

كلية هندسة البترول

Faculty of petroleum engineering

تحديد الملامح التقنية لتصميم واستثمار أنابيب النفط مشروع تخرج لنيل الإجازة في الهندسة البترولية

إعداد الطالب: ابراهيم بسام خزيم

إشراف الدكتور ماهر سعادة

العام الجامعي 2016 / 2017

الفهرس

مقدمة
الفصل الأول- مبادئ تصميم خطوط الأنابيب
- مقدمة
1.1- الأثر البيئي.
2.1- توجيه أو تحديد مسار خط الأنابيب.
3.1- المصادقة والاعتبارات التشريعية أو القانونية.
الفصل الثاني - المقاربة التصميمية.
- مقدمة.
1.2- العوامل المؤثرة على طول خط الأنابيب.
2.2- اختيار سماكة جدار الأنبوب.
3.2- انتقاء نوعية المادة الإنشائية المناسبة للأنبوب.
4.2- الصلابة.
5.2- الضغط التشغيلي
6.2- تأثيرات درجة الحرارة .
7.2- المطرقة المائية.
1.7.2- التوجيهات التي تقدمها المواصفات القياسية.
8.2- تغليف خطوط الأنابيب.
1.8.2- التغليف بأساس من قطران الفحم.
2.8.2- التغليف الشريطي.
3.8.2- الأغلفة البلاستيكية القابلة للتقلص حراريا.
4.8.2- أغلفة البولي ايثلين.
5.8.2- أغلفة الايبوكسي الملتصقة بالصهر (FBE).
9.2- حماية خط الأنابيب.
الفصل الثالث- بناء خط الأنابيب وتقنيات تقييم المخاطر.
1.3- طرق تصنيع خطوط الأنابيب.
2.3- تحضير الأرض ،الحفر و تركيب ووصل الأنابيب.
3.3- الحماية من التآكل.
1.3.3 - منظومات الحماية بتيار الانحلال.
2.3.3- منظومات الحماية بالتيار الفعال .
3.3.3- الإرشادات المقدمة في المواصفات القياسية حول الحماية الكاتودية.
4.3- المعابير والمواصفات القياسية لخطوط الأنابيب. 5.3- تقنيات تقييم المخاطر.
6.3- للتقييم الكمى للمخاطر.
0.5- التقييم الدمي للمحاصر.

11. 11. Ch
7.3- التقييم الكيفي للمخاطر.
الفصل الرابع- اختبارات الضغط والبدء بالتشغيل.
1.4- اختبارات الضغط.
2.4 الإعداد للتشغيل.
1.2.4- الكسح بالميتانول.
2.2.4- التجفيف بالهواء أو النتروجين مع استخدام حلقات رغوية.
3.2.4- التجفيف التشغيلي.
4.2.4- التجفيف بالتخلية.
القسم العملي.
النتائج و المقترحات.
المراجع العلمية.

كلمة شكر

بيديك صنعت المجد، حولت احلام الشباب الى واقع، بتفانيك و اخلاصك كنت الاب و الاخ والصديق.

استاذي السيد العميد الدكتور ماهر سعادة اهديكم رسالتي.

الى من مهد الطريق و ذلل الصعاب لنا، الى من كان تفانيهم منارة لارشادنا الى بر الامان، اساتذتي تعجز كلماتي ان تعطيكم حقكم.

اهديكم رسالتي مع الشكر دائما.

المقدمة

أدت الحاجة لنقل النفط ومنتجاته من نقطة الإنتاج إلى مكان الاستخدام النهائي إلى زيادة سريعة في عدد خطوط الأنابيب التي يجري تصميمها و بناؤها.

والعديد من هذه السوائل تعتبر من المواد الخطيرة ،التي تنقل في كثير من الأحيان على مقربة من المراكز السكانية أو من خلال مناطق عالية الحساسية بيئياً، والحاجة لحماية هذه الأنابيب على طول الخط أصبحت روتينية و في بعض الحالات الإشراف عليها إلزامي على مدار (24) ساعة ، ولذلك تزداد الحاجة إلى أنظمة تحكم وقياس سريعة و موثوقة إضافة إلى طرق المعالجة السريعة.

لقد شهد القرن الأخير تطورا" سريعا" في مختلف مجالات الحياة وكان هذا التطور مترافقا"مع تطور الصناعة في شتى مجالاتها وبالتالي كانت الحاجة ملحة إلى البحث عن مصادر الطاقة بمختلف مجالاتها وبما أن النفط يمثل أهم مصادر الطاقة في العالم و تزايد الطلب العالمي عليه فدعت الحاجة إلى بدء استخدام الغاز الطبيعي كمصدر بديل عن النفط وبالتالي ازدياد الاكتشافات الجديدة وحجمها وبالتالي زيادة الحجوم المنقولة من حقول النفط أو الغاز إلى مصافى التكرير أو مناطق الاستهلاك فتطورت بذلك طرق نقلها.

توجد عدة طرق لنقل النفط أو الغاز ونذكر منها:

- 1. النقل بواسطة صهاريج السكك الحديدية.
 - 2. النقل الملاحي البحري.
 - 3. النقل بو اسطة خطوط الأنابيب

وانتشر استخدام خطوط الأنابيب بشكل واسع وذلك لنقل كميات كبيرة دون توقف، وتزداد الجدوى الاقتصادية للنقل باستخدام هذه الطريقة مع زيادة الحجوم المنقولة واستمراريتها.

لذا في هذه الدراسة نناقش بالتحديد مبادئ ومنهجيات تصميم خطوط الأنابيب وتقنيات تقييم المخاطر واختبارات الضغوط وبدء التشغيل.

تتكون دورة حياة خط نقل النفط والغاز من العديد من المراحل الهامة التي تتمثل في: التصميم، البناء أو التركيب، التشغيل و الصيانة وأخيراً الإصلاح. سيعالج هذا الفصل المرحلة الأولية لتصميم خط أنابيب نقل الغاز و النفط. خلال طور التخطيط وقبل الشروع بالقيام بأي عمل لبناء خط أنابيب جديد هناك عدد من العوامل التي تؤثر على عملية التصميم والتي يتوجب أن تؤخذ بعين الاعتبار وهي:

- الأثر المترتب على البيئة.
- توجيه أو مسار خط الأنابيب.
- المصادقة و الاعتبارات التشريعية.

كما تتوفر حالياً العديد من المعايير أو المواصفات القياسية التي تشكل دليلاً ومرشداً يمكن الاستعانة به خلال عملية التصميم. إذ يمكن لبعض المشغلين أن يعتمدوا المعايير أو المقاييس الوطنية المتوفرة لديهم إلا أن العديد منهم يعتمد على المعايير القياسية الأجنبية الشائعة الاستخدام في صناعة خطوط الأنابيب. فيما يخص أنابيب نقل النفط و المغاز نذكر بشكل خاص معاييرالـ API (معهد البترول الأمريكي) و الـ ANSI (معهدالمقاييس الوطني الأمريكي) والـ BS (المواصفات القياسية البريطانية). إذ أنه ضمن المملكة المتحدة تصمم خطوط أنابيب النفط و المغاز بالاستعانة بالمواصفة القياسية [1]0 80 PD 8010 إلى المواصفة القياسية المملكة المتحدة وهي مواصفة تم تطويرها من قبل اتحاد مديري ومهندسي الغاز ضمن المملكة المتحدة وهي خاصة بتصميم و بناء وتشغيل خطوط الأنابيب العاملة عند ضغوط المملكة المتحدة وهي خاصة بتصميم و بناء وتشغيل خطوط الأنابيب العاملة عند ضغوط المملكة المتحدة وهي خاصة بتصميم و بناء وتشغيل خطوط الأنابيب العاملة عند ضغوط أسباب وعواقب فشل خطوط الأنابيب. لذا يبدو أن المواصفة 1GE/TD/1 جديرة بأن تكون مرجعاً لعمليات تطوير معايير دولية لخطوط الأنابيب و أن تعتبر توجيهاتها الممارسة الأفضل مرجعاً لعمليات تطوير المنابيب بيين الجدولان 1.1 و 2.1 ملخصاً للمعايير القياسية السائدة على مستوى العالم بما فيها المعايير المذكورة أعلاه [3].

1.1 الأثر البيئي:

يجب أن يؤخذ الأثر المحتمل الذي يمكن أن يخلفه خط الأنابيب المنشئ حديثاً على البيئة. حيث يبين الشكل 1.1 الآثار البيئية التي تخلفها خطوط الأنابيب البرية أمّا الشكل 2.1 فهو يبين آثار خطوط الأنابيب البحرية.

الجدول1.1: المواصفات القياسية التي تقدم توجيهات و إرشادات حول تصميم و بناء و صيانة خطوط الأنابيب.

	على البر
خطوط أنابيب النفط	ASME B31.4
خطوط أنابيب الغاز	ASME B31.8
خطوط أنابيب الغاز	IGE/TD/1
خطوط أنابيب الغاز و النفط	PD 8010
خطوط أنابيب النفط و الغاز	AS 2885
	الأنابيب البحرية
خطوط أنابيب النفط و الغاز	(توصیات) DNV Recommended Practice
خطوط أنابيب النفط و الغاز	PD 8010
خطوط أنابيب النفط	API RP 1111
خطوط أنابيب النفط	ASME B31.4
خطوط أنابيب الغاز	ASME 31.8

من الضروري تحديد الآثار البيئية المحتملة لخطوط الأنابيب خلال طور التخطيط والتأكد من موافقتها أو عدم مخالفتها للتشريعات المناسبة. من الواضح هنا أنه ستكون هناك متطلبات متباينة على مستوى العالم لذا سيتم اعتبار مثال نموذجي ضمن المملكة المتحدة يتمثل في "التشريعات المتعلقة بأعمال خطوط أنابيب نقل الغاز العامة"، إذ يتطلب هذا التشريع إجراء تقييم للأثر البيئي (EIA) في المناطق ذات البيئة الحساسة. و بالتالي قبل أن يتمكن المشغل من بناء خط أنابيب جديد يتوجب عليه إجراء EIA (تقييم للأثر البيئي) خلال مرحلة التصميم.

الجدول1.1: لمحة عن المواصفات القياسية التي تقدم توجيهات إرشادية حول تصميم وبناء و صيانة خطوط الأنابيب.

الجهة المخولة بالمصادقة	رمز التشريع	التشريع الحاكم
HSE (مديرية الصحة و السلامة)	PD 8010	تشريعات الأمان المتعلقة بخطوط الأنابيب في المملكة المتحدة
وزارة النقل	DOT	تشريعات وزارة النقل في الولايات المتحدة

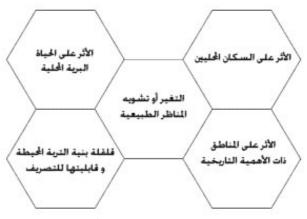
توجد عدة تشريعات بيئية بهذا الخصوص، أمّا التشريعات المعتمدة في المملكة المتحدة فهي تتضمن:

تشريعات الاتحاد الأوروبي

- 97/11/EC آثار المشاريع على البيئة.
- 92/43/EEC الحفاظ على الحياة الطبيعية الحيوانية و النباتية.

تشريعات المملكة المتحدة

- قانون الغاز وتشريعات أعمال خطوط أنابيب نقل الغاز العامة.
- تشريعات تقييم الأثر البيئي لخطوط الأنابيب 200، رقم 1928.
 قو انين المملكة المتحدة.
 - القانون البيئي 1995.
 - قانون حماية البيئة 1990.
 - قانون خطوط الأنابيب الخاص بأنابيب نقل النفط البرية.



الشكل 1.1 الاعتبارات البيئية لخطوط الأنابيب البرية.



الشكل 2.1 الاعتبارات البيئية لخطوط الأنابيب البحرية.

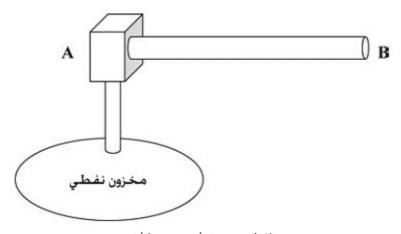
أمّا بالنسبة لخطوط الأنابيب البحرية يتوجب إيلاء اهتمام خاص للمناطق الحساسة المتأثرة بإنشاء خطوط أنابيب جديدة. وهذه الاعتبارات تفرضها التشريعات التالية:

• قانون خطوط أنابيب البترول تحت المائية [4] و هو قانون ينظم عملية الاستخراج الاقتصادي للنفط مع حماية البيئة.

2.1 التوجيه أو تحديد مسار خط الأنابيب.

يشكل موضوع التوجيه أو المسار عاملاً هاماً في عملية تصميم أي خط أنابيب، ذاك أنه يتم من خلاله تحديد المناطق التي يمكن لخط الأنابيب المرور عبرها وتلك التي لا يمكنه عبورها. فمثلاً لدى تصميم خط أنابيب متجه من النقطة A إلى النقطة B يكون من المناسب اتباع أقصر المسارات و هو الخط المستقيم الواصل بين النقطتين (انظرالشكل 3.1) إلا أن هذا الأمر ليس ممكناً دائماً إذ أنه لدى توجيه خط أنابيب بري يتوجب أن يأخذ المسار بعين الاعتبار النواحي التالية:

- المناطق الحساسة (المنتزهات الوطنية، مناطق تجديد أو تنشيط الغابات).
 - البيئة (الحياة البرية، المواقع الأثرية).
 - الجغرافيا (المناطق الوعرة، خطوط الفوالق، مناطق الحت والتعرية).
 - التقاطعات (الطرقات، الخطوط الحديدية، الأنهار).
 - مناطق التجمعات السكنية.
 - مواقع محطات الضواغط.
 - مواقع التجهيزات ما فوق الأرضية.



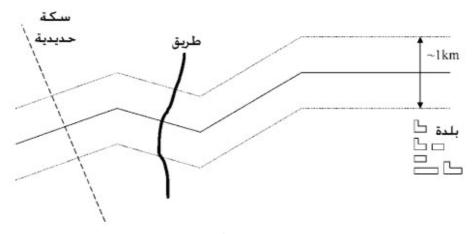
الشكل 3.1 مسار أو توجيه خط أنابيب.

كما يتوجب أن يتجنب مسار خط الأنابيب الخطوط أو المسارات ذات الكثافات المرورية العالية و خطوط نقل الطاقة الكهربائية و كذلك خطوط أنابيب الغاز و النفط الأخرى. و إذا كان من المفترض القيام بتقاطع ما يتوجب أن يكون خط الأنابيب معامداً للطريق أو السكة الحديدية (انظرالشكل4.1). إضافة إلى ذلك يتوجب إجراء دراسة جدوى اقتصادية تأخذ العوامل المذكورة أعلاه بعين الاعتبار لدى تحديد مسار خط الأنابيب بين نقطة البداية و النهاية. عادة ما يحدد شريط بعرض KM 1 لتبيان اية انحرافات لازمة في مسار خط الأنابيب كما هو مبين في الشكلين 4.1 و 5.1.

كذلك الأمر لدى توجيه خطوط النقل البحرية قد لا يكون المسار المستقيم متاحاً أو ممكناً. إذ يجب تجنب العقبات مثل:

- المنصات البحرية الأخرى.
 - حطام السفن.
- فوهات الآبار التحت بحرية.

• التفاصيل السطحية لقاع البحر (المنحدرات، البراكين، الحت و التعرية)



الشكل 4.1 ممر مسار خط الأنابيب.

يتوجب توخي الحذر لدى توجيه خط الأنابيب في المناطق التي تشهد حركة ملاحة بحرية كثيفة إذ يمكن أن يتضرر خط الأنابيب بواسطة مراسي السفن أو يمكن أن تغرق القوارب و السفن الصغيرة نسبياً إذا علقت المرساة بخط الأنابيب. و يتمثل المبدأ العام في أن خط الأنابيب يجب أن يكون عمودياً على حارة أو مسار خط الملاحة بمعنى أن تكون فترة عبور السفن ضمن منطقة خط الأنابيب قصيرة قدر الإمكان. هناك اعتبارات أخرى تؤثر على توجيه خط الأنابيب وهي مبينة في الشكل 2.1. يجرى في العادة مسح صوتي (سونار) زلزالي لتحديد طبيعة وتفاصيل قعر البحر بشكل إجمالي.

لدى الوصول إلى مرحلة التصميم التفصيلي لخط الأنابيب البحرية يتوجب أخذ عدد من الأمور بعين الاعتبار و نذكر منها بشكل خاص ما يلى:

- استقرارية خط الأنابيب على القعر، إذ يتوجب تقييم الحمولات الهيدروليكية للتأكد من أن خط الأنابيب سيكون مستقراً على قعر البحر تحت تأثير وزنه فقط وأنه لن يتحرك بتأثير التيارات و حركة الأمواج. تتضمن هذه الحمولات قوى الرفع و السحب و العطالة.
- تخضع خطوط الأنابيب تحت سطح البحر و التي لا تجري ضمن خندق محفور إلى حركات اهتزازية ناجمة عن الاحتكاك و الحركات السطحية، و هكذا فإنه لدى جريان التيارات البحرية حول محيط الخط تنشأ الدوامات، ولدى اقتراب تواتر هذه الدوامات من التواتر الطبيعي لخط الأنابيب يمكن أن تحرض هذه الدوامات نشوء اهتزازات في الخط مما يولد إجهادا فيه الأمر الذي قد يقود إلى انهيار أو فشل خط الأنابيب في نهاية الأمر. يتوجب بالتالي إجراء تحليل للمناطق الحرة (غير المستقرة على القعر) على طول خط الأنابيب و التحقق من عدم حصول اهتزازات في الخط.
- وأخيراً تتعرض خطوط الأنابيب تحت البحرية لخطر أنثناءات الرفع اللاحقة. و هي ظاهرة معقدة و تتطلب دراستها أو نمذجتها التفصيلية استخدام برمجيات تحليل بالعناصر المنتهبة.

يتوجب إذا أن تؤخذ جميع هذه العوامل بعين الاعتبار لدى تحديد مسار أو توجيه خط الأنابيب.



© NACE International 2006 الشكل 5.1 توجيه خط أنابيب النقل.

الجدول 3.1 بارامترات التصميم التفصيلية

قطر خط الأنابيب
حساب سماكة الجدار
نوعية المادة الإنشائية
الضغط التشغيلي الأقصى (الأعظمي) و ظروف الجريان أو التدفق
درجة الحرارة التشغيلية
هبوط الضغط
الحماية من التآكل

3.1 المصادقة و الاعتبارات التشريعية أو القانونية

بعد دراسة الأثر البيئي و تحديد مسار خط الأنابيب تتمثل المرحلة التالية في إعلام السلطات المختصة بنية بناء خط أنابيب جديد. ضمن المملكة المتحدة تتمثل هذه السلطات بوزارة التجارة و الصناعة (DTI)، والتي يتوجب إعلامها عن النية بالمباشرة بالمشاريع الجديدة و إبلاغها كذلك بالأثار البيئية المحتملة لهذه المشاريع. بالنسبة لخطوط الأنابيب التي تعبر حدود البلدان يتوجب إعلام المزارعين إذ يمكن أن يتقاضى هؤلاء أجوراً أو أثماناً لقاء السماح بمرور خط الأنابيب ضمن الأملاك أو الأراضي الخاصة. إضافة إلى ذلك يتوجب الحصول على شهادات سماحية لتقاطعات مسار خط الأنابيب مع الطرقات و السكك الحديدية و الأنهار. و أخيراً و بهدف تلافي حدوث تعطيل للمشروع خلال طور البناء و الإنشاء يتوجب اتخاذ الإجراءات المناسبة التي تضمن عدم تأثير المسار المقترح على الحياة البرية و بهذا يمكن تجنب التأخيرات المكلفة.

بعد القيام بجميع هذه الإجراءات و انتقاء الخيارات المحتملة لخط الأنابيب يمكن الشروع بالتصميم التفصيلي لخط الأنابيب؟ بالتصميم التفصيلي لخط الأنابيب؟ تنطوي هذه العملية على تحديد قيم بارامترات التصميم التفصيلية المبينة في الجدول 3.1 والتي ستتم دراستها بالتفصيل في الفصل اللاحق.

الفصل الثاني

المقاربة التصميمية

بعد تحديد مسار خط الأنابيب، و أخذ العوامل المذكورة في الفصل 1 بعين الاعتبار تتمثل المرحلة التالية في البدء بالتصميم التفصيلي لخط الأنابيب و هي عملية تتضمن تحديد بارامترات مختلفة مثل التدفق الحجمي و طول خط الأنابيب و هبوط الضغط المقبول أو المسموح و غيرها. لاحظ أن أطوال خطوط الأنابيب تتباين بشكل كبير جداً إذ يمكن أن تتراوح بين أقل من 1 km و يمكن أن تصل حتى آلاف الكيلومترات.

أمّا بالنسبة لتحديد شكل أو حالة المنتج المراد ضخه أو نقله فمن الضروري التعرف إلى محاسن و مساوئ نقل المنتجات بالشكل الغازي أو السائل. تتمثل المحاسن الرئيسية لخطوط نقل السوائل بما يلي:

- لدى إجراء عمليات الكشف باستخدام الـتجهيزات الذكية يمكن التحكم بالسرعة بصورة أسهل.
 - يمكن الكشف أو فحص خط الأنابيب بسهولة أكبر باستخدام الأمواج فوق الصوتية.
 - يمكن نقل المنتجات بصورة متقطعة أو على دفعات.
- بما أن السوائل غير قابلة للانضغاط عموماً لذا فإن العواقب المترتبة على فشل أو انهيار خط الأنابيب تكون أقل حراجة (إذ يمكن أن يوقف الجريان بسرعة).
 - يمكن التحكم بالجريان أو التدفق بصورة أكبر.

أمّا مساوئ خطوط أنابيب نقل السوائل فهي:

- هناك احتمالية لحدوث تلوث أكبر في حال حصول تسريب ذاك أن الهيدر وكربونات أثقل من الهواء.
 - يمكن لخط الأنابيب أن ينغلق أو يتضيق مقطع الجريان فيه بواسطة الرواسب الشمعية.
 - هناك احتمالية أكبر لحصول تآكل في الأنبوب تحت تأثير ظروف الجريان الحامضية.
 تتجسد محاسن تشغيل خطوط الأنابيب لنقل الغاز في النقاط التالية:
- التلوث المحتمل أقل خطورة نظراً لأن الغازات المنقولة كالميثان أخف من الهواء و هي تتطاير في الغلاف الجوي.
 - يمكن تصريف الغازات بسهولة أكبر.
- بشكل عام تكون الرواسب المتشكلة في خطوط الغاز أقل من تلك المتشكلة في خطوط نقل السوائل.
 - لا يشكل التآكل الحامضي مشكلة كبيرة كما هو الحال في خطوط نقل السوائل.

أمّا مساوئ خطوط نقل الغاز فهي الآتية:

- تكون عواقب فشل الأنبوب أكبر نظراً لأن الغازات قابلة للانضغاط و بالتالي فإن السيطرة على الجريان أو التدفق تكون أصعب.
- تكون عملية الكشف أو فحص الأنبوب باستخدام الأمواج فوق الصوتية أكثر تعقيداً ويتطلب إجراؤها استخدام تجهيزات تخصصية.
- تشغل خطوط أنابيب الغاز عادة على أنها خطوط ذات منتج وحيد (أي يمكنها أن تنقل منتجاً واحداً).

• لدى إجراء الفحص باستخدام الــتجهيزات الذكية يكون التحكم بسرعة الكشف أكثر صعوبة نظراً لطبيعة الغازات القابلة للانضغاط.

1.2 العوامل المؤثرة على طول خط الأنابيب:

هذه العوامل هي الضغط التصميمي، هبوط الضغط المقبول أو المسموح، القطر، سماكة الجدار و مخطط درجات الحرارة.

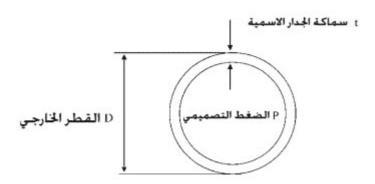
إن المعادلات الأكثر استخداماً في إجراء الحسابات الخاصة بجريان الموائع هي معادلتي Panhandle و Weymouth في حالة الغازات. أمّا بالنسبة لجريان السوائل فإن العوامل الأكثر تأثيراً تتضمن رقم رينولدس (Re) و معامل الاحتكاك المحسوب باستخدام معادلة Colecrook-White أو المستخرج من مخطط Moody. يبين الشكل 1.2 المعادلات الأساسية المستخدمة لاحتساب هبوط الضغط في خطوط أنابيب الغاز و السوائل [5]. يلاحظ أنه نظراً لكون الغازات قابلة للانضغاط فإن هذا الأمر يفرض استخدام حلول تحليلية أكثر تعقيداً بهدف إجراء حسابات التدفق أو الجريان. يتيح استخدام المعادلات المذكورة الحصول على قطر الأنبوب و الضغط التشغيلي.

2.2 اختيار سماكة جدار الأنبوب:

بعد حساب الضغط و القطر اللازمين باستخدام معادلات الجريان المذكورة أعلاه يجب أن يكون الأنبوب سميكاً كفاية لتحمل الضغط التصميمي. يبين الشكل 2.2 الصيغة الأساسية للمعادلة المستخدمة في العديد من المواصفات القياسية و التي تربط بين سماكة الأنبوب الاسمية و الضغط التصميمي لمقطع مستقيم من أنبوب فولاذي، حيث أن t هي سماكة الجدار الاسمية، و P هو الضغط التصميمي (P هو الفطر (P هو الفطر (P هو معامل الوصل و P النوعية الدنيا (P هو معامل الوصل و P هو معامل مرتبط بدرجة الحرارة.

جريان الغازات	جريان السوائل
معادلة جريان الغازات (جريان مضطرب تماماً)	$rac{P}{ ho} = rac{fLv^2}{2D}$ ضياع الضغط أو فاقد الرأس
Weymouth: $Q = 432.7 \frac{T_b}{P_b} \left[\frac{P_1^2 - P_2^2 - E}{GLT_f Z_n} \right]^{1/2}$.	في حالة جريان صفحي (Re <
$D^{2.667}$	$f = \frac{64}{Re}(2100)$
Panhandle:	
$Q = 737.02 \left(\frac{T_b}{P_b}\right)^{1.02} \left[\frac{P_1^2 - P_2^2 - E}{G^{0.961} L T_f Z_n}\right]^{0.51}.$	$Re=rac{ ho D \overline{v}}{\mu}$ رقم رینولدس
$D^{2.53}$	
	في حالةجريان مضطرب (Re > 4000)
	معادلة Colebrook-White
عدل التدفق أو الجريان Q	f : معامل الاحتكاك
(Pa) صنغط الأساس = P_b	L : الطول (m)
درجة الحرارة الأساس (°C) درجة الحرارة الأساس	(m) خشونة السطح : k
الكثافة النوعية للغاز G	Re: رقم رينولدس.
(m) طول الأنبوب $= L$	m) : القطر الداخلي (m)
Z= معامل انضغاطية الغاز	سرعة المائع (m/s) اسرعة المائع v
معامل الكفاءة E	$ar{v}$: السرعة الوسطى (m/s)
D = القطر الداخلي (m)	اللزوجة الحركية (cSt) اللزوجة الحركية μ
	Pa : الضغط (Pa)
	$ ho$ الكثافة (kg/m 3) : الكثافة $ ho$

الشكل2.1: المعادلات المستخدمة في الحسابات الأساسية لبار امترات جريان الغازات والسوائل عبر خطوط الأنابيب.



لدى تصميم خطوط الأنابيب هناك طريقة للربط بين سماكة الجدار الاسمية مع الضغط التصميمي لقسم مستقيم من الأنبوب و هي

 N/mm^2 الضغط الداخلي = P

 $mm \cdot D$ القطر = D

 N/mm^2 مقاومة الخضوع الدنيا المحددة،

معامل تصمیمی. F

معامل الوصل. E

معامل متعلق بدرجة الحرارة. T

الشكل 2.2: حساب سماكة الجدار.

تعتمد العديد من المواصفات القياسية هذه العلاقة أوهذه المقاربة لحساب سماكة جدران الأنابيب الاسمية مثل[2] B31.4 [7] ، PD 8010 [1, 6] الانابيب الاسمية مثل حساب سماكة جدرانا لأنابيب البحرية يفترض بالأنبوب أن يكون سميكاً كفاية لكيلا ينهار تحت تأثير الضغط الهيدروستاتيكي مع الأخذ بعين الاعتبار أيضاً الضغط الداخلي و بالتالي فإن السماكة الدني اللأنبوب تحسب على النحو الأتي:

حيث أن CA هي سماحية التآكل و P_{int} و P_{ext} هما الضغطان الداخلي و الخارجي على الترتيب.

3.2 انتقاء نوعية المادة الإنشائية المناسبة للأنبوب

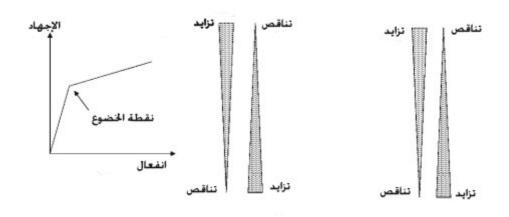
تتميز خصائص المواد الإنشائية بأهمية كبيرة في منظومات خطوط الأنابيب حيث أنها تضمن عدم انثناء أو خضوع الأنبوب تحت الإجهاد أو تحطمه نتيجة لنشوء التشققات إضافة إلى السماح بلحامه بسهولة. يبين الشكل 3.2 العلاقات الأساسية بين هذه العوامل.

لدى تحديد المادة الإنشائية للأنبوب سواءاً كان برياً أو بحرياً من الضروري التأكد من الفولاذ المستخدم يمتلك متانة مناسبة و مقاومة كسر جيدة إضافة إلى قابلية جيدة للحام. و بالتالي يتم طلب الفولاذ عادة وفقاً لمعايير و مواصفات قياسية معينة مثل مواصفة معهد البترول الأمريكي[9] API 5L[9] و المواصفة الأوروبية [2]2-10208 EN يبن الجدولان 1.2 و 2.2 طيفاً من المواد المتوفرة [2]. يتوجب ملاحظة أن القيم المبينة في الجدولين لكل من مقاومة

الخضوع و مقاومة الشد هما خاصتين بالمواصفة فقط وأن القيم الفعلية لهذين البار امترين تكون أكبر من تلك المبينة في الجدولين.

4.2 الصلابة:

تعرف الصلابة بأنها مقاومة المادة لتوسع أو امتداد الشقوق. فإذا تم صنع الأنبوب من مادة منخفضة الصلابة عندئذ يكون الأنبوب معرضاً لخطر التكسر القصيف أو الهش وبالتالي لن يكون قادراً على االصمود في حال وجود تشققات صغيرة. في الواقع كلما كانت المادة أكثر صلابة كلما كان حجم الشق الذي يمكنها الصمود بوجوده أكبر.



الشكل 3.2: العلاقة بين خصائص المادة و قابليتها للحام.

الجدول 1.2 مواصفات المواد الإنشائية وفقاً للـ API 5L

AF	الرتبة أو النوع	
UTS (N/mm ²)	SMYS (N/mm ²)	الربيد أو التوح
331	207	Grade A
413	241	Grade B
413	289	X42
434	317	X46
455	358	X52
489	386	X56
517	413	X60
530	448	X65
565	482	X70
620	551	X80

(تتمة الجدول 1.2)

EN 10	الرتبة أو النوع	
SMTS (N/mm ²)	SMYS (N/mm ²)	الربية أو اللوح
415	245	L245
415	290	L280
460	360	L360
520	415	L415
535	450	L450
570	485	L485
625	555	L555

إن العوامل الأساسية التي تؤثر على مستوى المتانة تتمثل في درجة الحرارة التشغيلية و البنية أو الشكل الهندسيين و الإجهادات التشغيلية و بالتالي فإن التشغيل عند إجهادات تشغيلية أعلى ينطلب مواداً ذات صلابة أعلى بينما يسمح التشغيل عند إجهادات أقل باستخدام مواد ذات صلابة أدنى. تقدم المواصفات القياسية للمواد كالـ [9] API 5L توصيات حول المتانة الدنيا للمواد المستخدمة. إضافة إلى أن مواصفات أخرى مثل الـ [8] B31.8 و الـ[12] المتشكلة على عينات توصي باعتماد طرق لضبط التشققات من خلال مراقبة مظهر التشققات المتشكلة على عينات Charpy كاملة الحجم. وهذه الطرق تتضمن الآتى:

- ضبط التكسر القصيف أو الهش: للحماية في مواجهة توسع أو امتداد التشققات التقتتية الناجمة عن الهشاشة، و يمكن أن يستخدم اختبار التمزق أو التحطم بالثقل الساقط لـ (BDWTT) Battelle
- ضبط التكسر المطيل: للحماية في مواجهة امتداد التشققات الطولانية و يستخدم في هذا السياق اختبار الصدم بالثلمة V لـ Charpy.

5.2 الضغط التشغيلي:

إن أمر فشل أو انهيار خط الأنابيب لهو خطر يتوجب على المصمم أن يأخذه بعين الاعتبار. هناك طريقة لتقليل هذا الخطر تتمثل في وضع نهاية عليا للإجهادات التشغيلية بناءاً على مستوى أو تعداد السكان في المناطق المجاورة للخط؛ حيث تدعى هذه الطريقة باسم "التصنيف المناطقي"، إضافة إلى أن العديد من المواصفات القياسية تضع معاملاً تصميمياً بحيث تمنع خط الأنابيب من العمل فوق مستويات إجهاد معينة. تنطبق هذه العوامل على جميع خطوط الأنابيب من الأنابيب الصاعدة وحتى الأنابيب البرية. يضم الجدولان3.2 و4.2 ملخصاً لمستويات الإجهاد و تصنيفاتها وفقاً للمواصفة [6]PD 8010 و المواصفة ASME

B31.4[7] و المواصفة [8]ASME B31.8 و المواصفة ASME B31.8 و المواصفة

	PD 8010		ASME B31.4		ASME B31.8		CSA Z662	
Class	معامل التصميم	المعيار (نسمة\هكتار)	معامل التصميم	العيار (نسمة(هكتار)	معامل التصميم	المعيار (مبنى)	معامل التصميم	المعيار (مبنى) ا
Class 1	0.72	<2.5 ريفية	0.72	None	0.8 (Div. 1) 0.72 (Div. 2)	≤ 10	0.72	≤ 10
Class 2			0.72	None	,	>10 and <46	0.6	>10 and <46
Class 3	0.3	2.5< شبه الريفية	0.72	None	0.5	≥46	0.5	≥46
Class 4	0.3	و مراكز البلدات	0.72	None	0.4	مباني متعددة < الطوابق أربع طوابق	0.4	مباني متعددة < الطوابق أربع طوابق

الجدول 3.2: تصنيفات الموقع و معاملات التصميم الموافقة للأنابيب البرية.

توفر المعاملات التصميمية (DFs) هامش أمان يضمن أن خط الأنابيب لن يعمل عند قيمة 300% من الـ SMYS و هذا العامل مرتكز أساساً على المعادلة التالية:

حيث أن σ_H هو الإجهاد المحيطي و SMYS هي مقاومة الخضوع الدنيا النوعية. بغية تقدير الإجهادات المحيطية تستخدم معادلو بارلو Barlow و هي موجودة في العديد من المواصفات القياسية لخطوط الأنابيب (انظر الشكل 4.2). يجب الانتباه إلى أنه في حالة الأنابيب البحرية يتوجب أخذ الضغط الهيدروستاتيكي الخارجي بعين الاعتبار و الذي يؤثر باتجاه معاكس لاتجاه الضغط الداخلي المؤثر على جدران الأنبوب.

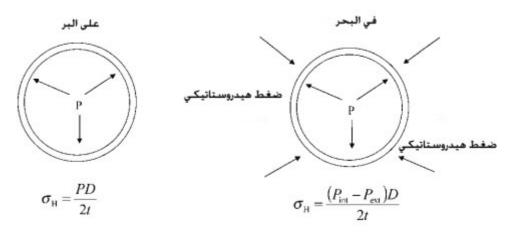
	الصواعد و أنابيب المنصات	الأنابيب على قعر البحر
ASME B31.4		
الإجهادات المحيطية	0.60	0.72
الإجهادات الطولانية	0.80	0.80
الإجهادات المركبة	0.90	0.90
ASME B31.8		
الإجهادات الحيطية	0.50	0.72
الإجهادات الطولانية	0.80	0.80
الإجهادات المركبة	0.90	0.90

الجدول 4.2: المعاملات التصميمية للأنابيب البحرية.

6.2 تأثيرات درجة الحرارة

إذا كان خط الأنابيب سيعمل ضمن درجات حرارة عالية جداً أو منخفضة جداً عندئذ ستتغير خصائص المواد الإنشائية للأنبوب و تؤثر بالتالي على الظروف التشغيلية للأنبوب، لذا فإنه من الضروري أن تؤخذ تأثيرات درجة الحرارة بعين الاعتبار. تشغل أغلب خطوط الأنابيب ضمن مجال درجات الحرارة المحددة للمعدن بموجب المواصفة القياسية مثل

المواصفة API 5L، و لكن لدى التشغيل عند درجات حرارة خارج المجال المحدد (عند درجات حرارة عالية أو منخفضة) عندئذ يتوجب اعتبار تأثير هذا الأمر على متانة و صلابة المعدن. تذكر المواصفة B31.8 عوامل تصميمية مرتبطة بدرجة الحرارة من أجل درجات حرارة تشغيلية تفوق الـ °F 250، وذلك لأنه ابتداءاً من هذه الدرجة تبدأ مقاومة الخضوع للمعدن بالتغير.



الشكل 4.2 حساب الإجهادات المحيطية (الحلقية)

عند درجات الحرارة المنخفضة جداً تبدأ صلابة أو تماسك الفولاذ بالتغير حيث أن التشغيل عند درجات حرارة أقل من درجة حرارة التحول هش—مطيل يمكن أن يزيد من خطر فشل الأنبوب نتيجة لحصول تكسرات قصيفة أو هشة. توصي المواصفة[2] IGE/TD/1 بأن تختبر صلابة المادة الإنشائية عند درجة حرارة °0.

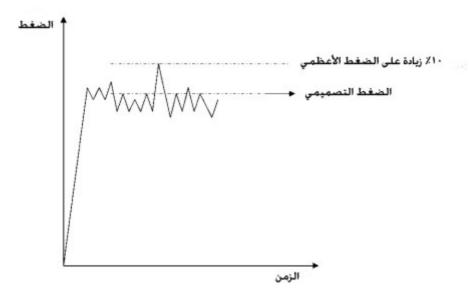
7.2 – المطرقة المائية

إضافة إلى الحمولات التي تم ذكرها سابقاً يجب الانتباه إلى ارتفاع الضغط بسبب المطرقة المائية التي تنشأ نتيجة تغير مفاجئ في التدفق مما يؤدي إلى حدوث موجة ضغط تنتقل عبر المائع المنقول. و بهذا فإن الأسباب النموذجية لحدوث المطرقة المائية تتمثل في الآتي:

- إغلاق صمام بشكل مفاجئ.
 - إقلاع مضخة؛
 - إغلاق خط الأنابيب.

1.7.2 التوجيهات التي تقدمها المواصفات القياسية:

تحدد معظم المواصفات القياسية التصميمية هوامش سماحية للضغط تأخذ بعين الاعتبار فرط ارتفاع الضغط. حيث تحدد المواصفة [6] PD 8010 و المواصفة[7] B31.4 قيمة ضغط زائد تبلغ %10 من الضغط التصميمي (انظر الشكل 5.2)



الشكل 5.2 اعتبارات اندفاع الضغط

8.2 تغليف خطوط الأنابيب

يبين الشكل 6.2 مجمع أنابيب مغلفة باستخدام الأيبوكسي الملصق بالصهر. يمكن اتباع طريقتين أساسيتين تساعدان في الحماية من التآكل هما:

- تغلیف الأنابیب.
- استخدام منظومة حماية كاتودية (CP).

هذا و يتوجب دوماً أن تكون الطريقة الأساسية للحماية من التآكل هي تغليف الأنابيب التي يمكن تدعيمها أو تعزيزها من خلال استخدام منظومة حماية كاتودية فعالة. يحدث التآكل عادة في المناطق التي يكون فيها التغليف متضرراً حيث يمكن للرطوبة أن تنفذ إلى سطح الأنبوب و بالتالي إذا لم تكن منظومة الحماية الكاتودية فعالة سيحدث التآكل.



Courtesy of BSR Pipeline Services Limited الشكل 6.2 طرق تغليف الأنابيب.

من المصادر الأخرى التي يمكن أن تبدأ التآكل تشكل فجوات بين طبقة الغلاف و الأنبوب و التي يمكن أن تحتجز الرطوبة بين سطح الأنبوب والغلاف.

يتوجب على غلاف الأنبوب أن يتميز بالخصائص الآتية:

- الثباتية الحرارية (ألا يتشوه تحت تأثير درجات الحرارة التشغيلية المرتفعة).
 - مقاومته لنفوذ المياه و الرطوبة عبره.
- الثباتية الكيميائية (ألا يتردى نتيجة التفاعلات الكيميائية مع التربة أو الوسط المحيط به).؟
 - سهولة الاستخدام
 - الاقتصادية.

يبين الشكل 7.2 طرق التغليف النموذجية للأنابيب البرية و البحرية. هذا و يمكن تلخيص طرق التغليف الواسعة الاستخدام فيما يلي:

1.8.2 التغليف بأساس من قطران الفحم

جرت العادة قديماً على استخدام الأغلفة البيتومينية (القار أو الاسفلت) والأساس المصنوع من قطران الفحم في تغليف خطوط الأنابيب على مستوى العالم. و يتم تطبيق هذه الأغلفة من خلال لف نسيج مصنوع من الألياف الزجاجية حول محيط الأنبوب ومن ثم إشباعه بخليط مصهور من البيتومين أو القطران الفحمى. من مساوئ هذا التغليف نذكر:

- يتميز هذا الغلاف بحساسيته تجاه درجات الحرارة العالية أو المنخفضة.
 - يكون عرضة للتكسر تحت تأثير ضغط التربة.
- يمكن أن يحدث إنفصال للغلاف عن الأنبوب تحت تأثير الصدمات أو نتيجة للإعداد السيء لسطح الأنبوب.





الشكل 7.2 طرق التغليف النموذجية لخطوط الأنابيب

2.8.2 التغليف الشريطي.

تستخدم الأغلفة الشريطية عادة لإصلاح أقسام أو أجزاء الأنابيب التي تضرر غلافها، أكثر الأنواع انتشاراً هي تلك التي تطبق باستخدام الحرارة حيث يتم لف نوع من نسيج أو قماش مشبع بالقار حول محيط الأنبوب و من ثم يجري تسخينه. و هناك أيضاً لشرائط التي تطبق

على البارد وتكون مصنوعة من البولي ايثلين حيث توجد طبقة ذاتية الالتصاق على الشريط. تعتبر طريقة التغليف الشريطي رخيصة نسبياً إلا أنها لا تتمتع بالمرونة الكافية لتحمل درجاتا لحرارة العالية كما يمكن أن تتضرر تحت تأثير ضغوط أو إجهادات التربة.

3.8.2 الأغلفة البلاستيكية القابلة للتقلص حراريا.

وهي تتكون أساساً من صفائح أو أغلفة بلاستيكية حساسة للحرارة، إذ أنه بعد وضعها على محيط الأنبوب يجري تطبيق الحرارة عليها من مشعل مناسب مما يتسبب بتقلصها أو انكماشها لتضغط على سطح الأنبوب. تستخدم هذه الطريقة عموماً للأنابيب ذات الأقطار الصغرى وكذلك حول وصلات الأنابيب.

4.8.2 أغلفة البولى ايثلين.

تطبق أغلفة البولي ايثلين خلال مرحلة التصنيع إمّا من خلال لف شريط لاصق حول محيط الأنبوب أو من خلال بثق البولي ايثلين كغلاف خارجي واحد. خلال عملية بثق البوليايثلين يتم وضع أساس أولاً على محيط الأنبوب ومن ثم طبقة من مادة لاصقة و أخيراً يتم بثق طبقة أو طبقتين من البولي ايثلين.

الكلفة النسبية	طريقة التغليف
مرتفعة	FBE ، البولي ايتلين
متوسطة	البيتومين، قار الفحم، الأسفلت
منخفضة	التغطية الشريطية

الجدول 5.2 الكلفة النسبية لطرق التعليف المختلفة

لا تتميز طبقة الغلاف المتشكلة بتحملها لتغيرات درجة الحرارة كما هو الحال بالنسبة لأغلفة الايبوكسي الملصقة بالصهر وذلك لأن طبقة المادة اللاصقة تحد من هذه القدرة.

5.8.2 أغلفة الايبوكسي الملصقة بالصهر (FBE).

تعتبر أغلفة الـ FBE من أكثر طرق التغليف وثوقية حالياً المعتمدة من قبل مشغلي خطوط الأنابيب. تطبق هذه الأغلفة خلال مرحلة التصنيع مع إمكانية تطبيقها في الموقع على الأماكن المتضررة الغلاف مثل الوصلات في الحقول أو مواقع التركيب. يتم تطبيق الـ FBE من خلال تحضير سطح الأنبوب أولاً و تسخينه قبل تطبيق بودرة الايبوكسي. و من ثم تبدأ هذه الحبيبات الدقيقة بالذوبان على محيط الأنبوب و تشكل ارتباطاً قوياً مع السطح لدى تصلبها. يتميز هذا النمط من التغليف بمتانته و مقاومته لتشكل العيوب فيه إضافة لمقاومته للانفصال عن السطح ودرجات الحرارة المرتفعة.

يبين الجدول 5.2 الكلف النسبية لطرق التغليف المختلفة.

9.2 حماية خط الأنابيب.

تتضمن حماية خطوط الأنابيب استخدام الطرق التالية:

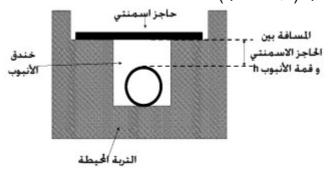
- التغليف بالبيتون.
- زيادة سماكة الجدار.
 - الدفن في التربة.
- وضع أغلفة حماية.
- وضع علامات تتبيه
- استخدام صفائح بيتونية واقية.

تتمثل المناطق التي تتطلب وجود حماية بالنسبة للأنابيب البرية في المناطق التي يتقاطع خط الأنابيب فيها مع الطرق أو مع خطوط السكة الحديدية أو مع مناطق حساسة أخرى. أمّا بالنسبة للأنابيب البحرية فهي تتضمن المناطق التي تشهد حركة ملاحة بحرية كبيرة. تستخدم حشية أو وسادة الحماية البيتونية للأنابيب البحرية بغية تحقيق الغايات التالية:

- التغليف الوزني أو تأمين غلاف ذي وزن كبير (طفو سلبي).
 - الحماية من الصدمات.

نظراً لكون الخط مغموراً يؤمن الغلاف البيتوني طفواً سلبياً يمنع الأنبوب من الطفو نحو سطح المياه إضافة إلى أنه يحمي الأنبوب ضد الصدمات خلال فترة حياته التشغيلية و التي يمكن أن تحدث بسبب:

- مراسى السفن.
- تجهيزات الصيد (شباك الصيد).



الشكل 8.2 حماية خط الأنابيب من الصدمات

أمّا بالنسبة للأنابيب البرية فيمكن حمايتها باستخدام من خلال وضع علامات تنبيه و صفائح بيتونية فوق الأنبوب. توصي المواصفة [GE/TD/1[2] باستخدام الكتل أو الصفائح البيتونية لحماية الأنابيب من تأثير الصدمات كما هو مبين في الشكل 8.2، إضافة إلى أن الفراغ أو المسافة h بين الأنبوب و الجدار البيتوني يجب أن تكون كبيرة كفاية بما يمنع انتقال الصدمة عبر الهواء (تأثير مطرقة الضغط).

الفصل الثالث

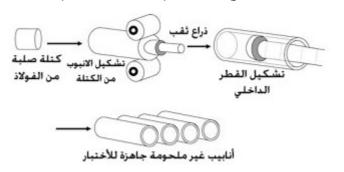
بناء خط الأنابيب و تقنيات تقييم المخاطر.

1.3 طرق تصنيع خطوط الأنابيب.

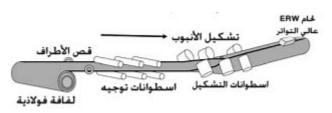
هناك أربع أنماط من الأنابيب التي تستخدم في تركيب خطوط الأنابيب هي:

- الأنابيب المسحوبة أو غير الملحومة (تتم صناعة الأنبوب بدون استخدام اللحام).
 - أنبوب ملحوم بالقوس الكهربائية (ERW).
 - انبوب ملحوم طولياً بقوس معزولة أو مغمورة (LSAW).
 - انبوب ملحوم حلزونياً بقوس معزولة (SSAW).

تأتي الأنابيب غير الملحومة عادة بأقطار أو بأبعاد صغيرة تصل حتى mm 450 و ما دون. و طرق صناعة الأنابيب غير الملحومة هي إما بالتطريق أو بالتسحيب أو بالبثق. أحد المصنعين و هو Mannesmann Millينتج أنابيب غير ملحومة تدعى بالأنابيب المسحوبة حيث يتم استخدام كتلة فولاذية و يجري تشكليها بحيث تأخذ شكل الأنبوب من خلال سلسلة من الأسطوانات و الأذرع الثاقبة. و من ثم يتم ضبط سماكة جدران هذه الأنابيب و قطرها بواسطة سلسلة إضافية من الاسطوانات و أذرع التطريق (انظر الشكل 1.3).



الشكل 1.3 صناعة الأنابيب المسحوبة أو غير الملحومة.



الشكل 2.3 صناعة أنابيب الـ ERW.

تصنع الأنابيب الملحومة عادة من خلال لف صفائح فولاذية على شكل أنبوب و من ثم لحام أطراف الصفيحة الطولانية معاً. في حالة أنابيب الـ ERW تبدأ العملية انطلاقاً من لفافة الصفائح الفولاذية التي يتم فكها و تسطيحها و من ثم يجري إعداد الحواف للف الصفيحة طولانياً على شكل أنبوب. تتم عملية اللف من خلال تمرير الصفيحة عبر سلسلة من اسطوانات الضغط و حلقات التسخين التي تعطي للصفيحة شكل الأنبوب. و أخيراً تتم عملية اللحام بالقوس الكهربائية من خلال تمرير تيار كهربائي عالى التردد عبر الأطراف المتلاصقة لسطح

الأنبوبمما يصهر النهايتين معاً لتشكيل درزات لحام خالية من العيوب. تتوفر الأنابيب من هذا النوع بأقطار صغيرة نسبياً تصل حتى mm 500 و ما دون (الشكل 2.3).

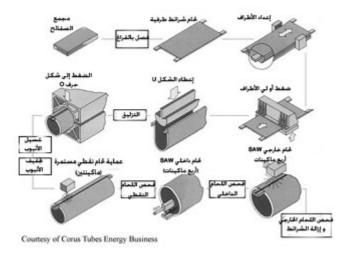
هناك نمط آخر من الأنابيب الملحومة و هي الأنابيب الملحومة طولياً بقوس مغمورة أو معزولة (LSAW) و طريقة تصنيعها مبينة بشكل مختصر في الشكل 3.3. على العموم تستخدم هذه الطريقة لتصنيع الأنابيب ذات الأقطار من mm 400 m و ما فوق:

- تقص صفائح فو لاذية إلى الطول المطلوب للأنبوب (يبلغ m 12 في الحالة القياسية أو النموذجية) و يتم تحضير أو إعداد الأطراف الطولانية لعملية اللحام.
- تثنى حواف الصفيحة أو لاً و من ثم تضغط الصفيحة بحيث تأخذ شكل الحرف U و بعد ذلك إلى الشكل O بواسطة سلسلة من عمليات التشكيل على البارد.
- و أخيراً يتم لحام الحواف الطولية داخلياً و خارجياً باستخدام اللحام بالقوس المغمورة (انظر الشكل 4.3).

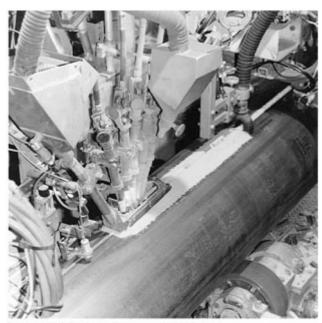
بغية التحقق من نوعية المنتج تجرى سلسلة من الاختبارات التي تتضمن:

- اختبار التمدد الميكانيكي و ذلك لإحداث إجهاد قدره %1.5~ مما يزيد من المتانة و يكشف مدى تماسك أو قوة اللحام.
- الاختبار الهيدروستاتيكي و ذلك بتطبيق حتى %95~ من مقاومة الخضوع الدنيا المحددة (SMYS).
- إجراء فحوص من خلال الاختبارات الغير اتلافية NDT كالأمواج فوق الصوتية و الفصح المغناطيسي للحبيبات البلورية و التصوير الإشعاعي.

تستخدم الأنابيب الملحومة حلزونياً بالقوس المغمورة (SSAW) في بناء خطوط الأنابيب التي تزيد أقطارها عن mm 400 إلا أن قطر الأنبوب الناتج هنا يتوقف على زاوية اللف و سماكة الصفيحة الفولاذية المستخدمة في التصنيع. تتم عملية التصنيع من خلال اللف الحلزوني الساخن لصفائح الفولاذ عبر سلسلة من الاسطوانات. خلال عملية فك لفافة الصفائح الفولاذية يتم تحضير حواف الصفيحة للحام و من ثم تجبر الصفيحة على أخذ الشكل الحلقي أو الحلزوني بواسطة اسطوانات التشكيل. و أخهيراً تتم عملية لحام الحواف بين كل صفيحتين باستخدام قوس كهربائية مغمورة. كما هو الحال في عمليات التصنيع الأخرى يتم اختبار مقاطع الأنابيب المصنعة هيدروستاتيكياً و باعتماد الـ NDT (الاختبارات الغير اتلافية) في المصنع للتحقق من متانة أو تماسك اللحام.



الشكل 3.3 تصنيع أنابيب الـ SAW.

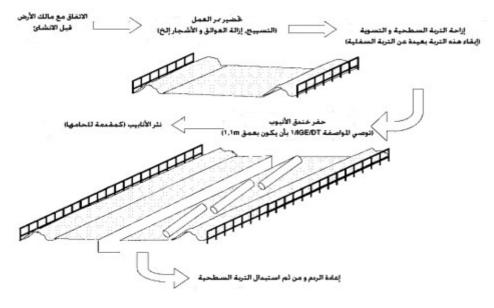


Courtesy of Corus Tubes Energy Business الشكل 4.3 اللحام بالقوس المغمورة.

2.3 تحضير الأرض، الحفر و تركيب و وصل الأنابيب.

تتضمن عملية تحضير الأرض لدى تركيب خطوط الأنابيب البرية من عدد من المراحل كما هو مبين في الشكل 5.3. و بشكل مختصر يمكن القول بأن المراحل الأساسية لإنشاء خطوط الأنابيب البرية تتمثل في الآتي:

- الحصول على موافقة مالك الأرض.
 - تحضير مسر أو ممر العمل.
 - كشف أو إزاحة التربة السطحية.
 - حفر الخندق أو المجرى.
 - تركيب و وصل الأنابيب.
- إعادة ردم الخندق و استبدال أو إصلاح التربة السطحية.



الشكل 5.3 مراحل إعداد الأرض.

إن الفائدة الرئيسية المتأتية من دفن خط الأنابيب تتجسد في حمايته من الضرر إلا أن هذه الأمر يتيح أيضاً بإعادة المناظر الطبيعية إلى حالتها الأصلية. يمكن أيضاً للأنابيب البحرية أن تدفن ضمن خندق أو مجرى أو يمكن أن تترك ببساطة لتستند على قاع البحر.

تتكون المراحل الرئيسية لإنشاء خطوط الأنابيب البحرية و إعداد أرضية الاستناد مما يلى:

- مسح قاع البحر باستخدام سونار بمسح جانبي لتحديد نوعية التربة و الخصائص الفيزيائية مثل البروزات الصخرية و الصخور الكبيرة و التجاويف.
- تحضير المسار أو المجرى قبل التركيب و يتضمن إزالة التجمعات الرملية و الأوساخ باستخدام شبكات الالتقاط و غيرها.
- تحضير أو تجهيز مناطق التقاطع مع خطوط الأنابيب الأخرى من خلال وسائد أو جسور خاصة.

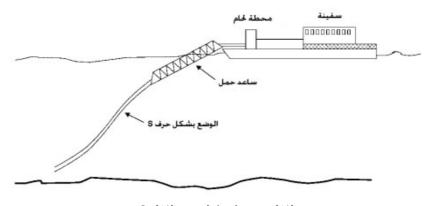
يمكن وضع الأنابيب وفق طرق متعددة إلا أن المقاربات الرئيسية لإنجاز ذلك تتمثل في الآتي:

- عملية الوضع بشكل حرف S و هي مبينة في الشكل 6.3. حيث يتم لحام أنبوب واحد طوله m 12 و يتم اختبار منطقة اللحام باستخدام اختبارات الـ NDT (الاختبارات العير اتلافية) و من ثم تطبق أغلفة الوصلات بالتتابع و ذلك على سطح مركب أو سفينة. و من ثم يتم إنزال القسم المتشكل من الخط إلى قعر البحر باستخدام ذراع (أو ذيل) مرتبط بذيل السفينة و نظام شد. يجعل هذا النظام خط الأنابيب يأخذ شكل حرف ك لدى توضع طرفه على قعر البحر.
- عملية الوضع بشكل حرف ل (انظر الشكل 7.3) تعتمد هذه الطريقة على استخدام منصة واحدة لإتمام أو تركيب عدة أنابيب معاً و من ثم يتم رفع المقاطع المشكلة و من ثم إنزالها إلى قعر البحر ليأخذ الخط خلال مرحلة التركيب شكل حرف ل. تتميز هذه العملية عن عملية التركيب بالشكل S بأن الخط يتعرض خلال عملية التركيب لاجهادات أقل.

- السحب أو القطر على القعر: يتم هنا سحب حزم الأنابيب على قعر البحر حتى الوصول الى الموضع المطلوب.
- التركيب انطلاقاً من بكرة: يتم في هذه الطريقة بناء الخط أولاً على البر و من ثم لفه حول بكرة كبيرة و من ثم ينزل إلى قاع البحر باستخدام طريقة الوضع بشكل الحرف ل.

أمّا حفر خندق في قاع البحر لدفن خط الأنابيب فيه فيمكن إنجازه بالاعتماد على إحدى الطرق الثلاث الآتية:

- جهاز القطع أو الحفر: و هي آلة تسير على طول المسرى المحدد لخط الأنابيب و تقوم بقطع التربة باستخدام أسنان ميكانيكية.
 - الحراثة: و هي آلة حراثة تحت مائية تجر على قعر البحر باستخدام مركب قطر.
- النوافث: و هي تستخدم لتوليد منافث مائية عالية الضغط تقوم بإبعاد التربة منشأة بذلك الخندق المطلوب.



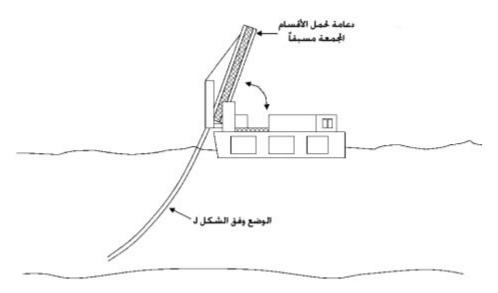
الشكل 6.3: طريقة الوضع بالشكل S

3.3 الحماية من التآكل.

كما ذكرنا سابقاً في القسم 7.2 تتجسد الطريقة الرئيسية لحماية خطوط الأنابيب من التآكل في تغليفها و استخدام منظومة حماية كاتودية CP مناسبة. أمّا طريقتي الحماية الكاتودية الأساسيتين فهما:

- منظومات الحماية المنحلة.
- منظومات الحماية بتطبيق تيار فعال.

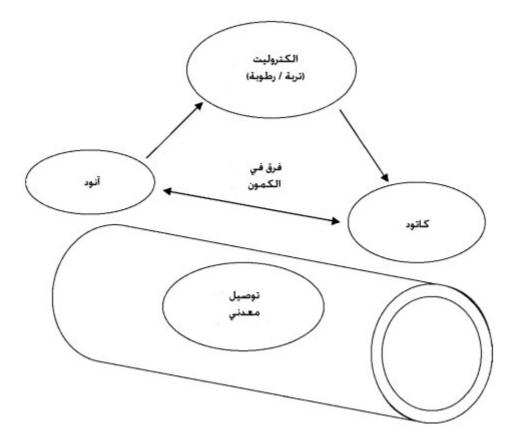
يبين الشكل 8.3 العناصر الأساسية لتآكل خطوط الأنابيب. إذ أنه حتى يحصل التآكل يتوجب وجود منطقتين هما: الآنود و الكاتود؛ حين يحدث فرق في الكمون بين الآنود و الكاتود و نتيجة وجود الموصل بينهما المتمثل بسطح الأنبوب و المحلول الالكتروليتي (التربة المحيطة) تتوفر الظروف الملائمة لنشوء خلية تآكلية. و ما إن تنشأ هذه الخلية حتى يمر تيار كهربائي من الأنود عبر الالكتروليت (المحلول الناقل للتيار الكهربائي) متجهاً إلى الكاتود حيث يعود التيار إلى المعدن. يحدث التآكل في منطقة الأنود فقط حيث يقوم الحديد بتشكيل شوارد معدنية تتفاعل مع الرطوبة المحيطة لتشكل الصدأ (انظر الشكل 9.3).



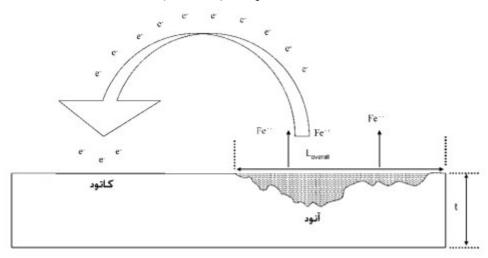
الشكل 7.3: طريقة الوضع بالشكل ل

يعتمد معدل أو سرعة التآكل في الخلية التآكلية على فرق الكمون بين الأنود و الكاتود. و بإسقاط هذه الظاهرة على خطوط الأنابيب يبدو أن العوامل التي تقود إلى احتمالية تشكل خلايا تآكلية تتمثل فيما يلى:

- التغيرات في نوع التربة (التي تمثل الالكتروليت).
- ظروف التربة الهوائية و غير الهوائية (الترب الهوائية تميل إلى تشكيل مناطق آنودية بينما الترب اللاهوائية تشكل مناطق كاتودية).
- عد تجانس أو تماثل بنية المعدن على طول خط الأنابيب (يتوجب الرجوع إلى الكمونات الطبيعية للمعادن المختلفة في السلسلة الغلفانية). فإذا تم وصل معدنين مختلفين مباشرة بواسطة الكتروليت عندئذ سيكون المعدن ذو الكمون الطبيعي الأقل هو الأميل إلى التآكل. على سبيل المثال إذا تم وصل انبوب برونزي قديم مع انبوب فولاذي جديد عندئذ سيكون تآكل انبوب الفولاذ مفضلاً و ذلك لأنه يمتلك كموناً طبيعياً أكبر و لكنه بالقيمة السالية.



الشكل 8.3 العناصر الأساسية لتآكل الأنابيب.



الشكل 9.3 مناطق الكاتود و الأنود.

1.3.3 منظومات الحماية بتيار الانحلال.

تقوم منظومات الحماية الانحلالية هذه على مبدأ الكمونات الطبيعية للمعادن. إذ تتحقق الحماية من خلال توصيل معدن آخر إلى التربة ظ الالكتروليت بحيث يكون تآكله مفضلاً مقارنة بمعدن الأنبوب (أي استخدام معدن ذي كهرسلبية أعلى)، و بالتالي سيشكل هذا المعدن آنوداً و يشار إليه بالأنود المنحل أو المضحى به. من الأنودات الشائعة الاستخدام هناك قطع الماغنزيوم التي توضع على طول خط الأنابيب و تتآكل عوضاً عن معدن الأنبوب. يمكن استخدام هذه الأنودات في التطبيقات التالية:

- خطوط الأنابيب البحرية.
- أقسام خطوط الأنابيب البرية القصيرة.

2.3.3 منظومات الحماية بالتيار الفعال.

تستخدم منظومات الحماية بالتيار الفعال لحماية خطوط الأنابيب العابرة للبلدان (الطويلة) و هي تعتمد على مصادر الطاقة الكهربائية الرئيسية مع محولات لتطبيق تيار مستمر بفولطية محددة بين الآنود و الكاتود. تستخدم الفولطية الخارجية لإحداث تيار الحماية و لضمان أن سطح الأنبوب يشكل الكاتود على الدوام. تتمثل القياسات الرئيسية المجراة في هذه المنظومات بكموني العمل و التوقف و المقاسين بالنسبة لإلكترود قياسي من سلفات النحاس. من الضروري قدر الإمكان قياس الكمون على سطح الأنبوب (كمون الاستقطاب) و من ثم أخذ قياسات كمونات التوقف. هذا و تدعى هذه العملية بالمقاطعة المتزامنة. أمّا إذا لم يكن القيام بذلك ممكناً كما هو الحال بالنسبة للمنظومات القديمة فيتوجب عندئذ قياس الكمونات على السطح و التي تدعى بكمونات العمل.

3.3.3 الإرشادات المقدمة في المواصفات القياسية حول الحماية الكاتودية.

توصي المواصفات القياسية مثل الـ NACE recommended practice على طول (توصيات NACE) [11] بأنه بغية تحقيق حماية كاتودية فعالة فإن كمون التوقف على طول خط الأنابيب يجب أن يبقى ضمن مجال يتراوح بين mV - 850 وحتى 1200 mV أمّا إذا لم يكن بالإمكان قياس كمونات التوقف عندئذٍ يجب أن تبقى كمونات العمل فوق T250 mV.

4.3 المعايير و المواصفات القياسية لخطوط الأنابيب.

يمكن أن يكون استخدام المواصفات القياسية (الكودات) مربكاً نظراً لتعدد المواصفات المتوافرة و اختلاف البلدان المصدرة لها إضافة إلى اختلاف التوصيات المثلى أو الفضلى بين هذه المواصفات. على العموم فإن المواصفات القياسية الرئيسية المعتمدة في صناعة خطوط أنابيب المغاز و النفط مبينة في الشكل 10.3.

تقوم هذه المواصفات أو الكودات على أساس تقديم الإرشاد و التوجيه حول تصميم و بناء و تشغيل خطوط الأنابيب سيجري تصميمه و بناؤه بشكل آمن و من ثم المحافظة على ديمومة و وثوقية خط الأنابيب خلال فترة حياته التي تتكون من المراحل التالية:

- التصميم
- البناء و التركيب.
- اختبارات الضغط
 - التشغيل.
 - الصيانة
 - الإصلاح.
 - ايقاف الاستثمار.

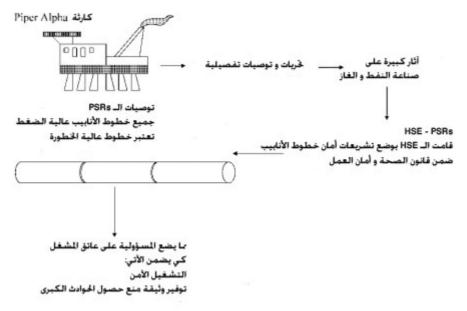
عقب كارثة Piper Alpha قامت وزارة الصحة و السلامة HSE بإصدار قوانين سلامة خطوط الأنابيب (PSRs) حيث يبين الشكل 11.3 ملخصاً للمبادئ الأساسية لـ PRSs.



الشكل 10.3 المواصفات القياسية العالمية لخطوط الأنابيب.

و بنتيجة كارثة Piper Alpha حصلت تغييرات كبيرة متعلقة بأمان صناعة الغاز و النفط. و قد شملت هذه التغييرات كلاً من الأنابيب البرية و البحرية. في ظل التشريعات الجديدة تعتبر جميع خطوط الأنابيب ذات الضغط العالي على أنها خطوط أنابيب عالية الخطورة و تلقي على عاتق مشغل الخط المسؤوليات التالى:

- الصيانة الملائمة لضمان سلامة خط الأنابيب.
- توفير وثيقة منع الحوادث الكبرى (MAPD).



الشكل 11.3 تشريعات سلامة خطوط الأنابيب

تشكل وثيقة الـ MAPD دليلاً للمشغل يبين فيها أن المشغل قد أخذ بعين الاعتبار جميع المخاطر المحتملة على خط الأنابيب و أنه قد قام بتطبيق منظومة إدارة للسلامة لضبط أو التحكم بهذه المخاطر. و قد أحدث تغييرات أيضاً بالنسبة للأنابيب البحرية من خلال قانون الأنابيب المغمورة بالمياه (البحرية) (1975) و الذي تم تحديثه في عام 1998 حيث تم منع القيام بعمليات استثمار على حساب السلامة.

5.3 تقنيات تقييم المخاطر.

يتحمل مشغلو خطوط الأنابيب مسؤولية المحافظة على منظومة إدارة السلامة لدرء مخاطر فشل خط الأنابيب. أمّا الجهات التشريعية أو القانونية مثل DOT (وزارة النقل) في الولايات المتحدة و الـ HSE (وزارة الصحة و السلامة) في المملكة المتحدة فإنها تتحمل مسؤولية ضمان تطبيق منظومات الإدارة هذه. تتضمن هذه المنظومات النواحي التالية:

- تشريعات سلامة خطوط الأنابيب (PRSs) في المملكة المتحدة.
 - مكتب سلامة خطوط الأنابيب (OPS) في الولايات المتحدة.

و كجزء من برنامج السلامة العامة يتم إجراء تقييم للمخاطر و الذي يتضمن دراسة كل من إحتمالية فشل خط الأنابيب و عواقب الفشل (انظر الشكل 12.3).

هناك مقاربتان أساسيتان في هذا السياق هما التقييم الكمي و التقييم الكيفي.

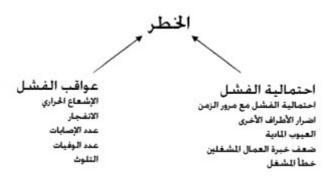
6.3 التقييم الكمي للمخاطر.

في هذه المقاربة يتم تحديد مستوى المخاطر كمياً بالاعتماد على الحسابات المباشرة. إذ يتطلب التشريع في المملكة المتحدة أن ينخفض مستوى المخاطر إلى "أدنى مستوى ممكن قابل للتطبيق عملياً" أو اختصاراً ALARP. يبين الشكل 13.3 مخطط الـ ARLAP المعتمد من قبل الـ HSE لتوصيف أو تحديد معايير المستويات المقبولة و الغير مقبولة للخطر [2].

يظهر مفهوم الـ ALARP وجود مناطق غير مقبولة حين يكون خطر التعرض للموت غير مقبول بتاتاً إضافة إلى مناطق مقبولة واسعة حيث يمكن التسامح مع مستوى الخطر و مناطق أخرى يكون فيها مستوى الخطر غير مهم (صغير) أصلاً. و بهذا فإن التقييم الكمي للمخاطر

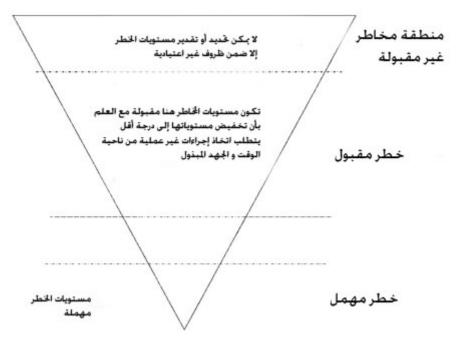
يمكن أن يستخدم لمحاكمة أو تقييم الانحرافات عن توصيات المواصفة القياسية مثل الـ الحجمال العرب الفشل أن تتخذ [13, 2] المحالمة و أن توضع في إطارها السليم لضمان أن المخاطر قد وصلت إلى حدود مقبولة أو يمكن التعامل معها.

تنطوي عملية التقييم الكمي للمخاطر على إجراء حسابات تفصيلية لكل من المخاطر الفردية و المخاطر المغرد على أساس التواتر الذي يمكن أن يصاب وفقاً له الأفراد نتيجة حادث معين (انظر الشكل 14.3).

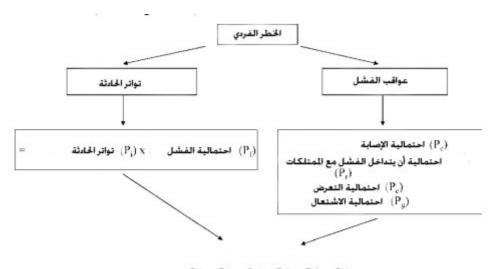


الشكل 12.3 عناصر تقييم الخطر.

يمكن استخدام مخططات مثل ALARP (المملكة المتحدة) في محاكمة مستوى الخطر و التقرير فيما إذا كان مقبولاً بناءاً على نتائج الحسابات المجراة. و كما تبين سابقاً في المواصفات القياسية مثل B31.8 [8] فإنه توجد طرق للسيطرة على عواقب الفشل و هي تتضمن وضع حدود عليا لإجهادات التشغيل العظمى في مواقع محددة (انظر الشكل 15.3). هناك طريقة شائعة لتمثيل المخاطر الجماعية من خلال رسم تواتر الحدث F المسبب لعدد الوفيات الم كما هو مبين في الشكل 16.3 [2]. حيث يقسم المخطط البياني إلى عدد من المناطق التي تحدد مستويات المخاطر الجماعية المقبولة و تلك الغير مقبولة.

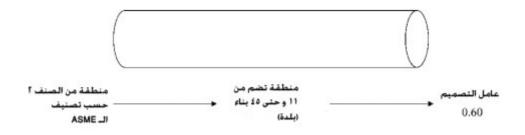


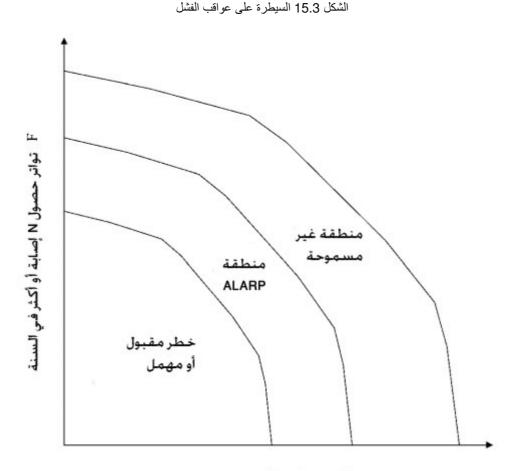
الشكل ALARP 13.3 "أدنى مستوى قابل للتطبيق عملياً"



= $(P_i) \times (P_f) \times (P_e) \times (P_f) \times (P_e) \times (P_g)$

الشكل 14.3 التقييم الكمى للمخاطر





N عدد الإصابات الشكل 16.3 تواتر الفشل بدلالة عدد الوفيات

7.3 التقييم الكيفى للمخاطر.

هناك مقاربة أبسط لتقييم المخاطر من خلال التقييم الكيفي تلك المخاطر و هي تختلف عن المقاربة الكمية بالنواحي التالية:

- بخلاف المقاربة الكمية فإن هذه المقاربة لا ترتكز على حسابات رقمية بل إنها تعتمد على منظومة تصنيف لكل من إحتمالية و عواقب الفشل.
 - تتم عملية التحليل في المقاربة الكيفية بالاعتماد على مصفوفة المخاطر.

في مصفوفة المخاطر يتم تمثيل الخطر من خلال احتمالية الفشل x عواقب الفشل، مع وجود نظام تصنيف أو مقارنة نسبي للمقارنة بين أقسام خط الأنابيب المختلفة (انظر الشكل 17.3). يمكن أيضاً أن تستخدم هذه المصفوفة كأداة مقارنة بين الخطوط المختلفة مما يغيد في تحديد أكثر آليات الفشل احتمالاً. تشكل هذه المقاربة الأساس الذي تقوم عليه عمليات تحري (أو

الكشف على) مخاطر RBI و هي تعتبر طريقة فعالة لأمثلة (جعلها مثالية) تكاليف السلامة بين مشغلي خطوط الأنابيب على مستوى العالم.

كبيرة			احتمالیة فشل مرتفعة و عواقب كبيرة
متوسطة			
صغيرة	احتمالیة فشل منخفضة و عواقب صغیرة		
L	منخفضة	متوسطة احتمالية الفشل	مرتفعة

الشكل 17.3 التقييم الكيفي للمخاطر

إن الخطوات الرئيسية في تطوير برنامج RBI تتمثل في التالي:

- تحديد آليات الفشل.
- إجراء تقييم للمخاطر على خط أو خطوط الأنابيب.
 - تحدید طریقة الكشف أو التحري الازمة.
- تحديد خطة للتحري تقوم على آليات نمو الأضرار وحدتها.

بغية إيضاح هذه الطريقة لننظر إلى المثال الآتي: يبين الشكل 18.3 المرحلة الأولى التي تتمثل في تحديد آليات الفشل المحتملة للأقسام A و B و C من خط الأنابيب المعتبر إضافة إلى تصنيفها أو ترتيبها على أساس عواقب و احتمالية الفشل. في حالة الخط A يبدو أن هذا القسم يتعرض لعدد كبير من دورات الإجهاد أو الكلل كما أظهرت عمليات تحري سابقة وجود شقوق في وصلات اللحام. كما يمكن أن يكون الفشل أو الانهيار من نوع الانكسار القصيف (الهش) أو الانهيار البلاستيكي (اللدن) تبعاً لخصائص المواد الإنشائية. و بالتالي يبدو أن احتمالية الفشل من هذا النوع تكون عالية أو كبيرة؛ و نتيجة للإحتمالية الكبيرة لهذا الفشل فإن عواقبه ستكون كبيرة أبضاً.

يبرز السؤال التالي و هو فيما إذا كان من الممكن السيطرة على هذا الخطر بسهولة من خلال عمليات الكشف و التحري المعتادة. في هذه الحالة يبدو أن الجواب على هذا السؤال هو "نعم"؛ إذ أن أدوات التحري و الفحص اللازمة متوفرة و هي تمكن من كشف العيوب الشبيهة

بالتشققات في وصلات اللحام و يكون لعمليات الكشف و التحري المعتادة على خط الأنابيب قيمة و أهمية عالية. يظهر هذا الأمر جلياً في الشكل 198.3 حيث يتم إضافة بعد ثالث إلى المصفوفة تُحمّل عليه متطلبات الكشف و التفحص اللازمة. في هذه الحالة يمكن لعمليات الكشف أن تكون آلية لتحقيق مايلي:

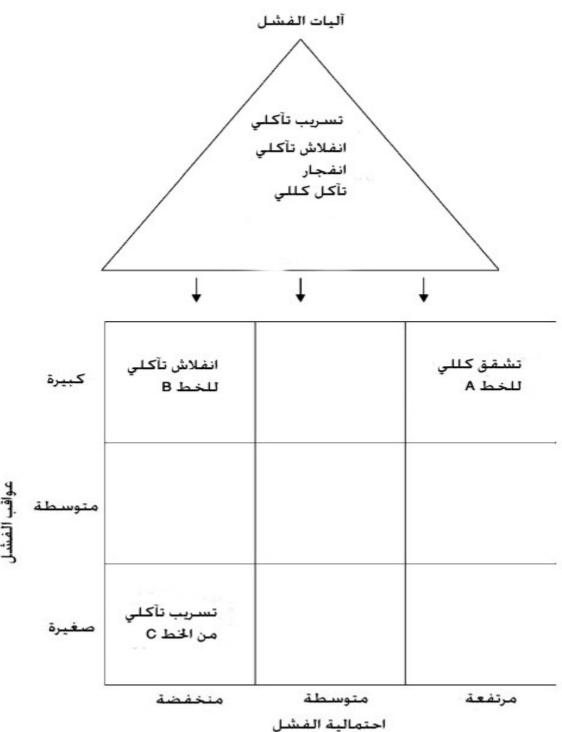
- السيطرة على الخطر.
 - منع الفشل.

تتمثل الخطوة التالية في تحديد طرق الكشف و الفحص المتوفرة أو المتاحة و هي:

- جهاز قياس سماكة الجدار الفوق صوتي.
 - جهاز كشف التشققات فوق الصوتي.
 - جهاز الكشف العرضي الحقلي.

بعد تحديد التجهيزات المتوفرة و إمكانياتها على القياس نصل إلى الخطوة الأخيرة و المتمثلة في وضع خطة للكشف. هذا و يعتمد مجال أو الفترات الفاصلة بين عمليات الفحص أو الكشف على اليات الفشل المختلفة على ما يلى:

- معدل نمو العيوب.
- طريقة الكشف المعتمدة.
- التغير في ظروف التشغيل و التحميل.
 - التغير في إحتمالية الفشل مع الزمن.



احتمالية الفشل الشكل 18.3 مثال عن التقييم الكيفي للمخاطر.

القصل الرابع

اختبارات الضغط و البدء بالتشغيل.

1.4 اختبارات الضغط

إن العديد من المواصفات القياسية تتطلب إجراء اختبارات ضغط لخط الأنابيب. على العموم يعتمد مشغلو خطوط الأنابيب على طريقتين للقيام باختبار سلامة خط الأنابيب و هما:

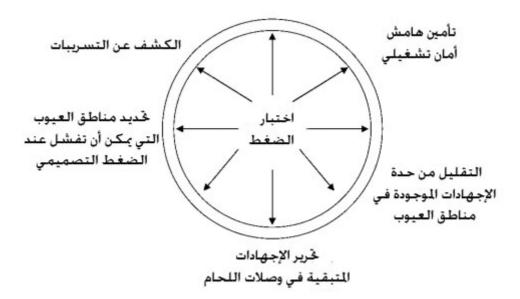
- الاختبار الهيدروليكي القياسي و يتم من خلال رفع الضغط ضمن الخط إلى قيمة تبلغ 1.5 من الضغط التصميمي و يقدم هذا الاختبار مؤشراً مباشراً و سريعاً على سلامة الخط.
- اختبار الضغط المرتفع و يقدم هذا الاختبار مؤشرات عن هوامش الأمان المتوفرة تجاه نمو العيوب و التشققات خلال التشغيل.

تتمثل الممارسة الفضلى حالياً في استخدام سائل (كالماء المستجر من نهر مجاور أو بحيرة أو مصدر آخر) لإجراء هذه الاختبارات و ذلك يعود للأسباب الأتية:

- الماء صديق للبيئة (غير ضار بالبيئة).
- الماء سائل غير قابل للانضغاط و بالتالي إذا حصل فشل ما عندئذٍ سيحصل تشتيت مباشر للضغط و من ثم فإن احتمالية امتداد أو توسع التشققات ستكون ضئيلة. على العكس من ذلك إذا تم استخدام غاز ما بدلاً من الماء؛ بما أن الغاز قابل للانضغاط فإن عملية ضغطه ستتطلب استهلاك كمية كبيرة من الطاقة و هكذا فإن هذا الاختبار الغازي سيحمل خطر توسيع الشقوق بسبب كمية الطاقة الكبيرة التي يحملها الغاز المحتجز ضمن جدران الأنبوب.

بالنسبة للأنابيب التي ستشغل ضمن بيئة جافة كالصحراء مثلاً يمكن إجراء اختبار الضغط الهوائي (أو الغازي) أو استخدام أدوات الكشف و التحري الذكية بدلاً من اختبارات الضغط بالمياه.

تعتبر اختبارات الضغط العالي طريقة فعالة للتحقق من سلامة خط الأنابيب و وسيلة يمكن من خلالها إزالة العيوب الحرجة خلال فترة إختبارات انتهاء التركيب (commissioning) انتهاء التركيب و ما قبل الاستثمار أو التشغيل). إن الاختبار الهيدروليكي عند ضغوط منخفضة نسبياً لا يقدم مؤشراً واضحاً على نمو العيوب أو التشققات تحت تأثير ضغط التشغيل، لذا و بغية الحصول على هامش أمان تجاه توسع الشقوق الصغيرة تم تطوير أو وضع مبدأ اختبار الضغط العالى. يبين الشكل 1.4 الفوائد المتأتية عن إجراء الاختبار الهيدروليكي.



الشكل 1.4 الهدف من الاختبار الهيدروليكي

من المهم هنا تحديد فيما إذا كان العيب المكتشف قد نشأ عند نقطة الفشل لدى إجراء اختبار الضغط، هناك عاملان أساسيان يؤثران على هذه العملية و هما:

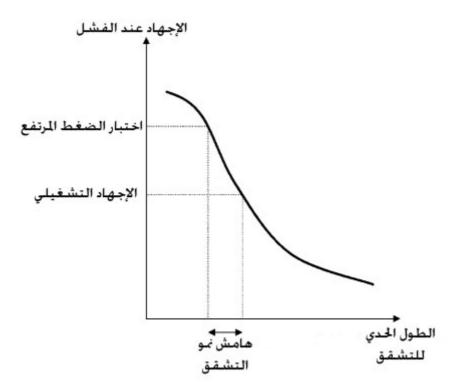
- العيوب الموجودة أساساً و التي تكون في حالة شد عند فوهة التشقق و التي تنتقل إلى حالة انضغاط نتيجة الخضوع المرن للمعدن. تؤدي هذه العملية إلى تقييد فوهة التشقق و منعه من النمو.
- من أجل حجم معين للتشقق و من أجل اختبار ضغط ما هناك فترة زمنية تمضي قبل تحول هذه الشقوق إلى فشل (بمعنى أن العيوب التي ستصبح حرجة خلال فترة تشغيل خط الأنابيب ستظهر خلال الاختبار). توصي المواصفة 1GE/TD/1 [2] بفترة احتجاز أو محافظة على الضغط تبلغ h 24. و يتمثل الهدف الرئيسي لهذه العملية في التأكد من أنه لا توجد أية تشققات ذات التأكد من أنه لا توجد أية تشققات ذات آلية فشل متعلقة أو تابعة للزمن. المواصفات الأخرى مثل الـ 831.8 [8] تسمح باعتماد فترات اختبار أقصر تبلغ ساعتين على الأقل.

يتجسد المبدأ الرئيسي لاختبار الضغط المرتفع بما يلي:

• الشقوق الصغيرة ستبقى أو تقاوم مع زيادة الضغط و هو المبدأ الرئيسي لهامش أمان الاختبار الهيدروليكي الذي تحدده العديد من المواصفات القياسية (انظر الشكل 2.4).

كما هو مبين في الشكل 2.4 كلما كان ضغط الاختبار أعلى كلما كان هامش ضمان عدم نمو التشققات أعلى. هناك عدد من التوصيات أو الإرشادات التي تقدمها المواصفات القياسية لمستويات ضغط الاختبار. يقدم الجدول 1.4 ملخصاً لهذه التوصيات. كما تقدم المواصفة [2] IGE/TD/1

حيث أن P_t هو ضغط الاختبار (bar) و t_n هي سماكة الجدار الاسمية (mm) و S هو الـ SMYS و f هو كسر ضغط الاختبار من الـ SMYS و D هو القطر الخارجي (mm).



الشكل 2.4 هامش أمان الاختبار الهيدروليكي

PD 8010	- ١٥٪ من ضغط التشغيلي الأقصى المسموح (MAOP) أو - ٩٪ من الـ SMYS	
B31.4	لدى التشغيل عند إجهادات محيطية > ٤٠٪ من الـ SMYS يجب إجراء الاختبار عند ١.٢٥x MAOP	
B31.8	Class 1 (Div. 1) (Div. 2) Class 2 Class 3 Class 4	1.25 x DF [*] 1.1 x DF 1.25 x DF 1.4 x DF 1.4 x DF 1.25
IGE/TD/1 ¾	التشغيل فوق: غ اقل من ,30% SMYS قل من ,105% SMYS or نصف الميل (2)	التشغيل دون: 30% SMYS الضغط التصميمي 1.5 x

معامل التصميم (الضغط التشغيلي) SMYS) = DF = (SMYS)

الجدول 1.4 مستوى اختبارات الضغط الموصى بها في المواصفات القياسية

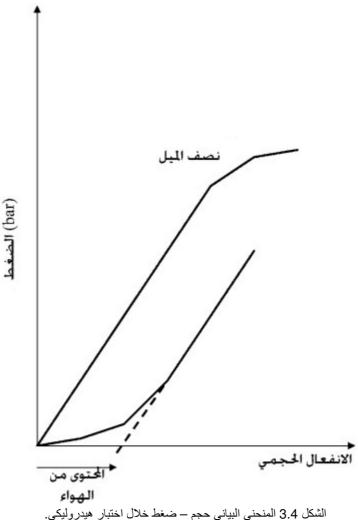
تمت الإشارة في الجدول 1.4 إلى ما يسمى بنصف الميل؛ ففي ظروف الاختبار تتم مراقبة الضغط ضمن خط الأنابيب من خلال رسم منحني بياني للضغط بدلالة الحجم. و الشكل 3.4 يبين هذا المنحني البياني. لدى زيادة الضغط باستخدام مضخة على سبيل المثال خلال طور الضغط يتم عد عدد أشواط المضخة لتحديد زيادة ثابتة في الضغط (7 bar/min م) إضافة إلى قياس حجم المياه المستهلكة لإحداث هذه الزيادة. نظراً لكون الهواء قابل للانضغاط و إذا احتوى الانبوب على هواء محتجز سيظهر وجود هذا الهواء من خلال تغير في ميل المنحنى. و

بالتالي يمكن تحديد حجم الهواء المحتجز من خلال إسقاط أو تمديد الخط المستقيم لزيادة الضغط حتى يتقاطع مع المحور الأفقي. و يمكن تعريف نصف الميل بأنه الميل عند النقطة التي يتضاعف عندها عدد أشواط المضخة اللازمة لإحداث ارتفاع معطى في قيمة الضغط، و هو ما يدعى بمضاعفة الأشواط.

من العوامل التي تؤثر على الاختبار الهيدروليكي نذكر:

- خصائص المواد الانشائية لخط الأنابيب.
 - سماكة الجدار.
 - تغيرات الارتفاع.
 - توفر المياه و طرق تصريفها.

إن الفائدة الرئيسية المتأتية عن الاختبار الهيدروليكي تتمثل في ترك إجهاد انضغاط متبقي على فوهة الشقوق. خلال طور الضغط تقود الإجهادات إلى حصول تشوه لدن في الأنبوب عند فوهة التشققات مما يخلق إجهاد شد في تلك المناطق (انظر الشكل 4.4). عند انتهاء الاختبار الهيدروليكي و لدى تخفيض الضغط تقوم الإجهادات المتبقية بدور ضاغط على فوهة التشقق، مما يجعل التشقق أقل عرضة للتوسع و هو أمر مفيد لخط الأنابيب.

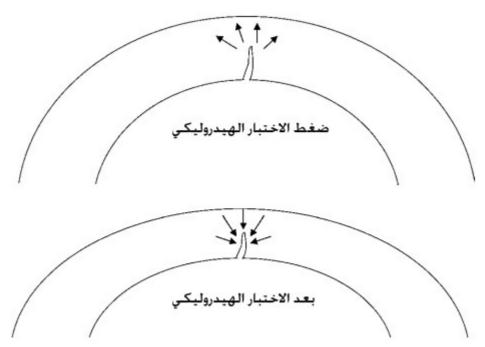


سكل 3.4 المنحني البياني حجم – صعط حلال احتبار هيدروليكي

بالنسبة للأنابيب البحرية هناك العديد من الأقسام أو التجهيزات التي يتوجب إجراء اختبار ضغط لها و هي:

- الصواعد.
- الصمامات
- مصائد الحلقات
- قسم الخط الموجود تحت المياه.

نظراً لكون الصواعد تكون عادة قريبة من المنصات يتم تصميمها بسماكة جدران أكبر و بأخذ قيم أصغر لمعاملات التصميم (الفصل 2، الجدول 4.2). إضافة إلى أن المصنع يجري عليها اختبارات لضغوط أعلى في مرحلة ما قبل التركيب. بعد أن يتم تركيب جميع هذه الأقسام يجري غمرها أو تعبئتها بمياه البحر المعالجة لتثبيط التآكل و من ثم إجراء اختبارات الضغط عليها. تتمثل المرحلة اللاحقة للاختبارات في الإعداد للتشغيل و هي مرحلة تتضمن إعداد خط الأنابيب للتشغيل من خلال تجفيفه و كسحه لإزاحة بقايا المياه منه.



الشكل 4.4 حالة الإجهاد عند فوهة التشقق خلال فترة الاختبار الهيدروليكي و ما بعده.

2.4 الإعداد للتشغيل.

بعد الاختبار الهيدروليكي تأتي مرحلة تجفيف خط الأنابيب للتأكد من عدم وجود بقايا مياه على الجدران الداخلية للأنبوب أو في المناطق المنخفضة المستوى من الخط. إذ أنه في حالة خط أنابيب طويل وجود حتى طبقة رقية من المياه قد تعادل أطناناً من المياه. و إذا ما بقيت هذه المياه داخل الخط يمكن أن تقود إلى حصول المشاكل التالية:

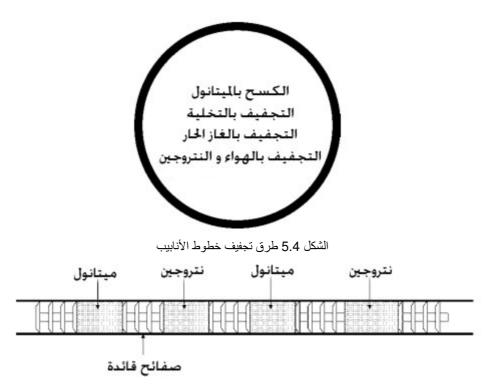
- تشكل الهيدرات في أنابيب الغاز العذب (المنزوع الكبريت).
- النقر (التآكل النقطي) الناتج عن التآكل العذب حيث يقوم غاز ثاني أكسيد الكربون بالانحلال في المياه ليشكل حمض الكربون الأكال.

• لدى تشغيل الخط في ظروف حامضية حيث يكون سلفيد الهيدروجين H_2S موجوداً ، يقوم هذا الأخير بالانحلال بالمياه مسبباً تآكلاً نقطياً (أو نقر) و تشققاً إجهادياً ناتجاً عن وجود السلفيد إضافة إلى تشقق محرض بالهيدروجين (انظر الفصل 5).

و بهذا فإن الغاية من تجفيف خط الأنابيب تتجسد في تخفيض نقطة ندى الرطوبة المتبقية في الخط (بمعنى أنه كلما كان خط الأنابيب أكثر جفافاً كلما كانت نقطة الندى أخفض). يبين الشكل 5.4 طرق التجفيف المتوفرة.

1.2.4 الكسح بالميتانول.

كما هو مبين في الشكل 6.4 فإن الطريقة الفعالة و السريعة في تجفيف الخط تتمثل في استخدام سلسلة من الحلقات التي تحصر بينها الميتانول و من ثم تمرير غاز تجفيف مثل النتروجين. إن طريقة الكسح بالميتانول مفيدة نظراً لأنها تمنع تشكل الهيدرات ضمن خط الأنابيب. إن أن الميتانول يمتزج مع الماء مشكلاً محلول كسح يتم دفعه على طول الخط باستخدام الصفائح. من محاسن هذه الطريقة أنه يمكن إعداد الخط للتشغيل من خلال عملية واحدة فقط.



الشكل 6.4 عملية الكسح بالميتانول

2.2.4 التجفيف بالهواء أو النتروجين مع استخدام حلقات رغوية.

يمكن أن يسخدم كل من الهواء أو النتروجين كغاز تجفيف نظراً لأن كلا منهما يمتلك نقطة ندى منخفضة. و من ثم يتم تمرير حلقات رغوية على طول الأنبوب لتجفيفه تماماً. يتم التقرير فيما إذا تم بلوغ مستويات الجفاف المقبولة من خلال قياس نقطة الندى للغاز المتبقي ضمن خط الأنابيب.

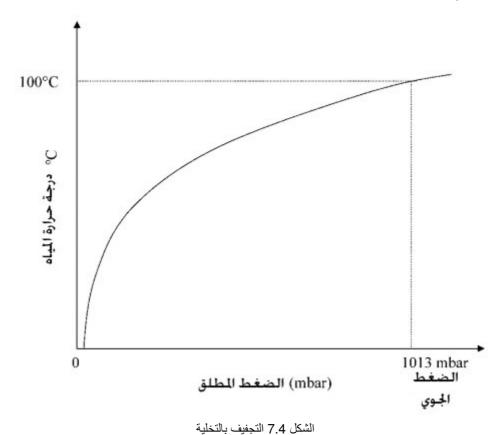
3.2.4 التجفيف التشغيلي (يطبق فقط على أنابيب نقل الغاز).

من خلال ضبط الضغط بدقة يتم إدخال النتروجين إلى الخط ممتزجاً مع المنتج المنقول، و تستمر هذه العملية حتى انخفاض نقطة الندى إلى مستوى مقبول. و عند ذلك يتم رفع ضغط الخط إلى المستوى التشغيلي المطلوب.

4.2.4 التجفيف بالتخلية.

تقوم هذه الطريقة على تخفيض الضغط ضمن الخط بحيث يبدأ الماء الموجود في الخط بالغليان أو التبخر. و يعرف هذا الضغط باسم الضغط البخاري، حيث أن الشكل 7.4 يبين المبدأ الأساسي لهذه العملية. فإذا كان الخط عند درجة الحرارة العادية يتم تخفيض الضغط حتى يبدأ الماء بالغليان ذاك أن درجة حرارة غليان الماء عند الضغط الجوي النظامي تبلغ °C 100. من الناحية العملية تتألف هذه الطريقة من ثلاثة أطوار هي:

- التخلية: خلال هذا الطور يتم تخفيض الضغط إلى الحد الذي تبدأ عنده المياه بالتبخر عند درجة الحرارة العادية.
 - التبخير: عند بلوغ هذا الضغط يتم المحافظة عليه بحيث تتبخر كامل كمية المياه.
- التجفيف النهائي: و يتم خلالها تفريغ كامل المياه المتبخرة من الخط من خلال تخفيض الضغط إلى قيمة أقل باستخدام تجهيزات التخلية و بالتالي سحب الأبخرة إلى خارج الأنبوب.



القسم العملي

هبوط الضغط بفعل الاحتكاك [Pressure Drop Due to Friction].

معادلات التدفق [Flow Equations].

يتوفر في الوقت الراهن العديد من المعادلات التي تربط بين معدل تدفق التيار الغازي [gas] بكل من خصائص الغاز وقطر وطول الأنبوب والضغوط في بداية ونهاية خط الأنابيب. ومن أهم هذه المعادلات يمكن ذكر مايلي:

- ✓ معادلة التدفق العامة [General Flow equation].
- ✓ معادلة كولبروك [Colebrook-White equation].
- ✓ معادلة كولبروك المعدّلة [Modified Colebrook-White equation].
 - ✓ معادلة الجمعية الأمريكية للغاز [AGA equation].
 - √ معادلة [Weymouth].
 - ✓ معادلة [Panhandle A].
 - √ معادلة [Panhandle B].

سوف يتم مناقشة كل هذه المعادلات مع حدودها ومجال تطبيقها على الموائع القابلة للانضغاط مثل الغاز الطبيعي كما أنه سوف يتم المقارنة بين هذه المعادلات من خلال استعمل خط أنابيب كمثال.

1- معادلة الجريان العامة:

تعتبر معادلة الجريان العامة والتي تدعى أحياناً بمعادلة الجريان الأساسية [fundamental flow equation] والتي تصف الجريان المستقر الإيزوترمي للغاز في خطوط الأنابيب، المعادلة الرئيسية التي تربط هبوط الضغط بمعدل التدفق. ويمكن كتابة الشكل الأكثر شيوعاً لهذه المعادلة بواحدات الجملة التجارية الأمريكية [USCS] على النحو التالي:

$$Q = 77.54 \left(\frac{T_b}{P_b}\right) \left[\frac{p_1^2 - p_2^2}{G L T_f Z f}\right]^{0.5} D^{2.5} \qquad (USCS \ units)$$

حيث إنّ:

Q: معدل تدفق التيار الغازي مقاساً عند الشروط القياسية، [SCFD].

f: عامل الاحتكاك.

.[psia] : الشروط القياسية، p_b

.[°R(460+°F)] درجة الحرارة القياسية، T_b

.[psia] : الضغط في بداية الجزء المعتبر p_1

.[psia] : الضغط في نهاية الجزء المعتبر p_2

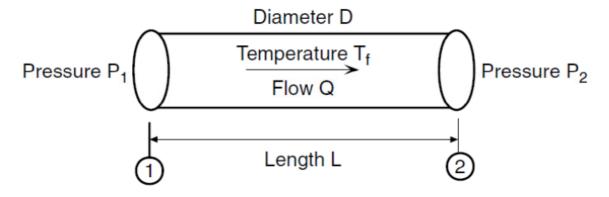
G: الكثافة النسبية للغاز.

 T_{f} : درجة الحرارة الوسطية للغاز المتدفق، [$^{o}R(460+^{o}F)$].

L: طول الجزء المعتبر، [mile].

z: عامل انضغاطية الغاز عند درجة حرارة التدفق.

D: القطر الداخلي للأنبوب، [in].



الشكل [2]، الجريان المستقر في خط الأنابيب.

ومن المهم ملاحظة بأنه من أجل الجزء المعتبر للأنبوب من المقطع [1] إلى المقطع [2]، يفترض أن لدرجة حرارة الغاز قيمة ثابتة [التدفق الإيزوترمي].

تكتب معادلة التدفق الأساسية في وحدات الجملة الدولية [S]، على الشكل التالي:

$$Q = 1.1494 \times 10^{-3} \left(\frac{T_b}{P_b}\right) \left[\frac{p_1^2 - p_2^2}{G L T_f Z f}\right]^{0.5} D^{2.5} \quad (SI \ units)$$
 [3]

حيث إنّ:

 $[m^3/day]$: معدل تدفق التيار الغازي مقاساً عند الشروط القياسية، Q

عامل الاحتكاك. f

الشروط القياسية، [KPa]. الشروط القياسية،

.[$K(273+^{\circ}C)$] : درجة الحرارة القياسية: T_{b}

.[KPa] : الضغط في بداية الجزء المعتبر، p_1

.[KPa] : الضغط في نهاية الجزء المعتبر، p_2

الكثافة النسبية للغاز. G

 $[K(273+{}^{o}C)]$: درجة الحرارة الوسطية للغاز المتدفق، T_{f}

L: طول الجزء المعتبر، [Km].

z: عامل انضغاطية الغاز عند درجة حرارة التدفق.

D: القطر الداخلي للأنبوب، [mm].

بسبب طبيعة المعادلة [3] يمكن التعبير عن الضغوط بواحدات [MPa] أو [Bar] شريطة ان تستعمل الواحدات الموافقة.

تحسب المعادلة [2] استطاعة النقل [معدل التدفق] لجزء من الأنبوب طوله [L] وذلك اعتماداً على قيمتي الضغط في بداية [p_1] ونهاية [p_2] الجزء المعتبر، كما هو مبين في الشكل [2]. حيث يفترض أنه لايوجد فرق ارتفاع جيوديزي بين نقطتي بداية ونهاية الجزء المعتبر، وبمعنى آخر أن جزء الأنبوب المعتبر يكون أفقياً.

عند فحص معادلة الجريان العامة [2]، يجب ملاحظة بأنه من أجل جزء من الأنبوب طوله [L] وقطره الداخلي [D] يعتمد معدل تدفق التيار الغازي [Q] - عند الشروط القياسية — على مجموعة من العوامل التالية:

- 1. خصائص الغاز الطبيعي المتمثلة بالكثافة النسبية [G] وعامل الانضغاطية [Z]، حيث أنه بازدياد الكثافة النسبية للغاز [الغازات الثقيلة] سوف يتناقص معدل التدفق. وبشكل مشابه، وبازدياد قيمة عامل الانضغاطية سوف يتناقص معدل التدفق.
- 2. درجة حرارة تدفق الغاز $[T_f]$ ، حيث أنه بازدياد درجة حرارة الغاز المتدفق سوف تتناقص استطاعة النقل. لذلك ومن أجل زيادة معدل التدفق لابد من الحفاظ على درجة حرارة منخفضة للغاز المتدفق.
- 3. كما يكون لطول الخط وقطره الداخلي تأثير واضح على معدل التدفق. حيث أنه بازدياد طول الأنبوب المعتبر (وذلك من أجل قيم معطاة لكل من $[p_1]$ و $[p_1]$ سوف يتناقص معدل التدفق. ومن ناحية أخرى وبازدياد القطر الداخلي لخط الأنابيب سوف يزداد معدل التدفق.
- 4. يمثل الحد $[p_1^2 p_2^2]$ القوة الدافعة التي تسبب تدفق الغاز من بداية الجزء المعتبر إلى نهايته. فمع تخفيض قيمة الضغط $[p_2]$ مع الحفاظ على قيمة $[p_1]$ سوف يزداد معدل التدفق. ومن الواضح أنه في حال تساوي قيمتي الضغط $[p_1]$ و $[p_2]$ فلن يكون هناك أي جريان للغاز. بسبب الاحتكاك بين جزئيات الغاز والجدار الداخلي للأنبوب من جهة وبين جزئيات الغاز مع بعضها البعض فإنه يحصل هبوط في قيمة الضغط بين نقطتي البداية والنهاية بمقدار $[p_1 p_2]$.
- 5. عامل الاحتكاك: ويعتمد هذا العامل على الطبيعة الهيدروليكية لجدران خط الأنابيب وعلى نوع الجريان [صفحى أو مضطرب].

في بعض الأحيان يتم التعبير عن معادلة التدفق العامة بمصطلح عامل النقل [f] [transmission factor] بدلاً من عامل الاحتكاك [f]. عندئذ يمكن كتابة هذه المعادلة على الشكل التالي:

$$Q = 38.77 F\left(\frac{T_b}{P_b}\right) \left[\frac{p_1^2 - p_2^2}{G L T_f Z}\right]^{0.5} D^{2.5} \quad (USCS \ units)$$

حيث إنّ:

$$F = \frac{2}{\sqrt{f}}$$

أما في واحدات الجملة الدولية فتأخذ المعادلة الشكل التالي:

$$Q = 5.747 \times 10^{-4} F\left(\frac{T_b}{P_b}\right) \left[\frac{p_1^2 - p_2^2}{G L T_f Z}\right]^{0.5} D^{2.5}$$
 (SI units)

سوف يتم مناقشة العديد من الملامح لمعادلة التدفق العامة قبل الانتقال إلى الصيغ الأخرى المستخدمة في حساب هبوط الضغط.

تأثير فرق الارتفاع:

عندما يكون هناك فرق في الارتفاع بين بداية ونهاية الجزء المعتبر من الأنبوب، فإنه يجب تعديل معادلة التدفق العامة بحيث تأخذ الشكل التالي:

$$Q = 38.77 F\left(\frac{T_b}{P_b}\right) \left[\frac{p_1^2 - e^s p_2^2}{G L_e T_f Z}\right]^{0.5} D^{2.5} \quad (USCS \ units)$$

أما في واحدات الجملة الدولية فتأخذ المعادلة الشكل التالي:

$$Q = 5.747 \times 10^{-4} F\left(\frac{T_b}{P_b}\right) \left[\frac{p_1^2 - e^s p_2^2}{G L_e T_f Z}\right]^{0.5} D^{2.5}$$
 (SI units)

حيث إنّ:

$$L_e = \frac{L(e^s - 1)}{s}$$

حيث $[L_e]$ الطول المكافئ و e^s مصطلح يأخذ بعين الاعتبار فرق الاتفاع بين بداية ونهاية جزء الأنبوب المعتبر. حيث يعتمد البارامتر [s] على الكثافة النسبية للغاز وعلى عامل انضغاطية الغاز وعلى درجة حرارة الغاز المتدفق وعلى فرق الارتفاعات ويمكن حسابه في واحدات [USCS] باستخدام العلاقة التالية:

$$s = 0.0375G \left(\frac{H_2 - H_1}{T_f Z}\right) \quad (USCS \ units)$$

حيث إنّ:

s: بارامتر تعديل الارتفاع [elevation adjustment parameter]، بلا أبعاد.

[ft] ارتفاع بدایة خط الأنابیب عن مستوي مقارنة أفقي، [ft].

[ft] ارتفاع نهایة خط الأنابیب عن مستوي مقارنة أفقي، [ft].

e = 2.718]. الساس اللوغاريتم الطبيعي، [e = 2.718].

أما في واحدات الجملة الدولية فيأخذ بارامتر تعديل الارتفاع [$_{\rm S}$] الشكل التالي:

$$s = 0.0684G \left(\frac{H_2 - H_1}{T_f Z}\right) \quad (SI \ units)$$

حيث إنّ:

[m]: ارتفاع بدایة خط الأنابیب عن مستوي مقارنة أفقی، [m]

[m] : ارتفاع نهایة خط الأنابیب عن مستوي مقارنة أفقي، [m]

عند حساب $[L_e]$ من المعادلة [9] تمّ افتراض بأنه يوجد انحدار وحيد بين نقطتي بداية ونهاية جزء الأنابيب المعتبر كما هو موضح في الشكل [2]، ولكن إذا كان على طول جزء خط الأنابيب المعتبر [L] سلسلة من الانحدارات، عندئذ سوف يتم إدخال البارامتر [L] من أجل كل جزء بمفرده من الأجزاء التي تشكل طول الخط من النقطة [1] إلى النقطة [2]:

$$j = \frac{e^s - 1}{s}$$

يحسب البارامتر [J] من أجل كل انحدار في كل جزء من الأجزاء المكونة للطول الكلي للخط [L]. في حين يتم حساب الطول المكافئ $[L_{\theta}]$ من خلال العلاقة التالية:

$$L_e = j_1 L_1 + j_2 L_2 e^{s1} + j_3 L_3 e^{s2} + \dots$$

تحسب البارامترات $[j_1]$ و $[j_2]$ و....الخ وذلك من أجل كل ارتفاع أو انحدار في ارتفاعات الأجزاء المكونة للأنبوب من أجل البارامترات $[s_1]$ و $[s_2]$...الخ لكل جزء بموجب المعادلة [12] من مدخل خط الأنابيب إلى نهايته.

سوف نناقش فيما بعد كيفية حساب عامل النقل وعامل الاحتكاك باستعمال معادلات مختلفة مثل كولبروك و[AGA]. من المهم ملاحظة أن معادلة التدفق العامة من أكثر المعادلات شائعة الاستخدام في حساب معدل التدفق والضغط في أنابيب نقل الغاز. ومن أجل تطبيقها بشكل صحيح فإنه يجب استخدام عامل نقل أو عامل احتكاك صحيح. تستخدم معادلة كولبروك ومعادلة [AGA] ومعادلات تجريبية أخرى في حساب عامل الاحتكاك المستعمل في معادلة التدفق العامة. عدة معادلات أخرى مثل [Panhandle A] و[Panhandle B] و[Panhandle B] ووعلى التدفق وذلك من أجل قيم معطاة للضغط بدون استعمال عامل احتكاك أو عامل نقل. وعلى أية حال يمكن حساب عامل احتكاك مكافئ [friction factor] أو عامل نقل باستعمال تلك الطرق أيضاً.

الضغط الوسطي لجزء الأنبوب المعتبر [Average Pipe Segment Pressure]:

مما سبق يمكن ملاحظة أنه في معادلة التدفق العامة تمّ استخدام عامل الانضغاطية. في الحقيقة أن هذا العامل يجب أن يحسب عند درجة حرارة تدفق الغاز وعند الضغط الوسطي في جزء الأنبوب المعتبر. لذلك فإنه من الضروري أولاً حساب الضغط الوسطي في جزء الأنبوب الموصوف بالشكل [2]، وذلك لأن الضغط الوسطي سوف يستخدم في حساب عامل الانضغاطية للغاز عند درجة حرارة الغاز الوسطية $[T_f]$. وكتقريب أولي يتم استعمال المتوسط الحسابي $[p_1+p_2)/2$. ولكنه وجد أن القيمة الأكثر دقة للضغط الوسطي يتم حسابها باستخدام العلاقة التالية:

$$p_{avg} = \frac{2}{3} \left(p_1 + p_2 - \frac{p_1 p_2}{p_1 + p_2} \right)$$

والشكل الآخر للعلاقة المستخدمة في حساب الضغط الوسطى في جزء الأنبوب المعتبر:

$$p_{avg} = \frac{2}{3} \left(\frac{p_1^3 - p_2^3}{p_1^2 + p_2^2} \right)$$
 15

من الملاحظ أن الضغوط المستعملة في معادلة الجريان العامة معطاة بالقيم المطلقة. لذلك يجب تحويل القيم المقاسة للضغط إلى القيم المطلقة بإضافة قيمة الضغط الأساسي.

عدد رينولدز [Reynolds Number]:

يعتبر عدد رينولدز من إحدى البارامترات الهامة عند جريان الموائع في الأنابيب. حيث يستعمل هذا العدد لتحديد نوع الجريان في الأنبوب إما جريان صفحي [laminar flow] أو جريان مضطرب [turbulent flow] أو جريان حرج [critical flow]، كما أنه يستعمل لحساب عامل الاحتكاك [friction factor] في الأنبوب. ففي البداية سوف يتم إيجاز العلاقات المستعملة في حساب عدد رينولدز والمعتمدة على خصائص الغاز وقطر الأنبوب وبعد ذلك سوف يتم مناقشة مجال عدد رينولدز لأنواع الجريان المختلفة وكيفية حساب عامل الاحتكاك.

يعتمد عدد رينولدز بشكل أساسي على معدل تدفق الغاز وعلى القطر الداخلي للأنبوب وعلى خصائص المائع المتدفق المتمثلة بالكثافة واللزوجة، وعملياً يمكن حساب عدد رينولدز من العلاقة التالية:

$$Re = \frac{u D\rho}{\mu} \qquad (USCS \ units)$$
 32

حيث إنّ:

Re: عدد رينولدز.

u: السرعة الوسطية للغاز في الأنبوب، [ft/s].

D: القطر الداخلي للأنبوب، [ft].

ر: كثافة الغاز، [lb/ft³].

ي: لزوجة الغاز، [lb/ft s]. μ

أما في واحدات الجملة الدولية فيمكن كتابة العلاقة السابقة كما يلي:

$$Re = \frac{u D\rho}{\mu} \qquad (SI \ units)$$

حيث إنّ:

Re: عدد رينولدز.

u: السرعة الوسطية للغاز في الأنبوب، [m/s].

القطر الداخلي للأنبوب، [m].

 $[kg/m^3]$: كثافة الغاز،

ي: لزوجة الغاز، [kg/m s].

في هيدروليك خطوط أنابيب الغاز، التي تستعمل واحدات الجملة التجارية، تعتبر المعادلة التالية من أكثر المعادلات ملائمة في حساب عدد رينولدز:

$$Re = 0.0004778 \left(\frac{p_b}{T_b}\right) \left(\frac{GQ}{\mu D}\right) \qquad (USCS \ units)$$
 34

حيث إن:

.[psia] : الضغط القياسي p_b

درجة الحرارة القياسية، $[{}^{\mathsf{O}}\mathsf{R}]$.

G: الكثافة النسبية للغاز

Q: معدل تدفق التيار الغازي مقاساً عند الشروط القياسية، [SCFD].

D: القطر الداخلي للأنبوب، [in].

الزوجة الغاز، [lb/ft s]]. الزوجة الغاز

أما في واحدات الجملة الدولية، تأخذ العلاقة السابقة الشكل التالي:

$$Re = 0.5134 \left(\frac{p_b}{T_b}\right) \left(\frac{GQ}{\mu D}\right) \qquad (SI \, units)$$

حيث إن:

.[KPa] : الضغط القياسي p_b

[K]: درجة الحرارة القياسية، [K].

G: الكثافة النسبية للغاز.

 $[m^3/day]$ معدل تدفق التيار الغازي مقاساً عند الشروط القياسية، $[m^3/day]$.

D: القطر الداخلي للأنبوب، [mm].

μ: لزوجة الغاز، [Poise].

يحدث الجريان الصفحي في خطوط الأنابيب عندما تكون قيمة عدد رينولدز أقل من [2320]، في حين يحدث الجريان المضطرب عندما يكون لعدد رينولدز قيم تفوق [4000]. أما عندما تتراوح قيم عدد رينولدز بين [2320] و[4000] فإن الجريان غير محدد ويدعى أحياناً بالجريان الحرج.

- Re ≤ 2320 ⇒ الجريان الصفحى [laminar flow].
- Re>4000 ← Re>4000
- .[critical flow] ⇒ الجريان الحرج 4000 ≥ Re > 2320 •

تعمل معظم خطوط أنابيب نقل الغاز الرئيسي في منطقة الجريان المضطرب [turbulent] أي أن [Re>4000]. وعملياً تقسم منطقة الجريان المضطرب إلى ثلاث مجالات رئيسية:

- √ مجال الاحتكاك الأملس [smooth pipe flow].
- ✓ مجال الاحتكاك الانتقالي أو المختلط [transition flow].
 - √ مجال الاحتكاك الخشن [fully rough pipe flow].

عامل الاحتكاك [Friction Factor]:

بغية حساب هبوط الضغط على طول خط الأنابيب عند معدل تدفق معطى، يجب أولاً إدراك مفهوم عامل الاحتكاك. إن عامل الاحتكاك هو بارامتر لابعدي [dimensionless] ويعتمد بشكل رئيسي على عدد رينولدز. في الأدبيات الهندسية يتم ذكر عاملي احتكاك مختلفين. يدعى الأول بعامل احتكاك دراسي [Darcy friction factor] وهو الأكثر شيوعاً، أما الثاني فيدعى بعامل احتكاك فانينغ [Fanning friction factor]. يساوي عامل احتكاك فانينغ عددياً ربع عامل احتكاك دراسي.

$$f_f = \frac{f_d}{4}$$
 36

حيث إنّ:

عامل احتكاك فانينغ. f_f

لعامل المناقشات اللاحقة، سوف يرمز لعامل : f_d المناقشات اللاحقة، سوف يرمز لعامل احتكاك در اسي بالرمز [f].

يتناسب عامل الاحتكاك في حالة الجريان الصفحي عكساً مع عدد رينولدز، كما يلي:

$$f = \frac{64}{\text{Re}}$$

أما في حالة الجريان المضطرب، فإن عامل الاحتكاك يتعلق بعدد رينولدز وبالقطر الداخلي للأنبوب وبخشونة السطح الداخلي لجدار الأنبوب. وقد وضع العديد من الباحثين بعض

العلاقات التجريبية لحساب عامل الاحتكاك [f]، وتعتبر معادلات [AGA] و[-Colebrook] ولعلاقات الأكثر شيوعاً.

يعتمد عامل الاحتكاك في حالة الجريان المضطرب [مجال الاحتكاك الأملس] على قيمة عدد رينولدز فقط. أما في حالة الجريان المضطرب [مجال الاحتكاك الخشن] فيعتمد عامل الاحتكاك بشكل أكبر على الخشونة الداخلية للأنبوب وبشكل أقل على عدد رينولدز. أما في مجال الاحتكاك المختلط فيعتمد عامل الاحتكاك على خشونة الأنبوب والقطر الداخلي للأنبوب وعلى عدد رينولدز. يبين الشكل [3] أنظمة الجريان المختلفة موضحة على مخطط مودي [Moody] عدد رينولدز وذلل من أجل قيم مختلفة من الخشونات النسبية للأنبوب.

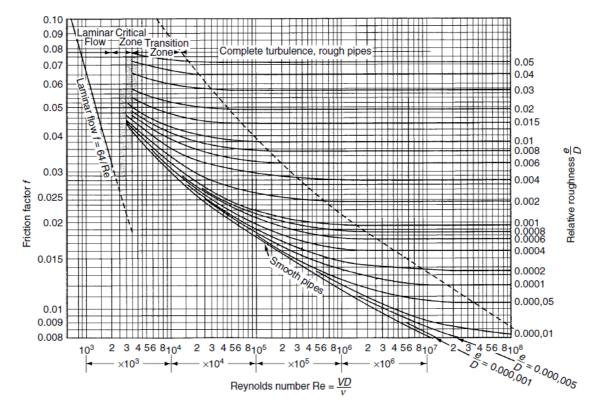
ويمكن تعريف الخشونة النسبية رياضياً بأنها النسبة بين الخشونة الداخلية للجدار الداخلي للأنبوب والقطر الداخلي للأنبوب:

Relative roughness =
$$\frac{e}{D}$$
 38

حيث إنّ:

absolute or internal roughness of] الخشونة المطلقة أو الداخلية للأنبوب: e [in] ، [pipe].

القطر الداخلي للأنبوب، [in].



الشكل [3]، مخطط مودى

معادلة كولبروك-وايت [Colebrook-White Equation]:

يطلق على هذه المعادلة أحياناً باختصار معادلة كولبروك [Colebrook equation]، وهي عبارة عن علاقة تربط بين عامل الاحتكاك وكل من عدد رينولدز وخشونة الأنابيب والقطر الداخلي للأنبوب. والشكل التالي لمعادلة كولبروك يستخدم في حساب عامل الاحتكاك في خطوط أنابيب نقل الغاز في حالة نظام الجريان المضطرب:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10}\left(\frac{e}{3.7D} + \frac{2.51}{\text{Re}\sqrt{f}}\right) \quad \text{for Re} > 4000$$

حيث إنّ:

عامل الاحتكاك. f

القطر الداخلي للأنبوب، [in].

e: الخشونة المطلقة للأنبوب، [in].

Re: عدد رينولدز.

كما يمكن استعمال المعادلة [39]، في واحدات الجملة الدولية وذلك بعد التعبير عن القطر والخشونة [mm].

من الملاحظ أن المعادلة [39] هي معادلة ضمنية بالنسبة لعامل الاحتكاك وذلك لأن هذا العامل يظهر على جانبي المعادلة لذلك فإنه لحساب عامل الاحتكاك من هذه المعادلة فإنه يجب استعمال منهجية الخطأ والتكرار [trial-and-error approach]. ففي البداية سوف نفرض قيمة أولية لعامل الاحتكاك [على سبيل المثال 0.01]، بعدئذ يتم تعويض هذه القيمة في الجهة اليمنى من المعادلة عندئذ سوف نحصل على قيمة تقريبية لعامل الاحتكاك والتي يمكن استعمالها بهدف الحصول على قيمة أفضل لعامل الاحتكاك وهكذا. وعملياً إن عملية التكرار لثلاثة أو أربعة مرات تكون كافية للاقتراب إلى قيمة مناسبة لعامل الاحتكاك إلى حد معقول.

كما يمكن أن نلاحظ من معادلة كولبروك أنه من أجل الجريان المضطرب [مجال الاحتكاك الأملس]، يكون للحد الأول الموجود بين قوسين قيمة مهملة مقارنة بالحد الثاني، وذلك لأن خشونة الأنبوب تكون صغيرة جداً.

لذلك فمن أجل الجريان المضطرب [مجال الاحتكاك الأملس] تأخذ معادلة كولبروك الشكل التالي:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10}\left(\frac{2.51}{\text{Re}\sqrt{f}}\right) \quad \text{for turbulent flow in smooth pipes}$$

وبشكل مشابه، ففي حالة الجريان المضطرب [مجال الاحتكاك الخشن] يكون للحد الثاني من معادلة كولبروك قيمة مهملة مقارنة مع الحد الأول وذلك لأن لعدد رينولدز قيمة كبيرة جداً وبالتالي فإن عامل الاحتكاك في هذه الحالة يعتمد في الغالب على الخشونة، عندئذ تأخذ معادلة كولبروك الشكل التالي:

يبين الجدول [1] قائمة بالقيم النموذجية للخشونة الداخلية للأنابيب المستعملة في حساب عامل الاحتكاك.

Pipe Material	Roughness, in.	Roughness, mm
Riveted steel	0.0354 to 0.354	0.9 to 9.0
Commercial steel/welded steel	0.0018	0.045
Cast iron	0.0102	0.26
Galvanized iron	0.0059	0.15
Asphalted cast iron	0.0047	0.12
Wrought iron	0.0018	0.045
PVC, drawn tubing, glass	0.000059	0.0015
Concrete	0.0118 to 0.118	0.3 to 3.0

الجدول [1]، الخشونة المطلقة لبعض الأنابيب.

عامل النقل [Transmission Factor]:

إن لعامل النقل مفهوم معاكس لعامل الاحتكاك، فإذا كان عامل الاحتكاك يشير إلى كم هو من الصعب نقل كمية معينة من الغاز خلال خط الأنابيب فإن عامل النقل هو مقياس مباشر لكمية الغاز التي يمكن نقلها خلال خط الأنابيب. وبازدياد عامل الاحتكاك ينقص عامل النقل وبالتالي نقصان في معدل تدفق الغاز أيضاً، والعكس صحيح. وعملياً يمكن حساب عامل النقل من العلاقة التالية:

$$F = \frac{2}{\sqrt{f}}$$

وبالتالي فإن:

$$f = \frac{4}{F^2}$$
 43

حيث إنَّ:

عامل الاحتكاك. f

عامل النقل: F

من الملاحظ أن عامل الاحتكاك من المعادلة المذكورة أعلاه هو عامل احتكاك دارسي. ولكن بعض المهندسين يفضلون استعمال عامل احتكاك فانينغ، ويمكن كتابة العلاقة بين عامل النقل وعامل احتكاك فانينغ على الشكل التالى:

$$F = \frac{1}{\sqrt{f_f}}$$

حيث إنّ $[f_f]$ عامل احتكاك فانينغ.

وبتعويض المعادلة [42] بمعادلة كولبروك [39] نحصل على المعادلة التالية:

$$F = -4\log_{10}\left(\frac{e}{3.7D} + \frac{1.255F}{\text{Re}}\right)$$
 45

وبشكل مشابه لطريقة حساب عامل الاحتكاك [من المعادلة 39] فإنه يتم حساب عامل النقل باستخدام منهجية التكرار [iterative approach].

معادلة كولبروك-وايت المعدّلة [Modified Colebrook-White Equation]:

تعطى معادلة كولبروك المعدلة في حالة الجريان المضطرب على الشكل التالى:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10}\left(\frac{e}{3.7D} + \frac{2.825}{\text{Re}\sqrt{f}}\right) \quad \text{for Re} > 4000$$

بإعادة كتابة المعادلة [46] بالنسبة لعامل النقل، سوف نحصل على النسخة المعدّلة لمعادلة كولير وك-وابت:

$$F = -4\log_{10}\left(\frac{e}{3.7D} + \frac{1.4125F}{\text{Re}}\right) \quad (USCS \ and \ SI \ units)$$

وبالمقارنة بين المعادلتين [39] و[46] يلاحظ بأن الاختلاف بين معادلة كولبروك ومعادلة كولبروك ومعادلة كولبروك المعلة يكمن في قيمة الثابت الثاني الموجود مابين قوسين. حيث يستبدل الثابت [2.51] في المعادلة [46]، وبنفس الشيء بالنسبة لمعادلات عامل النقل فالثابت [1.4125] يستبدل بالقيمة [1.255] في معادلة كولبروك-وايت الأصلية.

يتم إدخال عامل كفاءة خط الأنابيب لتصحيح الكميات الصغيرة من السائل [weld] ومقاومة اللحام [general debris] ومقاومة اللحام [amounts of liquid line] وتجهيزات الصمامات [valve installations] وانحناءات الخط [bends] أو أية عوامل أخرى من شأنها تقليل معدل تدفق التيار الغازي إلى نقطة مادون معادلة الحالة الأساسية [basic equation of state]. حيث يتم تقدير القيمة التصميمية لـ معادلة الخاز الجديدة والنظيفة بـ [0.92]. بعض شركات الغاز تستخدم بعض القيم الاعتباطية لـ [E]:

- [E=1.0]: وذلك من أجل الأنابيب الجديدة المستقيمة، ومن النادر جداً استعمال هذه القيمة في التصميم.
 - [E=0.95]: في الشروط الممتازة [مع تنفيذ عمليات كشط متكررة].

- [E=0.92]: في الشروط المتوسطة إلى جيدة [التصميم الطبيعي].
- [E=0.92]: في الأنابيب الوسخة والقديمة والتي لايتم فيها تنفيذ عمليات الكشط.

معادلة [Panhandle A]:

طوّرت معادلة [Panhandle A] بغية استخدامها في خطوط أنابيب نقل الغاز الطبيعي وذلك بإدخال عامل كفاءة من أجل قيم لأعداد رينولدز تتراوح من [10*10] إلى [10*10] في هذه المعادلة لايتم استخدام خشونة الأنبوب. إن الشكل العام لمعادلة [Panhandle A] معبراً عنها بواحدات الجملة التجارية الأمريكية [USCS units] هو مايلي:

$$Q = 435.87 \ E\left(\frac{T_b}{P_b}\right)^{1.0788} \left[\frac{p_1^2 - e^s p_2^2}{G^{0.8539} L_e T_f Z}\right]^{0.5394} D^{2.6182} \ (USCS \ units)$$
 55

حيث إنّ:

Q: معدل تدفق التيار الغازي مقاساً عند الشروط القياسية، [SCFD].

E: عامل كفاءة خط الأنابيب.

.[psia] : الشروط القياسية، p_b

.[°R(460+°F)] درجة الحرارة القياسية، T_b

.[psia] : الضغط في بداية الجزء المعتبر p_1

.[psia] الضغط في نهاية الجزء المعتبر: p_2

. الكثافة النسبية للغاز G

.[°R(460+°F)] درجة الحرارة الوسطية للغاز المتدفق، [T_f

L: الطول المكافئ للجزء المعتبر، [mile].

z: عامل انضغاطية الغاز عند درجة حرارة التدفق.

القطر الداخلي للأنبوب، [in].

أما في واحدات الجملة الدولية فتأخذ معادلة [Panhandle A] الشكل التالي:

$$Q = 4.5965 \times 10^{-3} \ E \left(\frac{T_b}{P_b}\right)^{1.0788} \left[\frac{p_1^2 - e^s p_2^2}{G^{0.8539} L_e T_f Z}\right]^{0.5394} D^{2.6182}$$
 (SI units) 56

حيث إنّ:

 $[m^3/day]$: معدل تدفق التيار الغازي مقاساً عند الشروط القياسية، $[m^3/day]$.

.[KPa] : الشروط القياسية، p_b

. [$K(273+^{o}C)$] : درجة الحرارة القياسية T_{b}

. [KPa] : الضغط في بداية الجزء المعتبر p_1

. [KPa] : الضغط في نهاية الجزء المعتبر، p_2

. [$K(273+^{o}C)$] درجة الحرارة الوسطية للغاز المتدفق، [T_{f}

[Km]: الطول المكافئ للجزء المعتبر،

أما الرموز الاخرى فلها نفس التعريف السابق.

معادلة [Panhandle B]:

وتدعى هذه المعادلة أحياناً بمعادلة [Panhandle] المنقحة، وتستخدم في حسابات خطوط العالية [arge diameter, high pressure أنابيب النقل ذات القطر الكبير والضغوط العالية [transmission lines]، حيث وجد أنها تعطي نتائج دقيقة في حالة الجريان المضطرب [منطقة الاحتكاك الخشن] وذلك من أجل قيم لعدد رينولدز تتراوح بين [410⁶] إلى [USCS] تأخذ هذه المعادلة في واحدات الجملة [USCS] الشكل التالي:

$$Q = 737 \ E \left(\frac{T_b}{P_b}\right)^{1.02} \left[\frac{p_1^2 - e^s p_2^2}{G^{0.961} L_e T_f Z}\right]^{0.51} D^{2.53} \ (USCS \ units)$$

حيث إنّ:

Q: معدل تدفق التيار الغازي مقاساً عند الشروط القياسية، [SCFD].

E: عامل كفاءة خط الأنابيب.

.[psia] : الشروط القياسية، p_b

.[°R(460+°F)] درجة الحرارة القياسية، [T_b

.[psia] : الضغط في بداية الجزء المعتبر p_1

.[psia] الضغط في نهاية الجزء المعتبر، p_2

الكثافة النسبية للغاز G

.[°R(460+°F)] درجة الحرارة الوسطية للغاز المتدفق، [T_f

.[mile] الطول المكافئ للجزء المعتبر، L_e

z: عامل انضغاطية الغاز عند درجة حرارة التدفق.

القطر الداخلي للأنبوب، [in].

أما في واحدات الجملة الدولية فتأخذ معادلة [Panhandle B] الشكل التالي:

$$Q = 1.5002 \times 10^{-2} E \left(\frac{T_b}{P_b}\right)^{1.02} \left[\frac{p_1^2 - e^s p_2^2}{G^{0.961} L_e T_f Z}\right]^{0.51} D^{2.53}$$
 (SI units)

حيث إنّ:

Q: معدل تدفق التيار الغازى مقاساً عند الشروط القياسية، $[m^3/day]$.

.[KPa] : الشروط القياسية، p_b

. [$K(273+{}^{o}C)$] : درجة الحرارة القياسية T_{b}

: الضغط في بداية الجزء المعتبر، [KPa].

.[KPa] : الضغط في نهاية الجزء المعتبر، p_2

. [$K(273+^{o}C)$] درجة الحرارة الوسطية للغاز المتدفق، [T_{f}

لطول المكافئ للجزء المعتبر، [Km]. L_{e}

أما الرموز الاخرى فلها نفس التعريف السابق.

يمكن بمقارنة معادلة [Panhandle B] مع معادلة الجريان العامة أن يحسب عامل النقل المكافئ في واحدات الجملة التجارية الأمريكية [USCS units] كمايلي:

$$F = 16.7 E \left(\frac{Q \cdot G}{D}\right)^{0.01961} \qquad (USCS \ units)$$

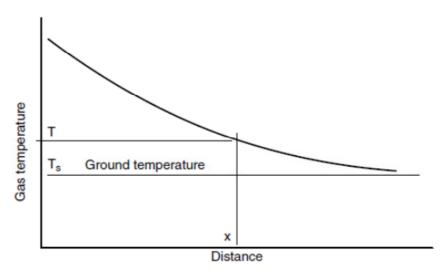
وفي واحدات الجملة الدولية [S]:

$$F = 19.08 E \left(\frac{Q \cdot G}{D}\right)^{0.01961} \qquad (SI \ units)$$

تغير درجة الحرارة على طول خطوط أنابيب نقل الغاز الطبيعي:

فيما سبق تمّ افتراض أن لدرجة حرارة الغاز قيمة ثابتة على طول خط الأنابيب [نظرية التحول الإيزوترمي]. وبناء على هذه الفرضية فإنه بالإمكان حساب هبوط الضغط باستخدام خصائص الغاز الثابتة مثل عامل الانضغاطية. ولكن في الواقع فإن درجة حرارة الغاز في الأنابيب المطمورة تتغير على طول خط الأنابيب نتيجة للتبادل الحراري [heat transfer] الحاصل بين الغاز والتربة المحيطة [surrounding soil]. فإذا كانت درجة حرارة الغاز والتربة المحيطة [60 °F]، عندئذ سوف يسبب هذا الاختلاف في درجات الحرارة فقدان حراري من الغاز إلى التربة. وعلاة على ذلك، ففي أنابيب النقل الطويلة درجات الحرارة فقدان حراري من الغاز إلى التربة. وعلاة على ذلك، ففي أنابيب النقل الطويلة

[long distance pipeline] يمكن لدرجة حرارة التربة أن تتغير على طول خط الأنابيب. وبالنتيجة فإن هذا سوف يسبب تغيراً في درجة حرارة الغاز، كما هو مبين في الشكل [3.14].



الشكل [3.14]، بروفيل توزع درجة حرارة الغاز على طول خط الأنابيب.

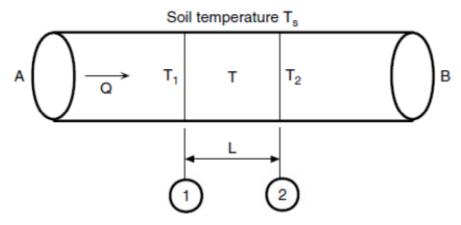
وبشكل عام، فإذا كان خط الأنابيب طويل جداً، فإن درجة الغاز سوف تتساوي في النهاية مع درجة حرارة التربة عند اقتراب الغاز من نقطة التسليم. لذلك وبسبب مثل هذا الاختلاف في درجة حرارة الغاز فإنه يجب إجراء حساب هبوط الضغط على أجزاء قصيرة من خط الأنابيب والتي تشكل بجملها خط الأنبوب الكلي. على سبيل المثال، فإذا كان الطول الكلي لخط الأنابيب والتي تشكل بجملها خط الأنبيب المثال، فإذا كان الطول الكلي لخط الأنابيب [1 وmile] أو [2 miles] بغية تطبيق معادلة الجريان العامة من أجل كل جزء على حدى وذلك انظلاقاً من الضغط في بداية خط الأنابيب [الجزء 1] ثم يتم حساب الضغط في نهاية الجزء الأول وذلك على افتراض أن لدرجة حرارة الغاز قيمة وسطية ثابتة على طول الجزء 1. وفيما بعد وباستخدام قيمة الضغط في نهاية الجزء 2. ونستمر بإجراء نفس منهجية الحساب حتى يتم سوف يتم حساب الضغط في نهاية الجزء 2. ونستمر بإجراء نفس منهجية الحساب حتى يتم تغطية كل الأجزاء المكونة لخط الأنابيب الكلي. ويجب أن نلاحظ بإن الاختلاف في درجة الحرارة من جزء غلى آخر يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار بغية حساب عامل الانضغاطية الذي يستعمل في معادلة الجريان العامة.

تعتبر عملية حساب درجة حرارة الغاز عند أي نقطة على طول خط الأنابيب مع الأخذ بعين الاعتبار التبادل الحراري بين الغاز ودرجة حرارة التربة المحيطة من العمليات المعقدة فعلاً. من أجل الأخذ بدقة وبعين الاعتبار تغيرات درجة الحرارة فإنه يجب استعمال برنامج محاكاة ملائم لهيدروليكة أنابيب الغاز [gas pipeline hydraulics simulation program] وذلك لإن إجراء مثل هذه الحسابات بشكل يدوي مرهق جداً ويستهلك وقتاً طويلاً. يتوفر في الوقت الراهم العديد من برامج النمذجة التجارية [programs المحاكاة الجريان المستقر في خطوط أنابيب نقل الغاز. حيث تقوم هذه البرامج بحساب ضغوط ودرجة حارة الغاز أخذة بعين الاعتبار تغيرات درجة حرارة التربة [pipe burial depth]، وعمق طمر الأنبوب [pipe burial depth]،

والناقليات الحرارية [thermal conductivities] لكل من الغاز الأنبوب وطبقة التغليف والتربة.

وبالرغم من أن الحساب اليدوي لاختلاف درجة الحرارة وهبوط الضغط الموافق في خطوط أنابيب الغاز مضجر جداً إلا أننا سوف نقدم بعض المعادلات الأساسية كمعادلات مرجعية.

ليكن لدينا خط أنابيب مطمور يقوم بنقل الغاز من النقطة [A] إلى النقطة [B]. سوف نقوم بتحليل جزء قصير طوله $[\Delta L]$ من هذا الخط كما هو موضح في الشكل [3.15]. وبتطبيق مبادئ التبادل الحراري على هذا الجزء القصير سوف نعين كيف يمكن لدرجة حرارة الغاز أن تتغير على طول خط الأنابيب.



الشكل [3.15]، تحليل تغير درجة الحرارة.

فإذا كانت درجة حرارة الغاز عند بداية ونهاية الجزء المعتبر هما T_1 و T_2 على التوالي. أما درجة الحرارة المتوسطة للغاز في هذا الجزء T_1 ودرجة حرارة التربة الخارجية [soil temperature] في هذا الموقع T_1 وعلى اعتبار أن الجريان مستقر وأن معدل التدفق الكتلي T_1 . يسبب جريان الغاز من بداية الجزء المعتبر إلى نهايته هبوطاً في درجة الحرارة بمقدار T_1 . حيث يمكن التعبير عن الفاقد الحراري من الغاز بالعلاقة التالية:

$$\Delta H = -mC_{p}\Delta T$$
 [3.23]

حيث إنّ:

Btu/h]، [heat transfer rate]، ΔH

m: معدل التدفق الكتلي، [lb/h].

.[Btu/lb.°F] للغاز، [average specific heat] للغاز، [Btu/lb.°F] الحرارة النوعية المتوسطة [Btu/lb.°F].

 $[T_1-T_2]$ ويساوي [temperature difference] ويساوي ΔT : فرق درجات الحرارة $[^{\circ}F]$.

تشير إشارة الناقص في المعادلة [3.23] إلى الفقد الحراري من درجة حرارة الغاز في بداية الجزء المعتبر $[T_1]$ إلى درجة الحرارة في نهاية الجزء المعتبر $[T_1]$.

سوف نعبر عن التبادل الحراري من الغاز إلى التربة المحيطة بمعامل التبادل الحراري الكلي [U] من الغاز الذي يرمز له بـ [U] كما سوف يرمز للفرق في coverall heat transfer coefficient] الذي يرمز له بـ $[T-T_s]$. عندئذ يمكن كتابة العلاقة التالية من أجل التبادل الحراري:

$$\Delta H = U \, \Delta A (T - T_s) \tag{3.24}$$

حيث إنّ:

(overall heat transfer coefficient] معامل التبادل الحراري الكلي:U: Btu/h.ft².°F]

 $\pi D\Delta L$] مساحة سطح الأنبوب التي يحدث من خلالها التبادل الحراري وتساوي [ft²].

درجة حرارة الغاز الوسطية في جزء الأنبوب المعتبر، $[^{\circ}F]$.

درجة الحرارة الوسطية للتربة في جزء الأنبوب المعتبر، $[^{\circ}F]$.

القطر الداخلي للأنبوب، [ft]. D

وبمساواة قيمتي معدل التبادل الحراري من العلاقتين [3.23] و[3.24]، نحصل على:

 $-mC_{p}\Delta T = U \Delta A(T - T_{s})$

وبالتبسيط، نحصل على:

$$\frac{\Delta T}{T - T_s} = -\left(\frac{\pi U D}{mC_p}\right) \Delta L$$
 [3.25]

بإعادة كتابة المعادلة [3.25] بالشكل التفاضلي [differential form]، وبالتكامل نحصل على:

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T - T_s} = \int_{0}^{L} -\left(\frac{\pi U D}{mC_p}\right) dL$$
 [3.26]

بإجراء التكامل والتبسيط نحصل على:

$$\frac{T_2 - T_s}{T_1 - T_s} = e^{-\theta}$$
 [3.27]

حيث إنّ:

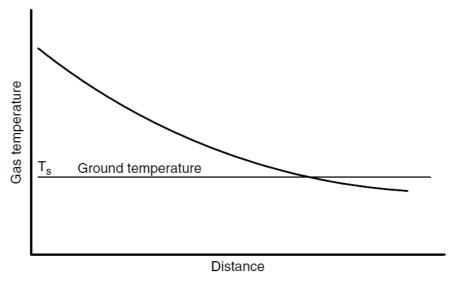
$$\theta = \frac{\pi U D \Delta L}{m \, C_p} \tag{3.28}$$

وبتبسيط المعادلة [3.27]، سوف نحصل على درجة الحرارة في نهاية الجزء المعتبر ذو الطول $[\Delta L]$:

$$T_2 = T_s + (T_1 - T_s)e^{-\theta}$$
 [3.29]

يمكن أن نلاحظ من المعادلة [3.29] بأنه بازدياد طول الأنبوب يمكن للحد $[e^{-\theta}]$ أن يقترب من الصفر، وعندئذ تصبح درجة الحرارة $[T_s]$ مساوية لدرجة حرارة التربة $[T_s]$. لذلك ومن أجل أنابيب الغاز الطويلة فإن درجة حرارة الغاز في النهاية تساوي درجة حرارة التربة، كما هو موضح في الشكل [3.14].

في التحليل السابق، تمّ اقتراح بعض الفرضيات التبسيطية، حيث تمّ افتراض أن لدرجة حرارة التربة ولمعامل التبادل الحراري الكلي قيم ثابتة على طول خط الأنابيب، كما تمّ إهمال مفعول جول تومسون عند تمدد الغاز في خط الأنابيب. ولكن في الحقيقة، يمكن لدرجة حراة التربة أن تتغير على طول خطوط أنابيب النقل الطويلة لذلك يجب أن يؤخذ هذا التغير بعين الاعتبار عند إجراء الحسابات. لذلك فإنه من المفضل في مثل هذه الحالة تقسيم خط الأنابيب إلى أجزاء بحيث تكون درجة حرارة التربة ثابتة في كل جزء ومن ثم يتم إنجاز الحسابات من أجل كل جزء بشكل منفصل. يسبب مفعول جول تومسون انخفاض بسيط في درجة حرارة الغاز بسبب تمدده، لذلك ففي أنابيب الغاز الطويلة يمكن لدرجة حرارة الغاز عند نقطة التسليم أن تتخفض إلى مادون درجة حرارة التربة، كما هو موضح في الشكل [3.16].



الشكل [3.16]، تأثير مفعول جول تومسون في خطوط أنابيب نقل الغاز.

تحليل الأنبوب [Pipe Analysis].

سوف نناقش في هذا الفصل المقاومة الميكانيكية [mechanical strength] التي pipe] تتطلبها خطوط أنابيب نقل الغاز الطبيعي. كما سوف نقوم بتحليل تأثير قطر الأنبوب [diameter of] وسماكة الجدار [wall thickness] ومادة البناء [construction] ومتطلبات الأمان النوعية [specific safety requirements] التي تمليها قوانين التصميم. كما سوف يتم تغطية متطلبات الاختبار [testing requirements] والمنشأت السمان [human] والكثافة السكان [industrial establishments] والكثافة السكانية [dwellings] والكثافة السكانية وحساب [population density]. كما سوف يتم مناقشة أهمية صمامات الإغلاق الرئيسية وحساب زمن التصريف [blowdown time] بغية عزل أقسام من خط الأنابيب.

سماكة جدار الأنبوب [Pipe Wall Thickness]:

تمّ في الفصل الثالث حساب الضغط اللازم لنقل كمية معينة من الغاز خلال خط الأنابيب. حيث تؤدي قوى الضغط الداخلية [internal pressure] التي تخضع لها أنابيب النقل إلى فشوء إجهادات في جدران مواسيرها، وإذا بلغت هذه الإجهادات حد خضوع [permanent deformation] معدن الأنبوب فإنها يمكن أن تسبب تشوه دائم [material] معدن الأنبوب في عمل خط الأنابيب. من الواضح أنه يجب أن يتمتع الأنبوب بمقاومة كافية للتغلب على الضغط الداخلي بسلامة وأمان. بالإضافة إلى قوى الضغط الداخلية الناجمة عن جريان الغاز في خط الأنابيب، يمكن أن يتعرض خط الأنابيب إلى قوى الضغط الخارجية [External pressure].

يمكن أن ينتج الضغط الخارجي من وزن التربة [buried pipeline] التي تعلو خطوط الأنابيب المطمورة [buried pipeline] وأيضاً من الأحمال المتولدة عن مرور الشاحنات [vehicular traffic] في المناطق التي يقع فيها خط الأنابيب تحت الطرق العامة [vehicular traffic] والطرق السريعة [highways] والسكك الحديدية [railroads]. حيث سوف يزداد حمل التربة على الأنبوب بازدياد عمق طمر الأنبوب ولكن بالمقابل تتناقص الأحمال المتولدة عن مرور الشاحنات بازدياد عمق الأنبوب تحت سطح الأرض. وبالتالي سوف تكون الضغوط الخارجية الناتجة عن أحمال الشاحنات على خطوط الأنابيب المطمورة على عمق [ff ft]. في معظم الحالات يكون تأثير الضغط الداخلي في أنابيب نقل الغاز المطمورة أكبر بكثير مقارنة مع تأثير الأحمال الخارجية. لذلك وبناء على ماسبق فإن سماكة الجدار الأصغرية والضرورية تبنى على أساس الضغط الداخلي في خط أنابيب الغاز.

تعتمد سماكة الجدار الأصغرية اللازمة للتغلب على الضغط الداخلي في خطوط أنابيب الغاز على الضغط وقطر الأنبوب ومعدن الأنبوب. حيث تتطلب خطوط الأنابيب العاملة عند ضغوط عالية أو تلك التي تتمتع بأقطار كبيرة، جدران بسماكات كبيرة. في حين تتطلب خطوط الأنابيب الفولاذية ذات المقاومة العالية [High strength steel pipes] جدران بسماكات أقل للتغلب على ضغوط معطاة مقارنة مع الأنابيب المصنوعة من معادن ذات مقاومة أقل. تدعى العلاقة الأكثر شيوعاً والمستعملة في تحديد سماكة الجدار من أجل الضغط الداخلي بمعادلة بارلو [Barlow's equation]. عدّلت هذه المعادلة لكي تأخذ بعين الاعتبار العوامل التصميمية [pipe joints] ونوع وصل الأنبوب [pipe joints] —بدون درزة التصميمية [seamless]، ملحومة [welded]....الخ- ودمجت في أكواد التصميم مثل [ASME B31.8 Standards].

معدن ودرجة الأنبوب [Pipe Material and Grade]:

تتوافق الأنابيب الفولاذية [Steel pipes] المستعملة في أنظمة خطوط أنابيب الغاز [API LX5] و [API LX5]. وتصنع هذه الأنابيب في درجات تتراوح من [X42] إلى [X90] وبـ [SMYS] مبين في الجدول [6.1].

Pipe Material API 5LX Grade	Specified Minimum Yield Strength (SMYS), psi
X42	42,000
X46	46,000
X52	52,000
X56	56,000
X60	60,000
X65	65,000
X70	70,000
X80	80,000
X90	90,000

الجدول [6.1]، يبين نوع معدن الأنابيب وحد الخضوع الأصغري المحدد.

معادلة الضغط التصميمي الداخلي [Internal Design Pressure Equation]:

كما أشير سابقاً في هذا الفصل بأن معادلة بارلو بشكلها المعدل تستعمل في تصميم خطوط أنابيب نقل الغاز الطبيعي. في حين يستخدم الشكل التالي لمعادلة بارلو في أكواد التصميم [design codes] لأنظمة أنابيب النقل بغية حساب الضغط الداخلي المسموح به في خط الأنابيب معتمدة على قيم معطاة لكل من القطر الخارجي وسماكة الأنبوب ومعدن الأنبوب:

$$P = \frac{2tSEFT}{D}$$
 [6.8]

حيث إنّ:

p: الضغط التصميمي الداخلي للأنبوب [internal pipe design pressure]، ويعرف هذا الضغط بضغط التشغيل الأعظمي المسموح به في خط الأنابيب [psig]. ويعرف هذا الصغط بضغط التشغيل الأعظمي [maximum allowable operating pressure]. وفي السنوات الأخيرة أصبح يطلق على هذا المصطلح بضغط التشغيل الأعظمي [operating pressure].

 τ : السماكة الاسمية لجدران خط الأنابيب [nominal wall thickness]، [in]

[in] ([nominal outside diameter]، [ni]. القطر الخارجي الاسمي للأنبوبD

specified minimum yield strength))، حد الخضوع الأصغري المحدود [psig].

F: عامل تصميمي [Design Factor]، وتعتمد قيمته على مواقع مسار خط الأنابيب [type of construction] ونوع الإنشاء [class location]، وهو عادة [0.72] من أجل خطوط أنابيب الغاز العابرة للدول [6.3] قيم هذا العامل اعتماداً على مواقع مسار خط يكون أقل من [0.4]. ويبين الجدول [6.3] قيم هذا العامل اعتماداً على مواقع مسار خط الأنابيب بدورها على الكثافة السكانية [population density] الموجودة بالقرب من خط الأنابيب.

Class Location	Design Factor, F
1	0.72
2	0.60
3	0.50
4	0.40

الجدول [6.3]، قيم العامل التصميمي اعتماداً على مواقع مسار خط الأنابيب

وقيمته [1] عامل اللحام الطولي لمواسير خط الأنابيب [seamless pipes] والملحومة بالقوس المغمور تساوي [1] من أجل الأنابيب المسحوبة [seamless pipes] والملحومة بالقوس المغمور [submerged arc welded (SAW) pipes]. وعموماً تعتمد قيمة هذا العامل على نوعية معدن الأنابيب [type of pipe material] وعلى طريقة اللحام المستخدمة. يبين الجدول [6.2] قيم هذا العامل من أجل أنواع اللحام والأنابيب شائعة الاستعمال.

Specification	Pipe Class	Seam Joint Factor (E)
ASTM A53	Seamless	1
	Electric Resistance Welded	1
	Furnace Lap Welded	0.8
	Furnace Butt Welded	0.6
ASTM A106	Seamless	1
ASTM A134	Electric Fusion Arc Welded	0.8
ASTM A135	Electric Resistance Welded	1
ASTM A139	Electric Fusion Welded	0.8
ASTM A211	Spiral Welded Pipe	0.8
ASTM A333	Seamless	1
ASTM A333	Welded	1
ASTM A381	Double Submerged	
	Arc Welded	1
ASTM A671	Electric-Fusion-Welded	1
ASTM A672	Electric-Fusion-Welded	1
ASTM A691	Electric-Fusion-Welded	1
API 5L	Seamless	1
	Electric Resistance Welded	1
	Electric Flash Welded	1
	Submerged Arc Welded	1
	Furnace Lap Welded	0.8
	Furnace Butt Welded	0.6
API 5LX	Seamless	1
	Electric Resistance Welded	1
	Electric Flash Welded	1
	Submerged Arc Welded	1
API 5LS	Electric Resistance Welded	1
	Submerged Arc Welded	1

الجدول [6.2]، قيم عامل اللحام الطولي من أجل أنواع اللحام والأنابيب شائعة الاستعمال.

temperature] معامل يأخذ بعين الاعتبار درجة حرارة الغاز المنقول [1.00]. T (derating factor]. ويساوي [1.00] من أجل درجات الحرارة الأخفض من

المعطيات الأساسية للتصميم:

1- كمية الغاز المنقول في الشروط القياسية:

 $Q=10.416 \text{ M}^3/\text{s}$

 $Q=2893.33 \text{m}^3/\text{s}$

2- الضغط:

أ- ضغط التصميم Ps=75bar

ب- ضغط الغاز في بداية الخطPin=70bar

ج- ضغط الغاز في نهاية خط الأنابيبPf=20bar

د- ضغط العمل الوسطى Pav=49.629bar

3-درجات الحرارة:

Tin=45c° درجة حرارة الغاز الداخل إلى الخط

درجة حرارة تغذية الغاز إلى وحدة توليد الطاقة فوق نقطة تكثف الهيدروكربونات $c^{\circ}15$

°10cدرجة حرارة التربة الصغرى في الشتاء

تحديد قطر الأنابيب

معادلة [Panhandle A]:

$$Q = 435.87 \ E \left(\frac{T_b}{P_b}\right)^{1.0788} \ \left[\frac{p_1^2 - e^s p_2^2}{G^{0.8539} L_e T_f Z}\right]^{0.5394} D^{2.6182} \ (USCS \ units)$$

حيث إنّ:

Q: معدل تدفق التيار الغازي مقاساً عند الشروط القياسية، [SCFD].

عامل كفاءة خط الأنابيب ويؤخذ100%من اجل الجدران النظيفة والناعمة وسطيا يؤخذ92%.

14.73 psia الضغط القياسي : p_b

R520=60+460 وتساوي. [° $R(460+^{o}F)$]. درجة الحرارة القياسية، [T_{b}

.[psia] : الضغط في بداية الجزء المعتبر p_1

.[psia] : الضغط في نهاية الجزء المعتبر p_2

G: الكثافة النسبية للغاز

وتساوي [$^{\circ}R(460+^{\circ}F)$] درجة الحرارة الوسطية للغاز المتدفق، $^{\circ}R(460+^{\circ}F)$ وتساوي : T_f

 $\mathsf{KM135} = 83.88$ ميل المكافئ للجزء المعتبر، [mile]. ويساوي ميل المكافئ المجزء المعتبر،

z: عامل انضغاطية الغاز عند درجة حرارة التدفق.

D: القطر الداخلي للأنبوب، [in].

بالتعويض في المعادلة السابقة

$$\times \, d^{2.61820.5341}(\tfrac{_{1012^2 - 290^2}}{_{0.952\times 0.6036}{}^{0.8539}\times 546\times 83.88}}) \ \ = 435.87\times 0.92\times (\tfrac{520}{_{14.73}})^{1.0781}\times 367.835\times 10^6$$

d = 21.0508 inch

من جداول الأقطار القياسية نجد القطر القياسي

D=22 inch

وبالتالي بناء" على معادلة بانهاندل نختار قطرين خارجين قياسين

 D_1 =22inch D_2 =24inch

معادلة [Panhandle B]:

$$Q = 737 \ E \left(\frac{T_b}{P_b}\right)^{1.02} \left[\frac{p_1^2 - e^s p_2^2}{G^{0.961} L_e T_f Z} \right]^{0.51} D^{2.53} \ (USCS \ units)$$

حيث إنّ:

Q: معدل تدفق التيار الغازي مقاساً عند الشروط القياسية، [SCFD].

E: عامل كفاءة خط الأنابيب.

.[psia] : الشروط القياسية، p_b

 $[^{o}R(460+^{o}F)]$: درجة الحرارة القياسية، [$^{o}R(460+^{o}F)]$

.[psia] : الضغط في بداية الجزء المعتبر p_1

. [psia] الضغط في نهاية الجزء المعتبر، p_2

G: الكثافة النسبية للغاز.

 T_{f} : درجة الحرارة الوسطية للغاز المتدفق، [$^{o}R(460+^{o}F)$].

 L_{e} : الطول المكافئ للجزء المعتبر، [mile].

z: عامل انضغاطية الغاز عند درجة حرارة التدفق.

D: القطر الداخلي للأنبوب، [in].

الحساب وفق بانهاندل B

$$Q = 737 \ E \left(\frac{T_b}{P_b}\right)^{1.02} \ \left[\frac{p_1^2 - e^s p_2^2}{G^{0.961} L_e T_f Z}\right]^{0.51} D^{2.53} \ (USCS \ units)$$

بالتعويض

$$\times d^{2.530.51} \left(\frac{1012^2 - 290^2}{0.952\times0.6036^{0.8539}\times546\times83.88} \right) \times ^2 \times 0.92 \times \left(\frac{520}{14.73} \right)^{1.0} 737 = 367.835 \times 10^6$$

d=21.4403

من جداول الأقطار القياسية نجد القطر القياسي

D=22 inch

نختار القطرين القياسين B وبالتالي بناء" على معادلة بانهاندل

 D_1 =22inch D_2 =24inch

تحديد السماكة:

تتعلق سماكة الأنابيب بالضغط الداخلي والخارجي فالضغط الداخلي ينشأ من ضغط الغاز على جدران الأنبوب أما الضغط الخارجي فأنه ينشأ عن الضغط الجوي على جدران الخارجية للأنابيب وضغط الأتربة التي تتوضع فوق الأنابيب وضغط الآليات عند مرورها على خط الأنابيب وكذلك تتعلق السماكة بعملية تأكل الأنابيب لذلك تزداد السماكة لجدران الأنبوب حسب نوع المادة المنقول وتأثيرها

وتحسب السماكة حسب العلاقة

$$P = \frac{2tSEFT}{D}$$

D=22 inch أو لا"- نحسب السماكة من أجل القطر

الأول:
$$F=0.5$$
 D=22 inch

$$\tau = \frac{pD}{2S.F.E.T} = \frac{1087.5 \times 22}{2 \times 60000 \times 0.5 \times 1 \times 1} = 0.3987 \text{in}$$

$$\tau = 10.3 \text{mm}$$

السماكة الحسابية

10.3mm ومن الجداول السماكة القياسية تكون القياسية

$$\tau = \frac{pD}{2S.F.E.T} = \frac{1087.5 \times 22}{2 \times 60000 \times 0.6 \times 1 \times 1} = 0.332in$$

 τ =8.44 mm السماكة الحسابية

 $\tau = 8.7$ mm السماكة القياسية

الاحتمال الثالث: F=0.72

$$\tau = \frac{pD}{2S.F.E.T} = \frac{1087.5 \times 22}{2 \times 60000 \times 0.72 \times 1 \times 1} = 7.033in$$

au=7.1 السماكة القياسية هي

$$D=24 \; inch$$
 النيا"- نحسب السماكة من أجل القطر $F=0.5$ $D=24 \; inch$ الأول:

$$\tau = \frac{pD}{2S.F.E.T} = \frac{1087.5 \times 24}{2 \times 60000 \times 0.5 \times 1 \times 1} = 11.044$$
mm

ومن الجداول السماكة القياسية تكون القياسية 11.1mm

الاحتمال الثاني أو F=0.6

$$\tau = \frac{pD}{2S.F.E.T} = \frac{1087.5 \times 24}{2 \times 60000 \times 0.6 \times 1 \times 1} = 9.2075 \text{mm}$$

 $\tau = 9.5 \, \mathrm{mm}$ السماكة القياسية

الاحتمال الثالث: F=0.72

$$\tau = \frac{pD}{2S F E T} = \frac{1087.5 \times 24}{2 \times 60000 \times 0.72 \times 1 \times 1} = 7.673 \text{mm}$$

au السماكة القياسية هي السماكة القياسية القياسة القياسية المام القياسية القياسية القياسية القياسية القياسية القياسية القياسي

وبناء على طبيعة المنطقة فقد تم استخدام ثلاث سماكات بالنسبة للقطر 24inch أي تقسيم الخط إلى ثلاث مناطق مختلفة بالسماكات

المنطقة A مساكتها 8.1mm طولها 30km المنطقة B طولها 9.6mm المنطقة B المنطقة C سماكتها 11.1mm طولها 25km

تدرج الحرارة على طول خط أنبوب نقل الغاز:

بعد معالجة الغاز فإن درجة حرارته عند خروجه من محطة الضواغط الى خط 60-40 ومع الأنابيب قد تصل الى Cحركة الغاز على طول الانابيب فأن درجة

ستنخفض الى أن تصل كما دلت التجربة إلى حرارة الوسط المحيط بعد أن يقطع

الغاز مسافة 30KM-20حيث يمكن تطبيق المعادلة التالية لحساب هبوط درجة

الحرارة على طول خط أنبوب الغاز

Tx=Ta+(Ti-Ta)e^{-ax}

حيثa ثابت تعطى قيمته بالعلاقة التالية:

 $a = \frac{\pi.K.D}{PQ.Cp}$

 $\frac{W}{m^2 \cdot k^{\circ}}$ التربة واحدته: K

D:القطر الداخلي لأنبوب الغاز (M)

Tx: درجة الحرارة في النقطة ×

 $(10 c^{\circ})$ درجة حرارة التربة (الوسط المحيط):Ta

Ta:درجة حرارة البدائية للغاز (45c°)

(m3/S) كمية الغاز المارة بالأنبوب

ρ:کثافة المزيج الغازي (Kg/m³)

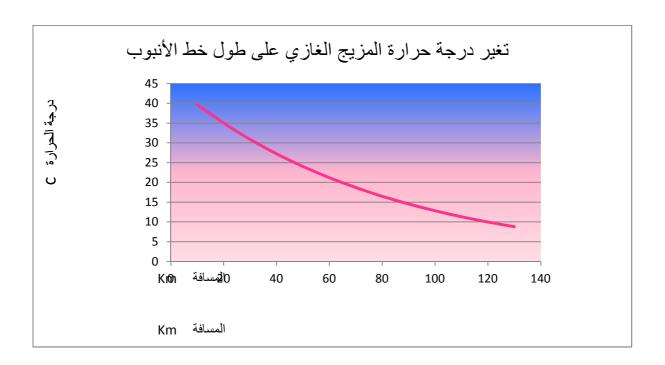
 $(J/Kg.K^{\circ})$ السعة الحرارية للمزيج الغازي:Cp

$$a = \frac{3.14 \times 1.35 \times 0.559}{0.603 \times 12055 \times 2214914} = 1.25 \times 10^{-5}$$

والجدول التالي يبين درجات الحرارة على مسافات مختلفة من الأنبوب

المسافة	درجة الحرارة °C
10	39.69
20	35.01
30	30.88
40	27.24
50	24.03
60	21.20
70	18.7
80	16.49
90	14.55
100	12.83
110	11.32
120	9.99
130	8.81
135	8.27

وبرسم العلاقة بين المسافة ودرجة الحرارة على طول الخط نجد:



الشكل (7) يبين تدرج الحرارة على طول خط الأنابيب

النتائج والمقترحات

- 1- من الضروري تحديد الآثار البيئية المحتملة لخطوط الأنابيب خلال طور التخطيط والتأكد من موافقتها أو عدم مخالفتها للتشريعات المناسبة.
- 2- تتميز أغلفة الايبوكسي الملصقة بالصهر بمتانته و مقاومته لتشكل العيوب فيه إضافة لمقاومته للانفصال عن السطح ودرجات الحرارة المرتفعة.
- 3- بغية تحقيق حماية كاتودية فعالة فإن كمون التوقف على طول خط الأنابيب يجب أن يبقى ضمن مجال يتراوح بين 850 mV و حتى 1200 Mv.
- 4- تنطوي عملية التقييم الكمي للمخاطر على إجراء حسابات تفصيلية لكل من المخاطر الفردية و المخاطر الجماعية. يعرف الخطر المفرد على أساس التواتر الذي يمكن أن يصاب وفقاً له الأفراد نتيجة حادث معين.
- 5- الاختبار الهيدروليكي القياسي يتم من خلال رفع الضغط ضمن الخط إلى قيمة تبلغ
 5.1 من الضغط التصميمي و هو يقدم مؤشراً مباشراً و سريعاً على سلامة الخط.

المراجع العلمية.

- 1- PD 8010, Code of Practice for Pipelines: Part 2 Pipelines on Land: Design, Construction and Installation, Published under the board of authority of BSI, London, 2004.
- 2- IGE/TD/1 Edition 4, Steel Pipelines for High Pressure Gas
 Transmission, The Institution of Gas Engineers Communication
 1670, London, 2001.
- 3- British Standard Business Information, Storage Tanks, Piping and Pipelines, An International Survey of Design and Approval Requirements, BSI, London.(2002)
- 4- API Spec 12J, "Specification for Oil and Gas Separators," 7th Edition. American Petroleum Institute, Washington, DC (Oct. 1989).
- 5- Aziz, K., and Ouyang, L.B., Simplified equation predicts gas flow rate, pressure drop. Oil Gas J. 93(19), 70–71 (1995).
- 6- Ballard, D., "The Fundamentals of Gas Dehydration." Gas Conditioning Conference, University of Oklahoma, Norman, (1979)
- 7- Brill, J. P., and H. D. Beggs. "Two-Phase Flow in Pipes." NTERCOMP Course, The Hague, 1974.
- 8- Hall, P., and Lokhandwala, K.A., "Advances in Membrane Materials Provide New Gas Processing Solutions." Paper presented at the GPA Annual Convention, New Orleans, (March 2004).
- 9- Kennedy, J.L., "Oil and Gas Pipeline Fundamentals," 2nd Ed. Pennwell, Tulsa, OK (1993).