



ارزیابی توانایی روش التراسونیک در اندازه‌گیری تنش پسماند طولی جوشکاری در راستای ضخامت

محمد افتخاری^۱، مهدی احمدی نجف آبادی^۲ و محمدرضا فراهانی^{۳*}

^۱ دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

^۲ دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

^۳ دانشیار، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۶/۱۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۱/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۰۱

چکیده

یکی از توانایی‌های روش التراسونیک که در مقایسه با سایر روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند، کمتر به آن پرداخته شده است، قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند در اعماق قطعه است. علت این قابلیت، توانایی نفوذ امواج التراسونیک در اعماق مختلف قطعه، بنا به فرکانس ارسالی آن‌ها است. در این پژوهش، به بررسی قابلیت روش التراسونیک در اندازه‌گیری تنش پسماند طولی جوشکاری در عمق قطعه پرداخته شده است. بدین منظور، از چهار نوع سنسور التراسونیک با فرکانس‌های ۱، ۲، ۴ و ۵ مگاهرتز برای دسترسی به چهار عمق از سطح قطعات از جنس آلیاژ آلومینیوم سری ۵۰۰۰ استفاده گردید که با روش جوشکاری ذوبی تیگ به هم متصل شده بودند. تنش پسماند جوشکاری، در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شد و سپس به‌وسیله مقایسه با نتایج روش تجربی پراش پرتو ایکس، اعتبارسنجی گردید. از مدل شبیه‌سازی صحنه‌سنجی شده با روش پراش پرتو ایکس به منظور تایید اعتبار نتایج اندازه‌گیری شده با روش التراسونیک در چهار عمق مختلف از سطح قطعه، استفاده گردید که تطابق خوبی مشاهده شد. روش اندازه‌گیری تنش‌های پسماند با استفاده از امواج التراسونیک، توانست تنش‌های پسماند طولی را با حداکثر خطای معادل ۱۲٪ تنش تسلیم ورق آلومینیومی، اندازه‌گیری نماید. دقت این روش در اندازه‌گیری حداکثر تنش پسماند طولی بالاتر از ۹۲٪ بود.

کلمات کلیدی: روش التراسونیک؛ روش شبیه‌سازی روش پراش پرتو ایکس؛ تنش پسماند جوشکاری؛ آلیاژ آلومینیوم سری ۵۰۰۰.

Evaluation of Ultrasonic Method Capability in Measurement of Longitudinal Welding Residual Stress through Thickness

M. Eftekhari¹, M. Ahmadi Najafabadi², M. Farahani³

¹ Ph.D. Student, School of Mechanical Engineering, Colleg of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

² Assoc. Prof., Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran

³ Assoc. Prof., School of Mechanical Engineering, Colleg of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Abstract

One of the abilities of Ultrasonic method which has been less investigated, in comparison with other residual stress measurement methods, is the residual stress measurement capability in specimen depths. this capability is due to ultrasonic waves penetration in different depths of specimen, according to their transmittance frequency. In this research, the capability of Ultrasonic method in measurement of longitudinal welding residual stress in specimen depth has been studied. For this goal, four series of Ultrasonic sensors, including 1, 2, 4 and 5 MHz were used in order to reach four depths of pieces of aluminum alloy series 5000 joined by TIG welding. Welding residual stresses were simulated in Abaqus software. Then, simulation model was validated by comparing with the results of X-ray diffraction experimental method. The validated FEM model with x-ray diffraction method was used for validation of residual stress obtained from Ultrasonic method in four depths. Finally, good agreement was observed. Ultrasonic method could measure longitudinal residual stresses with the maximum error of 12% of yield stress of aluminum plate. The accuracy of this method in measurement of the maximum longitudinal residual stress was greater than 92%.

Keywords: Ultrasonic Method; Simulation Method; X-Ray Diffraction Method; Welding Residual Stress; Aluminum Alloy Series 5000.

۱- مقدمه

همواره در فرآیندهای تولید قطعات برای مصارف حساس، پی بردن به مقدار و نحوه توزیع تنش‌های باقیمانده، مورد توجه محققین و طراحان بوده است. روش‌های تجربی که امروزه برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند استفاده می‌شوند، عموماً از نوع مخرب می‌باشند (برای مثال با ایجاد سوراخ یا شکاف دادن قطعه همراه هستند). این روش‌ها اغلب برای قطعاتی که در حال کار در سیستم می‌باشند، قابل اجرا نیستند، لذا امروزه ضرورت استفاده از روش‌های غیر مخرب (که هیچ عیوبی در قطعه ایجاد نمی‌کنند) در بسیاری از بخش‌های صنعت به اثبات رسیده است. یکی از روش‌های غیرمخرب اندازه‌گیری تنش که در حال توسعه است، استفاده از امواج التراسونیک است. علت توجه روزافزون به روش التراسونیک و تلاش برای اثبات قابلیت این روش در اندازه‌گیری تنش - پسماند، ماهیت غیرمخرب (زیرا بدون نیاز به ایجاد سوراخ، شکاف و یا ضربه شدید به سطح است) قابل حمل بودن تجهیزات، ارزان و سریع بودن اندازه‌گیری با آن است. همچنین این روش، برخلاف بسیاری از روش‌ها که تنش را در سطح قطعه اندازه می‌گیرند، قابلیت اندازه‌گیری تنش در عمق بیشتری از قطعه را بسته به فرکانس موج ارسالی دارد. همچنین باید متذکر شد که اساس کار اندازه‌گیری تنش پسماند با امواج التراسونیک با روش‌هایی مانند، تنش زدایی التراسونیک متفاوت است. روال کار در تنش زدایی التراسونیک، مشابه چکش کاری مکانیکی است، با این تفاوت که این روش در فرکانس‌های بالایی چون ۲۷ کیلوهرتز صورت می‌پذیرد و با ایجاد ضربات مکرر توسط یک ابزار ارتعاشی به سطح قطعه همراه است که متعاقباً باعث ایجاد تنش پسماند فشاری و تغییر شکل پلاستیک در سطح می‌شود؛ حال آن‌که در روش اندازه‌گیری تنش پسماند با امواج التراسونیک، موج التراسونیک در بسامدهای چند مگاهرتزی، نخست توسط ترانسدوسرهای التراسونیک تولید و سپس از طریق کوپلنت در قطعه منتشر می‌شود. در این روش، ابزار ارتعاشی ضربه زننده به سطح مانند آنچه که در تنش زدایی التراسونیک کاربرد دارد، وجود ندارد؛ لذا این روش، تاثیر قابل توجهی روی آزادسازی تنش پسماند ندارد.

اندازه‌گیری تنش پسماند با روش التراسونیک بر اساس خاصیت آکستوالاستیک مواد استوار است که بر مبنای آن، سرعت انتشار موج التراسونیک در ماده به تنش موجود در آن بستگی دارد [۱]. نخستین فعالیت‌های مربوط به اندازه‌گیری تنش پسماند با موج التراسونیک، به مورنگان^۱ [۲] برمی‌گردد. وی رابطه سرعت موج التراسونیک در یک محیط تحت تنش را برحسب ضرایب درجه سوم در تابع انرژی بیان نمود. در سال ۱۹۵۳ هوگس و کلی^۲ [۳] بر پایه نتایج و تئوری الاستیسیته غیرخطی مورنگان، تئوری آکستوالاستیسیته را پایه‌گذاری کرده و توسعه دادند. آن‌ها توانستند، تغییرات سرعت موج التراسونیک را به‌عنوان تابعی از کرنش‌های الاستیک ماده همسانگرد بیان کنند. استفاده از خاصیت آکستوالاستیک برای ارزیابی تنش در قطعات، برای اولین بار توسط کرکرافت^۳ [۴] در سال ۱۹۶۷ انجام شد. ایگل و بری^۴ [۵] در سال ۱۹۷۶، در نمونه‌های فولادی، تغییرات ناشی از تنش اعمالی را بر سرعت موج التراسونیک اندازه‌گیری کردند. با کار آن‌ها پیش‌بینی‌های تئوریک، تأیید شد و از آن‌پس در اندازه‌گیری‌ها به کار گرفته شد. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که امواج طولی با زاویه شکست بحرانی، بیشترین حساسیت را در مقابل تغییرات تنش از خود نشان می‌دهند. ایگل و بری [۶ و ۷] در سال ۱۹۷۸ از امواج طولی با زاویه شکست بحرانی برای اندازه‌گیری تنش در ریل قطار استفاده کردند. نخستین بار سالامانکا^۵ [۸] از روش التراسونیک در زمینه اندازه‌گیری تنش پسماند جوشی استفاده نمود. وی در سال ۱۹۹۰ از امواج طولی با زاویه شکست بحرانی برای اندازه‌گیری تنش پسماند ناشی از جوشکاری در فولاد سری ۶۰ استفاده کرد. وی نتایج حاصل از اندازه‌گیری تنش پسماند با روش التراسونیک را با نتایج حاصل از اندازه‌گیری با روش کرنش سنجی سوراخ مقایسه کرد که تطابق قابل قبولی به دست آمد. سالامانکا و بری [۹] با استفاده از امواج طولی با زاویه شکست بحرانی، تنش پسماند جوشی را در ورق‌های نورد گرم و سرد اندازه گرفتند. آن‌ها همچنین اثر تنش‌گیری

¹ Murnaghan

² Hughes & Kelly

³ Crecraft

⁴ Egle & Bray

⁵ Salamanca

کمک امواج LCR اندازه‌گیری نمود و پس از مقایسه با نتایج روش شبیه‌سازی و روش تجربی کرنش سنجی سوراخ، تطابق خوبی را مشاهده نمود. اینک در پژوهش حاضر، از یک مدل شبیه‌سازی تأیید اعتبار شده با روش استاندارد پراش پرتو ایکس (که یک روش تجربی غیر مخرب با دقت بالا است)، به منظور اعتبارسنجی نتایج روش التراسونیک در اعماق قطعات جوشکاری شده از جنس آلیاژ آلومینیوم سری ۵۰۰۰، استفاده شده است. هدف کلی این پژوهش، بررسی دقیق‌تر قابلیت روش التراسونیک در اندازه‌گیری تنش پسماند در اعماق قطعه است.

بسیاری از روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند دارای این محدودیت بزرگ هستند که قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند را در عمق قطعه ندارند و تنها برای سطح و نواحی بسیار نزدیک به سطح مناسب هستند. روش التراسونیک برخلاف سایر روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند، قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند در اعماق قطعه را دارد. در سال‌های اخیر تلاش برای اثبات قابلیت روش التراسونیک در اندازه‌گیری تنش پسماند و تدوین یک استاندارد معتبر برای آن همچنان ادامه دارد. در پژوهش قبلی [۱۶]، قابلیت روش التراسونیک در اندازه‌گیری تنش پسماند طولی، فقط در سطح قطعه، مورد ارزیابی قرار گرفت و اینک در پژوهش حاضر، به قابلیت روش التراسونیک در اندازه‌گیری تنش پسماند جوش کاری در اعماق قطعه پرداخته شده است که تاکنون مطالعات چندانی در این زمینه انجام نشده است و استفاده از مدل شبیه‌سازی تأیید اعتبار شده با روش استاندارد پراش پرتو ایکس، برای اعتبارسنجی نتایج روش التراسونیک در چهار عمق قطعه، نوآوری اصلی این پژوهش است. بدین منظور ابتدا دو ورق از جنس آلیاژ آلومینیوم سری ۵۰۰۰ با روش جوش کاری ذوبی تیگ به هم متصل شدند. در ادامه، تنش پسماند حاصل از جوش کاری، در نرم‌افزار آباکوس و به روش غیرکوپل، شبیه‌سازی شد. در ادامه، نتایج شبیه‌سازی، با نتایج پراش پرتو ایکس، تأیید اعتبار گردید و در انتها، در چهار عمق مختلف از سطح قطعه، نتایج حاصل از روش التراسونیک با نتایج شبیه‌سازی مقایسه گردید تا قابلیت روش التراسونیک در اندازه‌گیری تنش پسماند در اعماق قطعه مشخص شود. دلیل این‌که برای بررسی قابلیت روش التراسونیک در اندازه‌گیری تنش پسماند در عمق، از مقایسه نتایج روش

را روی تنش پسماند بررسی کردند. از آن پس، اندازه‌گیری تنش با امواج طولی با زاویه شکست بحرانی یا امواج LCR توسط بری و سالامانکا رواج یافت. امروزه این روش نزد محققانی که در زمینه اندازه‌گیری تنش با روش التراسونیک فعالیت دارند، محبوب‌تر از سایر روش‌ها است؛ لذا محققان در اکثر مقالاتی که از سال ۲۰۰۲ به بعد در این زمینه منتشر شده، از امواج LCR برای اندازه‌گیری تنش پسماند استفاده نموده‌اند.

والاسزک^۱ [۱۰] برای اندازه‌گیری تنش پسماند جوشی با روش التراسونیک، علاوه بر استخراج ضریب آکستوالاستیک فلز پایه، ضریب آکستوالاستیک فلز جوش را نیز در قطعه‌هایی از جنس فولاد P265 و P460 اندازه‌گیری نمود. وی زمان پرواز موج التراسونیک در فلز جوش را به‌عنوان زمان پرواز مرجع، برای اندازه‌گیری تنش پسماند در فلز جوش در نظر گرفتند. وی با این کار دقت اندازه‌گیری تنش را در منطقه فلز جوش افزایش داد و به این نتیجه رسید که نادیده گرفتن تغییرات ریزساختار در منطقه فلز جوش و به‌ویژه منطقه متأثر از حرارت می‌تواند خطای قابل ملاحظه‌ای در اندازه‌گیری تنش پسماند ایجاد نماید. گاجی^۲ [۱۱] برای نخستین بار تنش پسماند حاصل از جوش کاری اصطکاک‌ی را در ورق‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیوم AA7108-T79، با استفاده از امواج طولی با زاویه شکست بحرانی، اندازه‌گیری نمود. کوزام^۳ [۱۲] اثر تغییرات ریزساختاری در جوش کاری فولاد P355NL1 را بر سرعت موج LCR و تنش پسماند جوشی بررسی کرد. وی با استفاده از روش عملیات حرارتی، منطقه HAZ را در سه فاصله از خط جوش، روی سه نمونه استخراج شده از فلز پایه، شبیه‌سازی کرد و توانست ضریب آکستوالاستیک منطقه HAZ را اندازه بگیرد و تنش را در این منطقه با دقت بیشتری به‌دست آورد. نتایج وی تطابق قابل قبولی با روش کرنش سنجی سوراخ داشت. جوادی و افتخاری^۴ [۱۳، ۱۴، ۱۵]، تنش‌های پسماند جوشی در راستای ضخامت را در نمونه‌هایی از جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی 304L که به روش تیگ جوش کاری شده بودند، به

¹ Walaszek

² Gachi

³ Qozam

⁴ Javadi

تجربی پراش پرتو ایکس، لازم بود که سطح قطعه هموار باشد تا از تفرق‌های ناخواسته‌ی پرتو ایکس جلوگیری شود.

۲-۲- شبیه‌سازی تنش پسماند جوش کاری

۲-۲-۱- مدل‌سازی خواص مواد

شبیه‌سازی خواص مواد، همواره یکی از بخش‌های مهم و اولین مرحله در شبیه‌سازی جوش کاری محسوب می‌شود. زیرا در فرآیند جوشکاری ذوبی، با توجه به اینکه گستره دمایی بسیار وسیعی وجود دارد (در جوش کاری آلومینیوم از دمای بالای ۶۰۰ درجه در حوضچه مذاب گرفته تا دمای نقاط بسیار دور از حوضچه مذاب که هم‌دمای با اتاق

التراسونیک با نتایج مدل شبیه‌سازی تأیید اعتبار شده، استفاده شد. این بود که اکثر روش‌های تجربی اندازه‌گیری تنش پسماند، برخلاف روش شبیه‌سازی، قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند را در اعماق قطعه ندارند. در پژوهش حاضر، روال تأیید مدل المان محدود به‌منظور استفاده در عمق، با استفاده از مقایسه با نتایج تجربی، بر اساس مقالات معتبر [۱۴ و ۱۷]، فقط در سطح قطعه انجام گرفت که با توجه به بحث پیوستگی تنش‌های پسماند (در یک مقطع مورد بررسی و نه فقط در یک نقطه) روشی معتبر است که تابع شبیه‌سازی درست خواص مکانیکی و فیزیکی قطعه و شرایط انتقال حرارت آن است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد و آماده‌سازی نمونه‌ها

بنا به مقالات مربوط به شبیه‌سازی فرآیند جوش کاری مانند [۱۴ و ۱۷]، به‌منظور ارائه مدلی معتبر برای شبیه‌سازی تنش پسماند، لازم بود ابتدا دو ورق با فرآیند جوش کاری به هم متصل شوند و سپس در یک مقطع معین از قطعه، نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی در سطح قطعه راستی‌آزمایی شوند تا اعتبار مدل تأیید شود؛ لذا در پژوهش حاضر، دو ورق از جنس آلیاژ آلومینیوم سری ۵۰۰۰، با خواص مکانیکی مندرج در جدول ۱، به ابعاد ۱۵۰×۵۰ میلی‌متر مربع و به ضخامت ۸ میلی‌متر تهیه شد. ابعاد پخ جوشکاری ۷ شکل با زاویه ۶۰ درجه، طبق استاندارد [۱۸] انتخاب شد. از روش جوش کاری تیگ یا جوش کاری با الکتروود تنگستنی و گاز محافظ آرگون که یکی از روش‌های مرسوم جوش کاری آلیاژهای آلومینیوم است، برای اتصال ورق‌ها به‌صورت لب‌به‌لب، استفاده شد. بر اساس استاندارد [۱۸] فیلر ER5183 به‌منظور جوش کاری انتخاب شد و در نهایت جوش کاری با دستگاه پارس تیگ، جریان متناوب، در دو پاس و با پارامترهای جدول ۲ انجام گردید. هنگام جوش کاری از قیودی مطابق شکل ۱ به منظور مهار قطعه و ایجاد تنش پسماند بیشتر استفاده گردید. نقشه- مکان اعمال قیدها در شکل ۲ مشهود است. بعد از جوش کاری مشاهده شد که گرده‌ای به ارتفاع ۰/۶ میلی‌متر پدید آمد که با استفاده از سنباده‌زنی نرم دستی، این گرده با سطح ورق، هم‌ارتفاع شد؛ زیرا در اندازه‌گیری تنش با روش

جدول ۱- درصد عناصر تشکیل‌دهنده آلیاژ آلومینیوم سری

۵۰۰۰ مورد استفاده

Cu	Cr	Zn	Fe	Si	Mn	Mg	Al
۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۶۰	۴/۲۵	فلز اصلی

جدول ۲- خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم سری ۵۰۰۰

مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	تنش نهایی کششی (MPa)	تنش تسلیم کششی (MPa)
۷۱	۰/۳۳	۳۳۷	۲۲۶



شکل ۱- تصویری از ابعاد ورق‌های آماده شده و محل نصب ترموکوپل‌ها

فرآیندهای ذوبی جوش کاری، به خصوص در مواقعی که ضخامت قطعه نسبت به سایر ابعاد آن خیلی کوچک نباشد، از اعمال شار حجمی به قطعه استفاده می‌شود. در این پژوهش نیز، شار حرارتی به صورت حجمی به قطعه اعمال شده است، بدین صورت که یک شار توزیع شده حرارتی به صورت یکنواخت یا *DFLUX* طبق رابطه (۱) به المان‌های جوش یا ناحیه ذوب اعمال شد [۲۰].

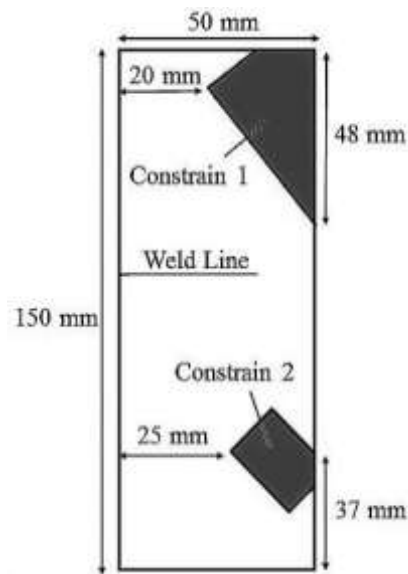
$$DFLUX = \frac{\eta UI}{V} \quad (1)$$

در رابطه فوق، U اختلاف پتانسیل قوس، I شدت جریان و η بازده قوس الکتریکی است که مقدار آن برای فرایند جوش کاری تیگ، ۰/۶ در نظر گرفته شد [۲۱] و V حجم منبع حرارتی یا حجم المان‌های فعال جوش است. برای اندازه‌گیری V لازم بود، مرز ناحیه ذوب شده مشخص شود. بدین منظور از قطعه جوش کاری شده یک نمونه متالوگرافی استخراج و سپس اچ شد که مشخص گردید، عرض ناحیه فلز جوش روی هر ورق، ۵/۵ میلی‌متر و عرض ناحیه HAZ روی هر ورق، ۲/۱ میلی‌متر است. به این ترتیب حجم ناحیه ذوب شده و نیز مقدار V به دست آمد. در نهایت مقدار *DFLUX* با توجه به رابطه (۱)، برای هر پاس جوش کاری با توجه به پارامترهای جوش کاری جدول ۲ محاسبه گردید و به المان‌های جوشی در هر پاس جوش کاری اعمال گردید و در نهایت دما در نقاط مدل به دست آمد. به منظور شبیه‌سازی اضافه شدن فلز پرکننده در حین جوش کاری، از روش تولد و مرگ المان‌ها (رایج‌ترین روش) استفاده شد. در این روش، ابتدا کلیه المان‌های فلز پایه و فلز جوش مدل می‌شوند، سپس المان‌های خط جوش که هنوز ایجاد نشده‌اند یا الکتروود جوش کاری به آن‌ها نرسیده است، حذف می‌شوند و با به اصطلاح در حالت مرگ قرار می‌گیرند؛ این یعنی المان‌های مرده، عملاً از روند تحلیل حذف می‌شوند. المان‌های مرده پس از رسیدن منبع حرارتی، زنده و فعال شده و حرارت منبع به آن‌ها اعمال می‌گردد و به این طریق، وارد تحلیل می‌شوند [۲۲].

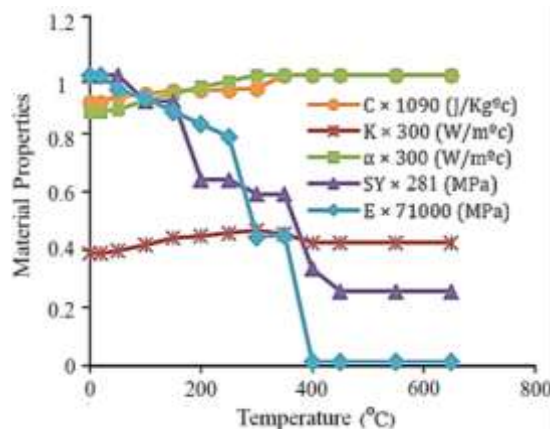
۲-۲-۳- مدل کردن قطعه و مش زنی آن

اولین قدم در شبیه‌سازی تنش پسماند، تهیه مدل هندسی با همان ابعاد و زوایای دقیق خود قطعه است. بدین منظور مدلی با همان ابعاد قطعه مورد تحقیق، در نرم‌افزار آباکوس

هستند. لذا خواص مواد باید در دماهای مختلف برای نرم‌افزار معلوم باشد. خواص مهم وابسته به دمای ماده که برای شبیه‌سازی تنش پسماند جوشکاری لازم می‌باشند، در شکل ۳ مشهود است. دمای ذوب آلیاژ در محدوده ۶۵۰-۵۷۰ درجه سلسیوس است.



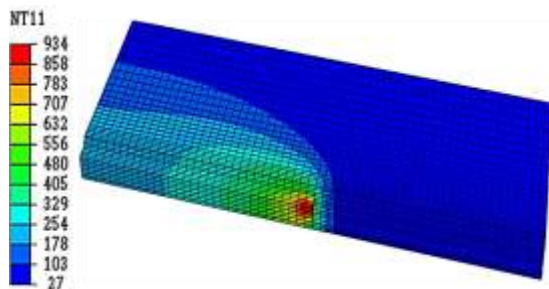
شکل ۲- نقشه محل اعمال قیدها



شکل ۳- خواص وابسته به دما [۱۹]

۲-۲-۲- تئوری تحلیل حرارتی و شبیه‌سازی انتقال حرارت جوش کاری

مهم‌ترین گام در تحلیل حرارتی فرایند جوش کاری، مدل‌سازی منبع حرارتی است. امروزه در شبیه‌سازی سه‌بعدی



شکل ۵- توزیع دما بر حسب سلسیوس در پاس اول، در لحظه رسیدن منبع جوش کاری به نصف مسیر

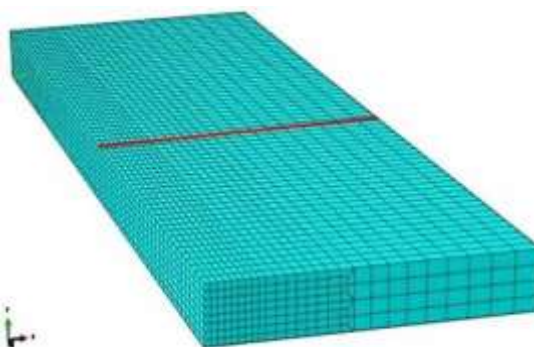
۲-۲-۵- تحلیل مکانیکی

در این پژوهش، شبیه‌سازی به روش غیرکوپل، یعنی به صورت دو تحلیل مجزای حرارتی و مکانیکی انجام شده است؛ به این صورت که پس از انجام تحلیل حرارتی و به دست آمدن تاریخچه دما در نقاط مدل، تاریخچه دمایی نقاط مدل به عنوان ورودی، وارد تحلیل مکانیکی شد تا پس از حل المان محدود روابط تنش- کرنش، تنش پسماند در قطعه به دست آید؛ همچنین برای انجام تحلیل مکانیکی لازم است که شرایط قیدوبند در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شود. بدین منظور همه نقاطی از مدل قطعه که در زیر محل قیدوبندها (نقشه قیدوبندها در شکل ۳) قرار داشت به دلیل صلبیت بالای قیدها، در هر سه جهت طول، عرض و ضخامت قطعه مقید شدند. برای نقاط یا گره‌های موجود در صفحه اتصال دو قطعه جوش کاری شده که به صورت صفحه موازی با راستای خط جوش قرار داشت، ممانعت از حرکت در جهت عمود بر صفحه مذکور به عمل آمد [۲۲]. پس از شبیه‌سازی قیدها، نتایج تحلیل حرارتی وارد تحلیل مکانیکی شد و پس از حل المان محدود روابط تنش-کرنش مذکور، تنش پسماند در مدل بدست آمد که توزیع تنش پسماند طولی پس از انجام جوشکاری، در شکل ۶ نشان داده شده است. در ادامه، به منظور بررسی نتایج تحلیل مکانیکی و تنش پسماند طولی و صحت‌سنجی آن با نتایج تجربی روی سطح قطعه، مقطع عرضی تقارن و منصف قطعه، یعنی مقطع مشخص شده با خط ضخیم در شکل ۴ انتخاب شد و پس از انجام تحلیل مکانیکی از طریق حل المان محدود و شبیه‌سازی، تنش پسماند در این مقطع به دست آمد که نتایج در شکل ۷ مشهود است.

ترسیم شد. از المان‌های نوع DC3D8 برای تحلیل حرارتی [۲۳] و از المان‌های نوع C3D8 برای تحلیل مکانیکی [۲۴] استفاده شد. سپس مدل، مش زنی گردید. به منظور این که نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، مستقل از ابعاد مش باشد، آنالیز حساسیت به اندازه مش روی مدل انجام گرفت. بدین صورت که در چندین مرحله، مش ریزتر شد تا آن جا که تغییرات چندانی در بیشینه دمای جوش کاری مدل مشاهده نگردد [۲۲]. در نهایت، مدلی با تعداد ۱۰۵۶۰ المان و ۱۲۷۴۹ گره یا نقطه برای شبیه‌سازی انتخاب شد که تصویر این مش در شکل ۴ مشهود است. با توجه به شکل ۴، مش در ناحیه جوش و مناطق نزدیک به آن، ریزتر از مناطق دورتر است؛ زیرا در این مناطق، شیب حرارتی و تغییرات دمایی شدیدی وجود دارد. اندازه کوچک‌ترین المان برابر $1 \times 1 \times 2/5$ میلی‌متر مکعب که به ترتیب از چپ به راست، برابر با اندازه ضلع المان در راستای ضخامت قطعه، عرض قطعه و طول خط جوش است.

۲-۲-۴- نتایج تحلیل حرارتی

بعد از مقید نمودن قطعه، جوش کاری قطعات انجام شد. به منظور انجام تحلیل حرارتی، پس از مش زنی مدل قطعه، تحلیل حرارتی مطابق آنچه که در بخش تئوری تحلیل حرارتی بیان شد، انجام گرفت و توزیع و تاریخچه دما در نقاط مدل به دست آمد. در شکل ۵، توزیع دمایی در قطعه بر حسب درجه‌ی سلسیوس، درست در زمانی که منبع حرارتی جوش کاری در پاس اول جوش کاری به نصف مسیر خود رسیده است، نشان داده شده است.

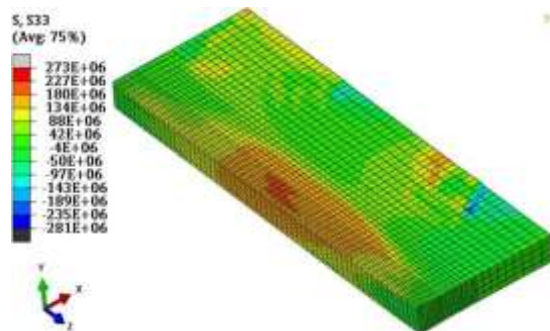


شکل ۴- مدل مش‌زنی شده‌ی یکی از قطعات

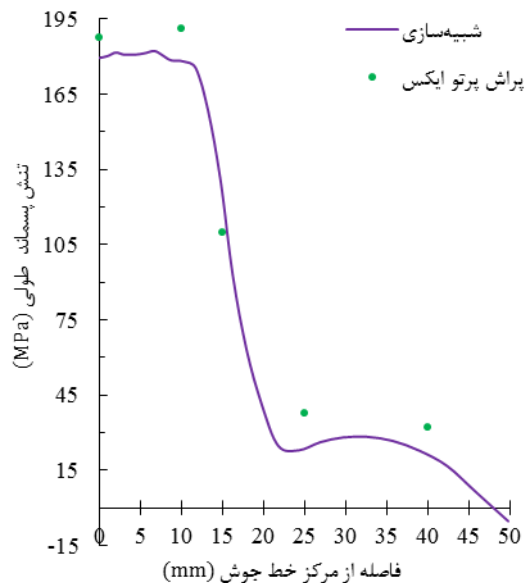
است. در این روش، ابتدا سطح قطعه تحت تابش پرتو ایکس تک طول (طول موج ثابت) موج قرار می‌گیرد؛ سپس پرتوهای منعکس شده، در جایی که با هم تداخل سازنده کرده و رابطه براگ را ارضا کنند و نیز دارای بیشترین شدت باشند، توسط آشکارساز دریافت می‌شوند و در آن محل یک پیک پراش مشاهده خواهد شد. بنابراین طبق رابطه براگ، در صورت بروز هر تغییری در فاصله صفحات کریستالی (d) تحت عواملی مانند تنش، زاویه‌ی انعکاس (θ) جابه‌جا خواهد شد. تیوب‌های تولید پرتو ایکس در واقع طیفی پیوسته‌ای از طول موج‌ها تولید می‌کنند که سه پرتو پراش پرتو تک‌فام آن، $k\alpha_1$ و $k\alpha_2$ نام دارند. البته با انجام فیلتراسیون تلاش می‌شود تا پرتو تک طول موج به سطح قطعه تابیده شود. در اندازه‌گیری تنش پسماند استفاده از پیک‌های پراش دریافت شده با مقدار 2θ در حد 120° درجه و بالاتر از آن توصیه شده است؛ زیرا در این زوایا، پیک‌های پراش دقت و شدت بالاتری دارند و نیز پرتو $k\beta$ از پرتوهای $k\alpha_1$ و $k\alpha_2$ فاصله می‌گیرد و دقت تشخیص مکان دقیق نوک پیک پراش بالاتر رفته و دیگر نیازی به استفاده از فیلتر برای حذف آن، نمی‌باشد [۲۵].

وجود تنش پسماند در قطعه باعث می‌شود که چنانچه به قطعه در برابر پرتو ایکس، چندین بار تحت زاویه‌ی ψ شیب داده شود، در هر زاویه‌ی شیب، پیک مورد بررسی برای تعیین مقدار تنش پسماند، مقداری جابه‌جا شود و در هر زاویه شیب، مقدار 2θ و d متفاوتی به‌دست آید [۲۶]. به همین دلیل، روال کار چنین است که به قطعه در برابر پرتو، چندین بار شیب داده می‌شود. سپس در هر زاویه شیب، مقدار d اندازه گرفته شده و در آخر نمودار d بر حسب $\sin^2\psi$ رسم می‌شود و از شیب نمودار حاصل، در رابطه‌ی (۳) استفاده می‌گردد تا تنش پسماند در هر جهت دلخواه ϕ (شکل ۸) به‌دست آید. این فرمول از روابط الاستیسیته و اعمال شرط تنش صفحه‌ای (به علت محدود بودن عمق نفوذ پرتو در قطعه و به تبع آن، اندازه‌گیری تنش در سطح قطعه) به‌دست آمده است. در رابطه‌ی (۳)، E مدول الاستیسیته، ν ضریب پواسون، $d_{\phi 0}$ فاصله بین صفحات کریستالی در $\psi=0$ و $d_{\phi \psi}$ فاصله‌ی بین صفحات کریستالی در زاویه دلخواه ϕ و ψ است [۲۷].

$$\sigma_{\phi} = \frac{E}{d_{\phi 0}(1 + \nu)} \times \frac{\partial d_{\phi \psi}}{\partial \sin^2 \psi} \quad (3)$$



شکل ۶- توزیع تنش پسماند طولی حاصل از روش شبیه‌سازی بعد از اتمام جوشکاری



شکل ۷- تنش پسماند طولی حاصل از دو روش شبیه‌سازی و پراش پرتو ایکس

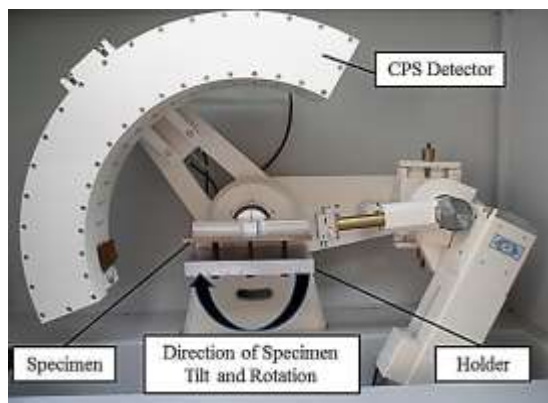
۲-۳- اندازه‌گیری تنش پسماند طولی جوش کاری با روش پراش پرتو ایکس

۲-۳-۱- تئوری اندازه‌گیری تنش پسماند با روش پراش پرتو ایکس

رابطه اساسی در روش پراش پرتو ایکس، قانون براگ می‌باشد که مطابق رابطه (۲) است:

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (2)$$

در رابطه فوق، n مرتبه‌ی انعکاس، λ طول موج پرتو ایکس، d فاصله بین صفحات کریستالی و θ زاویه‌ی انعکاس

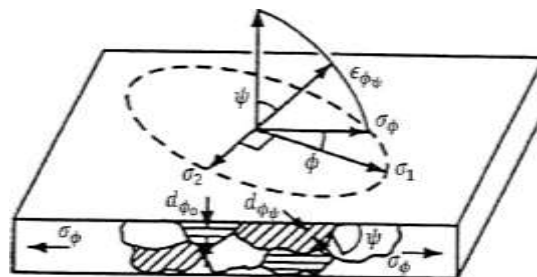


شکل ۹- دستگاه پراش مورد استفاده

جدول ۳- مشخصات و پارامترهای تنظیمی دستگاه پراش پرتو ایکس مورد استفاده برای اندازه‌گیری تنش پسماند

مشخصات دستگاه	مقدار و واحد
طول موج پرتو $k\alpha_1$	$1/54059 \text{ [\AA]}$
طول موج پرتو $k\alpha_2$	$1/544426 \text{ [\AA]}$
ولتاژ و جریان ژنراتور	40 kV و 30 mA
زمان هر پرتو دهی	350 s
نوع تیوب	مس
نوع تابش پرتو	پیوسته

پس از انجام یک آزمون پراش روی قطعه، پیک پراش ظاهر شده در 2θ بین 111 و 112 درجه که دارای شدت و دقت کافی و از لحاظ مکانی نزدیک به 120 درجه بود (شکل ۱۰)، برای بررسی انتخاب شد. همچنین به علت وجود فیلتراسیون قوی در دستگاه پراش مورد استفاده، دیگر نگرانی از حضور پرتو $k\beta$ و کاهش دقت اندازه‌گیری وجود نداشت. در هر نقطه مورد اندازه‌گیری تنش پسماند، به قطعه چندین بار تحت زاویه‌ی ψ در برابر پرتو ایکس، شیب داده شد که اطلاعات و نتایج به‌دست آمده برای نقطه واقع روی خط جوش در جدول ۴ درج شده است. در نهایت نمودار d بر حسب $\sin^2\psi$ برای هر یک از نقاط مورد اندازه‌گیری تنش پسماند رسم شد و شیب نمودار حاصل، در رابطه (۳) استفاده گردید و مقدار تنش پسماند طولی محاسبه شد. نمودار d بر



شکل ۸- محور و جهات مورد استفاده در بحث پراش

پرتو ایکس [۲۷]

۲-۳-۲- اندازه‌گیری عملی تنش پسماند طولی با روش پراش پرتو ایکس

به‌منظور اندازه‌گیری تنش پسماند طولی با روش پراش پرتو ایکس با هدف اعتبارسنجی نتایج روش شبیه‌سازی، از دستگاه پراش پرتو ایکس اکویناکس^۱ مدل ۳۰۰۰ استفاده شد که ساخت شرکت اینل^۲ (شکل ۹) است و در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی امیرکبیر موجود است. این دستگاه یکی از جدیدترین و پیشرفته‌ترین نوع دستگاه‌های پراش پرتو ایکس محسوب می‌شود؛ زیرا در ساخت آن از آشکارسازهای نوع جدید مکان ثابت سی پی اس^۳ نوع ۱۲۰ (دارای انحنای 120 درجه و به شعاع انحنای 250 میلی‌متر) استفاده شده است که سرعت و دقت کار را افزایش داده است. این نوع آشکارسازها (شکل ۹) این مزیت مهم را دارند که در مدت زمان کوتاه‌تری نسبت به آشکارسازهای قدیمی، همه پراش‌های صورت گرفته از سطح را به‌طور همزمان، در طول انحنای خود، دریافت می‌کنند که دیگر نیازی به حرکت آشکارساز برای دریافت پیک پراش نیست [۲۸]؛ همچنین این دستگاه دارای قدرت تفکیک^۴ خیلی بالایی است. قدرت تفکیک زاویه‌ای این دستگاه در حد $0/01$ درجه است که بسیار بهتر از رنج پیشنهادی برای بحث اندازه‌گیری تنش پسماند (یعنی محدوده‌ی $0/05-0/2$ درجه) است [۲۹]. سایر مشخصات دستگاه پراش پرتو ایکس مورد استفاده و شرایط تنظیمی آن برای انجام آزمون پراش در جدول ۳ آمده است.

¹ Equinox
² Inel
³ CPS
⁴ Resolution

جدول ۴- نتایج پراش برای نقطه‌ی واقع روی خط جوش

شماره شیب	ψ (درجه)	$\sin^2\psi$	2θ (درجه)	d (آنگستروم)
۱	۰	۰	۱۱۱/۸۹۳	۰/۹۳۰۸
۲	۷/۳	۰/۰۱۵۷۰۸	۱۱۱/۸۷۵	۰/۹۳۱۰
۳	۱۰/۲	۰/۰۳۱۳۵۹	۱۱۱/۸۳۹	۰/۹۳۰۷
۴	۱۲/۷	۰/۰۴۸۳۳۲	۱۱۱/۸۷۵	۰/۹۳۱۱
۵	۱۶/۷	۰/۰۸۲۵۷۶	۱۱۱/۸۳۹	۰/۹۳۱۲
۶	۲۰/۲	۰/۱۱۹۲۳۱	۱۱۱/۸۷۵	۰/۹۳۱۳
۷	۲۲/۸	۰/۱۵۰۱۶۸	۱۱۱/۸۳۱	۰/۹۳۱۲
۸	۲۵	۰/۱۷۸۶۰۶	۱۱۱/۷۶۶	۰/۹۳۱۴

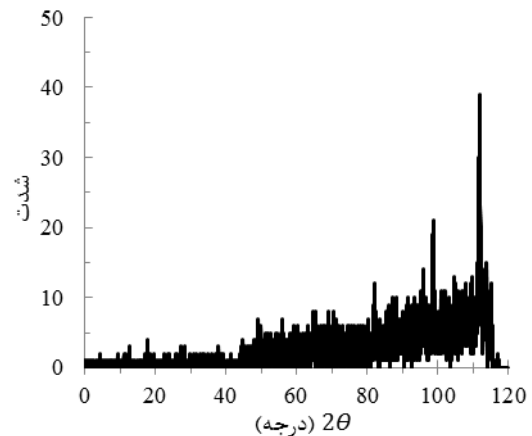
روی خط جوش حاصل شد، به طوری که اختلاف نتایج دو روش برای این نقطه، در حد ۷/۵ مگاپاسکال (معادل ۳/۳ درصد نسبت به تنش تسلیم مندرج در جدول ۱) بود. در فاصله ۱۰ میلی‌متری از خط جوش نیز که شامل منطقه حساس جوش (که شامل هر دو منطقه فلز جوش و منطقه متاثر از حرارت است) بود، تطابق خوبی بین نتایج، در حد ۱۳/۸ مگاپاسکال (معادل ۶/۱ درصد) مشاهده گردید. در فاصله ۱۵ میلی‌متری از خط جوش نیز، تطابق خوبی در حد ۱۵ مگاپاسکال (معادل ۶/۶ درصد) دیده شد. در فواصل دورتر از خط جوش که شامل فاصله بین ۲۰ تا ۵۰ میلی‌متری از خط جوش بود، بیشینه اختلافی در حد ۱۳/۷ مگاپاسکال مشاهده شد که نسبت به تنش تسلیم فلز پایه و جنس مورد مطالعه، عدد کوچکی بود (۶ درصد)؛ لذا بنا به این نتایج، اعتبار مدل شبیه‌سازی تایید گردید و از آن برای راستی‌آزمایی نتایج روش التراسونیک در عمق استفاده شد. این روال تایید اعتبار مدل المان محدود که فقط در یک مقطع واقع بر سطح قطعه انجام شد، بر اساس مقالات معتبر [۱۷، ۱۴] بود.

در روش پراش پرتو ایکس، قطر اشعه تابیده شده بر سطح قطعه، ۵ میلی‌متر بود؛ لذا روش پراش پرتو ایکس،

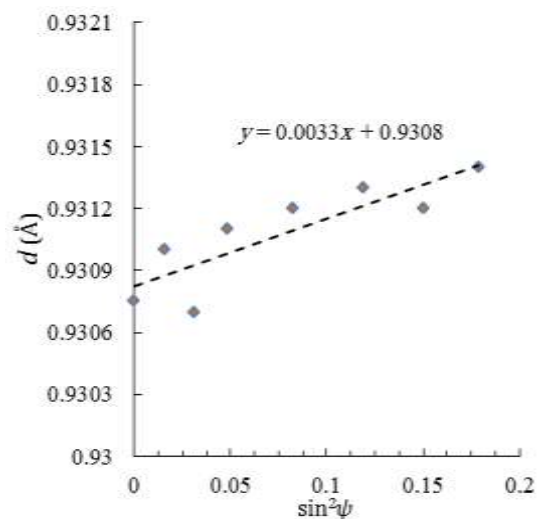
حسب $\sin^2\psi$ برای نقطه روی خط جوش در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مطابق شکل ۷ که پیش‌تر آورده شد، تنش پسماند طولی در ۵ نقطه واقع بر مقطع مشهود در شکل ۴ که روی سطح قطعه قرار داشت، با روش پراش پرتو ایکس اندازه‌گیری گردید.

۴-۲- انجام اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با نتایج پراش پرتو ایکس

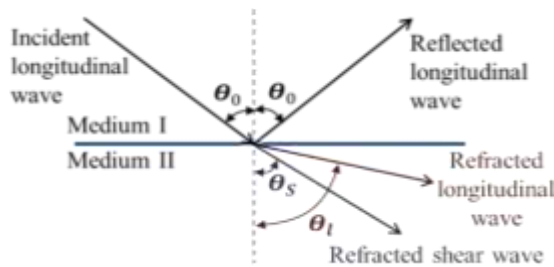
با توجه به شکل ۷ و با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و پراش پرتو ایکس مشخص شد که بهترین تطابق نتایج، در نقطه واقع



شکل ۱۰- آنالیز پراش به منظور انتخاب پیک پراش مناسب



شکل ۱۱- نمودار d بر حسب $\sin^2\psi$ برای نقطه واقع روی خط جوش



شکل ۱۲- نتیجه برخورد موج طولی از یک محیط به محیط دیگر [۲۲]

بیفتد و در امتداد سطح قطعه حرکت کند، باید زاویه انکسار موج طولی در محیط ۲ برابر با ۹۰ درجه شود؛ لذا طبق معادله اسنل (معادله ۴)، زاویه تابش موج طولی در محیط ۱ باید مقدار خاصی باشد، که این زاویه تابش را زاویه بحرانی اول یا θ_{cr} می‌نامند. برای به‌دست آوردن این زاویه تابش، کافی است، در رابطه اسنل به‌جای θ_l مقدار ۹۰ درجه قرار داده شود، آن‌گاه مقدار θ_0 به‌دست‌آمده همان زاویه بحرانی نخست است و فرمول آن به شکل رابطه (۵) خواهد بود. موج طولی ایجادشده در سطح محیط ۲ را که به موازات سطح منتشر می‌شود، موج طولی با زاویه شکست بحرانی یا موج LCR می‌گویند [۲۲].

$$\frac{\sin \theta_0}{C_0} = \frac{\sin \theta_l}{C_1} = \frac{\sin \theta_s}{C_s} \quad (4)$$

$$\theta_{cr} = \sin^{-1}(C_0 / C_1) \quad (5)$$

معادله اندازه‌گیری تنش با روش التراسونیک که از پژوهش محققینی مانند هوگس و کلی و با توجه به روابط مربوط به ارتباط سرعت موج التراسونیک با کرنش الاستیک در یک جسم ایزوتروپیک (معروف به روابط آکستوالاستیک) به‌دست آمده است [۵] و امروزه در مقالاتی مانند [۱۷] به کار گرفته شده است، در رابطه (۶) آورده شده است. توجه شود که برای استفاده از این رابطه لازم است موج التراسونیک در راستای تنش مورد هدف اندازه‌گیری، در قطعه منتشر شود. در رابطه (۶)، E مدول الاستیسیته، L ضریب آکستوالاستیک ماده که به‌صورت تجربی و با انجام تست کشش تک‌محوره برای ماده اندازه‌گیری می‌شود، t زمان پرواز موج در ماده‌ی تنش‌دار و t_0 زمان پرواز موج در همان ماده ولی در حالت بدون تنش است [۱۷].

$$\Delta \sigma = \frac{E}{L \times t_0} \Delta t = \frac{E(t - t_0)}{L \times t_0} \quad (6)$$

میانگین تنش پسماند را در این محدوده ۵ میلی‌متری می‌سنجید؛ حال آن‌که در روش شبیه‌سازی، تنش پسماند در گره‌ها یا نقاط مدل به‌دست می‌آید؛ لذا وجود مقداری خطا، اجتناب‌ناپذیر بود. توجه شود که همه روش‌های تجربی اندازه‌گیری تنش پسماند، در یک محدوده کوچک معینی از مساحت قطعه، میانگین مقدار تنش پسماند را در آن محدوده به‌دست می‌دهند و این ویژگی فقط مختص روش تجربی پراش پرتو ایکس نیست. با این وجود در مقالات، بارها برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی تنش پسماند جوشکاری از روش کرنش-سنجی سوراخ یا روش پراش پرتو ایکس استفاده شده است، مانند [۳۰ و ۳۱].

۲-۵- اندازه‌گیری تنش پسماند طولی جوشکاری با روش التراسونیک

۲-۵-۱- تئوری اندازه‌گیری تنش پسماند با روش التراسونیک

امروزه برای اندازه‌گیری تنش پسماند با روش التراسونیک، از امواج طولی با زاویه شکست بحرانی^۱ و یا به‌اختصار امواج LCR استفاده می‌شود. اصول ایجاد موج LCR چنین است که وقتی موج طولی به مرز مشترک دو محیط با مقاومت آکوستیکی^۲ متفاوت (یعنی سرعت انتشار موج طولی در این دو محیط متفاوت است)، برخورد می‌کند (شکل ۱۲)، قسمتی از آن منعکس شده و با همان زاویه تابش θ_0 برمی‌گردد که این فرآیند را انعکاس^۳ گویند و مابقی موج با زوایای معینی وارد ماده می‌شود که به این فرآیند انکسار^۴ می‌گویند. قسمت منکسر شده به دو دسته موج طولی و عرضی تقسیم می‌شود که هر کدام با زاویه متفاوتی (به‌ترتیب با θ_l و θ_s) در قطعه انتشار می‌یابند. بنا به معادله اسنل^۵ (معادله ۴)، این دو زاویه به زاویه تابش θ_0 مربوط می‌شوند که در این معادله C_0 سرعت موج طولی در محیط ۱، C_1 سرعت موج طولی در محیط ۲ و C_s سرعت موج عرضی در محیط ۲ است. برای این‌که موج طولی منکسرشده در محیط ۲، روی سطح قطعه

¹ Longitudinal Critically Refracted

² Acoustic Impedance

³ Reflection

⁴ Refraction

⁵ Snell's Equation

بخش تئوری بیان شد. بدین منظور در رابطه (۵) با قرار دادن سرعت موج طولی در پلکسی گلاس یا گوه التراسونیک به عنوان محیط ۱ ($C_0=C_{PMMA}=2749 \text{ m/s}$) و سرعت موج طولی در آلیاژ آلومینیوم سری ۵۰۰۰ به عنوان محیط ۲ ($C_1=C_{Al}=6393 \text{ m/s}$)، زاویه θ_{cr} برابر با ۲۵/۵ درجه به دست آمد.



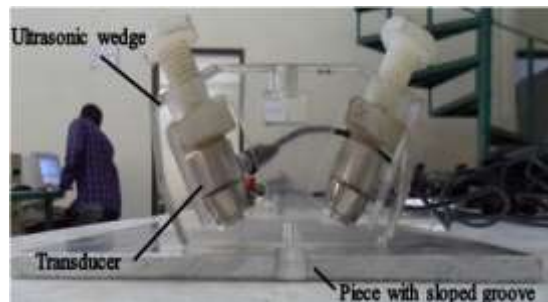
شکل ۱۴- بورد التراسونیک مورد استفاده

هنگام اندازه‌گیری تنش پسماند، در بین گوه التراسونیک و سطح قطعه از مایعی لزج به نام کوپلنت^۵ استفاده شد [۱۴]؛ کوپلنت ماده‌ای است که سبب عبور موج از گوه التراسونیک به داخل قطعه می‌شود؛ بدین صورت که وقتی گوهی التراسونیک روی سطح قرار داده می‌شود، کوپلنت بین گوه و سطح قطعه قرار می‌گیرد و فاصله هوایی بین گوه و سطح را پر می‌کند و موج را به داخل قطعه عبور می‌دهد. وجود تغییر در ضخامت کوپلنت به هنگام اندازه‌گیری با موج LCR، سبب تغییر در مسافت طی شده موج، از لحظه خروج موج از ترانسدیوسر فرستنده تا لحظه دریافت توسط ترانسدیوسر گیرنده می‌شود؛ در نتیجه زمان پرواز موج با تغییر ضخامت کوپلنت تغییر خواهد کرد. جهت ثابت نگه داشتن ضخامت کوپلنت بین گوه و سطح قطعه هنگام اندازه‌گیری زمان پرواز در نقاط مختلف، بایستی همواره فشار ثابتی به گوه التراسونیک در نقاط اندازه‌گیری، وارد شود تا ضخامت کوپلنت همواره هنگام اندازه‌گیری ثابت بماند [۳۲]. بدین جهت از یک میز سه‌محوره‌ی مجهز به سیستم کنترل

⁵ Couplant

۲-۵-۲- تجهیزات اندازه‌گیری تنش پسماند با روش التراسونیک

جهت ایجاد و ارسال موج LCR و دریافت آن، از ترانسدیوسرهای التراسونیک استفاده می‌شود. هرچه فرکانس موج التراسونیک کمتر باشد، عمق نفوذ موج LCR در قطعه بیشتر شده و از این ویژگی برای اندازه‌گیری تنش در عمق قطعه استفاده می‌شود. بدین منظور از چهار مجموعه دوتایی (فرستنده و گیرنده) از ترانسدیوسرهای ۱، ۲، ۴ و ۵ مگاهرتزی به قطر ۵ میلی‌متر برای دسترسی به چهار عمق از سطح قطعه استفاده گردید [۲۲] که در شکل ۱۳ مشهود است. دستگاه مورد استفاده برای تولید و دریافت امواج، یک بورد التراسونیک (شکل ۱۴) با قابلیت اتصال به رایانه است. این بورد، اپ‌باکس^۲ نام دارد و ساخت شرکت اپتل^۳ است. این دستگاه قابل حمل بوده و قابلیت اندازه‌گیری زمان پرواز موج با دقت ۱۰ نانوثانیه را دارا است که اهمیت اساسی در مبحث اندازه‌گیری تنش پسماند دارد.



شکل ۱۳- گوه التراسونیک و اندازه‌گیری عمق نفوذ موج

گوهی التراسونیک (همان شکل ۱۳)، قطعه‌ای از جنس پلکسی گلاس^۴ است [۱۷] که با زاویه و شکل مناسب، با برش لیزر ساخته شد تا نخست سبب موقعیت‌دهی و تثبیت مکان ترانسدیوسرهای فرستنده و گیرنده در موقعیت مطلوب (زاویه بحرانی نخست θ_{cr}) شود و سپس موج التراسونیکی را به شکل موج LCR به داخل قطعه وارد کند. برای تولید موج LCR، طراحی گوه بر مبنای قانون اسنلز انجام گرفت که در

¹ Transducer

² OPBOX

³ OPTEL

⁴ PMMA

در سه ناحیه جوش کاری فلز جوش، منطقه متأثر از حرارت معروف به HAZ و فلز پایه به صورت جداگانه تعیین شود [۱۴]. برای اندازه‌گیری ضریب آکوستوالاستیک سه منطقه فلز پایه، HAZ و فلز جوش ابتدا باید مرز این مناطق مشخص شود. بدین منظور از قطعه جوشکاری شده یک نمونه متالوگرافی استخراج و سپس اچ شد که مشخص شد، عرض ناحیه فلز جوش روی هر ورق ۵/۵ میلی‌متر و عرض ناحیه HAZ روی هر ورق ۲/۱ میلی‌متر است. روش اندازه‌گیری ضریب آکوستوالاستیک بدین گونه است که در رابطه (۶) در صورت معلوم بودن چهار پارامتر E ، t_0 و t ، ضریب آکوستوالاستیک یا L محاسبه می‌شود. برای اعمال یک تنش معلوم σ از آزمون کشش تک‌محوری و فک‌های دستگاه کشش استفاده می‌شود [۱]. برای اندازه‌گیری ضریب آکوستوالاستیک منطقه HAZ و فلز جوش، نواری به عرض ۳/۵ سانتی‌متر که خط جوش در وسط آن قرار داشت و شامل هر دو منطقه HAZ و فلز جوش بود، از ورق استخراج شد و تحت کشش قرار گرفت. هنگام کشش همین نوار با تنش‌های معلوم، با عبور دادن موج LCR از ناحیه فلز جوش به وسیله‌ی گذاشتن گوه التراسونیک روی آن و اندازه‌گیری زمان پرواز موج، ضریب آکوستوالاستیک فلز جوش تعیین شد. در مورد ناحیه HAZ، ضریب آکوستوالاستیک به همان شیوه و در نقاط چسبیده به فلز جوش به‌عنوان ضریب آکوستوالاستیک ناحیه HAZ تعیین گردید [۳۳، ۱]. برای اندازه‌گیری ضریب آکوستوالاستیک فلز پایه، نمونه تست کشش استاندارد از فلز پایه استخراج شد و در دستگاه کشش تحت تنش معلوم قرار گرفت. نحوه‌ی قرار دادن گوه‌ی التراسونیک روی نمونه‌ها به منظور تعیین ضریب آکوستوالاستیک مناطق جوش کاری، در شکل ۱۶ نشان داده شده است. در نهایت بنا به رابطه (۶)، برای هر سه ناحیه‌ی جوش کاری، با استفاده از ترنسدیوسرهای ۱، ۲، ۴ و ۵ مگاهرتزی، نمودارهایی مانند شکل ۱۷ (مربوط به ترنسدیوسرهای ۵ مگاهرتزی) رسم شد که شیب مربوط به هر ناحیه جوش کاری در نمودار، بیانگر ضریب آکوستوالاستیک آن ناحیه است. نتایج به‌دست آمده از هر چهار فرکانس در جدول ۵ درج شده است. در نهایت به‌منظور تعیین ضریب آکوستوالاستیک هر ناحیه با هدف محاسبه‌ی تنش پسماند، از نتایج فرکانس‌های مندرج در جدول ۵ میانگین‌گیری شد [۱۴].

فشار و استپر موتور برای ایجاد حرکت در سه جهت اصلی کارترین استفاده شد. برای اعمال فشار ثابت روی گوه، از یک جک پنوماتیکی مجهز به شیر تنظیم فشار استفاده گردید. در شکل ۱۵ تصویری از این میز و اجزای آن قطعه مورد بررسی و سایر تجهیزات لازم برای اندازه‌گیری تنش پسماند، هنگام آزمون التراسونیک نشان داده شده است.



شکل ۱۵- تجهیزات مورد استفاده در روش التراسونیک

۲-۵-۳- اندازه‌گیری عمق نفوذ موج LCR

برای اندازه‌گیری عمق نفوذ موج LCR در فرکانس‌های مختلف، براساس همان شکل ۱۳ از قطعه‌ای از همان جنس آلیاژ آلومینیم سری ۵۰۰۰ استفاده شد که با دستگاه فرز، شیاری شیب‌دار از ارتفاع کم تا زیاد روی آن ایجاد شده بود. به این طریق که ترنسدیوسر فرستنده و گیرنده، مطابق همان شکل ۱۳ به‌صورت متقارن در دو طرف شیار قرار داده شد و در این وضعیت، با حرکت دادن گوه در راستای شیار از سمت قسمتی با عمق شیار کم تا عمق زیاد، عمقی که در آن سیگنال موج LCR دیگر قابل تشخیص نباشد، به‌عنوان عمق نفوذ موج LCR در آن فرکانس در نظر گرفته می‌شود [۲۲]. پس از آزمون مشخص شد که عمق نفوذ موج LCR در فرکانس‌های ۱، ۲، ۴ و ۵ مگاهرتز به ترتیب ۶، ۳/۵، ۲ و ۱/۱ میلی‌متر است.

۲-۵-۴- اندازه‌گیری ضریب آکوستوالاستیک

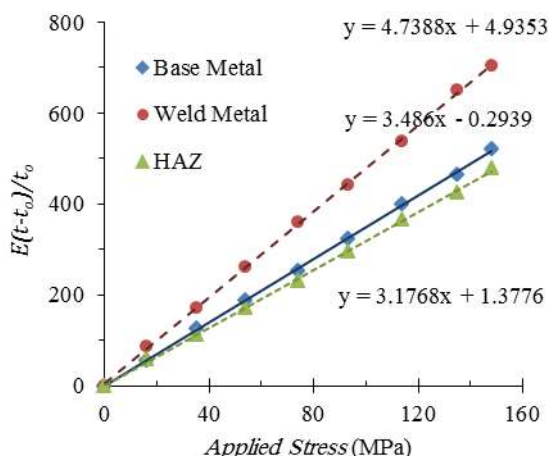
تغییر ریزساختار در نواحی مختلف جوش، بر زمان پرواز موج LCR تأثیر دارد؛ به همین دلیل به منظور افزایش دقت اندازه‌گیری تنش پسماند، لازم است تا ضریب آکوستوالاستیک

اندازه‌گیری و با در دست داشتن ضریب آکستوالاستیک مناطق مختلف جوش کاری، تنش پسماند طولی بنا به رابطه (۶) به دست آمد. نتایج روش التراسونیک با استفاده از چهار نوع فرکانس و به تبع آن در چهار عمق از سطح قطعه (در مسیر مورد بررسی مشهود در شکل ۱۸)، در شکل‌های ۱۹ تا ۲۲ آورده شده است.

از آنجا که مقدار تنش پسماند طولی ناشی از جوش کاری لب‌به‌لب دو ورق، در اواسط طول ورق (در اواسط مسیر جوش کاری) در راستای موازی خط جوش، تقریباً ثابت می‌ماند [۳۴]، بنابراین در نقاط موجود در فاصله بین دو ترنسدیوسر فرستنده و گیرنده (فاصله بین دو ترنسدیوسر ۲۰ میلی‌متر می‌باشد)، مقدار تنش پسماند طولی تقریباً ثابت است. به همین دلیل، نقاط موجود در نمودار تنش پسماند



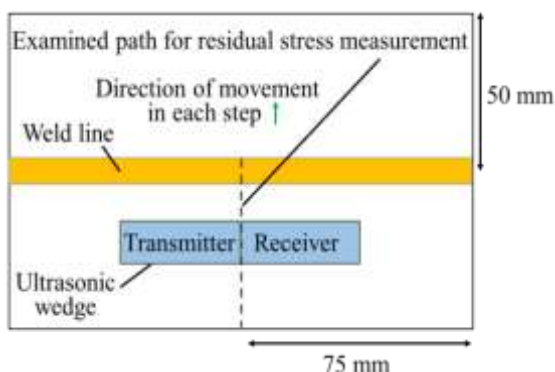
شکل ۱۶- اندازه‌گیری ضریب آکستوالاستیک



شکل ۱۷- نمودار تعیین ضریب آکستوالاستیک برای فرکانس ۵ مگاهرتز

جدول ۵- ضریب آکستوالاستیک به دست آمده برای سه ناحیه جوش کاری

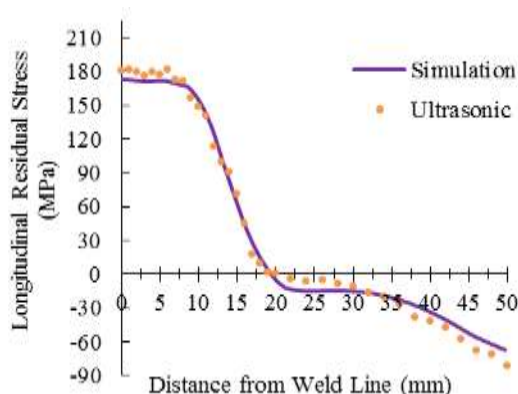
فرکانس (MHz)	فلز پایه	HAZ	فلز جوش
۱	۳/۵۳۹۰	۳/۲۳۲۱	۴/۸۱۹۷
۲	۳/۵۰۷۸	۳/۲۰۱۰	۴/۷۸۸۱
۴	۳/۴۲۱۶	۳/۱۱۸۷	۴/۶۹۱۸
۵	۳/۴۸۶۰	۳/۱۷۶۸	۴/۷۳۸۷
میانگین	۳/۴۸۸۶	۳/۱۸۲۱	۴/۷۵۹۵



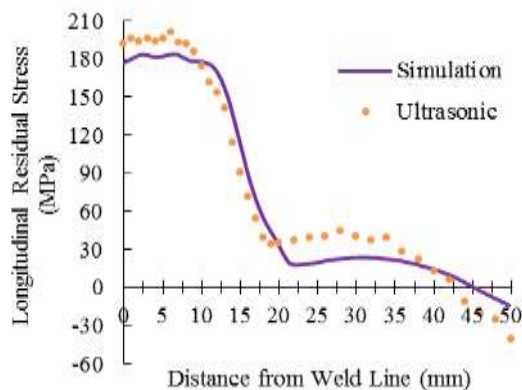
شکل ۱۸- مسیر مورد بررسی برای اندازه‌گیری تنش پسماند

۲-۵-۵- اندازه‌گیری تنش پسماند با روش التراسونیک

به منظور اندازه‌گیری تنش پسماند طولی، مقطع عرضی تقارن و منصف قطعه که در شکل ۱۸ مشخص شده است، انتخاب شد. زمان پرواز موج LCR در نقاط مختلف این مقطع، توسط چهار مجموعه دوتایی (فرستنده و گیرنده) از ترنسدیوسرهای ۱، ۲، ۴ و ۵ مگاهرتزی (فرستنده و گیرنده) اندازه‌گیری گردید که دویبه‌دو مطابق همان شکل ۱۸ در یک گوه بسته شده و در جهت نشان داده در همین شکل، حرکت داده می‌شد. اندازه‌گیری زمان پرواز موج در همان میز سه‌محوره مشهود در شکل ۱۵ انجام گرفت، همچنین موقعیت گوه، هنگام اندازه‌گیری زمان پرواز موج، نیز در شکل ۱۸ قابل مشاهده است. پس از اندازه‌گیری زمان پرواز موج در نقاط

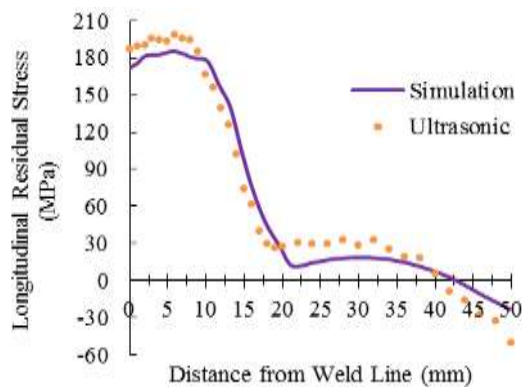


شکل ۲۲- تنش پسماند طولی جوش کاری حاصل از روش شبیه‌سازی و روش التراسونیک با استفاده از فرکانس ۱ MHz در عمق ۶ mm



شکل ۱۹- تنش پسماند طولی جوش کاری حاصل از روش شبیه‌سازی و روش التراسونیک با استفاده از فرکانس ۵ MHz در عمق ۱/۱ mm

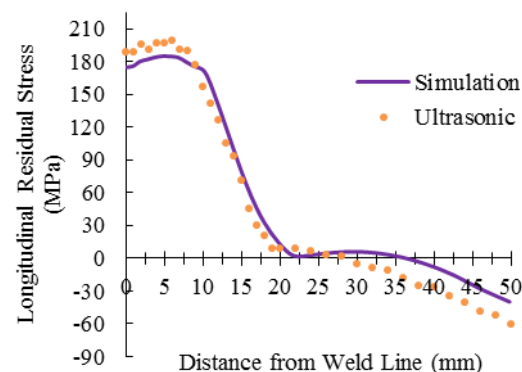
اندازه‌گیری شده به وسیله‌ی روش التراسونیک، بیان‌گر تنش پسماند طولی اندازه‌گیری شده در نقاط واقع در وسط فاصله بین دو ترنس‌دیوسر است. مطابق همان شکل ۱۸، گام‌های طی شده برای اندازه‌گیری تنش پسماند در نقاط مسیر مورد بررسی در همین شکل، در راستای عمود بر خط جوش بود. در هر گام، گوه التراسونیک به موازات خط جوش قرار داده می‌شد تا موج LCR را در راستای تنش پسماند طولی و به موازات خط جوش در قطعه وارد کند و زمان پرواز موج را اندازه بگیرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی تنش پسماند طولی، در ۷ عمق مختلف از سطح قطعه در شکل ۲۳ آورده شده است.



شکل ۲۰- تنش پسماند طولی جوش کاری حاصل از روش شبیه‌سازی و روش التراسونیک با استفاده از فرکانس ۴ MHz در عمق ۲ mm

۲-۶- مقایسه و بحث روی نتایج

در بخش ۲-۴ اعتبار مدل شبیه‌سازی با نتایج تجربی پراش پرتو ایکس، تایید شد. در ادامه، پس از اندازه‌گیری تنش پسماند طولی با روش التراسونیک در چهار عمق، نتایج روش التراسونیک با نتایج شبیه‌سازی در همان چهار عمق، مقایسه شدند که نتایج در همان شکل‌های ۱۸ تا ۲۱ مشهود است. با توجه به نتایج همین ۴ شکل، بیشترین اختلاف نتایج حاصل از دو روش، در دو ناحیه مهم و پرتنش ۰ تا ۱۰ و ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متری از خط جوش به ترتیب در جداول ۶ و ۷ آورده شده است. همان‌طور که در جدول ۶ مشهود است، در ناحیه‌ی ۰ تا ۱۰ میلی‌متر از خط جوش (که شامل مناطق فلز جوش و HAZ بوده و مهم‌ترین ناحیه در بحث ایمنی و طراحی



شکل ۲۱- تنش پسماند طولی جوش کاری حاصل از روش شبیه‌سازی و روش التراسونیک با استفاده از فرکانس ۲ MHz در عمق ۳/۵ mm

جدول ۶- بررسی بیشترین اختلاف موجود بین نتایج روش التراسونیک و شبیه‌سازی در فاصله‌ی ۰ تا ۱۰ میلی‌متری

از خط جوش					
فرکانس (MHz)	مکان نقطه (mm)	تنش روش شبیه‌سازی (MPa)	تنش روش التراسونیک (MPa)	اختلاف نتایج (MPa)	درصد نسبت به σ_y
۱	۶	۱۷۱/۶	۱۸۲/۱	۱۰/۵	۴/۶
۲	۱۰	۱۷۰	۱۵۷	۱۳	۵/۷
۴	۰	۱۷۱/۹	۱۸۶/۶	۱۴/۷	۶/۵
۵	۶	۱۸۲/۹	۲۰۰/۳	۱۷/۴	۷/۶

جدول ۷- بررسی بیشترین اختلاف موجود بین نتایج روش التراسونیک و شبیه‌سازی در فاصله‌ی ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متری

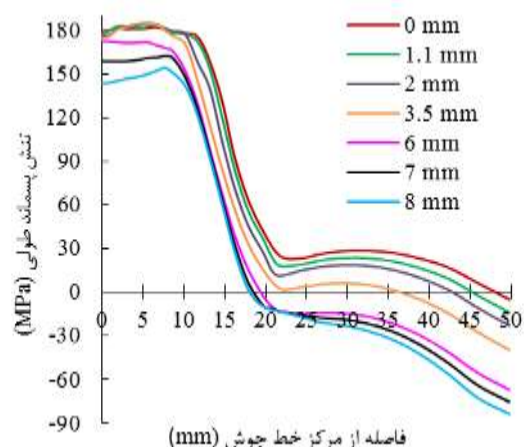
از خط جوش					
فرکانس (MHz)	مکان نقطه (mm)	تنش روش شبیه‌سازی (MPa)	تنش روش التراسونیک (MPa)	اختلاف نتایج (MPa)	درصد نسبت به σ_y
۱	۱۲	۱۲۸/۲	۱۱۳	۱۵/۲	۶/۷
۲	۱۶	۶۰/۷	۴۵/۲	۱۵/۵	۶/۸
۴	۱۷	۵۷/۱	۳۹	۱۸/۱	۸
۵	۱۸	۵۴/۳	۳۵/۱	۱۹/۲	۸/۴

(مشهود در جدول ۲)، مقدار کوچکی است. در این محدوده نیز تطابق نتایج دو روش از فرکانس ۱ تا ۵ مگاهرتز رفته‌رفته مقداری کمتر شده است.

در ناحیه ۲۰ تا ۵۰ میلی‌متری از خط جوش (که مقدار تنش پسماند در حد ایمن قرار دارد و این محدوده جزو مناطق حساس و حیاتی مورد مطالعه در بحث خستگی و تحمل بار سازه نمی‌باشد) باز هم تطابق نتایج دو روش التراسونیک و شبیه‌سازی، از فرکانس ۱ تا ۵ مگاهرتز، رفته‌رفته کمتر شده است. در این محدوده، تطابق نتایج فرکانس ۱ مگاهرتز با نتایج شبیه‌سازی، در حد خوبی است

جوش است)، نتایج همه‌ی فرکانس‌ها، تطابق بسیار خوبی با نتایج شبیه‌سازی دارد؛ به طوری که درصد اختلاف با نتایج شبیه‌سازی نسبت به تنش تسلیم نمونه‌ی اولیه (جدول ۲)، برای همه‌ی فرکانس‌ها، زیر ۸ درصد و مقدار اختلاف، زیر ۱۷/۵ مگاپاسکال می‌باشد. در این محدوده، بهترین تطابق نتایج، مربوط به فرکانس ۱ مگاهرتز است که مقدار اختلاف نتایج آن با نتایج شبیه‌سازی، ۱۰/۵ مگاپاسکال (معادل ۴/۶ درصد نسبت به تنش تسلیم) می‌باشد. طبق همان جدول ۶ تطابق نتایج، از فرکانس ۱ تا ۵ مگاهرتز، رفته‌رفته مقداری کمتر شده است؛ به طوری که مقدار اختلاف، از ۱۰/۵ به ۱۷/۴ مگاپاسکال رسیده است.

با توجه به جدول ۷ در ناحیه ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متری از خط جوش، نیز تطابق خوبی بین نتایج فرکانس‌های ۱ و ۲ مگاهرتز با نتایج شبیه‌سازی مشاهده شد؛ به طوری که مقدار اختلاف نتایج دو روش، برای این دو فرکانس، تقریباً با هم برابر (هر دو در حد ۱۵/۵ مگاپاسکال) بود، ولی در فرکانس‌های ۴ و ۵ مگاهرتز، مقدار اختلاف نتایج به اندازه‌ی کمی افزایش یافت؛ به طوری که در فرکانس ۵ مگاهرتز مقدار اختلاف به ۱۹/۲ مگاپاسکال یا ۸/۴ درصد رسید. در نهایت، تطابق نتایج التراسونیک با نتایج شبیه‌سازی در این محدوده نیز در حد مطلوبی است؛ به طوری که مقدار اختلاف نتایج روش التراسونیک با نتایج شبیه‌سازی، برای همه فرکانس‌ها، زیر ۲۰ مگاپاسکال می‌باشد که نسبت به تنش تسلیم فلز پایه



شکل ۲۳- تنش پسماند طولی حاصل از شبیه‌سازی در چند عمق مختلف از سطح قطعه

ساده‌سازی‌هایی که در شبیه‌سازی‌ها فرض می‌شود: برای مثال کاملاً ایزوتروپیک فرض کردن ماده و انتخاب خواص حرارتی و مکانیکی از مقالات و منابع معتبر به‌جای انجام آزمون تجربی (این کار یک روال معمول در شبیه‌سازی جوش است؛ زیرا آزمون‌های تجربی برای به‌دست آوردن خواص حرارتی مانند گرمای ویژه، ضریب انبساط حرارتی و خواص مکانیکی تابع دما، اغلب وقت‌گیر و نیازمند امکانات و هزینه بسیار می‌باشند)، می‌تواند باعث بروز مقداری خطا در نتایج حاصل از شبیه‌سازی شود. همچنین نقاط دورتر از خط جوش، از آن‌جاکه نزدیک به محل قیدوبندها قرار دارند و شبیه‌سازی شرایط واقعی قیدوبندها در نرم‌افزار، حساسیت بالایی دارد؛ لذا در این نقاط، وجود مقداری خطا، امری محتمل است؛ همچنین در نقاط دورتر از خط جوش، درشت زدن اندازه‌ی مش به دلیل کم‌اهمیت بودن محل این نقاط از نظر تنش و کاهش زمان شبیه‌سازی، مولد مقداری خطا در آن مناطق است.

به منظور حذف تنش پسماند اولیه، قطعات پس از آماده‌سازی و قبل از انجام جوش‌کاری، در کوره تنش‌گیری شدند؛ به‌طوری‌که دیگر الگوی پراش پرتو ایکس آن‌ها، تحت زوایای شیب مختلف، تغییرات چندانی را نشان نمی‌داد. البته باید متذکر شد که در هنگام جوش‌کاری ذوبی نیز، تنش‌های پسماند در محل خط جوش و نواحی نزدیک به آن (که در بحث ایمنی و طراحی، مناطق حساسی هستند) تحت دماهای بسیار بالای جوشکاری ذوبی، آزاد می‌شوند.

بنا به [۳۵] به‌دلیل بزرگ‌تر بودن قطر پراب نسبت به وسعت HAZ، مقداری از موج، از نواحی فلز جوش و فلز پایه عبور می‌کرد که با اندازه‌گیری وسعت قرارگیری پراب روی هر منطقه جوشی و احتساب ضریب آکستوالاتیگ همان منطقه در وسعت مربوط به خود، ضریب آکستوالاتیگ منطقه HAZ استخراج شد. سپس تنش پسماند در HAZ بدست آمد.

اگرچه بعد از جوش‌کاری، گرده‌ی کوچکی به ارتفاع ۰/۶ میلی‌متر پدید آمد که با استفاده از سنباده‌زنی نرم (که تولید تنش پسماند مازاد نمی‌کرد)، این گرده با سطح ورق، هم‌ارتفاع شد تا از تفرقی‌های ناخواسته‌ی پرتو ایکس جلوگیری شود ولی حذف همین گرده کوچک جوش‌کاری نیز می‌تواند

(اختلاف در حد ۱۴/۸ مگاپاسکال یا ۶/۵ درصد نسبت به تنش تسلیم)، در صورتی‌که مقدار همین اختلاف برای سه فرکانس دیگر، تقریباً در یک سطح و حداکثر برابر ۲۷/۲ مگاپاسکال یا ۱۲ درصد است که در مقایسه با مقدار تنش تسلیم فلز پایه، مقدار کوچکی است.

با توجه به نتایج فوق، با افزایش فرکانس موج التراسونیک، خطا و مقدار اختلاف نتایج دو روش بیشتر شد؛ علت این است که در فرکانس‌های بالاتر به علت میرا شدن بیشتر موج التراسونیک، دامنه موج در صفحه‌ی نمایش نرم افزار مربوطه افت پیدا می‌کند، لذا لازم است که برای تشخیص موقعیت دقیق قله‌ی موج LCR (به منظور ثبت زمان پرواز موج)، دامنه موج در صفحه نمایش تقویت گردد. با تقویت نمودن بیشتر دامنه، ارتعاشات موج در صفحه نمایش بیشتر شده و این امر تشخیص موقعیت دقیق قله موج LCR و قرائت زمان پرواز آن را با مقداری خطا مواجه می‌کند.

از آن‌جاکه روش التراسونیک، میانگین مقدار تنش پسماند را در عمق نفوذ خود اندازه می‌گیرد، لذا در شکل‌های ۱۸ تا ۲۱، نتایج روش التراسونیک، با مقدار میانگین تنش پسماند به‌دست آمده از روش شبیه‌سازی در همان عمق مورد نظر، مقایسه شده است [۱۳].

یکی از مهمترین منابع خطا و اختلاف بین نتایج روش التراسونیک و شبیه‌سازی، این است که چون قطر پراب‌ها ۵ میلی‌متر است، لذا در هر گام اندازه‌گیری، میانگین تنش پسماند، در عرض یک ناحیه ۵ میلی‌متری اندازه‌گیری شده است؛ حال آن‌که در روش شبیه‌سازی، تنش پسماند در گره‌ها یا نقاط مدل به‌دست آمد؛ لذا وجود مقداری خطا، اجتناب ناپذیر است. البته توجه شود که همه روش‌های تجربی اندازه‌گیری تنش پسماند، در یک مساحت کوچک معینی از سطح قطعه، میانگین مقدار تنش پسماند را در آن محدوده به‌دست می‌دهند و این ویژگی فقط مختص روش التراسونیک نیست. برای مثال، در همین پژوهش، در روش تجربی پراش پرتو ایکس، قطر پرتو ایکس تابیده شده بر سطح قطعه نیز ۵ میلی‌متر بود. بزرگ‌تر بودن قطر پراب از عرض منطقه‌ی HAZ نیز باعث بروز مقداری خطا شد که با توجه به نتایج این پژوهش و مرجع [۱]، این مقدار چشمگیر نبود.

خطا (که مربوط به فرکانس ۵ مگاهرتز بود) برابر ۱۷/۴ مگاپاسکال یا ۷/۶ درصد (نسبت به تنش تسلیم) بود. در ناحیه ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متری از خط جوش، نیز تطابق خوبی بین نتایج روش التراسونیک و شبیه‌سازی مشاهده شد به طوری که بیشترین خطا (که مربوط به فرکانس ۵ مگاهرتز بود) برابر ۱۹/۲ مگاپاسکال یا ۸/۴ درصد بود. در ناحیه ۲۰ تا ۵۰ میلی‌متری از خط جوش، تطابق خوبی بین نتایج روش التراسونیک و شبیه‌سازی برای فرکانس ۱ مگاهرتز مشاهده شد، به طوری که بیشترین خطای آن برابر ۱۴/۸ مگاپاسکال یا ۶/۵ درصد بود. مقدار همین اختلاف برای سه فرکانس دیگر، تقریباً در یک سطح و حداکثر برابر ۲۷/۲ مگاپاسکال یا ۱۲ درصد بود که در مقایسه با تنش تسلیم فلز پایه، مقدار کوچکی محسوب می‌شد. در هر سه ناحیه مورد بررسی، بهترین تطابق نتایج، به ترتیب مربوط به فرکانس‌های ۱، ۲، ۴ و ۵ مگاهرتز بود. در نهایت، روش التراسونیک توانست تنش‌های پسماند طولی را با حداکثر خطای معادل ۱۲٪ تنش تسلیم جنس مورد استفاده، اندازه‌گیری نماید. دقت این روش در اندازه‌گیری حداکثر تنش پسماند طولی بالاتر از ۹۲٪ بود.

۲- مشاهده گردید که مقدار اختلاف نتایج روش التراسونیک و شبیه‌سازی، با افزایش فرکانس، افزایش می‌یابد. علت این امر، افزایش ارتعاشات موج LCR در صفحه نمایش، به دلیل لزوم تقویت بیشتر دامنه‌ی موج (به علت افزایش میرایی موج) بود که در بخش مربوطه به آن پرداخته شد.

۴- مراجع

- [1] Javadi Y (2012) Residual stress evaluation through thickness of an austenitic stainless steel welded joint by using ultrasonic technique. PhD Thesis, Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran. (In Persian)
- [2] Murnaghan F. D (1937) Finite deformations of an elastic solid. Am J Math 59(2): 235-260.
- [3] Hughes D. S, Kelly J. L (1953) Second-order elastic deformation of solids. Phys Rev 92(5): 1145.
- [4] Crecraft D. I (1967) The measurement of applied and residual stresses in metals using ultrasonic waves. J Sound Vib 5(1): 173-192.

مقدار کمی از تنش پسماند جوش‌کاری را آزاد کند. توجه شود که به‌منظور اندازه‌گیری مقدار تنش پسماند در مواضع روی خط جوش با روش‌های تجربی اندازه‌گیری تنش پسماند (مانند روش التراسونیک، پراش پرتو ایکس و کرنش‌سنجی سوراخ)، حذف گرده‌ی جوش اجتناب‌ناپذیر است. همچنین در مراجع جدیدی مانند [۱۴،۱] مشاهده شده است که حتی با حذف گرده‌های مقدار کمی بزرگ‌تر از گرده‌ی بوجود آمده در پژوهش حاضر، باز هم تطابق خوبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی مشهود بوده است که این مطلب نشانگر آن است که حذف آرام گرده‌های کوچک، مقدار کمی از تنش پسماند را آزاد می‌کند.

۳- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی قابلیت روش التراسونیک در اندازه‌گیری تنش پسماند طولی جوش‌کاری در عمق اتصال دو قطعه از جنس آلیاژ آلومینیوم سری ۵۰۰۰ که با روش جوش‌کاری تیگ به هم متصل شده بود، پرداخته شد. بدین منظور از چهار نوع ترنسدیوسر التراسونیک با فرکانس‌های ۱، ۲، ۴ و ۵ مگاهرتز برای دسترسی به چهار عمق از قطعه استفاده گردید. تنش پسماند جوش‌کاری، در نرم‌افزار آباکوس و به روش غیرکوپل شبیه‌سازی شد و سپس مدل شبیه‌سازی حاصل، به وسیله‌ی مقایسه با نتایج روش تجربی پراش پرتو ایکس، تایید اعتبار گردید. در نهایت، نتایج روش التراسونیک در چهار عمق از قطعه، با نتایج شبیه‌سازی (به علت محدودیت روش‌های تجربی متداول در اندازه‌گیری تنش در اعماق قطعه، نتایج التراسونیک با نتایج شبیه‌سازی تایید اعتبار شده با روش تجربی پراش مقایسه شد) مقایسه گردید تا قابلیت روش التراسونیک در اندازه‌گیری تنش پسماند در عمق قطعه مشخص شود. برخی از مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده از این پژوهش عبارتند از:

۱- روش التراسونیک قابلیت پیش‌بینی پروفیل و شکل نمودار تنش پسماند طولی جوش‌کاری و مقدار آن را در اعماق قطعه از جنس آلیاژ آلومینیوم سری ۵۰۰۰ (به‌خصوص در منطقه‌ی حساس جوش) دارد؛ به طوری که در ناحیه ۰ تا ۱۰ میلی‌متری از خط جوش که شامل منطقه فلز جوش و ناحیه‌ی HAZ هم است، تطابق بسیار خوبی بین نتایج روش التراسونیک و شبیه‌سازی مشاهده شد، به طوری که بیشترین

- [18] AWS Standard D1.6/D1.6M (2003) American Welding Society, Structural Welding Code - Aluminum, An American National Standard.
- [19] Karimnia V, Sattari-Far I (2015) Investigating the influence of effective parameters on the residual stresses in circumferentially arc welded thin walled cylinders of aluminum alloy series 5000. *Moades Mechanical Engineering* 15(3): 377-386. (In Persian)
- [20] Shugen X, Wang W, Chang Y (2014) Using FEM to predict residual stresses in girth welding joint of layered cylindrical vessels. *Int J Pres Ves Pip* 119: 1-7.
- [21] Pradip D, Joshi Y, Franche C (1994) Determination of gas tungsten arc welding efficiencies. *Experimental thermal and fluid science* 9(1): 80-89.
- [22] Eftekhari M (2014) Simulation of longitudinal residual stress in welded austenitic stainless steel plates and evaluation with X-ray diffraction and ultrasonic methods. MSc Thesis, Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran. (In Persian)
- [23] Deng D, Murakawa H (2008) Prediction of welding distortion and residual stress in a thin plate butt-welded joint. *Comp Mater Sci* 43(2): 353-365.
- [24] Jiang W, Zhang Y, Woo W (2012) Using heat sink technology to decrease residual stress in 316L stainless steel welding joint: Finite element simulation. *Int J Pres Ves Pip* 92: 56-62.
- [25] Adachi T, Sekino T, Nakayama T, Kusunose T, Niihara K (2003) Measurement of microscopic stress distribution of multilayered composite by X-ray stress analysis. *Mater Lett* 57(20): 3057-3062.
- [26] Hauk V (1997) *Structural and residual stress analysis by nondestructive methods: Evaluation-Application-Assessment*. Elsevier.
- [27] Hilly M. E (1971) Residual stress measurement by X-ray diffraction. SAE J784a, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA: 19.
- [28] Pecharsky VK, Zavalij P (2009) *Fundamentals of powder diffraction and structural characterization of materials*. New York, Springer 69.
- [29] Fitzpatrick M, Fry A, Holdway P, Kandil F, Shackleton J, Suominen L (2005) Determination of residual stresses by X-ray diffraction: 45.
- [30] Akbari S, Miresmaeili R (2008) Experimental and numerical analyses of residual stress distributions in TIG welding process for 304L stainless steel. *J Mater Process Tech* 208(1): 383-394.
- [31] Eftekhari M, Najafabadi M. A, Farahani M (2017) Evaluation of Longitudinal Residual Stress Variations Along the Thickness of Welded Joint of 5086 Aluminum Alloy. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 7(3): 1-16. (in Persian)
- [5] Egle D. M, Bray D. E (1976) Measurement of acoustoelastic and third order elastic constants for rail steel. *J Acoust Soc Am* 60(3): 741-744.
- [6] Egle DM, Bray DE (1978) Nondestructive measurement of longitudinal rail stresses: Application of the acoustoelastic effect to rail stress measurement. 34(1): Final Rpt.
- [7] Egle DM (1980) Application of the acoustoelastic effect to rail stress measurement. *Ultrasonic Materials Characterization* 596: 213.
- [8] Leon-Salamanca T, Bray DE (1988) Ultrasonic measurement of residual stress in steels using critically refracted longitudinal waves (Lcr). PhD diss., Texas A&M University.
- [9] Leon-Salamanca, T, and Bray DF (1996) Residual stress measurement in steel plates and welds using critically refracted longitudinal (LCR) waves. *Journal of Research in Nondestructive Evaluation* 7(4): 169-184.
- [10] Walaszek H, Hoblos J, Bouteille P, Bourse G, Robin C (2006) Ultrasonic stress measurement: Application to welded joints. *ECNDT. Tu* 4(3).
- [11] Gachi S, Belahcene F, Boubenider F (2009) Residual stresses in AA7108 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding. *Nondestruct Test Eva* 24(3): 301-309.
- [12] Qozam H, Chaki S, Bourse G, Robin C, Walaszek H (2010) Microstructure effect on the Lcr elastic wave for welding residual stress measurement. *Exp Mech* 50(2): 179-185.
- [13] Javadi Y, Pirzaman HS, Raeisi MH, Najafabadi, MA (2013) Ultrasonic inspection of a welded stainless steel pipe to evaluate residual stresses through thickness. *Mater Design* 49: 591-601.
- [14] Javadi Y, Akhlaghi M, Najafabadi MA (2013) Using finite element and ultrasonic method to evaluate welding longitudinal residual stress through the thickness in austenitic stainless steel plates. *Mater Design* 45: 628-642.
- [15] Javadi Y, Pirzaman HS, Raeisi MH, Najafabadi MA (2013). Ultrasonic evaluation of welding residual stresses in stainless steel pressure vessel. *J Press Vess-T ASME* 135(4): 041502.
- [16] Eftekhari M, Najafabadi MA (2015) Evaluation of the capability of ultrasonic method for measuring longitudinal welding residual stress, by validating with X-Ray diffraction method. *Moades Mechanical Engineering* 15(9): 1-10. (in Persian)
- [17] Sadeghi S, Najafabadi MA, Javadi Y, Mohammadisefat M (2013) Using ultrasonic waves and finite element method to evaluate through-thickness residual stresses distribution in the friction stir welding of aluminum plates *Mater Design* 52: 870-880.

- [34] Ueda Y, Murakawa H, Ma N (2012) Welding deformation and residual stress prevention. Elsevier.
- [35] Khedmat M, Najafabadi MA, Bafghy HR (2014) Acousto elastic constant measurement in the HAZ of aluminum connection with the approach of using different frequencies. Indian J Sci Res 1(2): 329-334.
- [32] Minicuci DJ, dos Santos Júnior AA, Andriano MH, de Carvalho Santos F (2006) Stress evaluation of railroad forged wheels by ultrasonic testing. J Test Eval 35(1): 66-74.
- [33] Gachi S, Boubenider F, Belahcene F (2011) Residual stress, microstructure and microhardness measurements in AA7075-T6 FSW welded sheets. Nondestruct Test Eva 26(1): 1-11.