام شده بر روی آلومینیوم 7075 نیروی ماشینکاری در فرآیند UAT در حد یک سوم کاهش یافته است.  
 - در فرآیند UAT علاوه بر تاثیر پارامترهای ماشینکاری شامل دامنه ارتعاش، عمق برش، نرخ پیشروی و سرعت برشی بر نیروی ماشینکاری، تعامل بین دامنه ارتعاش-عمق برش، دامنه ارتعاش - نرخ پیشروی، دامنه ارتعاش-سرعت برشی، عمق برش - نرخ پیشروی و عمق برش - سرعت برشی بیشترین تاثیر را بر نیروی ماشینکاری دارند.  
 - روند تغییر نیروی ماشینکاری براساس تغییر پارامترهای ماشینکاری شامل نرخ پیشروی و عمق برش در دو فرآیند UAT و

جدول (۴): مقادیر نیروهای ماشینکاری Fz فرآیند UAT (N)

Runs	Fz	Runs	Fz	Runs	Fz	Runs	Fz	Runs	Fz
1	26.51	12	98.06	23	180.79	34	53.27	45	183.85
2	35.4	13	82.5	24	255.2	35	68.34	46	60.2
3	54.82	14	105.76	25	311.39	36	84.04	47	81.68
4	38.66	15	156.47	26	393.47	37	36.37	48	95.42
5	48.62	16	170.93	27	455.55	38	46.32	49	106.29
6	81.96	17	222.37	28	23.48	39	57.89	50	141.1
7	60.27	18	280.16	29	28.1	40	623.89	51	167.46
8	99.5	19	76.43	30	34.34	41	79.78	52	232.26
9	148.37	20	93.8	31	31.76	42	95.32	53	277.9
10	45.25	21	155.24	32	40.42	43	120.58	54	344.17
11	58.01	22	142.17	33	50.47	44	153.18		

جدول (۵): آنالیز واریانس نیروی ماشینکاری

S = 7.50919 R-Sq = 99.91% R-Sq(adj) = 99.42%

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
<i>a</i>	۱	23262	23262	23262	412.54	0.000
<i>d</i>	2	184379	184379	92190	1634.92	0.000
<i>f<sub>r</sub></i>	2	190803	190803	95402	1691.88	0.000
<i>v<sub>c</sub></i>	2	34965	34965	17482	310.04	0.000
<i>a</i> × <i>d</i>	4	3970	3970	1985	35.20	0.000
<i>a</i> × <i>f<sub>r</sub></i>	4	5764	5764	2882	51.11	0.000
<i>a</i> × <i>v<sub>c</sub></i>	4	3554	3554	1777	31.52	0.000
<i>d</i> × <i>f<sub>r</sub></i>	4	57682	57682	14421	255.74	0.000
<i>d</i> × <i>v<sub>c</sub></i>	4	4432	4432	1108	19.65	0.000
<i>f<sub>r</sub></i> × <i>v<sub>c</sub></i>	4	4448	4448	1112	19.72	0.000
<i>a</i> × <i>d</i> × <i>f<sub>r</sub></i>	4	909	909	227	4.03	0.044
<i>a</i> × <i>d</i> × <i>v<sub>c</sub></i>	4	43	43	11	0.19	0.938
<i>a</i> × <i>f<sub>r</sub></i> × <i>v<sub>c</sub></i>	4	321	321	80	1.42	0.311
<i>d</i> × <i>f<sub>r</sub></i> × <i>v<sub>c</sub></i>	8	286	286	36	0.63	0.733
Residual Error	8	451	451	56		
Total	80	53	515268			



## ۹- مراجع

- [9] Amini, S., Soleimanimehr, H., Nategh, M. J., Abudollah, A. and Sadeghi, M. H., "FEM Analysis of Ultrasonic-Vibration-Assisted Turning and The Vibratory Tool," *Journal of Materials Processing Technology*, 5 December 2007
- [10] Montgomery, DC., "Design and Analysis of Experiment," John Wiley & Sons Inc, New York, 2000.
- [11] Babitsky, V.I., Kalashnikov, A.N., and Molodtsov, F.V., "Autoresonant Control of Ultrasonically Assisted Cutting, *Mechatronics*," Vol. 14, 2004, pp. 91-114.
- [12] Gan, J., Wang, X., Zhou, M., Ngoi, B., and Zhong, Z., "Ultraprecision Diamond Turning of Glass With Ultrasonic Vibration," *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, Vol. 21, 2003, pp. 952-955.
- [13] Babitsky, V. I., Kalashnikov, A. N., and Meadows, A., "Ultrasonically Assisted Turning of Aviation Materials," *J. Mat. Proc. Tech*, Vol. 132, 2003, pp. 157-167.
- [14] Mitrofanov, A. V., Ahmed, N., Babitsky, V. I., and Silberschmidt, V. V., "Effect of Lubrication and Cutting Parameters on Ultrasonically Assisted Turning of Inconel 718," *J. Mat. Proc. Tech*, Vol. 162, 2005, pp. 649-654.
- [15] Ahmed, N., Mitrofanov, A. V., Babitsky, V. I., Silberschmidt, V. V., "Analysis of Material Response To Ultrasonic Vibration Loading in Turning Inconel 718," *J. Mat. Science. Eng.*, Vol. 424, 2006, pp. 318-325.
- [1] Kumabe, J., and Masuko, M., "Study on the Ultrasonic Cutting (1st report)," *Trns.JSME.*, Vol. 24, No. 138, 1958, pp. 109-114.
- [2] Kumabe, J., and Taniguchi, O., "Dynamical analysis of vibration cutting," *Bull. Japan. Soc. Prec. Eng.*, Vol. 5, No. 3, 1971, pp. 73-74.
- [3] Kumabe, J., and Taniguchi, O., "Dynamical analysis of vibration cutting (2nd report)," *J. Japan Soc. Mech. Eng.* Vol. 36, No. 8, 1970, pp. 532-537.
- [4] Kumabe, J., "Fundamentals and Applications of Vibration Cutting," Jikkyopublishing, Tokyo, 1979.
- [5] Shamoto, E., Moriwaki, T., "Study on Elliptical Vibration Cutting," *Ann. CIRP*, Vol. 43, No. 1, 1994, pp. 35-38.
- [6] Lee, E. C., Nian, C. Y., and Tarn, Y. S., "Design of a Dynamic Vibration Absorber Against Vibrations in Turning Operations," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 108, 2001, pp. 278-285.
- [7] Tarn, Y. S., Kao, J. Y., and Lee, E. C., "Chatter Suppression in Turning Operations with a Tuned Vibration Absorber," *J. Mat. Proc. Tech.*, Vol. 105, 2000, pp. 55-60.
- [8] Astashev, V. K., Babitsky, V. I., "Ultrasonic Cutting As A Nonlinear (Vibro-Impact) Process," *J. Ultrasonics*, Vol. 36, 1998, pp. 89-96.