



## طراحی و ساخت ترانسدیوسر و ابزار التراسونیک در فرایند جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی

امیر رضایی شهرضا، سعید امینی\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۸ اسفند ۱۳۹۵  
بازنگری: ۱۲ تیر ۱۳۹۶  
پذیرش: ۱۵ شهریور ۱۳۹۶  
ارائه آنلاین: ۱۸ شهریور ۱۳۹۶

### کلمات کلیدی:

ترانسدیوسر التراسونیک  
جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی ارتعاشی  
مود محوری و خمشی  
آنالیز مودال  
دامنه ارتعاش

**چکیده:** جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی در زمره روش‌های اتصال دائم است که به دلیل ماهیت ترمومکانیکال اتصال مواد در حالت نیمه جامد و نیروهای جوشکاری بالا، نیازمند ابزار، گیره‌بندی و ماشین ابزار بسیار مستحکم است. راهکار ترکیب این فرایند با ارتعاش التراسونیک، کاهش نیروهای جوشکاری و بهبود کیفیت اتصال را به همراه دارد. در این تحقیق، ایده نحوه مقایسه اعمال دو نوع ارتعاش التراسونیک محوری و خمشی بر فرایند جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی، منجر به ساخت مجموعه ابزار جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی و ترانسدیوسر التراسونیک منحصربه‌فردی گردید. در واقع یکی از اهداف این پژوهش طراحی یگانه ابزاری است که قابلیت ارتعاش در دو مود محوری و خمشی در دو فرکانس مختلف را دارا باشد. همچنین اثرات تغییر جرم و اینرسی مجموعه ابزار بر جوش به دلیل استفاده از مجموعه ابزارهای جداگانه برای هر مود فرکانسی، حذف گردد. در نهایت، مدل نهایی آنالیز مودال شده ساخته شد و تحت اندازه‌گیری تجربی دامنه ارتعاشات در فرکانس رزونانس دو مود محوری و خمشی قرار گرفت و تأثیر دامنه ارتعاشات در این دو مود به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. برتری استفاده از ارتعاش خمشی نسبت به ارتعاش محوری در جهت حصول جوش با کیفیت بالاتر را می‌توان یکی از نتایج این مطالعه برشمرد. همچنین دو برابر شدن دامنه ارتعاشات از ۸ به ۱۶ میکرومتر برای جوشکاری ارتعاشی در مود خمشی، تقویت استحکام اتصال را به همراه داشت.

### ۱- مقدمه

ارتعاشات التراسونیک نه تنها کاربرد گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف اعم از تمیزکاری سطوح، هم زدن یا جداسازی مواد، اندازه‌گیری تنش پسماند، بررسی عیوب درون قطعات و غیره پیدا کرده است [۱]، بلکه به جهت تأثیرات غیرقابل‌انکار و مثبت آن بر فرایندهای مختلف تولید نیز اعم از تراشکاری، سوراخ‌کاری، جوشکاری و غیره، استفاده از آن به صورت ترکیبی موردتوجه قرار گرفته است [۲-۴].

تحقیقات نشان می‌دهند که اعمال ارتعاش التراسونیک در فرایند تراشکاری و سوراخ‌کاری، کاهش نیروهای براده برداری و افزایش صافی سطح را به همراه دارد [۵]. در فرایندهای شکل‌دهی فلزات نیز استفاده ترکیبی از انرژی التراسونیک سبب کاهش نیروهای شکل‌دهی و افزایش شکل‌پذیری می‌شود [۶]. همچنین استفاده از ارتعاشات در فرایند جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی<sup>۱</sup> نیز بهبود کیفیت جوش و کاهش نیروی محوری ابزار در حین جوشکاری را در پی دارد [۷].

فرایند جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی<sup>۲</sup> با ماهیت ترمومکانیکال خود و به دلیل مزایای برجسته اعم از: اتصال در حالت جامد مواد، عدم نیاز به محافظت منطقه جوش، غیر مصرفی بودن ابزار جوشکاری و...، با گذشت

بیش از دو دهه از ابداع این روش (ابداع در سال ۱۹۹۱، توسط موسسه جوش انگلستان<sup>۳</sup>)، همچنان موردتوجه محققان می‌باشد. یکی از مشکلات فرایند مذکور نیروی بالای جوشکاری وارد بر ابزار است که کاربرد این روش را برای اتصال فلزات سخت و مستحکم نظیر تیتانیوم و فولاد دشوار ساخته است. استفاده از فرایندهای کمکی ترکیبی با فرایند FSW در سال‌های اخیر موردتوجه محققان واقع شده است.

سان<sup>۴</sup> و همکارانش از پرتو لیزر برای پیشگرم نمودن منطقه تحت FSW استفاده نمودند. نتایج این تحقیق، حاکی از افزایش دو برابری سرعت پیشروی جوشکاری، به تعویق افتادن شکل‌گیری فاز ترد مارتزیت و باینیت در سرعت‌های پیشروی بالا در فرایند FSW ورق فولاد ساده کربنی S45C است [۸].

اعمال ارتعاش التراسونیک بر فرایند FSW از دیگر روش‌های ترکیبی است که تحقیقات انجام‌شده تاکنون نشان می‌دهد که استفاده از این روش از چند منظر سودمند واقع گردیده است. اعمال انرژی التراسونیک، تشدید مضاعف اصطکاک و در نتیجه افزایش حرارت اصطکاکی وارد بر منطقه جوش، نرم‌شدگی مواد در موضع اعمال ارتعاش و امتزاج بهتر مواد خمیری را می‌توان از کارکردهای استفاده ترکیبی از انرژی التراسونیک با فرایند FSW در جهت کاهش نیروهای وارد بر ابزار و حصول جوش با کیفیت بهتر برشمرد

1 Ultrasonic assisted Friction Stir Welding (UaFSW)

2 Friction Stir Welding (FSW)

نویسنده عهده‌دار مکاتبات: amini.s@kashanu.ac.ir

3 TWI-( The Welding Institute)

4 Y.F. Sun

[۹ و ۱۰].

پذیرفته است. لذا مطالعه حاضر با رویکرد مقایسه تجربی، تأثیر نوع و دامنه ارتعاشات در دو مود محوری و خمشی را بر الگوی اغتشاش، نیروی جوشکاری و استحکام جوش حاصل از فرایند UaFSW، با اتخاذ روشی مناسب مطالعه می‌نماید.

این مقایسه با دو رویکرد قابل انجام است. راهکار اول، طراحی دو مجموعه ابزار و ترانسدیوسر جداگانه که هر کدام در فرکانس طبیعی یکسان (مثلاً ۲۰ کیلوهرتز)، یکی قابلیت ارتعاش در مود محوری و دیگری در مود خمشی را داشته باشد. اتخاذ این راهکار تغییر ابعادی و هندسی قابل ملاحظه دو مجموعه ابزار و در نتیجه تغییر در جرم و اینرسی ابزارها حین ارتعاش را در پی خواهد داشت. با توجه به سرعت‌های بالای ابزار ناشی از ارتعاش، تفاوت جرمی فاحش بین دو مجموعه ابزار مذکور سبب تفاوت شگرف در اینرسی و در نتیجه انرژی التراسونیک اعمالی به منطقه جوش خواهد شد. لذا با استفاده از این راهکار نمی‌توان مقایسه درستی در نحوه تأثیر ارتعاشات بر فرایند UaFSW انجام داد. راهکار دوم که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته است، طراحی پیچیده و نوآورانه یک مجموعه ابزار و ترانسدیوسر با قابلیت ارتعاش در هر دو مود محوری و خمشی است که هر مود در فرکانس رزونانس مخصوص به خود اما نزدیک به دیگری ارتعاش نماید. راهکار اخیر بر مبنای این فرض انجام شد که اختلاف حدود ۳ کیلوهرتز اثر فاحشی بر نتایج آزمایشات در مقایسه با تغییرات اینرسی اشاره شده در راهکار اول نخواهد گذاشت. به این منظور، ابتدا مجموعه ابزار و ترانسدیوسر UaFSW، با اتخاذ قیود طراحی مناسب، طراحی مودال شده و سپس بر مبنای ابعاد و هندسه پیشنهادی آنالیز مودال، مجموعه ابزار ساخته می‌شود. این ابزار نیاز به چیدمان ثابتی از عملگرهای التراسونیک از نوع پیزوالکتریک داشته که قادر به اعمال ارتعاش در هر دو مود فرکانسی خمشی و محوری باشد، به نحوی که در تأمین این هدف نیازی به تغییر قطعات مجموعه ابزار نباشد و در هر دو حالت سر ابزار در ماکزیمم دامنه ارتعاش قرار گیرد. در نهایت پس از اندازه‌گیری تجربی دامنه ارتعاشات مجموعه ابزار نهایی، به منظور ارزیابی تأثیر نوع و اندازه دامنه ارتعاشات محوری و خمشی بر جوش حاصل از فرایند UaFSW، آزمایشاتی با هدف اندازه‌گیری نیروی محوری وارد بر ابزار، دمای سر شانه ابزار و استحکام جوش حاصل انجام می‌شود.

## ۲- طراحی مجموعه ابزار UaFSW

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، به منظور بررسی تأثیر ارتعاشات در دو مود فرکانسی محوری و خمشی و مقایسه درست اثرگذاری دامنه ارتعاشات بر کیفیت جوش حاصل از فرایند UaFSW، در ابتدا دو ترانسدیوسر جداگانه برای هر یک از دو مود اشاره شده در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز طراحی گردید. نتایج آنالیز مودال مبین اختلاف طول ۴۰ میلی‌متر دو ترانسدیوسر بود. این اختلاف طول، تفاوت جرمی حدود ۱۰۰ گرم دو ترانسدیوسر را در پی داشت و با ملاحظه سرعت بالا و تغییرات سرعت شگرف ناشی از ارتعاشات التراسونیک، تفاوت اینرسی و در نتیجه اختلاف انرژی التراسونیک

تاکنون مطالعات تجربی و عددی مناسبی در خصوص بررسی تأثیر ارتعاشات التراسونیک در جهات مختلف بر فرایند FSW توسط محققان صورت پذیرفته است [۱۳-۱۱]. فرایند UaFSW ورق آلومینیومی 2A12-T4 توسط لیو<sup>۱</sup> و همکارش انجام شد. در این مطالعه، ارتعاشات محوری توسط یک سونوترود<sup>۲</sup> مجزا در جلوی ابزار FSW با فاصله ۲۰ میلی‌متر از آن اعمال شد. نتایج تحقیق نشان می‌دهد، جریان مواد اطراف پین ابزار FSW دارای خطوط هم سرعت یکنواخت تری می‌باشند [۹]. ارزیابی تجربی تأثیر اعمال ارتعاش محوری بر فرایند جوشکاری نقطه‌ای اصطکاکی اغتشاشی بر آلومینیوم ۶۰۶۱ توسط رستمیان و همکارانش صورت پذیرفت. پارامترهای فرایند نظیر: سرعت دورانی ابزار، زمان توقف و عمق نفوذ ابزار FSSW<sup>۳</sup> همراه با ارتعاش و بدون ارتعاش توسط روش طراحی آزمایش تاگوچی بهینه‌سازی گردید [۱۴]. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد، بهترین جوش نقطه‌ای با بیشترین سختی و استحکام تحت پارامترهای سرعت دورانی ابزار ۱۲۰۰rpm، عمق نفوذ ۶ میلی‌متر و زمان مکث ۶ ثانیه همراه با ارتعاش به دست آمد. در مطالعه‌ای دیگر، پانرسلاوم<sup>۴</sup> و همکارش با استفاده از تکنیک ترکیب روش‌های ANN و الگوریتم ژنتیک، به بهینه‌سازی جوش حاصل از فرایند UaFSW پرداختند [۱۵]. همچنین مطالعه مربوط به مقایسه تجربی و مدل ریاضی-تحلیلی به کمک نرم‌افزار سیمولینک و متلب، فرایند UaFWS توسط منتظرالقائم و همکارانش صورت پذیرفت [۱۶]. نتایج نشان داد که افزایش عمق نفوذ ابزار در حالت اعمال ارتعاش محوری، افزایش نیروهای محوری وارد بر ابزار را به همراه دارد.

تاکنون در ارتباط با نحوه اعمال ارتعاش بر فرایند FSW نیز تحقیقاتی انجام شده است. پارک به بررسی تجربی فرایند UaFSW بر ورق آلومینیومی به‌گونه‌ای پرداخته است که ارتعاشات به‌صورت جانبی توسط ابزار بر سطح جوش وارد می‌شود. نتایج این مطالعه حاکی از افزایش دمای منطقه جوش ناشی از تشدید اصطکاک و به سبب آن کاهش نسبی نیروهای جوشکاری است. امینی و همکارانش در تحقیقات جداگانه به بررسی تجربی تأثیر اعمال ارتعاشات محوری [۵ و ۷] و خمشی [۴] در جهت محور ابزار در فرایند UaFSW بر آلومینیوم T6-۶۰۶۱ پرداخته است. نتایج مطالعات نشان می‌دهد، هر دو نوع ارتعاش کاهش نیروهای فروروی ابزار<sup>۵</sup> در شروع جوشکاری را در پی دارد.

مطابق مطالعات اشاره شده در بالا، اعمال ارتعاشات به طرق مختلف بر منطقه جوش انجام شده است؛ اما به منظور انتخاب کاربردی‌ترین و مؤثرترین نوع ارتعاش اعمالی به فرایند مذکور در صنعت، نیاز به انجام مطالعه‌ای در ارتباط با مقایسه درست این روش‌ها با یکدیگر است که تاکنون صورت

- 1 X. Liu
- 2 Sonotrode
- 3 Friction Stir Spot Welding
- 4 K. Panneerselvam
- 5 Tool Plunge

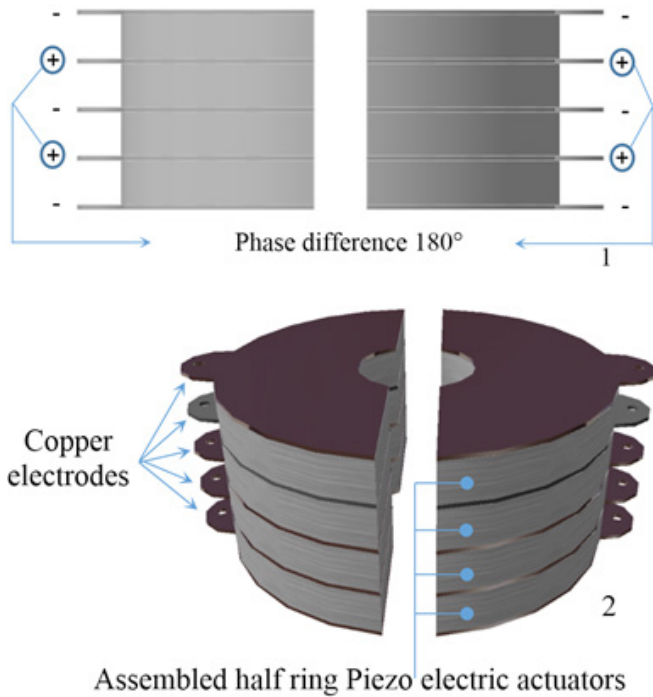


Fig. 2. Assembled 4 pairs of half Piezoelectric along with cut Copper electrodes, 1- Side view, 2- Isometric view

شکل ۲: مونتاژ ۴ جفت نیم پیزو و الکتروود مسی بریده شده، (۱) نمای جانبی، (۲) نمای ایزومتریک

بریده و مونتاژ شدند، استفاده گردید.

لازم به ذکر است پیزوالکتریکها به دلیل جنس ترد و شکننده ای که دارند قابل برش با اره نیستند. همچنین به دلیل ماهیت نارسانایی الکتریکی آنها امکان برش به کمک دستگاه وایرکات نیز میسر نبود. برش لیزر نیز به دو دلیل انجام پذیر نیست: اولاً جلای از جنس فلز نقره و براق سطحی و درون غیرفلزی و مات پیزوها، امکان برش به کمک لیزر را سلب نموده و دوماً حتی اگر امکان برش با این روش امکان پذیر می بود، تمامی دوقطبی های هم جهت شده در سطوح تحت برش خاصیت خود را از دست می دادند. لذا بهترین روش مناسب برای برش پیزوالکتریکها استفاده از دستگاه واتر جت بود که با ساخت فیکسچر مناسب برشکاری، مطابق شکل ۳ تک تک پیزوها به طور جداگانه با موفقیت بریده شدند.

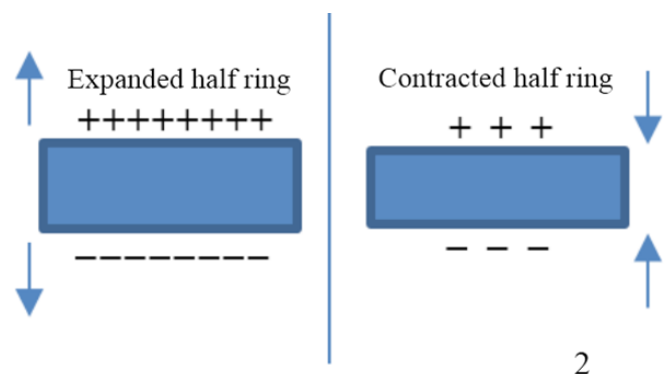
برای ایجاد سیگنال الکتریکی تقویت شده AC با فرکانس التراسونیک و توان تقریبی ۱ کیلووات، از دستگاه ژنراتور موج التراسونیک MPI مطابق شکل ۱-۴ و ۲-۴ استفاده شد. توان سیگنال الکتریکی این دستگاه جهت اعمال ارتعاشات پایدار بر فرایندهای با نیروی بالا، از جمله فرایند FSW، کافی است. مشکل پیش رو، تک خروجی تقویت شده سیگنال الکتریکی با فرکانس التراسونیک این دستگاه است. لذا با اتصال مستقیم ژنراتور مذکور به ترانسدیوسر، فقط مود محوری تحریک می شد. لذا برای تبدیل تک سیگنال خروجی مذکور به دو سیگنال هم فرکانس با ورودی البته با اختلاف فاز  $180^\circ$ ، ترانسفورماتوری مطابق شکل ۲-۴ در دانشگاه کاشان طراحی و ساخته شد. عموم ترانسدیوسرهای التراسونیک از بخش های مختلف پشت بند،

قابل ملاحظه ای در منطقه جوش ایجاد می نمود. لذا مقایسه اثرگذاری الگوی ارتعاش با دو ترانسدیوسر مذکور منطقی نبود. عیب اشاره شده سبب شد تا راهکار استفاده از یک ترانسدیوسر به منظور حذف اثرات اختلاف جرم و اینرسی پیشنهاد گردد. طبیعتاً اتخاذ چنین راهکاری، اختلاف فرکانسی دو مود ارتعاشی محوری و خمشی را در پی دارد که در ملاحظات طراحی حداقل نمودن این اختلاف به عنوان یکی از قیود طراحی مدنظر قرار گرفت.

نحوه اعمال ارتعاش ابزار UaFSW در مود خمشی بر مبنای ایده ای که در مطالعه قبلی محققان این پژوهش [۴] به کار بسته شد، استوار گردید. ایده مذکور بیان گر استفاده از دو ست نیم پیزوالکتریک مطابق شکل ۱-۱ و ۲-۱، به جای استفاده از قرص های کامل پیزوها است. چنانچه هر نیم ست پیزو با اختلاف فاز  $180^\circ$  نسبت به نیم ست دیگر تحریک شود قابلیت ایجاد موج التراسونیک در مود خمشی را می تواند فراهم نماید. همچنین، چنانچه تمامی پیزوهای هر دو نیم ست به طور هم فاز سیگنال الکتریکی با فرکانس التراسونیک دریافت نمایند، در صورت آنالیز مودال مناسب و طراحی هندسی درست ترانسدیوسر، می توان ارتعاش در مود محوری را شاهد بود.



1



2

Fig. 1. Isometric view of a whole piezoelectric ring, 2- Contraction and expansion for each set of half piezoelectric, due to actuation with  $180^\circ$  phase difference.

شکل ۱: (۱) نمای ایزومتریک یک قرص کامل پیزوالکتریک، (۲) انقباض و انبساط نیم پیزوها به دلیل تحریک با اختلاف فاز  $180^\circ$

برای تقویت و جلوگیری از توقف ارتعاشات حین جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی به دلیل نیروهای بالای این فرایند، از ۴ عدد پیزو کامل مطابق شکل ۱-۲ و ۲-۲، همراه با الکتروودهای مسی که توسط دستگاه واتر جت

۲. محل فلنج یا گره ارتعاشی برای هر دو نوع ارتعاش محوری و خمشی در یک نقطه واقع گردد.
۳. فاصله سر اینسرت ابزار تا محل استقرار پیزوها مضربی از یک چهارم طول موج باشد ( $\lambda/4$ ).
۴. بیشترین قطر هورن التراسونیک کوچکتر از  $\lambda/4$  باشد.
۵. در هر دو نوع مود ارتعاشی سر ابزار باید در شکم موج التراسونیک قرار گیرد.
۶. فرکانسهای رزونانس محوری و خمشی هر یک در نزدیکی ۲۰ کیلوهرتز و با اختلاف معقولی نسبت به یکدیگر و البته با فاصله از دیگر فرکانسهای تحریک مزاحم نیز باشند.

### ۲-۱- تشریح نحوه شبیه‌سازی مودال در نرم‌افزار آباکوس

برای آنالیز مودال مجموعه ابزار، ابتدا هندسه مونتاژ شده مطابق شکل ۱-۵ در نرم‌افزار کتیا ایجاد و به نرم‌افزار آباکوس وارد گردید. خواص مواد مطابق اطلاعات درج‌شده در جدول ۱، به هر یک از قطعات تخصیص داده شد. لازم به ذکر است، شماره‌گذاری قطعات اشاره‌شده در جدول ۱، مطابق شماره آن‌ها در شکل ۱-۶ می‌باشد.

جدول ۱: خواص مکانیکی مجموعه قطعات ابزار و ترانسدیوسر فرایند UaFSW [۱۸]

Table 1. Mechanical properties of UaFSW tool and transducer parts

شماره قطعه	نام قطعه	جنس ماده	چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	مدول الاستیک (Pa)	ضریب پواسون
۱	اینسرت ابزار	فولاد ابزار گرم‌کار H13	۷۸۰۰	۲۱۰۰۰۰	۰/۳
۲	متمركز کننده	آلومینیوم 7075-T6	۲۸۱۰	۷۱۰۰۰۰	۰/۳۳
۳	پشت‌بند	فولاد St37	۷۷۰۰	۲۰۰۰۰۰	۰/۳
۴	الکتروود مسی	مس	۸۹۶۰	۱۳۰۰۰۰	۰/۳۴
۵	پیزوالکتریک	PZT4	۷۵۱۷	۶۷۰۰۰۰	۰/۳
۶	پیچ مغزی	فولاد آلیاژی MO40	۷۸۵۰	۲۱۰۰۰۰	۰/۳

### ۲-۲- طراحی و ساخت مدل نهایی مجموعه ابزار

مجموعه ابزار و ترانسدیوسر فرایند UaFSW، در نرم‌افزار کتیا طراحی شده و سپس در نرم‌افزار آباکوس آنالیز مودال شد. در طی این فرایند، مجموعه ابزار متشکل از قطعات اشاره‌شده در جدول ۱، با جنس‌های مختلف مدل‌سازی شد و تحت تحلیل فرکانسی قرار گرفت. لازم به ذکر است، در ابتدا پشت‌بند از جنس آلومینیوم فرض شد و هورن التراسونیک، فولادی در نظر گرفته شد. نتیجه تحلیل فرکانسی این مجموعه ابزار قیود طراحی را برآورده

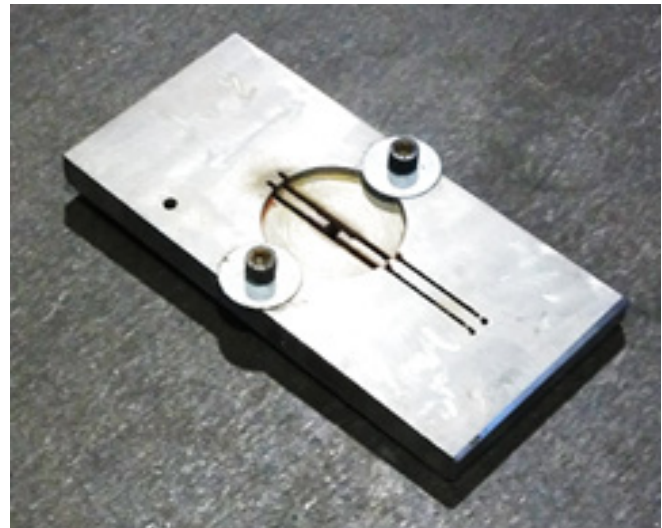


Fig. 3. Fixture for water jet cutting of Piezoelectric actuators  
شکل ۳: فیکسچر برش کاری پیزوالکتریک به کمک فرایند واترجت

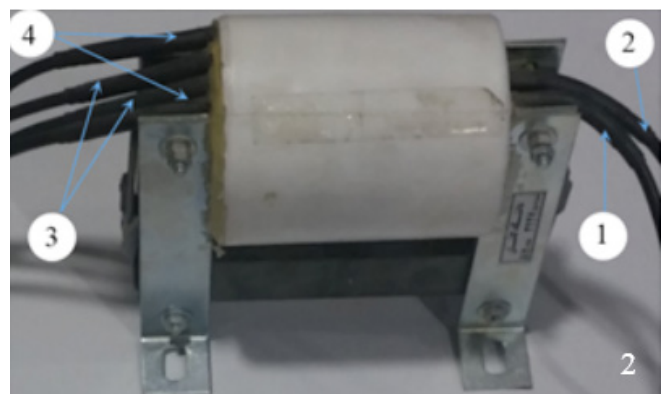


Fig. 4. 1- MPI ultrasonic generator, 2- AC transformer 1 to 2, (1. -input, 2. +input, 3. -output, 4. +output with 180° phase difference)

شکل ۴: ۱) ژنراتور التراسونیک MPI، ۲) ترانس مبدل جریان ۱ AC به ۲، (۱- ورودی، ۲- ورودی +، ۳- خروجی‌های -، ۴- خروجی‌های + با اختلاف فاز  $180^\circ$ )

متمركز کننده، پیچ مغزی، پیزوالکتریک‌ها، الکتروودهای مسی و در خصوص پژوهش حاضر، اینسرت ابزار FSW تشکیل شده است. در ارتباط با طراحی مودال و هندسی مجموعه ابزار ملاحظات وجود دارد که با عنوان قیود طراحی به قرار موارد زیر باید مدنظر واقع گردد [۱ و ۱۷].

۱. محل فلنج ترانسدیوسر یعنی جایی که مجموعه ابزار از آن موقعیت کلمپ می‌گردد باید در گره ارتعاشی واقع شود.



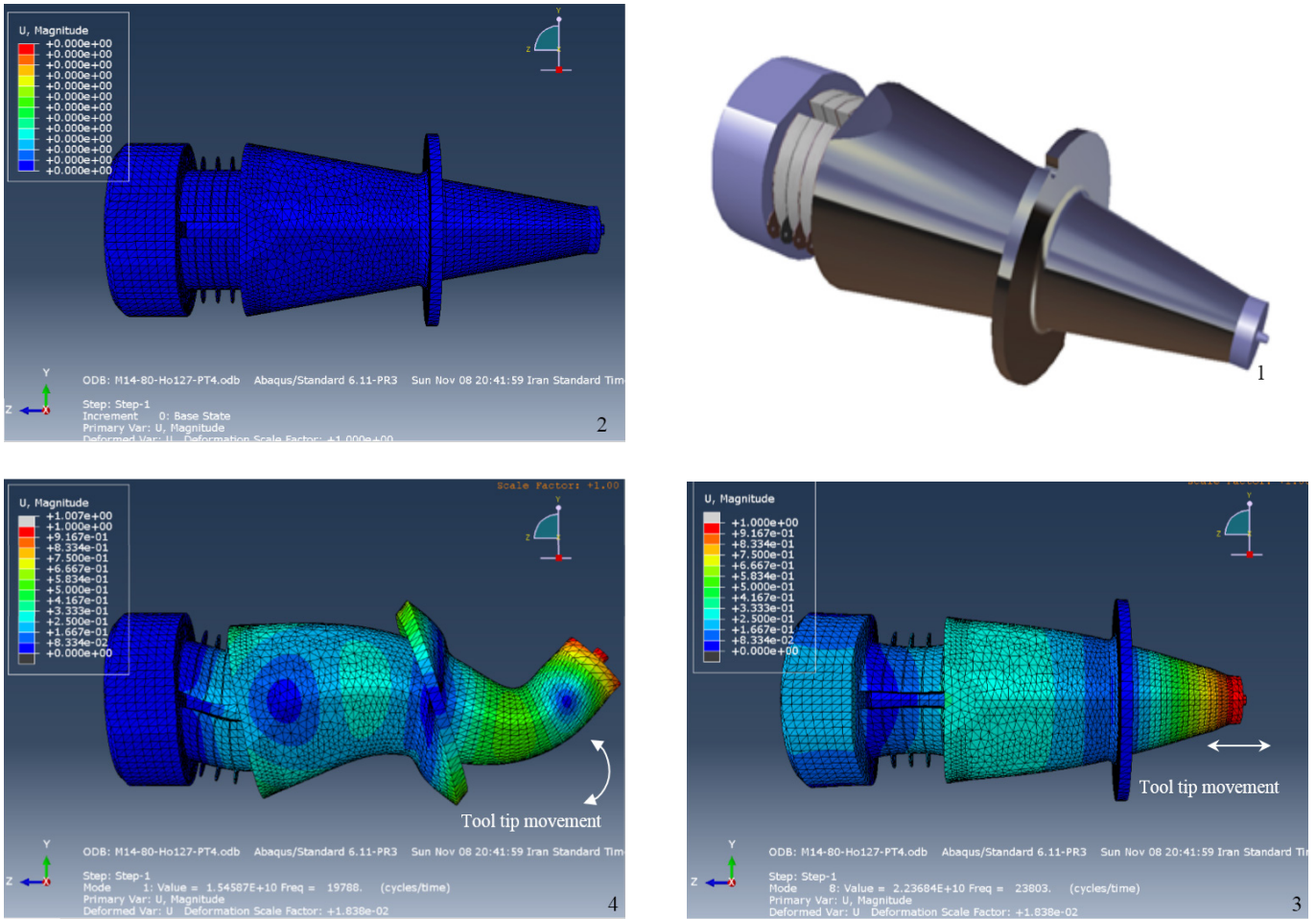


Fig. 5. Final model of transducer and tool set, 1- Assembled, 2- meshed, 3- Vibration in linear mode, 4- Vibration in bending mode

شکل ۵: مدل نهایی مجموعه ابزار و ترانسدیوسر، (۱) موتاژ شده، (۲) مش بندی شده، (۳) ارتعاش در مود محوری، (۴) ارتعاش در مود خمشی

در نهایت، متمرکز کننده با جنس آلومینیوم 7075-T6 جایگزین گردید و مراحل طراحی هندسی مجموعه ابزار، به کمک آنالیز مودال مجموعه، از سر گرفته شد. مطابق شکل ۵-۱ الی ۵-۴، مدل مجموعه ابزار و ترانسدیوسر نهایی در فرکانس ۲۳۸۰۰ هرتز با مود محوری و در فرکانس ۱۹۸۰۰ هرتز با مود خمشی به حالت تشدید می‌رسد. نحوه حرکت سر ابزار ناشی از ارتعاشات محوری و خمشی به ترتیب در شکل‌های ۵-۳ و ۵-۴ نشان داده شده است. با ساخت قطعات و موتاژ مجموعه ابزار با ابعاد مربوط به مدل نهایی مطابق شکل ۶، تمامی عیوب مذکور در نمونه‌های قبلی مرتفع گردید.

لازم به ذکر است به منظور جلوگیری از اتصال کوتاه و یا اصطلاحاً برق‌دار شدن ترانسدیوسر، از عایقی با جنس تفلون PTFE به شکل لوله‌ای در فضای بین پیچ مغزی و مجموعه الکترودهای مسی و پیژوها قرار گرفت.

### ۲-۳- مشخصات هندسه اینسرت ابزار FSW و ورق جوشکاری

طبق تحقیقات انجام شده بر تأثیر هندسه و ابعاد مختلف ابزار FSW بر کیفیت جوش حاصل [۲۲-۲۰]، در مطالعه حاضر از ابزار به شکل اینسرت با پین مخروطی با قطر بزرگ ۴/۵، قطر کوچک ۳/۵ و ارتفاع ۲/۸ میلی‌متر استفاده شد. قطر شانه ابزار ۱۸ میلی‌متر و کف شانه به صورت مقعر با زاویه

می‌ساخت؛ اما مجموعه ابزار ساخته شده طی این تحلیل فرکانسی، مشکلاتی اعم از ارتعاشات ناخواسته پشت‌بند و در نتیجه گرم شدن ابزار در محل پیژوها را در پی داشت. در ادامه تک‌تک سطوح تماس قطعات متصل سنگ‌زنی و پس از آن پولیش گردید. با موتاژ قطعات ابزار، ارتعاشات ناخواسته نه تنها متوقف نشد، بلکه پس از گرم شدن غیرقابل قبول پشت‌بند، کلیه پیژوها ترک برداشته و خورد شدند. در آنالیز مودال مجدد، از پشت‌بند با جنس فولادی، به دلیل ظرفیت میرایی<sup>۱</sup> ارتعاشات مناسب  $(\mu = 1/4 \text{ الی } 0/9) \times 10^{-3}$  و نزدیکی چگالی پیژوها به فولاد، استفاده شد [۱۹]. چراکه انتقال موج التراسونیک از سطح مشترک دو قطعه با چگالی نزدیک به یکدیگر راحت‌تر انجام می‌شود. همچنین انعکاس موج به محیط اولیه کمتر رخ می‌دهد [۱]. لذا در این مرحله پیژوها مابین پشت‌بند و متمرکز کننده فولادی قرار داده شدند. پس از اعمال تغییر، ابعاد هندسی مدل نهایی تحت آنالیز مودال استخراج گردید و قطعات مجدد ساخته، سنگ‌زده و صیقل داده شد. نتیجه حاصل از ارتعاش مجموعه ابزار موتاژ شده اخیر، کاهش ارتعاشات سر ابزار را در هر دو مود ارتعاشی محوری و خمشی در پی داشت. اتفاقی که پیشاپیش رخداد آن به دلیل دمپ بالای ارتعاشات توسط هورن فولادی، حدس زده شده بود.

1 Damping Capacity

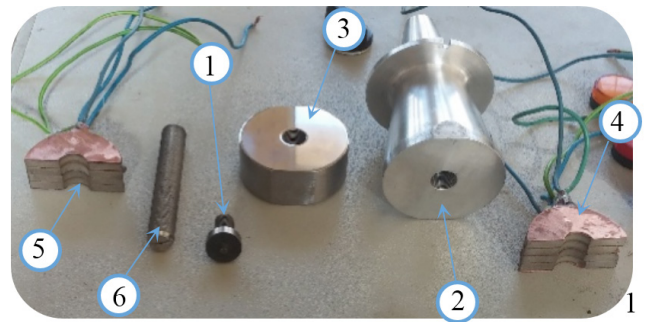
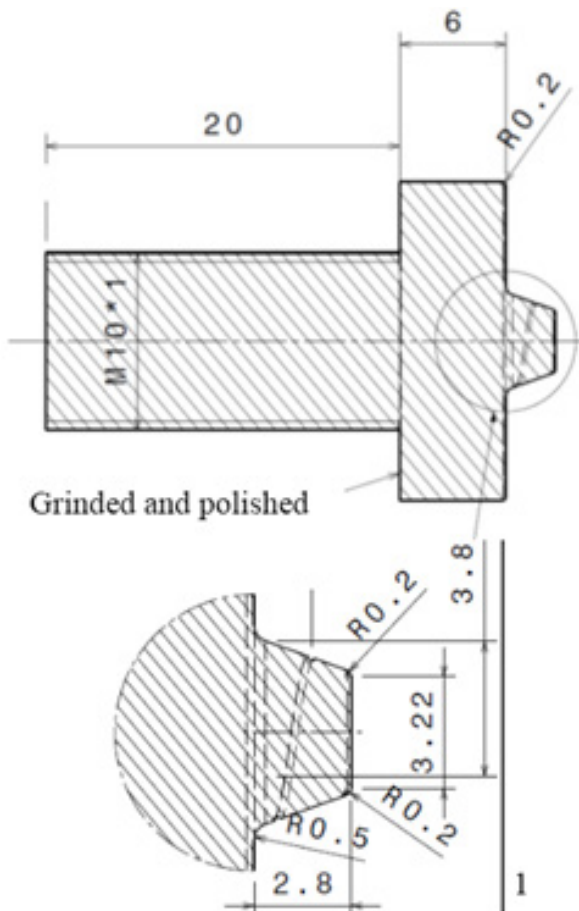


Fig. 6. 1- Detached parts of ultrasonic transducer and tool set, (1. FSW tool insert, 2. Concentrator, 3. Backing, 4. Copper electrodes, 6. Stud bolt)

شکل ۶: ۱) دمونتاز مجموعه قطعات اینسرت ابزار و ترانسدیوسر التراسونیک، ۲) اینسرت ابزار، ۳) متمرکز کننده، ۴) پشت بند، ۵) الکترود مسی، ۶) پیچ مغزی، ۷) پیچ مغزی، ۸) مجموعه مونتاژ شده ابزار UaFSW

۳۰ انتخاب گردید. لازم به ذکر است، پس از ساخت ابزار اینسرتی با جنس فولاد ابزار گرم کار H1۳ با ترکیب شیمیایی اندازه گیری و درج شده در جدول ۲، تحت عملیات حرارتی کوئنچ و تمپر قرار گرفت و سختی آن به ۴۵RC و مقاومت به سایش آن افزایش یافت. جزئیات و ابعاد مدل هندسه اینسرت ابزار و نمونه ساخته شده آن در شکل ۷-۱ و ۷-۲ نشان داده شده است.

همچنین ورق آلومینیم T6-۶۰۶۱ با ضخامت ۳ میلی متر با ترکیب شیمیایی اندازه گیری شده به صورت آزمایش تجربی مطابق جدول ۲، جهت انجام اتصال استفاده گردید.

### ۳- اندازه گیری دامنه ارتعاشات محوری و خمشی مجموعه ابزار UaFSW

به منظور اندازه گیری دامنه ارتعاشات ابزار مطابق شکل ۸-۱، از سنسور مجاورتی با شماره مدل PU-02A با رزولوشن ۱ میکرومتر، و از مبدل AEC-5502A-01، شکل ۸-۲، برای تبدیل ارتعاشات و میزان جابجایی سر ابزار به سیگنال الکتریکی استفاده گردید.

اندازه گیری دامنه ارتعاشات به این ترتیب صورت پذیرفت که ابتدا مجموعه ابزار از محل فلنج، در فیکسچر طراحی شده مطابق شکل ۹-۱ به نحوی استقرار یافت که کف شانه ابزار روی سنسور واقع گردد. مجموعه ابزار به ژنراتور التراسونیک متصل شد و در دو مود فرکانسی محوری و خمشی ارتعاش یافت. با توجه به اینکه ولتاژ القایی توسط سنسور مذکور

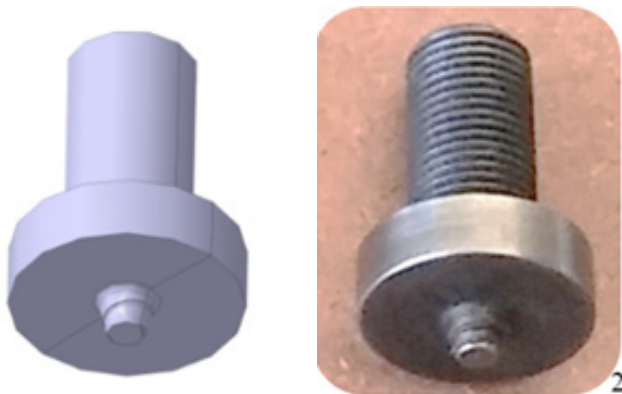


Fig. 7. FSW tool insert, 1- Dimensions of cut view, 2- 3D model and manufactured tool

شکل ۷: اینسرت ابزار FSW، ۱) ابعاد مدل برش خورده، ۲) نمونه ۳ بعدی و ساخته شده

بسیار کوچک است، به منظور تقویت ولتاژ القایی همان طور که شکل ۹-۲ نشان می دهد، از ترانسدیوسر الکتریکی و برای نشان دادن این سیگنال تقویت شده از اسیلوسکوپ استفاده گردید. لازم به ذکر است، با توجه به نوع کالیبراسیون، هر ۵ میلی ولت القاشده در اسیلوسکوپ مبین ۱ میکرومتر جابجایی سر ابزار خواهد بود.

مطابق شکل ۱۰، نقاط مختلفی از کف شانه ابزار اعم از: شمال (N)، جنوب (S) و مرکز ابزار (C)، در هر دو مود فرکانسی خمشی و محوری تحت



جدول ۲: ترکیب شیمیایی فولاد ابزار گرم کار H13 و آلومینیم 6061-T6

Table 2. Chemical compositions of hot work tool steel H13 and aluminum 6061-T6

ترکیب شیمیایی فولاد ابزار H13								
V	Cu	Ni	Mo	Cr	Mn	Si	C	
۸۴	۱۵	۱۵	۱/۱۹	۴/۷۶	۳۵	۸۸	۳۶	
ترکیب شیمیایی آلومینیم 6061-T6								
Al	Zn	Ti	Si	Mn	Mg	Fe	Cu	Cr
Balance	۰/۰۱۶	۰/۰۳۳	۰/۰۵۳	۰/۰۴۳	۱/۰۶	۰/۳۸	۰/۳۳	۰/۱۷

اندازه‌گیری دامنه قرار گرفت.

ماکزیمم دامنه ارتعاشات اندازه‌گیری شده برای هر دو مود فرکانسی، القای سیگنال الکتریکی ۸۰ میلی‌ولت و به طبع آن ۱۶ میکرومتر جابجایی را نشان می‌دهد. در مود ارتعاش خمشی، در مرکز ابزار (C)، ارتعاش ۰/۱ میکرومتر ثبت شد. ضخامت ۴ میلی‌متر فلنج ابزار که در واقع فقط یک نقطه از آن در گره ارتعاشی واقع است، دلیل ارتعاش خفیف تار خنثی کف شانه ابزار در مود خمشی شده است. جدول ۳ شامل مقدار ارتعاش ثبت‌شده کف شانه ابزار در نقاط N، C و S برای دو مود ارتعاشی خمشی و محوری می‌باشد.

جدول ۳: دامنه ارتعاشات در نقاط N، C و S برای مدهای (۱) خمشی، (۲) محوری

Table 3. Amplitude of vibrations in N, C and S points for a) bending, b) linear modes.

۲. دامنه ارتعاشات در مود محوری (μm)			۱. دامنه ارتعاشات در مود خمشی (μm)		
S	C	N	S	C	N
۱۵/۵	۰/۱	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶

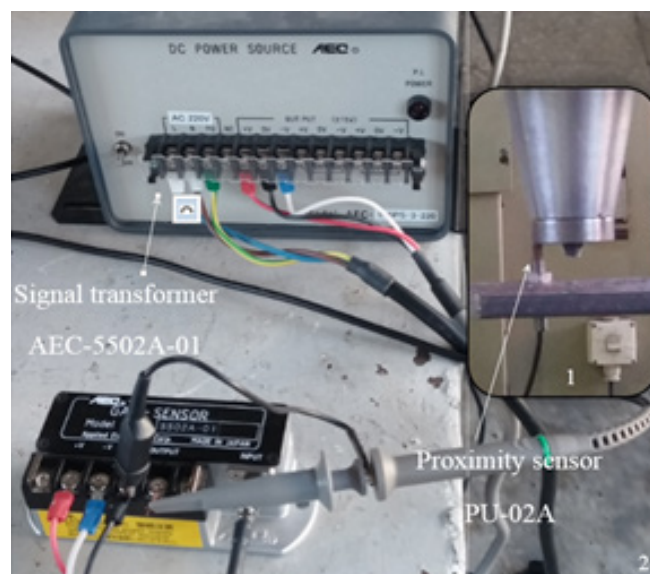


Fig. 8. 1- proximity sensor PU-02A, 2- Signal transformer AEC-5502A-01  
شکل ۸: (۱) سنسور مجاورتی (PU-02A)، (۲) مبدل سیگنال AEC-5502A-01

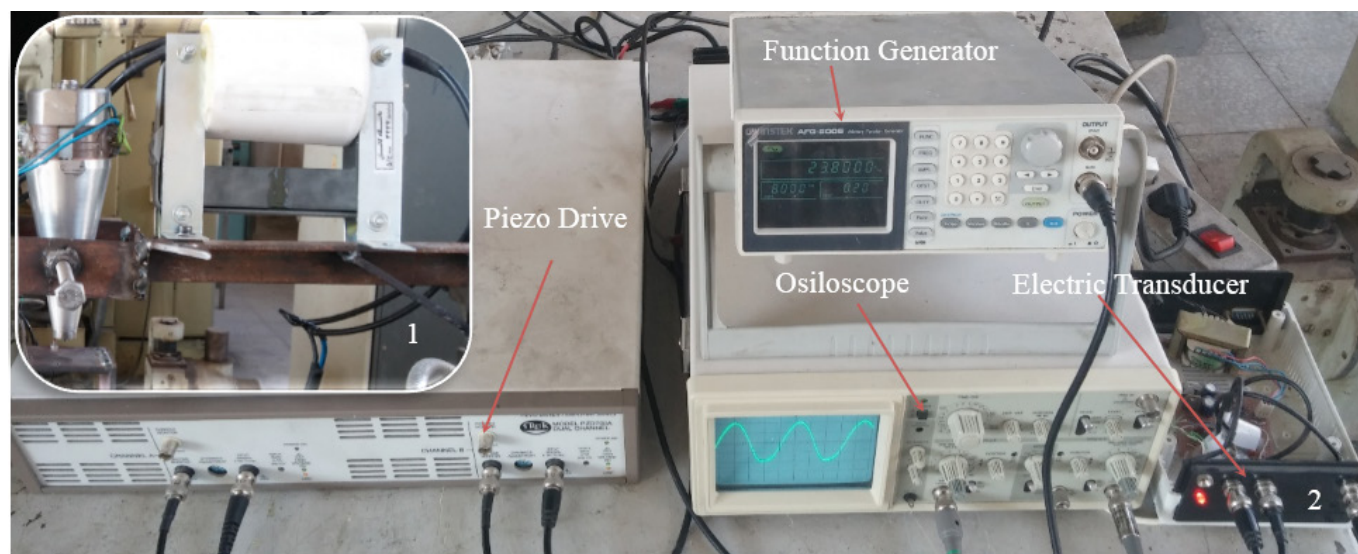


Fig. 8. Measurement equipment of vibration amplitude of UaFSW tool tip, 1- Placement of tool set in its fixture on proximity sensor, 2- Function generator, Oscilloscope, and Piezo drive

شکل ۹: تجهیزات اندازه‌گیری دامنه ارتعاشات سر ابزار UaFSW، (۱) مجموعه ابزار UaFSW مستقر در فیکسچر بر روی سنسور، (۲) Function Generator، اسیلوسکوپ و Piezo Drive

ماشین تراش (با تحریک سوپورت عرضی)، حرکت پیشروی جوشکاری را بر عهده دارد.

همان طور که در شکل ۱۱ مشخص است، از ترمومتر لیزری، پس از کالیبراسیون آن، برای اندازه‌گیری دمای لبه شانه ابزار که در تماس با محل جوشکاری است، استفاده شد.

۴-۱- انجام آزمایشات تجربی برای بررسی اثر دامنه ارتعاشات به منظور ارزیابی اثر دامنه ارتعاشات التراسونیک در دو مود محوری و خمشی بر فرایند UaFSW، مطابق جدول ۴ مجموعه‌ای از آزمایشات به روش طرح عاملی کامل طراحی گردید. به این ترتیب که دامنه ارتعاشات در دو سطح ۸ و ۱۶ میکرومتر برای هر دو مود ارتعاشی و حالت بدون ارتعاش و ۳ سطح ۰/۰۸، ۰/۱۶ و ۰/۲۴ mm/rev برای سرعت پیشروی در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است، تمامی آزمایشات در سرعت دورانی اسپیندل ۱۰۰۰ rpm انجام شد.

جدول ۴: پارامترهای مربوط به بررسی تأثیر نوع و اندازه دامنه ارتعاشات در سرعت‌های مختلف جوشکاری

Table 4. Parameters related to investigation of type and vibration amplitudes in different welding feed rates

سرعت پیشروی جوشکاری (mm/rev)	دامنه و نوع ارتعاش (μm)	سطح
۰/۰۸	۱۶ - محوری	۱
۰/۱۶	۱۶ - خمشی	۲
۰/۲۴	۸ - محوری	۳
	۸ - خمشی	۴
	بدون ارتعاش	۵

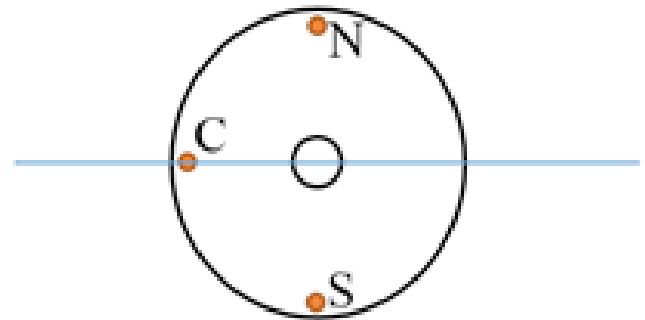


Fig. 10. Amplitude measurement positions of shoulder bottom for both frequency modes, N north, S south and C center of the tool

شکل ۱۰: موقعیت‌های تحت اندازه‌گیری دامنه ارتعاش در هر دو مود فرکانسی، شمال N، جنوب S و مرکز ابزار C

#### ۴- برپایی آزمایشات تجربی فرایند UaFSW

مطابق شکل ۱۱، به منظور انجام آزمایشات تجربی از ماشین تراش سنتی تبریز- مدل TN71BR-4000، جهت اندازه‌گیری نیروهای جوشکاری از دینامومتر Kistler-9257B با دقت ۰/۰۰۰۱ ماکزیمم رنج اندازه‌گیری نیرو (= ۰/۵ نیوتن) و برای اندازه‌گیری دمای سر شانه ابزار از ترمومتر ۲ لیزری مادون قرمز - مدل Extech-42512 استفاده شد. لازم به ذکر است به دلیل عدم امکان اتصال مستحکم مجموعه ابزار به سه‌نظام دستگاه تراش، کل مجموعه ابزار درون لوله‌ای فولادی قرار داده شد و لوله مذکور توسط سه‌نظام دستگاه تراش گرفته محکم گردید. همچنین، لنگی لوله و بخصوص سر ابزار، به واسطه ساعت اندازه‌گیری برطرف گردید. نمونه‌های آلومینیومی نیز بر روی صفحه پشت‌بند طراحی و ساخته شده برای قرارگیری نمونه‌های آلومینیومی با ابعاد ۱۵×۱۰×۳ میلی‌متر، توسط ۴ عدد روپند محکم گردید. صفحه پشت‌بند بر روی دینامومتر سوار و سپس دینامومتر کالیبره شد. در این حالت مجموعه ابزار حرکت دورانی و قطعه کار با نصب به‌جای تارت ابزار

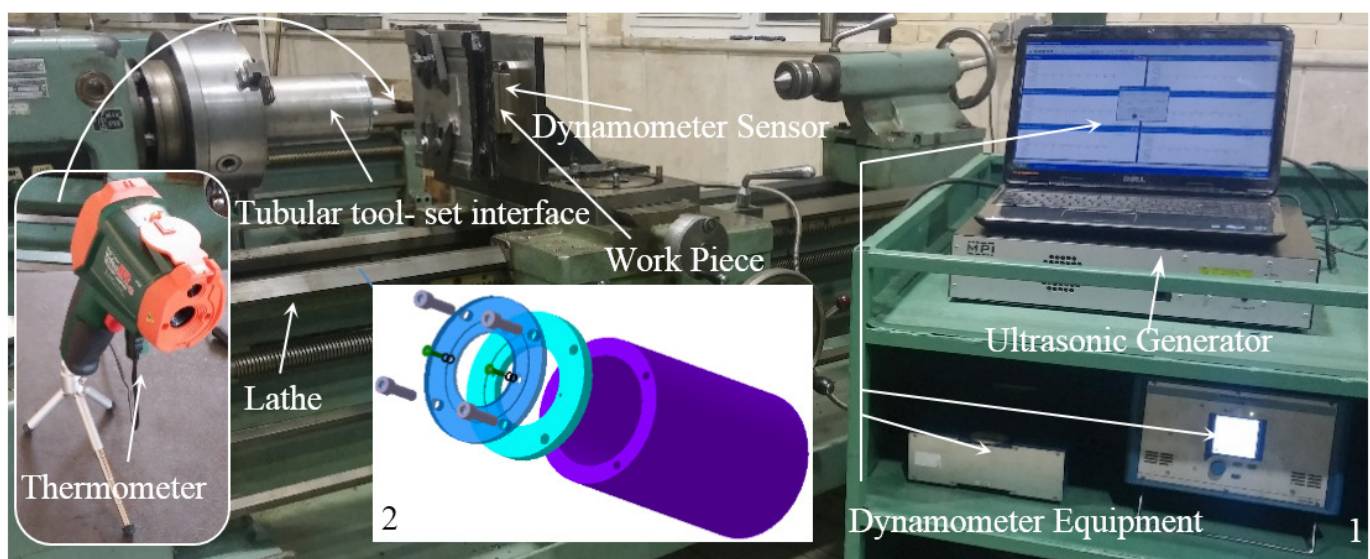


Fig. 11. 1- Experimental set up of UaFSW process, 2- Tubular interface between the toolset and the lathe chuck  
شکل ۱۱: ۱) ست‌آپ آزمایشات تجربی فرایند UaFSW، ۲) مجموعه اتصالات واسط بین مجموعه ابزار و سه‌نظام



## ۵- ارزیابی نتایج

همان‌طور که در بخش‌های گذشته اشاره گردید، به منظور بررسی اثر دامنه و نوع ارتعاشات التراسونیک پارامترهایی نظیر: نیروی حین جوشکاری، نیروی نفوذ ابزار به قطعه کار، دمای سر شانه ابزار و استحکام نهایی اتصال اندازه‌گیری شد. لازم به ذکر است پارامترهای مذکور برای جوشکاری UaFSW در مود خمشی و محوری هر یک در دو دامنه ۸ و ۱۶ میکرومتر و با حالت بدون ارتعاش، به‌قرار بخش‌های پیش‌رو مقایسه گردید.

### ۵-۱- بررسی اثر دامنه و نوع ارتعاشات بر نیروی حین جوشکاری

دیگرام میله‌ای شکل ۱۳، تأثیر شگرف نوع ارتعاش بر نیروی حین جوشکاری در فرایند UaFSW را نشان می‌دهد. به عبارتی، اعمال ارتعاشات خمشی نسبت به حالت بدون ارتعاش، به دلیل کمک به اغتشاش بیشتر مواد خمیری در زیر شانه، نیروهای حین جوشکاری را افزایش می‌دهد، درحالی‌که ارتعاشات محوری به طور کلی در مقایسه با حالت بدون ارتعاش، نیروهای حین جوشکاری را کاهش می‌دهد. کاهش نیروهای جوشکاری در ارتعاشات خطی به دلیل عدم مشارکت در اغتشاش مواد با توجه به الگوی ارتعاشی سر ابزار در این حالت می‌باشد. از طرف دیگر افزایش دامنه ارتعاشات در هر دو مود محوری و خمشی کاهش نیروی جوشکاری را در پی دارد. همچنین در تمامی حالت‌های ارتعاشی، افزایش نیروی جوشکاری با افزایش سرعت پیشروی گزارش شده است. این امر نیز به دلیل نیاز به صرف انرژی بیشتر در جوشکاری با سرعت بالاتر توجیه‌پذیر است.

به منظور تعیین محدوده مجاز نیروهای جوشکاری برای هر سطح و بررسی معنادار بودن اثرگذاری تغییرات پارامترهای دامنه و نوع ارتعاشات بر نیروی جوشکاری، جدول ۵ که شامل آمارهای توصیفی و آزمون همگونی

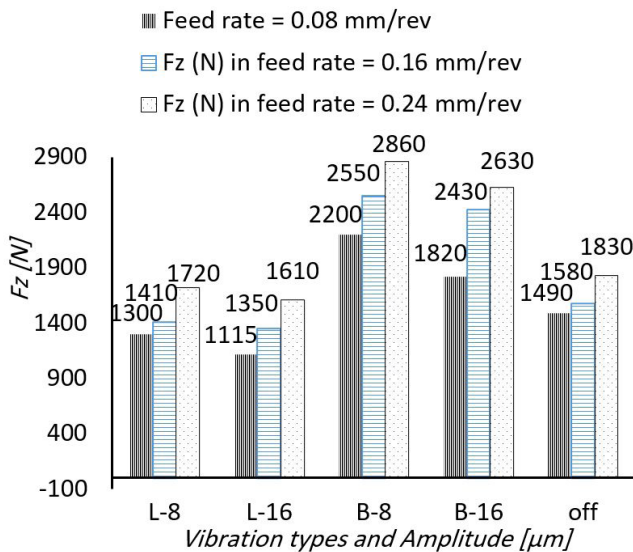


Fig. 13. Welding axial tool load in different vibration types and amplitude

شکل ۱۳: دیگرام نیروی محوری ابزار حین جوشکاری UaFSW در دامنه و نوع ارتعاشات مختلف

لازم به ذکر است در حین فرایند جوشکاری، نیرو و دمای سر شانه ابزار و پس‌از آن استحکام نمونه‌ها با انجام آزمایش کشش تک‌محوره اندازه‌گیری شد. همچنین نیروی فروری ابزار درون قطعه کار در هر ۵ سطح ارتعاشی مذکور در جدول ۴ نیز مقایسه گردید. همچنین نمونه‌های دمبلی-شکل به‌صورت ساینز کوچک، مطابق استاندارد ASTM , E8/E8M – 11 توسط دستگاه وایپرکات به نحوی بریده شد که مطابق شکل ۱۲-۱۱ مقطع جوش را به شکل عمودی قطع نماید [۲۳]. درنهایت، جهت انجام تست کشش از دستگاه WP-۳۱۰، ۵۰ تن که تصویر آن در شکل ۱۲-۱۲ قابل مشاهده است، استفاده گردید.

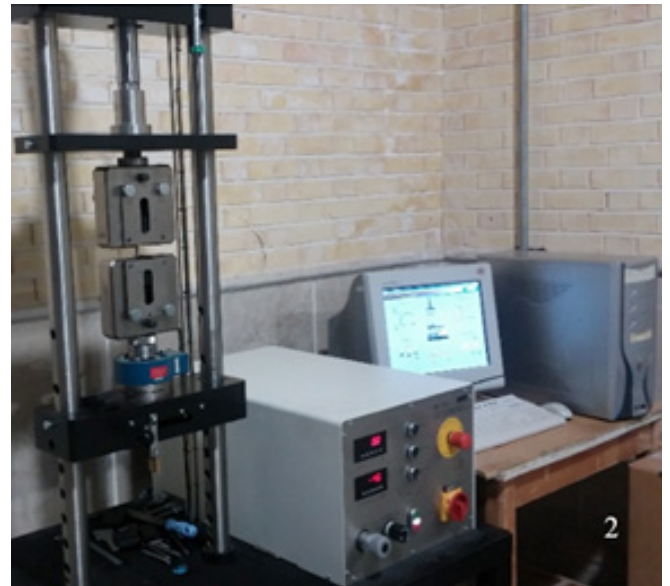
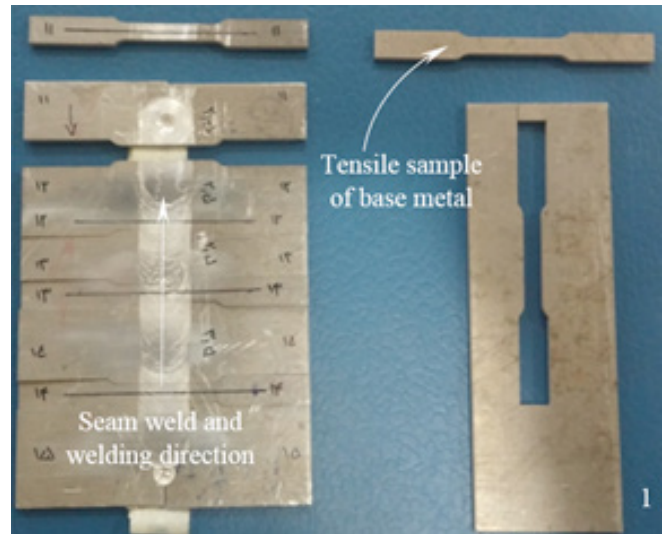


Fig. 12. 1- Uniaxial tension test samples, 2- Tension test machine, model WP-310, 50 tons

شکل ۱۲: (۱) نمونه‌های دمبلی برای آزمون کشش تک‌محوره، (۲) دستگاه تست کشش WP-۳۱۰، ۵۰ تن

جدول ۵: آمار توصیفی و آزمون همگونی نیروی جوشکاری بر حسب تغییرات پارامتر دامنه و نوع ارتعاش

Table 5. Descriptive statistics and homogeneity tests of amplitude and vibration types effect on welding forces

آمارهای توصیفی مربوط به نیروی جوشکاری								
ماکزیمم	مینیمم	فاصله اطمینان ۹۵٪ برای میانگین		انحراف استاندارد	انحراف معیار	میانگین	تعداد	
		کران بالا	کران پایین					
۱۸۳۰/۰۰	۱۴۹۰/۰۰	۲۰۷۰/۹۵	۱۱۹۵/۷۲	۱۰۱/۷۱	۱۷۶/۱۶	۱۶۳۳/۳۳	۳	None
۱۷۲۰/۰۰	۱۳۰۰/۰۰	۲۰۱۷/۶۹	۹۳۵/۶۴	۱۲۵/۷۴	۲۱۷/۷۹	۱۴۷۶/۶۷	۳	L8
۲۸۶۰/۰۰	۲۲۰۰/۰۰	۳۳۵۶/۹۳	۱۷۱۶/۴۰	۱۹۰/۶۴	۳۳۰/۲۰	۲۵۳۶/۶۷	۳	B8
۱۶۱۰/۰۰	۱۱۱۵/۰۰	۱۹۷۳/۴۲	۷۴۳/۲۵	۱۴۲/۹۵	۲۴۷/۶۱	۱۳۵۸/۳۳	۳	L16
۲۶۳۰/۰۰	۱۸۲۰/۰۰	۳۳۴۱/۴۹	۱۲۴۵/۱۸	۲۴۳/۶۱	۴۲۱/۹۴	۲۲۹۳/۳۳	۳	B16
۲۸۶۰/۰۰	۱۱۱۵/۰۰	۲۱۶۰/۸۳	۱۵۵۸/۵۰	۱۴۰/۴۲	۵۴۳/۸۴	۱۸۵۹/۶۷	۱۵	کل
			۲۰۲۷/۷۶	۱۶۹۱/۵۸	۷۵/۴۴	۲۹۲/۱۸		اثر ثابت
			۲۵۰۹/۵۱	۱۲۰۹/۸۲	۲۳۴/۰۶			اثر تصادفی

آزمون همگونی واریانس نیروی جوشکاری

سطح معناداری	درجه آزادی ۲	درجه آزادی ۱	آمار لوین
۰/۵۳۰	۱۰	۴	۰/۸۴۰

جدول ۶: تحلیل واریانس نیروی جوشکاری بر اساس پارامترهای دامنه و نوع ارتعاش

Table 6. Variance analysis of amplitude and vibration types effects on welding forces

سطح معناداری (P-Value)	F	میانگین مجذورات	درجه آزادی	جمع مجذورات	انحراف معیار
۰/۰۰۲	۹/۶۲۶	۸۲۱۷۳۵/۰	۴	۳۲۸۶۹۴۰/۰	میان گروهی
		۸۵۳۶۸/۳	۱۰	۸۵۳۶۸۳/۳	درون گروهی
			۱۴	۴۱۴۰۶۲۳/۳	کل

به منظور بررسی معناداری اثرات سرعت جوشکاری بر نیروی جوشکاری نیز مطالعات آماری اعم از آمارهای توصیفی، آزمون همگونی واریانس و تحلیل واریانس ناشی از تغییرات پارامتر سرعت جوشکاری به قرار جداول ۸ صورت پذیرفت.

نتایج جدول ۸ و ملاحظه P-value مربوطه نشان می‌دهد، بین گروه‌ها همگونی واریانس وجود دارد، در نتیجه می‌توان تحلیل واریانس (ANOVA) نیروی جوشکاری بر حسب تغییرات پارامتر سرعت پیشروی را مطابق جدول ۹ انجام داد.

با توجه به مقدار  $P\text{-value}=0/031$  اشاره شده در جدول ۹، که کمتر از ۰/۰۵ است، فرض صفر که همان فرض برابری میانگین‌هاست رد می‌شود؛ یعنی افزایش سرعت بر نیروی جوشکاری تأثیرگذار است.

واریانس ناشی از اثرات پارامترهای مذکور محاسبه گردید. لازم به ذکر است، سطح معناداری ۰/۵۳۰ بیان‌گر امکان‌پذیری تحلیل واریانس (ANOVA) به‌قرار جدول ۶ می‌باشد.

با توجه به اینکه در جدول ۷،  $P=0/002$  به دست آمده است، فرض برابری میانگین‌ها رد شده و مشخص می‌گردد که نوع ارتعاش بر روی نیروی جوشکاری تأثیرگذار است.

حال باید بررسی نمود که کدام گروه تفاوت معناداری با دیگر گروه‌ها دارد. جدول ۷ کمترین تفاوت معنادار<sup>۱</sup> را با مقایسه میانگین‌های نیروهای جوشکاری بررسی می‌کند.

توجه به نتایج جدول ۷ و مقادیر P مربوطه نشان می‌دهد، اعمال ارتعاشات خمشی نسبت به ارتعاشات محوری در مقایسه با حالت بدون ارتعاش بر نیروی جوشکاری تأثیرگذارتر است و موجب افزایش بیشتر نیروی جوشکاری می‌شود.

1 Least Significant Difference (LSD)

جدول ۷: مقایسه میانگین‌های نیروی جوشکاری بر اساس پارامتر نوع و دامنه ارتعاش در روش LSD

Table 7. Comparison of average welding forces influenced by amplitude and vibration types in LSD method

فاصله اطمینان ۹۵٪		سطح معناداری (P-Value)	انحراف معیار	میانگین اختلاف	پارامتر
کران بالا	کران پایین				
۶۸۸/۲۲	-۳۷۴/۸۸	۰/۵۳	۲۳۸/۵۶	۱۵۶/۶۷	L8
-۳۷۱/۷۸	-۱۴۳۴/۸۸	۰/۰۰	۲۳۸/۵۶	-۹۰۳/۳۳	B8
۸۰۶/۵۵	-۲۵۶/۵۵	۰/۲۸	۲۳۸/۵۶	۲۷۵/۰۰	L16
-۱۲۸/۴۵	-۱۱۹۱/۵۵	۰/۰۲	۲۳۸/۵۶	-۶۰/۰۰	B16
۳۷۴/۸۸	-۶۸۸/۲۲	۰/۵۳	۲۳۸/۵۶	-۱۵۶/۶۷	None
-۵۲۸/۴۵	-۱۵۹۱/۵۵	۰/۰۰	۲۳۸/۵۶	-۱۰۶۰/۰	B8
۶۴۹/۸۸	-۴۱۳/۲۲	۰/۶۳	۲۳۸/۵۶	۱۱۸/۳۳	L16
-۲۸۵/۱۲	-۱۳۴۸/۲۲	۰/۰۱	۲۳۸/۵۶	-۸۱۶/۶۶	B16
۱۴۳۴/۸۸	۳۷۱/۷۸	۰/۰۰	۲۳۸/۵۶	۹۰۳/۳۳	None
۱۵۹۱/۵۵	۵۲۸/۴۵	۰/۰۰	۲۳۸/۵۶	۱۰۶۰/۰	L8
۱۷۰۹/۸۸	۶۴۶/۷۸	۰/۰۰	۲۳۸/۵۶	۱۱۷۸/۳۳	L16
۷۷۴/۸۸	-۲۸۸/۲۲	۰/۳۳	۲۳۸/۵۶	۲۴۳/۳۳	B16
۲۵۶/۵۵	-۸۰۶/۵۵	۰/۲۸	۲۳۸/۵۶	-۲۷۵/۰۰	None
۴۱۳/۲۲	-۶۴۹/۸۸	۰/۶۳	۲۳۸/۵۶	-۱۱۸/۳۳	L8
-۶۴۶/۷۸	-۱۷۰۹/۸۸	۰/۰۰	۲۳۸/۵۶	-۱۱۷۸/۳۳	B8
۴۰۳/۴۵	-۱۴۵۵/۶۶	۰/۰۰	۲۳۸/۵۶	-۹۳۵/۰۰	B16
۱۱۹۱/۵۵	۱۲۸/۴۵	۰/۰۲	۲۳۸/۵۶	۶۶۰/۰۰	None
۱۳۴۸/۲۲	۲۸۵/۱۲	۰/۰۱	۲۳۸/۵۶	۸۱۶/۶۶	L8
۲۸۸/۲۲	-۷۷۴/۸۸	۰/۳۳	۲۳۸/۵۶	-۲۴۳/۳۳	B8
۱۴۶۶/۵۵	۴۰۳/۴۵	۰/۰۰	۲۳۸/۵۶	۹۳۵/۰۰	L16

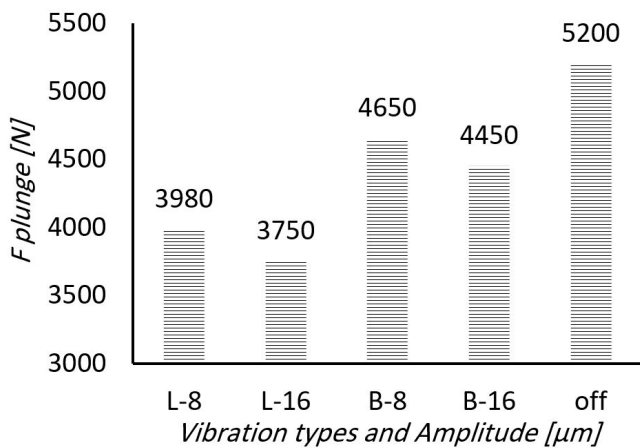


Fig. 14. Effect of vibration types and amplitude on plunge load of the UaFSW tool

شکل ۱۴: تأثیر نوع و دامنه ارتعاشات بر نیروی فرو روی ابزار UaFSW

۵-۲- تأثیر نوع و اندازه دامنه ارتعاشات بر نیروی فرو روی<sup>۱</sup> اولیه ابزار درون قطعه کار

با توجه به اینکه ماکزیمم نیروی وارد بر ابزار در فرایند فرو روی اولیه ابزار حادث می‌شود [۲۴]، اندازه‌گیری این نیرو در حالت اعمال ارتعاشات محوری و خمشی در دامنه‌های ارتعاشی مختلف مورد توجه می‌باشد. مطابق شکل ۱۴، فرو روی ابزار در حالت ارتعاشی به‌طور کلی، نیروی فروروی ابزار را نسبت به حالت بدون ارتعاش کاهش می‌دهد. این کاهش نیرو برای مودهای ارتعاشی محوری و خمشی، به ترتیب حدود ۱۳۰۰N و ۷۰۰N گزارش شد؛ به‌عبارت‌دیگر ورود ابزار مرتعش در مود محوری با سهولت بیشتری صورت می‌پذیرد. از طرف دیگر افزایش ۲ برابری دامنه ارتعاشی در هر یک از مودهای فرکانسی مذکور، کاهش نیروی فرو روی وارد بر محور ابزار UaFSW در حدود ۲۰۰N را در پی دارد.

1 Plunge force



جدول ۸: آمارهای توصیفی و آزمون همگونی واریانس نیروی جوشکاری بر حسب تغییرات پارامتر سرعت جوشکاری

Table 8. Descriptive statistics and homogeneity tests of welding feed effects on welding forces

ماکزیمم	مینیمم	فاصله اطمینان ۹۵٪ برای میانگین		انحراف استاندارد	انحراف معیار	میانگین	تعداد	
		کران بالا	کران پایین					
۲۲۰۰	۱۱۱۵	۲۱۲۰/۷۲	۱۰۴۹/۲۸	۱۹۲/۹۵	۴۳۱/۴۵	۱۵۸۵/۰۰	۵	۰/۰۸
۲۵۵۰	۱۳۵۰	۲۵۸۳/۱۸	۱۱۴۴/۸۲	۲۵۹/۰۳	۵۷۹/۲۱	۱۸۶۴/۰۰	۵	۰/۱۶
۲۸۶۰	۱۶۱۰	۲۸۴۰/۹۵	۱۴۱۹/۰۵	۲۵۶/۰۷	۵۷۲/۵۸	۲۱۳۰/۰۰	۵	۰/۲۴
۲۸۶۰	۱۱۱۵	۲۱۶۰/۸۳	۱۵۵۸/۵۰	۱۴۰/۴۲	۵۴۳/۸۴	۱۸۵۹/۶۷	۱۵	کل
			۲۱۵۹/۰۲	۱۵۶۰/۳۱	۱۳۷/۳۹	۵۳۲/۱۳		اثر ثابت
			۲۵۳۶/۶۶	۱۱۸۲/۶۷	۱۵۷/۳۴			اثر تصادفی

آزمون همگونی واریانس نیروی جوشکاری بر اساس سرعت پیشروی

سطح معناداری	درجه آزادی ۲	درجه آزادی ۱	آمار لوین
۰/۲۸۹	۱۲	۲	۱/۳۷۹

جدول ۹: تحلیل واریانس نیروی جوشکاری بر اساس سرعت پیشروی

Table 9. Variance analysis of welding feed effects on welding forces

سطح معناداری	F	میانگین مجزورات	درجه آزادی	جمع مجزورات	انحراف معیار
۰/۰۳۱	۶/۹۲	۳۷۱۳۵۱/۶۶۷	۲	۷۴۲۷۰۳/۳۳	میان گروهی
		۲۸۳۱۶۰/۰	۱۲	۳۳۹۷۹۲۰/۰	درون گروهی
			۱۴	۴۱۴۰۶۲۳/۳۳	کل

خمشی، به دلیل اضافه شدن انرژی التراسونیک در قالب گرما به منطقه تحت جوشکاری، افزایش دما را به همراه دارد. این افزایش دما برای حالت اعمال ارتعاشات محوری بیش از حالت ارتعاش خمشی گزارش شده است. دلیل این امر را می توان حرکت تمام سطح مقطع سر ابزار در مود محوری دانست.

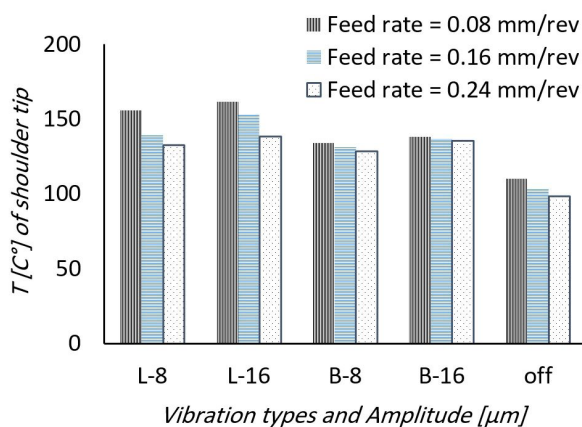


Fig. 15. Effect of vibration types and amplitude on temperature of the tool shoulder tip

شکل ۱۵: تأثیر نوع و دامنه ارتعاشات بر دمای سر شانه ابزار UaFSW

لازم به ذکر است به منظور بررسی تجدیدپذیری آزمایشات مربوط به اندازه گیری نیروی جوشکاری و فروروی، هر آزمایش ۳ مرتبه تکرار شد. اعداد درج شده در دیاگرام شکل های ۱۳ و ۱۴ میانگین نیروهای مربوط به آزمایشات تکراری مذکور است. به جهت بررسی میزان اثرگذاری نوع و بزرگی دامنه ارتعاش از آنالیز واریانس استفاده شد. نتایج ANOVA ارائه شده در جدول ۱۰ نشان می دهد، این پارامتر بر نیروی فروروی ابزار بسیار تأثیرگذار است. همچنین تأثیر تعامل بین پارامترهای مذکور بر نیروی فروروی قابل توجه نمی باشد. مقادیر اشاره شده در جدول ۱۰، اشاره به معنادار بودن اختلاف ۲۰۰ نیوتون ناشی از تغییرات دامنه ارتعاشات دارد.

با توجه به نتایج جدول ۱۰ و *P-value*، بین گروه ها همگونی واریانس وجود دارد. لذا اعمال ارتعاش بر نیروی فروروی ابزار، اثر معناداری به قرار آنچه در شکل ۱۴ آورده شده، دارد.

۵-۳ اثر نوع و دامنه ارتعاشات بر دمای سر شانه ابزار UaFSW

بر طبق نتایج حاصل از اندازه گیری دمای سر شانه ابزار، اشاره شده در شکل ۱۵، اعمال ارتعاش التراسونیک در هر یک از دو مود محوری یا

جدول ۱۰: آمارهای توصیفی و آزمون همگونی واریانس نیروی فروروی ابزار بر حسب تغییرات پارامتر دامنه و نوع ارتعاش

Table 10. Descriptive statistics and homogeneity tests of amplitude and vibration types effect on welding plunge forces

آمارهای توصیفی نیروی فروروی ابزار								
پارامتر	تعداد	محدوده	مینیمم	ماکزیمم	مجموع	میانگین	انحراف استاندارد	واریانس
None	۳	۲۳۰	۵۰۹۰	۵۳۲۰	۱۵۶۰۰	۵۲۰۰	۱۱۵/۳۲۵۶	۱۳۳۰۰
L8	۳	۱۹۰	۳۹۱۰	۴۱۰۰	۱۱۹۴۰	۳۹۸۰	۱۰۴/۴۰۳۱	۱۰۹۰۰
B8	۳	۴۰۰	۴۵۰۰	۴۹۰۰	۱۳۹۵۰	۴۶۵۰	۲۱۷/۹۴۴۹	۴۷۵۰۰
L16	۳	۳۹۰	۳۵۱۰	۳۹۰۰	۱۱۲۵۰	۳۷۵۰	۲۱۰	۴۴۱۰۰
B16	۳	۳۶۰	۴۲۳۰	۴۵۹۰	۱۳۳۵۰	۴۴۵۰	۱۹۲/۸۷۳۰	۳۷۲۰۰

آزمون همگونی واریانس نیروی فروروی ابزار

آمار لوین	درجه آزادی ۱	درجه آزادی ۲	سطح معناداری
۰/۰۰۰	۲	۱۲	۱/۰۰۰

درحالی که در مود خمشی فقط دو نقطه از لبه‌های شانه ابزار با ماکزیمم دامنه ارتعاش می‌کنند و نواحی نزدیک به تار خنثی از مقطع سر ابزار ارتعاش قابل توجهی ندارند.

نتایج انحراف معیار حاصل از آنالیز واریانس داده‌های شکل ۱۵، اشاره شده در جدول ۱۱، حاکی از معنادار بودن تغییرات دمای سر شانه ابزار ناشی از اعمال ارتعاشات التراسونیک است. نتایج جدول ۱۱ و مقدار  $P$ -value مربوطه، مؤید همگونی واریانس بین گروه‌های مختلف است. در نتیجه می‌توان تحلیل واریانس (ANOVA) را مطابق جدول ۱۲ انجام داد.

با توجه به مقدار  $P=۰/۰۰۰$  (جدول ۱۲)، فرض صفر که برابری میانگین‌هاست رد می‌شود. این امر نشان از تأثیر نوع ارتعاش بر دمای سر شانه ابزار است. حال مطابق جدول ۱۳ باید بررسی نمود که تغییر کدام گروه ارتعاشی تفاوت معناداری نسبت به دیگر گروه‌ها بر دمای سر شانه ابزار ایجاد می‌کند.

جدول ۱۱: آمارهای توصیفی و آزمون همگونی واریانس دمای سر شانه ابزار UaFSW بر حسب تغییرات پارامتر دامنه و نوع ارتعاش

Table 11. Descriptive statistics and homogeneity tests of amplitude and vibration types effect on UaFSW tool tip temperature

آمارهای توصیفی دمای سر شانه ابزار								
ماکزیمم	مینیمم	فاصله اطمینان ۹۵٪ برای میانگین		انحراف استاندارد	انحراف معیار	میانگین	تعداد	پارامتر
		کران بالا	کران پایین					
۱۰۹/۹	۹۸/۵	۱۱۸/۰۵	۸۹/۴۸	۳/۳۲	۵/۷۵	۱۰۳/۷۷	۳	None
۱۵۵/۹	۱۳۲/۷	۱۷۲/۳۳	۱۱۳/۰۷	۶/۸۹	۱۱/۹۳	۱۴۲/۷۰	۳	L8
۱۳۴	۱۲۸/۲	۱۳۸/۲۷	۱۲۳/۸۶	۱/۶۷	۲/۹۰	۱۳۱/۰۷	۳	B8
۱۶۱/۷	۱۳۸/۴	۱۸۰/۳۴	۱۲۱/۸۰	۶/۸۰	۱۱/۷۸	۱۵۱/۰۷	۳	L16
۱۳۸/۱	۱۳۵/۵	۱۴۰/۱۱	۱۳۳/۶۲	۰/۷۵	۱/۳۱	۸۷/۱۳۶	۳	B16
۱۶۱/۷	۹۸/۵	۱۴۳/۰۵	۱۲۳/۱۳	۴/۶۴	۱۷/۹۹	۱۳۳/۰۹	۱۵	کل
			۱۳۷/۷۳	۱۲۸/۴۶	۲/۰۸	۸/۰۵	اثر ثابت	
			۱۵۵/۴۲	۱۱۰/۷۶	۸/۰۴	۸/۰۵	اثر تصادفی	

آزمون همگونی واریانس دمای سر شانه ابزار UaFSW

آمار لوین	درجه آزادی ۱	درجه آزادی ۲	سطح معناداری
۲/۸۷۸	۴	۱۰	۰/۰۸۰

جدول ۱۲: تحلیل واریانس دمای سر شانه ابزار UaFSW برحسب تغییرات دامنه و نوع ارتعاش

Table 12. Variance analysis of UaFSW tool shoulder tip temperature affected by amplitude and vibration types

سطح معناداری	F	میانگین مجذورات	درجه آزادی	جمع مجذورات	
۰/۰۰۰	۱۴/۹۶۳	۹۷۰/۲۹۶	۴	۳۸۸۱/۱۸۳	میان گروهی
		۶۴/۸۴۷	۱۰	۶۴۸/۴۶۷	درون گروهی
			۱۴	۴۵۲۹/۶۴۹	کل

جدول ۱۳: مقایسه میانگین‌های دمای سر شانه ابزار برحسب تغییرات پارامتر دامنه و نوع ارتعاش در روش LSD

Table 13. Comparison of tool shoulder tip temperature influenced by amplitude and vibration types in LSD method

فاصله اطمینان ۹۵٪		سطح معناداری (P-Value)	انحراف معیار	میانگین اختلاف	پارامتر	
کران بالا	کران پایین					
-۲۴/۲۸	-۵۳/۵۸	۰/۰۰	۶/۵۸	-۳۸/۹۳	L8	None
-۱۲/۶۵	-۴۱/۹۵	۰/۰۰	۶/۵۸	-۲۷/۳۰	B8	
-۳۲/۶۵	-۶۱/۹۵	۰/۰۰	۶/۵۸	-۴۷/۳۰	L16	
-۱۸/۴۵	-۴۷/۷۵	۰/۰۰	۶/۵۸	-۳۳/۱۰	B16	
۵۳/۵۸	۲۴/۲۸	۰/۰۰	۶/۵۸	۳۸/۹۳	None	L8
۲۶/۲۸	-۳/۰۲	۰/۱۱	۶/۵۸	۱۱/۶۳	B8	
۶/۲۸	-۲۳/۰۲	۰/۲۳	۶/۵۸	-۸/۳۷	L16	
۲۰/۴۸	-۸/۸۲	۰/۴۰	۶/۵۸	۵/۸۳	B16	
۴۱/۹۵	۱۲/۶۵	۰/۰۰	۶/۵۸	۲۷/۳	None	B8
۳/۰۲	-۲۶/۲۸	۰/۱۱	۶/۵۸	-۱۱/۶۳	L8	
-۵/۳۵	-۳۴/۶۵	۰/۰۱	۶/۵۸	-۲۰	L16	
۸/۸۵	-۲۰/۴۵	۰/۴۰	۶/۵۸	-۵/۸	B16	
۶۱/۹۵	۳۲/۶۵	۰/۰۰	۶/۵۸	۴۷/۳	None	L16
۲۳/۰۲	-۶/۲۸	۰/۲۳	۶/۵۸	۸/۳۷	L8	
۳۴/۶۵	۵/۳۵	۰/۰۱	۶/۵۸	۲۰	B8	
۲۸/۸۵	-۰/۴۵	۰/۰۶	۶/۵۸	۱۴/۲	B16	
۴۷/۷۵	۱۸/۴۵	۰/۰۰	۶/۵۸	۳۳/۱	None	B16
۸/۸۲	-۲۰/۴۸	۰/۴۰	۶/۵۸	-۵/۸۳	L8	
۲۰/۴۵	-۸/۸۵	۰/۴۰	۶/۵۸	۵/۸	B8	
۰/۴۵	-۲۸/۸۵	۰/۰۶	۶/۵۸	۱۴/۲	L16	

می‌باشد.

با توجه به جدول ۱۳ و مقادیر P مربوطه، مشخص می‌گردد که اعمال ارتعاشات محوری نسبت به حالت خمشی بر روی دمای سر شانه ابزار تأثیر بیشتری دارد و سبب افزایش بیشتر دمای این قسمت می‌شود. مطابق روابط ۱ الی ۳، با استخراج معادلات رگرسیون دمای سر شانه ابزار، به ترتیب در حالت‌های بدون ارتعاش، ارتعاش خطی و ارتعاش خمشی، نیز اثرپذیری بیشتر دمای ناحیه مذکور تحت ارتعاش محوری (با ضریب ۱۱/۸) قابل اثبات

$$Temperature = 115 - 5.67 \times \text{welding Speed} \quad (۱)$$

$$Temperature = 104 + 11.8 \times \text{Vibration}_{(L)} - 0.13 \times \text{Welding Speed} \quad (۲)$$

$$Temperature = 127 + 2.90 \times \text{Vibration}_{(B)} - 2.10 \times \text{Welding Speed} \quad (۳)$$



و دامنه ارتعاشات التراسونیک است. به نحوی که مستحکم‌ترین جوش حاصل از اتخاذ سرعت پیشروی  $0/24\text{mm/rev}$  و دامنه ارتعاشی ماکزیمم ۱۶ میکرومتر، با استحکام نهایی  $203/451$  مگاپاسکال به دست آمد. شکل‌گیری اتصال با استحکام زیاد در فرایند UaFSW با مود خمشی همراه با دامنه ارتعاشی ۱۶ میکرومتر، قابل توجیه است. به این ترتیب که سرعت‌های جوشکاری بالا با این که کاهش دمای منطقه جوش را به همراه دارد، اما به دلیل اغتشاش بیشتر مواد تحت اعمال ارتعاشات خمشی، ضعف حاصل از کاهش حرارت جبران شده و ساختاری ریزدانه و مستحکم برای اتصال ایجاد می‌نماید.

در نهایت، با ملاحظه کلیه نتایج مستخرج از این مطالعه می‌توان به این نکته بسیار بااهمیت اشاره نمود که اعمال ارتعاشات التراسونیک از نوع خمشی با دامنه ۱۶ میکرومتر نسبت به دامنه ۸ میکرومتر، کاهش نیروهای فروری ابزار درون قطعه کار، افزایش سرعت جوشکاری و درعین حال حصول جوش با استحکام بالا را در پی خواهد داشت.

### ۶- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر به منظور مقایسه درست اثرگذاری نوع و دامنه ارتعاشات التراسونیک بر فرایند جوشکاری اغتشاشی اصطکاکی ارتعاشی (UaFSW)، مجموعه ابزار و ترانسیدوسر منحصر به فرد طراحی، آنالیز مودال و ساخته شد. مجموعه ابزار مذکور قابلیت ارتعاش در دو مود محوری و خمشی به ترتیب در فرکانس‌های  $23800$  و  $19800$  هرتز را داراست. همچنین برای ارزیابی اثر نوع و دامنه‌های مختلف ارتعاش در سرعت‌های پیشروی جوشکاری  $0/08$ ،  $0/16$  و  $0/24\text{mm/rev}$ ، خروجی‌های فرایند از قبیل نیروی محوری ابزار در لحظه فروری و حین جوشکاری، دمای ماکزیمم سر شانه ابزار و استحکام کششی نهایی جوش اندازه‌گیری و مقایسه گردید و نتایج ذیل حاصل شد:

۱. در ساخت ترانسیدوسر التراسونیک، استفاده از پشت‌بند فولادی و متمرکزکننده آلومینیومی به ترتیب بیشترین دمپ و انتقال موج فراصوتی را در پی دارد.
۲. اتصال حاصل از اعمال ارتعاشات در مود خمشی در ازای افزایش نیروی جوشکاری، خصوصاً در سرعت‌های پیشروی بالاتر، از کیفیت و استحکام بهتری برخوردار است.
۳. اعمال ارتعاشات در هر دو مود خمشی و محوری کاهش نیروی فروری ابزار به داخل قطعه کار را سبب می‌شود.
۴. افزایش دامنه ارتعاشات در مود محوری و خمشی، استحکام نهایی جوش را به ترتیب تضعیف و تقویت می‌نماید.

### فهرست علائم

B-8	مود خمشی و دامنه ارتعاش ۸ میکرومتر
B-16	مود خمشی و دامنه ارتعاش ۱۶ میکرومتر
L-8	مود محوری و دامنه ارتعاش ۸ میکرومتر

### ۵-۴ اثر نوع و دامنه ارتعاشات بر استحکام نهایی جوش UaFSW

لازم به ذکر است، با استناد به نتایج تاکنون به دست آمده، افزایش بیشتر دمای سر ابزار در مود محوری و یا افزایش نیروی محوری وارد بر ابزار در مود خمشی به تنهایی نمی‌توانند نشان از تأثیر مثبت نوع ارتعاش بر استحکام و کیفیت جوش حاصل باشند. لذا به منظور مقایسه اثرگذاری نوع و دامنه ارتعاشات بر کیفیت اتصال در فرایند UaFSW، استحکام نهایی هر یک از نمونه‌ها توسط دستگاه کشش اندازه‌گیری شد. مطابق شکل ۱۶ نتایج تست کشش نمونه‌ها حاکی از آن است که افزایش ۲ برابری دامنه ارتعاشات محوری نه تنها کمکی به افزایش استحکام نمی‌کند، بلکه کاهش شدید حدود ۲۰ درصدی استحکام و کیفیت جوش را به همراه دارد. دلیل این رخداد را می‌توان، عدم امتزاج مناسب مواد در حالت ارتعاشات محوری دانست؛ اما در طرف دیگر، افزایش ۲ برابری دامنه ارتعاشات در مود خمشی نشان از افزایش حدود ۱۰ درصدی استحکام جوش دارد. دلیل این افزایش استحکام را می‌توان در نحوه مشارکت مؤثر در امتزاج مناسب مواد خمیری دانست. ابزار در حالت ارتعاش محوری صرفاً بر روی درز جوش بالا و پایین می‌رود. این حرکت باعث نوسانی شدن نیروی عمودی ایجادکننده اصطکاک توسط شانه ابزار و کاهش درگیری سطح مؤثر بین در عملیات اغتشاش می‌شود [۱۲]. در حالی که انحنای سر ابزار در حال ارتعاش در مود خمشی، مطابق آنچه در شکل ۵-۴ نشان داده شده است، سبب می‌شود تا بین حرکت دورانی توسعه یافته تری نسبت به حالت بدون ارتعاش درون منطقه جوش انجام دهد. این امر سبب افزایش سطح مؤثر بین در اغتشاش مواد خمیری و در نتیجه افزایش کیفیت جوش خواهد شد.

نتیجه دیگری که از دیاگرام شکل ۱۶ قابل برداشت است، افزایش استحکام جوش در مود خمشی در ازای افزایش سرعت پیشروی جوشکاری

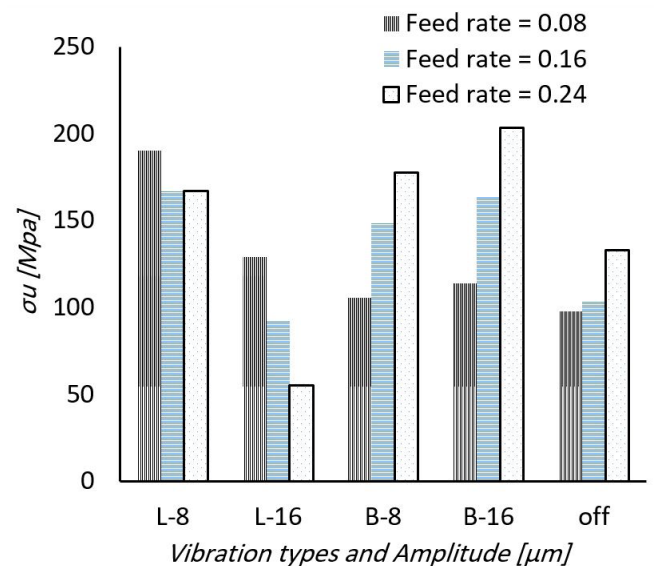


Fig. 16. Effect of vibration types and amplitude on weld ultimate tensile strength obtained from the UaFSW process

شکل ۱۶: تأثیر نوع و دامنه ارتعاشات بر استحکام نهایی جوش حاصل از فرایند UaFSW

L-16 مود محوری و دامنه ارتعاش ۱۶ میکرومتر

علامت یونانی

$\lambda$  طول موج ( $\mu\text{m}$ )

$\mu$  ضریب میرایی

## منابع

- [10] K. Park, *Development and Analysis of Ultrasonic assisted friction stir welding process*, The University of Michigan, (2009).
- [11] L. Ruilin, H. Diqu, L. Luocheng, Y. Shaoyong, Y. Kunyu, A study of the temperature field during ultrasonic-assisted friction-stir welding, *Int J Adv Manuf Technol*, 81 (2014) 2087-2098.
- [12] L. Shi, C.S. Wu, X.C. Liu, Modeling the effects of ultrasonic vibration on friction stir welding, *Materials Processing Technology*, 222 (2015) 91-102.
- [13] K. J. Dharmaraj, C.D. Cox, A. M. Strauss, G. E. Cook, Ultrasonic thermometry for friction stir spot welding, *Measurement*, 49 (2014) 226–235.
- [14] Y. Rostamian, A. Seidanloo, H. Sohrabpoor, R. Teimouri, Experimental Studies on ultrasonically associated stir welding of AA6061, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 15 (2014) 335-346.
- [15] K. Panneerselvam, S. Aravindan, A. N. Haq, Hybrid of ANN with genetic algorithm for optimization of frictional vibration joining process of plastics, *Int J Adv Manuf Technol*, 42 (2009) 669-677.
- [16] H. Montazerolghaem, M. Badrossamay, A. R. Fadaei Tehrani, Investigation of Vibration Assisted Friction Stir Welding and Comparison with Conventional Friction Stir Welding, *3rd International Conference on Manufacturing Engineering*, (2011).
- [17] K. Nakamura, *Ultrasonic Transducers: Materials and Design for Sensors, Actuators and Medical Applications*, 1st ed: Woodhead Publishing, (2012).
- [18] www.matweb.com.
- [19] J. Zhang, R.J. Perez, E. J. Lavernia, Documentation of damping capacity of metallic, ceramic and metal-matrix composite materials, *Journal of Materials Science*, 28 (1993) 2395–2404.
- [20] K. Elangovan, V. Balasubramanian, Influences of tool pin profile and tool shoulder diameter on the formation of friction stir processing zone in AA6061 aluminium alloy, *Materials and Design*, 29 (2008) 362–373.
- [21] H. Su, C.S. Wu, M. Bachmann, M. Rethmeier, Numerical modeling for the effect of pin profiles on thermal and material flow characteristics in friction stir welding, *Materials and Design*, 77 (2015) 114–125.
- [22] A. Arora, A and T. Deb Roy, Toward optimum friction stir welding tool shoulder diameter, *Scripta Materialia*, [1] D. Ensminger, L. J. Bond. *Ultrasonics, Fundamentals, Technologies and Applications*. 3rd ed: CRC Press, D. Ensminger, L.J. Bond, Ultrasonics, Fundamentals, Technologies and Applications, 3rd ed: CRC Press, Taylor & Francis Group, (2012).
- [2] A. Barani, S. Amini, H. Paktinat, Built-up edge investigation in vibration drilling of Al2024-T6, *Ultrasonics*, 45 (2014) 1300–1310.
- [3] R. Nosouhi, S. Behbahani, S. Amini, M. R. Khosrojerdi, Experimental and analytical study of the elliptical vibration assisted turning process with the dynamic friction model, *Engineering Manufacturing*, 228 (6) (2014) 837–846.
- [4] S. Amini, M. Mohammad Nazari, A. Rezaei, Bending vibrational tool for friction stir welding process, *Int J Adv Manuf Technol*, 222 (2015) 91-95.
- [5] S. Amini, M.R. Amiri., A. Barani, Investigation of the effect of tool geometry on friction stir welding of 5083-O aluminum alloy, *Int J Adv Manuf Technol*, 76 (1-4) (2015) 255–61.
- [6] M. Vahdati, R. Mahdavejad, S. Amini, A. Abdullah, K. Abrinia, Design and manufacture of vibratory forming tool to develop ultrasonic vibration assisted incremental sheet metal forming process, *Modares Mech Eng*, 14(11) (2014) 68–76. (in Persian).
- [7] S. Amini, M.R. Amiri, Study of ultrasonic vibrations' effect on friction stir welding, *Int J Adv Manuf Technol*, 73 (2014) 127-135.
- [8] Y.F. Sun, Y. Konishi, M. Kamai, H. Fujii, Microstructure and mechanical properties of S45C steel prepared by laser-assisted friction stir welding, *Materials and Design*, 47 (2013) 842–849.
- [9] X. Liu, C. Wu, G. Kumar Padhy, Characterization of plastic deformation and material flow in ultrasonic vibration enhanced friction stir welding, *Scripta Materialia*, 102 (2015) 95–98.

[24] S. Mandal, J. Rice, A.A. Elmustafa, Experimental and numerical investigation of the plunge stage in friction stir welding, *Journal of Materials Processing Technology*, 203 (2008) 411–419.

64 (2011) 9–12.

[23] www.astm.org, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, p. E8/E8M – 11, (2012).

Please cite this article using:

A. Rezaei Shahreza, S. Amini, Manufacturing a Single Ultrasonic Tool Set of Vibrational friction stir welding in Bending and Axial Modes, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(3) (2018) 601-618.  
DOI: 10.22060/mej.2017.12587.5375

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:





