



مدلسازی و تحلیل آزمون های کشش و خمش در عملیات حرارتی مخزن ذخیره نفت خام با استفاده از نرم افزار المان محدود Abaqus و مقایسه آن با روش تجربی

¹ علی وائل سلمان سنگور؛ ^{2*} سید علیرضا موسوی شیرازی

¹ دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده فنی، گروه مهندسی مکانیک- ساخت و تولید (تحصیلات تکمیلی)

² دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده فنی، گروه فیزیک

چکیده

در این تحقیق، دو آزمون کشش و خمش به صورت عددی و بر مبنای روش المان محدود مدلسازی شدند. برای این منظور از نرم افزار Abaqus 2022 استفاده شد. به منظور مدلسازی یک مسأله در محیط Abaqus، ماژولهای متفاوتی در نظر گرفته شده است که هر بخش از مدلسازی به طور جداگانه در ماژول مخصوص به خود تعریف و براساس آن مدلسازی تکمیل می گردد. همچنین در این تحقیق، بصورت تجربی نیز عملیات حرارتی انجام و بررسی شد. با بررسی نتایج این آزمون، اطلاعاتی در خصوص استحکام نهایی برای نمونه های مختلف جوش به دست آمد. در نهایت، اثر عملیات حرارتی بر خواص خوردگی و مکانیکی ناحیه جوش فولاد St321 در شرایط قرار گرفتن در محیط داخلی مخزن نفت خام بررسی گردید.

کلمات کلیدی: المان محدود، خمش، عملیات حرارتی، کشش، مخزن نفت، نرم افزار Abaqus.

۱- مقدمه

تست کشش که با عنوان **تست تنش** نیز شناخته می شود، اساسی ترین نوع آزمون مکانیکی است که می توان روی یک ماده انجام داد. به عبارتی دیگر، در این تست با کشیدن ماده توسط فک های دستگاه کشش، می توان واکنش آن را در برابر نیروهای اعمالی تعیین نمود. در مراحل اولیه آزمون، ارتباط بین بار وارد شده و ازدیاد طول نمونه، به صورت خطی

¹ دانشجوی کارشناسی ارشد

^{2*} استادیار و عضو هیات علمی

*Email: a_moosavi@azad.ac.ir

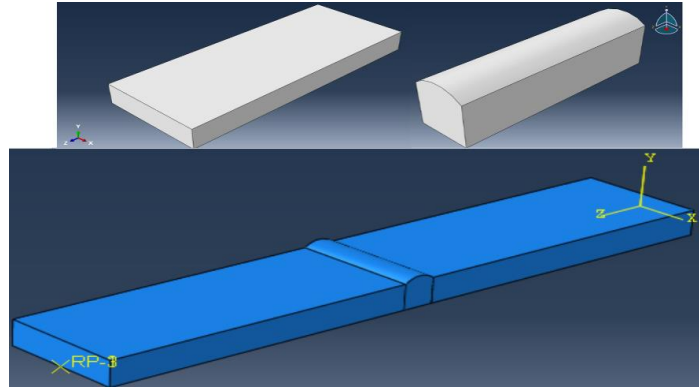
است. اگر نمونه‌ای در این ناحیه خطی تحت بار قرار گیرد، با برداشتن بار دقیقاً به همان شرایط قبل از بارگذاری باز می‌گردد. این ناحیه، به ناحیه الاستیک معروف است. پس از این ناحیه، با افزایش بیشتر نیرو ماده وارد ناحیه تغییر شکل پلاستیک می‌شود. در این ناحیه با برداشتن نیرو، ماده به شرایط قبل از اعمال نیرو باز نخواهد گشت. نقطه‌ای که در آن تغییر شکل از حالت الاستیک وارد پلاستیک می‌شود به حد الاستیک، حد تناسب یا نقطه تسلیم معروف است [1]. تست کشش معمولاً تا شکست قطعه ادامه می‌یابد تا نمودار نیرو-جابجایی و بعد از آن تنش- کرنش به شکل کامل به دست آید. یکی از موادی که تجمع آن در مخازن گاز باعث خوردگی می‌شود گاز H_2S است که خاصیت خوردگی بالایی نیز دارد که منجر به بروز خوردگی در سقف مخازن ذخیره سازی نفت می‌گردد [2]. بنابراین خوردگی در صنعت نفت یکی از مهم ترین مباحث در حوزه نگهداری و تعمیرات سازه ها به خصوص مخازن ذخیره نفت خام است. در این تحقیق، نتایج آزمون خوردگی و در نهایت نتایج آزمون کشش و خمش به صورت عددی و تجربی بررسی می‌گردد [3,4].

بنابراین هدف از این تحقیق، بررسی اثرات عملیات حرارتی بر خواص مکانیکی، خوردگی و ریز ساختار محل اتصال جوشکاری شده در ورق فولادی ضد زنگ St321 می‌باشد. در این تحقیق، خواص مکانیکی ناحیه جوش توسط روش مدل سازی المان محدود و با استفاده از نرم افزار Abaqus بررسی می‌شود [5].

۲- مواد و روش ها

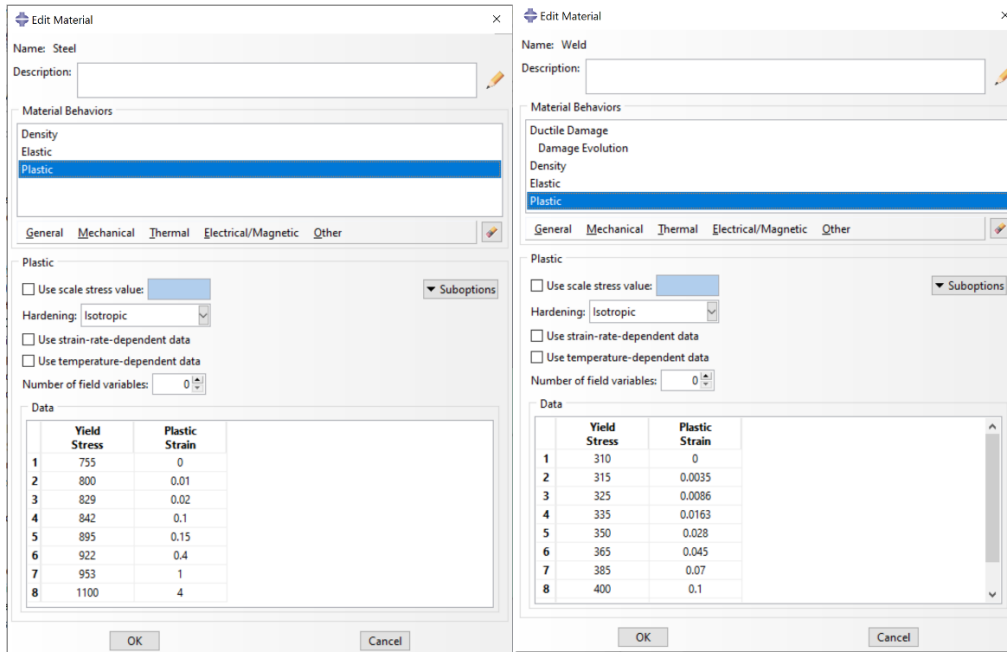
۲-۱- مدل سازی عددی آزمون کشش و خمش

در این بخش، شماتیک فولاد و ناحیه جوش به صورت دو قطعه جداگانه طراحی می‌شود. برای این منظور و براساس ابعاد و اندازه دقیق نمونه های جوشکاری شده، ناحیه جوش و فلز پایه طراحی شدند. در شکل ۱، این دو مدل نمایش داده شده است. در ماژول Assembly، قطعات طراحی شده در بخش قبل به هم متصل شده و ساختار کلی جوش طراحی شده را نشان می‌دهد. در شکل ۱، مدل نهایی جوش طراحی شده نمایش داده شده است.



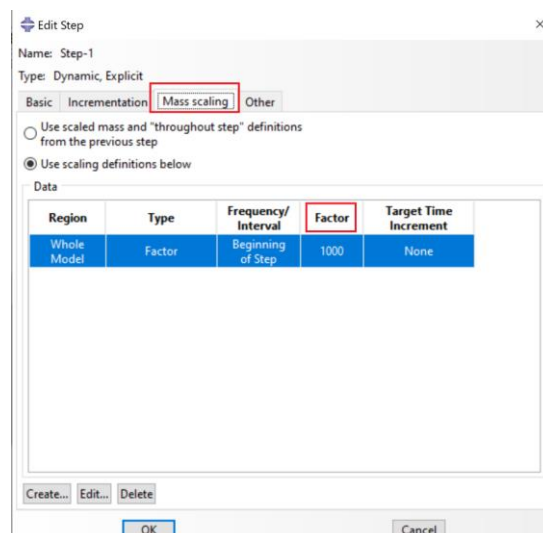
شکل ۱- مدل نهایی جوش طراحی شده و اجزای آن

در این ماژول، تمامی خواص فیزیکی و مکانیکی اجزای تشکیل دهنده مدل مورد بررسی تعریف می گردد. با توجه به اینکه جنس جوش و همچنین جنس فلز پایه با هم متفاوت است لذا در این بخش برای هر دو قطعه طراحی شده، خواص نامبرده تعریف می شود. در این تحقیق، چون هم فلز پایه و هم جوش در طی آزمون کشش و خمش دچار شکست شده و این موضوع تغییر شکل در ناحیه پلاستیک است لذا علاوه بر تعریف خواص الاستیک، باید خواص پلاستیک مواد مورد مطالعه نیز تعریف شود. در شکل ۲، خواص فیزیکی، الاستیک و پلاستیک تعریف شده برای هر دو بخش فلز پایه و ناحیه جوش نشان داده شده است. به منظور تعریف این خواص، در ماژول Property از گزینه New اقدام به تعریف این خواص می شود.



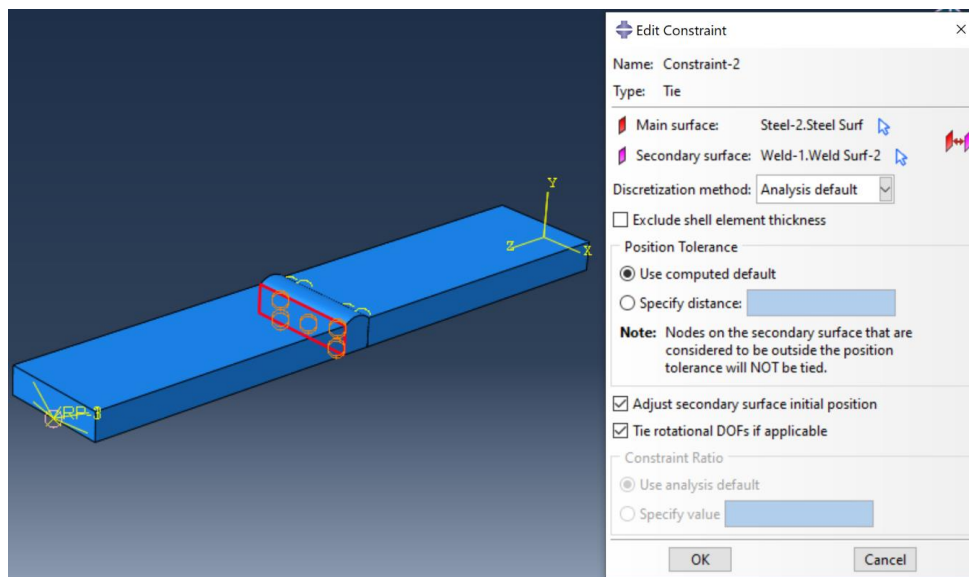
شکل ۲- سمت راست: خواص پلاستیک ناحیه جوش. سمت چپ: خواص پلاستیک ناحیه فلز پایه

در این ماژول، روش حل مسأله تعریف خواهد شد. مسأله مورد بررسی از نوع دینامیکی بوده لذا برای این منظور، روش حل Dynamic Explicit انتخاب می شود. با توجه به حجم بالای محاسبات در این مدل سازی، لازم است در بخش Edit می توان روش را تعریف نمود و از زیر شاخه Mass Scaling مطابق شکل ۳، شاخص Factor را عدد ۱۰۰۰ انتخاب کرد. این عدد به صورت آزمون و خطا انتخاب شده است تا در کمترین زمان ممکن، همگرایی در حل مسأله مشاهده شود.



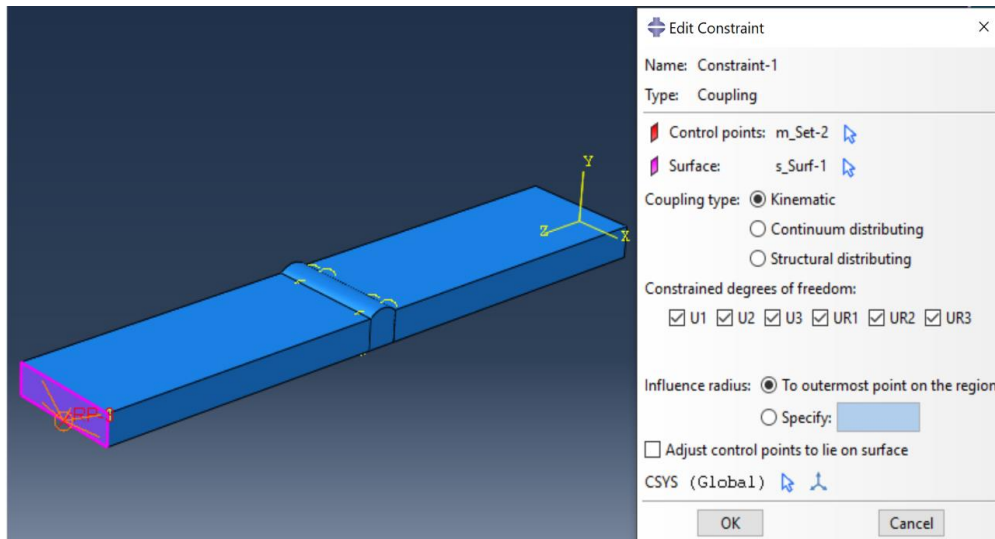
شکل ۳- روش انتخاب فاکتور Mass scaling جهت تسریع در حل مسأله

ارتباط بین صفحات مختلف در مدل جوش طراحی شده می بایست تعریف شود. با توجه به اینکه در این تحقیق، دو فلز پایه فولادی به اطراف مدل جوش طراحی شده باید فیکس شود لذا در این حالت باید دو قید تحت عنوان Tie برای اتصال سطوح مدل جوش به هم تعریف شود. این تعریف برای هر دو آزمون کشش و خمش یکسان است که در شکل ۴، فرآیند تعریف ارتباط بین سطوح فلز پایه و جوش نشان داده شده است. از طرفی برای آزمون کشش و خمش هر کدام باید به طور جداگانه قیود اعمال بار تعریف شود. در آزمون کشش، یک سمت قطعه، ثابت و سمت دیگر تحت تأثیر نیروی کششی است. به منظور اعمال نیروی کششی به قطعه، از منوی Tools یک نقطه مرجع تعریف و آن نقطه به سطح مقطع قطعه جوش متصل می شود.



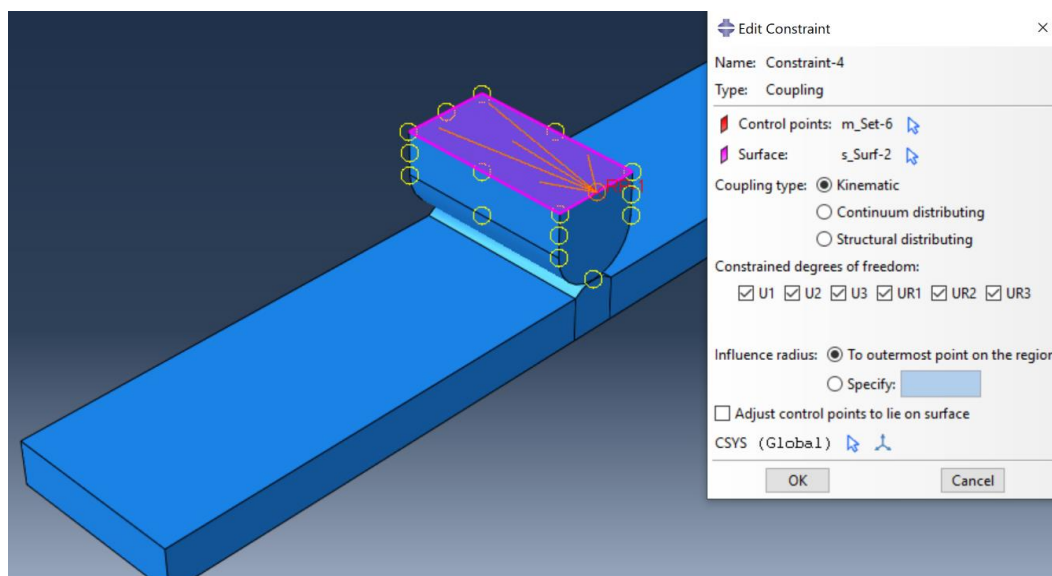
شکل ۴- تعریف ارتباط بین صفحات جوش و فلز پایه با قید Ti2

در شکل ۵، ارتباط بین نقطه مرجع و سطح مقطع در آزمون کشش نشان داده شده است. اما در آزمون خمش، یک قطعه سوم طراحی و عملیات اعمال نیرو توسط این قطعه انجام می شود.



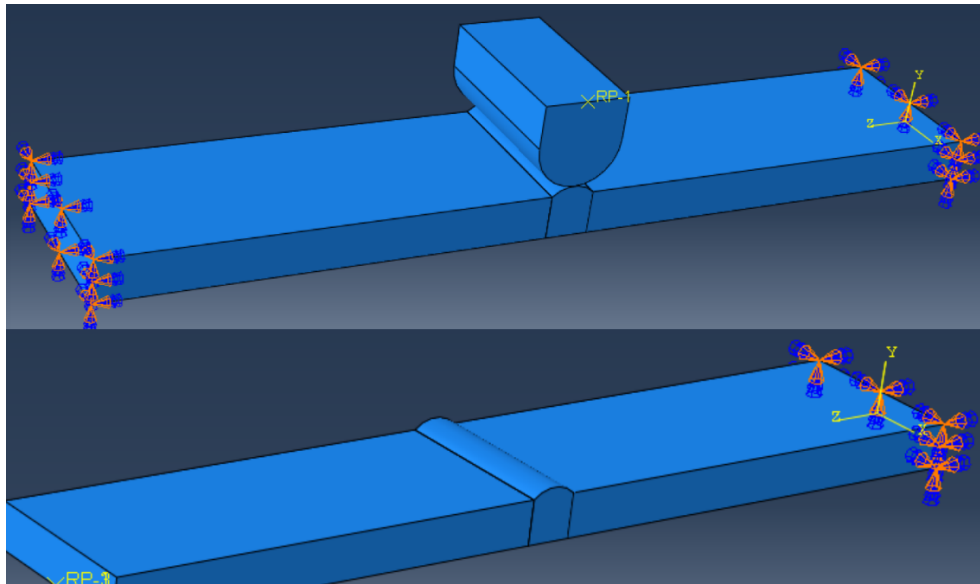
شکل ۵- تعریف ارتباط بین نیروی کششی و نمونه جوش با قید Coupling

در شکل ۶، نحوه اعمال ارتباط بین قطعه خمشی و جوش نشان داده شده است. برای این حالت نیز یک نقطه مرجع تعریف و این نقطه مرجع به سطح اثر قطعه خم کننده متصل می گردد.



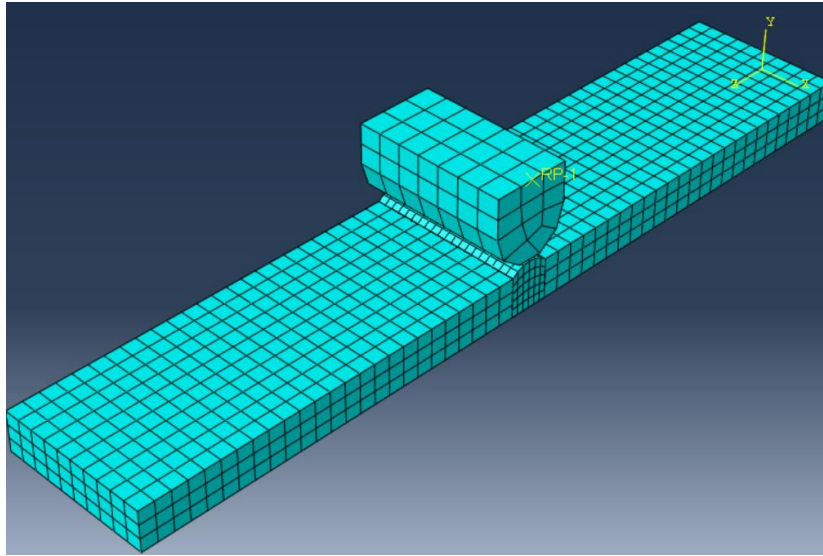
شکل ۶- تعریف ارتباط بین نیروی خمشی و نمونه جوش با قید Coupling

با استفاده از ماژول Load فقط تکیه گاه‌های مدل جوش تعریف می‌شود. لذا در حالت آزمون کشش، تکیه گاه با صفر درجه آزادی در یک سمت نمونه جوشکاری قرار می‌گیرد. برای تعریف تکیه گاه در آزمون خمش، تکیه گاه‌ها به صورت صفر درجه آزادی در هر دو سمت نمونه جوش تعریف می‌شود. در شکل ۷، نحوه تعریف تکیه گاه برای آزمون خمش و کشش نمایش داده شده است.



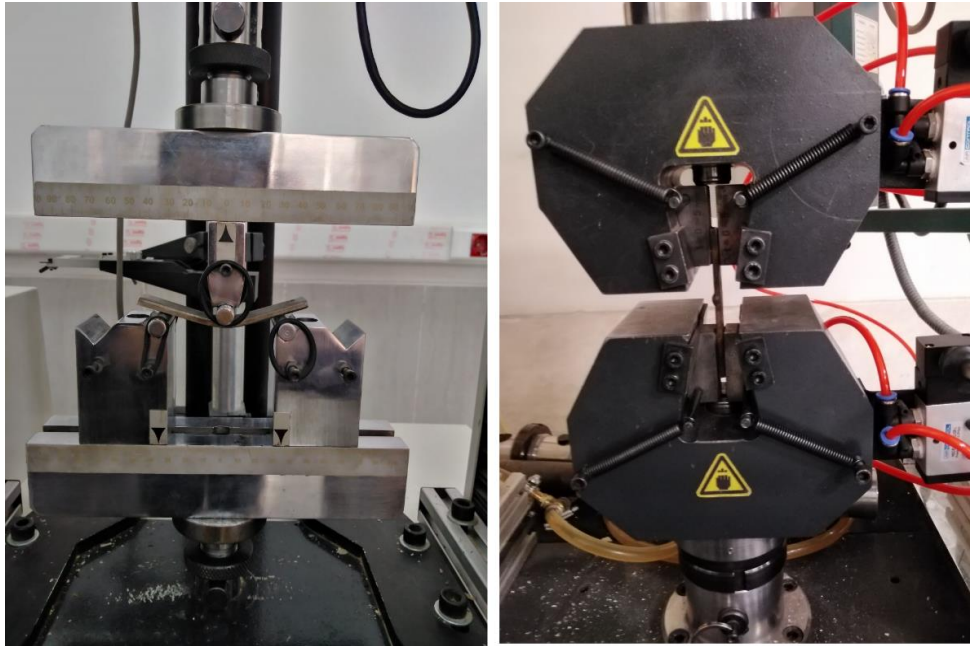
شکل ۷- تعریف تکیه گاه در ماژول Load (بالا: آزمون خمش. پایین: آزمون کشش)

در ماژول Mesh، مسأله تحقیق به اجزای ریز تقسیم بندی می‌شود که این فرآیند را مش بندی می‌گویند. در این حالت، ابتدا Part طراحی شده را انتخاب و سپس نوع مش انتخابی را Explicit Mesh بر می‌گزینیم. در بخش تنظیمات مش بندی سازه‌ها قابل تنظیم است که در این تحقیق سازه مش بندی برای ناحیه جوش از ناحیه فلز پایه ریزتر در نظر گرفته شد. در شکل ۸، مدل نهایی مش بندی شده برای آزمون خمش نمایش داده شده است. مدل مش بندی شده برای آزمون خمش و کشش مشابه هستند و تنها تفاوت آنها در المان خم کننده است که این المان در مدل کشش وجود ندارد.



شکل ۸- مدل مش بندی شده نهایی

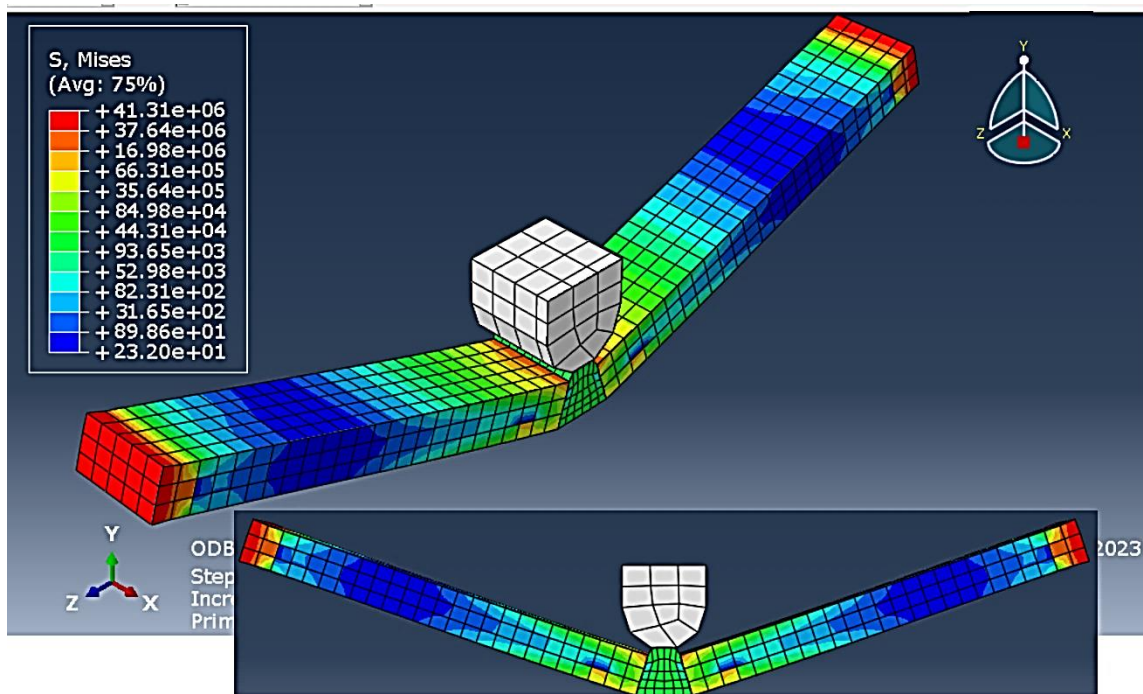
در ماژول Job، یک مسئله جدید تعریف می شود و با ارسال کردن آن، نرم افزار شروع به حل مسئله خواهد کرد. در ادامه پس از حل مسئله و کامل شدن فرآیند حل، نتایج مسئله و مدلسازی در ماژول Visualization قابل مشاهده است. همچنین در این تحقیق، آزمون کشش جهت بررسی رفتار نمونه های جوشکاری شده استفاده شد. با بررسی نتایج این آزمون، اطلاعاتی در خصوص استحکام نهایی برای نمونه های مختلف جوش به دست آمد. در این تحقیق از دستگاه تست کشش مطابق با استاندارد ASTM E8 استفاده شد [6,7].



شکل ۹- آزمون های مکانیکی (راست: تست کشش، چپ: تست خمش)

۳- نتایج و بحث

در شکل ۱۰، نتایج مدلسازی المان محدود آزمون خمش برای نمونه جوشکاری نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، با حرکت سنبه به سمت پایین، نمونه مدل خم شده است و در وسط فرآیند خمش، قطعه مدل شده دچار شکست نشده است. بررسی شکل ۱۰ نشان می دهد که در آزمون خمش سه نقطه ای، ماکزیمم تنش رخ داده در محل اتصال جوش و ورق فولادی یا همان ناحیه متأثر از جوش و همچنین در تکیه گاه ها مشاهده می گردد. بیشترین تنش خمش در نمونه مدلسازی شده برابر با $41/31$ مگاپاسکال بود این در حالی است که بیشینه تنش رخ داده در نمونه آزمایشگاهی $35/86$ مگاپاسکال است. بررسی نتایج عددی و تجربی نشان می دهد که $13/19$ درصد خطا بین مدل المان محدود و مدل تجربی مشاهده می شود.



شکل ۱۰- نتایج مدلسازی عددی آزمون خمش

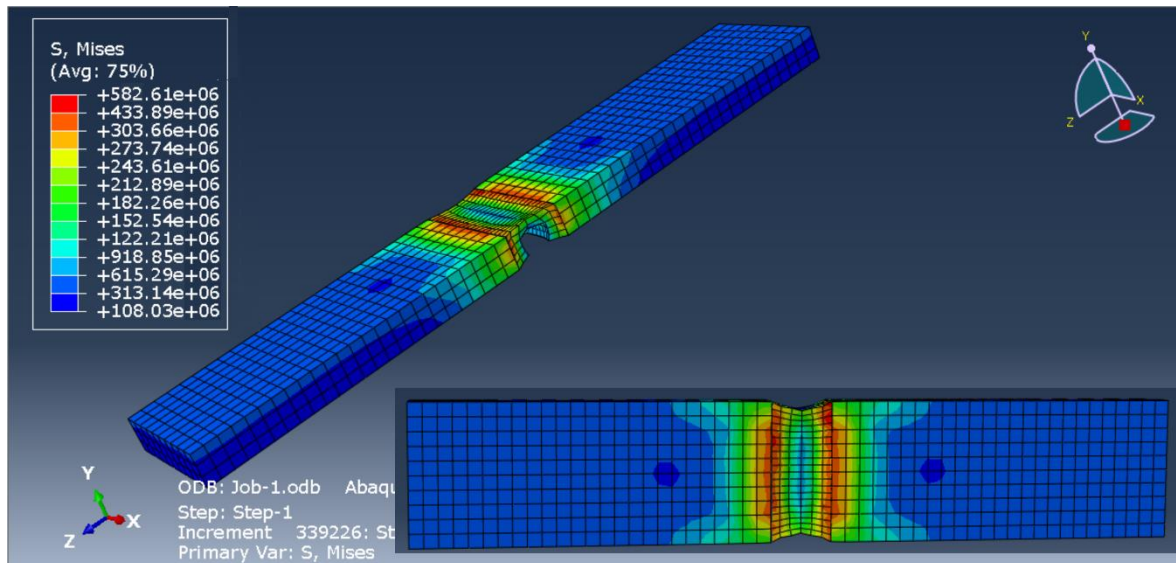
در شکل ۱۱ نیز نتیجه آزمون خمش برای نمونه به صورت تجربی نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است، مدل خم شده و مدل تجربی به هم شبیه بوده و در هر دو مدل، فرآیند شکست در قطعه رخ نداده است.



شکل ۱۱- نمونه آزمایشگاهی بعد از آزمون خمش

در شکل ۱۲، نمونه مدل شده به روش المان محدود تحت آزمون کشش تک محوری نشان داده شده است. بررسی این شکل نشان می‌دهد که بیشینه تنش کششی در ناحیه جوش اتفاق می‌افتد و مقدار آن $582/61$ مگاپاسکال است که مقدار واقعی بیشینه تنش کششی نمونه آزمایشگاهی $534/15$ مگاپاسکال خواهد بود. مقدار استحکام بیشینه کششی

برای نمونه مدلسازی شده ۹/۰۷ درصد بیشتر از نمونه آزمایشگاهی بود. همانند نتایج نشان داده شده در بخش‌های قبلی، در فرآیند جوشکاری، برخی رسوبات بین دانه‌ای در حین جوشکاری به وجود می‌آید که این رسوبات از عوامل مهم کاهش خواص مکانیکی جوش هستند لذا در طی فرآیند مدلسازی، اثرات این رسوبات نادیده گرفته شده است لذا مقدار تنش نهایی به دست آمده از مدل‌های عددی از مدل واقعی بیشتر می‌باشد.



شکل ۱۲- نتایج مدلسازی عددی آزمون کشش

در شکل ۱۳، نمونه آزمایشگاهی بعد از آزمون کشش نشان داده شده است. در این حالت نمونه در محلی نزدیک به خط جوش دچار شکست شد که در مدل عددی نیز نمونه دچار شکست شد اما در نمونه عددی، محل شکست دقیقاً از وسط خط جوش بود این در حالی است که در نمونه تجربی، محل شکست در ناحیه متأثر از جوش در سمت نیروی کششی دستگاه کشش ایجاد گردید.



شکل ۱۳- نمونه آزمایشگاهی بعد از آزمون کشش

۴- نتیجه گیری

بررسی نتایج آزمون کشش و خمش نشان داد که عملیات حرارتی سبب افزایش بیشینه استحکام خمشی و کششی نمونه‌های جوشکاری شده گردید به طوری که به ازای نمونه با چهار ساعت عملیات حرارتی، میزان بیشینه مقاومت خمشی و کششی به ترتیب ۱۰/۷۴ درصد و ۹/۹۳ درصد افزایش یافت اما میزان کرنش محوری و جانبی نمونه‌ها تحت تاثیر عملیات حرارتی کاهش یافت. مقایسه نتایج مدلسازی عددی و تجربی نشان داد که خطای مدلسازی عددی توسط روش المان محدود در اندازه گیری مقاومت کششی و خمشی به ترتیب برابر با ۱۳/۱۹ درصد و ۹/۰۷ درصد می باشد.

مراجع

[1] Samimi, A., *Investigation of corrosion metal in oil industry in Iran*. Bulletin of Pure & Applied Sciences-Physics, 2012. 31(2): p. 225-231.

[2] جوهری تیموری، رضا، کاشفی تربتی، مهرداد، میرجلیلی، مصطفی، پایش میزان خوردگی در لوله های نفت و گاز با روش جریان گردابی پالسی با استفاده از کویل برگیر. دومین همایش بین المللی نفت، گاز و پتروشیمی، ۲۷ آذر ماه ۱۳۹۳، تهران، ایران.

[3] فتح آبادی، هادی ابراهیم، مدیریت خوردگی ناشی از گاز سولفید هیدروژن در صنایع نفت و گاز. ماهنامه علمی اکتشاف و تولید نفت و گاز، ۱۳۹۲، ۱۳۹۲(۱۰۹). ۳۹-۳۴.

[4] Prabha, S.S., et al., *Corrosion problems in petroleum industry and their solution*. Eur. Chem. Bull, 2014. 3(3): p. 300-307.

[5] Chen, Y., Y. Liou, and H. Shih, *Stress corrosion cracking of type 321 stainless steels in simulated petrochemical process environments containing hydrogen sulfide and chloride*. *Materials Science and Engineering: A*, 2005. 407(1-2): p. 114-126.

[6] Thornthwaite, P. and J. Davies, *Monitoring and simulation resolves overhead corrosion*. *PTQ*, 2016. 1: p. 53-63.

[7] Thornthwaite, P. and J. Davies, *Monitoring and simulation resolves overhead corrosion*. *PTQ*, 2016. 1: p. 53-63.