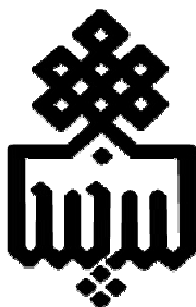


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه بیرجند
دانشکده مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک – طراحی کاربردی

تعیین تجربی و عددی چقرمگی شکست در لوله‌های انتقال گاز ایران با گرید API X65

مسعود کیمیابخش

استاد راهنما:

دکتر سید حجت هاشمی

تابستان 1390

چکیده

جهت تعیین مقاومت ماده در برابر رشد ترک از معیار چقرمگی شکست استفاده می‌شود. چقرمگی شکست در حالت کرنش مسطح (بعنوان معیار شروع ترک) برای فولادهای پراستحکام خطوط انتقال گاز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و نشان دهنده استعداد سازه به شکست ترد می‌باشد. در تحقیق حاضر از دو روش تجربی، انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی ده نمونه با ابعاد هندسی یکسان، طول شیار متفاوت و بارگذاری یکسان (روش لندس و بگلی) و شش نمونه آزمایشگاهی با ابعاد و طول شیار یکسان و بارگذاری متفاوت (روش استاندارد BS 7448)، و یک روش نیمه تجربی با استفاده از اطلاعات آزمون ضربه شاری جهت محاسبه چقرمگی شکست لوله فولادی API X65 (با قطر خارجی 1219 میلی‌متر و ضخامت جداره 14/3 میلی‌متر) استفاده می‌شود. با توجه به محدودیت در استخراج نمونه‌ای با ابعاد مناسب جهت تعیین تجربی چقرمگی شکست به روش مستقیم، به منظور تعیین این پارامتر از روش تعیین مقدار چقرمگی شکست نرم (J_{IC}) استفاده می‌شود. از نتایج حاصله مقدار چقرمگی شکست $308 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ از روش استاندارد BS 7448، $307 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ از روش لندس و بگلی و $315 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ از روش روابط نیمه تجربی بدست آمد. در ادامه حل المان محدود نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای با استفاده از تئوری اصلاح شده شکست گرسون جهت محاسبه میزان گشودگی دهانه ترک (در حالت بحرانی) انجام گردید. از این مدل مقدار چقرمگی شکست $297 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ بدست آمد. مقایسه نتایج تجربی و عددی نشان دهنده مطابقت مناسب مقادیر بدست آمده از روش‌های مرسوم تعیین چقرمگی شکست در دمای محیط می‌باشد.

کلید واژه‌ها: چقرمگی شکست، رشد ترک نرم، مدل شکست گرسون، فولاد لوله گاز، API X65.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست علائم و نشانه‌ها.....	د.....
فهرست جدول‌ها.....	و.....
فهرست شکل‌ها.....	ز.....
فصل 1- مقدمه.....	1.....
1-1- اهمیت انرژی.....	1.....
2-1- انتقال گاز طبیعی.....	2.....
3-1- مبانی شکست.....	2.....
1-3-1- شکست نرم.....	3.....
2-3-1- شکست ترد.....	5.....
4-1- آزمون‌های مکانیکی مرسوم.....	5.....
1-4-1- آزمون کشش.....	6.....
2-4-1- آزمون ضربه.....	7.....
3-4-1- آزمون سختی سنجی.....	7.....
5-1- چقرمگی شکست.....	8.....
1-5-1- اهمیت تعیین چقرمگی شکست.....	8.....
فصل 2- روش‌های تعیین چقرمگی شکست در حالت کرنش مسطح.....	9.....
1-2- مقدمه.....	9.....
2-2- روش‌های تعیین چقرمگی شکست.....	9.....
1-2-2- روش آزمایشگاهی.....	9.....
1-1-2-2- اندازه‌گیری مقدار گشودگی دهانه ترک.....	9.....
2-1-2-2- تعیین چقرمگی شکست نرم.....	12.....
3-1-2-2- استفاده از روابط نیمه تجربی.....	19.....
2-2-2- روش المان محدود.....	21.....
فصل 3- پیشینه تحقیق.....	22.....
1-3- سال 1998.....	22.....

- 23..... سال 2004 -2-3
- 25..... سال 2007 -3-3
- 28..... سال 2008 -4-3
- 28..... سال 2010 -5-3
- 29..... سال 2011 -6-3

فصل 4- ماده مورد آزمایش 32

- 32..... معرفی ماده مورد آزمایش 1-4
- 32..... خواص شیمیایی 2-4
- 33..... خواص مکانیکی 3-4
- 33..... روش تولید 4-4

فصل 5- روش تحقیق 35

- 35..... مقدمه 1-5
- 35..... تعیین تجربی J_{IC} 2-5
- 36..... تهیه و آماده سازی نمونه‌ها 1-2-5
- 37..... برش کاری 1-1-2-5
- 39..... صفحه تراشی و فرزکاری 2-1-2-5
- 43..... ایجاد شیار 3-1-2-5
- 50..... آماده سازی و ساخت قید و بندهای لازم جهت آزمایش خمش سه نقطه‌ای 2-2-5
- 64..... انجام آزمایش 3-2-5
- 66..... نتایج آزمایشگاهی 4-2-5
- 66..... اصلاح ناحیه پلاستیک با انجام آزمایش اول 1-4-2-5
- 67..... اصلاح ناحیه الاستیک 2-4-2-5
- 68..... نتایج بر روی ده نمونه آزمایشگاهی با طول ترک متفاوت و جابجایی یکسان 3-4-2-5
- 71..... نتایج مربوط به شش نمونه آزمایشگاهی با طول ترک یکسان و جابجایی متفاوت 4-4-2-5
- 74..... نتایج حاصل از روابط نیمه تجربی 5-4-2-5

فصل 6- شبیه سازی کامپیوتری آزمون خمش سه نقطه‌ای با نتایج 75

- 75..... مقدمه 1-6
- 76..... مراحل شبیه سازی کامپیوتری آزمون خمش سه نقطه‌ای 2-6
- 76..... ایجاد مدل هندسی 1-2-6

77.....	تعریف خواص ماده	2-2-6
79.....	مونتاز مدل	3-2-6
79.....	تعیین نوع تحلیل، مراحل حل و خروجی‌های مورد نیاز	4-2-6
81.....	تعیین تماس بین سطوح مختلف	5-2-6
81.....	اعمال بار و شرایط مرزی	6-2-6
81.....	مش بندی مدل	7-2-6
82.....	نتایج	8-2-6
86.....	فصل 7- مقایسه، نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات	
86.....	مقایسه و نتیجه گیری	1-7
90.....	ارائه پیشنهادات	2-7
92.....	فهرست مراجع	

فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
تغییر مکان نوک ترک (mm)	CTOD
تغییر مکان دهانه ترک (mm)	CMOD
تنش تسلیم (MPa)	σ_y
تنش نهایی (MPa)	UTS
مدول یانگ (GPa)	E
کرنش حقیقی	ϵ
کرنش نهایی	ϵ_f
ضریب پواسون	ν
ضریب سختی (MPa)	k
توان سخت شوندگی	n
ضخامت نمونه (mm)	B
طول ترک اسمی (mm)	a
طول ترک اولیه (mm)	a_0
نمو طول ترک	da
رشد ترک فیزیکی (mm)	Δa_p
عرض نمونه (mm)	w
ترم پلاستیک سطح زیر نمودار نیرو بر حسب جابجایی (N.mm)	A_p
انرژی جذب شده (J/mm)	U
نمو انرژی جذب شده	dU
جابجایی (mm)	Δ
نرخ رهایی انرژی (kJ/m^2)	J
ترم الاستیک نرخ رهایی انرژی (kJ/m^2)	J_e
ترم پلاستیک نرخ رهایی انرژی (kJ/m^2)	J_p
حداکثر نرخ رهایی انرژی (kJ/m^2)	J_{\max}
چقرمگی شکست نرم (kJ/m^2)	J_{IC}

K	ضریب شدت تنش ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)
K_{IC}	چقرمگی شکست در حالت کرنش مسطح ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)
q_1	پارامتر ماده
q_2	پارامتر ماده
ε_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 نهائی حفره‌ها

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول 2-1: روابط پرکاربرد نیمه-تجربی در تعیین چقرمگی شکست با استفاده از انرژی شارپی و تنش تسلیم.....	20
جدول 3-1: خواص مکانیکی لوله فولادی API X65.....	22
جدول 3-2: ترکیب وزنی عناصر شیمیایی لوله فولادی API X65.....	23
جدول 3-3: خواص مکانیکی لوله فولادی API X65 با درز جوش مستقیم.....	24
جدول 3-4: ترکیب وزنی عناصر شیمیایی لوله فولادی API X65.....	25
جدول 3-5: ترکیب وزنی عناصر شیمیایی لوله فولادی API X65.....	25
جدول 3-6: خواص مکانیکی لوله فولادی API X65.....	26
جدول 3-7: ترکیب وزنی عناصر شیمیایی به کار رفته در لوله فولادی API X65.....	28
جدول 3-8: خواص مکانیکی لوله فولادی API X65.....	28
جدول 4-1: ترکیب شیمیایی لوله فولادی API X65.....	32
جدول 4-2: خواص مکانیکی لوله فولادی API X65 در جهت محیطی.....	33
جدول 5-1: مقادیر رشد ترک محاسبه شده در نمونه‌ای با جابجایی اعمالی 9/4 میلی‌متر.....	72
جدول 5-2: مقادیر J بر حسب رشد ترک فیزیکی اندازه‌گیری شده.....	73
جدول 5-3: مقادیر انرژی شارپی و تنش تسلیم حاصل از صد آزمون آزمایشگاهی.....	74
جدول 6-1: اطلاعات مربوط به ناحیه پلاستیک فولاد API X65 در جهت محیطی لوله.....	78
جدول 6-2: پارامترهای گرسون فولاد API X65.....	79
جدول 7-1: مقایسه ضخامت و نسبت ضخامت تعدادی از لوله‌های API X65.....	88
جدول 7-2: مقایسه نتایج بین روش‌های متفاوت مورد استفاده در تحقیق حاضر.....	89
جدول 7-3: مقایسه مقادیر CTOD در چند تحقیق بر روی فولاد مشابه.....	90

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل 1-1: مراحل مختلف شکست نرم در یک فلز انعطاف پذیر.....	4
شکل 1-2: سطح مقطع شکست مواد نرم.....	4
شکل 1-3: سطح مقطع شکست مواد ترد.....	5
شکل 1-4: نمودار آزمون کشش و اطلاعات بدست آمده از این آزمون.....	6
شکل 1-5: دستگاه آزمون شارپی.....	7
شکل 2-1: نمای کلی آزمون C(T) با بسته شدن ابزار اندازه گیر.....	10
شکل 2-2: نمای کلی آزمون خمش سه نقطه‌ای با بسته شدن ابزار اندازه گیر.....	11
شکل 2-3: نمونه‌ای از نمودار چقرمگی شکست بر حسب کرنش حقیقی برای فولاد API X65.....	12
شکل 2-4: نمودار نیرو بر حسب جابجایی یکسان برای ترک‌هایی با طول متفاوت.....	14
شکل 2-5: نمودار انرژی جذب شده بر حسب ترک اولیه در جابجایی یکسان.....	14
شکل 2-6: نمودار J بر حسب جابجایی‌های داده شده.....	15
شکل 2-7: نمودار نیرو بر حسب جابجایی بدست آمده از آزمون C(T).....	16
شکل 2-8: نمودار نیرو بر حسب جابجایی بدست آمده از آزمون خمش سه نقطه‌ای.....	17
شکل 2-9: نمودار نیرو بر حسب جابجایی بدست آمده از در آزمون تک نمونه‌ای.....	18
شکل 2-10: نحوه استخراج CTOD از حل المان محدود.....	21
شکل 3-1: ابعاد نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای.....	22
شکل 3-2: مقایسه مدل گرسون و نتایج آزمایشگاهی بر روی نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای.....	23
شکل 3-3: ابعاد نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی لوله API X65.....	24
شکل 3-4: ابعاد نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای ماشین کاری شده از لوله فولادی API X65.....	26
شکل 3-5: نمودار نیرو بر حسب گشودگی دهانه ترک و مقایسه آن با مدل گرسون.....	27
شکل 3-6: مدل المان محدود نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای.....	27
شکل 3-7: ابعاد نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای ماشین کاری شده از بدنه از لوله فولادی API X65.....	29
شکل 3-8: ابعاد نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای لوله فولادی API X65.....	30
شکل 3-9: نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌ها با طول ترک متفاوت.....	30
شکل 3-10: مقایسه نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای با دو آزمون CCT و SENT.....	31

- شکل 4-1: نمایی کلی از لوله مورد آزمایش به همراه مشخصات هندسی 32
- شکل 4-2: مراحل تولید لوله با درز جوش مارپیچ 34
- شکل 5-1: نمودار تنش- کرنش مهندسی نمونه گرد در جهت محیطی 35
- شکل 5-2: ابعاد استاندارد نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای 36
- شکل 5-3: مقطع برش خورده لوله برای استخراج نمونه‌ها 37
- شکل 5-4: نمونه در حال برش بوسیله دستگاه اره لنگ 38
- شکل 5-5: مقطع برش خورده بوسیله دستگاه اره لنگ 38
- شکل 5-6: مقطع در حال برش بوسیله دستگاه اره نواری 39
- شکل 5-7: استخراج نمونه‌ها از دو طرف مقطع توسط اره نواری 39
- شکل 5-8: نمایی از دستگاه صفحه تراش بکار رفته در این تحقیق 40
- شکل 5-9: نمونه در حال تراشیده شدن توسط صفحه تراش 41
- شکل 5-10: نمونه تراشیده شده به ضخامت، عرض و طول 10، 10 و 60 میلی‌متر توسط صفحه تراش ..
..... 41
- شکل 5-11: نمایی از دستگاه فرز CNC بکار رفته در این تحقیق 42
- شکل 5-12: نمونه‌ها در حال تراشیده شدن توسط فرز CNC 42
- شکل 5-13: نمونه‌های تراشیده شده به ضخامت، عرض و طول 10، 10 و 60 میلی‌متر توسط فرز CNC.
..... 43
- شکل 5-14: ابعاد استاندارد شیار 43
- شکل 5-15: انواع شیوه‌های بارگذاری 44
- شکل 5-16: ساخت نوک ابزار برش با دستگاه سنگ 45
- شکل 5-17: بستن ابزار برش آماده شده به دستگاه صفحه تراش 45
- شکل 5-18: بستن نمونه به صفحه تراش جهت زدن شیار 46
- شکل 5-19: شیار آماده شده بر روی نمونه مربوط به آزمایش اول 46
- شکل 5-20: نمایی از دستگاه وایر کات مورد استفاده در این تحقیق 47
- شکل 5-21: نمونه در حال تنظیم شدن بر روی دستگاه وایر کات 48
- شکل 5-22: نمونه پس از تنظیم شدن و انتخاب برنامه از روی حافظه 49
- شکل 5-23: نمونه‌های آماده شده با طول شیار متفاوت جهت انجام آزمایش دوم 49
- شکل 5-24: نمونه‌های آماده شده با طول شیار یکسان جهت انجام آزمایش سوم 50

- شکل 5-25: نقشه ابعاد استاندارد قید و بند آزمون خمش سه نقطه‌ای 50
- شکل 5-26: قید و بند مربوط به آزمون خمش سه نقطه‌ای موجود در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشکده مهندسی دانشگاه بیرجند 51
- شکل 5-27: تراش غلتک تکیه‌گاهی با ماشین گرد تراش 52
- شکل 5-28: غلتک‌های تکیه‌گاهی آماده شده 52
- شکل 5-29: چکش حامل بار به همراه غلتک مورد نیاز برای بسته شدن روی آن 53
- شکل 5-30: بسته شدن مبدل به ماشین گرد تراش جهت تراشکاری 53
- شکل 5-31: ایجاد سوراخ جهت رزوه کاری مبدل و اتصال آن به فک اصلی دستگاه 54
- شکل 5-32: ایجاد سوراخ جهت رزوه کاری فک حامل بار به منظور اتصال به دستگاه آزمایش 54
- شکل 5-33: مجموعه چکش حامل بار بسته شده به مبدل و اتصال مجموعه به فک اصلی دستگاه 55
- شکل 5-34: نقشه طراحی شده جهت ساخت فک جداگانه برای نمونه 55
- شکل 5-35: ایجاد شیار توسط دستگاه صفحه تراش در تکیه گاه تحتانی جهت قرار گیری غلتک‌های تکیه گاهی 56
- شکل 5-36: ایجاد شیاری عمیق تر جهت فضایی برای خم شدن نمونه تحت آزمایش 56
- شکل 5-37: ایجاد شابلون جهت اطمینان از هم مرکز بودن نمونه هنگام انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای 57
- شکل 5-38: نمای کلی از فک و نمونه به همراه شابلون جهت انجام آزمون آزمایشی 57
- شکل 5-39: پله زده شده بر روی فک نمونه جهت هم محوری با فک اصلی دستگاه 58
- شکل 5-40: ایجاد شیاری به ابعاد چکش حامل بار 59
- شکل 5-41: فک مربوط به نمونه با فک اصلی دستگاه که توسط دو پیچ به هم بسته شده‌اند 60
- شکل 5-42: شابلون آماده شده از جنس پلاستیک فشرده 60
- شکل 5-43: قرار گرفتن نمونه‌ای در مرکز توسط شابلون 61
- شکل 5-44: تصویر تکیه گاه قبل و بعد از سخت کاری 62
- شکل 5-45: بارگذاری بر روی قید و بند آزمایش جهت اصلاح ناحیه الاستیک نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای 63
- شکل 5-46: قید و بند آماده شده به همراه نمونه‌ای روی آن 63
- شکل 5-47: هم مرکز شدن نمونه توسط شابلون قبل از انجام آزمون 64
- شکل 5-48: نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای حین بارگذاری 65

- شکل 5-49: نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای قبل و بعد از بارگذاری.....65
- شکل 5-50: نمودارهای خروجی نشان داده شده بر روی مانیتور دستگاه آزمون Zwick.....66
- شکل 5-51: نمودار نیرو بر حسب جابجایی آزمون خمش سه نقطه‌ای قبل و بعد از سخت کاری تکیه گاه‌ها.....67
- شکل 5-52: نمودار نیرو بر حسب جابجایی حاصل از انجام آزمون بر روی قید و بند.....67
- شکل 5-53: نمودار اصلاح شده نیرو بر حسب جابجایی نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای با طول ترک 3/43 میلی‌متر.....68
- شکل 5-54: نمودار نیرو بر حسب جابجایی حاصل از آزمون خمش سه نقطه‌ای بر روی نمونه‌ای با طول ترک 4/33 میلی‌متر.....69
- شکل 5-55: نمودار سطح زیر منحنی هر نمونه با جابجایی‌های یکسان بر حسب طول ترک اولیه.....69
- شکل 5-56: نمودار J بر حسب جابجایی‌های یکسان وارد شده بر هر نمونه.....70
- شکل 5-57: نمودار نیرو بر حسب جابجایی حاصل از انجام آزمون خمش سه نقطه‌ای با جابجایی 9/4 میلی‌متر.....71
- شکل 5-58: سطح شکست نمونه با جابجایی 9/4 میلی‌متر جهت اندازه‌گیری رشد ترک فیزیکی.....72
- شکل 5-59: نمودار J- Δa برای نمونه‌های آزمون خمش سه نقطه‌ای.....73
- شکل 6-1: نمونه مدل شده با ترکی به طول 5/73 میلی‌متر.....76
- شکل 6-2: نمودار تنش بر حسب کرنش پلاستیک در جهت محیطی لوله فولادی API X65 ورودی به نرم افزار.....77
- شکل 6-3: مدل مش بندی شده با المان CPE4R.....82
- شکل 6-4: کانتور تنش سه بعدی پس از تخریب اولین المان.....83
- شکل 6-5: کانتور تنش میزز پس از تخریب اولین المان.....84
- شکل 6-6: کانتور کسر حجمی حفره‌ها در هنگام تخریب المان‌ها.....84
- شکل 6-7: نمودار نیرو بر حسب جابجایی بازای جابجایی 8 میلی‌متر برای نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای با شیار 5/73 میلی‌متر.....85
- شکل 7-1: مقایسه نمودار نیرو بر حسب جابجایی از شبیه سازی و نتایج آزمایشگاهی روی نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای با طول ترک 5/73 میلی‌متر.....86
- شکل 7-2: مقایسه مدل گرسون و نتایج آزمایشگاهی بر روی نمونه آزمون خمش سه نقطه‌ای.....87

فصل 1 - مقدمه

1-1 - اهمیت انرژی

انرژی در زندگی بشر اهمیت فوق العاده‌ای دارد و ادامه زندگی بدون آن غیر ممکن است. همچنین در حیات اقتصاد صنعتی جوامع نیز نقش زیربنایی را ایفا می‌کند، به این معنی که هرگاه انرژی به مقدار کافی و به موقع در دسترس باشد توسعه اقتصادی نیز میسر خواهد بود. صنعت، کشاورزی، خدمات، گرمایش و سرمایش، تولید غذا، محیط خانوادگی، حمل و نقل، فعالیت‌های نظامی، پزشکی و درمانی، پژوهش‌های علمی و غیر آن همه به انرژی وابسته هستند. از این رو مباحث مربوط به منابع تأمین انرژی، مسیرهای انتقال انرژی، بازارهای مصرف، تجارت انرژی، فناوری انرژی و نظایر آن اهمیت ویژه‌ای دارند.

سوخت‌های فسیلی به ویژه نفت و گاز بیش از 68 درصد انرژی دنیا را فراهم می‌کنند [1]. اهمیت انرژی‌های فسیلی طی زمان نسبت به یکدیگر تغییر کرده است. ابتدا زغال‌سنگ در قرن‌های 18 و 19 اهمیت داشت و به توسعه صنایع به ویژه در اروپا کمک شایانی کرد. پس از کشف نفت در ایالت پنسیلوانیای آمریکا در سال 1859 میلادی به تدریج این ماده اهمیت یافت و جایگزین زغال‌سنگ شد.

کاربرد گاز طبیعی به عنوان سوخت حرارتی تنها قسمتی از موارد متنوع کارآیی این ماده گرانبدر به شمار می‌رود. اهمیت اصلی و واقعی گاز طبیعی با توجه به ارزش افزوده فراوان و قابلیت تبدیل به هزاران نوع کالای با ارزش اقتصادی در بخش صنعت پتروشیمی ظاهر می‌شود. نیاز روزافزون به گاز برای تأمین انرژی و سوخت و همینطور ارز حاصل از فروش و صادرات برای سرمایه‌گذاری و راه اندازی صنایع مادر و زیر بنایی در کشور، اندیشه تمرکز بخشیدن فعالیت‌های مرتبط با صنعت گاز را تقویت کرد. همچنین بنا به گزارشی که تا پایان سال 2008 وجود دارد، میزان ذخایر گاز جهان در حدود 185 تریلیون متر مکعب برآورد شده است.

کشور روسیه با 43/3 تریلیون متر مکعب و با سهم 23/4 درصد، دارای بیشترین منابع گازی و پس از آن ایران با 29/61 تریلیون متر مکعب و با سهم 16 درصد، دومین منبع گازی جهان محسوب می‌شوند. وجود این ذخایر در کنار سهولت انتقال به وسیله خطوط لوله، ارزانتر بودن این سوخت و ملاحظات زیست محیطی آن، (گاز طبیعی در هر واحد انرژی حدود 24 درصد نسبت به نفت خام و 42 درصد نسبت به زغال‌سنگ گازهای آلاینده کمتری تولید می‌کند)، سبب افزایش توجه به گاز طبیعی در برنامه‌ها و اقدامات 20 سال گذشته وزارت نفت گردیده است [2].

1-2 - انتقال گاز طبیعی

در جهان بیش از 70 درصد از ذخایر گاز و منابع عرضه آن در مناطقی وجود دارند که از بازارهای مصرف بالقوه خود بسیار دور می‌باشند. این مسئله ابتدا به ایجاد بازارهای مجزای محلی برای گاز طبیعی گردید ولی هم اینک بازارهای محلی نمی‌توانند تقاضای فزاینده را پوشش دهند. در دهه 1970 و اوایل دهه 1980 و همچنین سال‌های گذشته، قیمت‌های بالای نفت، وضعیت اقتصادی پروژه‌های انتقال زمینی و دریایی گاز طبیعی را بهبود بخشیده است به طوری که در سال‌های دهه 70، سرمایه‌گذاری‌های عظیمی برای انتقال گاز شوروی سابق به اروپا صورت گرفت و در سال‌های گذشته نیز با کمک پیشرفت‌های فنی، دسترسی بازارهای بیشتری به ویژه در آسیای جنوب شرقی و ژاپن به گاز طبیعی میسر شده است. هم اینک خطوط لوله انتقال گاز به عنوان اقتصادی‌ترین روش برای انتقال گاز حتی در فواصل بین قاره‌ای شناخته شده است. علاوه بر پهناور بودن ایران، وجود غالب مراکز بزرگ جمعیتی به عنوان بازار مصرف گاز طبیعی در نیمه شمالی و شمال غربی و وجود ذخایر گاز در جنوب کشور، نیاز به خطوط لوله انتقال گاز در کشور را به نحو چشمگیری افزایش داده است. بنابراین چه در سطح جهان و چه در سطح ایران، فاصله زیاد بین ذخایر گاز و بازار مصرف باعث شده چشم انداز تقاضا برای لوله‌های فولادی انتقال گاز مثبت باشد. در سال‌های اخیر لوله‌های فولادی به دلیل مقرون به صرفه بودن در مقایسه با سایر روش‌ها به سرعت جای خود را در صنعت انتقال انرژی (نفت و گاز) ارتقاء داده‌اند. در ایران پنج خط اصلی انتقال گاز موجود بوده و برنامه‌ریزی جهت احداث و اتمام عملیات اجرایی چهار خط دیگر نیز در جریان است. با توجه به بعد مسافت مراکز تولید گاز (عمدتاً بخش جنوبی کشور) و پراکندگی مراکز عمده مصرف صنعتی و خانگی (شمال و مرکز کشور) اهمیت این خطوط آشکار می‌گردد. طی یک قرن گذشته صنعت گاز به منظور استفاده از ظرفیت‌های بالاتر در انتقال گازها از سیستم‌های انتقال پر فشار با کارایی بیشتر استفاده کرده است. لازمه این کار استفاده از خطوط لوله‌های فولادی با قطر خارجی بزرگتر و دیواره نازکتر برای حداقل کردن هزینه و وزن در هر متر از خطوط لوله می‌باشد.

1-3 - مبانی شکست

بررسی مکانیزم‌های ایجاد ترک و مکانیزم‌های متفاوت رشد سریع یا در حد بحرانی ترک و رشد آرام و پایین‌تر از رشد بحرانی از اهمیت ویژه صنعتی برخوردارند. بررسی فعل و انفعالات فیزیکی که به هنگام شکست روی می‌دهد چندان ساده نیست، زیرا چگونگی ایجاد ترک و رشد آن و بالاخره نوع شکست در مواد کریستالی به جنس، ساختار شبکه کریستالی، ریزساختار و از آنجا که قطعات معمولاً به طور کامل

سالم و بدون عیب نیستند به نوع، اندازه و موقعیت عیب، نوع و حالت تنش وارد بر آنها بستگی خواهد داشت. معمولاً شکست در فلزات به شکست نرم و شکست ترد تقسیم می شود.

1-3-1 - شکست نرم

بسیاری از فلزات و آلیاژهای آنها، به ویژه آنهایی که دارای شبکه fcc هستند، مانند آلومینیوم و آلیاژهای آن، در تمام درجه حرارتها، شکست نرم خواهند داشت. شکست نرم به آرامی و پس از تغییر شکل پلاستیکی زیاد به ازای تنش بالاتر از استحکام کششی ظاهر می شود. از مشخصات شکست نرم، تحت تاثیر تنش کششی، ظاهر گشتن گلوبی یا نازکی موضعی و ایجاد حفره‌های بسیار ریز در درون قسمت گلوبی و اتصال آنها به یکدیگر تا رسیدن به حد یک ترک ریز و رشد آرام ترک تا حد پارگی یا شکست نهایی است. در این نوع شکست علت ایجاد حفره‌های ریز در محدوده گلوبی می‌تواند تغییر شکل غیر یکنواخت ناشی از ناخالصی‌های موجود در ماده اصلی زمینه باشد. لذا با ایجاد حفره‌های بسیار ریز در محدوده گلوبی حالت تنش سه بعدی برقرار می‌شود که منجر به ایجاد ترک می‌شود. جهت ترک ایجاد شده ابتدا عمود بر امتداد کشش است. بعد از اینکه ترک قسمت عمده‌ای از سطح مقطع را فرا گرفت و به سطح خارجی نمونه نزدیک شد، شکست نهایی در نتیجه برش بقیه سطح مقطع تحت زاویه 45 درجه با امتداد کشش، یعنی در صفحاتی که حداکثر تنش برشی اتفاق می‌افتد، پدیدار می‌شود [3].

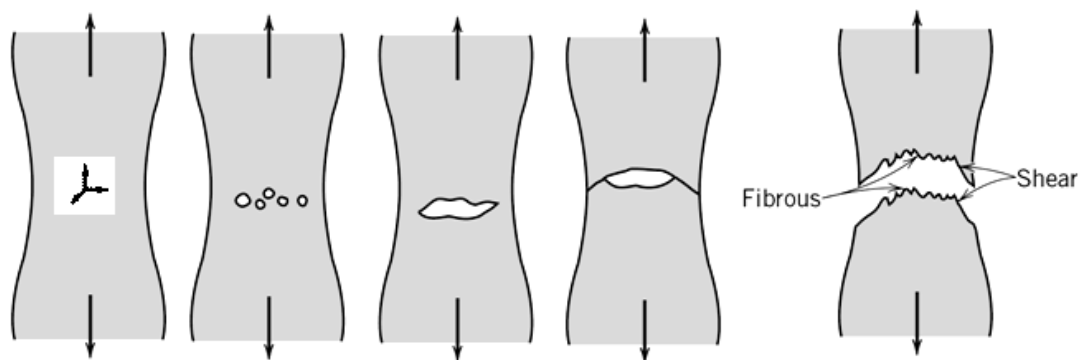
برای هر نوع فلز صنعتی یا آلیاژهای فلزی، جریان میکرومکانیکی که منجر به شکست تحت بارگذاری کششی (مد اول شکست) می‌شود را می‌توان به سه فاز تقسیم نمود [4]. این سه فاز که مراحل شکست نرم را بیان می‌کنند، به ترتیب زیر می‌باشند:

فاز 1: ایجاد حفره توسط شکست ذرات ناخالصی مانند سولفید منگنز و کاربید آهن یا جدا شدن این ذرات از ماتریس ماده (به دلیل استحکام کم این ذرات تحت بارگذاری کششی). حفره‌ها همچنین می‌توانند گاهی اوقات در مرزهای ذره و محل‌های تقاطع مرزهای ذره یا داخل پرلیت در فولادها ایجاد شوند.

فاز 2: رشد حفره توسط افزایش تغییر شکل پلاستیکی.

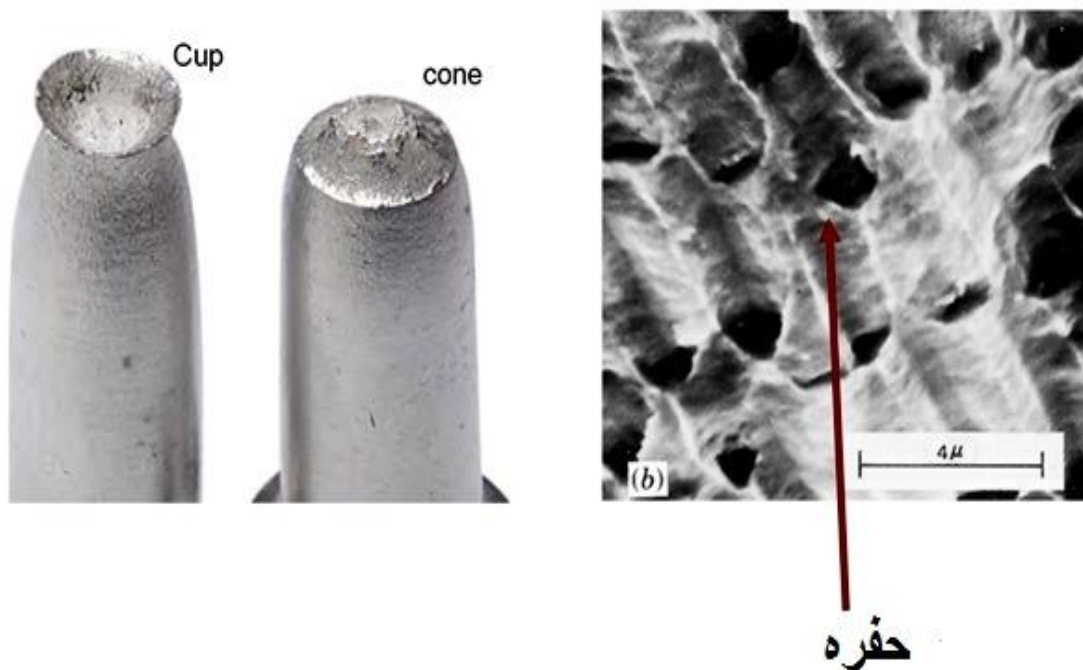
فاز 3: ادغام حفره‌ها توسط تشکیل باندهای برشی بین حفره‌ها (توسط تشکیل حفره‌های کوچک ثانویه یا توسط باریک شدن بافت‌ها بین حفره‌ها).

با به هم پیوستن حفره‌های مجاور در مرحله سوم، ترک‌های ریز در داخل جسم شکل می‌گیرد. نهایتاً با به هم پیوستن این ترک‌ها و افزایش طول ترک به بیشتر از طول بحرانی قابل تحمل به وسیله ماده، گسیختگی کامل جسم صورت می‌گیرد.



شکل 1-1: مراحل مختلف شکست نرم در یک فلز انعطاف پذیر.

مدل‌های ماده برای توصیف شکست نرم باید این جریان میکرومکانیکی را با قوانین زنجیره‌ای و پیوسته مکانیکی شبیه‌سازی کنند. مدل‌های پیوسته مکانیکی، هر حفره را به عنوان یک سوراخ کوچک توصیف نمی‌کند، بلکه به جای آن، رفتار کلی ماده متخلخل را شبیه‌سازی می‌کنند. به دلیل فرمول بندی موضعی این مدل‌ها خصوصیات استفاده شده ماده نباید به هندسه (اندازه نمونه) یا نوع بارگذاری بستگی داشته باشد. این خصوصیات شرایط انتقال مدل کالیبره شده در آزمایشگاه را به سازه واقعی فراهم می‌آورد [5]. سطح مقطع این نوع شکست در شکل 1-2 نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود سطح شکست مواد نرم از حفره‌هایی تشکیل شده است.



شکل 2-1: سطح مقطع شکست مواد نرم.

1-3-2 - شکست ترد

در شکست ترد پس از اینکه ترک به یک طول بحرانی رسید سریع (با سرعت صوت در جامدات) رشد می‌کند و قطعه به شکست نهایی می‌رسد که برای طراحی سازه‌ها اهمیت زیادی دارد. شکست ترد معمولاً در فلزاتی با ساختار کریستالی مکعب مرکزدار (bcc) و هگزاگونال متراکم (hcp) و آلیاژهای آنها در درجه حرارت‌های پایین (معمولاً پایینتر از دمای معمولی محیط) و سرعت‌های تغییر شکل بالا بطور ناگهانی ظاهر می‌شود. شکست ترد در امتداد صفحه کریستالی معینی، به نام صفحه کلیواژ¹، انجام می‌گیرد. در شکست ترد عموماً تغییر شکل پلاستیکی قابل توجهی در منطقه شکست مشاهده نمی‌شود. در این نوع شکست معمولاً پس از اینکه ترک به اندازه بحرانی برسد، با سرعت زیاد پیوندهای اتمی را پی در پی می‌شکند و پدیده شکست کامل می‌شود. به این پدیده کلیواژ گفته می‌شود. رشد ترک عمود بر تنش اعمالی صورت می‌گیرد که باعث می‌شود سطح شکست به صورت سطحی صاف باشد. شکل 1-3 سطح شکست ترد را نشان می‌دهد.



شکل 1-3: سطح مقطع شکست مواد ترد.

1-4-4 - آزمون‌های مکانیکی مرسوم

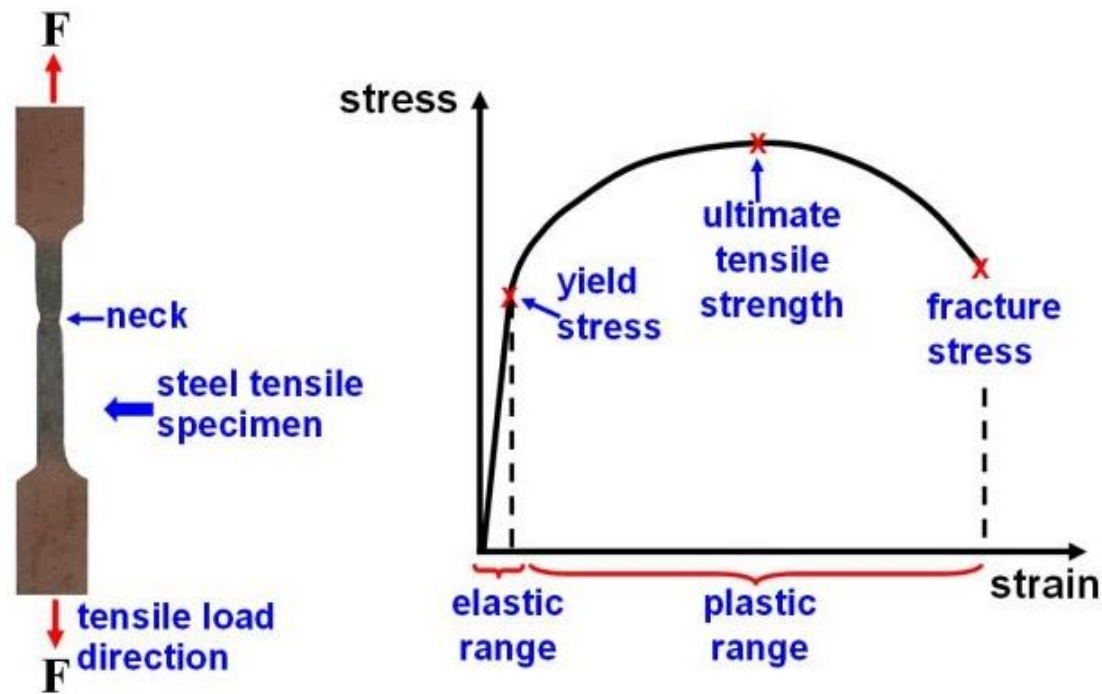
مواد مهندسی در معرض آزمون‌های مکانیکی گسترده‌ای قرار می‌گیرند تا آن که ثابت‌های الاستیک و دیگر خصیصه‌های مواد به همراه عملکرد آنها تحت شرایط کاربری مختلف و محیط‌های گوناگون مشخص و اندازه‌گیری شود. نتایج چنین آزمایشاتی برای مقاصد زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند:

¹ Cleavage

- طراحی مهندسی (بطور مثال، تئوریهای شکست بر اساس قدرت و استحکام).
 - کنترل کیفیت چه از طریق تولید کننده مواد به منظور کنترل فرآیند تولید و چه بوسیله کاربران نهایی برای اطمینان از مشخصات عرضه شده مواد.
- از آنجائیکه نیاز به مقایسه خصیصه‌های اندازه‌گیری شده و عملکرد آنها بر مبنای معمول آن می‌باشد، کاربران و تولیدکنندگان مواد، از روشهای آزمون استاندارد شده نظیر (ASTM) یا (BS) استفاده می‌کنند. این استانداردها روشهایی که بر اساس آنها نمونه‌ها آماده و آزمایش می‌شوند را بیان داشته و همچنین چگونگی آنالیز و گزارش نتایج آزمون را نیز عرضه می‌دارند. در این بخش تعدادی از آزمون‌های مهم مکانیکی بررسی می‌شود.

1-4-1 - آزمون کشش

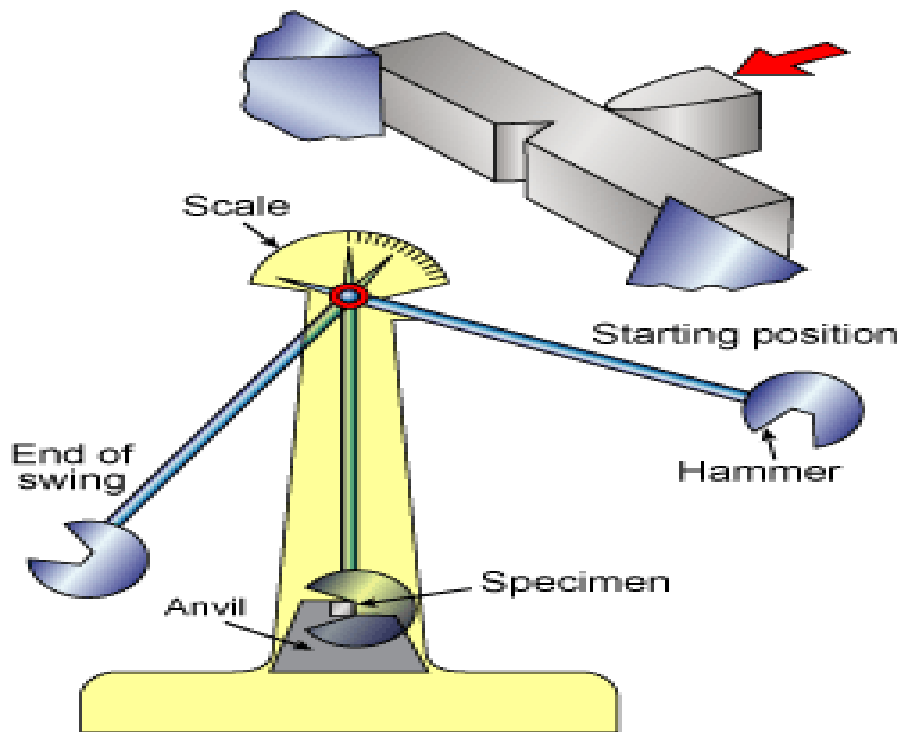
شاید مهمترین آزمایش، کشش ساده باشد که تغییر شکل الاستیک و پلاستیک را در شرایط ساده تک محوری بررسی می‌نماید و اطلاعات بسیار مهمی را در اختیار قرار می‌دهد. به کمک این آزمایش علاوه بر بدست آوردن مشخصات الاستیک و پلاستیک ماده همچون تنش تسلیم، استحکام کششی، ازدیاد طول، پدیده‌هایی نظیر نقطه تسلیم، کار سختی، پدیده گلوپی شدن، نحوه شکست و اثر نرخ کرنش بر خواص کششی فولادها نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. این اطلاعات در شکل 4-1 نشان داده شده است.



شکل 4-1: نمودار آزمون کشش و اطلاعات بدست آمده از این آزمون.

1-4-2 - آزمون ضربه

هدف از انجام این آزمایش تعیین مقاومت ماده در برابر بارهایی است که با سرعت کرنش بالا اعمال می شوند. داده‌هایی که از این آزمایش اندازه‌گیری می شوند میزان انرژی شکست ماده در شرایط بارگذاری با سرعت کرنش بالا است. در این حالت بار اعمالی به صورت دینامیکی است و به عبارتی مقاومت به ضربه که معیار مقایسه‌ای برای چقرمگی¹ ماده می‌باشد را اندازه‌گیری می‌نماید. در شکل 1-5 نمونه‌ای از دستگاه آزمون شاری نشان داده شده است.



شکل 1-5: دستگاه آزمون شاری.

1-4-3 - آزمون سختی سنجی

در حوزه مباحث مهندسی، سختی تحت عنوان مقاومت مواد در برابر نفوذ تعریف می‌شود. تعریف خاصیت سختی با آزمون ویژه‌ای که برای تعیین مقدار آن به کار می‌رود، مشکل است. مقدار سختی را

¹ Fracture toughness