الجمهورية العربية السورية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
الجامعة السورية الخاصة
كلية هندسة البترول

دراسةُ تأثيرِ سوائلِ الحفرِ على مواسيرِ التغليفِ

دراسةٌ أُعِدَت لنيلِ درجةِ الإجازةِ في هندسةِ البترول

إشراف:

الدكتور المهندس يوسف فرج

المهندس راتب جمول

إعدادُ:

مجد وسام الشبلي

2024-2025

شكر وتقدير

الحمدُلله الذي بنعمته تتم الصالحات، وبعد:

أتقدم بجزيل الشكر والامتنان إلى كل من أسهم في إنجاز هذا المشروع:

إلى مشرفيّ المشروع
القامة العلميّة الكبيرة في تخصص الحفر **الدكتور المهندس يوسف فرج**
وصاحب الخبرة الحقليّة والأكاديميّة **المهندس راتب جمول**
على دعمهم المستمر، وإرشادهم الثمين ووقتهم وجهدهم اللامحدود طوال فترة العمل على هذا المشروع.

إلى صاحبة الفضل **الدكتورة هناء حلواني**، الّتي قدمت لي جهاز الحمام المائي الساخن المستخدم في تجربتي العمليّة، كما لم تبخل بأيّ معلومة كيميائية تسهم في نجاح المشروع.

إلى عمداء كلية هندسة البترول في الجامعة السوريّة السّورية الخاصة الذين تعاقبوا على عمادة الكلية خلال فترة دراستي وإعدادي للمشروع وهم:
(د.جان سعد، د.أيمن شقوف، د.أدمون سلوم، د.محمد رياض الغزي)

إلى جميع أساتذتي الأعزاء في قسم الهندسة البترولية على ما قدموه من علم وجهد، مما ساعدني في إثراء معرفتي وتطوير مهاراتي، وأخص بالشكر من قدم لي معلومات تخص بحثي العلمي في مواضيع الحفر والتآكل أو إثراء لآلية الدراسة.
(د.عدنان البارودي، د.جليل ضمد غليم، ، د.منى عسكري، د.محمود حديد، د.حازم جنيد، د.زياد سلوم، د.هيثم الجاجة)
وسأذكر اسماء جميع أساتذتي وهم أصحاب الفضل في فقرة الإهداء.

إلى **الجامعة السورية الخاصة** ممثلةً برئاسة الجامعة وقد تعاقب عليها خلال فترة دراستي للمشروع **(أ.د.وائل معلا، أ.د.سمر حبيب)** والشكر الكبير لرئيس الجامعة السورية الخاصة السابق، معالي رئيس مجلس الوزراء في الجمهورية العربية السوريّة **الأستاذ الدكتور محمد الجلالي.**

إلى **الشركة السورية للنفط** ممثلةً بمديرها **الأستاذ المهندس سليمان ديب والأستاذ الجيوفيزيائيّ باسم دواه والأستاذة ميرفت زيود.**

كما أشكر **مديرية حقول المنطقة الوسطى** ممثلةً بالسيد المدير **المهندس علي سويقات** ونائب المدير **المهندس غياث عمران** وكوادرها العاملة على الحفارة ناشيونال 2 الذين قدموا لي الدعم في الحصول على عينات من سوائل الحفر ومواسير التغليف، مما كان له الأثر الكبير في إنجاز هذا البحث.

وأخص بالشّكر الأساتذة: **(فريد شلهوم، منصور دليقان، نضال ديب، شادي شنان، محمد نابلسي)**

إلى الفنيين الذين ساعدوني في العمل على العينات من قص وتشذيب وصقل، على جهدهم المبذول وإتقانهم للعمل، الذي كان له دور كبير في إتمام التجارب بشكل دقيق وناجح، وهم مع حفظ الألقاب:

(عمر أبو محمود، نسيم أبو سعدة، ياسر العقباني، هيسم الخطيب، رمزي الحمود).

الشّكر الأكبر لعائلتي الكريمة على دعمها اللامحدود وتشجيعها المستمر لي لتحقيق هذا الإنجاز، فلولاهم ما كنت لأكون وكل كلمات الشّكر لا توفيهم حقهم.

وفي الختام، أتوجه بالشكر إلى جميع من ساعدني وساندني خلال فترة دراستي في هذا المشروع من زملاء وأصدقاء، فأنتم شركاء في تحقيق هذا النجاح.

الفهرس **الصفحة**

الموضوع

ملخص المشروع.....3

الفصل الأول– تغليف الآبار

1-1– مقدمة. 4

1-2- مراحل تغليف الآبار:.....5

1-3- برنامج التغليف :.....10

1-4-العوامل المؤثرة على برنامج التغليف:.....10

1-5– المعدات المستخدمة في تغليف الآبار:.....11

الفصل الثاني–الإجهادات التي تتعرض لها مواسير التغليف

2-1-1-جهد الشد:.....19

2-1-2 -الضغط الخارجي:.....23

2-1-3-الضغط الداخلي:.....25

2-1-4-جهد الانضغاط المحوري:.....26

2-1-5–جهد الفتل:.....26

2-2–تصميم مواسير التغليف:.....27

2-2-1– تصميم مواسير التغليف اعتماداً على جهد الشد:.....28

2-2-2– تصميم مواسير التغليف اعتماداً على الضغط الخارجي:.....30

2-2-3– الطريقة البيانية في تصميم مواسير التغليف:.....32

الفصل الثالث– تآكل مواسير التغليف

3-1-تعريف التآكل:.....39

3-2-الظروف المساعدة لحدوث التآكل:.....39

3-3-مسببات تآكل مواسير التغليف:.....40

3-4-أنواع التآكل الذي تتعرض له مواسير التغليف:.....41

3-4-1-التآكل الكيميائي:.....42

3-4-2-التآكل الكهروكيميائي:.....42

3-4-3-التآكل الحيوي (البيولوجي):.....48

3-4-4-التآكل الميكانيكي:.....49

3-5-مواضع تآكل مواسير التغليف داخل البئر:..... 52
الفصل الرابع– اختبارات التآكل
4-1-مقدمة:.....55
4-2-تصنيف الاختبارات:.....55
4-3-مراحل دراسة تآكل العينات مخبرياً:.....56
4-4–طرق الاختبار (طرق تقييم عملية تآكل مواسير التغليف):.....58
الفصل الخامس– دراسة تأثير سوائل الحفر على مواسير التغليف
مقدمة :.....60
5-1-هدف البحث:.....60
5-2-الدراسة المرجعية وتقييم الواقع الحقلي:.....60
5-3- مواد وطرق البحث.:.....61
5-4-نتائج الدراسة المخبرية:.....64
5-5-مناقشة النتائج والمقترحات:.....68
مصطلحات البحث:.....69
المراجع العلمية:.....71

ملخص المشروع

تهدف عملية التغليف إلى زيادة ثبوتية جدران البئر وعزل الطبقات عن بعضها البعض وإن تمثيل ظروف حدوث تآكل مواسير التغليف مخبرياً يعتبر من المهام المعقدة وذلك بالنظر لكثرة العوامل المؤثرة بآن واحد أثناء استثمارها كالضغط والحرارة والإجهادات الثابتة والمتغيرة، نوع الخليطة المعدنية المصنوعة منها مواسير التغليف، وكذلك نوع السائل المتبقي في الفراغ الحلقي .... الخ.

لذلك وانطلاقاً من المحدودية المخبرية والفنية المتوفرة وبالتوافق مع الهدف الأساسي لمشروعنا فإننا اقتصرنا في دراستنا المخبرية على دراسة تأثير عدة أنواع من السوائل على مواسير التغليف في فترة زمنية محدودة جداً قياساً بالعمر الاستثماري للمواسير في البئر.

Abstract

The casing process aims to increase the borehole stability and isolate the layers from each other. Representing the conditions of corrosion of the casing pipes in the laboratory is one of the complex tasks. given the large number of factors affecting simultaneously during their investment such as pressure, temperature constant and variable stresses, steel grade, as well as the type the remaining fluid in the annular space…etc

Therefore, based on the limited laboratory and technical availability and in accordance with the main objective of our project, we were limited in our laboratory study to studying the effect of several types of fluid on the casing in a very limited period of time compared to the investment life of the pipes in the well.

مقدمة

إن جميع الآبار التي تحفر لإنتاج النفط والغاز (أو لحقن الموائع في الطبقة) يتم تدعيم جدرانها الصخرية بمجموعة متداخلة (تلسكوبية) من الأنابيب المعدنية اتفق على تسميتها مواسير التغليف (Casing) [8]

تبطن مواسير التغليف من الخارج بسائل تبطين (سائل إسمنتي) يضخ كي يملأ الفراغ الخلقي بين مواسير التغليف وجدران البئر، ثم يتصلب كي يؤمن للمواسير متانة وعازلية كافية لتأدية وظائفها الرئيسية في الحفاظ على ثبوتية (استقرار) جدران البئر وعزل الطبقات الحاملة للمياه عن بعضها وعن الطبقات الحاملة للنفط أو الغاز والتحكم بضغوط الآبار خلال عمليات الحفر والإنتاج والإصلاح، كما أن مواسير التغليف تشكل قاعدة متينة ومحكمة لتثبيت المعدات المختلفة التي تنزل في البئر أو التي تجهز بها فوهته أثناء الحفر (أجهزة منع الانفجار) أو أثناء الإنتاج (كشجرة الميلاد ومواسير الإنتاج).

لكن المشاكل التي تتعرض لها مواسير التغليف نتيجة تأثير سوائل الحفر المختلفة، والسوائل الأخرى التي تتواجد عادة في الفراغ الحلقي خلف مواسير التغليف في الأماكن غير المسمنتة تؤدي إلى إنقاص تدريجي لمقاومتها والتقليل من عمرها وعمر البئر.

حيث إن دراسة المشكلة وإمكانية تلافيها سوف توفر في المستقبل أثناء عمليات الإنتاج المختلفة من البئر التقليل من كلفة العمليات الإصلاحية المحتملة على المواسير، وبالتالي سوف تساعد في تقليل كلفة إنتاج المتر المكعب الواحد من النفط المستخرج.

وتتضمن هذه الدراسة الفصول التالية:

الفصل الأول: تغليف الآبار: ويتضمن: مراحل تغليف الآبار، برنامج التغليف، العوامل المؤثرة على برنامج التغليف، المعدات المستخدمة في تغليف الآبار.

الفصل الثاني: الإجهادات التي تتعرض لها مواسير التغليف يتضمن: جهد الشد، الضغط الخارجي، الضغط الداخلي، جهد الانضغاط المحوري، جهد الفتل، تصميم مواسير التغليف.

الفصل الثالث: تآكل مواسير التغليف ويتضمن: تعريف التآكل، الظروف المساعدة لحدوث التآكل، مسببات تآكل مواسير التغليف، أنواع التآكل الذي تتعرض له مواسير التغليف، مواضع تآكل مواسير التغليف داخل البئر، التآكل الميكانيكي، آلية التآكل الميكانيكي، العوامل المؤثرة على التآكل الميكانيكي

الفصل الرابع: اختبارات التآكل: ويتضمن: تصنيف الاختبارات، مراحل دراسة تآكل العينات، طرق الاختبار

الفصل الخامس: دراسة تأثير سوائل الحفر على مواسير التغليف: ويتضمن: هدف البحث، الدراسة المرجعية وتقييم الواقع الحقلي، مواد وطرق البحث.

وفي نهاية هذه الدراسة خلصنا إلى مجموعة من النتائج والمقترحات التي يمكن أن تؤدي إلى تلافي المشاكل الناتجة عن تأثير سوائل الحفر على مواسير التغليف.

الفصل الأول
تغليف الابار
Well Casing

1-1- مقدمة:

إن جميع الآبار التي تحفر لإنتاج النفط والغاز أو لحقن الموائع في الطبقة، يتم تدعيم جدرانها الصخرية بمجموعة من الأنابيب المعدنية اتفق على تسميتها بمواسير التغليف (Casing); حيث يضخ سائل إسمنتي كي يملأ الفراغ الحلقي بين القطر الخارجي لمواسير التغليف وجدران البئر، والذي يتصلب بعد فترة من الزمن كي يؤمن للمواسير متانة وعازلية كافية لتأدية وظائفها الرئيسة في [7]:

- الحفاظ على ثبوتية جدران البئر، أي تؤمن دعم جدران البئر مقابل الطبقات الضعيفة والمتشققة، ومنع تكهف جدران البئر خلال عمليات الحفر.
- عزل الطبقات المسامية التي تحتوي على موائع طبقية ذات خواص فيزيائية مختلفة، وتتواجد ضمن شروط طبقية مختلفة، وينجز ذلك من خلال العمل المشترك لعمليات التغليف والسمنتة.
- منع تلوث الطبقات القريبة من السطح والحاملة للمياه العذبة بسائل الحفر.
- التحكم بضغوط الآبار خلال عمليات الحفر والإنتاج والإصلاح، كما أنها تشكل قاعدة متينة ومحكمة لتثبيت المعدات المختلفة التي تنزل في البئر أو التي تجهز بها فوهته أثناء الحفر (كأجهزة منع الانفجار(BOPs)، أو كشجرة الميلاد ومواسير الإنتاج أثناء الإنتاج.
- تؤمن بئراً بقطر وعمق مناسبين يمكّنا من إنزال أجهزة الاختبار وتجهيزات الإنهاء للآبار.

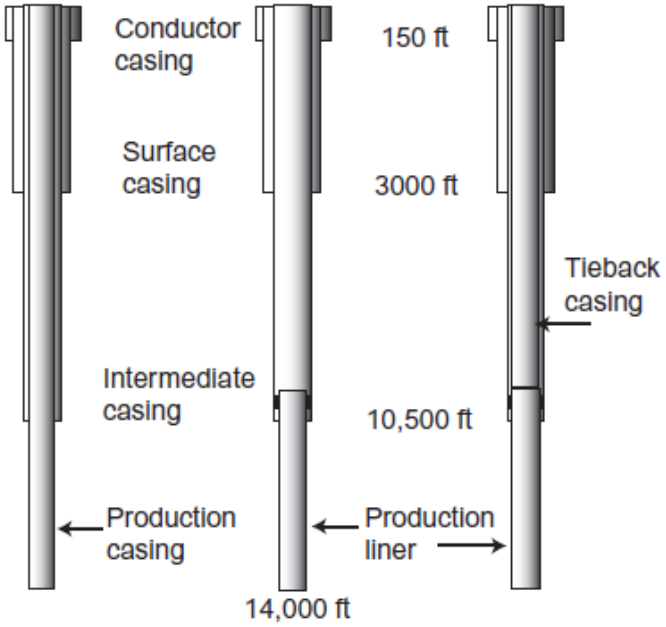
وعملية التغليف هي عبارة عن سلسلة من الإجراءات الضرورية التي يتم بموجبها إنزال مواسير التغليف في البئر حتى عمق محدد، وذلك بشكل يلائم قطر رأس الحفر الذي حفرت به، أي استبدال جدران البئر الصخرية بجدران معدنية أكثر مقاومة.

1 -2- مراحل تغليف البئر (Casing stages) [7]:

في الواقع فإن حفر بئر بقطر واحد من السطح وحتى العمق النهائي للبئر يؤمن إنجاز بئر بأقل كلفة ولكن من جهة أخرى فإن وجود طبقات ذات ضغوط طبقية مختلفة، وعلى أعماق مختلفة بالإضافة إلى وجود طبقات ضعيفة أو طبقات غير متماسكة أو طبقات من الشيل – التي تؤدي إلى تهدم جدران البئر– كل ذلك يتطلب إنزال مواسير لعزل تلك الطبقات التي تؤدي إلى مشاكل كثيرة وكي تسمح للوصول إلى العمق النهائي للبئر يتم حفر البئر على مراحل، حيث يتم حفر مجالات معينة، ثم تنزل مجموعة من مواسير التغليف التي تثبت بالإسمنت، الذي يملأ الفراغ الحلقي بينها وبين جدران البئر بشكل كامل، يتابع الحفر بعد ذلك من خلال هذه المواسير باستخدام رأس حفر جديد ذي قطر أصغر

من السابق، حتى الوصول إلى عمق معين جديد، حيث تنزل مجموعة أخرى من مواسير التغليف، تكرّر العملية بين حفر وتغليف حتى الوصول إلى العمق النهائي المقرر للبئر.

والشكل (1-1) يبين مراحل التغليف العامة لآبار النفط والغاز



الشكل (1-1): مراحل التغليف العامة لآبار النفط والغاز

المسميات على الشكل:

المرحلة الدليلة (Conductor pipe)، المرحلة السطحية (Surface casing)، المرحلة الوسطية (Intermediate casing)، المرحلة الإنتاجية (Production casing)، مواسير التغليف الضائعة (Liner)، مواسير الإطالة (Tieback casing).

1-3- برنامج التغليف لآبار النفط والغاز: يتألف برنامج التغليف من المراحل الآتية[4,8] :

1-3-1- مواسير التغليف الدليلة (Conductor pipe or drive pipe or stove pipe):

يطلق على هذه الماسورة اسم المرحلة الدليلة لأنها تدل على فوهة البئر أي تحفظ فوهة البئر من انجراف التربة السطحية حيث تنجز حفرة مربعة الشكل عند فوهة البئر يتراوح طول ضلعها بين m (1.0 – 0.8) وعمقها بين m (6 – 3) تنزل في الحفرة ماسورة تغليف بقطر كبير (أكبر من أقطار بقية المراحل التي سوف تستعمل أثناء إنجاز البئر) يتراوح بين in 30-20. وإلى عمق يتراوح بين ft 20 إلى عدة مئات من الأقدام [7] ، يرفع رأس هذه الماسورة عن سطح الأرض إلى ارتفاع يحدده نوع جهاز الحفر المستخدم، بحيث تصل إلى مستوى منصة الطاحون و يملأ الفراغ خارج الماسورة بالإسمنت.

تؤدي ماسورة التغليف الدليلة الوظائف الآتية:

1 – توجيه سائل الحفر الصاعد من البئر إلى ارتفاع معين، كي يتمكن من الجريان بشكل حر إلى الخزانات بعد مروره بأجهزة تنظيفه من نواتج الحفر، ومن أجل تحقيق هذه الوظيفة الأساسية لهذه الماسورة يتم تجهيزها بوصلة تصريف جانبية عند طرفها العلوي لخروج السائل عبرها.

2 – حماية الطبقات غير المتماسكة القريبة من السطح من الانهيار نتيجة استمرار دوران سائل الحفر

3– حماية الطبقات الحاوية على المياه العذبة من التلوث بالمواد الكيميائية التي يعالج بها سائل الحفر.

4– تحفظ فوهة البئر والقواعد الإسمنتية التي يثبت عليها جهاز الحفر من التأثر المستمر بسائل الحفر.

1-3-2-مرحلة التغليف السطحية (Surface casing):

تغلف الطبقات السطحية من القشرة الأرضية وإنزالها إلزامي في جميع أنواع الآبار النفطية والغازية وتعتبر مواسير التغليف السطحية هي المرحلة الأولى من حيث الأهمية لأنها تشكل قاعدة لتثبيت أجهزة منع الاندفاع، إن عمق إنزال مواسير التغليف السطحية يتغير بشكل كبير، ويحدد بحيث تنزّل حتماً قبل الوصول إلى أية طبقة خازنة للمركبات الهيدروكربونية (نفط ، غاز)، لأن اختراق هذه الطبقات مع عدم وجود أجهزة منع الاندفاع على فوهة البئر يمكن أن يتسبب بكارثة عند حدوث الاندفاع الذي لا يمكن السيطرة عليه، يتراوح عمق إنزالها من 200 قدم إلى عدة ألاف من الأقدام ,أما قطرها يتراوح بين 20 in – 5/8 9، ويعتمد القطر المختار على عدد مراحل التغليف، حيث أنه كلما زاد عدد مراحل إنجاز البئر كلما كبر قطر مواسير التغليف السطحية، كما يعتمد على نوع البئر إذ تستخدم مواسير تغليف سطحية بقطر كبير في الآبار الاستكشافية.

تؤدي مواسير تغليف المرحلة السطحية الوظائف الآتية:

1 – تشكل قاعدة لتثبيت أجهزة منع الاندفاع على فوهة البئر التي تستخدم للتحكم في البئر أثناء الحفر، وهي الوظيفة الأساسية لهذه المواسير.

2– عزل الطبقات السطحية غير المتماسكة والطبقات التي تؤدي لتهريب سائل الحفر.

3 –حماية الطبقات السطحية الحاملة للمياه العذبة من التلوث بالمواد الكيميائية التي يعالج بها سائل الحفر ومن التلوث بالموائع الطبقية التي تصادف أثناء حفر المراحل التالية، يستخدم الماء العذب لحفر هذه المرحلة من البئر عندما تتواجد طبقات غضارية (من النوع البنتونيتي القابل للتشرد في الماء) ضمن صخور هذه المرحلة، ويكفي ناتج الحفر فيها لرفع لزوجة الماء إلى الحد الذي يمكنه من تأدية وظائفه العامة كسائل حفر (تشكيل ضغط معاكس على جدران البئر، رفع نواتج الحفر إلى السطح، تنظيف قاع البئر من نواتج الحفر ... إلخ)، أما في حال عدم وجود طبقات غضارية ضمن المجال السطحي من البئر فتتم إضافة الغضار إلى الماء على السطح دون أية معالجات أخرى.

4 – تتحمّل ثقل مواسير التغليف للمراحل التالية (الوسطية والإنتاجية) إضافةً إلى ثقل قسم من تجهيزات الإنتاج.

(مواسير الإنتاج، شجرة الميلاد ... إلخ)، لذلك يجب أن تعزل مواسير هذه المرحلة بالإسمنت بشكل كامل (من القاع إلى السطح)، وذلك من أجل زيادة قدرتها على تحمّل الإجهادات.

1-3-3-مرحلة التغليف الوسطية (Intermediate or protective casing):

هذه المرحلة تلي مرحلة التغليف السطحية، وتعرف أيضاً بمواسير الحماية(**protective** casing) ، لأنها تحافظ على ثبوتية جدران البئر وبالتالي تساعد في الوصول إلى العمق النهائي المقرر للبئر، وهذه المرحلة تتطلبها الشروط الجيولوجية فقط وهي التي تحدد العمق الذي تنزل إليه هذه المواسير، بحيث يتم عزل أو إغلاق جميع الطبقات التي تسبب مشاكل وتمنع من استمرار الحفر أو للوصول إلى العمق النهائي للبئر، وعندما تكون شروط الحفر معقدة، تستخدم أكثر من مرحلة وسطية، قد تصل إلى ثلاث مراحل (مرحلة وسطية أول، مرحلة وسطية ثانية، مرحلة وسطية ثالثة)، ونادراً ما تستخدم أربع مراحل وسطية، يتراوح قطر (أو أقطار) مواسير التغليف الوسطية بين in 3/8 13 – 7

وفيما يلي نذكر بعض الوظائف التي تؤمنها مواسير التغليف الوسطية:

1- عزل الطبقات الاسفلتية (وتبعاً لدرجة خطورتها) والتي تتطلب استخدام سائل حفر ذو وزن نوعي مرتفع خاصةً إذا كانت الطبقات التي تليها تتطلب استخدام سائل حفر بوزن نوعي قليل.

2- عزل الطبقات أو المجالات ذات النفوذية المرتفعة والمتشققة، والتي تؤدي إلى تهريب شديد لسائل الحفر، خاصةً إذا كانت الطبقات التي تليها تتطلب استخدام سائل حفر بوزن نوعي مرتفع (تحوي موائع تحت ضغط مرتفع، طبقات قابلة للانهيار، طبقات إسفلتية).

3-عزل الطبقات الحاوية على موائع واقعة تحت ضغط مرتفع (ماء مالح، غاز) وتمنع دخولها إلى البئر، الأمر الذي يؤدي في حال حدوثه إلى تغيير كبير في خواص سائل الحفر، ويزيد من احتمال حدوث صعوبات أخرى جديدة داخل البئر (تهدم جدران البئر، اندفاع الغازات، استعصاء مجموعة مواسير الحفر ... إلخ).

4 -عزل الطبقات التي تتأثر بشدة بسائل الحفر (طبقات ملحية، طبقات غضارية ...إلخ)

1-3-4- مرحلة التغليف الإنتاجية (Production casing):

تعتبر مواسير التغليف الإنتاجية المجموعة الثانية من حيث الأهمية وتكمن أهميتها في أنه من خلالها يتم استثمار محتويات الطبقات التي تشكل الهدف النهائي للبئر. يتراوح قطر مواسير الإنتاجية (قطر البئر في هندسة الإنتاج) بين in 7 – ½ 4.

يتم اختيار قطر مواسير التغليف للمرحلة الإنتاجية (وهو الأساس في تصميم برنامج التغليف) اعتماداً على:

- الإنتاجية المتوقعة من البئر.
- نوع المكمن (نفط أو غاز).
- طرق الإنتاج المحتمل اعتمادها أثناء استثمار محتويات المكمن.

- عدد مراحل التغليف وعمق البئر.

تقوم مواسير التغليف للمرحلة الإنتاجية بالوظائف الآتية:

1 – تشكل قناة لنقل الموائع الطبقية من الطبقة حتى السطح، لأن معظم عمليات الإنتاج تتم من خلال مواسير الإنتاج التي تنزل داخل مواسير التغليف الإنتاجية.

2 – تمكّن من الاستثمار المنفصل للمجالات الخازنة للموائع الطبقية بطريقة مثالية، من خلال وصل البئر داخل مواسير التغليف الإنتاجية مع هذه المجالات فقط من خلال التثقيب.

3–تمكّن من إجراء عمليات تحسين (التحميض، التشقيق الهيدروليكي.. إلخ) لنفوذية المناطق المجاورة للآبار وذلك لزيادة معدل تدفق النفط أو الغاز منها باتجاه البئر.

4 – تمكّن من مراقبة الضغط والتحكم به داخل البئر أثناء إنتاج الموائع الطبقية وكذلك تمكّن من حقن الموائع في الطبقة (ماء أو غاز) لزيادة ضغطها أو للمحافظة عليه عند قيم ثابتة .

ويمكن الاستغناء عن مواسير التغليف الإنتاجية في الآبار الاستكشافية في حال التأكد من عدم وجود النفط أو الغاز ضمن المجال المستهدف للحفر.

1-3-5- مواسير التغليف الضائعة (Liner Casing)[7]:

تسمّى مواسير التغليف بعمود كامل (Full casing) عندما تنزل من السطح وحتى قاع البئر، أما عندما تستخدم مواسير تغليف بطول أقل من عمق البئر فتسمى مواسير التغليف الضائعة (عدم إمكانية استعادة أي جزء منها بعد تثبيتها في البئر)، حيث يتم تعليقها داخل مواسير التغليف السابقة (على ارتفاع – 50 150 m من نهايتها السفلى) وذلك باستخدام أجهزة تعليق المواسير الضائعة (liner hanger)

تستخدم مواسير التغليف بعمود كامل في المراحل السطحية من الآبار باستمرار، أما في المراحل الأخرى (الوسطية والإنتاجية) فيمكن استخدام هذا النوع، كما يمكن استخدام مواسير تغليف ضائعة.

تتميز مواسير التغليف الضائعة بعدة محاسن:

1- كلفتها القليلة، قياساً مع المواسير الكاملة.

2- تنزل بواسطة مواسير الحفر وبالتالي فإن زمن إنزال مواسير التغليف وكذلك زمن عملية السمنتة يكون قليل.

إلا أن استخدامها يترافق ببعض العيوب:

1- صعوبة تعليقها داخل المواسير السابقة.

2- إمكانية حدوث تسرب للموائع عبر جهاز تعليق المواسير الضائعة.

3- صعوبة الحصول على سمنتة أولية جيدة، وذلك بسبب الفراغ الحلقي الصغير بين مواسير التغليف الضائعة وجدران البئر.

4- تعريض مواسير التغليف التي سبقتها لإجهادات إضافية (نتيجة متابعة عمل مجموعة مواسير الحفر خلالها أو لضغط داخلي أثناء الإنتاج من طبقات ذات ضغوط مرتفعة)، غير مصمَّمة لتحمّلها لم تؤخذ في الاعتبار أثناء التصميم.

يمكن التقليل من عيوب مواسير التغليف الضائعة، خصوصاً تلك الناتجة عن تعرّض مواسير التغليف للمرحلة السابقة لإجهادات إضافية، وذلك بإطالتها لاحقاً حيث تستعمل مواسير بنفس قطر مواسير التغليف الضائعة المثبّتة بالإسمنت أو أكبر قليلاً، وبطول يساوي عمق البئر من رأس المواسير الضائعة حتى السطح تسمّى هذه المواسير بمواسير الإطالة (tie-back liner) وهي مواسير يمكن استعادتها بعد الانتهاء من استغلال البئر.

1-4- برنامج التغليف (Casing program):

يتضمن برنامج التغليف النقطتين الأولى والثانية من برنامج بناء البئر، أي عدد مراحل التغليف، وعمق كل منها، وقطر مواسير التغليف، وأقطار رؤوس الحفر لكل مرحلة من مراحل التغليف.

1-4-1- العوامل المؤثرة على برنامج التغليف [8]:

إن تحديد برنامج التغليف المثالي يتطلب معرفة كاملة بالعوامل المؤثرة عليه، وكيفية هذا التأثير. وهذه العوامل هي الآتية:

- ✓ **العوامل الجيولوجية (Geological factors):**

تشمل العوامل الجيولوجية معرفة طبيعة الصخور المتوقع اختراقها، ودرجة ثبوتيتها بعد الحفر، ومدى تأثرها بسوائل الحفر التي يمكن استعمالها، وتشترط العوامل الجيولوجية إنزال مواسير التغليف لعزل المجالات التي تعتبر مصدراً للمشاكل أثناء الحفر (تسرب سائل الحفر في الطبقة، تهدم الطبقات، اندفاع المركبات الهيدروكربونية... إلخ). كما تحدد العمق الذي يجب أن تنزل إليه (بعد اختراق الطبقة المسببة للمشكلة حتماً) ولا يجوز اعتماد هذه العوامل فقط لتحديد برنامج التغليف، بل يجب دراسة كافة الإمكانيات الفنية والتقنية المتوفرة، التي تسمح بمتابعة الحفر مع السيطرة على الصعوبات التي تسببها تلك المجالات دون الحاجة لإنزال مواسير التغليف، وذلك باستخدام سائل الحفر الفعال ذي التأثير القليل على الطبقات، وذي الخواص المناسبة لتلك المجالات الخطرة من وجهة نظر مهندس الحفر (سوائل حفر خاصة، سوائل حفر ممنعة . . . إلخ).

- ✓ **العوامل الفنية (Technical factors):**

تختص العوامل الفنية بدراسة الإمكانيات المادية المتوفرة عند تنفيذ حفر البئر، وهي تحدد المعادن المناسبة لإنجاز عملية التغليف، وضرورة توفر مجموعات كبيرة من المواسير بأقطار خارجية وسماكات جدار مختلفة، وبنوعيات مناسبة لمناطق الوصل (الشرار) القادرة على العزل المحكم وتحمّل الإجهادات التي ستتعرض لها – وذلك تبعاً لعمق البئر – إضافةً إلى توفّر الأجهزة السطحية التي يمكنها إنزال الأوزان الكبيرة عند التغليف، والمواد الكيميائية اللازمة لمعالجة سائل الحفر، وجعله يتمتع بخواص ملائمة

لبعض المجالات. كما تشمل العوامل الفنية توفر الأجهزة التي سوف تستخدم أثناء الإنتاج بمراحله المختلفة (الإنتاج الذاتي، الرفع الغازي، الإنتاج بالضخ ... إلخ) مثل المصافي التي تنزل في البئر، وفواصل الغازات عن النفط عند قاع البئر، صمامات التشغيل بأنواعها، مواسير الإنتاج، قضبان الضخ، المضخات الجوفية ... إلخ، حيث يجب أن يسمح برنامج التغليف بتطبيق مختلف طرق الإنتاج، من أجل استثمار كامل مخزون المكامن النفطية والغازية.

✓ **العوامل التقنية (Technological factors):**

تدرس هذه العوامل الإمكانيات المتوفرة، التي تسمح بالحفر إلى أعماق كبيرة دون الحاجة إلى التغليف، إن توفر إمكانية تطبيق التقنيات المتطورة مع الخبرة المناسبة تسمح بالتقليل من عدد مراحل التغليف، والإسراع بإنجاز البئر، ومن المعلوم أن استخدام سوائل الحفر الفعالة تزيد من ثبوتية جدران البئر لفترة معينة تتناسب وطبيعتها، لذلك يجب البحث باستمرار عن طرق حفر جديدة (تقنيات جديدة) تسمح بزيادة سرعة الحفر، والتقليل من عدد مراحل التغليف.

✓ **العوامل الاقتصادية (Economic factors):**

تهدف العوامل الاقتصادية إلى تأمين برنامج تغليف جيد من وجهة نظر فنية، وبأقل تكاليف ممكنة. تقسم العوامل الاقتصادية التي يجب أن تؤخذ بالاعتبار عند وضع برنامج التغليف إلى مجموعتين: مجموعة تتبع لكلفة مواسير التغليف، والأخرى لطريقة التغليف المطبقة، تشكّل كلفة التغليف نسبة كبيرة من الكلفة الإجمالية لحفر البئر(15-20%) أثناء الحفر في شروط جيولوجية بسيطة، وتزداد هذه النسبة مع ازدياد تعقيد شروط الحفر، وقد تصل إلى 50% .

فيما يتعلق بكلفة مواسير التغليف، فإن هذه الكلفة تتعلق بقطر هذه المواسير، حيث تزداد بزيادة هذا القطر، وبالتالي فإنه يجب استعمال أصغر قطر لمواسير التغليف يؤدي إلى الحصول على بئر ناجحة.

1-5-المعدات المستخدمة في تغليف الآبار

Casing Equipment

تستخدم أثناء عمليات تغليف الآبار النفطية والغازية المعدات الآتية [5,8] :

1-5-1- مواسير التغليف (Casing Pipes):

تعتبر مواسير التغليف الجزء البنائي الرئيسي للآبار وهي عبارة عن أنابيب أسطوانية الشكل، تصنع من الفولاذ بنوعيات مختلفة، والقياس المميز لهذه المواسير هو قطرها الخارجي حيث تعرف مواسير التغليف بقطرها الخارجي عند الجسم، تستخدم في تغليف آبار النفط والغاز مواسير بأقطار متعددة تتراوح بين 4 ½- 20 in ويضم كل قطر خارجي عدة سماكات جدار, أي أنه يقابل كل قطر خارجي عدة أقطار داخلية.

1-5-1-1- تصنيف مواسير التغليف (Classification of casing):

➢ **تصنيف مواسير التغليف وفقاً لطريقة تصنيعها:The Manner of Manufacturing**

وفقاً لطريقة تصنيع المواسير فإنها تصنف إلى نوعين رئيسيين[5] :

1- مواسير تغليف غير ملحومة (,Seamless casing):

وهي الأكثر استعمالاً في تغليف آبار النفط والغاز، ومن ميزات (Advantages) مواسير التغليف غير الملحومة عدم تغير فيي الخواص الفيزيائية للمادة أما من سلبيات (Disadvantages) هذه المواسير:

- أكثر كلفة وأكثر صعوبة في عمليات التصنيع
- لا يمكن الحصول على سماكة جدار منتظمة لمواسير التغليف.

2- مواسير تغليف ملحومة (Welded casing):

وهي أقل استعمالاً في تغليف آبار النفط والغاز من سابقتها، ومن مزاياها:

- ❖ تتميز مواسير التغليف الملحومة بكلفتها القليلة مقارنةً مع مواسير التغليف غير الملحومة، وذلك بسبب قلة الهدر في المعدن
- ❖ سهولة في عمليات التصنيع
- ❖ يمكن الحصول على سماكة جدار منتظمة لمواسير التغليف.

أما من سلبيات استخدامها:

- ❖ نتيجة درجات الحرارة العالية التي تتطلبها عملية اللحام فإن هناك امكانية تغير في الخواص الفيزيائية للمادة
- ❖ امكانية فشل عملية اللحام، ولذلك لا يمكن استخدامها في تغليف الآبار العميقة ذات الشروط الطبقية العالية.

➢ **تصنيف مواسير التغليف تبعاً لنوع الخليطة المعدنية المستخدمة: (Steel Grade)**

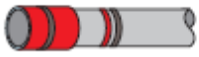
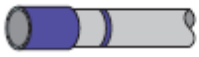
نبين في الجدول (2-1) أنواع الخلائط المستخدمة وخواصها وذلك وفقاً للنموذج الأمريكي (API).

نوع الخليطة	مقاومة الخضوع				جهد الشد الأصغري	
	الصغرى		العظمى			
	Ksi	Mpa	Ksi	MPa	Ksi	Mpa
K-55	55	379	80	552	95	655
M-65	65	448	85	586	85	586
N-80	80	552	110	758	100	689

L–80	80	552	95	655	95	655
C–90	90	621	105	724	100	689
C–95	95	655	110	758	105	724
T–95	95	655	110	758	105	724
P–110	110	758	140	965	125	862
Q–125	125	862	150	1034	135	931

الجدول (2–1) أنواع الخلائط المستخدمة وخواصها وذلك وفقاً للنموذج الأمريكي (API)

عملياً يمكن تمييز مواسير التغليف من خلال رموز اصطلاحية الجدول (2–2) تكون على شكل خطوط ملونة تطلى بها مواسير التغليف أو نقاط الوصل [5]

Grade	Color Coating on Couping	Color Band on Couping	Color Band on Pipe Body	
H-40	Black	-	-	
J-55	Green	Letter "J" (Yellow)	One Green band	
K-55	Green	-	Two Green bands	
N-80	Red	-	One Red band	
L-80	Red	One Brown band	One Red band and One Brown band	
L80-CR9	Red	Two Yellow bands	One Red band, One Brown band and Two Yellow bands	
L80-CR13	Red	One Yellow band	One Red band, One Brown band and OneYellow bands	
C-90	Purple	-	One Purple band	
C-95	Brown	-	One Brown band	
T-95	Silver	-	One Silver band	
P-110	White	-	One White band	
Q-125	Orange	-	One Orange band	

الجدول (2–2) طرق تمييز مواسير التغليف

➢ **تصنيف مواسير التغليف تبعا لطريقة الوصل ونوع نقاط الوصل**

تبعاً لطريقة وصل مواسير التغليف مع بعضها فإنه يمكن أن يتم الوصل بواسطة الشرار أو بطريقة اللحام وتعتبر طريقة الوصل بالشرار الأكثر استخداماً في تغليف آبار النفط والغاز، وهي تطبق بدورها بعدة أشكال نذكر بعضاً منها:

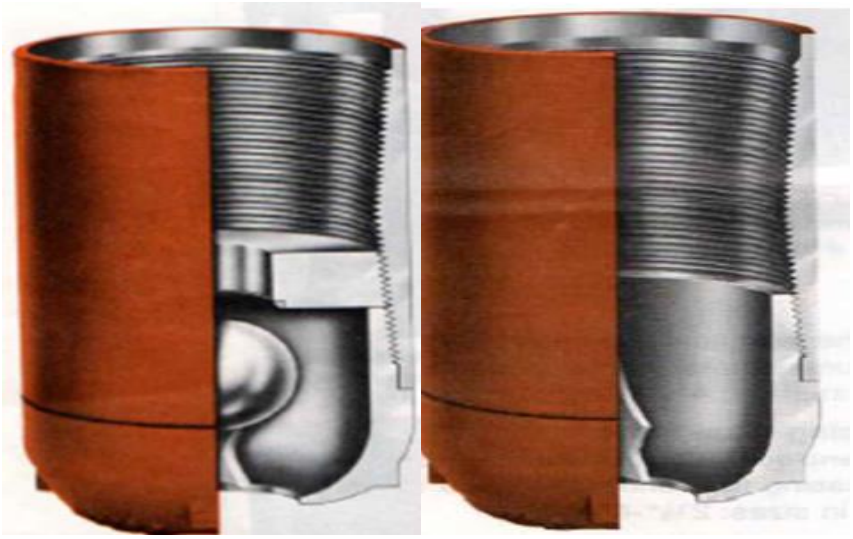
1- مواسير تغليف معايرة: هي تلك المواسير التي يجهز أحد رأسيها بشرار من الداخل، أما الرأس الآخر فيجهز بشرار من الخارج، حيث يتم وصل المواسير مع بعضها مباشرةً دون الحاجة إلى وصلة منفصلة، يتميز عمود مواسير التغليف عند استخدام هذا النوع بقطر خارجي ثابت على كامل طوله، بما في ذلك مناطق الوصل، العيب الرئيسي لهذا النوع من المواسير هو المقاومة الضعيفة لجهد الشد، ولا سيما في مناطق وصل المواسير، لذلك فهي تستخدم في تغليف أعماق قليلة (كمواسير ضائعة بشكل أساسي) وكذلك عندما نضطر لاعتماد برنامج تغليف بأقطار متقاربة، بسبب كثرة المراحل.

2- مواسير تغليف بوصلة منفصلة: تتميز المواسير في هذه الحالة بأن قطرها الداخلي ثابت، لها نفس الشرار من الطرفين وفي هذه الحالة نحتاج لوصلة قد تكون ذات شرار داخلي (internally thread، Box) أو خارجي (externally thread, Pin)

3- مواسير تغليف ذات نهايات مغلطة (External- internal upset ends) حيث يجهز أحد طرفي رأس الماسورة ذات النهاية المغلظة بشرار خارجي والرأس الأخر بشرار داخلي وتوصل مباشرة وهي الأفضل من حيث الإنزال والرفع ومن ناحية مقاومة الإجهادات عند نقاط الوصل.

1-5-2-حذاء مواسير التغليف (Casing shoe):

وهو عبارة عن وصلة صغيرة من المعدن تركب في الجزء السفلي من مواسير التغليف قطرها يساوي قطر مواسير التغليف نفسها وبسماكة جدار تتراوح من 0.6-1in تتميز هذه الوصلة بنهايتها الكروية وتسمى حذاء التوجيه (Guide Shoes) والذي يصنع من الإسمنت لسهولة طحنه أثناء متابعة الحفر خلال المواسير ويؤمن حذاء التوجيه توجيه أو تأمين إنزال مواسير التغليف في البئر دون أن تصطدم بشكل حاد مع جدران البئر أو مع السطح الداخلي لمواسير التغليف للمرحلة السابقة، يستخدم نوعان من أحذية التوجيه أحدهما بسيط والثاني مركب الذي يحتوي على صمام كروي أو قلابي وفي هذه الحالة يدعى الحذاء العائم Float shoe حيث يستخدم لمنع السائل الإسمنتي من العودة إلى داخل مواسير التغليف بعد إزاحته إلى الفراغ الحلقي خلف مواسير التغليف، كما يمنع دخول سائل الحفر أو السوائل الأخرى الموجودة في البئر إلى داخل المواسير عند إنزالها في البئر وفي الشكل (1-2) نبين أنواع أحذية مواسير التغليف

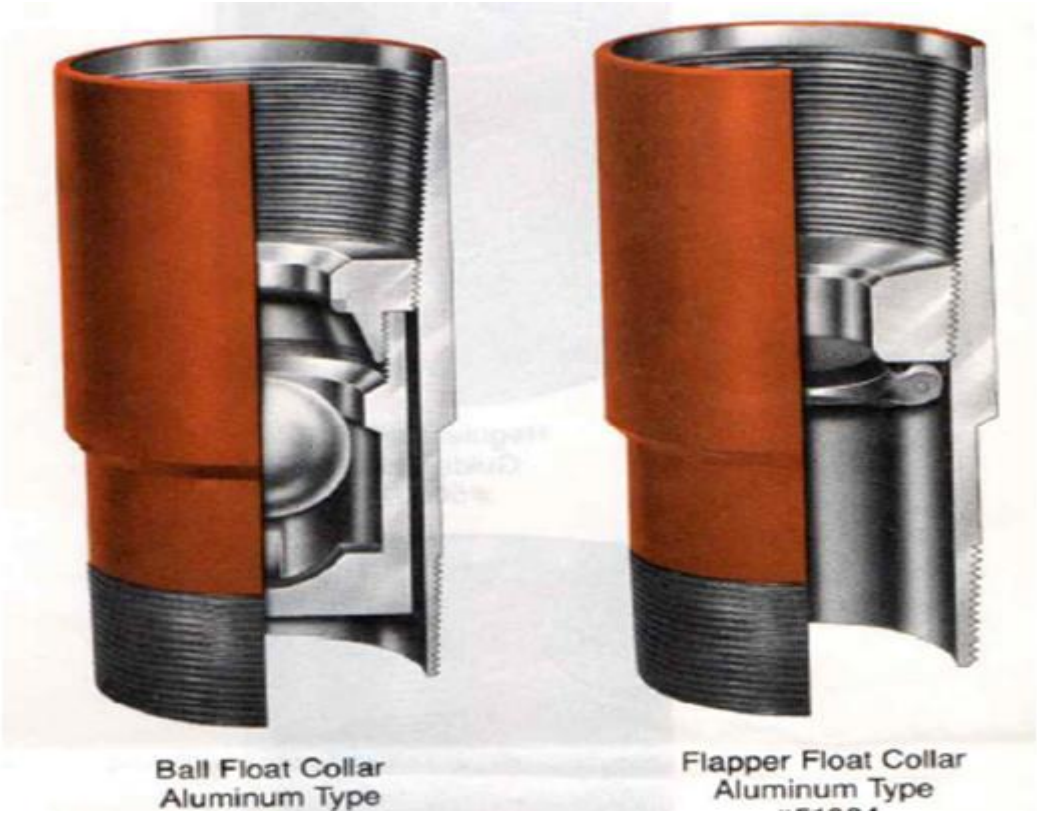


ب- حذاء مركب أ-حذاء بسيط

الشكل (1-2) أنواع احذية مواسير التغليف

1-5-3-حلقة الصد (Float collars):

وهي حلقة سماكتها بضع ميليمترات، تصنع من (الألمنيوم، حديد الزهر) وذلك لسهولة طحنها أثناء متابعة الحفر من خلالها، توضع داخل وصلة والتي بدورها توضع على بعد (10-30m) عن حذاء مواسير التغليف (توضع على بعد ماسورة تغليف واحدة أو اثنتين أو ثلاث مواسير ونادراً أربع مواسير) تزود الوصلة بصمام (كروي أو قلابي) وحيد الاتجاه (valve one way) متحولة إلى وصلة عائمة لمواسير التغليف (تسمى حلقة الصد المركبة) وتؤمن حلقة الصد المركبة نفس الوظائف التي يؤمنها حذاء التوجيه العائم، بالإضافة إلى وظيفتها الأساسية وهي إيقاف أو صد الفواصل الإسمنتية التي تفصل بين السائل الإسمنتي الذي يضخ داخل المواسير وسائل الحفر الموجود قبل البدء بعملية السمنتة من جهة وبين السائل الإسمنتي وسائل الإزاحة على ارتفاع معين عن حذاء مواسير التغليف والتي تحافظ على كمية الإسمنت الملوثة (نتيجة اختلاطها مع سائل الإزاحة) المتبقية داخل مواسير التغليف، لأن إزاحتها خارج المواسير سوف يعطي حجر اسمنتي ضعيف التماسك وغير كتيم (مقاومة ضعيفة ونفوذية كبيرة وبذلك يفقد الخصائص الأساسية المطلوبة منه) وفي الشكل (1-3) نبين أنواع حلقات الصد المستخدمة أثناء عملية السمنتة.



الشكل (1-3) أنواع حلقات الصد المستخدمة أثناء عملية السمنتة.

1-5-4-منظفات القشرة الطينية أو الخادشات (Scratchers)

كما هو معروف فإن إحدى وظائف سائل الحفر هي بناء جدار البئر من خلال تشكيل كعكة الحفر على جدران البئر ولكن من جهة أخرى فإن هذه الكعكة تمنع التصاق السائل الإسمنتي مع جدار البئر، الأمر الذي يؤدي إلى عملية سمنتة ذات نوعية سيئة، لذلك لا بد من نزع القشرة الطينية وإعطاء فرصة للسائل الإسمنتي أن يلتصق مع جدران البئر.

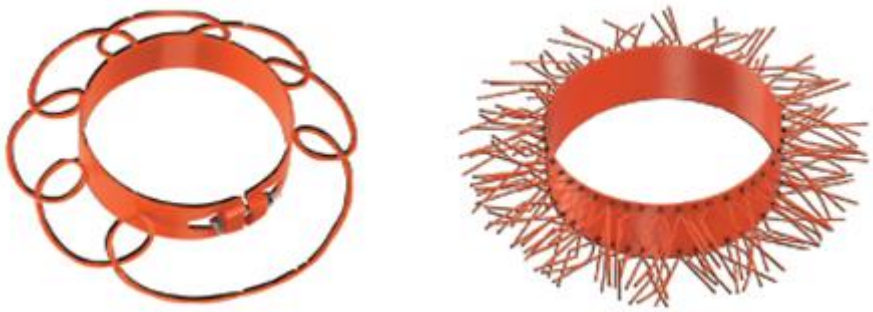
الخادشات هي أداة تثبت على القطر الخارجي لمواسير التغليف من خلال أطواق أو حلقات التوقف (Stop collars OR Stop ring) بأعداد تتعلق بظروف البئر، تستخدم المنظفات لإبعاد القشرة الطينية عن جدران البئر (كعكة سائل الحفر) قبل ضخ السائل الإسمنتي، وذلك من أجل تأمين الالتصاق المباشر بين الإسمنت والصخر المشكّل للجدران (تأمين العزل الجيد للطبقات المخترقة عن بعضها). كما يؤدي استخدام المنظفات إلى اضطراب السائل الإسمنتي في الفراغ الحلقي (تأمين جريان مضطرب)، والذي يرفع من درجة إزاحة سائل الحفر من قبل السائل الإسمنتي، والحصول على عملية إسمنتية ناجحة تصنّع منظفات القشرة الطينية بأشكال مختلفة، ويمكن تصنيفها حسب طريقة تشغيلها إلى النوعين الآتيين:

آ- **منظفات عمودية أو دورانية (Rotating scratchers):** وهي تعمل على نزع كعكة سائل الحفر عن جدران البئر بتدوير مواسير التغليف، لذلك فهي توضع على كامل طول المجال المقرر عزله بالإسمنت.

ب- منظفات أفقية أو ترددية (Reciprocating scratchers): وتعمل برفع وإنزال مواسير التغليف من أجل نزع الكعكة، لذلك فهي توضع في مناطق محددة، وعلى مسافات متساوية ضمن المجال الذي سيعزل بالإسمنت.

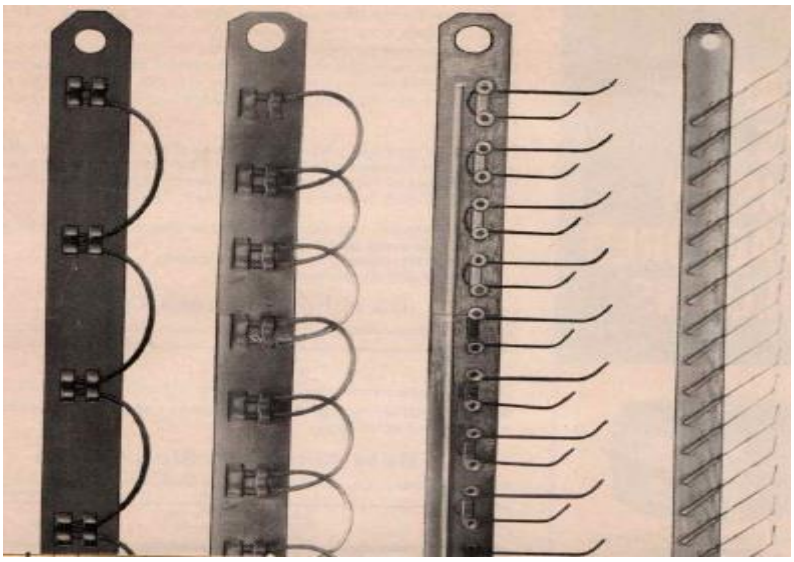
لا يمكن استعمال منظفات كعكة الحفر دون وجود ممركزات لمواسير التغليف، كما لا يجوز وضعها في مناطق الانحراف، أو تلك التي ازداد فيها قطر البئر.

وفي الشكل (1-4) والشكل (1-5) نبين أنواع المنطفات الأفقية والمنطفات العمودية.



منظف أفقي بريش منظف أفقي ذو حلقات.

الشكل (1-4) أنواع المنطفات الأفقية



الشكل (1-5) أنواع المنظفات العمودية.

1-5-5-ممركزات مواسير التغليف (Casing centralizers)

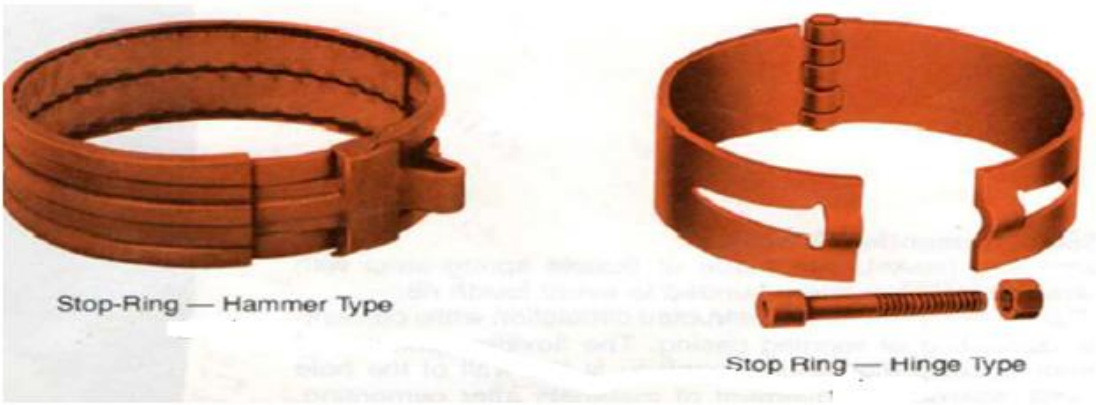
الممركزات هي أداة (Device) تثبت على القطر الخارجي لمواسير التغليف من خلال أطواق أو حلقات التوقف (الشكل 1-6) وعلى كامل المجال الذي يسمنت وذلك بهدف مركزة مواسير التغليف مع محور البئر، بهدف الحصول على حجر إسمنتي بسماكة متجانسة، حيث أن عدم مركزة مواسير التغليف يؤدي إلى:

1–استناد مواسير التغليف على جدران البئر بأطوال كبيرة نسبياً وينتج عن ذلك ابتعاد السائل الإسمنتي عن طريق مناطق الاستناد، وبالتالي تبقى هذه المناطق غير مسمنتة.

2–احتمال استعصاء مواسير التغليف بسبب فرق الضغط بين عمود سائل الحفر في البئر وضغط المائع في الطبقة، وبشكل خاص عند الاضطرار للتوقف عن متابعة التغليف لفترة طويلة.

3– عدم التمكن من إبعاد القشرة الطينية المتوضعة على جدران البئر في منطقة الاستناد وبالتالي ضعف الترابط بين الحجر الإسمنتي وجدران البئر، يختلف عدد الممركزات التي يجب استخدامها تبعاً لدرجة ميل البئر وطول المجال الذي يجب سمنتته.

ونبين في الشكل (1–7) بعض أنواع الممركزات المستخدمة في مركزة مواسير التغليف.



الشكل (1–6) أطواق أو حلقات التوقف



الشكل (1–7) ممركزات مواسير التغليف

الفصل الثاني

الإجهادات التي تتعرض لها مواسير التغليف

Stresses which casing pipes exposed to

تتعرّض مواسير التغليف منذ لحظة إنزالها في البئر وحتى الانتهاء من استثمار محتويات المكمن النفطي أو الغازي لمجموعة من الإجهادات التي تؤثّر بشكل منفصل أو موحّد وتتميّز الإجهادات التي تتعرض لها مواسير التغليف بأنها ذات طابع سكوني في معظمها (لها قيم ثابتة)، إلاّ في حالات خاصة، حيث تأخذ صفة الديناميكية (التغيّر).

2-1-الإجهادات الرئيسية التي تتعرض لها مواسير التغليف هي الآتية [8]:

1 – جهد الشد.

2 – الضغط الخارجي.

3 – الضغط الداخلي.

إضافةً إلى هذه الإجهادات الرئيسية فإن مواسير التغليف تتعرّض لإجهادات أقل أهمية هي الآتية:

- جهد الانضغاط المحوري
- جهد الانحناء بتأثير القوى المحورية أو انحناء البئر.
- جهد الفتل عند تدويرها لسببٍ ما أثناء الإنزال، أو عند استعمال منظفات عمودية للقشرة الطينية على جدران البئر.
- التآكل الميكانيكي بفعل الحبيبات الصلبة الموجودة في سائل الحفر.
- التآكل الكيميائي.

2-1-1 جهد الشد (Tension or tensile stress):

تتعرّض مواسير التغليف لجهد الشد بصورة دائمة منذ لحظة البدء بإنزالها في البئر، وينشأ هذا الجهد عن قوى مختلفة:

✓**قوة الشد الناتجة عن وزن مجموعة مواسير التغليف:**

والتي تعطى بالعلاقة :

$$F_w = W_{csg} = \sum_{i=1}^{n} L_i \,.\, q_i \qquad (1-2)$$

عند استخدام مواسير تغليف بسماكات جدار مختلفة يتم حساب وزن كل قسم بمفرده، حيث يتميز القسم بسماكة جدار واحدة، ثم تجمع أوزان الأقسام، فنحصل على قوة الشد على النحو الآتي:

حيث إن:

L_i , q_i i– طول ووزن واحدة الطول للمواسير في القسم i المتغيّر.

إذا أخذنا في الاعتبار أن مواسير التغليف مغمورة في سائل الحفر الذي يملأ البئر، عندئذٍ فإن قوة الشد يجب أن تصحّح بقيمة معامل الطفو، التي تتبع للوزن النوعي لسائل الحفر الجدول (3−1)

يجب التنبيه إلى ضرورة إهمال عامل الطفو في الآبار الاستكشافية، لأنه لا يمكن التأكد من بقاء المواسير مغمورة في السائل (يؤخذ في الاعتبار احتمال حدوث تسرب شديد لسائل الحفر في الطبقات غير المدروسة جيداً).

تتعرض مواسير التغليف لقوة شد إضافية أثناء إنزالها في البئر، والتي تنتج عن تسارعها واحتكاكها مع جدران البئر.

✓ تسارع مواسير التغليف والتي تعطى بالعلاقة:

$$F_a = \mathrm{W_{csg}} \ \frac{a}{g} \qquad (2-2)$$

✓ قوة احتكاك المواسير مع جدران البئر تعاكس الحركة (فهي سالبة في حالة الإنزال وموجبة أثناء الرفع) وتحسب بالعلاقة الآتية:

$$F_{fr} = \mathrm{W_{csg}}.\mu_f \qquad (3-2)$$

حيث إن:

F_w : قوة الشد الناتجة عن ثقل مواسير التغليف

$\mathrm{W_{csg}}$– الوزن الكلي لمجموعة مواسير التغليف.

$L_i \, . \, q_i$– طول ووزن واحدة الطول للمواسير في القسمi

a ـ تسارع مواسير التغليف أثناء الرفع أو أثناء الإنزال.

μ_f– معامل احتكاك مواسير التغليف مع جدران البئر.

g – تسارع الجاذبية الأرضية.

وبالتالي فإن قوة الشد الكلية التي يتعرض لها الجزء العلوي من مواسير التغليف تعطى في مثل هذه الحالات بالعلاقة الآتية:

$$F_T = W_{csg}\left(1 + \frac{a}{g} \pm \mu_f\right) \qquad (4-2)$$

2- قوى الشد الناتجة عن الضغط الداخلي:

تتعرض مواسير التغليف لقوة شد ثانوية المتولدة عن ارتفاع الضغط الداخلي بسبب الاستمرار بضخ سائل الإزاحة بعد توضع الفاصل الإسمنتي الثاني على حلقة الصد

وهنا يوجد لدينا حالتان:

1 – مواسير التغليف ذات سماكة جدار كبيرة ($\frac{D}{t}\langle 14$):

وتتوافق مع شروط استخدام علاقة لامي (Lame)، عندئذٍ فإن جهد الشد المماسي المحوري يعطى بالعلاقة الآتية:

$$\sigma_s = \frac{{d_i}^2}{{D_e}^2 - {d_i}^2} . P_i \qquad (5-2)$$

di¸De – القطر الخارجي والقطر الداخلي على التوالي لمواسير التغليف.

وبالتالي تصبح قوة الشد:

$$F_{tc} = \frac{{d_i}^2}{{D_e}^2 - {d_i}^2} . P_i \, . A_P \qquad (6-2)$$

مساحة المقطع العرضي للمواسير (A_b) تحسب على الشكل الآتي:

$$A_P = \frac{\pi}{4}\left({D_e}^2 - {d_i}^2\right) \qquad (7-2)$$

وتكون قوة الشد الثانوية التي تنشأ في نهاية عملية السمنتة بسبب استمرار ضخ سائل الإزاحة:

$$F_{tc} = \frac{\pi}{4} . {d_i}^2 . P_I \qquad (8-2)$$

2 – مواسير التغليف ذات سماكة جدار صغيرة ($\frac{D}{t}\rangle 14$):

قيمة جهد الشد المماسي المحوري تعطى بالعلاقة الآتية:

$$\sigma_s = \frac{D_e}{4t} . P_i \qquad (9-2)$$

t – سماكة جدار مواسير التغليف

بتعويض كل من مساحة المقطع العرضي للمواسير (A_b) وجهد الشد المماسي:

$$F_{tc} = \frac{D_e}{4t} . P_i . \; A_p = \frac{D_e}{4t} . P_i . \frac{\pi}{4} ({D_e}^2 - {d_i}^2) .$$

$$F_{tc} = \frac{\pi}{4} D_e (D_e - t) . \; P_i$$

3– قوى الشد الإضافية الناتجة عن انحناء البئر:

تتعرّض مواسير التغليف لقوة شد إضافية نتيجة الانحناء وخصوصاً في مناطق تغيّر زاوية الميل وزاوية السمت، وتزداد قيمة الانحناء مع ازدياد زاوية الميل، لتعيين قوة الشد الإضافية المتسببة عن الانحناء يمكن استخدام العلاقة الآتية:

$$F_b = \sigma_b \, A_P = \frac{E . D_e}{2R} \, . A_P \qquad (11-2)$$

$-\sigma_b$ جهد الإنحناء

R – نصف قطر انحناء البئر.

D_e– القطر الخارجي عند الجسم لمواسير التغليف.

E – معامل مرونة الخليطة المعدنية المصنوعة منها المواسير

إن نصف قطر انحناء البئر يعطى بالعلاقة التالية :

$$R = \frac{L}{\alpha} . \frac{180}{\pi} \qquad (12-2)$$

وبالتالي فإن قوة الشد الإضافية المتسببة عن الانحناء تعطى بالعلاقة الآتية:

$$F_b = \frac{E . D_e}{2} . \frac{\alpha}{L} . \frac{\pi}{180} . A_P \qquad (13-2)$$

حيث إن:

$\frac{\alpha}{L}$: شدة الانحراف (dogleg severity ،degrees / m)

α – زاوية انحراف البئر عن الوضع الشاقولي (تؤخذ الزاوية الأكبر ضمن المجال الذي سيغلّف).

L – طول المجال الذي تتغيّر خلاله زاوية الميل.

4- – قوة الشد الإضافية الناتجة عن تغير درجة الحرارة:

تتعرض مواسير التغليف المثبتة من طرفيها للتقلص عند تناقص درجة الحرارة في البئر (عند ضخ سائل مبرّد لتحقيق هدف معين)، أي أن الجزء الحر (غير المسمنت) سوف يتعرّض لقوة شد ثانوية (يجب التنويه إلى أنه عند ارتفاع درجة الحرارة فإن المواسير تتعرض للتمدد، الذي يسبب ظهور قوى انضغاط محورية عند طرفي الجزء الحر).

يمكن تحديد تغيّر طول مواسير التغليف أثناء التقلص أو التمدد بالعلاقة:

$$\Delta L = \pm \alpha \, L \, \Delta \, t \qquad (14-2)$$

حيث إن:

ΔL – مقدار التطاول أو التقلص الذي تتعرض له مواسير التغليف ذات الطول L عندما تتغير درجة الحرارة بمقدار Δt

α – معامل التمدد الحراري الخطي للمواسير.

Δt – مقدار التغير في درجة الحرارة (C˚):

$$\Delta \, t = t_c - t_p$$

t_c– درجة الحرارة الوسطية لمواسير التغليف قبل استبدال السائل داخلها (C˚).

t_p– درجة حرارة السائل الجديد (C˚).

قيمة قوة الشد الثانوية التي يسببها التقلص (والتي تضاف إلى قوة الشد الرئيسية) تحسب بالعلاقة:

$$F_{cnt} = \sigma_{cnt} \, A_p = \frac{\Delta \, L}{L} \, E \, A_P \, = E \, \alpha \, \Delta t \, A_p \qquad (15-2)$$

A_p– مساحة المقطع العرضي للمواسبر.

E – معامل المرونة الطولي لمعدن المواسير.

- **قوى شد متغيرة (ديناميكية) [7]** : تتعرّض مواسير التغليف **لقوى شد متغيرة** وذلك عند ارتكاز حذاء مواسير التغليف في مناطق الميل أو التضيق ثم تحرره بشكل مفاجئ أو نتيجة الإيقاف المفاجيء لمواسير التغليف واصطدامها مع ماسكات مواسير الغليف (Slips) ضمن المنضدة الرحوية يمكن حسابها بالعلاقة الآتية :

$$F_{Shock} = 2\rho_s . v_i . v_w . A_P \qquad (16-2)$$

ρ_s : كثافة الفولاذ

v_i : سرعة إنزال مواسير التغليف

v_w: سرعة انتقال الموجة ضمن الفولاذ

A_P : مساحة المقطع العرضي لمواسيرالتغليف

2-1-2- الضغط الخارجي (External Pressure):

تتعرّض مواسير التغليف للضغط الخارجي في الحالات التالية:

1-الضغط في الفراغ الحلقي خارجها أكبر من الضغط داخلها $\boldsymbol{p_e > p_i}$

2-الضغط الخارجي الناتج عن انهيار جدران البئر

1-الضغط الخارجي **External pressure** $\boldsymbol{p_e > p_i}$

تتعرض مواسير التغليف للضغط الخارجي في الحالات التالية:

1 – عند الانتهاء من عملية الإسمنت وذلك بسبب الفرق بين الوزن النوعي المرتفع للسائل الإسمنتي خارج المواسير والوزن النوعي القليل لسائل الإزاحة داخل مواسير التغليف، يستمر تأثير الضغط الخارجي في هذه الحالة حتى يبدأ السائل الإسمنتي بالتصلّب

2-عند متابعة الحفر من خلال مواسير التغليف بسائل حفر بوزن نوعي أقل من الوزن النوعي لسائل الحفر الموجود خارجها فوق الإسمنت المتصلّب.

3-عند حدوث اندفاع للمركبات الهيدروكربونية أثناء متابعة الحفر من خلال مواسير التغليف، إذا لم نتمكّن من السيطرة على البئر (عدم إغلاق أجهزة منع الانفجار)

4 – عند وضع البئر في الإنتاج من خلال تغيير سائل الحفر الذي استخدم أثناء اختراقها بسائل ذي وزن نوعي أقل (ماء، نفط، سائل مهوّى...إلخ) أو بإنقاص مستوى السائل داخل مواسير التغليف الإنتاجية وفي هذه الحالة تتعرّض مواسير التغليف أثناء ذلك لضغط خارجي ناتج عن الفرق في الأوزان النوعية للسوائل أو بسبب اختلاف مستوى السائل في الفراغ الحلقي عنه داخل المواسير

5 – أثناء الإنتاج وذلك بسبب الفرق بين الوزن النوعي القليل للموائع المنتجة (نفط، ماء، غاز) داخل المواسير بالمقارنة مع الوزن النوعي للسائل الموجود خارجها أو بسبب الفرق في مستوى السائل داخل

المواسير (سواءً السكوني أو الديناميكي) الذي يستمر في التناقص نتيجة سحب كميات متزايدة من الموائع الطبقية ومستوى سائل الحفر الذي يبقى ثابتاً في الفراغ الحلقي خارجها.

6 – عند إنزال مواسير التغليف بحذاء مركّب أو بحلقة صدّ مركبة عند استعمال أحد هذين العنصرين أو كلاهما معاً فإن مواسير التغليف تبقى فارغة كلياً أثناء إنزالها في البئر.

7– أثناء تسرّب سائل الحفر في الطبقة أثناء متابعة الحفر من خلالها وحدوث تسرّب كلي لسائل الحفر في الطبقة وذلك في الآبار الاستكشافية لأن مستوى السائل ينخفض داخل المواسير، في حين يبقى خارجها ثابتاً وحتى السطح.

8 – أثناء رفع مجموعة مواسير الحفر بسرعة كبيرة تتعرّض مواسير التغليف لإفراغ جزئي أثناء رفع مجموعة مواسير الحفر بسرعات كبيرة، وبشكل خاص عند تشكّل لبادة من الطين على رأس الحفر، أي أثناء الحفر ضمن صخور طرية، ومعرّضاً مواسير التغليف التي يتابع الحفر من خلالها لضغط خارجي، ناتج عن الفرق في مستوى السائل في الفراغ الحلقي عنه داخل المواسير.

2–الضغط الخارجي الناتج عن انهيار جدران البئر:

تتعرّض مواسير التغليف لضغط خارجي من قبل الصخور في حالات معينة عندما يحصل انهيار لجدران البئر، عندما تتكون جدران البئر من صخور عالية اللدونة فإنها تنهار بتأثير الصخور التي تعلوها، أما عندما تكون ضعيفة التماسك فإنها تنهار بفعل سائل الحفر، أو فاقد الرشح لهذا السائل، حيث يقللان من تماسك الصخور.

إذا فرضنا طبقة صخرية متجانسة في جميع الاتجاهات فإن قيمة الجهد العمودي الذي يؤثّر على عنصر ما من الطبقة الصخرية المفترضة، والناتج عن الضغط الجيولوجي السكوني الذي يولّد ضغطاً جانبياً يحدد من العلاقة الآتية:

$$\sigma_Z = P_z = \gamma_m . Z \qquad (17-2)$$

حيث إن:

Z – عمق العنصر المفترض (m).

γ_m – الوزن النوعي الوسطي للصخور المتواجدة فوق العنصر وبسماكة Z .

أما قيمة الجهد الجانبي، والذي يؤثر كضغط خارجي على مواسير التغليف يحدد بالعلاقة الآتية:

$$\sigma_x = \sigma_y = P_e = \frac{\mu}{1-\mu}\gamma_m . Z \qquad (18-2)$$

حيث إن: μ – معامل بواسون للصخر المفترض.

يظهر تأثير هذا الضغط عندما تكون قيمته أكبر من الضغط الذي يشكّله عمود سائل الحفر الموجود في الفراغ الحلقي خارج المواسير (Pe > Pi)، أو $\frac{\mu}{1-\mu}\gamma_m . > \gamma_f$

ويتميز الضغط الخارجي الناتج عن انهيار جدران البئر بشدة تعقده، لأنه:

1-لا يمكن تحديد زمن تعرّض مواسير التغليف لهذا الجهد إذ أن معظم حالات تعرّض مواسير التغليف لهذا الجهد تحدث أثناء الإنتاج من البئر، أي بعد زمن كبير من إنزال مواسير التغليف فيه

2- وبأن قيمته تعتمد كثيراً على الزمن

3- لا يمكن تحديد مدى المقاومة التي تملكها المواسير عند تعرّضها له

إذن، ولتلافي المشاكل التي يسببها هذا الجهد تتم حماية مواسير التغليف برفع الإسمنت في الفراغ الحلقي خارجها، بحيث تتم تغطية كل الطبقات التي يمكن أن تسبب مثل هذا الانهيار بوجود سائل الحفر داخلها.

2-1-3- الضغط الداخلي Internal pressure

الضغط في الفراغ الحلقي خارجها أأقل من الضغط داخلها $p_e < p_i$

تتعرض مواسير التغليف للضغط الداخلي في الحالات التالية:

1- في نهاية عملية الإسمنت تتعرّض مواسير التغليف للضغط الداخلي، يأخذ الضغط الداخلي في هذه الحالة قيمته العظمى على السطح في اللحظات الأخيرة من عملية الإسمنت، أما في حال متابعة الضخ بعد استناد الفاصل الإسمنتي الثاني على الفاصل الأول فيرتفع الضغط الداخلي بشكل مفاجئ.

2 - عند متابعة الحفر من خلال مواسير التغليف بسائل حفر بوزن نوعي مرتفع أكبر من الوزن النوعي للسائل الموجود خارجها فوق الإسمنت المتصلّب.

3 - في حال حدوث اندفاع للمركبات الهيدروكربونية أثناء متابعة الحفر من خلال مواسير التغليف وتمّت السيطرة عليه بإغلاق أجهزة منع الانفجار، تتعرّض مواسير التغليف خلال ذلك لضغط داخلي ناتج عن الفرق بين ضغط الموائع الطبقية التي سببت الاندفاع وضغط الفراغ الحلقي (ضغط عمود سائل الحفر الموجود فوق الإسمنت خارج المواسير) والقيمة العظمى لفرق الضغط تكون على السطح، حيث يكون الضغط الخارجي مهملاً.

4 - عند إجراء دوران لسائل الحفر أثناء إنزال المواسير أو بعد الانتهاء منه، وقبل البدء بضخ السائل الإسمنتي في هذه الحالة تتعرض مواسير التغليف للضغط الداخلي بفعل احتكاك سائل الحفر مع سطوح الجريان، وتكون قيمته عظمى عند السطح.

5- عند إغلاق البئر وهي في حالة إنتاج ذاتي، في حال استعمال مواسير تغليف ضائعة للمرحلة الإنتاجية، فإن مواسير التغليف الوسطية تتعرّض لضغط داخلي أثناء الإنتاج العادي من البئر، وكذلك أثناء إغلاق البئر لأي سببٍ طارئ.

6- عند اختبار درجة إحكام مواسير التغليف: يترك السائل الإسمنتي الذي ضخ إلى الفراغ الحلقي خارج المواسير في وضع ساكن فترة كافية للتصلب، ولتشكيل حجرٍ إسمنتي مقاوم خارج المواسير وداخلها

بارتفاع حلقة الصد من الحذاء. بعد ذلك يتم فحص مواسير التغليف للتأكد من العزل المحكم لداخل المواسير عن الفراغ الحلقي، حيث ترفع قيمة الضغط الداخلي، ويراقب معدّل تغيّرها تبعاً للزمن، ومن خلال تحديد معدل هبوط الضغط الداخلي تقيّم درجة عازلية مواسير التغليف في مناطق الوصل فيما بينها، إذن: تتعرّض مواسير التغليف للضغط الداخلي من خلال هذا الاختبار، الذي تحدد قيمته العظمى تبعاً لقطر ونوعية المواسير

7 – عند إجراء عمليات السمنتة تحت ضغط وذلك عند إجراء بعض عمليات الصيانة والإصلاح للطبقات الخازنة أثناء الإنتاج للمحافظة على معدل استثمار مقبول منها، ومن هذه العمليات حقن حموض أو سوائل أخرى لإحداث شقوق وقنوات جديدة في الطبقة، أو حقن إسمنت لتشكيل حاجز أمام المياه الطبقية التي تغمر المجال النفطي ... إلخ، حيث تتعرّض مواسير التغليف لضغط داخلي كبير أثناء هذه العمليات، والذي يجب أن تكون قيته كافية لدفع السوائل إلى الدخول في الطبقة، وخاصةً عند ضخ الإسمنت ذي الوزن النوعي المرتفع واللزوجة العالية أيضاً (وكلتا الخاصيتين تتطلبان قوة كبيرة لدفع السائل للحركة وخاصةً في الطبقة)، حيث القنوات صغيرة القطر وغير خطية.

إذا كان الضغط الداخلي المطلوب توليده ضمن المواسير لدفع هذه السوائل للدخول إلى الطبقة أكبر من قدرة المواسير (قيمة المقاومة الحدية للمواسير أقل من الضغط الداخلي المطلوب) يستعمل عازل (Packer) يثبّت فوق الطبقة المتهدمة وفي نهاية المواسير المستخدمة لتنفيذ مثل هذه العمليات الإصلاحية

2-1-4- جهد الانضغاط المحوري (Axial compression stress):

تتعرّض مواسير التغليف للانضغاط المحوري (أي لقوى موازية لمحورها وتعاكس قوى الشد) في حالات قليلة نذكر منها:

1 – عند استنادها على قاع البئر أو في مناطق التضيّق، وكذلك في المناطق التي تتغيّر فيها زاوية الميل بشدة.

2 – عند ارتفاع الضغط في الفراغ الحلقي خارج الجزء غير المسمنت، وكذلك عند ارتفاع درجة حرارة مواسير التغليف المثبّتة بالإسمنت من الأسفل، ومع المواسير السابقة على السطح حيث يحدث تمدد وكأنه انضغاط على الطرفين، ونتيجة لذلك تتعرّض المواسير للانحناء بسبب قوى الانضغاط وتستند على جدران البئر وذلك تبعاً لطول الجزء المعرّض لهذا الجهد، يمكن إهمال تأثير تعرّض المواسير لهذا الجهد بسبب الفراغ القليل بينها وبين جدران البئر

إن جهد الانضغاط المحوري ذو قيمة صغيرة جدا وتأثيره ضعيف جدا لذلك لايؤخذ بالاعتبار في تصميم مواسير التغليف.

2-1-5- جهد الفتل (Torsion stress):

تتعرّض مواسير التغليف لجهد الفتل عند تدويرها بواسطة الطاحون لتلافي استعصائها، أو لنزع القشرة الطينية عن جدران البئر قبل البدء بضخ السائل الإسمنتي (عند استخدام منظفات كعكة الحفر العمودية)، وكذلك أثناء عملية السمنتة لتحسين نسبة إزاحة السائل الإسمنتي لسائل الحفر في الفراغ الحلقي (فعالية الإزاحة تزداد بازدياد اضطراب السائل)، نتيجةً لجهد الفتل فإن مواسير التغليف تتعرّض للشد الزائد في مناطق الوصل فيما بينها، وهذا يعني ازدياد تآكل الشرار، مع احتمال حلّ المواسير عن بعضها، وسقوط الجزء السفلي منها في البئر، من أجل تلافي النتائج السلبية لجهد الفتل يجب مراقبة المواسير عند مستوى الطاحون، حيث يتم إيقاف التدوير عند ملاحظة تزايد الشد حيث ويحدد عزم الشد أثناء ربط المواسير وفقاً لقطرها ونوع الشرار .

2-2-تصميم مواسير التغليف (Casing design) [8]

إن تصميم مواسير التغليف يعني تحديد سماكة جدار المواسير ونوع المعدن الذي صنعت منه وكذلك نوع نقاط الوصل (الشرار) لكل مرحلة من مراحل التغليف، بما يؤمن أهداف تغليف البئر بأقل كلفة ممكنة.

يتم تصميم مواسير التغليف باعتماد النظريتين الأولى والرابعة من مقاومة المواد، إذ تصمم المواسير بفرض تعرضها لكل من جهد الشد والضغط الخارجي المؤثرين بشكل منفصل (في الآبار الضحلة) أو بشكل موحد في الآبار (العميقة والمتوسطة العمق)، ثم يتم التحقق من قدرة تحمل المواسير المصممة للضغط الداخلي، ويمكن إعادة التصميم إذا كان الضغط الداخلي الذي تتحمله (Burst resistance) أقل من الضغط الداخلي الذي سوف تتعرض له.

ولكن قبل تصميم مواسير التغليف يجب أن تتوفر المعلومات الهامة والضرورية التالية

1-عمق إنزال مواسير التغليف.

2-الضغوط الطبقية والأوزان النوعية لسوائل الحفر التي يجب استخدامها.

3-نوعية الصخور التي يمكن أن تعرض مواسير التغليف لضغط خارجي كبير أثناء عمليات الإنتاج من البئر.

4-الخواص التآكلية للسوائل المنتجة.

5-زمن دوران مجموعة مواسير الحفر أثناء متابعة العمل خلال مواسير التغليف.

6-العمليات الخاصة التي يمكن اجراؤها داخل البئر مثل: (حقن إسمنت تحت ضغط، تحميض الطبقات، التشقيق الهيدروليكي) والتي يمكن أن تعرض مواسير التغليف لضغط داخلي بقيم كبيرة ولكن خلال فترات قصيرة .

2-2-1-تصميم مواسير التغليف اعتماداً على جهد الشد (تطبيق النظرية الرابعة من مقاومة المواد)

Casing design based on the tensile stress

يمكن تصميم مواسير التغليف اعتماداً على جهد الشد فقط عند التأكد من عدم تعرضها للضغط الخارجي في أية مرحلة من مراحل العمل في البئر، سواء أثناء الحفر أو أثناء الإنتاج.

تطبق هذه الطريقة في التصميم على مواسير التغليف للمرحلة السطحية أو الوسطية، وفي حال التأكد من عدم تعرضها للضغط الخارجي عند متابعة الحفر من خلالها (لن تتعرض للإفراغ من سائل الحفر بسبب تسربه في الطبقة أو أن الوزن النوعي لسائل الحفر الذي سوف يتابع به العمل من خلالها هو أكبر أو على الأقل يساوي الوزن النوعي الذي استخدم قبل إنزالها في البئر) أي أنها تطبق في الآبار الإنتاجية حيث شروط الحفر معلومة بدقة كافية

ينطلق في تصميم مواسير التغليف اعتماداً على جهد الشد من الأسفل باتجاه الأعلى في الطرف العلوي لكل قسم وفق الشرط التالي :

$$F_{ad} = \frac{F}{S_f} \geq F_w \qquad (19-2)$$

F_{ad}: المقاومة الحدية التي تتحملها المواسير تمثل المقاومة الحدية للحل من الشرار عند استخدام مواسير تغليف بشرار عادي، أما عند استخدام مواسير تغليف بشرار خاص، فإنها تمثل المقاومة الصغرى الحدية للكسر من منطقة الجسم أو الشرار (وتؤخذ القيمة الأقل).

S_f: عامل أمان (safety factor) لجهد الشد تتراوح قيمته من (2-1.5).

F_w: القوة الناتجة عن وزن المواسير.

وبما أن مواسير التغليف المصممة على جهد الشد فقط سوف يتابع الحفر من خلالها لذلك تستعمل في الجزء السفلي منها مواسير بطول يتراوح من (La =50-100 m) إما من نوعية جيدة للمعدن أو ذات سماكة جدار كبيرة) وذلك كي تقاوم الإجهادات التي سوف تتعرض لها نتيجة دوران مجموعة مواسير الحفر داخلها، وزن هذا الجزء ($G_a = L_a q_a$)، يلي هذا الجزء المختار القسم الأول من مواسير التغليف ذو سماكة الجدار الصغرى، طول القسم الأول يحدد بتطبيق الشرط (2-1)عند طرفه العلوي ,أي:

$$F_{ad1} = l_1 q_1 + l_a q_a \qquad (20-2)$$

ومنها يعين الطول

$$l_1 = \frac{F_{ad1-} l_a q_a}{q_1} \qquad (21-2)$$

حيث q_1,q_a وزن واحدة الطول للجزء المختار (l_a) والقسم الأول (l_1) أخذين بعين الاعتبار وجود المواسير ضمن سائل الحفر (أي نأخذ عامل الطفو).

طول القسم الثاني بسماكة الجدار $t_1<t_2$ يعطى بالعلاقة التالية:

$$l_2 = \frac{F_{ad2-}(l_a q_a + l_1 q_1)}{q_2} \qquad (22-2)$$

وبشكل مشابه نصل إلى العلاقة العامة لتحديد طول القسم (n) ذي سماكة الجدار العظمى، وهي الآتية:

$$l_n = \frac{F_{adn-}(l_a q_a + \sum_{i=1}^{n-1} liqi)}{q_n} \qquad (23-2)$$

- يمكن تصميم مواسير التغليف اعتماداً على جهد الشد بطريقة احتياطي الشد الثابت وذلك على النحو التالي:

يحدد طول القسم الأول كما في الطريقة السابقة، أي :

$$l_1 = \frac{F_{ad1-} l_a q_a}{q_1} \qquad (24-2)$$

تحسب بعد ذلك قوة الشد الاحتياطية لهذا القسم وهي الآتية:

$$R_S = F_1 - \frac{F_1}{S_f} \qquad (25-2)$$

تعتمد هذه القوة الإحتياطية للاقسام التالية والتي تحسب أطوالها على الشكل التالي:

$$l_2 = \frac{(F_2 - R_s) - (l_1 q_1 + l_a q_a)}{q_2} \qquad (26-2)$$

وهكذا حتى نصل إلى العلاقة الآتية:

$$l_n = \frac{(F_n - R_s) - (l_a q_a + \sum_{i=1}^{n-1} \mathrm{L_i} \cdot q_i.)}{q_n} \qquad (27-2)$$

2-2-2-تصميم مواسير التغليف اعتماداً على الضغط الخارجي (بتطبيق النظرية الأولى من مقاومة المواد)

Casing design based on the collapse pressure

لا يمكن تصميم مواسير التغليف اعتماداً على الضغط الخارجي فقط لأنها سوف تتعرض حتما لجهد الشد (إضافة إلى الضغط الخارجي)، لذلك تصمم في البداية اعتماداً على الضغط الخارجي، ثم يتم التحقق من تحملها لجهد الشد، يمكن اعتماد هذه الطريقة في تصميم مواسير التغليف الوسطية والإنتاجية المختلفة الكاملة أو الضائعة، تؤخذ القيمة العظمى للضغط الخارجي (الناتج عن عمود سائل الحفر في الفراغ الحلقي) الذي يمكن أن تتعرض له المواسير وذلك في حالة الإفراغ الكامل لها (إنزالها بنهاية مغلقة وعدم تعبئتها)، لذلك يجب أن تكون قيمة الضغط الخارجي الذي تتحمله مواسير التغليف (collapse resistance) أكبر من الضغط الخارجي الفعلي الذي سوف تتعرض له والناتج عن عمود سائل الحفر وذلك في أية نقطة من المواسير، أي يجب أن يتحقق الشرط الآتي:

$$\frac{p_{cr}}{S_f} \geq \frac{H \cdot \gamma_f}{10} \qquad (28-2)$$

حيث أن:

H : عمق النقطة المفترضة.

γ_f :الوزن النوعي لسائل الحفر

P_{cr}: الضغط الخارجي الذي تتحمله المواسير على العمق H.

S_f :عامل أمان للضغط الخارجي ويعتمد على عمق البئر ونوع الخليطة المصنوعة منها مواسير التغليف على النحو التالي: الجدول (3-2):

- في الآبار الضحلة والمتوسطة العمق (H≤ 3000m): يؤخذ عامل أمان للضغط الخارجي وبقيمة (S_f=1) من أجل جميع أنواع الخلائط التي تصنع منها مواسير التغليف.
- في الآبار العميقة تستخدم عوامل أمان بالقيم التالية:

عامل الأمان	نوع الخليطة المعدنية
1.05	K-55
1.08	N-80, L-80, C-90
1.125	T-95,P-110, Q-125 ,V-150

الجدول (3−2): عامل أمان للضغط الخارجي حسب نوع الخليطة المصنوعة منها مواسير التغليف

من تحليل العلاقة السابقة نلاحظ أن لكل نوع من مواسير التغليف عمق محدد يمكن أن يستخدم عنده وهذا العمق يحدد على الشكل الآتي:

$$H_{ad} = \frac{10 \, . \, p_{cr}}{\gamma_f S_f} \qquad (29-2)$$

يبدأ تصميم مواسير التغليف اعتماداً على الضغط الخارجي من الاسفل باتجاه الأعلى، إذ تختار مواسير القسم الأول (الذي يشكل الجزء السفلي من مجموعة مواسير التغليف) اعتماداً على عمق البئر، وتجرى مقارنة بين عمق البئر والعمق الذي يمكن أن تنزل إليه المواسير وتختار المواسير التي تتميز بعمق إنزال أكبر مباشرة على الأقل مساويا لعمق البئر ($H_{ad} \geq H$).

إن طول القسم الأول من النوع الأول يعتمد على العمق الذي يمكن أن تنزل إليه مواسير النوع التي تليها مباشرة ذات السماكة الأقل أوذات الجودة الأقل للمعدن (H_{ad2})، طول القسم الأول يحدد على النحو التالي:

$$l_1 = H - H_{ad2} = H - \frac{10 \, . \, p_{cr2}}{\gamma_f S_f} \qquad (30-2)$$

أما طول القسم الثاني فيعتمد بدوره على العمق الذي تنزل إليه مواسير النوع الثالث (H_{ad3})، أي:

$$l_2 = H_{ad2} - H_{ad3} = H - l_1 - \frac{10 \, . \, p_{cr3}}{\gamma_f S_f} \qquad (31-2)$$

وهكذا حتى نصل إلى العلاقة العامة الآتية:

$$l_n = H_{adn} - H_{adn+1} = H - \sum_{i=1}^{n-1} \mathrm{L_i} - \frac{10 \, . \, p_{crn+1}}{\gamma_f S_f} \qquad (32-2)$$

يجري التحقق من تحمل مواسير التغليف (المصممة اعتماد اعلى الضغط الخارجي) لجهد الشد الذي سوف تتعرض له، ويتم ذلك بدءاً من القسم الاخير على السطح (يؤخذ جهد الشد الناتج عن ثقل المواسير بكاملها)، تجرى مقارنة بين الجهد الأصغري الذي تتحمله المواسير(الجهد الحدي للحل من الشرار أو الجهد الحدي للكسر عند الجسم أو في منطقة الشرار تبعاً لنوع الشرار في المواسير المستعملة) وجهد الشد الناتج عن وزنها، تلغى الأقسام التي لا تتحمل جهد الشد ويعاد تصميم الجزء الملغى اعتماداً على جهد الشد فقط .

2-2- 3-الطريقة البيانية في تصميم مواسير التغليف. (Graphical method for casing design)

تستخدم هذه الطريقة في كثير من الشركات النفطية [7] لحل مشكلة تصميم مواسير التغليف، حيث تأخذ هذه الطريقة تأثير أحمال الصدم (Shock loading) وكذلك أحمال الشد الأعظمية التي تتعرض لها مواسير التغليف[8] .

وتعتمد هذه الطريقة على رسم المخطط البياني للضغط بالعلاقة مع العمق بحيث أن قمة المخطط البياني تبدأ بالقيمة صفر والتي تتوافق مع القيمة صفر للعمق والقيمة صفر للضغط كما في الشكل (2-6)، وترسم خطوط ضغط التقوض وضغط الإنفجار (وأحياناً خط تدرج ضغط التشقيق) على المخطط البياني، أما قيم الإجهادات (الضغط الخارجي، الضغط الداخلي التي تتحملها مواسير التغليف والتي تكون أكبر من الإجهادات التي تتعرض لها) تحدد بشكل خطوط عمودية على المخطط البياني.

يتم تحديد خطوط ضغط التقوض وضغط الانفجار على الشكل التالي:

- خط ضغط التقوض(Collapse load line (CCL

1- يحدد الضغط الخارجي الناتج عن تأثير عمود سائل الحفرخارج المواسير (P_e) كما في الشكل (*4-2*).

2-يحدد الضغط الداخلي الناتج عن تأثير عمود سائل الحفرداخل المواسير(P_i).

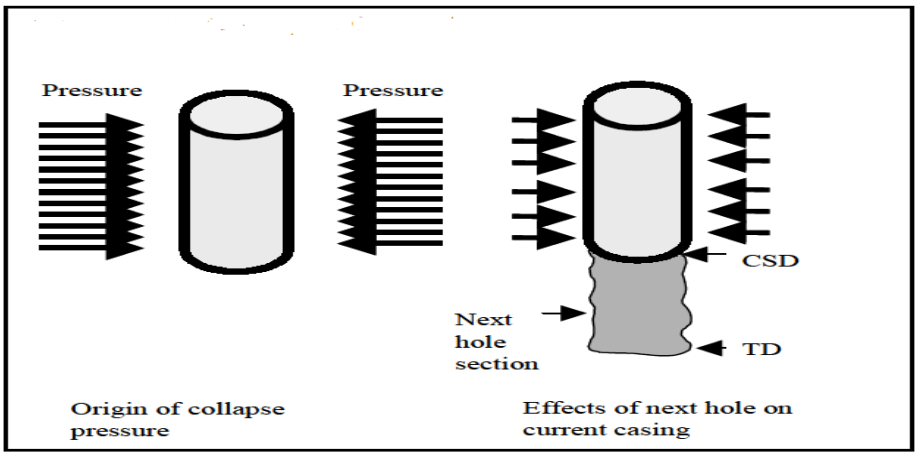
يحسب ضغط التقوض (PC) بالعلاقة التالية:

$$P_C = P_e - P_i \qquad (33-2)$$

عند السطح فإن قيمة كل من الضغط الداخلي والضغط الخارجي تكون صفراً وبالتالي فإن قيمة ضغط التقوض تساوي الصفر $P_{C1}= 0$

أما عند حذاء مواسير التغليف أي عند عمق إنزال مواسير التغليف (*Casing setting depth*) فإن ضغط التقوض (P_{C2}) له قيمة عظمى ويحسب بالعلاقة التالية:

$$P_{C2} = P_{csD} = \mathrm{h.G_m} \qquad (34-2)$$



الشكل (2-4): تأثير الضغط الخارجي (الناتج عن عمود سائل الحفر) على مواسير التغليف.

- تحديد خط ضغط الانفجار Burst load line (BLL)

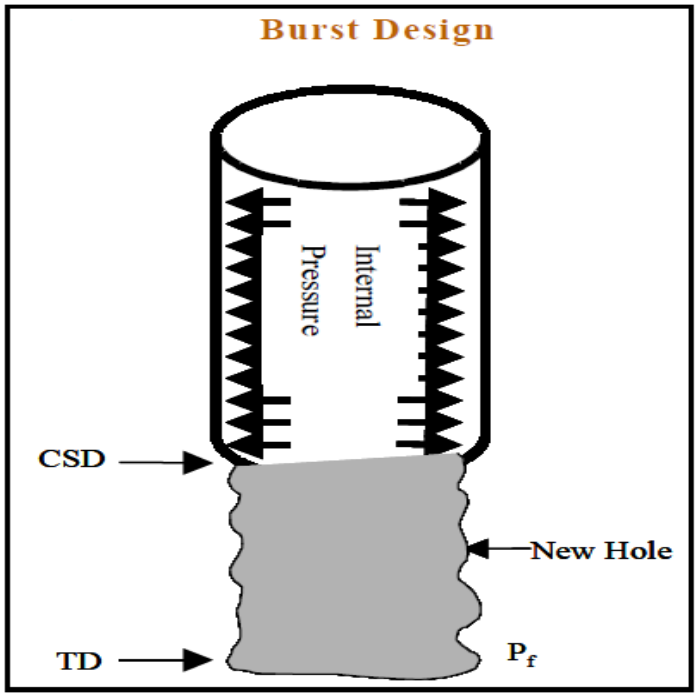
1- يحسب الضغط الخارجي (P_e)الناتج عن عمود سائل الحفر حيث أن تدرج ضغط عمود سائل الحفر (0.465 Ps/ft=0.107 at/m) وهذه القيمة تساوي تدرج عمود من الماء المالح (حيث فرضنا أن سائل الحفر في الفراغ الحلقي يتخرب مع الزمن وتترسب الأجزاء الصلبة وبالتالي فإن قيمة تدرج ضغط عمود سائل الحفر تنخفض).

2- يحسب الضغط الداخلي (P_i) الناتج عن ضغط الطبقة.

يحسب ضغط الإنفجار بالعلاقة التالية:

$$P_B = P_e - P_i \qquad (35-2)$$

إن ضغط الطبقة هو الضغط الذي يمكن أن يصادف خلال حفر المرحلة اللاحقة من البئر أي أن مواسير التغليف الوسطية تصمم اعتماداً على ضغط الطبقة الأعظمي الذي يمكن أن ينتج خلال حفر المجال المفتوح في المرحلة الإنتاجية الشكل (2-5)



الشكل (2−5): تأثير الضغط الداخلي على مواسير التغليف

يتم حساب ضغط الانفجار عند السطح وعند حذاء مواسير التغليف باستخدام العلاقات التالية:

1− حساب ضغط الانفجار عند السطح (Burst at the surface).

$$P_{B1} = P_i - P_e \qquad (36-2)$$

P_i : الضغط الداخلي (Internal pressure).

P_e : الضغط الخارجي (External pressure).

$$P_e = 0$$

$$P_i = P_f - H.G \qquad (37-2)$$

وبالتالي فإن العلاقة (2−37) تأخذ الشكل التالي:

$$P_{B1} = P_f - H.G \qquad (38-2)$$

2−حساب ضغط الإنفجار عند حذاء مواسير التغليف (Burst at the shoe)

$$P_{B2} = P_i - P_e \qquad (39-2)$$

$$P_e = h.G_m \qquad (40-2)$$

$$P_i = P_f - (H-h).G \qquad (41-2)$$

وبالتالي فإن العلاقة (2−39) تأخذ الشكل التالي:

$$P_{B2} = P_f - (H-h).G - h.G_m \qquad (42-2)$$

حيث أن:

P_{B1} : ضغط الإنفجار الذي تتعرض له مواسير التغليف عند السطح

P_{B2} : ضغط الإنفجار الذي تتعرض له مواسير التغليف عند حذاء مواسير التغليف

P_f : ضغط الطبقة للمرحلة اللاحقة عند العمق H ((Total depth .TD.

$(H - h).G$: الضغط الهيدروستاتيكي لسوائل الطبقة بين العمق (H) وعمق حذاء مواسير التغليف (h).

G : تدرج ضغط سوائل الطبقة.

G_m : تدرج ضغط عمود سائل الحفر (ويؤخذ مساوياً لتدرج ضغط عمود من الماء المالح).

عادة في تصميم مواسير التغليف نفترض حدوث الحالة الأسوأ وهي حدوث اندفاع للغاز حيث يؤخذ تدرج ضغط الغاز (0.1Psi/ft=0.023 at/m) وفي هذه الحالة يجب أن نأخذ بعين الاعتبار النفطتين التاليتين

- يجب أن يختار عمق إنزال مواسير التغليف بحيث أن ضغط الغاز عند حذاء مواسير التغليف يجب أن يكون أقل من ضغط تشقق الطبقة عند حذاء مواسير التغليف.

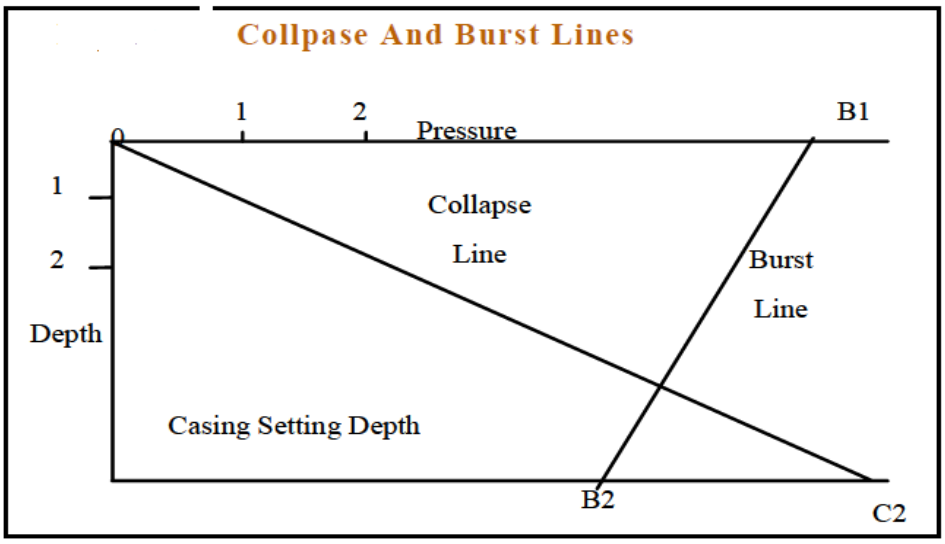
➢ في الآبار الاستكشافية وفي حال عدم معرفة ضغط الطبقة للمرحلة اللاحقة من المجال المفتوح للبئر يحسب الوزن النوعي الأعظمي لسائل الحفر المتوقع استخدامه عند هذا العمق وبالتالي فإن ضغط الغاز يؤخذ مساوياً لهذه القيمة التي يجب أن تستخدم في حساب الضغوط الداخلية.

➢ في الآبار العميقة (**deep wells**) حيث يستخدم أكثر من نوع من أنواع مواسير التغليف وبالتالي فإن الطريقة البيانية تستخدم على الشكل **التالي**[7] :

1-نحدد على المخطط البياني قيم (الضغط –العمق) عند السطح وعند حذاء مواسير التغليف كما في الشكل (2-6).

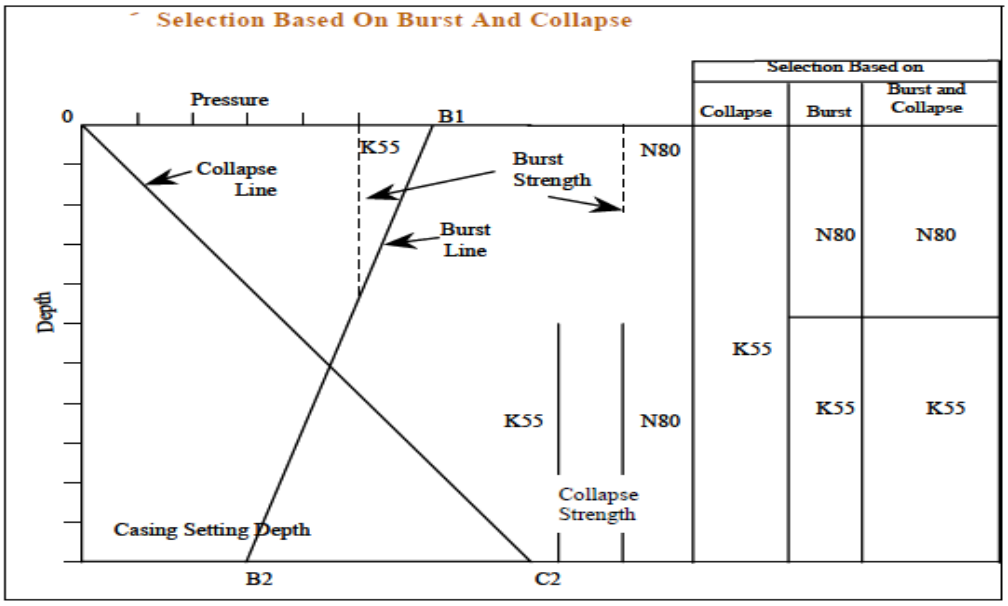
2- تحديد خط ضغط التقوض(CCL): نحدد على المخطط البياني (الضغط-العمق) إحداثيات النقطة C_1 عند السطح واحداثيات النقطة C_2 عند حذاء مواسير التغليف، نرسم خط مستقيم خلال النقطتين C_1 و C_2 فنحصل على خط التقوض كما في الشكل (2-6).

3- تحديد خط ضغط الانفجار (*BLL*): نحدد على المخطط البياني (الضغط-العمق) احداثيات النقطة B_1 عند *السطح* و إحداثيات النقطة B_2 عند حذاء مواسير التغليف. نرسم خط مستقيم خلال *النقطتين* B_1 وB_2 فنحصل على خط الانفجار كما في الشكل (2-6).



الشكل (2–6): طريقة تحديد خطوط التقوض والانفجار في تصميم مواسير التغليف.

4– نحدد على المخطط البياني قيم الضغوط الخارجية والضغوط الداخلية التي تتحملها مواسير التغليف((*Collapse* and burst strength (*resistance*) وذلك حسب الأنواع المتوفرة من مواسير التغليف كما في الشكل (2–7)، واعتماداً على ذلك يتم التحديد الأولي لأعماق إنزال مواسير التغليف.



الشكل (2–7): طريقة تحديد أعماق إنزال مواسير التغليف اعتماداً على ضغط التقوض وضغط الانفجار.

6– يتم التحقق من قدرة تحمل هذه المواسير لجهد الشد الذي تتعرض له نتيجة وزن المواسير بالإضافة إلى قوة الشد الناتجة عن ضغط اختبار مواسير التغليف (Testing pressure)، وعن قوة الانحناء(Bending

force) الناتجة عندا إنزال مواسير التغليف في الآبار المنحرفة وعن أحمال الصدم (*Shoc loads*) الناتجة عن اصطدام مواسير التغليف مع لاقط المواسير (Slips) نتيجة إيقافها داخل المنضدة الرحوية (الطاحون).

يتم حساب ضغط الاختبار، وقوة الانحناء وحمولة الصدم باستخدام العلاقات التالية [8] :

- ضغط الاختبار: يحسب ضغط الاختبار باستخدام العلاقة التالية:

$$P_{test} = 60\% \times P_{burst} \qquad (43-2)$$

وبالتالي فإن قوة الشد الناتجة عن ضغط الاختبار تعطى بالعلاقة التالية:

$$F_{test} = \frac{\pi}{4} \times \mathrm{d_{icsg}} \times \mathrm{P_{test}} \qquad (44-2)$$

حيث أن:

P_{test} : ضغط الاختبار.

P_{burst} : الضغط الداخلي الذي يتحمله المعدن ذو النوعية الأقل جودة

$\mathrm{d_{icsg}}$: القطر الداخلي لمواسير التغليف ذات النوعية الأقل جودة.

- قوة الانحناء: تحسب قوة الإنحناء باستخدام العلاقة التالية:

$$F_B = 2.33 \times D_{csg} \times \mathrm{q_{csg}} \times \theta \qquad (45-2)$$

حيث أن:

$\mathrm{F_B}$:قوة الانحناء (KN).

$\mathrm{D_{csg}}$: القطر الخارجي لمواسير التغليف (m).

$\mathrm{q_{csg}}$: وزن واحدة الطول لمواسير التغليف (N/m).

θ :شدة الإنحناء ($^{o}/10m$).

- قوة الصدم: تحسب قوة الصدم باستخدام العلاقة التالية:

$$F_s = 0.94 \times q_{csg} \qquad (46-2)$$

F_s: قوة الصدم (KN).

$\mathrm{q_{csg}}$: وزن واحدة الطول لمواسير التغليف (N/m).

وبالتالي فإن فوة الشد الكلية التي تتعرض لها مواسير التغليف تحسب بالعلاقة التالية:

$$F_t = G_{csg} \times b + F_{test} + F_B + F_s \qquad (47-2)$$

حيث أن:

G_{scg} : وزن مواسير التغليف في الهواء.

b:عامل الطفو ويحسب من العلاقة التالية :

$$b = 1 - \frac{\gamma_f}{\gamma_s} \qquad (48-2)$$

γ_s ,γ_f الوزن النوعي لسائل الحفر والوزن النوعي لمعدن مواسير التغليف على التوالي.

7 – يجري التحقق من تحمل مواسير التغليف ذات النوعية الأقل جودة لتأثير جهد الشد والجهد الناتج عن الضغط الخارجي بآن واحد (*Biaxial effects*) وذلك على النحو التالي:

- نحسب نسبة الشد (Tensile ratio) من العلاقة التالية:

$$R_t = \frac{W_{cd}}{F} \qquad (49-2)$$

حيث أن:

W_{cd} :الوزن الذي يتعرض له القسم ذي النوعية الأقل جودة (الوزن المحمول,Weight carried)

F : الجهد الذي يتحمله المعدن ذي النوعية الأقل جودة (يؤخذ من جداول مواسير التغليف).

- نحسب نسبة نقصان الضغط الخارجي الذي يتحمله المعدن (ذي النوعية الأقل جودة) نتيجة تأثير الجهدين بآن واحد.

الفصل الثالث

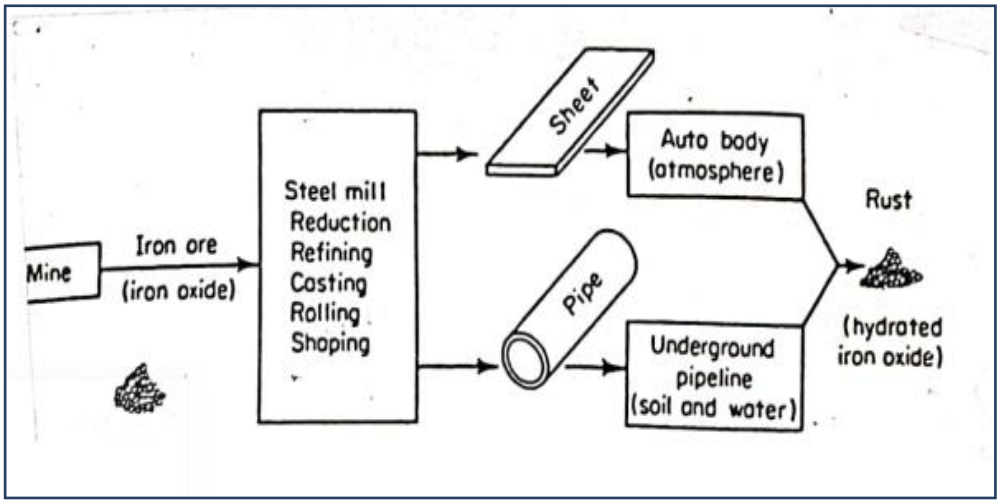
تآكل مواسير التغليف

Casing Corrosion

3-1- تعريف التآكل:

هو كل تخريب للمعدن بتأثير كيميائي أو كهركيميائي، أما من وجهة نظر ترموديناميكية هو عودة المعادن والسبائك إلى حالتها الطبيعية (الفلزات)، أي عملية معاكسة للتعدين [10, 1].

إن معظم المعادن باستثناء المعادن النبيلة (الذهب، البلاتين...) توجد على شكل أملاح أو أكاسيد معدنية وذلك لكون هذه الحالة أكثر استقراراً من الناحية الترموديناميكية والإنسان يصرف طاقة كي يحول هذه الأملاح والأكاسيد إلى معادن، وهي الحالة الأكثر استقراراً، لذلك تسعى هذه المعادن إلى الوصول إلى الحالة الأكثر استقراراً أي تتآكل كما في الشكل (3-1)



الشكل (3-1)

3-2-الظروف المساعدة لحدوث التآكل[7]:

1.اختلاف طاقة معدلات الإجهاد أو النشاط الكيميائي عبر السطح المعدني بالتماس المباشر في وسط التآكل.

2.اختلاف تراكيز الأملاح وغيرها من المواد المسببة للتآكل في المحاليل الكهروليتية.

3.التدرجات الحرارية المختلفة على السطح المعدني في نقاط التماس مع محلول التآكل.

4.عدم التجانس في التركيب الكيميائي للسطح المعدني.

5.تعرض المعدن لقوى وإجهادات تضعف مقاومته.

3-3- مسببات تآكل مواسير التغليف [10]:

1.الإجهادات التي تتعرض لها مواسير التغليف:

تتعرض مواسير التغليف منذ لحظة إنزالها في البئر وحتى نهاية الاستثمار إلى إجهادات مختلفة من قوى شد وضغط داخلي وضغط خارجي واحتكاك مع مجموعة مواسير الحفر وبالإضافة إلى هذه الإجهادات فإن هناك بعض الأسباب التي يمكن أن تؤثر على المواصفات الميكانيكية لمواسير التغليف وتخلق فيها مناطق ضعف تبدأ منها عملية التآكل، نذكر منها:

- استخدام مواسير تغليف لا تتلائم وشروط البئر المنزلة فيها وهذا يحدث بسبب التصنيف الخاطئ لها من قبل الشركة المصنعة أو في قاعدة التخزين.

- تعرض مواسير التغليف للتشوه خلال التصنيع أو التخزين أو النقل وعدم اختبارها بشكل دقيق قبل إنزالها في البئر.

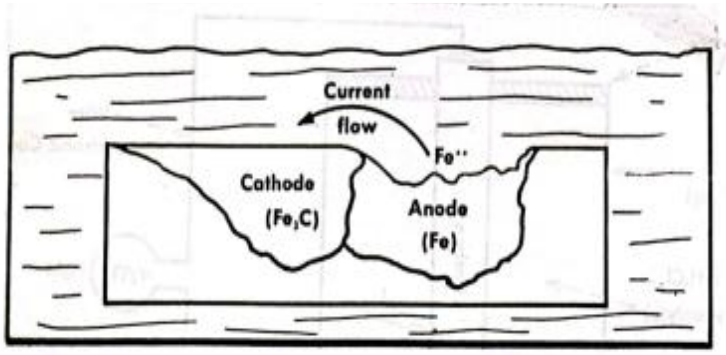
-عدم التقيد بالترتيب الصحيح لإنزالها، وبالتعليمات الدقيقة لكيفية سحبها وإنزالها.

- تناقص مقاومة مواسير التغليف بسبب تخزينها لفترات طويلة وضمن شروط غير ملائمة.

2.طبيعة المعدن:

ليست المعادن المستعملة في صناعة مواسير التغليف متجانسة، بل تتألف من أشكال معدنية مختلفة وهي عبارة عن خليطة معدنية، وعندما توضع هذه المعادن في محلول كهرليتي تتشكل نتيجة ذلك اختلافات كمونية بين المناطق ذات الخواص المختلفة الناتجة عن خلايا التآكل على سطح المعدن، فمثلاً تتشكل خلايا تآكل على مواسير التغليف التي تتألف من خلائط فولاذية تحوي بلورات الحديد وبلورات كربيد الحديد (نسبة الكربون عادة تتراوح من %(1-0.2)) وتكون بلورات الحديد هي المصاعد في معظم الأحيان، بينما تكون بلورات كربيد الحديد هي المهابط وتكتمل الدارة الكهربائية بالسائل الموجود ويؤدي ذلك إلى تآكل عام على سطح المواسير بينما تتشكل القشور والترسبات مهما كان نوعها، وبشكل طبيعي فالخلائط غير متجانسة والاختلافات الكمونية على سطح المعدن هي نتيجة طبيعية واحدة للأسباب الرئيسية، والشكل (3-2) يوضح خلايا التآكل التي تتشكل على سطح مواسير التغليف.

3



الشكل (3-2): خلايا التآكل التي تتشكل على سطح مواسير التغليف.

3.الإسمنت خلف المواسير:

حيث يلعب نوع الإسمنت ومتانته ومرونته وتركيبه الكيميائي وارتفاعه خلف المواسير دوراً هاماً في تحديد التآكل والتقليل منه ولكن غياب الإسمنت في بعض المناطق وبقاء سائل الحفر في الفراغ الحلقي خارج مواسير التغليف، يجعل من هذه الأخيرة عرضة لإجهادات شتى (تآكل من قبل محتويات الطبقة المفتوحة، ضغط خارجي كبير ناتج عن انهيار جدران البئر) والتي تؤدي مع مرور الزمن إلى ظهور مشاكل مثل تقوض المواسير أو إصابتها بتآكل موضعي وبالتالي عدم تأديتها لوظيفتها الرئيسية في المحافظة على ثبوتية جدران البئر، أي التقليل من عمرها وعمر البئر.

4.تأثير الوسط المحيط بالمعدن:

يلعب الدور الأساسي في عملية التآكل، وفي داخل البئر فإن الوسط المحيط بمواسير التغليف هو وسط تشردي يحتوي على العديد من المركبات، من مثل:

أ. وجود غاز الأكسجين في سائل الحفر المستخدم في قتل البئر.

ب. وجود غاز كبريت الهيدروجين بفعل بعض البكتيريا التي تعمل على تفكيك مركبات الليغنين الموجودة في سائل الحفر.

ج. وجود غاز ثاني أكسيد الكربون.

وهناك عوامل آخرى تؤثر على عملية التآكل، منها:

1.درجة الحموضة PH للسائل.

2.ملوحة السائل.

3.سرعة جريان السائل.

4.تأثير درجة الحرارة.

5.تأثير الضغط.

3-4-أنواع التآكل التي تتعرض لها مواسير التغليف [6,10]:

تتعرض مواسير التغليف إلى أربعة أنواع رئيسية للتآكل وذلك حسب الوسط المسبب للتآكل، وهي:

3-4-1-التآكل الكيميائي.

3-4-2-التآكل الكهروكيميائي.

3-4- 3-التآكل الحيوي(البيولوجي).

3-4-4- التآكل الميكانيكي.

3-4-1-التآكل الكيميائي:

وهو تفاعل غير متجانس بين الطور الصلب (المعدن) والطور السائل ويسمى تآكل رطب أو مع طور غازي ويسمى تآكل جاف، حيث تتوضع منتجات التآكل على سطح المعدن نفسه.

والتآكل الكيميائي الصرف لا يترافق بتيار كهربائي أثناء عملية التآكل، أي أن الوسط المحيط بالمعدن غير متشرد كهربائياً مثل النفط ومشتقاته والمركبات العضوية.

تتعرض مواسير التغليف لهذا النوع من التآكل نتيجة بعض المركبات التي تضاف عادة إلى سائل الحفر لتحسين خواصه، مثل: $Cacl_2 , Ca(OH)_2$,

أو تأثير بعض الأحماض التي تضخ أثناء عملية التحسين وتأثير الموائع الطبقية التي تخرج من البئر باتجاه السطح.

3-4-2-*التآكل* الكهروكيميائي (*Electrochemical Corrosion*):

يعتبر من أكثر الأنواع انتشاراً ويتحقق هذا النوع من التآكل في المحاليل المتشردة والتي تغمر في المعدن بشكل كلي أو جزئي.

❖ آلية التآكل الكهروكيميائي *Mechanism of Electrochemical Corrosion:*

عند غمر معدن في محلول ولكي يتوازن ترموديناميكياً مع هذا المحلول (السائل المحيط)، عندها فإن المعدن سيشرد عدد من ذراته إلى المحلول، هذه الشوارد تبقى مرتبطة وملتصقة بسطح المعدن بواسطة الإلكترونات المكافئة التي تبقى ضمن المعدن، وعند أي تغيير في شروط المحلول (تغير التركيز أو درجة الحرارة...الخ) يتغير هذا التوازن، ويتم ترسيب عدد من الشوارد أو تشريد عدد من الذرات لتحقيق توازن جديد، وفي حال وجود معدنين في المحلول دون اتصال بينهما، يتم توازن كل منهما مع المحلول دون حصول تآكل لأي منهما في حالة وجود اتصال بينهما

بما أن لكل قطب توازنه يكون عدد الإلكترونات على أحد القطبين مختلفاً عن عددها على الآخر ونتيجة لفرق عدد الإلكترونات، ينتقل عدد منها من القطب الأغنى إلى القطب الأفقر بغية حصول توازن كهربائي بين الأقطاب وهذا التوازن الكهربائي بين الأقطاب يخلق خللاً كهربائياً على القطب الواحد فالقطب الذي خسر عدداً من الإلكترونات يصبح ذا شحنة موجبة (حيث عدد الشوارد أكبر من عدد الإلكترونات) وبالتالي يسمح لعدد من الشوارد الموجبة بمغادرة سطحه إلى المحلول لكي يتوازن كهربائياً.

أما القطب الموجب الذي كسب عدداً من الإلكترونات يصبح ذا شحنة سالبة وبالتالي يجذب (يرسب) عدداً من الشوارد الموجبة لكي يتوازن كهربائياً، هذا التوازن الكهربائي على الأقطاب يخلق خللاً ترموديناميكياً على كل قطب وحتى يتم الاستقرار يجب تعديل الشوارد.

فعدد الشوارد على القطب الذي كسب إلكترونات أكبر من العدد اللازم لتوازنه الترموديناميكي ولكي يتوازن فإنه يرسب على سطحه عدد من الشوارد على القطب الذي فقد إلكترونات أصغر من العدد اللازم لتوازنه الترموديناميكي ولكي يتوازن فإنه يشرد عدداً آخر من ذرات سطحه مما يؤدي إلى تآكله.

وتستمر العملية ما دام هذا الفرق موجوداً والاتصال موجوداً وبالتالي يتم تآكل المعدن.

الأشكال الشائعة للتآكل (الكهروكيميائي) التي تتعرض لها مواسير التغليف [1,6] :

Common forms of casing corrosion

- ✓ التآكل العام أو المنتظم
- ✓ التآكل الغلفاني
- ✓ التآكل النخري
- ✓ التآكل الكهفي (الشقي)
- ✓ التآكل البنيوي (تآكل بين الحبيبات)
- ✓ التآكل عبر الحبيبات
- ✓ التآكل بالإجهاد
- ✓ التقصف الهيدروجيني
- ✓ التآكل المتزامن بالحت
- ✓ **التآكل العام General corrosion:**

ويسمى أيضاً التآكل المستمر أو التآكل المنتظم، وهو أكثر الأشكال شيوعاً، يحصل بشكل متجانس على كامل المعدن نتيجة للتفاعل بين المعدن والسوائل المتواجدة في البئر أو السوائل التي تحويها الطبقات الجيولوجية المختلفة كما أن هذه السوائل يمكن أن تكون سوائل الحفر أو السوائل المستخدمة في عمليات إنهاء البئر التي تترك في الفراغ الحلقي (بين مواسير التغليف ومواسير الإنتاج)، يتصف هذا التآكل بأنه تفاعل كهروكيميائي والذي ينتج عنه انخفاض في سماكة المعدن ويعبر عن سرعة التآكل بالسماكة المتآكلة خلال زمن محدد (mm/year,day,hour) أو بالفقد في الوزن بالنسبة لمساحة محددة من السطح وخلال زمن محدد (gr/m^2/year,day,hour)

- ✓ **التآكل الغلفاني Galvanic corrosion:**

ويسمى أيضاً تآكل ثنائي المعدن :Two metal (Bimetallic) corrosion

ويحصل عند وجود معدنين مختلفين في محلول ما، أو معدن واحد في ظرفين مختلفين حيث التوازن الترموديناميكي في كل وسط يختلف عنه في وسط آخر وبالتالي تتشكل بطارية تآكلية (قطبين مختلفين) حيث يحدث انتقال للإلكترونات من المعدن الأكثر سلبية إلى المعدن الأكثر إيجابية.

فعند استخدام معدنين مختلفين في نفس مجموعة مواسير التغليف أو في مجموعتين متجاورتين منها ونتيجة لتماس كل معدن مع الآخر من خلال السائل الذي يملأ الفراغ الحلقي والذي يحتوي على عوامل أكالة مثل: H_2S, CO_2, O_2, فإن التآكل الغلفاني يحدث أنه عند شروط مماثلة تتعرض مواسير التغليف لهذا الشكل من التآكل عند اختلاف المعالجة الحرارية بين جسم الماسورة ونهايتها (المزودة بنفخة عند الرأس).

كما أن هذه الظاهرة تحدث عند وصل مواسير تغليف جديدة مع مواسير تغليف قديمة حيث تعمل هذه المواسير الحديثة عمل (المصعد) وتتآكل تفاضلياً (Corrodes preferentially)

✓ **التآكل النخري Pitting corrosion:**

هو شكل من أشكال التآكل الموضعي جداً أي أنه يحدث في مناطق محدودة جداً ويؤدي إلى تشكل فجوات داخل المعدن ذات أبعاد مختلفة ولكنها في معظم الأحيان تكون صغيرة نسبياً وأحياناً تكون الفجوات متباعدة منفصلة أو قريبة لبعضها بحيث تبدو كسطح خشن.

عموماً يمكن وصف النخر (pit) كتجويف (cavity) أو فتحة (hole) ذات سطح قطره مساو أو أقل من عمقه، يعتبر هذا التآكل من أكثر الأشكال المدمرة (شكل خطير جداً) والخبثية (insidious) لأنه لا يمكن التنبؤ به نظراً لصغر أبعاد فتحات الثقوب على السطح وغالباً ما تكون هذه الفتحات مغطاة بنواتج التآكل بالإضافة إلى أنه من الصعب القياس كمياً، ومقارنة امتداد الثقوب وذلك بسبب اختلاف أعماق وعدد الثقوب التي يمكن أن تحدث عند شروط مماثلة.

خصائص هذا التآكل:

إنه عملية بطيئة ويحتاج إلى عدة شهور وأحياناً عدة سنوات حتى يصبح مرئياً (وهذا يعتمد على نوع المعدن ونوع الوسط الأكال).

تعتبر المحاليل (الأوساط) الحاوية على الكلور، البروم، هيبوكلوريد السلفات من المحاليل المسببة لهذا النوع من التآكل، أما المحاليل الحاوية على اليود والفلور فهي أقل تأثيراً كما أن وجود الشوارد المؤكسدة مثل: (Fe^{++}, Cu^{++}, Hg^{+} ,.....) تعتبر خطرة وخاصة بغياب الأكسجين وأخطر هذه المركبات هو تواجد متزامن لشوارد الكلور مع الأكسجين.

يعتبر التآكل النخري هو الشكل الوحيد من أشكال التآكل الذي يحدث وبعملية وساطة ذاتية (محفزة ذاتياً auto catalytic) حيث أن عملية التآكل نفسها داخل الثقوب تنتج شروطاً محفزة وضرورية معاً لاستمرار عملية التآكل حيث إن الانحلال السريع للمعدن داخل الثقب يؤدي إلى إنتاج فائض كبير من الشوارد

الموجبة وهذا يقود إلى هجرة شوارد الكلور، وهكذا يوجد داخل الثقب المتآكل تركيز كبير من كلوريد المعدن وهذا غير ثابت إذ تتم حلمهته (hydrolysis) بسهولة حسب التفاعل التالي:

$$M^{+}CL^{-} + H_2O \rightarrow MOH + HCL$$

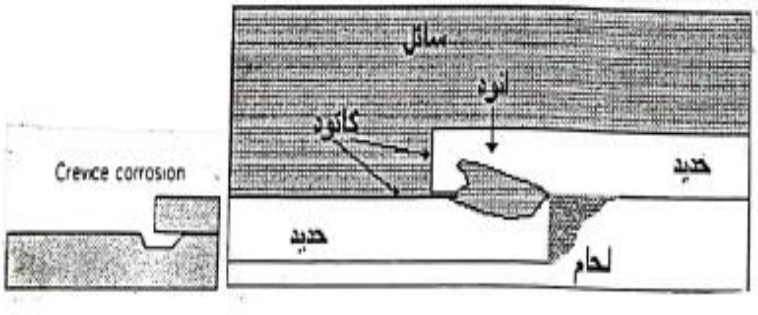
إن الحمض الناتج HCL (شوارد cl^{-} وشوارد H^{+}) تؤدي إلى زيادة سرعة التآكل وهذا التآكل يبدأ بطيئاً ثم يتسارع مع مرور الوقت، حيث تنمو الثقوب وتتطور من الأعلى إلى الأسفل (باتجاه الجاذبية) ونموها بالعكس نادراً وبالتالي تزداد سرعة التآكل باتجاه العمق، حيث يؤدي ذلك إلى ثقب المعدن مع بقاء كامل السطح سليماً.

يحدث التآكل النخري بسبب عدم التجانس (non–homogeneity) في تركيب المعدن أو نتيجة وجود نقاط ضعف (week point) على سطح المعدن المعرض بشدة للوسط الأكال.

- ✓ **التآكل الكهفي (الشقي) :Crevice corrosion الشكل (3–3)**

وأحياناً يطلق عليه deposit or gasket corrosion

يرتبط هذا النوع من التآكل بوجود كمية من السائل الراكد (في ثقب، بين وصلات المعادن، تحت طبقة رواسب).



الشكل (3–3): التآكل الكهفي

- ✓ **التآكل البنيوي (تآكل بين الحبيبات)، تآكل عبر الحبيبات**

Intergranular corrosion, Transgranular corrosion

يعتبر هذا النوع من التآكل من الأشكال الخبيثة أيضاً حيث يصيب بشكل رئيسي الحدود الفاصلة بين بلورات (حبيبات المعدن) أو الخليطة المعدنية ففي معظم حالات التآكل وخاصة في التآكل العام تكون الفواصل بين البلورات أكثر حساسية تجاه التآكل من جسم البلورة، وفي بعض الظروف نجد أن هذه

الفواصل بين البلورت تتعرض إلى تآكل شديد، بينما بقية المعدن (البلورة نفسها) تبقى سليمة ويفقد المعدن معظم خواصه الميكانيكية دون أن نلاحظ ذلك.

أي أن هذا النوع من التآكل قد استفحل دون أن يعطي أي إشارة عن وجوده، ففي كثير من الحالات نجد أن قطعة معدنية قد كسرت نتيجة جهد الانكسار والسبب يكون أن المعدن قد تعرض لهذا النوع من التآكل ولم يعد يربط البلورات أي رابط لذلك تتفكك عن بعضها نتيجة قوة صغيرة.

لا يلاحظ هذا التآكل بالعين المجردة لأن السطح الخارجي لا يطرأ عليه أي تغيير أو تبدل، كما أنه لا يحصل فقد في وزن المعدن المتآكل بنيوياً.

- ✓ **التآكل بالإجهاد Stress–corrosion**

هو تآكل وتحطم المعدن نتيجة لوجود متزامن لجهد ميكانيكي ووسط آكال، فعندما يتعرض المعدن لإجهاد ما تتغير بنيته البلورية عند منطقة الإجهاد، ونتيجة لهذا التغير في البنية بين المنطقة المجهدة والمنطقة غير المجهدة يحدث تآكل كهروكيميائياً يسمى التآكل بالإجهاد.

تتعرض مواسير التغليف لهذا الشكل من التآكل نتيجة استمرار تعرضها للإجهادات المتكررة (أثناء الحفر أو أثناء العمليات الأخرى) وتتشكل في مواسير التغليف مناطق ضعيفة المقاومة وشقوق إذ تنشأ الأعطاب عن الشقوق التي تبدأ في المناطق الضعيفة ثم تتعمق مع الإجهادات الدورية المتكررة.

تزداد سرعة التشقق للمواسير بزيادة الكميات المنحلة من الأملاح والأوكسجين وثاني أوكسيد الكربون وكبريت الهيدروجين، إذ تتشكل مصاعد عن أسفل الشقوق ومهابط على سطح الأنابيب

وبذلك يتسارع انتشار الشقوق بعبور الشوارد المعدنية إلى المحلول عند أسفل الشقوق وهذا هو السبب الرئيس لتصاعد مواسير التغليف.

أي أن التآكل الإجهادي للمعدن ينتج عن اتحاد عمليتي التآكل الكيميائي وإجهاد الشد ويستخدم المصطلح التحطم الإجهادي التآكلي للتعبير عن جميع الأعطاب المعدنية الناتجة عن اتحاد ظاهرتي التآكل الكيميائي وإجهاد الشد.

- ✓ **التقصف الهيدروجيني (HE) hydrogen embrittlement [3]**

يحدث التقصف الهيدروجيني كتحطم مفاجئ للمعدن الذي ينتج عن امتصاصية الهيدروجين الذي يتغلغل في الأبنية البلورية للمعدن، كما يمكن أن يحدث التحطم على شكل تمزق تدريجي (step wise cracking) وينتج الهيدروجين الوليد (الذري) عن عملية التآكل في الوسط الحمضي حسب التفاعلات التالية:

$$Fe + 2H^+ \rightarrow F_e^{+2} + 2H^0$$ هيدروجين وليد

$$Fe + 2e^- \rightarrow F_e^{+2}$$
$$2H^+ + 2e^- \rightarrow 2H^0$$

تتغلغل بعض ذرات الهيدروجين الوليد (لها قطر أصغر من المسافة الفاصلة بين ذرات المعدن) المتشكلة أثناء التفاعل المهبطي في الشبكة البلورية للمعدن، متحدة على شكل جزيئات هيدروجين (لها قطر أكبر من المسافة الفاصلة بين ذرات المعدن) مما يؤدي الى انحباسها ضمن المعدن مؤدياً إلى انخفاض مرونتها وتحطمها وخاصه الأنواع الفولاذية العالية المتانة (وهذه هي ميزة مواسير التغليف بشكل عام).

إن وجود كبريت الهيدروجين في السائل يؤمن وجود شوارد الكبريتيت (S^{--}) التي تمنع اتحاد ذرتين هيدروجين لتشكلا جزيء هيدروجين، أي أن وجود غاز كبريت الهيدروجين يساعد ذرات الهيدروجين على التغلغل في البنية البلورية لمواسير التغليف كما يوضح الشكلان التاليان أن سرعة التحطم المعدني بالتقصف الهيدروجيني تزداد مع ارتفاع تركيز كبريت الهيدروجين وزيادة الإجهاد على المعدن وكذلك مع ارتفاع متانة وقساوة الفولاذ.

وبشكل عام فان التقصف الهيدروجيني يحدث في أنواع الفولاذ التي تزيد متانتها على $600 kg/m^2$ وتزيد قساوتها على 22−20 روكويل، أما أنواع الفولاذ ذات المتانة الأقل فلا تخضع للتقصف الهيدروجيني بل للتقرح الهيدروجيني الذي ينتج عن امتصاص غاز كبريت الهيدروجين وظهوره بشكل بثور على السطح المعدني

ومن الجدير بالذكر أن ذرات الهيدروجين لا تستطيع أن تتحد على شكل جزيئات الهيدروجين إلا في المناطق الضعيفة في البنية البلورية (فراغات أو شقوق مجهرية) أما في البنية البلورية السليمة لا يستطيع غاز الهيدروجين التغلغل فيها، ولا يستطيع الخروج منها، ويمكن تمييز ثلاثة أنواع من التآكل الهيدروجيني:

أ- التآكل الهيدروجيني نتيجة نزع الكربون، وهذا النوع يحصل عند درجة حرارة تزيد على $200c^0$ مشكلا غاز الميتان

ب – التآكل الهيدروجيني نتيجة وجود مناطق عيوب فيزيائية (فجوة، شقوق مجهرية)

ج- التآكل الهيدروجيني نتيجة وجود إجهاد وهي الحالة الأكثر خطورة من حالات التآكل الهيدروجيني كونها تتطور بسرعة، وهي معقدة جداً، اما الإجهاد فليس من الضروري أن يكون إجهاداً مطبقاً حالياً، إنما قد يكون إجهاداً متبقياً في المعدن نتيجة معالجة حرارية خاطئة أو خطأ أثناء عمليه اللحام.

يستطيع الهيدروجين أن ينفذ إلى المعدن بطرق كثيرة (أثناء التشكل، اللحام، التنظيف بالحموض، الطلاء الكهروكيميائي).

أما غاز كبريت الهيدروجين يمكن أن يوجد في الهواء القريب من المصانع الكيميائية ومصانع معالجة النفط وكذلك يمكن أن يدخل إلى سائل الحفر من خلال الطبقات الغازية الحاوية على غاز كبريت الهيدروجين عبر الحجر الإسمنتي (مسامية كبيرة ونفوذية كبيرة) وينحل في سائل الحفر المتوضع فوق الحجر الإسمنتي في الفراغ الحلقي، كذلك يمكن أن يتشكل من خلال تفكك مركبات الليغنين التي توجد في سائل الحفر والتي تستعمل كمرفقات وهذه المركبات تتفكك حرارياً عند درجات الحرارة المرتفعة معطية غاز كبريت الهيدروجين وغاز ثاني أكسيد الكربون إذا كانت حموضة الوسط *PH>7* حيث أن كبريت الهيدروجين الجاف لا يشكل أي خطر تآكلي على العديد من المعادن لكن وجود الرطوبة إلى جانب كبريت الهيدروجين تلعب دوراً هاماً في تأثيره التآكلي.

- ✓ **التاكل المتزامن بالحت *Erosion–corrosion***

يحصل هذا النوع من التآكل نتيجة عدم تحمل طبقة الحماية المتشكلة على سطح المعدن لحركة الموائع وتجدر الإشارة إلى أن هذا النوع يختلف عن التآكل الحتي كون المعدن في التآكل الحتي لا يتحمل حركة الموائع، أما هنا فالمعدن يتحمل حركة الموائع بينما طبقة الحماية هي التي لا تتحمل حركه الموائع.

يصادف هذا النوع من التآكل في مناطق التغير المفاجئ لسرعه المائع مثل: الأكواع ومناطق تغير الأقطار.

3-4-3-التآكل الحيوي (البيولوجي) *Biogenic corrosion*

في التربة ضعيفة التهوية ذات التفاعل المعتدل يلاحظ تآكل شديد لمواسير التغليف، والسبب في ذلك عائد إلى التأثير الشديد لبعض أنواع البكتيريا ومن بينها البكتيريا الهوائية (التي تعتمد على الأكسجين الحر في الوسط المحيط) والبكتيريا اللاهوائية والتي تعيش في الأوساط الخالية من الأكسجين، بالنسبة لعملية التآكل الأخطر هي البكتيريا اللاهوائية وخاصة النوع *Desulfovibrio* التي تتمكن من إرجاع السولفات والشروط المثلى لنموها في التربة هي *PH= 5.5-8.5* ودرجة الحرارة $t=25-30\ c^0$ هذه البكتيريا يمكنها التواجد أيضاً في المياه الطبيعية القليلة الإشباع بالأكسجين ونتيجة لتأثيرها الحيوي يتشكل السولفيدات. تعمل هذه البكتيريا على تشكيل غاز كبريت الهيدروجين نتيجة التفاعل مع الهيدروجين المحيط من السطح المعدني في عمليه ارجاع شوارد الكبريتات (so_4^-)إلى شوارد الكبريتيد (S^{--}) ويحدث في النهاية نمو البكتيريا وتآكل الفولاذ حسب التفاعل التالي:

$$\text{Bacteria} + \text{SO}_4^- + 10\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{S} + 4\text{H}_2\text{O}$$

يحدث التآكل هنا بسبب كبريت الهيدروجين المتولد الذي يتحد مع المعدن ويشكل كبريتيد المعدن، كما يوجد نوع من البكتيريا يؤدي الى التآكل بتشكيلها بقع من المواد الحيوانية الرخوة تتكون تحتها الخلايا التآكلية، وهناك بكتيريا قادرة على العيش ضمن درجة الحرارة $T=40-80\ C^0$ والتي تعمل على تفكيك مركبات الليغنين التي توجد في سائل الحفر والمستعملة كمرققات، وهذه المركبات تتفكك حرارياً عند درجات الحرارة المرتفعة > $200\,c^0$ معطية غاز كبريت الهيدروجين وغاز ثاني أوكسيد الكربون إذا كانت حموضة الوسط $PH>7$، وهناك بعض أنواع البكتيريا تحول بعض مكونات الطبيعة ومنها مكونات المعادن والسبائك إلى شكل آخر بحيث تستفيد من هذا التحويل لاستمرار بقائها (كالكبريت والكربون) مخلفة مواد آكالة كالحموض مثل حمض الكبريت ومثال عليها بكتيريا تيوباسيل *Thiobacilli's* التي تتغذى على الكبريت الموجود في الحديد مخلفة حمض الكبريت والذي يعتبر ذا درجة تأكلية عالية:

$$2H_2S + O_2 \rightarrow 2S + 2H_2O$$

$$2S + 3O_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$$

كما يوجد أنواع آخرى من البكتيريا تشكل مستعمرات على سطوح المعادن والسبائك، وهذه المستعمرات تخلق تهوية متغيرة على سطح المعدن أو السبيكة، مما يؤدي الى تآكل هذه المعادن او السبائك ومثالنا على ذلك بكتيريا الحديد *(Iron bacteria)* ولها أنواع متعددة والتي تحول أوكسيد الحديدي إلى أوكسيد الحديد لاستمرار بقائها، حيث يتشكل غلاف على سطح مواسير التغليف من هيدروكسيد الحديد الذي يعتبر وسطاً مناسباً لنمو بكتيريا ارجاع السلفات (تواجد الشروط اللاهوائية) *(Sulfate-reducing bacteria (SRB))*

3-4-4-التأكل الميكانيكي Casing wear [9, 6]

تتعرض مواسير التغليف للتآكل الميكانيكي نتيجة دوران (رفع وإنزال) مجموعة مواسير الحفر أثناء متابعة العمل خلالها، (والذي يزداد مع زيادة عمق البئر وارتفاع زاوية ميل البئر)، إضافه إلى تأثير سائل الحفر وما يحويه من مواد صلبة حيادية ناتجة عن الحفر، كما تتعرض مواسير التغليف لتأكل شديد أثناء الإنتاج بسبب احتكاكها مع مواسير الإنتاج، وكذلك مع الأجهزة والمعدات التي تنزل بواسطه كبل (*wire line*) داخل البئر، كذلك يمكن أن تتعرض مواسير التغليف للتآكل بعد تثبيتها بالإسمنت في مناطق الميل، بسبب تعرضها للاحتكاك مع مجموعه مواسير الحفر عند متابعه تعميق البئر خلالها وكذلك عند حدوث انحناء لمواسير التغليف فوق المجال المسمنت، لكن هذا التآكل في الآبار الشاقولية يكون صغيراً ويتوزع بشكل منتظم إذا لم توجد مجالات ذات شدة انحناء كبيرة.

اما في الآبار المائلة فإن تآكل مواسير التغليف يحدث نتيجة التماس بين مجموعة مواسير الحفر الدوارة وبين مواسير التغليف في المقاطع المائلة وفوق مجال بناء زاوية ميل البئر (زيادة زاوية الميل ونقصان زاوية الميل)، وكذلك فوق المجال المسمنت عند حدوث انحناء لمواسير التغليف فوقه.

يمكن أن تتعرض مواسير التغليف للتآكل وذلك:

1. عند عدم تحقيق الأفقية التامة لطاحون الحفر أثناء التركيب.
2. عن عدم مركزة الطاحون مع مجموعة البكرات الثابتة بحيث تجبر الماسورة المضلعة على أخذ وضعية مائلة عن الاتجاه الشاقولي.
3. وجود بعض المواسير المقوسة ضمن مجموعة مواسير الحفر.
4. وجود بعض مناطق الوصل (الشرار) غير متمركزة مع محور مجموعة مواسير الحفر.
5. انحناء الماسورة المضلعة بتأثير ثقل الخرطوم المرن عند بداية الحفر، حيث يكون وزن مجموعة مواسير الحفر قليلاً.

3-4-4-1 - آلية التآكل *الميكانيكي* (*wear* mechanisms):

التآكل الميكانيكي هو نتيجة لعمليات احتكاك معقدة تحدث نتيجة التماس بين مجموعة مواسير الحفر ومواسير التغليف، إضافة إلى تأثير سائل الحفر وما يحويه من مواد صلبه حيادية ناتجة عن الحفر.

يحدث التآكل بشكل رئيسي نتيجة التماس بين وصلات مجموعة مواسير الحفر ومواسير التغليف (التماس بين جسم مواسير الحفر ومواسير التغليف يحدث عند تطبيق قوه شد متوسطة وعندما تكون شدة الانحناء أقل $6^\circ/100ft(2^\circ/10m)$ حيث يعتبر هذا التآكل في معظم الحالات مهملاً)، لذلك فإن أغلب الأبحاث في تآكل مواسير التغليف تعتمد دراسة التماس بين معدن مواسير التغليف ومعدن وصلات مواسير الحفر.

إن حمولة التماس وخشونة السطح وقساوته والشكل الجيومتري (الهندسي) والتركيب الكيميائي لمواسير التغليف ولوصلات مواسير الحفر، وتركيب سائل الحفر تحد أي نوع من آلية التآكل الميكانيكي التي سوف تحدث.

وهناك ثلاثة أنواع من آليات التآكل الميكانيكي[9]:

1. التآكل بين وصلات مواسير الحفر (الملساء) ومواسير التغليف.

Two-body adhesive wear

2.التاكل بين وصات مواسير الحفر (المعرضة للتقسية) ومواسير التغليف.

Two-body abrasive wear

3.التآكل بين وصلات مواسير الحفر (الملساء) ومواسير التغليف، والتي يفصل بينهما الجزيئات الصلبة التي يحويها سائل الحفر مثل البارايت.

Three-body abrasive wear

1.التآكل بين وصلات مواسير الحفر (الملساء) ومواسير التغليف.

يحدث هذا التآكل بين وصلات مواسير الحفر الملساء (فولاذ مصقول) وبين مواسير التغليف نتيجة لضغط تماس عال، ويدعى التخدش (*galling*) أو التآكل بالاحتكاك، وتتميز آلية هذا التآكل بوجود طبقة موضعية من اللحام على وصلة مواسير الحفر والتي تنفصل نتيجة الحركة النسبية للسطوح المتقابلة والتي تحدث خدوشاً في جسم مواسير التغليف ويكون ناتج التآكل على شكل قشور *(flake)*.

2.التأكل بين وصلات مواسير الحفر (المعرضة للتقسية) ومواسير التغليف.

يعرف هذا النوع من التآكل بالتشظي (*chipping*) ويحدث نتيجة للاحتكاك بين الجزيئات الحادة المتوضعة على وصلات مواسير الحفر (المعرضة للتقسية) وبين مواسير التغليف نتيجة لجهد تماس موضعي عال بين هذه الجزيئات الحادة ومواسير التغليف ويكون ناتج التآكل على شكل شرائح معدنية رقيقة (*chips*) تشبه الشرائح الناتجة عن عمل المخرطة.

***3*.التآكل بين وصلات مواسير الحفر (الملساء) ومواسير التغليف، والتي يفصل بينهما الجزيئات الصلبة التي يحويها سائل الحفر**

وفي هذه الحالة إن سطوح التماس بين وصلات مجموعة مواسير الحفر الملساء ومواسير التغليف تفصل بالجزيئات الصلبة، التي يحويها سائل الحفر مثل البارايت حيث يحدث هذا النوع من التآكل، ويدعى أيضاً بالشحذ أو التجليخ (grinding)، حيث يحمل سطح مواسير التغليف بشكل دوري بالجزيئات الصلبة التي يحويها سائل الحفر نتيجة لدوران مجموعة مواسير الحفر، ويؤدي هذا الى تعب المعدن وتقصفه، ويؤدي في حالات قصوى إلى حدوث شقوق ميكروية على سطح المعدن حيث تتطور هذه الشقوق وهذا يعتمد على الحمولات العظمى وبالتالي على قساوة الجزيئات الصلبة التي يحويها سائل الحفر. وتكون نواتج عمليات التشقق الميكروي على شكل مسحوق ناعم (powder)

إن ميكانيكية (آلية) التآكل لهذه الأنواع الثلاثة تميز بعوامل التآكل (*wear factors*) وعامل التآكل يمثل كميه التآكل التي تحدث عند كل آلية من آليات التآكل.

3-4-4-2 -العوامل المؤثرة على عمق التأكل:

1. ضغط التماس بين وصلات مجموعة مواسير الحفر ومواسير التغليف
2. سطوح التماس:
   - أ- الشكل الهندسي (الجيومتري) للسطوح المتماسة
   - ب - الخشونة النسبية للسطوح المتماسة.
   - ج- نوع المعدن المشكل للسطوح المتماسة.
3. السرعة النسبية وزمن تقابل السطوح المتماسة.
4. تركيب سائل الحفر.

3-5- *مواضع* تآكل مواسير التغليف داخل البئر[4,9] :

تتعرض مواسير التغليف للتآكل في ثلاثة مواضع، يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار أثناء تصميم مواسير التغليف:

- **التآكل الداخلي لمواسير التغليف الإنتاجية الذي ينشأ عن سوائل المكمن داخل البئر**

internal production casing corrosion due to reservoir fluid within the well

يتعرض السطح الداخلي لمواسير التغليف الإنتاجية (أسفل باكر الإنتاج) للتآكل نتيجة تماسه مع سوائل المكمن (الطبقة المنتجة)، أما السطح الداخلي (فوق باكر الإنتاج) فيتعرض أيضاً للتآكل أثناء عمليات الإنتاج بالضخ وعمليات الإصلاح والمعالجة وكذلك عند حدوث تهريب بين الباكر ومواسير الإنتاج، كذلك يمكن أن تتعرض مواسير التغليف الوسطية لتأثير مشابه خلال دوران السوائل المندفعة أثناء الحفر.

- **تآكل مواسير التغليف الإنتاجية (أسفل باكر الإنتاج):**

Production casing below production packer

تتعرض مواسير التغليف الإنتاجية (أسفل باكر الإنتاج) باستمرار للتأثير التآكلي لسوائل المكمن، حيث أنه من غير الممكن استخدام مانع تآكل داخل مواسير الانتاج وكذلك من غير الممكن استعادة هذا الجزء من المواسير لصيانته، كما تتعرض هذه المواسير لتأثير المياه غير المعالجة والتي تحوي (O_2, H_2S, CO_2) والتي يتم حقنها داخل البئر للحفاظ على ضغط الطبقة والتي تؤدي إلى حدوث

تآكل او تآكل حتي، كما تتعرض مواسير التغليف الإنتاجية لتأثير السوائل التي تستخدم لتحسين الطبقه المنتجة (استخدام حمض كلور الماء) ولمنع تأثير هذه السوائل على هذا الجزء من مواسير التغليف الإنتاجية فإن معيار اختيار الخلائط المصنوعة منها مواسير التغليف (نوعية مواسير التغليف) يجب أن يطبق بحيث يستطيع هذا المعدن أن يستخدم لفترة طويلة حتى نهايه استثمار المكمن، حيث لا يوجد قوانين عامة مصاغة لتوجه هذا الاختيار، حيث تلعب الخبرة دوراً مهماً في ذلك.

- **تآكل مواسير التغليف الإنتاجية (فوق باكر الإنتاج):**

Production casing above production packer

تتعرض مواسير التغليف الإنتاجية (فوق باكر الإنتاج) لتأثير سوائل الإنهاء التي تترك في الفراغ الحلقي بين مواسير التغليف الإنتاجية ومواسير الإنتاج، كما أن تلوث سوائل الإنهاء بالكلور وغاز كبريت الهيدروجين قد يؤدي إلى تآكل نخري وسوف يصبح أكثر خطورة مع زيادة درجة الحرارة، ولكن هذه التأثيرات يمكن ان يتم تلافيها خلال فترة قصيرة بحيث يبقى الضرر الناتج عنها محدوداً، ويعتبر تلوث الفراغ الحلقي بالأوكسجين لفترة طويلة عادة غير وارد، ولكن أثناء الإنتاج بالضخ فان التلوث بالأوكسجين هو خطر جداً وقد ينتج عنه أشكال من التآكل الخطرة ولكن من جهة آخرى فإن استخدام الفولاذ الكربوني المصنوعة منه مواسير التغليف لا يزال يمثل الطريقة الأكثر اقتصادية.

- **التآكل الداخلي والخارجي لمواسير التغليف الذي ينشا عن سوائل الحفر والإصلاح والإنهاء وسوائل التحسين:**

Internal&external casing corrosion due to drilling work over, completion and stimulation fluids

إن السوائل التي تستخدم خلال عمليات الحفر والإنهاء يمكن أن تكون أكالة أو تصبح أكالة عندما تتعرض لدرجة حرارة عالية ولفترة طويلة ومثال على ذلك سوائل الحفر والسوائل المالحة التي لها *PH* منخفضة وكذلك سوائل الحفر والإنهاء التي تترك في الفراغ الحلقي والتي يمكن أن تصبح أكالة نتيجة انخفاض درجة الحموضة *PH* مع الزمن أو بسبب زيادة درجه الحرارة، أما السوائل التي تستخدم لتحسين الطبقة المنتجة فيجب أن تحدد طبيعتها الأكالة.

- **الفراغ الحلقي بين مواسير التغليف: Annuli between casing strings**

إن بعض سوائل الحفر أو السوائل المالحة التي تترك في الفراغ الحلقي بعد إنهاء البئر يمكن أن تتخرب (تفسد) مع الزمن وخاصة عند ارتفاع درجة الحرارة وهذا يؤدي إلى نقصان درجة الحموضة *(PH<7)* وبالتالي تتعرض مواسير التغليف باستمرار لتأثير هذه السوائل الحمضية , كما أن وجود بكتيريا إرجاع السلفات *(SRB)* في سوائل الحفر والإنهاء يمكن أن تؤدي إلى إنتاج غاز H_2S وبالتالي نقصان في درجة ال*PH* حيث يمكن منع هذا التأثير من خلال استخدام سوائل الحفر وسوائل الإنهاء بدرجة عالية *(PH>10)* حيث أنها تلعب دوراً في منع نشاط (فعالية) بكتيريا إرجاع السلفات.

- **التآكل الخارجي لمواسير التغليف الذي ينشأ عن السوائل التي تحويها الطبقات الجيولوجية:**

External casing corrosion due to formation fluid

تتعرض مواسير التغليف غير المستمنة للتآكل نتيجة لتماسها مع الطبقات الجيولوجية الحاملة للمياه والتي تحوي عوامل أكالة، مثل: H_2S, CO_2, O_2 أوأية عوامل أكالة أخرى، كما أن اختلاف تراكيز الغازات المنحلة في الطبقات الجيولوجية الحاملة للمياه يمكن أن يؤدي إلى تشكيل خلية غلفانية، حيث تتسارع عمليه التآكل لمواسير التغليف ويمكن منع هذا التآكل بإجراء عمليه السمنتة لهذه الطبقات والتي تعطي وسطاً قلوياً بجانب السطح الخارجي لمواسير التغليف *(PH>=10)* والتي في حال فشلها نلجأ إلى عمليات إصلاحية لهذه المواسير، كذلك تتعرض مواسير التغليف غير المسمنتة لتأثير الموائع الطبقية التي تحويها الطبقات المنتجة، كذلك يمكن أن تتعرض مواسير التغليف عند السطح للتآكل (الناتج عن مصادر خارجية *(*External sources)، أما بالنسبة للآبار البحرية، فإنها تتعرض لتأثير المياه المالحة والأوكسجين، حيث أن التعرض لمياه البحر بشكل مستمر يعطي مشكلة خاصة لهذه الآبار.

الفصل الرابع

اختبارات التآكل

Corrosion testing

4-1- *مقدمة* (Introduction):

تجرى آلاف الاختبارات كل عام، إلا أن قيمة المعلومات وموثوقيتها تعتمد على التفاصيل المستخدمة أثناء الاختبار، ولكن لسوء الحظ كثير من الاختبارات لا تجرى أو لا توثق بشكل دقيق والمعلومات التي نحصل عليها تؤدي إلى نتائج غير جيدة.

وتعتبر الاختبارات المخططة والمنجزة بشكل جيد من أهم العوامل في اختبارات التآكل بالإضافة إلى مطابقة الشروط والظروف كما هو الحال في الأوساط السائدة أثناء العمل والابتعاد عن هذه الشروط يؤدي إلى نتائج أقل موثوقية.

4-2-تصنيف (أنواع) الاختبارات [9, 6] :

تشكل اختبارات التآكل أساساً للتحكم (أو إعاقة) في عملية التآكل، ونظراً لتعدد واتساع طرق الاختبار المطبقة في البلدان المختلفة ستقتصر على الطرق الرئيسية الأكثر انتشاراً وبذلك يمكن تصنيف طرق الاختبار كلها وبشكل مناسب إلى ما يلي:

4-2-1-الاختبارات المخبرية laboratory tests

تتميز هذه الاختبارات باستخدام عينات صغيرة (المعدن) وحجم قليل من السائل المراد إجراء الاختبار عليه، وشروط فعلية مشابهة إلى حد بعيد للشروط السائدة أثناء العمل، وتعتبر هذه الاختبارات اختبارات مسرعة وتستخدم الاختبارات المخبرية لعدة أهداف:

1. لدراسة كيميائية وآلية التآكل.
2. للكشف وتحديد الظروف التي يمكن أن تستخدم فيها المعادن أو الخلائط المعدنية المختلفة.
3. تحديد التأثيرات الممكنة للخلائط المعدنية المختلفة على خصائص الوسط الذي تعمل به وتكون معرضة لفعله.
4. تستخدم لتحديد مقدار التغير في تركيب الخلائط لتطويرها ورفع مقاومتها للتآكل.
5. يمكن أن تستخدم الاختبارات المخبرية للوقاية.

4-2-2-الاختبارات الحقلية Field tests

في هذه الاختبارات تفحص العينات المختلفة تحت نفس الظروف والشروط السائدة اثناء العمل

4-2-3-اختبارات الوحدة الصناعية التجريبية (نصف مصنع)

تجرى الاختبارات في وحدة ذات قياس صغير والتي تطابق بشكل أساسي (نسخة طبق الأصل) للعمليات المزمع بها في الوحدات ذات القياس الكبير (large scale plant) حيث يستلزم نوع المواد الأولية –التراكيز –درجة الحرارة –حجم السائل بالنسبة للمساحة المعرضة من المعدن.

ولكن هناك واحدة من السيئات الممكنة وهي بأن شروط العمل ربما تكون مختلفة بشكل واسع في محاولة لتحديد ظروف العمل المثالي، وبغض النظر عن الطرق المتبعة في الاختبار وعن الهدف من وضعها لا بد من الآخذ بعين الاعتبار بعض الملاحظات الهامة:

4-3- مراحل دراسة تآكل العينات مخبرياً [9]:

- **المواد والعينات المأخوذة** Materials & specimens (coupons)

يتعدد شكل وحجم العينات المأخوذة وغالباً ما يكون الاختبار قضية ملائمة، فغالباً ما تستخدم عينات بأشكال مختلفة (مربعة، مستطيلة، أسطوانية، أقراص) إلا أن الأشكال المنبسطة تفضل عموماً لسهولة التعامل معها ولسهولة تحضير سطحها، ففي الاختبارات المخبرية تستخدم بشكل واسع عينات بطول 2 ً وبعرض 1 ً وبسماكات تتراوح بين ً $(\frac{1}{4}-\frac{1}{6})$.

أما في الاختبارات الحقلية أو في اختبارات الوحدة الصناعية التجريبية فتكون العينات ذات أبعاد أكبر، تتميز العينات الصغيرة في أنها تسمح بقياس دقيق للأبعاد وللوزن، وخاصة من أجل الاختبارات التي تجرى خلال فترة قصيرة أو عندما تكون سرعة التآكل قليلة.

- **كيفية تحضير العينة (تحضير السطح):**

عملياً يجب أن يكون سطح عينة الاختبار مطابقاً للسطح الحقيقي المستخدم أثناء الاختبار ولكن هذا الأمر يصعب تحقيقه، لذلك فإننا نستخدم عادة معدناً ذا سطح نظيف (نموذجي) لكي تسهل المقارنة مع النتائج الأخرى وتتلخص عمليات (تحضير السطح) للتجربة بما يلي:

1. قص العينات اعتباراً من الماسورة الأساسية: باستخدام وسائل متطورة ومكلفة على شكل مستطيل أبعاده 4×3 cm وبعدد كافٍ.
2. تشذيب المقاطع المقصوصة: (تشذيب حواف وزوايا العينات) وتنعيم سطوحها بشكل جيد تلافياً لوجود الشقوق أو الخدوش، التي يمكن أن تزيد من السطح وتؤثر على نتائج القياس.

هناك طريقة تستخدم بشكل واسع لصقل (تنعيم العينات) وذلك باستخدام قماش سنفرة NO 120 أو ورق سنفرة بشرط أن نتجنب التسخين الزائد للعينة.

3. التأكد من أن السطوح الخارجية للعينة لا يعاني من عيوب أو خدوش للطبقة الواقية (إن وجدت) وذلك بالفحص بالعين المجردة أو باستخدام المجهر وبدرجات تكبير مختلفة واستبعاد أية عينة تعاني من أية تشوهات (ناجمة عن الماسك (الملزمة) أثناء القص) أو أية خدوش.

- **القياس والوزن (Measuring and weighting):**

بعد إنهاء (تحضير) سطوح العينات تقاس أبعاد العينة باستخدام بياكوليس دقيق (حتىmm 0.01) ومن ثم حساب السطح المعرض للتآكل (S) بشكل دقيق.

بعد القياس يتم إزالة الشحم عن العينة وغسلها بمادة مذيبة كالأسيتون ثم تجفف وتوزن بميزان دقيق وحساس (يقيس حتى 0.0001gr)، ثم تعرض العينة لفعل الوسط الأكال مباشرة أو تخزن في مجفف، خاصة إذا كانت المادة غير مقاومة للتآكل الجوي.

- **آلية التعريض Exposure techniques:**

تستخدم طرق عديدة في تعليق العينات (بعد ترقيمها) من أجل تعريضها لفعل الوسط الأكال سواء كان في المخبر أو في الوحدة الصناعية التجريبية ويجب أن تؤخذ الاعتبارات التالية:

1. يجب أن يأخذ التآكل طريقاً سهلاً في الوصول للعينة.
2. يجب ألا تفشل عمليات التعليق أثناء الاختبار.
3. يجب عزل العينات كهربائياً عن طريق التماس مع معدن آخر.
4. ينبغي للعينات أن تتخذ موقعاً بشكل مناسب في حال كانت الدراسة بالغمر الكامل أو الجزئي للعينة.

- **زمن الاختبار Duration of test:**

يعتبر الاختيار المناسب لزمن وعدد فترات تعرض العينة لفعل الوسط الأكال بالإضافة إلى العوامل السابقة من الأمور الهامة جداً والتي إذا لم تؤخذ بعين الاعتبار فسنحصل على نتائج خاطئة (مضللة)، حيث يجب أن تستخدم فترتين على الأقل، حيث أن هذه الطريقة تزودنا بمعلومات عن تغير سرعة التآكل مع الزمن كما يمكن أن تكشف عن أخطاء التوزين.

إن سرعة التآكل يمكن أن تزداد أو تنقص أو تبقى ثابتة مع الزمن ولكن غالباً ما يكون معدل التآكل (الهجوم) الأولى مرتفعاً ومن ثم يتناقص.

هناك قاعدة لفحص نتائج الاختبار مع اعتبار زمن الاختبار قليلاً.

$$\frac{2000}{mils\ per\ year} = hours(duration\ of\ tests)$$

تعتمد هذه الصيغة على القاعدة العامة وهي أن معدل التآكل المنخفض يجري بزمن أطول.
فمثلاً إذا أعطيت عينة ما معدل تآكل 10 mils per year (10 ميل/سنة) فيجب إجراء الاختبار في 200 ساعة (200 hours) .

- **تنظيف العينة بعد التعريض للتآكل:**

يعتبر تنظيف العينة بعد التعرض للتآكل من الخطوات الأكثر أهمية في اختبارات التآكل ومن المهم أيضاً الكشف المرئي على العينات (يفضل بالتكبير من 15-10 مرة بالإضافة للعين المجردة) قبل تنظيفها حيث أن يزودنا بمعلومات تتعلق بأسباب أو آلية التآكل. فمثلاً الرواسب أو القشور المعدنية قد تكون السبب في حدوث التآكل النقطي، إن تغير وزن العينة غالباً يستخدم لحساب سرعة التآكل وتبعاً لذلك فإن الإزالة الكاملة أو غير الكاملة لمنتجات التآكل سوف تنعكس مباشرة على سرعة التآكل، هناك إجراء شائع يستخدم لتنظيف العينات وذلك بوضع العينة تحت تيار مياه الصنبور ويفرك السطح بشدة بواسطة سدادة مطاطية ولكن إذا التصقت كميات لا يمكن تجاهلها من نواتج التآكل على سطح العينة فإن الطريقة السابقة لا تحدد معدل (سرعة) التآكل بشكل صحيح لذلك يجب استخدام طرق تنظيف أكثر فعالية والخطر هنا هو أن يزال المعدن غير المتآكل ولا يجوز استخدام هذه الطريقة في حال كان معدل التآكل منخفضاً بشكل كبير.

يمكن تصنيف طرق التنظيف إلى:

- ميكانيكية كالحك بفرشاة أو مادة حاكة أو باستخدام معجون رملي أو سدادة مطاطية.
- كيميائية، استخدام مواد كيميائية ومذيبات.

4-4- طرق الاختبار (طرق تقييم عملية تآكل مواسير التغليف)[6,9]

4-4-1-اختبار الفقد بالوزن weight – loss tests

وهي الاختبارات (القياسات) الأكثر انتشاراً وفيها يتم وزن العينة بعد تنظيفها جيداً ومن ثم تعرض لفعل الوسط الأكال ولفترة زمنية محددة ثم تنظف من جديد (نزع نواتح التآكل) ومن ثم يعاد وزنها من جديد، حيث يحدد مقدار تناقص وزن العينة بالعلاقة التالية:

$$\Delta W = W_1 - W_2 \qquad (1-4)$$

حيث:

$-\Delta W$ مقدار تناقص وزن العينة (gr)

$-W_1$ وزن العينة قبل التجربة (gr)

$-W_2$ وزن العينة بعد التجربة (gr)

وبالتالي فإن الفقد بالوزن بالنسبة لمساحة محددة ولزمن محدد أي أن سرعة التآكل (corrosion rate) R_{cor} تعطى بالعلاقة التالية:

$$R_{cor} = \frac{\Delta W}{S.t} \qquad (2-4)$$

S : سطح المعدن الواقع على تماس مع السائل (m^2)

t : زمن التجربة (day).

4-4-2-تعيين عمق التآكل (depth Penetration) **داخل المعدن والذي يستخدم في تحديد عمر المعادن أو الخلائط:**

يحدد العمق الوسطي للتآكل بالعلاقة التالية:

$$h_p = \frac{\Delta W}{S.t} = \frac{R_{cor}}{\rho} \qquad \text{mm/year} \qquad (3-4)$$

حيث أن:

ρ-كثافة المعدن المعرض للتأكل

h_p :عمق التآكل داخل المعدن

علماً أن هذه الطريقة في تقييم درجة التآكل تستخدم في التآكل المتجانس فقط

الفصل الخامس

دراسة تأثير سوائل الحفر على مواسير التغليف

Study of Drilling Fluids Effect on The Casing

- **مقدمة:**

إن جميع الآبار التي تحفر لإنتاج النفط والغاز (أو لحقن الموائع في الطبقة) يتم تدعيم جدرانها الصخرية بمجموعة متداخلة (تلسكوبية) من الأنابيب المعدنية، أُتفق على تسميتها مواسير التغليف (Casing) [9].

تبطن مواسير التغليف من الخارج بسائل تبطين (سائل إسمنتي)، يضخ كي يملأ الفراغ الخلقي بين مواسير التغليف وجدران البئر، ثم يتصلب كي يؤمن للمواسير متانة وعازلية كافية لتأدية وظائفها الرئيسة في الحفاظ على ثبوتية (استقرار) جدران البئر وعزل الطبقات الحاملة للمياه عن بعضها وعن الطبقات الحاملة للنفط أو الغاز والتحكم بضغوط الآبار خلال عمليات الحفر والإنتاج والإصلاح، كما أن مواسير التغليف تشكل قاعدة متينة ومحكمة لتثبيت المعدات المختلفة التي تنزل في البئر أو التي تجهز بها فوهته أثناء الحفر(أجهزة منع الانفجار) أو أثناء الإنتاج (كشجرة الميلاد ومواسير الإنتاج).

لكن مشكلة بقاء سائل الحفر في الفراغ الحلقي خارج مواسير التغليف يجعل هذه الأخيرة عرضة لاجهادات شتى (تآكل من قبل محتويات الطبقات المفتوحة–ضغط خارجي كبير ناتج عن انهيار جدران البئر....الخ) والتي تؤدي إلى إنقاص تدريجي لمقاومتها والتقليل من عمرها وعمر البئر

5–1–هدف البحث: يهدف هذا البحث إلى زيادة العمر الاستثماري للآبار النفطية والغازية. وذلك من خلال تلافي المشاكل التي يمكن أن تتعرض لها مواسير التغليف نتيجة تأثير سوائل الحفر المختلفة، والسوائل الأخرى التي تتواجد عادة في الفراغ الحلقي خلف مواسير التغليف في الأماكن غير المسمنتة، حيث إن دراسة المشكلة وإمكانية تلافيها سوف توفر في المستقبل أثناء عمليات الإنتاج المختلفة من البئر التقليل من كلفة العمليات الإصلاحية المحتملة على المواسير، وبالتالي سوف تساعد في تقليل كلفة إنتاج المتر المكعب الواحد من النفط المستخرج ,

5–2– الدراسة المرجعية وتقييم الواقع الحقلي:

أكدت الأبحاث [3,10, 1,2] المتعلقة بمعدل تأكل مواسير التغليف أن معدل تأكل مواسير التغليف يتعلق بشروط الوسط (ضغط، حرارة، PH، تركيز شوارد الكلور وتركيز الأملاح) الذي تعمل عنده مواسير التغليف كما يتعلق بتركيب وخواص سائل الحفر كما أكدت هذه الأبحاث أن معدل التآكل يتعلق بالتركيب الكيميائي للخلائط المعدنية المصنوعة منها مواسير التغليف، وأن

الإجهادات التي تتعرض لها مواسير التغليف تلعب دوراً في زيادة معدل التآكل، كما أظهرت الأبحاث [**1**,2,3] التي أجريت على مواسير تغليف من نوع (Q-125, T-95) وباستخدام ماء مشبع بالملح مع مزيج من غاز (CO_2 , CH,H_2S) أن معدل التآكل يتعلق بتركيز كبريت الهيدروجين وتغير قيمة الضغط الجزيئي لغاز ثاني أكسيد الكربون وأن مواسير التغليف من نوع Q-125 تتمتع بمقاومة أعلى للتآكل (معدل تآكل أقل) من مواسير التغليف من نوع T-95 ، وأن زمن استثمار البئر يتعلق بالاختيار المناسب لمواسير التغليف الإنتاجية كونها على تماس دائم مع السوائل المنتجة من الطبقات ومع سوائل الحفر في المجالات غير المسمنتة، كما أكدت الأبحاث [5] أن عملية السمنتة ونوع الإسمنت المستخدم والإضافات التي يعالج بها السائل الإسمنتي والتي تعطي حجراً اسمنتياً يتمتع بترابط جيد (ترابط غير مسامي وغير نفوذي) مع جدران البئر ومع مواسير التغليف يلعب دوراً هاماً في منع تأكل السطح الخارجي لمواسير التغليف.

ومن خلال تحليل الواقع الحقلي لعدد من الآبار، (الجدول (5-1))، نلاحظ عدم وجود إسمنت (إسمنت حر) خلف هذه المواسير وهذا يعني بقاء جزء من مواسير التغليف غير مسمنت في هذه الآبار وهذا سوف يعرض مواسير التغليف مستقبلاً للتآكل، وما يتبع ذلك من زيادة في كلفة العمليات الإصلاحية للآبار وبالتالي من زيادة كلفة البئر.

الجدول (5-1): نوع ترابط الإسمنت

رقم البئر	قطر مواسير التغليف انش	المجال M	نوع ترابط الإسمنت
أبو رباح15	9 5/8	125-السطح	إسمنت حر
	7	2100-1702	
شمال الفيض8	7	2170-1845	إسمنت حر
		1427-السطح	
	9 5/8	1570-1365	إسمنت حر
		1175-السطح	
صدد7	9 5/8	1810-1760	إسمنت حر

5-3- مواد وطرق البحث:

5-3-1-الأجهزة المستخدمة في البحث:

وهي الأجهزة التي استخدمت لقياس الخواص الهامة لسائل الحفر:

- الوزن النوعي لسائل الحفر

- لزوجة سائل الحفر
- فاقد الرشح
- درجة الحموضة أو القلوية PH
- حمامات مائية إلكترونية لتأمين درجة الحرارة اللازمة لإجراء الدراسة المخبرية.

-عبوات زجاجية سعة نصف ليتر والتي تستخدم لوضع العينات المعدنية من مواسير التغليف بعد أن تملأ العبوة بنموذج السائل المراد دراسة تأكل المعدن فيها.

5- 3-2- نماذج مواسير التعليف المستخدمة:

تم استخدام مواسير تغليف من نوع k-55 وتتلخص عمليات تحضير العينات للتجربة بما يلي:

1- قص العينات اعتباراً من الماسورة الأساسية باستخدام وسائل متطورة ومكلفة

2- تشذيب المقاطع المقصوصة (تشذيب حواف زوايا العينات) وتنعيم سطوحها بشكل جيد تلافياً لوجود الشقوق التي يمكن أن تزيد من السطح وتؤثر على نتائج القياس

3- التأكد من أن السطوح الخارجية للعينة لا تعاني من عيوب أو خدوش وذلك بالفحص بالعين المجردة أو باستخدام المجهر وبدرجات تكبير مختلفة واستبعاد أي عينة تعاني من أية تشوهات ناجمة عن الماسك (الملزمة) أثناء القص.

4- غسل العينات بشكل جيد بالكحول الإيتيلي وإبقاءها فيه للعمليات اللاحقة.

5- وزن العينات بعد تجفيفها من الكحول بميزان دقيق وحساس (يقيس حتىg 0.0001)

6- قياس أبعاد العينة وسماكة الجدار باستخدام بياكوليس دقيق (حتىmm0.01) ومن ثم حساب السطح المعرض للتأكل "S" وتدوين هذه المعلومات إلى جانب كل عينة في دفتر التجارب، كما في الجدول التالي:

الجدول (5-2): العينات المستخدمة في الدراسة

رقم العينة	الطول mm	العرض mm	السماكة mm	الوزن g	مساحة سطوح التماس Cm^2
1	41.40	29.35	6.80	59.6768	32.789
2	43.45	28.75	6.65	59.7618	33.451
3	41.85	28.75	6.75	57.2245	32.459
4	40.95	29.40	7.20	58.8262	33.074
5	40.75	28.75	6.75	56.1755	31.679

32.945	59.9177	6.80	29.55	41.35	6

5-3- 3- نماذج السوائل المستخدمة كأوساط تأكل:

تم استخدام سائل حفر حقلي جرى إحضاره مباشرة عن الحفارة، بالإضافة إلى سائل حفر مشبع بالملح تم تحضيره في المخبر كنماذج لأوساط مسببة للتأكل، في الجدول (5-3) نبين أنواع السوائل المستخدمة كأوساط تأكل وخواصها.

الجدول (5-3): أنواع السوائل المستخدمة كأوساط تأكل وخواصها.

الرقم	نوع السائل	الوزن النوعي	فاقد الرشح	القلوية
		gf/cm^3	ml/30min	-
1	سائل حفر حقلي	1.87	8	11
2	سائل حفر مشبع بالملح	1.22	13.5	8

5-3-4- طريقة إجراء التجارب المخبرية:

تتلخص طريق إجراء التجارب بوضع العينة المدروسة (بعد التأكد من وزنها W_1 وجفافها تماماً من الكحول) في وعاء زجاجي مليء بنموذج السائل المراد دراسة تآكل المعدن فيه بحيث تبقى معلقة في وسط الوعاء ولمنع البخر وزيادة تركيز الأملاح يحكم إغلاق الوعاء وكذلك لإغلاق ثقب عتلة التثبيت (تم استخدام مادة السيليكون الحراري لهذا الغرض).

يدون على السطح الخارجي للوعاء تاريخ وضع العينة ونوع السائل والمعدن ورقم التجربة ولتلافي تأثير نوع السلك ومساحة تماسه على النتائج جرى اختيار أسلاك غير معدنية ورفيعة (شعرية) وتوحيد مكان الربط لجميع العينات.

وبعد مرور الفترة الزمنية المقررة لكل تجربة نقوم بفتح الوعاء بحذر ونرفع العينة ونغسلها جيداً بالكحول ونجففها حتى ثبات الوزن W_2 وندون الملاحظات والنتائج في سجل التجارب.

5-3-5- طريقة تقييم عملية تأكل مواسير التغليف [6]:

5-3-5-1- الطريقة الوزنية:

حيث يحدد مقدار تناقص وزن العينة (الفقد بالوزن) بفعل التآكل بالعلاقة التالية:

$$\Delta W = W_1 - W_2$$

حيث أن:

ΔW– مقدار تناقص وزن العينة (gr).

W_1– وزن العينة قبل التجربة (gr).

W_2–وزن العينة بعد التجربة (gr).

ولحساب معدل أو سرعة التآكل الوسطية خلال زمن معين نستخدم العلاقة:

$$R_{cor}=\Delta W/S\ .t$$

حيث أن:

S–سطح المعدن الواقع على تماس مع السائل (m^2).

t–زمن التجربة (day).

5–3–5–2 تحديد عمق التآكل داخل المعدن [6,9]:

يحدد العمق الوسطي للتآكل بالعلاقة التالية:

$$h_p = \frac{\Delta W}{S.t} = \frac{R_{cor}}{\rho} \qquad \text{mm/year} \qquad (3-4)$$

حيث أن:

ρ–كثافة المعدن المعرض للتأكل

h_p :عمق التآكل داخل المعدن

5–4–نتائج الدراسة المخبرية باستخدام الطريقة الوزنية:

5–4–1– تأثير سائل الحفر (حقلي) على مواسير التغليف من نوع k–55.

نبين في الجدول (1) الحسابات الوسطية لمعدل التآكل وعمق التآكل وذلك خلال فترة زمنية 30 يوم

الجدول (1): الحسابات الوسطية لمعدل التآكل وعمق التآكل

hp. 0^{-3}	R_{cor}	S	ΔW	W_2	W_1	نوع الخليطة
mm/year	g/m^2.day	$m^2.10^{-4}$	g	G	g	
26.78	0.5764	32.789	0.0567	59.6201	59.6768	k–55

5–4–2–تأثير سائل الحفر(حقلي) على مواسير التغليف من نوع k–55.

في الجدول (2) نبين الحسابات الوسطية لمعدل التآكل وعمق التآكل نتيجة تأثير سائل الحفر على مواسير التغليف (k–55) وذلك خلال فترة زمنية 90 day.

الجدول (2): الحسابات الوسطية لمعدل التآكل وعمق التآكل

$h_p.10^{-3}$.	R_{cor}	S	ΔW	W_2	W_1	نوع الخليطة
mm/year	g/m^2.day	$m^2.10^{-4}$	g	g	g	
11.11	0.2391	32.945	0.0709	59.8468	59.9177	k–55

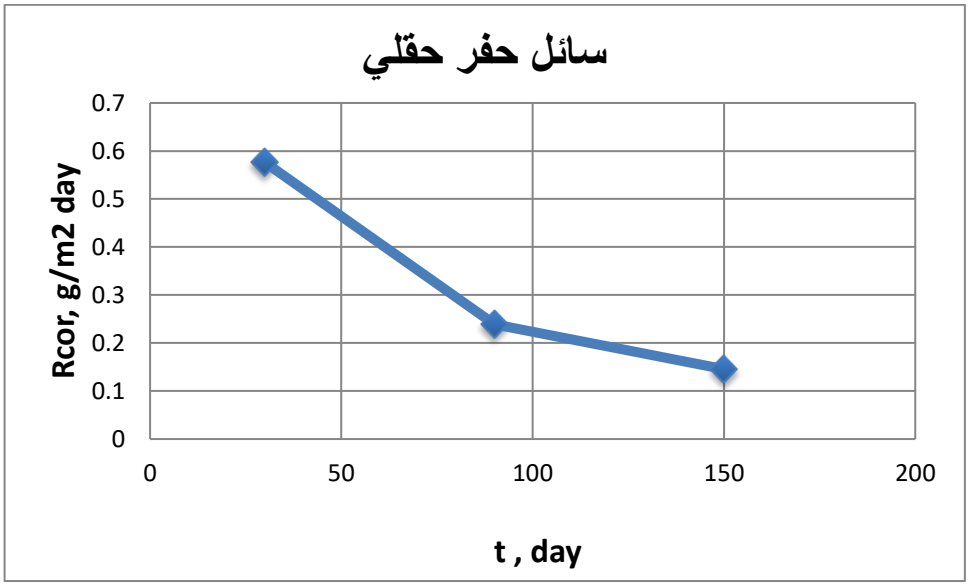
5-4-3-تأثير سائل الحفر(حقلي) على مواسير التغليف من نوع k-55.

في الجدول (3) نبين الحسابات الوسطية لمعدل التآكل وعمق التآكل نتيجة تأثير سائل الحفر على مواسير التغليف وذلك خلال فترة زمنية 150 day

الجدول (3): الحسابات الوسطية لمعدل التآكل وعمق التآكل

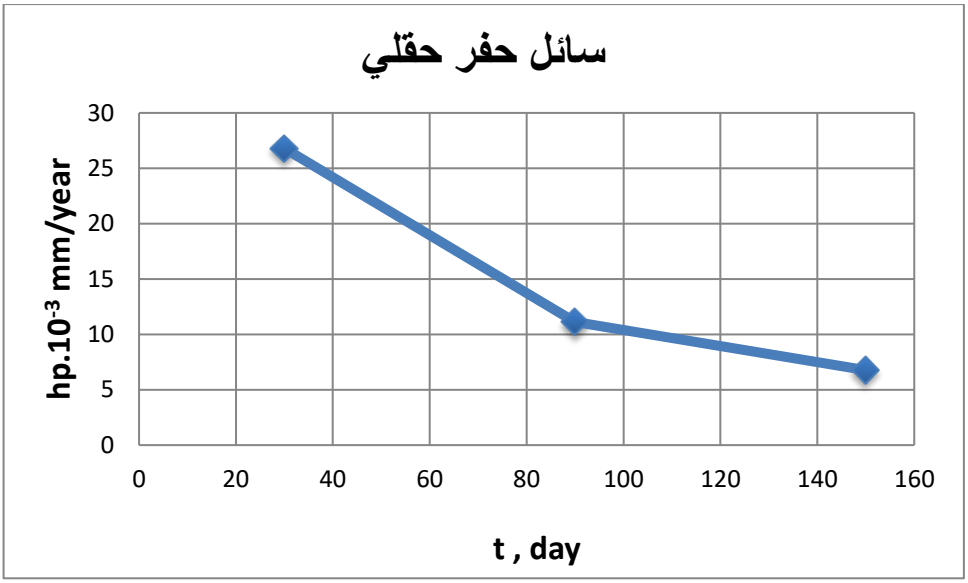
$h_{p.}.10^{-3}$	R_{cor}	S	ΔW	W_2	W_1	نوع الخليطة
mm/year	$g/m^2.day$	$m^2.10^{-4}$	g	g	g	
6.77	0.1456	32.459	0.0709	57.1536	57.2245	k-55

وعلى الشكل (5-1) نبين تغير سرعة التآكل الوسطية بالعلاقة مع فترة التآكل ونوعية سائل الحفر



الشكل (5-1): تغير سرعة التآكل الوسطية بالعلاقة مع فترة التآكل ونوعية سائل الحفر

وعلى الشكل (6-1) نبين تغير عمق التآكل الوسطي بالعلاقة مع فترة التآكل ونوعية سائل الحفر



الشكل (6-1): تغير عمق التآكل الوسطي بالعلاقة مع فترة التآكل ونوعية سائل الحفر

5-4-4-تأثير سائل الحفر (مشبع بالملح) على مواسير التغليف من نوع. k-55

في الجدول (4) نبين الحسابات الوسطية لمعدل التآكل وعمق التآكل نتيجة تأثير سائل الحفر وذلك خلال فترة زمنية 30day

الجدول (4): الحسابات الوسطية لمعدل التآكل وعمق التآكل

$h_p.10^{-3}$.	R_{cor}	S	ΔW	W_2	W_1	نوع الخليطة
mm/year	$g/m^2.day$	$m^2.10^{-4}$	g	g	g	
6.58	0.1415	33.451	0.0142	59.7476	59.7618	k-55

5-4-5- تأثير سائل الحفر (مشبع بالملح) على مواسير التغليف من نوع. k-55

في الجدول (5) نبين الحسابات الوسطية لمعدل التآكل وعمق التآكل نتيجة تأثير سائل الحفر وذلك خلال فترة زمنية 90 day

الجدول (5): الحسابات الوسطية لمعدل التآكل وعمق التآكل

$h_p.10^{-3}$.	R_{cor}	S	ΔW	W_2	W_1	نوع الخليطة
mm/year	$g/m^2.day$	$m^2.10^{-4}$	g	g	g	
15.61	0.3359	33.074	0.0993	58.7270	58.8263	k-55

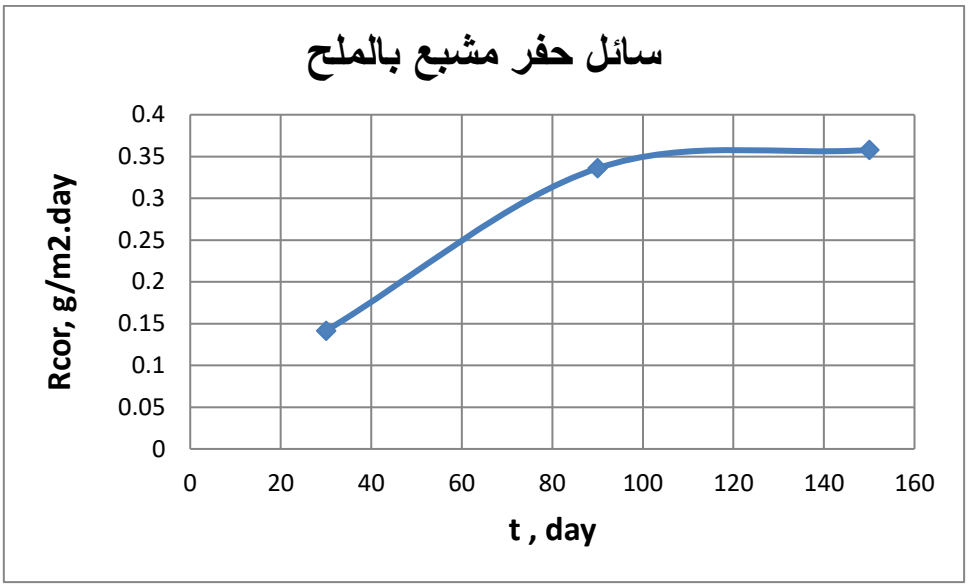
5-4-6- تأثير سائل الحفر (مشبع بالملح) على مواسير التغليف من نوع. k-55

في الجدول (6) نبين الحسابات الوسطية لمعدل التآكل وعمق التآكل نتيجة تأثير سائل الحفر وذلك خلال فترة زمنية 150 day

الجدول (6): الحسابات الوسطية لمعدل التآكل وعمق التآكل

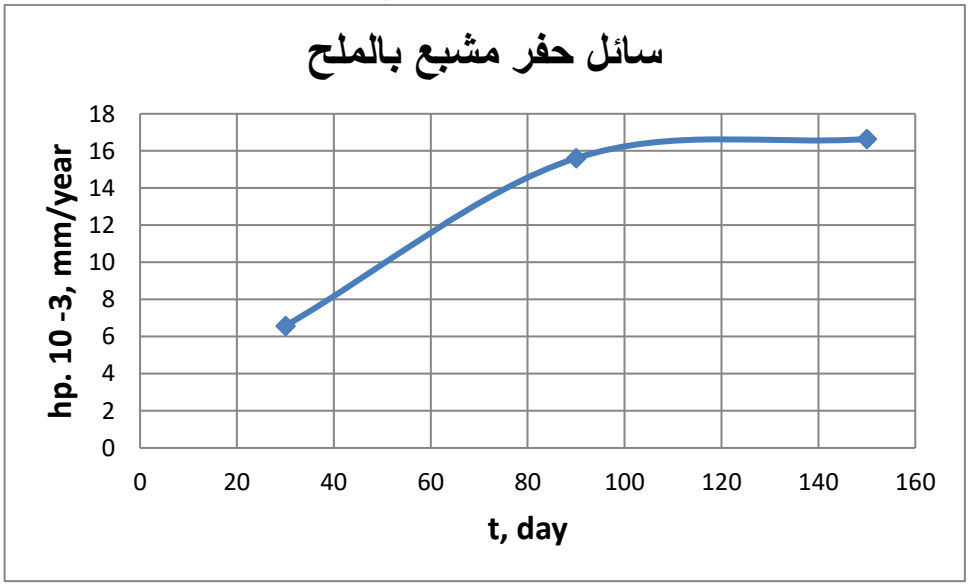
$h_p.10^{-3}$.	R_{cor}	S	ΔW	W_2	W_1	نوع الخليطة
mm/year	$g/m^2.day$	$m^2.10^{-4}$	G	g	G	
16.64	0.3579	31.679	0.1701	56.0054	56.1755	k-55

وعلى الشكل (7-1) نبين تغير سرعة التآكل الوسطية بالعلاقة مع فترة التآكل ونوعية سائل الحفر



الشكل (7-1): تغير سرعة التآكل الوسطية بالعلاقة مع فترة التآكل ونوعية سائل الحفر

وعلى الشكل (8-1) نبين تغير عمق التآكل الوسطي بالعلاقة مع فترة التآكل ونوعية سائل الحفر



الشكل (8-1): تغير عمق التآكل الوسطي بالعلاقة مع فترة التآكل ونوعية سائل الحفر

5-5- مناقشة النتائج:

أولاً: من خلال الدراسة المخبرية لاحظنا أن السوائل التي استخدمت لها تأثير تآكلي وبقيم مختلفة (سرعة التآكل الوسطية، وعمق التآكل الوسطي) يتعلقان بتركيب ونوع السائل الذي يملأ البئر قبل عملية السمنتة والذي سوف يعرض مواسير التغليف للتآكل.

لذلك نقترح:

-عزل تأثير سائل الحفر عن جدران البئر وعن مواسير التغليف من خلال رفع السائل الإسمنتي إلى السطح في الفراغ الحلقي بين جدران البئر ومواسير التغليف بحيث يعطي حجراً اسمنتياً ذو ترابط جيد (الترابط غير مسامي وغير نفوذي) وذلك تلافياً لحصول إصلاحات لاحقة أكثر كلفة

ثانيا- إن الدراسة النظرية قد بينت:

1- إن غياب الإسمنت خلف مواسير التغليف يؤثر بشكل سلبي على مقاومة المواسير للتآكل وذلك من خلال إضعاف مقاومة المواسير للتقوض من جهة وينشط عملية التآكل الكهركيميائي للمواسير من جهة أخرى.

2- كما أن الإجهادات التي تتعرض لها مواسير التغليف تؤثر على مواصفاتها الميكانيكية وتخلق فيها مناطق ضعف تبدأ منها عملية التآكل، لذلك يمكن تلافي حدوث التآكل بتلافي مسبباته وذلك من خلال:

- رفع الإسمنت خلف مواسير التغليف حتى السطح مهما كانت المجالات المغلفة.
- ضرورة المحافظة على مواسير التغليف سليمة وخالية من التشوهات خلال التخزين والنقل وضرورة إنزالها بحذر في البئر، وعدم تعريضها لأي ضغط أو جهد يؤثر عليها سلباً.
- اختيار نوع مواسير التغليف بحيث يكون ملائماً للوسط الذي تنزل فيه.

ثالثا: يعتبر التآكل النخري شكل من أشكال التآكل الموضعي جداً والذي يحدث في مناطق محدودة جداً ويؤدي إلى تشكل فجوات داخل المعدن ذات أبعاد مختلفة.

لذلك نوصي بدراسة هذا النوع من التآكل وخلال فترات زمنية طويلة لأنه يعتبر من أكثر الأشكال المدمرة (شكل خطير جداً نظراً لصغر أبعاد فتحات الثقوب على السطح) على مواسير التغليف.

-انتهى بعون الله -

جدول المصطلحات العلمية

المصطلح باللغة العربية	المصطلح باللغة الانكليزية
B	
تأكل حيوي	Biogenice Corrosions
C	
مواسير التغليف	Casing Pipes
عملية التغليف	Casing process
برنامج التغليف	Casing program
السمنتة	Cementing
التاكل الكيميائي	Chemical Corrosions
التاكل	Corrosions
مانعات التاكل	Corrosion’s Preventers
D	
مواسير الحفر	Drilling Pipes
سائل الحفر	Drilling Mud
زمن الاختبار	Duration of test
E	
تآكل كهرو كيميائي	Electrochemical Corrosions
آلية التعريض	Exposure techniques
F	
الاختبارات الحقلية	Field tests
G	
تآكل غلفاني	Galavanic corrosion
تآكل تكهفي	Grevice Corrosions
H	

جدول المصطلحات العلمية

المصطلح باللغة العربية	المصطلح باللغة الانكليزية
التقصف الهيدروجيني	Hydrogen embrittlement
I	
تآكل بنيوي (تآكل بين الحبيبات)	Intergranular corrosion
L	
الاختبارات المخبرية	Laboratory tests
M	
القياس	Measuring
P	
عمق التآكل	Penetration depth
التآكل النخري	Pitting corrosion
S	
وحدة صناعية صغيرة	Small–scale plant
عينة	Specimens
السطوح	Surfaces
T	
طرق الاختبار	Testing methods
W	
الوزن	Weight
اختبار الفقد بالوزن	weight – loss tests
اللحام	Welding
البئر	Well

المراجع العلمية

1- باللغة الإنكليزية

English References:

1- M. Farzan, P. Baghery, H.R. Mardan Dezfully, 2011 Corrosion Study of steel API 5A,5L and AISI 1080,1020 in drilling- Mud environment of Iranian hydrocarbon field ISRN Materials Science

2-Rida, E, Shokollah, H, Subhash, S, Samuel, Osisanya,2016 Corrosion of C110 Carbon Steel in High-Pressure Aqueous Environment with Mixed Hydrocarbon and CO_2 Gas Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol.146-77-10

3-Rida, E, Ramadan, A, Subhash, S, 2017 Modeling and Experimental Studies on CO_2-H_2S Corrosion of API Carbon Steel Under High-Pressure Journal of Petroleum Science and Engineering.

4-Ted, Byrom,2015 Casing and liners for Drilling and completion. NewYork,439p

5-Rahman, S, 1989 Cement Slurry System for Controlling External Casing Corrosion Opposite Fractured and Vugular Formations Saturated with Corrosive Water, Vol. 3-25-10

6-CICEK, V 2014-Corrosion Engineering. Willy, NewYork,754p

7- Rabia, H, 2000 Well Engineering and construction.

2-باللغة العربية.

8-نصور, طاهر, 1992-1993 **هندسة الحفر 2** -منشورات جامعة البعث

9- فرج, يوسف – نصور, طاهر – مرهج, أحمد, ,2000**دراسة تأثير سوائل الحفر على مواسير التغليف الإنتاجية.** رسالة ماجستير-كلية الهندسة الكيميائية والبترولية 146صفحة

10- فرج، يوسف ,2017 **دراسة تأثير درجة حرارة سوائل الحفر على مواسير التغليف الإنتاجية.** مجلة جامعة البعث-المجلد 39 العدد 41.

Syrian Arab Republic
Ministry of Higher Education
and Scientific Research
Syrian Private University
Faculty of Petroleum Engineering

The Study Of Drilling Fluids Effect On The Casing

A study submitted to obtain a Bachelor's degree
in Petroleum Engineering

:Supervised by

Dr.Eng.Yousef Faraj Eng.Rateb Jammoul

:Prepared by

Majd Wessam Alshebli

2025-2024