الجمهورية العربية السورية

وزارة التعليم العالي

الجامعة السورية الخاصة

كلية الهندسة البترولية

رسالة مقدمة لنيل درجة الإجازة في الهندسة البترولية بعنوان

دراسة تأثير إضافة أكسيد الكالسيوم على خواص الخلطة الإسمنتية وعلى الحجر الإسمنتي الناتج عنها

إعداد

ورد مجد الخلف جواد ماجد مرداس

اشراف:

الدكتور المهندس يوسف فرج المهندس راتب جمول

2024م – 1445 هـ

كلمة شكر...

الدكتور المهندس يوسف فرج

إلى من علمني معنى بوادر العلم والمبادئ وكان من أهل الفضل في إنجاز مشروعي وأشعل شمعته لإنارة طريقي .....

لطالما كانت روحك جميلة وطيبة وإبتسامتك تبعث في النفوس الأمل

فقيمتك عظيمة

الدكتور المهندس أيمن شقوف

لابد أن أشكر صناع التربية والعلم ومن حمل أقدس رسالة في الحياة

ومن أعطى حصيلة فكره على منابر القاعات .

المهندس راتب جمول

إلى من سخر علمه وخبرته ليضعها بين أيدينا

ومن سار معنا خطوة بخطوة لحصد النجاحات ، ها قد أثمرت بفضلك

الفهرس

الموضوع		رقم الصفحة
أولا: القسم النظري		
مقدمة	.....	1
الفصل الأول		
كيمياء و خواص الإسمنت البورتلاندي		
Chemistry and Characterization Of Portland Cement		
1-1 مقدمة	.....	3
2-1 صناعة الإسمنت البورتلاندي	.....	3
1-2-1 تحضير المواد الخام	.....	5
2-2-1 إنتاج (تشكيل) الكلينكر	.....	9
3-2-1 تحضير الإسمنت	.....	12
3-1 . تصنيف إسمنت آبار النفط و الغاز	.....	16
1-3-1 تصنيف الإسمنت وفق معهد البترول الأمريكي API		16
2-3-1 أنواع الإسمنت وفق التصنيف الروسي		24
الفصل الثاني		
إضافات اسمنت آبار النفط والغاز وآلية التأثير		
Additives for oil well cementand Mechanisms of Action		
1-2 مقدمة	.....	25
2-2 ضبط منظم الكثافة	.....	26
3-2 الإضافات المقللة للكثافة (الباسطة)	.....	26
4-2 المرققات (مقللات اللزوجة أو الاحتكاك)	.....	28
5-2 مسرعات التصلب	.....	30
6-2 مبطئات (مؤخرات) تصلب الإسمنت	.....	32
7-2 ضبط فاقد الرشح (الإضافات المنظمة لفاقد الرشح)	.....	33
8-2 إضافات الماء الحر و ترسب الجزيئات	.....	33

2-9 إضافة معالجة التهريب 34
2-10 الإضافات الخاصة 35
2-10-1 تحسين الترابط و التوسع (التمدد) 35
2-10-2 المقاومة للكبريتات 35
2-10-3 تراجع المقاومة 36
2-10-4 إضافات مانع الرغوة 38

الفصل الثالث

تدعيم الآبار

Well construction

3-1 تغليف الآبار 39
3-1-1 وظائف مواسير التغليف 39
3-1-2 أنواع مواسير التغليف 40
3-1-3 متتمات مواسير التغليف 45
3-2 سمنتة آبار النفط 51
3-2-1 أهداف السمنتة 52
3-2-2 أنواع عملية السمنتة 52
3-2-3 آلية السمنتة 53
3-2-4 طرق السمنتة 55
3-3 خواص السائل الإسمنتي و الحجر الإسمنتي..... 59
3-3-1 خواص السائل الإسمنتي..... 59
3-3-2 خواص الحجر الإسمنتي..... 67
3-3-3 العوامل التي تؤثر على عملية السمنتة 73
3-3-4 طرق تقييم الإسمنت..... 85

الفصل الرابع

الخلائط الإسمنتية الخاصة

Special cement systems

4-1 الخلائط الإسمنتية الهلامية..... 88
4-2 أنواع الخلائط الإسمنتية التيكسوتروبية..... 90
4-2-1 إسمنت ذو أساس غضاري 90
4-2-2 إسمنت أساسه سلفات الكالسيوم 90
4-2-3 إسمنت أساسه سلفات الألمنيوم و سلفات الحديدي 92
4-2-4 إسمنت أساسه بوليمير سيللوزي بشكل مزيج متشابك 92
4-3 الخلائط الإسمنتية المتوسعة..... 93
4-4 التغيرات الحجمية للسائل الإسمنتي و الحجر المتشكل منه 93
4-5 آلية توسع الحجر الإسمنتي..... 96
4-5-1 التوسع بطريقة توليد بلورات الاترنجيت 96
4-5-2 الإسمنت الملحي 97
4-5-3 التوسع بطريقة توليد الغاز 98
4-5-4 التوسع بطريقة إنتاج الهيدروكسيد 99
4-6 تقييم متانة التصاق الحجر الإسمنتي مع معدن مواسير التغليف 100

ثانيا :القسم العملي

الفصل الخامس

تحسين جودة سمنتة و عازليه الآبار باستخدام خلطات إسمنتية متوسعة خلف مواسير التغليف

5-1 مقدمة..... 102
5-2 تقييم الواقع الحقلي..... 104
5-3 الدراسة المخبرية..... 105
5-3-1 الأجهزة المستخدمة في البحث..... 105
5-3-2 المواد المستخدمة في البحث..... 106
5-3-4 المواد المستخدمة كإضافات موسعة للخلطة الإسمنتية..... 107
5-4 دراسة تأثير المواد الموسعة على خواص الخلطة الإسمنتية و الحجر الإسمنتي..... 107
5-4-1 دراسة تأثيرإضافة اوكسيد الكالسيوم..... 107
5-5 مناقشة النتائج و صياغة المقترحات..... 112
5-6 مصطلحات البحث..... 113
المراجع العلمية 114

المقدمة

تعتبر عملية السمنتة من العمليات الأساسية في تدعيم آبار النفط والغاز، حيث تلعب نوعية الإسمنت خلف مواسير التغليف دورا" هاما" خلال عملية الحفر، وخلال فترة إنتاج البئر، والتي لها تأثير هام على عمليات السمنتة الثانوية (الإصلاحية)، وعلى عملية إصلاح وتحسين الآبار .

وتعتبر مشكلة الترابط السيئ للحجر الإسمنتي مع كلٍ من مواسير التغليف من جهة، والصخر من جهة أخرى ، من المشاكل الكثيرة الانتشار في آبار النفط والغاز، والتي سوف تنعكس سلباً على جودة عملية السمنتة بشكل عام، ويفقد السائل الإسمنتي المتصلب في الفراغ الحلقي للبئر إحدى أهم وظائفه في تدعيم مواسير التغليف، وعزل الطبقات، وما ينتج عن ذلك من حدوث تآكل لمواسير التغليف، وفقدان العازلية (حدوث اتصال هيدروديناميكي بين البئروالتشكيلات الجيولوجية) يتبعه بالضرورة فقدان في الطاقة الطبقية.

تهدف هذه الدراسة إلى تحسين جودة سمنتة وعازلية الآبار، وذلك من خلال البحث عن خلائط إسمنتية خاصة ، ويمكن توجيه عملية تصلبها بحيث تتوسع في جميع الاتجاهات لتضغط على ما يحيط بها من معدنٍ أو صخر وضمان الترابط الجيد بين ما يحيط بالسائل الإسمنتي المتصلب في شروط ترموديناميكية حقلية محددة، ، (خلائط متوسعة).

تتضمن هذه الدراسة الفصول الآتية :

- **الفصل الأول:** كيمياء وخواص الإسمنت البورتلاندي. ويتضمن مراحل صناعة الإسمنت البورتلاندي, إماهة الإسمنت البورتلاندي والعوامل المؤثرة على هذه الإماهة, طرق تحديد خواص مسحوق الإسمنت, تصنيف الإسمنت البورتلاندي وفق المواصفات القياسية المختلفة، بالإضافة إلى تصنيف إسمنت آبار النفط والغاز تبعاً لتصنيف معهد البترول الأمريكي API.
- **الفصل الثاني** : إضافات إسمنت آبار النفط والغاز وآلية التأثير. في هذا الفصل استعرضنا الإضافات التي يعالج بها السائل الإسمنتي، من ضبط كثافة السائل الإسمنتي, ودراسة مسرعات ومبطئات التصلب, إضافات منظم فاقد الرشح, إضافات معالجة التهريب، بالإضافة إلى الإضافات الخاصة, وأنواع هذه الإضافات تبعاً للشركات الصانعة .
- **الفصل الثالث:** تدعيم الآبار. في هذا الفصل استعرضنا عمليات تغليف وسمنتة آبار النفط والغاز، بالإضافة إلى المعدات المستخدمة في عمليات التغليف والسمنتة, وخواص السائل الإسمنتي والحجر الإسمنتي، والأجهزة المستخدمة في تحديد خواصهما, وفي

نهاية الفصل تمت دراسة العوامل التي تؤثر على نجاح عمليات السمنتة، وطرق تقييم جودة الإسمنت خلف مواسير التغليف.

- **الفصل الرابع** : الخلائط الإسمنتية الخاصة. استعرضنا بعض أنواع لخلائط الإسمنتية الخاصة مثل: الخلائط الإسمنتية التكسوتروبية واستخداماتها , الخلائط الإسمنتية المتوسعة وآلية توسع الحجر الإسمنتي، تقييم متانة التصاق الحجر الإسمنتي مع مواسير التغليف وطريقة تحديد متانة الالتصاق.
- **الفصل الخامس:** وهو القسم العملي في هذه الدراسة، حيث تمت دراسة تأثير الإضافات الموسعة على خواص الخلائط الإسمنتية والحجر الناتج عنها.

وفي نهاية هذه الدراسة خلصنا إلى مجموعة من النتائج والمقترحات التي يمكن أن تؤدي إلى تحسين جودة سمنتة وعازلية الآبار باستخدام خلطات إسمنتية متوسعة خلف مواسير التغليف.

ونأمل من خلال هذه الدراسة أن نكون قد وفقنا في الوصول إلى الهدف الموضوع لها ، وتقديم كل ما هو مفيد لصناعتنا النفطية المتنامية ، وللعاملين في المجالات المختلفة لهذه الصناعة .

كيمياء و خواص الإسمنت البورتلاندي
Chemistry and Characterization Of Portland Cement

1-1- مقدمة:

الإسمنت هو رابطة مائية (Hydraulic binder)، مكون من مزيج عدة مواد غير عضوية مطحونة بشكل ناعم (finely ground)، والتي تشكل عندما تمتزج بالماء ما يسمى الملاط الإسمنتي (Paste)، الذي يتصلب وتزداد قساوته نتيجة تفاعل الإماهة، والذي يحافظ حتى بعد عملية التصلب على مقاومته وثبوتيته حتى تحت الماء [1,16]. ويعد الإسمنت البورتلاندي من أهم الأنواع الشائعة، والأكثر استخداما في أنحاء كثيرة من العالم .

يتألف الإسمنت البورتلاندي بشكل رئيسي من أكسيد الكالسيوم (Lime)(CaO) و أكسيد السيلكون Silica(SiO_2) وأكسيد الألمنيوم (Alumina)(Al_2O_3) وأكسيد الحديد (Fe_2O_3) (Ferric Oxide) بالإضافة إلى بعض الأكاسيد الأخرى، التي توجد بنسب ضئيلة كشوائب مرافقة مع المواد الخام ، والتي تطحن بنعومة مناسبة (Suitable Fineness)، حيث يتم حرق هذا المزيج داخل الفرن ليحدث الاتحاد الكيميائي، وينتج ما يسمى الخبث الحراري أو الكلينكر (Clinker)، والذي تضاف إليه أثناء الطحن كمية قليلة من الجص، وذلك بهدف التحكم بزمن التصلب (Setting time)، حيث ينتج في النهاية مسحوق رمادي (gray powder) يدعى مسحوق الإسمنت (Fine powder cement).

1-2-صناعة الإسمنت البورتلاندي [7] :

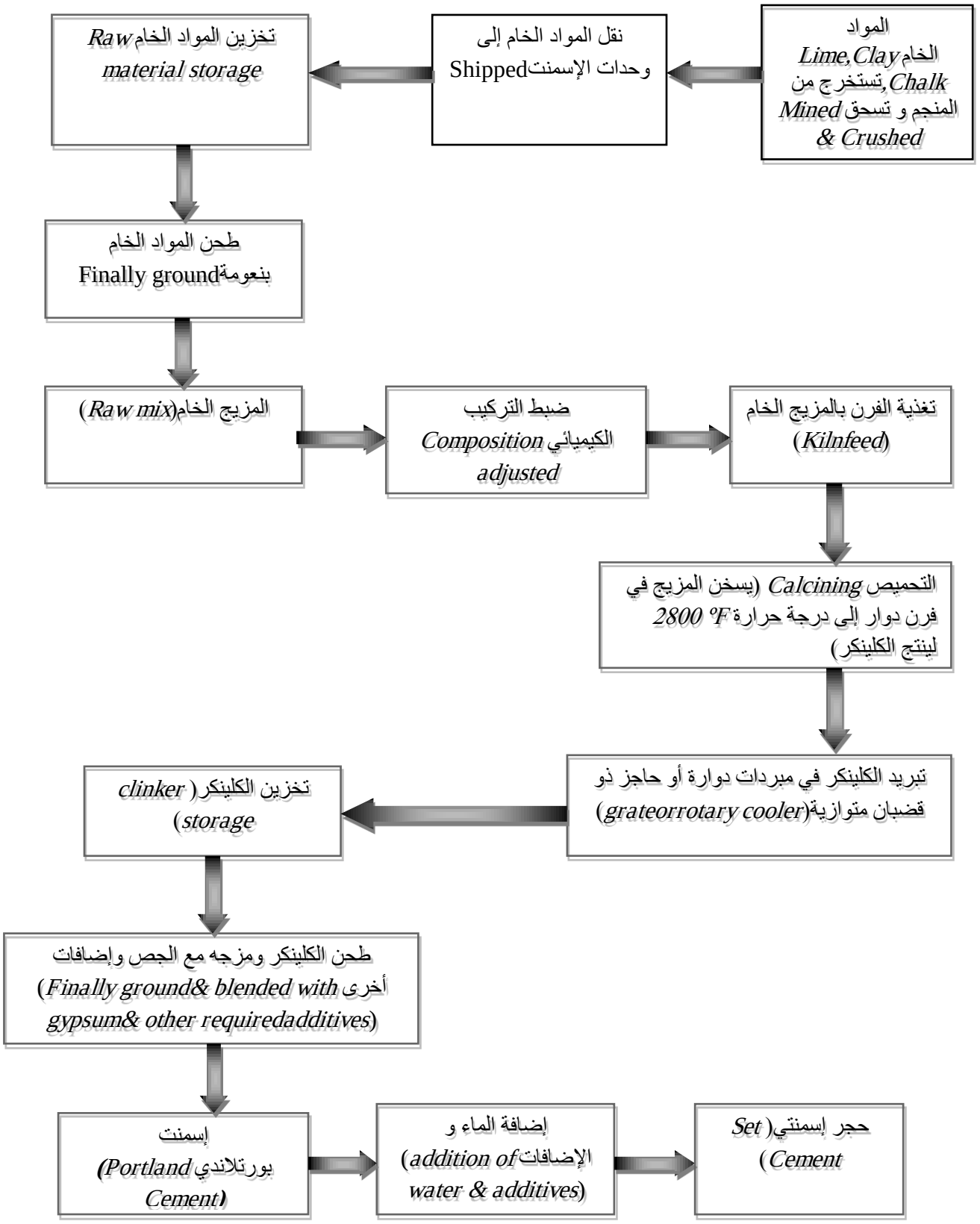
يوجد ثلاث مراحل رئيسية لإنتاج الإسمنت البورتلاندي:

1- تحضير المواد الخام .

2- إنتاج (تشكيل) الكلينكر .

3- تحضير الإسمنت .

و في الشكل (1-1) نبين مراحل تصنيع الإسمنت البورتلاندي .



الشكل (1-1) مراحل صناعة الإسمنت البورتلاندي

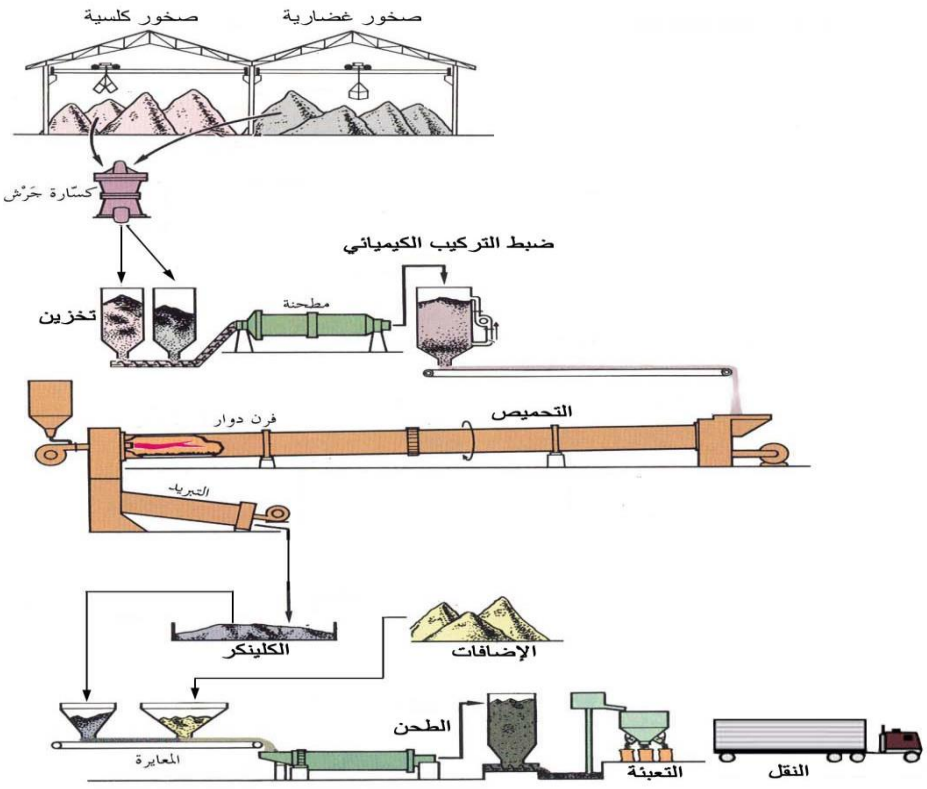
1-2-1- تحضير المواد الخام (Row materials preparation):

إن المواد الخام الرئيسية التي تستخدم في صناعة الإسمنت البورتلاندي هي المواد الكلسية (Calcareous materials)، التي تحتوي على كربونات الكالسيوم أو أوكسيد الكالسيوم، وتتألف من الحجر الكلسي (Limestone) والصخر الطباشيري (الحوار Chalk) حيث يشكل الحجر الكلسي بشكل تقريبي 80% من تركيب المواد الخام، والمواد الغضارية (argillaceous materials) التي تحتوي على الغضار، أو على فلزات الغضار(Clay minerals) ، والتي تتألف من الغضار (Clay) والشيل (Shale). كما يمكن أن تحتوي المواد الخام أيضا على الرمل (Sand)، وخامات الحديد (Iron ore) والبوكسيت (Bauxite)، التي تضاف كمواد مصححة لتصحيح نسب الأكاسيد الرئيسية المستخدمة في المزيج الخام [7] . وفي الجدول (1-1) نبين مصادر المواد الخام المستخدمة في صناعة الإسمنت البورتلاندي.

الجدول (1-1) مصادر المواد الخام المستخدمة في صناعة الإسمنت البورتلاندي

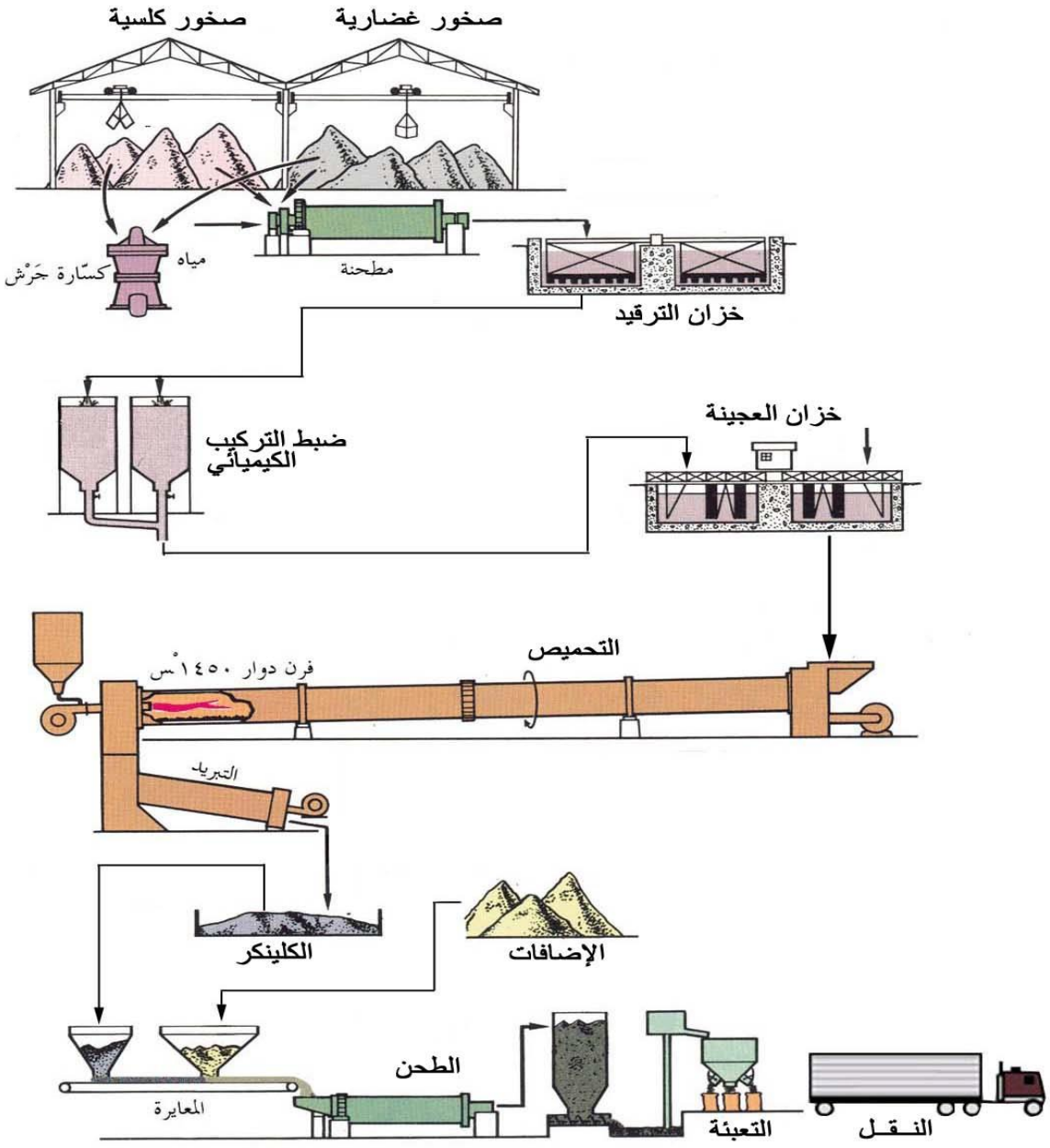
كبريتات الكالسيوم	الألومينا (Al_2O_3)	السيليكا (SiO_2)	أكسيد الحديد (Fe_2O_3)	أكسيد الكالسيوم lime (CaO)
الأنهدريت$CaSO_4$	البوكسيت	سيليكات الكالسيوم	خبث الفرن العالي	النفايات القلوية
الجص نصف المهدرج $CaSO_4$ .1/2 H_2O	صخر الإسمنت	صخر الإسمنت	الغضار	الكالسيت
الجص $CaSO_4$.2 H_2O	الغضار	الغضار	خامات الحديد	صخور الإسمنت
ـــــ	رماد متطاير	الرماد المتطاير	الشيل	الحوار
ـــــ	حجر كلسي	الحجر الكلسي	رماد متطاير	الغضار
ـــــ	الشيل	المارل	البيريت	الدولوميت
ـــــ	الخبث	كوارتزيت		الحجر كلسي
ـــــ	ستورولیت	الرمل		الرخام
ـــــ	غراندیوریت	حجر رملي	ـــــ	المارل
ـــــ		الشيل	ـــــ	القواقع البحرية
ـــــ		الخبث	ـــــ	الشيل
ـــــ		الصخر النارية (كالبازلت)	ـــــ	الخبث

تستخرج الصخور الكلسية و الغضارية من المقالع أو المناجم (quarries or mines) وتنقل إلى مخازن مصانع الإسمنت أو إلى وحدات الإسمنت (Cement plant) حيث تتعرض لعملية تكسير أولي (تحول إلى أحجار صغيرة بقطر أعظمي 6 inches) ثم بعد ذلك تتعرض لعملية تكسير ثانية (Secondary Crushers) أو طحن بالطرق (hammer mills)، وذلك لإنقاص قطر الصخور إلى حوالي 3in أو أقل (في معظم وحدات الإسمنت تكون أقل من(50 mm). بعد ذلك تطحن المواد الخام بنعومة مناسبة (لا يتجاوز قطرها 90 µm) لكي تتم التفاعلات الكيميائية بشكل تام في الفرن، ولكي تتحقق عملية التجانس الكيميائي ، و تمزج مع بعضها رطبة أو جافة . وبالرغم من أن لكل مصنع طريقته الخاصة في تصنيع الإسمنت، فإن هناك بشكل عام طريقتان لتصنيع الإسمنت البورتلاندي.ففي عملية تصنيع الإسمنت **بالطريقة الجافة (dry process)** (الشكل 1-2) فإن مزيج المواد الخام يجفف عادة من خلال إمرار الغازات العادمة الحارة (Hot exhaust gasses) الخارجة من الفرن إلى طاحونة المواد الخام (Row mill)، حيث يتشكل مزيج على شكل مسحوق ناعم، والذي يحول إلى نظام مزج بواسطة محولات سير ناقل، أو بواسطة مضخة المسحوق (Conveyor belt or by a powder pump) .



الشكل (1–2) صناعة الإسمنت بالطريقة الجافة

أما في **الطريقة الرطبة (Wet Process)**) لتصنيع الإسمنت الشكل (1-3) فيضاف الماء إلى المواد الخام الداخلة لآلة الطحن (مغذي طحن المواد الخام (row mill feed) و يكون ناتج الطحن خليطاً (slurry) مع محتوى رطوبة يتراوح عادة بين (25-45%) وزنا. بعد ذلك يحول هذا الخليط إلى نظام مزج بواسطة مضخات السائل التقليدية (Conventional liquid pump).



الشكل (1–3) صناعة الإسمنت بالطريقة الرطبة

تستخدم بعض الوحدات طريقة الطحن الرطب (wet gridding process)، وذلك لتحسين عملية المزج، أو للحصول على عملية المزج بشكل أفضل. ومن جهة أخرى تسبب هذه الطريقة

زيادة في كلفة الفرن. أما في الطريقة الجافة فإن عملية الطحن والمزج أكثر كلفة، ولكن هذا يعوض عن الخسارة بالكلفة الأقل لكلفة الفرن .

وهناك طريقة أخرى تدعى الطريقة نصف الجافة (Semi – dry procedure)، وهي طريقة جافة مع إضافة الماء بنسبة (12-14%) قبل مرحلة الحرق.

مزج المواد الخام (Rae mix blending):

قبل إدخال المزيج الخام إلى الفرن الدوار يجب أن تكون المواد الخام مطحونة بدرجة كافية، وأن تكون نسب المواد الأولية صحيحة، والمزيج متجانساً، حيث يعبر عن ذلك بمواصفات كيميائية دقيقة جداً. فالمحتوى الفردي (بشكل مستقل) للأكاسيد الموجودة في المزيج الخام يجب أن يتم التحكم بها بدقة 0.1% أو أفضل، كما أن التخزين في صوامع المزيج (blending silo) يعتبر ضرورياً لتامين تجانسيَة المزيج [8].

إن وجود الكالسيوم و السيلكون يلعب دوراً في المتانة من خلال إنتاج سيليكات الكالسيوم، كما أن وجود الألمنيوم يلعب دوراً كمذيب للسيليكات المتشكلة، وذلك بسبب إنتاج مصهور (سائل) في منطقة احتراق الفرن، والذي يسمح لها بإحداث التفاعل بشكل اقتصادي عند درجة الحرارة المنخفضة. كما أن عدم كفاية الألمنيوم والحديد يؤدي إلى صعوبة احتراق الكلينكر، وإن وجودها بشكل مفرط يؤدي إلى تشكيل مقاومة منخفضة، بسبب تخفيف (تمديد) السيليكات والألومينات والحديد، كما إن التغير القليل في محتوى الكالسيوم يؤدي إلى تغير كبير في نسبة الأليت إلى البيليت في الكلينكر، والذي يؤدي إلى تغير في خواص نمو المقاومة للإسمنت، ولذلك يجب أن تتم المحافظة على نسبة كل أكسيد بشكل ثابت وذلك لتأمين شروط مستقرة في الفرن، وبالتالي الحفاظ على المنتج بخواص ثابتة .

عمليا يتم التحكم بنسب المزيج الخام بالتحليل الكيميائي المستمر كل ساعة باستخدام طريقة (X- ray fluorescence analysis)، أو كل ثلاث دقائق باستخدام طريقة (neutron activation analysis)، حيث أن معطيات التحليل تستخدم للضبط الأوتوماتيكي لمعدل التغذية بالمزيج الخام، أو بوصلها مع كمبيوتر، حيث يبقى التغير الكيميائي في الحدود الدنيا، وذلك من خلال إمرار المزيج الخام إلى نظام مزج يجعل المزيج متجانسا(الإمداد اليومي للمزيج الخام15000 طن في حالة الأفران الكبيرة). وبعد عملية المزج يفرغ المزيج في صوامع تخزين، والتي تكون جاهزة للمرحلة الثانية من الإنتاج .

إن البارامترات المستخدمة للتحكم بالتركيب الكيميائي للمزيج الخام هي :

- عامل تشبع أكسيد الكالسيوم LSF(Lime saturation factor)
- معامل السيليكا SM (Silica modulus)
- معامل الحديد IM(Iron modulus)

و بالتالي فإن النسب الفعلية للمركبات الكيميائية المختلفة التي يجب أن تتواجد في الكلينكر الناتج هي :

$$LSF = \frac{CaO}{2\,SiO_2 + 1.18\,Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3} = 0.9\text{-}0.97$$

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} = 2.0\text{-}2.8$$

$$IM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} = 1.3 - 1.8$$

2-2-1- إنتاج (تشكيل) الكلينكر (Production (Formation) of the clinker) :

أو ما يسمى عملية الحرق (The burning process). إن الاتحاد الدقيق لعناصر الكالسيوم والسيليكا والألمنيوم والحديد (في المادة الخام) ضروري لإنجاز الهدف الكيميائي للكلينكر. ومن أجل إنتاج كلينكر الإسمنت فإن مزيج المواد الخام المطحونة بدقة، والذي يدعى بـ (raw meal)، أو بمغذي الفرن (Kiln feed)، والذي يرسل بمعدل منتظم من الجهة العليا (قبل المسخن) إلى فرن (في الأفران الحديثة يبلغ قطرها (20 ft (6 m) وطولها يزيد عن (600 ft (183 m)) مع سعة إنتاجية تزيد عن (5000 ton/day)) اسطواني دوار مصنوع من الفولاذ المبطن بآجر مقاوم للحرارة، يميل بدرجات قليلة عن الأفق، ويدور بسرعة (1-4 RPM) حول محوره، حيث يسخن المزيج إلى درجة حرارة 1000 °C بسرعة كبيرة، حيث تحدث عملية التحميص (calcining) لكربونات الكالسيوم في الحجر الكلسي لتتحول إلى أكسيد الكالسيوم، وذلك قبل دخولها في الفرن الدوار، ثم بعد ذلك يتحرك المزيج ببطء داخل الفرن، حيث تزداد درجة حرارته كلما اقترب من شعلة الفرن حتى تصل إلى درجة حرارة (1450°C) 2700 °F ، حيث يحدث التبادل الحراري (في الطريقة الرطبة المواد في الفرن تتطلب زمن 3-2 ساعات، وتنخفض هذه المدة إلى(2-1) ساعة في الطريقة الجافة. وفي بعض المبادلات الحرارية الحديثة يتطلب فقط 20 min وتتشكل بنية سيليكات الكالسيوم التي تدعى الكلينكر (الطاقة اللازمة لتشكل الكلينكر من كربونات الكالسيوم والغضار هي أكبر من 1600Kj/Kg وبسبب أن الحرارة الضائعة خلال الإنتاج، فإن القيمة الحقيقية للطاقة تكون أكبر).

تقسم عملية تشكل الكلينكر إلى أربع مراحل : التجفيف – التحميص – الحرق – التبريد, حيث تحدث سلسلة معقدة ومتتالية من التفاعلات الكيميائية في الفرن نتيجة تحول المواد الخام إلى كلينكر، كما في الجدول (4-1):

الجدول (1-4) مراحل عملية الحرق في الفرن الدوار

التحولات الكيميائية Chemical Transformations	العملية Process	درجة الحرارة Temperature
	تحرر الماء (تجفيف drying) تحرر الماء المدمص	< 200 100-400
$Al_4(OH)_8SiO_{10} \rightarrow 2(Al_2O_3 .2SiO_2)+4H_2O$	تفكك الشيل مع تشكل ميتا كاولينيت	400-750
$Al_2O_32SiO_2 \rightarrow Al_2O_3 + 2SiO_2$	تفكك ميتا كاولينيت للحجر الكلسي ومركبات أخرى مع تشكل مزيج من الأكاسيد الفعالة	600-900
$CaCO_3 \rightarrow CaO+CO2$ $CaO + 2SiO_2 + Al_2O_3 \rightarrow 3(CaO SiO_2) + CaO.Al_2O_3$	تفكك الحجر الكلسي مع تشكل CS, CA	600-1000
$CS+C \rightarrow C_2S$ $2C+S \rightarrow C_2S$ $CA+2C \rightarrow C_3A$ $CA+3C + F \rightarrow C_4AF$	امتصاص CS, CA و تشكل C_4AF	800- 1300
تشكل C3S	تحدث عملية Clinkering حيث يكون فقط ربع الكمية في حالة سائلة	1400-1600

بعد انتهاء عملية الحرق تحصل عملية تبريد للكلينكر(عقد مسامية لونها رمادي داكن قطرها (0.5-2 inch (13-50 mm)) .



الشكل (1–3) الكلينكر

حيث يدخل الكلينكر المتوهج الساخن إلى مبردات دوارة تعمل بالهواء، حيث تستخدم الحرارة الضائعة في الكلينكر كهواء ثانوي في عملية الاحتراق في المكلسن (Calciner)، كما أن الغازات الحارة تستخدم أيضاً كمجففات عند مرحلة تحضير المواد الخام. وفي الجدول (1-5) نبين خواص المركبات الكيميائية الرئيسية التي يتكون منها.

الجدول (1-5): خواص المركبات الكيميائية الرئيسية التي يتكون منها الكلينكر

الصيغة الكيميائية	$3CaO.SiO_2$	$2CaO.SiO_2$	$3CaO.Al_2O_3$	$4Fe_2O_3.CaO.Al_2O_3$
الرمز المختصر	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
الاسم الشائع	الأليت	البيليت	الطور الألومياناتي	الطور الحديدي
الشوارد المتحدة (كشوائب)	Mg, Al, Fe	Al, القلويات Fe, F	Fe , Mg , القلويات	Mg , Si
الشكل العام للبلورات	أحادي الميل	أحادي الميل	مكعب – معيني	معيني
النسبة المئوية	40-60	16-30	7-15	7-12
لون الطور النقي	أبيض	أبيض	أبيض	رمادي داكن – أخضر
التفاعل مع الماء	متوسط	بطيء	سريع	متوسط

عملية التبريد (The cooling process)[3]

إن نوعية الكلينكر الناتج الذي يخرج من الفرن الدوار تعتمد على معدل وطريقة التبريد المطبقة، حيث نميز مرحلتين لتبريد الكلينكر (حيث أن الكلينكر الأفضل هو الذي نحصل عليه بتبريد بطيء لحوالي(1250°C) (2282 °F) يتبع بتبريد سريع عادة (18-20) (32-36 °F/min) (°C/min):

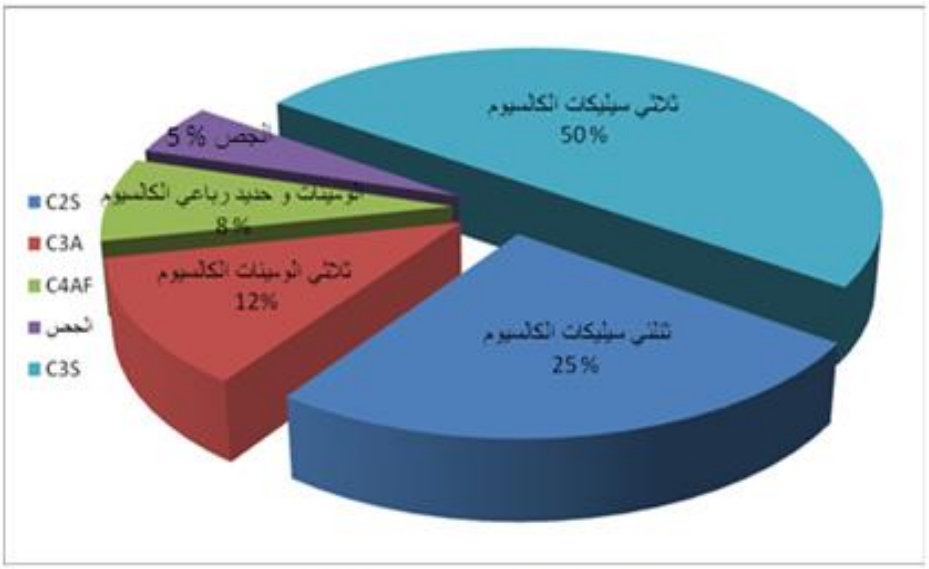
- معدل تبريد بطيء(Slow cooling rate) : ويتم ذلك بمعدل (4-5) (7-9 °F/min) (°C/min) حيث أن التبريد البطيء يسمح ببلورة مركبات الكلينكر، وهذا ما يؤمن قابلية أفضل للطحن، وبالنهاية ينتج إسمنت ليس له فعالية هيدروليكية أو أن فعاليته الهيدروليكية قليلة، كما أن الإسمنت المتصلب سوف يظهر مضغوطية مبكرة عالية مع الزمن، ولكن المقاومة مع الزمن قليلة .
- معدل تبريد سريع (Fast cooling rate): ويتم ذلك بمعدل (18-20) (32-36 °F/min) (°C/min) ينتج تشكيلة زجاجية تجعل الكلينكر صعب الطحن، وبالنهاية فإن الإسمنت المتصلب يعطي متانة مبكرة قليلة، ولكنها تزداد مع الزمن.

1-2-3- تحضير الإسمنت(Preparation of the cement) :

أو ما يسمى بطحن الإسمنت (cement grinding) أو العملية النهائية (Final processing) حيث ينتج الإسمنت من طحن الكلينكر (الذي تم تخزينه في الصوامع) في كسارات الطحن الكروية (ball mills)، حيث يضاف إليه أثناء الطحن كمية قليلة من سلفات الكالسيوم (عادة الجص $CaSO_4.2H_2O$) تتراوح عادة من (2-8%)، ونموذجيا 5% من وزن الكلينكر[13]، وذلك لمنع التصلب الوميضي (Flash set) للإسمنت. كما أنه عند هذه المرحلة يجب أن يكون ناتج الطحن بارداً، وذلك لمنع تجفيف الجص (نزع الماء)، حيث يتحول إلى أنهدريت، حيث يمكن أن ينتج التصلب الوهمي (False setting). كما يمكن أن يمزج مع الإسمنت مواد إسمنتية متممة (Supplementarycementation materials(SCMs)) مثل الرماد المتطاير (Fly ashes)، وخبث الأفران (slag).

تركيب الإسمنت (Cement composition):

يتألف الإسمنت (تتراوح قطر جسيمات حبة الإسمنت من 1-100 µm) من أربعة مركبات أساسية يسهم كل واحدٍ منها بطرق مختلفة في التأثير على خواص السائل الإسمنتي أو خواص الحجر الإسمنتي, حيث أن التغير القليل في تركيزها يمكن أن يؤثر على سلوك التصلب للإسمنت[2] فالإختبار المستقل لكل عينة من عينات الإسمنت المأخوذة حقلياً هو الشرط اللازم لمنع حدوث عملية التصلب المفاجئة أو غير المتوقعة. وفي الشكل (1-4) نبين النسب المئوية لمكونات الإسمنت . وفي الجدول(1-6) نبين تركيب الإسمنت وخواصه



الشكل(1–4) النسب المئوية لمكونات الاسمنت

.

الجدول (1–6) : تركيب الإسمنت وخواصه

الرمز المختصر ID Trade name	الاسم : الصيغة Formula	النسبة % وزناً Amounts	الخواص Functions
C_3A	$3CaOAl_2O_3$ ألومينات الكالسيوم الثلاثية(Tri–calcium Aluminates)	<3-15	ينتج من تفاعل أكسيد الكالسيوم مع أكسيد الألمنيوم. عملية الإماهة والتصلب تتم بسرعة. وهذا سبب هام لنمو مقاومة ميكانيكية بصورة مبكرة. مقاومته لتأثير شوارد الكبريتات ضعيفة حيث تسبب تدهور بنية الإسمنت المقاوم لتأثير الكبريتات HSR .يجب أن يحتوي على C3A>3%

الرمز المختصر ID Trade name	الاسم : الصيغة Formula	النسبة % وزناً Amounts	الخواص Functions
C_3S	$3CaO.SiO_2$ سيليكات الكالسيوم الثلاثية Tri –calcium) (silicate)	40-65	ينتج من التفاعل بين أكسيد الكالسيوم وأكسيد السليكون ويشكل مركب رئيسي في أبار النفط . ويسهم في كل مراحل نمو المقاومة الميكانيكية للجر الإسمنتي يتميز بسرعة تصلبه والمقاومة الميكانيكية الجيدة للجر الإسمنتي .
C_2S	$2CaO.SiO_2$سيليكات الكالسيوم الثنائية Di – (calcium silicate)	16-54	ينتج من تفاعل أكسيد الكالسيوم وأكسيد السليكون. تتميز بإماهة بطيئة (تصلب بطئ جداً) (زمن تشتت مرتفع) وليس له تأثير على الزمن البدائي لتصلب الإسمنت ولكن يسهم فقط في المقاومة الميكانيكية النهائية للحجر الإسمنتي المتشكل . كما يتصف الحجر للإسمنتي المتشكل بمقاومته الجيدة لتأثير شوارد الكبريتات
C_4AF	ألومينات وحديد رباعي الكالسيوم $4Fe_2O_3.CaO.Al_2O_3$ (Tetra- calcium (Alumina Ferrite)	5-12	ينتج من اتحاد أكاسيد الحديد والألمنيوم والكالسيوم . ويؤثر بشكل كبير على عملية الإماهة للإسمنت (تصلب بطي) ولكن يتميز بمقاومة ميكانيكية جيدة للحجر الإسمنتي وبثبوت كبير ضد التأثير التآكلي للمياه الطبقية الكبريتية

تتغير خواص الإسمنت بتغير نسبة المكونات الأساسية (Basic compounds) , درجة الحرارة معدل التبريد وبضبط طحن الكلينكر، وذلك لإنتاج حبيبات خشنة (Coarser grains)، أو لإنتاج حبيبات أكثر نعومة (finer grains) .

- من أجل مقاومة مبكرة عالية (وهذه يتميز بها معظم الإسمنت المستخدم في حقول النفط)، ويتم ذلك من خلال زيادة في محتوى C_3S و يجب أن يكون ناتج الطحن لحبيبات كلينكر الإسمنت اسمنتاً ناعماً .
- من أجل تأخير التصلب ، وهذا يطبق في الآبار التي تتميز بشروط طبقية عالية (HPHT)، ويتم ذلك من خلال إنقاص محتوى C_3S و محتوى C_3A ويجب أن يكون ناتج الطحن لحبيبات كلينكر الإسمنت اسمنتاً خشناً.
- من أجل إماهة بحرارة قليلة ، وهذا يطبق في المناطق المتجمدة (Permafrost applications)، ويتم ذلك بإنقاص محتوى C_3S و C_3A.
- من أجل مقاومة تأثير الكبريتات ، وهذا يميز معظم أصناف الإسمنت المستخدمة في حقول النفط ، ويتم ذلك بإنقاص محتوى C_3A ، حيث أن السلفات يمكن أن تتفاعل مع الإسمنت، فتؤدي إلى إنقاص مقاومته مع الزمن، وتزيد مساميته, حيث يصنف إسمنت آبار النفط إلى إسمنت متوسط المقاومة للكبريتات MSR(Modified sulphate resistance) وإلى إسمنت عالي المقاومة للكبريتات HSR (High sulphate resistance).

- **الرمز الكيميائي (Chemical notation)**[1, 7] :

أو تركيب العناصر (composition elements). نظراً للطبيعة المعقدة لكيمياء الإسمنت فإن تركيب و خواص الإسمنت تبسط باستخدام رموز مختصرة و ذلك على الشكل التالي :

الجدول (1-7) الرمز الكيميائي

C=CaO	**$F=Fe_2O_3$**	**$N=Na_2O$**	**$P=P_2O_5$**
$A=Al_2O_3$	M=MgO	$K=K_2O$	F =FeO
$S=SiO_2$	$H=H_2O$	L=LiO	$T=TiO_2$

و أحيانا تستخدم الرموز الآتية مثل: $\hat{C}=CO_3$و $\hat{S}=SO_3$. و تستخدم كذلك لوصف المركبات التي لها صيغ جزيئية (مولية) كبيرة تشغل مساحة كبيرة جدا .

- **تخزين و توزيع الإسمنت(Cement Storage & distribution):**

بعد عملية الطحن فإن الإسمنت (الشكل (1-5)) يحول عن طريق سير ناقل أو مضخات المسحوق (Powder pump) إلى صوامع تخزين كبيرة عازلة للهواء (عادة وحدات الإسمنت تمتلك صوامع بمساحة تكفي لتخزين إنتاج فترة مابين 20-1 أسبوعاً من الإسمنت حسب الطلب والإستجرار المحلي).



الشكل (1–5) الإسمنت البورتلاندي.

وذلك لأن الإسمنت سريع التأثر بالرطوبة ، حيث يمتص الرطوبة من الهواء وثاني أكسيد الكربون CO_2 ، كما أن التخزين في المناطق الحارة يمكن أن يؤدي إلى تجفيف الجص وتحويله إلى أنهدريت ، وفي النهاية فإن الإسمنت يسلم للمستخدمين إما في أكياس, أو يحمل في ناقلات أو عربات سكك حديد . ويبلغ الوزن النموذجي لكيس الإسمنت (42 Kg) 94 Lb .

1–6– تصنيف إسمنت آبار النفط و الغاز(Classification of oil well cement):

يعتبر التصنيف الأفضل والأكثر انتشارا لإسمنت آبار النفط و الغاز هو تصنيف ASTM (تصنيف الجمعية الأمريكية لاختبار المواد) (American Society for testing and materials) و تصنيف معهد البترول الأمريكي API (American Petroleum Institute)

1–6–1–<u>تصنيف الإسمنت وفق معهد البترول الأمريكي(API Classification)</u>

يصنف إسمنت آبار النفط والغاز وفقا لمعهد البترول الأمريكي (API Standards 10A) إلى ثمانية أصناف (A,B,C,D,E,F,G,H) وثلاثة أنواع (MSR , HSR – O). و كل صنف يستخدم تبعا لعمق الآبار، ودرجات الحرارة والضغوط ، ومدى مقاومته لتأثير الكبريتات . وفي الجدول (1–23) نبين مواصفات إسمنت آبار النفط و الغاز حسبAPI [1,8,16]

الجدول (1-23) نبين مواصفات إسمنت آبار النفط و الغاز حسب API Standards 10A

نوع الإسمنت حسب API	كثافة الإسمنت ppg	عمق الاستخدام (m)	درجة الحرارة (°C)	الخواص وأهداف الاستخدام
A	15.6	0-2000	80-170	يستخدم لأهداف عامة ، وهو ذو مقاومة ضعيفة لتأثير شوارد الكبريتات ومشابه لـ ASTM C 150 type I حيث يستخدم في الآبار الضحلة والمرحل السطحية للآبار العميقة،وهو متوفر بنوعه العادي (OSR) (Ordinary grade)
B	15.6	0-2000	8-170	يستخدم لأهداف عامة، ولا يتطلب خواص معينة.متوفر بأنواع ذات مقاومة متوسطة، ومقاومة عالية لتأثير شوارد الكبريتات ، ومشابه لـ ASTM C 150 type II
C	14.8	0-2000	8-170	ذو مقاومة مبكرة عالية ، ومتوفر بأنواع ذات مقاومة ضعيفة ومقاومة عالية لتأثير الكبريتات، ومشابه لـ ASTM C 150 type III ، ويطحن بشكل ناعم .
D	16.4	2000-3000	77-110	وهو إسمنت مؤخر لتصلب السائل الإسمنتي ، ومتوفر بنوعيه : ذو المقاومة المتوسطة والمقاومة العالية للكبريتات ويطحن بشكل خشن .
E	16.4	3000-5000	110-145	وهو إسمنت مؤخر للتصلب، ومتوفر بنوعيه، ذات المقاومة المتوسطة (MSR) و المقاومة العالية (HSR) لتأثير للكبريتات .
F	16.4	3000-5000	145-160	وهو إسمنت مؤخر للتصلب ومتوفر بمقاومة (MSR) ومقاومة (HSR) .

نوع الإسمنت حسب API	كثافة الإسمنت ppg	عمق الاستخدام (m)	درجة الحرارة (°C)	الخواص وأهداف الاستخدام
G	15.8	0-2500	حتى 195	يستخدم لأهداف عامة. وهو متوفر بمقاوماته المتوسطة والعالية لتأثير للكبريتات. الإضافات التي يسمح بها فقط للكلينكر هي سلفات الكالسيوم والماء ويطحن بشكل ناعم ومشابه لـ ASTM C 150 type IV .
H	16.5	0-2500	حتى 195	يستخدم لأهداف عامة، وهو متوفر بأنواعه ذات المقاومة المتوسطة والمقاومة العالية لتأثير الكبريتات ، وهو يشبه النوع G ولكن يختلف عنه بأن النوع H أكثر خشونة . وهو مشابه لـ ASTM C 150 type IV

إن أنواع الإسمنت D,E,F تحتوي على إضافات مؤخرة (مبطئة) لتصلب السائل الإسمنتي، وهي تبدي زمن تصلب كافٍ عندما تستخدم في المجال الصحيح لدرجات الحرارة . ويمكن أن ندرك أن هذه الإضافات يمكن أن لا تتلاءم مع الإضافات الأخرى المراد استخدامها (مثلا التحكم بفاقد الرشح (Fluid loss control)).

إن الأنواع G و H هما من أكثر أنواع الإسمنت انتشاراً في حقول النفط , حيث يستخدم النوع في أمريكا بشكل عام ، أما خارج أمريكا فإن النوع G هو الأكثر استخداما

ويمكن أن تضبط خواصهما تبعا للمواصفات المناسبة للاستخدام في سمنتة الآبار.

المواصفات النموذجية للإسمنت من نوع G هي :

الوزن النوعي Specific Gravity : $3.15\ grf/Cm^3$

الحجم المطلق Bulk volume : $0.94\ Lbs/ft^3$ (1.47 Kg/L)

نسبة الماء إلى الإسمنت Water requirement:5gps(0.44l/kg)

الوزن النوعي للسائل الإسمنتي Slurry weight:15.8ppg(1.9sg)

إنتاجية الإسمنت Slurry yield : $1.15\ ft^3/sack$ (0.77 l / Kg)

وفي الجدول (1-24) نبين المتطلبات الكيميائية و الفيزيائية لإسمنت الصنف

الجدول (1–24) المتطلبات الكيميائية والفيزيائية للإسمنت G وفق المواصفات API spec .10 A

المتطلبات الكيميائية	متطلبات النوع API Class G	الأداء النموذجي داخل البلاد
(MgO) , كحد أقصى %	6.0	3.6
(SO_3), كحد أقصى %	3.0	2.5
الضياع نتيجة الإحتراق , كحد أقصى %	3.0	1.2
الرواسب المتبقية , كحد أقصى %	0.75	0.16
(C_3S), كحد أقصى %	48-58	53.0
(C_3A) , كحد أقصى %	8.0	2.8
المحتوى الكلي للقلويات كـ (NO_2)	0.75	0.6
المتطلبات الفيزيائية	**متطلبات النوع API Class G**	**الأداء النموذجي داخل البلاد**
نسبة الماء إلى الإسمنت %	44.0	44.0
الاستجابة الصوتية (Soundness) كحد أقصى , %	0.8	0.09
محتوى الماء الحر .حد أعظمي %	5.8	3.9
المتانة الانضغاطية الصغرى بـ (MPa) (8 ساعات) في الدرجة 38 °C الضغط في الدرجة 60 °C بـ atm)	2.1 10.3	3.5 15.0
التماسكية العظمى	30.0	10.0
زمن التصلب , حد أدنى (بالدقائق)	90-120	110

وفي الجدول (1–25) نبين المتطلبات الكيميائية لإسمنت آبار النفط حسب (API specification 10A/ ISO 10426-1:2000)[7]

الجدول (1–25) المتطلبات الكيميائية لإسمنت آبار النفط حسب API specification 10A/ ISO 10426-1:2000

صنف الإسمنت						
H	G	D,E, F	C	B	A	
إسمنت عادي (Ordinary grade) (O)						
NA	NA	NA	6.0	NA	6.0	أكسيد المغنيزيوم (MgO) , كحد أقصى %
NA	NA	NA	4.5	NA	3.5 [a]	أكسيد الكبريت(SO_3), كحد أقصى %
NA	NA	NA	3.0	NA	3.0	الضياع نتيجة الاحتراق , كحد أقصى %
NA	NA	NA	0.75	NA	0.75	الرواسب المتبقية , كحد أقصى %
NA	NA	NA	15	NA	NR	ألومينات ثلاثية الكالسيوم (C_3A) , كحد أقصى %
إسمنت ذو مقاومة متوسطة للكبريتات(MSR)(Grade Moderate sulphate – resistant)						
6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	NA	أكسيد المغنيزيوم (MgO) , كحد أقصى %
3.0	3.0	3.0	3.5	3.0	NA	أكسيد الكبريت(SO_3), كحد أقصى %
3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	NA	الضياع نتيجة الإحتراق , كحد أقصى %
0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	NA	الرواسب المتبقية , كحد أقصى %
58[b]	58[b]	NR	NR	NR	NA	سيليكات ثلاثية الكالسيوم (C_3S) — كحد أقصى %
48[b]	48[b]	NR	NR	NR	NA	سيليكات ثلاثية الكالسيوم (C_3S) — كحد أدنى %
8	8	8	8	8	NA	ألومينات ثلاثية الكالسيوم (C_3A) , كحد أقصى %
0.75[c]	0.75[c]	NR	NR	NR	NA	المحتوى الكلي للقلويات معبر عنه بأكسيد الصوديوم المكافئ (NO_2) , كحد أقصى %
إسمنت ذو مقاومة عالية للكبريتات (HSR) (High sulphate-resistant Grade)						
6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	NA	أكسيد المغنيزيوم (MgO) , كحد أقصى %
3.0	3.0	3.0	3.5	3.0	NA	أكسيد الكبريت(SO_3), كحد أقصى %
3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	NA	الضياع نتيجة الاحتراق , كحد أقصى %
0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	NA	الرواسب المتبقية ,كحد أقصى %
65[b]	65[b]	NR	NR	NR	NA	سيليكات ثلاثية الكالسيوم (C_3S) — كحد أقصى %

	صنف الإسمنت						
	A	B	C	D,E, F	G	H
كحدأدنى %	NA	NR	NR	NR	48[b]	48[b]
ألومينات ثلاثية الكالسيوم (C_3A), كحد أقصى %	NA	3[b]	3[b]	3[b]	3[b]	3[b]
كالسيوم رباعي الحديد و الألمنيوم (C_4AF) مع ألومينات ثلاثية الكالسيوم(C_3A) المضاعفة, كحد أقصى	NA	24[b]	24[b]	24[b]	24[b]	24[b]
المحتوى الكلي للقلويات معبر عنه بأكسيد الصوديوم المكافئ (NO_2) , كحد أقصى %	NA	NR	NR	NR	0.75[c]	0.75[c]

NR= not required , NA = not applicable

a: عندما يكون محتوى C3A8% أو أقل والمحتوى الأعظمي لـ SO3 يكون 3% .

b : عندما تكون النسبة المئوية AL_2O_3 / Fe_2O_3 =% 0.64 أو أقل . ومحتوى C_3A صفر .

- عندما تكون قيمة النسبة السابقة أكبر من 0.64% , فالمكونات تحسب كما يلي :

$C_3A = 2.65 .\% AL_2O_3 – 1.69 .\% Fe_2O_3$

$C_4AF = 3.04 . \% Fe_2O_3$

$C_3S = 4.07 . \%CaO -7.60. \%SiO2- 6.72 . \% AL_2O_3 - 1.43 . \% Fe_2O_3 – 2.85.\%SO3$

- و عندما تكون النسبة AL_2O_3 / Fe_2O_3 أقل من 0.64% فإن C3S تحسب كما يلي :

$C_3S = 4.07 . \%CaO -7.60. \%SiO2 - 4.48 . \% AL_2O_3 – 2.86 . \% Fe_2O_3 – 2.85.\%SO3$

c : مكافئ أكسيد الصوديوم (المعبر عنه بـ Na_2O) يحسب من الصيغة التالية :

Na_2O مكافئ =$(\%Na_2O)+ (0.658 . \%K_2O)$

وفي الجدول (1−26) نبين ملخص للمتطلبات الفيزيائية و العملية حسب API specification 10A/ ISO 10426-1:2000 :

الجدول (1–26)للمتطلبات الفيزيائية والعملية حسب API specification 10A/ ISO 10426-1:2000

H	G	F	E	D	C	B	A	نوع الإسمنت			
38	44	38	38	38	56	46	46	نسبة الماء إلى الإسمنت % (جدول5)			
اختبار النعومة (الطريقة البديلة) (البند5)											
NR	NR	NR	NR	NR	220	160	150	Turbidimeter (السطح النوعي. حد أدنى بـ m^2/Kg)			
NR	NR	NR	NR	NR	400	280	280	النفوذية بالهواء (السطح النوعي. حد أدنى بـ m^2/Kg)			
5.9	5.9	NR	NR	NR	NR	NR	NR	محتوى الماء الحر .حد أعظمي %			
								ضغط العينة النهائي Mpa (Psi)	درجة حرارة العينة النهائية ºC (ºF)		اختبار المتانة الإنضغاطية
2.1 (300)	2.1 (300)	NR	NR	NR	2.1 (300)	1.4 (200)	1.7 (250)	atm	38 (100)		
10.3 (1500)	10.3 (1500)	NR	NR	NR	NR	NR	NR	atm	60 (140)		
NR	NR	NR	NR	3.4 (500)	NR	NR	NR	20.7 (3000)	110 (230)		
NR	NR	NR	3.4 (500)	NR	NR	NR	NR	20.7 (3000)	143 (290)		
NR	NR	3.4 (500)	NR	NR	NR	NR	NR	20.7 (3000)	160 (320)		
								ضغط العينة النهائي(Mpa(Psi	درجة حرارة العينة النهائية (ºCºF	رقم الجدول 6	اختبار المتانة الإنضغاطية
NR	NR	NR	NR	NR	13.8 (2000)	10.3 (1500)	12.4 (1800)	atm	38(100)	NA	
NR	NR	NR	6.9 (1000)	6.9 (1000	NR	NR	NR	20.7 (3000)	77(170)	4S	

H	G	F	E	D	C	B	A	نوع الإسمنت			
								ضغط العينة النهائي Mpa(Psi)	درجة حرارة العينة النهائية °C (°F)	رقم الجدول 6	اختبار متانة الانضغاطية
NR	NR	6.9 (1000)	NR	13.8 (2000)	NR	NR	NR	20.7 (3000)	110 (230)	6S	
NR	NR	NR	13.8 (2000)	NR	NR	NR	NR	20.7 (3000)	143 (290)	8S	
NR	NR	6.9 (1000)	NR	NR	NR	NR	NR	20.7 (3000)	160 (320)	9S	
									الحد الأعظمي للتماسكية B_c^a (15 – 30 دقيقة لحظة المزج)	رقم جدول اختبار المواصفة الجدول 9–13	ضغط وحرارة وزمن التصلب (البند 10)
NR	NR	NR	NR	90min	90 Min	90 min	90 min		30	4	
90min	90min	NR	NR	NR	NR	NR	NR		30	5	
120 max	120max	NR	NR	NR	NR	NR	NR		30	5	
NR	NR	100 min	100 min	100 min	NR	NR	NR		30	6	
NR	NR	NR	154 min	NR	NR	NR	NR		30	8	
NR	NR	190 min	NR	NR	NR	NR	NR		30	9	

a: واحدة بيردن للتماسكية (Bc) ، ونحصل عليها من قياس التماسكية بالضغط في البند 10 .

not required = NR

1-6-2- أنواع الإسمنت وفق التصنيف الروسي:

يصنف الإسمنت الروسي:

- ✓ تبعاً لدرجة حرارة اختبار الإسمنت إلى ثلاثة أصناف:

1- إسمنت للآبار الباردة بدرجة حرارة اختبار C^O 2±22.

2- إسمنت للآبار الساخنة بدرجة حرارة اختبار C^O 3±75 .

3- إسمنت للابار العميقة ذات درجة الحرارة العالية، ويمكن تقسيمه إلى عدة مجموعات:

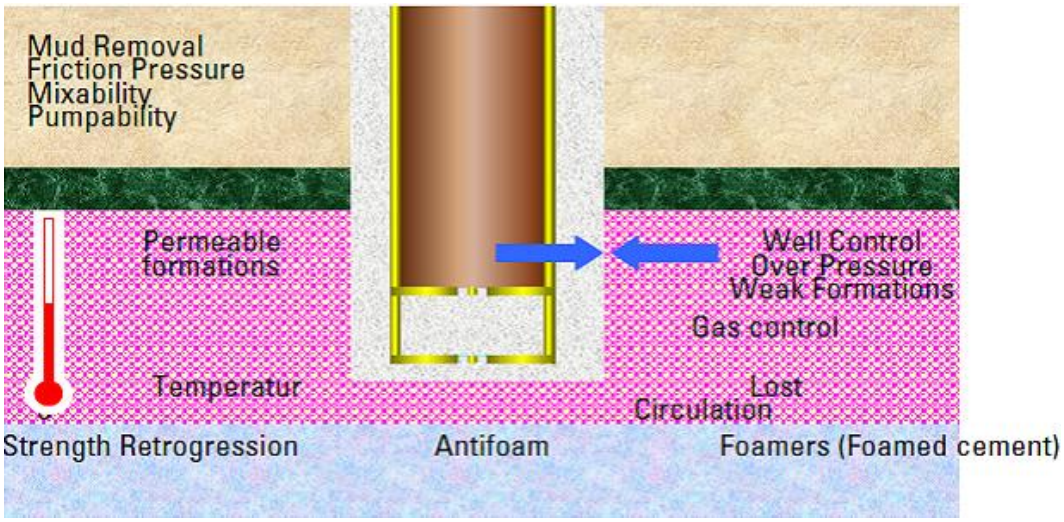
- المجموعة B ưA بدرجة حرارة اختبار (C^O 3±100) والضغط 300-500 at.
- المجموعة BưБ بدرجة حرارة اختبار (C^O 3±125) والضغط 300-500 at.
- المجموعة BưB بدرجة حرارة اختبار (C^O 3±150) والضغط 400-600 at.
- المجموعة BưГ بدرجة حرارة اختبار (C^O 3±200) والضغط 500-1000 at.

- ✓ ويمكن تقسيم الإسمنت إلى الأنواع الآتية حسب وزنه النوعي :
  - خفيف ذي وزن نوعي حتى gf/cm^3 1.3
  - مخفف ذي وزن نوعي gf/cm^3 1.3-1.75
  - عادي ذي وزن نوعي gf/cm^3 1.75--1.95
  - مثقل ذي وزن نوعي gf/cm^3 1.95-2.2
  - ثقيل ذي وزن نوعي أكبر من gf/cm^3 2.2
- ✓ ويقسم الإسمنت حسب زمن الشك إلى :
  - إسمنت سريع الشك ببداية شك أقل من 40min
  - إسمنت ذو شك مسرع 40 min -1hour
  - إسمنت عادي الشك ببداية شك يزيد عن ساعتين .
- ✓ ويقسم الإسمنت تبعاً لثباتيته في الوسط الآكال إلى:
  - إسمنت كبريتي الثبات.
  - إسمنت عادي الثبات .
- ✓ ويقسم الإسمنت حسب قيمة صلابة الحجر وزمن بلوغ هذه القيمة إلى:
  - إسمنت ذو صلابة ابتدائية عالية .
  - إسمنت عادي .

إضافات إسمنت آبار النفط والغاز وآلية التأثير
Additives for oil and gas wells cement and Mechanisms of Action

2-1- مقدمة:

إن الخواص النظامية للإسمنت البورتلاندي لا تتوافق دائماً مع ظروف البئر التي تجري سمنتتها، فدرجة الحرارة التي تصادف أثناء سمنته الآبار تتراوح من درجة حرارة تحت الصفر في المناطق المتجمدة (freezing zone) إلى درجة حرارة أكبر من 700 ^{o}F (350C^{o})، الشكل (2-1) . كما تصادف ضغوط تتراوح من الضغط الجوي في الآبار الضحلة ، إلى ضغوط أكثر من 30000 Psi (21Mpa) في الآبار العميقة . كما أن زمن الضخ يتراوح من عدة دقائق إلى عدة ساعات. لذلك تجرى في معظم الحالات معالجة السائل الإسمنتي بمواد كيميائية معينة ، أو إضافات تعطي للسائل الإسمنتي مواصفات تتوافق وشروط البئر التي يستخدم عندها.



الشكل (2-1) ظروف البئر

ويمكن أن تصنف هذه الإضافات إلى [4,9,19]:

1- منظم الكثافة : (Density control)
2- مرققات أو مقللات احتكاك : (Dispersants or frictions reducers)
3- مسرعات التصلب : (Accelerator)
4- مؤخرات أو مبطئات التصلب : (Retarders)
5- منظم فاقد الرشح : (Fluid loss control)
6- إضافة معالجة التهريب : (Lost circulation control additives)
7- إضافات خاصة : (specialty additives)

2-2- منظم الكثافة (Density control):

تضبط كثافة السائل الإسمنتي لتحقيق هدفين رئيسيين :

- الحفاظ على البئر ، وذلك من خلال بقاء ضغط قاع البئر ضمن حدود محددة.
- إنقاص كلفة بناء البئر ، وذلك من خلال استخدام كمية قليلة من مسحوق الإسمنت اللازم لملء الفراغ الحلقي حتى ارتفاع محدد.

❖ **إضافات زيادة الكثافة(Density –raising additives, weighting agents):**

تستخدم هذه الإضافات لزيادة كثافة السائل الإسمنتي، وهي بشكل عام مواد خاملة كيميائياً ، لها وزن نوعي عالٍ ، ويمكن أن تحسن بشكل جيد مقاومة الانضغاط للحجر الإسمنتي. كما يمكن زيادة كثافة الملاط الإسمنتي باستخدام نسبة قليلة من الماء إلى الإسمنت(W/C) ، ولكن يمكن أن يكون لهذه العملية تأثيرات سيئة على خواص السائل الإسمنتي[23].

تستخدم إضافات زيادة الوزن بشكل رئيسي للسيطرة على الضغوط العالية في الآبار الحاوية على النفط والغاز أثناء الحفر.

إن المواد الأكثر شيوعاً والتي تستخدم لزيادة كثافة السائل الإسمنتي هي البارايت والهيماتيت ، وفي الجدول (2-1) نبين الخصائص الفيزيائية لبعض لهذه المواد.

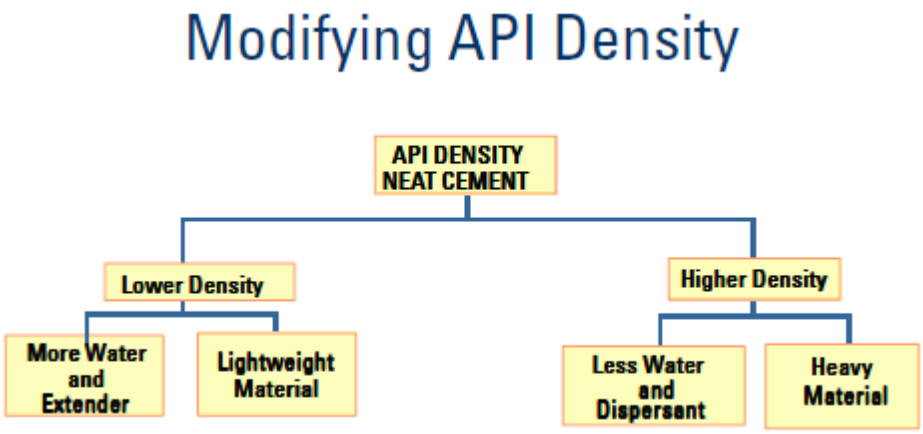
الجدول (2-1) الخصائص الفيزيائية لبض أنواع مثقلات الخلطات الإسمنتية

الرمز	المادة	الوزن النوعي	اللون	كمية الماء الإضافية اللازمة (gal / Lb)
D031	البارايت	4.33	أسود	0.024
D076	الهيماتيت	4.95	أحمر	0.0023

2-3-إضافات مقللة للكثافة(الباسطة):

(Density –reducing additives , extenders):

أو تدعى بالمواد المالئة . إن كثافة السائل الإسمنتي يمكن أن تنقص باستخدام مواد باسطة (extenders) ، أي إضافة مواد ذات وزن نوعي قليل (أقل من كثافة الإسمنت) , أو قليل جداً ، أي استخدام مواد كثافتها أقل بكثير من كثافة الإسمنت وتدعى مقللات غازية . ويمكن استخدام نسبة مرتفعة من الماء إلى الإسمنت (W/C) ، وهي الأكثر اقتصادية . ولكن استخدام نسبة مرتفعة من الماء إلى الإسمنت يمكن أن تؤدي إلى حدوث مشكلة انفصال الماء وتشكل الماء الحر كقنوات داخل بنية الإسمنت , أو باستخدام مواد تمتص الماء ، وبالتالي تسمح باستخدام نسبة مرتفعة من الماء إلى الإسمنت ، كما في الشكل (2-2).



الشكل (2-2)- ضبط كثافة الخلطة الإسمنتية

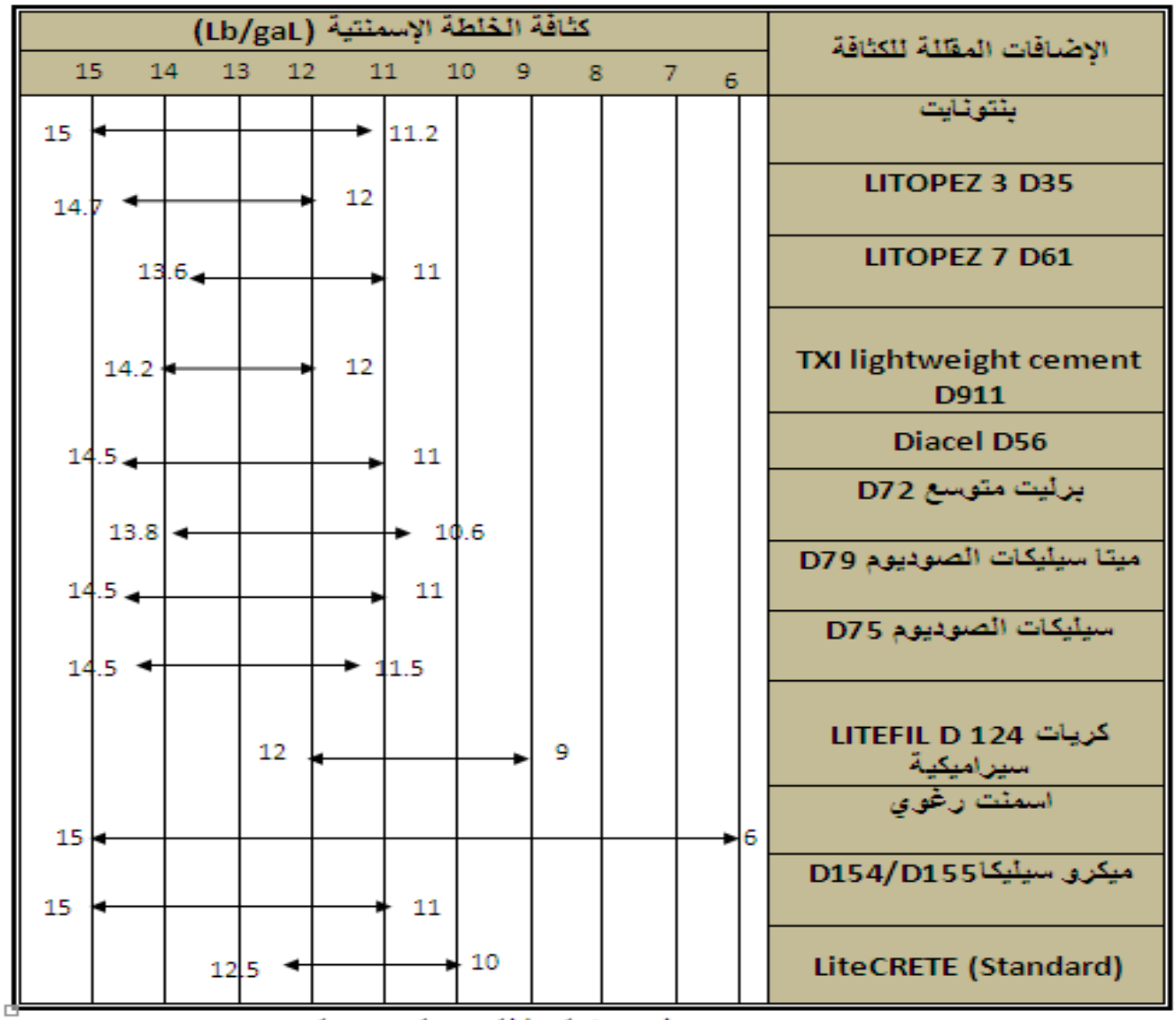
وفي الجدول (2-2) نبين الاضافات التي يمكن أن تستخدم في تحضير الخلائط الإسمنتية المخففة .

جدول (2-2)المواد التي يمكن أن تستخدم في تقليل كثافة الخلطة الإسمنتية

الإضافات المقللة للكثافة		
إضافات تعتمد على الماء	**اضافات ذات وزن نوعي قليل**	**اضافات ذات وزن نوعي قليل جدا**
ماء	البوزولان(رماد متطاير ,تراب دياتومي) (D035 ,D602) D056 , D061)	نتروجين (إسمنت رغوي)
بنتونايتD20 غضار ملحيD128	كولايتD042غلسونايتD024 برليت متوسع D072	كرياتD124(LITEFIL) سيراميكية أو زجاجية
سيليكات الصوديوم D075ميتاسيليكات الصوديوم D079	مايكرو سيليكاD154,D155	

و في الجدول (2–3) نبين كثافة السائل الإسمنتي التي نحصل عليها تبعا للإضافات المختلفة كعوامل لتقليل كثافة السائل الإسمنتي.

جدول (2–3) الإضافات المقللة لكثافة الخلطة الإسمنتية



الجدول (2–3)الإضافات المقللة لكثافة الخلطة الإسمنتية

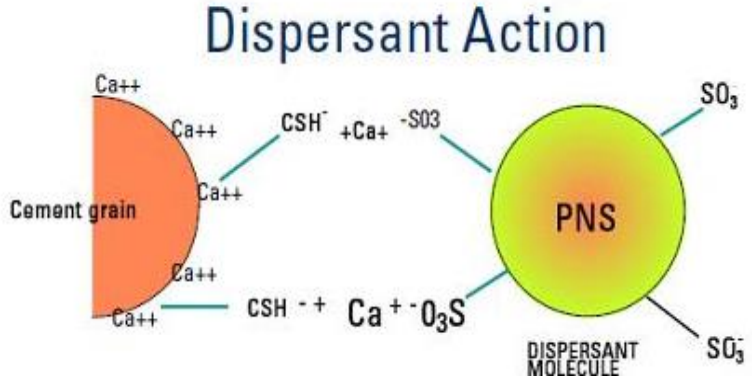
2–4– المرققات(مقللات اللزوجة) أو مقللات الاحتكاك:

(Dispersants or friction reducers):

تضاف المرققات إلى السائل الإسمنتي لتحسين امكانية المزج عند كثافات أعلى من الكثافات المطلوبة حسب API وذلك من أجل جميع أنواع الإسمنت دون الحاجة لزيادة الماء. فالخلائط الإسمنتية تحتوي على تركيز عال من الاجزاء الصلبة اكثر من70%حجماً ، حيث يوجد تأثير الكتروستاتيكي تجاذبي بين طبقات C-S-H حول حبات الإسمنت ، والتي تعطي للسائل الإسمنتي لزوجة وثباتية. فالمرققات تساعد في إنقاص لزوجة السائل الإسمنتي و بذلك

تسمح بحدوث جريان مضطرب عند معدلات الضخ الأقل, حيث تصبح الحاجة إلى سوائل إسمنتية بلزوجة قليلة أكثر أهمية في الآبار العميقة, الأقل قطراً و في الآبار ذات درجات حرارة عالية, كما أن استخدام المرققات تؤخر إماهة الإسمنت و تنقص خواصه الهلامية وتقلل من ضغط الاحتكاك كما تحسن من فعالية تأثير إضافات فاقد الرشح و تأثير مبطئات التصلب كما تحسن من الخواص الريولوجية للسائل الإسمنتي والتي تؤدي إلى تحقيق فعالية عظمى في إزاحة سائل الحفر.

إن آلية عمل المرققات والتي هي جزيئات مشحونة سلبياً تمتز على سطوح حبيبات الإسمنت المماهة المشحونة إيجابياً والتي تؤدي إلى إيقاف التفاعل بين الجزيئات ومع زيادة تركيز المرققات تزداد المواقع المشحونة سلبياً على سطوح حبيبات الإسمنت مما يؤدي إلى زيادة التنافر(repulsion) وعدم حدوث اندماج الحبيبات مع بعضها وبالتالي حدوث عملية التشتت للسائل الإسمنتي. وفي الشكل (2-3) نبين آلية عمل المرققات .



الشكل (2-3)ألية عمل المرققات

والمرققات هي حموض عضوية, وبشكل خاص بولي سلفونات, مثل بولي ميلامين سلفونات (PMS) D145A, بولي نفتالين سلفونات الصوديوم (PNS) D065,D080. كما يعتبر استخدام المرققات مع البوليميرات المتعددة السكريات المعدلة من المرققات الأكثر شيوعاً .و في الجدول (2-4) نبين أنواع المرققات المستخدمة وذلك تبعا للشركات الصانعة.

الجدول (2-4): أنواع المرقئات المستخدمة

الإستعمال	النوع	اسم الشركة		
		BJ services	هاليبرتون	شلمبرجير
استعمالات عامة	مسحوق	CD-31, CD-32, CD-33, CD-34	CFR-2, CFR-3,	D065, D121
	سائل	CD-31L, CD-33L, CD-34L	CFR-2L, CFR-3L,	D080, D145A
مرقئات للخلطات الإسمنتية المشبعة بالملح	مسحوق	CD-33	FE-2	D045
	سائل	CD-33L	CFR-3L	D065A, D080A, D604AM
مرقئات مع خواص مضادة للترسب	مسحوق	CD-32	CFR-2	
	سائل	CD-33L	CFR-2L	D604AM

إن الإستخدام المفرط للمرقئات يمكن أن يؤدي إلى ترسب جزيئات الإسمنت و يسبب فصلها, وعدم انتظام كثافة السائل الإسمنتي و ظهور ماء حر (Free water) . وهذا التأثير بشكل خاص له أهمية عند سمنتة المقاطع الأفقية ، فالماء الحر يمكن أن يستقر على قمة عمود السائل الإسمنتي على طول المقطع ، ويشكل طريقاً لانتقال الغاز والسائل بين الطبقات .

2-5- مسرعات التصلب (Accelerators) :

تضاف مسرعات التصلب لتقليل زمن التثخن للسائل الإسمنتي وهي تستخدم في المواضع التي تكون فيها درجات الحرارة قليلة (تستخدم المسرعات بشكل أولي في الآبار التي تكون فيها درجة حرارة قاع البئر أقل من (49 °C) 120 °F و هذا يفترض الحصول على مقاومة انضغاط 500 PSI في زمن قصير) ، والتي يمكن أن تؤدي إلى زمن انتظار كبير جداً لتصلب الإسمنت, وهي غالبا تستخدم للتعويض عن تأثير إعاقة (تأخير) عملية الإماهة للإضافات الأخرى.

والمسرعات هي عادةً أملاح غير عضوية ، وتكون فعاليتها وفقا للسلسلة الآتية]23[:

$Ca^{++} > Mg^{++} > Li^{+} > Na^{+} > H2O$; $OH^{-} > Cl^{-} > Br^{-} > NO3^{-} > SO4^{--} > = H2O$ (1-2)

يعتبر كلور الكالسيوم ($CaCl_2$ – صلب) من المسرعات السائدة الاستعمال في الصناعة النفطية، حيث يستخدم بتركيز (0-5 % BWOW) أوبتركيز (2-4 % BWOC) ، وهو تفاعل ناشر للحرارة . فعند إضافته للماء ترتفع درجة حرارة الماء بمقدار F^0 10-20. كما يستخدم كلور الكالسيوم بشكله السائل بتركيز 0.2-0.4 gal/sk (D077($CaCl_2$) ، ونادراً ما يستخدم لأسباب اقتصادية ، كما أن استخدامه بتركيز أكبر من 5% لا يمكن التنبؤ بتأثيره .

أيضا يعتبر D044((NaCl)) من المسرعات الشائعة الإستخدام بتركيز حتى 10 % BWOW وعند استخدامه بتركيز 10-18 % لا يظهر له تأثير على زمن تثخين السائل الإسمنتي، أما عند استخدامه بتركيز أكبر من 18% فإنه سوف يبطئ تصلب السائل الإسمنتي .إن التركيز المثالي لكلور الصوديوم والذي يستخدم كمسرع يتراوح بين 3-5%BWOW . ويمكن أن يستخدم ماء البحر كمسرع للتصلب حيث يحتوي على كلور الصوديوم (25g/L) وكلور المغنيزيوم(1.5gL±) وعلى كلوريدات أخرى ، ولكن يجب أن يختبر قبل استخدامه.

تعتبر أملاح المغنيزيوم و كبريتات الألمنيوم من المسرعات الفعالة جداً. من جهة أخرى فإن التأثيرات التكستروبية (Thixotropic) لأملاح المغنيزيوم وكبريتات الألمنيوم تجعلها أقل استخداما، حيث أنها تؤثر بشكل عكسي على عملية الإزاحة وتعطي كثافة عالية غير مقبولة . و في الجدول (2–5) نبين أنواع مسرعات التصلب المستخدمة وذلك تبعا للشركات الصانعة.

جدول (2–5) أنواع مسرعات التصلب المستخدمة وذلك تبعا للشركات الصانعة

الإستعمال	النوع	اسم الشركة		
		BJ services	هاليبرتون	شلمبرجير
كلوريد الصوديوم	حبيبات	ملح (NaCl)	ملح	DO40
كلوريد الكالسيوم	مسحوق	A-7,CaCl2	CFR-2, CFR-3, CFR-4	D065, D121
	سائل	A-7 L	CFR-2L, CFR-3L, CFR-6L	D080, D145A
سيليكات الصوديوم	مسحوق أو كريات	A-2, سيليكات الصوديوم ,Diacel-A	Econolite ,Diacel-A	D79, Diacel A

الإستعمال	النوع	اسم الشركة		
		BJ services	هاليبرتون	شلمبرجير
سيليكات الصوديوم	سائل	A-3L أو سيليكات الصوديوم	Econolite سائل	D075
كبريتات الكالسيوم المائية(الجص)	مسحوق	A-10 , الجبس	Cal-seal , EA-2	D053
كلوريد البوتاسيوم	حبيبات	A-9 ,KCl	KCl	M117
مسرعات احتكاريةproprietary		AFE-100L,T-40L T-40L		

2-6- مبطئات (مؤخرات) تصلب الإسمنت (Retarders):

تستخدم المبطئات لتحقيق تأثير معاكس للمسرعات, أي زيادة زمن التثخن للسائل الإسمنتي، وذلك عند سمنتة مواسير التغليف للمراحل الوسطية والإنتاجية, وفي عمليات السمنتة تحت الضغط, وإنشاء السدادات الإسمنتية، وفي الآبار ذات الضغط ودرجة الحرارة الكبيرة ، والتي تحتاج إلى زمن ضخ كبير وذلك لتمكين السائل الإسمنتي من الارتفاع إلى المكان المقرر في البئر قبل بدء التصلب .

إن معظم مؤخرات التصلب الأكثر شيوعا والأكثر فعالية هي حموض عضوية , أملاح أو بوليميرات مع حموض ليغنوسلفونات الصوديوم والكالسيوم، وذلك عند استخدامها بتراكيز (0.1-1.5%BWOC) . وفي الشكل(2-9) نبين تأثير المبطئات على الإسمنت.

كما تعتبر المشتقات السيللوزية(Cellulose derivatives) مثل كربوكسي ميتيل هيدروكسي إيتيل السيللوز (CMHEC) من المبطئات الأكثر شيوعا; الفوسفونات العضوية(organophosphonates) مثل حمض ألكيلنالفوسفونيك وكلور الصوديوم NaCl بتركيز أكبر من(18%BOWO).

2-7- الإضافات المنظمة لفاقد الرشح (Fluid loss control additives):

عند توضع السائل الإسمنتي في الفراغ الحلقي مقابل طبقة نفوذة، ونتيجةً لتأثير الضغط تحدث عملية الفلترة، حيث يدخل الطور المائي للسائل الإسمنتي ضمن الطبقة، تاركاً وراءه جزيئات الإسمنت التي تترسب على سطح الطبقة، تعرف هذه العملية بفاقد الرشح.

إن الإضافات المنظمة لفاقد الرشح تستخدم للحفاظ على نسبة ثابتة للماء إلى الجزء الصلب في السائل الإسمنتي و ذلك من خلال[23]:

2-8-إضافات الماء الحر و ترسب الجزيئات (Free water & particles settling) الشكل (2-12) :

يعتبر عدم تجانس عمود الإسمنت (Non homogeneous cement column) خلف مواسير التغليف أمرا غير مقبول ,و بخاصة عندما يكون جدار البئر أفقيا أو ذا درجة انحراف كبيرة, حيث أنه وفي بعض الحالات ولأن الخواص العازلية للحجر الإسمنتي ومتانته يمكن أن تتعرض لخطورة شديدة , نستخدام إضافات منع الترسب (Anti settling agents) و ذلك كي تعطينا لزوجة كافية للحفاظ على تماسكية السائل الإسمنتي (slurry consistency),كما أن إضافات منع الترسب تؤدي إلى إنقاص الماء الحر, ترسب الجزيئات وليس لها أي تأثير على خواص الخليطة الإسمنتية باستثناء الخواص الريولوجية والتي تتستخدم حتى درجة حرارة $300F^0$. يعتبر البنتونايت و المشتقات السيللوزية (HEC) من الإضافات الشائعة الإستخدام لترميم هذه اللزوجة و من المهم أن يتم اختبار هذه الظاهرة في الآبار الأفقية و المائلة عند زاوية ميل البئر الحقيقية (Actual well angle) . كما يستخدم عامل منع الترسب D135بتركيز (0.1-1.5%BWOC)ومواد منع ترسب سائلة مثل(D162(:0.005-0.025 / sk gal

2-9-إضافات معالجة التهريب (Lost circulation Control additives):

إن فقدان الدوران (Lost circulation) هو الضياع الكلي لمزيج سائل / صلب (Fluid/ solid mixture) خلال حفر الآبار في الطبقات النفوذة , الطبقات المتشققة و المتكهفة (Permeable , fractured & cavernous formation). و لإعادة الدوران أو لإنقاص فرص حدوث ضياعات خلال عملية السمنتة تضاف مواد معالجة التهريب (LCM) و هذه الموادتضاف بشكل فردي أو كجزء من السائل الإسمنتي.

إن المواد التي تضاف لمعالجة تهريب السائل الإسمنتي هي مواد خاملة تغلق الطبقات ذات النفوذية العالية، أو تشكل جسراً في الطبقات المتشققة، وهذه المواد تضاف على شكل حبيبات

أو على شكل رقائق أو على شكل ألياف. و في الجدول (2-15) نبين خواص الإضافات المستخدمة في معالجة تهريب السائل الإسمنتي و تطبيقاتها.

الجدول (2-15) خواص الإضافات المستخدمة في معالجة تهريب السائل الإسمنتي و تطبيقاتها

اسم المادة ورمزها	نوعها	الوزن النوعي ($gr_f/cm3$)	كمية الاضافة (Lb/sk)	آلية العمل
كولايت-D42	فحم حبيبي	1.3	5-25	- لها دور رئيسي في ثباتية الخلطة الإسمنتية . - تعمل على تشكل جسور داخل الطبقة - صعوبة المزج عند تراكيز عالية
غلسونايتD24	مواد اسفلتية حبيبية	1.07	5-25	- تستخدم عند درجة حرارة 300 °F - تعمل على تشكل جسور داخل الطبقة - صعوبة المزج عند تراكيز عالية
سلوفان	قشرية	-	1/8-1/2	- تشكل حصيرة على الطبقات المتشققة و المتكهفة - صعوبة المزج عند تراكيز عالية
بوليستر	قشرية	–	1/8-1/2	

كما يستخدم الإسمنت (CemNET) وهو إسمنت يحتوي على فيبر مرن، ويتشتت في الماء، وهو كسائل مثل الإسمنت العادي يستخدم في معالجة التهريب، حيث يستخدم التحكم في منع التهريب بكميات كبيرة، وذلك باستخدام ألياف مرنة ضمن الإسمنت، كما أنه ينسجم أو يتلاءم بشكل تام مع كل الإضافات التي يعالج بها السائل الإسمنتي، ولا يشكل أي تلوث للطبقات, ويتمتع بالمواصفات الآتية :

1- الأبعاد : بأقطار من (15-20µ) وبطول (12mm) .

2- الكثافة : مماثلة لكثافة الإسمنت .

3- ينسجم مع كل الإضافات التي يعالج بها السائل الإسمنتي، وكذلك مع الخلائط الإسمنتية المحضرة بإستخدام إسمنت من نوع (Lite crete)

4- درجة الحرارة : يستخدم عند درجة حرارة (50-500 °F) .

5- التركيز المثالي : (0.5-0.8 Lb/ sack) .

2-10- الإضافات الخاصة (Specialty additives) [5,6,9]:

2-10-1- تحسين الترابط والتوسع (التمدد) (Expanding & bond improvement):

ينكمش الإسمنت البورتلاندي بحدود (% 2-4)، وهذا يمكن أن يسبب ضياع عازلية الإسمنت مع المواسير أو مع الطبقة, والذي يؤدي بدوره لعبور سوائل غير مرغوب بها من خلالها . ويتم إنقاص انكماش الإسمنت البورتلاندي بطريقتين رئيسيتين :

- كيميائي أو موسعات عن طريق نمو البلورات، مثل كبريتات الكالسيوم نصف المماه، وأكاسيد المغنيزيوم المحمصة، وهي من أكثر المكونات شهرة ، وهي تنتج تأثيراً موسعاً بعد أن يبدأ الإسمنت بالتصلب .
- موسعات على أساس توليد الغاز (gas generating expandes)، وذلك من خلال إضافة مواد تطلق عند تفاعلها مع مكونات الخليطة الإسمنتية أو نواتج إماهتها طوراً غازياً تنحصر فقاعاته في الفراغات المسامية للحجر الإسمنتي، والذي يمكن أن يولد في موضعه خلال فترة تهلم السائل الإسمنتي . والمادة الأكثر استخداما لهذا الهدف هي مسحوق الألمنيوم، الذي يؤدي إلى إنتاج غاز الهيدروجين، و لكن درجة الأمان لغاز الهيدروجين لا يمكن التحكم بها .
- **2-10-2- المقاومة للكبريتات (sulphate resistance) :**

إن المواد الكيميائية الكبريتية، والتي تشمل المغنيزيوم والصوديوم، والتي لها تأثير كبير جداً على الحجر الإسمنتي، حيث أن معادن الكبريتات تتفاعل مع أكسيد الكالسيوم (CaO) الموجود في الإسمنت لتشكل هيدروكسيد المغنيزيوم والصوديوم وكبريتات الكالسيوم . تتفاعل كبريتات الكالسيوم الناتجة مع مركبات C_3A مكونة ألومينات الكبريتات(Sulphoaluminate) التي تسبب تمدد وتفكك الإسمنت. إن سبب التفكك يعود إلى أن حجم جزيئات ألومينات الكبريتات أكبر من حجم جسيمات C_3A . وبما أن الأول يحل محل الثاني كنتيجة للتفاعل، لذلك سوف يحصل تفكك للحجر الإسمنتي .

تتواجد الكبريتات بكثرة في مياه بعض الطبقات التي تكون في حالة تماس أو اتصال مع الحجر الإسمنتي عن طريق:

- التثقيب

- الفراغات المكروية التي يمكن أن تتشكل في الحجر الإسمنتي، لعدم فعالية إزاحة سائل الحفر بالسائل الإسمنتي.

إن زيادة مقاومة الحجر الإسمنتي لتأثير الكبريتات (sulphate attack) يمكن أن تتم عن طريق تقليل نسبة C_3A والكلس الحر (free lime) في الإسمنت، أو بإضافة المواد البوزولانية التي تتفاعل مع الكلس، وبذلك تقلل من نسبة أوكسيد الكالسيوم الذي يتفاعل مع كبريتات المغنيزيوم.

2-10-3- تراجع المقاومة (strength retrogression):

في الآبار التي تكون درجة الحرارة فيها أقل من (110 °C) 230 °F يستمر الإسمنت بالتميؤ، وتتطور مقاومته لفترة طويلة من الزمن، والتي يمكن أن تمتد من عدة أيام إلى أعوام قليلة لحين الوصول إلى المقاومة النهائية، بينما تتطور المقاومة القصوى للإسمنت في غضون الأسابيع الأولى عند درجات الحرارة التي تزيد عن 230 °F . وبعد ذلك تبدأ المقاومة بالانخفاض. وهذه الظاهرة تسمى عادة تردي أو تراجع المقاومة . في بعض الحالات فإن تراجع المقاومة يمكن أن يستمر لحين الوصول إلى نقطة الإخفاق (Point of failure) ، حيث يزداد تراجع المقاومة بازدياد درجة الحرارة . عند درجة حرارة الأعلى من 230 °F تتحول هيدراتسيليكات الكالسيوم الهلامية C-S-Hgel(calcium silicate hydrate) الناتجة عن إماهة الإسمنت إلى α-هيدراتسيليكات ثاني الكالسيوم (α-Dicalcium silicate hydrate ,α-C_2SH)، والتي تكون ذات كثافة أكبر من هيدرات سيليكات الكالسيوم الهلامية، ونتيجة لذلك يحدث انكماش للحجر الإسمنتي وفقدان عازليته، أي نقصان متانته وزيادة نفوذيته.

يتم منع تراجع مقاومة الحجر الإسمنتي من خلال إنقاص نسبة أوكسيد الكالسيوم إلى السيلكا (C/S) في C-S-Hgel ، وذلك من خلال إضافة مسحوق سيليكافلور أو سيليكا رمل.إن إنقاص نسبة C/S من 1.5± إلى 1.0± يتم عند إضافة مسحوق سيليكافلور أو سيليكا رمل بنسبة 30-4% BWOC إلى الإسمنت . عند نسبة C/S= 1.0± يتشكل معدن يعرف (tobermorite,$C_5S_6H_5$)، والذي له نفوذية قليلة ومتانة إنضغاطية عالية , وحتى أنه يحافظ على خواص الحجر الإسمنتي . في الجدول (2-18) نبين نسب C/S في الإسمنت ناتج الإماهة , وعند إضافة السيليكا.

الجدول (2–18) نسب C/S في الإسمنت ناتج الإماهة، وعند إضافة السيليكا.

المادة	نسبة C/S
هيدرات سيليكات الكالسيوم الهلامية	±1.5
الإسمنت	2.5-3.0
إضافة السيليكا	±0.83-1.0
α–هيدرات سيليكات ثاني الكالسيوم	1.5-3.0

عند درجة حرارة أعلى من$300F^{o}(150C^{o})$, يتحول الـ tobermorite إلى (Xonotlite,C_6S_6H) وكمية قليلة من gyrolite,C_6S_3H) حيث لا تملك نفس الخواص التي يملكها التوبيموريت (نفوذيته أقل من نفوذية التوبيموريت)، ولكن هذه البنية المستقرة الأخرى (Xonotlite) والتي سوف تحافظ على عازلية الحجر الإسمنتي عند مستويات مقبولة.

عند درجة الحرارة الأعلى فإن قطر جزيئات السيلكا سوف تمنع تراجع المقاومة. ولكن عندما يزيد قطر الجزيئات عن 40μm(D30), فإن متانة ونفوذية الحجر الإسمنتي تتدهور بشكل سريع بعد حوالي ستة أشهر، ولذلك من الضروري استخدام مسحوق السيليكا فلور(D66) بدلاً من مسحوق سيليكا رمل D30 عند هذه الشروط. حيث أن مسحوق السيليكا فلور له قطر جزيئات بشكل تقريبي 10μm حيث يكون تشكل الـ Xonotlite (هيدرات سيليكات أحادية الكالسيوم) هو المفضل عند القطر الأصغر للحبيبات.

في الجدول (2–19) نبين مواصفات الإضافات المستخدمة في منع تراجع مقاومة الحجر الإسمنتي.

الجدول (2–19): مواصفات إضافات من تراجع مقاومة الإسمنت

الخواص	D030 إسمنت سيليكا	D066 سيلسكا فلور
قطر الحبيبات (mech)	7-200	>200
كمية الماء المضافة	10 % 1.34 gal / sk	+12% 1.34 gal / sk
الوزن النوعي	2.63	2.63
التطبيقات		

الخواص	D030 إسمنت سيليكا	D066 سيلسكا فلور
كثافة عالية	مفضل	بديل
كثافة منخفضة	بديل	مفضل
مشاكل الترسيب	بديل	مفضل
مشاكل المزج (الريولوجية)	مفضل	بديل
الاستخدام عند درجة حرارة اعلى من 300 °F	بديل	مفضل

2-10-4-إضافات مانع الرغوة (Anti Foam additives)[61]:

تؤدي الطاقة العالية للمزج أثناء تحضير السائل الإسمنتي إلى دخول كمية من الهواء إلى السائل الإسمنتي ، وهذا يمكن أن يؤثر على قياس كثافة السائل الإسمنتي، ويسبب مشاكل الامتصاص والتكهف عند المضخة . إن إضافات مانع الرغوة تؤدي إلى تكسير أو خروج الهواء بسرعة و ذلك بإنقاص التوتر السطحي لفقاعات الهواء.

إن سبب تشكل الرغوة يتعلق بخواص المواد المستخدمة، لذلك فإن إضافات مانع الرغوة تستخدم لمنع تهلم السائل الإسمنتي، والحصول على كثافة صحيحة للخلطة الإسمنتية , لذلك يجب أن تتمتع إضافات مانع الرغوة بمواصفات هامة، منها أن تكون غير قابلة للانحلال في سائل الرغوة أو في الخلطة الإسمنتية، وأن تملك سطحاً أكثر فعالية من سائل الرغوة .

يعتبر الغليكول بولي بروبلين من المواد الفعالة لمنع تشكل الرغوة (defoamer)، حيث يضاف بنسبة 0.05-0.1% BWOW وهي الأكثر شيوعا، وتضاف إلى ماء المزج قبل عملية المزج, كما يستخدم بولي غليكول إيتر: بشكله الصلب (D046(0.20 Lb/sk, وشكله السائل(D047(0.05-0.07 gal/sk كذلك يستخدم نوعان من السيليكون بشكله السائل(D046,D047,M45) حيثيستخدم M45(0.05gal/sk),D175(0.01-0.05gal/sk) لمنع تشكل الرغوة قبل حدوثها، أما النوع (D175) فيستخدم لإزالة الرغوة بعد حدوثها

تدعيم الآبار
Well construction

3-1- تغليف الآبار(Casing job):

تعتبر عمليات تدعيم الآبار (التغليف والسمنتة) من أهم العمليات التي تهدف الى زيادة عمر البئر. وتأتي أهمية التدعيم كونها تمثل المرحلة الأساسية في بناء أو إنجاز البئر, كونها تمثل المرحلة النهائية للحفر، والقاعدة التي تبدأ منها مرحلة الإنتاج، وكلما كانت أكثر إيجابيةً وأقل كلفةً كانت أكثر نجاحاً.

3-1-1-وظائف مواسير التغليف (functions of casing) [23]:

تعتبر مواسير التغليف الجزء البنائي الرئيسي للآبار، وهي مواسير(أنابيب) أسطوانية ذات قطر كبير، تصنع من خلائط من الفولاذ، تنزّل في البئر المفتوح، وتسمنت في مكانها. ومع زيادة عمق البئر من الضروري تغليف جدران البئر بمجموعة متداخلة (تلسكوبية) من الأنابيب المعدنية، اتفق على تسميتها مجموعة مواسير التغليف.

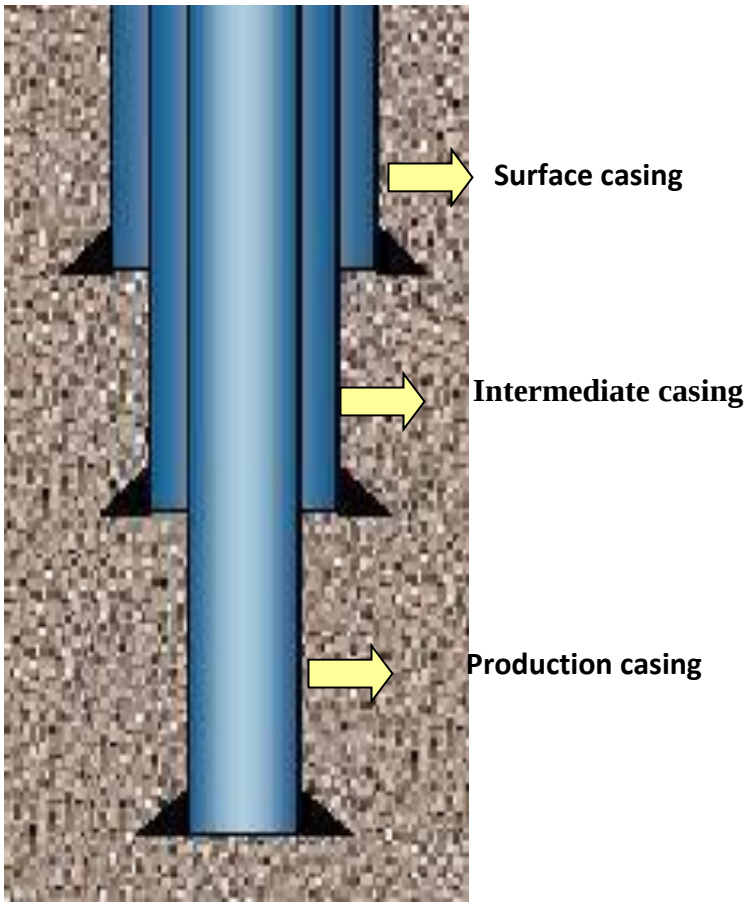
تشكل كلفة مواسير التغليف جزءاً لا بأس به من الكلفة الإجمالية للبئر، حيث تشكل حوالي 20% من الكلفة الإجمالية للبئر، لذلك فإن اختيار قطرها ونوعها وعمق إنزالها هي من الاعتبارات الهندسية والاقتصادية الهامة جداً. ويمكن تلخيص الوظائف الهامة لمواسير التغليف كما يلي:

1- الحفاظ على ثبوتية جدران البئر, أي تؤمن دعم الطبقات الضعيفة والمتشققة، ومنع تكهف جدران البئر خلال عمليات الحفر.
2- 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.
3- منع تلوث الطبقات القريبة من السطح والحاملة للمياه العذبة.
4- تشكل قناةً لمرور السوائل الهيدروكربونية، حيث أن معظم عمليات الإنتاج تتم من خلال مواسير الإنتاج التي تنزل داخل مواسير التغليف.
5- تؤمن التحكم بالآبار كونها تشكل قاعدة متينة ومحكمة لتثبيت المعدات المختلفة (كأجهزة منع الانفجارBOPs التي تجهز بها فوهة البئر أثناء الحفر)، أو كشجرة الميلاد ومواسير الإنتاج أثناء الإنتاج.
6- تؤمن بئراً بقطر وعمق مناسبين يمكّنا من إنزال أجهزة الاختبار وتجهيزات الإنهاء للآبار.

3-1-2- أنواع مواسير التغليف Typesof casing[22,23,] :

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 على طول البئر، بالإضافة إلى وجود طبقات ضعيفة أو طبقات غير متماسكة أو طبقات من الشيل التي تؤدي إلى تهدم جدران البئر، كل ذلك يتطلب إنزال مواسير تغليف لعزل تلك الطبقات التي تؤدي إلى مشاكل كثيرة، ولتسمح بالحفر للوصول إلى العمق النهائي للبئر(TD).

تصنف مواسير التغليف اعتمادا على الوظائف الاساسية لمجموعة مواسير التغليف، والتي تستخدم بشكل متكرر على الشكل التالي.



الشكل(3-1) مواسير التغليف

- ✓ **مواسير التغليف الموجهة (الدليلة)(pipeConductorpipe or drive) :**

تنزل مواسير التغليف الموجهة من السطح إلى عمق قليل، وذلك لحماية الطبقات غير المتماسكة القريبة من السطح، وعزل الطبقات الحاملة للمياه العذبة من التأثّر بسائل الحفر، كما تؤمن عودة سائل الحفر من البئر إلى خزانات سائل الحفر.

يتراوح عمق إنزال مواسير التغليف الموجهة من 100-400 ft ، أما قطرها الذي يستخدم في الشرق الأوسط فهو ("5/8 18 أو "20)، أما في بحر الشمال فإن قطرها يكون عادة "26 أو "30. تسمنت مواسير التغليف الدليلة إلى السطح، وتستخدم لدعم مجموعة مواسير التغليف للمراحل اللاحقة وتجهيزات رأس البئر، وتقص عند السطح بعد إنزال مواسير التغليف السطحية .

تستخدم في عمليات الحفر البحري مواسير التغليف الموجهة، والتي تدعى الموجه البحري (stovepipe or marine conductor) ، وهي الدعامة الأساسية في عمليات الحفر البحري، وهذه المواسير لا تتحمل أي وزن من تجهيزات رأس البئر، ويتراوح قطرها النموذجي("42-"26).

✓ **<u>مواسير التغليف السطحية (Surface casing):</u>**

تعتبر مواسير التغليف السطحية المجموعة الأولى التي تنزل بشكل إلزامي في البئر، والتي يجب أن تدعمّ بشكل جيد(تسمنت بكاملها)، وهي تشكل الركيزة الأساسية في بناء البئر، ويجب أن تحقق الوظائف الآتية :

1- منع تكهف الطبقات الضعيفة التي يمكن أن تصادف عند الأعماق الضحلة. وهذه المواسير يجب أن تثبت في طبقة قاسية (مثل الحجر الكلسي القاسي) ، وهذا يحمي الطبقات المتواجدة عند حذاء مواسير التغليف من التتشقق عند الضعوط الهيدروستاتيكية العالية التي تصادف أثناء الحفر.

2- عزل الطبقات السطحية غير المتماسكة، والطبقات التي تؤدي لتهريب (تسرب) سوائل الحفر

3- حماية الطبقات السطحية الحاملة للمياه العذبة ومنع تلوثها بسائل الحفر.

4- تشكل قاعدة لتثبيت أجهزة منع الإنفجار على فوهة البئر

5- تؤمن إجراء اختبار منع التسرب (Leak-off test.).

إن عمق إنزال مواسير التغليف السطحية يتغير بشكل كبير، ويحدد بحيث تنزل قبل الوصول إلى أي طبقة خازنة للمركبات الهيدروكربونية. ويتراوح عمق إنزالها من 200 قدم إلى عدة ألاف من الأقدام . أما قطرها فيتراوح عادة من ("20 – "5/8 8) . ولكن القطر النموذجي لهذه المواسير ("3/8 13) في الشرق الأوسط، أما في بحر الشمال("5/8 18 or "20) .

إن القسم من رأس البئر عند النهاية العلوية لمجموعة مواسير التغليف السطحية يدعى رأس مواسير التغليف (casing head)، التي تربط بشرار (screwed)، أو تلحم (welded) على مواسير التغليف السابقة.

✓ **مواسير التغليف الوسطية(intermediate or protective casing):**

تنزل مواسير التغليف الوسطية (وتعرف أيضا بمواسير الحماية) إلى بداية أو نهاية الطبقات ذات الضغوط الطبقية العالية، وذلك لحماية مواسير التغليف للمرحلة السطحية من التعرض للضغوط الطبقية المرتفعة أثناء حفر الطبقات الحاوية على النفط والغاز، أو لعزل الطبقات التي تؤدي إلى تهريب شديد لسائل الحفر، أو تلك الطبقات التي تتأثر بشدة بسائل الحفر(الطبقات الملحية , طبقات الشيل).أي أن الهدف من إنزالها هو السماح بتعميق البئر، وذلك بعزل كل الطبقات الضعيفة، التي يمكن إما أن تسبب تكهفاً لجدران البئر، أو تسبب تسرباً لسائل الحفر. يتراوح عادة عمق إنزال مواسير التغليف الوسطية من(3000-8000 ft) ، أما قطرها فيتراوح بين ("3/8 13-"5/8 7). ولكن معظم الأقطار الشائعة لهذه المواسير هي (”3/8 13 or 5/8" 9) .

يدعى القسم من رأس البئر عند النهاية العلوية لمجموعة مواسير التغليف الوسطية (casing spool).

✓ **مواسير التغليف الإنتاجية (production casing) :**

وهي المجموعة النهائية (الأخيرة) من مجموعة مواسير التغليف، والتي تنزل عادة حتى نهاية الطبقة المنتجة، ويمكن أن تنزل إلى بداية الطبقة المنتجة. وتنزل هذه المرحلة لعزل كل الطبقات الأخرى عن الطبقة المنتجة، كما تؤمن التحكم بالضغط داخل البئر أثناء إنتاج الموائع الطبقية، وتمكن من الاستثمار الانتقائي (المنفصل) للمجالات الخازنة للموائع الطبقية، وإجراء عمليات تحسين نفوذية المناطق المجاورة للبئر (تحميض , تشقيق هيدروليكي).

تتراوح أقطار مواسير التغليف الإنتاجية بين("7- "1/2 4)، ولكن القطر الأكثر استخداما" هو القطر " 7 .

إن القسم من رأس البئر(wellhead) عند النهاية العلوية لمجموعة مواسير التغليف الإنتاجية يدعى رأس مواسير الإنتاج (tubing head).

✓ **مواسير التغليف الضائعة (liner):**

وهي مجموعة مواسير التغليف التي لاتصل إلى السطح (طولها أقل من عمق البئر). ويتم تعليق مواسير التغليف الضائعة بواسطة أجهزة تعليق (liner hanger) (باكر وسليبس) مناسبة داخل مواسير التغليف للمرحلة السابقة.

❖ **أنواع اللاينر (Types of liners) شكل(3−2) :**

تصنف مواسير التغليف الضائعة (**liner**) إلى الأنواع الآتية:

- لاينر الحفر (drilling liners): ويستخدم لعزل الطبقات التي تؤدي لتسرب سوائل الحفر، أو الطبقات ذات الضغوط الطبقية الشاذة لتأمين استمرار الحفر(تعميق البئر)، وذلك للوصول إلى العمق النهائي للبئر.
- لاينر الإنتاج (production liners): وينزل بدلاً من إنزال مواسير التغليف بشكل كامل (full casing)، وذلك لعزل الطبقات المنتجة، أو يستخدم في عمليات الحقن.
- لاينر من نوع (tie-back-liner): وهو القسم من مواسير التغليف الذي تتم إطالته من قمة اللاينر حتى السطح، ويمكن أن تتم سمنتته كما يمكن أن لا يسمنت.
- لاينر من نوع (The scab liner): وهو الجزء من مواسير التغليف الذي لا يصل إلى السطح، ويستخدم لإصلاح الضرر الموجود في مواسير التغليف. وهو عادة يعزل بعوازل (بواكر) من الأعلى والأسفل، وفي بعض الحالات يمكن أن يسمنت.
- لاينر من نوع (The scab tie-back liner)): وهو القسم من مواسير التغليف الذي تتم إطالته ولكن لايصل إلى السطح وهو عادة يسمنت.

❖ **محاسن اللاينر (Advantages of liner) :**

تتميز مواسير التغليف الضائغة من نوع لاينر الإنتاج (production liners) بالآتي:

1. كلفتها القليلة قياسا" مع المواسير الكاملة، لأن كمية المواسير المستخدمة أقل وزنا"، كما أن زمن إنزال مواسير التغليف وزمن السمنتة يكون قليلا".
2. يسمح بإنهاء البئر باستخدام أقطار مثالية لمواسير الإنتاج .

وهناك محاسن أخرى **للاينر** :

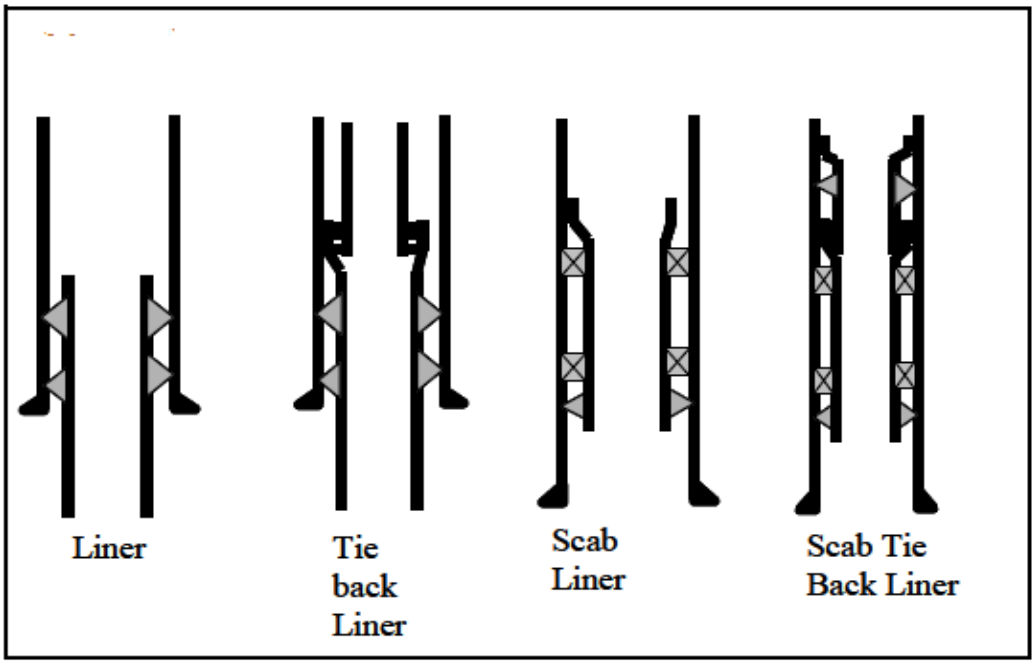
1− إنهاء البئر بأقل وزن على رأس البئر وعلى مواسير التغليف السطحية.

2− يسمح بالحفر باستخدام مجموعة مواسير حفر غير متجانسة .

3− −يؤمن عملية سمنتة جيدة (heavy wall cemented) خلال سمنتة الطبقات الملحية، وذلك عند استخدام **لاينر** من نوع (The scab tie-back liner) .

سيئات(عيوب) اللاينر (The disadvantages of a liner) :

1. إمكانية حدوث تسرب(Leak) للموائع عبر مثبت اللاينر (liner hanger).
2. صعوبة الحصول على سمنتة أولية جيدة، وذلك بسبب الفراغ الحلقي الصغير بين اللاينر وجدران البئر.

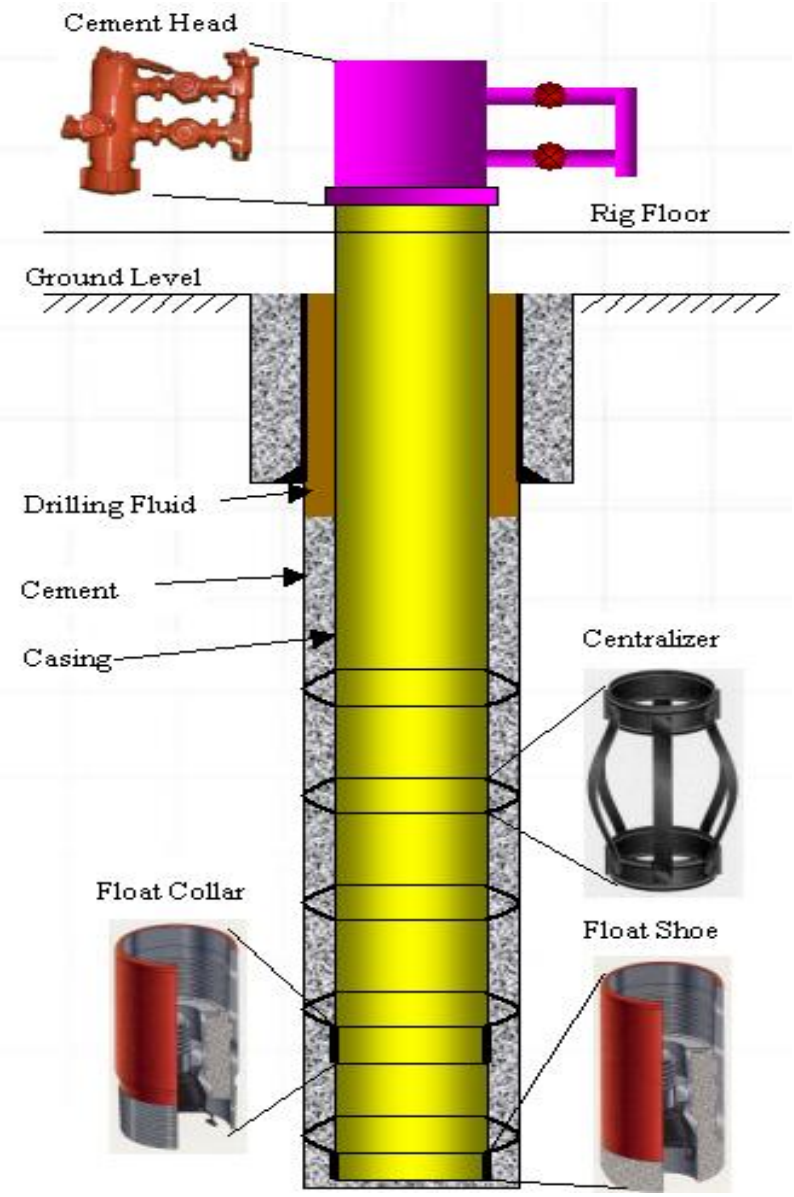


الشكل (3–2): أنواع اللاينر.

3–1–3– متممات مواسير التغليف (Casing accessories)[34,35,17,78,] :

وهي التجهيزات الميكانيكية التي تتطلبها سمنتة مواسير التغليف. وتتألف من الأجزاء الآتية، الشكل (3–3):

1. حذاء التوجيه (Guide Shoes)
2. حلقة الصد (Float collars)
3. الفواصل الإسمنتية (Cement plug) أو سدادات المسح (wiper plug)
4. وصلة المرحلتين (Two stage collar OR DV toll).
5. الخادشات والممركزات (Scratchers & centralizers)



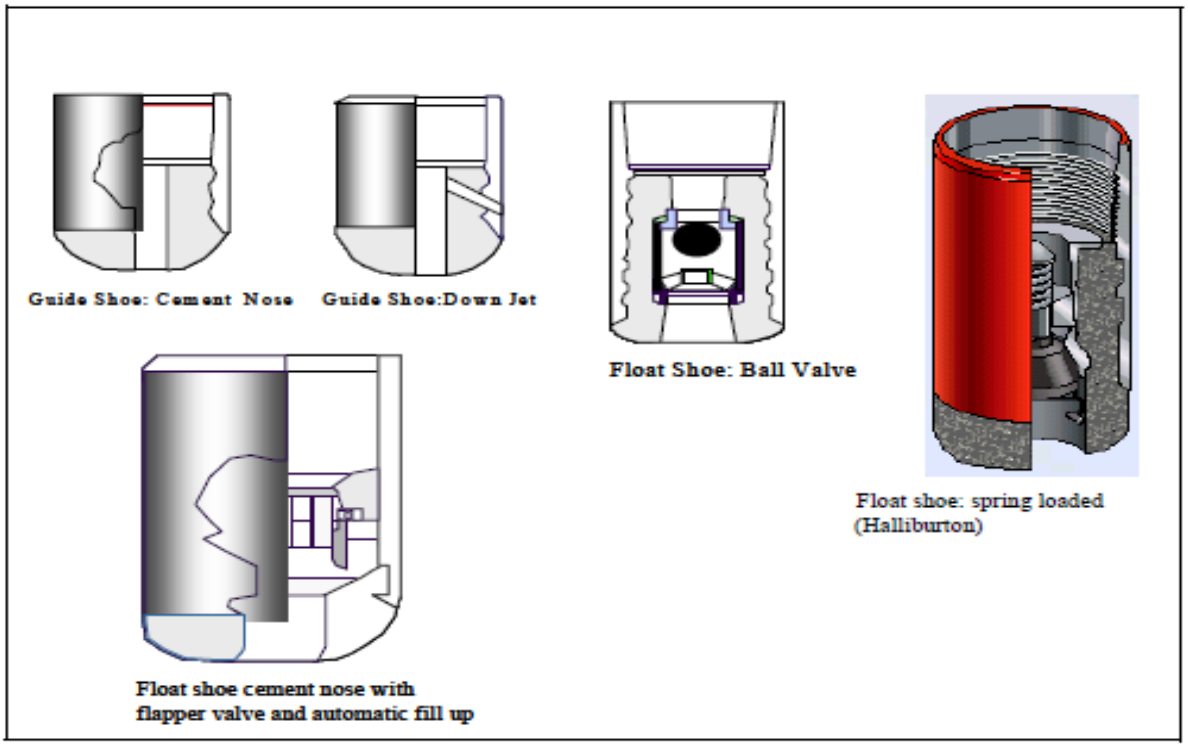
الشكل (3–3): متممات مواسير التغليف.

حذاء التوجيه (Guide Shoes) :

يصنع حذاء التوجيه من الإسمنت لسهولة طحنه أثناء متابعة الحفر خلال المواسير. أما جسمه فهو عبارة عن ماسورة معدنية بقطر يساوي قطر مواسير التغليف نفسها، وبسماكة جدار تتراوح من ("1-" 0.6) .

يستخدم حذاء التوجيه (يركب في الجزء السفلي لمواسير التغليف) لتأمين إنزال(لتوجيه) مواسير التغليف في البئر، وذلك لمنع اصطدامها بشكل حاد مع 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 ، شكل(3–4) ، وفي هذه الحالة يدعى الحذاء العائم Float shoe ، حيث يستخدم لمنع الإسمنت 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 ، والذي يؤدي إلى تناقص قوى الشد (الذي تتعرض له أجهزة الرفع والإنزال)، والناتجة عن ثقل المواسير بسبب عامل الطفو. ولكن من عيوب استخدام الحذاء العائم هو الزيادة في الزمن اللازم لإنزال مواسير التغليف (RIH) نتيجة التوقف المتكرر عن الإنزال عند تعبئة مواسير التغليف من قبل المضخات. ولكن يمكن التغلب على هذه المشكلة، وذلك باستخدام أحذية مواسير تغليف ذاتية التعبئة (shoe(Automatic fill- up) ، شكل(3–4) ، والتي تسمح بدخول كميات من سائل الحفر الموجود في البئر إلى داخل مواسير التغليف عند ارتفاع الضغط داخل البئر.

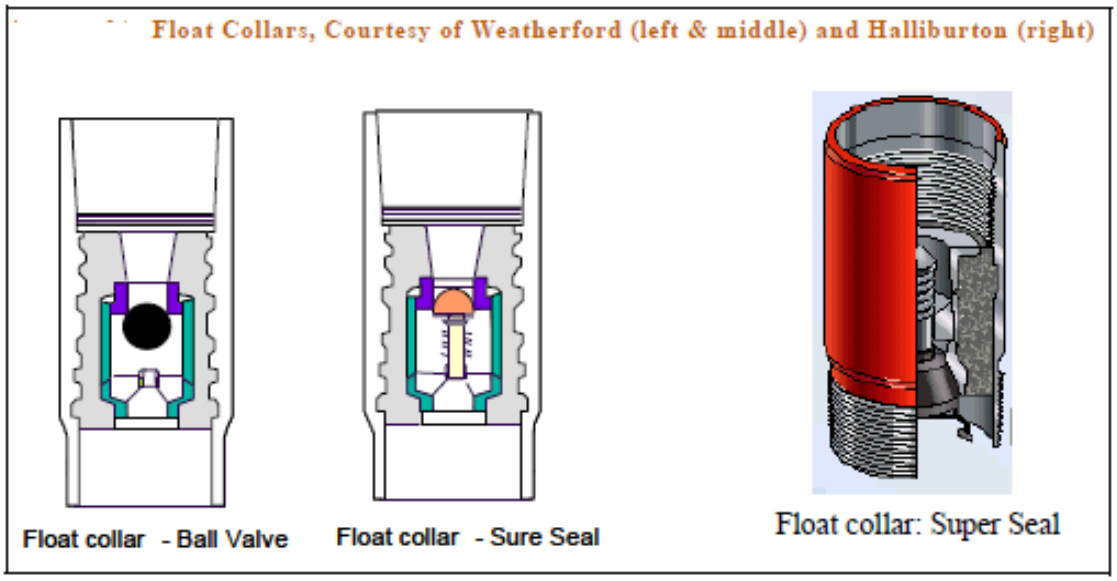


الشكل (3–4): أنواع أحذية التوجيه لمواسير التغليف

حلقة الصد (Float collars) :

تصنع حلقة الصد من مواد قابلة الطحن (الألمنيوم , حديد الزهر) وذلك لسهولة طحنها أثناء متابعة الحفر من خلالها. وتوضع حلقة الصد داخل وصلة مزودة بصمام (كروي أوقلابي) وحيد الاتجاه (one way valve) على بعد ماسورة أو ماسورتين عن حذاء مواسير التغليف. وتؤمن حلقة الصد نفس الوظائف التي يؤمنها حذاء التوجيه العائم، بالإضافة إلى وظيفة إيقاف 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 من جهة أخرى. تدعى المسافة بين حذاء مواسير التغليف وحلقة الصد بمسار الحذاء (shoe track)،

والتي تحافظ على كمية الإسمنت الملوثة (نتيجة اختلاطها مع سائل الإزاحة) المتبقية داخل مواسير التغليف. وفي الشكل (3-5) نبين أنواع حلقات الصد المستخدمة أثناء عملية السمنتة.



الشكل (3-5)نبين أنواع حلقات الصد المستخدمة أثناء عملية السمنتة.

الفواصل الإسمنتية (Cement plug أو سدادات المسح wiper plug) :

تستخدم الفواصل الإسمنتية – والتي تنزل داخل مواسير التغليف أمام وخلف السائل الإسمنتي– للتقليل من تلوث السائل الإسمنتي بسائل الحفر. تصنع الفواصل الإسمنتية من الألمنيوم المسبوك مع جسم خارجي من المطاط ، وذلك لسهولة الطحن. يصنّع المطاط على شكل زعانف، كي يكون بإمكان الفاصل إزالة الطبقة الرقيقة (film) من سائل الحفر أو السائل الإسمنتي عن السطح الداخلي لمواسير التغليف.

تصنف الفواصل الإسمنتية إلى فاصل إسمنتي سفلي (القاعي، الأول) وفاصل إسمنت علوي(الثاني)(bottom &top plug) ، الشكل (3-6). يستخدم الفاصل الإسمنتي السفلي، الذي ينزل قبل ضخ السائل الإسمنتي لفصل سائل الحفر عن السائل الإسمنتي . لقد تم تصميم الفاصل الإسمنتي السفلي بفتحة مركزية (مجوف من الداخل) مغطاة بغشاء رقيق(diaphragm) من المطاط أو البلاستيك، الذي يتمزق عند تعرضه للضغط، نتيجة استمرار ضخ السائل الإسمنتي، وذلك بعد استناده على حلقة الصد، ليسمح للسائل الإسمنتي بالمرور خلاله، وتوضعه خلف مواسير التغليف. أما الفاصل الإسمنتي العلوي أو سدادة الإزاحة (seal off plug)(وهو من النوع الأصم) الذي يفصل بين السائل الإسمنتي الذي تم ضخه

داخل مواسير التغليف، وسائل الإزاحة الذي يضخ بعده ، وعند وصوله إلى حلقة الصد تحدث زيادة مفاجئة في ضغط الضخ على السطح . الشكل(3–6) نبين أنواع الفواصل الإسمنتية.





الشكل (3–6): أنواع الفواصل الإسمنتية

وصلة المرحلتين (Two stage collar OR DV toll) :

تستخدم وصلة المرحلتين عند سمنتة مواسير التغليف التي تنزل إلى أعماق كبيرة، وذلك لمنع تعرض الطبقات الضعيفة لضغوط هيدروستاتيكية كبيرة، والناتجة عن الارتفاع الكبير لعمود السائل الإسمنتي.

تصنع وصلة المرحلتين من نفس المعدن الذي تصنع منه مواسير التغليف، وتجهز بلوحتين داخليتين أو بمسندين Two sleeves : مسند علوي ومسند سفلي (an upper sleeve& a lower sleeve) يثبتان داخل الوصلة عن طريق مسمار أمان(shear pins) أو مسمار تثبيت اللوحتين، كما تجهز الوصلة أيضا"بفتحات أو ثقوب على سطحها، حيث تكون هذه الثقوب مغطاة (مغلقة في البداية عند إنزالها) بالمسند السفلي، والتي تفتح باستخدام فاصل الفتح (opening bomb)، ثم تغلق هذه الثقوب مرة ثانية بإنزال فاصل الإغلاق (closing plug)،

الذي يدفع أمامه المسند العلوي لتحقيق وضعية الإغلاق (closing position). وفي الشكل(3-8) نبين الوصلة الإسمنتية مع فواصل الفتح والإغلاق.



الشكل(3-8): الوصلة الإسمنتية مع فواصل الفتح والإغلاق .

الخادشات والممركزات (Scratchers&centralizers) :

كما هو معروف، فإن إحدى وظائف سائل الحفر هي بناء جدار البئر عن طريق تكوين 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 .

تستخدم الخادشات (المنظفات) في تنظيف جدران البئر من كعكة الحفر، قبل وخلال عملية السمنتة، وذلك عن طريق الحت (abrasion)، الناتج عن تدوير مواسير التغليف عند استخدام خادشات دورا نية (Rotating scrathers)، أو عن طريق الحركة الترددية لمواسير التغليف عند استخدام خادشات ترددية (Reciprocating scrathers).

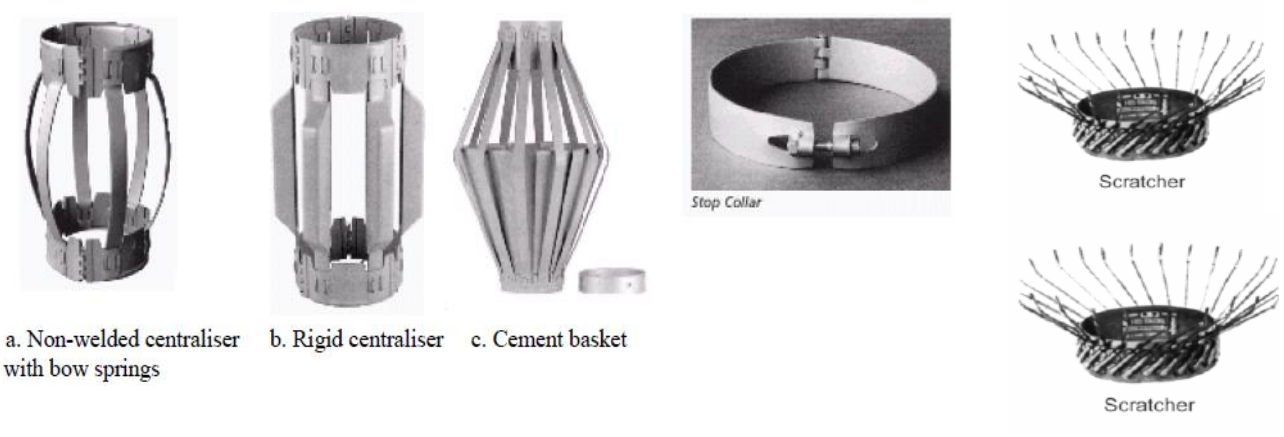
إن نزع كعكة سائل الحفر يؤدي إلى ترابط أفضل بين الحجر الإسمنتي وجدران البئر، ويبعد احتمال تكون قنوات في السائل الإسمنتي أثناء عملية الإزاحة، حيث اتضح من التجارب الحقلية أنه بالإمكان تجنب تكون هذه القنوات باستعمال الخادشات والممركزات المصحوبة بحركة ترددية (صعودا"ونزولا") لمواسير التغليف أثناء عملية السمنتة.

توضع الخادشات حول مواسير التغليف (على القطر الخارجي لمواسير التغليف) بأعداد تتعلق بظروف البئر(لا يجوز استخدامها دون وجود ممركزات).

بينت التجارب الحقلية أن إزاحة سائل الحفر تتحسن بشكل كبير عند تمركز مواسير التغليف داخل البئر، حيث أن عدم مركزة مواسير التغليف ستسمح للسائل الإسمنتي بالمرور خلال سائل

الحفر، تاركا" قنوات غير مسمنتة حول مواسير التغليف. فالممركزات هي أدوات تستخدم لإبعاد مواسير التغليف عن جدران البئر، وبذلك تسمح بالحصول على حجر إسمنتي بسماكة متجانسة" حول مواسير التغليف، كما تسمح بتوزيع متساو للضغط الهيدروستاتيكي في الفراغ الحلقي، وبذلك تمنع احتمال استعصاء مواسير التغليف بسبب فرق الضغط الناتج عن الفرق بين ضغط عمود سائل الحفر في البئر وضغط الموائع في الطبقة (استعصاء تفاضلي).

يختلف عدد الممركزات التي يجب استخدامها تبعا" لدرجة ميل البئر، وطول المجال الذي يجب سمنتته. يتم تحديد حركة القاشطات والممركزات أثناء تنزيل مواسير التغليف أو أثناء حركتها صعودا" ونزولا" من خلال أطواق أو حلقات التوقف (Stop collars OR ring). وفي الشكل (3–9) نبين الممركزات والخادشات وأطواق أو حلقات التوقف، حيث تساعد هذه الحلقات على عدم نزع كعكة سائل الحفر عن جدران البئر أثناء تنزيل مواسير التغليف بواسطة الخادشات المثبتة عليها.



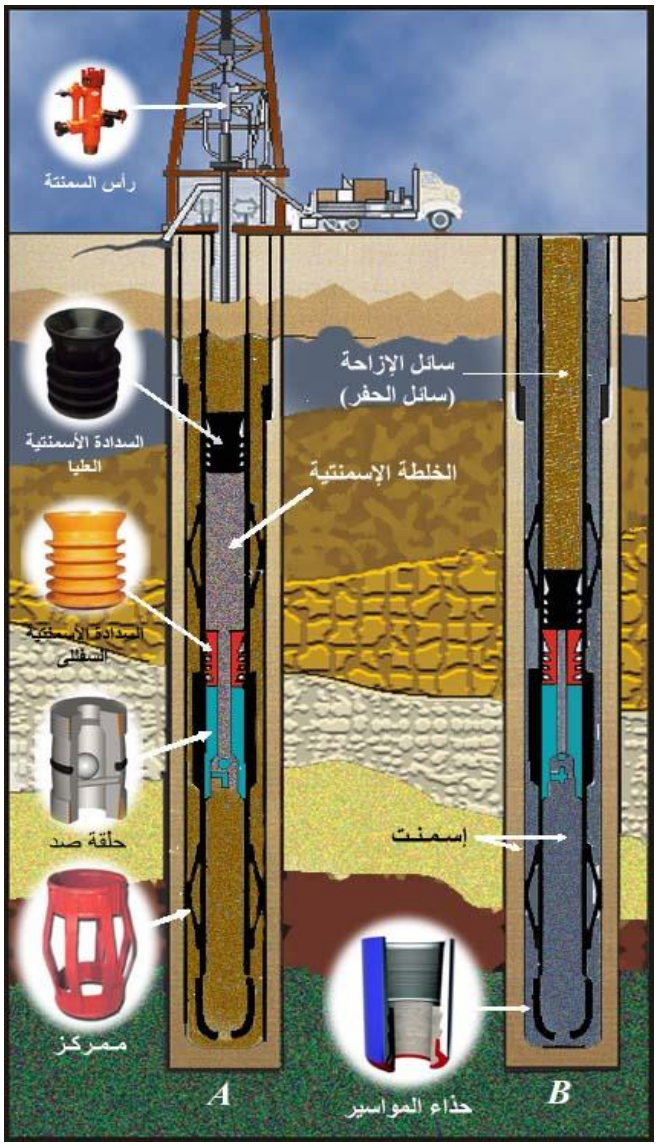
a. Non-welded centraliser with bow springs b. Rigid centraliser c. Cement basket

شكل (3–9) أطواق و حلقات توقف

2-3- سمنتة آبار النفط: (*Oil well cementing*)

السمنتة هي عملية مزج السائل الإسمنتي (مسحوق الإسمنت ,الماء ,الإضافات) وضخه داخل مواسير التغليف، حيث يدفع بواسطة سائل الإزاحة (*Displacement fluid*) ليصل إلى الفراغ الحلقي بين القطر الخارجي لمواسير التغليف وجدار البئر، والذي يتصلب بعد فترة قصيرة من الزمن(*set shorting*)، ليشكل كتلة صلبة (*solid mass*) أو حجراً إسمنتياً (*set cement*) خلف هذه المواسير، مهمتها تدعيم جدران البئر وعزل الطبقات عن بعضها.

والشكل (3-10) يبين رسماً تخطيطياً لعملية سمنتة آبار النفط .



الشكل (3-10) عملية السمنتة

3-2-1- أهداف السمنتة (*purposesforcementing*)[22] :

تنفذ عملية السمنتة (*cementing jobs*) في أبار النفط والغاز لعدة أسباب هي :

- تدعيم مواسير التغليف (*casing support*) من خلال تحقيق الترابط بينها وبين جدار البئر.
- تمنع تقوض مواسير التغليف وجدار البئر، من خلال مقاومة التشوهات اللدنة القصفية للصخور المحيطة، التي يمكن أن تؤثر على مواسير التغليف وتسبب تقوضها .
- عزل الطبقات (*zonal isolation*) : عزل الفراغ الحلقي خلف مواسير التغليف لمنع انتقال الموائع الطبقية بين الطبقات المختلفة (طبقة – طبقة، أو طبقة – سطح) وكذلك منع الغاز أو الموائع الطبقية ذات الضغط العالي من الانتقال في الفراغ الحلقي بين مواسير التغليف وجدار البئر، وارتفاعها إلى السطح، والتي يمكن أن تسبب مشاكل مثل الحرائق.
- الحماية من التآكل (*corrosion protection*): عزل معدن المواسير أو التقليل إلى أدنى حد ممكن من التأثير التآكلي للغازات والسوائل التي تحويها الطبقة.
- تكوين قاعدة أو نقطة انطلاق (*kick of plugs*) لعمليات الحفر الموجه أو المائل .
- معالجة التسرب(*lost circulation*): أي عزل أو إغلاق مناطق تسرب السوائل في البئر المفتوح أثناء عمليات الحفر، وعزل المجالات التي تؤدي لتدفق المياه ،أو المجال المماه، الذي ينتج بنسبة مرتفعة من الماء .
- هجر البئر (*well abandonment*) أي إغلاق البئر، بهدف حفر أخرى جديدة، أو عزل جزء من البئر المفتوح عند اختبار عدة طبقات تخترق من قبل البئر في مرحلة واحدة .
- تزودنا بقاعدة متينة ومحكمة لتجهيزات التحكم والسيطرة والأمان، التي توضع على رأس البئر.

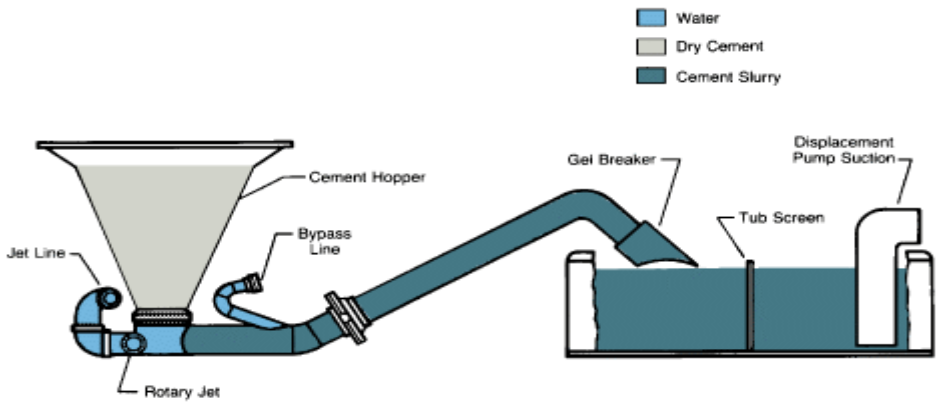
3-2-2- أنواع العمليات الإسمنتية (*Types of cementing operation*)[23]:

- السمنتة الأولية (*Primary cementing*) : تشمل السمنتة الأولية كل عمليات تثبيت مواسير التغليف أو المواسير الضائعة (*liner*) في جدار البئر المحفورة حديثا ، حيث يتوضع السائل الإسمنتي الفراغ الحلقي بين مواسير التغليف وجدار البئر بسبب إزاحته لسائل الحفر الموجود في الفراغ الحلقي بشكل كامل، ليسمح بترابط كاف لمواسير التغليف والطبقة نتيجة نمو خواصه العازلة .
- السمنتة الثانوية (*secondary cementing*) أو الإصلاحية (*Remedial Cementation*) :

تستخدم السمنتة الثانوية لإغلاق الطبقات غير المنتجة، أو الطبقات المستنزفة، وكذلك لمعالجة مناطق تسرب سوائل الحفر، ولإصلاح التسرب في مواسير التغليف، وأحيانا لإصلاح عمليات السمنتة الأولية. ويحقن الإسمنت إما تحت الضغط (*Squeeze job*)، أو بعدم باستخدام ضغط ضخ كبير كما في إنشاء الجسور و السدادات الإسمنتية (*Plug – Back cementation*) داخل الآبار.

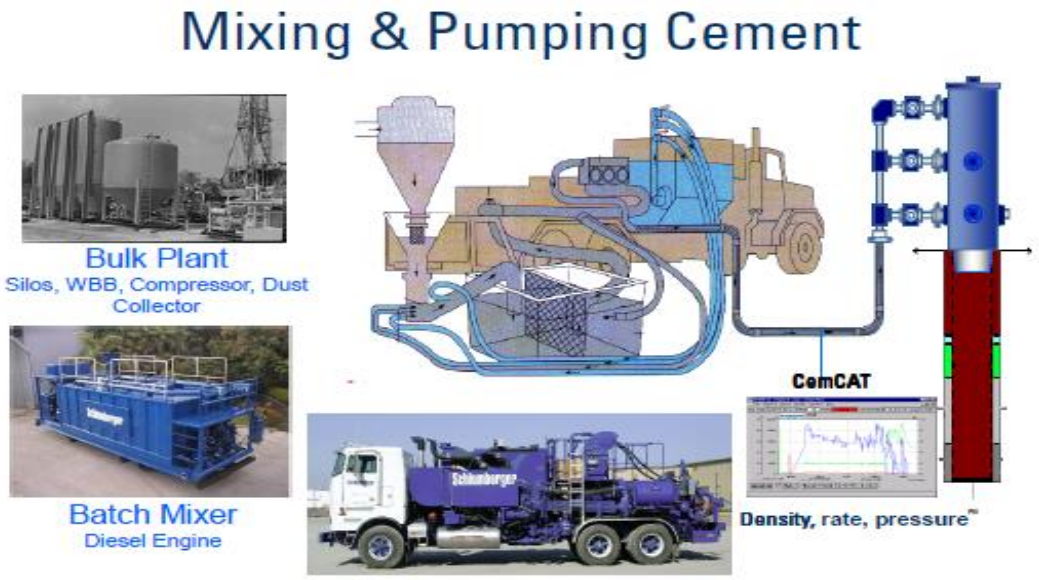
3-2-3- آلية السمنتة (Mechanics of cementing) :

اعتمادا" على عمق البئر، وتبعا" للحرارة المتوقعة في قاع البئر, يحضر السائل الإسمنتي بالمزج القوي الشديد لمسحوق الإسمنت مع التيار النفثي للماء مع الإضافات الكيميائية، للتحكم بمواصفات السائل الإسمنتي. يضخ المزيج الناتج مباشرة إلى خزان، حيث يتم قياس مواصفات السائل الإسمنتي الشكل (3,a-11). بعد ذلك يضخ السائل الإسمنتي بمضخة ثلاثية الشوط ذات طاقة كبيرة بضغط ضخ عالٍ داخل مواسير التغليف عبر رأس السمنتة Head cementing .



الشكل (3,a-11): **خلاط نفثي jet mixer**

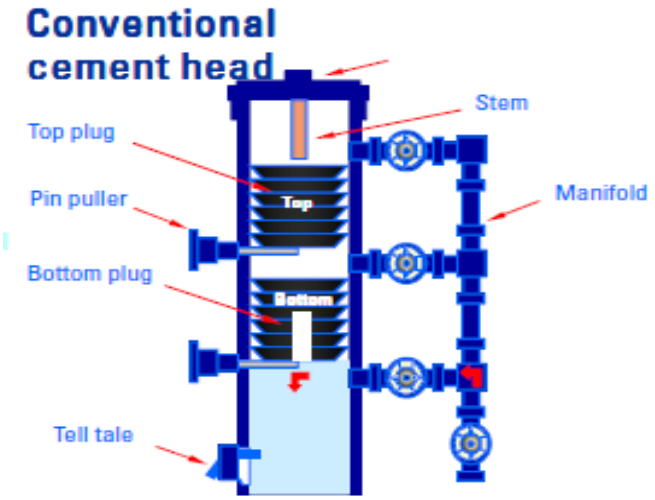
ورأس السمنتة عبارة عن قطعة صغيرة من ماسورة التغليف بطول يتراوح بين("20-32") ، تنتهي من الأسفل بشرار لربطها مع مواسير التغليف. كما يجهز رأس السمنتة بمجموعة من الخطوط **manifold** التي يتم من خلالها وصل مواسير التغليف مع وحدات ضخ الإسمنت **cementunit pumping** الشكل (3,b-11): أو مع مضخات جهاز الحفر **rig pump**



الشكل (3,b–11) نبين وحدات مزج وضخ السائل الإسمنتي

. ويحتوي رأس السمنتة على صماميّ تثبيت **(retainer valve two)** (وهو عبارة عن مسمار لولبي يحفظ الفواصل الإسمنتية داخل رأس السمنتة). كما يحتوي رأس السمنتة على غطاء قابل للفك بسرعة، والذي يمكن أن ينزع عندما نريد إنزال الفواصل يدويا" بدلا" من استخدام صمامات التثبيت. ويوجد نوعان من رؤوس السمنتة :

1. رأس سمنتة بفاصل إسمنتي واحد (single plug head): ويحتوي على صمام واحد لحفظ الفاصل .
2. رأس سمنتة بفاصلين إسمنتيين(double plug head) كما في الشكل (3–12).

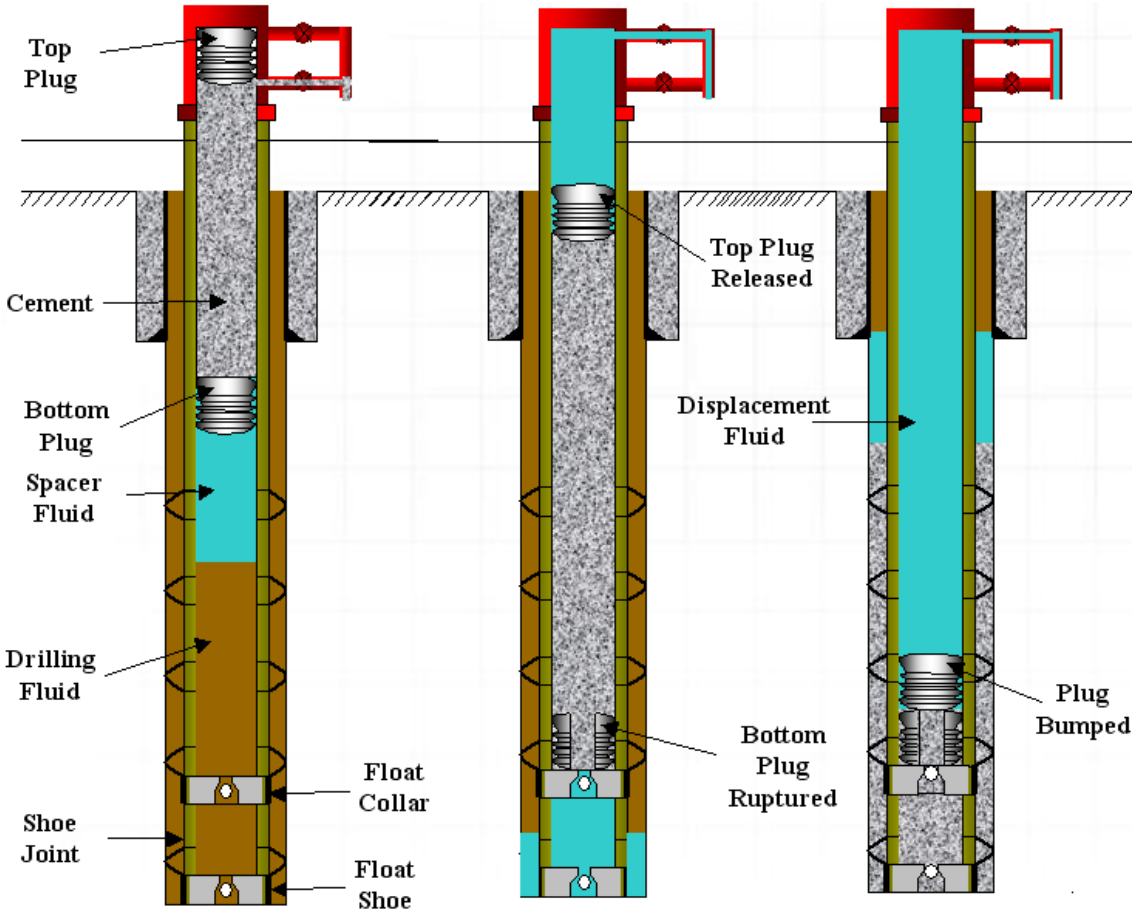


الشكل (3–12): رأس السمنتة

3-2-4- طرق السمنتة (Method of cementing) :

◆ **السمنتة بمرحلة واحدة (Single stage cementing):**

تستعمل عادة هذه الطريقة لسمنتة مواسير التغليف الموجهة ومواسير التغليف السطحية ، حيث يتم تحضير الخلطة الإسمنتية وضخها داخل مواسير التغليف. يبين الشكل (3-13) عملية السمنتة بمرحلة واحدة . بعد إنزال مواسير التغليف داخل البئر يتم إجراء دوران لسائل الحفر الموجود داخل البئر بهدف تجانسه، ومن ثم ينزل الفاصل الإسمنتي الأول (السفلي) ويضخ سائل الفصل (spacer) والسائل الإسمنتي على التوالي. وباستمرار الضخ يدفع السائل الإسمنتي الفاصل الإسمنتي داخل مواسير التغليف حتى يصل إلى مقعده على حلقة الصد. ومع استمرار الضخ أيضا"يتمزق الغشاء المركزي في الفاصل الإسمنتي، وبذلك يسمح للسائل الإسمنتي بالمرور من خلاله باتجاه الفراغ الحلقي. وعند الانتهاء من ضخ الحجم الكلي للسائل الإسمنتي، ينزّل الفاصل الإسمنتي الثاني (العلوي)، وذلك من خلال حل مسمار حفظ الفاصل في رأس السمنتة)، ويباشر بضخ سائل الحفر(سائل الإزاحة)، الذي يدفع الفاصل العلوي باتجاه الأسفل، سامحا"للسائل الإسمنتي بالتوضع خلف مواسير التغليف في الفراغ الحلقي. تعتبر عملية السمنتة منتهية عندما يستقر الفاصل الإسمنتي العلوي فوق الفاصل الإسمنتي السفلي . يغلق البئر ويترك السائل الإسمنتي ليتصلب في الفراغ الحلقي.



الشكل (3-13): عملية السمنتة بمرحلة واحدة

◆ السمنتة متعددة المراحل (Multi-stage cementing) [77,78]:

تستخدم السمنتة متعددة المراحل في سمنتة مواسير التغليف التي يتعذر فيها رفع السائل الإسمنتي إلى الارتفاع المحدد له عند إجراء عملية السمنتة بمرحلة واحدة، وتستخدم بهدف .

1-تقليل ضغط الضخ الكلي، وذلك عند سمنتة الآبار العميقة التي تتطلب ضخ كميات كبيرة من السائل الإسمنتي, لأن زمن عملية السمنتة يكون كبيرا"، وقد يزيد عن زمن بدء التصلب للسائل الإسمنتي، خاصة عند الضخ بمعدلات قليلة، ولا توجد إمكانية لزيادتها، لأنها تتطلب ضغوطا" مرتفعة، قد تؤثر سلبا" على جدار البئر، وقد تسبب تسريبا" شديدا" للسائل الإسمنتي فيها، كما أن ذلك يتطلب استخدام مضخات ذات استطاعة كبيرة. وبالإضافة إلى ذلك فإن الضخ بضغط مرتفع يعرّض مواسير التغليف لضغط داخلي مرتفع لا تقدر على تحمله.

2-تقليل الضغط الهيدروستاتيكي الناتج عن ارتفاع عمود السائل الإسمنتي على الطبقات الضعيفة والقابلة للتشقق، وبالتالي تقلل من احتمال تشققها .

3-عند سمنتة الآبار ذات درجة الحرارة العالية، والتي تقلل من زمن بدء تصلب السائل الإسمنتي.

4–عندما يتطلب استخدام عدد كبير من وحدات الضخ في آن واحد، إما بسبب عدم توفر العدد اللازم لإنجاز عملية السمنتة بمرحلة واحدة، أو عدم إمكانية تنظيمها حول جهاز الحفر.

5–عند حدوث تسرب للسائل الإسمنتي في الطبقات أثناء عملية السمنتة العادية , ولم يرتفع السائل الإسمنتي في الفراغ الحلقي إلى المكان المحدد له.

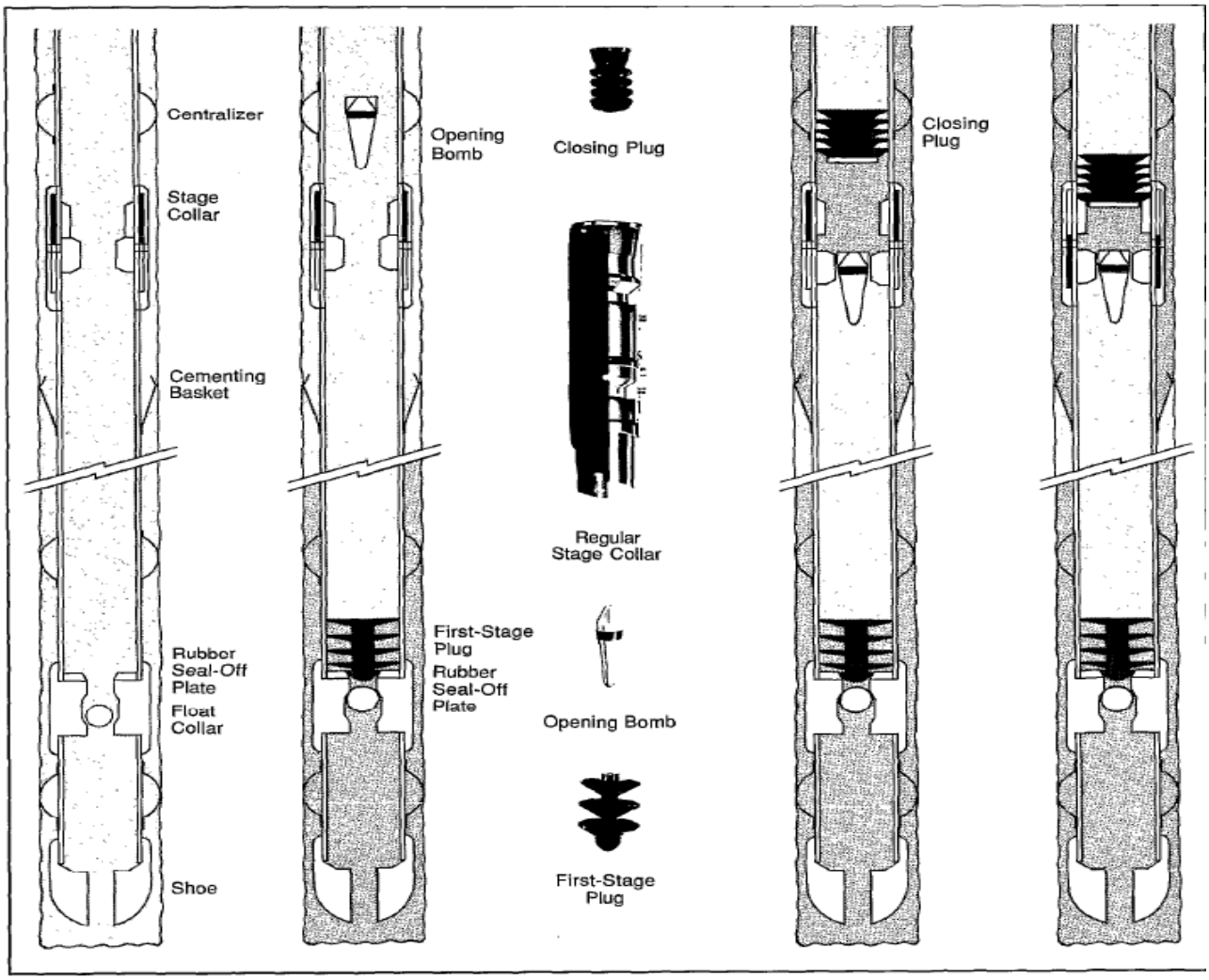
6–عند سمنتة الطول الكامل لمواسير التغليف.

تتم عملية السمنتة على مرحلتين من خلال استخدام وصلة مثقبة تدعى الوصلة الإسمنتية (Stage cementing collars)، التي يتم اختيار عمق تثبيتها اعتماداً على ارتفاع عمود السائل الإسمنتي، وعلى مقاومة الطبقات. يتم تثبيت وصلة السمنتة بمرحلتين على ارتفاع يتراوح بين (50-150 m) فوق الطبقة الضعيفة. ومن المفضل استعمال السلة الإسمنتية (Cement Basket) تحت الوصلة الإسمنتية، وذلك بهدف التقليل من تأثير عمود السائل الإسمنتي على الطبقات الواقعة تحتها، علما" أن السلة الإسمنتية تثبت على مسافة (2-4m) أسفل الوصلة الإسمنتية. بعد إنزال مواسير التغليف إلى قاع البئر يتم إجراء دوران لسائل الحفر بحجم مساوٍ لضعف حجم البئر، وذلك بهدف التأكد من عمل معدات الطفو (حذاء مواسير التغليف, حلقة الصد) بصورة ملائمة وكذلك لتحديد ضغط الدوران.

يتم تنفيذ المرحلة الأولى من عملية السمنتة بنفس أسلوب تنفيذ عملية السمنتة بمرحلة واحدة، حيث تكون الوصلة الإسمنتية مغلقة في هذه الحالة، ولكن ارتفاع عمود السائل الإسمنتي ينتهي أسفل الوصلة الإسمنتية مباشرة.

تبدأ المرحلة الثانية من عملية السمنتة بإنزال فاصل أو قذيفة الفتح (opening bomb) من السطح، حيث تبدأ مرحلة ضخ السائل الإسمنتي للمرحلة الثانية. بعد وصول فاصل الفتح إلى المسند السفلي للوصلة الإسمنتية (مقعد الفتح) يطبق ضغط بحدود 1200-1500 psi فوق ضغط الدوران بهدف كسر مسمار حفظ لوحة تغطية الثقوب (shear pins)، وبذلك يتحرر المسند السفلي lower sleeve ويهبط مع فاصل الفتح، مؤديا" إلى فتح ثقوب الوصلة الإسمنتية، عند ذلك يبدأ السائل الإسمنتي بالعبور من خلال هذه الثقوب إلى الفراغ الحلقي.

بعد الانتهاء من ضخ السائل الإسمنتي للمرحلة الثانية يدفع بفاصل الإغلاق(closing plug), ويتبع بضخ سائل الإزاحة، وتستمر عملية الضخ هذه حتى وصول فاصل الإغلاق إلى الوصلة الإسمنتية (يطبق عليه ضغط قدره 1500 psi إضافة إلى الضغط اللازم لتدوير سائل الحفر)، حيث يدفع أمامه المسند العلويupper sleeve للوصلة الإسمنتية ويغلق ثقوبها، ويمنع الاتصال بين داخل مواسير التغليف والفراغ الحلقي، وبذلك تنتهي عملية السمنتة، والتي تلاحظ بالارتفاع الحاد للضغط عند متابعة الضخ. يبين الشكل (3–14) مخطط عملية السمنتة على مرحلتين.



الشكل (3-14): عملية السمنتة على مرحلتين.

في حال تنفيذ عملية السمنتة على ثلاث مراحل تستعمل وصلتان إسمنتيتان (Tow stage cementing) حيث يتم تنفيذ المرحلة الأولى من خلال حذاء مواسير التغليف(casing shoe)، أما المرحلة الثانية فتتم من خلال الوصلة الإسمنتية الأولى، بينما المرحلة الثالثة فتنجز من خلال الوصلة الإسمنتية الثانية.

3-3-خواص السائل الإسمنتي والحجر الإسمنتي :

Cement slurry and Set Cement Properties

تختلف الخواص المطلوبة للخلطة الإسمنتية أو الحجر الإسمنتي تبعاً لأهداف عملية السمنتة. وهكذا من أجل سمنتة مواسير التغليف، فإنه يجب أن يحقق الإسمنت ما يلي:

1. إنتاج خلطة إسمنتية بكثافة معطاة .
2. أن يكون سهل المزج والضخ.

3. تحقيق الخواص الريولوجية المثالية المطلوبة من أجل تأمين إزاحة جيدة لسائل الحفر.
4. أن يحافظ على خواصه الفيزيائية والكيميائية خلال الإزاحة.
5. غير نفوذ لتسرب الغاز في الفراغ الحلقي إذا كان موجوداً عند التوضع .
6. أن تنمو مقاومته بسرعة حال توضعه في الفراغ الحلقي .
7. أن يملك متانة كافية مع الزمن حتى عند تلوثه بسائل الحفر.
8. أن تنمو أو تتطور متانة الترابط مع مواسير التغليف ومع الطبقة.
9. أن يملك نفوذية قليلة.
10. أن تحافظ الخلطة الإسمنتية أو الحجر الإسمنتي على خواصهما تحت الشروط المختلفة من الضغط ودرجة الحرارة.

3-3-1- خواص السائل الإسمنتي (*CementslurryProperties*)[20]:

- **نسبة الماء إلى الإسمنت (*water/ cementratio*):**

تؤثر نعومة الإسمنت على الكثافة الدنيا والقصوى للسائل الإسمنتي، أي على النسبة المنخفضة والعالية للماء في الإسمنت. تعرف كمية الماء الدنيا لأي صنف من أصناف الإسمنت، بتلك الكمية الممكن استعمالها، والتي لا تؤدي إلى تكوين ملاط إسمنتي ذي تماسكية أكثر من *30* وحدة *us* (وحدة تماسك). فإذا كانت نسبة الماء المستخدمة إلى الإسمنت أقل من النسبة الدنيا، فإن ذلك سيؤدي إلى صعوبة مزج السائل الإسمنتي، وزيادة الاحتكاك في الفراغ الحلقي، إضافة إلى ضغط عمود السائل الإسمنتي، واللذان يؤديان إلى تشقق الطبقات الضعيفة وهروب السائل الإسمنتي، إضافة إلى كون الزمن الذي يكون فيه مثل هذا الخليط قابلا للضخ قصيراً جداً .

يعرف المحتوى الأقصى من الماء (نسبة الماء القصوى) بتلك الكمية التي تمزج مع الإسمنت بدون أن تسبب له انفصالاً أكثر من *3.5ml* من الماء بعد ترك السائل الإسمنتي لمدة ساعتين تحت الظروف المخبرية في أنبوبة مدرجة سعتها *250ml*.

إن استخدام نسبة ماء / إسمنت أكبر من النسبة القصوى سوف يؤدي إلى ترسب جزيئات الإسمنت في السائل الإسمنتي، و يشكل جيوباً للماء الحر داخل عمود الإسمنت (الحجر الإسمنتي)، والذي يؤدي إلى تشكل حجر إسمنتي ذي مقاومة منخفضة، وتصبح عملية العزل غير فعالة .

إن نسبة الماء إلى الإسمنت (والتي يعبر عنها بالنسبة المئوية الوزنية)، والتي يجب أن تستخدم مع كل صنف من أصناف الإسمنت حسب قياس *API* موضحة في الجدول (3-1) :

الجدول (3–1): يبين نسبة الماء إلى الإسمنت حسب كل صنف من أصناف الإسمنت.

الصنف	الكثافة Lb/gal	حجم الماء اللازم لكل كيس gal/ sk	حجم الخلطة الناتج عن كل كيس إسمنت (Cu.ftslurry/skCement	النسبة المئوية لماء المزج
A	15.6	5.2	1.18	46
B	15.6	5.2	1.18	46
C	14.8	6.32	1.32	56
D	16.46	4.29	1.05	38
G	15.8	4.97	1.15	44
H	16.46	4.29	1.05	38

- **كثافة السائل الإسمنتي (*slurry density*):**

تعرف كثافة السائل الإسمنتي مثل كثافة أي مادة و هي كتلة واحدة الحجم و يمكن قياسها بواسطة مقياس كثافة سائل الحفر (*Mud balance*) .

يجب التمييز بين الحجم الظاهر (Bulk volume) والحجم المطلق (Absolute volume) للمواد الصلبة التي تكون عادة على شكل مسحوق أو حبيبات. فمثلاً الحجم الظاهر لكيس الإسمنت الذي وزنه 94Lb يساوي $1ft^3$ بينما الحجم الفعلي المشغول من قبل حبيبات الإسمنت هو $0.48\ ft^3$ فقط، وأن الحجم الفارغ والمشغول من قبل الهواء والموجود بين حبيبات الإسمنت يساوي 0.52 من الحجم الظاهر ولهذا في حالة مزج $1ft^3$من الحجم الظاهر للإسمنت مع 0.70 ft^3 من الماء فإن حجم الملاط الإسمنتي سيكون $1.18ft^3$ فقط، أي أن الحجم المطلق عبارة عن إضافات.

إن كثافة الإسمنت الظاهرية هي $94Lb/ft^3$ ، أما الكثافة المطلقة فتساوي 94/0.48=195.8 Lb/ft^3 ، وأن الوزن النوعي المطلق للإسمنت يساوي195.8/62.4=3.14

تحدد كثافة السائل الإسمنتي بالنسبة الصغرى والعظمى (ماء / إسمنت) المسموح بها حسب قياس *PI* . فالسائل الإسمنتي ذو الكثافة المنخفضة يستخدم للتقليل من تسرب السائل ، وتحضر إما باستخدام نسبة مرتفعة من (الماء / الإسمنت) أو باستخدام مواد مقللة لكثافة السائل الإسمنتي (تدرس لاحقا).

أما السائل الإسمنتي ذو الكثافة العالية فيستخدم في الطبقات ذات الضغوط الطبقية العالية، أو الطبقات القابلة للتهدم (*sloughing formation*)، والذي يحضر عن طريق إنقاص نسبة (الماء / الإسمنت)، أو باستخدام إضافات لمواد ذات كثافة عالية ، حيث يتوفر العديد من المواد

التي تستعمل إما لتقليل الكثافة أو زيادتها (نناقش ذلك في فصل الإضافات التي يعالج بها السائل الإسمنتي).

إن استخدام النسبة الصغرى (ماء / إسمنت) تسمح بإعطاء كثافة تتراوح بين (*17.5-18 lb/gal*) ففي هذه الحالة يجب استخدام مرققات (مقللات لزوجة) (*dispersants*) وذلك لزيادة سيولة السائل الإسمنتي (*fluidity of the slurry*).

- **فاقد الرشح (*Filtration of cement slurry , Fluid -loss*)[23,]**

وهو يمثل كمية الماء التي يفقدها السائل الإسمنتي بتأثير فرق الضغط الذي يتعرض له و تعتمد قيمة فاقد الرشح للسائل الإسمنتي على نسبة الماء/الإسمنت، وعلى قيمة فرق الضغط، وهي تتناسب عكسا مع مربع السطح النوعي لمسحوق الإسمنت، وعلى اللزوجة، حيث أن تغير محتوى الماء في السائل الإسمنتي سوف يؤثر كثيراً على خواص السائل الإسمنتي (زمن التصلب– مقاومةالانضغاط– الريولوجية *Reology*). في مثل هذه الحالة فإن تعرّض السائل الإسمنتي للضغط مقابل طبقة نفوذة سوف يؤدي إلى فقدان الماء بالارتشاح (*Filtration*)، وبالتالي فإن السائل الإسمنتي يصبح مسبق الهدرجة (نزع الماء *dehydrate*)، ويصبح غير قابلٍ للضخ، وتحدث هذه الظاهرة بشكل عادي أثناء سمنتة مواسير التغليف، والتي تدعى ما يسمى بالتصلب الوميضي (*Flash set*). وفي أقل الحالات شدة فإن السائل الإسمنتي يصبح ذا لزوجةٍ كبيرةٍ، مما يتطلب ضغط إزاحة (ضغط ضخ) بقيم متزايدة للحركة خلف المواسير، والذي يؤدي إلى زيادة الضغط عن ضغط التشقيق للطبقات الضعيفة .

إن التحكم بفاقد الرشح هو من الأمور الهامة جداً خلال عملية السمنتة، حيث يجب أن يكون فاقد الرشح قليلاً كي لا يؤثر على الطبقات المنتجة، وعلى الأخص، كي لا يؤدي إلى حدوث تماسكية عالية للسائل الإسمنتي، الأمر الذي يؤدي إلى زيادة الضغط على المضخات، وفي بعض الأحيان إلى إيقاف الدوران.

يقاس فاقد الرشح للسائل الإسمنتي باستخدام جهاز مشابه لجهاز الباروئيد (ذي الضغط المنخفض) المستخدم في تعيين هذه الخاصية لسائل الحفر، ويمكن استخدام جهاز بضغط مرتفع عند اللزوم. وبما أن فاقد الرشح للسائل الإسمنتي مرتفع جداً، ويمكن أن يرشح الماء بكامله قبل مرور 30 min, لذلك يتم قياسه خلال زمن t). ويعين فاقد الرشح خلال 30min بالعلاقة الآتية:

$$Q_{30} = Q_t \frac{5.477}{\sqrt{t}} \qquad (1-3)$$

حيث أن Q_{30}: حجم فاقد الرشح بعد $30min/cm^3$

Q_t: حجم فاقد الرشح بعد الزمن t (cm^3).

إن القيم العادية لفاقد الرشح للسائل الإسمنتي غير المعالج (دون إضافات) تتراوح بين (-800 1000 ml/30min) عند فرق ضغط (1000 Psi). قيم فاقد الرشح التي يوصى بها عند سمنتة مواسير التغليف تتراوح بين (100-200 ml/30min) عند ضغط (1000 Psi) . أما من أجل السمنتة تحت ضغط أو سمنتة اللاينر فإن قيم فاقد الرشح تتراوح بين (100-150 ml/30min. أما في الحقل وللحالات التطبيقية فإن قيم فاقد الرشح تتراوح من (-1 150ml/30min) .

يستخدم البنتونايت للتحكم بفاقد الرشح عندما يتطلب استخدام سائل إسمنتي بكثافة قليلة، حيث تتراوح قيم فاقد الرشح بين (*400-500ml/30min*) .

- **زمن التصلب (*Setting time*)**

- **زمن التصلب البدائي (*Initial setting time*) :**

يتم قياس زمن التصلب البدائي بواسطة جهاز يدعى إبرة فيكات (*Vicat needle*) وذلك بقياس عمق اختراق إبرة ذات قطر (*1mm*) ووزن (*300 g*) لملاط إسمنتي (*W/C =0.5*) في درجة حرارة (*140* °F) . إن زمن التصلب البدائي هو الزمن اللازم الذي يمتلك عنده السائل الإسمنتي تماسكية معينة، بحيث أن إبرة الجهاز لا تخترق النموذج كليا، وإنما تبقى (*3-5 mm*) فوق القاعدة السفلى .

يعتبر الإسمنت ذو نوعية جيدة إذا كان زمن تصلبه البدائي يتراوح بين (*95-140 min*) اعتبارا من بدء تحضير السائل الإسمنتي. ويعطي هذا الجهاز مؤشرات مباشرة حول الوقت الذي بإمكان السائل الإسمنتي أن يبقى قابلا للضخ في بئر درجة حرارته بحدود (*140 °F*). وكعامل أمان يجب أن يكون الوقت المستغرق لعملية السمنتة بحدود *0.75* من زمن التصلب البدائي .

- **زمن التصلب النهائي (*Final setting time*) :**

يقاس زمن التصلب النهائي بنفس الجهاز أعلاه، ويعطي مؤشرات حول زمن تصلب السائل الإسمنتي، بحيث يكون بالإمكان إعادة استمرار عمليات حفر الآبار. و يعرف زمن التصلب النهائي بالزمن المستغرق من بدء تحضير السائل الإسمنتي لحين وصوله الى حالة يتعذر على الإبرة اختراق السائل الإسمنتي . يعتبر الإسمنت جيداً إذا كان زمن تصلبه النهائي بعد (*45min*) كحد أقصى بعد زمن تصلبه البدائي . من ناحية عملية يتم استئناف العمل بعد (*12-24 hours*) من إتمام عملية السمنتة .

- **زمن تكاثف السائل الإسمنتي (زمن التثخن) (*Thickening time*) [23]:**

عند إضافة الماء إلى الإسمنت يبدأ التفاعل الكيميائي بين مختلف مركبات الإسمنت، وينتج عنه زيادة في لزوجة السائل الإسمنتي. يتم إجراء قياس زمن التثخن عادةً لتحديد طول الوقت الذي يبقى فيه ملاط الإسمنت في حالة سائلة تحت ظروف المخبر، وهذا يستخدم كطريقة

للمقارنة بين مختلف السوائل الإسمنتية، ومعرفة الفترة التي تبقى فيها قابلة للضخ ، ولذلك بالإمكان استعمال اللزوجة كأساس لتحديد زمن التثخن .

يعرف زمن التثخن بالزمن اللازم لوصول لزوجة السائل الإسمنتي إلى (*100Bc*) وحدة بيردن (*Bearden units*) (*Bc = ΔPI units of consistency*) . على الرغم من أن معهد النفط الأمريكي (*API*) يعتبر أن (*100Bc*) هي نقطة نهاية اختبار زمن التثخين (*Termination point of the thickening time test*) فإن (*70Bc*) تعتبر في الواقع أو بشكل أساسي كقيمة للزوجة العظمى القابلة للضخ (*maximum pumpable viscosity*) . كما أن ثخانة الخلطة الإسمنتية يشار لها باصطلاح أخر يدعى التماسكية (consistency)، ويعتبر البواز وحدة قياسها، وبذلك يعرف زمن التثخين بالوقت اللازم لوصول تماسيكية الخليطة الإسمنتية إلى 100 poise

ومن الضروري التأكيد أن زمن التثخن يجب أن يكون أكبر من الزمن الفعلي اللازم لعملية السمنتة بهدف تجنب تصلب الإسمنت على سطوح الأنابيب ، رأس السمنتة , مواسير الحفر، أو داخل مواسير التغليف، حيث أن نتيجة ذلك تكون مكلفةً جداً، لأن معالجتها تتطلب حفر الحجر الإسمنتي على طول مواسير التغليف من الداخل، وإصلاح سمنتة مواسير التغليف، والتي تكون عادةً أقل كفاءة من عملية السمنتة الأولية الناجحة بالإضافة إلى الزمن المستغرق للمعالجة . لهذا السبب يجب أن يكون زمن التثخن مساويا للزمن الكلي اللازم لإنجاز العمل بزيادة عامل أمان يتراوح من (30-60 min) .

بما أن زمن التثخين يساوي الزمن اللازم لبقاء الملاط الإسمنتي قابلاً للضخ، لذا بالإمكان التعبير عنه بما يلي:

زمن التثخن= زمن الخلط + زمن التحضير على السطح + زمن الإزاحة + زمن إنزال الفواصل الإسمنتية+ عامل أمان.

زمن الخلط T_m: الزمن اللازم لخلط الإسمنت مع الماء ومواد الإضافة، ويحسب بالعلاقة الآتية:

$$Tm = Vc/Vm = Vc/sacks/min \qquad (2-3)$$

حيث:V_m, V_c حجم الإسمنت الجاف , وسرعة المزج على التوالي.

زمن التحضير على السطح Ts: وهوالزمن اللازم لتحضير الخليطة الإسمنتية على السطح وزمن اختباره، وهذا الزمن عادةً يكون قصيراً، وبالإمكان شموله ضمن زمن المزج.

زمن الإزاحة T_d: وهو الزمن اللازم لإزاحة الخلطة الإسمنتية بواسطة سائل لحفر من داخل مواسير التغليف إلى الفراغ الحلقي ، وهذا الزمن يعتمد على سعة مواسير التغليف، وعلى سرعة الإزاحة، والتي تكون مناظرةً لسرعة تشغيل المضخة، وعليه فإن:

$$T_d = V_d / Q_d \qquad (3-3)$$

حيث:V_d: حجم سائل الإزاحة اللازم لإزاحة الفاصل الإسمنتي العلوي

Q_d: معدل الإزاحة.

بعد حساب الأزمنة أعلاه يضاف 30-60 min كعامل أمان.

يمكن زيادة أو تقليل زمن التثخن عن طريق إضافة مواد كيماوية (تناقش لاحقا).

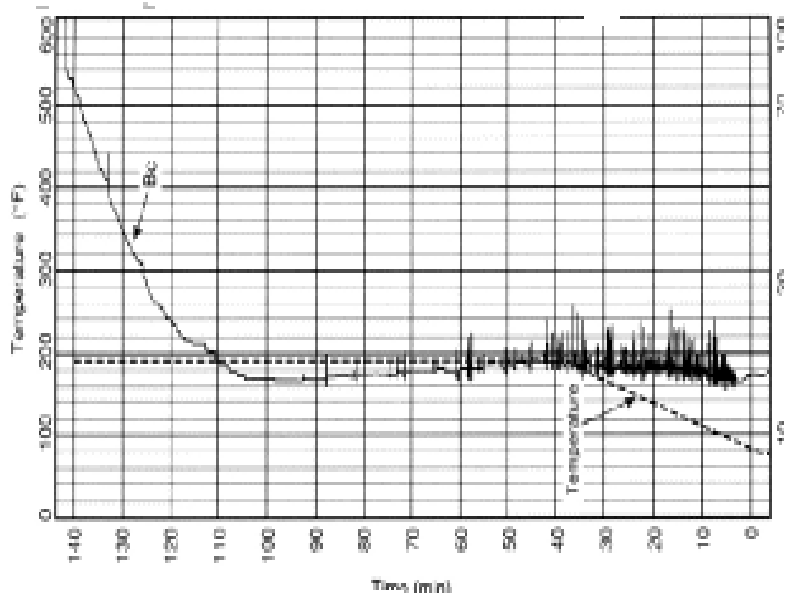
يتم تعيين زمن تكاثف السائل الإسمنتي باستخدام جهاز التماسكية (consistometer)، الذي يتكون من خلية اختبار (Test cell)، وهي عبارة عن وعاء أسطواني دوار (يدور بسرعة 150±15 r/min)، ومزود بمجموعة ثابتة من الريش (Paddle) . توضع خلية الاختبار داخل حجرة مغلقة (Test chamber) قادرة على تحمل الضغط ودرجة الحرارة خلال فترة الاختبار . يملأ الفراغ بين الأسطوانة التي تحوي السائل الإسمنتي وبين جدار حجرة الاختبار بزيت معدني، ويستخدم نظام تسخين قادر على رفع درجة حرارة الزيت بمعدل $3C^0(5F^0)$/min على الأقل ، كما يستخدم نظام لقياس درجة حرارة الزيت والسائل الإسمنتي. يتم قياس زمن التثخين للسائل الإسمنتي من خلال آلية قياس فرق الجهد الكهربائي ودارة الجهد الكهربائي، التي يتعرض لها النابض الموصول مع محور ريش خلط العينة الإسمنتية، والتي تؤدي إلى توليد عزوم مكافئة متغيرة تبعاً لتغير قيم اللزوجة، أو تبعاً لتغير قيم تماسكية السائل الإسمنتي. وفي الجدول (3–3) نبين المتطلبات المقبولة لزمن تثخين السائل الإسمنتي.

الجدول (3–3): المتطلبات المقبولة لزمن تثخين السائل الإسمنتي

الصنف	الجدول	زمن التثخين الأصغري min	زمن التثخين الأعظمي Min
A	4	90	NR
B	4	90	NR
C	4	90	NR
D	4	90	NR
	6	100	NR
E	6	100	NR
	8	154	NR
F	6	100	NR
	9	190	NR
G	5	90	120
H	5	90	120

.

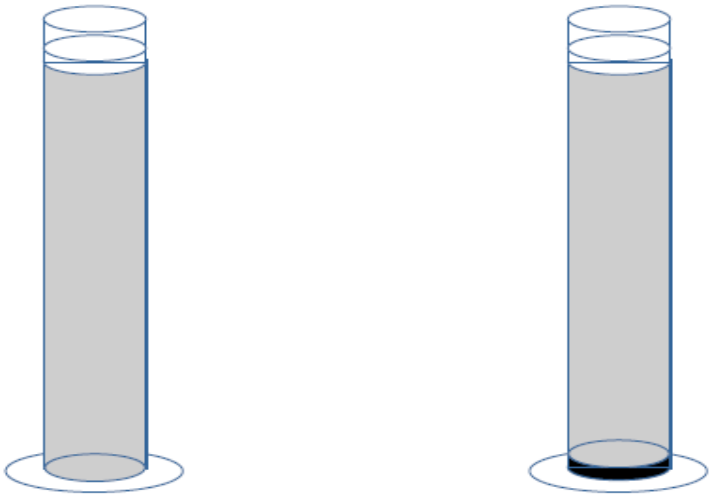
كما يمكن تسجيل زمن التثخين بيانياً باستخدام جهاز قياس التماسكية (consistometer) عندHPHT ، الشكل (3–15).



الشكل (3-15): تسجيل زمن التثخن بيانياً باستخدام جهاز قياس التماسكية (consistometer) عندHPHT

- **<u>الماء الحر (الثبوتية) (*Free Water (Stability)*) :</u>**

تعرف الثبوتية ببقاء مكونات السائل الإسمنتي مبعثرة بشكل متجانس حتى عند توقفه عن الحركة، وتبقى حبيبات الإسمنت مشتتة في الماء لدقائق قليلة، وبعدها تهبط إلى الأسفل، بينما يرتفع الماء إلى الأعلى. وتسمى أكبر كمية من الماء القابلة للانفصال عن السائل الإسمنتي بالفصل المائي للسائل الإسمنتي (الماء الحر)، وهو يعتمد على نوعية مسحوق الإسمنت ومعالجاته المختلفة، وكذلك على نسبة الماء إلى مسحوق الإسمنت. ويمكن التقليل من الماء الحر بمعالجته بمواد غروية، أو عن طريق رفع السطح النوعي لمسحوق الإسمنت، وكذلك تخفيض نسبة الماء إلى مسحوق الإسمنت . ينم تحديد الماء الحر أو الثبوتية بموجب نسبة الماء المنفصل عن ملاط الإسمنت المكون من الماء والإسمنت، باستخدام أنبوب حجمه يساوي $250\ Cm^3$. يعتبر الإسمنت جيداً إذ كانت كمية الماء المفصولة لا تزيد عن 1 % من حجم السائل الإسمنتي الكلي (بعد ترك السائل الإسمنتي هادئا لمدة ساعتين وتحت ظروف المخبر .



الشكل (3-16):, تشكل الماء الحر مع ترسب جزيئات الإسمنت.

- **<u>سيولة السائل الإسمنتي أو خاصية الانتشار (*Fluidity of the slurry*):</u>**

وهي قدرة السائل الإسمنتي على الحركة خلال فترة زمنية محددة. وتعين سيولة السائل الإسمنتي بواسطة جهاز، هو عبارة عن مخروط مقطوع بحجم $120\ Cm^3$ بقطر علوي $36 \pm 0.5\ mm$ وبقطر سفلي $64 \pm 0.5\ mm$ وارتفاع $60 \pm 0.5\ mm$. ويصنع المخروط من معدن غير قابل للصدأ ويجب أن يكون مصقولا من الداخل . ويتم تعيين سيولة السائل الإسمنتي بوضع القمع المخروطي على لوح زجاجي مثبت فوق ورقة تحوي دوائر متمركزة، يفصل بين كل دائرة وأخرى $10\ mm$ بحيث يكون قطر أكبر دائرة $250mm$. يضبط المخروط المركزي بحيث يرسم على الورقة دائرة بقطر يساوي القطر الداخلي للمخروط بخط واضح . يصب السائل الإسمنتي في القمع حتى حافة قاعدته العليا (الحجم الداخلي $120Cm^3$). يرفع القمع المخروطي بهدوء إلى الأعلى . تعين سيولة السائل الإسمنتي بقياس القطر الأعظمي والأصغري الذين وصلهما السائل الإسمنتي، ثم يحسب متوسط القطرين . وفي الشكل (3-17) نبين جهاز تحديد سيولة السائل الإسمنتي.



الشكل (3-17): جهاز تحديد سيولة السائل الإسمنتي.

3-3-2- خواص الحجر الإسمنتي (*Set Cement Properties*):

1- متانة الحجرالإسمنتي (*Cement Strength*):

يقصد بمتانة الإسمنت أو المقاومة الميكانيكية للحجر الإسمنتي الجهد الأصغري الذي يبدأ عنده الحجر الإسمنتي بالتحطم. وتوصف المتانة كمقاومة شد (*Tensile Strength*) أو مقاومة انضغاط (*Compressive strength*)، وتعتبر مقاومة الانضغاط الأكثر استعمالا كمؤشر كمي لمقاومة الحجر الإسمنتي .

من الناحية الهندسية يجب تحديد المقاومة التي يبلغها الإسمنت المتصلب ليكون قادراً على أداء المهام الآتية :

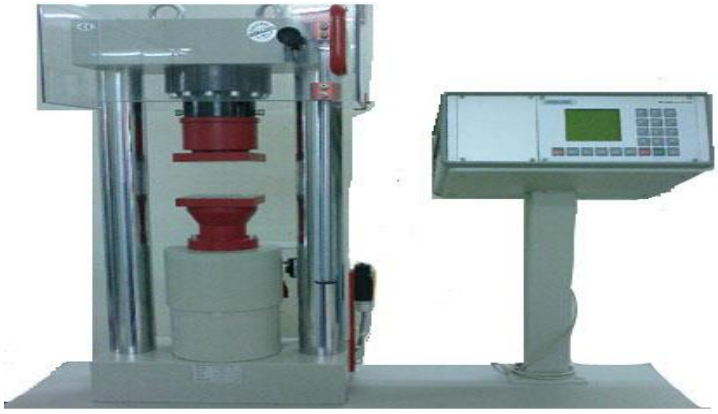
- أن يحافظ أو يدعم مواسير التغليف في البئر.
- يمكّن من عزل الطبقات ذات النفوذية المختلفة في البئر.
- أن يقاوم الصدمات الناتجة عن عمليات الحفر وعن عمليات التثقيب.
- أن يتحمل ضغوط هيدروليكية عالية دون حدوث تشققه.

إن القوى التي تسلط على الحجر الإسمنتي في الفراغ الحلقي يفترض أن تكون مكونة من قوى ضاغطة أفقية (ضغط الطبقات) إضافة إلى قوى شاقولية مكونة من وزن مواسير التغليف. يعتقد أن مقاومة الحجر الإسمنتي للانضغاط تعتبر ملائمة لمعظم العمليات إذا كانت تساوي *500Psi* ، حيث أنها تعتمد على نسبة الماء إلى الإسمنت وعلى زمن الانتظار (*Curing Time*) . قبل إنزال مواسير التغليف يؤخذ نموذج من الإسمنت المقترح استعماله ويمزج مع الماء في ظروف مشابهة لظروف البئر من ناحية درجة الحرارة والضغط، و يوضع ملاط الإسمنت في قوالب ملائمة (على شكل مكعبات)، و يترك لفترة من الزمن ليجف، بعد ذلك تكسر هذه المكعبات بواسطة جهاز فحص الانضغاط لتحديد مقاومة انضغاط النموذج (و يؤخذ معدل قياس أربعة أو خمسة نماذج) . الشكل (3-18) يبين جهاز فحص الانضغاط لتحديد مقاومة انضغاط النموذج .

و في الجدول (3-4) نبين القيم الدنيا لمتانة الانضغاط عند زمن معين، وذلك تبعاً لكل صنف من أصناف الإسمنت [8].

الجدول (3-4) المتطلبات الدنيا للمتانة الانضغاطية للحجر الإسمنتي.

القيمة الدنيا للمتانة الانضغاطية عند زمن معين									
24 h ± 15 min		8 h ± 15 min		الضغط النهائي للمعالجة		درجة الحرارة النهائية للمعالجة		رقم الجدول	صنف الإسمنت
PSi	Mp	PSi	Mpa	PSi	Mpa	°F	°C		
180	12.	250	1.7	_	atm .	100	38	_	A
150	10.	200	1.4	_	atm .	100	38	_	B
200	13.	300	2.1	_	atm .	100	38	_	C
100	6.9		NR	3000	20.7	170	77	4S	D
200	13.	500	3.4	3000	20.7	230	110	6S	
100	6.9		NR	3000	20.7	170	77	4S	E
200	13.	500	3.4	3000	20.7	290	143	8S	
100	6.9		NR	3000	20.7	230	110	6S	F
100	6.9	500	3.4	3000	20.7	320	160	9S	
NR	NR	300	2.1	_	atm .	100	38	_	G , H
NR	NR	150	10.3	_	atm .	140	60	_	



اشكل (3-18): جهاز فحص المتانة الانضغاطية للحجر الإسمنتي.

2- الخواص العازلية للحجر الإسمنتي(Cement isolating properties):

تلعب نفوذية الحجر الإسمنتي وقوة ترابط الإسمنت مع مواسير التغليف دوراً هاماً في تحديد الخواص العازلية للحجر الإسمنتي. تكون نفوذية الحجر الإسمنتي عادةً قليلة جداً، وخاصة عند سمنتة المجالات الغازية (وخاصة منها التي تحتوي على غازات ذات تأثير تأكلي), المجالات المائية (ذات التأثير التآكلي) والآبار ذات درجات الحرارة العالية (geothermal wells).

وبشكل عام تتغير نفوذية الحجر الإسمنتي حسب نسبة الجزء الصلب/الماء في الخلطة الإسمنتية.

نفوذية الحجر الإسمنتي (*Set Cement permeability*)[23] :

وهي السمة الثانية الهامة من خواص الحجر الإسمنتي. وتحدد النفوذية درجة عازلية الإسمنت للطبقات. ولتحقيق هذه الغاية يجب أن يتمتع الحجر الإسمنتي بنفوذية لا تتجاوز (2–4 ميلي دارسي). تعتمد نفوذية الحجر الإسمنتي على عدة عوامل منها نسبة الماء الى مسحوق الإسمنت، نوعية مسحوق الإسمنت، الشروط التي يحدث عندها التصلب. و يتم قياس نفوذية الحجر الإسمنتي باستخدام جهاز قياس النفوذية روسكا (*RUSKA*)، حيث يتم تحضير عدة خلطات إسمنتية باستخدام نسب مختلفة من الماء والإسمنت مع إضافات مختلفة. توضع هذه الخلطات في قوالب خاصة وتدخل إلى الأفران لتأمين شروط مشابهة للشروط الطبقية، ثم تخرج العينات من الأفران بعد انقضاء الزمن المحدد لتصلبها وتبرد ثم تحدد نفوذية كل عينة باستخدام العلاقة التالية، وتستخدم الخلطة التي أعطت نفوذية أقل:

$$\mathbf{K} = \frac{\boldsymbol{Q.\mu.L}}{\boldsymbol{F.\Delta P}} \qquad \mathbf{(5-3)}$$

حيث:

K– ثابت النفوذية المطلقة (m^2) .

Q –غزارة عبور الهواء ضمن العينة($\mathrm{m}^3 / \mathrm{s}$) .

L -طول العينة (m) .

F– مقطع العينة (m^2).

Δp– فرق الضغط عند مدخل ومخرج العينة (Pa)) .

μ – لزوجة الغاز($Pa.s$) .

التصاق الحجر الإسمنتي بالسطح الخارجي لمواسير التغليف ومع جدران البئر:

(Shear bond strength between Casing/ Formation):

يعتمد قيام الحجر الإسمنتي بوظائفه العامة (تدعيم مواسير التغليف وعزل الطبقات) إلى حد كبير على مدى التصاقه مع السطح الخارجي لمواسير التغليف، ومع جدران البئر، إذ يجب العمل باستمرار للحصول على درجة التصاق عظمى. وتتأثر درجة الالتصاق هذه بعدة عوامل أهمها: درجة نظافة هذه السطوح من سائل الحفر أو من القشرة الطينية لسائل الحفر, خشونة سطح التلامس, نوع الإسمنت ودرجة حرارة وسط التجمد وغيرها.

يكون التصاق الحجر الإسمنتي ضعيفاً (بل تهبط قوة الالتصاق إلى الصفر) مع السطوح المغطاة بالقشرة الطينية لسائل الحفر, ولذلك يجب نزع هذه القشرة باستخدام الخادشات أو باعتماد سائل تنظيف معالج بمركبات كيميائية تقوم بتفتيت هذه القشرة, حيث يضخ هذا السائل قبل ضخ السائل الإسمنتي مباشرة. كما يجب أن تنظف السطوح الخارجية لمواسير التغليف من الطلاء الواقي الذي يمنع التصاق الإسمنت معها. إن التصاق الإسمنت مع مواسير التغليف ليس نتيجة تفاعل كيميائي، ولكنه ظاهرة فيزيائية. يمكن تفسير التصاق معدن مواسير التغليف النظيف مع الحجر الإسمنتي بتكوين طبقة متداخلة بهيكل بلوري معين, تنتمي هذه الطبقة إلى كل من المعدن والحجر الإسمنتي بنفس الوقت.

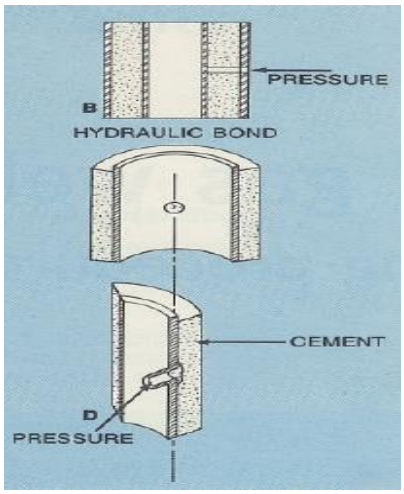
وهكذا فإن انكماش الإسمنت خلال عملية الإماهة مضافاً إليه انكماش مواسير التغليف نتيجة تبريد قاع البئر بعد عملية الإماهة و/أو نتيجة دوران سائل الإنهاء يمكن أن يؤدي إلى كسر الترابط، وهذا يؤدي إلى تشكل قنوات ميكروية في الحجر الإسمنتي، ذات نفوذية كافية تسمح بمرور الغازات، أو حتى السوائل القليلة اللزوجة. في مثل هذه الحالة, فإن الإسمنت المتوسع أو القابل للتمدد يكون مطلوباً ليعوض من تأثير انكماش الإسمنت (Cementing Shrinkage) وتقلص مواسير التغليف (Casing Contraction).

إن قوة الالتصاق يمكن قياسها كقوة ترابط هيدروليكية(Hydraulic bond strength) الشكل (3-19) والتي تختبرعادة بتطبيق ضغط هيدروليكي على سطح مواسير التغليف، ويقاس الضغط الذي يؤدي إلى انفصال مواسير التغليف عن غلاف الإسمنت المحيط بها.

- **الانكماش الحجمي للإسمنت المتصلب (Shrinkage of the set cement , Volume Contraction)[13,27] :**

أي تغير الحجم خلال فترة التصلب. إن إماهة الإسمنت البورتلاندي هي عبارة عن نتيجة تداخل عمليات فيزيائية وكيميائية متكاملة ومتزامنة. ويمكن أن نميز العمليتين الأساسيتين الآتيتين:

- تفاعل كيميائي ناشر للحرارة يحدث بين الماء ومكونات الكلينكر، والذي يؤدي إلى تشكل أطوار إماهة مع طبقة هلامية من هيدرات سيليكات الكالسيوم. ونتيجة هذا التحول يتشكل الماء



الشكل(3–19): قياس قوة الالتصاق.

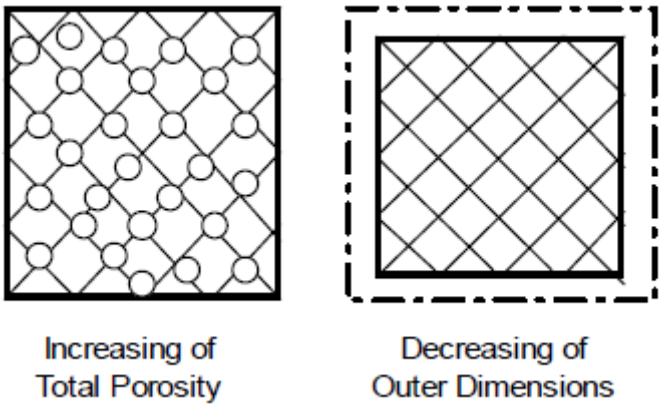
الحر، حيث يزداد حجم مكونات الطور الصلب ودرجة تشتته، بينما ينقص حجم مكونات الطور السائل، وبخاصة الطبقة الهلامية التي تتشكل خلال تحول أطوار السيليكات, والتي هي عامل تصلب أساسي للحجر الإسمنتي.

- الماء الهلامي يرتبط فيزيائياً (على شكل أربع أو خمس طبقات مائية ثنائية القطب) على السطوح المشحونة سلبياً للبنية الهلامية التي تتشكل من جديد.

في النظام المغلق, كلتا العمليتين تؤديان إلى نقصان في الحجم الكلي للإسمنت، والذي هو مجموع حجوم كل المكونات المشاركة (ماء, كلينكر الإسمنت, معادن, نواتج الإماهة).

تدعى العملية الأولى الانكماش الكيميائي، الذي ينجم عن أن حجم المواد الناتجة عن تفاعلات الإماهة أقل من حجم المواد الداخلة في التفاعل، وعلى الرغم من النقصان في الحجم المطلق فأن الأبعاد الخارجية للحجر الإسمنتي أو الحجم الظاهري يبقى نفسه أو يزيد بشكل طفيف، وهذا يؤدي إلى أن المسامية الداخلية للمنظومة تزداد. أما العملية الثانية فتدعى الانكماش الفيزيائي، والذي يفسر بأن قسماً من الماء الحر يتحول إلى مياه مترابطة على سطوح الحبيبات الإسمنتية ذات كثافة أكبر أو حجم أقل، ينعكس نقصاً في حجم المزيج. ويمكن أن نميز حالتين محددتين بالنسبة للحجر الإسمنتي الشكل (3–20) نتيجة النقصان في حجم السائل الإسمنتي :

- ✓ زيادة مسامية الحجر الإسمنتي.
- ✓ النقصان في الأبعاد الخارجية للحجر الإسمنتي, أو نقصان في حجم الجملة, والذي يشمل حجوم مكونات الإسمنت والماء أو الغاز الذي يملأ الفراغات المسامية



الشكل (3–20): تغير الحجم خلال فترة التصلب.

المقاومة للكبريتات(Sulfate Resistance):

تحتوي الآبار بشكل عام على أملاح سلفات المغنيزيوم والصوديوم. والتأثيرات الضارة يمكن أن تنتج عندما تتفاعل هذه المحاليل مع بعض نواتج إماهة الإسمنت، حيث تتفاعل سلفات المغنيزيوم والصوديوم مع رواسب هيدروكسيد الكالسيوم، لتشكل هيدروكسيد المغنيزيوم والصوديوم وسلفات الكالسيوم .

يمكن أن تتفاعل سلفات الكالسيوم مع الألومينات لتشكل إترنجيت ثانوي :

$$Ca(OH)_2 + MgSO_4 + 2\ H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + Mg(OH)_2 \quad (1\text{-}3)$$

يحدث الانسلاخ بسبب إحلال ماءات الكالسيوم بماءات المغنيزيوم :

$$Ca(OH)_2 + Na_2SO_4 + 2\ H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + 2\ Na\ OH \quad (2\text{-}3)$$

حيث تحدث زيادة في مسامية الإسمنت، لأن انحلالية هيدروكسيد الصوديوم أكبر بكثير من انحلالية هيدروكسيد الكالسيوم :

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + 3(CaSO_4 \cdot 2H_2O) + 20\ H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4.32H_2O$$

عندما يتشكل الإترنجيت بعد نمو مقاومة الإسمنت يحدث التوسع. هذا المقدار المحدد من التوسع يمكن أن يكون مفيداً في مفهوم الترابط، ومن جهة أخرى فإن عدم التحكم بتمدد الإسمنت يمكن أن يؤدي إلى ضياع متانة الإسمنت و تشوه مواسير التغليف .

إن احتواء الإسمنت البورتلاندي على كمية قليلة من C_3A تجعله أقل تأثراً بالكبريتات بعد التصلب، إضافة إلى أن انحلالية كبريتات المغنيزيوم والصوديوم هي أقل عند درجة حرارة أعلى من ($140^oF–60^oC$) . إن تأثير السلفات لا يؤدي عادة إلى مشاكل خطرة جداً عند هذه الدرجة من الحرارة أو أعلى منها. إن تأثير السلفات يمكن أن يقلل بشكل أساسي بإضافة مادة البوزولان مثل الرماد المتطاير في نظام الإسمنت.

تراجع مقاومة الحجر الإسمنتي(*strength retrogression*) (تمت دراستها سابقاً في إضافات الإسمنت) .

3-3-3- العوامل التي تؤثر على عملية السمنتة: Factor that Influence cementing operation)

إن العوامل التي تؤثر على عملية السمنتة لا تتعلق فقط بعملية السمنتة نفسها والعمليات اللاحقة، وإنما تتعلق بمجمل عملية الحفر، اعتبارا" من تصميم البئر، وانتهاء" بعمليات السمنتة وتحضير البئر لعملية السمنتة. ومن هذه العوامل نذكر ما يلي,[,23] :

1- نوعية السائل الإسمنتي: أي استخدام السائل الإسمنتي المناسب وفقا" لشروط البئر وإجراء الاختبار بشكل مناسب.
2- المزج الجيد للإسمنت وللإضافات التي يعالج بها السائل الإسمنتي، وذلك باستخدام خلاطات ذات طاقة مزج عالية.
3- مواصفات سائل الحفر والسائل الإسمنتي: أي الاستخدام الصحيح لسائل الحفر ذي الخواص المناسبة.
4- تلوث سائل الحفر بالسائل الإسمنتي.
5- تهيئة مواسير التغليف والبئر قبل عملية السمنتة.
6- الاستخدام الصحيح لطرق إنزال مواسير التغليف: استخدام الخادشات والممركزات، الحركة الدورانية أو الترددية لمواسير التغليف أثناء الإزاحة.
7- إزاحة سائل الحفر من قبل السائل الإسمنتي: استخدام معدل ضخ صحيح خلال عملية الإزاحة.
8- ترابط الإسمنت.
9- نوعية البئر.

1- نوعيةالسائل الإسمنتي:

يعتمد نجاح عملية السمنتة على نوعية السائل الإسمنتي، أي على نوعية مركباته، وفي النهاية على نوعية الحجر الإسمنتي، الذي يتكون نتيجة تصلب السائل الإسمنتي في الفراغ الحلقي .أي يجب أن يتمتع السائل الإسمنتي بالمواصفات الآتية :

- ✓ أن يكون ذا كثافة أكبر من كثافة سائل الحفر بحدود .0.833-2.5 ppg . وقد يصل الفرق إلى 4.5ppg إن أمكن بهدف الحصول على أفضل كفاءة إزاحة.

- ✓ أن يكون ذا لزوجة مقبولة، بحيث يكون قابلا" للضخ بسهولة، ومن المفضل أن تكون اللزوجة ثابتة طيلة فترة تنفيذ عملية السمنتة، وذلك في ظروف درجة الحرارة والضغط الموجودة داخل البئر.
- ✓ أن يكون ذا فاقد رشح قليل لكي لا يؤثر على الطبقات، ولكي لا تحصل زيادة مفرطة في لزوجة السائل الإسمنتي بسبب فقدان الماء، الأمر الذي يؤدي إلى زيادة كبيرة في ضغط الضخ.
- ✓ يجب أن يحافظ السائل الإسمنتي على مكوناته عند انتهاء الضخ (لا يحدث انفصال للماء الحر في الجزء العلوي للسائل الإسمنتي، والتي يكون فيها السائل الإسمنتي في حالة السكون) ، والتي في حالة حدوث العكس يتشكل حجر إسمنتي غير متجانس بالإضافة إلى إمكانية حدوث اندفاع للبئر من خلال الفراغ الحلقي بسبب الانخفاض في كثافة السائل الإسمنتي في الجهة العليا منه.
- ✓ أن يتصلب خلال فترة وجيزة، حيث أن بقاءه في حالة سائلة لفترة طويلة يؤدي إلى خطر دخول الغازات من الطبقات، وبذلك يزداد الضغط خارج مواسير التغليف.

أما الحجر الإسمنتي المتشكل من تصلب السائل الإسمنتي فيجب أن يتمتع بالمواصفات الآتية:

- ✓ أن يكون الحجر الإسمنتي ذا متانة انضغاط أو شد كافية لتثبيت مواسير التغليف، ويقاوم مختلف الحمولات التي تنتج خلال عمل البئر، أو في مرحلة الإنتاج، وهذه المقاومة إما أن تزداد مع الزمن أو تبقى ثابتة.
- ✓ يجب أن لا يطرأ عليه عند التصلب أي تغيير في الحجم الذي قد يؤدي إلى تقليل قوة الترابط مع جدران البئر من جهة، ومع السطح الخارجي لمواسير التغليف من جهة أخرى.
- ✓ أن يقاوم التأثير التآكلي للموائع الطبقية، ويقاوم عمليات التشقيق الهيدروليكي.

2- <u>تلوث السائل الإسمنتي.</u>

يؤثر تلوث السائل الإسمنتي بصورة عكسية على زمن تصلب السائل الإسمنتي، كما يؤدي ذلك إلى نقصان المتانة الانضغاطية للحجر الإسمنتي، وفي حالات أخرى على أن تصبح الخلطة الإسمنتية غير قابلة للضخ.

يحدث التلوث عادة"عندما يلامس السائل الإسمنتي سائل الحفر أثناء إزاحة هذا الأخير في الفراغ الحلقي. فالسطح البيني بين السائلين غير ثابت ويتغير مع الوقت بسبب الاختلاف في الخواص الفيزيائية لكل من سائل الحفر والسائل الإسمنتي.

تعتمد درجة التداخل بين السائل الإسمنتي وسائل الحفر بدرجة كبيرة على تمركز مواسير التغليف داخل البئر، ونوع الجريان، والفرق في الكثافة بين السائل الإسمنتي وسائل الحفر. ففي

حالة عدم تمركز مواسير التغليف داخل البئر، يتسرب السائل الإسمنتي إلى سائل الحفر من الجهة الأوسع من الفراغ الحلقي، حيث تكون المقاومة للجريان قليلة نسبيا"، والتي تؤدي إلى تشكل قنوات من سائل الحفر داخل السائل الإسمنتي وهي تمثل لاحقا" القنوات التي يتم من خلالها الاتصال مابين مختلف الطبقات . تلعب مركزة مواسير التغليف دورا" إيجابيا" في التقليل من تلوث السائل الإسمنتي بينما الحركة الترددية صعودا" ونزولا" لمواسير التغليف تكون أكثر فائدة في حالة كون تمركز مواسير التغليف جيد نسبيا". وعندما يستعمل الماء كفاصل لإزاحة سائل الحفر بدلا" من السائل الإسمنتي، أي يكون موقعه بعد سائل الحفر وقبل السائل الإسمنتي. بالإمكان تقليل تلوث السائل الإسمنتي بسائل الحفر بوضع الماء كفاصل بينهما بسبب اللزوجة المنخفضة للماء، الذي يسمح بحصول جريان مضطرب عند ضغوط ضخ أقل، مقارنة بالضغوط اللازمة عند استعمال سوائل (كفواصل) ذات لزوجة عالية. كما أن الكثافة المنخفضة للماءالتي تسمح للماء بتكوين قنوات داخل سائل الحفر، بالإضافة إلى حالة الاضطراب تساعد على تكسير البنية الهلامية لسائل الحفر. الفواصل أو الغاسل الكيميائي (Chemical wash) ، وهي عبارة عن عوامل مقللة للزوجة (Thinning Agents) تكون مشتتة داخل الماء، وهدفها تخفيف سائل الحفر، وبذلك تسمح بإزاحة فعالة لسائل الحفر من داخل البئر .

3- <u>تهيئة مواسير التغليف والبئر قبل عملية السمنتة.</u>

- **<u>تهيئة مواسير التغليف</u>:** يجب تنظيف الطبقة الواقية الموجودة على السطح الخارجي لمواسير التغليف قبل إنزالها داخل البئر، وذلك بهدف تحقيق الترابط الجيد بين الحجر الإسمنتي ومواسير التغليف. في بعض الأحيان يوصى بتغطية السطح الخارجي لمواسير التغليف بطبقة خشنة مثل Epoxy Resin ، الذي يضاف إليه حبيبات ناعمة من الرمل ذات أحجام مختلفة.
- **<u>إنزال مواسير التغليف داخل البئر</u>:** وذلك باستعمال ممركزات على طول مواسير التغليف (في حالات نادرة) أو في الجزء السفلي من مواسير التغليف، أو مقابل الطبقة المنتجة. وذلك بهدف إبعاد مواسير التغليف عن جدران البئر، وبذلك تسمح بالحصول على حجر إسمنتي بسماكة متجانسة" حول مواسير التغليف، كما تسمح بتوزيع متساو للضغط الهيدروستاتيكي في الفراغ الحلقي، وبهذا تمنع احتمال استعصاء مواسير التغليف بسبب فرق الضغط الناتج عن الفرق بين ضغط عمود سائل الحفر في البئر وضغط الموائع في الطبقة (استعصاء تفاضلي). فعندما تكون المواسير غير متمركزة تكون في تماس مع جدران البئر, فالسرعة الأعلى للسائل الإسمنتي خلال عملية الإزاحة سوف تحدث في الفراغ الحلقي الأعظمي بينما في الفراغ الحلقي الضيق تنقص السرعة في نقاط التماس حيث لا تكون قادرة على إزاحة سائل الحفر المتهلم المحجوز هناك.

فالمركزة تحدد بالعلاقة التالية :

$$\%\text{Stand-off} = \frac{W.100\%}{Rh-Rc} \qquad (6-3)$$

حيثW: المسافة الصغرى بين مواسير التغليف وجدران البئر.

R_h: نصف قطر البئر.

R_c: نصف قطر مواسير التغليف.

إن تغير سرعة السائل الإسمنتي نتيجة المركزة السيئة تؤدي إلى تشكل القنوات داخل السائل الإسمنتي التي تتطور أو تنمو. كما أن ذلك يؤدي إلى زيادة معدل السرعة اللازمة لبدء تدفق السائل في الأجزاء الضيقة.

كما أن مواسير التغليف غير المتمركزة سوف تستند على جدران البئر حيث الطبقات النفوذة، والتي لها ضغط أقل من الضغط الذي يشكله عمود سائل الحفر, بالإضافة إلى كعكة الحفر التي سوف تشكل عازل حول مساحة التماس وفرق الضغط (الضغط التفاضلي)، كل ذلك سوف يؤدي إلى زيادة قوى الاحتكاك، والذي يمكن أن يمنع الحركة الشاقولية لمواسير التغليف.

أظهرت الدراسات الحقلية والمخبرية أنه عندما تكون درجة المركزة أقل من 60% تكون غير عملية وتكون المركزة فاشلة.

❖ **إبعاد كعكة الحفر:**

بهدف تحقيق ترابط جيد بين الحجر الإسمنتي وجدران البئر يجب إبعاد كعكة الحفر عن جدران البئر بواسطة استخدام منظفات القشرة الطينية (الخادشات) التي تؤدي إلى تحقيق جريان اضطراب إضافي لتيار السائل الإسمنتي محسّنا"بذلك ظروف إزاحة سائل الحفر من قبل السائل الإسمنتي.

تستعمل حقليا"طريقة كيميائية لإبعاد كعكة الحفر بصورة منفصلة، أو مع الطريقة الميكانيكية، وذلك باستعمال سدادة غسل حامضية بحدود من $35\text{-}100FT^3$ يتم ضخها قبل السائل الإسمنتي، وذات تركيب كيميائي مكون من الماء و2-3% حمض كلور الماء ومحلل استحلاب.

❖ **تهيئة سائل الحفر:**

وذلك بتقليل اللزوجة البلاستيكية ومقاومة الجل لسائل الحفر الموجود داخل البئر، الذي يؤدي شروط إزاحة جيدة، ويقلل من الضغط اللازم على مساحة التماس بين السائل الإسمنتي وسائل الحفر لتحقيق إزاحة جيدة.

عند إنزال مواسير التغليف داخل البئر، ونتيجة احتكاكها مع جدران البئر، تتكون كتل من كعكة الحفر وبعض الصخور، الأمر الذي يؤدي إلى تغيير في مواصفات سائل الحفر، وربما

يؤدي إلى دخول الغازات من الطبقات، حيث يتطلب في هذه الحالة ضغط ضخ كبير أثناء عملية السمنتة لإزاحة سائل الحفر بواسطة السائل الإسمنتي، الذي قد يسبب تشقق الطبقات. كما أن كتل كعكة الحفر قد تسبب إغلاق الفراغ الحلقي، وبذلك يتوقف دوران السائل الإسمنتي، كما أن دخول الغاز وتحركه نحو الأعلى (السطح) مع سائل الحفر قد يسبب حدوث اندفاع. ومن أجل منع حدوث المشاكل المذكورة أعلاه يصار إلى تدوير سائل الحفر بهدف تجانسه، حيث أظهرت التجارب المخبرية أن تجانس سائل الحفر يحسن كفاءة الإزاحة بحدود 34% .

4- نوعية البئر، وتشمل:

☒ - **شاقولية البئر:**

عمليا"، فإن معظم الآبار النفطية غير شاقولية سواء" بسبب الحفر(الانحراف)، أو بسبب تصميم البئر أصلا" بأن يكون مائلا". في مثل هذه الحالات تكون الإزاحة غير كاملة، بسبب عدم تمركز مواسير التغليف داخل البئر، حيث ستستند على جدار البئر، وفي منطقة التماس يبقى سائل الحفر بدون إزاحة من قبل السائل الإسمنتي، الأمر الذي يؤدي إلى تكوين حجر إسمنتي غير متجانس من جهة، وحدوث قنوات من سائل الحفر داخل السائل الإسمنتي من جهة أخرى. وبهدف التغلب على هذه المشكلة من الضروري استعمال ممركزات مع مواسير التغليف لتأمين الوضع المركزي للمواسير داخل البئر.

☒ **وجود مقعد الخابور (المفتاح) (Key seats):**

بما أن نجاح عملية السمنتة يعتمد على درجة إزاحة سائل الحفر من قبل السائل الإسمنتي في الفراغ الحلقي، وتحقيق تماس مباشر بين السائل الإسمنتي ومواسير التغليف من جهة، ومع جدار البئر من جهة أخرى، لذا يجب معرفة مناطق تجمع سائل الحفر وكعكة الحفر لغرض إبعادها. إن المناطق التي يحدث فيها أكبر تجمع لسائل الحفر هي مقعد الخابور. وبما أن السائل الإسمنتي يجري من خلال المناطق التي فيها أقل مقاومة هيدروليكية، لذا سوف تبقى لدينا قناة تمكن الطبقات من خلالها أن تتصل فيما بينها، مؤدية إلى عدم تحقيق الهدف الرئيسي من عمليات السمنتة، والذي هو عزل الطبقات ومنع الاتصال فيما بينها.

☒ **انتظام قطر البئر:**

يؤدي وجود منطقة ذات قطر صغير - بسبب انتفاخ الغضار أوالشيل في البئر- إلى ظهور ضغوط إضافية أثناء عملية السمنتة، التي قد ينتج عنها توقف لعملية السمنتة أو تشقق لبعض الطبقات التي تقع أسفل هذه المنطقة. أما إذا كان قطر البئر كبيرا" في منطقة ما بسبب التهدم أو عبور طبقة ملحية، فإن ذلك يؤدي إلى عدم وصول السائل الإسمنتي إلى الارتفاع المطلوب، أو بقاء كميات كبيرة من سائل الحفر غير مزاحة.

☒ **نوعية كعكة الحفر:**

تعتمد درجة ترابط الحجر الإسمنتي بجدار البئر على درجة التماس بين السائل الإسمنتي وجدار البئر، لذا من المفروض استعمال سائل الحفر، الذي تكون فيه كعكة الحفر ذات سماكة قليلة، والتي يمكن إزاحتها بسهولة من على جدار البئر بواسطة القاشطات، أو باستعمال مواد كيميائية خاصة بعد إكمال عملية السمنتة. في حال عدم إزالة كعكة الحفر فإنها تتحطم مع الزمن، وبذلك تتكون قنوات بين الإسمنت وجدار البئر، مما يؤدي إلى حدوث اتصال فيما بينها في حالة كون سماكة كعكة الحفر كبيرة. وبما أن السماكة الكبيرة لكعكة الحفر تزيد من مساحة التماس بين مواسير التغليف وهذه الكعكة ، وأن مواسير التغليف ستدفع نحو جدار البئر أكثر بسبب فرق الضغط، الأمر الذي يؤدي إلى استحالة تحريك مواسير التغليف صعودا" أو نزولا"، أو دورانه بهدف تنظيف جدار البئر من كعكة الحفر بواسطة القاشطات. للأسباب أعلاه من الضروري تنظيف جدار البئر من كعكة الحفر قبل البدء بإنزال مواسير التغليف وعملية السمنتة.

☒ **وجود منطقة فقدان دوران السائل الإسمنتي:**

يشكل فقدان السائل الإسمنتي في الطبقات أحد المشاكل الرئيسية لعمليات السمنتة، حيث يؤدي هذا الفقدان إلى عدم رفع عمود السائل الإسمنتي في الفراغ الحلقي إلى الارتفاع المقرر له، الأمر الذي يسبب دخول الموائع الطبقية إلى الفراغ الحلقي، وبالتالي حدوث اندفاع البئر، بالإضافة إلى تعقيدات كثيرة عند وضع البئر ففي الإنتاج. يحدث تشقق الطبقات بسبب الضغط الهيدروديناميكي الكبير الذي يسلط على جدار وقاع البئر، وأن هذا الضغط يزداد في حالة زيادة سرعة السائل الإسمنتي في الفراغ الحلقي، وكذلك في حالة وجود فرق كبير بين كثافة السائل الإسمنتي وسائل الحفر. كما أن لسرعة إنزال مواسير التغليف في الآبار العميقة وذات الفراغ الحلقي الصغير نسبيا" تأثيراً كبيراً على حدوث هذا التشقق. وعليه في حالة وجود مثل هذه المناطق من الضروري إغلاقها أثناء عملية الحفر، لغرض تأمين ظروف طبيعية لعملية السمنتة. وفي حالة تعذر ذلك تستعمل طرق معينة للعزل كالسمنتة على مراحل، أو بواسطة الدوران العكسي وغيرها، وكذلك استعمال خلطات إسمنتية مخففة باستعمال الإضافات المبينة في الفصل السابق.

☒ **سعة الفراغ الحلقي:**

إذا كان الفراغ الحلقي كبيرا"، فإن خطر تكوين قنوات من سائل الحفر داخل الإسمنت يكون كبيرا"، وتكون كمية الإسمنت الواجب استعمالها أكبر، وكذلك تكون عملية التثقيب أصعب. أما إذا كان الفراغ الحلقي صغيراً نسبيا"، فإن هبوط الضغط فيه يكون كبيرا"، وقد يؤدي ذلك الى تشقق الطبقات وفقدان السائل الإسمنتي فيها ، وبذلك نرجع إلى الحالة السابقة. لقد أوضحت بعض التجارب بأن قطر الفراغ الحلقي الإعتيادي يجب أن يحقق الشرط الآتي:

$$D_h = (1.30 - 1.35).D_c \qquad (7-3)$$

حيث D_h: قطر البئر، (إنش).

D_c: قطر مواسير التغليفنش، (إنش).

5- <u>إزاحة سائل الحفر من قبل السائل الإسمنتي:</u>

تعتمد درجة الإزاحة (النسبة بين حجم السائل المزاح وحجم الفراغ الكلي ضمن منطقة صعود السائل الإسمنتي) بدرجة كبيرة على خواص كل من سائلي الحفر والإسمنت, تلوث سائل الحفر بالسائل الإسمنتي الذي يحدث في منطقة تماس السائلين، وعلى طبيعة جريان السائل الإسمنتي في الفراغ الحلقي. فالعلاقة بين خواص كل من السائلين وظروف البئر محددة بواسطة عامل يدعى عامل النجاح (Success Coefficient)، والمعبر عنه بالمعادلة الآتية:

$$C_s = (\rho_{cs}-\rho_m).d/\zeta_m \qquad (8-3)$$

حيث ρ_m , ρ_{cs}: كثافة سائل الحفر والسائل الإسمنتي على التوالي

d: المسافة بين جدار البئر ومواسير التغليف $d = (d_h-d_c)/2$.

d_h , d_c: قطر مواسير التغليف وقطر البئر على التوالي

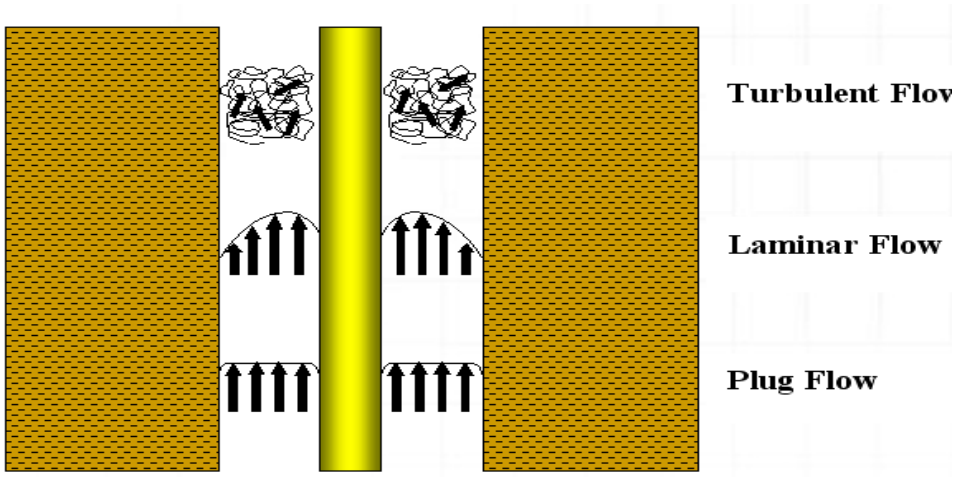
ζ_m: جهد القص(shear stress) لسائل الحفر .

للحصول على عملية سمنتة ناجحة .يجب أن يكون **Cs** أكبر أو على الأقل يساوي 30 .

إن عامل النجاح لا يفي بجميع الشروط، لأنه يهمل تأثير نوعية الجريان، ولهذا فإنه يستعمل في الجريان الصفحي فقط. لقد بينت الدراسات بأن هناك العديد من العوامل التي تؤثر عل كفاءة إزاحة سائل الحفر من قبل السائل الإسمنتي ومنها:

.<u>نوعية الجريان</u>، الشكل (3-21):

بينت التجارب الحقلية أنه في حالة الجريان السدادي(Plug Flow)، حيث تكون سرعة السائل الإسمنتي في الفراغ الحلقي أقل من 1 ft/s فإن درجة الإزاحة تكون حوالي 60% من سائل الحفر من قبل السائل الإسمنتي، وفي حالة الجريان الصفحي، حيث تتراوح السرعة بين 1- 5.25 ft/s تتم إزاحة 90% من سائل الحفر. أما في الجريان المضطرب، وعندما تكون السرعة بحدود 8 ft/s أو أكثر، فإن إزاحة سائل الحفر من قبل السائل الإسمنتي تكون بحدود 95% . وبهدف الحصول على جريان مضطرب تستعمل العديد من الإضافات مثل المشتتات ومقللات اللزوجة.



الشكل(3–21): أنواع الجريان.

بينت التجارب أنه عند تطبيق الجريان المضطرب أو السدادي يتم الحصول على إزاحة مثلى، وتكوين قنوات أقل، وتكوين حجر إسمنتي ذي متانة جيدة حول مواسير التغليف، وأن الجريان المضطرب هو الأكثر قبولا" في عمليات السمنتة، بينما في الجريان الصفحي يكون مقطع السرعة في الفراغ الحلقي قطعاً مكافئاً (parabolic)، الأمر الذي يساعد على تكوين قنوات من سائل الحفر داخل السائل الإسمنتي.

■ **<u>تأثير خواص سائل الحفر والسائل الإسمنتي على كفاءة الإزاحة:</u>**

لقد بينت التجارب بأن للفرق بين كثافتي السائل الإسمنتي وسائل الحفر تأثيراً كبيراً على كفاءة الإزاحة، حيث أنه كلما زاد هذا الفرق بين هاتين الكثافتين زادت كفاءة الإزاحة وإلى حد معين. وبعد ذلك الحد فإن الاستمرار في زيادة الفرق يكون له تأثير أقل على تحسين الكفاءة. وقد أوضحت هذه التجارب بأنه يجب أن تكون كثافة السائل الإسمنتي أكبر من كثافة سائل الحفر بمقدار3.5-4.5lb/gal وذلك بهدف الحصول على أفضل إزاحة. كما أن للفرق في اللزوجة ومقاومة الجل تأثيرا" كبيرا" أيضا" على كفاءة الإزاحة، حيث أنه كلما زاد الفرق بين لزوجة ومقاومة الجل للسائل الإسمنتي من جهة، ولزوجة ومقاومة الجل لسائل الحفر من جهة أخرى ، فإن كفاءة الإزاحة تزداد بدرجة كبيرة، ولكن إلى حد معين، حيث أن الاستمرار في زيادة هذا الفرق يكون له تأثير أقل على الكفاءة. واستنادا" إلى التجارب الحقلية، وبهدف الحصول على أفضل إزاحة، يجب أن تكون مقاومة الجل للسائل الإسمنتي أكبر من مقاومة الجل لسائل الحفر بمقدار ($25-35lb/100ft^3$) ، وبما أن زيادة مقاومة الجل لحجم السائل الإسمنتي بكامله غير ملائمة حقليا"، لذا يفضل زيادة مقاومة الجل للجزء الأول من السائل الإسمنتي، والذي يكون على اتصال مباشر مع سائل الحفر في الفراغ الحلقي، والذي بإمكانه أن يتعامل مع الإزاحة وكأن كامل حجم السائل الإسمنتي قد ازدادت مقاومته للجل. أما تأثير الفرق في اللزوجة البلاستيكية

مابين السائل الإسمنتي وسائل الحفر فهو قليل نسبيا"، حيث أنه بازدياد الفرق تتحسن كفاءة الإزاحة ببطيء.

- **استعمال السوائل الفاصلة:**

من أجل نجاح عملية السمنتة الأولية فإن السائل الإسمنتي يجب أن يزيح سائل الحفر حول مواسير التغليف. فسائل الحفر والسائل الإسمنتي يشكلان غالباً عند تماسهما قنوات أو كتلة لزجة غير قابلة للضخ، ولمنع حدوث مثل هذه المشكلة يتم إدخال سائل وسطي بينهما، تدعى هذه السوائل بسوائل الفصل (spacer fluid) أو السوائل المساعدة ، وهي تستخدم لتحقيق عدة أهداف، ولكن معظمها يستخدم لتحسين فعالية إزاحة سائل الحفر, والتقليل من تلوث السائل الإسمنتي بسائل الحفر، وتحسين نزع كعكة الحفر، وتحسين التصاق الحجر الإسمنتي بجدران البئر ومواسير التغليف. تضخ هذه السوائل أمام السائل الإسمنتي، وعندما تستخدم يجب أن نأخذ بالاعتبار المحافظة على الضغط الهيدروستاتيكي عند رأس البئر في الفراغ الحلقي.

عند استخدام سوائل حفر ذات أساس مائي فإنه يفضل استخدام الماء كسائل فصل بسبب لزوجته القليلة، حيث يسمح الماء بحدوث الجريان الاضطرابي، وبذلك يعطي التأثير الأعلى لتنظيف جدار البئر بالإضافة لكلفته القليلة . وعندما يجب زيادة الوزن النوعي لسائل الفصل يجب إضافة مواد لزيادة اللزوجة (عادة يستخدم HEC,XC polmer, Biozan)، وذلك للحفاظ على البارايت بشكل معلق. وعند استخدام سوائل حفر ذات أساس زيتي، فإنه من الضروري أن يكون جدار البئر مرطباً بالماء (water wet)، وأن يكون سائل الفصل ذا أ ساس زيتي، حيث يحتوي على مقللات توتر سطحي غير شاردية، يتبع بالماء الذي يحتو ي على مقللات توتر سطحي لترطيب الماء، ويمكن أن يزاد وزنه بنفس الطريقة التي يزاد بها الوزن النوعي لسوائل الفصل ذات الأساس المائي. يبلغ حجم سائل الفصل $4m^3$(25bbls) ، وتركيز مقللات التوتر السطحي بنسبة حجمية% (4-1).

يستخدم الماء العذب لمزج سوائل الفصل البولميرية، والتي لا تتهدرج جيداً في مياه البحر. والماء العذب يستخدم كفاصل، حتى إذا كان السائل الإسمنتي محضراً باستخدام ماء البحر, وخاصة إذا تطلب ذلك إماهة البولمير. في المساحات ذات المحتوى القليل من الماء تضاف ماءات الصوديوم إلى الماء للمساعدة في إماهة البولمير. وفي الجدول (3–6) نبين تحضير سوائل الفصل من أجل سوائل الحفر ذات الأساس المائي وسوائل الحفر ذات الأساس النفطي.

الجدول (3–6): تحضير سوائل الفصل من أجل سوائل الحفر ذات الأساس المائي، و ذات الأساس النفطي.

مكونات سوائل الفصل (12.5ppg, 1.5kg/l)	سوائل حفر ذات أساس مائي	سوائل حفر ذات أساس نفطي
ماء عذب	8231 kg /m^3	776 kg/m^3
Caustic	0.9kg/m^3	0.9 kg/m^3
Gw-22,polmer	3 kg/m^3	3 kg/m^3
Mcs-G, surfactant	24kg/m^3	36 kg/m^3
D-4GB, surfactant	–	36 kg/m^3
Barite	646.5kg/m^3	645.7 kg/m^3

يجب أن تحقق سوائل الفصل الشروط الآتية :

1- أن لا تؤثر على لزوجة السائل الإسمنتي عند تماسه به في ظروف درجات الحرارة العالية، وخاصة إذا كانت كثافة السائل الإسمنتي عالية.

2- أن لا تؤثر على زمن تثخين السائل الإسمنتي عند التماس مع السائل الإسمنتي.

3- أن يمكّن من زيادة كثافته (التثقيل) لأية كثافة مطلوبة وملائمة لكثافة سائل الحفر والسائل الإسمنتي.

4- أن تكون ذات خواص جريانية تسمح بجريان مضطرب عند معدل ضخ قليل.

5-يجب أن تتحمل كميات من الأجزاء الصلبة.

6-يجب أن لا تسمح بتكوين قنوات من السائل الإسمنتي داخلها، وذلك لتحقيق عزل تام بين السائل الإسمنتي وسائل الحفر.

7-يجب أن يكون فاقد رشحها قليل كي لا تؤثر على الطبقات.

بهدف تحقيق الشروط أعلاه، يتم تحضير سائل عزل من نوع مستحلب عكسي مكون من حجوم متساوية من الماء وزيت الديزل. طول هذا الفاصل يمكن تحديده بالعلاقة الآتية، والتي هي حصيلة تجارب حقلية ومخبرية.

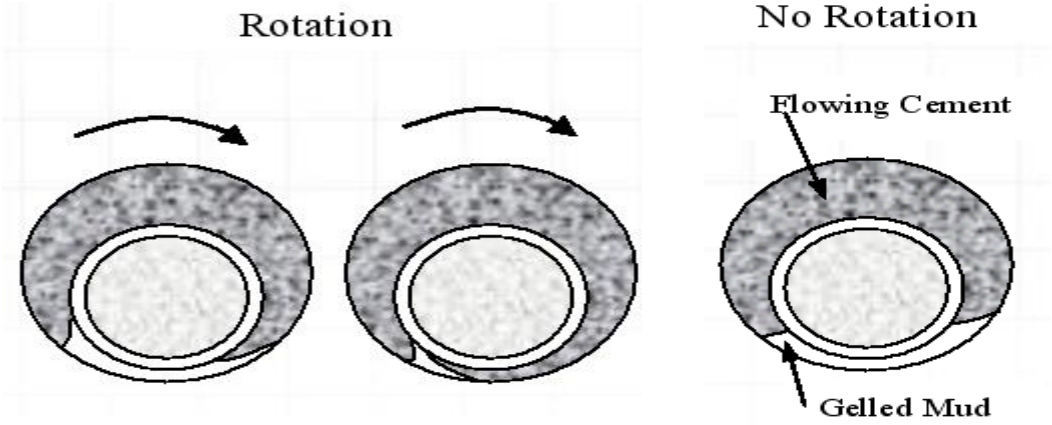
$$L_{am} = (0.1\text{-}0.15) \cdot L_c \qquad (9\text{-}3)$$

$$V_{am} = (0.12\text{-}0.17) \cdot V_c \qquad (10\text{-}3)$$

حيث أن: L_{am} , L_c: ارتفاع منطقة العزل، وارتفاع السائل الإسمنتي على التوالي.

V_c,V_{am} : حجم منطقة العزل، وحجم السائل الإسمنتي على التوالي.

بينت التجارب المخبرية بأنه لضخ عازل مائي قبل عملية السمنتة تأثير متوسط على كفاءة الإزاحة عند استعمال سائل حفر ذي كثافة ومقاومة جل منخفضتين، كما أن لهذا العازل تأثير قليل على كفاءة الإزاحة عند استعمال سائل حفر ذو مقاومة جل عالية. كما أثبتت التجارب أنه بالإمكان تحقيق كفاءة إزاحة جيدة أثناء ضخ السائل الإسمنتي عن طريق تحريك مواسير التغليف صعودا"ونزولا" وتدويرها وخاصة منها ذات القطر الكبير، لغرض منع تكون قنوات من السائل الإسمنتي داخل سائل الحفر وتكوين جريان مضطرب في السوائل الجارية. وفي الشكل (3–22) نبين تأثير تدوير مواسير التغليف على كفاءة الإزاحة.



الشكل (3–22): تأثير تدوير مواسير التغليف على كفاءة الإزاحة.

6– ترابط الإسمنت (*Cement Bonding*) :

إن الهدف من سمنتة مواسير التغليف أو المواسير الضائعة هو تحقيق عزل جيد للطبقات، وإغلاق دخول الغازات والسوائل غير المرغوب بها. فالعزل الجيد للإسمنت سوف يمنع تدفقه بين الطبقات خلف مواسير التغليف. إن إنجاز هذا الهدف من العزل التام يتطلب ليس فقط العزل بين الإسمنت ومواسير التغليف ولكن بدرجة متساوية بين الإسمنت والطبقة .

- **ترابط القص أو مقاومة ترابط القص (*Shear bond strength*) :**

ترابط القص هو الترابط الذي يحقق الدعم الميكانيكي لعمود مواسير التغليف في البئر، و يحدد بقياس القوة اللازمة لتبدأ المواسير بالحركة في غلاف الإسمنت (*cement sheath*) . وتعتمد قيمة هذه القوة على نوع الإسمنت، وعلى فعالية الإزاحة. هذه القيمة عادة هي أكبر بكثير من القوة اللازمة لدعم مواسير التغليف . إن القيمة النظرية اللازمة لمقاومة ترابط القص يمكن أن تكون منخفضة بمقدار *5 Psi* على الأقل، و هذه القيمة سوف تنجز مع مقاومة الانضغاط بشكل تقريبي حوالي *50 Psi*.

- **الترابط الهيدروليكي (Hydraulic Bond)**

الترابط الهيدروليكي هو ترابط الإسمنت مع مواسير التغليف، والإسمنت مع الطبقة. هذا الترابط يساعد في منع انتقال السوائل، وأيضا في عزل الطبقات خلال أي حقن لاحق للسائل (تحسين – حقن الماء . . . الخ).

ويتأثر الترابط الهيدروليكي بالعوامل الآتية :

1- وجود طبقة رقيقة (*film*) من سائل الحفر على مواسير التغليف .
2- وجود فراغات ميكروية (*micro – annuals*) بسبب تمدد وتقلص مواسير التغليف.
3- انكماش (*shrinkage*) الإسمنت خلال التصلب (*setting*).
4- نعومة سطح مواسير التغليف .
5- مقاومة الانضغاط للحجر الإسمنتي .
6- إصلاح خواص سائل الحفر إلى القيم الأقل قدر الإمكان (اللزوجة ، التهلم) قبل إنزال مواسير التغليف.
7- استخدام الممركزات والقوا شط (الخادشات) أو منظفات القشرة الطينية .

3-3-4- طرق تقييم الإسمنت:[21]

- **سوابر تقييم جودة الإسمنت خلف مواسير التغليف:**

تُستخدم القياسات الآتية لتقييم نوعية الإسمنت وجودة ترابطه مع مواسير التغليف:

- ✓ قياس ترابط الإسمنت (*CBL*).
- ✓ قياس الكثافة المتغيرة (*VDL*).
- ✓ سابرة تقييم الإسمنت (*CET*).
- ✓ التصوير البئري فوق الصوتي (*USI*).
- ✓ سابرة الترابط المجزّأة (*SBT*).

يولّد الإسمنت كمية معتبرة من الحرارة خلال عملية الاماهة ، لذلك يمكن أن يتم إجراء مسح حراري لتحديد كل من وجود الإسمنت خلف مواسير التغليف وارتفاع الإسمنت خلفها (*TOC*). لكن لا يمكن لهذا المسح أن يُستخدم للتقييم الكمّي لعملية الإسمنت. هذه المسوحات الحرارية يجب أن تُجرى خلال 24 ساعة من عملية السمنتة.

يُستخدم المسح الحراري لتحديد ارتفاع الإسمنت خلف المواسير عندما لا يكون مخططاً إجراء قياس جودة ترابط الإسمنت (*CBL*)، أو أنه غير ذي وثوقية عالية نتيجة قطر مواسير التغليف.

يمكن للتسجيل الحراري أن يُستخدم أحياناً للكشف عن وجود جريان مباشر خلف مواسير التغليف، وعندما يُجرى مع قياس ضجيج (*Noise Log*) يمكن أن يستخدم لتقدير حجم وتركيب

السائل خلف المواسير. إن تحليل طيف التردد والسعة للضجيج المسجل يمكن أن يُساعد في تقدير نوعية السوائل وأماكن وجودها خلف المواسير، وإن تغيّر درجة الحرارة عن التدرج الحراري الطبيعي في المنطقة يمكن أن يكون مرتبطاً بحجم ومعدل تدفق السائل الإسمنتي.

- ✓ **<u>قياس جودة ترابط الإسمنت خلف مواسير التغليف (*CBL*):</u>**

يحدد هذا القياس (التسجيل) جودة ترابط الإسمنت مع المواسير، ولا يمكن أن يُستخدم لتحديد كمية الإسمنت الموجودة خلف المواسير. يعتمد مبدأ القياس على تسجيل زمن العبور وتخامد الموجة الصوتية المرسلة عبر كل من السائل الموجود في البئر وجدار مواسير التغليف، حيث يُعطي هذا القياس تسجيلاً مستمراً لسعة الموجة الصوتية العابرة في المواسير ذات الوصول الأول، وذلك بواسطة مُرسل ومستقبل، البعد بينهما ثلاثة أقدام. تكون القيمة المسجلة عظمى في المجالات من مواسير التغليف التي يكون الإسمنت خلفها عديم الترابط معها، والعكس بالعكس. تكون القيمة المطلقة للإشارة المسجلة تابعة لكل من: قطر مواسير التغليف وثخانة جدارها، نوعية ترابط الإسمنت مع المواسير، السائل المالئ لحفرة البئر، نوع السابرة المستخدمة ومركزية السابرة مع محور البئر. عادةً ما تبقى جميع هذه المُعاملات ثابتة، لذا فإن جودة ترابط الإسمنت تكون تابعة بشكلٍ مباشر لسعة الموجة المسجلة.

تستخدم هذه السابرة لتقييم كل من نسبة السطح الخارجي لمواسير التغليف المترابط مع الإسمنت والقوة الانضغاطية للإسمنت. يكون القياس موثوقاً فقط في الحالة التي تكون فيها السابرة ممركزة بشكلٍ جيد مع محور البئر، ولا يوجد فراغ صغير جداً بين مواسير التغليف والإسمنت.

من المزايا الهامة لهذا القياس إمكانية إجراء مضاهاة مع القياسات البئرية المنفذة في المجالات غير المغلفة، حيث يمكن تنفيذ هذه المضاهاة بإجراء قياس أشعة غاما الطبيعية (*GR*)، وقياس تحديد وصلات (شرارات أو أقفال) مواسير التغليف (*CCL*) بشكلٍ مترافق مع قياس (*CBL*)، والتي تفيد أيضاً في العمليات اللاحقة، كتحديد مجالات التثقيب مع الأخذ بعين الاعتبار إجراء قياس (*CBL*) تحت الضغط في المناطق التي يُشك بوجود فراغ صغير جداً بين المواسير والإسمنت. ويجب أن تتحقق الشروط الآتية للحصول على تسجيل (*CBL/VDL*) موثوق:

1) من المفضّل أن يكون قطر مواسير التغليف (*9 5/8″*) أو أقل.
2) أن تكون السابرة ممركزة بشكلٍ جيد مع محور البئر، أي أن تركّب على الأقل ثلاثة ممركزات للتأكد من أن المرسل والمستقبل لا يميلان أكثر من (*1/8″*) عن محور

المواسير. في الآبار المائلة يكون من الضروري المركزة الجيدة لسابرتي القياس (*CBL/CET*) وإجراء القياس بشكل منفصل لكل مجال.

3) عدم وجود فراغات حلقية دقيقة بين مواسير التغليف والإسمنت.

4) سماكة الإسمنت خلف المواسير (*1″*) على الأقل.

✓ **<u>قياس الكثافة المتغير (VDL) :</u>**

يقدم هذه القياس تمثيلاً تصويرياً للشكل الحقيقي للموجة الصوتية المسجّلة عند تباعد بين المرسل والمستقبل مقداره (*5 ft*). يُستخدم الأثر المسجل للتمييز بشكلٍ أفضل بين الأمواج القادمة من مواسير التغليف ومن الطبقة. عادةً ما يُستخدم هذا القياس لتقييم درجة ترابط الإسمنت مع التشكيلة، كما يساهم في الكشف عن وجود قنوات وعن تسرب للغاز، كما يمكن مُلاحظة الترابط السيء من خلال الخطوط الشاقولية المتوازية البيضاء والسوداء، أما الترابط الجيد فيظهر بلون رمادي باهت دون وجود خطوط بيضاء وسوداء مميزة وذلك نتيجة وصول الموجة الصوتية من الإسمنت.

تتأثر نتائج القياس (*CBL/VDL*) بعدم مركزة السابرة، وجود الفراغات الحلقية الدقيقة، (Fast formations)، وجود الغاز ووجود طبقة رقيقة من الإسمنت خلف المواسير.

✓ **<u>سابرة تقييم الإسمنت (*CET*):</u>**

تعتمد سابرة تقييم الإسمنت على الأمواج فوق الصوتية، وتتألف من ثمانية محولات للطاقة مرتبة على شكل حلزوني حول جسم السابرة. وبينما تقيس هذه السابرة تخامد الأمواج الصوتية الانضغاطية المنتشرة على طول المواسير، فإنها تُسبب حصول طنين في المواسير عن طريق إرسال حزمة عريضة من النبضات بتردد (*270- 650 Hz*) عمودي على جدار المواسير.

تعتمد الطاقة التي تعود إلى المرسلات والناتجة عن الطنين المتحرض في مواسير التغليف على خاصية التخميد الصوتي للمواد التي هي على تماس مباشر مع السطحين الداخلي والخارجي لمواسير التغليف، وبما أن العامل الوحيد المجهول هو عامل التخامد الصوتي للمواد الموجودة في الفراغ الحلقي خلف المواسير، فإنه وبمعرفة مقدار الطاقة المُرسلة من محول الطاقة للسابرة يُمكن تقدير القوة الانضغاطية للإسمنت في الفراغ الحلقي.

إن التوزع الشعاعي للمرسلات يسمح بتقدير توزع الإسمنت خلف المواسير. وباعتبار أن قطر المرسلات هو (*1″*) فإن نسبة السطح الجانبي لمواسير التغليف المسبور يعتمد على قطر المواسير، ويتراوح تقريباً بين (*36%*) للمواسير ذات القطر (*7″*) و (*26%*) للمواسير (*9 5/8″*).

تجدر الإشارة إلى أن سابرة (*CET*) لا تتأثر بالماء المالئ للفراغات الحلقية الدقيقة حتى القطر (*0.1 mm*)، وهي قادرة على كشف وجود قنوات في الإسمنت، لكنها تتأثر سلباً بوجود تآكل في السطح الداخلي لمواسير التغليف.

- ✓ **التصويرالبئري فوق الصوتي (*USI*):**

إن مبدأ عمل هذه السابرة مشابه لمبدأ السابرة (*CET*)، إلا أنها تؤمن تغطية كاملة (360^o) للسطح الجانبي للمواسير عن طريق استخدام مرسلات دوّارة تعمل كمرسل ومُستقبل في آنٍ معاً.

- ✓ **سابرةالترابط المجزّأة (*SBT*).**

تقدم هذه السابرة قياساً كميّاً لجودة ترابط الإسمنت في ستة قطاعات زاويّة حول مواسير التغليف.

تكون المرسلات الصوتية مركبة على ست وسادات مُلامسة للسطح الداخلي لمواسير التغليف، لتحقيق قياسات تعويضية للتخميد. يُقاس التخامد الصوتي باتجاهين باستخدام مجموعات من المرسلات والمستقبلات. تتألف كل مجموعة من مُرسلين ومستقبلين مُركبة على أربعة أذرع متجاورة. يتم جمع كل تسجيلين للحصول على قيمة معوّضة لا تعتمد على حساسية المستقبل أو طاقة المرسل. تُكرّر عملية القياس هذه لكل قطاع من القطاعات الستة. لتسهيل عملية تفسير القياسات يتم عرض التسجيلات بطريقتين: الأولى عرض أولي أثناء التسجيل ومعاملة وتمثيل التسجيلات، والثانية العرض الثانوي الذي يتألف من صفوف مجزَأة بزاوية (60^o) لخريطة تغير تخميد الإسمنت، وتتبع تراكب توجّه السابرة (*Tool orientation trace overlay*).

الخلائط الإسمنتية الخاصة
Special cement systems

مقدمة:

لقد تطورت تقنيات سمنتة الآبار باستخدام خلائط إسمنتية خاصة وذلك لحل بعض المشاكل التي تصادف عند سمنتة الآبار، مثل تراجع السائل الإسمنتي (slurry fallback), تهريب السائل الإسمنتي (lost circulation), تشكل الفراغات الميكروية (micro annuli) في الحجر الإسمنتي، سمنتة المجالات الملحية (salt formation) وفي الأوساط البئرية الآكالة.(corrosive well environments). كما أن التكنولوجيا الخاصة استخدمت أيضاً لحل المشاكل الناتجة عن عملية السمنتة في الآبار ذات درجات الحرارة العالية، وكذلك المشاكل الناتجة عن تسرب الغاز في الفراغ الحلقي.

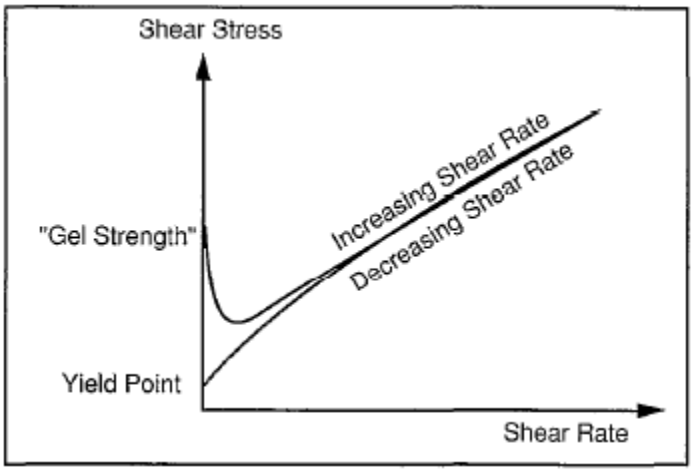
5-1-الخلائط الإسمنتية الهلامية (Thixotropic cements)[14] :

التكسوتروبية (Thixotropy) أو الهلامية مفهوم يستعمل لوصف الخاصة التي تظهر في السوائل الخاضعة للقصّ (ضخ- تحريك)، حيث ينمو التركيب الهلامي ويصبح صلباً عند التوقف عن الحركة. عملياً فإن مصطلح الخلائط الإسمنتية التكسوتروبية هو سوائل ذات هلامية رقيقة، وتكون بشكل سائل أثناء المزج والإزاحة، حيث ينمو التركيب الهلامي ويتحول بسرعة إلى كتلة صلبة (rigid self-supporting gel structure) عند توقّف الضخ. وعند إعادة الضخ، ينكسر التركيب الهلامي ويصبح السائل الإسمنتي قابلاً للضخ مرة أخرى. وهذا النوع من السلوك الريولوجي هو عكوس باستمرار مع الخلائط الإسمنتية التكسوتروبية (الهلامية). وكقاعدة، تسلك الخلائط الإسمنتية الهلامية سلوك السوائل البنغامية البلاستيكية تحت القص، وبالتالي فإن سلوكها يحدد بقيمة نقطة الخضوع τ_Y واللزوجة البلاستيكية μ_p... أما السوائل الغير تكسوتروبية فتبقى قيمة نقطة الخضوع ثابتة سواء ازداد معدل القص أو نقص. ولا يوجد هناك أي تغيير في التركيب الفيزيائي للسائل خلال السكون، كما أن الضغط اللازم تطبيقه لبدء السائل في الحركة لا يتغير مع الزمن. أما في حالة السوائل التيكسوتروبية ومع انخفاض الزمن (lapse of time,) فإنه يتطلب قوة أكبر من تلك القوة التي تدل عليها نقطة الخضوع اللازمة لعودة السائل إلى الحركة. والمبينة في الأشكال (5-1),(5-2) والشكل (5-3). إن الفرق بين المتانة الهلامية "gel strength" ونقطة الخضوع (yield point) يعطى كمقياس لدرجة تكستروبية السائل (degree of thixotropy).

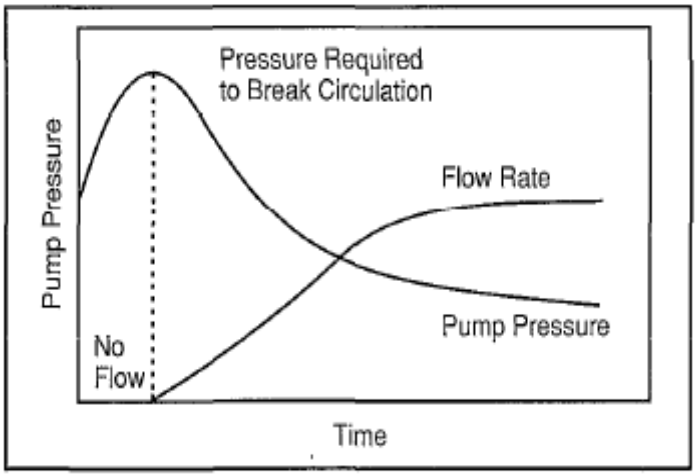
تستخدم الخلائط الإسمنتية التيكسوتروبية في الآبار التي يحدث فيها تراجع كبير لعمود الإسمنت في الفراغ الحلقي، ويحصل ذلك في الآبار التي تحتوي على طبقات ضعيفة ، تتشقق تحت تأثير الضغوط الهيدروستاتيكية القليلة، حيث أن خاصية الدعم الذاتي التي تتمتع بها هذه

الخلائط تقلل من الضغط الهيدروستاتيكي على الطبقة، وذلك كلما زادت المتانة الهلامية. وتستخدم كذلك في معالجة فقدان السوائل خلال الحفر، حيث تدخل هذه الخلائط الى الطبقة ويبدأ التركيب الهلامي بالنمو، ويحدث إغلاق الطبقة بسبب مقاومة جريانه، الناتجة عن الهلامية الزائدة في فترة السكون.

كما تستخدم في عمليات إصلاح مواسير التغليف المتآكلة أو المفصولة split or corroded كمخدة أو كخلطة أمامية (lead slurries) في عمليات السمنتة الإصلاحية، حيث من الصعب تطبيق عمليات السمنتة تحت ضغط. ولكن من سلبيات هذه الخلائط، أنه إذا تم التوقف عن الضخ أكثر من مرة فإن هلامية السائل ونقطة خضوعه تزدادان، مما يتطلب ضغطاً كبيراً جداً لإعادته.



الشكل (5-1): السلوك الريولوجي للسوائل التكسوتروبية.



الشكل (5-2): ضغط المضخة ومعدل التدفق للسوائل التكسوتروبية.



الشكل (5-3): سلوك السوائل التكسوتروبية.

5-2-أنواع الخلائط الإسمنتية التيكسوتروبية:

توجد أنواع متعددة للخلائط الإسمنتية التيكسوتروبية [43] نبينها كما يلي:

5-2-1-إسمنت ذو اساس غضاري(Clay-Base systems):

وهو عبارة عن إسمنت بورتلاندي يحتوي على غضار قابل للإنتفاخ في الماء(البنتونايت)، حيث تنمو متانته الهلامية، ويبدي بعض الدرجة من السلوك التكستروبي . ومن تطبيقاته السيطرة على مشكلة هجرة الغاز في حالات محددة. يتراوح تركيز البنتونايت-0.05% (0.02%(BWOC))، وتتراوح كثافة الخليطة الإسمنتية(Lb/gal 11.5-21.0) أي (1.4-2.5gr/cm^3)

5-2-2-إسمنت أساسه سلفات الكالسيوم(Calcium sulfate-base systems):

تعتبر سلفات الكالسيوم نصف المهدرجة ($CaSO_4.1/2\ H_2O$ or $CS^-\ H_{1/2}$) من أكثر المواد استخداماً في تحضير الخلائط الإسمنتية التكسوتروبية. وعندما تضاف هذه المادة إلى الإسمنت البورتلاندي, يتهدرج في البدء ليشكل الجص($CaSO_4.2\ H_2O$ or $CS^-\ H_2$), الذي يتفاعل مع ثلاثي ألومينات الكالسيوم (C_3A) ليشكل هيدرات سلفوألومينات الكالسيوم، والتي تدعى الاترنجيت" (Ettringite) كما يظهر في التفاعل الآتي:

$$3\ CaSO_4.2H_2O + 3CaO.Al_2O_3 \xrightarrow{H2O} 3CaO.AL_2O_3\ .32H_2O \quad \text{(الأترنجيت)} \quad (1\text{-}5)$$

والأترنجيت هو بلورات أبرية الشكل أحادية المحور ,سداسية الأضلاع, تترسب على سطوح حبيبات الإسمنت، حيث أن وجود هذه البلورات يعزز بشكل كبير الارتباط الفيزيائي بين جزيئات الإسمنت، والذي يؤدي إلى تشكل شبكة ضعيفة أو هلامية, والتي تتكسر بسهولة عند التحريك، وتعود الخليطة إلى الحالة السائلة .

للتبلور إن معظم الإسمنت البورتلاندي الذي يستخدم لتحضير الخلائط الإسمنتية التيكسوتروبية باستخدام سلفات الكالسيوم نصف المهدرجة يتعلق بتركيب الإسمنت, والتركيز المثالي لـ $CS^{-}H_{1/2}$ الذي يتراوح بين BWOC 12% - 8% أما الإسمنت الذي يحتوي على نسبة من (C_3A) أقل من5% فيجب ألا يستخدم, وذلك بسبب عدم كفاية الأترنجيت.

إن كمية الماء اللازمة لتحضير الخلائط الإسمنتية التكسوتروبية باستخدام سلفات الكالسيوم نصف المهدرجة هي أعلى من تلك الكمية التي تتطلبها السوائل الإسمنتية العادية، وبالتالي فإن كثافتها تكون أقل. وفي الجدول(5-1) نبين مواصفات الخلائط الإسمنتية التيكسوتروبية التي تحتوي على سلفات الكالسيوم نصف المهدرجة .

الجدول (5-1): مواصفات الخلائط الإسمنتية التكسوتروبية التي تحتوي على سلفات الكالسيوم نصف المهدرجة

System	Density (lb/gal)	% Water	Water (gal/sk)	% Calcium Sulfate Hemihydrate	% $CaCl_2$	Yield (ft^3/sk)
1	15.6	46	5.20	0	0	1.18
2	14.9	60	6.78	12	3	1.48
3	14.6	64	7.20	10	2	1.50
4	14.6	64	7.20	12	3	1.54
5	14.2	70	7.90	10	0	1.60

System	Well Conditions (°F) BHCT	BHST	Thickening Time (hr:min) at BHCT	Compressive Strength (psi) at BHST 7 hr	18 hr	24 hr	96 hr
1	113	170	4:00+	350	1750	2900	—
2	70	60	3:10	100	—	500	1150
3	80	95	2:08	485	1165	1295	—
4	80	95	1:50	500	1250	1350	—
5	125	200	3:15	950	1750	2200	—

إن الخلائط الإسمنتية التكسوتروبية التي تحتوي على سلفات الكالسيوم نصف المهدرجة لا تنسجم مع معظم إضافات فاقد الرشح. ولتأمين تحكم كاف بفاقد الرشح, فإن مثل الخلائط الإسمنتية تسبق عادة بفاصل (Spacer) مع معدل فاقد رشح قليل.

إن الخلائط الإسمنتية التكسوتروبية التي تحتوي على سلفات الكالسيوم نصف المهدرجة بالإضافة إلى أنها تسهم في الخواص التكستروبية، فإن مثل هذه الخلائط لها مقاومة عالية للكبريتات, لأن (C_3A) تعتبر ذات حيادية فعالة (effectively neutralized). وبعد التصلب تستمر بلورات الأترنجيت بالتشكل، والتي تؤدي إلى حدوث توسع داخل بنية الإسمنت، وهذه الظاهرة الجيدة تعود لهذه السوائل الهلامية.

5-2-3- <u>إسمنت أساسه سلفات الألمنيوم وسلفات الحديدي:</u>

system:Aluminum sulfat/iron(II)sulfat

وهي إضافات تتكون من مزج $Al_2(so_4)_3$ و $Feso_4$ ، والتي تلعب أيضاً دوراً في تشكل بلورات الأترنجيت، لتضفي الخواص التكستروبية على الخلائط الإسمنتية. وهي تستخدم مع الإسمنت البورتلاندي، الذي يحتوي على نسبة من(C_3A) أقل من5% . وهذه المواد تكون أيضاً فعالة عند استخدامها مع الإسمنت غير البورتلاندي (مثل الإسمنت صنف j)، والتي يمكن أن تكون على شكل سائل, وهي ملائمة في العمليات الإسمنتية البحرية.

تتفاعل سلفات الألمنيوم مع هيدروكسيد الكالسيوم في السائل الإسمنتي(slurry cement) لتشكل الأترنجيت وفق التفاعل التالي :

$$3CaO.AL_2O_3.3CaSO_4.32H_2O \xrightarrow{H2O} 6Ca^{+2}+12OH^-+{}^{2}3SO_4+ 2Al(OH)_4^- \quad (2\text{-}5)$$

إن حركية التفاعل المبين أعلاه هو أسرع بكثير من تلك الموضحة باستخدام سلفات الكالسيوم نصف المهدرجة. تعتبر سلفات الألمنيوم من المسرعات الفعالة جداً للإسمنت، وتشكل تركيباً هلامياً قوياً وغير عكوس، يمكن أن يتطور إذا أضيفت لوحدها. أما سلفات الحديدي iron(II)sulfat فهي مبطئات ضعيفة للإسمنت، والتي توجد في هذا النظام، وذلك لكبح تأثير سلفات الألمنيوم وللحفاظ على الخواص التكسوتروبية خلال زمن الضخ. بسبب الحركية السريعة لهذا النظام, تتشكل كمية قليلة من بلورات الأترنجيت بعد تصلب الإسمنت. هذا التوسع لا يلاحظ بشكل هام إلا عند درجة حرارة أقل من 100°F(38°C).

5-2-4-<u>إسمنت أساسه بوليمير سيللوزي بشكل مزيج متشابك :</u>

Crosslinked cellulose polymer systems :

تحضر هذه الأنواع من الخلائط التكسوتروبية باضافة بوليميرات تشكل مزيجاً متشابكاً قابلاً للإنحلال في الماء بوجود عامل مزج (crosslinking agent) مثل كربوكسيل ميتيل هيدروكسيل إيتيل السيللوز(CMHEC)، هيدروكسيل إيتيل السيللوز(HEC), كحول بولي فينيل

وبوليميرات سلفونية متنوعة، يمكن أن تكون مزيجاً متشابكاً مع التيتانيوم أو الزكونيوم. إن الإتحاد المثالي لنسبة تركيز كل من البوليمير/مزيج التشابك يتغير تبعاً لدرجة حرارة البئر.

5-3- الخلائط الإسمنتية المتوسعة (Expansive cement systems):

تلعب نوعية الحجر الإسمنتي خلف مواسير التغليف دورا" هاما" في تحقيق المعدل الأعظمي للإنتاج من أبار النفط. فالترابط الجيد بين الحجر الإسمنتي ومواسير التغليف من جهة، وبين الحجر الإسمنتي والطبقة من جهةٍ أخرى، يلعب دوراً أساسياً في تحسين فعالية عزل الطبقات. أما الترابط السيئ فسوف يؤدي إلى مشاكل كبيرة خلال عمليات الإنتاج, حيث يقيّد طرق الإنتاج المراد تطبيقها، ويقلل من فعالية طرق التحسين المنفذة لزيادة الإنتاج من الطبقات. فالاتصال الهيدروليكي بين الطبقات يمكن أن يكون سببه الإزاحة السيئة لسائل الحفر, كما ينتج عن الترابط السيء بين الإسمنت والطبقة بسبب السماكة الكبيرة لكعكة سائل الحفر, وتمدد أو تقلص مواسير التغليف نتيجة الضغط الداخلي ، أو الإجهادات الحرارية (thermal stress), وتلوث الإسمنت بسائل الحفر أو بسوائل الطبقة. كل هذه الأسباب يمكن أن تؤدي إلى تشكل قنوات صغيرة أو فراغات ميكروية (microannulus) عند سطوح الترابط بين الحجر الإسمنتي ومواسير التغليف ، أو بين الحجر الإسمنتي والطبقة, الأمر الذي يمكن أن يسبب تشوه الترابط جزئياً أو كلياً بين الحجر الإسمنتي ومواسير التغليف، ويعطي إمكانية لحركة السوائل داخل الفراغ الحلقي.

إن استخدام الإضافات الموسعة التي تؤدي إلى تمدد الإسمنت بعد بدء التصلب، تعتبر أحد أهم الوسائل لعزل الفراغات الميكروية وتحسين نتائج السمنتة الأولية. فتحسين الترابط ناتج عن المقاومة الميكانيكية أو عازلية الإسمنت مقابل مواسير التغليف والطبقة [5].

في الشروط البئرية، فإن الإسمنت المتوسع لا يمكن أن يتوسع داخل مواسير التغليف، بل يتوسع باتجاه الطبقة، مما يؤدي إلى منع تشكل الفراغات، وهذا التوسع يؤدي لاحقاً إلى نقصان المسامية داخل بنية الإسمنت .

5-4- التغيرات الحجمية للسائل الإسمنتي والحجر المتشكل منه[18] :

عند خلط كمية من الإسمنت M_{cem} جحمها V_{cem} مع كمية من الماء M_w وحجمها V_w فإن الخليطة الناتجة يمكن أن تبدي التغيرات الحجمية الآتية :

<u>أولا :انكماش حجم الجملة (ماء + إسمنت) :</u>

يطلق على نقص حجم النظام (ماء + إسمنت) مصطلح الانكماش الحجمي Volume Contraction والذي يقدر بالفرق بين الحجم الأولي V_1 والحجم النهائي V_2 لهذا النظام، ويحسب بالعلاقة الآتية:

$$\Delta V_s = V - V_2(t)_1 = (V_c + V_w) - V_2(t) \qquad (1\text{-}5)$$

وحيث أن الحجم النهائي للنظام يتغير زمنياً مع تطور عمليات الهدرجة والتصلب، فإن قيمة الانكماش تحسب عندما يصبح تغير الحجم النهائي مهملاً $V_2(t) \approx Const.$. وحسب آلية حدوث الإنكماش في النظام (ماء + إسمنت) فإن هذه الجملة يمكن أن يقل حجمها نتيجة عمليات فيزيائية وكيميائية متكاملة ومتزامنة .

يفسر الانكماش الكيميائي بأنه ينجم عن أن حجم المواد الناتجة عن تفاعلات الإماهة أقل من حجم المواد الداخلة في هذه التفاعلات. فمثلا عند اكتمال تفاعل فلز C_3A ($3CaO.Al_2O_3$) مع الماء تتكمش الجملة بمقدار 3.4 cm^3/kg (23,60 % حجماً)، أما عند تفاعل أوكسيد الكالسيومCaO مع الماء فان الانكماش الكيميائي 3.02 cm^3/kg (4,56 % حجماً)

كما يفسر الانكماش الفيزيائي بأن قسماً من الماء الحر يتحول إلى مياه مترابطة (مدمصة، مبللة ...إلخ) على سطوح الحبيبات الإسمنتية، ذات كثافة أكبر (أو حجم أقل)، ينعكس نقصاً في حجم المزيج. وتتراوح انكماشية معظم أنواع الإسمنت البورتلاندي عند اكتمال التصلب بين 50 - 70 cm^3/kg .

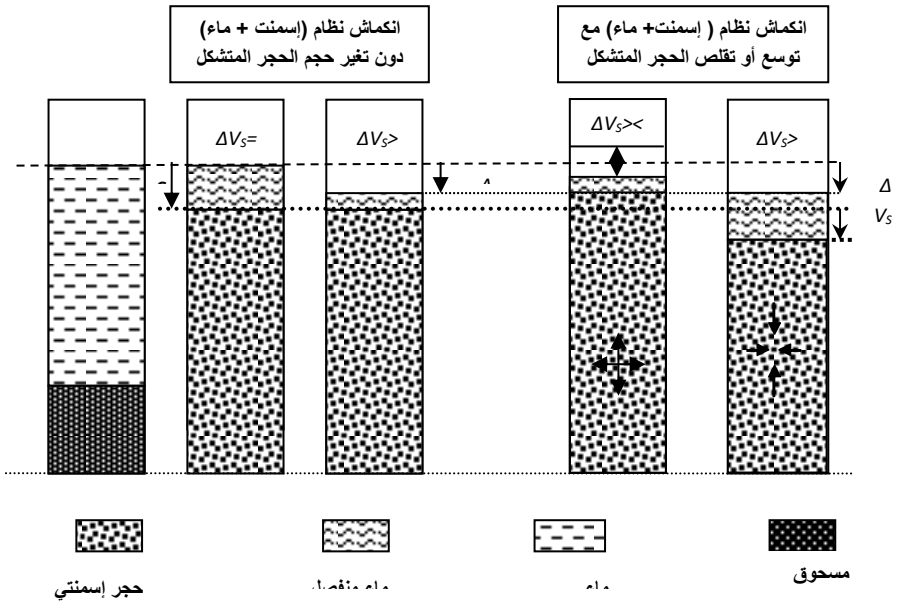
<u>ثانيا : تغير حجم الحجر الإسمنتي :</u>

يمكن أن يحافظ الحجر الإسمنتي المتصلب في الشروط السطحية (تغير حجمي حر) أو في الفراغ الحلقي للبئر (تغير حجمي مقيد) على حجمه دون تغير طيلة فترة التصلب، كما يمكن أن يزداد حجمه (تمدد أو توسع Expanding) في جميع الإتجاهات، وعلى العكس يمكن أن يقل حجمه (تقلص أو انكماش Contraction). ولفهم الفروق الدقيقة بين مصطلحات التغيرات الحجمية للنظام (إسمنت + ماء) وبين التغيرات الحجمية للحجر المتشكل عن هذا النظام ، يمكننا تمثيل جميع التغيرات الحجمية على المخطط الموضح على الشكل (5-4) . في الحالة العامة عند إضافة مسحوق الإسمنت إلى الماء وخلطهما جيداً، ومن ثم تركهما بحالة سكون بانتظار التصلب، فان قسماً من الماء سوف يصعد إلى أعلى السائل الإسمنتي (الماء المنفصل). حجم النظام (ماء + إسمنت) في هذه الحالة هو مجموع حجم السائل الإسمنتي (الذي سيتحول إلى حجر) مضافاً إليه حجم الماء المنفصل .

وهنا يمكن تمييز حالتين :

- الحالة الأولى : حدوث انكماش للنظام دون تغير في حجم الحجر الإسمنتي .
- الحالة الثانية : حدوث انكماش للنظام مع حدوث تغير في حجم الحجر الإسمنتي .

أي أن انكماش حجم النظام سيحدث بغض النظر عن تغيرات حجم الحجر الإسمنتي بعد بداية الشك . باستثناء الحالة الخاصة، أي عند عدم وجود أية تغيرات حجمية للنظام والحجر المتشكل ($\triangle V_C= 0$ ،$\triangle V_S= 0$)، انظر(الشكل 5-4).



الشكل(5-4): الفرق بين التغيرات الحجمية للسائل الإسمنتي والحجر المتشكل منه.

أما في حالة حدوث توسع للحجر الإسمنتي ($\Delta V_c > 0$) فإن حجم النظام يمكن أن يزداد أو ينكمش ($\Delta V_S >< 0$)، ويطلق مصطلح الإنكماش السلبي على الحالة التي يزداد فيها حجم النظام ، أي $\Delta V_s \rangle 0 \Rightarrow V_2(t) \rangle V_1$ حسب العلاقة (5-1) .

إن توسع أو تمدد الحجر الإسمنتي يمكن أن يحدث على الشكل الخارجي دون تغيير في الكثافته الحقيقية، أي على حساب تغير الفراغ المسامي للحجر .

وتختلف النظريات التي تفسر آلية التوسع، بيد أن معظم المراجع [14،18] تتفق على أنه ناتج عن تأثير الإجهادات الداخلية الخاصة، والناتجة عن تشوه البنية. ففي حال كانت الإجهادات متوازنة في جميع الإتجاهات، يمكن أن تحدث إزاحة العناصر البينية، وهنا إذا كانت التشوهات لدنة فإن سطوح التماس بين الحبيبات تقوم بترميم التشوهات بنواتج الإماهة، ومع استمرار عملية الإماهة تنمو متانة الحجر وتقل التشوهات اللدنة، ويكون الضغط الناتج عن التوسع مرتبطاً مباشرةً بمتانة الحجر الإسمنتي. فإذا كانت التشوهات اللدنة قليلة سيتم الحصول على حجر ذي ضغط توسعي قليل، سواء أكانت المتانة المبكرة عالية أم ضعيفة .

وبشكل عام فإن حركية التوسع المقيد للحجر الإسمنتي تبدي قيمة توسع عظمى، تقابل ضغط توسع محدد على السطوح الملامسة في فترة تصلب محددة .

5-5- آلية توسع الحجر الإسمنتي: The mechanism of cement expansion

من خلال دراسة البحوث المهتمة بنظرية توسع الحجر الإسمنتي [5,11] يمكننا تلخيص طرق الحصول على توسع الحجر الإسمنتي على الشكل التالي:

5-5-1- <u>التوسع بطريقة توليد بلورات الأترنجيت (Ettringite systems) :</u>

تعتمد العملية على تحويل كامل $CaO.Al_2O_3$ الموجود في الإسمنت خلال المرحلة الأولى للتصلب إلى طور الأترنجيت $3CaO.Al_2O_3.CaSO_4.32\ H_2O$ ، ونتيجة لفرق الكثافة بين بلورة الأترنجيت وبلورات $CaO.Al_2O_3$ يزداد الحجم بمعدل % (280-200) .

وفي العمليات الإسمنتية البئرية لا يمكن الاستفادة من هذه العملية، بسبب ضعف نسبة $CaO.Al_2O_3$ في إسمنت الآبار ($<3\%CaO.Al_2O_3$).

ويمكن إضافة هيدروسولفاألومينات الكالسيوم لإسمنت الآبار، لضمان توسع كافٍ عند قلوية $PH>10.2$ وحرارة دون الـ $100C^o$.

إن معظم أنواع الإسمنت المتوسعة تعتمد على تشكيل بلورات الأترنجيت، وهي بلورات لها حجم أكبر من حجم المكونات التي تتشكل منها، وبالتالي فإن التمدد (التوسع) يحدث بسبب الضغط الداخلي المطبق نتيجة تشكل البلورات. عادة, نميز أربعة أنواع من الإسمنتات التجارية المتوسعة تبعاً لتوليد بلورات الأترنجيت .

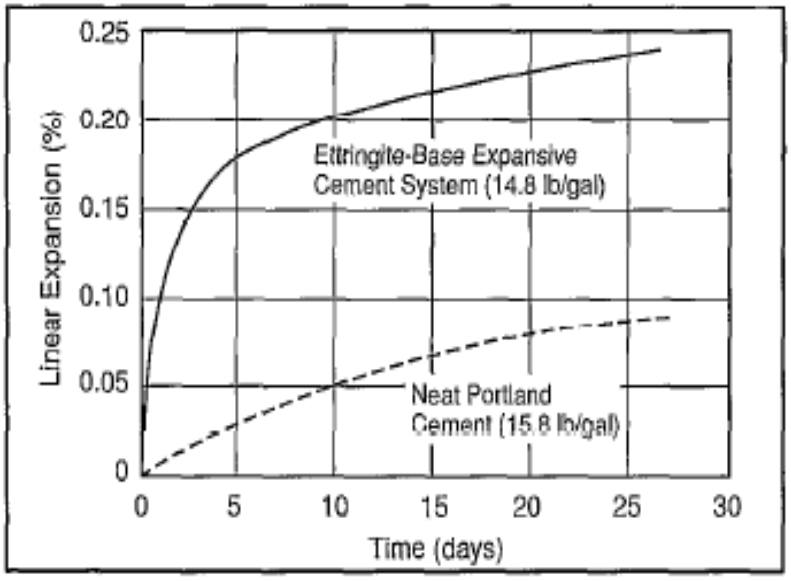
- **<u>إسمنت من نوع K :</u>** وهو مزيج من الإسمنت البورتلاندي, كبريتات الكالسيوم, أوكسيد الكالسيوم, وسلفوألومينات الكالسيوم غير المهدرجة، وهذا النوع من الإسمنت يتمدد تقريباً بمقدار (0.05%- 0.2%).
- **<u>إسمنت من نوع M</u>:** ينتج هذا الإسمنت إما من مزيج الإسمنت البورتلاندي, وإسمنت ألومينات الكالسيوم المقاوم للحرارة وكبريتات الكالسيوم، أو من ناتج طحن كلينكر الإسمنت البورتلاندي, وكلينكر إسمنت ألومينات الكالسيوم وكبريتات الكالسيوم. وذلك وفق المعادلة الآتية:

$$CA+3C\hat{S}+2CH+30H\rightarrow C6A\hat{S}_3H_{32} \qquad \textbf{(3-5)}$$

- **<u>إسمنت من نوع S</u>:** يحضر بمزج الإسمنت البورتلاندي الذي يحتوي على نسبة عالية من C3A (20%) مع %15- 10.5% جص .

أما الطريقة الرابعة في تحضير الإسمنت المتوسع الذي يعتمد على توليد بلورات الأترنجيت، وذلك بإضافة كبريتات الكالسيوم نصف المهدرجة إلى الإسمنت البورتلاندي، الذي يحتوي على نسبة من C_3A تساوي على الأقل 5%. وهذا الشكل يشابه إسمنت من نوع S .

إن التوسع الناتج عن إسمنت بورتلاندي/كبريتات الكالسيوم نصف المهدرجة موضح في الشكل(5–4).



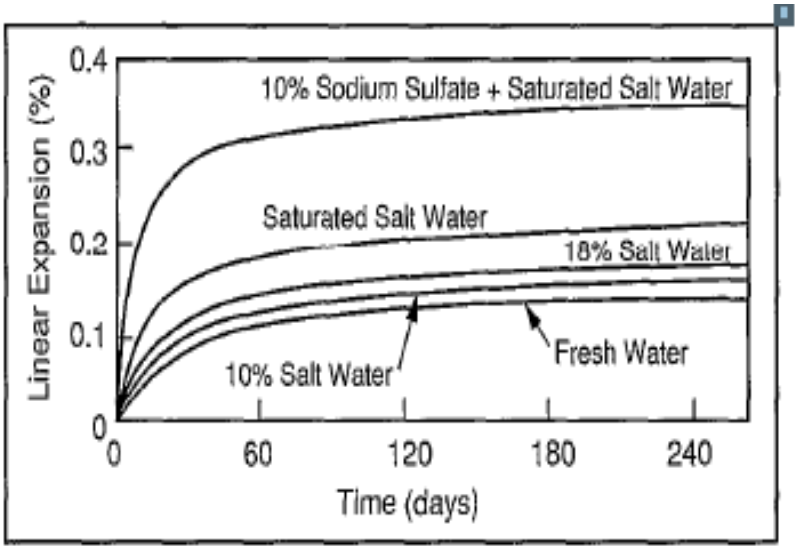
الشكل(5–5): التوسع الناتج عن الخلائط الإسمنتية النظامية، والتوسع الناتج عن طريقة توليد بلورات الأترنجيت.

إن السيئة الرئيسية للتوسع بطريقة توليد بلورات الأترنجيت، هو عدم قدرتها على إحداث توسع بدرجة كافية عند درجة حرارة أعلى من 150 °F ((56℃). إن بلورات الأترنجيت تكون غير مستقرة عند درجات الحرارة الأعلى, حيث تتحول إلى الجص وهيدرات سلفوألومينات الكالسيوم المتكاثفة أو المتراصة كثيراً (densemore) وفقاً للمعادلة الآتية(5-4) :

$$3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.CaSO_4.12H_2O + 2CaSO_4.2H_2O + 18\ H_2O$$

5–5–2–الإسمنت الملحي (Salt Cements):

إن تحضير الخلائط الإسمنتية التي تحتوي على تركيز عالي من كلور الصوديوم أو كبريتات الصوديوم تعتبر من الطرق التي استخدمت لإنجاز التوسع في سمنتة الآبار. بعد التصلب، فإن توسع الإسمنت يحدث نتيجةً للضغط الداخلي المطبق بسبب تبلور الأملاح داخل الفراغات. إن التوسع الناتج عن الإسمنت الملحي يكون فعالاً حتى درجة حرارة,(204℃,400°F) كما هو مبين في الشكل(5–5)



الشكل (5-6): التوسع الناتج عن نظام الإسمنت الملحي.

5-5-3-التوسع بطريقة توليد الغاز :

ويتم ذلك من خلال إضافة مواد تطلق عند تفاعلها مع مكونات الخليطة الإسمنتية أو نواتج إماهتها, طوراً غازياً تنحصر فقاعاته في الفراغ المسامي للحجر الإسمنتي, وتتطور كمياته مع استمرار هذه التفاعلات. وكمثال على هذه الإضافات مساحيق: المغنيزيوم والتوتياء والحديد والألمنيوم, فوق كلور الكالسيوم, كربيد الكالسيوم, الماء الأوكسجيني مع فوق كلور الكالسيوم, وفق التفاعلات الآتية :

$$2AL + 3Ca\ (OH)_2 + 6\ H_2O \rightarrow 3CaO\ .\ Al_2O_3\ .\ 6H_2O + 3H_2\uparrow$$
$$CaC_2 + 2\,H\,2O \rightarrow Ca(OH)_2 + C_2H_2\uparrow \qquad \textbf{(5-5)}$$
$$H_2O_2 + CaOCl_2 \rightarrow CaCl_2 + O_2\uparrow + H_2O_2$$

يعتبر التوسع بطريقة توليد الغاز باستخدام مسحوق الألمنيوم من الطرق الفعالة في الآبار الضحلة [45] لأن ضغط التوسع الناتج عن الفقاعات الغازية لا يزيد عن ضغط الطبقة. وفي الجدول(5-2) نبين التوسع بطريقة توليد الغاز باستخدام مسحوق الألمنيوم.

الجدول (5-2): تأثير التوسع الناتج عن مسحوق الألمنيوم في الإسمنت

Volume Expansion % (80°F)		
Aluminum (%)	Curing Pressure 0 psi	3000 psi
0.00	—	—
0.05	11.84	0.712
0.10	17.90	0.917
0.25	24.00	1.64
0.50	56.51	2.64
1.00	57.19	5.17

يتعلق تأثير المادة المولدة للغاز بدرجة الحرارة، وبالضغط الهيدروستاتيكي لعمود السائل الإسمنتي، وتركيب المادة ودرجة نعومتها. كما يشكل غاز الهيدروجين خطر التآكل على مواسير التغليف، إضافةً إلى صعوبة السيطرة على كمية وحجم الغاز. وقد استعملت هذه الطريقة بنجاح لمعالجة التهريب .

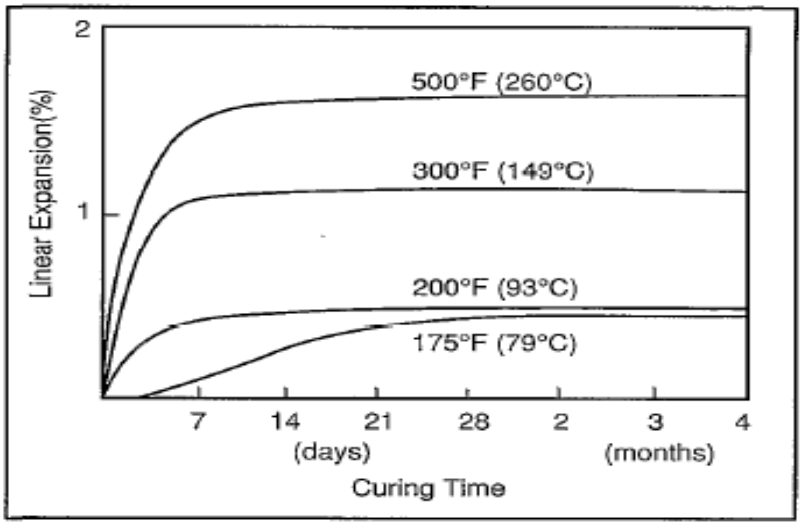
5-5-4-<u>التوسع بطريقة إنتاج الهيدروكسيد:</u>

تعتمد هذه الطريقة على إضافة أوكسيد الكالسيوم أو أوكسيد المغنيزيوم أو مزيج منهما. خلال الإماهة يتشكل $Ca(OH)_2$ و $Mg(OH)_2$ ، ويؤدي إلى حصول التوسع نتيجة لتشكل$Mg(OH)_2$, $Ca(OH)_2$ ، والتي تشغل حجماً أكبر (كثافة أقل) من الحجم الأولي لمكوناته.

$$\underset{\text{S.G.} = 3.58}{\text{MgO (periclase)}} + H_2O \rightarrow \underset{\text{S.G.} = 2.36}{\text{Mg (OH)}_2\text{ (brucite)}} \qquad \textbf{(6-5)}$$

تزداد كثافة الحجر الإسمنتي أيضاً، كما تنخفض قابليته للتقلص. ولتجنب خطر تشقق الحجر الإسمنتي يتم التحكم بالعملية بحيث يحصل التمدد بعد انتهاء عملية التجمد، وقبل أن يملك الإسمنت صلابة محددة إن أوكسيد المغنيزيوم يجب أن يحمّص عند درجة حرارة عالية جداً (dead-bunt) بين (1100°C&1300°C)2012°F&2352°F. كما أن الإسمنت الذي يحتوي على أوكسيد المغنيزيوم ينجز توسعاً ممتازاً عند درجة حرارة (550°F, 288°C). يتراوح تركيز أوكسيد المغنيزيوم الذي ينجز توسعاً كافياً بين (0.25% - 1.00% BWOC)، ويعتمد ذلك على درجة الحرارة .

والشكل(5-6) يظهر توسع إسمنت صنفG والذي يحتوي على(1.00%Mgo (BWOC وذلك عند درجات حرارة مختلفة .



الشكل (5-6): توسع الإسمنت الذي يحتوي على(1.00% Mgo (BWOC

إن معدل التوسع لـ MgO أقل بـ (2– 10) مرة من التوسع الناتج عن إضافة CaO ، إلا أن نشاط MgO يزداد مع ازدياد درجة الحرارة، لذا ينصح باستخدامه عند درجات حرارة فوق الـ $100\ ^0C$ ، وينصح باستخدام أوكسيد الكالسيوم دون الـ $100\ ^0C$ [5] .

55–7– تقييم متانة إلتصاق الحجر الإسمنتي مع معدن مواسير التغليف :

إن إحكام التصاق الحجر الإسمنتي مع معدن مواسير التغليف مرتبط أساساً بالقوى الضاغطة أثناء عملية السمنتة، وبعد توقف الضخ وانتظار التصلب، والتي تؤسس لكثافة التصاق الحبيبات الإسمنتية ومتانته وعازليته. ويرجع الباحث دانيوشيفسكي [20, 21] متانة التصاق الحجر الإسمنتي مع المواسير إلى الترابط الفيزيوكيميائي بينهما، نتيجة التبادل الأيوني بين الطبقة الحدية المبللة للمواسير وبين السائل الإسمنتي. أي أن الطبقة الحدية الخاملة والمبللة للسطح المعدني للمواسير يمكن استبدالها بطبقة تتبلور مع تطور عملية التصلب، وتنمو متانتها ومقاومتها الإرتشاحية .

وتجمع الدراسات على تحسن الالتصاق بزيادة خشونة سطح المعدن، وبازدياد نعومة طحن الإسمنت وارتفاع درجة الحرارة الطبقية. كما تتشوه منطقة التلاصق عند تقلص الحجر الإسمنتي، وتعرضه للاهتزازات في بداية مرحلة التصلب .

وقد بينت التجارب [23] أن إضافة مسحوق الرمل إلى الخليطة الإسمنتية يرفع قوة تلاصق الحجر المتشكل عنها (بعد 5 أيام) من ($1.4\ Mp_a$ إلى $2.2\ Mp_a$) ، دون أن يبدي الحجر الإسمنتي أي توسع .

كما أن إضافة فلز($\mathbf{3CaO.Al_2O_3.CaSO_4.12H_2O}$) بنسبة (3–5%) من وزن الإسمنت، وبسبب تشكل بلورات الأترنجيت، يؤدي إلى توسع 0.6% وقوة تلاصق مع المعدن(MPa 2)، وهو برأي الباحث كاف لضمان تلاصق جيد مع المعدن والصخر دون الإساءة إلى كتامة ومتانة الحجر الإسمنتي.

وتجمع الدراسات المهتمة بموضوع حل مشكلة سوء التصاق الحجر الإسمنتي مع الصخر أن وجود كعكة حفر على مختلف أنواع الصخور يؤدي إلى تخريب عازلية نطاق التماس مع الحجر الإسمنتي، حيث تصل قوة التصاق الحجر الإسمنتي مع الصخور الكلسية والأنهدريتية إلى MPa 1.8) ومع الصخور الغضارية إلى(0.8MPa)، ولدى تبلل الصخور المدروسة بطبقة من سائل الحفر تهبط قوة التلاصق إلى الصفر .

إن إضافة الرمل الناعم إلى السائل الإسمنتي يحسن التصاقه مع الصخور الكلسية والغضارية وبشكل ملحوظ مع الصخور الرملية (تصل إلىMPa 5) ، ولدى تغطية الصخر

الرملي بكعكة حفر غضارية تنهار متانة الالتصاق، ولا يمكن تأمين حد أدنى من الالتصاق دون إضافة كلور الكالسيوم ومسحوق الجير. كما أن إضافة نسب قليلة من هيكسا ميتا فوسفات الصوديوم كمرقق، و CMC كمقلل فاقد رشح تحسن إلتصاق الحجر الإسمنتي مع المعدن والصخر. كما أن إضافة كلور الصوديوم (حتى 5% وزنا) يعطي نتائج إيجابية على عازلية الحجر الإسمنتي بشكل عام .

مما سبق نستنتج أن إضافة كل من الرمل والجير يحسن من التصاقية الحجر الإسمنتي مع المعدن وجميع أنواع الصخور دون الإساءة إلى نفاذية الحجر الإسمنتي.

من أجل تقييم متانة التصاق الحجر الإسمنتي مع معدن مواسير التغليف تم تصنيع جهاز اعتماداً على طريقة دفع المحور[. يتكون الجهاز من أسطوانة خارجية ومحور متمركز معها، الشكل(5-8) ، بحيث تكون العلاقة بين القطرين محاكيةً للعلاقة بين أقطار مواسير التغليف وأقطار الدقاقات التي استخدمت للحفر :

$$\frac{d}{D_c} > \frac{d_{ep}}{D_W} = \frac{219}{304.8} > 0.72 \qquad (4-5)$$

حيث أن :

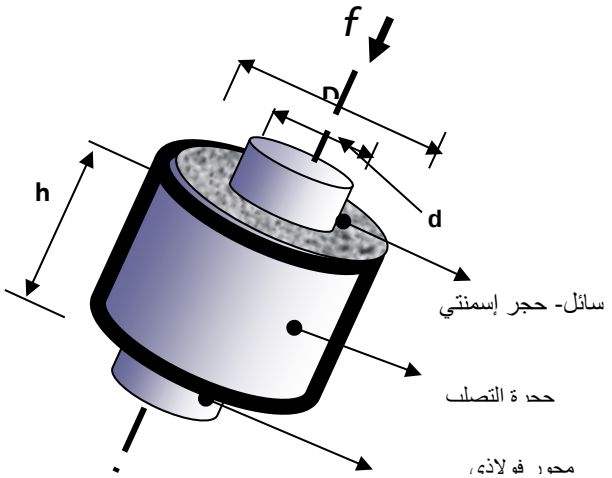
d – قطر المحور .

D_C – قطر الأسطوانة .

d_{eP} – القطر الخارجي لماسورة التغليف في البئر .

D_W – قطر البئر .

لحساب متانة الإلتصاق تسجل القوة f (KN) اللازمة لدفع المحور المركزي، وإزالة الالتصاق مع الحجر الإسمنتي



الشكل (5-8): طريقة تقييم متانة الإلتصاق

تحسين جودة سمنتة وعازلية الآبار باستخدام خلطات إسمنتية متوسعة خلف مواسير التغليف

. – مقدمة :

تلعب نوعية الحجر الإسمنتي خلف مواسير التغليف دورا"هاما"في تحقيق المعدل الأعظمي للإنتاج من أبار النفط. فالترابط الجيد بين الحجر الاسمنتي ومواسير التغليف من جهة، وبين الحجر الإسمنتي والطبقة من جهةٍ أخرى ، يلعب دوراً أساسياً في تحسين فعالية عزل الطبقات.أماالترابط السيئ فسوف يؤدي إلى مشاكل كبيرة خلال عمليات الإنتاج, حيث يقيّد طرق الإنتاج المراد تطبيقها ، ويقلل من فعالية طرق التحسين المنفذة لزيادة الإنتاج من الطبقات. فالاتصال الهيدروليكي بين الطبقات يمكن أن يكون سببه الإزاحة السيئة لسائل الحفر, كما ينتج عن الترابط السيء بين الإسمنت والطبقة بسبب السماكة الكبيرة لكعكة سائل الحفر, تمدد أو تقلص مواسير التغليف نتيجة الضغط الداخلي ، أو الاجهادات الحرارية , وتلوث الإسمنت بسائل الحفر أو بسوائل الطبقة. كل هذه الأسباب يمكن أن تؤدي إلى تشكل قنوات صغيرة أو فراغات ميكروية عند سطوح الترابط بين الحجر الإسمنتي ومواسير التغليف ، أو بين الحجر الإسمنتي والطبقة ,الأمر الذي يمكن أن يسبب تشوه الترابط جزئياً أو كلياً بين الحجر الإسمنتي ومواسير التغليف ويعطي إمكانية لحركة السوائل داخل الفراغ الحلقي.

إن استخدام الإضافات الموسعة التي تؤدي إلى تمدد الإسمنت بعد بدء التصلب تعتبر أحد أهم الوسائل لعزل الفراغات الميكروية وتحسين نتائج السمنتة الأولية. فتحسين الترابط ناتج عن المقاومة الميكانيكية أو عازلية الاسمنت مقابل مواسير التغليف والطبقة [5].

2– هدف البحث :

مما سبق يمكننا بلورة هدف هذا البحث بالشكل التالي : **البحث عن مكونات جديدة لتحضير خلائط إسمنتية متوسعة ينتج عن تصلبها حجراً إسمنتياً ذا عازلية مرتفعة (ترابط غير مسامي وغير نفوذي)** , وذلك من خلال إجراء تجارب مخبرية للخلطات الإسمنتية المتوسعة ولمواصفات الحجر الإسمنتي المتشكل منها و اختيار النموذج الأنسب الذي سوف يؤدي إلى :

1. تحسين فعالية عازلية الحجر الإسمنتي في الفراغ الحلقي (ترابط غير مسامي وغير نفوذي) وذلك من خلال منع تشكل الفراغات المكروية في الحجر الإسمنتي عند سطوح التماس بين الحجر الإسمنتي /الطبقة والحجرالإسمنتي /مواسير التغليف والتي تسهم في الحفاظ على الطاقة الكامنة للمكمن ، والتقليل من مشاكل الإنتاج ، وزيادة فعالية عمليات التحسين المراد تطبيقها.
2. حماية مواسير التغليف من التأثير التآكلي للموائع الطبقية ذات التركيز المختلف بالأملاح والغازات الحمضية, أي التقليل من التأثير التآكلي إلى أدنى حد ممكن، وما

يتبع ذلك من التقليل من كلفة العمليات الإصلاحية للآبار ، وبالتالي التقليل من كلفة البئر.

3- تقييم الواقع الحقلي:

من خلال دراسة الواقع الحقلي فقد بينت القياسات الصوتية لترابط الاسمنت (CBL) والتي أجريت على الآبار ، أن ترابط الإسمنت كان سيئاً في معظم هذه الآبار، وهذا يعرض مواسير التغليف للتآكل وما يتبع ذلك من زيادة في كلفة العمليات الإصلاحية للآبار وبالتالي من زيادة كلفة البئر ، جدول(1) .

رقم البئر	المجال M	نوع الترابط
أبو رباح 15 Casing 9 5/8"	2068-1075	وسط – سيء
	1075-445	سيء – حر
	445-325	جيد – وسط
	325-125	سيء – حر
	125-السطح	وسط
أبو رباح 15 Casing7 "	2195-2355	وسط – سيء
	2175-2195	سيء
	2145-2175	جيد
	2100-2145	وسط – سيء
	1702-2100	حر
شمال الفيض 8 Casing 9 5/8 "	2145-1620	وسط
	1620-1570	جيد
	1570-1365	حر
	1365-1175	وسط
	1175-السطح	حر

	2435-2403	وسط
	2403-2215	سيء
رقم البئر	المجال M	نوع الترابط
صدد 7 Casing 9 5/8 "	2935-4102	وسط
	2410-2390	سيء
	2390-1915	جيد
	1915-1875	سيء
	1875-1810	وسط
	1810-1760	سيء – حر
	1760-690	جيد
	690- السطح	سيء – وسط

جدول (1): قياسات ترابط الاسمنت لبعض الآبار

6-3- الدراسة المخبرية (*Laboratory test*):

6-3-1- <u>الأجهزة المستخدمة في البحث :</u>

- جهاز قياس سيولة السائل الإسمنتي المستخدم في مخبر هندسة الحفر.
- جهاز قياس كثافة الخلطات الإسمنتية المخففة المتوسعة (من نوع بار وئيد).
- جهاز قياس زمن تكاثف السائل الإسمنتي (زمن الشك) في الشروط السطحية باستخدام إبرة فيكات.
- سلندرات زجاجية قياس *250 mL* لقياس الثباتية الترسيبية للخلطات الإسمنتية المخففة المتوسعة.
- جهاز قياس المتانة الإنضغاطية للحجر الإسمنتي في المستخدم في مخبر هندسة الحفر

- جهاز قياس نفاذية العينات الأسطوانية الصخرية المستخدم في مخبر فيزياء الطبقة النفطية و الغازية باستخدام الغاز (جهاز روسكا *RUSKA* لقياس النفوذية).
- خلاطات متعددة السرع لخلط السائل الإسمنتي المستخدم في مخبر هندسة الحفر
- ميزان الكتروني حساس .
- حمامات مائية الكترونية .
- عينات أو قوالب (*Specimen molds*) مصنعة من الحديد لصب العينات الإسمنتية و التي تصنع وفق ثلاثة نماذج:

- النموذج الأول (*First mold*) مكعبة الشكل (*Cubic Type*) بأبعاد *2"×2"×2"*انش لتحديد المقاومة الإنضغاطية للحجر الإسمنتي .حيث أجريت هذه السلسلة من التجارب بدرجة حرارة ثابتة تقريبا طيلة فترة عملية التصلب *T= 60 ºC* والعينات الأسطوانية المتصلبة موحدة الأبعاد $5 \times 5 = 25\ Cm^2$.
- النموذج الثاني (*Second mold*) بشكل أسطواني (*Cylindrical Type*) بقطر *2.54 Cm* وطول *3 Cm* لتحديد نفوذية العينات اللأسطوانية.
- النموذج الثالث (Third mold) : يستخدم من أجل تقييم متانة التصاق الحجر الإسمنتي مع معدن مواسير التغليف تم تصنيع جهاز بطريقة دفع المحورالمعتمد مرجعياً [15,16] ،والذي يتكون من أسطوانة خارجية بقطر داخلي(D_C=4.8cm)ومحور بقطر (d =3.6cm) متمركز معها بحيث تكون العلاقة بين القطرين محاكيةً للعلاقة بين أقطار مواسير التغليف(d_{csg}) وأقطار رؤوس الحفر (D_B) التي استخدمت للحفر في حقولنا :

$$\frac{d}{DC} > \frac{dcsg}{DB} > = \frac{219}{304.8} > 0.72$$

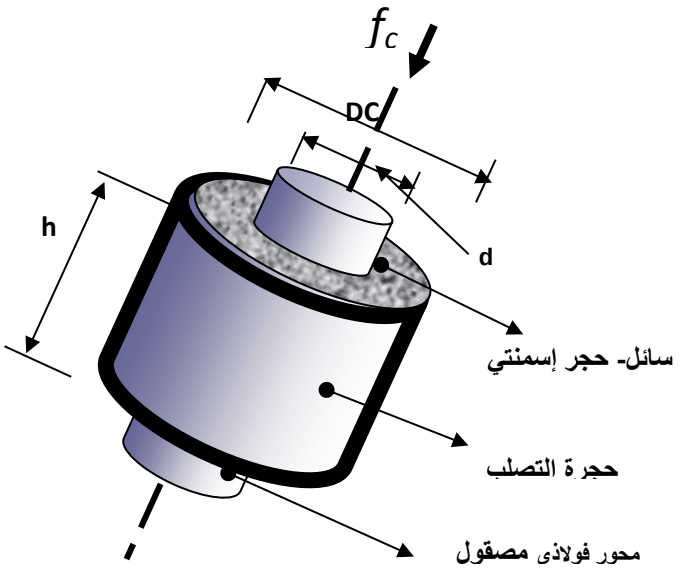
D_C :القطر الداخلي للأسطوانة

d: قطرالمحور

حيث يتم حساب متانة الإلتصاق على الشكل التالي : تسجل القوة (KN) f اللازمة لدفع المحور المركزي وإزالة الالتصاق مع الحجر الإسمنتي. وذلك من خلال جهاز قياس المتانة الإنضغاطية للحجر الإسمنتي.ثم تقسم القوة (f)على (A) مساحة مقطع الفراغ الحلقي بين القطر الداخلي للأسطوانة وقطر المحور فنحصل على متانة الإلتصاق .

A: مساحة مقطع الفراغ الحلقي بين القطر الداخلي للأسطوانة وقطر المحور وتحسب من العلاقة التالية:

$$A= \pi /4.(D_C^2-d^2)$$



الشكل (6-1) وسيلة تقييم متانة التصاق الحجر الإسمنتي مع معدن مواسير التغليف

6-3-2-<u>المواد المستخدمة في البحث (*Sample tested*):</u>

تم استخدام إسمنت الآبار المطابق للصنف *G* حسب *API* المنتج في شركة الرستن لصناعة الإسمنت المقاوم للكبريتات (*HSR*) و حسب معطيات المعمل فإن الإسمنت مكون من الأكاسيد المعدنية التالية جدول(6-2).

جدول(6-2) التركيب الكيميائي لإسمنت الرستن(%وزن)

المركب	*CaO*	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	MgO	الفاقد بالحرق	المواد غير المنحلة
النسبة االمئوية	*64.21*	*5.64*	*4.28*	*21.2*	*1.99*	*1.51*	*1.02*	*0.007*

6-3-3-<u>المواد المستخدمة كإضافات موسعة للخلطات الإسمنتية:</u>

تم استخدام أوكسيد الكالسيوم التجاري الناتج من حرق ا لحجر الكلسي حتى درجة حرارة $950\ C^0$ لمدة نصف ساعة , .وفي الجدول(6-4) نبين التركيب الكيميائي لعينات أوكسيد الكالسيوم.

الجدول(6-4) نبين التركيب الكيميائي لعينات أوكسيد الكالسيوم

المركب	النسبة المئوية
أكسيد الحديد	*0.86*
أكسيد الألمنيوم	*1.567*
أكسيد الكالسيوم	*91.95*
أكسيد المنغنيز	*2.62*
الفاقد بالحرق	*3.0*

الجدول (6-5) التركيب الكيميائي لعينات أوكسيد الكالسيوم

أولاً: دراسة تأثير الإضافات الموسعة على خواص الخلائط الإسمنتية والحجر الناتج عنها :

6-5- دراسة تأثير إضافة المواد الموسعة على خواص الخلطات الإسمنتية:

6-5-1- تأثير إضافة أكسيد الكالسيوم :

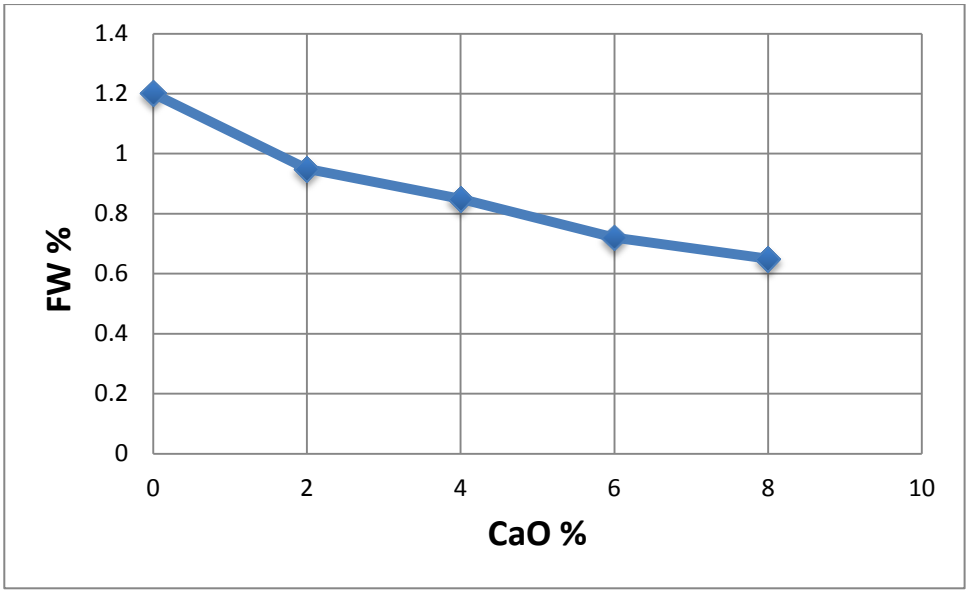
أولاً : تأثير إضافة أكسيد الكالسيوم على خواص الخلطة الإسمنتية:

في الجدول (4) نبين مواصفات الخلطة الإسمنتية المتوسعة (كثافتها , انتشارها, الفصل المائي, زمن الشك) و ذلك عند نسبة ماء/إسمنت (w/c = 0.5) .

الجدول (6-18) مواصفات الخلطة الإسمنتية المتوسعة

t_s دقيقة: ساعة	F_W %	F_{iy} Cm	ρ_{fc} gr/cm^3	CaO %
3:50	1.2	22	1.84	0
3:00	0.95	20	1.82	2
2:40	0.85	19	1.81	4
2.30	0.72	19	1.81	6
2:15	0.65	18	1.81	8

ويتضح من تحليل النتائج إن استبدال جزء من مسحوق الإسمنت بمادة أكسيد الكالسيوم مع الحفاظ على نسبة.(w/c=0.5) يؤدي إلى زيادة ثبوتية الخلطة الإسمنتية من خلال تناقص الفصل المائي (الماء الحر) للخلطة , كما أن ذلك مترافق مع تناقص سيولة (انتشار) الخلطة الإسمنتية وزمن بدء تصلبها (زمن الشك).



الشكل (6-14) تأثير إضافة أكسيد الكالسيوم على معدل تشكل الماء الحر

ثانياً : <u>تأثير إضافة أكسيد الكالسيوم على الخواص الميكانيكية للحجر الإسمنتي:</u>

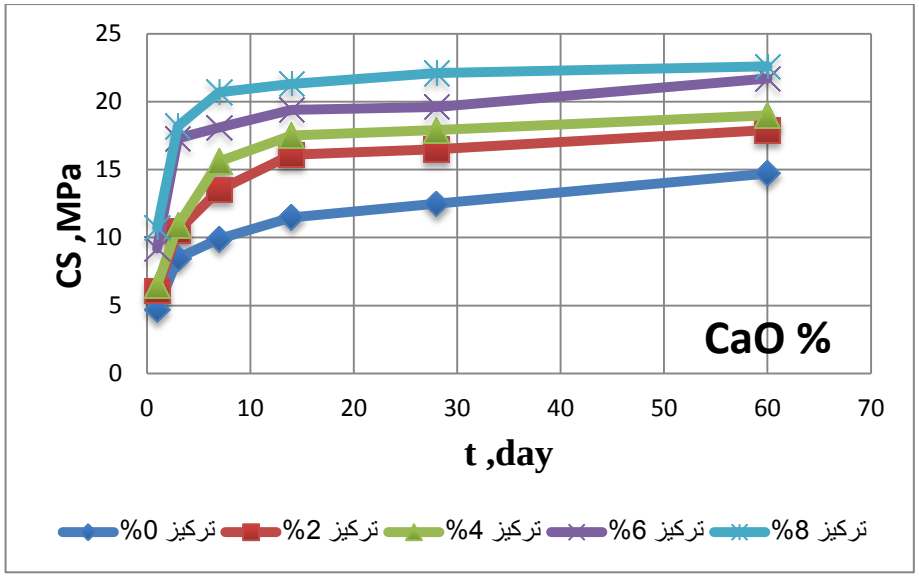
تأثير إضافة أكسيد الكالسيوم على مقاومة الحجر الإسمنتي للضغط:

في الجدول (6-19) نبين تأثير إضافة أكسيد الكالسيوم على حركة نمو متانة (مقاومة)الحجر الإسمنتي .

الجدول (6-19) تأثير إضافة أكسيد الكالسيوم على مقاومة الحجر الإسمنتي

60	28	14	7	3	1	t, day
CS , Mpa						CaO %
14.7	12.5	11.48	9.9	8.5	4.7	0
17.9	16.5	16.1	13.5	10.5	6.1	2
19.0	17.9	17.5	15.6	10.9	6.5	4
21.7	19.6	19.4	18.1	17.3	9.2	6
22.6	22.1	21.3	20.7	18.2	10.7	8

كما نبين بيانياً تأثير إضافة أكسيد الكالسيوم على مقاومة الحجر الإسمنتي ، حيث يتضح إن استبدال جزء من مسحوق الإسمنت بمادة أكسيد الكالسيوم يؤثر إيجاباً على المتانة الانضغاطية للحجر المتشكل ، وذلك عند كافة نسب الإضافة ، ولكن معدل تزايد مقاومة الحجر الإسمنتي للضغط ينخفض مع ازدياد نسبة أكسيد الكالسيوم وأفضل النتائج تم الحصول عليها عند إضافة أكسيد الكالسيوم بنسبة تصل إلى 6% وزناً حيث تضاعفت المتانة المبكرة بنسبة (2-2.3)مرة واستمرت بعد شهرين أكبر ب1.5 مرة .



الشكل (6–15) تأثير إضافة أكسيد الكالسيوم على مقاومةالحجر الإسمنتي

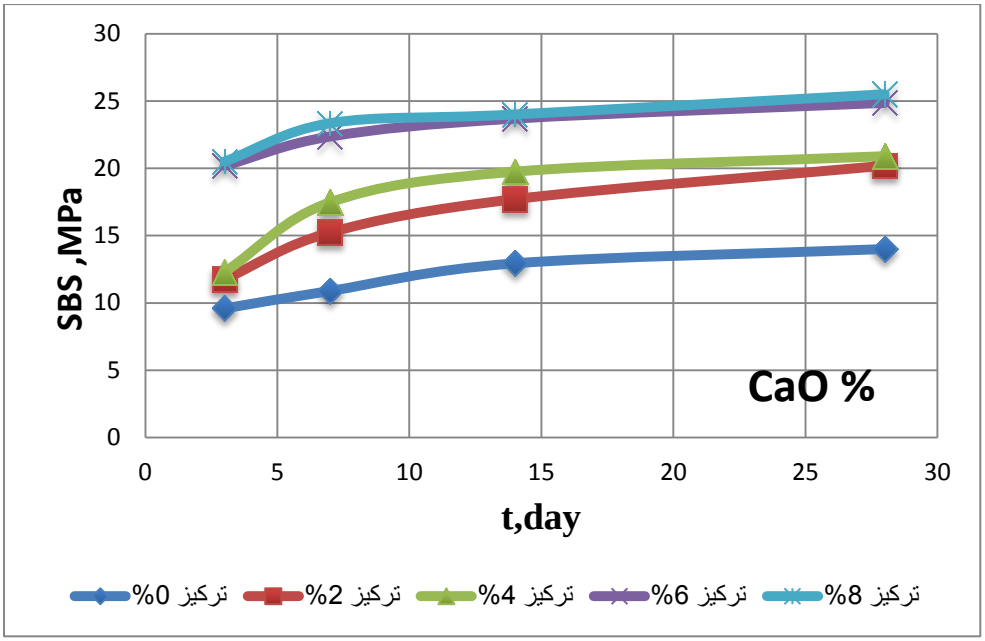
تأثير إضافة أكسيد الكالسيوم على متانة التصاق الحجر الإسمنتي مع معدن مواسير التغليف :

ندرج في الجدول (6-20) نتائج دراسة تأثير إضافة أكسيد الكالسيوم على متانة التصاق الحجر الإسمنتي مع معدن مواسير التغليف .

الجدول (6-20) تأثير إضافة أكسيد الكالسيوم على متانة الإلتصاق للحجر الإسمنتي مع مواسير التغليف

28	14	7	3	t, day
SBS , Mpa				CaO %
14.00	12.94	10.89	9.59	0
20.19	17.71	15.23	11.76	2
20.90	19.75	17.47	12.29	4
24.86	23.69	22.36	20.19	6
25.50	24.00	23.35	20.5	8

ونبين على الشكل (6–16) تأثير إضافة أكسيد الكالسيوم على متانة التصاق الحجر الإسمنتي مع معدن مواسير التغليف ، حيث يتضح أيضاً أن استبدال جزء من مسحوق الإسمنت بمادة أكسيد الكالسيوم يؤثر إيجاباً على متانة التصاق الحجر الإسمنتي المتشكل ، وذلك عند كافة نسب الإضافة ولكن معدل تزايد متانة الالتصاق تقل عند إضافة أكسيد الكالسيوم بنسبة أكبر من6% وزناً .



الشكل (6-16) تأثير إضافة أكسيد الكالسيوم على متانة الالتصاق للحجر الإسمنتي مع مواسير التغليف.

ويتضح من الشكلين(6-15) و(6-16) وجود ارتباط بين متانة التصاق الحجر الإسمنتي المتصلب مع المعدن وبين متانته (مقاومته للضغط) وهذا التطابق منطقي حيث أن المعدن يصبح جزءاً من الحجر الإسمنتي المتصلب ويحد من تطور عملية التوسع إلى قيمة قريبة من قيمة متانته تحت الضغط .

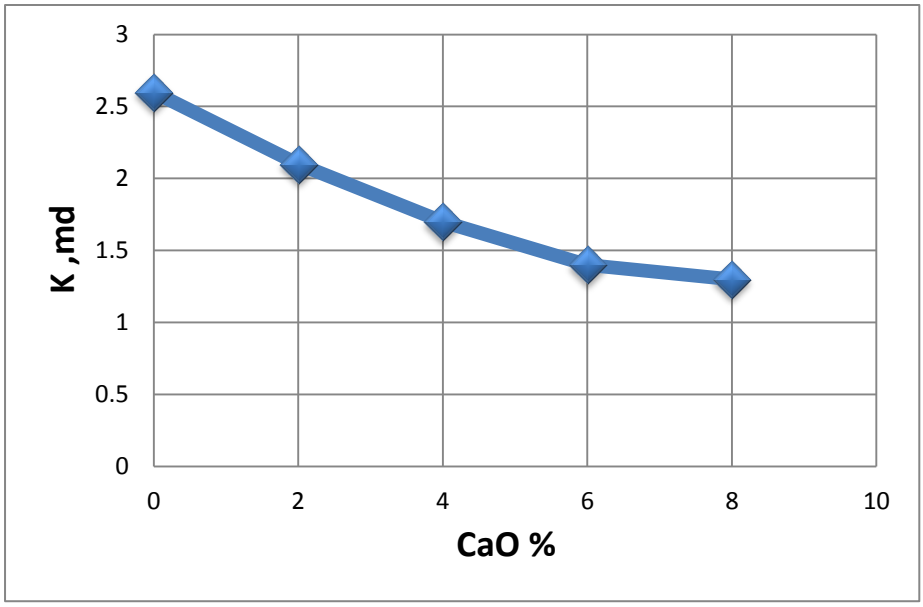
تأثير إضافة أكسيد الكالسيوم على نفاذية الحجر الإسمنتي :

في الجدول (6-21) نبين تأثير إضافة أكسيد الكالسيوم على نفاذية الحجر الإسمنتي .

الجدول (6-21) تأثير إضافة أكسيد الكالسيوم على نفاذية الحجر الإسمنتي

K (md)	Q (cm^3/s)	L (cm)	Cao %	N°
2.6	0.238	3.04	0	1
2.1	0.192	3.02	2	2
1.7	0.157	3.05	4	3
1.4	0.13	3.05	6	4
1.3	0.115	3.05	8	5

ونبين على الشكل (6-17) بيانياً تأثير إضافة أكسيد الكالسيوم على نفاذية الحجر الإسمنتي حيث يتضح كذلك أن استبدال جزء من مسحوق الإسمنت بمادة أكسيد الكالسيوم يؤثر إيجاباً على نفاذيةالحجر الإسمنتي المتشكل, وذلك عند كافة نسب الإضافة حيث تتناقص النفوذية مع زيادة تركيز أكسيد الكالسيوم .



الشكل (6-17) تأثير إضافة أكسيد الكالسيوم على نفوذية الحجر الإسمنتي

6-6- مناقشة النتائج وصياغة المقترحات :

أولاً: من خلال دراسة تأثير الإضافات الموسعة على خواص الخلطة الإسمنتية والحجر الإسمنتي الناتج عنها يمكن أن نلاحظ مايلي:

1-إن استبدال جزء من مسحوق الإسمنت بمادة أكسيد الكالسيوم يؤثر إيجابا على الخواص الميكانيكية للحجر الإسمنت المتشكل , حيث تزداد قيم المتانة للحجر الإسمنتي المتشكل وكذلك تزداد قيم متانة التصاق الحجر الإسمنتي مع مواسير التغليف ، وذلك بالمقارنة مع عينات الإسمنت الخالية من أيٍّ من هذه الإضافات, ولكن معدل تزايد هذه الخواص الميكانيكية يقل عند نسب الإضافة الأكبر من 6% لأكسيد الكالسيوم. ,كما يتضح أن استبدال مسحوق الإسمنت بماد أكسيد الكالسيوم يؤدي إلى نقصان نفوذية الحجر الإسمنتي وذلك عند جميع نسب الإضافة لأكسيد الكالسيوم (وذلك بالمقارنة مع عينات الإسمنت الخالية من أيٍّ من هذه الإضافات) .

2- من خلال تحليل دراسة تأثير إضافة أكسيد الكالسيوم إلى إسمنت تبطين الآبار ، اتضح أن زيادة نسبة أكسيد الكالسيوم إلى أكثر من 6% ، لا يؤثر كثيراً على معدل زيادة متانة الحجر الإسمنتي المتشكل أو على معدل زيادة متانة التصاق الحجر الإسمنتي مع مواسير التغليف. ،كما أن استخدام هذه الإضافات سوف يؤدي إلى نقصان كبير في نفوذية الحجر الإسمنتي بالمقارنة مع عينات الإسمنت الخالية من أيٍّ من هذه الإضافات .

لذلك **نقترح** استبدال مسحوق الإسمنت بمادة أكسيد الكالسيوم بنسبة (4%-6%) (وزنا") ، حيث أن ذلك سوف يؤدي إلى تحسين الخواص الميكانيكية للحجر الإسمنتي المتصلب وذلك من خلال:

- نقصان كبير في نفوذية الحجر الإسمنتي.
- زيادة المتانة الإنضغاطية للحجر الإسمنتي ومتانة إلتصاق الحجر الإسمنتي مع مواسير التغليف

المصطلحات المستخدمة في البحث (NOMENCLATURE)

الاختصار	المصطلح باللغة الإنكليزية	المصطلح باللغة العربية
BWOC%	Percentage by weight of cement	(% من وزن الإسمنت)
BWOW%	Percentage by weight of water	(% من وزن الماء)
CaO%	CaO (BWOC)	النسبة المئوية الوزنية(CaO /الاسمنت)
W/C	mix water (BWOC)%	النسبة المئوية الوزنية (ماء /اسمنت)
W/C	Cement-to-water ratio	
WCR	Water cement ratio	
W/S	Solids-to-water ratio	نسبة الماء إلى الجزء الصلب
fc_{ρ}	Slurry density	كثافة الخلطة الإسمنتية
F_{iy}	Fluidity	سيولة الخلطة الإسمنتية (خاصية الانتشار)
Fw	Free water	الماء الحر (الفاصل المائي)
t_{kg}	thickening time	زمن تكاثف الخلطة الإسمنتية
t_s	Setting time	زمن تصلب السائل الإسمنتي
C_S	Compressive strength	مقاومة الحجر الإسمنتي للضغط
SBS	Shear bond strength	متانة التصاق الحجر الإسمنتي
K	Sample permeability	نفوذية العينة الاسمنتية
L	Sample Length	طول العينة الاسمنتية
D	Sample Diameter	قطر العينة الاسمنتية
Q	Gas flow rate	معدل تدفق الغاز

المراجع

1-باللغة الإنكليزية

1. AASHTOM85, " **Specification for Portland and Cement**
2. API Standard, **"10A Specification for Cements and Materials for Well Cementing"**, 22nd, Edition2000 , American Petroleum Institute ,Washington .
3. **Basic and advanced cement** 2010 ,sr.descengineer,cementing.
4. **"Case Studies Of Expanding Cement to Prevent Micro annular Formation "** , C. Baumgrate , M .Thiercelin , SPE ,& D .Kluas, Schlumberger Dowell 3-6October,Hoston,Texas,1999.
5. **"Cement additives specialty products**" , company web master , December 2004.
6. **Cement Expansion**", A Laboratory Investigation, Moram , L.K. Murray,T.R,Moyer,W.R.,Conocoinc.7-9,April , 1991,Oklahoma city , Oklahoma .
7. **Cement Manufacturing** , Economics census, October 1999.
8. **Cement standard and Specificating**,PortlandCement Association , 2008.
9. **Cementing additives 231M104**, Dowell Schlumberger 2003
10. -Cementing, petroskills LLC,2010
11. **"Chemistry and Technology of Special Cement "** , Edited by I.V Kravchenk-M , Stroyizdate , 1979,-208 p.
12. Chenevert ,M.E, and Shreshta, "**Shrinkage properties of Cement paper SPE"**,16654-1987.
13. **Systems ,**Well CementingDowell Schlumberger,7-1 – 7-6.
14. " **Expansion – Contraction Cycles For Cement Optimized as a Function Of additives"** , TalabaniSoran , Hareland , Geir, New Mexico Institute of Minning& Technology , 2-4 April 1995, Oklahoma .
15. H.R.,**well engineering and construction** ,2000
16. History " **Cement Manufacture and Cement Types**", CEEN5305, Dr. Fransisco / Aguiniga , Texas A&M university-Kingsvill,pp-3.
17. **"Specification for Cements and Materials for Well Cementing"**, API Specification, 23nd,edition , April 2002.
18. "**Theories of Expansion in Sulfa aluminates Type Expansion Cements "** , 24 March , 1983 , J. Skalny .
19. **"Types Cement additives Cement "** , World Oil Magazine,2004

2- باللغة العربية

20–أ, بولاتوف, 1987 **مواد التبطين وتكنولوجيا سمنتة الآبار)**.الطبعة الأولى, دار مير للطباعة والنشر موسكو صفحة 725

21–دانيوشيفسكي ف.س1987.**الدليل المرشد في مواد التبطين (باللغة الروسية**) دار مير للطباعة والنشر موسكو صفحة .

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

23– نصور ,طاهر 1993-1992**هندسة حفر 2**– منشورات جامعة البعث