

بهینه‌سازی گرم کردن لوله برای خمکاری لوله‌های بویلر به کمک روش اجزای محدود و

بررسی اثر تغییر پارامترها بر کیفیت خمکاری

سید ابراهیم موسوی ترشیزی

پیمان شورشی

دانشیار دانشکده مکانیک و انرژی

دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک

پردیس شهید عباسپور

پردیس شهید عباسپور

دانشگاه شهید بهشتی

دانشگاه شهید بهشتی

شرکت مدیریت تولید برق هرمزگان

چکیده

لوله‌های خمیده کاربرد وسیعی در صنایع مختلف به خصوص در نیروگاه‌ها دارند. بیشترین کاربرد لوله‌های خمیده برای ساخت اجزای بویلر شامل سوپرهیتورها، ری هیتورها، اکونومایزرها و واتروال‌ها می‌باشد. با توجه به این‌که سوپرهیتورها در شرایط دما و فشار بالا در بویلرها بهره‌برداری می‌شوند از آسیب‌پذیرترین قطعات مکانیکی در نیروگاه‌ها به حساب می‌آیند. لوله‌های سوپرهیتور متشکل از تعداد زیادی خم‌های U شکل است. از جمله مشکلاتی که در خمکاری این لوله‌ها بوجود می‌آید چین‌خوردگی، افزایش ضخامت لوله در قوس داخلی خم و کاهش ضخامت در قوس خارجی آن می‌باشد. کاهش ضخامت پیش از حد باعث کاهش مقاومت لوله و در نتیجه افزایش احتمال گسیختگی آن می‌شود. یکی از روش‌های رفع این عیب گرم کردن موضعی لوله‌ها هنگام خمکاری می‌باشد. در این پژوهش سعی شده است تا با شبیه‌سازی کامپیوتری فرایند خمکاری گرم لوله‌های سوپرهیتور پارامترهای مناسب را جهت گرم کاری لوله‌ها بدست آورده تا عیوب بوجود آمده بعد از خمکاری به حداقل مقدار رسیده و در محدوده مجاز ذکر شده در استانداردها و دستورالعمل‌ها قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: خمکاری گرم، لوله، بویلر، بهینه‌سازی

۱- مقدمه

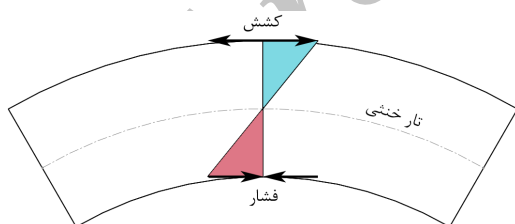
نسبت قطر خارجی لوله به ضخامت دیواره لوله، تحت عنوان فاکتور دیواره (WF) مورد بررسی قرار می‌گیرد. چنانچه فاکتور دیواره برای لوله‌ای بزرگ‌تر از ۳۰ باشد، لوله مورد نظر به عنوان لوله‌ای با دیواره نازک شناخته می‌شود. پارامتری دیگر تحت عنوان درجه خم (k)، نشان‌دهنده کوچک یا بزرگ بودن شعاع خمکاری هست. این پارامتر به صورت نسبت شعاع خم از خط مرکزی لوله به قطر خارجی لوله تعریف می‌شود. فاکتور دیواره

تمامی لوله‌های بویلر دارای مقطع عرضی دایره‌ای هستند. برای لوله‌های دارای مقطع دایره‌ای، هدف عمده فرایند خمکاری، دستیابی به خمی با سطحی صاف و مقطع دایره‌ای است. برای اعمال روش مناسب خمکاری، یکی از پارامترهای لازم، مشخص کردن نوع لوله از نظر ضخامت دیواره آن است. برای این منظور

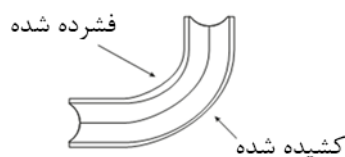
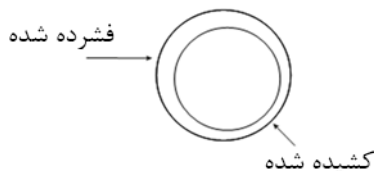
و همکارانش [۳ و ۴] به بررسی عیوب خمکاری لوله‌ها از جمله چین خوردگی و برگشت فنری و بیضوی شدن سطح مقطع لوله‌ها پرداخته شده است. در مقاله [۵] *Guarracino* فرایند خمکاری لوله‌ها با استفاده از تئوری الاستیک بررسی شده است و با نتایج تجربی و نرم‌افزاری مقایسه شده است. *Zu-tang* در مقاله‌ای به بررسی تئوری خمکاری گرم القایی لوله‌های با شعاع خمکاری کوچک با استفاده از روش المان محدود پرداخته است [۶]. *Z. Hu* نیز در مقاله‌ای به بررسی خمکاری گرم القایی لوله‌های با شعاع خم کوچک با استفاده از شبیه‌سازی کامپیوتری پرداخته است و روش‌هایی برای جلوگیری از کاهش بیش از حد ضخامت ارائه داده است [۷].

۲- تئوری تحقیق

تغییرات ضخامت دیواره‌ها در خمکاری لوله‌ها امری متداول و اجتناب ناپذیر است. اما اگر میزان این تغییرات ضخامت از یک میزان معینی بیشتر شود باعث پاره شدن لوله در جداره‌ی بیرونی خم می‌شود. هنگام خمکاری لوله، نیمه‌ی بیرونی خم تحت کشش و نیمه‌ی درونی خم تحت فشار قرار می‌گیرد. که در اثر این تنش‌ها دیواره‌ی نیمه‌ی بیرونی خم با کاهش ضخامت و نیمه‌ی درونی خم با افزایش ضخامت همراه است، که کاهش ضخامت همواره در خمکاری بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. همچنین می‌توان با استفاده از این تغییرات ضخامت، جابه‌جایی تار خنثی در حین خمکاری را توجیه کرد، به این صورت که با توجه به کاهش ضخامت دیواره‌ی بیرونی خم و افزایش ضخامت دیواره‌ی درونی خم، محور اصلی سطح مقطع به سمت داخل خم نزدیک‌تر می‌شود [۲].



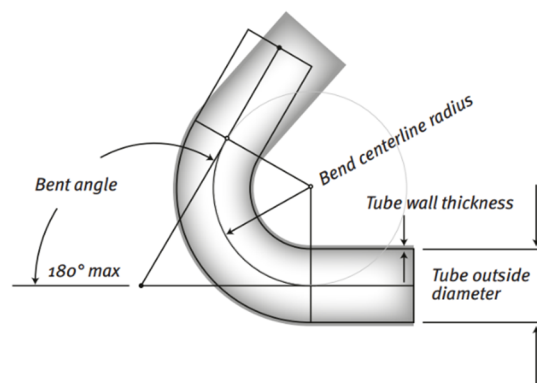
شکل ۲: توزیع تنش‌ها بر اثر خمکاری



شکل ۳: تغییرات ضخامت در لوله

و درجه خم، برای تعیین میزان شدت خم ایجاد شده مورد استفاده قرار می‌گیرند. هر چه درجه خم کوچکتر باشد دستیابی به خم‌های با کیفیت سخت‌تر می‌شود. بنابراین خمکاری لوله‌های سوپرهیتر که درجه خم $k = 1$ را دارند حساس می‌باشد [۱]. شکل ۱ مهم‌ترین فاکتورهای مورد توجه در فرایند خمکاری لوله‌ها را به صورت شماتیکی نشان می‌دهد.

$$k = \frac{R}{D_0} \quad WF = \frac{D_0}{t} \quad (1)$$



شکل ۱: مهم‌ترین فاکتورهای مورد توجه در فرایند خمکاری لوله [۱]

مهمترین ایرادی که در خمکاری این لوله‌ها به وجود می‌آید کاهش ضخامت در نیمه بیرونی خم می‌باشد که باعث افزایش احتمال گسیختگی لوله می‌شود. یکی از روش‌های رفع این عیب گرم کردن مناسب لوله هنگام خمکاری می‌باشد. گرم کردن لوله‌ها به منظور رسیدن سرتاسر یا بخشی از لوله که بایستی خم شود، به دمای مطلوب خمکاری، به روش‌های حرارت‌دهی القایی، هدایت الکتریکی، کوره و یا مشعل گاز، امکان‌پذیر است.

در این مقاله تغییرات ضخامت لوله‌ی جدار ضخیم آستینیتی با درجه خم $k = 1$ که معمولاً در سوپرهیتر نهایی نیروگاه‌های بخاری استفاده می‌شود، بررسی شده است. به این صورت که قسمتی از سطح داخلی خم تا دمای معینی گرم می‌شود و سپس خم می‌شود. پارامترهای مؤثر بر خمکاری دما، طول و پهنای منطقه‌ی گرمایش می‌باشند. با تغییر این پارامترها در محدوده‌ی مناسب مقادیر بهینه برای دستیابی به بهترین ضخامت دیواره بیرونی و حد بیضوی شدن (*Ovality*) سطح مقطع لوله به دست می‌آیند. تحقیقات زیادی در زمینه خمکاری لوله‌ها و بررسی عیوب به وجود آمده پس از خمکاری انجام شده است، اما هیچ‌کدام از آن‌ها با روشی که در این پژوهش ذکر شده است به شبیه‌سازی فرایند خمکاری نپرداخته‌اند. مقاله *Tang* [۲] به بررسی هفت سوال متداول در فرایند خمکاری پرداخته است و در مقاله

بین قطرهای کوچک و بزرگ تقسیم بر قطر اسمی لوله تعیین می‌شود. رابطه ۳ این مقدار را نشان می‌دهد [۸].

$$Ovality = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{nom}} \times 100 \quad (3)$$

استاندارد VGB که برای بویلرهای نیروگاهی تدوین شده است بیشترین درصد مجاز کاهش و افزایش ضخامت را بسته به میزان شعاع خم و قطر لوله تعیین می‌کند و فرمول‌های زیر را ارائه می‌نماید.

$$\text{کاهش ضخامت} = \frac{1}{4R/D_o + 2} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{افزایش ضخامت} = \frac{1}{4R/D_o - 2} \times 100 \quad (5)$$

همچنین این استاندارد معیار پذیرش حد بیضوی شدن سطح مقطع لوله‌ها را به صورت زیر تعریف می‌کند [۱۰].

$$Ovality = \frac{20}{R/D_o} \times 100, R/D_o > 2 \quad (6)$$

$$Ovality = 10\%, R/D_o < 2 \quad (7)$$

با توجه به الزامات ارائه شده، از آنجا که قطر خارجی لوله‌های مورد بررسی در این تحقیق ۵۰ میلیمتر و شعاع خم برابر ۵۰ میلیمتر می‌باشد، پس نسبت R/D_o در اینجا برابر ۱ می‌باشد. بنابراین درصد مجاز کاهش و افزایش ضخامت و همچنین حد بیضوی شدن سطح مقطع لوله به دست می‌آید [۵].

$$\text{کاهش ضخامت} = \frac{1}{4 \times 1 + 2} \times 100 = 16.66\%$$

$$\text{افزایش ضخامت} = \frac{1}{4 \times 1 - 2} \times 100 = 50\%$$

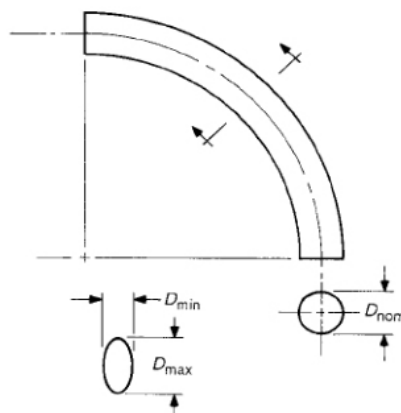
$$Ovality = 10\%$$

در این پژوهش کیفیت لوله‌های خم شده فقط از نظر کاهش ضخامت قسمت بیرونی و بیضوی شدن سطح مقطع لوله بررسی می‌شوند. حد مجاز کاهش ضخامت ۱۵ درصد و حد بیضوی شدن سطح مقطع ۸ درصد در نظر گرفته می‌شود.

۳- شبیه‌سازی المان محدود

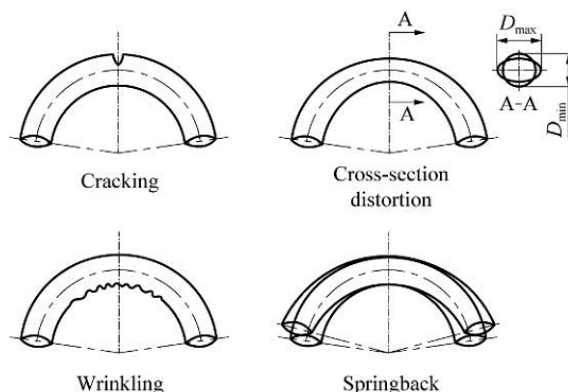
در این مقاله جهت شبیه‌سازی فرایند خمکاری گرم لوله به روش المان محدود از نرم‌افزار ANSYS 12.1 استفاده شده است.

یکی دیگر از عیوبی که در خمکاری لوله‌ها ایجاد می‌شود تغییر سطح مقطع لوله می‌باشد. متداول‌ترین تغییر سطح مقطع را می‌توان بیضی شدن مقطع لوله دانست. شکل ۴ این موضوع را نشان می‌دهد.



شکل ۴: بیضوی شدن محل خم [۸]

عیوب دیگری از جمله چین خوردگی لایه‌ی درونی و صاف شدگی لایه‌ی بیرونی و برگشت فنری لوله ممکن است پس از خمکاری به وجود بیاید. در شکل ۵ این معایب به طور مختصر نشان داده شده است.



شکل ۵: انواع عیوب به وجود آمده پس از خمکاری لوله [۳]

اولین و مهم‌ترین معیار پذیرش در کنترل کیفیت لوله‌های خمکاری شده، کاهش ضخامت دیواره در نیمه بیرونی خم می‌باشد. این ضخامت پس از خمکاری حداقل باید برابر با کمترین ضخامت دیواره مورد نیاز برای لوله‌های مستقیم باشد [۹]. درصد کاهش ضخامت دیواره‌ی لوله از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\text{درصد کاهش ضخامت} = \frac{t - t_{min}}{t} \times 100 \quad (2)$$

دومین معیار پذیرش لوله‌های خمکاری شده، مقدار بیضوی شدن مقطع لوله است. در طول عملیات خمکاری، سطح مقطع محل خم اغلب شکل بیضی به خود می‌گیرد که قطر بزرگ آن عمود بر صفحه خم است. درجه بیضوی شدن توسط اختلاف

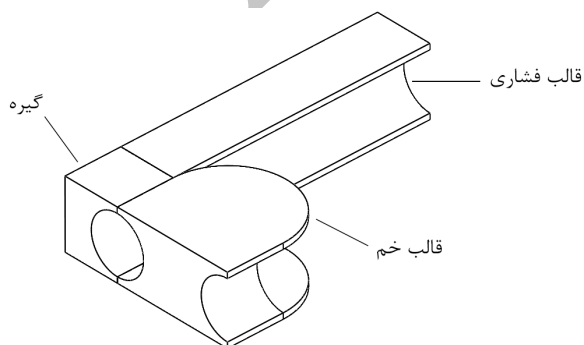
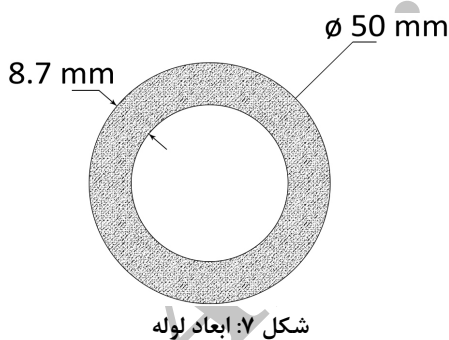
در ادامه به جزئیات روند المان محدود از جمله هندسه اجزاء، خواص مکانیکی مواد و شرایط مرزی و تکیه‌گاهی می‌پردازیم.

۳-۱- هندسه مدل المان محدود و شبکه‌بندی

مدل المان محدود این مسئله از ۵ جزء تشکیل شده است؛ لوله، قالب خم، گیره، قالب فشاری و مندریل. لوله دارای قطر خارجی ۵۰ میلی‌متر و ضخامت ۸/۷ میلی‌متر می‌باشد. شعاع خم نیز برابر ۵۰ میلی‌متر است، بنابراین ابعاد قالب خم مشخص می‌باشد. شکل ۷ و ۸ هندسه لوله و دیگر اجزاء را نشان می‌دهد.

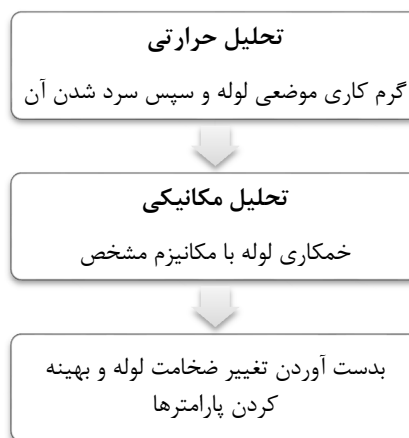
در این شبیه‌سازی از ساده‌ترین نوع مندریل استفاده می‌شود تا شرایطی نزدیک به واقعیت برای خمکاری فراهم گردد. با توجه به مشخصات خمکاری در این تحقیق مقدار مناسب برای قطر مندریل ۲۸/۸ میلی‌متر و میزان فاصله نوک آن از خط مماس ۱۱/۴۵ میلی‌متر انتخاب می‌شود [۱۱]. مکان قرارگیری مندریل در شکل ۹ نشان داده شده است.

با کمی دقت در این مسئله درمی‌یابیم که یک صفحه تقارن محوری وجود دارد. این بدان معناست که می‌توانیم فقط نیمه از هندسه را مش‌بندی کنیم. این کار حجم و زمان محاسبات را نصف می‌کند. شکل ۱۰ مش‌بندی المان محدود لوله و اجزای خمکاری را نشان می‌دهد.



در مدلسازی فرایند خمکاری گرم لوله تقابل بین حوزه‌های مختلف علوم مهندسی همچون انتقال حرارت، متالورژی و تنش-کرنش وجود دارد. در روش المان محدود از دو روش مستقیم و غیر مستقیم برای انجام تحلیل‌های فیزیکی مختلف استفاده می‌شود. فرایند خمکاری گرم لوله از دو میدان حرارتی و مکانیکی تشکیل شده است. به این ترتیب که ابتدا لوله به طور موضعی گرم شده و مقدار دما برای هر یک از گره‌ها در گام‌های زمانی مشخص، تعیین می‌گردد. در تحلیل مکانیکی دمای هر یک از گره‌ها در گام‌های زمانی متناسب با تحلیل حرارتی، به عنوان بار حرارتی بر روی مدل اعمال شده و همچنین فرایند خمکاری همزمان انجام می‌شود.

مدلسازی فرایند خمکاری با گرم‌کاری قسمت مشخصی از لوله آغاز می‌شود. در این قسمت طول، پهنا و دمای منطقه‌ی گرم-کاری پارامترهای متغیر مسئله می‌باشند. پس از گرم‌کاری، لوله به مدت مشخصی سرد می‌شود و سپس تحلیل مکانیکی آغاز می‌شود، به این صورت که لوله به وسیله مکانیزم خمکاری کشتی با ابعاد مشخص شعاع انحنا و زاویه ۱۸۰ درجه خم می‌شود. از آنجایی که گرم‌کاری لوله قبل از خمکاری انجام می‌شود بنابراین دماهای مورد استفاده در تحلیل مکانیکی از قسمت خنک شدن لوله برداشته می‌شود. طبیعی است که زمان آماده کردن لوله برای خمکاری بستگی به امکانات کارگاهی و کارگران دارد، بنابراین حتی الامکان باید فاصله زمانی بین گرم‌کاری لوله و شروع خمکاری کوتاه باشد تا از توزیع و گستردگی بیش از حد حرارت و کاهش دما در لوله جلوگیری شود. با تغییر دادن دما، طول و پهناى منطقه گرمایش مقادیر مختلفی برای کاهش ضخامت دیواره‌ی بیرونی و درصد بیضوی شدن سطح مقطع لوله بدست می‌آید و تأثیر پارامترهای فوق بر کیفیت خم بدست آمده بررسی می‌شود و مقادیر بهینه یافته می‌شوند. شکل ۶ الگوریتم شبیه‌سازی فرایند خمکاری گرم لوله را نشان می‌دهد.



شکل ۶: روند کلی شبیه‌سازی فرایند خمکاری گرم لوله

قالب خم، گیره و قالب فشاری نیز از جنس فولاد ابزار با استحکام بالا انتخاب شده است. برای این فولاد تنش تسلیمی تعریف نشده است تا رفتاری کاملاً الاستیک داشته باشد. خواص این فولاد در جدول ۱ آورده شده است [۱۲]. مندریل مورد استفاده در این شبیه‌سازی نیز از آلیاژ آلومینیوم - برنز می‌باشد که خواص مکانیکی آن در جدول ۲ آورده شده است [۱۴].

جدول ۱: خواص مکانیکی فولاد مورد استفاده در قالب و گیره

ضریب پواسون	مدول یانگ (GPa)	چگالی (kg/m^3)
0.3	200	7920

جدول ۲: خواص مکانیکی مندریل

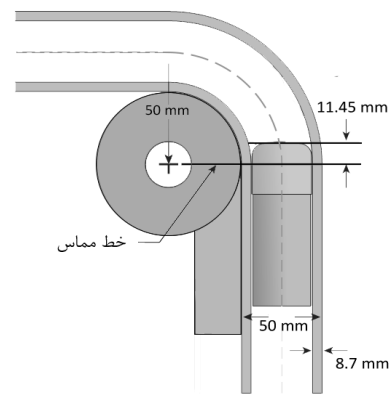
ضریب پواسون	مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	چگالی (kg/m^3)
0.31	115	400	7890

۳-۳- بارگذاری حرارتی

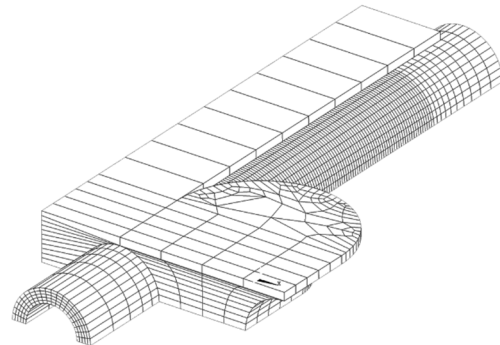
برای گرم‌کاری لوله تغییرات ۳ پارامتر دما، پهنای گرمایش و طول منطقه گرمایش مورد بررسی قرار گرفته است. محدوده دمایی مورد نیاز با توجه به استاندارد برای فولاد زنگ نزن آستنیتی 321H بین $850^{\circ}C$ تا $1150^{\circ}C$ می‌باشد [۱۲]. از آنجایی که به نرم‌تر شدن لوله در داخل خم بیشتر نیاز داریم پس پهنای منطقه گرمایش باید حداکثر 180° باشد. بنابراین پهنای گرمایش نیز عددی بین ۲۰ تا 180° درجه می‌باشد. طول منطقه گرمایش را نیز باید به گونه‌ای انتخاب کرد تا کل خم به دمای مورد نظر برسد. بنابراین این پارامتر نیز باید عددی بین ۱۵۰ تا ۲۴۰ میلی‌متر باشد. دمای اولیه لوله $25^{\circ}C$ و دمای محیط نیز $25^{\circ}C$ در نظر گرفته شده است. ضریب همرفت هوا نیز $50 W/m^2 \cdot ^{\circ}C$ تعریف می‌شود. شکل ۱۲ و ۱۳ این تغییر پارامترها را نشان می‌دهد.

گرم‌کاری موضعی لوله با شعله انجام می‌شود، بدین ترتیب که باید شعله را در طول منطقه گرمایش به سرعت جلو و عقب کرده تا تمام این منطقه یکنواخت به دمای مورد نظر برسد. در این تحقیق با دادن گرما به سطح مورد نظر به مدت ۸۰ ثانیه بیشترین دمای لوله را به دمای مشخص می‌رسانیم. سپس به مدت ۳۰ ثانیه آن را سرد می‌کنیم. توزیع دمایی در این ۳۰ ثانیه به عنوان بار حرارتی در مرحله تحلیل مکانیکی وارد می‌شود.

بازه تغییر این سه پارامتر همانطور که گفته شد تابعی از استاندارد، نتایج تجربی گذشته و محدودیت‌های اجرایی می‌باشد. جدول ۳ بازه تغییرات این پارامترها را نشان می‌دهد.



شکل ۹: هندسه مندریل و نحوه قرارگیری آن

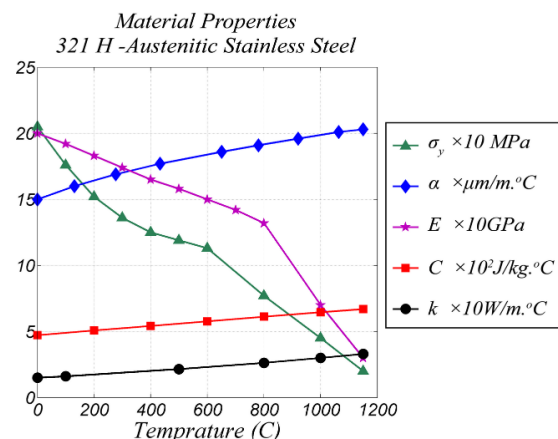


شکل ۱۰: مش‌بندی مدل المان محدود لوله و اجزای خمکاری

۳-۲- خواص مکانیکی مواد

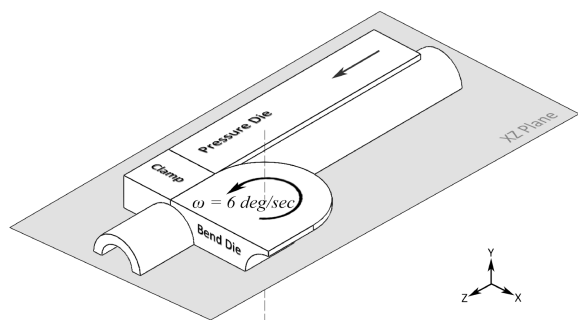
جنس فولاد به کار رفته در لوله‌های سوپر‌هیت از نوع فولاد آستنیتی 321H می‌باشد. از آنجایی که در این شبیه‌سازی لوله تا دمای معینی گرم می‌شود بنابراین خواص مکانیکی این فولاد برای دماهای مختلف مورد نیاز می‌باشد.

خواص حرارتی و مکانیکی وابسته به دما برای فولاد آستنیتی 321H در شکل ۱۱ آورده شده است. ضریب پواسون در همه دماها مقدار ۳، در نظر گرفته شده است [۱۲ و ۱۳]. از آنجایی که فولاد آستنیتی در دمای بالا تغییرات ساختاری نمی‌دهد بنابراین نگرانی در مورد تغییرات متالوژیکی لوله بعد از خمکاری وجود ندارد.



شکل ۱۱: خواص حرارتی و مکانیکی وابسته به دمای فولاد 321H

حرکت لوله و با سرعت مساوی با آن حرکت می‌کند. قالب خم نیز همراه با گیره با سرعت 6 deg/sec حول نقطه مرکز قالب خم می‌چرخد. با این سرعت چرخش 180° درجه قالب 30 ثانیه طول می‌کشد، با این حرکت چرخشی لوله نیز همراه با قالب می‌چرخد و شکل قالب خم را به خود می‌گیرد. شکل ۱۴ قید-بندی و بارگذاری مکانیکی مدل المان محدود را نشان می‌دهد.



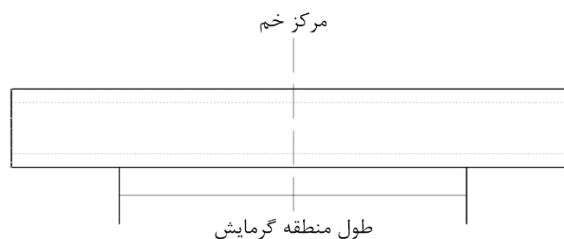
شکل ۱۴: قید بندی و بارگذاری مکانیکی مدل المان محدود

توزیع حرارتی بدست آمده از قسمت قبل نیز به عنوان بار خارجی بر لوله اعمال می‌شود، بنابراین با کاهش تنش تسلیم و مدول الاستیسیته‌ی قسمت داخلی لوله و به تبع آن نرم‌تر شدن دیواره داخلی نسبت به دیواره خارجی لوله از کاهش ضخامت بیش از حد قسمت بیرونی جلوگیری می‌شود. با حل مسئله مقدار کاهش ضخامت دیواره بیرونی لوله و همچنین درصد بیضوی شدن سطح مقطع لوله تعیین می‌شود.

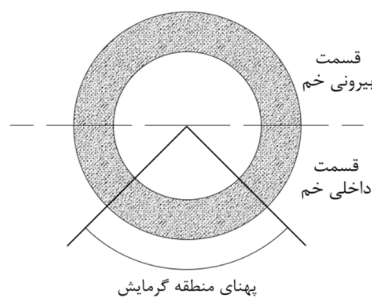
۴- تحلیل نتایج

جهت انجام مقایسه میان حالت‌های مختلف خمکاری ابتدا باید خمکاری را یک بار به صورت سرد انجام داد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که لوله در محل خم دارای ضخامت $6/97$ میلی‌متر شده‌است، یعنی درصد کاهش ضخامت نیمه بیرونی خم 20% می‌باشد. مقدار بیضوی شدن سطح مقطع لوله در محل خم نیز برابر $20/9\%$ به دست آمد. مشاهده می‌شود که هر دو مقدار فوق فاصله‌ی زیادی از استاندارد دارند، بنابراین خمکاری سرد برای این لوله‌ها مناسب نمی‌باشد و برای دستیابی به کیفیت خم بالاتر باید از خمکاری گرم استفاده نمود.

در قسمت‌های قبل به این نکته اشاره شد که مهمترین معیار بررسی کیفیت خم کاهش ضخامت نیمه بیرونی خم می‌باشد و حد بیضوی شدن در اولویت دوم قرار دارد، از این رو ابتدا به بررسی تغییرات کاهش ضخامت پرداخته و سپس در منطقه‌ی بهینه حد بیضوی شدن سطح مقطع لوله را چک می‌کنیم تا در محدوده‌ی استاندارد باشد. پس ابتدا در بازه دمایی ذکر شده چهار دما را انتخاب می‌کنیم. برای هر دما نیز پهنای گرمایش را



شکل ۱۲: طول منطقه گرمایش



شکل ۱۳: پهنای منطقه گرمایش

جدول ۳: بازه تغییر پارامترها

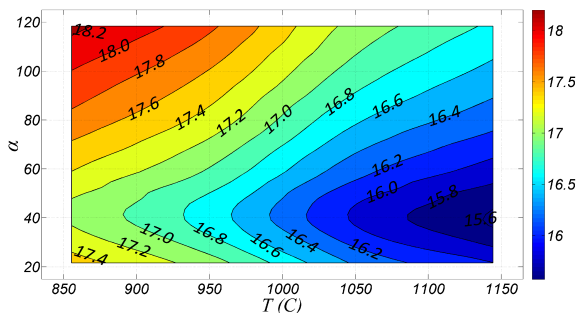
طول منطقه گرمایش (w)	پهنای منطقه گرمایش (α)	دمای خمکاری (T)
150 - 240 mm	$20^\circ - 120^\circ$	$850^\circ\text{C} - 1150^\circ\text{C}$

حمدت زمان گرمایش نیز می‌تواند با توجه به پارامترهای شعله از جمله دبی گاز، فاصله شعله تا لوله و پهنای دریچه شعله تغییر کند که این موضوع در نحوه‌ی توزیع و گستردگی دما تأثیر می‌گذارد. در این پژوهش بیشترین دمای قسمت بیرونی خم در پایان گرمایش به عنوان معیاری از توزیع دمای لوله در نظر گرفته می‌شود. بدیهی است در هنگام خمکاری اپراتور باید با توجه به دستورالعمل ارائه شده مقادیر مناسب پارامترهای شعله را انتخاب کند تا هم سطح مورد نظر به دمای خمکاری برسد هم قسمت بیرونی لوله در محدوده دمایی خواسته شده باشد.

۳-۴- بارگذاری مکانیکی و اعمال شرایط تماسی

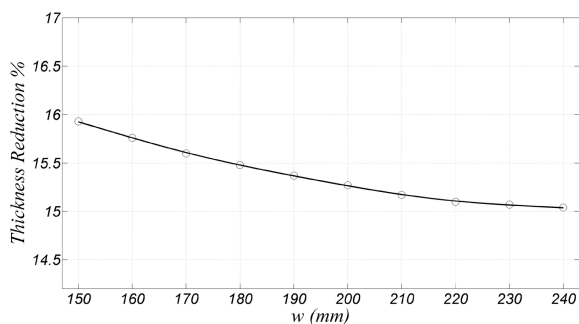
در این بخش باید ابتدا شرایط تماسی بین لوله و قالب‌ها و لوله و مندریل تعریف شود. مقدار ضریب اصطکاک میان لوله و قالب خم و لوله و قالب فشاری $0/74$ در نظر گرفته شده است. ضریب اصطکاک میان لوله و مندریل نیز $0/16$ تعریف می‌شود [۱۵]. ضمن آن که فرض می‌شود گیره به لوله چسبیده است و آن را با خود حرکت می‌دهد.

پس از تعریف شرایط تماسی میان سطوح لوله و اجزای دستگاه خمکاری قید گذاری مکانیکی سیستم انجام می‌شود. از آنجایی که مدل این مسئله نسبت به صفحه xz دارای تقارن محوری می‌باشد بنابراین باید درجه آزادی تمام گره‌های روی این صفحه را در راستای محور y ببندیم. قالب فشاری نیز فقط در جهت



شکل ۱۷: درصد کاهش ضخامت نیمه بیرونی خم بر حسب پهنای گرمایش و دما

پس از انجام محاسبات برای مرحله دوم درصد کاهش ضخامت برای نیمه بیرونی خم بدست آمد. نمودار شکل ۱۸ تغییرات درصد کاهش ضخامت برای طول‌های مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۱۸: درصد کاهش ضخامت نیمه بیرونی خم در طول‌های مختلف گرمایش لوله

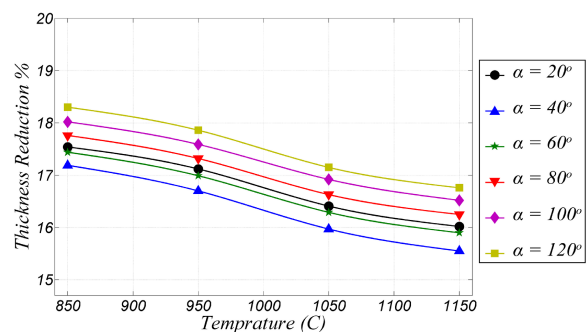
همانطور که از نمودار شکل ۱۸ پیداست درصد کاهش ضخامت نیمه بیرونی خم با افزایش طول گرمایش کاهش می‌یابد. بهترین درصد کاهش ضخامت در طول گرمایش ۲۴۰ میلی‌متر به دست آمد که مقدار ۱۵/۰۴٪ را دارد. دلیل این کاهش این است که در هنگام خمکاری منطقه‌ی خارج از خم لوله نیز تا حدی تحت فشار و کشش قرار می‌گیرد، با مقداری گرم کردن این منطقه نیز می‌توان از تمرکز تنش بر روی منطقه‌ی خم کم کرد و تغییر شکل قوس داخلی و خارجی خم را کاهش داد. بنابراین با این کار میزان کاهش ضخامت می‌تواند بهبود پیدا کند. برای این پارامترها حد بیضوی شدن نیز برابر ۷٪ به دست آمد که مقدار مناسبی با توجه به استاندارد می‌باشد.

یکی دیگر از پارامترهایی که در گرم‌کاری لوله باید لحاظ شود نحوه‌ی توزیع و گستردگی دما در لوله می‌باشد. اگر لوله با شار حرارتی پایین در مدت زمان زیاد گرم شود توزیع دما روی لوله گسترده‌تر بوده و دمای قسمت بیرونی خم بیشتر می‌باشد ولی اگر لوله با شار حرارتی بیشتر در مدت زمان کمتری به دمای خمکاری برسد توزیع دما در لوله متمرکز تر و در نتیجه دمای قسمت بیرونی خم کمتر خواهد بود. برای این منظور با توجه به پارامترهای بهینه شده‌ی فوق لوله را با چند شار حرارتی متفاوت

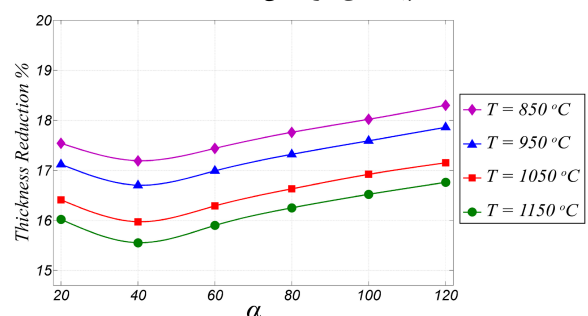
۶ بار تغییر می‌دهیم. در تمام این موارد طول گرمایش را ثابت و برابر ۱۷۵ میلی‌متر در نظر می‌گیریم.

پس از تحلیل ۲۴ مورد فوق درصد کاهش ضخامت نیمه بیرونی خم محاسبه شده و منطقه مطلوب مشخص می‌شود. شکل‌های ۱۵ و ۱۶ درصد کاهش ضخامت نیمه بیرونی خم را برای دماها ۱۷ مشاهده می‌شود کمترین کاهش ضخامت در محدوده‌ی دمایی ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد و ۴۰ درجه پهنای گرمایش می‌باشد که مقداری در حدود ۱۵/۵۵٪ است. مقدار بیضوی شدن سطح مقطع لوله نیز ۸/۶۵٪ به دست آمد. از این رو این پهنای دما را به عنوان منطقه بهینه انتخاب کرده و و طول گرمایش را تغییر می‌دهیم. در واقع پس از آن که برای دو پارامتر دما و پهنای گرمایش بهترین منطقه را پیدا کردیم، سپس تأثیر پارامتر سوم یعنی طول منطقه گرمایش را برای این نقطه بهینه بر روی درصد کاهش ضخامت بررسی می‌کنیم. با توجه به ابعاد لوله و خم، طول منطقه‌ای از لوله که خم می‌شود ۱۵۶ میلی‌متر می‌باشد، از این رو طول منطقه گرمایش را در بازه‌ی میان ۱۵۰ تا ۲۴۰ میلی‌متر تغییر می‌دهیم.

در این مرحله دمای خمکاری برابر ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد و پهنای منطقه گرمایش ۴۰ درجه در نظر گرفته شده است و تنها پارامتر متغیر طول منطقه گرمایش می‌باشد.



شکل ۱۵: درصد کاهش ضخامت نیمه بیرونی خم بر حسب دما در پهنای گرمایش مختلف



شکل ۱۶: درصد کاهش ضخامت نیمه بیرونی خم بر حسب پهنای منطقه گرمایش در دماهای مختلف

جدول ۵: خلاصه نتایج به دست آمده

	درصد کاهش ضخامت	درصد بیضوی شدن
خمکاری سرد	20 %	20.9 %
خمکاری گرم 1150 °C - 40° - 240 mm	15.04 %	7 %
استاندارد	15 %	8 %

مراجع

- [1] Kosmac, A., Brussels., 2012, *bending stainless steel tube-design benefits in engineering and architecture, first edition, Materials and applications series, Vol. 15, Euro Inox.*
- [2] N. C. Tang, "Plastic-deformation analysis in tube bending", *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 77, 751-759, 2000.
- [3] Y. He, L. Heng, Z. Zhiyong, Z. Mei, L. Jing, L. Guangjun, "Advances and Trends on Tube Bending Forming Technologies", *Chinese Journal of Aeronautics* 25, 1-12, 2012.
- [4] H. Yang, Y. Lin, "Wrinkling analysis for forming limit of tube bending processes", *Journal of Materials Processing Technology* 152, 363-369, 2004.
- [5] F. Guarracino, "On the analysis of cylindrical tubes under flexure: theoretical formulations, experimental data and finite element analyses", *Thin-Walled Structures* 41, 127-147, 2003.
- [6] W. Zu-tang, H. Zhong, "Theory of Pipe-Bending to a Small Bend Radius Using Induction Heating", *Journal of Materials Processing Technology* 21, 275-284, 1990.
- [7] Z. Hu, J. Q. Li, "Computer Simulation of Pipe-Bending Processes with Small Bending Radius Local Induction Heating", *Journal of Materials Processing Technology* 91, 75-79, 1999.
- [8] Mohindar L. Nayyar. P.E.-7th ed. "PIPING HANDBOOK", McGraw-Hill, 2002.
- [9] ASME B31.1 Code "ASME Code for Pressure Piping, B31, ASME B31,1-2001"
- [10] VGB, Directives for construction and inspection of high capacity steam boilers, VGB-R 501 He, 7th edition, pp.24-33.
- [11] "Mandrel Nose Placement Calculator," 2010. [Online]. Available: www.bendtooling.com.
- [12] Metals Handbook, "Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys," ASM International 10th Ed. 1990.
- [13] A Designer's Handbook, "High Temperature Characteristics of Stainless Steels", American Iron and Steel Institute.
- [14] Metals Handbook, "Properties and Selection: Nonferrous, Alloys and Pure Metals," ASM International 10th Ed. 1990.
- [15] "Friction Coefficients," [Online]. Available: www.engineershandbook.com.

در مدت زمان‌های ۳۰، ۸۰، ۱۳۰ و ۱۸۰ ثانیه به دمای ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد می‌رسانیم و کاهش ضخامت نیمه بیرونی را اندازه می‌گیریم. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که شار حرارتی پایین‌تر و زمان بیشتر گرمایش کیفیت خم بهتری را از نظر کاهش ضخامت و به خصوص حد بیضوی شدن به دست می‌دهد. اما باید به این نکته توجه داشت که در عمل گرم‌کاری یک لوله به مدت ۲ یا ۳ دقیقه برای اپراتور زیاد بوده و دقت انجام کار بعد از گرم‌کاری چند لوله کاهش می‌یابد، ضمن آن‌که تغییرات درصد کاهش ضخامت به اندازه‌ای نیست که توجیه اقتصادی داشته باشد. جدول ۴ مقادیر به دست آمده از تغییرات این پارامتر را نشان می‌دهد.

جدول ۴: تأثیر گستردگی دما در لوله بر روی کیفیت خم

توزیع گستردگی دما	مدت زمان گرمایش	بیشترین دمای قسمت بیرونی خم	درصد کاهش ضخامت	درصد بیضوی شدن
↓	30 s	50 °C	15.4 %	8.9 %
	80 s	100 °C	15.04 %	7 %
	130 s	250 °C	15.0 %	6.2 %
	180 s	400 °C	14.9 %	5.5 %

۵- نتیجه گیری

در این مقاله سعی شد تا با شبیه‌سازی فرایند خمکاری گرم لوله‌های سوپرهایتر بهترین پارامترها جهت دستیابی به کیفیت خم بالاتر یافته شود. این فرایند در کارگاه شامل مراحل دیگری از جمله تنظیم مجدد زاویه و تنظیم مجدد بیضوی شدن سطح مقطع می‌باشد که در این جا از شبیه‌سازی آن‌ها خودداری شد. بنابراین درصدهای به دست آمده جنبه‌ی مقایسه‌ای داشته و در واقعیت ممکن است کمی متفاوت باشد. اما با انجام خمکاری گرم با پارامترهای ذکر شده می‌توان درصد کاهش ضخامت و بیضوی شدن سطح مقطع را تا حد مجاز استاندارد کاهش داد. به طور خلاصه می‌توان گفت بهترین دمای خمکاری ۱۱۵۰ درجه سانتیگراد بوده و بهترین پهناى گرمایش نیز ۴۰ درجه می‌باشد. برای طول گرمایش نیز مقداری بیش از ۲۲۰ میلی‌متر توصیه می‌شود. مدت زمان گرمایش نیز باید با توجه به پارامترهای شعله توسط اپراتور تنظیم شود به نحوی که دمای قسمت بیرونی خم حداقل ۱۰۰ درجه سانتیگراد باشد. ضمن آن‌که فاصله‌ی میان پایان گرم‌کاری و شروع خمکاری تا حد امکان باید کوتاه باشد تا دمای لوله افت نکند. خلاصه نتایج در جدول ۵ آورده شده است.