



بررسی تجربی و عددی اثر تنش پسماند جوشکاری بر فرکانس‌های طبیعی

امیرحسین مجیدی‌راد^{۱*} و علی‌اصغر جعفری^۲

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

^۲ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۱۱/۰۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۱۶

چکیده

فرآیند ساخت، سبب به وجود آمدن تنش پسماند در سازه‌ها می‌شود. فرآیندهایی چون جوشکاری نیز در به وجود آمدن این تنش‌ها دخیل بوده و بنا به کاربرد، می‌توانند مفید یا مضر باشند. برای اندازه‌گیری تنش پسماند، غالباً باید از تست‌های پرهزینه و زمان‌بر بهره‌جست، این درحالی‌است که تست مودال بسیار کم‌هزینه و سریع است. در مواردی که تغییرات دقیق تنش مدنظر نبوده، تنها تغییرات کیفی آن مورد نظر است، تست مودال جایگزین مناسبی برای تست‌های اندازه‌گیری تنش پسماند است. در مقاله حاضر، ابتدا قطعه آلومینیومی تحت آنالیز مودال تجربی قرار گرفته، سپس قطعات جوشکاری شده تحت تست مودال قرار می‌گیرند و فرکانس‌های طبیعی قبل و بعد از جوشکاری مقایسه می‌شوند. لازم بذکر است، تست مودال تجربی بوسیله روابط اولر-برنولی، صحت‌سنجی شده است. علاوه بر آنالیز مودال تجربی، مدل‌سازی عددی فرآیند جوشکاری نیز، صورت پذیرفته و علاوه بر صحت‌سنجی شبیه‌سازی فرآیند، نتایج عددی با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود، جوشکاری موجب سخت‌شدن قطعه شده، فرکانس‌های طبیعی سازه را افزایش می‌دهد. این سختی محلی تمامی فرکانس‌های طبیعی قطعه را حدود ۲ درصد افزایش داده که این بررسی، توسط تحلیل عددی نیز صورت پذیرفته است. در این مقاله، به بررسی کمی اثر تنش پسماند ناشی از جوشکاری روی تغییرات فرکانس‌های طبیعی قطعه حاضر پرداخته می‌شود. از مقایسه فرکانس‌های طبیعی سازه می‌توان به وجود تنش پسماند پی‌برد و تغییر فرکانس به وجود آمده را با تنش پسماند ایجاد شده مرتبط دانست.

کلمات کلیدی: تنش پسماند، جوشکاری؛ آنالیز مودال تجربی؛ فرکانس طبیعی؛ مدل‌سازی عددی جوشکاری.

Effect of Welding Residual Stress on Natural Frequencies Using Experimental and Numerical Analysis

A.H. Majidi Rod^{1,*}, A.A. Jafari²

¹ MSc., Mech. Eng., K.N.Toosi University of Technology., Tehran, Iran

² Prof., Mech. Eng., K.N.Toosi University of Technology., Tehran, Iran

Abstract

The manufacturing processes mostly generate residual stresses in structures. Welding as well, can cause these types of stresses which can be useful or detrimental in different cases. Expensive and time-consuming tests should be conducted to measure residual stresses, however, modal testing is widely available providing results conveniently and quickly. In cases in which the qualitative changes in stress is required, experimental modal testing is a suitable substitute for residual stress measurement processes. In this paper, experimental modal analysis have been conducted on an aluminum specimen, also the same procedure has been done on welded specimens. Natural frequencies are compared before and after the welding along with verification of experimental modal analysis integrity using Euler-Bernoulli relations. In addition to experimental modal analysis, finite element modeling of welding process has been done comparing the numerical and experimental results. The results obtained from the investigation have shown that welding made the structure harder leading to elevation of its natural frequencies. This increase in frequencies are associated with residual stresses generated in welding process. By comparing natural frequencies of the specimens, a quantitative relation can be drawn between the residual stress caused by welding and changes of natural frequencies.

Keywords: Residual Stress, Welding, Experimental Modal Analysis, Natural Frequency, Finite Element Modeling of Welding.

۱- مقدمه

فرآیند جوشکاری، سبب به‌وجود آمدن تنش پسماند در سازه شده، موجب تغییر خواص ارتعاشی قطعه می‌شود. بررسی مودال و پارامترهای ارتعاشی قطعه جوشکاری شده، اطلاعات مهمی را در رابطه با میزان تنش پسماند در ناحیه جوش مهیا می‌سازد. انتظار می‌رود با جوش دادن قطعه، فرکانس‌های طبیعی آن به طور کیفی افزایش یابند. حال آنکه از میزان کمی این تغییرات، اطلاعات دقیقی در دسترس نیست. در پژوهش‌های مشابه پیشین، Friedman آنالیز دوبعدی کاملی را انجام داد و طی آن مشخص شد که الگوی دما با زمان تغییر نکرده و با سرعت ثابتی در امتداد خط جوش حرکت می‌کند. از این رو، ابعاد و اندازه مسئله جهت ارزیابی دما در مقطعی عمود بر خط جوش کاهش یافته است [۱]. در مقاله‌ای دیگر، Qu و همکارانش به بررسی عددی رابطه تنش پسماند و پارامترهای ارتعاشی تیرهای فولادی پرداختند و عوامل متعددی از جمله، اعوجاج ناشی از جوشکاری را مورد مطالعه قرار دادند [۲]. در سال ۲۰۱۴، Aykan و همکارانش از آنالیز مودال جهت ردیابی آسیب وارده به سازه بوسیله متد شناسایی غیرخطی، استفاده کردند. آن‌ها از قطعات ترک خورده متعددی استفاده کردند و غیر خطی بودن را مورد بررسی قرار دادند. هدف این بررسی، مکان‌یابی ترک به عنوان یک آسیب ساختاری بود [۳]. در تحقیقی دیگر، de Brito و همکارانش، به تست مودال جایگاه متحرک تماشاجیان پرداختند و علاوه بر مدل‌سازی عددی کل سازه، بروزرسانی مدل به صورت خودکار را بررسی کردند [۴]. در تحقیقی دیگر، Narayana و همکارانش، بواسطه تغییرات پارامترهای مودال، تکنیکی جدید جهت شناسایی وجود ترک و همچنین موقعیت آن ارائه کردند. این پژوهش، بر تیر یک‌سر گیردار به‌صورت تجربی و تحلیلی صورت گرفت [۵]. Husain به بررسی آسیب بوسیله تغییر در مدول یانگ پرداخت و مدل‌سازی عددی را تا حد امکان براساس متغیرهای ارتعاشی بهینه ساخت [۶]. Abdul Rani و همکارانش، به بررسی تست مودال مدل المان محدود در سازه فولادی با جوش نقطه‌ای پرداختند. در این تحقیق، همچنین بهینه سازی مدل نیز مورد توجه قرار گرفت [۷]. Hu و Richardson در پروسه جوشکاری آلومینیوم آلیاژی با مقاومت بالا، به وجود تعداد زیادی ترک عرضی در منطقه مذاب جوش اشاره کردند [۸].

این مقاله، در واقع تلفیقی از پژوهش‌های پیشین به منظور ایجاد ارتباط بین تنش پسماند و آنالیز مودال است. در اینجا، ابتدا به آنالیز مودال قطعه بدون جوش و جوشکاری شده پرداخته می‌شود. سپس تغییرات فرکانس‌های طبیعی بررسی و در نهایت، مراحل مدل‌سازی فرآیند جوشکاری در نرم‌افزار آباکوس ارائه شده است.

۲- روابط حاکم بر مسئله

جهت بررسی تحلیلی مسئله می‌توان از رابطه اولر-برنولی برای تیرهای نازک با مقطع یکنواخت و دوسر آزاد^۱ استفاده کرد. با بررسی مدل تحلیلی ارتعاشات قطعه بدون جوش با این تئوری، می‌توان فرکانس طبیعی را به صورت رابطه ۱ نوشت [۹].

$$\omega = \beta^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} = (\beta l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}} \quad (1)$$

$$\beta_1 l = 4.730041, \quad \beta_2 l = 7.853205$$

$$= 4.73004^2 \sqrt{\frac{71 \times 10^9 \times 1.7496 \times 10^{-9}}{2640 \times 5.832 \times 10^{-4} \times (328 \times 10^{-3})^4}}$$

$$= 1.867938 \times 10^3 \text{ rad/sec} = \frac{1.9952 \times 10^3}{2\pi}$$

$$= 297.2915 \text{ Hz} \quad (2)$$

بنابر تئوری اولر، بایستی نسبت طول به ضخامت بیشتر از ۲۰ بوده تا نتایج تحلیلی با تجربی هم‌خوانی داشته باشند که در اینجا این فرض بدرستی در نظر گرفته شده است. واضح است ثوابت $\beta_n l$ مربوط به شکل مود مورد نظر در تئوری است. در رابطه ۱، ثوابت مربوط به دو فرکانس اول بررسی شده است. لازم بذکر است که روابط فوق مربوط به تیر بوده، در مورد کار حاضر این شرایط برای فرکانس‌های اول و سوم رخ می‌دهد. شکل مود فرکانس دوم به صورت پیچشی بوده که در ادامه به آن پرداخته می‌شود. همچنین شکل موده‌های ارتعاشی مربوط به صفحه نیز، در این مورد صادق است [۱۰]. در این پژوهش از قطعه‌ای به جنس آلومینیوم آلیاژی سری ۵ باکد 5056-O استفاده شده است. مشخصات مکانیکی قطعه در جدول ۱ قید شده‌اند [۱۱]. ابعاد هندسی قطعه نیز، در شکل ۱ نشان داده شده است.

¹Free-Free

جدول ۱- مشخصات و خواص مکانیکی قطعه آلومینیومی [۱۱]

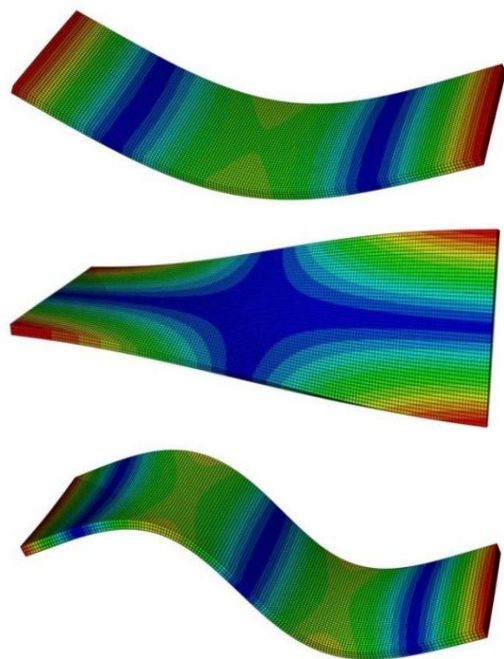
سختی (HB)	تنش تسلیم (MPa)	ضریب پواسون	مدول یانگ (GPa)	چگالی (kg/m ³)
۶۵	۱۵۲	۰٫۳۳	۷۱	۲۶۴۰

جدول ۲- فرکانس اول و دوم قطعه یک‌بعدی

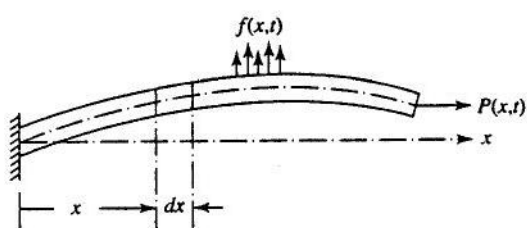
فرکانس اول (Hz)	فرکانس دوم (Hz)	فرکانس طبیعی نامیرا
۲۹۷٫۳	۸۱۹٫۵	



شکل ۱- ابعاد هندسی قطعه



شکل ۲- شکل مودهای قطعه موردنظر



شکل ۳- مدل پیش‌بار کششی در قطعه

۳- تست تجربی

ابتدا قطعه‌ای با ضخامت ۲ میلی‌متر انتخاب شد که پس از جوشکاری دچار اعوجاج گردید. این مسئله، هندسه قطعه را به شدت تغییر داد، بطوری‌که شکل مودهای قطعه قبل و بعد جوشکاری دیگر قابل مقایسه نبودند. این مشکل با افزایش ضخامت ورق برطرف گردید و در نهایت، ورق با ضخامت ۶ میلی‌متر (شکل ۴) انتخاب شد.

بنا به روابط ۱ و ۲، فرکانس طبیعی نامیرای اول و دوم قطعه بدون جوش محاسبه شده، نتایج در جدول ۲ ذکر شده است [۹]. فرکانس‌های بدست آمده به کمک رابطه ۱ تماماً مربوط به تیر بوده، شکل مودهای مربوط به قطعه سه بعدی مورد نظر در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود در مدل مورد نظر شکل مودهای اول و سوم مطابق با روابط فوق بوده، شکل مود دوم برای قطعه به صورت پیشگی است. این شکل مودها برای قطعه قبل و بعد از جوشکاری صادق هستند.

در مراجع معتبر تنش پسماند به مثابه پیش‌بار کششی در نظر گرفته شده که می‌تواند فرکانس طبیعی را تحت تاثیر قرار دهد. برای شرح بیشتر لازم است، معادله انرژی را برای یک تیر تحت بار مطابق شکل ۳ بنویسیم [۱۲].
برای بدست آوردن معادله دیفرانسیل حرکت قطعه، از اصل همیلتون استفاده شده و با حل معادله دیفرانسیل، فرکانس طبیعی قطعه تحت نیروی محوری P به شکل رابطه ۳ بدست می‌آید [۱۳]:

$$\omega_n = \frac{\pi^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \left(n^4 + \frac{n^2 P l^2}{\pi^2 EI} \right)^{1/2} \quad (3)$$

در این رابطه ρ چگالی، A سطح مقطع قطعه، E مدول یانگ، I ممان اینرسی، l طول قطعه، P نیروی محوری و ω_n فرکانس طبیعی n ام قطعه است. مشاهده می‌شود که وجود تنش پسماند در سازه، باعث سخت شدن می‌شود. اگر نیرو فشاری باشد، سازه نرم می‌شود که این حالت در کماتش رخ می‌دهد و اگر نیرو کششی باشد، سازه سخت‌تر خواهد شد؛ بنابراین با افزایش میزان و گستردگی تنش، پسماند در قطعه سازه سخت‌تر شده، در واقع فرکانس طبیعی قطعه افزایش می‌یابد.

آن را از گیره جدا می‌کنیم. در شکل ۵، ابعاد ورق بزرگ قبل از برش و همچنین نحوه گیردار کردن آن مشخص شده است. حال دو قطعه مشابه از نظر ابعاد هندسی که یکی بدون جوش و دیگری دارای دوپاس جوش است (شکل ۶)، آماده انجام تست مودال هستند.

لازم به ذکر است که تعداد نقاط اندازه‌گیری، تاثیری بر دقت نتایج مربوط به فرکانس طبیعی قطعه ندارد، زیرا تحریک در هر نقطه و نیز استخراج سیگنال خروجی از نقطه دلخواهی دیگر، فرکانس‌های طبیعی یکسانی را نشان خواهد داد؛ اما جهت دیدن شکل مودهای مختلف قطعه و جلوگیری از مشکلاتی چون پدیده الیاسینگ^۳، محل اعمال تحریک و همچنین محل شتاب‌سنج به عنوان خروجی آزمایش، بسیار حائز اهمیت است [۱۵]. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص شده است، ۲۷ نقطه روی قطعه کار مدرج شده تا شکل مودهای ارتعاشی با دقت مناسبی حاصل شوند. تحریک در این نقاط صورت گرفته، در حالی که محل شتاب‌سنج ثابت است.

در این تحقیق، سه مود اول بررسی شده است. محل‌های تقریبی گره نقطه‌ای هستند که کمترین جابه‌جایی را در ازا تحریک داشته، حتی الامکان شتاب‌سنج باید از آنها دور باشد. به این ترتیب، مناسب‌ترین مکان برای قرارگیری شتاب‌سنج و همچنین تحریک سازه مشخص شده است. در مبانی آنالیز مودال، تاثیر لرزاننده^۴ در بروز خطای خودبه‌خودی^۵ سبب شده تا گاهی آن را نزدیک به نقاط گره قرار دهند. از این رو معیاری با نام نقطه تحریک بهینه نشده^۶ تعریف شده تا نقطه‌ای که برای اعمال تحریک و همچنین قرارگیری سنسور مناسب‌تر هستند، مشخص باشند [۱۵]. در شکل ۷، این نقاط نشان داده شده‌اند.

هرچه این معیار برای نقطه‌ای اندازه کمتری داشته باشد، نقطه مورد نظر مکان مناسب‌تری برای تحریک سازه خواهد بود. نقاط کم‌رنج، مکان مناسبی برای تحریک می‌باشند. پس از انجام آنالیز مودال، نمودار پاسخ فرکانسی^۷ یکی از نقاط قطعه در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۴ - قطعه ۶ میلی‌متری

این انتخاب با در نظر گرفتن ضخامت‌های گزارش شده در مقالات مشابه و همچنین انواع ورق آلومینیومی موجود انجام شده است [۱۴]. مشخصات و خواص مکانیکی قطعه آلومینیومی در جدول ۱ ذکر شده‌اند [۱۱]. در شکل ۱، ابعاد قطعه مورد آزمایش نشان داده شده است. برای اطمینان از صحت نتایج و به‌علاوه از آنجایی که امکان شکستن قطعه‌ها از ناحیه جوش وجود دارد، چندین قطعه مشابه با ابعاد یکسان برای انجام تست‌ها در نظر گرفته شد. ورق ابتدا برش داده شده، سپس جهت ایجاد حفره جوش مناسب‌تر، لبه‌های جوش اصطلاحاً پخ خورده تا ماده فلز پرکننده سطح تماس بیشتری با فلز پایه داشته و استحکام جوش بالاتر رود.

لازم به ذکر است، پهناي جوش ۷ میلی‌متر بوده، نوع جوشکاری، جوش گاز تنگستن ساکن^۱ است که جهت جوشکاری آلومینیوم استفاده می‌شود. مشخصات جوشکاری به‌همراه خواص میله جوش^۲ از جنس آلومینیوم آلیاژی ۴۰۴۳ در جدول ۳ ذکر شده‌اند [۱۱].

جدول ۳ - مشخصات جوشکاری

سرعت مشعل (mm/s)	ولتاژ (V)	جریان (A)	چگالی میله جوش (kg/m ³)	قر میطله جوش (mm)
۲/۵	۷/۶	۱۱۸	۲۶۸۰	۳

دوتکه ورق توسط دوگیره به میز کار بسته شده، یک پاس جوش توسط اپراتور زده می‌شود. پس از سرد شدن، قطعه از میز جدا شده، برگردانده و مجدداً به میز بسته می‌شود. پاس دوم جوش توسط اپراتور زده شده، پس از خنک شدن قطعه،

³ Aliasing

⁴ Shaker

⁵ Biased Error

⁶ Non-optimum Driving Point

⁷ FRF

¹ Tungsten Inert Gas (TIG)

² Filler

دلیل این اختلاف جزئی می‌تواند عدم دقت کافی در آنالیز آلومینیوم آلیاژی استفاده شده و یا ناشی از خطاهای خودبه‌خودی تست تجربی باشد. جهت انجام تست روی قطعه جوشکاری شده، همانند قبل، شتاب سنج در نقطه ۲۷ نصب بوده، نقاط ۱_۲۷ بوسیله چکش تحریک شده‌اند.

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، ورق اولیه به طول نیم متر به پنج قسمت مساوی تقسیم شده، جهت حصول اطمینان از نتایج بدست آمده از تست تجربی مودال، ۳ قطعه دیگر نیز مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نتایج بدست آمده از تست این قطعات از لحاظ آماری، تأکیدی بر ثبات نتیجه‌گیری‌های انجام شده است. واضح است، جوشکاری در تمامی نمونه‌ها موجب افزایش فرکانس طبیعی شده است. در جدول ۵، نتایج تست قطعه شماره ۲ که قطعه مورد آزمایش است، با قطعات ۳، ۴ و ۵ مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، چون تمامی قطعات مربوط به یک ورق بوده، همچنین جوش سرتاسر و تقریباً یکنواخت است، تفاوت فرکانس‌های طبیعی این ۴ قطعه جوشکاری شده بسیار ناچیز است.

در نمودار شکل ۹، تفاوت پاسخ فرکانسی قطعه بدون جوش با قطعه جوشکاری شده در تست تجربی مودال بررسی شده است.

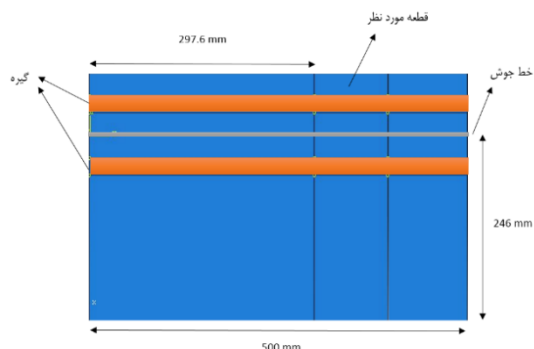
مشاهده می‌شود که جوشکاری سبب افزایش سختی قطعه شده و فرکانس‌های طبیعی آن افزایش می‌یابد. این نتایج، در جدول ۶ با هم مقایسه شده‌اند.

جدول ۴- مقایسه نتایج روابط اولر با تست تجربی مودال

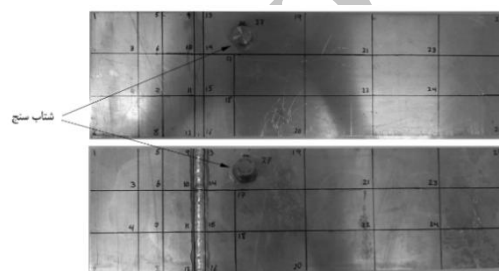
فرکانس اول (Hz)	فرکانس دوم (Hz)	
۲۹۱/۱	۷۹۷/۹	تست تجربی مودال
۲۹۷/۳	۸۱۹/۵	رابطه اولر-برنولی
٪ ۲/۰۶	٪ ۲/۶۳	خطا

جدول ۵- فرکانس طبیعی قطعات جوشکاری شده

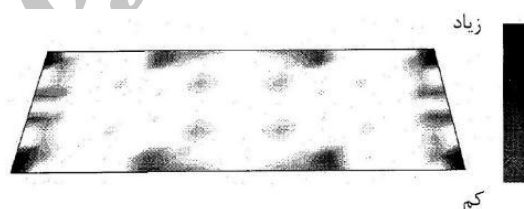
شماره قطعه جوشکاری شده	فرکانس اول (Hz)	فرکانس دوم (Hz)	فرکانس سوم (Hz)
قطعه ۲	۲۹۵/۶	۵۸۵/۶	۸۰۶/۸
قطعه ۳	۲۹۶/۸	۵۸۶/۲	۸۱۰/۶
قطعه ۴	۲۹۵/۶	۵۸۴/۳	۸۰۸/۱
قطعه ۵	۲۹۴/۳	۵۸۳/۷	۸۰۵



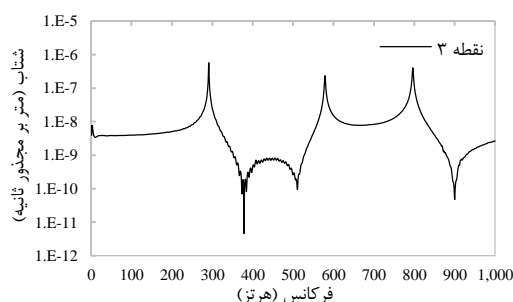
شکل ۵- ابعاد هندسی ورق بزرگ قبل از برش



شکل ۶- تشابه قطعه قبل و بعد جوش

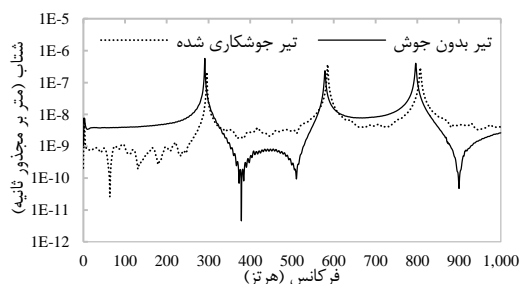


شکل ۷- نمایش نقاط تحریک بهینه نشده



شکل ۸- نمودار پاسخ فرکانسی قطعه بدون جوش

لازم است، نتایج تست تجربی قطعه بدون جوش با نتایج تحلیلی بدست آمده از رابطه اولر-برنولی در قسمت قبل صحت‌سنجی شوند. در جدول ۴، این مقایسه صورت پذیرفته است.



شکل ۹- مقایسه پاسخ فرکانسی قطعه بدون جوش با قطعه جوشکاری شده

علاوه بر شتاب سنج، می‌توان از جرم فلز پرکننده^۲ که دوتکه را به هم جوش داده نیز صرف‌نظر کرد. جرم این فلز، حدود ۲ گرم بوده که درصد جرمی معادل ۰/۴٪ را داراست. با توجه به مقایسات انجام شده برای شتاب‌سنج با درصد جرمی ۲/۴٪، واضح است که نادیده گرفتن اثر جرم فلز پرکننده در فرکانس طبیعی، فرضی منطقی است.

در این روش، ابتدا یک تحلیل حرارتی برای به دست آوردن تاریخچه دمایی برای تمام نقاط موجود در مش اجزاء محدود انجام می‌شود. سپس این داده‌ها، به‌عنوان ورودی برای یک تحلیل مکانیکی (تنش- تغییر مکان) الاستیک-پلاستیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ارتباط سبب می‌شود، تاریخچه دمایی و تاثیرات مکانیکی آن به وسیله پدیده انبساط حرارتی مرتبط گردند و اثر تغییرات دمایی بر رفتار مکانیکی اعمال شود.

تحلیل حرارتی، یک تحلیل سه بعدی انتقال حرارت است. در این تحلیل، معادله انتقال حرارت حاکم به صورت معادله ۴ است [۱۹].

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}(x, y, z, t) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} \quad (4)$$

در اینجا ρ چگالی ماده، (kg/m^3) ، C_p ظرفیت گرمایی ویژه، T ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$)، دمای ماده در هر لحظه (K)، k رسانایی حرارتی وابسته به دما (W/m.K)، \dot{Q} نرخ حرارت تولیدی درونی (W/m^3) و t زمان (sec) است. باتوجه به معادله فوق

جدول ۶- مقایسه فرکانس‌های طبیعی قطعه بدون جوش با قطعه جوشکاری شده

فرکانس اول (Hz)	فرکانس دوم (Hz)	فرکانس سوم (Hz)	
۲۹۱	۵۷۹	۷۹۶	قبل از جوشکاری
۲۹۶	۵۸۴	۸۰۷	بعد از جوشکاری

همانطور که در تست تجربی مشاهده شد، شکل مودهای ارتعاشی قطعه قبل و بعد از جوشکاری تغییر چندانی نکرده، مطابق حالت نشان داده شده در شکل ۲ می‌باشند.

لازم بذکر است، دقت تست تجربی مودال بسیار بالاتر از تست اندازه‌گیری تجربی تنش پسماند است، به طوری که در اندازه‌گیری به روش سوراخ‌زنی خطا در بهترین حالت بین ۵ تا ۱۰ درصد بوده، حال آنکه خطا در آنالیز مودال، کمتر از یک هرتز است. بنابراین دقت پایین، هزینه بالا و همچنین زمان‌بر بودن تست اندازه‌گیری تنش، آنالیز مودال کاربردی است [۱۷، ۱۶]. همچنین تغییر موقعیت خط جوش نیز می‌تواند قابل بحث و بررسی باشد. در پژوهشی که به تاثیر محل حفره قطعه در فرکانس طبیعی پرداخته شده، مشاهده می‌شود فارغ از محل قرارگیری حفره، نتایج از الگوی یکسانی تبعیت می‌کنند. [۱۸].

۴- مدلسازی عددی

جنس آلومینیوم انتخاب شده از نوع ۵۰۵۶-۰ است. ورق اولیه دارای ابعاد $۶ \times ۳۲۸ \times ۵۰۰$ بوده که به پنج قسمت مساوی تقسیم شده تا در صورت شکستگی، خللی در روند انجام آزمایش وارد نشود.

پس از بررسی همگرایی مش، مشاهده می‌شود با صد برابر شدن تعداد المان‌ها، فرکانس‌ها حدود ۰/۳٪ تغییر می‌کنند؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، میزان کوچک بودن المان‌ها تاثیر چندانی بر دقت نتایج ندارند.

شتاب‌سنج مورد استفاده از نوع دی جی بی^۱ باکد A/120/V بوده که دارای جرمی معادل ۱۲/۵ گرم است. درصد جرمی شتاب‌سنج در کل سازه معادل ۲/۴٪ است. میزان این اثر بررسی شده، صرف‌نظر از آن کاملاً منطقی است.

² Filler Metal

¹ DJB

جدول ۸- ضریب انبساط حرارتی متوسط آلومینیوم متغیر با دما [۱۱]

ضریب متوسط ($\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{K}$)	بازه دمایی ($^{\circ}\text{C}$)
۲۲/۵	۰ تا ۲۰
۲۴/۱	۲۰ تا ۱۰۰
۲۵/۲	۲۰ تا ۲۰۰
۲۶/۱	۲۰ تا ۳۰۰

جدول ۹- تنش تسلیم فلز متغیر دما [۱۱]

دما ($^{\circ}\text{C}$)	۲۴	۱۴۹	۲۰۴	۲۶۰	۳۱۶	۳۷۱
تنش تسلیم (MPa)	۱۵۲	۱۱۷	۹۰	۶۹	۴۸	۲۸

این دو طریق، همرفت با محیط اطراف و تشعشع می‌باشند که می‌توان این شرط مرزی را با معادله ۵ نشان داد:

$$q_{bc} = h(T - T_a) + \varepsilon_{em}\sigma_{bol}(T^4 - T_a^4) \quad (5)$$

در این رابطه، q_{bc} حرارت اتلافی (W/m^2)، h ضریب همرفتی ($\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$)، ε_{em} توان گسیل دادن، σ_{bol} ثابت استفان - بولتزمن^۲ ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}^4$)، T دمای هر نقطه (K) و T_a دمای محیط (K) است. از آنجا که این شرط مرزی با توجه متغیرها و ثوابت موجود در آن و شرایط متغیر آن در هر مرحله منجر به پیچیده شدن شبیه‌سازی می‌شود، ضریب مرکب h_c که از معادله ۶ به دست می‌آید و اثرات همرفت و تشعشع را به طور همزمان مدنظر قرار می‌دهد، مورد استفاده قرار خواهد گرفت [۱۹، ۲۲]:

$$h(T - T_a) + \varepsilon_{em}\sigma_{bol}(T^4 - T_a^4) = h_c(T - T_a) \quad (6)$$

در این روش، شار حرارتی روی محل جوشکاری حرکت کرده، تداعی کننده حرکت مشعل جوشکاری^۳ روی قطعه است. حرکت شار حرارتی عمود بر سطح ورق بوده، روی سطح بالای ورق اعمال می‌شود. روش‌های متنوعی برای مدل کردن شار حرارتی (یا منبع حرارتی) می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. برای این کار، نیاز به نوشتن یک زیر

خواصی از ماده که برای تحلیل حرارتی مورد نیاز هستند، چگالی، ظرفیت حرارتی ویژه و رسانایی حرارتی می‌باشند که در ادامه برای ماده مورد استفاده در این کار آورده شده‌اند [۱۱].

مشخصات مکانیکی و حرارتی فلز پایه که از جنس آلومینیوم آلیاژی ۵۰۵۶-۰ هستند، در جدول ۷ قید شده‌اند.

در جدول ۸، ضریب انبساط حرارتی آلومینیوم که متغیر با دما بوده، نشان داده شده است. در جدول ۹، تنش تسلیم فلز همراه با تغییرات دما بیان شده است. با استناد به برخی پژوهش‌ها که در آن‌ها رفتار فلز پایه جوش کاملاً مومسان^۱ بوده، برای این ماده نیز در دماهای مختلف این شرایط برقرار است. دلیل آن را می‌توان تاثیر زیاد تنش تسلیم در دماهای مختلف بیان کرده و از تاثیر تغییرات کرنش در ناحیه مومسان چشم‌پوشی کرد [۲۰]. در این میان، برخی عوامل تاثیر بیشتر و برخی تاثیر کمتری بر نتایج دارند که همان‌طور که انتظار می‌رود، تنش تسلیم در دماهای مختلف، از عوامل مهم و حساس است [۲۱].

ورودی حرارتی ناشی از مشعل جوشکاری، به صورت شار حرارتی توزیع شده مدل می‌شود که تمرکز آن بر خط جوش است، سپس این حرارت از طریق هدایت به بقیه نقاط انتقال می‌یابد. بعد از مرحله حرارت دادن، ورق تا دمای مشخصی که می‌تواند یک دمای تعیین شده برای شروع مرحله بعدی جوشکاری و یا دمای محیط پس از انجام آخرین مرحله جوشکاری باشد، سرد می‌شود که این کار با استفاده از شرط مرزی حرارتی انجام پذیرفته است. با توجه به نوع فرایند ورق می‌تواند به دو طریق با محیط اطراف جهت سرد شدن و رسیدن به تعادل حرارتی انتقال حرارت انجام دهد.

جدول ۷- مشخصات مکانیکی و حرارتی فلز پایه [۱۱]

چگالی (kg/m^3)	مدول یانگ (GPa)	ضریب ضریب پواسان	تنش تسلیم (MPa)	رسانایی گرمایی ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	گرماوی ویژه ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$)
۲۶۴۰	۷۱	۰/۳۳	۱۵۲	۱۱۷	۹۰۴

^۲ Stefan-Boltzmann constant^۳ Torch^۱ Perfect Plastic

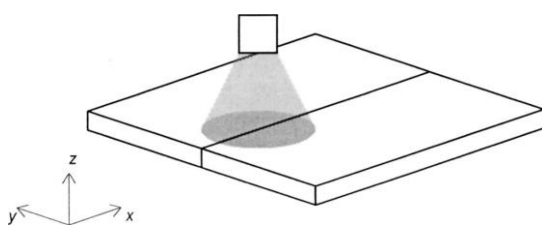
قله دوم و کوچکتر، مربوط به پاس دوم جوشکاری است. این نمودار، در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

جدول ۱۰- مشخصات مدل‌سازی جوشکاری

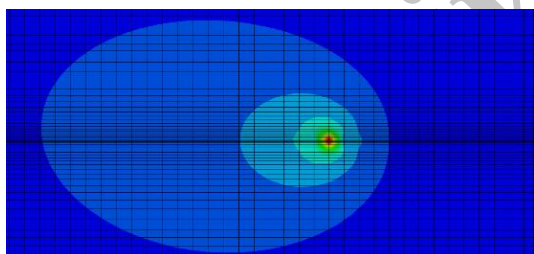
سرعت مشعل (mm/s)	ولتاژ (V)	جریان (A)	راندمان	ضریب همرفتی معادل (W/m ² .K)	قطر شار حرارتی (mm)
۲/۵	۷/۶	۱۸	۷۰	۳۰	۷

جدول ۱۱- زمانبندی فرآیند جوشکاری

پاس اول (s)	خنک شدن اولیه (s)	پاس دوم (s)	خنک شدن ثانویه (s)	سرد شدن نهایی (s)
۲۰۰	۱۸۰	۲۰۰	۱۸۰	۴۰۰۰



شکل ۱۰- حرکت شار حرارتی روی خط جوش



شکل ۱۱- حرکت شار حرارتی روی ورق

لازم به ذکر است، عامل زمان برش، تاثیری در میزان تنش آزاد شده ندارد. همان‌طور که در شکل ۵ نمایش داده شده است، قطعه مورد آزمایش از کل ورق جدا شده، برای این کار از شیوه حذف المان^۵ استفاده شده است. در شکل ۱۳، تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری پس از برش قطعه از ورق بزرگ اولیه، نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که در این

برنامه^۱ به زبان فرترن^۲ است که در نرم‌افزار آباکوس این کد^۳ مشخص بوده، به عنوان منبع حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۱۰، نحوه حرکت شار حرارتی روی خط جوش را نشان می‌دهد. انتخاب منبع حرارتی بستگی به نوع فرایند جوشکاری، ضخامت‌هایی که جوشکاری می‌شوند و عواملی از این قبیل دارد [۲۲].

در این مدل‌سازی کل دایره به یک نسبت داغ نمی‌شود و توزیع حرارت مطابق با رابطه ۷ است:

$$q = \frac{3Q_p}{\pi a^2} \exp\left(-3\left(\frac{r}{a}\right)^2\right) \quad (7)$$

در رابطه (۷) Q_p به صورت رابطه ۸ تعریف می‌شود:

$$Q_p = \eta VI \quad (8)$$

در رابطه ۷، a بیانگر شعاع منبع دایره‌ای، τ متغیر شعاعی حرارت محلی و q حرارت ورودی به سطح است. در این تحقیق، ضریب همرفت برای زیر و روی ورق $h_c = 30$ در نظر گرفته شده است. در مقالاتی که بیشتر به این زمینه پرداخته‌اند، مواردی چون حساسیت ضریب همرفت h بررسی و مقدار آن برای سطح بالایی ورق که در تماس با هواست و سطح پایینی که در تماس با میز کار است، متفاوت است [۲۳]. دمای محیط و دمای اولیه جسم در تحلیل برابر ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده و بنا به مدل‌سازی‌های متعدد، راندمان ۷۰٪ برای این شبیه‌سازی در نظر گرفته شده است. بنا به مراجع متعدد، بازده جوشکاری آرگون^۴ بین ۰/۲۲ - ۰/۸ است [۲۵، ۲۴]. در جدول ۱۰، مشخصات جوشکاری بیان شده است.

در شکل ۱۱، توزیع دما ناشی از حرکت شار حرارتی روی ورق نیم متری به صورت کیفی بدون ذکر جزئیات نمایش داده شده است.

زمانبندی مراحل مختلف جوشکاری، در جدول ۱۱ قید شده است.

در نمودار تاریخچه دمایی نقطه‌ای واقع بر خط جوش، قله‌های دما حاکی از لحظه‌ای هستند که مشعل جوشکاری از نقطه موردنظر عبور می‌کند. قله ابتدایی، مربوط به پاس اول و

^۱ Subroutine

^۲ Fortran

^۳ DFLUX

^۴ GTAW

^۵ Element Deactivation

شده پرداخته تا تاثیر جوشکاری روی فرکانس طبیعی قطعه بررسی شود. همانطور که انتظار می‌رفت [۲۷]، تنش پسماند ناشی از جوشکاری، موجب سخت شدن قطعه شده، تمامی شکل مودهای ارتعاشی قطعه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. حال آنکه به وسیله این تحقیق، میزان کمی ارتباط بین میزان تنش پسماند به وجود آمده، تغییرات فرکانس طبیعی تحقیق شده است. نتایج تحلیل سه فرکانس اول، در جدول ۱۲ مشخص شده است.

در جدول ۱۳، تغییرات فرکانس طبیعی قبل و بعد از جوشکاری باهم مقایسه شده‌اند.

جهت مقایسه اجمالی نتایج تجربی بیان شده در قسمت قبل با نتایج عددی این قسمت، می‌توان از اطلاعات جدول ۱۴ بهره جست. ملاحظه می‌شود، میزان خطا همواره کمتر از ۵٪ بوده و میزان اختلاف نتایج عددی و تجربی بعد از جوشکاری بیشتر از قبل آن است. غیر خطی بودن تاثیر جوش در تحلیل مودال همچنین ایجاد ناحیه مذاب خط جوش می‌توانند از جمله دلایل این کاهش دقت باشند.

توزیع تنش پسماند نشان داده شده در شکل ۱۴ را می‌توان به تغییرات فرکانس طبیعی نسبت داد [۲۸]. اگرچه با تغییر هر یک از پارامترهای مسئله، پاسخ تغییر خواهد داشت، اما از کلیت نتایج می‌توان در تحلیل مسائل مشابه دیگر بهره جست.

جدول ۱۲- سه فرکانس اول از مدلسازی عددی

فرکانس اول (Hz)	فرکانس دوم (Hz)	فرکانس سوم (Hz)	فرکانس چهارم (Hz)	فرکانس پنجم (Hz)	فرکانس ششم (Hz)
۳۰۹/۷	۶۰۵	۸۵۲/۶	۱۲۷۱	۱۶۸۵	۲۰۵۶

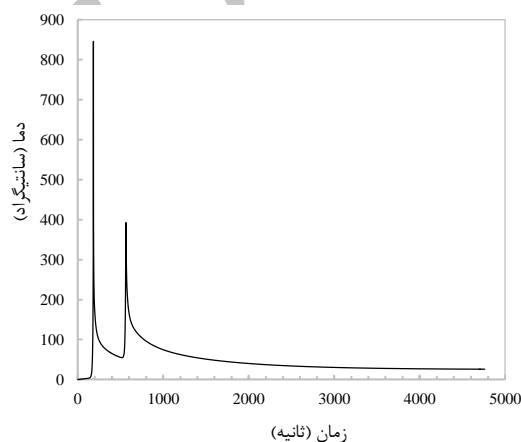
جدول ۱۳- مقایسه فرکانس طبیعی قبل و بعد جوشکاری در

مدلسازی عددی

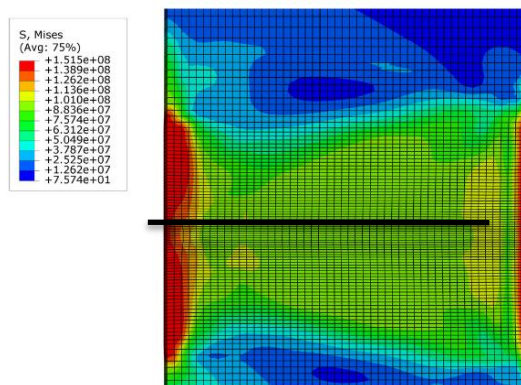
فرکانس اول (Hz)	فرکانس دوم (Hz)	فرکانس سوم (Hz)	فرکانس چهارم (Hz)	فرکانس پنجم (Hz)	فرکانس ششم (Hz)
۲۹۷	۵۹۵	۸۱۷	۱۲۴۸	۱۶۲۳	
۳۰۹/۷	۶۰۵	۸۵۲/۶	۱۲۷۱	۱۶۸۵	
٪ ۳/۸	٪ ۱/۶	٪ ۴/۱	٪ ۱/۸	٪ ۳/۶	

شکل نمایش داده شده است، المان‌های خط جوش، بیشترین اعوجاج را داشته و همچنین پس از برش، بیشترین میزان کاهش تنش پسماند را به نسبت نواحی مجاور دارا است. لازم بذکر است، برای بحث و مقایسه تنش پسماند از تنش میزز استفاده می‌شود.

حال به منظور تایید مدل‌سازی عددی، به مقایسه نتایج بخش تجربی با نتایج عددی پرداخته می‌شود. در شکل ۱۴، در مسیر عمود بر راستای خط جوش، تنش‌های پسماند در جهت جوش (تنش طولی) نمایش داده شده است. لازم بذکر است، شکل کلی نمودارهای بدست آمده از حل عددی تشابه بالایی با کارهای مشابه انجام شده دارد [۱۷، ۲۶]. پس از آنکه فرآیند جوشکاری موجب به وجود آمدن تنش پسماند در قطعه گردید، مجدداً به تحلیل فرکانسی قطعه جوشکاری



شکل ۱۲- تاریخچه دمایی خط جوش

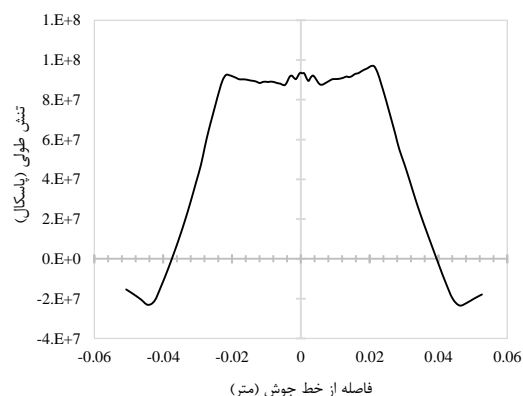


شکل ۱۳- تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری پس از برش قطعه (Pa)

این مقایسه از این جهت حائز اهمیت است که در قسمت مدل‌سازی جوشکاری برای مقایسه نتایج تنش‌پسماند تجربی با عددی، نیاز به یکنواخت بودن جوشکاری احساس می‌شود. این یکنواختی به بالا بردن دقت نتایج کمک کرده، همچنین بدین معناست که تغییرات فرکانس قبل و بعد جوشکاری بسیار بیشتر از خطای وارده و نیز اختلاف فرکانس قطعات جوشکاری شده با یکدیگر است. اثر همگرایی مش، جرم فلز پرکننده جوشکاری و وزن شتاب‌سنج هرکدام بررسی شده و مشاهده شد، صرف نظر کردن از این موارد، فرض معقولی است. تغییرات فرکانس طبیعی در تحلیل عددی مسئله نیز، بررسی و به طور میانگین حدود ۲/۵٪ است. سپس به مقایسه همزمان نتایج تجربی و عددی، قبل و بعد از جوشکاری پرداخته که میزان خطا بین نتایج تجربی و عددی کمتر از ۵٪ گزارش شده است. در نهایت، افزایش تنش پسماند ناشی از جوشکاری، موجب افزایش ۲٪ فرکانس‌های طبیعی می‌شود. گرچه تغییر ۲ درصدی فرکانس چشمگیر نمی‌باشد، اما مطمئناً مربوط به خطای آزمایش نبوده و این مورد در رابطه با ۴ قطعه جوشکاری شده مشابه دیگر نیز بررسی شده است. همانطور که در جدول ۵ ملاحظه می‌شود، تمامی قطعات جوشکاری شده دارای فرکانس‌های مشابه بوده که مقدار انحراف آنها از یکدیگر به مراتب بسیار کمتر از اختلاف فرکانس‌های قطعه بدون جوش و جوشکاری شده است. تغییرات فرکانس طبیعی را می‌توان ناشی از تنش پسماند جوشکاری دانست و از نتایج آن به‌طور کلی می‌توان در تحلیل و مقایسه مسائل مشابه استفاده کرد. این تناسب کمی می‌تواند در مواردی که میزان دقیق اندازه تنش پسماند جوش اهمیت بالایی ندارد، جایگزین روش‌های پرهزینه و زمان‌بر اندازه‌گیری تنش پسماند شود. علاوه بر موارد ذکر شده، مدل‌سازی مربوطه می‌تواند نقطه آغازی برای بررسی‌های بیشتر مربوط به فرآیند جوشکاری و همچنین بهینه‌سازی تنش پسماند باشد.

۶- مراجع

- [1] Friedman E (1975) Thermomechanical analysis of the welding process using the finite element method. J Press Vess-T ASME 97(3): 206-213.
- [2] Qu L, Wei F, Huang J, Zhao H (2013) Numerical Modal analysis for influence of initial deflection



شکل ۱۴- تنش‌های پسماند در جهت جوش

جدول ۱۴- مقایسه همزمان فرکانس‌های عددی و

تجربی، قبل و بعد جوشکاری

فرکانس اول (Hz)	فرکانس دوم (Hz)	فرکانس سوم (Hz)	فرکانس	
۲۹۱	۵۷۹	۷۹۶	تجربی	قبل از جوشکاری
۲۹۷	۵۹۵	۸۱۷	عددی	
٪ ۲	٪ ۲/۶	٪ ۲/۵	خطا	
۲۹۶	۵۸۴	۸۰۷	تجربی	بعد از جوشکاری
۳۰۹	۶۰۵	۸۵۲	عددی	
٪ ۴/۲	٪ ۳/۴	٪ ۵/۲	خطا	

۵- جمع بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، به بررسی قطعات آلومینیومی جوشکاری شده پرداخته شده است. روابط پایه‌ای ریاضی حاکم بیان شده، در ادامه به بررسی تجربی و عددی مسئله پرداخته شده است. هدف از مقایسه و ایجاد رابطه بین فرکانس طبیعی، جایگزین کردن بررسی تجربی فرکانس با بررسی‌های تجربی پرهزینه و زمان‌بر مرتبط با اندازه‌گیری تنش پسماند است.

در این تحقیق، ابتدا تست تجربی مودال روی قطعه بدون جوش انجام شده، نتایج تجربی تطابق بالایی با نتایج تحلیلی نشان دادند. محل قرارگیری شتاب‌سنج و همچنین تحریک سازه نیز بحث شده است. سپس همین تست روی قطعه جوشکاری شده انجام شده، مشاهده گردید که فرکانس‌های طبیعی افزایش یافتند و به عبارتی قطعه سخت شده است. چهار قطعه دیگر که به همراه قطعه قبلی از ورق یک‌پارچه بریده شده‌اند نیز، مورد تست قرار گرفته، نتایج حاصل از مقایسه فرکانس‌های طبیعی تشابه بالایی باهم نشان دادند.

- [16] Sasaki K, Kishida M, Itoh T (1997) The Accuracy of residual stress measurement by the hole-drilling method. *Exp Mech* 37(3).
- [17] Kong F, Kovacevic R (2010) 3D finite element modeling of the thermally induced residual stress in the hybrid laser/arc welding of lap joint. *J Mater Process Tech* 210(6): 941-950.
- [18] Shiquan S, Huandong X, Lihai W (2011) The Application of modal analysis in hole-defect in lumber. *Key Eng Mat* 467-469: 1776-1780.
- [19] Sun W (2009) Current capabilities of the thermo-mechanical modeling of welding processes. *J Multiscale Modelling* 01(03n04): 451-478.
- [20] Khandkar H, Khan JA, Reynolds AP, MA Sutton (2006) Predicting residual thermal stresses in friction stir welded metals. *J Mater Process Tech* 174: 195-203.
- [21] Zhu XK, Chao YJ (2002) Effects of temperature-dependent material properties on welding simulation. *Comput Struct* 80: 967-976.
- [22] Fanous IFZ, Younan MYA, Wifi AS (2003) 3D Finite element modeling of the welding process using element birth and element movement techniques. *ASME 2002 Pressure Vessels and Piping Conference: American Society of Mechanical Engineers* 165-172.
- [23] Chao YJ, Qi X, Tang W (2003) Heat Transfer in friction stir welding—experimental and numerical studies. *J Manuf Sci E-T ASME* 125: 138-145.
- [24] Schellhaase M (1985) *Der schweisslichtbogen ein technologisches werkzeug*. VEB Verlag Technik (DVS), Berlin.
- [25] Radaj D (1992) *Heat effects of welding*. Springer-Verlag.
- [26] Murugan N, Narayanan R (2009) Finite element simulation of residual stresses and their measurement by contour method. *Mater Design* 30: 2067-2071.
- [27] Aoki S, Nishimura T, Hiroi T, Hirai S (2007) Reduction method for residual stress of welded joint using harmonic vibrational load. *Nucl Eng Des* 237: 206-212.
- [28] Buschow KHJ, Cahn RW (2005) Residual stresses and distortion in welds, *encyclopedia of materials: Science and Technology*. Elsevier.
- and residual stress on welded I-steel beam. *JWRHE*.
- [3] Aykan M, Nevzat Ozguven H (2013) Topics in modal analysis, volume 7: proceedings of the 31st imac, a conference on structural dynamics. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series* 45.
- [4] Lira de Brito V, Pena AN, Pimentel RL, Vital de Brito JL (2014) Modal tests and model updating for vibration analysis of temporary grandstand. *Adv Struct Eng* 17(5): 721-734.
- [5] Narayana KL, Jebaraj C (1999) Sensitivity analysis of local/global modal parameters for identification of a crack in a beam. *J Sound Vib* 228(5): 977-994.
- [6] Husain NA (2011) Detection of damage in welded structure using experimental modal data. *9th International Conference on Damage Assessment of Structures (DAMAS 2011)*, *Journal of Physics: Conference Series* 305: 012120.
- [7] Abdul Rani MN (2011) Model updating for a welded structure made from thin steel sheets. *Appl Mech Mater* 70: 117-122.
- [8] Hu B, Richardson IM (2006) Mechanism and possible solution for transverse solidification cracking in laser welding of high strength aluminum alloys. *Mater Sci Eng A* 429: 287-294.
- [9] Rao SS, Yap FF (1995) *Mechanical vibrations*. Vol. 4, Addison-Wesley, New York.
- [10] Arthur WL (1969) *Vibration of plates*. NASA Pub.
- [11] *ASM handbook* (1993) *Properties and Selection nonferrous alloys and special –purpose materials*. Vol. 2.
- [12] Syahroni N, Hidayat MIP (2012) Numerical simulation – from theory to industry. Chapter 24, 3D finite element simulation of T-joint fillet weld: Effect of various welding sequences on the residual stresses and distortions. 585-588.
- [13] Rao SS (2007) *Vibration of continuous systems*. Wiley.
- [14] Yang YP, Jung G, Yancey R (2005) Finite Element modeling of vibration stress relief after welding. *American Society of Materials*.
- [15] Ewins DJ (2000) *Modal testing: theory, practice and application*. Vol. 2, Research studies press Baldock.