



## مدل سازی عددی ابزارهای غلتکی جوش کاری فراصوتی مواد گرمانرم

حبیب دارابی بختیار<sup>1</sup>، عباس پاک<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

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

## چکیده

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 8 بهمن 1396

پذیرش: 2 اردیبهشت 1397

ارائه در سایت: شهریور 1397

## کلیدواژگان:

جوش کاری فراصوتی پیوسته

مواد گرمانرم

ابزار غلتکی

انتقال دهنده

شیبه سازی اجزا محدود

جوش کاری فراصوتی یک روش نوین و اقتصادی برای اتصال قطعات از جنس مواد گرمانرم مانند پلاستیک، منسوجات و مواد غیرهمجنس به ویژه در تولید انبوه و با کیفیت است. مهم ترین ویژگی های جوش کاری فراصوتی که آن را از روش های دیگر جوش کاری و اتصال مواد گرمانرم متمایز می کند حداقل تأثیر گذاری بر ساختار مواد، تمیزی و استحکام بالای اتصال به همراه سرعت زیاد انجام فرایند است. انتقال دهنده و ابزار از اجزای اصلی سیستم جوش کاری فراصوتی هستند که علاوه بر انتقال امواج و تمرکز مناسب انرژی، فشار لازم برای نگهداری سطوح اتصال ذوب شده به منظور تشکیل جوش را تأمین می کنند. به همین دلیل نوع و ویژگی های ابزار از نظر شکل هندسی، ابعاد و جنس تأثیر قابل توجهی بر کیفیت جوش دارد. هدف از این مقاله بررسی طراحی ابزار نوع غلتکی به روش حل عددی با استفاده از روش اجزاء محدود می باشد. در این پژوهش طراحی و مدل سازی ابزار غلتکی جوش کاری پیوسته با استفاده از روش عددی اجزا محدود توسط نرم افزار ABAQUS 6.12 انجام شده است. مقدار فرکانس طبیعی و شکل مود و سایر پارامترهای طراحی و رفتار مجموعه در حین اعمال نوسانات برای 4 نوع ابزار غلتکی مختلف شامل نوع مخروطی شیاردار، پلهای شیاردار، پلهای بدون شیار و نوع زنگوله ای شیبه سازی شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که انتقال دهنده پلهای بدون شیار بیشترین ضریب تقویت را دارد لیکن توزیع جابجایی شعاعی در ابزار و انتقال دهنده های مخروطی و پلهای نوع شیار دار نسبت به سایر ابزارها غیر یکنواخت تر می باشد. همچنین در ابزار و انتقال دهنده نوع پلهای بدون شیار و زنگوله ای بازده تبدیل نوسانات طولی به شعاعی بالاتر و توزیع جابجایی شعاعی به صورت یکنواخت تر می باشد که در نتیجه شرایط طراحی بهینه را بهتر تأمین نموده است.

## Numerical modeling of roller tools for ultrasonic welding of thermoplastic materials

Habib Darabi Bakhteyar<sup>1</sup>, Abbas Pak<sup>2\*</sup>

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

2- Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

\* P.O.B. 651754161, Hamedan, Iran, a.pak@basu.ac.ir

## Article Information

Original Research Paper  
Received 28 January 2018  
Accepted 22 April 2018  
Available Online September 2018

## Keywords

Continuous Ultrasonic Welding  
Thermoplastic Materials  
Roller Tool  
Horn  
FEM Modeling

## Abstract

Ultrasonic welding is an economic and advanced method for connecting such parts like plastic, fabrics, metals and dissimilar materials, especially for mass and high quality production assembly parts. The most important and distinguished property of this method to other fabrics and plastic sewing methods is the minimum destruction of materials and fibers because the maximum produced heat occurs in the contact interface. Horn is one of the basic parts of the ultrasonic welding which in addition on the transmitting waves and appropriate energy concentration, provides the necessary pressure to keep the melted joint interfaces together in order to form a weld. That's why horn characteristics in terms of geometry and dimensions have a significant impact on the quality of welding. The purpose of this paper is to study the design of a roller type tool by numerical method using finite element method. In this research, the design and modeling of continuous welding roller tools was performed using numerical finite element method by ABAQUS 6.12 software. By simulating and analyzing include natural frequency and harmonic analysis, the frequency, mode shape and other design parameters and behavior of the collection during applying oscillations for 4 types of horns include conical integrated, stepped with grooves integrated, stepped without grooves integrated and bell-like horn were derived. The result of the different horns shows that the stepped without groove horn has the highest gain, but the radial displacement distribution in the conical integrated and stepped with groove horns is more non-uniform than other horns. Also, in the stepped without groove and bell-like horn, the efficiency of the conversion of longitudinal to radial displacement and the uniform distribution of radial displacement is more uniform, which results in better optimal design conditions.

## 1- مقدمه

قطعات همجنس و غیر همجنس بویژه قطعات از جنس مواد

گرمانرم مانند پلاستیک و منسوجات در تولید انبوه و با کیفیت

جوش کاری فراصوتی یک روش نوین و اقتصادی برای اتصال

## Please cite this article using:

H. Darabi Bakhteyar, A. Pak, Numerical modeling of roller tools for ultrasonic welding of thermoplastic materials, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 26-33, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

استفاده از ابزار دوار (غلتکی) امکان جوش کاری پیوسته و بدون گیرکردن مواد بین ابزار و سندان و پاره‌شدگی مواد جوش داده شده و نیز افزایش سرعت و کیفیت جوش را فراهم می‌نماید؛ از طرفی همان‌طور که ذکر شد در جوش کاری مواد گرمانرم نوسانات مافوق صوت باید به‌صورت عمود بر فصل مشترک اتصال اعمال شوند در نتیجه ابزار دوار باید نوسانات طولی را به شعاعی تبدیل کرده تا شرایط موردنیاز برای جوش کاری پیوسته مواد گرمانرم فراهم گردد [10].

هدف از این مقاله بررسی طراحی ابزار نوع غلتکی به روش حل عددی با استفاده از روش اجزاء محدود می‌باشد. در این پژوهش 4 نوع ابزار دوار از جنس آلومینیوم Al 7075-T6 توسط نرم‌افزار ABAQUS 6.12 مدل‌سازی شده است. مدل‌سازی ابزارها به گونه‌ای انجام شده که حداکثر دامنه ارتعاشات شعاعی و حداقل دامنه ارتعاشات محوری در محیط پیرامون انتقال دهنده وجود داشته باشد. همچنین جهت افزایش کیفیت و یکنواختی جوش در سرتاسر محل جوش، یکنواختی دامنه ارتعاشات در محیط پیرامون ابزار دوار مورد توجه قرار گرفته است. در این ابزارها فرکانس تشدید و دامنه جابجایی سطح کاری بیرونی (شعاعی) نسبت به دامنه نوسانات طولی از مشخصه‌های اصلی مبدل نوسانات طولی به شعاعی می‌باشند.

## 2- طراحی و مدل‌سازی عددی

در طراحی ابزار و انتقال دهنده امواج فراصوتی از روشهای تحلیلی، تجربی و عددی استفاده می‌گردد که هر یک از این روشها مزایا و معایبی دارند [9]. طراحی تحلیلی ابزارهای ساده با استفاده از حل معادلات انتشار طولی موج (معادله وبستر) انجام می‌شود. این روش طراحی (رابطه 1) برای حالت انتشار طولی امواج و صرفنظر از جابجایی شعاعی در ابزار به کار می‌رود.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\omega^2}{C^2} u = 0 \quad (1)$$

معادله وبستر فقط در مواردی که ابعاد محوری ابزار بسیار بیشتر از ابعاد شعاعی آن است مناسب است. لذا در طراحی ابزار با شکل دایره‌ای و متقارن محوری از معادله (2) که شکل کلی‌تر معادله وبستر است و با نام معادله ابزار هلمهوتز<sup>2</sup> شناخته شده استفاده می‌گردد [10].

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + k^2 u_z = 0 \quad (2)$$

است. مهم‌ترین ویژگی‌های جوش کاری فراصوتی که آنرا از روش‌های دیگر جوش کاری و اتصال مواد گرمانرم متمایز می‌کند حداقل تاثیرگذاری بر ساختار مواد، تمیزی و استحکام بالای اتصال به همراه سرعت زیاد انجام فرایند است که در نتیجه در مقایسه با سایر فرایندها بهره‌وری بالایی ایجاد می‌نماید [1-4].

در جوش کاری فراصوتی مواد گرمانرم<sup>1</sup> نوسانات عمود بر فصل مشترک اتصال اعمال می‌گردند، نوسانات اعمال‌شده سبب ایجاد تنش‌های متناوب در سطوح فصل مشترک قطعات جوش داده شده می‌شوند. این تنش‌ها در نوک ناهمواری موجود در ریز ساختار ماده به دلیل تمرکز تنش به محدوده تنش تغییر شکل پلاستیک می‌رسد. نرم شدن مواد در اطراف نوک ناهمواری‌های ریز، جذب انرژی را افزایش داده سبب افزایش دما در فصل مشترک و به دنبال آن افزایش تحرک زنجیره‌های پلیمری شده که این امر سبب اختلاط شدید زنجیره‌های پلیمری در فصل مشترک شده و منجر به ایجاد یک درز جوش می‌شود. در این فرایند کیفیت درز جوش وابسته به مقدار انرژی فراصوتی آزاد شده در ناحیه جوش است و این انرژی تولید شده در منطقه جوش با فرکانس، دامنه نوسانات، سطح تماس و سرعت تشکیل درز جوش و ویژگی‌های انتقال دهنده و ابزار متناسب است. مطابق شکل 1 انتقال‌دهنده (بوستر) و ابزار (هورن) یکی از اجزای اصلی سیستم جوش کاری فراصوتی است که علاوه بر انتقال امواج و تمرکز مناسب انرژی، فشار لازم برای نگهداری سطوح اتصال ذوب‌شده به‌منظور تشکیل جوش را تأمین می‌کند. به همین دلیل نوع و ویژگی‌های ابزار از نظر شکل هندسی، ابعاد و جنس تأثیر قابل توجهی بر کیفیت جوش داشته و طراحی بهینه آن مورد توجه محققان و صنعتگران قرار گرفته است [5-9]. در جوش کاری فراصوتی مواد گرما نرم بویژه منسوجات از دو نوع ابزار بصورت ثابت و دوار استفاده می‌شود.

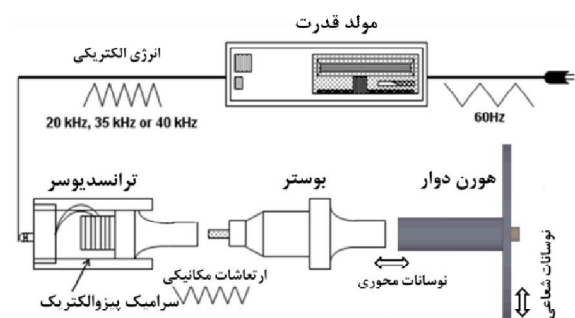


Fig. 1 Vibration system used for continuous ultrasonic welding

شکل 1 سیستم ارتعاشی مورد استفاده در جوش کاری فراصوتی پیوسته

<sup>2</sup> Helmholtz horn equation

<sup>1</sup> Thermoplastic

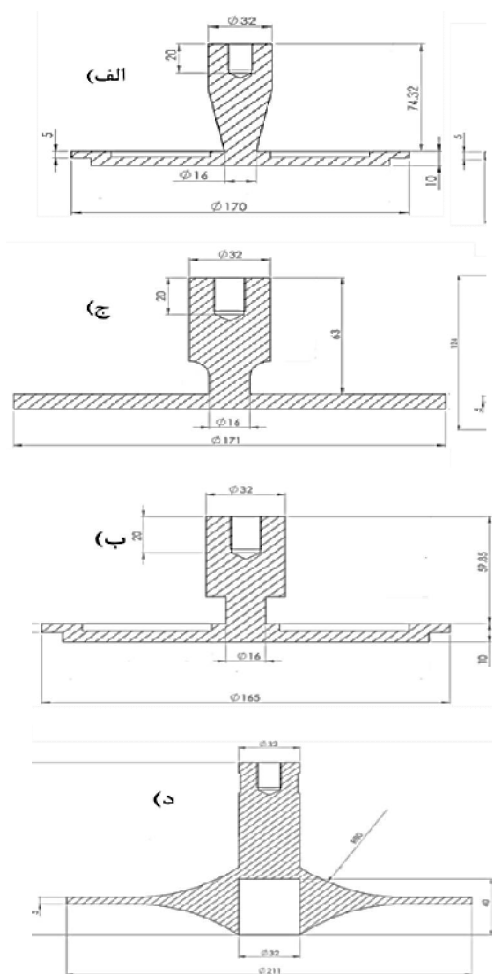


Fig. 3 Designed tools a) Conical with grooves type, b) Stepped with grooves type, c) Stepped without grooves type, d) Bell-like type

شکل 3 ابزارهای طراحی شده (الف مخروطی شیاردار، ب) پله‌ای شیاردار، (ج) پله‌ای بدون شیار، (د) زنگوله‌ای

## 2-1- تحلیل مودال

در جوش کاری مواد گرمانرم برای کاهش احتمال تخریب مواد و همچنین کاهش مقدار میرایی از فرکانس‌های پایین استفاده می‌گردد [3]. لذا فرکانس طراحی برابر با 20600Hz در نظر گرفته شد.

در طراحی مدل اولیه این ابزارها به منظور ایجاد شرایط تشدید بر اساس فرکانس طراحی انتخاب شده، طول محور و قطر دیسک برابر نیم طول موج ( $\lambda/2$ ) انتخاب و سپس با تغییر هندسه مدل ابعاد نهایی جهت تبدیل کامل نوسانات طولی به شعاعی و جابجایی یکنواخت سطح محیطی غلتک با انجام تحلیل مودال و مشاهده شکل مود در فرکانس طراحی انجام شد. با توجه به رابطه (3)، طول موج در ماده موردنظر (ماده بی‌نهایت) و در فرکانس 20600Hz به‌طور تقریبی برابر 250mm است، پس قطر اولیه غلتک، برابر 125mm در نظر گرفته شده است.

در روش تجربی طراحی ابزار و انتقال دهنده برای به دست آوردن ابعاد آنها از نمودارهای استاندارد استفاده می‌شود. در این روش معمولاً طول انتقال دهنده یا ابزار 2 الی 3 میلی‌متر بیشتر در نظر گرفته می‌شود سپس با آزمون و سعی و خطا ابعاد نهایی تعیین می‌گردد. این روش فقط برای ابزارها با هندسه ساده و پرکاربرد مورد استفاده قرار می‌گیرد و معمولاً پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد [11].

در روش طراحی و مدل‌سازی عددی با فرض تخمین هندسه ابزار به هندسه‌ی ساده‌تر و کوچک‌تری به نام شبکه که شامل گره‌هایی است، رفتار هر گره بوسیله معادله مناسب توصیف می‌گردد. با بکارگیری شرایط مرزی مناسب می‌توان این معادله را برای کل مدل مورد نظر حل کرد. لذا امکان طراحی و بررسی رفتار ابزار غلتکی با هندسه پیچیده توسط این روش وجود دارد. در طراحی ابزار غلتکی به‌منظور تبدیل نوسانات طولی به شعاعی مانند شکل 2 از تغییر سریع سطح مقطع استفاده می‌گردد. شکل مود ارتعاشی (مود تبدیل نوسانات محوری<sup>1</sup> به شعاعی<sup>2</sup>)، مقدار فرکانس تشدید، حداقل نوسانات محوری در محیط پیرامون ابزار، حداکثر دامنه نوسانات شعاعی در محیط پیرامون ابزار و یکنواختی آن در محیط پیرامون ابزار از عوامل مؤثر در جوش کاری فراصوتی است [9، 10]، که در طراحی و مدل‌سازی ابزار غلتکی در نظر گرفته شده است. در نتیجه با در نظر گرفتن موارد مذکور و به ترتیب به‌دلیل بازده بالای انتقال دهنده‌های مخروطی، ضریب تقویت دامنه بزرگ در انتقال‌دهنده پله‌ای و بهبود نحوه توزیع دامنه انتقال دهنده زنگوله‌ای، 4 نوع ابزار مختلف شامل نوع مخروطی شیاردار، پله ای شیاردار، پله‌ای بدون شیار و نوع زنگوله‌ای مطابق شکل 3 طراحی و مدل‌سازی گردیده است [9-11].

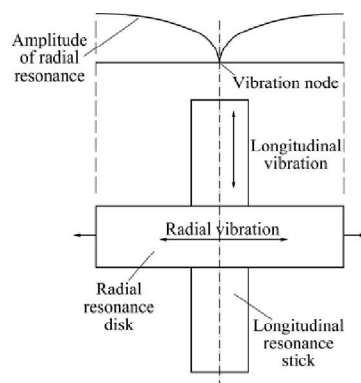


Fig. 2 The mechanism of longitudinal vibration to radial change

شکل 2 مکانیزم تبدیل ارتعاشات طولی به شعاعی [10]

<sup>1</sup> Longitudinal

<sup>2</sup> Radial

بیشترین مقدار باشد. از طرفی نوسانات محوری در جوش کاری مواد گرمانرم باعث اتلاف انرژی در مجموعه می شوند. لذا مقدار دامنه نوسان محوری باید در کمترین مقدار قرار گیرد. لذا جهت بررسی یکنواختی دامنه ارتعاشات و نحوه توزیع جابجایی ها، نمودار جابجایی شعاعی و محوری به ترتیب در مسیرهایی مطابق شکل 6 در محیط پیرامون غلتک و در راستای قطر غلتک ها تعریف و نمودار تغییرات دامنه ارتعاشات و توزیع جابجایی ها در مسیرهای تعریف شده بدست آمده است. شکل 7 تغییرات بدست آمده برای دامنه نوسانات در محیط پیرامون ابزار غلتکی را نشان می دهد. نمودار جابجایی شعاعی و محوری برای ابزارهای غلتکی طراحی شده نیز در شکل 8 نشان داده شده است.

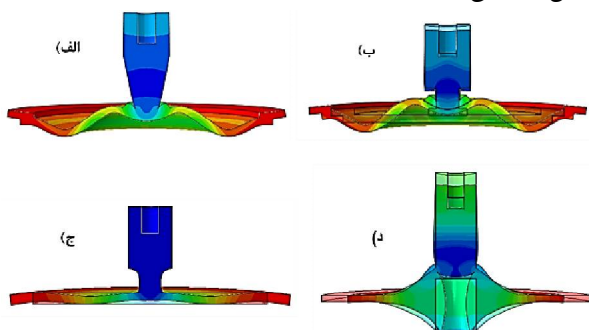
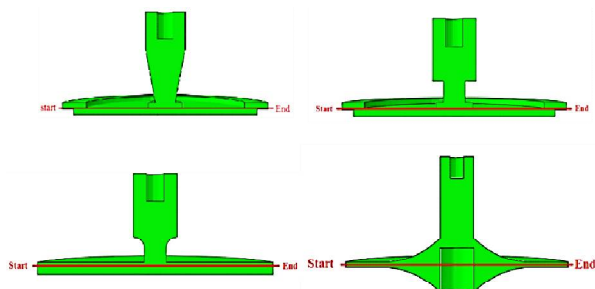
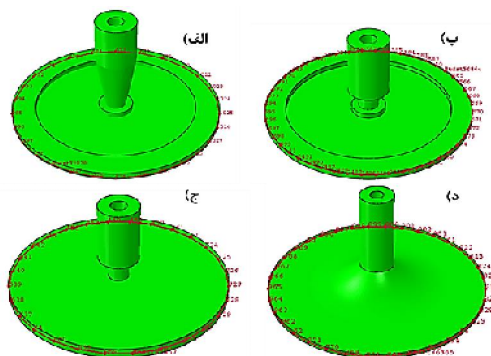


Fig. 5 The mode shape of designed tools a) Conical with grooves type, b) Stepped with grooves type, c) Stepped without grooves type, d) Bell-like type

شکل 5 شکل مود ابزارهای طراحی شده (الف) مخروطی شیاردار، (ب) پله ای شیاردار، (ج) پله ای بدون شیار، (د) زنگوله ای



شکل 6 مسیرهای تعریف شده جهت استخراج نمودارهای تغییرات دامنه جابجایی



شکل 7 مسیرهای تعریف شده جهت استخراج نمودارهای تغییرات دامنه جابجایی

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad (3)$$

جنس غلتک ها با توجه به مقاومت خستگی بالا، جرم و امپدانس مکانیکی پایین و همچنین قابلیت ماشین کاری بالا از جنس آلومینیوم Al 7075-T6 انتخاب شده است. خواص Al 7075-T6 در جدول 1 نشان داده شده است.

برای مشاهده همه ی شکل مودهای ارتعاشی و اثرات آن ها تمامی شبیه سازی ها، به صورت سه بعدی انجام گردید، همچنین المان از نوع C3D20R انتخاب و شبکه بندی شده است (مطابق شکل 4). با انجام تحلیل مودال در حالت کاملاً آزاد فرکانس طبیعی، شکل مودها و یکنواختی دامنه ارتعاشات بررسی گردید.

شکل 5 شکل مود ارتعاشی ابزارهای طراحی شده را در فرکانس 20600Hz نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود تمامی ابزارها در شکل مود تبدیل ارتعاشات محوری به شعاعی نوسان می کنند لذا جهت انجام جوش کاری منسوجات مناسب هستند.

جدول 1 خواص Al 7075-T6

چگالی	ضریب پواسون	مدول یانگ	سرعت انتشار صوت (m/s)
2823	0/31244	74/226	5134/6

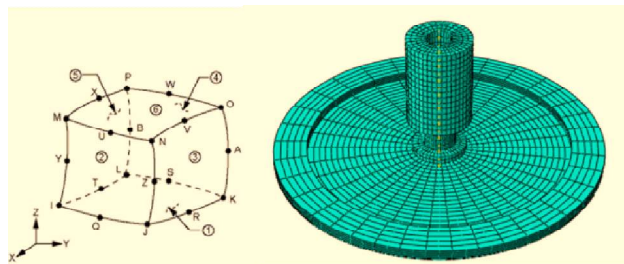


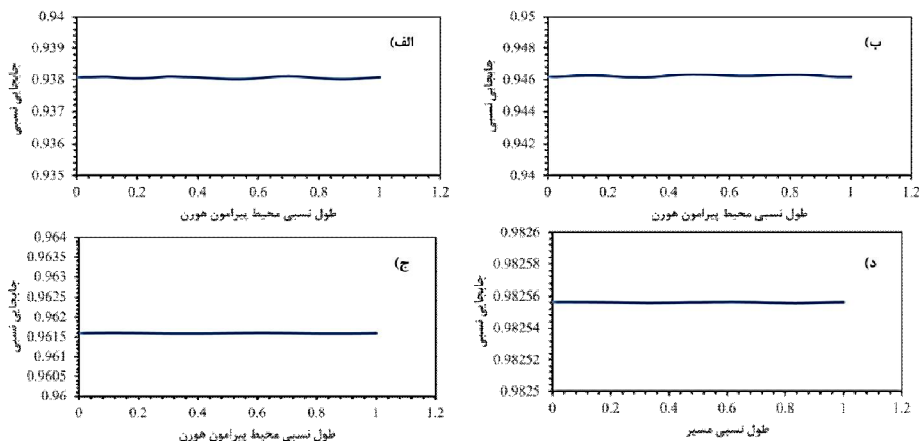
Fig. 4 Type of element and tool meshing

شکل 4 نوع المان و شبکه بندی ابزار

## 2-2- تحلیل هارمونیک

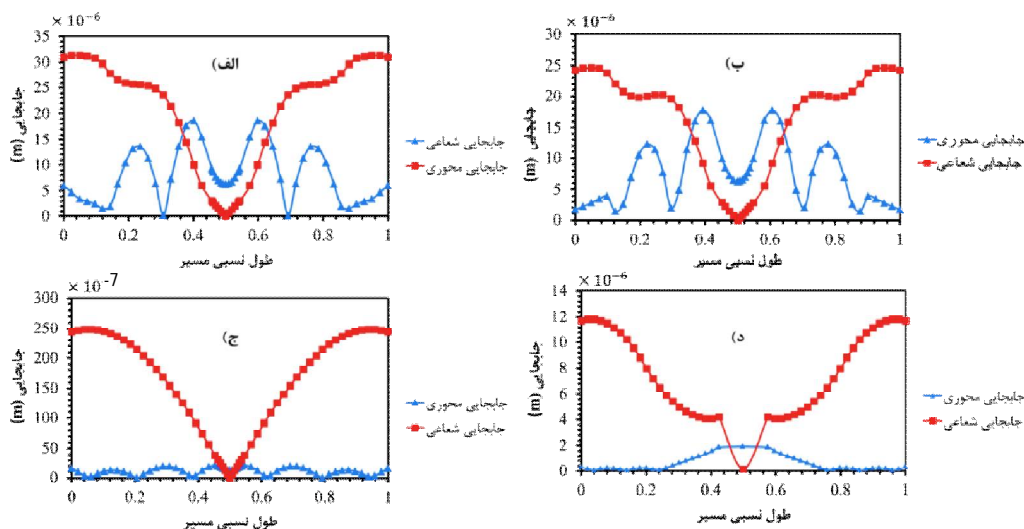
پس از انجام تحلیل مودال (فرکانس طبیعی)، جهت بررسی نحوه توزیع جابجایی شعاعی و توزیع تنش در محیط پیرامون غلتک و همچنین ضریب تبدیل ابزار غلتکی تحلیل هارمونیک انجام گردید. در این تحلیل یک جابجایی با دامنه ای متناسب با دامنه جابجایی ترانسدیوسر (30 میکرومتر) به سطح ورودی انتقال دهنده غلتکی اعمال و نتایج آن استخراج گردید.

با توجه به اینکه در جوش کاری فراصوتی مواد گرمانرم نوسانات شعاعی نقش اصلی را دارند باید دامنه این نوسانات در



**Fig.7** Diagram of displacement amplitude in the circumference for a) Conical with grooves type, b) Stepped with grooves type, c) Stepped without grooves type, d) Bell-like type

شکل 7 نمودار تغییرات دامنه جابجایی در محیط پیرامون الف) ابزار مخروطی شیاردار ب) ابزار پله‌ای شیاردار ج) ابزار پله‌ای بدون شیار د) ابزار زنگوله‌ای



**Fig.8** Diagram of axial and radial displacements for a) Conical with grooves type, b) Stepped with grooves type, c) Stepped without grooves type, d) Bell-like type

شکل 8 نمودار جابجایی‌های محوری و شعاعی در الف) ابزار مخروطی شیاردار ب) ابزار پله‌ای شیاردار ج) ابزار پله‌ای بدون شیار د) ابزار زنگوله‌ای

پیوسته منسوجات باید میزان تنش در این ناحیه بحرانی بررسی و کنترل شود. نمودارهای توزیع تنش حاصل از تحلیل هارمونیک در شکل 9 نشان داده است.

### 3- بحث و بررسی نتایج

با توجه به اینکه یکی از موثرترین پارامتر در کیفیت جوش فراصوتی دامنه نوسانات می‌باشد و در جوش کاری پیوسته فراصوتی یکنواختی دامنه نوسانات تضمین کننده یکنواختی کیفیت اتصال در طول خط جوش است. با توجه به شکل 7 مشاهده می‌گردد که تغییرات دامنه نوسانات در محیط پیرامون ابزار غلتکی نوع زنگوله‌ای در حدود 0/01 درصد است و نسبت به سایر ابزارها یکنواخت‌ترین دامنه تغییرات را دارد.

در جوش کاری فراصوتی تنش‌های اعمالی به ابزارهای طراحی شده از دو قسمت تشکیل شده است؛ 1- تنش‌های ناشی از اعمال ارتعاشات فراصوتی 2- تنش‌های ناشی از اعمال بار استاتیکی به ابزار جهت انجام عمل جوش کاری.

در طراحی ابزارها باید به این نکته توجه کرد که توزیع تنش یکنواخت بوده و میزان تنش در نواحی بحرانی ابزار حداقل باشد، با توجه به اینکه تنش‌های ناشی از اعمال ارتعاشات به ابزار در نقاط گره ارتعاشی حداکثر است لذا طراحی ابزارها باید به گونه‌ای باشد که تا حد امکان در نواحی بحرانی گره ارتعاشی قرار نگیرد. در ابزارهای دوار جوش کاری پیوسته منسوجات فصل مشترک بین دیسک و پایه محل بحرانی می‌باشد و هندسه این ابزارها به گونه‌ای است که معمولاً در این محل بحرانی گره ارتعاشی قرار می‌گیرد لذا در طراحی ابزارهای دوار جوش کاری

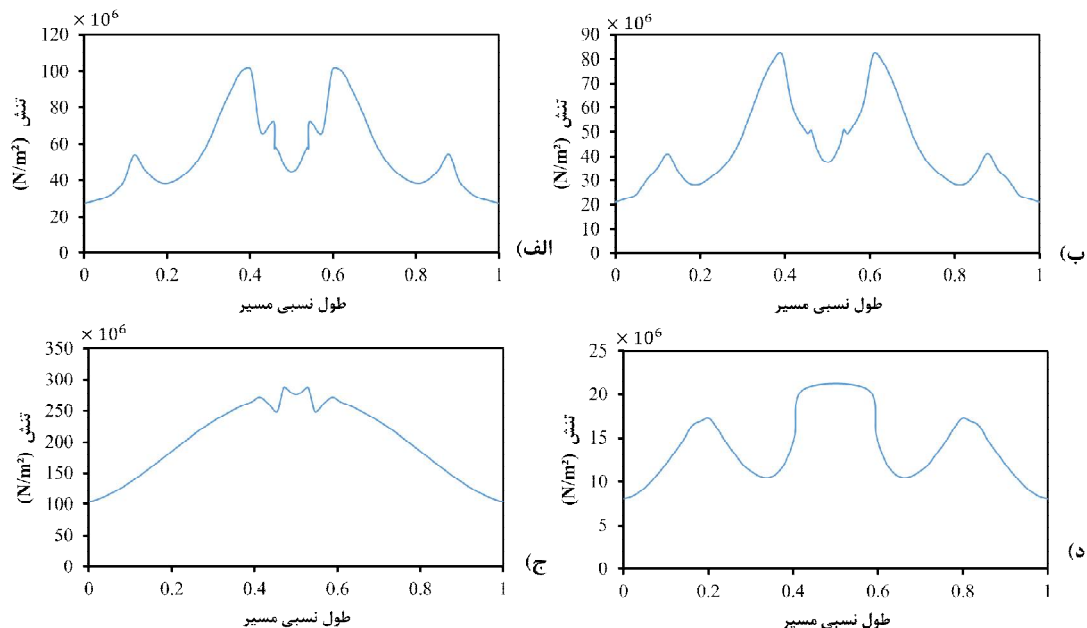


Fig.9 The stress distribution diagram for a) Conical with grooves type, b) Stepped with grooves type, c) Stepped without grooves type, d) Bell-like type

شکل 9 نمودار توزیع تنش در الف) ابزار مخروطی شیاردار ب) ابزار پله‌ای شیاردار ج) ابزار پله‌ای بدون شیار د) ابزار زنگوله‌ای

دامنه ارتعاشات شعاعی به طولی حدود 15 می باشد که نشان دهنده این است اگر چه ضریب تقویت بزرگتر است اما مقدار بیشتری از ارتعاشات به نوسان طولی در ابزار پله‌ای تبدیل شده است که به عبارتی اتلاف انرژی بیشتری دارد. در حالی که در نوع ابزار زنگوله‌ای اگرچه ضریب تقویت دامنه تقریباً نصف است اما نسبت به ابزار پله‌ای بیش از دو برابر از انرژی مصرفی صرف نوسان شعاعی و به عبارتی جوش کاری می گردد.

همان‌طور که در شکل 9 مشاهده می‌شود توزیع تنش و مقدار آن در ابزار زنگوله‌ای یکنواخت‌تر و کمتر می‌باشد لذا ابزار زنگوله‌ای از نظر تنش‌های اعمالی ناشی از ارتعاشات فراصوتی در وضع مطلوب تری قرار دارد.

جدول 2 نسبت دامنه جابجایی شعاعی به محوری ابزارهای طراحی شده

Table 2 The radial to axial displacement amplitude ratio of designed tools

ابزار	مخروطی شیاردار	پله‌ای شیاردار	پله‌ای بدون شیار	زنگوله‌ای
نسبت دامنه جابجایی شعاعی به محوری	5/14	14/42	15/23	36/6

جدول 3 ضریب تقویت ابزارهای طراحی شده

Table 3 The amplification factor of designed tools

ابزار	مخروطی شیاردار	پله‌ای شیاردار	پله‌ای بدون شیار	زنگوله‌ای
ضریب تقویت	5/24	4/03	4/237	1/96

با مقایسه نمودارهای جابجایی محوری و شعاعی ابزارها در شکل 8 می‌توان مشاهده کرد که ابزار زنگوله‌ای دارای بهترین توزیع دامنه جابجایی محوری می‌باشد و انتظار می‌رود که بالاترین راندمان را در جوش کاری داشته باشد. همچنین می‌توان نسبت دامنه جابجایی شعاعی به محوری را نیز به عنوان یک پارامتر در تعیین راندمان ابزار دوار معرفی کرد که مقدار این پارامتر برای ابزارهای طراحی شده در جدول 2 آورده شده است. با مشاهده نمودار جابجایی محوری و شعاعی ابزار می‌توان دید که حداکثر دامنه جابجایی شعاعی و حداقل دامنه جابجایی محوری در محیط پیرامون ابزار وجود دارد، همچنین با استفاده از رابطه (4) ضریب تقویت ابزارهای دوار بدست آمده و در جدول 3 نمایش داده شده است.

$$M = \frac{u_{out}}{u_{in}} \quad (4)$$

همان‌طور که مشاهده می‌شود ابزار پله‌ای بدون شیار دارای بیشترین ضریب تقویت می‌باشد لذا از این ابزار می‌توان در مواردی که نیاز به دامنه ارتعاشات زیاد جهت جوش کاری است مانند جوش کاری پلیمرهای نیمه کریستالی استفاده کرد.

در جدول 4 نتایج کامل بدست آمده از شبیه سازی ابزارهای مختلف نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ابزار زنگوله‌ای کمترین میزان تنش را دارد. از طرفی مشاهده می‌گردد که ابزار پله‌ای بیشترین ضریب تقویت را دارد اما نسبت

جدول 4 مقایسه پارامترهای طراحی و نتایج بدست آمده از شبیه سازی ابزارهای مختلف

Table 5 Comparison of design parameters and results obtained by simulation of different tools

نوع ابزار	مقدار فرکانس طراحی (Hz)	مقدار فرکانس مدل‌سازی (Hz)	محیطی ابزار (μm)	محوری محیطی ابزار (μm)	دامنه ارتعاشات (ارتعاشی) (Mpa)	بیشترین تنش (ارتعاشی) (Mpa)	ضریب تقویت شعاعی به طولی	نسبت دامنه تقویت × نسبت دامنه شعاعی به طولی (به طولی)	ضریب تبدیل کلی (ضریب)
مخروطی شیاردار	20600	20605	30/99	6/03	100/87	81/6	5/24	5/14	27
پله‌ای شیاردار	20600	20610	24/23	1/68	81/6	16	4/03	14/42	58
پله‌ای بدون شیار	20600	20616	24/375	16	271/47	0/32	4/237	15/23	64/5
زنگوله‌ای	20600	20621	11/71	0/32	20/59		1/96	36/6	71/7

#### 4- نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی ابزار نوع غلتکی جوشکاری فراصوتی مواد گرما نرم به روش حل عددی با استفاده از روش اجزاء محدود برای 4 نوع انتقال دهنده و ابزار دوار شامل نوع مخروطی شیاردار، پله‌ای شیاردار، پله‌ای بدون شیار و نوع زنگوله‌ای از جنس آلومینیوم Al 7075-T6 توسط نرم‌افزار ABAQUS 6.12 بررسی گردید. مدل‌سازی ابزارها به گونه‌ای انجام شده که حداکثر نسبت دامنه ارتعاشات شعاعی به محوری و بصورت یکنواخت در محیط پیرامون ابزار وجود داشته باشد. نتایج کلی این پژوهش را می‌توان بصورت زیر بیان نمود:

- ابزار پله‌ای بدون شیار بیشترین ضریب تقویت را دارا می‌باشد لذا برای کاربردهایی که به دامنه جابجایی زیاد نیاز دارند مناسب می‌باشد.

- ابزار پله‌ای بدون شیار و ابزار زنگوله‌ای دارای بهترین توزیع دامنه جابجایی می‌باشند.

- ابزار زنگوله‌ای دارای یکنواخت‌ترین توزیع دامنه ارتعاشات شعاعی است لذا انتظار می‌رود که بالاترین کیفیت جوش را نیز دارا باشد.

- با توجه به نسبت نوسان شعاعی به محوری در ابزار زنگوله‌ای مقدار اتلاف انرژی در جوش کاری فراصوتی مواد گرما نرم با استفاده از این ابزار کمتر خواهد شد.

- با توجه به توزیع تنش یکنواخت و مقدار پایین آن در ابزار زنگوله‌ای، از این ابزار می‌توان در کاربردهایی که نیازمند فشار جوش کاری بالایی است استفاده کرد.

#### 5- فهرست علائم

A	مساحت سطح مقطع ابزار (m <sup>2</sup> )
C	سرعت صوت (m.s <sup>-1</sup> )
f	فرکانس (Hz)
K	عدد موج (Rad.m <sup>-1</sup> )

$u$  جابجایی مکانیکی (m)

$u_{out}$  دامنه جابجایی خروجی از ابزار (μm)

$u_{in}$  دامنه جابجایی محوری ورودی ابزار (μm)

$\omega$  فرکانس زاویه‌ای (Hz)

$\lambda$  طول موج (m)

#### 6- مراجع

- [1] G. Flood, Ultrasonic Bonding of Nonwovens, *Tappi journal*, Vol. 72, No. 5, pp. 165-170, 1989.
- [2] H.D Al-Budairi., *Design and analysis of ultrasonic horns operating in longitudinal and torsional vibration*, Ph.D. Dissertation, School of engineering, college of science and engineering, university of Glasgow, 2012.
- [3] V. N. Khmelev, A.N. Slivin, A.V. Lehr, A.B. Abramov, Theoretical investigations of continuous ultrasonic seam welding of thermoplastic polymers and fabrics, *11th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM*, Novosibirsk, Russia, 30 June-4 July 2010.
- [4] H. Sh, J. Wang, X. Chen, S. Lvo, L. Zhang, Research on the seam performance of waterproof clothing based on continuous ultrasonic welding technology, *International Journal of Clothing Science and Technology* Vol. 28, No. 2, pp. 171-190, 2016.
- [5] M. J. Troughton, *Handbook of Plastics Joining: a practical guide*, Norwich, William Andrew Inc., 2008.
- [6] S. Weihua, T. Little, Mechanisms of ultrasonic joining of textile materials, *International Journal of Clothing Science and Technology*, Vol 12, No. 5, pp. 331-350, 2000.
- [7] V. N. Khmelev, A.N. Slivin, A.V. Lehr, A.B. Abramov., Studies of Transformation of Longitudinal Ultrasonic Vibrations into Radial Ones, *12th International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM*, Novosibirsk, Russia, July 2011.

- New Multimode Sonotrodes Models Designed for Rotary Ultrasonic Welding Systems, *Acta Physica Polonica A*, Vol. 124, No. 3 pp. 474-478, 2013.
- [11] German Electrical Manufacturers Association (ZEVI), *Ultrasonic Assembly of Thermoplastic Moulding and Semi-finished Products*, Frankfurt am Main, Germany, 2006.
- [12] Dassault Systèmes Simuli, *Abaqus Analysis User's Manual 6.10*, Providence, RI, 2010.
- [8] V. N. Khmelev, A.N. Slivin, A.V. Lehr, A.B. Abramov, The development of ultrasonic vibrating system for continuous seam welding, *Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2012 IEEE 13th International Conference and Seminar of Young Specialists on*, Erlagol, Altai, Russia 2-6 July 2012.
- [9] K. Kuo, Ultrasonic vibrating system design and tool analysis, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 19, pp. 225-231, 2009.
- [10] P. Kogut, A. Milewski, W. Kardy, P. Kluk, P.,