



بررسی تجربی و عددی تاثیر تغییرات خواص مکانیکی در راستای ضخامت فولاد لوله API X65 بر توزیع تنش

سید رسول سجادی^۱، سید یوسف احمدی بروغنی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

^۲ استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۵

چکیده

در طی فرآیند ساخت لوله‌های فولادی دما و عناصر آلیاژی به طور غیریکنواخت در دیواره لوله توزیع می‌شود. در این مطالعه اثر این توزیع غیریکنواخت بر خواص مکانیکی در مقیاس ماکرو بررسی شد. برای این منظور نمونه‌های تخت کششی از دیواره لوله بریده شد؛ به طوری که هر نمونه مربوط به موقعیت خاصی از ضخامت دیواره بود. نتایج آزمایش کشش تغییرات معنادار خواص مکانیکی را در راستای ضخامت نشان می‌دهد. در ادامه اثر این تغییرات بر رفتار مکانیکی فولاد بررسی گردید. برای این منظور یک نمونه کششی ضخیم با استفاده از خواص اندازه‌گیری شده به صورت ساختار چندلایه (ناهمگن) مدل شد. در فرآیند مدل‌سازی، ابتدا به کمک شبیه‌سازی اجزاء محدود و با توجه به نمودار تنش-کرنش بدست آمده از آزمایش کشش، پارامترهای مدل آسیب گرسون-تیورگارد-نیدلمن برای هر یک از لایه‌ها به طور جداگانه کالیبره شدند. سپس این پارامترها در مدل‌سازی نمونه ناهمگن استفاده شد. بر طبق نتایج، نمودارهای نیرو-تغییر مکان نمونه ضخیم بدست آمده از مدل‌سازی و آزمایش دقیقاً بر یکدیگر منطبق نیستند؛ این اختلاف به دلیل شرایط تنشی مختلف در نمونه‌های نازک و ضخیم و همچنین اثر تنش‌های پسماند است.

کلمات کلیدی: آزمایش کشش تک‌محوره؛ مدل آسیب گرسون-تیورگارد-نیدلمن؛ فولاد لوله انتقال گاز؛ خواص مکانیکی راستای ضخامت.

Effect of Through-thickness Variation of Mechanical Properties on Stress Distribution in API X65 Linepipe Steel: An Experimental and Numerical Investigation

S. R. Sajadi¹, S. Y. Ahmadi Brooghani^{2,*}

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., University of Birjand, Birjand, Iran.

² Prof., Mech. Eng., University of Birjand, Birjand, Iran.

Abstract

Alloying elements and temperature are non-uniformly distributed in the wall of a steel pipe during the manufacturing process. In this study, the effects of these non-uniform distributions on mechanical properties were evaluated macroscopically. Plate-type tensile specimens were cut from the wall of a steel pipe in a way that each specimen was separated from a specified location along the wall thickness. The results of tensile tests showed significant variation of mechanical properties in the thickness direction. To investigate the effect of this variation on the steel deformation, a thick tensile specimen with a thickness equal to the pipe wall thickness was then modeled as a multilayer structure based on the measured mechanical properties. First of all, with the help of finite element simulation and according to the obtained stress-strain curve from the tension test, GTN damage parameters have been calibrated for every single layer, and then, these parameters were used in modeling the multilayer specimen. According to the results, the numerical load-displacement curve obtained from multilayer modeling did not exactly match the experimental curve of the thick specimen; this can be due to different governing stress states in thin and thick specimens and also the effect of residual stresses.

Keywords: Uniaxial tensile test, Gurson Tvergaard Needleman model, Linepipe steel, Through-thickness mechanical properties.

۱- مقدمه

استفاده از فولاد استحکام بالا در کاربردهای مختلف از قبیل زیردریایی، خطوط انتقال گاز، پلها و جرثقیلها در حال افزایش است [۲۱]. استحکام و قابلیت شکلپذیری این فولادها با استفاده از عناصر آلیاژی به مقدار زیادی بهبود یافته است [۳-۵].

در طی فرآیند کار گرم بر روی فولاد آلیاژی، ریز ساختار آن در امتداد سیلان ماده به صورت لایه‌ای می‌شود که به آن نواری شدن^۱ می‌گویند. نواری شدن فریت-پرلیت رایج‌ترین نوع نواری شدن در فولادهای آلیاژی است [۶]. پدیده نواری شدن بخاطر جدایش^۲ برخی عناصر آلیاژی در طی فرآیند انجماد فلز مذاب اتفاق می‌افتد [۷ و ۸]. هنگامی که فرآیند ساخت فولاد تکمیل می‌شود، ساختار شیمیایی فاز مایع یکنواخت است؛ اما هنگامی که فلز مذاب سرد می‌شود، جدایش میکروسکوپی و ماکروسکوپی عناصر آلیاژی در طی فرآیند انجماد اتفاق می‌افتد. جدایش ماکروسکوپی برای تختال‌های به طور پیوسته ریخته‌گری شده در امتداد خط مرکزی مقطع است، در حالیکه برای شمش‌ها در بالا، پایین و خط مرکزی مقطع است. در مقطع منجمد شده جدایش میکروسکوپی در بین دندریتها ظاهر می‌شود. در انتهای فرآیند ساخت فولاد، کار گرم (برای مثال نورد) با فشردن کردن جدایش‌ها، باعث ایجاد نوارهای طولی می‌شود که ترکیب شیمیایی متفاوتی دارند [۹]؛ بنابراین نواری شدن منجر به پیدایش خواص مکانیکی متفاوت در نواحی مختلف فلز می‌شود که به آن ناهمگنی خواص مکانیکی گفته می‌شود.

مطالعات زیادی در زمینه ناهمگنی خواص مکانیکی فلزات در راستای ضخامت انجام شده است [۱۰-۱۳]. ونگ و همکارانش [۱۴] تغییرات خواص مکانیکی و چقرمگی شکست را در ورق فولاد ساختمانی Q345B بررسی کردند. برای این امر آنها نمونه‌های آزمایش مربوطه را در اندازه کوچک از ضخامت ورق استخراج کردند. این نویسندگان نشان دادند که خواص مکانیکی و چقرمگی شکست در مرکز ورق کاهش می‌یابد. پاپویچ و ریچارسون [۱۵] برای ارزیابی چقرمگی شکست ناحیه متأثر از حرارت^۳، فولاد استحکام بالای S690 را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که در راستای ضخامت

فلز پایه خواص کششی، سختی، اندازه دانه، ریز ساختار و ترکیب شیمیایی به طور معناداری تغییر می‌کند. آنها همچنین اظهار داشتند که اندازه ریزساختار متفاوت مقاطع بیرونی (دانه‌بندی خیلی ریز) و میانی (دانه‌بندی درشت) ورق فولادی به دلیل توزیع غیریکنواخت دما در طی فرآیند سرمایش است و جدایش عناصر حل شده مخصوصاً کربن منجر به خواص مکانیکی غیریکنواخت در فولاد مورد مطالعه می‌شود. جوکیا و همکارانش [۱۶]، در ورق‌های فولادی ضخیم، اثر برشکاری با شعله را روی شکل‌گیری ترک مورد مطالعه قرار دادند. بر اساس گزارش این نویسندگان در طی فرآیند نورد، جدایش‌ها به شکل نوار یا ورقه در می‌آیند و باعث ایجاد ساختار لایه‌ای در راستای ضخامت ورق می‌شوند؛ در نتیجه این ساختار لایه‌ای، خواص مکانیکی در راستای ضخامت تغییرات قابل توجهی دارند؛ به این صورت که خواص با نزدیک شدن به مرکز ورق بیشتر کاهش پیدا می‌کنند. هان و همکارانش [۱۷] اثر نورد بر خواص و ریزساختار را در موقعیت‌های مختلف ورق مورد مطالعه قرار دادند. آنها در تحقیق‌شان از ورق فولادی خیلی ضخیم با ضخامت ۳۰ mm استفاده کردند. یافته‌های آنها کاهش تدریجی انرژی ضربه، سختی، مقاومت و نرخ سرمایش در جهت ضخامت ورق را نشان داد.

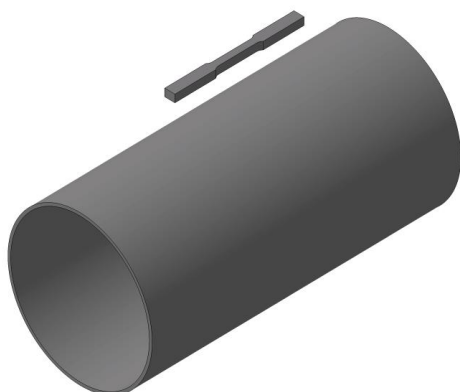
در تولید ورق‌های خیلی ضخیم جدایش شدید و ترک‌های ریز مرکزی یک چالش عمده است که در طی فرآیند ریخته‌گری بوجود می‌آیند. این پدیده‌ها به خاطر محدودیت نسبت شمش به ورق، به آسانی توسط نورد قابل حذف نیستند. ونگ و همکارانش [۱۸] این چالش را تا حدی حل کردند. آنها ورق فولادی خیلی ضخیمی را به کمک تکنولوژی‌های پیشرفته ریخته‌گری و غوطه‌وری تولید کردند که خواص مکانیکی و ریزساختاری آن در امتداد ضخامت یکنواختی بالایی داشت. گواشنگ و همکارانش [۱۹] برای حذف موثر نقص‌های ریخته‌گری و بهبود خواص ورق ضخیم در امتداد ضخامت، روش نورد همراه با گرادیان دمایی را پیشنهاد کردند. پایکرینگ و بادشی [۲۰] بررسی کردند که چطور جدایش ماکروسکوپی باعث ایجاد ریزساختارها و خواص مکانیکی متغیر در فولاد مخازن تحت فشار می‌شود. گزارش آنها نشان داد که باندهای

³ Heat affected zone

¹ Banding

² Segregation

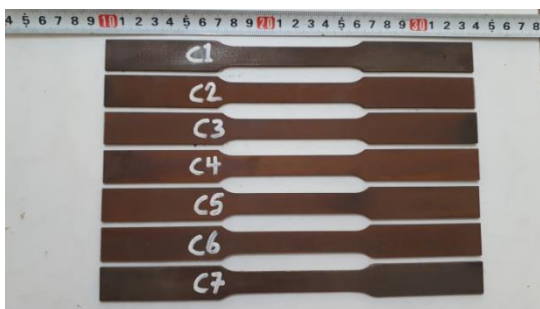
استوانه از داخل و خارج جوشکاری می‌شود. در طی فرایند شکل‌دهی، ضخامت ورق تغییر شکل‌های پلاستیک متفاوتی را متحمل می‌شود. قطر خارجی و ضخامت دیواره لوله به ترتیب ۹۱۴mm و ۱۴/۳mm است. به منظور اندازه‌گیری ناهمگنی خواص مکانیکی فولاد، نمونه‌های کششی تخت از موقعیت‌های مختلف ضخامت دیواره استخراج شد.



(الف) جهت استخراج نمونه آزمایش کشش از لوله



(ب) جهت برش وایبرکات



(ج) نمونه‌های نازک آماده شده از موقعیت‌های مختلف ضخامت لوله

شکل ۱- جهت و موقعیت نمونه‌های نازک و ضخیم کششی به دست آمده از لوله

فریت مشاهده شده در ریزساختار نتیجه جدایش الفا شده از فرآیند انجماد مذاب است.

بر طبق پیشینه تحقیق، خواص مکانیکی فلزات در موقعیت‌های مختلف ضخامت تغییرات معناداری دارند که به آن ناهمگنی خواص در جهت ضخامت گفته می‌شود. برای اینکه رفتار مکانیکی فلز با دقت بیشتری پیش بینی شود، باید اثر این ناهمگنی در نظر گرفته شود. در بخش اول این کار، با استفاده از آزمایش‌های کشش تک‌محوری، ناهمگنی خواص مکانیکی در جهت ضخامت فولاد خط لوله اندازه‌گیری می‌شود. در بخش دوم، فولاد از بعد ماکروسکوپیک مانند یک ساختار چندلایه (ناهمگن) در نظر گرفته می‌شود؛ از این رو یک نمونه کشش ضخیم با ضخامتی برابر با ضخامت دیواره لوله با استفاده از خواص اندازه‌گیری شده مدل‌سازی می‌شود. سپس برای بررسی اثر ناهمگنی خواص روی رفتار مکانیکی فولاد، نتایج مدل المان محدود و آزمایش با یکدیگر مقایسه می‌شوند. بر اساس دانش محدود نویسندگان، هیچ فولاد خط لوله‌ای تاکنون به صورت چندلایه مدل نشده است. با توجه به اینکه تغییرات خواص مکانیکی رابطه مستقیم با تغییرات ریزساختاری دارد، با استفاده از این مدل می‌توان اثر تغییرات ریزساختاری بر میدان تنش داخل فولاد را از بعد ماکروسکوپیک بررسی کرد. هدف مطالعه حاضر این است که با در نظر گرفتن ناهمگنی خواص، مدل‌سازی رفتار مکانیکی فولاد را تا حدی ممکن به واقعیت نزدیک‌تر کند و از آنجا که این نوع مدل‌سازی تاکنون انجام نشده است، می‌توان محدودیت‌های آنرا نیز شناسایی کرد.

۲- بخش آزمایشگاهی

در این مطالعه از فولاد خط لوله گرید API X65 استفاده شد که از لوله‌سازی اهواز به شکل لوله تهیه شده است. جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، ترکیب شیمیایی این فولاد در محدوده استاندارد API 5L است.

لوله مورد نظر از نوع درزدار با درز جوش مستقیم است که از ورق‌های نورد شده ترمومکانیکال طی فرایند U&O تولید شده است. در فرایند U&O، ابتدا لبه‌های طولی ورق پخ زده می‌شود، سپس به ترتیب تحت پرس‌هایی به شکل "U" و "O" قرار می‌گیرد تا به شکل استوانه شود، در انتها درز این

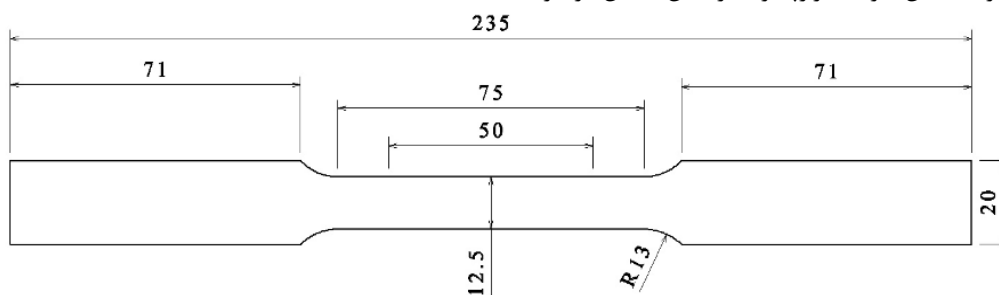
جدول ۱- ترکیب شیمیایی لوله فولاد مورد مطالعه (درصد وزنی)

	Fe	Si	S	Mn	P	C
پژوهش حاضر	۰/۲۲	۰/۰۰۶	۱/۴۹	۰/۰۱۵	۰/۰۸	۰/۰۸
مقادیر حداکثر مطابق استاندارد API 5L	-	-	۰/۰۳	۱/۴۵	۰/۰۳	۰/۲۶

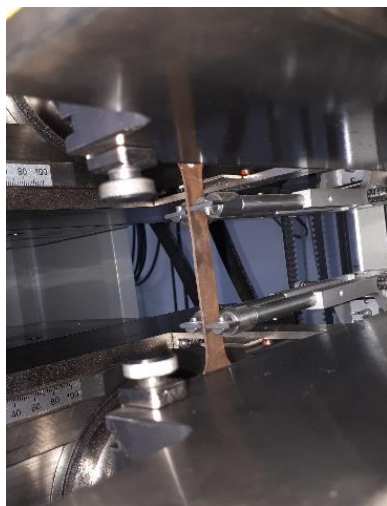
نمونه‌ها از سطح داخلی به سطح خارجی لوله به ترتیب از ۱ تا ۷ شماره‌گذاری شدند. عملیات استخراج نمونه‌ها توسط برش وایرکات انجام شد. شکل ۲ ابعاد نهایی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. برای تامین شرط تکرارپذیری آزمایش کشش، از هر

موقعیت دیواره سه عدد نمونه استخراج شد. به این ترتیب برای انجام آزمایش‌ها بیست و یک نمونه نازک و همچنین سه نمونه ضخیم آماده شد. ضخامت نمونه‌های نازک و ضخیم به ترتیب ۱/۶۵mm و ۱۴/۳mm (ضخامت دیواره لوله) بود.

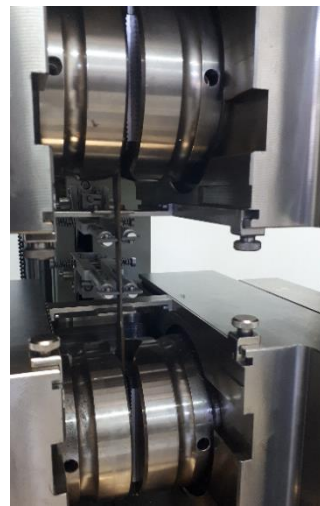
آزمایش کشش تک‌محوره توسط دستگاه کشش Zwick Roell دانشگاه بیرجند انجام شد. این دستگاه آزمایش دارای ظرفیت ۶۰۰kN است. مطابق با استاندارد ASTM، یک بار یکنواخت تحت شرایط جابجایی کنترل با سرعت ۱mm/s در دمای اتاق بر نمونه‌ها اعمال شد. شکل ۳ فک‌های دستگاه آزمایش کشش، اکستنسیومترها و نمونه کشش را نشان می‌دهد.



شکل ۲- هندسه نمونه آزمایش کشش (واحد: mm)

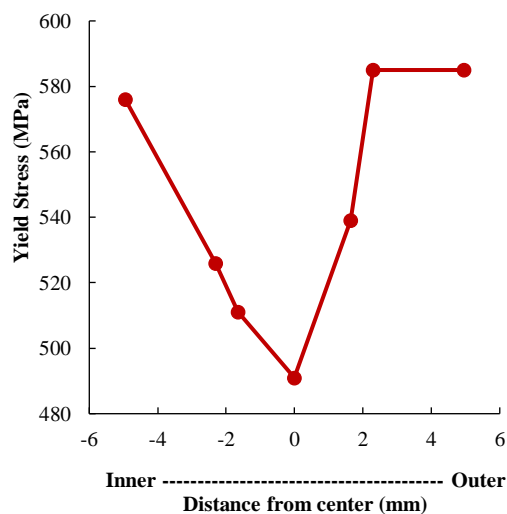


(ب) قرارگیری اکستنسیومترها روی نمونه آزمایش کشش

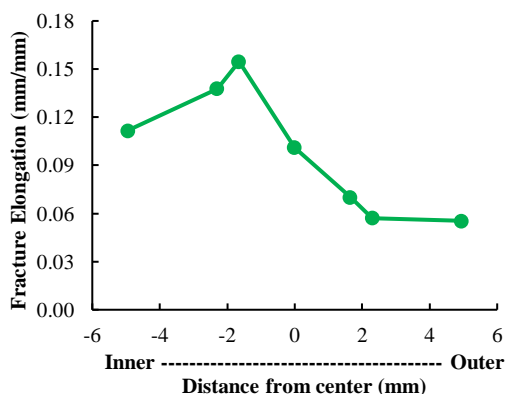


(الف) دستگاه آزمایش کشش Zwick Roell

شکل ۳- تجهیزات آزمایشگاهی



شکل ۵- تغییرات تنش تسلیم بر حسب موقعیت نمونه کششی نازک در دیواره لوله

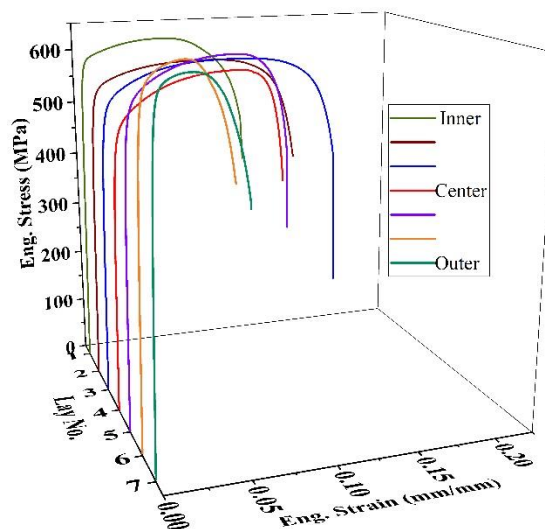


شکل ۶- تغییرات کرنش شکست بر حسب موقعیت نمونه کششی نازک در دیواره لوله

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، تغییرات استحکام نهایی برعکس تغییرات کرنش شکست است؛ یعنی مقادیر این خاصیت در سطوح داخلی و خارجی لوله بیشتر از ناحیه مرکزی است. این پدیده به دلیل تغییر شکل پلاستیک و تنش‌های پسماند ایجاد شده طی فرآیند شکل‌دهی لوله است. به طور کلی تمامی یافته‌های فوق ناشی از تغییرات ریزساختار و تفاوت مقادیر تغییر شکل در راستای ضخامت فولاد است که در طی فرآیند ساخت لوله اتفاق می‌افتد [۲۲].

در شکل ۴ منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های نازک ترسیم شده است. منحنی‌ها تغییرات معنادار خواص مکانیکی در راستای ضخامت لوله را نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود، منحنی‌های تنش جریان سطوح داخلی و خارجی لوله بالاتر از ناحیه مرکزی است. شکل ۵ تغییرات تنش تسلیم در راستای ضخامت را نشان می‌دهد. این تنش در ناحیه مرکزی دارای کمترین مقدار است. دلیل این امر سایز درشت دانه‌ها در این ناحیه است [۱۵]. در طی فرآیند تولید فولاد، پایین بودن نرخ سرد شدن در ناحیه مرکزی باعث درشت شدن دانه‌بندی می‌شود.

در شکل ۶ تغییرات کرنش شکست در راستای ضخامت نشان داده شده است. مقدار این خاصیت به طور قابل توجهی در ناحیه مرکزی بیشتر از سطوح داخلی و خارجی لوله است. این پدیده از یک سو به این دلیل است که حین فرآیند نورد ترمومکانیکال نرخ سرد شدن در سطوح بالا است؛ بنابراین ماده در این قسمت‌ها دارای قابلیت شکل‌پذیری کمتری است. از سوی دیگر سطوح ورق طی فرآیند ساخت لوله تغییر شکل پلاستیک بیشتری متحمل می‌شوند.



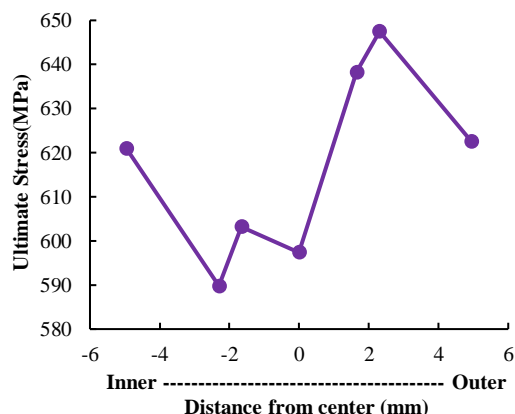
شکل ۴- منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های نازک استخراج شده از موقعیت‌های مشخص ضخامت دیواره لوله

یافته و در انتها به دلیل شرایط تنش صفحه‌ای در سطوح بیرونی با زاویه ۴۵ درجه نسبت به تنش کششی، به سوی لبه‌ها رشد می‌کند.

۳- بخش مدل‌سازی کامپیوتری

همانطور که در بخش قبل نشان داده شد، خواص مکانیکی فولاد در راستای ضخامت لوله به طور قابل توجهی تغییر می‌کند؛ از این رو می‌توان از بعد ماکروسکوپی فولاد را مانند یک ساختار چندلایه در نظر گرفت. بر این اساس به منظور بررسی ناهمگنی خواص بر رفتار مکانیکی فولاد، نمونه ضخیم کششی به صورت یک ساختار هفت لایه مدل شد؛ سپس خواص بدست آمده در بخش آزمایشگاهی به هر لایه اختصاص داده شد. برای شبیه‌سازی مکانیزم آسیب نرم و خواص پلاستیک، از مدل آسیب گرسون-تیورگارد-نیدلمن استفاده شد. این مدل به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۳]:

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_y} \right)^2 + 2q_1 f^* \cosh \left(\frac{3q_2 \sigma_m}{2 \sigma_y} \right) - \left[1 + q_3 f^{*2} \right] = 0 \quad (1)$$



شکل ۷- تغییرات استحکام نهایی بر حسب موقعیت نمونه کششی نازک در دیواره لوله

شکل (۸) سطح شکست نمونه‌های نازک و ضخیم را نشان می‌دهد. نمونه‌های نازک تحت زاویه تقریباً ۴۵ درجه نسبت به محورشان شکسته‌اند که به دلیل شرایط تنش صفحه‌ای حاکم بر آنها است؛ در حالی که نمونه‌های ضخیم شکست فنجان‌ی-مخروطی همراه با لبه‌های برشی داشته‌اند که نشان دهنده حاکم بودن شرایط سه بعدی تنش بر آنها است. در هر دو نوع نمونه، شکست به دلیل جوانه‌زنی و رشد حفره‌ها است که از بهم پیوستن آنها، ترک داخلی بزرگی ایجاد می‌شود. این ترک به سمت بیرون و در راستای عمود بر تنش کششی گسترش



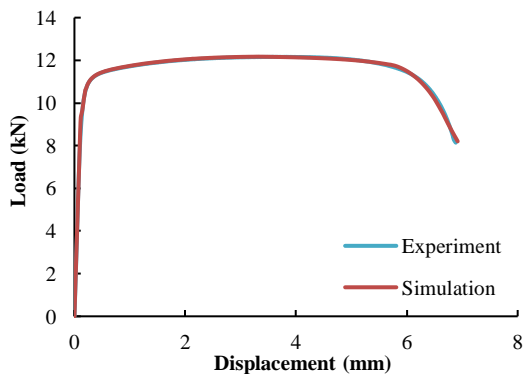
(ب) شکست فنجان‌ی-مخروطی (شرایط سه بعدی تنش)



(الف) شکست برشی (شرایط تنش صفحه‌ای)

شکل ۸- نوع شکست در نمونه‌های (الف) نازک و (ب) ضخیم

برای تعریف خواص مکانیکی نمونه مدل شده، از خواص اندازه‌گیری شده استفاده شد. مدل ایجاد شده توسط المان مکعبی C3D8R شبکه‌بندی شد. از آنجایی که اندازه المان در تحلیل المان محدود مکانیزم آسیب یک پارامتر مهم است، برای مدل انجام شده تحلیل حساسیت به شبکه انجام شد. در ناحیه مرکزی نمونه که پدیده گلوبی شدن اتفاق می‌افتد، اندازه مناسب المان ۰/۳mm به دست آمد. برای کالیبره کردن پارامترهای گرسون از روش عددی معکوس استفاده شد. در این روش با تغییر پارامترهای گرسون سعی می‌شود تا منحنی‌های نیرو-تغییر مکان حاصل از مدل‌سازی و آزمایشگاه بر هم منطبق شوند. برای مثال در شکل ۱۰ مقایسه نمودارهای نیرو-تغییر مکان به دست آمده از مدل‌سازی و آزمایشگاه برای نمونه نازک شماره ۲ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نمودارها تطابق خوبی را نشان می‌دهند. پارامترهای گرسون به دست آمده برای این نمونه در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱۰- نمودارهای نیرو-تغییر مکان به دست آمده از مدل المان محدود و آزمایش برای نمونه نازک شماره ۲ بعد از کالیبره کردن پارامترهای گرسون

جدول ۲- پارامترهای مدل آسیب گرسون برای نمونه نازک شماره ۲

q_1	q_2	q_3	ϵ_N	S_N	f_N	f_c	f_f
۱/۵	۱	۲/۲۵	۰/۳	۰/۱	۰/۰۲۴	۰/۱۸	۰/۳

در مرحله دوم، مطابق شکل ۱۱ یک نمونه ضخیم شامل هفت لایه (نمونه ضخیم ناهمگن) مدل شد. در اینجا نیز برای کاهش زمان حل و حجم محاسبات فقط یک چهارم طول طول سنجه مدل شد. خواص مکانیکی و پارامترهای گرسون

که پارامترهای $\sigma_m, \sigma_y, \sigma_{eq}$ و f^* به ترتیب تنش ون میز، تنش تسلیم، تنش هیدرواستاتیک و کسر حجمی اصلاح شده حفره‌ها هستند. تیورگارد مقادیر $q_1 = 1.5, q_2 = 1, q_3 = 2.25$ را برای این ضرایب پیشنهاد کرد. کسر حجمی اصلاح شده حفره‌ها به صورت زیر است:

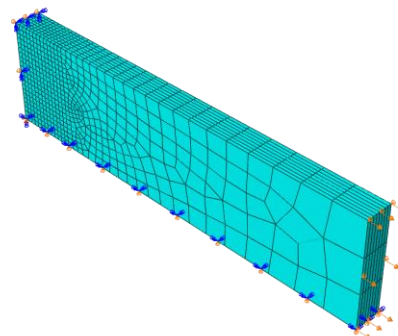
$$f^* = \begin{cases} f & \text{for } f \leq f_c \\ f_c + \frac{f_F - f_c}{f_F - f_c} (f - f_c) & \text{for } f_c < f < f_F \\ \frac{f_F}{f_F} & \text{for } f \geq f_F \end{cases} \quad (2)$$

با:

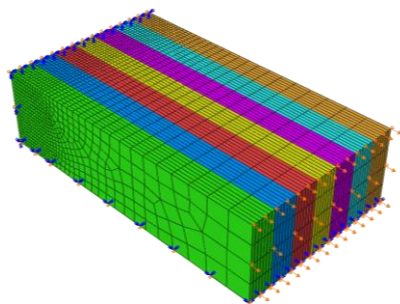
$$f_F = \frac{(q_1 + \sqrt{q_1^2 - q_3})}{q_3} \quad (3)$$

که پارامترهای f, f_c و f_F به ترتیب کسر حجمی حفره‌ها، کسر حجمی بحرانی حفره‌ها در لحظه شروع به پیوستگی حفره‌ها و کسر حجمی حفره‌ها در لحظه شکست می‌باشند. فرایند مدل‌سازی با استفاده از نرم افزار آباکوس [۲۴] در دو مرحله انجام شد:

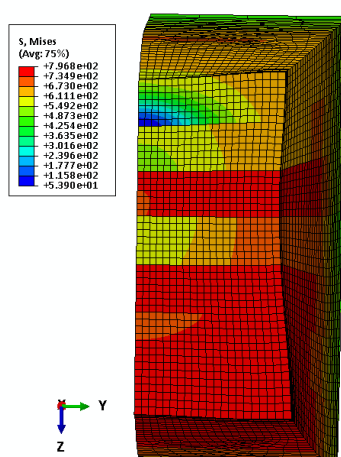
در مرحله اول، هر نمونه نازک برای کالیبره کردن پارامترهای گرسون مدل شد. برای این منظور مدل‌سازی بر اساس ابعاد نمونه‌های آزمایشگاهی (شکل ۲) انجام شد. مطابق شکل ۹ از یک سو به دلیل مقارن بودن شرایط هندسی و بارگذاری، یک چهارم نمونه مدل شد و از سوی دیگر برای کاهش زمان حل و حجم محاسبات فقط محدوده طول سنجه مدل گردید.



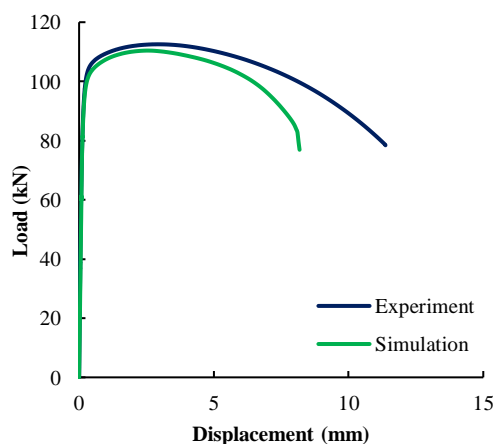
شکل ۹- مدل المان محدود نمونه نازک (یک چهارم طول سنجه) برای کالیبره کردن پارامترهای گرسون



شکل ۱۱- مدل المان محدود نمونه ضخیم ناهمگن (یک چهارم طول سنجه) متشکل از هفت لایه



شکل ۱۲- کانتور تنش ون میزز در نمونه ضخیم ناهمگن در لحظه شروع حفره‌زایی



شکل ۱۳- نمودارهای نیرو-تغییر مکان به دست آمده از مدل المان محدود و آزمایش برای نمونه ضخیم، در

به دست آمده در مراحل قبل به لایه‌ها اختصاص داده شد؛ هرچند شرایط پیوستگی خواص در امتداد ضخامت برقرار نبود. ضخامت این نمونه ناهمگن برابر ضخامت دیواره لوله در نظر گرفته شد؛ در حالیکه بقیه ابعاد آن مطابق شکل ۲ بود. شکل ۱۲ کانتور تنش ون میزز را در لحظه شروع حفره‌زایی نشان می‌دهد. ناپیوستگی تنش بخاطر ناپیوستگی خواص مکانیکی است. در شکل ۱۳ منحنی‌های نیرو-تغییر مکان نمونه ضخیم حاصل از مدل‌سازی و آزمایش مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، منحنی مدل‌سازی دقیقاً بر منحنی تجربی منطبق نشده است. این اختلاف در نتیجه دو عامل است. اولین عامل وجود شرایط تنش مختلف در نمونه‌های نازک و لایه‌های تشکیل‌دهنده نمونه ضخیم ناهمگن است. در نمونه نازک مجزا شرایط تنش صفحه‌ای حاکم است؛ در حالیکه هر لایه در نمونه ضخیم دارای شرایط تنش سه بعدی است. از این رو مقادیر خواص پلاستیک و پارامترهای گرسون حاصل از نمونه‌های نازک ابتدا باید اصلاح و سپس در مدل‌سازی نمونه ضخیم ناهمگن استفاده شوند. دومین عامل تنش‌های پسماند است. در طی فرایند ساخت لوله، تغییر شکل پلاستیک غیریکنواخت فولاد باعث ایجاد تنش پسماند می‌شود. هنگامی که یک نمونه نازک از دیواره لوله استخراج می‌شود، این تنش‌ها آزاد می‌شوند؛ بنابراین اثر این تنش‌ها باید حین مدل‌سازی نمونه ضخیم ناهمگن در نظر گرفته شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تغییر خواص مکانیکی در راستای ضخامت لوله فولادی API X65 به طور عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ضخامت دیواره لوله به هفت قسمت مساوی تقسیم شد و از هر قسمت نمونه آزمایش کشش استخراج شد. سپس با استفاده از داده‌های تجربی به دست آمده یک نمونه ضخیم ناهمگن مدل شد. این مدل‌سازی در نرم افزار آباکوس و با استفاده از مدل آسیب گرسون انجام شد. نتایج اصلی مطالعه حاضر به صورت زیر می‌باشد:

- ۱- تنش تسلیم در ناحیه مرکزی ضخامت لوله دارای کمترین مقدار است که به دلیل اندازه درشت دانه بندی در این ناحیه است.

کسر حجمی نهایی حفره‌ها در لحظه شکست	f_F
کسر حجمی حفره‌ها در لحظه جوانه‌زنی حفره‌ها	f_N
ضرایب تیورگارد	q_i
تنش تسلیم، MPa	σ_y
کرنش متوسط در لحظه جوانه‌زنی حفره‌ها	ϵ_N
تنش ون میزز، MPa	σ_{eq}
تنش هیدرواستاتیک، MPa	σ_m
تابع تسلیم	ϕ

۷- مراجع

- [1] Chakraborty G, Rejeesh R, & Albert S K (2016) Study on hydrogen assisted cracking susceptibility of HSLA steel by implant test. Defe Technology 12(6): 490-495.
- [2] Movahedi M R & Hashemi S H (2019) Experimental Study of Mechanical Behavior of Welded API X70 Pipe Steel using Tensile and Three Point Bend Specimens. Jour of Solid and Fluid Mechanics 9(4): 93-106 (In Persian).
- [3] Soliman N F, Ramadan D O, & Yagoob J A (2021) Influence of mould thickness on microstructure, hardness and wear of al-cu cast alloys. Inte Jour of Engineering 34(8): 2021-2027.
- [4] Kong J P, Kang C Y (2016) Effect of alloying elements on expulsion in electric resistance spot welding of advanced high strength steels. Scie and Tech of Weld and Joining 21(1): 32-42.
- [5] Samek L, De Moor E, Penning J, & De Cooman B (2006) Influence of alloying elements on the kinetics of strain-induced martensitic nucleation in low-alloy, multiphase high-strength steels. Meta and Mate Transactions A 37(1): 109-124.
- [6] Verhoeven J D (2000) A review of microsegregation induced banding phenomena in steels. Jour of Mate Engi and Performance 9(3): 286-296.
- [7] Samuels L E (1999) Light microscopy of carbon steels: Asm International.
- [8] Jafari A, Seyedeina S H, Aboutalebina M R, Eskin D G & Katgerman L (2010) Numerical modeling of macrosegregation during the direct-chill casting of an al alloy billet. Iran Jour of Mate Scie & Engineering 7(3): 39-50.
- [9] Krauss G (2003) Solidification, segregation, and banding in carbon and alloy steels. Meta and Mate Transactions B 34(6): 781-792.
- [10] De Jong H F (1980) Thickness direction inhomogeneity of mechanical properties and fracture toughness as observed in aluminium 7075-T651 plate material. Engi Frac Mechanics 13(1): 175-192.

شرایطی که نمونه ضخیم به صورت چندلایه (ناهمگن) مدل شده است.

- ۲- مقدار کرنش شکست در نواحی سطحی لوله به طور قابل توجهی کمتر از ناحیه مرکزی است. به باور نویسندگان این اختلاف از یک سو به دلیل قابلیت شکل‌پذیری پایین ماده و از سوی دیگر بالا بودن مقدار تغییرشکل پلاستیک طی ساخت لوله، در نواحی سطحی است.
- ۳- مقادیر استحکام نهایی در نواحی سطحی بیشتر از ناحیه مرکزی است. تغییرشکل پلاستیک و تنش‌های پسماند از دلایل این پدیده می‌باشند. به طور کلی تمامی یافته‌های فوق ناشی از تغییرات ریزساختار و تفاوت مقادیر تغییرشکل در راستای ضخامت فولاد است که طی فرایند ساخت لوله اتفاق می‌افتد.
- ۴- در مطالعه حاضر فولاد به صورت ناهمگن مدل شد و از بعد ماکروسکوپی، اثر ناهمگنی بر رفتار مکانیکی آن بررسی شد. منحنی‌های حاصل از آزمایش و مدل‌سازی دقیقاً بر هم منطبق نشد. این اختلاف به دلیل حاکم بودن شرایط تنشی مختلف در نمونه‌های نازک و ضخیم و همچنین اثر تنش‌های پسماند است که برای رفع آنها نیاز به بررسی‌های بیشتر و استفاده از سابروتین نویسی است.

۵- تشکر و قدردانی

از جناب آقای غریب زاده مدیر بخش تحقیق و توسعه شرکت لوله سازی اهواز به دلیل تامین فولاد مورد مطالعه تشکر می‌شود؛ همچنین سپاس فراوان از جناب آقای دکتر اشرفی مسئول آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشگاه بیرجند که در انجام آزمایش‌ها همکاری نمودند.

۶- فهرست علائم

کسر حجمی حفره‌ها	f
کسر حجمی اصلاح شده حفره‌ها	f^*
کسر حجمی اولیه حفره‌ها	f_0
کسر حجمی بحرانی حفره‌ها در لحظه شروع به هم پیوستگی حفره‌ها	f_c

- [18] Wang Q, Ye Q, Tian Y, Fu T & Wang Z (2021) Superior through-thickness homogeneity of microstructure and mechanical properties of ultraheavy steel plate by advanced casting and quenching technologies. *steel research international* 92(5): 200-208.
- [19] Gaosheng L, Wei Y & Qingwu C (2015) Investigation of the evolution of central defects in ultra-heavy plate rolled using gradient temperature process. *Meta and Mate Transactions B* 46(2): 831-840.
- [20] Pickering E, & Bhadeshia H (2014) Macrosegregation and microstructural evolution in a pressure-vessel steel. *Meta and Mate Transactions A* 45(7): 2983-2997.
- [21] Standard test methods for tension testing of metallic materials (2009) ASTM international.
- [22] Sohn S S, Han S Y, Bae J h, Kim H S & Lee S (2013) Effects of microstructure and pipe forming strain on yield strength before and after spiral pipe forming of API X70 and X80 linepipe steel sheets. *Mate Scie and Engineering: A* 573(2): 18-26.
- [23] Wcislik W (2016) Experimental determination of critical void volume fraction f_F for the Gurson Tvergaard Needleman (GTN) model. *Proc Stru Integrity* 2: 1676-1683.
- [24] ABAQUS Version 6.12. (2012) Dass Syst Simu Corp, Rhode Island, USA.
- [11] Tsuboi K, Tsuchiyama T, Takaki S, & Tsutsumi S (2012) Mechanical properties of strength-gradient steel sheets produced by solution nitriding. *ISIJ International* 52(10): 1872-1878.
- [12] Yang N, Su C, Wang X f, & Bai F (2016) Research on damage evolution in thick steel plates. *Jour of Cons Steel Research* 122: 213-225.
- [13] Kingklang S, Uthaisangsuk V (2017) Micromechanical modeling of anisotropic behavior of pipeline steel grade X65. *Mate & Design* 127: 243-260.
- [14] Wang Y, Liu X, Hu Z & Shi Y. (2013) Experimental study on mechanical properties and fracture toughness of structural thick plate and its butt weld along thickness and at low temperatures. *Fati & Frac of Engi Mate & Structures* 36(12): 1258-1273.
- [15] Popovich V & Richardson I (2015) Fracture toughness of welded thick section high strength steels and influencing factors. Paper presented at the TMS 2015 144th Annual Meeting & Exhibition :1031-1038.
- [16] Jokiahho T, Santa-Aho S, Peura P & Vippola M (2020) Cracking and failure characteristics of flame cut thick steel plates. *Meta and Mate Transactions A* 51(4): 1744-1754.
- [17] Han J, Fu T, Wang Z & Wang G (2020) Effect of Roller Quenching on Microstructure and Properties of 300 mm Thickness Ultra-Heavy Steel Plate. *Metals* 10(9): 1238-1245.