

تعیین پارامترهای شکست یک استوانه جدار نازک تحت فشار در حضور تنش‌های پسماند جوشکاری

محمد رضا محمدعلیها^۱، حسین قره‌باغی^۲

۱ استادیار مرکز تحقیقات جوش و اتصال دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، mrm_aliha@iust.ac.ir

۲ کارشناس ارشد مهندسی هوافضا، آزمایشگاه خستگی و شکست دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۲/۱۶

چکیده

در این مقاله ابتدا فرایند جوشکاری قوس تنگستن یک پوسته آلومینیومی^۱ با درز جوش طولی به صورت سه بعدی در نرم افزار آباکوس مدل سازی شده و توزیع تنش پسماند ناشی از فرایند جوشکاری به دست می آید. تمامی خواص مکانیکی و حرارتی پوسته وابسته به دما در نظر گرفته شده و برای مدل سازی شار حرارتی و فلز جوش از مدل دو بیضی گون گلداک و روش تولد و مرگ المان استفاده می شود. مقدار تنش پسماند در اطراف خط جوش و در ناحیه متأثر از حرارت به مقدار قابل ملاحظه‌ای کششی می باشد که می تواند سبب بروز و رشد ترک در ناحیه خط جوش شود. سپس یک ترک سه بعدی نیم بیضوی با طول های مختلف در امتداد خط جوش و در جداره پوسته آلومینیومی به صورت طولی در نظر گرفته می شود و پس از محاسبه ضریب شدت تنش مود I آن تحت بارگذاری فشار داخلی منحنی های تغییرات ضریب شدت تنش در سرتاسر جبهه ترک و برای طول ترک های مختلف ارائه می شود. در نهایت با در نظر گرفتن تأثیر حوزه تنش پسماند اطراف جوش در ضریب شدت تنش و تکرار تحلیل های اجزای محدود نشان داده می شود که تأثیر همزمان فشار داخلی و تنش پسماند کششی موجود در اطراف جوش می تواند شرایط رشد ترک در پوسته را تسهیل نمایند.

واژگان کلیدی

مدل سازی فرایند جوشکاری، المان محدود، تنش پسماند، استوانه جدار نازک ترک دار، ترک نیم بیضوی

۱. مقدمه

تنش پسماند در سازه ها می تواند منجر به ایجاد اعوجاج، تغییر شکل های ناخواسته و غیرمجاز و یا کاهش استحکام و عمر مفید سازه های فلزی گردد؛ لذا محاسبه میزان تنش های پسماند حاصل از فرایند جوشکاری بسیار مهم است. جوشکاری آلومینیوم و آلیاژهای آن با توجه به مشکلات تکنیکی مربوط به جوش پذیری

تنش پسماند تنشی است که بر اثر انجام عملیات خاصی در جسم باقی می ماند و در حالی که جسم تحت هیچ بارگذاری خارجی نیست، همچنان در قطعه وجود دارد. فرایند جوشکاری با توجه به اعمال حرارت شدید، تغییر شکل جسم و تغییر ریز ساختار ماده، یکی از عوامل عمده ایجاد تنش پسماند به شمار می رود. وجود

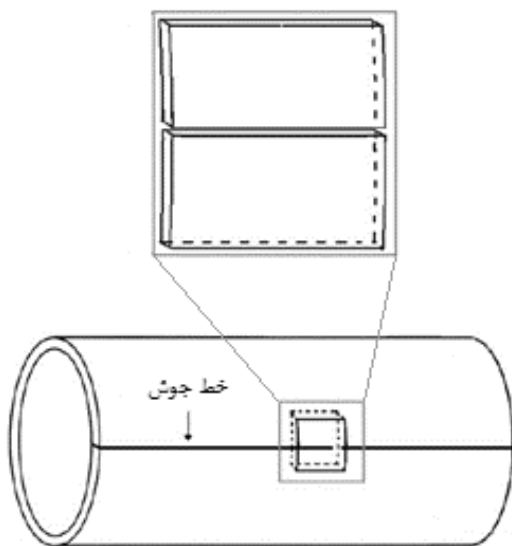
آن، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. به‌علت ضریب انبساطی بزرگ و میزان انقباض در حالت تبدیل به جامد، اعوجاج‌های پسماند قابل توجهی در سازه‌های جوشکاری شده از جنس آلیاژهای آلومینیوم یافت می‌شود. در زمان خنک‌کاری آلومینیوم و آلیاژهای آن و رسیدن از مرحله مایع به جامد نیز انقباض حجمی قابل توجهی وجود خواهد داشت. تغییر شکل جوشکاری می‌تواند روی دقت ابعادی و تoleransi سازه‌های جوشکاری شده تأثیر فراوانی بگذارد. بنابراین بررسی و کنترل تنش‌های پسماند و اعوجاج قطعات جوشکاری شده از جنس آلیاژهای آلومینیوم همیشه موضوعی مهم در مهندسی جوشکاری است [۱]. در ادامه، به برخی از تحقیقات انجام‌شده درباره آنالیز فرایند جوشکاری آلیاژهای مختلف آلومینیوم اشاره می‌شود.

کاناس و همکاران [۲] آثار خواص مواد را در سه حالت وابستگی دمایی، دمای اتاق و مقادیر متوسط دمایی در جوشکاری یک ورق آلومینیومی AL 5052 روی تنش‌های پسماند و اعوجاج با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ولدسیم^۲ بررسی کردند. فریگارد و همکاران [۳] نیز مدل المان محدود حرارتی با منبع حرارتی متحرک ایجاد کردند و پروفیل دمایی پیش‌بینی شده خود را با استفاده از پروفیل‌های تجربی به‌دست آمده برای آلیاژهای آلومینیوم 6082-T6 و 7108-T79 تصحیح کردند. اولیس [۴] نیز با استفاده از مدل سه‌بعدی ویسکوپلاستیک، تأثیر تغییر پارامترهای جوشکاری را بر توزیع دمایی آلیاژ آلومینیوم 7050-T7451 بررسی کرد. خاندکار و همکاران [۵] مدل کامل‌تری از حرارت ورودی ارائه کردند و از آن برای مدل‌کردن تاریخچه دمایی آلیاژ آلومینیوم 6061-T651 استفاده کردند. چن و کواچویچ [۶] با استفاده از نرم‌افزار انسیس^۳ توزیع دمایی حین جوشکاری ورق آلومینیوم 6061-T6 را به‌دست آوردند و با نتایج تجربی خود مقایسه کردند. ضعیف و همکاران [۷] آثار خواص مواد وابسته دمایی و سخت‌شدن فلز در اثر تغییر شکل نسبی را روی تنش‌های پسماند در یک ورق آلومینیومی AL 5083 با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس^۴ بررسی کردند. همچنین ستاری‌فر و فراهانی [۸] در یکی از تحقیقات خود به بررسی اثر شکل شیار جوش و تعداد پاس جوش در تنش‌های پسماند باقی‌مانده در لوله‌های جوشکاری شده پرداخته‌اند.

با توجه به کاربرهای فراوان لوله‌ها و پوسته‌های استوانه‌ای، در سال‌های گذشته تحقیقات عددی و تجربی بسیاری درخصوص

مدلسازی فرایند جوشکاری و تعیین تنش‌های پسماند لوله‌های جوشکاری شده انجام شده است [۹-۱۲]. وجود تنش‌های پسماند می‌تواند عامل مهمی در ایجاد و رشد ترک در دیواره لوله‌ها و استوانه‌ها باشد؛ لذا تحقیقات گسترده‌ای در زمینه تحلیل و بررسی ترک در استوانه‌های جدار نازک و مخازن تحت فشار به‌روش اجزای محدود توسط مهندسان و محققان انجام شده و یا در حال انجام است. در بیشتر این تحقیقات، پژوهشگران به بررسی و محاسبه پارامترهای شکست از جمله ضریب شدت تنش نوک یا جبهه ترک پرداخته‌اند. به‌عنوان اولین تحقیقات در این زمینه، در سال ۱۹۷۲ م آندروود [۱۳] و در سال ۱۹۷۴ کبایاشی [۱۴] ترک‌های محوری را در مخازن فلزی تحت فشار مورد بررسی قرار داده و مقدار ضریب شدت تنش مود I را به‌صورت تخمینی محاسبه کردند. آتلوری و کاتیرسان [۱۵] و بعدها، مک‌گوان و ریموند [۱۶] توانستند ضریب شدت تنش را برای یک ترک سطحی نیمه‌بیضوی با استفاده از روش‌های اجزای محدود به‌دست آورند. در هر دو تحقیق، ترک سطحی به‌صورت یک ترک داخلی در دیواره قسمت استوانه‌ای مخزن تحت فشار در نظر گرفته شده بود. در سال‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۸۲ م، نیومن و راجو [۱۷-۱۸] توانستند ضریب شدت تنش مود I را برای بازه وسیعی از پارامترهای هندسی ترک‌های نیمه‌بیضوی داخلی و خارجی ارائه دهند. پس از نیومن و راجو نیز تحقیقات زیادی در زمینه ترک در مخازن استوانه‌ای انجام گرفت. مثلاً، کرخوپ [۱۹-۲۰] با استفاده از روش‌های اجزای محدود سه‌بعدی، ضریب شدت تنش ترک سه‌بعدی نیمه‌بیضوی سطحی را برای یک مخزن تحت فشار محاسبه نمود. ژنگ و همکاران [۲۱-۲۲] نیز با استفاده از روش توابع وزنی توانستند ضریب شدت تنش را برای ترک‌های محوری در مخازن جدار ضخیم به‌دست آورند و ترک نیمه‌بیضوی را در استوانه جدار ضخیم با انتهای آزاد در نظر بگیرند. کریمی و میرزائی [۲۳] نیز با استفاده از تحلیل‌های عددی اجزای محدود، به بررسی رشد ترک در یک لوله جدارنازک تحت بارگذاری انفجاری گازی پرداخته‌اند. باوجود تحقیقات گسترده، بررسی رفتار شکست استوانه‌های جدار نازک آلومینیومی دارای ترک و در حضور تنش‌های پسماند ناشی از فرایند جوشکاری کمتر مورد بررسی قرار گرفته است؛ لذا در این مقاله فرایند جوشکاری قوس تنگستن با پوشش گاز محافظ یک پوسته آلومینیومی با درز جوش طولی با استفاده از روش المان محدود سه بعدی مدلسازی و توزیع

پوشش گاز محافظ^۵ بوده و همان طور که در شکل ۱ نیز مشاهده می‌شود، اتصال به صورت لب به لب مربعی باشد. جنس لوله از آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 فرض شده و برای کاهش حجم مدل و تعداد المان‌ها تنها نیم متر از طول پوسته در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس ۶/۷ برای مدلسازی هندسی، مدلسازی فرایند جوش و انجام تحلیل‌های تنش و تغییر شکل استوانه جوشکاری شده استفاده می‌گردد.



شکل ۱. نمایی شماتیک از پوسته استوانه‌ای شکل با درز جوش طولی

شبه‌سازی فرایند جوشکاری با انجام تحلیل‌های حرارتی و مکانیکی به صورت مستقل انجام می‌شود. برای این منظور ابتدا یک تحلیل حرارتی گذرای سه‌بعدی انجام شده، توزیع میدان‌های دما به دست می‌آیند. سپس تحلیل مکانیکی با در نظر گرفتن نتایج دمایی به عنوان بار حرارتی و با استفاده از مدل الاستوپلاستیک، معیار تسلیم فون مایزس و سخت‌شوندگی سینماتیک صورت می‌پذیرد. جهت تحلیل پوسته مدلسازی شده، زیربرنامه‌های رایانه‌ای توسط زبان برنامه‌نویسی فورترن^۶ نوشته شده است. برای مدلسازی منبع حرارتی از مدل دو بیضی‌گون گلداک [۲۴] استفاده شده که این مدل در شکل ۲ نمایش داده شده است.

تمامی خواص حرارتی و مکانیکی ماده پوسته تابع دما فرض شده و جهت مدلسازی ماده پرکننده از روش تولد و مرگ المان استفاده شده است. برای استفاده از این تکنیک کلیه المان‌های فلز پایه و المان‌های فلز جوش، که بعداً در اثر رسوب مواد باید متولد شوند، در ابتدا ایجاد و سپس المان‌های مربوط به فلز جوش

تنش پسماند حاصله بررسی می‌شود. سپس با در نظر گرفتن یک ترک نیم‌بیضوی در خط جوش به بررسی رفتار شکست پوسته تحت بارگذاری فشار داخلی پرداخته می‌شود و نشان داده می‌شود که تنش پسماند اطراف ناحیه جوش تأثیر به‌سزایی در ضریب شدت تنش ترک دارد.

۲. مطالعه عددی فرایند جوشکاری

با توجه به پیچیدگی‌های فراوان در فرایند جوشکاری، استفاده از روش‌های عددی نظیر اجزای محدود، در مواردی تنها ابزار موجود برای بررسی رفتار سازه‌های با اشکال هندسی متنوع و بارگذاری پیچیده می‌باشد. از اینرو، در این مقاله نیز مدلسازی هندسی استوانه ترک‌دار و نیز فرایند جوشکاری به کمک نرم‌افزارهای المان محدود صورت می‌پذیرد. شبه‌سازی‌های عددی این تحقیق طی سه مرحله انجام می‌شود:

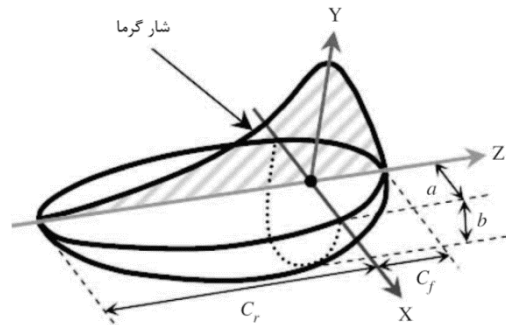
۱. مدلسازی المان محدود استوانه جدارنازک آلومینیومی و شبه‌سازی فرایند جوشکاری در امتداد خط جوش و محاسبه توزیع تنش پسماند
۲. مدلسازی یک ترک نیم‌بیضوی طولی در امتداد خط جوش
۳. تحلیل و بررسی تأثیر حوزه تنش پسماند جوشکاری پوسته بر رفتار رشد ترک

در بخش نخست، ابتدا فرایند جوشکاری لوله شبه‌سازی شده و توزیع تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری به دست می‌آید. سپس در بخش دوم، مدل المان محدود یک ترک نیم‌بیضوی محوری در امتداد خط جوش و در جداره خارجی لوله ایجاد می‌گردد و پارامترهای شکست آن از قبیل ضریب شدت تنش بدون در نظر گرفتن حوزه تنش پسماند به روش عددی محاسبه می‌گردد. در نهایت و در بخش سوم، با اعمال حوزه تنش پسماند محاسبه شده در بخش اول به مدل استوانه ترک‌دار، تأثیر هم‌زمان بار خارجی اعمالی و تنش پسماند در رفتار شکست استوانه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳. مدلسازی پوسته و فرایند جوشکاری

در شکل ۱ مدل شماتیک یک پوسته استوانه‌ای به شعاع ۲۵۰ و ضخامت ۴ میلی‌متر نمایش داده شده است. این پوسته توسط جوشکاری با درز جوش طولی تولید شده است. فرض می‌شود که فرایند جوشکاری به صورت تک‌پاسه و به روش قوس تنگستن با

غیرفعال می‌شوند. این کار با ضرب ماتریس سختی آن المان‌ها در یک عدد بسیار کوچک انجام می‌شود. به‌صورت مشابه، وقتی المان‌ها مجدداً فعال (متولد) می‌شوند و پس از عبور منبع حرارت و رسوب مادهٔ پرکننده، عملاً به مدل اضافه نمی‌شوند، بلکه فعال شدن مجدد المان‌ها به‌معنای بازگشت مقادیر ماتریس‌های سختی، جرم، بارهای المان و جز این‌ها به مقدار اولیه خود می‌باشد.



شکل ۲. نمایی شماتیک از منبع حرارتی، مدل دو بیضی‌گون گلاک [۲۴]

مواد به‌طور واقعی و متغیر با دما اعمال می‌شود، تحلیل المان محدود به‌صورت غیرخطی و حل به‌صورت تکراری خواهد بود [۲۵]. جهت اعمال شرایط مرزی، جابه‌جایی گره‌ها در صفحهٔ تقارن در جهت عمود بر خط جوش مقید شده‌اند. علاوه بر آن، جهت جلوگیری از حرکت صلبوار سیستم نقاط ابتدایی و انتهایی خط جوش نیز مقید شده‌اند. اندازهٔ المان‌ها برای ناحیهٔ مذاب و نزدیکی ناحیهٔ مذاب به‌صورت مکعبی با ابعاد $1 \times 1 \times 1$ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. سطح تقارن آدیاباتیکی و دمای اولیهٔ لوله برابر دمای محیط 20 درجهٔ سانتی‌گراد و کلیهٔ خواص حرارتی و مکانیکی وابسته به دما فرض شده‌اند. در جدول ۱ خواص مکانیکی و حرارتی آلومینیوم آلیاژ 6061-T6 وابسته به دما، که در این مدل‌سازی استفاده شده، آورده شده است.



شکل ۳. مدل المان محدود سه‌بعدی پوستهٔ آلومینیومی

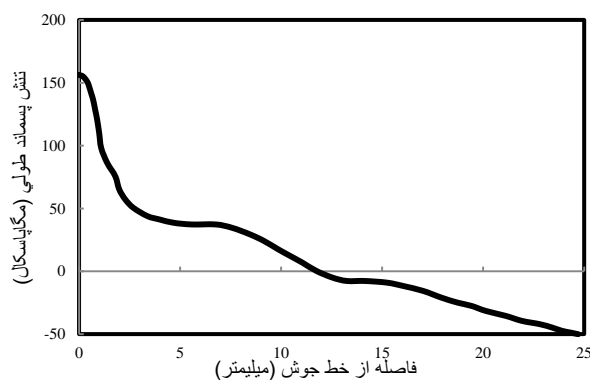
۴. نتایج مدل‌سازی فرایند جوشکاری

در شکل ۴ نتایج تاریخچهٔ دمایی پس از گذشت 30 ثانیه از فرایند جوشکاری مشاهده می‌شود. در شکل ۵ نیز نتایج مربوط به تنش‌های پسماند طولی نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در این فرایند تنش‌های اطراف خط جوش به‌صورت کششی بوده و در فاصلهٔ 12 میلی‌متری از مرکز خط جوش تنش پسماند کششی به تنش پسماند فشاری تبدیل می‌شود. لذا نواحی نزدیک به خط جوش لوله مستعد ایجاد و رشد ترک‌های کششی می‌باشد. بیشینهٔ مقدار تنش پسماند کششی در حدود 160 مگاپاسکال است که مقدار قابل ملاحظه‌ای داشته و درصد قابل توجهی از استحکام تسلیم مادهٔ آلومینیومی می‌باشد. این مقدار تنش پسماند بدون شک تأثیر بسیاری بر رفتار رشد ترک‌های احتمالی ایجادشده در این محدوده خواهد داشت و سبب تسریع رشد ترک‌ها و شکست فاجعه‌آمیز ترک در نواحی اطراف جوش می‌شود. همچنین لازم به‌ذکر است که سایر مؤلفه‌های

در شکل ۳ مدل المان محدود ساخته‌شده در این شبیه‌سازی نمایش داده شده است. ساختار هندسی مش به‌کار رفته برای هر دو تحلیل حرارتی و مکانیکی یکسان بوده، جهت تحلیل از المان‌های آجری‌شکل ایزوپارامتریک مرتبهٔ اول استفاده شده است. در تحلیل حرارتی المان آجری 8 گرهی با درجهٔ آزادی دما در هر گره 7 و در تحلیل مکانیکی المان آجری 8 گرهی با 3 درجه آزادی جابه‌جایی در هر گره 6 به‌کار رفته است. به‌دلیل بالا بودن گرادیان‌های دمایی در نزدیکی ناحیهٔ مذاب و ناحیهٔ متأثر از حرارت 9 از المان‌های ریزتری در این ناحیه تا فاصلهٔ 10 میلی‌متری از خط جوش استفاده شده، اما با دور شدن از خط جوش اندازهٔ المان‌ها افزایش می‌یابد. تعداد کل المان‌ها در این مدل‌سازی حدود 162 هزار المان است که با توجه به غیرخطی بودن حل و ابعاد وسیع پوسته، زمانی طولانی برای تحلیل لازم بود، لذا از بررسی تغییرات پارامترهای مختلف در مدل‌سازی فرایند جوشکاری چشم‌پوشی شد.

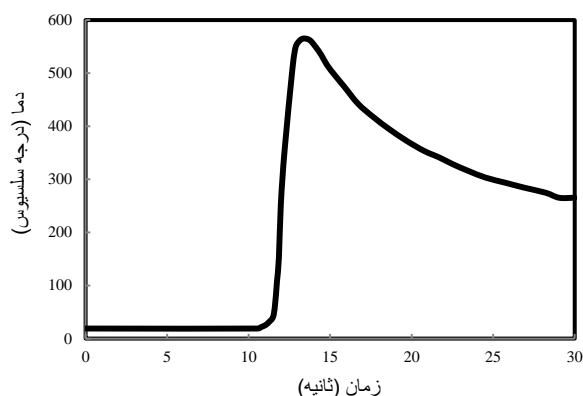
گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی ماده، چگالی، دمای ذوب و دمای انجماد ماده خواص مهمی از ماده می‌باشند که دانستن آنها برای شبیه‌سازی حرارتی فرایند جوشکاری لازم است. خواص مکانیکی مواد نیز شامل مدول یانگ، ضریب پواسون، تنش تسلیم و ضریب انبساط حرارتی است که در تحلیل ترموپلاستیک و ترموپلاستیک فرایند جوشکاری تأثیرگذار می‌باشند. چون خواص

تنها به ارائه نتایج تنش پسماند طولی، که بر ضریب شدت تنش مود کششی موثر است، پرداخته شده و از بررسی سایر مؤلفه‌های تنش پسماند صرف‌نظر شده است.



شکل ۵. نتایج تنش پسماند طولی در پوسته تحلیل شده حاصل از فرایند جوشکاری قوس تنگستن با پوشش گاز محافظ

تنش (نظیر تنش‌های پسماند عرضی) نیز به سادگی از تحلیل‌های عددی انجام‌شده برای پوسته استوانه‌ای قابل محاسبه است. اما چون هدف اصلی این مقاله بررسی پارامترهای شکست پوسته استوانه‌ای ترک‌دار در مود بازشوندگی (کششی) بارگذاری می‌باشد،



شکل ۴. نتایج تاریخچه دمایی برای فرایند جوشکاری قوس تنگستن با پوشش گاز محافظ در پوسته آلومینیومی تحلیل شده

جدول ۱. خواص حرارتی و مکانیکی وابسته به دما برای آلومینیوم آلیاژ 6061-T6 [۲۶]

دما (درجه سانتی‌گراد)	نسبت پواسون	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	ضریب هدایت حرارتی (وات بر متر مربع درجه سانتی‌گراد)	ظرفیت گرمایی ویژه (ژول بر کیلوگرم درجه سانتی‌گراد)	چگالی (کیلوگرم بر متر مکعب)	مدول یانگ (گیگاپاسکال)	ضریب انبساط حرارتی
۳۷/۸	۰/۳۳	۲۷/۴۴	۱۶۲	۹۴۵	۲۶۸۵	۶۸/۵۴	۲۳/۴۵
۹۳/۳	۰/۳۳	۲۶/۴۶	۱۷۷	۹۷۸	۲۶۸۵	۶۶/۱۹	۲۴/۶۱
۱۴۸/۹	۰/۳۳	۲۴/۸۲	۱۸۴	۱۰۰۴	۲۶۶۷	۶۳/۰۹	۲۵/۶۷
۲۰۴/۴	۰/۳۳	-	۱۹۲	۱۰۲۸	۲۶۵۷	۵۹/۱۶	۲۶/۶۰
۲۶۰	۰/۳۳	۱۵/۹۷	۲۰۱	۱۰۵۲	۲۶۵۷	۵۳/۹۹	۲۷/۵۶
۳۱۵/۶	۰/۳۳	۶/۶۲	۲۰۷	۱۰۷۸	۲۶۳۰	۴۷/۴۸	۲۸/۵۳
۳۷۱/۱	۰/۳۳	-	۲۱۷	۱۱۰۴	۲۶۳۰	۴۰/۳۴	۲۹/۵۷
۴۲۶/۷	۰/۳۳	۱/۷۹	۲۲۳	۱۱۳۱	۲۶۰۲	۳۱/۷۲	۳۰/۷۱

بودن آن ترک‌ها و یا حد مجاز طول ترک بحرانی بررسی می‌گردد. بسته به هندسه سازه و بارگذاری روی آن ترک می‌تواند سه نوع تغییر شکل کلی (مود) به نام‌های مود I (یا مود کششی و باز کننده لبه‌های ترک)، مود II (یا مود لغزش داخل صفحه لبه‌های ترک) و مود III (مود لغزش خارج صفحه لبه‌های ترک) داشته باشد. به‌منظور مشخص کردن هندسه ترک‌های نیمه‌بیضوی موجود در دیواره استوانه‌ها، دانستن پارامترهای ضخامت دیواره

۵. مدل‌سازی ترک در جداره پوسته آلومینیومی

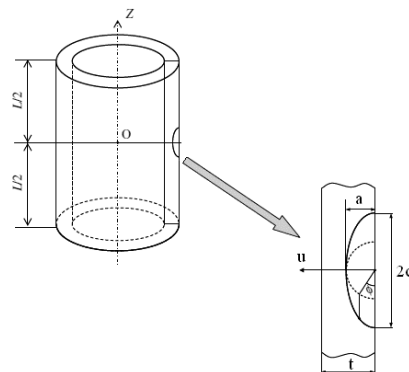
یکی از مهم‌ترین پارامترهای مطرح در مکانیک شکست، ضریب شدت تنش می‌باشد و معمولاً وضعیت ترک با این پارامتر بررسی می‌شود. بدین‌صورت که پس از شناسایی ترک‌های بحرانی موجود در یک سازه و یا قطعه، ضریب شدت تنش برای آن ترک‌ها با روش‌های متعددی که رایج‌ترین آنها روش اجزای محدود است، محاسبه شده و با استفاده از معیارهای شکست، میزان بحرانی

پوسته، شعاع استوانه، زاویه دایروی جبهه ترک (φ)، طول ترک (c) و عمق آن (a) لازم است (شکل ۶). علاوه بر پارامترهای ذکر شده، ضریب الاستیسیته و ضریب پواسون پوسته نیز جهت مدلسازی ترک مورد نیاز است. ضریب شدت تنش را می‌توان با استفاده از روش‌های گوناگون به دست آورد. در موارد خاص که هندسه و بارگذاری ساده باشند می‌توان ضریب شدت تنش را با استفاده از روش‌های تحلیلی محاسبه نمود، اما در اکثر موارد که مسئله پیچیده‌تر است (نظیر ترک‌های سه‌بعدی در پوسته‌ها) به روش‌های عددی از جمله روش اجزای محدود نیاز است. ترک در داخل استوانه‌ها می‌تواند به صورت محوری، محیطی و یا حتی مورب ایجاد شود. اما براساس شرایط بارگذاری و مرزی حاکم بر مسئله، معمولاً یکی از حالت‌ها فوق‌بحرانی می‌باشد. مثلاً در بررسی ترک‌های ایجاد شده در اطراف جوش‌های طولی، ترک‌های طولی در امتداد خط جوش معمولاً بحرانی‌تر بوده و در نتیجه غالباً به بررسی رفتار این‌گونه ترک‌ها پرداخته می‌شود. در این بخش به

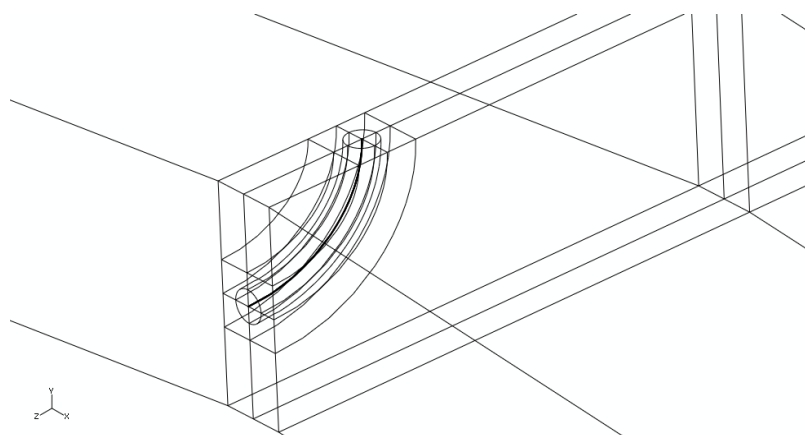
تشریح مدلسازی ترک نیمه‌بیضوی محوری ایجاد شده در جداره خارجی یک پوسته نازک استوانه‌ای به ضخامت ۴ میلی‌متر و در اندازه‌های مختلف پرداخته می‌شود. به منظور سهولت و حصول دقت بیشتر در مدلسازی ترک موجود در استوانه به صورت شکل ۷ تقسیم‌بندی می‌گردد. برای مدلسازی تکینگی موجود در مؤلفه‌های تنش و کرنش جبهه ترک، از المان‌های ویژه‌ای با نام المان‌های نقطه یک‌چهارم که همان المان‌های منفرد هستند، برای جبهه ترک استفاده می‌شود. برای ایجاد المان‌های تکین اطراف ترک باید حجم کوچکی با عنوان تونل ترک در اطراف ترک طرح‌ریزی شود. برای انجام این کار در نرم‌افزار آباکوس ابتدا می‌بایست قسمت‌بندی مناسب و ویژه‌ای در اطراف ترک صورت پذیرد و سپس با استفاده از قابلیت نرم‌افزار، المان‌های مذکور در راستای جبهه ترک ایجاد شوند. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، اطراف ترک برای ایجاد مش‌های کوچک‌تر به صورت خاصی شبکه‌بندی شده است.



شکل ۷. تقسیم‌بندی استوانه برای مدلسازی پوسته ترک‌دار



شکل ۶. ترک سطحی طولی در جداره خارجی استوانه محاسبه ضرایب شدت تنش برای ترک نیمه‌بیضوی طولی



شکل ۸. تقسیم‌بندی اطراف جبهه ترک برای مدلسازی ترک نیم بیضوی

ملاحظه بوده و می‌تواند در استحکام، عملکرد و عمر سرویس‌دهی پوسته آلومینیومی تأثیرگذار باشد. پیدایش و بروز ترک در این نواحی می‌تواند شرایط بحرانی شکست فاجعه‌بار پوسته را به‌همراه داشته باشد. لذا در ادامه مدلسازی‌های عددی این مقاله، با در نظر گرفتن یک ترک نیم‌بیضی طولی، تغییرات ضریب شدت تنش مود I ترک تحت بار فشار داخلی برای طول ترک‌های مختلف و بدون در نظر گرفتن تأثیر تنش پسماند حاصل از جوشکاری محاسبه گردید. در این قسمت تنش پسماند موجود در پوسته به‌عنوان بار خارجی به ترک اعمال شده و تأثیر حوزه تنش پسماند بر رفتار شکست مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور، حوزه تنش پسماند محاسبه شده ناشی از فرایند جوشکاری گاز محافظ پوسته آلومینیومی به‌عنوان بار خارجی به مدل المان محدود پوسته ترک‌دار اعمال شده و تغییرات ضریب شدت تنش ترک با حضور همزمان تنش پسماند و فشار داخلی مجدداً با انجام تحلیل‌های اجزای محدود، محاسبه شده و با نتایج بخش دوم تحلیل‌ها (که پوسته آلومینیومی تنها در معرض فشار داخلی در نظر گرفته شده بود) مقایسه می‌گردد.

در شکل ۱۱ تغییرات ضریب شدت تنش مود I ترک در پوسته آلومینیومی تحت فشار، با و بدون حضور تنش پسماند مقایسه شده است. همان‌گونه که از این شکل مشاهده می‌شود، تنش پسماند کششی حاصل از جوشکاری سبب افزایش مقدار ضریب شدت تنش مود I می‌شود. این تفاوت در طول ترک یکسان نیست؛ یعنی در قسمتی از ترک که در سطح قرار دارد این مقدار کمتر است و در قسمت‌های عمیق‌تر ترک ($\varphi \rightarrow 0$)، این تغییرات بیشتر ملاحظه می‌شود. اگر ترک طولی موازی با خط جوش، جایی که در آن تنش پسماند عرضی بالایی وجود دارد، در نظر گرفته شود، به محض اینکه عمق ترک افزایش پیدا می‌کند، ضرایب شدت تنش سریعاً نزدیک عمیق‌ترین موقعیت (نزدیک $\varphi = 0^\circ$) کاهش پیدا می‌کند، در حالی که افزایش در K_I در سطح ($\varphi = 90^\circ$) دیده می‌شود. به محض اینکه جلوی ترک به ناحیه ضخامت میانی می‌رسد، مواجه با تنش‌های پسماند عرضی سطح پایینی می‌شود. این بیانگر این واقعیت است که ترک‌های طولی و کوچک سطحی احتمال دارد که به‌صورت ترک کم عمق و دراز در سطح توسعه پیدا کند و سرانجام در ضخامت میانی به خاطر تنش‌های پسماند عرضی سطح پایینی متوقف شود.

پس از آن، قسمت‌های دیگر استوانه نیز المان‌بندی شده و مدل برای اعمال شرایط مرزی و بارگذاری آماده می‌شود. نسبت عمق ترک به ضخامت پوسته برابر $0/5$ ، نسبت عمق ترک به طول ترک در محدوده $0/4$ تا 1 و نسبت ضخامت پوسته به شعاع استوانه برابر $0/08$ در نظر گرفته شده است. نحوه مش‌بندی اطراف ترک در شکل ۹ نمایش داده شده است. با توجه به تقسیم‌بندی صورت گرفته برای مش‌بندی بهتر اطراف جبهه ترک، عرض کوچک‌ترین المان $0/07$ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. تعداد المان‌ها در طول ترک‌های مختلف متفاوت بوده و بیشترین مقدار در حدود 13000 المان برای بیشترین طول ترک می‌باشد. از بردار نرمال بر صفحه ترک برای تعریف جهت رشد ترک استفاده شده است. استوانه تحت بارگذاری فشار داخلی 5 مگاپاسکال قرار گرفته و مقادیر K_I در سرتاسر جبهه ترک توسط نرم‌افزار آباکوس به‌صورت مستقیم و با استفاده از روش انتگرال J استخراج گردید. شکل ۱۰، تغییرات ضریب شدت تنش مود I (K_I) را برای زوایای مختلف جبهه ترک و برای طول ترک‌های مختلف که از نتایج تحلیل‌های اجزای محدود استوانه ترک‌دار به‌دست آمده‌اند نشان می‌دهد. در حالتی که فشار داخلی اعمال می‌شود ضرایب شدت تنش مود II و III بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد و ترک شرایط بارگذاری مود I خالص (باز شونده) را تجربه می‌نماید.

همچنان که از شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد در طول ترک‌های مختلف بیشینه مقدار ضریب شدت تنش مود I در زاویه (φ) صفر درجه و کمینه مقدار آن در زاویه نود درجه اتفاق می‌افتد. با کاهش طول ترک مقدار ضریب شدت تنش مود I نیز کاهش پیدا می‌کند. در تمامی موارد ملاحظه شده است که با افزایش طول ترک اختلاف بیشینه و کمینه مقدار ضریب شدت تنش مود I افزایش می‌یابد، به بیان دیگر می‌توان چنین استنباط نمود که شدت تغییرات ضریب شدت تنش مود I با افزایش طول ترک افزایش می‌یابد.

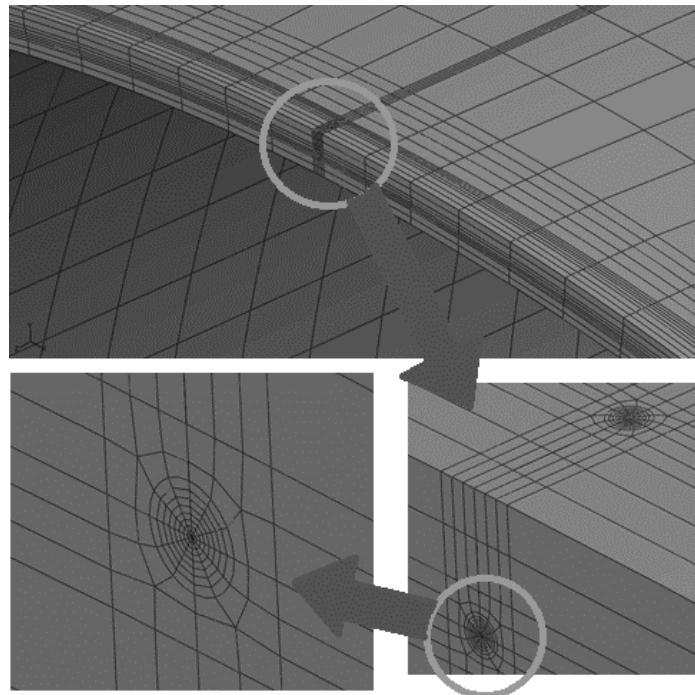
۶. تأثیر حوزه تنش پسماند بر رفتار رشد ترک

در قسمت اول شبیه‌سازی‌های المان محدود این مقاله، توزیع تنش پسماند ناشی از فرایند جوشکاری گاز محافظ در اطراف خط جوش، پوسته استوانه‌ای به‌دست آمد و نشان داده شد که مقدار تنش‌های پسماند کششی در نواحی نزدیک به خط جوش قابل

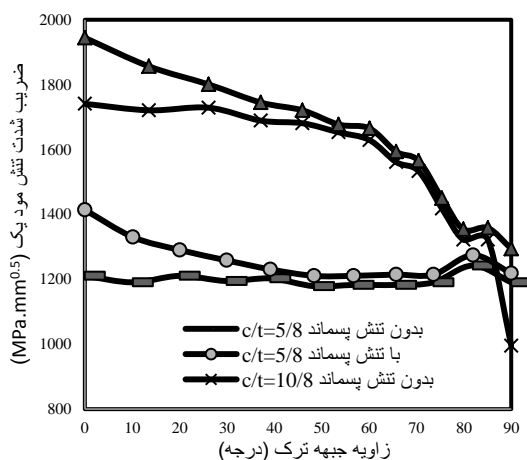
۷. نتیجه‌گیری

چون تخمین توزیع تنش پسماند در سازه‌های جوشکاری شده از اهمیت بالایی در زمینه تعیین بارهای خرابی سازه‌ها برخوردار است، لذا شناخت این نوع تنش‌ها و روش‌های تعیین و محاسبه آن بسیار مورد نیاز صنایع می‌باشد. ارزیابی جوش‌ها از نظر مکانیک شکست غالباً نیازمند دانش مربوط به توزیع تنش‌های پسماند جوشی می‌باشد. در بسیاری از استانداردها نظیر API RP

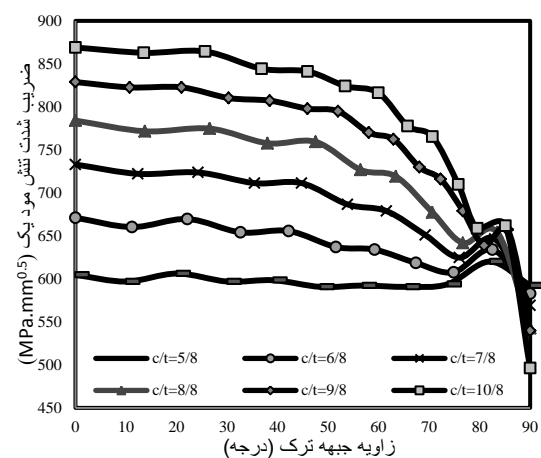
579 - و PD 6493 معمولاً توزیع محافظه‌کارانه و ساده‌شده‌ای از این تنش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. مثلاً در این استانداردها تنش‌های پسماند جوش، غالباً به صورت کششی و در حد تنش تسلیم یا به صورت درصدی از آن (در صورتی که عملیات حرارتی به کار برده شود) فرض شده است و توزیع آن در جهت ضخامت به صورت یکنواخت در نظر گرفته شده است [۲۷-۲۸].



شکل ۹. مش‌بندی اطراف نوک ترک



شکل ۱۱. نمودار توزیع ضریب شدت تنش مود I برای یک سری از اندازه‌های ترک طولی تحت بارگذاری فشار داخلی و در حضور میدان تنش پسماند جوشکاری



شکل ۱۰. نمودار توزیع ضریب شدت تنش مود I زوایای مختلف جبهه ترک برای اندازه‌های مختلف ترک طولی و تحت بارگذاری فشار داخلی در استوانه جدار نازک ترک دار

بیشینه مقدار ضریب شدت تنش را تنها بین ۱۲ تا ۱۷ درصد (بسته به عمق ترک) افزایش می‌دهد. از شکل ۱۱ می‌توان چنین نتیجه گرفت که نسبت K_I با حضور تنش پسماند به K_I بدون حضور تنش پسماند برای دو طول ترک ($c/t = 5/8$ و $c/t = 10/8$) به ترتیب برابر $1/17$ و $1/12$ می‌باشد. بنابراین هرچند که تنش پسماند کششی اطراف ترک در پوسته تحلیل شده درصد قابل ملاحظه‌ای از استحکام تسلیم ماده آلومینیومی می‌باشد، اما این تنش پسماند تنها در حدود ۱۵ درصد به مقدار ضریب شدت تنش ترک موجود در پوسته می‌افزاید. در نتیجه بار خارجی اعمالی به پوسته که به صورت فشار داخلی می‌باشد نقش مؤثرتری نسبت به تنش پسماند در شکست و واماندگی پوسته ایفا می‌نماید. چنانچه مقدار چقرمگی شکست بحرانی برای آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 در محدوده ۳۰ تا $50 \text{ MPa m}^{0.5}$ [۲۹-۳۰]، نتایج نشان می‌دهد که ترکیب همزمان بارگذاری فشار داخلی و تنش پسماند می‌تواند سبب رشد ترک و شکست پوسته شود. چون کاهش فشار کاری در بسیاری از موارد ممکن نیست؛ باید تمهیداتی اندیشید تا دست‌کم در حین جوشکاری مقدار تنش‌های پسماند کششی به حداقل برسد و یا بازرسی وجود عیب در نواحی اطراف خط جوش با دقت بیشتری انجام شود تا احتمال بروز شکست در پوسته‌های جدار نازک تحت فشار کاهش یابد.

در این مقاله، نحوه مدل‌سازی و محاسبه تنش‌های پسماند در عملیات جوشکاری پوسته استوانه‌ای شکل از جنس آلومینیوم آلیاژ 6061-T6 با استفاده از نرم‌افزار آباکوس به صورت سه‌بعدی مورد بررسی قرار گرفت و توزیع تنش‌های پسماند ایجادشده در ریشه جوش ارائه گردید. بر اساس نتایج حاصله تنش‌های پسماند در فواصل نزدیک لبه خط جوش به مقدار قابل ملاحظه‌ای کششی می‌باشند. وجود تنش پسماند قابل ملاحظه در این ناحیه که تا حدود ۱۶۰ مگاپاسکال نیز می‌رسد، می‌تواند زمینه‌ساز بروز شکست از محل ترک‌های ایجاد شده در خط جوش یا ناحیه HAZ جوش گردد. بدین منظور با در نظر گرفتن ترک‌های نیم‌بیضوی در طول خط جوش، به بررسی تأثیر وجود تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری بر رفتار شکست پرداخته شد. در حالتی که تنش پسماند حاصل از جوشکاری نیز لحاظ شده باشد، مقدار ضریب شدت تنش مود I افزایش می‌یابد. تأثیر تنش پسماند بر مقدار ضریب شدت تنش در زاویه $\phi = 0^\circ$ (عمیق‌ترین نقطه ترک) از سایر زوایا بسیار بیشتر بوده و به تدریج با افزایش زاویه ϕ و حرکت به سمت لبه‌های کناری ترک اثر تنش پسماند در مقدار K_I قابل اغماض می‌گردد. همچنین با افزایش طول ترک تأثیر تنش پسماند در ازدیاد ضریب شدت تنش بحرانی کاهش می‌یابد. با وجود این، نتایج تحلیل‌های تنش انجام‌شده نشان داد که حضور تنش پسماند کششی در اطراف ترک موجود در پوسته استوانه‌ای،

۸. مأخذ

- [1] Li, Jun, Jian G. Yang, Hai L. Li, De J. Yan, Hong Y. Fang. "Numerical simulation on bucking distortion of aluminum alloy thin-plate Weldment." *Frontiers of Materials Science in China* 3 (1), 2009, pp. 84-88.
- [2] Cañas, J., R. Picón, F. Paríís, A. Balzquez, J. Marín. "A simplified numerical analysis of residual stresses in aluminum welded plates." *Computers & Structures* 58 (1), 1996, pp. 59-69.
- [3] Frigaard, O., O. Grong, T. Midling. "A process model for friction stir welding of age hardening aluminum alloys." *Metallurgical and Materials Transactions A* 32 (5), 2001, pp. 1189-1200.
- [4] Ulysee, P. "Three-dimensional modeling of the friction stir-welding process." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 42 (14), 2002, pp. 1549-1557.
- [5] Khandkar, M.Z.H., J.A. Khan, A.P. Reynolds. "Predictions of temperature distribution and thermal history during friction stir welding: input torque based model." *Science and Technology of Welding and Joining* 8 (3), 2003, pp. 165-174.
- [6] Chen, C.M., R. Kovacevic. "Finite element modeling of friction stir welding-thermal and thermo mechanical analysis." *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (13), 2003, pp. 1319-1326.
- [7] Zaeem, Mohsen A., M.R. Nami, M.H. Kadivar. "Prediction of welding buckling distortion in a thin wall aluminum T joint." *Computational Materials Science* 38 (4), 2007, pp. 588-594.
- [8] SattariFar, Iraj, M.R. Farahani. "Effect of the weld groove shape and pass number on residual stresses in butt-welded pipes." *International*

- Journal of Pressure Vessels and Piping* 86 (11), 2009, pp. 723-731.
- [9] Roelens, J.B. "Numerical simulation of some multipass submerged arc welding determination of the residual stresses and comparison with experimental measurements." *Welding in The word* 35 (2), 1995, pp. 17-24.
- [۱۰] مصیب‌نژاد، جواد، مهسا سیدیان چوبی، محمد حق پناهی، محمد صدیقی. "شبیه‌سازی المان محدود و تجربی میدان‌های دما و تنش‌های پسماند در یک اتصال لوله به فلنج." نشریه مکانیک و هوافضا ۴ (۳)، ۱۳۸۷، ص. ۷۱-۸۳.
- [11] Runnemalm, Henrik, R. Lin. "Investigation of Residual Stresses in a Laser Welded Pipe by Finite Element Simulations and Neutron Diffraction Measurements", the 5th International Conference on Residual Stresses, Linköping, Sweden, 1997.
- [12] Mochizuki, Masahito, Makoto Hayashi, Toshio Hattori. "Numerical Analysis of Welding Residual Stress and its Verification Using Neutron Diffraction Measurement." *ASME Journal of Engineering Materials and Technology* 122 (1), 2000, pp. 98-103.
- [13] Underwood, J.H. "Stress intensity factor for internally pressurized thick walled cylinders." *ASTM National Symposium on Fracture Mechanics* 5 (3), 1971, pp. 59-72.
- [14] Kobayashi, A.S. "A simple procedure for estimating stress intensity factor in regions high stress gradients." WASHINGTON: Significance of defects in welded structures, Defense Technical Information Center, 1973.
- [15] Atluri, S.N., K. Kathirsan. "Outer and Inner Surface Flaws in Thick-Walled Pressure Vessels." *Transaction of the Fourth International Conference on Structure Matreial in Reactor Technology*, San Francisco, California, 1977.
- [16] McGowan, J.J., M. Raymund. "Stress intensity factor for internal longitudinal semi-elliptical surface flaws in a cylinder under arbitrary loading." *ASTM STP* 677, 1979, pp. 365-380.
- [17] Newman, J.C., I.S. Raju. "Stress intensity factor for internal surface cracks in Cylindrical pressure vessels." *Journal of Pressure Vessel Technology* 102, 1980, pp. 342-346.
- [18] Raju, I.S., J. C. Newman. "Stress intensity factor for internal and external surface cracks in Cylindrical vessels." *Journal of Pressure Vessel Technology* 104, 1982, pp. 293-298.
- [19] Kirkhope, K.J., R. Bell, J. Kikhope. "Stress intensity factors equations for single and multiple cracked pressurized thick walled cylinders." *International Journal of Pressure Vessel and Piping* 41, 1990, pp. 103-111.
- [20] Kirkhope, K.J., R. Bell, J. Kikhope. "Stress intensity factors equations for single and multiple semi elliptical surface cracks in pressurized thick walled cylinders." *International Journal of Pressure Vessel and Piping*, 47, 1991, pp. 247-257.
- [21] Zheng, X.J., G. Glinka. Weight function and stress intensity factors for longitudinal semi-elliptical cracks in thick walled cylinders." *Journal of Pressure Vessel Technology* 117, 1995, pp. 383-389.
- [22] Zheng, X.J., A. Kiciak, G. Glinka. "Weight function and stress intensity factors for internal surface semi elliptical crack in thick walled cylinders." *Engineering Fracture mechanics* 58, 1997, pp. 207-221.
- [۲۳] کریمی، رضا، و مجید میرزائی. "بررسی رشد ترک در لوله جدار نازک تحت بارگذاری انفجاری گازی به روش اجزای محدود." *مجله فنی و مهندسی مدرس، مکانیک* ۳۷، ۱۳۸۸، ص. ۵۱-۷۱.
- [24] Long, H., D. Gery, A. Carlier, P.G. Maropoulos. "Prediction of welding distortion in butt joint of thin plates." *Materials & Design* 30 (10), 2009, pp. 4126-4135.
- [25] Zhu, X.K., Y.J. Chao. "Effects of temperature dependent material properties on welding simulation." *Computers and Structures* 80, 2002, pp. 967-976.
- [26] Chao, Y., and X. Qi. "Thermal and Thermo-Mechanical Modeling of Friction Stir Welding of Aluminum Alloy 6061-T6." *Journal of Materials Processing & Manufacturing Science* 7, 1998, pp. 215-233.
- [27] API RP-579. Recommended practices for fitness-for-service, 2000.
- [28] PD 6493. Guidance on Methods for Assessing the Acceptability of flaws in Fusion welded structures. British standards institute, 1991.
- [29] MacMaster, F.J., K.S. Chan, S.C. Bergsma, and M.E. Kassner. "Aluminum alloy 6069 part II:

fracture toughness of 6061-T6 and 6069-T6.”
Materials Science and Engineering A 289, 2000,
pp. 54–59.

[30] 6061-T6 Aluminum. Material Notes. A
Resource for Semiconductor Manufacturers,
www.glemco.com, 2013.

پی نوشت

-
1. Aluminum 6061-T6
 2. WELDSIM
 3. ANSYS[®]
 4. ABAQUS[®]
 5. Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)
 6. FORTRAN
 7. DC3D20
 8. C3D20R
 9. heat-affected zone (HAZ)