

## بررسی تاثیر فرایندهای هایدروتست و کوئنچینگ لوله‌های API 5L-X70 بر روی تنشهای پسماند حاصل از جوشکاری زیرپودری به کمک روش اجزای محدود

علی حیدری\*، محمدرضا فروزان\*\* و سید علیرضا طباطبایی\*\*\*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

شرکت لوله و تجهیزات سدید، تهران

(دریافت مقاله: ۸۶/۱۱/۱۴ - دریافت نسخه نهایی: ۸۷/۲/۲۵)

**چکیده** - در این تحقیق اثر سه مورد از مهمترین عملیاتهای تکمیلی بر روی لوله‌های درزدار قطور مورد استفاده در انتقال نفت و گاز بر تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری زیر پودری مطالعه شده است. بدین منظور از برنامه‌نویسی پارامتری در محیط نرم‌افزار ANSYS در تحلیل غیر خطی مکانیکی-گرمايي و در شرایطی که جسم از قبل حاوی تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری است بهره برده شده است. این عملیات عبارت‌اند از اعمال فشار داخلی به لوله که به هایدروتست معروف است، کوئنچینگ به کمک گرما دهی توسط حلقه القایی خارجی که به کوئنچینگ به روش هوش شناخته می‌شود و کوئنچینگ همزمان با جوشکاری که روشی بسیار اقتصادی است. از جمله جنبه‌های نو در این تحقیق بررسی فرایندهای مذکور برای لوله‌های API 5L-X70 و مقایسه همزمان آنها است. به علاوه شبیه‌سازی فرایندهای کوئنچینگ مذکور به روش اجزای محدود تاکنون سابقه‌ای نداشته، ضمن آنکه در این تحقیق برای اولین بار اثر ترکیب این فرایندها با هایدروتست نیز ارائه شده است. نتایج شبیه‌سازیها به کمک مقایسه کیفی با دستاوردهای تجربی یافت شده در دیگر مراجع اعتبار سنجی شده است..

**واژگان کلیدی:** هایدروتست، کوئنچینگ، جوشکاری زیرپودری، روش اجزای محدود، تنش پسماند

# Effects of Hydrotest and Quenching Processes on Residual Stresses Due to SAW of API 5L-X70 Pipes Using FEM

A. Heidari, M. R. Forouzan, and S. J. Golestaneh

Department of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology  
Sadid Pipe and Equipment Co., Tehran, Iran

**Abstract:** This paper explores the effects of three of the most important post-welding processes on the residual stresses of large-diameter oil and gas pipes. The analysis is one of uncoupled thermo-mechanical applied for both 2D and 3D models of the pipe. The pipe body is assumed to be prestressed due to prior submerged arc welding of its seam. To analyze the processes, parametric programming in the ANSYS commercial software is utilized. The processes are hydrotest, quenching by Houcsh method, and quenching by the last pass heat sink welding, which is the most cost-effective technique. The processes are, respectively, performed by applying very high internal pressure to the pipe, induction heating plus spray cooling of the pipe, and cooling the weld zone simultaneously with the last pass welding. The novel aspects of the study include investigation of the above processes for API 5L-X70 pipes and application of FE analysis to simulate the quenching of pipes for both the Houcsh method and the last pass heat sink method. The effects of the processes on the residual stresses are compared. The simulations are verified qualitatively using experimental results reported in the literature.

**Keywords:** Hydrotest, Quenching, SAW, FEM, Residual stress.

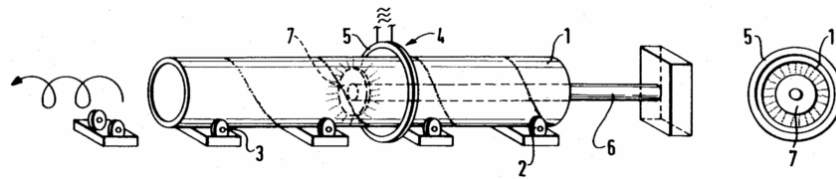
## فهرست علائم

$h_r$	ضریب انتقال گرمای معادل تشعشعی	$h_c$	ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی
$\theta$	دمای سطح جسم	$h_{eq}$	ضریب انتقال گرمای معادل جابه‌جایی-تشعشعی

## ۱- مقدمه

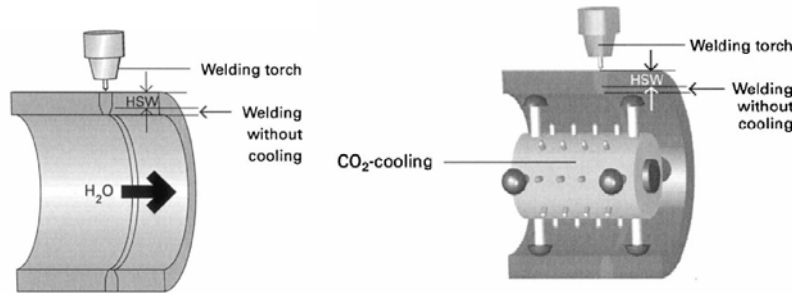
پدیده در مواردی منجر به انفجارهای سهمگین و تحمیل هزینه‌های جانی و مالی قابل توجهی شده است. معمولاً نیروهای کششی و فشاری و نیز خاصیت خوردندگی محیط، هر کدام به تنهایی اثر چندانی در تخریب فلز ندارند ولی در حالتی که نیروهای کششی و محیط خوردنده با هم عمل کنند، منجر به انهدام سریع فلز می‌شوند [۱ و ۲]. بنابراین برای جلوگیری از ترک خوردگی تنشی باید به نحوی تنشهای پسماند کششی را کاهش داد و تا حد امکان به تنشهای فشاری تبدیل کرد. راهکارهای صنعتی پیشنهاد شده برای این منظور استفاده از فرایند هایدروتست<sup>۲</sup> یا عملیات کوئنچینگ کنترل شده است. تعدادی از محققان سعی در یافتن اثر حاصل از فرایندهای تکمیلی بعد از جوش کردند. در زیر به مهمترین کارها در این زمینه پرداخته شده است. مایکلریس [۳] در سال ۱۹۹۶ نشان داد که در جوش محیطی

در سالهای اخیر با افزایش تقاضای انرژی و کاهش منابع نفتی در کشورهای نفت خیز جهان، تکنولوژی طراحی و ساخت خطوط لوله توسعه چشمگیری یافته است به طوری که امروزه از منابع نفت و گاز حاوی گاز ترش ( $H_2S$ ) که در گذشته کمتر مورد توجه بود، استفاده بیشتری می‌شود. از طرفی تولید و به کارگیری لوله‌های فولادی درزدار در خطوط انتقال نفت و گاز روند رو به رشدی را در اقصی نقاط جهان در پیش گرفته است. بنابراین گسترش تحقیقات روی این لوله‌ها امری بدیهی است. لوله‌های درز جوش مستقیم و لوله‌های اسپیرال دو روش عمده در تولید لوله‌های درزدارند. در این تحقیق لوله‌های درز جوش مستقیم مورد بررسی می‌شود. بدون شک پدیده ترک خوردگی تنشی<sup>۱</sup> از مهمترین چالشهای ایجاد شده در لوله‌های انتقال نفت و گاز است. این



شکل ۱ - کوئنچینگ به روش هوش [۹]

۱- لوله ۲- درز جوش ۳- غلتک ۴- اتصال الکتریکی ۵- القاگر ۶- جنت انتقال آب ۷- نازل پاشش آب



شکل ۲ - کوئنچینگ همزمان با جوشکاری [۱۰]

دهند. دو مورد از مهمترین پیشنهادات در این زمینه توسط هوش و انگلهارد [۹ و ۱۰] پیشنهاد شده‌اند. اختراع هوش [۹] در سال ۱۹۸۸ ارائه شد. وی برای افزایش مقاومت لوله‌های فولادی در برابر میدانهای اسیدی، استفاده از روش کوئنچینگ خاصی را پیشنهاد داد که با انجام آن، توانست در لوله‌های داخلی لوله تنش فشاری حداکثر تا ۲۰٪ تنش تسلیم ایجاد کند. این روش که در شکل (۱) نمایش داده شده است لوله‌های فولادی جوشکاری شده را قادر می‌سازد تا برای انتقال گازهای اسیدی یا نفت استفاده شوند.

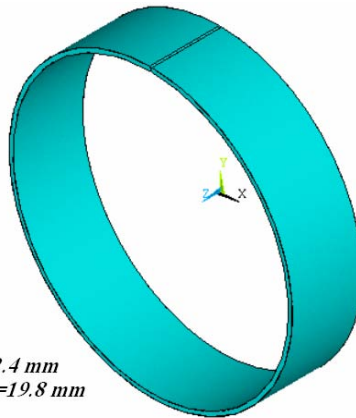
در روش انگلهارد [۱۰] که در سال ۲۰۰۰ ابداع شد مطابق آنچه در شکل (۲) نمایش داده شده کوئنچینگ همزمان با جوشکاری برای تولید تنش فشاری استفاده می‌شود. در این روش همزمان با جوش دادن پاسهای بیرونی، لوله از داخل توسط آب یا گاز CO<sub>2</sub> خنک‌کاری می‌شود.

در این تحقیق اثر فرایندهای هایدروتست و کوئنچینگ به روش هوش بر روی لوله‌های فولادی از جنس API 5L-X70 که قبلاً به صورت درز جوش مستقیم جوشکاری شده‌اند به کمک شبیه‌سازی به روش اجزای محدود بررسی شده‌است. بدین منظور

لوله، فرایند هایدروتست تنش پسماند را ۵۰ الی ۷۵ درصد کاهش می‌دهد. این اثر برای جوش درز مستقیم لوله‌ها کمتر است. از طرفی کینگرن [۴] در سال ۲۰۰۲ بیان کرد که علی‌رغم اینکه با افزایش فشار، تنش پسماند بیشتر کاهش می‌یابد ولی از طرفی باعث خرابی لوله می‌شود. در نتیجه فشاری برای هایدروتست مناسب است که بتواند تنش محیطی بین ۹۰ تا ۱۰۰ درصد کمینه تنش تسلیم در لوله ایجاد کند.

کُخ [۵] در مقاله خود نشان داده است که نمی‌توان به فرایند انبساط سرد<sup>۳</sup> و فرایند هایدروتست در لوله‌های درز جوش مستقیم و اسپیرال در خطوط پرفشار همراه با محیط خورنده اکتفا کرد، بلکه باید برای مقابله با اثرات مخرب تنش پسماند کششی به دنبال مهیا کردن شرایط مناسب برای تنش بود، یعنی کاهش تنش پسماند کششی و ایجاد تنش پسماند فشاری که این امر به کمک یک عملیات کوئنچینگ کنترل شده امکانپذیر است.

بعضی از محققان مانند چو [۶]، استرجوسکی [۷] و راوی [۸] ادعا دارند که توانسته‌اند به کمک عملیات گرمایی بعد از جوشکاری<sup>۴</sup> تنش پسماند کششی حاصل از جوش را کاهش داده، شروع ترک را به تعویق بیاورند و رشد آن را کاهش



Diameter=1422.4 mm  
Wall thickness=19.8 mm

شکل ۳ - هندسه سه بعدی مدل

جوشکاری شده با در نظر گرفتن اثر تغییر فازهای ناشی از جوشکاری بر خواص مکانیکی ماده، ارائه اثر فرایند کوئنچینگ هوش بر میدان تنشهای پسماند لوله جوشکاری شده پس از هایدروتست و ارائه میدان تنشهای پسماند لوله جوشکاری شده به روش LPHSW که همگی برای اولین بار به کمک یک روش تحلیلی صورت می پذیرد از جمله مهمترین نو آوریهای این تحقیق اند.

## ۲- خصوصیات ماده

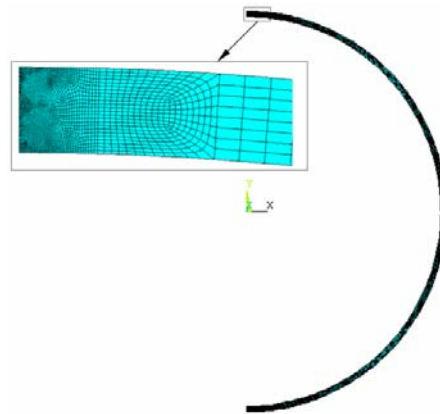
جنس لوله API 5L-X70 می باشد که خواص مربوط به این فولاد بر اساس اعلام تولید کننده تهیه شده است. خواص مکانیکی و ترموفیزیکی فولاد تابعی از دما می باشد. شکل (۵) خواص این ماده را در فاز مارتزیت تابع دما نمایش می دهد.

## ۳- مدل اجزای محدود

در این تحقیق لوله درز جوش مستقیمی با قطر خارجی ۱۴۲۲ میلیمتر و ضخامت ۱۹/۸ میلیمتر بررسی شده است. شکل (۳) هندسه سه بعدی مدل لوله به همراه دستگاه مختصات انتخاب شده را نشان می دهد. لوله به شکل X تراش داده شده و در دو مرحله ابتدا از داخل و سپس از خارج و در هر مرحله با دو سیم جوش به ترتیب DC و AC که در فاصله اندکی از هم قرار دارند به روش زیر پودری جوش داده می شود.

دانستن میدان تنش پسماند و ساختار متالورژیکی پیشنیاز تحلیل است. جزییات روش مورد استفاده در شبیه سازی فرایند جوشکاری قبلاً توسط نویسندگان منتشر شده است [۱۱ و ۱۲]. همچنین چگونگی تعیین و انتساب خواص فیزیکی و ترموفیزیکی ماده به هر المان به کمک برنامه های داخلی که در محیط نرم افزار ANSYS تهیه شده است وابسته به درصد حضور هر نوع فاز در ساختار متالورژیکی توضیح داده شده است [۱۲]. در این مقاله برای لوله ای که المان به المان آن دارای تنشهای پسماند و خواص فیزیکی متفاوت ناشی از عملیات جوشکاری درز لوله است شرایط هر یک از دو فرایند هایدروتست و کوئنچینگ هوش تشریح، مدلسازی و نتایج ناشی از اعمال هر یک بر میدان تنش پسماند ناحیه متأثر از جوشکاری به دست آمده است.

در بخش نهایی تحقیق اثر اعمال نوع خاصی از گرادیان دما ناشی از شدت بخشیدن به نرخ سرمایش ناحیه جوش تحت عنوان کوئنچینگ همزمان با جوشکاری بر روی تنشهای پسماند لوله در عملیات جوشکاری درز لوله شبیه سازی شده است و میدان تنشهای پسماند حاصله از این فرایند مورد مقایسه با مقادیر نظیر حاصله از شبیه سازی ترکیبی لوله هایی قرار گرفته است که به صورت عادی جوشکاری شده و سپس مرحله ترکیب دو فرایند هایدروتست و کوئنچینگ هوش را طی می کنند. ارائه اثر فرایند هایدروتست بر میدان تنشهای پسماند لوله



شکل ۴- المان بندی مدل دوبعدی

جدول ۱- پارامترهای فرایند کوئنچینگ به روش هوش [۹]

توان ورودی	۰/۲۵ MW
سرعت عبور لوله از میان القاگر حلقوی	۷/۵ mm / sec
پهنای القاگر حلقوی	۵ cm
پهنای جت آب	۵ cm
فاصله بین القاگر و جت آب	۵۰ cm
حجم پاشش آب	۲۰۰۰ lit / m

### ۳-۱- المان بندی و شرایط مرزی

با توجه به تقارن مسئله برای شبیه سازی هر سه فرایند، تنها نیمی از جسم در نظر گرفته شده است. نحوه المان بندی برای مدل دوبعدی در شکل (۴) نمایش داده شده است. تراکم المانی مورد استفاده در ناحیه جوشکاری باید به نحوی باشد که دقت مورد نظر در شبیه سازی فرایند جوشکاری حاصل شود. در هنگام تحلیل گرمایی برای مدل دوبعدی گرمایی از المان Plane55 و در مدل سه بعدی گرمایی از المان Solid70 استفاده شده است و در مدل مکانیکی به ترتیب از المانهای Plane42 با شرط رفتار کرنش صفحه ای و Solid45 در حلهای دو بعدی و سه بعدی استفاده شده است.

از آنجا که سه مسئله مجزا در این تحقیق شبیه سازی شده ابتدا باید توجه داشت که در کلیه موارد لوله در دمای محیط و تحت شرایط مرزی متقارن در مرزها چه از نظر گرمایی و چه از نظر مکانیکی قرار دارد. در تحلیلهای مکانیکی با محدود کردن

حرکت نقطه میانی ضخامت ورق در ناحیه جوش در راستای شعاع لوله از حرکت صلب آن جلوگیری به عمل آمده است. شرایط مرزی خاص هر فرایند به دنبال شرح داده شده است:

#### ۳-۱-۱- هایدروتست

در فرایند هایدروتست عملیات گرمایی جدیدی صورت نمی گیرید و تنها یک شرط مرزی مکانیکی فشار ثابت بر سطح داخلی جسم اعمال می شود. هرچند ظاهراً این فشار نمی تواند لوله را تسلیم کند اما به دلیل وجود تنشهای پسماند ناشی از جوشکاری لوله در برخی نواحی تسلیم می شود لذا لازم است تحلیل به صورت غیر خطی انجام پذیرد.

#### ۳-۱-۲- کوئنچینگ هوش

جدول (۱) به طور دقیق شرایط مرزی گرمایی اعمالی در این فرایند را مشخص می کند. ابتدا در مساحتی از سطح بیرونی

لوله به پهنای القاگر و محیط خارجی لوله توان ۰/۲۵ MW باشدت یکنواخت به لوله اعمال می‌شود. چون در مدل اجزای محدود لوله ثابت فرض می‌شود با توجه به سرعت لوله، ناحیه اعمال گرما وابسته به زمان حرکت می‌کند. در فاصله ۰/۵ متر پس از القاگر در ناحیه‌ای به پهنای نازل جت آب و محیط داخلی لوله شرط مرزی جابه‌جایی همراه با جوشش ذرات آب ضریب جابه‌جایی قابل توجه  $h = 5760 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  را ایجاد می‌کند [۱۴]. این ناحیه نیز در مدل اجزای محدود با سرعت لوله حرکت می‌کند چرا که لوله در مدل ثابت فرض شده است. در بقیه نقاط شرط مرزی جابه‌جایی وابسته به دما بر اساس رابطه زیر اعمال شده است:

$$h_{eq} = h_c + h_r = 10 + 0.06\theta \text{ Wm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

که در آن ضریب انتقال گرما معادل ( $h_{eq}$ ) حاصل جمع ضریب انتقال گرما جابه‌جایی ( $h_c$ ) و تشعشعی ( $h_r$ ) و  $\theta$  دمای سطح جسم است. از آنجایی که پس از تکمیل فرایند جوش زیر پودری و قبل از انجام هایدروتست و کوئنچینگ گل جوش از روی آن زدوده می‌شود، رابطه (۱) حتی برای گرده جوش نیز معتبر است. تحلیل مکانیکی این فرایند هیچگونه بارگذاری جدیدی به جز اعمال تاریخچه گرمایی محاسبه شده در بخش گرمایی ندارد. کلیه شرایط مرزی گرمایی وابسته به دما نیاز به برنامه‌های داخلی مجزا دارند.

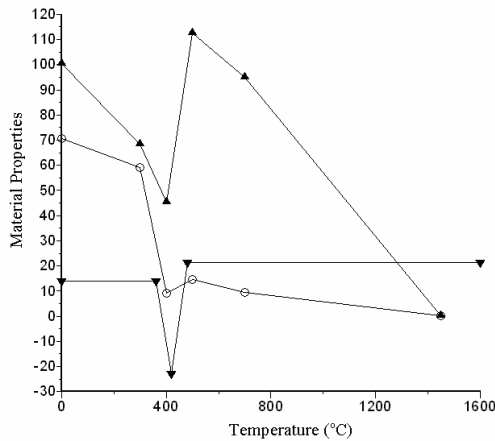
### ۳-۱-۳- کوئنچینگ همزمان با جوشکاری

شرایط مرزی در این بخش دقیقاً مشابه با شرایط مرزی فرایند جوشکاری زیرپودری است با این تفاوت که از آنجایی که در داخل لوله آب حرکت می‌کند کلیه نقاط داخلی دارای ضریب جابه‌جایی  $h = 1600 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  بوده و البته با آبی به دمای محیط تبادل حرارت می‌کنند [۱۴]. این جریان آب وظیفه کوئنچ همزمان با جوش را به عهده دارد. در این بخش به جز توزیع گرمای دویضوی گلداک که با سرعت جوشکاری حرکت می‌کند نیازی به برنامه‌های داخلی جابه‌جایی شرایط مرزی گرمایی نیست. تحلیل مکانیکی این فرایند نیز بر اساس

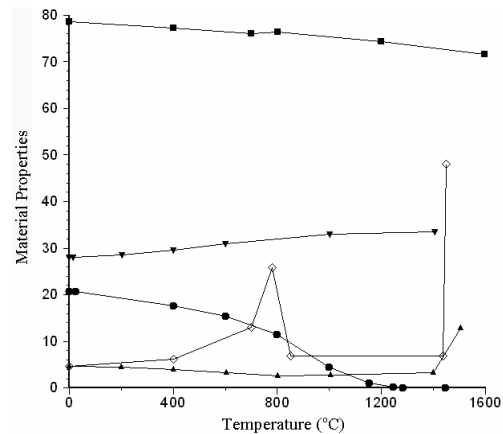
تاریخچه بارگذاری ناشی از گرما محاسبه شده در تحلیل گرمایی مربوطه تعیین می‌شود.

### ۳-۲- اثر استحاله‌های فازی

تغییر حجم ماده در دمای استحاله به عنوان یکی از منابع اساسی و مهم ایجاد تنش پسماند در قطعه است. به عنوان مثال در اثر استحاله فازی و تبدیل کامل آستنیت به مارتنزیت، هر المان افزایش حجمی تقریباً برابر ۴/۶ درصد و برای تبدیل کامل آستنیت به پرلیت، هر المان افزایش حجمی تقریباً برابر با ۰/۷ درصد خواهد داشت. با توجه به کم بودن افزایش حجم استحاله آستنیت به پرلیت، می‌توان در یافت که چرا در بسیاری از تحقیقات گذشته از اثر تغییر فاز صرف‌نظر شده است [۳]. اما در فرایند LPHSW به دلیل افزایش نرخ سرمایش بخش قابل توجه‌ای از ماده به فاز مارتنزیت استحاله می‌یابد، لذا تعیین میدان فازهای تشکیل شده بسیار ضروری است. این امر به کمک یک کد داخلی که تحت نرم افزار ANSYS عمل می‌کند محقق می‌شود. اساس این کد اخذ تاریخچه دمایی از تحلیل غیر کوپل گرمایی و مقایسه آن با منحنیهای CCT فولاد مورد نظر است. برای اعمال افزایش حجمهای ناشی از استحاله مارتنزیتی به المانها می‌توان در بازه دمایی استحاله ضریب انبساط گرما معادل جسم را به نحوی تعیین کرد که کل میزان کرنش جسم معادل کل کرنش انقباضی ناشی از سرد شدن و کرنش انبساطی ناشی از افزایش حجم باشد. بدین معنی که در فرایند سرد شدن قطعه، بارسیدن دمای المان به دمای آغاز استحاله مارتنزیتی با وجود کاهش تدریجی دمای قطعه به دلیل منفی بودن ضریب انبساط گرمایی جسم، حجم المان افزایش می‌یابد. با رسیدن دمای المان به دمای پایان استحاله ضریب انبساط گرمایی به مقدار مثبت و واقعی خود می‌رسد و روند افزایش حجم المان متوقف می‌شود و با ادامه سرد شدن جسم، حجم المان کاهش می‌یابد. علاوه بر ضریب انبساط خطی این معادل سازی باید برای کلیه خواص ماده انجام گیرد. به عنوان نمونه در شکل (۵) خواص مورد استفاده برای استحاله مارتنزیتی تصویر شده است.



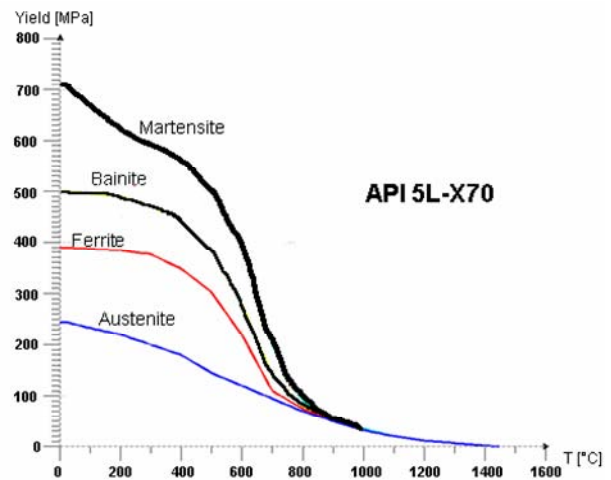
Symbol	Material Properties	Unit
○ -- $\sigma_y$	Yield stress	$\times 10^7$ Pa
▲ -- $E_T$	Plastic modulus	$\times 10^7$ Pa
▼ -- $\alpha$	Thermal expansion	$\mu\text{m} / \text{m}^\circ\text{C}$



Symbol	Material Properties	Unit
● -- E	Young 's modulus	$\times 10^{10}$ Pa
▲ -- k	Conductivity	$\times 10\text{W} / \text{m}^\circ\text{C}$
◇ -- c	Specific heat	$\times 10^2$ J / Kg $^\circ\text{C}$
■ -- $\rho$	Density	$\times 10^2$ Kg / m <sup>3</sup>
▼ -- $\nu$	Poisson 's ratio	m / m

شکل ۵- خواص مکانیکی و ترموفیزیکی فولاد X70 [۱۳]

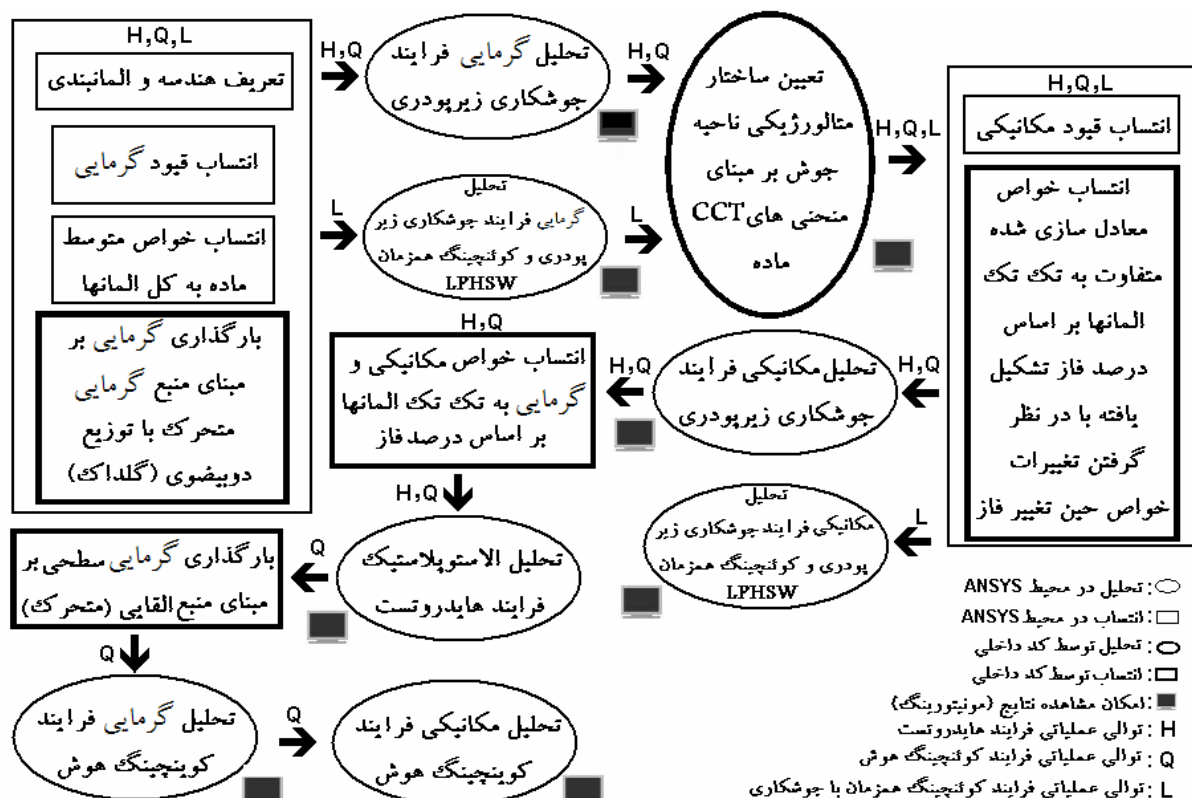
متفاوت و تاثیر آن بر رژیم تشکیل نواحی پلاستیک است. شکل (۶) تنش تسلیم ماده در فازهای متفاوت را به ازای دماهای مختلف نشان می‌دهد. توجه کنید که اختلاف تنش تسلیم در شکل‌های (۵) و (۶) از تاثیر معادل سازی اثر پلاستیسیته استحاله‌ای بر تسلیم ماده نشأت می‌گیرد. لذا در شروع مرحله شبیه‌سازی فرایندهای هایدروتست و کوئنچینگ هوش به دلیل آنکه در فرایندهای مذکور استحاله فازی مطرح نیست یک برنامه داخلی، المان به المان خواص ماده را بر اساس درصد حضور هر فاز تعیین و به عنوان خاصیت جدید جایگزین خواص معادل مورد استفاده در تحلیل فرایند جوشکاری می‌کند. شکل (۷) مراحل تحلیل اجزای محدود و فرضیات هر بخش را به اختصار مشخص می‌کند. در این شکل بلوکهای مستطیلی کار انتساب خواص و تعریف مسئله را به عهده دارند در حالی که در بلوکهای بیضی شکل محاسبات هر بخش به انجام می‌رسد. عملیاتی که در محیط نرم افزار ANSYS محقق شده در بلوکهای کم ضخامت و عملیاتی که نیاز به کد داخلی مجزا دارند در بلوکهای ضخیمتر نمایش داده



شکل ۶- تنش تسلیم فولاد X70 در فازهای مختلف

وابسته به دما [۱۳]

علاوه بر فرایند LPHSW که در آن تعیین میدان ساختار تشکیل شده در ماده بسیار حائز اهمیت است در تحلیل فرایندهای ترکیبی هایدروتست و کوئنچینگ هوش نیز اهمیت تعیین این میدان بیشتر از تحلیل‌های متعارف جوشکاری است. علت این امر تغییرات قابل توجه خواص ماده در فازهای



شکل ۷- توالی محاسبات در تحلیل اجزای محدود فرایندهای جوشکاری زیر پودری با کوئنچینگ همزمان (L)، هایدروتست (H) و کوئنچینگ هوش (Q)

شکلهای (۸) و (۹) تنشهای پسماند عرضی و طولی بر روی سطح داخلی بر حسب فاصله محیطی از مرکز جوش را بعد از انجام هر سه فرایند جوشکاری، هایدروتست و کوئنچینگ به روش هوش نمایش می دهد. نتایج مشابه مربوط به سطح خارجی در شکلهای (۱۰) و (۱۱) آمده است.

همان طور که در این شکلهای ملاحظه می شود تأثیر فرایند هایدروتست بر روی تنشهای پسماند عرضی چشمگیر است. به طوری که تنش بیشینه عرضی ۶۱ درصد کاهش یافته است. این تأثیر بر روی تنشهای پسماند طولی کمتر است. در ناحیه گرده جوش یعنی جایی که ماکزیمم تنش پسماند طولی در آن اتفاق می افتد، کرنش محیطی به دلیل برجستگی اثر نکرده و کاهش اندکی مشاهده می شود. البته هر چند بیشینه تنش پسماند طولی ۰/۸ درصد کاهش یافته است ولی بیشینه تنش پسماند در ناحیه متأثر از جوشکاری<sup>۵</sup>، ۲۵ درصد کاهش یافته است.

شده اند. علامت نمایشگر (مونیتور) نشان دهنده نقاطی است که از آن می توان پاسخهای هر بخش مسئله را اعم از توزیع گرما و یا تنش دریافت کرد.

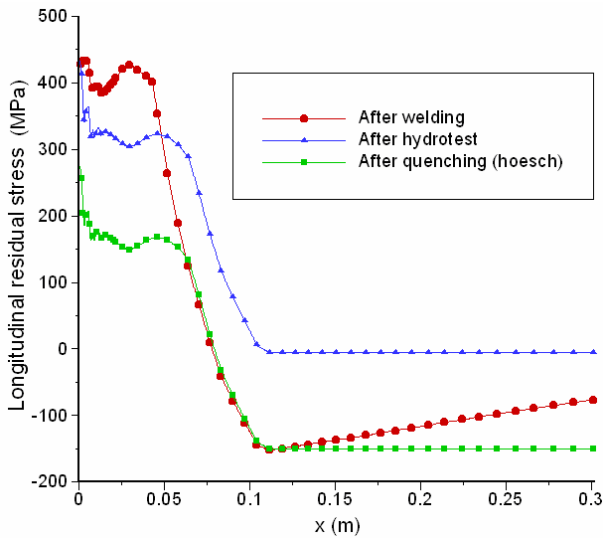
#### ۴- نتایج و بحث

##### ۴-۱- بررسی تأثیر فرایند هایدروتست و کوئنچینگ به

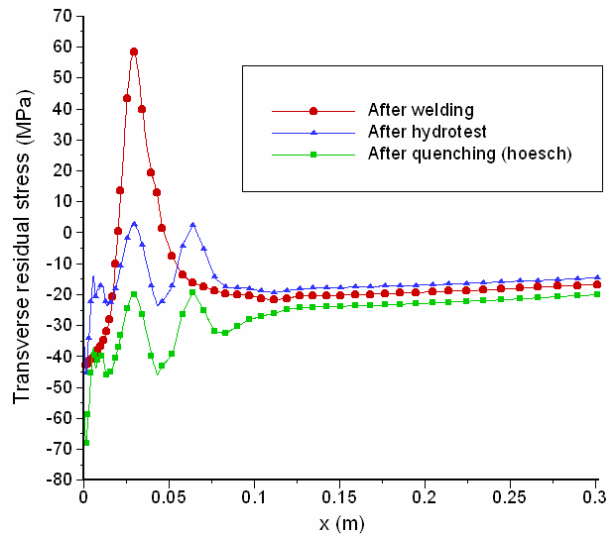
##### روش هوش بر تنشهای پسماند

فشار مناسب برای انجام فرایند هایدروتست که بتواند ۹۵ درصد کمینه تنش تسلیم را در لوله ایجاد کند برابر ۱۲۷/۸ بار است. در این تحقیق بنا بر پیشنهاد مرجع [۴] چنین فشاری به عنوان فشار هایدروتست به جداره داخلی لوله اعمال می شود. همچنین در جدول (۱) پارامترهای مربوط به فرایند کوئنچینگ به روش هوش بنابر پیشنهاد وی [۹] ذکر شده است.

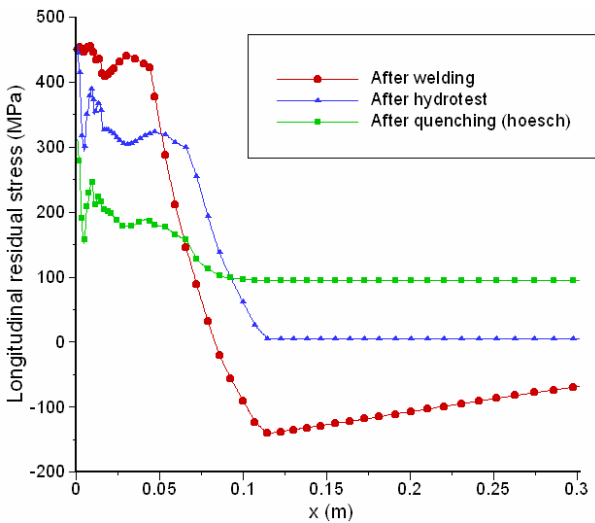




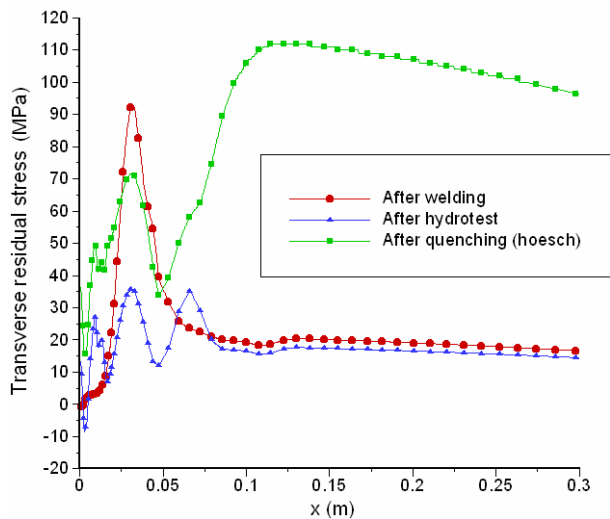
شکل ۹ - تنشهای پسماند طولی بر روی سطح داخلی بر حسب فاصله محیطی از مرکز جوش (بعد از فرایند جوشکاری، فرایند هایدروتست و فرایند کوئنچینگ به روش هوش)



شکل ۸ - تنشهای پسماند عرضی بر روی سطح داخلی بر حسب فاصله محیطی از مرکز جوش (بعد از فرایند جوشکاری، فرایند هایدروتست و فرایند کوئنچینگ به روش هوش)



شکل ۱۱ - تنشهای پسماند طولی بر روی سطح خارجی بر حسب فاصله محیطی از مرکز جوش (بعد از فرایند جوشکاری، فرایند هایدروتست و فرایند کوئنچینگ به روش هوش)



شکل ۱۰ - تنشهای پسماند عرضی بر روی سطح خارجی بر حسب فاصله محیطی از مرکز جوش (بعد از فرایند جوشکاری، فرایند هایدروتست و فرایند کوئنچینگ به روش هوش)

نتایج نشان می‌دهد که بعد از انجام کوئنچینگ به روش هوش تقریباً در دوسوم ضخامت از طرف سطح داخلی شاهد تنش پسماند عرضی فشاری هستیم. از طرفی مقادیر تنش پسماند عرضی بر روی سطح خارجی افزایش یافته است. باید

همان‌طور که مشاهده می‌شود به دلیل کرنش بیشتر در جهت محیطی نسبت به جهت طولی، فرایند هایدروتست بر روی تنشهای پسماند عرضی نسبت به تنشهای پسماند طولی بیشتر تاثیر گذاشته است.

جدول ۲- مقایسه کیفی اثر فرایندهای تکمیلی پس از جوش بر تنشهای پسماند با دیگر تحقیقات

تنش طولی سطح خارجی		تنش طولی سطح داخلی		تنش عرضی سطح خارجی		تنش عرضی سطح داخلی		کمیت	
مقدار (MP)	کاهش (%)	مقدار (MP)	کاهش (%)	مقدار (MP)	کاهش (%)	مقدار (MP)	کاهش (%)	فرایند ↓	
این تحقیق		این تحقیق		این تحقیق		این تحقیق		SAW	
دیگر مراجع	-	دیگر مراجع	-	دیگر مراجع	-	دیگر مراجع	-		
۴۴۸	۳۰	۴۴۳	۳۰	۹۳	۳۰	۶۱	۳	( <sup>۱</sup> )H	
۳۰	۳۲	۳۲۸	۲۶	۷۲	۲۳	۱۰۰	۹۵		
۱۹۶	۷۰<	۱۸۰	۵۹	۳۶	۶۱	۱۰۰>	۱۲۸	-۱۷	( <sup>۲</sup> )Q

(۱): هایدروتست، مرجع مقایسه [۳] (۲): کوئنچینگ هوش، مرجع مقایسه [۹]

کوئنچینگ و امکان کاهش ۷۰ درصدی تنشهای طولی که در این تحقیق نیز به طور کیفی تایید شد از جمله مواردی است که هوش به استناد آنها روش خود را به عنوان اختراع به ثبت رسانده است [۹]. نتایج این تحقیق با نتایج تحلیلیها و آزمایشات مایکلریس [۳] نیز نطابق دارد. وی برای لوله‌های جدار نازک که با یک پاس ۷ جوش داده می‌شوند ۵۰ تا ۷۰ درصد و برای لوله‌های ضخیمتر که با دو یا چند پاس به صورت X جوشکاری می‌شوند (مانند لوله مورد بررسی در این تحقیق) ۳۰ تا ۵۰ درصد کاهش تنش پسماند طولی در اثر انجام هایدروتست را گزارش کرده است که موید صحت کار حاضر است. خلاصه این مقایسه‌ها در جدول (۲) آورده شده است.

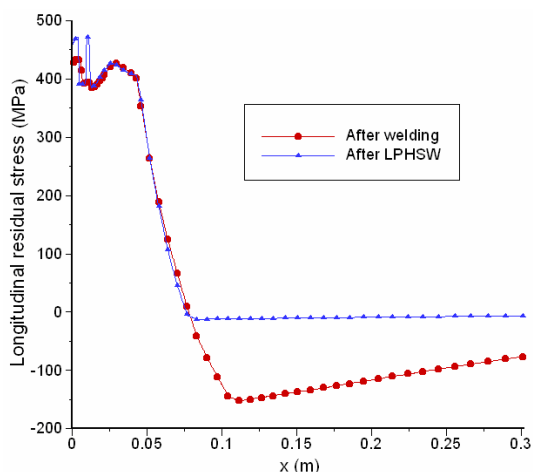
#### ۲-۴- بررسی تأثیر فرایند کوئنچینگ همزمان با

##### جوشکاری بر تنشهای پسماند

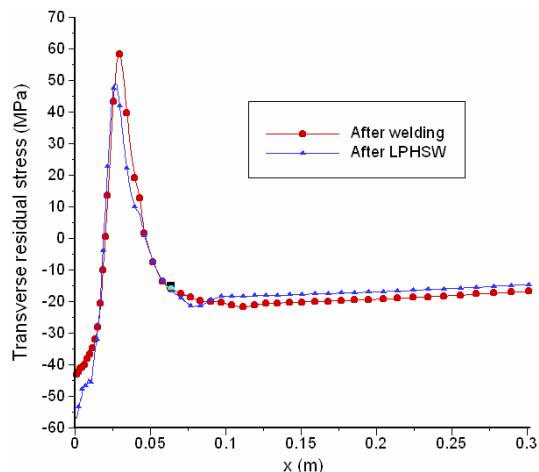
در فرایند کوئنچینگ همزمان با جوشکاری، شرایط خنک‌کاری مشابه روش هوش لحاظ شده است. با این تفاوت که در زمان جوش دادن پاسهای بیرونی خنک‌کاری صورت می‌گیرد. در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) تنشهای پسماند عرضی و طولی بر روی سطح داخلی بر حسب فاصله محیطی از مرکز جوش (x) در دو حالت جوشکاری معمولی و با کوئنچینگ همزمان مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که برای شرایط

توجه کرد که هنگامی که لوله بارگذاری نشده است، متوسط تنشهای محیطی جداره بر اساس معادله تعادل صفر است. توجه کرد که هنگامی که لوله بارگذاری نشده است، متوسط تنشهای محیطی جداره بر اساس معادله تعادل صفر است. از این رو افزایش توان در انجام فرایند کوئنچینگ به نحوی که عمق ناحیه تنش فشاری را افزایش دهد باعث تنشهای زیاد در جداره خارجی خواهد شد. این موضوع در صورتی که آمادگی وقوع خوردگی تنشی از سطح خارجی لوله وجود داشته باشد می‌تواند خطرناک باشد. با استفاده از بهینه‌سازی می‌توان تنشهای محیطی خارجی را نیز در محدوده مناسبی کنترل کرد. کاهش تنشهای پسماند طولی نیز بعد از انجام این فرایند قابل توجه است به گونه‌ای که بیشینه آن ۳۲ درصد کاهش یافته است. هر چند که بعد از فرایند هایدروتست تغییر چندانی نداشت.

هوش [۹] با انجام آزمونهای عملی بر روی لوله‌های جوشکاری شده روشهای مختلف تأثیر بر تنشهای پسماند را بررسی کرده است. هر چند جنس لوله مورد استفاده وی متفاوت با لوله مورد مطالعه در این تحقیق است اما نتایج کیفی این دو مطالعه تطابق خوبی نشان می‌دهند. به‌طور مثال امکان حذف تنشهای عرضی بر سطح خارجی ناحیه HAZ به کمک روش هایدروتست و یا امکان منفی کردن آنها به کمک روش



شکل ۱۳ - تنشهای پسماند طولی بر روی سطح داخلی بر حسب فاصله محیطی از مرکز جوش (بعد از فرایند جوشکاری و فرایند کوئنچینگ همزمان با جوشکاری)



شکل ۱۲ - تنشهای پسماند عرضی بر روی سطح داخلی بر حسب فاصله محیطی از مرکز جوش (بعد از فرایند جوشکاری و فرایند کوئنچینگ همزمان با جوشکاری)

۵. فرایند کوئنچینگ همزمان با جوشکاری تأثیر چندانی بر روی تنشهای پسماند ندارد.
۶. استفاده از فرایند کوئنچینگ به روش هوش بعد از فرایند هایدروتست شرایط بهتری را برای تنش نسبت به فرایند کوئنچینگ همزمان با جوشکاری ایجاد می‌کند.

### قدردانی

این تحقیق به طور کامل تحت حمایت شرکت لوله و تجهیزات سدید به انجام رسیده است. کلیه نمونه‌های مورد مطالعه بر مبنای اطلاعات خطوط تولید این شرکت شبیه‌سازی و همچنین اطلاعات جامع خواص مواد مورد استفاده به درخواست شرکت سدید از سوی تولید کننده آن - شرکت پوسکو<sup>۷</sup> کره جنوبی - در اختیار محققان قرار گرفته است که از همکاری کلیه عزیزان تشکر می‌شود. همچنین مراتب قدردانی گروه پژوهشی را از همکاری پروفیسور گادالا<sup>۸</sup> نسبت به موافقت در اجرا و اخذ پاسخهای نهایی در آزمایشگاه اجزای محدود و بهینه سازی<sup>۹</sup> دانشگاه بریتیش کلمبیا در ونکوور کانادا اعلام می‌دارد.

این تحقیق، فرایند کوئنچینگ همزمان با جوشکاری قادر به ایجاد تنشهای پسماند نیست هر چند که فرایند کوئنچینگ به روش هوش شرایط مناسبی را برای تنش پسماند در سطح داخلی فراهم می‌کند.

### ۵- نتیجه گیری

- برای شرایط مورد مطالعه در این تحقیق نشان داده شد که:
۱. فرایند هایدروتست بیشینه تنش پسماند عرضی را بیش از ۶۰ درصد کاهش می‌دهد.
  ۲. فرایند هایدروتست بیشینه تنش پسماند طولی در منطقه متأثر از جوشکاری را بیش از ۲۵ درصد کاهش می‌دهد. در منطقه گرده جوش به دلیل عدم نفوذ خطوط انتقال نیرو این کاهش ناچیز است.
  ۳. بعد از فرایند کوئنچینگ به روش هوش تنش پسماند عرضی تقریباً در دوسوم ضخامت از طرف داخلی فشاری می‌شود.
  ۴. فرایند کوئنچینگ به روش هوش بیشینه تنش پسماند طولی را بیش از ۵۵ درصد کاهش می‌دهد.

- |                                    |  |                                   |
|------------------------------------|--|-----------------------------------|
| 1. stress corrosion cracking (SCC) | 4. post weld heat treatment            | 7. Posco                          |
| 2. hydrotest                       | 5. heat affected zone (HAZ)            | 8. Gadala                         |
| 3. cold expanded                   | 6. last pass heat sink welding (LPHSW) | 9. FE and design optimization lab |

## مراجع

1. Contreras, A., Albitzer, A., Salazar, M., and P´erez, R., "Slow Strain Rate Corrosion and Fracture Characteristics of X-52 and X-70 Pipeline Steels," *Materials Science and Engineering*, Vol. 407, pp. 45–52, 2005.
2. Manfredi, C., and Otegui J.L. "Failures by SCC in Buried Pipelines," *Engineering Failure Analysis*, Vol.9, pp. 495–509, 2002.
3. Michaleris, P., "Residual Stress Distributions for Multipass Welds in Pressure Vessel and Piping Components," *Residual Stresses in Design Fabrication, Assessment and Repair*, ASME, PVP-Vol. 327, 1996.
4. Qingren, X., Yaorong, F., and Chunyong, H., "The Measurement and Control of Residual Stress in Spiral Sub-Merged arc Welded Pipe," 4<sup>th</sup> *International Pipeline Conference, Alberta, Canada*, 2002.
5. Koch, F.O., Peek, A., and Elfinger, F.X., "Influence of Weld Residual Stresses on the Stress Corrosion Cracking Behavior of Submerged arc Welded Pipes," *Residual Stresses Science and Technology*, Vol.2, Garmisch-partenkirchen, FRG, 1986.
6. Cho, J. R., Lee, B. Y., Moonb, Y. H., and Van Tyne, C. J., "Investigation of Residual Stress and Post Weld Heat Treatment of Multi-Pass Welds by Finite Element Method and Experiments," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 155-156, pp. 1690–1695, 2004.
7. Sterjovski, Z., Dunne, D.P., and Ambrose, S., "Evaluation of Cross-Weld Properties of Quenched and Tempered Pressure Vessel Steel Before and After PWHT," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 81, pp. 465-470, 2004.
8. Ravi, S., Balasubramaniana, V., and Nemat Nasser, S., "Influences of Post weld Heat Treatment on Fatigue Life Prediction of Strength Mis-Matched HSLA Steel Welds," *International Journal of Fatigue*, Vol. 27, pp. 547–553, 2005.
9. Hoesch, A., "Method for Making Steel Tubes or Pipes of Increased Acidic Gas Resistance," United states patent, P.N. 4721536, 1988.
10. Engelhard, G., Habip, L. M., Pellkofer, D., Schmidt, J., and Weber, J., "Optimization of Residual Welding Stresses in Austenitic Steel Piping: Prooftesting and Numerical Simulation of Welding and Postwelding Processes," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 198, pp. 141–151, 2000.
۱۱. حیدری، ع.، "شبیه سازی ترکیبی فرایندهای جوشکاری، هایدروتست و کوئنچینگ لوله ها به منظور بررسی تنشهای پسماند به کمک روش اجزای محدود،" دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۵.
۱۲. فروزان، م.ر.، حیدری، ع.، میرفتاح، ج.، نیرومند، م.ر.، و گلستانه، ج.، "شبیه سازی فرایند جوشکاری به منظور بررسی تنشهای پسماند توسط روش اجزای محدود،" مجموعه مقالات چهاردهمین کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک، اصفهان، ۱۳۸۵.
13. Forouzan, M.R., and Choo, W.Y., personal conversation.
14. Kaviany, M., *Principles of Heat Transfer*, Wiley-IEEE, 2001