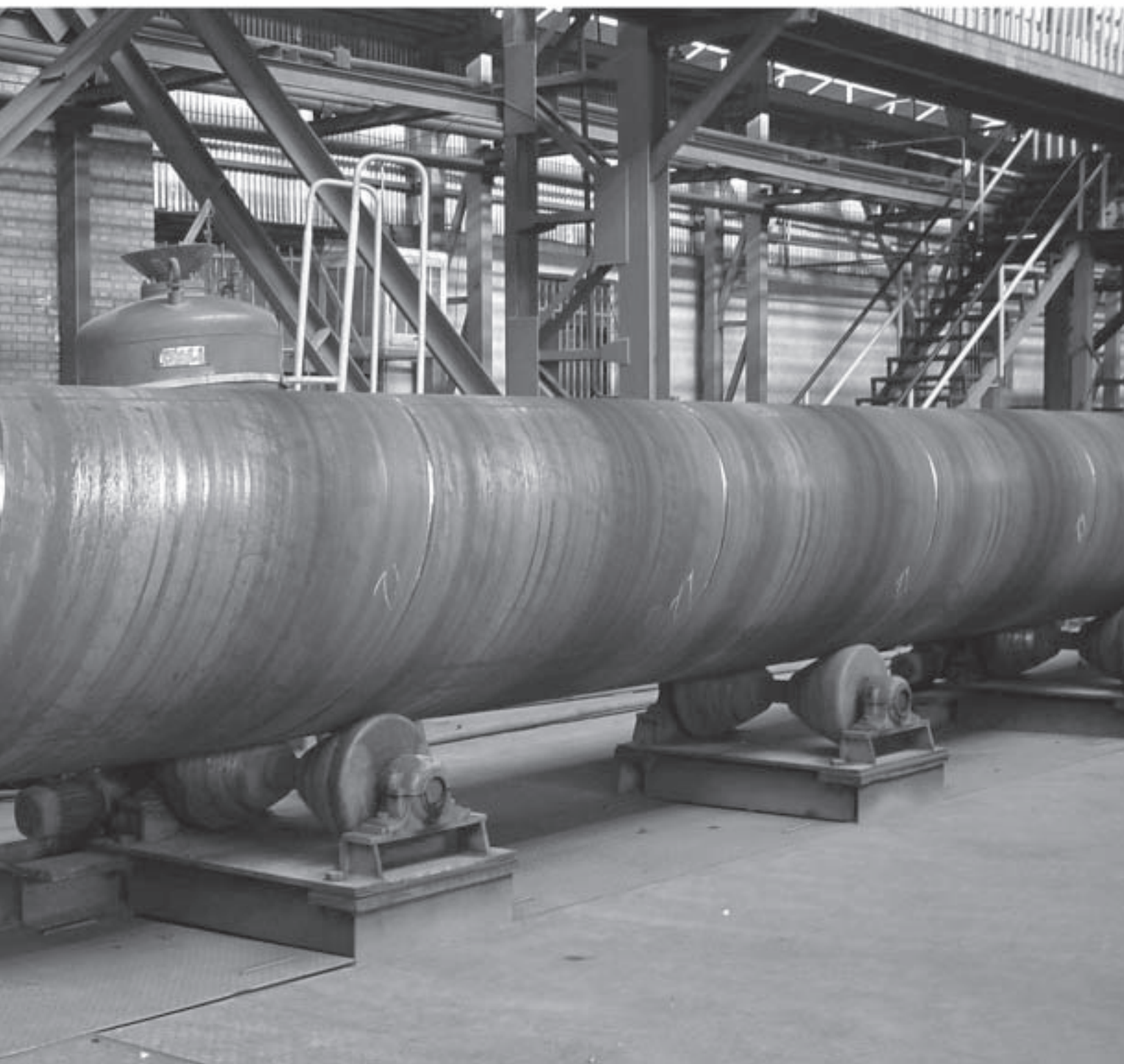


تخلیپل لوله‌های دارای خوردگی خارجی



نقاطی را که در تماس با الکترولیت قرار گرفته اند در معرض خوردگی قرار می دهد [۱].

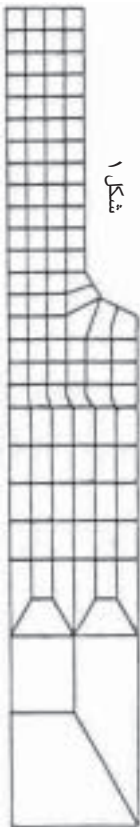
خوردگی خارجی لوله ها از مسائل بسیار با اهمیت و مخاطره انگیز در لوله ها می باشد. تلاش های صورت گرفته بر این اساس بوده که با استفاده از پوشش های مناسب از ایجاد این خوردگی ها جلوگیری شود. ولی همان طور که ذکر شد موارد زیادی پیش می آید که به دلایل گوناگون این پوشش ها از بین رفته و شکاف های طولی در لوله ها ایجاد می شود.

در همین راستا در ایالات متحده [۲،۳] و کانادا [۴] آزمایش های گوناگونی انجام شده است. در این آزمایش ها که آزمایش های انفجاری بودند شکاف های طولی خارجی با ماشینکاری روی لوله ها ایجاد شده تا به این ترتیب خوردگی شبیه سازی شود. نتایج آزمایشات نشان داده که استانداردهای موجود برای عیوب طولی مستقیم یا مارپیچی محتاطانه تر از عیوب کوچکتر عمل کرده اند. متأسفانه این امر سبب تحمیل هزینه های اقتصادی گردیده است، بنابراین مطالعاتی به منظور تعریف دقیق تر شکست در خطوط لوله با

شکاف های خوردگی خارجی طولی آغاز شد. به دلیل هزینه های سنگین آزمایش های مورد نیاز، مدل اجزای محدود برای شبیه سازی هندسی شکاف ها و رفتار شکست در لوله ها به کار گرفته شد.

۱ - مدل اجزای محدود

نرم افزار اجزای محدود به کار رفته ABAQUS [۵] می باشد که برای شبیه سازی رفتار ترکیند الاستیک - پلاستیک خط لوله دارای عیب طولی مورد استفاده قرار گرفته است. فرض عیب طولی امکان استفاده از مدل دو بعدی را فراهم کرده است.



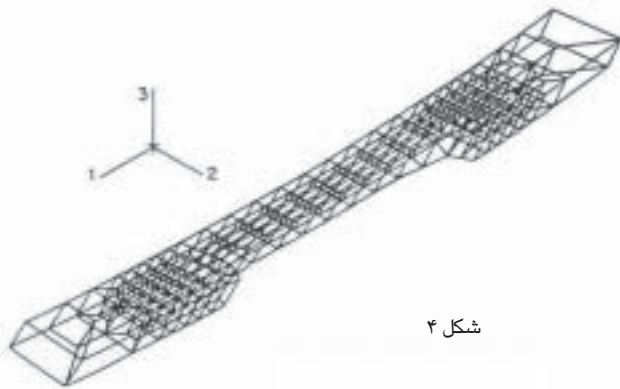
علیرغم تمهیدات زیادی که برای پوشش خارجی لوله ها در نظر گرفته می شود، به دلایل مختلف سطوح خارجی لوله ها از بین رفته و خوردگی هایی در سطوح خارجی لوله ها پدیدار می گردد. کاربرد ۱۸-AGANG یا ۱-۲۴۵-CSA برای محاسبه خوردگی خارجی خطوط لوله دارای عیوب طولی مستقیم یا عیوب طولی مارپیچ محتاطانه تر از عیوب کوتاه است. برای رفع این مشکل روش اجزای محدود به کار گرفته شد. مدل های هندسی تهیه و ماده کارسخت در نظر گرفته شد و سپس نتایج اجزای محدود با نتایج آزمون های عملی انفجار مقایسه گردید. دقت روش اجزای محدود قابل قبول و نتایج حاکی از کاهش فشار در خطوط لوله با خوردگی هایی طولی است.

مقدمه

سطوح خارجی لوله های مدفون معمولاً با انواع پوشش ها از محیط خاک جدا شده و با احداث سامانه های حفاظت کاتدی به عنوان مکمل پوشش، از خوردگی خارجی آن ها ممانعت بعمل می آید. در طراحی سامانه ها معمولاً حفاظت درصد کمی از سطوح خارجی پیش بینی می شود و با این فرض که تنها قسمت های کمی از پوشش ممکن است در عملیات مدفون نمودن آن در کانال آسیب ببیند و یا پوشش دارای خلل و فرج باشد طراحی انجام می پذیرد. بنابراین چنانچه به هر دلیل درصد بیشتری از سطح خارجی خط لوله در تماس با خاک قرار گیرد و یا شرایط طبیعی محیط مانع حفاظت آن شود این حفاظت به خوبی انجام نشده و فولاد خورده می شود. همچنین از کار افتادن سامانه های حفاظتی به دلایل مختلف از جمله قطع شدن برق، آسیب های عمدی، استهلاک طبیعی سیستم و ...

● تهیه شده توسط شورای عالی پژوهش شرکت لوله و تجهیزات سدید



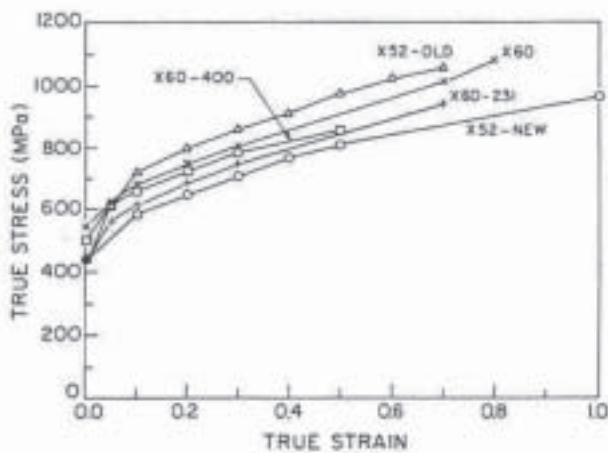


شکل ۴

محل شکاف هر حلقه بر طبق زاویه مارپیچ تغییر می کند. جابه جایی در شکاف ها در هر طرف حلقه باید مساوی باشد تا اجازه مونتاژ رینگ ها داده شود. بنابراین عیب مورب طویل می تواند توسط یک رینگ محیطی با اجزای محدود و اعمال شرایط مرزی مناسب مدل شود. مش بندی اجزای محدود عیب مورب در شکل ۴ نشان داده شده است.

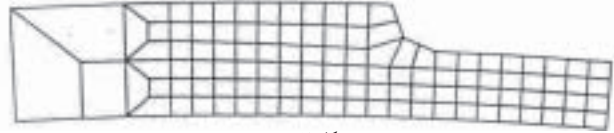
۲-۱- خواص ماده

۲۰۰ و ۰/۳ مقادیر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون در این تحلیل می باشند. بررسی نتایج آزمایش های انفجار نشان داده اند که قبل از انفجار نهایی کرنش قابل ملاحظه ای اتفاق می افتد. بنابراین رفتار ماده باید با رابطه تنش حقیقی - کرنش حقیقی مدل شود. از آنجا که این اطلاعات معمولاً برای فولادهای لوله سازی در دسترس نیست، یک سری آزمایش کشش ترتیب داده شده که در آن ها در هر دو جهت طولی و محیطی رفتار تنش حقیقی - کرنش حقیقی فولادهای مورد استفاده در صنعت لوله سازی بررسی گردیده است. نتیجه در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵

با آزمایش چندین نمونه از پنج نوع فولاد متفاوت لوله سازی این نتیجه به دست می آید که رفتار پس از تسلیم این فولادها می تواند با رابطه زیر تخمین زده شود:

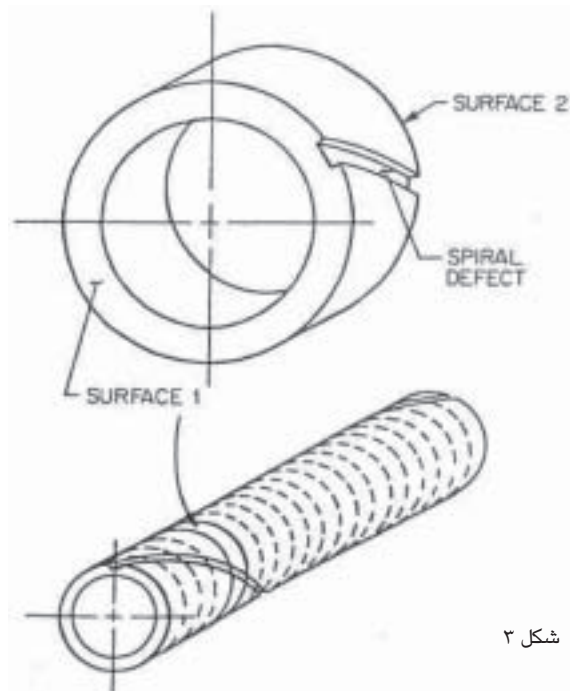


شکل ۲

۱-۱ مدل هندسی

لوله های استفاده شده در آزمایش های انفجار از جنس فولاد Grade ۴۱۴ (X۶۰) با قطر خارجی ۵۰۸ میلی متر و ضخامت متوسط دیواره ۶/۳۵ میلی متر می باشد. عیوب خوردگی شبیه سازی شده که همان شکاف های ماشینکاری شده هستند و به سه دسته زیر تقسیم می شوند:

- ۱- عیوب بازوویه مارپیچ صفر درجه، شکاف های محیطی اطراف لوله (عیوب محیطی)
 - ۲- عیوب بازوویه مارپیچ ۹۰ درجه، شکاف هایی در امتداد طول لوله (عیوب مستقیم)
 - ۳- عیوب بازوویه ها مارپیچ بین صفر تا ۹۰ درجه (عیوب مورب)
- عیوب محیطی می توانند به صورت دو بعدی و با تحلیل Axisymmetric مدل شوند. نحوه مش بندی در ضخامت دیواره در شکل یک نشان داده شده است.



شکل ۳

عیوب مستقیم به صورت دو بعدی با تحلیل کرنش صفحه ای مدل می شوند. به دلیل تقارن فقط نصف لوله مدل شده در شکل ۲ نشان داده شده است. برای عیوب مورب که زاویه مارپیچ دلخواه دارند یک تحلیل کاملاً سه بعدی مورد نیاز است، به این منظور یک نوار سه بعدی از جسم مدل می شود و به جای لوله ای با عیب مورب طویل یک سری حلقه های محیطی باریک دارای شکاف اریب به یکدیگر وصل می شوند (شکل ۳).

زاویه مارپیچ عیب مورب، طول محوری حلقه و شعاع خارجی آن است. وقتی لوله تحت فشار به صورت محدب در آمده و اصطلاحاً شکم می دهد، روابط تغییر مکان های بزرگ لازم است تا تغییرات هندسه لوله را بررسی کند.

۲- مدل شکست

تعیین زمان گسیختگی کار ساده ای نیست. مطالعات قبلی [۶] ادعا کرده اند پلاستیک شدن کامل عیب، معیاری برای گسیختگی است. این نظریه محتاطانه است زیرا تحلیل ها و آزمایشات انفجار نشان داده اند که کرنش قابل ملاحظه ای پس از پلاستیک شدن کامل و پیش از گسیختگی رخ می دهد. معیار باریک شدن (Necking) عضو دارای عیب برتر از روش قبل است، زیرا احتیاط آن قدری کمتر است. با آزمایش کشش می توان نشان داد که باریک شدن وقتی اتفاق می افتد که تنش با استحکام نهایی ماده مساوی می شود.



باریک شدن معمولاً به عنوان پیش آگهی ناپایداری و شکست نهایی شناخته می شود، وقتی کرنش زیاد باشد، ضعف در یک قسمت ماده یا وجود عیب می تواند سبب کرنش موضعی و باریک شدن شود. این باریک شدن و کاهش مساحت منجر به شدیدتر شدن کرنش موضعی و ناپایداری هندسی می گردد. از آنجا که لوله لزوماً با پیدایش باریک شدن نمی ترکد، فرضیه اخیر نیز قدری محتاطانه است و هنوز مقداری استحکام اندک در ماده لوله باقی می ماند. پس از ایجاد باریک شدن، با افزایش اندک فشار ناپایداری و شکست رخ می دهد. در شرایط واقعی کرنش پلاستیک توسط باریک شدن های موضعی و گسیختگی محدود می گردد. متأسفانه مدل اجزای محدود قادر به شبیه سازی باریک شدن های موضعی به دلیل یکنواختی رفتار ماده و هندسه کامل و یکنواخت نیست. به هر حال باریک شدن رانمی توان در این مقاله شبیه سازی کرد و فشار انفجار (گسیختگی) به عنوان فشاری در نظر گرفته می شود که در آن فشار کرنش پلاستیک مجانبی نسبت به فشار پیدا می کند.

$$\sigma_T = K \epsilon^n \quad (۱)$$

در این رابطه σ_T و ϵ تنش جریان و کرنش معادل آن هستند. K تنش جریان در کرنش ۱۰۰٪ و n ضریب سختی کرنش است. مقادیر K و n برای پنج فولاد مذکور در جدول یک نشان داده شده است.

Material		Yield Stress(MPa)	K	n
X52-new	Hoop	۲۳۰	۲۳۱.۹	۰.۱۰۴
	Longitudinal		۲۱۲.۸	۰.۱۰۱
X52-old	Hoop	۵۰۰	۹۳۵.۲	۰.۱۱۸
	Longitudinal		۱۰۳۹.۹	۰.۱۵۹
X60	Hoop	۵۲۰	۸۲۳.۳	۰.۰۹۷
	Longitudinal		۹۱۲	۰.۱۳۵
X60-231	Hoop	۲۳۰	۸۳۹.۵	۰.۱۳۵
	Longitudinal		۸۳۳.۳	۰.۱۲۸
X60-400	Hoop	۲۵۰	۸۵۲	۰.۱۱۰
	Longitudinal		۸۵۹	۰.۱۱۸

جدول ۱

در تحلیل اجزای محدود این مقاله از منحنی تنش حقیقی - کرنش حقیقی فولاد X۶۰ (۴۱۴) استفاده شده است. استحکام تسلیم ماده برابر ۵۴۰ MPa در نظر گرفته شده است. رفتار پس از تسلیم در ABAQUS با تعیین چندین نقطه روی منحنی تنش حقیقی - کرنش حقیقی تعریف گردیده است. برای مدل کردن ماده در ABAQUS از معیار تسلیم فون میزز و قانون جریان Prandtl - Reuss برای مدل پلاستیسیته ای استفاده شده است.

۱-۳- بارگذاری و شرایط مرزی

باری که در این مقاله بر روی مدل اعمال شده است فقط فشار داخلی لوله بوده که در تمام قسمت های تحلیل لحاظ گردیده است. شرایط مرزی برای عیوب محیطی و مستقیم ساده است ولی در مورد عیوب مورب قدری پیچیدگی وجود دارد. همانگونه که توضیح داده شده عیوب مورب به صورت حلقه های متصل به هم تحلیل می شوند و شرایط مرزی در آن ها به گونه ای انتخاب می گردد که این حلقه ها وقتی در لوله جای گذاری می شوند کاملاً فیت باشند. این امر نیاز به این دارد که اندازه جابه جایی های محوری و شعاعی در گره های معادل دو طرف حلقه مساوی باشند. این امر در مدل اجزای محدود قابل انجام است. درجات آزادی (یا جابه جایی ها) گره ای در دو طرف حلقه از روابط زیر به دست می آید:

$$u_2 = u_1 \cos(\Delta\theta) - v_1 \sin(\Delta\theta) \quad (۲)$$

$$w_2 = w_1 \quad (۳)$$

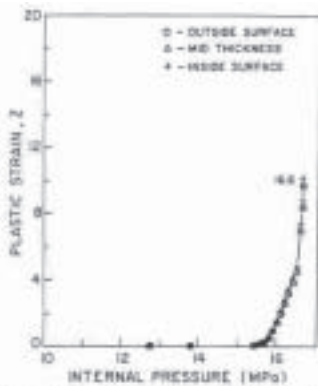
$$v_2 = u_1 \sin(\Delta\theta) + v_1 \cos(\Delta\theta) \quad (۴)$$

u و v و w جابه جایی های گره ها در جهات x و y و z هستند و اندیس های ۱ و ۲، سطوح ۱ و ۲ را که در شکل ۳ نشان داده شده است معرفی می کنند. $\Delta\theta$ یک المان بین دو گره مربوط به هم (معادل هم) بوده و از رابطه زیر بدست می آید:

$$\Delta\theta = \tan(\nu) \frac{L}{r_0} \quad (۵)$$

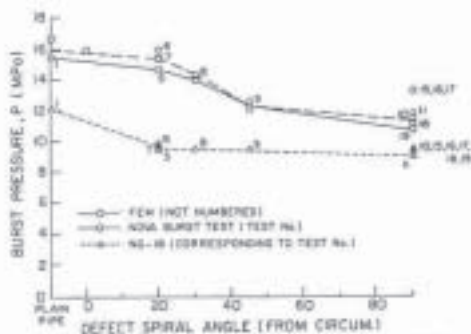
۳- بررسی نتایج و مقایسه آنها

جدول دو نتایج آزمایش های انجام شده و جدول سه نتایج شبیه سازی کامپیوتری و روش اجزای محدود را نشان می دهد.



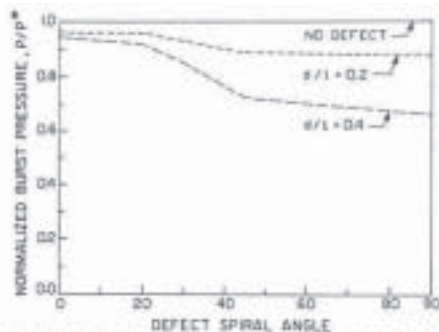
Plastic strain as a function of internal pressure for plain pipe (material: Grade 414 (X60), OD = 508 mm, $t = 6.35$ mm).

شکل ۶



Burst test summary (material: Grade 414 (X60), OD = 508 mm, $t = 6.35$ mm, $d/t = 0.40$, $W/t = 4.0$).

شکل ۷



Effect of defect depth on burst pressure (material: Grade 414 (X60), OD = 508 mm, $t = 6.35$ mm, $W/t = 4.0$).

شکل ۸

نتایج اجزای محدود نشان می دهد که فشار انفجار با افزایش زاویه مارپیچ از صفر درجه (عیب محیطی) تا ۹۰ درجه (عیب مستقیم) کاهش می یابد. این امر قابل پیش بینی بود زیرا راستای عیب مستقیم بر ماکزیم نقش محیطی عمود است. اثر عمق عیب در فشار پیش بینی شده انفجار برای زوایای عیب متفاوت برای دو عمق عیب متفاوت در شکل ۹ نشان داده شده است که در آن d عمق عیب و t ضخامت دیواره لوله است. همان گونه که انتظار می رفت عیب عمیق تر در فشار کمتری می شکند. از شکل ۹ مشخص است که اثر تغییر عمق در زوایای کمتر

Test NO	Defect description			Burst pressure Measured (Mpa)
	Spiral angle	Depth (d/t)	Width (w/t) Length (mm)	
۱	Plain pipe			۱۵,۴۴۵
۲	Plain pipe			۱۵,۲۵
۳	۰	۰.۲۷	۱۶.۱	-
	۰	۰.۲۰	۲۲	-
۴	۰	۰.۲۶	۲۲	-
	۰	۰.۵۱	۱۶.۱	-
۵	۲۰	۰.۲	۲	۱۱۱۲
۶	۲۰	۰.۲	۲	۵۵۸
۷	۲۰	۰.۲	۲	۲ ۹۵۰
۸	۳۰	۰.۲	۲	۷۶۲
۹	۴۵	۰.۲	۲	۵۳۹
۱۰	۹۰	۰.۲	۲	۳۸۱
۱۱	۹۰	۰.۲	۲	۱۰۱۶
۱۲	۹۰	۰.۵۲	۲	۹۰۰
۱۳	۹۰	۰.۵	۲	۱۰۰۰
۱۴	۹۰	۰.۲۲	۲	۹۰۰
	۹۰	۰.۵۲	۲	۱۵۲
۱۵	۹۰	۰.۲	۲	۲-۱۵۲
۱۶	۹۰	۰.۲	۲	۲-۱۵۲
۱۷	۹۰	۰.۲	۲	۲-۱۵۲
۱۸	۹۰	۰.۲	۲	۲ ۳۸۱
۱۹	۹۰	۰.۲	۲	۲ ۳۸۱
۲۰	Patch	۰.۵۳	32t to 32t	۸,۲۵
	Patch	۰.۵	16.1t to 16.1t	-

جدول ۲- نتایج آزمون های انفجار

Pipe geometry OD=508 mm Wall thickness, $t=6.35-6.50$ mm
Material X60 Steel
2-152 indicates two aligned longitudinal defects each of length 152 mm.
2||381 indicates two parallel defects each of length 381 mm.

P نشان دهنده فشار انفجار در لوله معیوب (دچار خوردگی شده) و $P \times$ فشار انفجار در لوله سالم است. همان گونه که ذکر شد اثر باریک شدن در روش اجزای محدود لحاظ نمی گردد اما باید دانست که اثر باریک شدن در لوله های معیوب و سالم یکسان است و محاسبه نسبت $P/P \times$ در روش اجزای محدود منجر به حذف خطای حذف باریک شدن می گردد.

شکل شماره ۶ نشان می دهد که کرنش پلاستیک در فشار $۱۶/۶$ MPa مجانب پیدا می کند. این فشار در روش اجزای محدود به عنوان فشار شکست در نظر گرفته می شود.

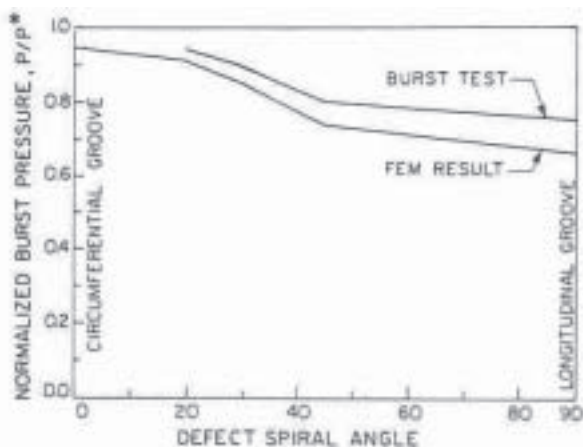
فشار پیش بینی شده برای شکست و انفجار لوله ها و نتایج تجربی آزمایش انفجار لوله ها برای عیوب با عمق یکسان در شکل ۷ نشان داده شده است. به طور کلی فشار شکست پیش بینی شده از تحلیل اجزای محدود حدود $۰/۵$ MPa با فشار واقعی شکست اختلاف دارد و این نشان می دهد که معیار شکست فرض شده رفتار بسیار خوبی را از خود نشان می دهد.

نسبت فشار بی بعد شده $P/P \times$ بر حسب زاویه مارپیچ عیب در شکل ۸ نشان داده شده است.

Case	Material Type	Defect descriptions			P/P*		
		Spiral angle	d/t	w/t	FEM	Design opt	AP/P* (%)
1	X60	Plain pipe wall (t=6.35 mm)			1.00	1.00	-
2	X60	Plain pipe wall (t=5.08 mm)			1.00	1.00	-
3	X60	Plain pipe wall (t=3.08 mm)			1.00	1.00	-
4	X60	90	0.2	4	0.44	0.54	2.08
5	X60	90	0.2	16	0.88	0.88	0.78
6	X60	90	0.2	32	0.80	0.80	0.78
7	X60	90	0.2	4	0.88	0.88	0.77
8	X60	90	0.2	8	0.84	0.84	1.08
9	X60	90	0.2	16	0.78	0.78	1.08
10	X60	90	0.2	32	0.60	0.60	-
11	X60	20	0.2	1.27	0.90	0.90	1.04
12	X60	20	0.2	4	0.84	0.84	1.05
13	X60	20	0.2	1.27	0.91	0.91	1.05
14	X60	20	0.2	4	0.88	0.88	1.04
15	X60	20	0.2	4	0.87	0.87	1.05
16	X60	45	0.2	2.87	0.86	0.86	0.77
17	X60	45	0.2	1.21	0.77	0.77	1.04
18	X60	45	0.2	2.87	0.71	0.71	1.04
19	X60	45	0.2	4	0.71	0.71	1.04
20	X60	90	0.2	4	0.80	0.80	0.80
21	X60	90	0.2	4	0.60	0.60	0.99
22	X60	90	0.2	4	0.60	0.60	0.99
23	X52-new	Plain pipe wall (t=6.35 mm)			1.00	1.00	-
24	X52-new	Plain pipe wall (t=5.08 mm)			1.00	1.00	-
25	X52-new	90	0.2	4	0.88	0.88	0.79
26	X52-new	90	0.2	4	0.60	0.60	1.07
27	X52-new	90	0.2	4	0.60	0.60	0.99
28	X52-new	90	0.2	8	0.60	0.60	0.99
29	X52-new	90	0.2	20	0.60	0.60	0.99
30	X52-new	90	0.2	32	0.60	0.60	0.89

جدول ۴- مقایسه نتایج اجزای محدود با فرمول طراحی

Pipe geometry: OD=508 mm t = 6.35 mm



شکل ۹

کاهش می یابد و در حقیقت عمق ترک درعیوب محیطی تقریباً اثری ندارد.

۴- معادلات پیشنهادی برای محاسبه فشار شکست عیوب طولی

از آنجا که تحلیل اجزای محدود الاستیک - پلاستیک برای بسیاری از لوله ها وجود ندارد در ادامه مقاله یک تکنیک محاسباتی ساده برای یافتن فشار شکست

Case	Material Type	Defect descriptions			Burst pressure	
		Spiral angle	d/t	w/t	P(MPa)	P/P*
1	X60	Plain pipe (wall thickness=6.35 mm)			18.6	1.00
2	X60	Plain pipe (wall thickness=5.08mm)			13.3	0.80
3	X60	Plain pipe (wall thickness=3.08 mm)			10	0.60
4	X60	90	0.2	4	18	0.96
5	X60	90	0.2	16	10.5	0.57
6	X60	90	0.2	32	14	0.75
7	X60	90	0.2	4	18	0.96
8	X60	90	0.2	8	10.7	0.58
9	X60	90	0.2	16	10	0.60
10	X60	90	0.2	32	10	0.60
11	X60	20	0.2	1.27	18	0.96
12	X60	20	0.2	4	10.3	0.56
13	X60	20	0.2	1.27	10.5	0.57
14	X60	20	0.2	4	10.1	0.55
15	X60	20	0.2	4	12.1	0.65
16	X60	45	0.2	2.87	12.8	0.69
17	X60	45	0.2	1.21	12.2	0.66
18	X60	45	0.2	2.87	12	0.65
19	X60	45	0.2	4	12	0.65
20	X60	90	0.2	4	12.5	0.67
21	X60	90	0.2	4	10.9	0.59
22	X60	90	0.2	4	10.9	0.59
23	X52-new	Plain pipe (wall thickness=6.35 mm)			18.6	1.00
24	X52-new	Plain pipe (wall thickness=5.08 mm)			16.6	0.90
25	X52-new	90	0.2	4	13	0.70
26	X52-new	90	0.2	4	9.8	0.53
27	X52-new	90	0.2	4	9.8	0.53
28	X52-new	90	0.2	8	9.8	0.53
29	X52-new	90	0.2	20	9.7	0.52
30	X52-new	90	0.2	32	9.7	0.52

جدول ۳- نتایج اجزای محدود

Pipe geometry ; OD=508 mm t = 6.35 mm

Test No.	Defect descriptions				Burst pressure Measured(Mpa)	Actual P/P*	Design P/P*
	Spiral angle	Depth (d/t)	Width (w/t)	Length (mm)			
1	Plain pipe				18.625	1.0	1.0
2	Plain pipe				13.30	1.0	1.0
3	0	0.27	16.1	-	12.5	0.67	0.77
	0	0.20	32	-	-	-	-
4	0	0.46	32	-	9.8	0.53	0.54
	0	0.51	16.1	-	-	-	-
5	20	0.2	4	1114	12.525	0.67	0.68
6	20	0.2	4	558	10.625	1.03	0.68
7	20	0.2	4	2190	10.225	0.55	0.68
8	20	0.2	4	742	12.825	0.90	0.61
9	45	0.2	4	529	12.225	0.60	0.70
10	90	0.2	4	281	11.225	0.60	0.60
11	90	0.2	4	1016	11.525	0.60	0.60
12	90	0.54	4	900	8	0.52	0.46
13	90	0.5	4	1000	8.2	0.50	0.50
14	90	0.32	4	900	11.8	0.64	0.66
	90	0.52	4	152	-	-	-
15	90	0.2	4	2-152	12.025	0.64	0.60
16	90	0.2	4	2-152	12.025	0.64	0.60
17	90	0.2	4	2-152	12.025	0.64	0.60
18	90	0.2	4	2(281)	11.025	0.60	0.60
19	90	0.2	4	2(281)	10.525	0.58	0.60
20	Patch	0.52	32x32t	-	8.65	0.50	0.47
	Patch	0.5	16.1t*16.1t	-	-	-	-

جدول ۵- خلاصه نتایج

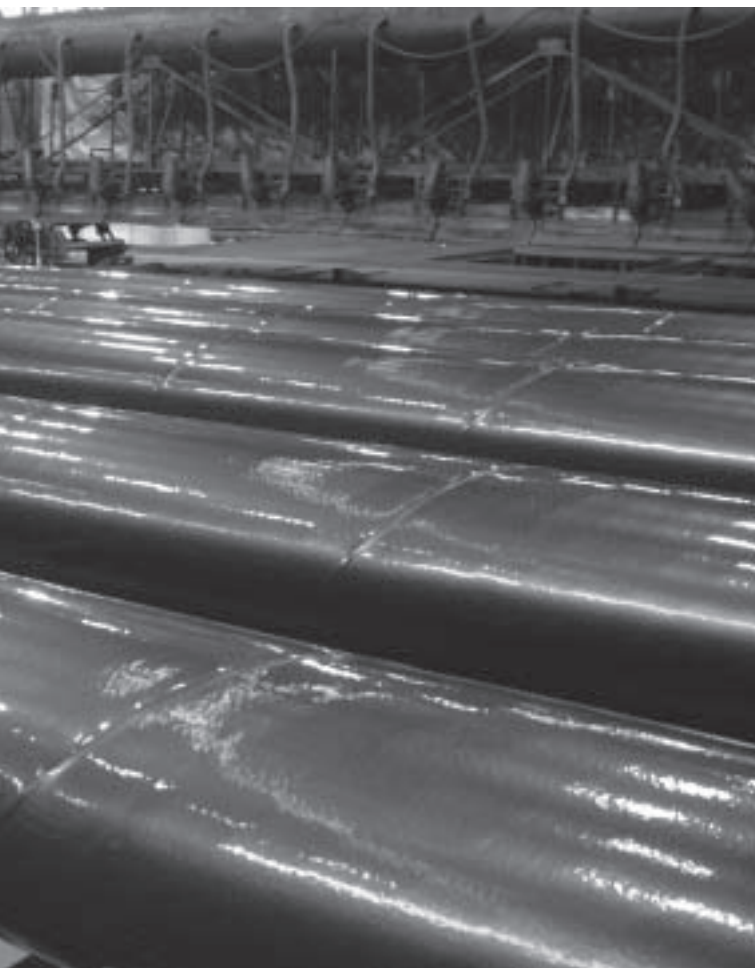
نیز در نظر گرفته می شود. Cooper در مرجع [Y] و Svensson در مرجع [A] با تحقیق در مورد فشار انفجار در مخازن تحت فشار جدار نازک رابطه زیر را برای محاسبه $P \times$ ارائه داده اند:

$$P^* = \left[\frac{2}{(\sqrt{3})^{n+1}} \left(\frac{1}{e^n} \right) \right] \sigma_y \left(\frac{n}{\epsilon_y} \right)^n \frac{t}{r} \quad (14)$$

این رابطه شبیه رابطه (۱۱) است با این تفاوت که یک جمله داخل براکت به آن اضافه شده است. این جمله بین ۰/۹۸۹ برای انواع $n=0/1$ و ۰/۹۱۵ برای $n=0/15$ تغییر می کند که می توان رابطه (۱۳) را با آن اصلاح کرد. این یک اصلاح کم اهمیت است و با انتخاب ضریب ایمنی خود به خود ارضا می شود.

حال با در نظر گرفتن اثر هندسه شکاف خوردگی باید مقدار $P/P \times$ محاسبه شود. تحلیل های اجزای محدود نشان داده اند که $P/P \times$ بیشترین تأثیر را از عمق عیب (d) برای عیوب مستقیم و پهنای عیب (w) برای عیوب محیطی می پذیرد. برای عیوب مورب با زاویه مارپیچ بین صفر تا ۹۰ درجه، هر دو پارامتر d و w روی $P \times / P$ تأثیر می گذارند، در نتیجه نمی توان هیچ رابطه ساده ای بین $P/P \times$ و w و d بیان کرد. با استفاده از تعاریف پایه $P \times / P$ رابطه زیر پیشنهاد می شود:

$$\frac{P}{P^*} = 1 - Q \left(\frac{d}{t} \right) \quad (15)$$



در لوله های دارای عیوب طولی ارائه گردیده است. قبلاً اشاره شد که فشار شکست P را می توان با استفاده از نسبت $P/P \times$ محاسبه کرد که $P \times$ فشار شکست در لوله بدون عیب است. نسبت مذکور بیانگر کاهش استحکام لوله در اثر خوردگی می باشد و نقشی همانند ضریب تمرکز تنش داشته و تنها به هندسه خوردگی وابسته است. در عمل روش زیر برای محاسبه $P \times$ اعمال می شود.

فرض اینکه رفتار تنش ماده با رابطه زیر تقریب زده شود که همان رابطه (۱) است.

$$\sigma_r = k \epsilon^n \quad (6)$$

برای پیش بینی فشار شکست لوله بدون عیب محتاطانه فرض می شود که ناپایداری و شکست با شروع نازک شدن (Necking) اتفاق می افتد. در آزمایش کشش شروع نازک شدن موقعی اتفاق می افتد که کرنش (ϵ_r) مساوی ضریب n شود، بنابراین رابطه (۷) برقرار می گردد:

$$\sigma_n = kn^n \quad (7)$$

با استفاده از تعادل فشار کاری می توان بر حسب تنش بیان کرد:

$$\sigma_n = P^* \left(\frac{r}{t} \right) \quad (8)$$

بنابراین فشار در مرحله نازک شدن، $P \times$ می شود:

$$P^* = \frac{kn^n t}{r}$$

واضح است که $P \times$ وابسته به سختی کرنش ماده که با k و n توصیف می شود می باشد. پیشنهاد می شود که k و n برای هر ماده ای اندازه گیری شود ولی در مسأله حاضر که این اندازه گیری انجام نشده است اطلاعات موجود محدود به استحکام تسلیم مینیم (SMYS) ماده است که در کرنش تسلیم مشخصی اندازه گیری شده است (ϵ_r) . با توجه به اطلاعات موجود که این ترتیب محاسبه می شود:

$$K = \frac{\sigma_y}{\epsilon_y^n} \quad (10)$$

بنابر این فشار شکست در لوله بدون عیب با رابطه زیر تخمین زده می شود:

$$P^* = \sigma_y \left(\frac{n}{\epsilon_y} \right)^n \frac{t}{r}$$

عبارت $\left(\frac{n}{\epsilon_y} \right)^n$ می تواند ثابت باشد زیرا برای لوله های معمولی فولادی n معمولاً بین ۰/۱ تا ۰/۱۴ تغییر می کند و ϵ_y نیز از مدول الاستیته E و تنش تسلیم مقادری انحراف (offset) دارد:

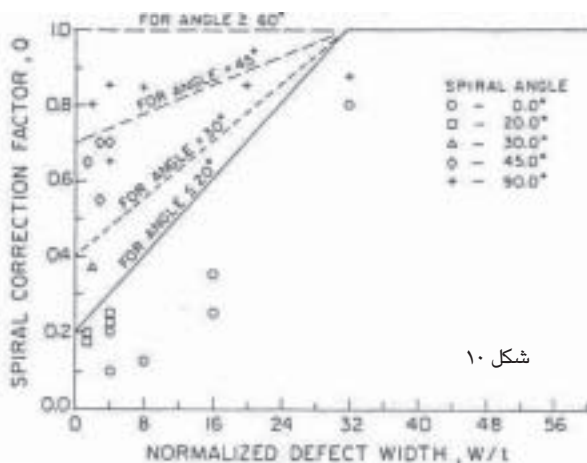
$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} + offset \quad (12)$$

جداولی که برای محاسبه $\left(\frac{n}{\epsilon_y} \right)^n$ برای مقادیر مختلف n و ϵ_y موجودند نشان می دهند که $\left(\frac{n}{\epsilon_y} \right)^n$ برای ϵ_y بین ۰/۱ تا ۰/۵٪ از ۱/۳۵ تا ۲/۱۲ تغییر می کند. رابطه زیر یک رابطه مناسب برای مقاصد طراحی است که عدد ۱/۵ برای $\left(\frac{n}{\epsilon_y} \right)^n$ در نظر گرفته شده است. همچنین SMYS برای σ_y جای گذاری شده است.

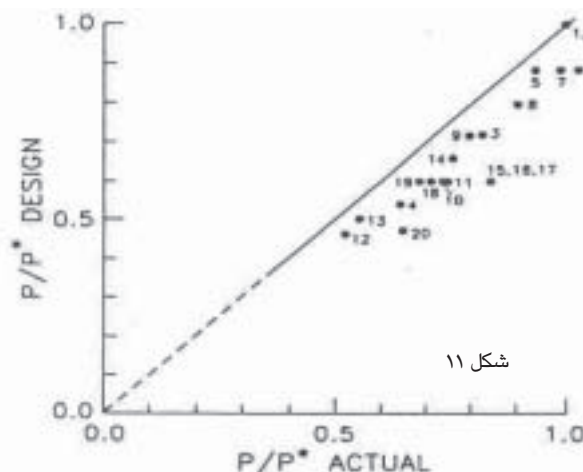
$$P^* = 1.5(SMYS) \frac{t}{r} \quad (13)$$

با استفاده از رابطه (۱۳) فشار شکست برای لوله بدون عیب $(X60) 414$ فولادی با SMYS برابر 414 MPa با قطر خارجی 254 mm و ضخامت $6/35 \text{ mm}$ برابر $15/3 \text{ MPa}$ خواهد بود که در مقایسه با فشار شکست اندازه گیری شده با آزمایش انفجار که $15/445 \text{ MPa}$ است، قابل قبول می باشد.

از آنجاکه رابطه اخیر رابطه ای تقریبی است، برای استفاده از آن یک ضریب ایمنی



شکل ۱۰



شکل ۱۱

در این رابطه p فشار شکست لوله معیوب، $P \times$ فشار شکست لوله سالم بدست آمده از رابطه (۱۳)، d عمق عیب در لوله، t ضخامت دیوار لوله و Q ضریب اصلاح مارپیچ است. شکل ۱۰ ضریب اصلاح Q را نشان می‌دهد.

مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه مارپیچ مقدار Q افزایش می‌یابد. مقدار Q همیشه بین صفر و یک می‌باشد. برای $W/L \geq 1$ مقدار Q مساوی یک در نظر گرفته می‌شود. جدول ۴ مقایسه‌ای بین روش اجزای محدود و فرمولهای محاسباتی طراحی ارائه می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که قوانین طراحی در محاسبه فشار شکست محتاطانه عمل می‌کنند که این احتیاط بین صفر تا ۱۵/۶٪ است. نتایج آزمایش‌های تجربی و نیز نتایج استفاده از روابط طراحی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مقدار ملاحظه کارانه بودن روابط طراحی به خوبی در این شکل مشهود است.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله انفجار خطوط لوله با عیوب خوردگی طولی بررسی و فشار شکست باروش اجزای محدود و مدل الاستیک-پلاستیک محاسبه گردید. خلاصه‌ای از نتایج در جدول ۵ نشان داده شده است. در تحلیل از منحنی تنش-کرنش حقیقی و معیار شکستی استفاده شده است که شروع باریک شدن (Necking) را به عنوان فشار شکست در نظر می‌گیرد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که معیار مذکور دقت قابل قبولی دارد، همچنین توافق خوبی بین نتایج اجزای محدود و آزمون‌های عملی وجود دارد.

بررسی نتایج حاکی از این مطلب است که فشار شکست ناشی از عیوب خوردگی طولی در لوله‌ها به عمق، پهنا و زاویه عیب وابسته است. برای زوایای بزرگتر از ۶۰ درجه از جهت محیطی، عمق عیب مهمترین پارامتر است ولی برای زوایای کوچکتر از ۲۰ درجه پهنای عیب عامل بحرانی می‌باشد.

منابع

- ۱- احمد سالاری، ارزیابی استفاده از لوله‌های درزجوش مارپیچ در خطوط انتقال نفت و گاز، کنفرانس بین المللی جایگاه لوله‌های درزجوش مارپیچی در صنایع نفت و گاز، تیرماه ۱۳۸۱
2. Kiefner, J.F., Corroded pipe: strength and repair methods. 5 th Symposium on Line Pipe Research, Houston, Texas, L1-L23, 1974.
3. American Gas Association, NG-18 Committee on Line Pipe, Arlington, Virginia.
4. CAN3-Z245-M86, Steel Line Pipe, Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario.
5. Hibbitt, Karlsson & Sorenson, ABAQUS User's Manual, Hibbitt, Karlsson & Sorenson, Inc., Rhode Island.
6. Hoff, R. & Pick, R.J., Final Report-An Investigation of Long Corrosion Defects in Line Pipe. Waterloo Research Institute, University of Waterloo, 1986.
7. Cooper, W.E., The significance of the tensile test to pressure vessel design. Welding Research Supplement, Welding Journal, (January 1957) 495.
8. Svensson, N.L., The bursting pressure of cylindrical and spherical vessels. Journal of Applied Mechanics (1958) 326.

