

Experimental evaluation of ultrasonic welding parameters on the breaking strength of Al1050 and Al3105 using the acoustic emission method

Ali Pouladak¹  | Hossein Heidary²  | Vahid Fartashvand³  | Mojtaba Moradi⁴ 

1. Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, iran.
2. Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, iran. E-mail: heidary@tafreshu.ac.ir
3. Department of Industrial Design, Alzahra University, Tehran, Iran
4. Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, iran.

Article Information:

Research Article

Received 31 May 2025

Revised 12 Oct. 2025

Accepted 28 Oct. 2025

Keywords:

Acoustic Emission,
Ultrasonic Welding,
Mechanical Properties,
Time Domain Analysis.

ABSTRACT

In the production process and use of the welding industry in similar and dissimilar metals, there is a possibility of cracking and failure phenomena occurring under different stresses and loads at certain points, which can be weak points in the connection of welded structures. This leads to a decrease in safety and efficiency in the structure over time, and also creates a risk to the health of the structure and serious and irreparable accidents from it. Therefore, it is very important to investigate the failure mechanisms, including fracture and cracking and their growth in welded joints, which is one of the methods to be used for non-destructive testing of acoustic emission. In this study, ultrasonic welding was used to weld two dissimilar metals, 3105 and 1050 aluminum, with thicknesses of 0.5 and 1 mm, between samples manufactured according to ASTM E8M standards using ultrasonic welding at a frequency of 20 kHz and variable energy parameters of 150, 100, 200, and 250 joules. The parameters of the welding machine such as energy, horn holding time, converter power and applied pressure at the welding point were investigated to achieve the best strength. The tensile strength, strain energy and permeability of the elements at the joint surface of the samples were determined by the tensile machine and acoustic emission data such as energy, amplitude, count and time were recorded by the sensors of the acoustic emission machine during the tensile process. The maximum force tolerance was (1530) N, corresponding to a sample with a welding energy of (250) Joules, a power of (2980) Watts, and a time of (0.1) seconds. The minimum force tolerance was (950) N, corresponding to a sample with a welding energy of (100) Joules, a power of (1500) Watts, and a time of (0.075) seconds. The strain energy capacity of the four welded samples was 517, 970, 1696, and 2482 in joules, respectively, with the highest strain energy value for the sample welded with 250 joules of energy.

Cite this article: Pouladak, A., Heidary, H., Fartashvand, V. & Moradi, M. (2025). Experimental evaluation of ultrasonic welding parameters on the breaking point of AL1050 and AL3105 using the acoustic emission method. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 4 (2), 39-51.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2025.524328.1164>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

بررسی اثر پارامترهای جوشکاری فراصوتی آلتراسونیک بر استحکام شکست اتصالات غیرمشابه آلومینیوم ۱۰۵۰ و ۳۱۰۵ با بهره‌گیری از روش آکوستیک امیشن

علی پولادک^۱ | حسین حیدری^۲ | وحید فرتاشوند | مجتبی مرادی

۱. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران

۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران، رایانامه: heidary@tafreshu.ac.ir

۳. گروه طراحی صنعتی، دانشکده هنر، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران.

۴. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش، ایران.

چکیده:

در فرآیند تولید و استفاده از صنعت جوشکاری در فلزات مشابه و غیر مشابه احتمال رخ دادن پدیده ترک و شکست در اثر تنش‌ها و بارگذاری‌های مختلف در نقطه اتصال داده شده وجود دارد، که این پدیده‌ها می‌تواند نقاط ضعفی در اتصال سازه‌های جوشکاری شده باشد و منجر به کاهش ایمنی و کارایی در سازه مورد نظر در گذر زمان هم چنین باعث ایجاد خطر برای سلامت سازه و حوادث جدی و غیر قابل جبران حاصل از آن می‌شود. بنابراین بررسی مکانیزم‌های خرابی از جمله شکست و ترک خوردگی و رشد آن در اتصالات جوشکاری شده اهمیت زیادی دارد، که از روش‌های مورد نظر بهره‌گیری از آزمایش غیرمخرب نشرآوایی می‌باشد. در این پژوهش، اتصال توسط جوشکاری فراصوتی آلتراسونیک با فرکانس ۲۰ کیلوهرتز و پارامتر متغیر انرژی با مقادیر ۲۰۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۵۰ ژول، میان نمونه‌های ساخته شده طبق استاندارد ASTM E8M میان دو فلز غیرمشابه آلومینیوم ۳۱۰۵ و ۱۰۵۰ با ضخامت‌های ۱/۵ و ۱ میلی‌متر صورت گرفت و پارامترهای دستگاه جوشکاری نظیر انرژی، زمان نگهداری شیپوره، توان مبدل و فشار اعمالی در محل نقطه جوش جهت رسیدن به بهترین استحکام بررسی شد. مقاومت کششی، انرژی کرنشی و میزان نفوذ پذیری عناصر در سطح اتصال نمونه‌ها توسط دستگاه کشش تعیین و داده‌های نشر آوایی نظیر انرژی، دامنه، شمارش و زمان توسط حسگرهای دستگاه نشر آوایی در حین کشش ثبت شدند و بیشترین حد تحمل نیرو برابر با ۱۵۳۰ نیوتن و مربوط به نمونه‌ای با انرژی جوشکاری ۲۵۰ ژول و توان ۲۹۸۰ وات و زمان ۰/۱ ثانیه و کمترین حد تحمل نیرو نیز برابر ۹۵۰ نیوتن بود که مربوط به نمونه‌ای با انرژی جوشکاری ۱۰۰ ژول، توان ۱۵۰۰ وات و در زمان ۰/۰۷۵ ثانیه صورت گرفت. مقادیر عددی انرژی کرنشی در ۴ نمونه جوشکاری شده به ترتیب برابر با ۵۱۷، ۹۷۰، ۱۶۹۶ و ۲۴۸۲ در واحد ژول بود، که بیشترین مقدار انرژی کرنشی برای نمونه با ۲۵۰ ژول انرژی جوشکاری شده بود.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۳/۱۰

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۷/۲۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۸/۰۶

کلیدواژگان:

نشرآوایی ،
جوشکاری فراصوتی ،
خواص مکانیکی ،
تحلیل حوزه زمان ،

استناد: پولادک، علی؛ حیدری، حسین؛ فرتاشوند، وحید و مرادی، مجتبی (۱۴۰۴). بررسی اثر پارامترهای جوشکاری فراصوتی آلتراسونیک بر نقطه شکست اتصالات غیرمشابه آلومینیوم ۱۰۵۰ و ۳۱۰۵ با بهره‌گیری از روش آکوستیک امیشن. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۴ (۲)، ۵۱-۳۹.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران



DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2025.524328.1164>

۱- مقدمه

می‌باشد وقتی که ماده‌ای جامد تحت تنش باشد، عیوب موجود در آن باعث ایجاد امواج صوتی با بسامد بالا می‌گردد که انتشار این امواج توسط حسگر موجود در سطح حسگر ثبت و به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌شوند، سیستم آکوستیک امیشن این سیگنال‌ها را پردازش می‌کند و آنها را به بسته‌های اطلاعاتی تبدیل می‌کند [۶] در نهایت اطلاعات آماری نظیر مشخصات و موقعیت منابع محاسبه شده و به صورت نمودارهای گرافیکی و عددی نمایش داده می‌شوند تا مورد تفسیر قرار گیرند و با تجزیه و تحلیل این امواج امکان شناسایی نوع عیب، مکان و شدت آن فراهم می‌گردد [۷]. دستگاه‌های مورد استفاده در روش نشرآوایی با توجه به نوع کاربردشان می‌توانند به صورت یک دستگاه کوچک قابل حمل تا یک دستگاه بزرگ چندکاناله باشند. یک حسگر منفرد به همراه ابزارهای وابسته برای کسب و اندازه‌گیری سیگنال‌های نشرآوایی تشکیل یک کانال نشرآوایی را می‌دهد. از سیستم چندکاناله برای اهدافی نظیر موقعیت‌یابی منابع یا آزمون نواحی که برای یک حسگر منفرد خیلی بزرگ است استفاده می‌شود. سیگنال‌های نشرآوایی به دو صورت ضربه ای و ادامه دار هستند که سیگنال‌های ضربه معرف پدیده ناگهانی در سیستم است و حالت سیگنال‌های ادامه دار متشکل از چند سیگنال روی هم افتاده است. جهت تشخیص امواج تنشی و تبدیل آنها به سیگنال‌های الکتریکی از حسگر استفاده می‌شود که در انواع مختلفی تولید می‌شوند مانند حسگرهای پیزوالکتریکی، لیزری و خازنی.

منابعی که روش نشرآوایی در آنها به وجود می‌آید دو مورد زیر می‌باشد:

۱. منابع ماکروسکوپی: رشد ناگهانی ترک، تغییر شکل پلاستیک، شکست و جدایش لایه ای
۲. منابع میکروسکوپی: جابه جایی نا به جایی، لغزش صفحات، ایجاد حفره [۸].

برخی محققین به بررسی ساز و کار خرابی و عوامل پیدایش ترک و رشد آنها در سازه ها پرداختند و پارامترهای مناسب را جهت بهبود کیفیت در صنایع تولیدی تعیین کردند:

به جهت کاهش وزن محصولات در تولیدات صنعتی توجه زیادی به جوشکاری فراصوتی آلتراسونیک^۱ میان فلزات سبک صورت گرفته است. این روش جوشکاری به خاطر زمان جوشکاری کوتاه، انرژی کم، اعوجاج کوچک و آلودگی زیست محیطی کمتر نسبت به سایر روش‌های جوشکاری حالت جامد جایگاهی ویژه به خود اختصاص داده است [۱]. از امتیازات ویژه این جوشکاری می‌توان به اتصال دادن قطعات فلزی نازک که مجموع ضخامت این نمونه قطعات جهت اتصال برابر با ۲ میلی متر است در فرکانس ۲۰ کیلوهرتز^۲ را اشاره کرد، بنابراین برای کاربردهای ساخت و تولید جایگاه ویژه دارد. جوشکاری فراصوتی فلزات یک روش جوشکاری حالت جامد است که توسط ارتعاشات حاصل از دستگاه جوش فراصوتی که به صورت موازی یا عمودی به نمونه نیرو اعمال می‌کند ایجاد می‌شود، که از این ارتعاشات می‌توان جهت اتصال فلزات استفاده نمود [۲]. از آنجا که آلیاژهای آلومینیوم دارای مقاومت بالا، فرم پذیری خوب و وزن کم می‌باشند به همین دلیل ایجاد اتصال بین آلیاژهای آلومینیوم به صورت غیرهم جنس جهت رسیدن به ترکیبی از خواص دو آلیاژ مورد توجه محققین است [۳]. گسترش تکنیک‌های جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم به طور خاص در صنایع الکتریکی، اتومبیل سازی، صنایع هوایی هم چنین جهت کاهش اثرات گلخانه ای مورد توجه واقع شده [۴]. به منظور بازرسی و کشف عیب در اتصالات جوشکاری شده روش‌های مختلفی ارائه شده که یکی از آنها استفاده از روش غیرمخرب آکوستیک امیشن می‌باشد. آکوستیک امیشن یک روش تشخیص دینامیک و غیرفعال است که از طریق تحلیل امواج الاستیک^۳ تولید شده در ماده و بررسی ارتباط بین امواج دریافت شده و تغییرات ایجاد شده بر روی منبع انجام می‌گیرد و می‌تواند به صورت آنی ناپیوستگی‌ها را در یک سازه تحت کشش نشان دهد که فرکانس متداول در این روش در محدوده ۱۵۰ الی ۳۰۰ کیلوهرتز می‌باشد [۵].

در روش نشرآوایی که یک روش بازرسی غیرمخرب

³ Elastic

¹ Ultrasonic

² KHz

داده‌های مکانیکی و آکوستیکی وجود داشت. دیوید دوبروکی^۳ و همکاران [۱۲] با هدف شناسایی مکانیزم رشد ترک در اتصال غیرمشابه فولادی بدون آلیاژ، نورد و پیش گرم شده ۵۲۳۵ به تحلیل سیگنال‌های نشرآوایی در حین روش مکانیکی آزمایش کشش پرداختند. دوبروکی در این پژوهش نمونه‌ها را بر اساس مدت زمان‌های متفاوت در معرض خوردگی قرار داد و بعد از اتصال آنها، این نمونه‌ها تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند، با مقایسه کردن داده‌های آزمایش کششی با نتایج مربوط به آنالیز داده‌ها نشرآوایی و استفاده از طراحی آزمایشی به روش سطح پاسخ به این نتیجه دست یافتند، که تحلیل داده‌های سیگنال‌های انتشار صوتی را می‌توان به عنوان یک روش قدرتمند و حساس برای شناسایی تشکیل میکرو ترک‌ها انتخاب نمود و نمونه‌هایی که دارای بیشترین استحکام هستند را مشخص نمود. رفاهی اسکوتی و همکاران [۱۳] به بررسی مکانیزم جدایش بین لایه‌ای در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با پین‌های فلزی تحت بارگذاری کششی پرداختند. در این پژوهش از دو نمونه پین از جنس‌های مس و فولاد جهت اتصال ورق‌های کامپوزیتی استفاده شد و نتایج تحلیل داده‌های نشرآوایی مرتبط با آزمایش کشش هر دو نمونه با نتایج داده‌های نشرآوایی نمونه کامپوزیتی بدون پین تحت بارگذاری کششی مقایسه شدند؛ نتایج نشان داد که چقرمگی و انرژی ناشی از جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌های دارای پین فلزی بیشتر می‌باشد. بارات^۳ و همکاران [۱۴] با هدف بررسی مکانیزم تغییر شکل و خواص مکانیکی در اتصال دو فلز فولادی غیرمشابه پرلیتی و آستنیتی (مطابق با شکل ۴) به تحلیل داده‌ها و سیگنال‌های سری زمانی و فرکانسی مرتبط با بارگذاری کششی پرداختند. نتایج بدست آمده از تحلیل این سیگنال‌ها نشان داد که تغییر شکل در نمونه آستنیتی بیشتر از نمونه دیگر بود و در نمونه اتصالاتی که دارای نقص، عدم نفوذ کافی بودند پراکندگی نمودار دامنه - فرکانس بیشتر بود که منجر به کاهش استحکام در اتصالات می‌شود که این نتایج، دقت و اعتبار روش نشرآوایی را در بررسی خواص مکانیکی در اتصالات جوشکاری نمونه‌های فولادی تایید می‌کند. جونجی ژائو^۴ و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۲۱ اثر

معصومی و همکاران [۹] در پژوهش خود به بررسی خواص مکانیکی و استحکام دو نمونه آلومینیومی غیرمشابه که این دو نمونه توسط جوشکاری فراصوتی تحت پارامترهای مختلف جوشکاری نظیر فشار اعمالی در محل نقطه جوش، توان مبدل و زمان نگهداری شیپوره به یکدیگر متصل شدند پرداختند، بعد از اتصال جوش که روی نمونه‌ها صورت گرفت، این نمونه‌ها متناسب با پارامترهای جوشکاری متفاوت فشار ۴ و ۵ بار و زمان‌های ۲ و ۳ ثانیه تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند و حد تحمل نقطه جوش آنها مورد بررسی قرار گرفت و نقطه بهینه برای جوشکاری مورد نظر بدست آمد، و حداکثر استحکام برای نمونه‌ای بود که دارای فشار ۵ بار و زمان ۳ ثانیه و توان جوشکاری ۷۰۰ وات و دارای ماکزیم تحمل نیرو ۱ کیلو نیوتن و کمترین استحکام برای نمونه‌ای بود که دارای فشار ۴ بار و زمان ۲ ثانیه و توان جوشکاری ۲۵۰ وات بود و دارای کمترین مقدار تحمل نیرو برابر با ۰.۳ کیلو نیوتن بود. رضا فلک دین و همکاران [۱۰] در پژوهش خود به بررسی آسیب در مواد کامپوزیتی تحت بارگذاری‌های مختلف خستگی و آزمایش خمشی با استفاده از آزمون غیر مخرب نشرآوایی پرداختند و با بررسی و تحلیل نمودارهای نشرآوایی مرتبط با آزمایش‌های انجام شده و مقایسه با نمودارهای کرنش - چرخه بارگذاری، طول تورق - تعداد چرخه بارگذاری که مرتبط با آزمایش‌های خستگی هستند، به این نتیجه رسیدند که بهترین روش جهت تشخیص تورق و خرابی الیاف در مواد کامپوزیتی استفاده از تکنیک آکوستیک امیشن^۱ می‌باشد. موسوی نسب و همکاران [۱۱] به بررسی مکانیزم‌های خرابی ورق آلومینیوم ۲۰۲۴-۳ ترک دار ترمیم شده با وصله کامپوزیت شیشه-اپوکسی با لایه چینی‌های مختلف به روش نشرآوایی پرداختند. نمونه‌ها تحت بارگذاری شبه استاتیکی کششی قرار گرفتند و هم‌زمان حسگرهای نشرآوایی به منظور داده برداری بر روی نمونه‌ها نصب شد و داده‌های آکوستیکی ثبت شدند و نتایج تحلیل این داده‌ها با داده‌های مکانیکی مقایسه شدند. نتایج بدست آمده از پژوهش نشان داد که وصله با لایه چینی کمتر استحکام کششی و کرنش شکست بیشتری دارد، همچنین تطابق قابل قبولی بین نتایج حاصل از

³ barat⁴ javanji jao¹ Acoustic emission² david dobroki

متفاوت تقسیم شدند. مشخص شد که رشد جدایش در نمونه‌های مود I حالت پایدار داشته و در نمونه‌های مود ترکیبی و مود II، حالت ناپایدار دارد. در ادامه با استفاده از روش آکوستومکانیک [۱۹] که تلفیقی از روش‌های آکوستیک امیشن و مکانیکی بوده، چقرمگی شکست بین لایه ای در نمونه‌ها تعیین شده است. مشخص شد که روش آکوستومکانیک حد پایین چقرمگی شکست بین لایه ای را ارائه داده و با نتایج حاصل از روش ذکر شده در استاندارد، مطابقت خوبی دارد. در انتها با استفاده از تصاویر گرفته شده از سطوح شکست نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی، نتایج بدست آمده صحت سنجی گردیدند [۲۰].

فرتاشوند و همکاران [۲۱] با هدف بررسی و بهینه‌سازی متغیرهای جوشکاری فراصوت فلزات برای رسیدن به حداکثر استحکام اتصال، تأثیر زمان جوشکاری فراصوتی، فشار جوشکاری و دامنه نوسان را بر روی اتصال روی نمونه‌های غیرمشابه آلومینیوم ۱۰۵۰ و مس با درصد خلوص بالا با ضخامت ۰/۳ میلی‌متر که تحت بارگذاری کششی-برشی هم چنین لایه برداری از روی اتصال (T) نمونه‌ها هستند، با استفاده از طراحی آزمایشی به روش سطح پاسخ مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که زمان و فشار از تأثیرگذارترین پارامترهایی هستند که مستقیماً بر حداکثر بار آزمایشی برش کششی تأثیر می‌گذارند هم چنین زمان، فشار و دامنه از تأثیرگذارترین پارامترهای تأثیر گذار بر بار آزمایش لایه برداری T می‌باشند. در نهایت پارامترهای بهینه زمان جوش ۱ ثانیه، فشار ۴۰۵ بار و دامنه ارتعاش ۵۵ درصد تعیین شد و در حالت بهینه، حداکثر بار حاصل از آزمون برش کششی و لایه برداری T به ترتیب برابر با ۸۲۴/۴ نیوتن و ۱۵۶/۶ نیوتن بود.

فرتاشوند و همکاران [۲۲] با هدف بررسی و بهبود استحکام در تولید محصولات صنعتی که نیاز به جوشکاری فراصوتی دارند نظیر باتری‌های لیتیومی یونی به بررسی ریزساختاری مفاصل در جوشکاری فراصوتی فلزات، بر روی نمونه‌های غیرمشابه آلومینیوم ۱۰۵۰ و مس با درصد خلوص بالا با ضخامت ۰/۳ میلی‌متر پرداختند و سپس ویژگی‌های ماکرو و ریزساختاری سطح مقطع و رابط جوش به طور کامل مورد بررسی قرار دادند و به این نتایج رسیدند که تغییرات ریزساختاری در مقادیر مختلف پارامترهای جوشکاری

ارتعاشات فراصوت را برخواص مکانیکی اتصال جوشکاری حالت جامد دو فلز غیر مشابه منیزیم و آلومینیوم مورد پژوهش قرار دادند. در این پژوهش با به کار بردن لایه ترکیبی بین فلزی نازک در بخش اتصال و بررسی داده‌ها و نمودارهای حاصل از بارگذاری کششی در نمونه‌ها با پارامترهای متفاوت از جمله نمودار جابه جایی - تنش و مطالعات ریز ساختاری نمونه به این نتیجه رسیدند، که نفوذ مواد در قسمت بالایی اتصال نسبت به قسمت پایینی بیشتر است، که منجر به افزایش استحکام و چقرمگی شکست برای لایه بالایی می‌شود. حیدری و همکاران [۱۶] با هدف شناسایی آسیب در سازه‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه سه نوع کامپوزیت که دارای لایه چینی متفاوت بودند را تحت بارگذاری کششی مود یک قرار دادند و داده‌های نشرآوایی مربوط به شکست این سه نمونه را با استفاده از روش خوشه بندی فازی تحلیل کردند و میزان تغییرات شکل، ترک خوردگی ماتریس، جداسازی فیبر و شکست فیبر در هر سه نمونه را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده از این پژوهش نشان داد که تناسب خوبی بین گروه‌های خوشه و مکانیسم‌های آسیب وجود دارد. حیدری و همکاران [۱۷] با هدف بررسی استحکام کششی در نمونه کامپوزیتی سوراخ کاری شده، تأثیر پارامترهای ماشینکاری (سرعت تغذیه، سرعت برش و زاویه نقطه مته) را در بارگذاری کششی توسط داده‌های نشرآوایی مورد پژوهش قرار دادند. با تحلیل داده‌های نشرآوایی که با روش دامنه- زمانی صورت گرفت، نیرو رانش در سوراخ کاری و نیروی کششی ماکزیمم مشخص شدند، و به این نتیجه رسیدند که اندازه زاویه نقطه مته مهم‌ترین پارامتر در طول آزمایش کشش ورقه‌های حفاری شده می‌باشد. میلاد سعیدی فر [۱۸] و همکاران در پژوهش مد نظر به بررسی رفتار مکانیکی و نشرآوایی جدایش بین لایه‌ای در کامپوزیت‌های چندلایه شیشه/ اپوکسی پرداخته‌اند و با تلفیق روش‌های نشرآوایی و مکانیکی، چقرمگی شکست بین لایه‌ای را تعیین نمودند. نمونه‌های استاندارد با لایه چینی‌های مختلف و تحت شرایط مختلف بارگذاری مود I، مود II و مود ترکیبی I و II، قرار گرفتند. در ابتدا، منحنی‌های نیرو- جابجایی و رشد جدایش بین لایه‌ای برای نمونه‌های مختلف مقایسه شده و این منحنی‌ها بر اساس رفتار مکانیکی و نشرآوایی آنها، به سه ناحیه با رفتار

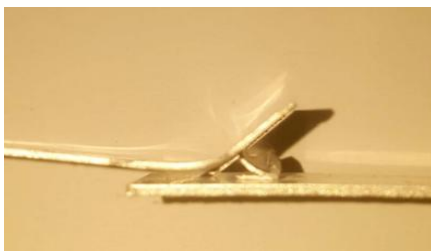
صورت گرفته در فشار ثابت توسط دستگاه جوش فراصوتی (جدول ۳) تحت پارامتر متغیر انرژی از ۱۰۰ ژول تا ۲۵۰ ژول، نتیجه می‌شود که پارامترهای مهم دیگر نظیر توان و زمان ارتباط مستقیمی با افزایش انرژی در این نوع اتصال جوشکاری شده دارند. به گونه‌ای که با افزایش پارامتر انرژی در هر نمونه جوش، پارامترهای توان و زمان جوشکاری نیز افزایش پیدا کرده‌اند.

۲-۲- دستگاه‌های آزمایش

برای انجام آزمایش‌های پژوهش از دستگاه آزمایش کشش سنتام مدل STM150 که باری دارای نیروی کششی ۱۵ تن بود استفاده شد و نمونه‌های کششی بین دو فک لودسل دستگاه کشش گیر افتادند و تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند (شکل ۱). در حین کشش نمونه‌ها جهت ثبت سیگنال‌ها و داده‌های نشرآوایی از حسگر متصل به دستگاه نشرآوایی چهار کاناله شرکت مپوا با نرخ نمونه برداری MHZ ۶۵ به همراه نرم افزار AE MAP استفاده گردید و از یک حسگر پیزو الکتریک تک کریستال با پهنای باند وسیع استفاده شد که میزان محدوده بهینه کاری حسگر ۷۵۰-۱۰۰ KHZ می‌باشد. برای دریافت بهترین سیگنال و اتصال مناسب بین نمونه و حسگر از ژل لوبریکانت شمارش استفاده شده است.



شکل ۱) نمونه در حال کشش و حسگر نشرآوایی



شکل ۲) عکس از رشد ترک در ناحیه جدایش اتصال

آلتراسونیک با ویژگی‌های مقاومت مکانیکی مرتبط بود و با افزایش زمان جوش از ۰/۲ به ۰/۸ ثانیه، چگالی باند افزایش یافت، ضخامت پس از جوش کاهش یافت و میانگین سختی ویکرز در نقاط مختلف در امتداد رابط جوش ۱۰٪ کاهش یافت.

از این رو در این پژوهش به بررسی خواص مکانیکی رفتاری در نقطه جدایش (شکل ۲) نمونه‌های جوشکاری شده آلومینیومی که تحت بارگذاری کششی هستند با استفاده از نمودارهای نیرو-جابجایی بدست آمده از دستگاه کشش و مقایسه سطوح شکست در نمونه‌ها و در نهایت به بررسی نمودارهای نشرآوایی در حین کشش برای نمونه‌ها می‌پردازیم.

۲-مواد و روش پژوهش

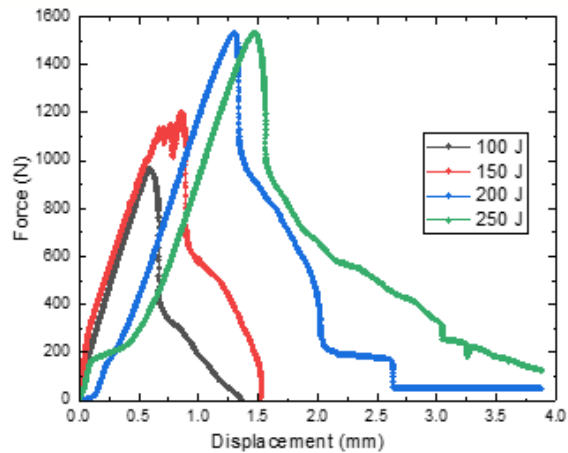
مطابق با جدول ۱ و ۲ که در صفحه بعد خواص مکانیکی و شیمیایی دو ورق آلومینیومی از نوع ۳۱۰۵ و ۱۰۵۰ آمده که ضخامت ورق ۳۱۰۵ برابر ۰/۵ میلی متر و ورق ۱۰۵۰ برابر ۱ میلی متر می‌باشد و مطابق با استاندارد ASTM E8M جهت انجام آزمایش کشش (مطابق شکل ۱) ساخته می‌شوند.

۲-۱-روش انجام آزمایش

دو نمونه ورق آلومینیوم ۳۱۰۵ و ۱۰۵۰ بعد از ساخته شدن بر اساس استاندارد ASTM E8M توسط دستگاه جوش کاری فراصوتی با استفاده از جوش فراصوتی بهم متصل شدند، طریقه متصل شدن نمونه‌ها به این صورت بود که نمونه با ضخامت کمتر در زیر نمونه با ضخامت بیشتر قرار گرفت و برای انجام پژوهش نمونه‌های انتخاب شده در ۴ مدل با پارامترهای جوشکاری فراصوتی مختلف که این پارامترها براساس مجموع ضخامت هر دو نمونه و میزان انرژی دستگاه جوش که سبب گرما و نفوذ کافی جهت اتصالی قابل قبول در مقطع جوشکاری شده می‌باشد مطابق با جدول ۳ تعیین و در یک نقطه جوش به یکدیگر متصل شدند. هر چهار مدل نمونه آلومینیومی تحت بارگذاری کششی در سرعت ثابت ۱ میلی متر در دقیقه قرار گرفتند و داده‌ها و نمودارهای نیرو-جابجایی برای هر چهار نمونه ثبت شد. در حین کشش نمونه‌ها حسگر نشرآوایی نیز به این چهار نمونه متصل بود و داده‌های نشرآوایی هر کدام از نمونه‌ها را به طور مجزا ثبت کرد.

طبق داده‌های بدست آمده مرتبط با جوشکاری‌های

ارتباطاتی هستند که در شکل (۳) به بررسی و تحلیل نمودارهای مرتبط با داده‌های چهار نمونه کششی می‌پردازیم:



شکل (۳) نمودار های نیرو - جابه جایی چهار نمونه جوش

همان طور که در بالا ذکر شد با افزایش یافتن پارامتر انرژی پارامترهای مهم دیگر نظیر توان و زمان نیز افزایش می‌یابند که افزایش این دو پارامتر منجر به افزایش پدیده نفوذ در اتصالات جوش کاری می‌شود. که منجر به افزایش استحکام و حد تحمل نیرو در بار گذاری کششی نمونه‌ها می‌شود به گونه‌ای که در نمونه‌های دارای پارامترهای انرژی کمتر تغییر طول کمتری نسبت به سایر نمونه‌ها دیده می‌شود که تصاویر شماره (۷ تا ۴) مقطع شکست برای چهار نمونه را نشان می‌دهد، که بر اساس این سطوح شکست به برخی نتایج در زیر می‌رسیم:



شکل (۴) سطح شکست نمونه جوشکاری یک

مطابق با شکل (۴) که مرتبط با نمونه‌ای با انرژی جوشکاری ۱۰۰ ژول می‌باشد به این نتیجه می‌رسیم که محل جدایش نمونه در هنگام بار گذاری کششی از روی سطح اتصال ورق‌ها بوده، پس نفوذ و استحکام کافی در این نمونه جوشکاری قابل قبول نمی‌باشد.

جدول (۱) خواص شیمیایی آلومینیوم

آلیاژ	درصد عنصر	درصد عنصر	درصد عنصر	درصد عنصر	درصد عنصر
	Al	Mn	Cu	Fe	Si
Al3105	۹۷/۵۲	۰/۶۶۶	۰/۰۸۹	۰/۶۹۲	۰/۶۷۶
Al1050	۹۷/۵۲	۰/۰۰۸	۰/۰۰۲	۰/۲۷	۰/۰۶

جدول (۲) خواص مکانیکی آلومینیوم

آلیاژ	چگالی (Kg/m ³)	مدول الاستیک (Gpa)	استحکام کششی (Mpa)	تنش تسلیم (Mpa)
Al3105	۲/۷۲	۶۹/۸	۱۵۹	۱۳۱
Al1050	۲/۷۰۵	۶۸	۱۱۰	۱۰۳

جدول (۳) نمونه‌های جوش کاری شده و پارامترهای آن

نمونه‌ها	انرژی (J)	توان (W)	زمان (S)	فشار (Pa)
یک	۱۰۰	۱۵۰۰	۰/۰۷۵	۴
دو	۱۵۰	۱۹۸۰	۰/۰۸	۴
سه	۲۰۰	۲۴۰۰	۰/۰۹	۴
چهار	۲۵۰	۲۹۸۰	۰/۱	۴

۳- نتایج و بحث

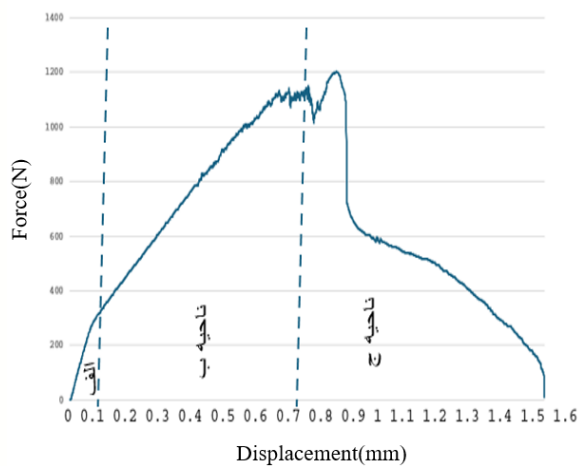
۳-۱ نتایج و مشاهدات مکانیکی

به دلیل ایجاد سیکل گرمایی و مکانیکی که در حین جوشکاری فراصوتی صورت می‌گیرد، فرایند نفوذ و اختلاط مکانیکی در فصل مشترک هر دو نمونه ورق باعث ایجاد اتصال بهتر در نقطه جوش می‌شود و در طی فرایند نفوذ جوشکاری عنصر Mn در نمونه Al₃₁₀₅ در Al₁₀₅₀ نفوذ می‌کند. در این نوع جوشکاری که امواج و ارتعاشات فراصوتی از شیپوره به نمونه‌ها در محل اتصال اعمال می‌شود در اثر اصطکاک زیاد ناشی از جنبش مولکولی سطوح دو قطعه کار این انرژی تبدیل به گرما شده و باعث نرم شدن نمونه‌ها و به وجود آمدن شرایط جوشکاری می‌شود. با توجه به این که نمونه‌ها جوشکاری شده فراصوتی برای چهار نمونه در پارامتر متغیر انرژی بهم متصل شده‌اند، به همین دلیل نتایج داده‌های مرتبط با آزمایش کشش این نمونه‌ها که شامل پارامترهای نیرو و جابه‌جایی می‌باشند با یکدیگر دارای

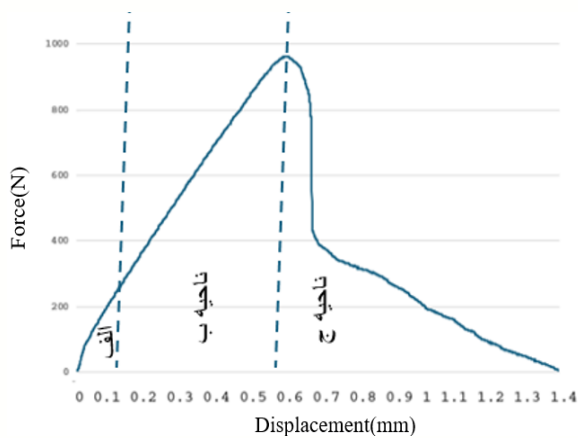
قبول تری برخوردار است.

۲-۳ بررسی حد تحمل نیروی کششی و انرژی کرنشی:

همان طور که از نمودارهای نیرو - جابه جایی مشاهده می شود که با افزایش پارامترهای جوشکاری استحکام و نفوذ افزایش پیدا می کند، به همان نسبت نیز بر روی ماکزیمم نیروی قابل تحمل بر روی هر نمونه نیز تاثیر مستقیم دارد و منجر به افزایش حداکثر نیروی قلیل تحمل برای نمونه هایی با انرژی جوشکاری بالاتر نیز می شود (نواحی ب)، که این مورد فقط مختص نیرو نیست بلکه دیگر پارامترها نظیر طول کشیدگی و چقرمگی شکست یا انرژی کرنشی برای هر نمونه به ترتیب افزایش پیدا می کند که در شکل های (۸ تا ۱۱) شاهد این قضیه هستیم:



شکل ۸) تقسیم بندی نواحی منحنی برای نمونه جوش اول



شکل ۹) تقسیم بندی نواحی منحنی برای نمونه جوش دوم



شکل ۵) سطح شکست نمونه دوم

مطابق با شکل (۵) که مرتبط با نمونه ای است با انرژی جوشکاری ۱۵۰ ژول به این نتیجه می رسیم که محل جدایش نمونه ها در هنگام بارگذاری کششی نسبت به حالت قبل از نفوذ بالاتری برخوردار است و در هنگام جدایش نمونه در اثر بارگذاری کششی، ورق ها مقداری از درون هم جدا شده اند و نسبت به حالت قبلی از استحکام بالاتری برخوردار است.



شکل ۶) سطح شکست نمونه سوم

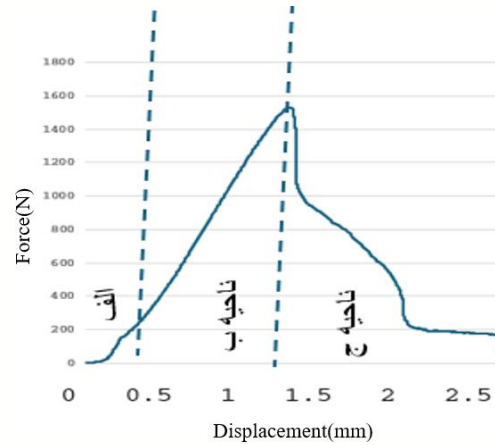
مطابق با این نمونه که دارای انرژی جوشکاری ۲۰۰ ژول می باشد به این نتیجه می رسیم که نمونه باز از ناحیه ای با نفوذ بالاتر از حالت قبلی جدا شده پس از استحکام بالاتری نیز برخوردار است.



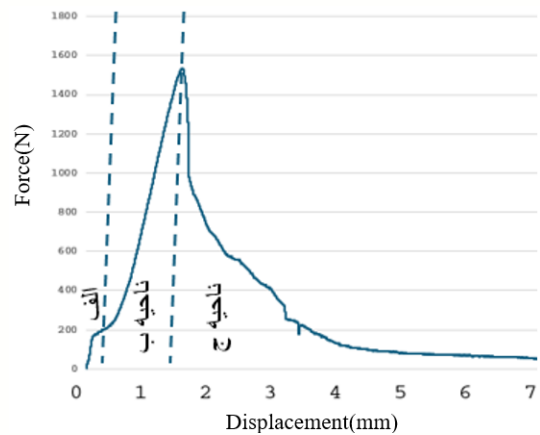
شکل ۷) سطح شکست نمونه چهارم

مطابق با نمونه ای که دارای انرژی جوشکاری ۲۵۰ ژول می باشد با توجه به مشاهدات صورت گرفته نمونه نسبت به حالت قبل نیز باز ناحیه جدایش از قدرت نفوذ بالاتری برخوردار بوده به گونه ای که نمونه در هنگام جدایش از روی ناحیه جوش کاری یعنی رابط جوش مطابق تصویر بالا جدا شده پس نسبت به بقیه نمونه ها از استحکام بالاتر و قابل

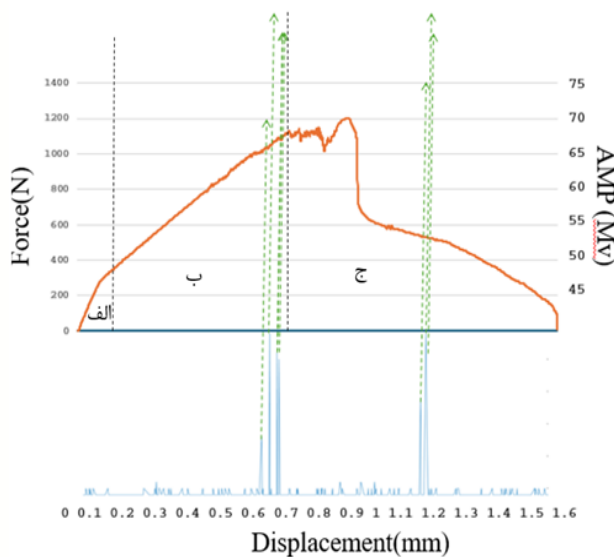
سیگنال‌های ضعیف اولیه می‌توانند ناشی از شروع حرکت فک‌های دستگاه کشش باشند. در ناحیه (ب) با فعال شدن سازوکارهای اولیه خرابی هم چون پیدایش ترک و یا رشد ترک در نمونه‌ها، انرژی سیگنال‌های نشرآوایی رفته رفته افزایش می‌یابد به گونه‌ای که در نزدیکی‌های بار ماکزیمم، سیگنال‌هایی با انرژی بیشتر مشاهده می‌شود که در اثر این افزایش سیگنال‌ها رشد ترک در منطقه اتصال جوش و یا جدایش در نمونه‌ها به صورت مستقیم با چشم قابل مشاهده می‌باشد که در نمودارهایی که به طور تقریبی توسط نرم افزار اکسل رسم شده‌اند در زیر شاهد این نتایج هستیم:



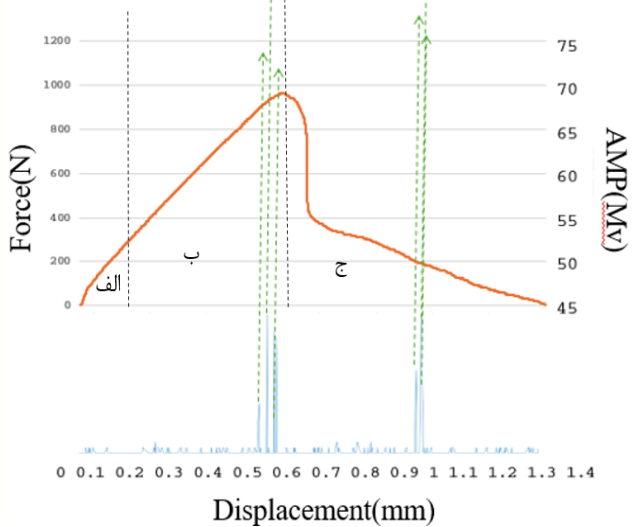
شکل ۱۰) تقسیم نواحی منحنی برای نمونه جوش سوم



شکل ۱۱) تقسیم نواحی منحنی برای نمونه جوش چهارم



شکل ۱۲) نمودار نیرو- دامنه- جابه جایی برای نمونه اول



شکل ۱۳) نمودار نیرو- دامنه- جابه جایی برای نمونه دوم

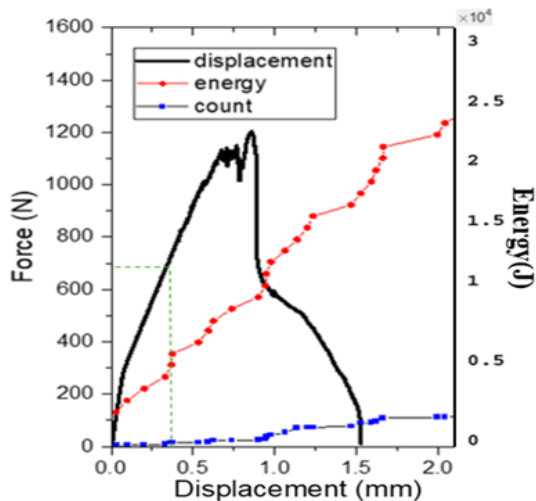
با توجه به نمودارهای بالا اولاً سطح زیر منحنی برای هر نمونه جوشکاری به ترتیب افزایش پیدا کرده پس مقدار انرژی کرنشی نیز افزایش یافته که به ترتیب مقادیر عددی برابر اند با: ۵۱۷، ۹۷۰، ۱۶۹۶ و ۲۴۸۲ در واحد ژول و از طرفی بر اساس تقسیم بندی نواحی که برای هر نمونه صورت گرفته در ناحیه (الف) که ناحیه ای خطی است انرژی کرنشی شکست از دیگر نواحی (ب) و (ج) کمتر است و بیشترین انرژی کرنشی برای شکست مربوط به ناحیه (ج) هر منحنی به علت رشد ترک می‌باشد.

۳-۳- مشاهدات نشر آوایی

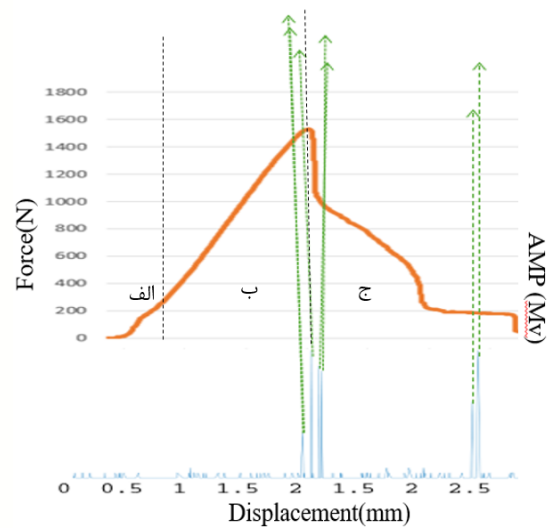
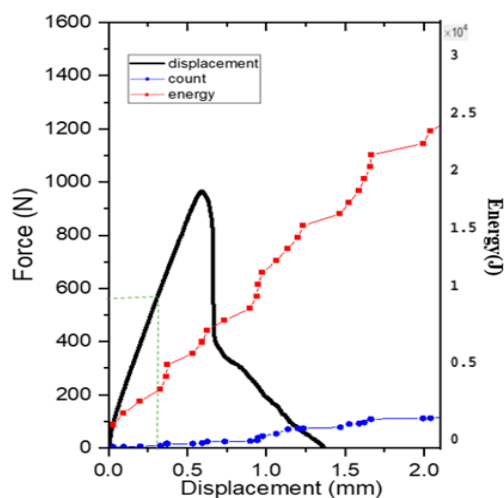
منحنی نیرو- جابجایی و انرژی سیگنال‌های نشرآوایی ایجاد شده توسط نمونه‌ها در حین آزمایش در زیر نشان داده شده است، براساس انرژی سیگنال‌های نشرآوایی، می‌توان منحنی را به سه ناحیه تقسیم بندی نمود. در ناحیه (الف)، فعالیت نشرآوایی قابل توجهی مشاهده نمی‌شود و

۳-۴- بررسی نمودارهای نیرو-جا به جایی و مجموع نشرآوایی

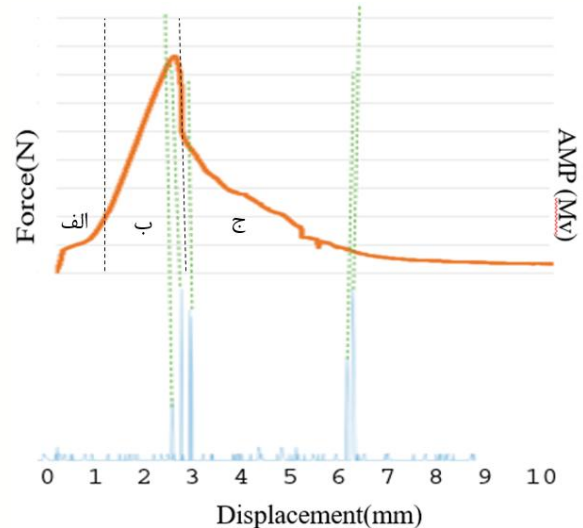
در لحظه شروع رشد ترک در نمونه‌ها به علت فعال شدن سازوکارهای مختلف خرابی، تعداد و انرژی سیگنال‌های نشرآوایی به طور ناگهانی افزایش می‌یابد (ناحیه‌ای که با خط چین سبز جدا شده و نمودار از حالت خطی و تقریباً یکنواخت دچار تغییر شیب و نوسان افزایشی می‌شود). لحظه‌ای که تغییر ناگهانی در شیب منحنی مجموع انرژی نشرآوایی را شاهدیم، متناظر با لحظه شروع رشد ترک در نمونه را در نظر گرفته و بار متناظر با آن نقطه را به عنوان بار بحرانی در نظر می‌گیریم:



شکل ۱۶) مقدار بار بحرانی مربوط به نمونه ۱۰۰ ژول
شکل ۱۷) مقدار بار بحرانی مربوط به نمونه ۱۵۰ ژول



شکل ۱۴) نمودار نیرو-دامنه- جابه جایی برای نمونه سوم



شکل ۱۵) نمودار نیرو-دامنه- جابه جایی برای نمونه چهارم

همان طور که از نمودارهای بالا (نمودار ۱۲-۱۵) شاهد هستیم در بخشی که نمودارها که دچار تغییرات ناگهانی شده‌اند به همان نسبت نیز سیگنال‌های نشرآوایی دچار نوسان شده‌اند و از طرفی در ناحیه‌ای از نمودار که دارای ماکزیمم نیرو شده است، بیشترین نوسان را در سیگنال نشرآوایی دارا هستیم.

جهت بررسی این که کدام نمونه جوشکاری بیشترین میزان افزایش تغییرات در داده‌های نشرآوایی داشته با میانگین گرفتن از مقادیر داده‌های نشرآوایی انرژی و دامنه، بیشترین مقدار میانگین مربوط به نمونه ۲۵۰ ژول انرژی جوشکاری و کمترین مربوط به نمونه‌ای با ۱۰۰ ژول انرژی جوشکاری می‌باشد.

نشان از وقوع خرابی در نمونه های جوشکاری نظیر پیدایش ترک می‌باشد، در برخی نمونه‌ها در مقایسه با برخی دیگر در ناحیه‌ای که کشیدگی بیشتری صورت گرفته است اتفاق افتاده که نشان از استحکام بالاتر در نمونه که منجر به وقوع تغییر شکل در زمانی بالاتر می‌باشد.

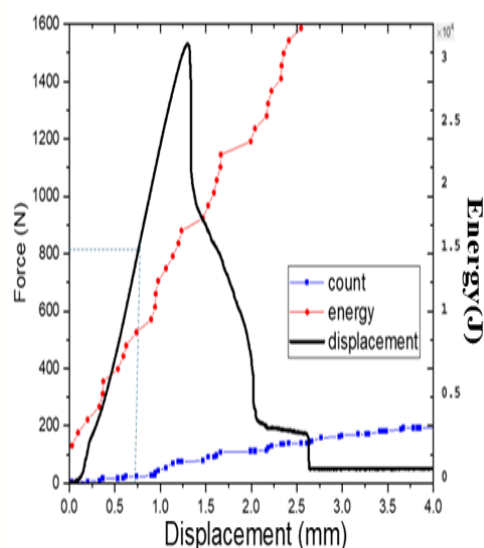
۳) محل تلاقی کردن هر دو نمودار نشرآوایی مجموع انرژی- زمان و یا مجموع شمارش- زمان با نمودار نیرو - جا به جایی در محلی اتفاق می‌افتد که نمونه‌ها دچار اتمام کشیدگی می‌شوند یعنی در نقاط انتهایی نمودار نیرو - جا به جایی.

۴) نمودار مجموع انرژی یا شمارش^۱ - زمان در نمونه‌هایی که دارای پارامتر جوشکاری بالاتری هستند باعث می‌شود که نقاط تلاقی بیشتر از یک نقطه با نمودار نیرو - جابه‌جایی داشته باشند که در برخی از نمونه‌ها در ۳ نقطه نمودار نیرو - جابه‌جایی را قطع می‌کنند.

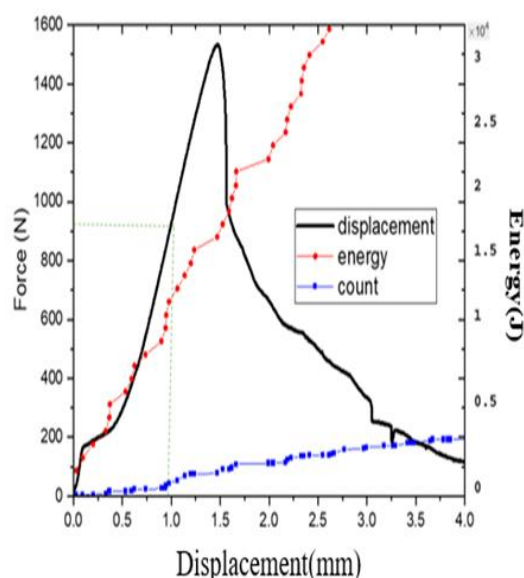
۵) در هنگامی که نمونه‌ها دچار تغییر ناگهانی در شیب نمودار خود می‌شوند در هر دو نمودارهای مجموع شمارش- جابه‌جایی و مجموع انرژی- جابه‌جایی هر دو در یک نقطه با هم تلاقی پیدا می‌کنند در شروع تغییر شیب و نشان از وقوع پدیده خرابی در نمونه‌ها است (شکل ۱۷) مقدار بار بحرانی مربوط به نمونه ۱۵۰ ژول).

۴- نتیجه گیری

با توجه به نتایج آزمایش کشش مشاهده می‌شود که با افزایش انرژی جوشکاری، استحکام و نفوذ پذیری جوش افزایش می‌یابد که علت آن افزایش زمان اعمال نیرو و توان دستگاه جوشکاری فراصوتی جهت اتصال می‌باشد که منجر به افزایش دما در فصل مشترک ورق‌ها خواهد شد و نفوذ عناصر آلیاژی بیشتر صورت می‌گیرد. در نمونه اتصالی با انرژی کم و توان و زمان اعمال نیرو جوشکاری پایین، جدایش ورق‌ها به علت نفوذ پایین از روی یکدیگر اتفاق می‌افتد که نشان می‌دهد دمای کافی در محل اتصال‌ها و زمان کافی برای نفوذ عناصر آلیاژی وجود نداشته است. بیشترین استحکام برای نمونه آخر که دارای انرژی ۲۵۰ ژول و توان ۲۹۸۰ وات و زمان ۰/۱ ثانیه بود اتفاق افتاد در این حالت تغییر طول نمونه در حین آزمایش کشش نیز نسبت



شکل ۱۸) مقدار بار بحرانی مربوط به نمونه ۲۰۰ ژول



شکل ۱۹) مقدار بار بحرانی مربوط به نمونه ۲۵۰ ژول

همان طور که در نمودارهای بالا (نمودارهای ۱۶-۱۹) مشاهده می‌شود در اثر تغییرات افزایشی پارامترهای جوشکاری فراصوتی نظیر انرژی، به همان نسبت تغییراتی در نمودارهای نشرآوایی آنها ایجاد می‌شود به گونه‌ای که برخی نتایج آنها در زیر نوشته شده:

۱) شیب نمودارهای نشرآوایی در نمونه‌هایی که در پارامتر انرژی بالاتری جوش شده‌اند بیشتر می‌باشد. (نمونه‌های ۴ و ۳)

۲) تغییر ناگهانی در شیب منحنی‌های مجموع نشرآوایی که

¹ Count

- HEALTH MONITORING OF POLYMER-BASED COMPOSITES. *Sensors*, 23(15), 6945.
- [6] Ohtsu, M. (2007). ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUES STANDARDIZED FOR CONCRETE STRUCTURES. *Journal of Acoustic Emission*, 25, 21–32.
- [7] Li, X., & Wu, J. (2000). WAVELET ANALYSIS OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS IN BORING. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 214(5), 421–428.
- [8] Guo, F. (2022). DEEP LEARNING APPROACH FOR DAMAGE CLASSIFICATION BASED ON ACOUSTIC EMISSION DATA IN COMPOSITE MATERIALS. *Materials*, 15(12), 4270.
- [9] Masoumi, H. (2021). EXPERIMENTAL EFFECTS INVESTIGATION OF ULTRASONIC SPOT WELDING ON DISSIMILAR AL3105 AND AL1050 ALLOYS JOINING. *Journal of Welding Science and Technology of Iran*, 7(1), 61–70.
- [10] Dean, F. (2022). NON-DESTRUCTIVE ASSESSMENT OF COMPOSITE DAMAGE BY ACOUSTIC EMISSION TESTING. *Journal of Mechanical Engineering*, 31(5), 20–31. (in Persian)
- [11] Nassab, M. (2017). INVESTIGATION OF FAILURE MECHANISMS IN CRACKED ALUMINUM SHEETS REPAIRED WITH COMPOSITE PATCHES USING ACOUSTIC EMISSION METHOD. *Modares Mechanical Engineering*, 17(8). (in Persian)
- [12] Sustr, M. (2019). ACOUSTIC EMISSION OF CORRODED WELDMENTS DURING TENSILE TEST. *Management Systems in Production Engineering*, 27(4), 211–216.
- [13] Gholamiyan Nezhad, G., & Refahi Oskouei, A. (2023). ESTIMATION OF DELAMINATION IN POLYMER COMPOSITES REINFORCED WITH METAL PINS UNDER MODE I LOADING USING ACOUSTIC EMISSION METHOD. *NDT Technology*, 3(1), 32–51.
- [14] Barat, V. (2021). FEATURES OF ACOUSTIC EMISSION IN TENSILE TESTING OF DISSIMILAR WELDED JOINTS OF PEARLITIC AND AUSTENITIC STEELS. *Applied Sciences*, 11(24), 11892.
- [15] Zhao, J., et al. (2021). ACOUSTIC EFFECT ON THE TENSILE PROPERTIES AND METALLURGICAL STRUCTURES OF DISSIMILAR FRICTION STIR WELDING JOINTS OF AL/MG ALLOYS. *Journal of Manufacturing Processes*, 65, 328–341.
- [16] Karimi, N. Z. (2012). RESIDUAL TENSILE STRENGTH MONITORING OF DRILLED COMPOSITE MATERIALS BY ACOUSTIC EMISSION. *Materials & Design*, 40, 229–236.
- [17] Oskouei, A. R. (2012). UNSUPERVISED ACOUSTIC EMISSION DATA CLUSTERING FOR THE ANALYSIS

به حالت‌های قبلی قابل توجه بود اما این به این معنی نیست که بقیه حوش‌ها مورد قبول نیستند بلکه بنابر کاربرد مورد نظر مورد استفاده قرار می‌گیرند. هم‌چنین با استفاده نمودارهایی که از داده‌های نشرآوایی هر نمونه بدست آمد تطابق قابل قبولی میان نمودار تغییرات شکل آزمایش کشش و سیگنال‌های نشرآوایی برای هر نمونه وجود داشت. نتایج حاصل از داده‌های نشرآوایی نشان می‌دهد که در هنگام جدایش نمونه‌های جوشکاری شده و یا رشد ترک در ناحیه جوشکاری شده، انرژی حاصل از داده‌های نشرآوایی افزایش می‌یابد که نشان از تشخیص و توانایی روش نشرآوایی در شناسایی و تشخیص عیوب می‌باشد. از طرفی روش نشرآوایی نسبت به سایر روش‌ها از جمله روش چشمی برتری قابل ملاحظه‌ای جهت تشخیص میکرو ترک‌ها دارد.

۵- تشکر و قدر دانی

بدین وسیله از همکاری آزمایشگاه دانشگاه تفرش بابت در اختیار قرار دادن دستگاه‌های آزمایش کشش و نشرآوایی، هم‌چنین شرکت فراصوت تجهیز ایرانیان بابت در همکاری در انجام جوشکاری فراصوتی آلتراسونیک کمال تشکر و قدر دانی را داریم.

۶- تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷- منابع

- [1] Haddadi, F., & Abu-Farha, F. (2015). MICROSTRUCTURAL AND MECHANICAL PERFORMANCE OF ALUMINIUM TO STEEL HIGH POWER ULTRASONIC SPOT WELDING. *Journal of Materials Processing Technology*, 225, 262–274.
- [2] Kravchenko, O. (2005). ACTIVATION OF ALUMINUM METAL AND ITS REACTION WITH WATER. *Journal of Alloys and Compounds*, 397(1–2), 58–62.
- [3] Carletti, H. G. (2006). DETERMINATION OF METAL-MOLD HEAT TRANSFER COEFFICIENT FOR ALUMINUM ALLOYS.
- [4] Zhang, C. (2022). ULTRASONIC WELDING OF ALUMINIUM TO STEEL: A REVIEW. *Metals*, 13(1), 29.
- [5] Ghadarah, N., & Ayre, D. (2023). A REVIEW ON ACOUSTIC EMISSION TESTING FOR STRUCTURAL

- OF DAMAGE MECHANISMS IN GLASS/POLYESTER COMPOSITES. *Materials & Design*, 37, 416–422.
- [18] Far, S. (2014). INVESTIGATION OF INTERLAYER SEPARATION AND DETERMINATION OF INTERLAYER FRACTURE TOUGHNESS IN GLASS/EPOXY COMPOSITES USING ACOUSTIC EMISSION METHOD. *Modares Mechanical Engineering*, 14(4), 1–11. (in Persian)
- [19] Najafabadi, A. (2014). ANALYSIS AND MONITORING OF FAILURE INITIATION IN ALUMINUM/COMPOSITE JOINTS USING ACOUSTIC EMISSION. *Composite Science and Technology*, 1(1), 13–22. (in Persian)
- [20] Shakil, M. (2014). EFFECT OF ULTRASONIC WELDING PARAMETERS ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF DISSIMILAR JOINTS. *Materials & Design*, 55, 263–273.
- [21] Yusefi, A. (2024). INVESTIGATION OF PROCESS PARAMETERS ON THE MECHANICAL STRENGTH IN ULTRASONIC METAL WELDING OF ALUMINUM TO COPPER DISSIMILAR JOINTS. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 77(11), 3707–3718.
- [22] Yusefi, A. (2024). MICROSTRUCTURE EVOLUTION AND MECHANICAL PROPERTIES ANALYSIS IN DISSIMILAR ULTRASONIC METAL WELDING OF ALUMINUM TO COPPER. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 2922–2935.