

دانشگاه بیرجند  
دانشکده مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک ( طراحی کاربردی)

تعیین تجربی چقرمگی شکست درز جوش فولاد ترمومکانیکال API X65

نگارش:

علی فرهی

استاد راهنما:

دکتر سید حجت هاشمی

تابستان ۱۳۹۱

## چکیده

ارزیابی مقدار چقرمگی شکست به عنوان مقاومت ماده در برابر شروع و گسترش ترک در درز جوش لوله های انتقال گاز برای مهندسين و طراحان به دليل شرايط بحراني منطقه جوش بسيار حائز اهميت است. در تحقيق حاضر سعی بر آن است با روشی تجربی، انجام آزمون خمش سه نقطه ای بر اساس آزمون چند نمونه‌ای استاندارد ASTM و روش حل المان محدود به کمک نرم افزار ABAQUS تخمینی از چقرمگی شکست درز جوش ماریپیچ لوله API X65 به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین انواع لوله‌های انتقال گاز در ایران، برآورد شود. روش تجربی انجام شده در تحقیق حاضر شامل دو روش تعیین چقرمگی مواد نرم است. یک روش بر اساس محاسبه گشودگی بحرانی دهانه ترک (CTOD) و روش دیگر محاسبه  $J_{IC}$  است. بر این اساس مقدار CTOD برآورد شده  $0.23$  mm و مقدار  $K_{IC}$  معادل آن  $265$  MPa $\sqrt{m}$  اندازه گیری می شود. همچنین  $J_{IC}$  مقدار  $302$  kJ/m $^2$  و  $K_{IC}$  معادل آن  $289$  MPa $\sqrt{m}$  محاسبه می شود. روش المان محدود نیز با استفاده از تئوری اصلاح شده گرسون (GTN) انجام می پذیرد. بدلیل وجود تنش پسماند در جوش، مقادیر چقرمگی شکست حاصل از داده های تجربی به طور قابل ملاحظه ای پایین تر از نرم افزار بدست می آید. این تفاوت با در نظر گرفتن ماهیت تنش پسماند کششی قابل توجیه است.

**کلیدواژه‌ها:** لوله با درز جوش ماریپیچ، چقرمگی شکست، فولاد APIX65، شکست نرم، لوله انتقال گاز، مدل حل GTN

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
ه.....	فهرست علایم و نشانه‌ها .....
ز.....	فهرست جدول‌ها .....
ط.....	فهرست شکل‌ها .....

### فصل اول: مقدمه

۲.....	۱-۱- تاریخچه صنعت گاز طبیعی .....
۳.....	۱-۱-۱- گاز در ایران .....
۳.....	۲-۱- انتقال گاز طبیعی .....
۴.....	۱-۲-۱- سیستم گردآوری .....
۴.....	۲-۲-۱- سیستم انتقال شهری .....
۴.....	۳-۲-۱- سیستم توزیع .....
۴.....	۳-۱- توضیحی بر لوله‌های اسپیرال یا مارپیچی .....
۴.....	۱-۳-۱- تاریخچه .....
۴.....	۲-۳-۱- فرآیند ساخت .....
۵.....	۳-۳-۱- مزایای لوله‌های اسپیرال .....
۶.....	۴-۳-۱- معایب لوله‌های اسپیرال فولادی و نحوه پیشگیری از آن .....
۶.....	۵-۳-۱- مقایسه لوله‌های اسپیرال با لوله‌های درزجوش .....
۷.....	۴-۱- جوشکاری زیرپودری .....
۷.....	۱-۴-۱- تاریخچه .....
۸.....	۲-۴-۱- اصول عملیات .....
۱۰.....	۳-۴-۱- مزایا و محدودیت‌ها .....
۱۱.....	۴-۴-۱- محدودیت‌های جوش زیر پودری .....
۱۱.....	۵-۴-۱- فلزات مناسب جوش زیر پودری .....
۱۱.....	۱-۵-۴-۱- فلزات بسیار مناسب .....
۱۱.....	۲-۵-۴-۱- فلزات اندکی مناسب .....
۱۱.....	۳-۵-۴-۱- فلزات نامناسب .....
۱۲.....	۶-۴-۱- جنبه‌های متالورژیک .....

- ۱۲-۱-۶-۴-۱ تغییرات ریز ساختار.....
- ۱۳-۲-۶-۴-۱ پیش گرم و پس گرم کردن.....
- ۱۳-۷-۴-۱ منابع عیوب در جوش زیر پودری.....
- ۱۴-۱-۷-۴-۱ ذوب ناقص و سرباره باقیمانده درون جوش.....
- ۱۴-۲-۷-۴-۱ ترک انقباضی.....
- ۱۵-۳-۷-۴-۱ ترک هیدروژنی.....
- ۱۶-۴-۷-۴-۱ تخلخل.....
- ۱۶-۵-۱ مبنای شکست.....
- ۱۷-۱-۵-۱ انواع شکست.....
- ۱۷-۱-۱-۵-۱ شکست نرم.....
- ۱۹-۲-۱-۵-۱ شکست ترد.....
- ۲۰-۶-۱ آزمایش های مکانیکی.....
- ۲۱-۱-۶-۱ آزمون کشش.....
- ۲۲-۲-۶-۱ آزمون ضربه.....
- ۲۳-۳-۶-۱ آزمون چقرمگی شکست.....

### فصل دوم: روش های تعیین چقرمگی شکست در حالت کرنش مسطح

- ۲۵-۱-۲ معرفی و مروری بر استانداردهای مربوطه.....
- ۲۶-۲-۲ روش های تعیین چقرمگی شکست.....
- ۲۸-۱-۲-۲ اندازه گیری چقرمگی به صورت مستقیم.....
- ۲۹-۲-۲-۲ اندازه گیری چقرمگی به صورت غیرمستقیم.....
- ۳۰-۱-۲-۲-۲ تعیین تجربی  $J_{IC}$ .....
- ۳۵-۲-۲-۲-۲ تعیین چقرمگی شکست از روی CTOD.....
- ۳۸-۳-۲-۲-۲ روش نیمه تجربی.....
- ۳۸-۴-۲-۲-۲ روش المان محدود.....

### فصل سوم: پیشینه تحقیق

- ۴۱-۱-۳ سال ۲۰۰۲.....
- ۴۲-۲-۳ سال ۲۰۰۳.....
- ۴۳-۳-۳ سال ۲۰۰۴.....
- ۴۵-۴-۳ سال ۲۰۰۸.....
- ۴۶-۵-۳ سال ۲۰۱۱.....

## فصل چهارم: ماده مورد آزمایش و تعیین نمونه آزمایشگاهی

- ۴-۱- جهات در لوله ها ..... ۵۰
- ۴-۲- خواص ماده مورد آزمایش ..... ۵۱
- ۴-۳- هندسه نمونه آزمایش ..... ۵۴
- ۴-۳-۱- نمونه خمشی با یک لبه شیار دار ..... ۵۶

## فصل پنجم: روش تحقیق

- ۵-۱- مراحل ساخت نمونه ..... ۵۹
- ۵-۱-۱- برش کاری ..... ۵۹
- ۵-۱-۲- فرزکاری و صفحه تراشی و سنگ زنی ..... ۶۱
- ۵-۱-۳- ایجاد شیار ..... ۶۲
- ۵-۲- طراحی و ساخت قیدوبند لازم برای آزمایش ..... ۶۷
- ۵-۲-۱- طراحی و ساخت قطعه ای الحاقی به قید و بند جهت اندازه گیری جابجایی قائم ..... ۷۲
- ۵-۳- انجام آزمایش ..... ۷۷

## فصل ششم : نتایج آزمایشگاهی

- ۶-۱- اندازه گیری جابجایی اعمالی و طول ترک ..... ۸۲
- ۶-۲- رسم منحنی J ..... ۸۴
- ۶-۳- رسم منحنی CTOD ..... ۸۷

## فصل هفتم: بیان نتایج و ارائه پیشنهادات

- ۷-۱- بیان نتایج ..... ۹۳
- ۷-۲- ارائه پیشنهادات ..... ۹۴

## پیوست الف: شبیه سازی کامپیوتری مسئله

- الف-۱- مقدمه ..... ۹۶
- الف-۲- مراحل شبیه سازی آزمایش خمش سه نقطه ای در نرم افزار ..... ۹۷
- الف-۲-۱- ایجاد هندسه نمونه ..... ۹۷
- الف-۲-۲- تعریف خواص ماده ..... ۹۷
- الف-۲-۳- اتصال اجزای مدل ..... ۱۰۰
- الف-۲-۴- تعیین نوع تحلیل و خروجی های لازم ..... ۱۰۰
- الف-۲-۵- تعریف تماس بین سطوح ..... ۱۰۳

الف-۲-۶- اعمال بار و شرایط مرزی ..... ۱۰۳

الف-۲-۷- مش بندی نمونه ..... ۱۰۳

الف-۲-۸- نتایج نرم افزار ..... ۱۰۳

**فهرست مراجع ..... ۱۰۸**

## فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
تغییر مکان نوک ترک (mm)	$(\delta)$ CTOD
جزء الاستیک تغییر مکان نوک ترک (mm)	$\delta_{el}$
جزء پلاستیک تغییر مکان نوک ترک (mm)	$\delta_{pl}$
تغییر مکان دهانه ترک (mm)	CMOD
تنش تسلیم (MPa)	$(\sigma_{YS}) \sigma_y$
تنش نهایی (MPa)	$(\sigma_{US}) UTS$
مدول یانگ (GPa)	E
مدول یانگ معادل (GPa)	$E'$
کرنش حقیقی	$\epsilon$
کرنش نهایی	$\epsilon_f$
ضریب پواسون	$\nu$
ضریب سختی (MPa)	K
توان سخت شوندگی	n
ضخامت نمونه (mm)	B
ضخامت بدون شیار اولیه (mm)	$b_0$
فاصله تکیه گاهی (mm)	S
طول ترک اسمی (mm)	a
طول ترک اولیه (mm)	$a_0$
رشد ترک فیزیکی (mm)	$\Delta a_p$
عرض نمونه (mm)	W
نیرو (N)	F, P
نیروی حداکثر (N)	$P_{max}$
نیروی مشروط (N)	$P_Q$
جزء پلاستیک سطح زیر نمودار نیرو بر حسب جابجایی (N.mm)	$A_{pl}$
جزء پلاستیک جابجایی نمودار بازشدگی دهانه ترک بر حسب جابجایی (mm)	$V_{pl}$

$z$	ارتفاع تیغه نگهدارنده سنجه گیره ای (mm)
$r_p$	ضریب چرخش پلاستیک
$U$	انرژی جذب شده (J/mm)
$\Delta$	جابجایی (mm)
$J$	نرخ رهایی انرژی (kJ/m <sup>2</sup> یا kPa.m)
$J_{el}$	جزء الاستیک نرخ رهایی انرژی (kJ/m <sup>2</sup> )
$J_{pl}$	جزء پلاستیک نرخ رهایی انرژی (kJ/m <sup>2</sup> )
$J_{max}$	حداکثر نرخ رهایی انرژی (kJ/m <sup>2</sup> )
$J_{IC}$	چقرمگی شکست نرم (kJ/m <sup>2</sup> )
$K$	ضریب شدت تنش (MPa√m)
$K_Q$	ضریب شدت تنش مشروط (MPa√m)
$K_{IC}$	چقرمگی شکست در حالت کرنش مسطح (MPa√m)
CVN	انرژی شارپی جذب شده (J)
$a, b$	پارامتر رابطه تجربی چقرمگی و انرژی شارپی
HV	سختی (kg/mm <sup>2</sup> )
$p$	فشار داخلی (kPa)
$t$	ضخامت لوله (mm)
$r$	شعاع داخلی لوله (mm)
$q_2, q_1$	پارامتر ماده
$\epsilon_N$	کرنش متوسط بهم پیوستن حفره‌ها
$S_N$	انحراف استاندارد توزیع حفره‌ها
$f_N$	کسر حجمی حفره‌های ناشی از هسته زایی
$f_0$	کسر حجمی اولیه حفره‌ها
$f_c$	کسر حجمی بحرانی حفره‌ها
$f_f$	کسر حجمی نهایی حفره‌ها



## فهرست جدول‌ها

صفحه

عنوان

### فصل سوم: پیشینه تحقیق

جدول ۱-۳: ترکیب شیمیایی ماده جوش	۴۲
جدول ۲-۳: شرایط جوشکاری	۴۲
جدول ۳-۳: شرایط جوشکاری	۴۴
جدول ۴-۳: خصوصیات مکانیکی ماده جوش	۴۴
جدول ۵-۳: مقادیر $K_{IC}$ و $CTOD$	۴۵
جدول ۶-۳: ترکیبات شیمیایی	۴۵
جدول ۷-۳: خصوصیات مکانیکی ماده جوش	۴۶

### فصل چهارم: ماده مورد آزمایش و تعیین نمونه آزمایشگاهی

جدول ۱-۴: ترکیبات شیمیایی ماده جوش لوله در تحقیق حاضر	۵۲
جدول ۲-۴: خواص مکانیکی ماده جوش لوله در تحقیق حاضر	۵۲

### فصل پنجم: روش تحقیق

جدول ۱-۵: ابعاد هندسی نمونه های استفاده شده	۶۷
---	----

### فصل ششم: نتایج آزمایشگاهی

جدول ۱-۶: جابجایی اعمالی بر نمونه های آزمایش	۸۲
جدول ۲-۶: رشد ترک در موقعیت های متفاوت در نمونه آزمایش ۳	۸۳
جدول ۳-۶: طول ترک در نمونه های مختلف	۸۴
جدول ۴-۶: مقادیر $J$ نمونه های آزمایش	۸۵
جدول ۵-۶: مقادیر $J_{IC}$ و $K_{IC}$ حاصل از دو دستگاه اندازه گیری متفاوت	۸۷
جدول ۶-۶: باز شدگی نوک ترک نمونه های آزمایش مختلف	۸۸
جدول ۷-۶: مقدار $K_{IC}$ حاصل از دو منحنی مقاومت	۹۰
جدول ۸-۶: مقایسه مراجع مختلف با تحقیق حاضر از لحاظ شرایط آزمایش	۹۰
جدول ۹-۶: مقایسه مقادیر $K_{IC}$ و $CTOD$ مراجع مختلف با تحقیق حاضر	۹۰
جدول ۱۰-۶: مقایسه حد نهایی تسلیم و $CTOD$ در ماده بدنه و جوش مراجع مختلف	۹۱

پیوست الف: شبیه سازی کامپیوتری مسئله

- جدول الف-۱: پارامترهای گرسون ماده جوش API X65 ..... ۹۸
- جدول الف-۲: اطلاعات پلاستیک ماده جوش API X65 ..... ۱۰۰
- جدول الف-۳: مقایسه CTOD مرجع [۲۱] و تحقیق حاضر ..... ۱۰۷

## فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

### فصل اول: مقدمه

- شکل ۱-۱: فرآیند تولید لوله های اسپیرال ..... ۵
- شکل ۲-۱: جوشکاری لوله های اسپیرال ..... ۷
- شکل ۳-۱: شماتیک جوشکاری زیر پودری ..... ۹
- شکل ۴-۱: عملیات جوشکاری زیر پودری ..... ۱۰
- شکل ۵-۱: ذوب ناقص در جوشکاری ..... ۱۴
- شکل ۶-۱: نفوذ ناقص در جوشکاری ..... ۱۴
- شکل ۷-۱: انواع مختلف ترک انقباضی ..... ۱۵
- شکل ۸-۱: انواع مختلف تخلخل در جوش ..... ۱۶
- شکل ۹-۱: فازهای مختلف شکست نرم ..... ۱۸
- شکل ۱۰-۱: سطح شکست نرم نمونه تحت بار کششی ..... ۱۹
- شکل ۱۱-۱: سطح شکست ترد نمونه تحت بار کششی ..... ۲۰
- شکل ۱۲-۱: نمودار تنش کرنش مهندسی آزمون کشش ..... ۲۲
- شکل ۱۳-۱: نمونه و دستگاه آزمون ضربه ..... ۲۳

### فصل دوم: روش های تعیین چقرمگی شکست در حالت کرنش مسطح

- شکل ۱-۲: نمودار  $K_{IC}$  بر حسب ضخامت نمونه و سطح شکست در حالات مختلف ..... ۲۷
- شکل ۲-۲: حالت های مختلف بارگذاری ..... ۲۸
- شکل ۳-۲: نمودار انواع مختلف نیرو - تغییر مکان ..... ۲۹
- شکل ۴-۲: تعریف انتگرال  $J$  حول نوک ترک ..... ۳۰
- شکل ۵-۲: نمودار نیرو - تغییر مکان در روش تک نمونه ای ..... ۳۲
- شکل ۶-۲: مساحت  $A_{pl}$ ، مساحت زیر نمودار نیرو - تغییر مکان ..... ۳۳
- شکل ۷-۲: مراحل مختلف تشکیل منحنی  $J-R$  ..... ۳۴
- شکل ۸-۲: هندسه و مشخصات Clip Gage استفاده شده در تحقیق حاضر ..... ۳۵
- شکل ۹-۲: نمودار نیرو -  $CMOD$  ..... ۳۶
- شکل ۱۰-۲: مراحل مختلف تشکیل منحنی  $\delta-R$  ..... ۳۷

شکل ۲-۱۱: تعریف CTOD برای محاسبه در نرم افزار ..... ۳۹

#### فصل سوم: پیشینه تحقیق

شکل ۳-۱: رابطه بین چقرمگی شکست و انرژی شاریبی ..... ۴۱

شکل ۳-۲: نمودار تنش پسماند بر حسب موقعیت نسبت به مرکز خط جوش ..... ۴۲

شکل ۳-۳: مقدار CTOD بر حسب فاصله از میانه جوش ..... ۴۳

شکل ۳-۴: (a) هندسه نمونه، (b) جهت نمونه نسبت به ماده جوش ..... ۴۴

شکل ۳-۵: محل استخراج نمونه ..... ۴۶

شکل ۳-۶: هندسه نمونه ..... ۴۷

شکل ۳-۷: نمودار  $\delta$ - $\Delta a$  برای عمق شیارهای مختلف ..... ۴۸

شکل ۳-۸: نمودار J- $\Delta a$  نمونه های مختلف ..... ۴۸

#### فصل چهارم: ماده مورد آزمایش و تعیین نمونه آزمایشگاهی

شکل ۴-۱: ابعاد هندسی و جهات در لوله API X65 ..... ۵۰

شکل ۴-۲: جهت بازشدگی ترک در لوله های انتقال گاز ..... ۵۱

شکل ۴-۳: تعریف جهت نمونه و تعیین جهت نمونه های آزمایش ..... ۵۱

شکل ۴-۴: شکل شیار لوله قبل از جوشکاری ..... ۵۳

شکل ۴-۵: مقطع جوش در لوله تحقیق حاضر ..... ۵۳

شکل ۴-۶: تعیین استخراج نمونه از ماده جوش لوله اسپیرال ..... ۵۴

شکل ۴-۷: شماتیک موقعیت نمونه های استخراجی نسبت به درز جوش مارپیچی در تحقیق حاضر ... ۵۴

شکل ۴-۸: هندسه های مختلف آزمون چقرمگی شکست ..... ۵۵

شکل ۴-۹: هندسه نمونه و قید و بند آزمون SENB ..... ۵۶

شکل ۴-۱۰: هندسه تعیین شده برای نمونه های آزمایشگاهی (ابعاد بر حسب میلیمتر) ..... ۵۷

#### فصل پنجم: روش تحقیق

شکل ۵-۱: خط جوش استخراج شده از بدنه لوله (خطوط سفید نشان دهنده جهت نمونه است) ..... ۵۹

شکل ۵-۲: برش فولاد بوسیله اره نواری ..... ۶۰

شکل ۵-۳: شابلون استفاده شده جهت تعیین دقیق موقعیت طول نمونه ..... ۶۰

شکل ۵-۴: قطعات ماشینکاری شده ..... ۶۱

شکل ۵-۵: دستگاه سنگ مغناطیس ..... ۶۱

شکل ۵-۶: هندسه شیار ..... ۶۲

- شکل ۷-۵: دستگاه وایر کات ..... ۶۲
- شکل ۸-۵: نقشه داده شده به دستگاه جهت انجام وایرکات ..... ۶۳
- شکل ۹-۵: هندسه های پیشنهادی تیغه در استاندارد (راست) و کاتالوگ شرکت سازنده (چپ) ..... ۶۴
- شکل ۱۰-۵: هندسه اولیه طراحی شده طبق کاتالوگ ..... ۶۴
- شکل ۱۱-۵: هندسه تیغه داخلی در استاندارد ..... ۶۵
- شکل ۱۲-۵: هندسه شیار طراحی شده ..... ۶۵
- شکل ۱۳-۵: ترکیب بندی نهایی نمونه ها بعد از انجام وایرکات جهت ایجاد تیغه داخلی ..... ۶۶
- شکل ۱۴-۵: موقعیت شیار نمونه در ناحیه جوش بعد از انجام ماکرو اچ ..... ۶۶
- شکل ۱۵-۵: وجه مقابل شیار نمونه و موقعیت مقطع جوش در آن ..... ۶۶
- شکل ۱۶-۵: ترکیب بندی چند قید و بند ..... ۶۸
- شکل ۱۷-۵: نقشه های قید و بند طراحی شده جهت ساخت آن (ابعاد بر حسب میلیمتر) ..... ۶۹
- شکل ۱۸-۵: ترکیب بندی قید و بند طراحی شده ..... ۶۹
- شکل ۱۹-۵: ترکیب بندی نهایی قید و بند ..... ۷۰
- شکل ۲۰-۵: شابلون های ساخته شده برای در مرکز قرارگیری نمونه ..... ۷۱
- شکل ۲۱-۵: قرار گیری شابلونها در قید و بند ..... ۷۱
- شکل ۲۲-۵: نمایش تغییر مکان در انتهای تیر یک سر گیردار ..... ۷۲
- شکل ۲۳-۵: هندسه قطعه الحاقی طراحی شده جهت اندازه گیری جابجایی قائم ..... ۷۳
- شکل ۲۴-۵: کرنش سنج شرکت TML استفاده شده در تحقیق حاضر ..... ۷۳
- شکل ۲۵-۵: چسباندن کرنش سنج در مرکز تیغه ..... ۷۴
- شکل ۲۶-۵: پل واتسون استفاده شده در تحقیق حاضر ..... ۷۴
- شکل ۲۷-۵: هندسه قطعه ساخته شده به همراه کرنش سنج و مدار الکترونیکی آن ..... ۷۵
- شکل ۲۸-۵: کالیبراسیون قطعه الحاقی برای اندازه گیری جابجایی قائم ..... ۷۶
- شکل ۲۹-۵: نمودار حاصل از کالیبراسیون قطعه الحاقی ..... ۷۷
- شکل ۳۰-۵: قرار گیری نمونه آزمایش و قید و بند بر روی دستگاه Zwick ..... ۷۸
- شکل ۳۱-۵: شماتیک اتصال اجزای آزمایش به یکدیگر ..... ۷۹
- شکل ۳۲-۵: نمونه آزمایش در حین انجام آزمایش ..... ۷۹
- شکل ۳۳-۵: رشد ترک در نمونه آزمایش ..... ۸۰

## فصل ششم: نتایج آزمایشگاهی

- شکل ۶-۱: نمونه های با اعمال جابجایی متفاوت ..... ۸۲
- شکل ۶-۲: سطح شکست نمونه آزمایش ۳ ..... ۸۳
- شکل ۶-۳: نمودار نیرو- جابجایی نمونه آزمایش ۳ جهت محاسبه  $A_{pl}$  ..... ۸۴
- شکل ۶-۴: نمودار نیرو - جابجایی نمونه ۳ حاصل از دو دستگاه اندازه گیری متفاوت ..... ۸۵
- شکل ۶-۵: منحنی مقاومت بر حسب  $J$  ..... ۸۶
- شکل ۶-۶: نمودار نیرو - باز شدگی دهانه شیار جهت محاسبه  $V_{pl}$  ..... ۸۷
- شکل ۶-۷: منحنی مقاومت بر حسب  $\delta$  ..... ۸۸
- شکل ۶-۸: شماتیک مراحل رشد ترک در منحنی مقاومت CTOD ..... ۸۹

### پیوست الف: شبیه سازی کامپیوتری مسئله

- شکل الف-۱: هندسه نمونه مدل شده (ابعاد بر حسب میلیمتر) ..... ۹۸
- شکل الف-۲: نمودار تنش- کرنش حقیقی ماده جوش API X65 ..... ۱۰۰
- شکل الف-۳: مش بندی نمونه مدل شده ..... ۱۰۵
- شکل الف-۴: کانتور کسر حجمی حفره ها قبل از تخریب اولین المان ..... ۱۰۵
- شکل الف-۵: کانتور تنش میزز لحظه بعد از تخریب اولین المان ..... ۱۰۶
- شکل الف-۶: نمایش وضعیت تنش سه بعدی در هنگام رشد ترک ..... ۱۰۶
- شکل الف-۷: نمودار نیرو - تغییر مکان با ۶ میلیمتر جابجایی (برای نصف نمونه مدل شده) ..... ۱۰۸
- شکل الف-۸: نمودار نیرو بر حسب جابجایی مدل GTN و روش های تجربی ..... ۱۰۸

# فصل اول

مقدمه

## ۱-۱- تاریخچه صنعت گاز طبیعی

در طول بخش اعظم قرن نوزدهم گاز طبیعی منحصر به عنوان منبع روشنایی به کار می‌رفت. در آن زمان روشی برای انتقال گاز طبیعی به منازل برای گرمایش یا کاربردهای دیگر وجود نداشت. بنابراین گاز طبیعی برای روشنایی خیابان‌های شهر بکار می‌رفت. بعد از دهه ۱۹۸۰ برق جای گاز را گرفت و در نتیجه کاربری‌های جدیدی برای گاز طبیعی مورد نیاز واقع شد.

برای یک دوره کوتاه شرکت‌های گاز رسانی سعی کردند که برای وسایل کوچک گاز سوز بازار مناسبی پیدا کنند (نظیر ابزار فر دادن مو؛ اتو و نظایر آن) که اینها هم به سرعت از رده خارج شدند. اختراع رابرت باتسن در سال ۱۸۸۵ تحت نام مشعل باتسن که هوا را با گاز طبیعی مخلوط می‌نمود با ظهور کنترل ترمواستاتیکی به مشتریان اجازه داد که از خواص حرارتی گاز طبیعی استفاده کنند.

تولید کنندگان گاز به زودی توجه خود را به خواص حرارتی گاز معطوف کردند و از آن به عنوان سوختی برای گرمایش فضا، حرارت دادن آب و پخت و پز استفاده نمودند. تا جنگ جهانی دوم بازار صنعت و نیروگاه‌های برای گاز طبیعی کوچک بود؛ اما بعد از جنگ گاز طبیعی به راحتی در دسترس قرار گرفت. تا قبل از جنگ جهانی سیستم خط لوله بین ایالات استفاده‌ای نداشت زیرا گاز اگر همراه بود سوزانده می‌شد و اگر مستقل بود در محل می‌ماند. یکی از اولین خط لوله‌های گاز طولانی در سال ۱۸۹۱ ساخته شد؛ طول آن ۱۲۰ مایل (۱۹۳ کیلومتر) بود و گاز را از ایالت ایندیانا به شیکاگو می‌برد. این خط از تقویت فشار استفاده نمی‌کرد؛ زیرا خود گاز تحت فشار بود و با فشار حدود ۵۲۵ psi به طرف مقصد حرکت می‌کرد.

توسعه شبکه‌های بزرگ انتقال گاز تا سال ۱۹۲۰ به علت کیفیت پایین خطوط لوله و عدم اتصال مطلوب قطعات خطوط لوله با کندی انجام شد. جنگ و رکود عظیم حاصل از آن احداث خطوط انتقال عمده را برای یک دهه به تعویق انداخت. به هر حال در طول سال‌های جنگ پیشرفت متالورژی، روش‌های جوشکاری و خم کردن لوله‌ها بر موانع حمل و نقل گاز غلبه کرد و این غلبه تا سال‌های ۱۹۶۰ ادامه داشت و باعث احداث هزاران مایل خط لوله در سراسر جهان گردید. همینکه سیستم انتقال و توزیع قابل اعتمادی ایجاد شد. صنایع شروع به استفاده از گاز در واحدهای ساخت و فرایند خود نمودند. سرویس‌های الکتریسیته نیز دریافتند که گاز سوخت خوبی برای بویلرهایشان می‌باشد. گاز طبیعی نیز برای گرم کردن منازل استفاده گردید.



کاربریهایی چون آبگرمکن، اجاق و خشک کن لباس هم برای گاز طبیعی فراهم شد. در امریکا صنعت گاز برای اولین بار توسط دولت فدرال و در سال ۱۹۳۸ دارای مقررات گردید.

## ۱-۱-۱- گاز در ایران

استفاده از گاز طبیعی علی‌رغم حجم زیاد و اهمیت حیاتی آن به‌عنوان یک عامل تعیین کننده و موثر در اقتصاد ما تاریخچه کوتاهی دارد.

از سال ۱۲۸۷ که اولین چاه نفت در منطقه مسجد سلیمان مورد بهره برداری قرار گرفت تا ۲۵ آذر ماه ۱۳۵۰ که پالایشگاه بید بلند رسماً افتتاح گردید مدت ۶۳ سال گازی که همراه نفت بدست می‌آمد می‌سوخت و از این رهگذر سالانه مقادیر زیادی از ثروت مملکت ما نابود می‌شد و تنها مقدار ناچیز ۳٪ آن به مصرف می‌رسید. مقدار گاز هدر رفته ظرف مدت یاد شده معادل ارزش حرارتی کل محصولات پالایشگاه آبادان در مدت ۷ سال می‌باشد. با توجه به ظرفیت پالایش نفت در آبادان (۶۵۰-۶۰۰ هزار بشکه در روز) بعد ضرر و زیان آن احساس می‌شود.

طبق محاسبات انجام شده ذخایر گاز ایران بالغ بر ۲۵۰۰ تا ۶۰۰ تریلیون فوت مکعب برآورد شده و در سطح جهان بعد از روسیه در جای دوم قرار دارد [۱].

## ۱-۲- انتقال گاز طبیعی

انتقال کارآمد و موثر گاز از مناطق تولید به مصرف‌کنندگان، نیازمند سیستم حمل و نقل گسترده و پیچیده‌ای است. از آنجایی که در بسیاری موارد، گاز طبیعی تولید شده نیازمند طی مسیر زیادی برای رسیدن به منطقه مصرف گاز است و یکی از تجهیزات مهم برای این انتقال، لوله‌های انتقال می‌باشند. لذا نیاز است در طراحی، تولید، نصب و جایگذاری، تامین و نگهداری لوله‌ها دقت و توجه ویژه‌ای صورت گیرد. سه گونه اصلی برای لوله‌های انتقال گاز وجود دارد:

- سیستم گردآوری
- سیستم انتقال بین‌شهری
- سیستم توزیع

## ۱-۲-۱ - سیستم گردآوری

این سیستم لوله‌های کم فشار با شعاع کم‌تر را شامل می‌شود که گاز طبیعی خام را از محل استخراج تا پالایشگاه منتقل می‌کنند. با توجه به اینکه در این مرحله گاز، ترش<sup>۱</sup> است لذا سیستم گردآوری باید محافظ در برابر خوردگی باشد.

## ۱-۲-۲ - سیستم انتقال شهری

این سیستم شامل شبکه‌ای است که گاز طبیعی فرآوری شده را از پالایشگاه به مناطقی که نیازمند گاز هستند، به ویژه مناطق بزرگ شهری، منتقل می‌کنند. لوله‌های انتقال بین شهری حکم بزرگراه‌ها را برای انتقال گاز دارند. گازی که در این خطوط جاری است حاوی فشار بالای ۲۰۰ تا ۱۵۰۰ پوند بر اینچ مربع (PSI) می‌باشد.

## ۱-۲-۳ - سیستم توزیع

این سیستم، مرحله پایانی انتقال گاز به مصرف‌کننده بوسیله لوله‌های کم قطر است [۲].

## ۱-۳ - توضیحی بر لوله‌های اسپیرال یا مارپیچی

### ۱-۳-۱ - تاریخچه

از اواسط دهه ۱۹۶۰ میلادی، تولید لوله‌های درزجوش مارپیچی با کیفیت مطلوب در جهان آغاز گردید. پیش از این تاریخ، فناوری تولید چنین لوله‌هایی چندان پیشرفت نکرده بود که بتواند آنها را از نظر کیفی قابل رقابت با لوله‌های درزجوش خطی (مستقیم) گرداند. البته گفتنی است که این لوله‌ها هنوز، قسمت کمتری از کل تولیدات لوله در سطح جهان را به خود اختصاص داده‌اند.

### ۱-۳-۲ - فرآیند ساخت

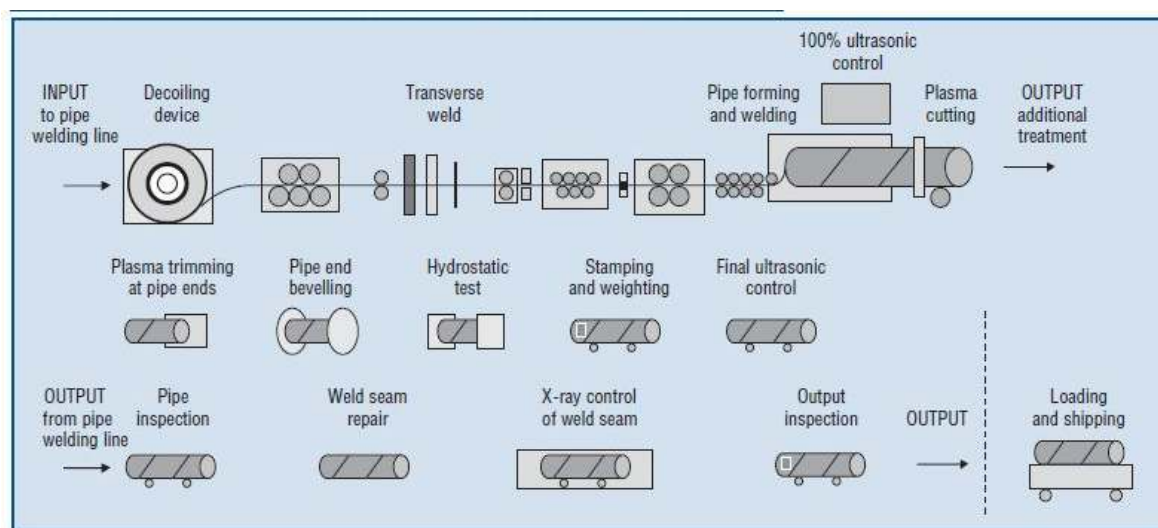
فرآیند ساخت لوله درزجوش مارپیچی فرآیندی انعطاف‌پذیر است. بدین معنی که با استفاده از ورق‌های پهنای ثابت، می‌توان لوله‌هایی با قطرهای متفاوت ساخت و یا با استفاده از ورق‌هایی با پهنای مختلف،

---

<sup>۱</sup> Sour gas

لوله‌هایی با قطر یکسان و برابر تولید نمود، در حالی که نیازی برای به‌کارگیری از ابزارهای شکل‌دهی اضافی وجود ندارد.

علاوه بر این، با افزایش زاویه شکل‌دهی، سرعت خروجی تولید لوله بیشتر می‌شود که اثر مهمی در اقتصادی بودن این فرآیند دارد. لوله‌های درزجوش مارپیچی به علت امتداد و جهات مناسب نورد ورق و درزجوش آن نسبت به جهت تنش‌های اصلی، قابلیت تحمل تنش‌های زیادی را دارند. شکل ۱-۱ مراحل مختلف تولید لوله‌های اسپیرال را نمایش می‌دهد.



شکل ۱-۱: فرآیند تولید لوله‌های اسپیرال [۳]

### ۱-۳-۳- مزایای لوله‌های اسپیرال

- ۱- در محدوده وسیعی از لحاظ قطر و ضخامت قابل تولید می‌باشند.
- ۲- شکل نهایی آنها با دقت زیاد و بدون نیاز به عملیاتی نظیر کالیبره کردن مستقیماً حاصل می‌شود و لذا، جوشکاری و نصب لوله‌ها در محل ساده‌تر است.
- ۳- توزیع تنش<sup>۱</sup> در لوله‌ها خیلی یکنواخت‌تر از لوله‌هایی با جوش طولی است. به عبارت دیگر، توزیع انرژی در اطراف جوش یکنواخت‌تر است و خواص مکانیکی یکنواخت‌تری ایجاد می‌شود و به دنبال آن مقاومت لوله در برابر شکست بیشتر می‌گردد.

<sup>۱</sup> Stress Distribution

۴- مقاومت بهتر منطقه جوش در برابر تنش حلقوی<sup>۱</sup> نسبت به لوله‌های با درز جوش طولی.

### ۱-۳-۴- معایب لوله‌های اسپیرال فولادی و نحوه پیشگیری از آن

ماهیت فرآیند تولید لوله‌های اسپیرال به گونه‌ای است که در صورت مهیا بودن مجموعه‌ای از عوامل، ترک‌های هیدروژنی بروز می‌نماید. برای جلوگیری از وقوع چنین شرایطی، می‌توان با بهسازی برخی از پارامترهای جوشکاری و مراحل از فرآیند تولید، خطر وقوع ترک‌های هیدروژنی را کاهش داده و به حداقل رساند.

کنترل میزان آلودگی پودر سرباره مصرفی و بازگشتی به منابع ذخیره، رعایت حداقل درجه حرارت پیش‌گرم برای شروع جوشکاری (در مواقع ممکن)، کنترل تمیز بودن و عدم آلودگی شیار جوش و بهره‌گیری از سیم جوش‌های مناسب (مثلاً سیم جوش‌هایی که توسط عناصر برم و تیتانیوم میکروآلیاژی شده و با استفاده از پودرهای سرباره حاوی پودر آهن اضافی و مواد نیمه قلیایی) از جمله مهم‌ترین راهکارها می‌باشد.

به هر حال، انجام دوره‌های آزمون‌های سنجش میزان هیدروژن قابل نفوذ در جوش، برای ترکیب معین از فلز پایه، سیم جوش و پودر سرباره محافظ جوش در شرایط مشابه با فرآیند واقعی تولید، همواره به‌عنوان یک معیار مطرح می‌گردد.

نتایج این آزمون می‌تواند جهت دستیابی به بهترین ترکیب از فلز پایه، سیم جوش، پودر سرباره برای ساخت لوله‌های مورد نظر با ویژگی‌های کیفی و استاندارد خواسته شده به‌کار گرفته شود.

### ۱-۳-۵- مقایسه لوله‌های اسپیرال با لوله‌های درز جوش

شواهد تجربی نشان می‌دهد که لوله‌های اسپیرال نسبت به دیگر انواع لوله در مواردی مثل استحکام استاتیکی، چقرمگی، استحکام خستگی و قابلیت جوشکاری از مزیت نسبی برخوردارند و در مقابل لوله‌های درز جوش مستقیم در ارتباط با توزیع تنش‌های پسماند که موجب خوردگی می‌گردد، برتر می‌باشند. لذا برای انتخاب هر پروژه، تصمیم در خصوص انتخاب نوع لوله باید بر اساس شرایط خاص پروژه، توانایی سازندگان لوله‌ها، شرایط فروش، تحویل و قیمت اتخاذ شود [۳]. در شکل ۱-۲ جوش اسپیرال و مراحل ساخت این لوله مشاهده می‌شود.

---

<sup>1</sup> Hoop Stress