Sea Pipeline Hydrostatic Test: Parameters & Field Experiences

Abstract

All pipeline construction specifications use strict acceptance criteria. This is because of the complicated process of pipe lying and of course high sensitivity and risk. Most of the pipeline contractors and inspectors have accepted this unwritten agreement that, in spite of good considerations during pipe lying, the final assurance of the pipeline reliability is due to the final hydrostatic test. In this article the different parameters involved in pipeline hydrostatic test which yields in a good test result is taken into account. Beside the attempts are placed on estimating water behavior in pipeline under hydrostatic test, based on mechanical and thermodynamical relations.

Keywords: Pipeline, Hydrostatic Test, Entrapped Air, thermodynamic properties of liquid water, Temperature Effect.

آزمون هیدرواستاتیک خطوط لوله دریایی : پارامترها و تجربیات میدانی

چکیده

مشخصات فنی پروژه های احداث خطوط لوله دریایی با توجه به پیچیدگی اجرا، حساسیت کاری و ریسک بالای بهره برداری ایمن و پیوسته از آن، همواره از معیارهای پذیرش سخت گیرانه ای تبعیت کرده است. با این حال تقریباً تمامی قانون گزاران، پیمانکاران، ناظران و بازرسان پروژه های خط لوله بر این نکته به توافقی نانوشته رسیده اند که علی رغم تمهیدات بکار گرفته شده حین احداث خطوط لوله، کسب اطمینان نهایی از سلامت آن، در گرو آزمون هیدرواستاتیک است. پرداختن به این موضوع و بررسی پارامترهای موثر مرتبط با آزمون هیدرواستاتیک خطوط لوله دریایی به همراه تجربیات میدانی نویسندگان در مقاله مد نظر قرار گرفته است. همچنین تلاش شده است از روابط ترمودینامیکی و مکانیکی در بررسی و ارزیابی رفتار آب درون یک خط لوله ی تحت تست استفاده شود.

واژه‌های کلیدی :خطوط لوله، آزمون هیدرواستاتیک ، هوای محبوس، خواص ترمودینامیکی آب، تاثیرات دمایی.

مقدمه

آزمون هیدرواستاتیک کاربرد بسیاری در صنایع نفت دارد. از این آزمون در لوله کشی پالایشگاه ها، خطوط لوله دریایی و زمینی، مخازن ذخیره و ... استفاده می شود. این آزمون نوعی تضمین را قبل از بهره برداری نهایی برای بازرسین در بردارد. آزمون هیدرواستاتیک در خطوط لوله با توجه به زیاد بودن طول خط و همچنین مقدار زیاد آب استفاده شده جهت تست و مهمتر از همه امکان پذیر نبودن آزمون چشمی جهت بررسی خط و پیدا نمودن محل های نشتی در بسیاری از موارد پیچیدگی هایی را در زمان آزمون در بر دارد. در این مقاله آزمون هیدرواستاتیک خطوط دریایی و متغیر های اثر گذار در آن بیشتر مورد توجه قرار گرفته شده و با استفاده از روابط ترمودینامیکی، رفتار آب در دما و فشار آزمون مورد ارزیابی قرار می گیرد.

کلیات آزمون هیدرواستاتیک خط لوله

آیین نامه های مورد استفاده در آزمون هیدرواستاتیک خطوط لوله عبارتند از ANSI/ASME B31.4 و ANSI/ASME B31.8 در این آیین نامه ها ملزومات مربوط به تست ، فشار تست و نحوه محاسبه آن آمده است. همچنین API RP1110 اطلاعات و پیشنهادهای سودمندی را جهت انجام این تست بر روی خطوط لوله به بازرسین و پیمانکاران ارائه می دهد.

به طور خلاصه مقدمات آزمون هیدرواستاتیک شامل :

نصب تجهیزات، قسمت بندی نمودن خط جهت آزمون، تمیز کاری و پیگ رانی جهت اطلاع از سالم بودن خط در هنگام ساخت و پر نمودن خط با آب می باشد.

آماده سازی آزمون هیدرواستاتیک شامل:

اطمینان از ثابت شدن دما قبل از آزمون، آغاز فشار دهی به خط، محاسبه درصد هوای محبوس شده در خط لوله

و آزمون هیدرواستاتیک شامل:

نگهداری خط لوله تحت فشار تست به مدت معین (معمولا ۲۴ ساعت) و انجام آزمونهای استحکام و نشتی، بررسی داده ها و از فشار انداختن سیستم می باشد.

تجهیزات اندازه گیری مورد استفاده در آزمون هیدرواستاتیک خط لوله

عبارتند از:

دماسنج جهت اندازه گیری دمای بدنه خط لوله

دماسنج جهت اندازه گیری دمای محیط

دماسنج جهت اندازه گیری دمای آب بستر دریا/ خاک با دقت ۰/۱ درجه سانتیگراد

فشار سنجهایی معروف به Deadweight Tester . نوعی فشار سنج هیدرولیکی دقیق با دقت بالا در حد ۰/۰۱ بار

فشار سنج های معمولی

بررسی پارامترهای موثر دما، فشار و حجم در آزمون هیدرواستاتیک خطوط لوله

خواص ترمودینامیکی آب

اگر حجم آب را تابعی از دمای آب و فشار آب در نظر بگیریم داریم:

$$V=V(T,P)$$

$$\Rightarrow dV=\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P dT+\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T dP \qquad (۱)$$

مشتق های جزئی در این معادله معانی فیزیکی مشخصی را دارند و مربوط به دو خاصیت مهم در مایعات می شوند.

$$\beta \equiv \frac{1}{V}(\frac{\partial V}{\partial T})_P \quad (۲)$$ ضریب انبساط پذیری حجمی

$$\kappa \equiv \frac{1}{V}(\frac{\partial V}{\partial P})_T \quad (۳)$$ ضریب تراکم پذیری همدما

ضریب انبساط حجمی و ضریب تراکم پذیری هم دما از خواص مایعات بوده و توابعی از فشار و دما می باشند . بدین معنا که در دما و فشار معین هر مایع مقادیر مشخصی از β و κ را دارد.

با استفاده از این معادلات می توانیم رفتار آب استفاده شده در آزمون هیدرواستاتیک را در طول زمان تست بررسی نماییم و اظهار نظر دقیقی را از شرایط آزمون ارائه دهیم.

در هنگام بالا بردن فشار خط مقدار آب اضافه شده به خط توسط یک کنتر به دقت اندازه گیری می شود با اضافه شدن به حجم آب درون خط لوله و با توجه به بسته بودن خط، فشار خط نیز بالا می رود. بدیهی است که هنگام تزریق آب به خط لوله انرژی داخلی آب درون خط لوله افزایش می یابد ولی طبق محاسبات ترمودینامیکی انجام شده توسط نویسندگان این میزان افزایش انرژی داخلی ناچیز بوده و تغییرات دمایی قابل ملاحظه ای را در بر ندارد. بنابراین این مرحله را می توان یک فرایند در دمای ثابت در نظر گرفت. لذا طبق معادله ۳ داریم.

$$(\frac{\partial V}{\partial P})_T = \kappa V$$
$$\therefore \frac{\Delta V}{\Delta P} = \kappa V \quad (۴)$$

نمودار مربوط به این معادله نموداری خطی خواهد بود. در صورتیکه خط لوله را به عنوان یک جسم صلب در نظر نگرفته و اثرات انبساطی آنرا نیز محاسبه نماییم، آهنگ تغییرات حجمی خط لوله نسبت به افزایش فشار داخل آن با استفاده از روابط تعمیم یافته قانون هوک به صورت زیر محاسبه می شود.

$$\frac{\Delta V}{\Delta P} = [\frac{D}{Et}(1-\upsilon^2)]V \quad (۵)$$

مجموع اثرات تراکم پذیری همدمای آب و تغییرات حجمی خط لوله در اثر فشار تست را می توان به خوبی با فرمول زیر پیش بینی نمود.

$$\frac{\Delta V}{\Delta P} = [\frac{D}{Et}(1-\upsilon^2) + \frac{1}{B}]V \quad (۶)$$

در اینجا:

D = قطر خارجی لوله

E = مدول یانگ لوله

t = ضخامت لوله

υ = ضریب پواسون لوله

B = مدول حجمی آب

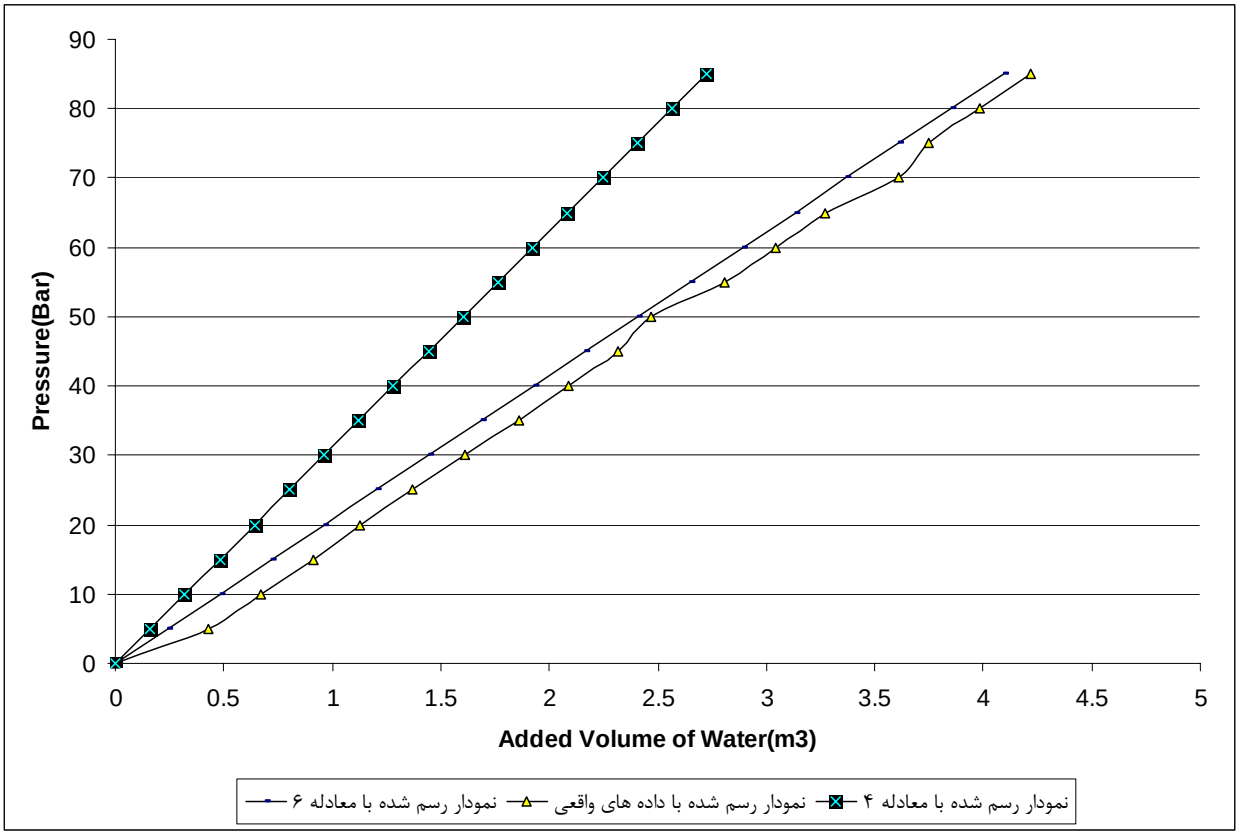
V = حجم خط لوله تست تست

لازم به ذکر است که مدول حجمی آب عکس ضریب تراکم پذیری هم دما می باشد. یعنی:

$$B = \frac{1}{\kappa} \quad (۷)$$

در شکل ۱ نمودار های مربوط به تغییرات حجم – فشار یک خط لوله دریایی در منطقه خلیج فارس به طول ۵۳۴۲ متر و ضخامت دیواره ۰/۰۱۰۵۲ متر و قطر خارجی ۰/۴۵۷۲ متر در ۲۴/۶ درجه سانتیگراد (درجه حرارت بستر دریا و دیواره خط لوله) که در

فشار ۱۷۶ بار مورد تست هیدوراستاتیک قرار گرفته است را با استفاده از معادلات ۴ و ۶ و همچنین به صورت داده های واقعی ترسیم شده است.



شکل شماره۱: تغییرات فشار خط لوله با میزان حجم آب وارد شده به لوله

همانگونه که می توان دید با اضافه شدن آب به خط و با افزایش حجم آب در خط لوله میزان فشار خط نیز بالا می رود. واضح است که دقت معادله ۶ در پیش بینی تغییرات حجم – فشار آب در خط لوله بیشتر از معادله ۴ است.

مقدار انحرافی که در نمودار واقعی نسبت به نمودار رسم شده با معادله ۶ مشاهده می شود مربوط به هوای محبوس شده در خط لوله می باشد. در هنگام پر نمودن خط با آب ممکن است مقداری هوا درون لوله محبوس شود. محاسبه این مقدار هوا در خط لوله در ساعات اولیه آزمون از اهمیت بسزایی برخوردار است. با برون یابی نمودن نمودار واقعی با محور x ها میزان درصد هوای محبوس شده در خط لوله را می توان محاسبه نمود. هوای محبوس شده بیش از مقدار مجاز(۰/۲ ٪ حجم قسمتی از خط لوله که در حال تست است) هم از لحاظ ایمنی خطرناک است و هم اینکه با تغییرات درجه حرارت محیط اطراف خط لوله میزان انبساط و انقباض هوای محبوس بیش از آب داخل لوله است ، که تغییرات فشار ناشی از این انبساط و انقباض تاثیر بر روی فشار خط می گذارد و ممکن است بازرسین را به شک بیاندازد. محاسبه هوای محبوس شده در خط هنگامی صورت می گیرد که به فشار ۵۰٪ فشار تست رسیده باشیم.

در این نمونه عملی مقدار تغییرات انرژی داخلی آب درون خط لوله از ابتدای فشار دهی تا رسیدن به فشار تست تنها در حدود ۰/۰۸ کیلوژول بر کیلوگرم محاسبه شد که تنها تغییر دمایی برابر ۰/۰۱۹ درجه سانتیگراد را می تواند در بر داشته باشد. بنابراین همانگونه که گفته شد مرحله فشار دهی خط لوله را یک فرایند هم دما در نظر گرفتیم.

بررسی ترمودینامیکی تغییرات فشار و دمای آب در تست هیدرواستاتیک خطوط لوله

اطلاع از تغییرات فشار و دمای آب در طول زمان تست به خصوص در زمانی که خط زیر فشار به مدت ۲۴ ساعت نگه داری می شود تا از عدم نشتی در خط اطلاع پیدا نماییم از اهمیت ویژه ای برخوردار است. با توجه به اینکه بعد از رسیدن به فشار تست دیگر آب به درون خط لوله پمپ نمی شود و خط لوله به مدت ۲۴ ساعت تحت فشار تست نگهداری می شود، می توانیم سیستم ترمودینامیکی خود را به صورت یک سیستم با حجم ثابت در نظر بگیریم. در اینصورت روابط ترمودینامیکی زیر را خواهیم داشت.

با توجه به معادله ۱ داریم:

$$dV = (\frac{\partial V}{\partial T})_P dT + (\frac{\partial V}{\partial P})_T dP$$

$$\therefore \frac{dV}{V} = \beta dT - \kappa dp$$

$$\beta dT - kdP = 0 \qquad \text{(حجم ثابت)}$$

$$\therefore (\frac{\partial P}{\partial T})_V = \frac{\beta}{\kappa} \Rightarrow \frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{\beta}{\kappa} \qquad (۸)$$

در قسمت قبل گفتیم که توابع حالت β و κ وابسته به دما و فشار می باشند. با مراجعه به جداول ترمودینامیکی می توانیم در فشار و درجه حرارت های مشخص مقادیر مورد نظر را برای β و κ بدست بیاوریم.

در آزمون هیدروتست خط لوله ذکر شده پس از ۲۴ ساعت دمای بستر دریا و بدنه لوله به ۲۴/۳ درجه سانتیگراد کاهش پیدا نمود. مقدار کاهش فشار طبق معادله ۷ به صورت زیر بدست می آید.

$$\kappa(24.3^o C, 176bar) = 4.337e-5 bar^{-1}$$

$$\beta(24.3^o C, 176bar) = 309.26e-6 \; {}^{1}\!/_{{}^o C}$$

$$\Delta P = \frac{\beta}{\kappa}\Delta T$$

$$\Delta P = 7.13\Delta T$$

$$\Delta T = -0.3$$

$$\Delta P = -2.13bar$$

برآورد دقیق از میزان تغییرات فشار و دما در کل خط هنگامی حاصل می شود که اثرات انبساطی و انقباضی خط لوله نیز در نظر گرفته شود. ضریب انبساط پذیری حجمی خط لوله را می توان به صورت زیر بیان نمود.

$$\delta = \frac{\Delta V}{V\Delta T} = 2\alpha(1+\upsilon) \qquad (۹)$$

با در نظر گرفتن خط لوله و آب درون آن به عنوان یک سیستم ، می توان ضریب انبساط پذیری حجمی این سیستم را به صورت زیر تعریف نمود.

$$\frac{\Delta V}{V\Delta T} = \beta - 2\alpha(1+\upsilon) \qquad (۱۰)$$

در نهایت آهنگ تغییرات فشار به دما برای این سیستم از تقسیم معادله (۱۰) بر روی معادله (۶) بدست می آید.

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{\beta - 2(1+\upsilon)\alpha}{\frac{D}{Et}(1-\upsilon^2)+\frac{1}{B}} \qquad (11)$$

در اینجا:

β = ضریب انبساط پذیری حجمی آب در دما و فشار آزمون

υ = ضریب پواسون

α = ضریب انبساط پذیری طولی لوله

D = قطر خارجی لوله

E = مدول یانگ

t = ضخامت لوله

B = مدول حجمی آب در فشار و دمای آزمون

اگر از رابطه (۱۱) در محاسبه تغییرات فشار بر حسب دما استفاده کنیم تغییرات فشار به صورت ذیر بدست می آید.

$$\Delta P = -1.34 bar$$

مقدار فوق بسیار دقیقتر از وقتی است که ما اثرات انبساطی و انقباضی خط لوله را در نظر نگرفتیم. در عمل نیز مقدار $\Delta P = -1.31$ بدست آمد که بسیار نزدیک به مقدار پیش بینی شده توسط رابطه (۱۱) می باشد.

درصورتیکه مقدار افت فشار بیش از مقدار پیش بینی شده بوسیله رابطه (۱۱) باشد می توان به صحت آزمون هیدرواستاتیک مشکوک بود. معمولا در دستورالعمل های اجرایی مقدار ۰/۲٪ فشار تست را جهت تلرانس در نظر می گیرند که این مقدار در مقایسه با میزان تغییرات فشار ناشی از تغییر دما به مراتب مقدار کمتری را دارا می باشد. در اینجا مقدار تلرانس تنها ۰/۳۵ بار می باشد که تقریبا یک چهارم تغییرات فشار ناشی از تغییر درجه حرارت آب به میزان تنها ۰/۳ درجه سانتیگراد بوده است.

نتیجه گیری

بررسی انجام شده در این مقاله نشان می دهد که در محیط دریایی خلیج فارس تنها تغییرات درجه حرارت در ۲۴ ساعت معادل ۰/۳ درجه سانتیگراد در بستر دریا باعث افت فشار معادل ۱/۳۱ بار در طول خط لوله می شود که مقداری برابر ۰/۸٪ فشار تست را داراست. این در حالی است که در دستورالعمل های اجرایی آزمون هیدرواستاتیک خطوط لوله تنها میزان ۰/۲٪ تلرانس از فشار تست مجاز شمرده می شود.

بنابراین با توجه به حساسیت آزمون هیدرواستاتیک خطوط لوله، دقت در اندازه گیری های مربوط به فشار و دمای خط لوله در هنگام تست و همچنین دمای محیط تست از اهمیت زیادی برخوردار است.

همچنین محاسبه دقیق هوای محبوس شده در خط لوله به هنگام آزمون هیدرواستاتیک نه تنها ایمنی کار را تضمین می نماید بلکه از خطاهای ناشی از انبساط و انقباض های هوای محبوس شده در خط لوله که تاثیر مستقیم بر فشار خط در طول تست دارد جلوگیری به عمل آورده، امکان تفسیر دقیقتری از شرایط خط لوله در حال تست را به همراه خواهد داشت.

مراجع

1- J.M.Smith., H.C. Van ness. M.M.Abbott., Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics, Sixth edition.
2- Ferdinand P.Beer., E.Russel Johanston. JR., Mechanics of Materials.
3- ROYAL DUTCH/SHELL GROUP, Hydrostatic Pressure Testing of New Pipeline, June 1993.