



بررسی اثرات نانوذرات در بهبود استحکام کششی و خمشی جوش در خطوط لوله گاز خانگی توسط روش

جوشکاری قوس فلزی محافظ (SMAW)

^۱احمد حسین علی الجنابی؛ ^{۲*}سید علیرضا موسوی شیرازی

^۱دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده فنی، گروه مهندسی مکانیک- ساخت و تولید (تحصیلات تکمیلی)

^۲دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، دانشکده فنی، گروه فیزیک

چکیده

جوشکاری یکی از موارد بسیار مهم در تمام صنایع از جمله لوله های گاز می باشد. لذا مواردی نظیر استحکام، مقاومت نسبت به خوردگی و نفوذ جوش در اتصالات جوشکاری در لوله های گاز از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق، هدف بر اینست که با اضافه نمودن نانوذرات به مناطق مجاور جوش، خواص مکانیکی جوش به منظور جوانه زنی در فلز و بهبود چقرمگی جوش شده و در نهایت منجر به کیفیت هرچه بهتر در جوشکاری گردد. لذا در این مقاله، به منظور بررسی میزان کشش و خمش در لوله گاز جوشکاری شده، یک مدل سازی با استفاده از نرم افزار المان محدود Abaqus صورت گرفته است. بدین منظور، ابتدا مدل لوله جوشکاری شده در ماژول Part طراحی می شود. فرآیند طراحی در این محیط بر اساس اندازه گیری دقیق ابعاد لوله های آماده شده برای آزمون کشش و خمش و ابعاد دقیق خط جوش است. همچنین، خواص فیزیکی و مکانیکی که شامل خواص الاستیک و پلاستیک هستند نیز برای لوله تعریف شده است.

کلمات کلیدی: استحکام کششی و خمشی، جوشکاری قوس فلزی محافظ، لوله گاز، نانوذرات.

۱- مقدمه

جوشکاری جزء ضروری بسیاری از صنایع مانند صنعت خودروسازی، صنعت ساختمان، صنعت هوانوردی و غیره است.

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد

^{۲*}استادیار و عضو هیات علمی

*Email: a_moosavi@azad.ac.ir

فولاد یکی از مهم‌ترین مواد به کار رفته در صنعت و ساختمان است. خواصی نظیر استحکام، مقاومت به خوردگی و قابلیت جوشکاری فولاد در طراحی و ساخت قطعات صنعتی بسیار مهم هستند. این قابلیت‌ها باعث شده که نقش فولاد در صنعت و ساختمان بسیار پررنگ باشد [۱].

لوله‌ گاز که برای انتقال گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌تواند شامل مصارف خانگی یا صنعتی باشد. لوله‌ گاز بر اساس جنس، نوع استاندارد و روش تولید، انواع مختلفی دارد که در مصارف ساختمانی و در بخش لوله کشی خانگی گاز، از لوله های فولادی به دلیل قابلیت بالا در جوشکاری به طور ویژه استفاده می‌شود. از این رو خواص مکانیکی و ریز ساختار ناحیه جوش در لوله‌های گاز از اهمیت زیادی برخوردار هستند [۲].

نفوذ جوش یکی از مشخصه‌های کیفیت جوش می‌باشد که نقش مهمی در ظرفیت تحمل تنش در اتصالات جوشی دارد. همچنین خستگی مسئله بسیار حساسی است که می‌تواند منجر به شکست محل جوش تحت نیروی سیکلی گردد [۳]. تحقیقات نشان داده‌اند که اضافه نمودن نانوذرات، دانه‌های مناطق مجاور جوش را در فولاد ریزتر کرده و این امر موجب افزایش چقرمگی جوش می‌شود. نانوذرات می‌توانند سبب بهبود خواص مکانیکی مخصوصاً چقرمگی جوش شوند [۴]. در حین جوشکاری، نانوذرات وارد حوضچه جوش شده و توزیع یکنواختی از مراکز مستعد برای جوانه‌زنی در فلز جوش ایجاد می‌نمایند. بنابراین با افزایش درصد جوانه‌زنی خواص مکانیکی جوش، افزایش چشمگیری در مقایسه با جوش بدون نانوذرات خواهد داشت [۵]. همچنین افزودن نانوذرات باعث کاهش ناهمواری های سطح جوشکاری گشته و در نتیجه آن تعداد تنش‌ها محدود شده و بنابراین ترک ناشی از خستگی کاهش می‌یابد [۶]. پیشرفت در این فناوری منجر به افزایش ایمنی، نیاز کمتر به نظارت و استفاده بهتر از مواد در ساخت و سازهای مستعد به مسئله خستگی شده است. لذا در این تحقیق اثرات افزودن نانوذرات در حین جوشکاری بر خواص مکانیکی لوله‌های گاز خانگی جوشکاری شده توسط روش جوشکاری قوس فلزی محافظ بررسی می‌شود [7,8].

۲- مواد و روش‌ها

در حالت کلی لوله های فولادی را می‌توان در سه گروه زیر قرار داد:

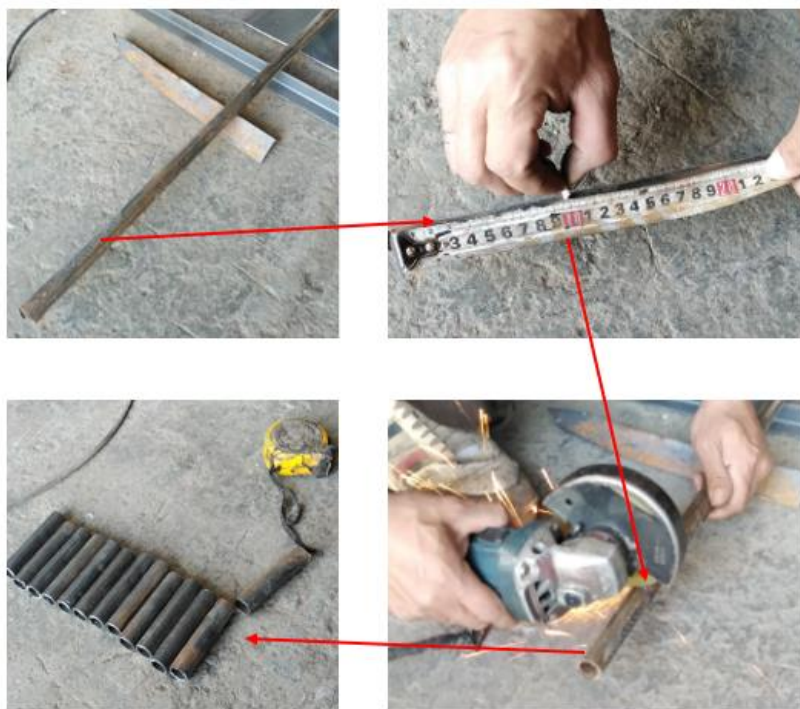
۱- لوله کشی آب و فاضلاب

۲- لوله کشی ساختمان

۳- خطوط انتقال سیالات در صنعت نفت و گاز

۱-۲- آماده سازی و عملیات پاکسازی نمونه ها قبل از جوشکاری

کیفیت لوله گاز معیاری است که تضمین کننده ایمنی انتقال گاز می باشد. در تحقیق حاضر از لوله گاز $\frac{1}{2}$ API استفاده شده است. قطر خروجی این لوله ۲۱.۳ میلیمتر، ضخامت دیواره آن ۲.۶۵ میلیمتر و جرم به ازای درازای آن ۱.۵۸ کیلوگرم بر متر است. در این تحقیق، لوله API سپاهان در طول ۶ متری تهیه شده است. این لوله در زمینه تکمیل خطوط گاز رسانی در پروژه های مسکونی و همچنین تکمیل خطوط آبرسانی در بخش آتش نشانی ساختمان ها مورد استفاده قرار می گیرد. تمامی لوله های درزدار API سپاهان براساس استانداردهای ملی و بین المللی (DIN2440) تولید می شوند که این لوله ها از ورق آهن Gr_BPSL2 تولید می شوند. در شکل ۳-۵، فرآیند آماده سازی نمونه های مختلف برای انجام عملیات جوشکاری نشان داده شده است. برای انجام عملیات جوشکاری، ابتدا نمونه های لوله گاز توسط متر به قسمت هایی به طول ۱۰ سانتیمتری تقسیم بندی شد و سپس توسط سنگ فرز برش داده شدند.



شکل ۱- فرآیند آماده سازی نمونه ها برای انجام جوشکاری

با توجه به اینکه سطح لوله گاز مورد استفاده در این تحقیق شامل ناخالصی، زنگ زدگی، گرد و خاک و مواد اضافی است که این مواد در کیفیت نهایی جوشکاری تاثیر گذار است لذا در این مرحله، نمونه ها توسط کاغذ سنباده و آب صابون تمیز کاری شدند. برای این منظور ابتدا سطح نمونه های برش داده شده توسط کاغذ سنباده نمره ۸۰۰ و نمره ۲۰۰۰ به

طور کامل، سنباده زنی شدند. بعد از اتمام این عملیات، نمونه ها توسط آب صابون شستشو داده شده و در نهایت توسط سشوار خشک شدند. در شکل ۲ نمونه ها قبل و بعد از تمیز کاری نشان داده شده است.



شکل ۲- نمونه های آماده شده برای جوشکاری قبل و بعد از تمیز کاری

۲-۲- روش جوشکاری SMAW

به منظور اتصال لوله های گاز از روش جوشکاری قوس فلزی محافظ (SMAW) استفاده شد. فرآیند SMAW معمول ترین فرآیند جوشکاری قوسی است که حدود ۵۰٪ جوشکاری ها با این فرآیند انجام می شوند. این فرآیند به علت انعطاف زیاد و قابلیت استفاده در همه موقعیت ها و ضخامت های مختلف، قابل توجه است. ۹۹٪ مصارف این فرآیند به صورت دستی است و در سطح محدودی از یک روش اتوماتیک به نام جوشکاری ثقلی استفاده می شود. با تغییر نوع الکتروود و جریان و بسته به مهارت جوشکار این فرآیند در تمام موقعیت ها قابل استفاده است. این فرآیند عمدتاً برای جوشکاری انواع فولادها به کار رفته و در برخی موارد نیز برای جوشکاری نیکل و آلیاژهای آن استفاده می شود. فرآیند SMAW روش موثری برای جوشکاری غیرآهنی نیست. با توجه به اینکه در تحقیق حاضر برای انجام جوشکاری به الکتروود نیاز است لذا در این تحقیق از الکتروود سلولزی ایساب برای جوشکاری لوله با استاندارد E6010 استفاده شد. به منظور توزیع یکنواخت نانوذرات در سطح جوش، قبل از انجام عملیات جوشکاری، روغن لحیم کاری در محل اتصال جوش مالیده شد به طوری که برای هر نمونه از جوش، میزان ۱۰ گرم نانوروغن لحیم کاری استفاده شد. در شکل ۳ نحوه قرار دادن نانوفیلر در محل اتصال و در شکل ۴ نمونه های جوش کاری شده نشان داده شده است.



شکل ۳- روش مالیدن نانوفیلر بر سطح اتصال



شکل ۴- نمونه های جوشکاری شده

۳-۲- آزمون کشش و خمش

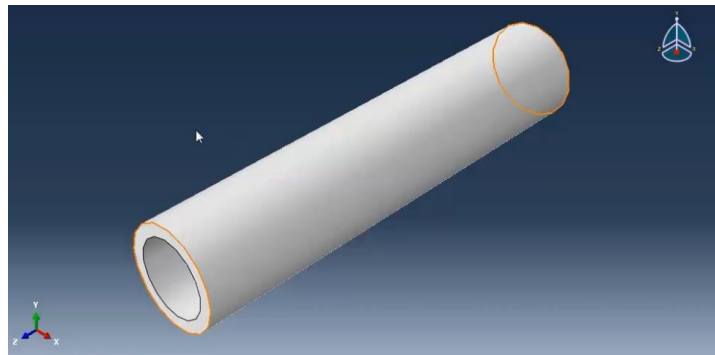
تست کشش که با عنوان تست تنش نیز شناخته می‌شود، اساسی ترین نوع آزمون مکانیکی است که می‌توان روی یک ماده انجام داد. به عبارتی دیگر در این تست با کشیدن ماده توسط فک های دستگاه کشش، می‌توان واکنش آن را در برابر نیروهای اعمالی تعیین نمود. استاندارد ASTM D 3039 با عنوان روش آزمون استاندارد برای مشخصات کششی مواد مختلف، برای تعیین مشخصات مکانیکی استفاده می‌شود. این روش آزمون برای بدست آوردن مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و ازدیاد طول نهایی نمونه و برای استفاده در تست‌های آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. تست خمش نیز آزمایشی برای ارزیابی خواص مکانیکی مواد است که در آن، مقاومت قطعه در برابر خم شدگی و شکستن مورد آزمایش قرار می‌گیرد. این آزمون راهی ساده و ارزان برای ارزیابی کیفیت مواد به شمار می‌رود. استانداردهای معمول مورد استفاده در آزمون خمش ASTM E290 و ASTM E858 هستند.

۴-۲- مدلسازی المان محدود فرآیند کشش و خمش

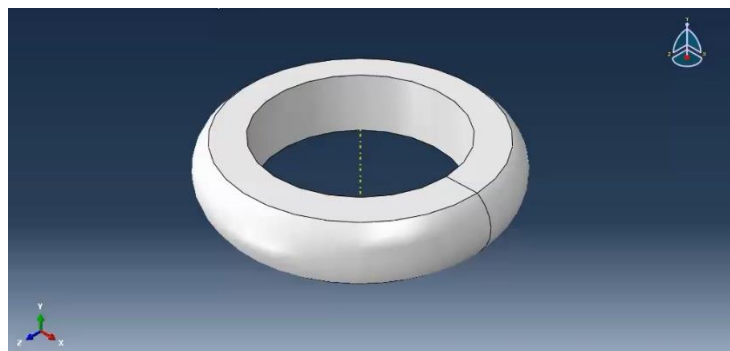
در این تحقیق به منظور مدلسازی فرآیند کشش و خمش در لوله گاز جوشکاری شده، از نرم افزار المان محدود Abaqus استفاده شد.

۴-۲-۱- تعریف لوله و جوش در محیط Abaqus

به منظور مدل‌سازی فرآیند کشش و خمش در لوله جوشکاری شده، ابتدا مدل لوله جوشکاری شده در ماژول Part طراحی شد. در شکل ۵ مدل طراحی شده برای لوله و در شکل ۶ مدل طراحی شده برای جوش نشان داده شده است. این دو قسمت باید با هم یکی شده و تشکیل یک مجموعه واحد اما با خواص متفاوت را بدهند. فرآیند طراحی در این محیط براساس اندازه گیری دقیق ابعاد لوله های آماده شده برای آزمون کشش و خمش و ابعاد دقیق خط جوش است.

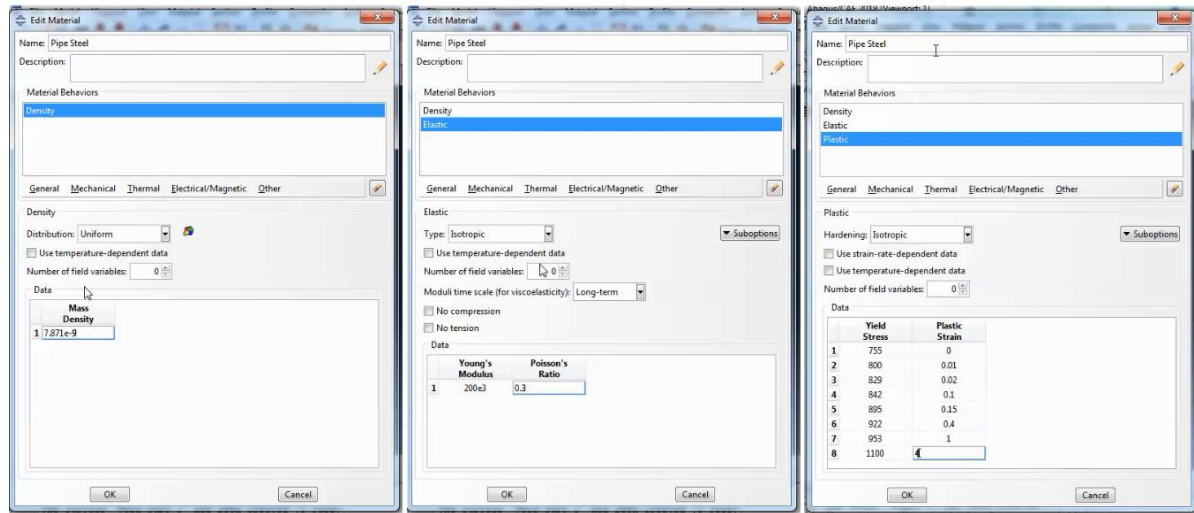


شکل ۵- مدل طراحی شده لوله در محیط Part

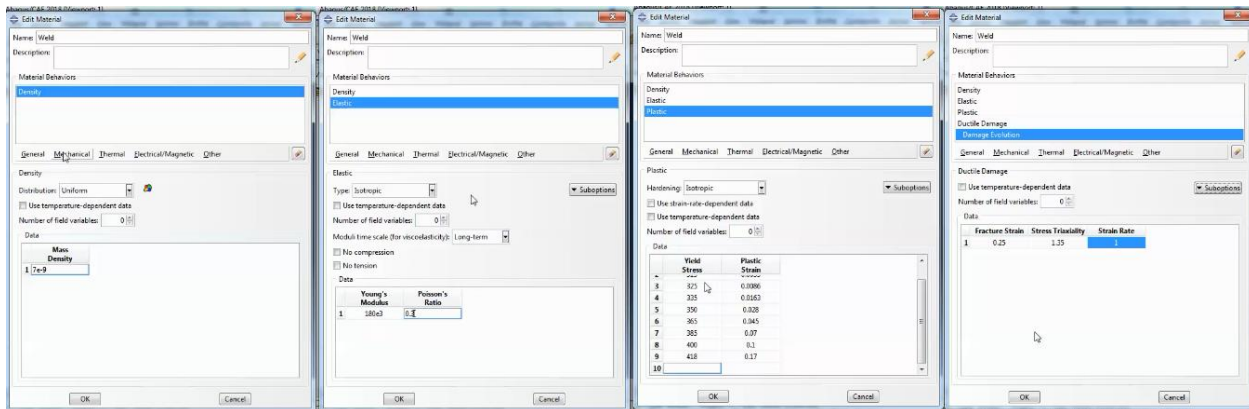


شکل ۶- مدل سه بعدی برای جوش

مطابق شکل ۷، خواص فیزیکی، مکانیکی که شامل خواص الاستیک، پلاستیک هستند برای لوله تعریف شده است. چون در طی فرآیند کشش و خمش، ماده مورد بررسی وارد فاز تغییر شکل پلاستیک می شود لذا با خواص پلاستیک ماده نیز تعریف شود. مطابق تعریف خواص برای لوله، خواص مکانیکی و فیزیکی برای ناحیه جوش نیز تعریف شده است اما توجه به این نکته ضروری است که چون مدول الاستیسیته ناحیه جوش از فولاد کمتر است لذا این بخش دچار شکست خواهد شد که از بخش Ductile Damage، اطلاعات مربوط به شکست ناحیه جوش تعریف می گردد.

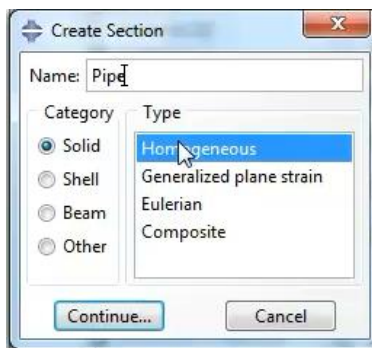


شکل ۷- تعریف خواص لوله فولادی



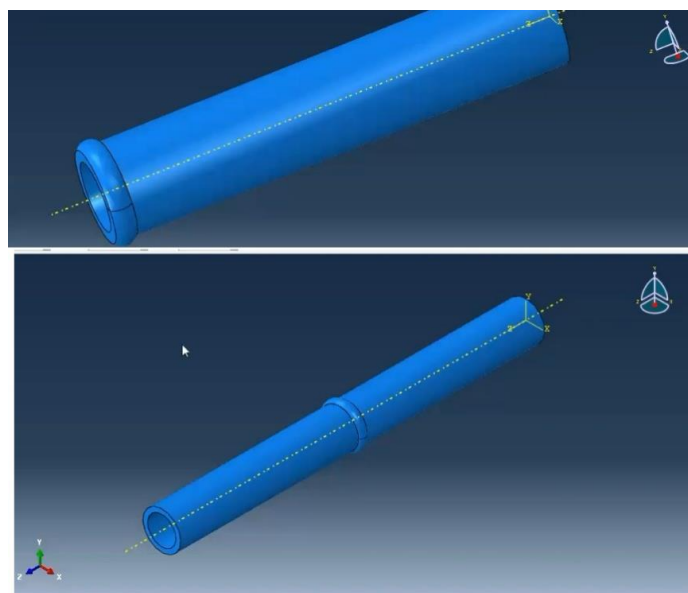
شکل ۸- تعریف خواص ناحیه جوش

در شکل ۹ تعریف Section نشان داده شده است. در این حالت هر دو Section مربوط به لوله و جوش از نوع Solid و Homogeneous تعریف شد.



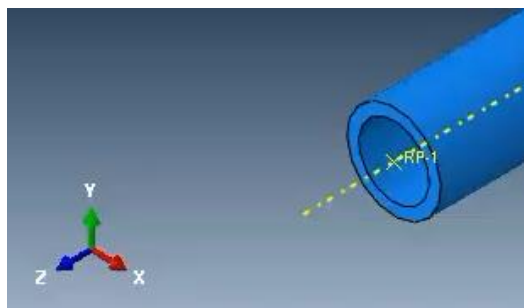
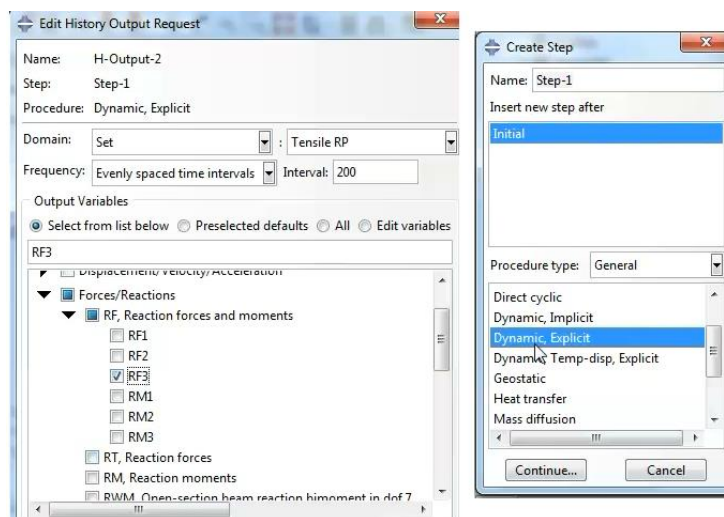
شکل ۹- تعریف Section

از ماژول Assembly به منظور مونتاژ لوله و خط جوش و ساخت نمونه نهایی طراحی شده لوله جوشکاری شده استفاده شد. در شکل ۱۰، ابتدا فرآیند مونتاژ یک بخش از لوله و جوش نشان داده شده است. همچنین نمونه نهایی لوله جوشکاری شده نشان داده شده است.



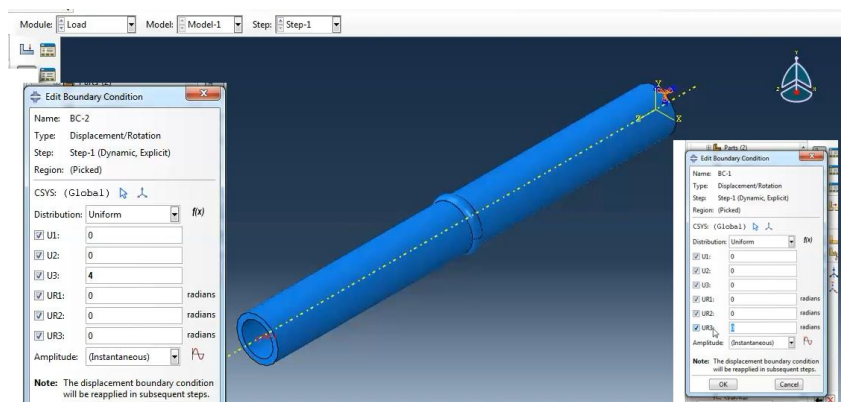
شکل ۱۰- مونتاژ کردن جوش و لوله

در ادامه در ماژول Step نوع تحلیل Dynamic Explicit انتخاب شد. دلیل انتخاب این گزینه این است که آزمون کشش و خمش یک فرآیند دینامیکی سرعت پایین تا رسیدن قطعه به مرحله شکست است (شکل ۱۱ سمت راست). با توجه به اینکه در این آزمون کشش، یک سمت لوله ثابت و سمت دیگر آن توسط دستگاه کشش تحت نیروی کشی است لذا در انتهای لوله، یک نقطه مرجع (Reference Point) (شکل ۱۱ سمت چپ) تعریف شد. در ادامه در ماژول Interaction ارتباط بین لوله و جوش و RF تعریف شد.



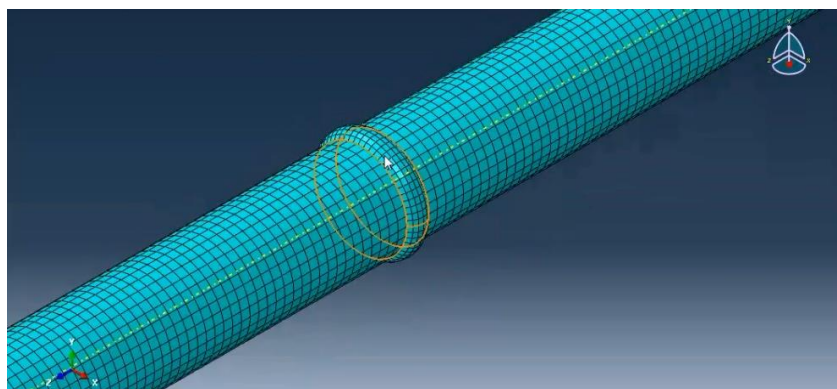
شکل ۱۱- قسمت راست: انتخاب نوع تحلیل. چپ: تعریف RF و قسمت پایین: محل تعریف نقطه مرجع

در مرحله بعدی در ماژول Load، ابتدا تکیه گاه مدل تحت کشش تعریف شد. در شکل ۱۲، نحوه مقید کردن تکیه گاه و محدودیت درجات آزادی لوله نشان داده شده است. سمت راست لوله به طول کامل مقید شد اما چون سمت چپ باید تحت نیروی کششی قرار بگیرد لذا در راستای Z به آن ۴ سانتیمتر درجه آزادی داده شد که در طی آزمون کشش بتواند تا ۴ سانتیمتر جابجا شود.



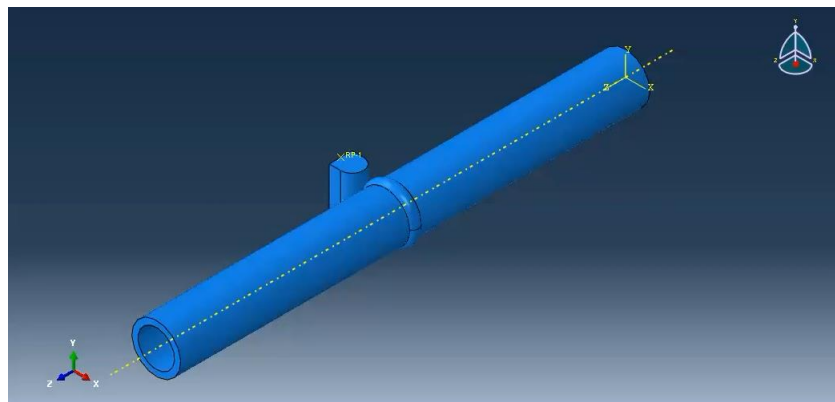
شکل ۱۲- تعریف تکیه گاه و مقید کردن لوله

در شکل ۱۳، مدل مش بندی شده لوله و جوش نشان داده شده است. در این تحقیق سائز مش بندی برای ناحیه جوش از ناحیه لوله ریزتر در نظر گرفته شد. دلیل انتخاب مش ریز در این ناحیه، احتمال رخ دادن شکست در این ناحیه به دلیل خواص پایین مکانیکی آن نسبت به لوله است. در نهایت در ماژول Job فرآیند حل مسئله تعریف شد.



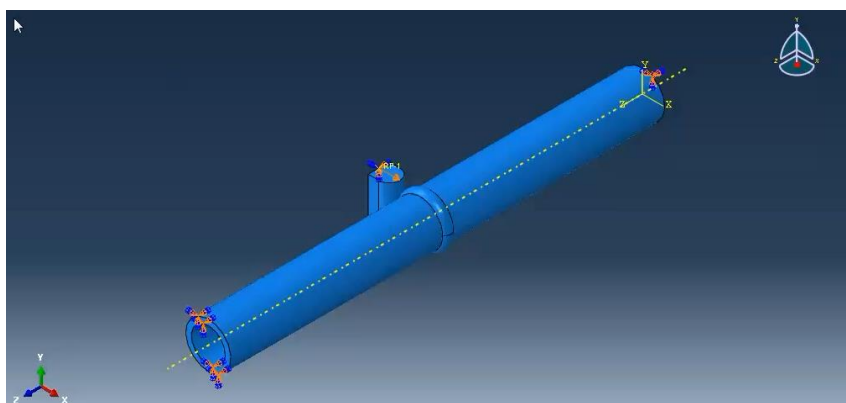
شکل ۱۳- مش بندی مدل لوله و جوش

به منظور تعریف آزمون خمش در Abaqus، باید یک قطعه سوم تعریف شود که لوله جوشکاری شده را فشار داده و سبب خمش آن شود. در شکل ۱۴ این قطعه و موقعیت قرار گیری آن نشان داده شده است. در این حالت، موقعیت نقطه مرجع برای آزمون خمش در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



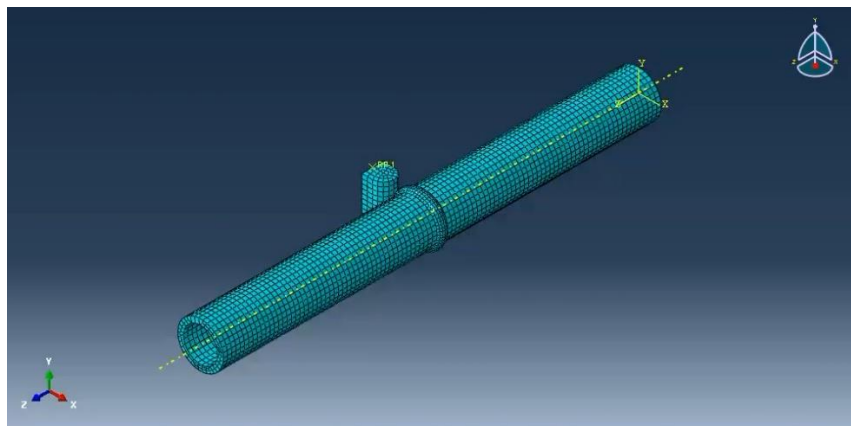
شکل ۱۴- تعریف قطعه سوم جهت خمکاری لوله

در شکل ۱۵، و در مائول Load، ابتدا دو سر لوله ها به طور کامل مقید شد. سپس در موقعیت تعریف RF برای آزمون خمش، محدوده حرکت به اندازه ۶ سانتیمتر برای فک خم کننده تعریف شد.



شکل ۱۵- تعریف تکیه گاه و نحوه بارگذاری

مطابق شکل ۱۶، مدل نهایی فک متحرک و لوله جوشکاری شده مش بندی شدند و این مدل آماده حل است.

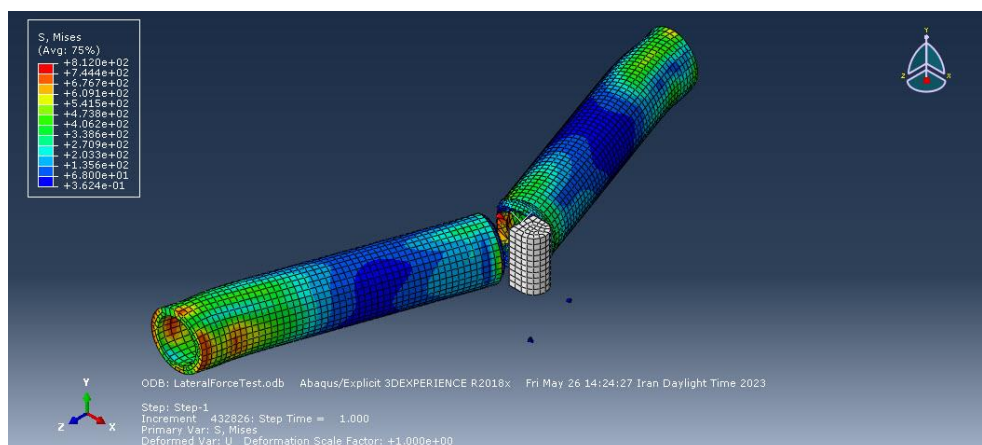


شکل ۱۶- مدل مش بندی شده برای آزمون خمش

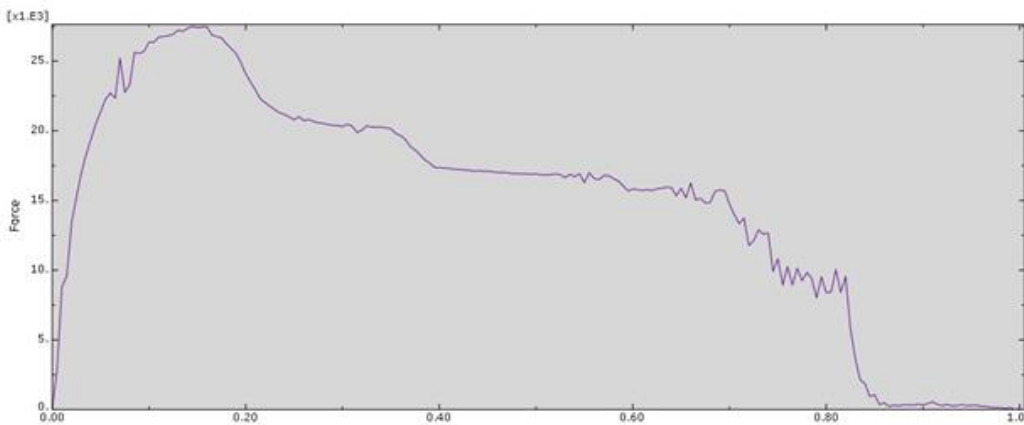
۳- نتایج و بحث

در این قسمت، مدل شبیه سازی شده توسط Abaqus برای دو آزمون خمش و کشش مورد بررسی قرار می گیرد. اثرات توزیع تنش فشاری در زیر نیروی خمشی و همچنین در زیر بارگذاری کششی در شکل های ۲۰-۱۷ نمایش داده می شود.

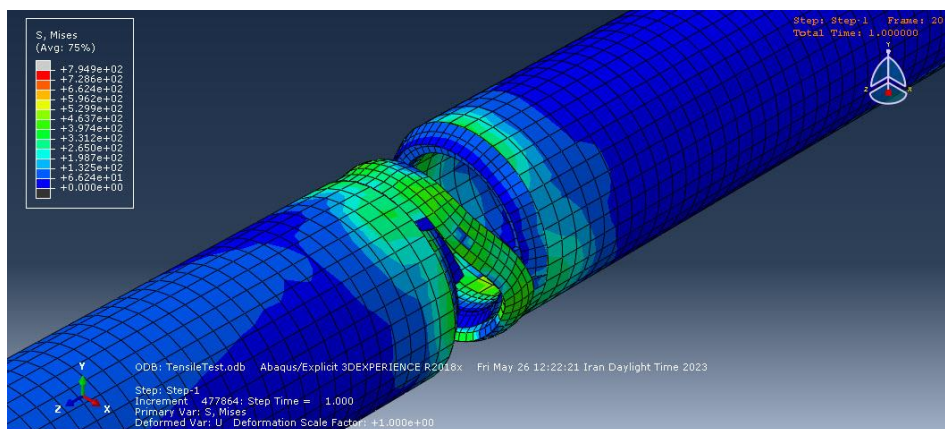
همانگونه که در شکل های ۱۷ و ۱۹ مشاهده می شود بیشترین اثر شکستگی و پارگی لوله در اثر آزمون خمش و کشش به ترتیب در مناطق قرمز و سبز اتفاق افتاده است.



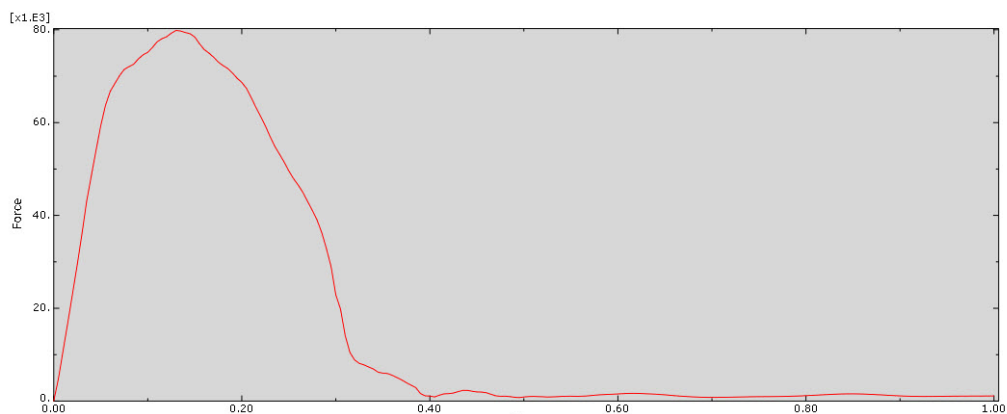
شکل ۱۷- توزیع تنش فشاری و تغییر حالت در لوله و ناحیه جوشکاری در زیر نیروی خمشی



شکل ۱۸- دیاگرام نیرو-جابجایی در لوله زیر بارگذاری خمشی



شکل ۱۹- توزیع تنش فشاری و تغییر حالت در لوله و ناحیه جوشکاری در زیر بارگذاری کششی



شکل ۲۰- دیاگرام نیرو-جابجایی در لوله زیر بارگذاری کششی

همانگونه که در شکل های ۱۷ و ۲۰ مشاهده می گردد، افزایش نیروی خمشی و کششی به ترتیب باعث شکستگی و پارگی لوله در طول آن می گردد که در نمودار شکل های ۱۸ و ۲۰، اثرات اعمال نیرو در جابجایی صورت گرفته در طول لوله کاملاً مشهود است. بنابراین وجود نانوذرات در حوضچه جوش، دانه های مناطق مجاور جوش را ریزتر کرده و توزیع یکنواختی از مراکز مستعد برای جوانه زنی در فلز جوش ایجاد می نمایند لذا با افزایش درصد جوانه زنی، خواص مکانیکی جوش افزایش چشمگیری در مقایسه با جوش بدون نانوذرات خواهد داشت.

مراجع

- [1] Sunny, K.T. and N.N. Korra, *A systematic review about welding of super austenitic stainless steel*. Materials Today: Proceedings, 2021. **47**: p. 4378-4381.
- [2] Lisienko, V. and E. Shleimovich, *Improving the thermal characteristics of furnaces and the operating conditions of the lining by improving direct-flame-impingement methods for intensifying the heating of metal*. Refractories and Industrial Ceramics, 2013. **54**(3): p. 188-195.
- [3] Vimalraj, C., et al., *High-strength steel S960QC welded with rare earth nanoparticle coated filler wire*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019. **102**(1): p. 105-119.
- [4] Sadeghi, B., et al., *Friction stir spot welding of TiO₂ nanoparticle-reinforced interstitial free steel*. Journal of Materials Science, 2020. **55**(26): p. 12458-12475.
- [5] Sharma, L. and R. Chhibber, *Design of TiO₂-SiO₂-MgO and SiO₂-MgO-Al₂O₃-Based Submerged Arc Fluxes for Multipass Bead on Plate Pipeline Steel Welds*. Journal of Pressure Vessel Technology, 2019. **141**(4).
- [6] Pietrzak, K., et al. Processing of intermetallics with Al₂O₃ or steel joints obtained by friction welding technique. in 12th Conference of the European Ceramic Society-ECerS XII, Stockholm. 2011.
- [7] Rajeswari, V.B., et al., *Effect of substituting fine rutile of the flux with nano TiO₂ on the improvement of mass transfer efficiency and the reduction of welding fumes in the stainless steel SMAW electrode*. High Temperature Materials and Processes, 2020. **39**(1): p. 117-123.
- [8] Vishnu, B., et al., *Influence of nano-sized flux materials in the reduction of the Cr (VI) in the stainless steel welding fumes*. Journal of Manufacturing Processes, 2018. **34**: p. 713-720.