

آنالیز تنش و بررسی شکست در یک انشعاب از واحد لخته‌گیر پالایشگاه گاز

مهدی جاویدی^{۱*}، فاطمه السادات موسوی شیرازی^۲، رامین ابراهیمی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۲۲، ش.ص ۹۵-۱۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۱۵)

چکیده

این مقاله به بررسی علل شکست و آنالیز تنشی یک انشعاب کوچک با قطر ۶۰/۳ در واحد لخته‌گیر ورودی پالایشگاه گاز می‌پردازد. این اتصالات از نقاط ضعف محسوب شده مگر آنکه دارای قابلیت انعطاف پذیری قابل قبولی باشند. در این تحقیق از نرم افزار CAESAR II جهت آنالیز تنش‌های وارد شده به این اتصال استفاده شده است. بررسی‌های به عمل آمده نشان داد که مهم‌ترین علل تخریب، عدول کردن تنش انبساطی از حد مجاز خود در کد طراحی یعنی استاندارد ASME B31.3 بوده است. از عوامل دیگر مؤثر در شکست، کارکرد موقتی در درجه حرارت‌های پایین به علت نشت سیال از فلنج در اثر ممان‌های بالای اعمالی، اخذ گرمای نهان تبخیر میعان‌ات گازی از اتصالات مجاور به فلنج، افت دمای شدید این اتصالات و به تبع آن کاهش چقرمگی بوده است. نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش انعطاف‌پذیری لوله‌ها و اتصالات آنان توسط افزایش پیچ و خم در مسیر سیستم لوله کشی، انبساط حرارتی در سیستم آزاد شده و تنش‌های حاصله در سیستم به طور چشمگیری کاهش خواهند یافت. این تحقیق و نتایج حاصل از آن بیانگر اهمیت مطالعه و بررسی تنش در اتصالات با اندازه کوچک در تاسیسات فرایندی نفت و گاز می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز تنش، بررسی علل تخریب، شکست، لخته‌گیر.

^۱ - دانشیار بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

^۲ - دانشجوی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

^۳ - استاد بخش مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز

*-نویسنده مسئول مقاله: mjavidi@shirazu.ac.ir

پیشگفتار

گاز طبیعی، عمدتاً به عنوان سوخت و ماده خام اولیه به کار رفته، سهم به سزایی در تأمین انرژی دارا می‌باشد. به نحوی که بیش از ۲۴٪ از انرژی مورد نیاز جهان از این طریق تأمین می‌گردد. همچنین، گاز طبیعی در مقایسه با دیگر سوخت‌های طبیعی به عنوان سوختی پاک و منبع قابل اطمینانی برای تأمین انرژی به شمار می‌آید [۱، ۲].

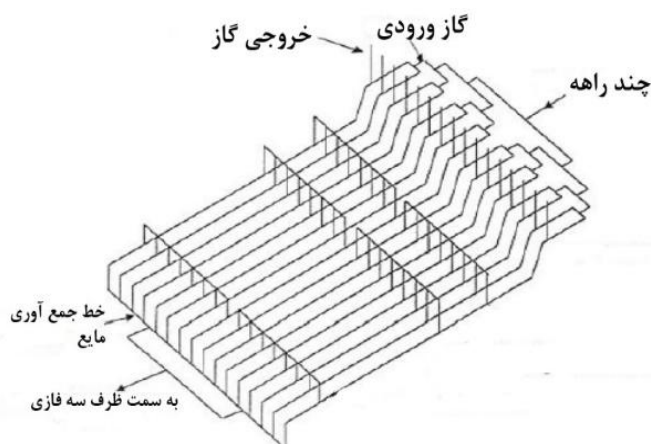
گاز طبیعی خام پس از انتقال توسط شبکه جمع‌آوری میدان گاز و قبل از ارسال به خطوط لوله، می‌بایست فراوری شود و پس از جداسازی ناخالصی‌ها و تبدیل به محصولات جانبی و یا سوزاندن آن‌ها، گاز مصرفی کشور فراورش و به شبکه انتقال تزریق می‌گردد [۱، ۳].

عموماً در گاز ورودی به پالایشگاه، جریان تک فاز به ندرت یافت می‌شود، چرا که فشار بالای مخازن زیرزمینی نفت و گاز، موجب حل شدن بخشی از گاز موجود در فاز هیدروکربن و یا آب همراه با گاز می‌گردد. در حین فرایند پالایش گاز، طی چند مرحله فازهای گاز، هیدروکربن و آب از هم جدا می‌شوند. اولین قدم در راستای تحقق هدف فوق، به کارگیری لخته‌گیرها (Slug Catchers) می‌باشد که وظیفه اصلی آن‌ها جداسازی فاز گاز از فازهای آب و هیدروکربن‌های مایع و ذخیره‌سازی مایع به طور موقت است. در نهایت گاز و مایع جداسازی شده به منظور انجام عملیات فراورش بعدی، به سوی تجهیزات پایین دستی هدایت می‌شوند [۱].

به طور کلی طراحی لخته‌گیرها بر مبنای کاستن سرعت سیال به منظور افزایش رژیم لایه‌ای، جدایش گاز از مایع بر

اساس نیروی جاذبه و زمان لازم جهت سقوط ذرات مایع می‌باشد [۱، ۴]. معمول‌ترین نوع لخته‌گیرها در پالایشگاه‌های گاز نوع انگشتی آن می‌باشد. در این گونه از لخته‌گیرها که به طور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده، سیال ورودی توسط یک تقسیم‌کننده به چندین بخش تقسیم می‌گردد. هر کدام از این شاخه‌ها از طریق یک ناودانی به لوله‌های اولیه جداکننده متصل می‌شوند. لوله‌های اولیه جداکننده به صورت موازی و کمی شیب‌دار بوده و معمولاً از قطر بزرگتری نسبت به ناودانی‌ها برخوردار می‌باشند، چرا که با افزایش قطر لوله، سرعت سیال کاهش یافته و شرایط به منظور تبدیل الگوی جریان از لخته‌ای به لایه‌ای مهیا می‌گردد. این لوله‌ها دارای یک شیب اندک (بین 1° تا 10°) می‌باشند و بر روی هر یک از آن‌ها در فاصله‌ای مناسب، یک بالابرنده نصب شده تا گازهای تفکیک یافته از مایعات به سمت شاخه اصلی خروجی گاز هدایت شوند [۵].

جهت کنترل مقدار فاز مایع موجود در سیستم لخته‌گیر از سیستم‌های ابزار دقیق استفاده می‌شود که توسط یک سری اتصالات با اندازه کوچک به بدنه پایین دست لخته‌گیر متصل می‌شوند. عدم رعایت اصول طراحی و وقوع انبساط و انقباض برای لوله‌های انگشتی سیستم لخته‌گیر منجر به وارد شدن تنش‌های مکانیکی شدید به این اتصالات شده که بعضاً شکست آن‌ها را به دنبال دارد. شکست در این بخش از پالایشگاه منجر به خارج از سرویس شدن تمام پالایشگاه و قطع روند تولید می‌گردد.



شکل ۱- نمای شماتیک از لخته‌گیر انگشتی [۱]

محاسبه حجم توسط نرم‌افزار آنالیز تنش، برای محاسبه وزن لوله، عایق و سیال به کار برده می‌شود تا در محاسبه تنش‌های به وجود آمده در سیستم به کار بسته شود.

شرایط عملیاتی سیستم

شرایط دمایی و فشار سیستم لخته‌گیر بین دو دمای حداکثر و حداقل $15-55^{\circ}\text{C}$ و دو فشار ۱۲۴ و ۹۵ متغیر می‌باشد که این دماها مقادیر دمای واقعی سیستم بوده و به صورت تفاوت دما با دمای محیط بیان نمی‌شوند. نرم‌افزار آنالیز تنش بر اساس جنس المان‌های مختلف، از این دماها برای محاسبه کرنش‌های حرارتی و محدوده تنش‌های مجاز استفاده می‌کند. در ضمن فشار هیدروتست نیز طبق مدارک برابر با ۲۳۰/۹۷ barg در نظر گرفته شده است.

مدل‌سازی شرایط مرزی سیستم مورد مطالعه

در این تحقیق با استفاده از آنالیز تنش به وسیله نرم‌افزار CAESAR II و انجام آزمون‌های مکانیکی، مشاهدات میکروسکوپی و آنالیز شیمیایی سعی بر پی بردن به علت شکست و ارائه راه‌کارهایی جهت اصلاح وضع موجود و پیشگیری از وقوع مجدد تخریب شده است. به منظور تحلیل تنش و یافتن علل شکست محل اتصال فلنج گردنی با قطر ۶۰/۳ میلی‌متر (۲") و ولدلوت بین این فلنج با لوله با قطر ۱۶۸/۳ میلی‌متر (۶"×۲")، ابتدا بایستی قسمتی از سیستم لخته‌گیر که شرایط عملیاتی و تکیه‌گاهی آن مشخص است در نرم‌افزار مدل‌سازی ترسیم شود. در شکل ۳ نمایی از محل‌های شبیه‌سازی شده لخته‌گیر و در شکل ۴ شبیه‌سازی و گره‌بندی این قسمت‌ها در نرم‌افزار نشان داده شده است.

در نرم‌افزار CAESAR II هر المان به وسیله دو شماره گره (Node) مشخص می‌گردد، لذا بایستی شماره گره‌ها که در واقع تعیین‌کننده جایگاه المان در سیستم لوله‌کشی می‌باشند، معلوم گردند. نرم‌افزار دو گره با شماره ابتدا در یک گره و انتها در گره دیگر یکسان را در مدل سه بعدی به یکدیگر متصل نموده و با این عمل، تک تک المان‌ها در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و سیستم لوله‌کشی را می‌سازند. لازم به ذکر است که شماره گره محل وقوع شکست ۱۹۰ می‌باشد که در شکل ۲-ب و ج و همچنین شکل ۴-الف نشان داده شده است.

در این مقاله به بررسی آنالیز تنش و علت وقوع شکست برای یک اتصال ولدولت^۱ با قطر ۶۰/۳ میلی‌متر (۲ اینچ) در لخته‌گیر یک واحد پالایشگاهی گاز پرداخته شده است.

روش تحقیق

مشاهدات

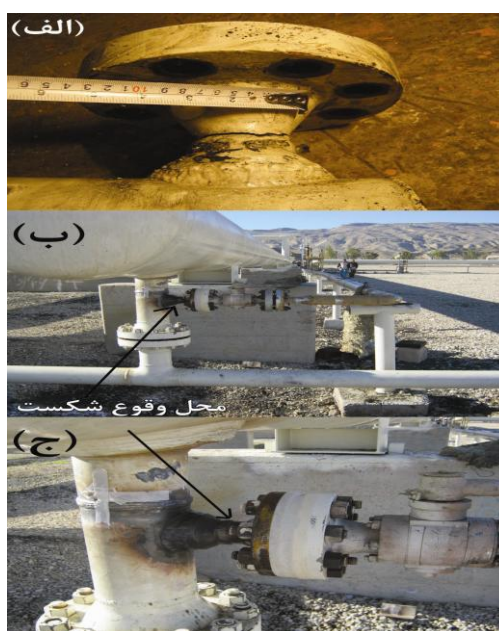
شکست مورد مطالعه در این تحقیق در واحد لخته‌گیر یکی از مجتمع‌های پالایشگاهی گاز رخ داده است. واحد لخته‌گیر این پالایشگاه متشکل از هشت لوله با قطر ۷۶۲ میلی‌متر (۳۰") می‌باشد که در انتهای این لوله‌ها، لوله‌های عمودی با قطر ۱۶۸/۳ میلی‌متر (۶") جهت خروج آب و ميعانات منشعب شده‌اند. از یکی از لوله‌های با قطر ۱۶۸/۳ میلی‌متر (۶") یک لوله منشعب گردیده که در محل انشعاب، توسط یک ولدولت از جنس فولاد کربنی ASTM A105، از یک سمت به لوله با قطر ۱۶۸/۳ میلی‌متر و از سوی دیگر به یک فلنج گردنی با قطر ۶۰/۳ میلی‌متر (۲") از جنس A105 کلاس ۱۵۰۰ جوشکاری شده است. شکست در نواحی جوش و متأثر از جوش (Heat Affected Zone, HAZ) اتصال بین فلنج با قطر ۶۰/۳ میلی‌متر (۲") و ولدلوت بین این فلنج با لوله با قطر ۱۶۸/۳ میلی‌متر (۶"×۲") حادث گردید که در شکل ۲ محل شکست نشان داده شده است.

جنس لوله و اتصالات

مشخصات جنس انواع المان‌های به کار رفته در محل اتصال مطابق با اطلاعات موجود در کتابچه‌های بهره‌برداری پالایشگاه در جدول ۱ ارائه شده است. در طراحی این لخته‌گیر، مقدار حد مجاز خوردگی^۲ برابر با ۱/۵۸ mm در نظر گرفته شده است. همچنین در این قسمت از لخته‌گیر از عایق پشم شیشه‌ای با چگالی 70 kg/m^3 و ضخامت ۲۵ mm استفاده شده است. چگالی لوله‌ها که همگی از جنس فولاد می‌باشند، برابر با $7833/43 \text{ kg/m}^3$ و چگالی سیال درون سیستم که ترکیبی از هیدروکربن‌های مختلف می‌باشد، برابر با ۰/۶۳ برابر چگالی آب یا به عبارتی $629/71 \text{ kg/m}^3$ در نظر گرفته شده است. مقادیر چگالی با توجه به مقادیر قطر، ضخامت لوله و

^۱ -Weldolet

^۲ - Corrosion Allowance



شکل ۲- الف). ترک حاصل شده در محل اتصال فلنج به ولدولت، ب و ج). نمای کلی محل تخریب پس از انجام تعمیرات (محل شکست بر روی شکل نشان داده شده است)

لوله در انتها به یک سیستم ارتفاع سنج^۱ ابزار دقیق برای کنترل سطح مایع در لخته‌گیر متصل می‌باشد (شکل ۶- ب). انتهای گره شماره ۶۳۰ (شکل ۶- ب) به المانی متصل نیست و از لحاظ انبساط حرارتی کاملاً آزاد خواهد بود. بنابراین برای این گره هیچ‌گونه قیدی در نظر گرفته نشده است (شکل ۶). همان‌گونه که در شکل ۶- ج دیده می‌شود گره شماره ۴۲۰ مربوط به انتهای یک فلنج کور با قطر ۸۸/۹ میلیمتر (۳ اینچ) بوده و انتهای آن به منظور انبساط حرارتی آزاد می‌باشد و به تبع آن قیدی در این گره منظور نشده است.

گره‌های شماره ۱۵۰، ۸۲۰، ۲۳۹۰، ۳۲۹۰، ۴۱۹۰، ۵۰۹۰، ۵۹۹۰ و ۶۸۹۰ همان‌گونه که در شکل ۵ نشان داده شده، به طور کامل به تکیه‌گاه زیر خود جوش داده شده و تمام درجات آزادی حرکات انتقالی و چرخشی آن محدود گشته و لذا حکم قید صلب را بازی می‌کند. به گونه‌ای که قسمتی از انبساط حرارتی انگشتی از این نقطه شروع و تا فاصله ۱۴۷/۲ m (فاصله این نقطه تا ابتدای انگشتی‌ها) انجام شده و مابقی انبساط حرارتی این لوله با قطر ۷۶۲ میلیمتر از نقطه دارای قید صلب تا فاصله ۸ m در جهت مخالف انجام می‌شود. بنابراین این نقطه حکم مبدأ به منظور در نظر گرفتن محاسبات انبساط حرارتی خواهد بود. گره‌های شماره ۷۳۴۱، ۷۴۲۱، ۷۲۰۰ و ۷۲۸۰ همان‌گونه که در شکل ۵- ج نشان داده شده، انتهای سهرای‌های متصل کننده لوله‌های تخلیه گاز به یکدیگر بوده که با کلاهک بسته نگاه داشته شده‌اند و از لحاظ انجام انبساط‌های حرارتی کاملاً آزاد بوده و لذا هیچ نوع قیدی در انتهای آنان اعمال نشده است. از طرفی محل شکست همچنان که در شکل ۲- ب نشان داده شد به یک لوله با قطر ۸۸/۹ میلیمتر (۳ اینچ) متصل است که این

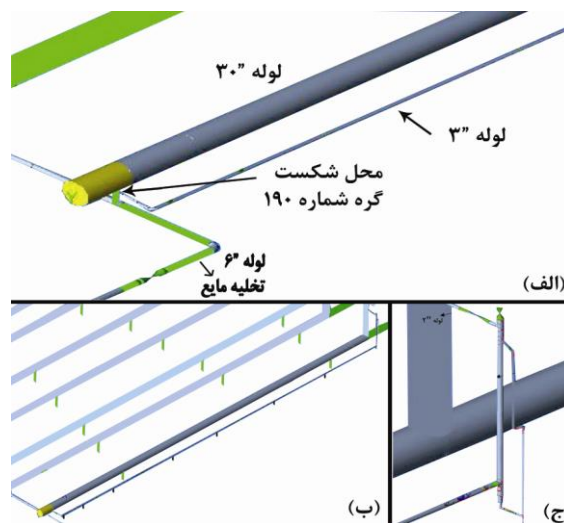
^۱ - Stand Pipe

جدول ۱- مشخصات مصالح به کار رفته در سیستم

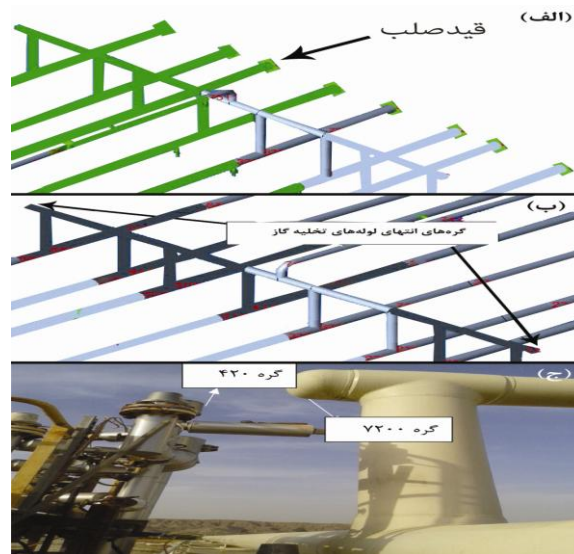
جنس	مشخصات، نوع المان		جنس	مشخصات، نوع المان	
	هندسه	قطر خارجی (mm)		هندسه	قطر خارجی (mm)
L Gr. B5API	لوله ۳/۴"	۲۶/۷	۱۰۵ASTM A	ولدولت ۲"×۶"	۱۶۸/۳×۶۰/۳
۲۳۴ASTM A	زانو ۳/۴"		۱۰۵ASTM A	فلنج گردنی ۲"	۶۰/۳
۱۰۵ASTM A	شیر دروازه‌ای ۳/۴"		۱۰۵ASTM A	شیر توپی ۲"	
L Gr. B ۵API	لوله ۱"	۳۳/۴	۲۳۴ASTM A	تبدیل ۳"×۲"	۸۸/۹×۶۰/۳
۲۳۴ASTM A	زانو ۱"		L Gr. B5API	لوله ۳"	۸۸/۹
۱۰۵ASTM A	شیر توپی ۱"		۲۳۴ASTM A	زانو ۳"	
۵۲L Gr. X5API	لوله ۶"	۱۶۸/۳	۱۰۵ASTM A	فلنج گردنی ۳"	
۶۰L Gr. X5API	لوله ۳۰"	۷۶۲	L Gr. B5API	لوله ۲ ۱/۲"	۷۳



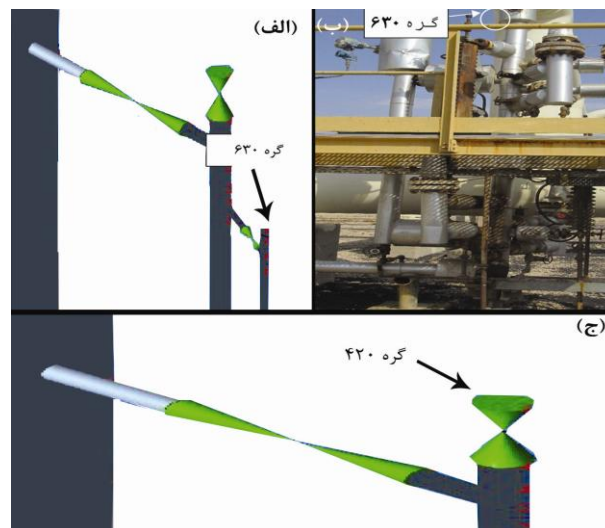
شکل ۳- نمایی از لخته‌گیر و اجزای مدل‌سازی شده



شکل ۴- نمای کلی از ناحیه مدل‌سازی شده از لخته‌گیر



شکل ۵- گره‌های ابتدایی و انتهایی در محاسبه انبساط حرارتی (قید صلب)

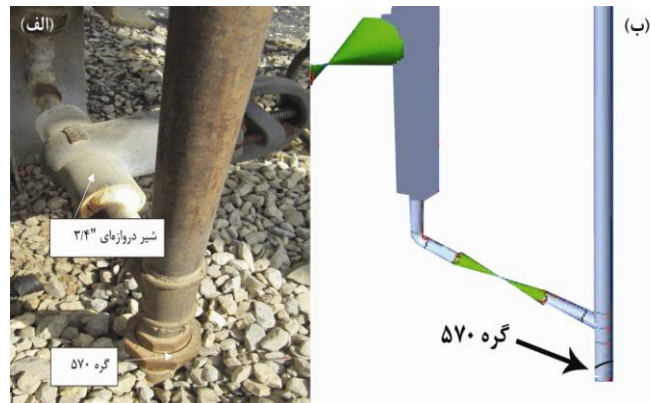


شکل ۶- نمایش گره ۶۳۰ در حالت مدل‌سازی شده

جداسازی‌های بعدی منتقل می‌شود. مسیر این لوله تخلیه گاز در شکل ۸ نشان داده شده و شماره گره آن ۷۵۶۱ در نظر گرفته شده است. در این مسیر یک نقطه قید صلب که همانند نقاط شروع مدل‌سازی در انگشتی‌ها می‌باشد به طور کامل به صفحه فلزی قرار گرفته بر روی ساپورت بتنی جوش داده شده و بنابراین تمام درجات آزادی جابجایی و چرخش از این نقطه گرفته شده است. چگونگی مدل‌سازی شده این نقطه نیز در شکل ۸ نشان داده شده است.

در صورت پر شدن سطح ارتفاع‌سنج سیال و یا به منظور تعمیر بخشی از لخته‌گیر، این ارتفاع‌سنج بایستی از سیال درون خود توسط شیر دروازه‌ای به قطر خارجی ۲۶/۷ میلیمتر (۳/۴") تخلیه شود. این عمل تخلیه از طریق گره ۵۷۰ درون سیستم فاضلاب درون زمین انجام خواهد شد، لذا شرایط مرزی این گره به صورت آزاد در نظر گرفته می‌شود، شکل ۷.

لوله‌های تخلیه گاز در یک نقطه به یکدیگر متصل شده و گازهای درون آن‌ها به واحدهای دیگر به منظور



شکل ۷-نمایش گره ۵۷۰ در نرم‌افزار CAESAR II

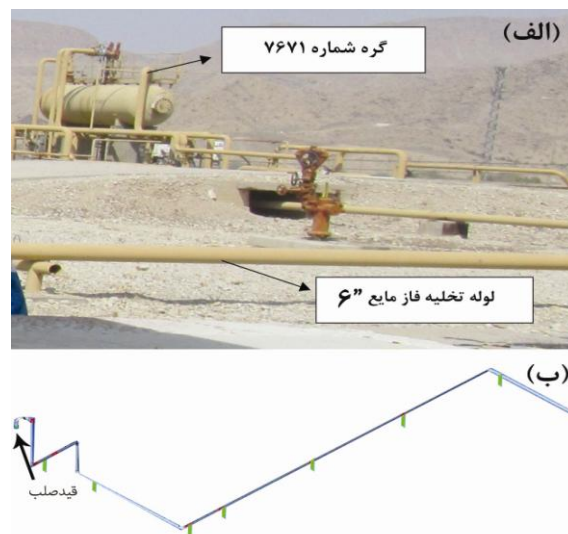


شکل ۸- مسیر تخلیه گاز از لخته گیر و نمایش گره ۷۵۶۱

ضرایب تشدید تنش در خمها و انواع سهرای‌های مختلف

با انتخاب گزینه SIF & Tees در محیط نرم‌افزار و مشخص نمودن المان‌هایی چون سه راهی‌ها و ولدولت و همچنین برای خمها در مکانی که این المانها قرار گرفته‌اند نرم‌افزار، ضرایب تشدید تنش را با استفاده از محاسبه شاخصه انعطاف‌پذیری و با توجه به نوع المان انتخاب شده مطابق با استاندارد ASME B31.3 محاسبه می‌کند.

لوله به قطر خارجی ۱۶۸/۳ میلیمتر (۶") جمع‌آوری آب و میعانات گازی در انتهای مسیر خود به یک مخزن سه فازی متصل می‌شود و در آن فاز مایع (آب و میعانات) و فاز گاز بطور مؤثرتری از یکدیگر جدا می‌شود. از آنجا که نازل متصل به این لوله به مخزنی متصل است که توسط پیچ‌های انکر به سازه بتنی نگهدارنده آن به طور کامل مهار شده، این نقطه نیز به عنوان قید صلب در نظر گرفته شده است (گره ۷۶۷۱، شکل ۹).



شکل ۹- گره ۷۶۷۱ تخلیه میعان‌ات به داخل مخزن

ساخت حالت بارهای استاتیکی

پس از بررسی خطاهای مدل‌سازی، نخستین قدم در تحلیل یک مدل سیستم لوله‌کشی، ساخت بارگذاری‌ها می‌باشد. در این نرم‌افزار عبارت حالت بار (Load Case) به مجموعه‌ای از بارها اطلاق می‌گردد که به طور همزمان به سیستم اعمال می‌گردد. در این شبیه‌سازی حالت بارهای در نظر گرفته شامل بارهای عملیاتی، بارهای مستمر، بار ناشی از فشار هیدروتست و بارهای انبساطی می‌باشند.

بارهای عملیاتی

در مورد بارهای مستمر و بارهای انبساطی کدها و استانداردهای لوله‌کشی، معادلاتی را برای محاسبه تنش به وجود آمده در سیستم و همچنین تنش مجاز در سیستم، ارائه کرده‌اند، در حالی که کد ASME B31.3 حالت بار عملیاتی را به عنوان یک حالت از تنش در نظر نمی‌گیرد و لذا معادلاتی را نیز جهت محاسبه این دو تنش پیشنهاد نکرده است. اهمیت بارهای عملیاتی زمانی آشکار خواهد شد که محاسبه جابجایی‌های ماکزیمم سیستم، نیروهای وارده بر تجهیزات، تکیه‌گاه‌ها و دامنه تنش انبساطی در سیستم مد نظر باشد [۶، ۷].

بارهای مستمر

بارهای مستمر، بارهایی هستند که به وسیله نیروهای مکانیکی در تمام مدت کارکرد معمول سیستم به آن اعمال

می‌گردند و شامل بارهای ناشی از فشار و وزن سیستم می‌باشند. خطرناک‌ترین نوع تنش وارد شده به سیستم که در تمامی عمر سیستم به آن وارد می‌شود، تنش محیطی می‌باشد. این نوع تنش به طور مستقیم در محاسبه ضخامت لوله مد نظر قرار داده می‌شود. مقدار تنش محیطی به دست آمده به هیچ عنوان نباید از تنش مجاز در حالت کاری گرم (σ_h) تجاوز نماید [Error! Bookmark not defined.]. این تنش مجاز همواره بایستی پایین‌تر از تنش تسلیم ماده نگاه داشته شود، چرا که تنش محیطی جزء تنش‌های اولیه محسوب شده و مانند تنش‌های ثانویه خاصیت خود محدود شوندگی ندارد [Error! Bookmark not defined.]. مقادیر تنش مجاز برای فولادهای کربنی که در دامنه دمایی خزش به کار نمی‌روند، کم‌ترین مقدار تنش از دو مورد زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$(۱) \quad \frac{1}{3} \text{ مقدار استحکام کششی ماده}$$

$$(۲) \quad \frac{2}{3} \text{ مقدار تنش تسلیم ماده}$$

به منظور استفاده راحت و در دسترس تنش‌های مجاز، این مقادیر برای هر جنس از فلزات در دماهای مختلف تعیین شده و در جدول A-1 از کد ASME B31.3، آمده است.

دسته دیگر از تنش‌هایی که در تمامی بازه زمانی کارکرد سیستم به آن وارد می‌گردند، تنش‌های طولی ناشی از فشار و همچنین تنش‌های طولی ناشی از ممان‌های خمشی و پیچشی که در اثر وزن سیستم یا هرگونه نیرو و

طبق روابط ذیل به فشار معادل تبدیل می‌گردند این فشار (P_f) بایستی با جدول کلاس‌بندی فلنج‌ها بر حسب دما و فشار در استاندارد ASME B16.5 مقایسه شود و در صورتی که P_f از فشار قابل تحمل برای فلنج کمتر باشد، فلنج دارای نشی نخواهد بود [۱۰].

بررسی متالورژیکی علل تخریب

علاوه بر انجام آنالیز تنش برای یافتن علل شکست، انجام یک سری از آزمایش‌ها در جهت یافتن عوامل متالورژیکی شکست و بررسی کیفیت و خواص مکانیکی ماده، ضروری می‌باشد. بدین منظور در این تحقیق شکست نگاری توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، بررسی‌های ریزساختاری توسط میکروسکوپ نوری، تعیین اندازه دانه، آزمون میکروسختی، آزمون ضربه و آزمون کوانتومتری انجام گرفته است.

از قسمت فلنج، نمونه‌هایی در سه جهت طولی، شعاعی و محیطی برای تعیین ریزساختار و عدد اندازه دانه بریده شد. لازم به ذکر است که علت بریدن نمونه‌ها در این سه جهت این است که فلنج‌هایی از این قبیل به روش فورج تولید شده و احتمال کشیدگی یا فشردگی دانه‌ها در این سه جهت وجود خواهد داشت، لذا برای اطمینان از ساخت مطلوب و همگنی دانه‌ها، در جهات مختلف نمونه‌ها مورد بررسی ریزساختاری قرار گرفتند. به منظور بررسی ریزساختار ناحیه جوش نیز نمونه‌هایی از ناحیه جوش و ناحیه متأثر از جوش تهیه شد. نمونه‌ها پس از عملیات ماند گرم، به وسیله سمباده‌های شماره ۸۰، ۱۸۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ پولیش و برای پولیش نهایی از نمد مخصوص و دوغاب آلومینا با اندازه ذرات آلومینای $0.3 \mu\text{m}$ استفاده گردید. سپس نمونه‌ها جهت اچ در محلول پیکرال (g) ۴ اسید پیکریک حل شده در ۹۹ mL اتانول ۹۶٪ برای مشخص نمودن ساختار کلی و پس از آن در محلول نایتال ۲/۵٪ (۲/۵ mL اسید نیتریک حل شده در ۹۹ mL اتانول ۹۶٪) به منظور آشکار نمودن ساختار کلی و مرز دانه‌های فریت جهت تعیین اندازه دانه قرار گرفت و در نهایت تصاویری از ساختار میکروسکوپی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ نوری تهیه شد. عدد اندازه دانه نیز با استفاده از نرم افزار پردازش ریز ساختار^۷ و به روش تقاطع خطی

ممانی که منجر به ایجاد تنش طولی گردد، می‌باشند. این تنش‌های طولی در نرم‌افزار به عنوان بارهای مستمر شناخته خواهند شد و حداکثر مقدار آن‌ها نباید از مقدار تنش مجاز ماده در حالت کاری گرم تجاوز نماید.

بارهای انبساطی

آنالیز انعطاف‌پذیری سیستم در اثر بارهای حرارتی بر پایه تأثیر ترکیبی تنش‌ها بر مبنای معیار ترسکا می‌باشد. این کمیت ترکیبی در محاسبه دامنه تنش‌های حرارتی (S_E) به کار خواهد رفت. تنش‌هایی که در هنگام آنالیز حرارتی سیستم بایستی در نظر گرفته شود شامل تنش‌های خمشی طولی و تنش‌های پیچشی ناشی از ازدیاد یا کاهش طول لوله‌ها در اثر افزایش و کاهش دما می‌باشد. تنش‌های مجاز در بارهای انبساطی (S_A) از رابطه ۱ به دست می‌آید و همواره بایستی دامنه تنش‌های انبساطی (S_E) از مقدار مجاز این تنش‌ها پایین‌تر نگاه داشته شوند.

$$S_A = f(1.25S_c + 0.25S_H) \quad (1)$$

در این رابطه S_c تنش مجاز در حالت سرد (پایین‌ترین دمای سرویس)، S_H تنش مجاز در حالت کاری گرم و f فاکتور کاهش تنش مجاز است که بسته به تعداد سیکل‌های بارگذاری (N) از مقدار یک $(N < 7000)$ تا 0.15 (تعداد بی‌نهایت سیکل) متغیر می‌باشد.

اعمال فاکتور کاهش تنش مجاز بیان‌گر این امر است که هرگاه سیستم تحت بارگذاری بیش از ۷۰۰۰ سیکل قرار گیرد، بایستی مقدار تنش مجاز انبساطی آن تا یک مقدار مشخص کاهش یابد که در واقع بدین مفهوم می‌باشد که سیستم به شرایط خستگی حرارتی با سیکل بالا نزدیک می‌گردد. برای فلزات آهنی با حداقل استحکام کششی کم‌تر از ۵۱۷ MPa، دمای طراحی کم‌تر از 371°C و تعداد سیکل‌های بارگذاری کم‌تر از ۳۱۲۵، می‌توان فاکتور کاهش تنش مجاز را تا مقدار ۱/۲ افزایش داد و به نوعی مقدار تنش مجاز فلز را کمی بالا برد [۸، ۹].

بررسی نشی فلنج

یکی از مواردی که باید در آنالیز تنش سیستم لوله‌کشی مورد بررسی قرار گیرد، بررسی احتمال نشی فلنج به خصوص در فلنج‌های با کلاس بالای ۶۰۰ می‌باشد. از جمله روش‌های بررسی نشی فلنج، روش فشار معادل می‌باشد. در این روش نیروی محوری و ممان خمشی مؤثر بر فلنج،

⁷ -Microstructural Image Processing (MIP)

انتخاب مقدار کمتر نیز خود به عنوان یک فاکتور اطمینان قوی محسوب می‌گردد. با جایگزینی ضخامت استفاده شده ۷/۱۱ mm و فشار عملیاتی ۱۲۴ barg، تنش محیطی به وجود آمده در سیستم برابر با ۱۴۶/۷ MPa می‌باشد که هنوز با مقدار مجاز خود یعنی ۱۶۱/۷ MPa فاصله دارد. بنابراین شکست رخ داده به واسطه فشار داخلی و ناشی از غلبه نمودن تنش محیطی بر تنش مجاز ماده نبوده است.

تنش‌های هیدرواستاتیک

این دسته از تنش‌ها جزء تنش‌های مستمر محسوب شده و تفاوت آن‌ها با بارگذاری مستمر در مقدار فشار سیال (مابین ۱/۵-۱/۲ برابر فشار طراحی سیستم)، دمای کارکرد (دمای محیط)، نوع سیال (آب با چگالی kg/m^3 ۹۹۹/۵) و مقدار تنش مجاز (برابر با تنش تسلیم ماده) می‌باشد. مقادیر تنش‌های خمشی و پیچشی به وجود آمده برای هر گره تعریف شده در سیستم، ضرائب تشدید تنش درون و برون صفحه‌ای، برابند تنش‌های حاصل شده در سیستم (ترکیبی از تنش‌های خمشی و پیچشی و تنش‌های طولی ناشی از فشار سیال)، مقادیر مجاز آن‌ها و در نهایت نسبت تنش‌های حاصل شده در سیستم به مقادیر مجاز آن‌ها مد نظر قرار داده شد. نتایج برای گره‌های شماره ۱۶۰، ۱۹۰ (همان گره محل وقوع شکست) و گره ۷۰۱۰ در جدول ۲ نشان داده شده است. بررسی‌ها نشان داد که مقدار ماکزیمم نسبت تنش‌های به وجود آمده در سیستم به مقادیر مجاز آن‌ها در هیدروتست برابر با ۵۸/۲٪ (گره ۷۰۱۰) بوده که کاملاً در محدوده مجاز خود قرار داشته و بنابراین سیستم در هنگام هیدروتست دچار تخریب نگردیده است.

تعیین شد. در این روش تعداد دانه‌ها و یا تعداد مرزدانه‌های برخورد کرده با خط بر واحد طول شمارش می‌شود و سپس با استفاده از آن طول خط برخورد متوسط محاسبه گردیده و در نهایت عدد اندازه دانه محاسبه می‌گردد. همچنین به منظور تعیین درصد عناصر مختلف در نمونه و مقایسه با استاندارد ASTM A105، آزمون کوآتومتری بر روی فلنج شکسته شده صورت پذیرفت.

نتایج و بحث

آنالیز تنش

تنش‌های محیطی

مهم‌ترین و خطرناک‌ترین دسته از تنش‌های وارده به سیستم، تنش‌های محیطی می‌باشد که از نوع تنش‌های اولیه بوده و بایستی همواره پایین‌تر از استحکام تسلیم ماده نگاه داشته شوند. بنابراین به علت اهمیت بسیار زیاد این تنش‌ها، در محاسبه ضخامت لوله، مد نظر قرار داده می‌شوند. از طرفی مقدار تنش مجاز یک سوم استحکام کششی ماده و یا دو سوم استحکام تسلیم ماده (هر کدام که کوچک‌تر باشد) در نظر گرفته می‌شود. از آنجایی که شکست در محل فلنج متصل به ولدولت حادث شده و جنس هر دو آن‌ها A105 بوده است [۱۱] با توجه به حداقل استحکام کششی و تسلیم ارائه شده به عنوان مجاز برای این جنس (۴۸۵ MPa و ۲۵۰ MPa)، تنش مجاز با در نظر گرفتن یک سوم استحکام کششی ماده برابر با ۱۶۶/۷ MPa و با در نظر گرفتن دو سوم استحکام تسلیم ماده برابر با ۱۶۱/۷ MPa خواهند بود که کم‌ترین این دو مقدار یعنی ۱۶۱/۷ MPa به عنوان تنش مجاز برای این جنس در نظر گرفته شد. اختلاف زیاد این دو مقدار مجاز و

جدول ۲- آنالیز تنش‌های هیدرواستاتیک به وجود آمده در سیستم (SIF: Stress Intensification Factor)

NODE	Bending Stress MPa	Torsion Stress MPa	SIF In Plane	SIF Out Plane	Code Stress MPa	Allowable Stress MPa	Ratio %
160	12.77	1.16	1.518	1.691	68.33	248.22	27.53
190	29.76	-4.73	1	1	75.68	248.22	30.49
7010	25.34	1.83	1	1	144.44	248.22	58.19

بارهای عملیاتی

این دسته از تنش‌ها به عنوان یک حالت تنش در نظر گرفته نمی‌شوند و تنها نیرو، گشتاور و جابجایی گره‌ها به منظور طراحی تکیه‌گاه مناسب و به عنوان داده ورودی در طراحی نازل‌های تجهیزات به کار می‌رود و لذا در این تحقیق مورد بررسی قرار نگرفتند.

بارهای مستمر

این نوع از تنش‌ها که همواره در تمامی طول کارکرد سیستم به آن وارد می‌شوند، در دو حالت وزن و فشار حداکثر سیال 124 barg (Sustained Loads: SUS1) و هم‌چنین مجموع وزن و حداقل فشار $(W + P_1) =$ کاری سیال 95 barg (SUS2 = $W + P_2$) بررسی گردید. طبق نتایج به دست آمده از نرم افزار که بخشی از آن در جدول ۳ نشان داده شده است، حداکثر تنش مستمر به وجود آمده در سیستم برابر با $84/9\%$ مقدار تنش مجاز (برای گره 6950) و هم‌چنان در محدوده مجاز خود قرار دارد، لذا تخریب صورت گرفته ناشی از برآیند نیروهای وزن و فشار سیستم نبوده است. هم‌چنین همانند بارگذاری مستمر در فشار حداکثر، طبیعتاً در این بارگذاری با فشار حداقل 95 barg نیز تخریبی رخ نداده و حداکثر تنش حاصل شده در سیستم برابر با $75/5\%$ تنش مجاز می‌باشد.

بارهای انبساطی

این نوع از تنش‌ها در اثر نواسانات دما پدید آمده و برابر با اختلاف بارهای عملیاتی و مستمر (Expansion Loads: EXP = OPE – SUS) می‌باشد و به صورت دامنه تنش (Stress Range) تعریف می‌گردد. این تنش‌ها در بازه دمایی بین دمای محیط (21°C) و دمای حداکثر 55°C ، دمای محیط و حداقل دمای 15°C و اختلاف دو دمای حداقل و حداکثر 15°C و 55°C بررسی گردیده و بخشی از نتایج به دست آمده در جدول ۴ نشان داده شده است. با توجه به آنالیز تنش توسط نرم افزار، نسبت تنش حاصل شده به تنش مجاز برای گره شماره ۱۹۰ بیش از 100% ($198/3\%$) بوده که این گره دقیقاً همان محل وقوع شکست یعنی محل اتصال ولدولت ۲" به فلنج گردنی ۲" می‌باشد. این گره در بارگذاری‌های انبساطی میان دمای محیط و حداقل و دمای حداقل و حداکثر نیز به ترتیب دارای نسبت تنش حاصل شده به تنش مجازی برابر با 118% و $317/18\%$ می‌باشد. گره ۲۲۰ همان‌گونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده، محل اتصال تبدیل 3×2 به فلنج گردنی ۲" می‌باشد که با توجه به میزان تنش انبساطی در این گره ($94/51\%$)، احتمال تخریب در این مکان در آینده بسیار محتمل خواهد بود.

جدول ۳- تنش‌های مستمر حاصل شده در سیستم در فشار ماکزیمم 124 barg

(SIF: Stress Intensification Factor)

NODE	Bending Stress MPa	Torsion Stress MPa	SIF In Plane	SIF Out Plane	Code Stress MPa	Allowable Stress MPa	Ratio %
190	34.61	-5.75	1	1	72.64	157.66	46.07
6950	43.59	1.5	1.518	1.691	128.82	151.69	84.92

جدول ۴- نتایج آنالیز تنش انبساطی در شرایط مختلف (SIF: Stress Intensification Factor)

NODE	Bending Stress MPa	Torsion Stress MPa	SIF In Plane	SIF Out Plane	Code Stress MPa	Allowable Stress MPa	Ratio %
تنش انبساطی ناشی از کارکرد سیستم در دماهای مابین دمای ماکزیمم و محیط							
190	644.68	-3.19	1	1	644.71	325.2	198.25
220	198.04	3.19	1	1	198.14	334.29	59.27
تنش‌های انبساطی پدید آمده در سیستم در بازه دمایی دمای محیط (C ۲۱) و مینیمم دما (C ۱۵)							
190	387.98	2.77	1	1	388.02	328.94	117.96
220	118.32	-2.77	1	1	118.45	334.29	35.43
تنش‌های انبساطی ناشی از کارکرد سیستم در دماهای مابین دمای ماکزیمم و مینیمم							
190	1031.41	-5.96	1	1	1031.48	325.2	317.18
220	315.71	5.96	1	1	315.93	334.29	94.51



شکل ۱۰- نمایش گره شماره ۲۲۰ (محل اتصال تبدیل ۲×۳ به فلنج گردنی ۲")

بررسی نشی فلنج

نیروها و ممان‌های ناشی از افزایش و کاهش طول لوله در اثر انبساط و انقباض بوده و تنها اثر فشار در اعمال گشتاورهای خمشی به فلنج در نظر گرفته شده و مقادیر آن‌ها نیز ناچیز می‌باشد. همان گونه که مشاهده می‌شود، فلنج‌های متصل به ابتدا و انتهای شیر تویی در هیچ یک از بارگذاری‌های هیدرواستاتیک و مستمر دچار نشی نگردیده و فشار معادل در تمامی حالات از فشار مجاز کلاس ۱۵۰۰ پایین‌تر نگاه داشته شده است. علت این امر وارد نشدن نیروها و ممان‌های ناشی از افزایش و کاهش طول لوله در اثر انبساط و انقباض بوده و تنها اثر فشار در اعمال گشتاورهای خمشی به فلنج در نظر گرفته شده و مقادیر آن‌ها نیز ناچیز می‌باشد.

با تبدیل نیرو و ممان خمشی وارد بر فلنج به فشار معادل و مقایسه آن با حداکثر فشار قابل تحمل برای فلنج طبق جدول کلاس‌بندی فلنج‌ها، نشی فلنج در تمامی بارگذاری‌های انجام شده، در دو دمای ۱۵ °C و ۵۵ °C (دمای محیط در هیدروتست) و در دو گره ۲۰۰ و ۲۱۰ (محل اتصال شیر تویی فلنجی به فلنج خود) در سیستم بررسی گردید. نتایج بررسی‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، فلنج‌های متصل به ابتدا و انتهای شیر تویی در هیچ یک از بارگذاری‌های هیدرواستاتیک و مستمر دچار نشی نگردیده و فشار معادل در تمامی حالات از فشار مجاز کلاس ۱۵۰۰ پایین‌تر نگاه داشته شده است. علت این امر وارد نشدن

جدول ۵- بررسی احتمال وقوع نشت از فلنج (SIF: Stress Intensification Factor)

Node	Axial Force (N)	Bending Moment (N.m)	P Equivalent (barsg)	Rating Temperature (°C)	Allowable Pressure/Stress	Ratio of P Equivalent to allowable Stress (%)
بررسی احتمال نشتی در هیدروتست در دمای محیط						
200	80	243	262.98	21.11	339.55	77.45
210	80	132	248.09	21.11	339.55	73.06
۱۲۴ barg بررسی احتمال نشتی در بارگذاری مستمر با فشار						
200	168	210	152.72	55	248.84	61.37
210	168	145	143.98	55	248.84	57.86
۹۵ barg بررسی احتمال نشتی در بارگذاری مستمر با فشار						
200	168	210	123.72	15	255.3	48.46
210	168	145	114.98	15	255.3	45.04
۵۵°C، ۱۲۴ barg بررسی احتمال نشتی در بار عملیاتی با فشار ماکزیمم						
200	255	6982	1065.58	55	248.84	428.22
210	255	3120	545.05	55	248.84	219.04
۱۵°C، ۹۵ barg بررسی نشتی در بار عملیاتی با فشار						
200	335	5966	899.86	15	255.3	352.47
210	335	2705	460.31	15	255.3	180.3

می‌شود، تمامی فشارهای معادل در دماهای گوناگون از میزان مجاز در جدول کلاس‌بندی فلنچ‌ها تجاوز می‌کند که این امر بیان‌گر وجود نشتی از دو فلنج متصل به شیر تویی با قطر خارجی ۶۰/۳ میلی‌متر (۲") و متعاقباً وقوع پدیده خود بروندی، کاهش بیش‌تر دمای فلز از حد مورد انتظار در اثر آزاد شدن گرمای نهان تبخیر از آن، نهایتاً ترد شدن فلز و شکست زودتر از موعد می‌باشد.

نتایج بررسی متالورژیکی

نتایج آزمون کوانتومتری

نتایج آزمون کوانتومتری از نمونه تهیه شده از فلنج A1۰۵ به منظور مقایسه با مقادیر مجاز ارائه شده در استاندارد ASTM A ۱۰۵ در جدول ۶ ارائه شده است.

در بررسی نشتی فلنج در شرایط بار عملیاتی با استفاده از روش فشار معادل، بایستی نیروها و گشتاورهای اعمال شده به فلنج تعیین و مد نظر قرار داده شوند. این نوع از بارگذاری امکان بررسی احتمال وقوع نشتی از فلنج را در شرایط عملیاتی و کارکرد سیستم خواهد داد. در این سیستم با توجه به دو فشار حداکثر و حداقل برابر با ۱۲۴۰۰ (۱۲۴ barg) و ۹۵۰۰ kPa (۹۵ barg)،

دماهای ۱۵°C و ۵۵°C دو نوع بار عملیاتی $W+D_1+T_1+P_1$ و $W+D_2+T_2+P_2$ تعریف شده و نشتی در دو حالت فوق مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده در جدول ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده

جدول ۶- نتایج آنالیز کوانتومتری و ترکیب شیمیایی فلنج A1۰۵

Mo	Cr	S	P	Mn	Si	C	Fe	عنصر
۰/۰۳۸۹	۰/۰۷۱۹	۰/۰۰۶۳	۰/۰۱۸۸	۱/۲	۰/۲۶۸	۰/۲۱۳	بالانس	ترکیب شیمیایی (درصد وزنی)

نتایج آزمایش‌های تعیین اندازه دانه

از آنجایی که فاز فریت فاز غالب در فولادهای کم‌کربن می‌باشد، اندازه دانه این فاز تأثیر به‌سزایی در استحکام، داکتیلیتی و چقرمگی شکست ماده خواهد داشت. کاهش اندازه دانه با افزایش هم‌زمان استحکام و داکتیلیتی منجر به افزایش سطح زیر نمودار تنش-کرنش و لذا افزایش چقرمگی ماده می‌گردد [۱۲]. در این تحقیق عدد اندازه دانه در مقاطع مختلف از فلنج با استفاده از روش متقاطع خطی و رسم ۵۰ خط عمودی و افقی در هر تصویر محاسبه گردید و نتایج در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷- نتایج عدد اندازه دانه برای نمونه‌های تهیه شده

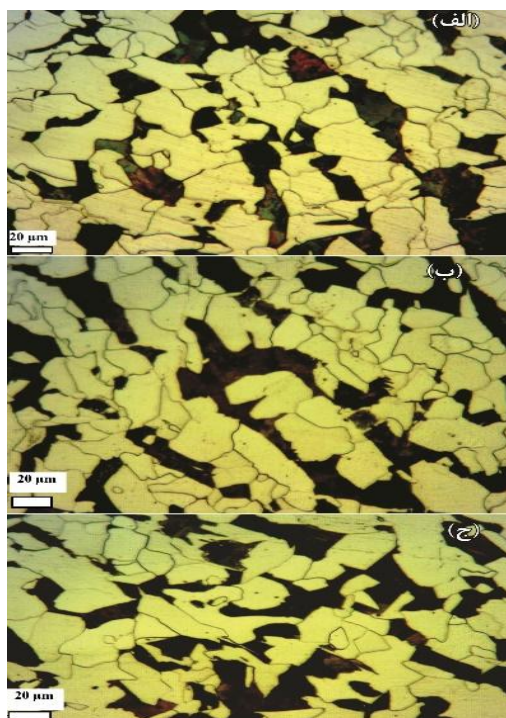
از فلنج در جهات متفاوت

میانگین عدد اندازه دانه (G)	نمونه
۷/۱۴۴	نمونه اول
۷/۲۰۲	نمونه دوم
۶/۸۳۹	نمونه سوم

با مقایسه نتایج به دست آمده در جدول ۶ با استاندارد A105، مشاهده می‌شود که درصد تمامی عناصر به غیر از منگنز در محدوده مجاز خود قرار دارد. حضور منگنز همانند کربن (کمی به میزان کم‌تر) موجب افزایش استحکام فولاد می‌گردد، بنابراین به ازای هر کاهش ۰/۱٪ کربن از حداکثر میزان مجاز خود، افزایش ۰/۰۶٪ منگنز بالاتر از میزان ارائه شده (۱/۰۵٪) البته تا سقف ۱/۳۵٪، بلا مانع خواهد بود.

نتایج بررسی‌های متالوگرافی

ساختار نمونه‌های تهیه شده از فلنج در سه راستای طولی، محیطی و شعاعی پس از مانت، پولیش و اچ کردن توسط میکروسکوپ نوری بررسی گردید. ریزساختار این نواحی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بررسی شکل ۱۱ نشان می‌دهد که فلنج فوق دارای ریزساختار فریتی (نواحی روشن) - پرلیتی (نواحی تیره) می‌باشد.



شکل ۱۱- نمایش ریزساختار نمونه خارج شده از فلنج (الف). در جهت محیطی، (ب). در جهت شعاعی و (ج). در جهت طولی

شکل ۱۲، نمایانگر سطوح روشن براقی است که در زیر میکروسکوپ الکترونی روبشی به صورت سطوح صاف دیده می‌شوند. معمولاً بر روی این سطوح صاف، یک سری خطوط رودخانه‌ای به وجود می‌آید. تشکیل خطوط رودخانه‌ای موجب قدری برآمدگی و غیریکنواختی روی صفحه‌های کوچک شکست تورقی می‌شود و جهت این خطوط، می‌تواند نمایانگر جهت پیشرفت ترک باشد. همچنین در این گونه از شکست، سطح شکست تقریباً بر جهت ماکزیمم تنش کششی عمود است. شکست تورقی درون دانه‌ای در برخی از فلزات bcc و آلیاژهای آن‌ها و دسته‌ای از فلزات hcp رخ می‌دهد و فلزات دارای ساختار fcc معمولاً از این نوع شکست مصون می‌باشند. آهن و فولادهای کم کربن یک نوع انتقال از حالت نرم به ترد را با کاهش دما از خود نشان می‌دهند که از وابستگی شدید تنش تسلیم به دما ناشی می‌شود. شکست ترد در فلزات نرم به فاکتورهایی چون هندسه، اندازه قطعه، دما و نرخ کرنش وابسته است. بنابراین حتی ممکن است قطعه‌ای که تحت سرویس مطلوبی قرار گرفته، به طرز غیر قابل پیش بینی دچار شکست گردد [۱۴]. وقوع شکست ترد برای این آلیاژ می‌تواند به واسطه وقوع پدیده خود برودتی در اثر نشت از فلنج نیز باشد که در بخش‌های قبلی به آن اشاره شد.

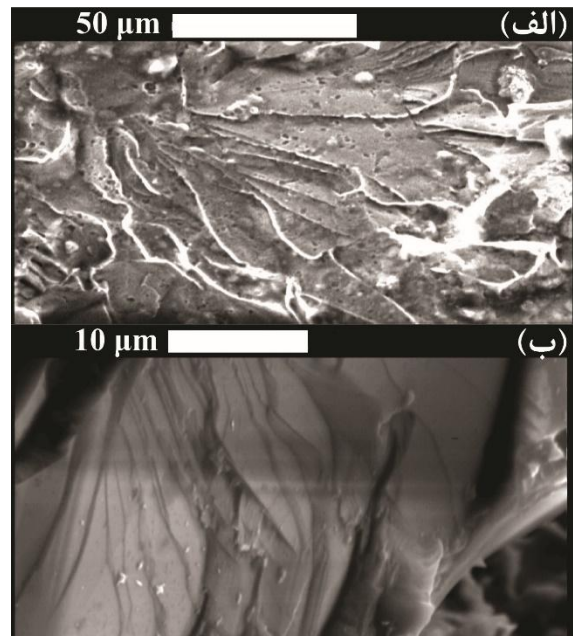
نتایج آزمون ضربه

آزمون ضربه با توجه به دمای حاصل از فرایند خودبرودتی ناشی از نشتی فلنج در دمای 36°C - 29°C (حداقل دمای کارکرد مشخص شده در ASME B31.3) و دماهای 12°C - و 22°C انجام شد. انرژی جذب شده در هر دما برای نمونه‌های خارج شده از فلنج در جهات متفاوت و با جهات شیار مختلف در جدول ۸ نشان داده شده است.

فلز با عدد اندازه دانه زیر پنج به عنوان دانه درشت محسوب شده و مقاومت به ضربه آن مطلوب نمی‌باشد، از طرفی عدد اندازه دانه بالای نه دانه ریز بوده و خواص ضربه بهینه‌ای را دارا می‌باشد. حال با توجه به اعداد اندازه دانه به دست آمده در این تحقیق، فلنج مورد نظر دانه درشت محسوب نخواهد شد. همچنین انجام عملیات حرارتی برای فلنج‌هایی با کلاس بالای ۳۰۰ ضروری بوده و عملیات نرماله کردن در دمای 910°C به مدت ۳۰ دقیقه منجر به حصول عدد اندازه دانه با مقادیری در حدود ۹-۸ می‌شود [۱۱، ۱۳].

نتایج مشاهدات میکروسکوپ الکترونی روبشی

نتایج بررسی‌های فراکتوگرافی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- الف). شکست تورقی در سطح شکست نمونه،
ب). خطوط رودخانه‌ای حاصل شده ناشی از شکست
تورقی

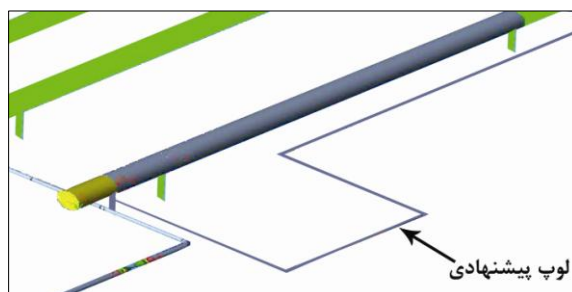
جدول ۸- انرژی جذب شده در دماهای مختلف آزمون برای نمونه‌های مختلف

میانگین	نمونه سوم	نمونه دوم	نمونه اول	انرژی شکست (J) دما ($^{\circ}\text{C}$)
۱۵	۱۴	۱۶	۱۵	-۳۶
۱۸/۶	۱۶	۱۴	۲۶	-۲۹
۲۲/۳	۱۹	۲۹	۱۹	-۱۲
۸۸	۸۶	۹۱	۸۷	۲۲

حرارتی می‌باشد و در صورتی که از وقوع این پدیده جلوگیری به عمل می‌آید، کاهش دما تا 36°C - اتفاق نمی‌افتاد. حال با در نظر گرفتن وقوع نشتی از فلنج و بروز پدیده خود برودتی، افت دما تا زیر 36°C - حادث شده و کافی نبودن انرژی شکست این نوع فولاد در این محدوده دمایی می‌تواند منجر به وقوع شکست ترد شود. لذا شکست مشاهده شده در محل اتصال ولدولت به فلنج می‌تواند به واسطه تنش‌های انبساطی و وقوع همزمان پدیده خود برودتی باشد.

پیشنهادات

راه حل مناسب و اقتصادی برای رفع این مشکل، ایجاد پیچ و خم در مسیر با اضافه نمودن مجدد زانوها و لوله‌ها خواهد بود. مسیر پیشنهادی جهت کاهش میزان تنش‌ها در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این حالت زانوهای افزوده شده به مسیر خط، با قابلیت بیضی شدن خود، انعطاف‌پذیری مسیر را افزایش خواهند داد. میزان تنش‌های حاصل شده در دو گره 160 و 190 در جدول ۹ نشان داده شده که بیانگر مجاز بودن تنش‌ها و پیشگیری از وقوع شکست می‌باشد.



شکل ۱۳- مسیر پیشنهادی جهت کاهش میزان تنش‌های اعمالی به ناحیه دچار شکست شده

جدول ۹- تنش‌های انبساطی بین دو دمای ماکزیمم و مینیمم در راه‌کار پیشنهادی جهت پیشگیری از وقوع شکست

(SIF: Stress Intensification Factor)

NODE	Bending Stress MPa	Torsion Stress MPa	SIF In Plane	SIF Out Plane	Code Stress MPa	Allowable Stress MPa	Ratio of Code Stress to Allowable Stress %
160	87.08	0.31	2.048	2.048	87.08	350.02	24.88
190	42.48	-0.32	1	1	42.49	356.96	11.9

طبق استاندارد ASME B31.3 اتصالاتی از جنس فولاد کربنی A105 بایستی تا دمای 29°C - بدون الزام و نیاز به تست ضربه تحت سرویس قرار گیرند، چرا که تا این دما برای آن تنش مجاز گزارش شده است (در حالی که در استاندارد ASME SA 105 استفاده از اتصالاتی با جنس مذکور را به دمای محیط و بالاتر از آن محدود کرده و این خود تناقضی میان این دو استاندارد می‌باشد [۱۱]). در صورت لزوم به استفاده از این جنس در دماهای پایین، انجام آزمون ضربه یک نیاز ضروری خواهد بود. مطابق با این استاندارد برای هر دما بایستی سه نمونه تهیه شده و میانگین انرژی شکست این سه نمونه برای فولادهای کربنی با حداقل استحکام کششی بین $448-517\text{ MPa}$ (حداقل استحکام کششی فولاد A105 برابر با 485 MPa) از 20 J کم‌تر نگردد [۹]. حال با توجه به داده‌های حاصل شده از آزمون ضربه، مشاهده می‌گردد که انرژی شکست در دماهای 29°C - و 36°C - از مقدار 20 J کم‌تر می‌باشد؛ اما در دماهای بالاتر از 29°C - (به ویژه در دمای محیط) فولاد فوق از انرژی شکست مطلوبی برخوردار بوده است. همان‌گونه که ذکر شد حصول دمای پایین‌تر از 29°C - به علت وقوع پدیده خودبرودتی در اثر نشتی فلنج ناشی از ممان‌های بالای اعمال شده به دلیل خستگی

به دلیل نشت فلنج در اثر ممان‌های بالای اعمالی و اخذ گرمای نهان تبخیر میعان‌ات گازی از اتصالات مجاور به فلنج و افت دمای شدید این اتصالات و به تبع آن کاهش چقرمگی می‌باشد. نتایج تحقیق نشان داد که با افزایش انعطاف‌پذیری لوله‌ها و اتصالات آنان از طریق افزایش پیچ و خم‌های مسیر، انبساط حرارتی در سیستم آزاد گشته و تنش‌های حاصله در سیستم به طور چشمگیری کاهش خواهند یافت.

References:

- 1 - Mokhtab, S., Poe, W. A. and Speight, J. G., "Handbook of Natural Gas Transmission and Processing", Elsevier Inc., 2006.
- 2 - Karam, T., "Slug Catchers in Natural Gas Production" Norwegian University of Science and Technology, 2012.
- 3 - Rahimpour, M. R., Seifi, M., Paymooni, K., Shariati, A. and Raeissi, S., "Enhancement in NGL production and improvement in water dew point temperature by optimization of slug catchers' pressures in water dew point adjustment unit" Journal of Natural Gas Science and Engineering, Vol. 3, pp. 326-333, 2011.
- 4 - "Design of Multiple Pipe Slug Catchers", Shell International Oil Products, Design and Engineering Practice, 1998.
- 5 - Bashiri, A., Fatehnejad, L., Kasiri, N., "Properly design and operate multi-pipe slug catchers," 1st Iranian Petroleum Engineering Congress, Tehran, Iran, 2006.
- 6 - COADE Mechanical Engineering News, COADE Engineering Software, Vol. 35, 2004.
- 7 - CAESAR II/User Guide Version 5.10, COADE/Engineering Physics Software USA, 2007.
- 8 - Peng, L. C., "Pipe Stress Engineering", ASME Press, 2008.
- 9 - ASME B31.3, "Process Piping", ASME International 2010.
- 10 - COADE Mechanical Engineering News, COADE Engineering Software, 1991.
- 11 - ASME SA105, "Specification for Carbon Steel Forgings for Piping Applications", ASME International, 2007.
- 12 - Davis, J. R., "Alloying: Understanding the Basics", ASM International, 2001.
- 13 - Dhooge, A. and Deleu, E., "Susceptibility of Brittle Fracture of Flanges in ASTM A105" Research Center of Belgian Welding Institute (BWI), 2002.
- 14 - ASM Metals Handbook, "Fractography", Vol. 12, 2002.

نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی علت شکست و آنالیز تنش یک انشعاب کوچک با قطر خارجی ۶۰/۳ میلیمتر (۲") در واحد لخته گیر ورودی پالایشگاه گاز پرداخته شده است. بررسی‌های به عمل آمده نشان می‌دهد که مهم‌ترین علت آسیب، عدول کردن تنش انبساطی از حد مجاز کد طراحی یعنی استاندارد ASME B31.3 بوده است. از عوامل دیگر مؤثر در شکست، کارکرد موقتی در درجه حرارت‌های پایین

