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

الجامعة السورية الخاصة
SYRIAN PRIVATE UNIVERSITY

دراسة إمكانية استخدام الخلائط الاسمنتية الرغوية في الحقول السورية

دراسة أُعدت لنيل درجة الإجازة في هندسة البترول

اعداد

خمري عبد الله الموسى علي محمد سالم

إشراف

الدكتور المهندس

يوسف فرج

العام الدراسي 2025-2026 م

الفهرس

الموضوع الصفحة

المقدمة.....4

الفصل الأول: الإسمنت البورتلاندي.....5

مقدمة.....5

صناعة الإسمنت البورتلاندي.....5

تصنيف إسمنت آبار النفط والغاز.....12

الفصل الثاني: إضافات إسمنت آبار النفط والغاز.....18

2-1 مقدمة..... 18

2-2 منظم الكثافة 18

2-3 الإضافات المقللة للكثافة..... 19

2-4 المرققات (مقللات اللزوجة أو الاحتكاك) 20

2-5 مسرعات التصلب..... 20

2-6 مبطئات (مؤخرات) تصلب الإسمنت..... 20

2-7 ضبط فاقد الرشح (الإضافات المنظمة لفاقد الرشح) 20

2-8 إضافات الماء الحر..... 21

2-9 إضافات معالجة التهريب..... 21

2-10الإضافات الخاصة..... 21

الفصل الثالث: سمنتة آبار النفط.....23

3-1 أهداف السمنتة.....23

3-1-1 أنواع عمليات السمنتة..... 24

3-2 آلية السمنتة..... 24

3-3 طرق السمنتة..... 26

3-4 خواص السائل الإسمنتي والحجر الإسمنتي..... 29

3-4-1 خواص السائل الإسمنتي..... 29

3-4-2 خواص الحجر الإسمنتي..... 33

3-5 العوامل التي تؤثر على عملية السمنتة..... 36

الفصل الرابع: الخلائط الإسمنتية المخففة 43

4-1مقدمة.....43

4-1-1 استخدام الخلائط الإسمنتية المخففة..... 45

4-1-2 الإضافات المخففة للوزن النوعي..... 45

4-2 الخلائط الإسمنتية المحضرة باستخدام الغضار(البنتونايت)..... 46

4-3 الخلائط الإسمنتية المحضرة باستخدام سيليكات الصوديوم..... 48

4-4 الخلائط الإسمنتية المحضرة باستخدام البوزولان..... 48

4-5 الخلائط الإسمنتية المحضرة باستخدام البرليت المدد..... 50

4-6 الخلائط الإسمنتية المحضرة باستخدام الغيلسونايت..... 50

4-7 الخلائط الإسمنتية المحضرة باستخدام مسحوق الفحم..... 50

4-8 الخلائط الإسمنتية المحضرة باستخدام الميكروسفير (الكريات الميكروية) 51

الفصل الخامس: السمنتة الرغوية.....52

5-1 مجالات استخدام السوائل الإسمنتية الرغوية..... 52

5-2 المواد المستخدمة في تحضير السوائل الإسمنتية الرغوية..... 52

5-3 خواص الخلائط الإسمنتية الرغوية..... 53

4-5 المعدات المستخدمة في عملية السمنتة الرغوية..... 55
5-5 -تكنولوجيا سمنتة الآبار باستخدام الخلائط الإسمنتية الرغوية..... 57
6-5 حسابات عملية السمنتة الرغوية 62
الفصل السادس: دراسة إمكانية استخدام الخلائط الإسمنتية الرغوية في الحقول السورية...68
1-6 مقدمة..... 68
2-6 هدف الدراسة..... 68
3-6 تقييم الواقع الحقلي لبعض الآبار في السلسلة التدمرية.....68
4-6 حساب عمليات السمنتة الرغوية لبعض الآبار في حقول المنطقة الوسطى..... 69
5-6 مناقشة النتائج وصياغة المقترحات..... 73
المراجع العلمية.....74

المقدمة

إن حفر الآبار يشكل حجر الأساس للصناعة النفطية ولكثير من الصناعات وعليه تعتمد النتيجة النهائية لها. والجدوى الاقتصادية للصناعة النفطية تتبع بشكل كبير لجودة إنجاز هذه الآبار وتعتبر عمليتا التغليف والسمنتة من أهم العمليات المقررة لجودة إنجاز البئر النفطية أو الغازية، كعملتين أساسيتين متكاملتين مسؤولتين عن العمر الفعلي للبئر.

حيث أنه مع ازدياد أعماق الحفر تتفاقم مشكلة تهريب سائل الحفر، وبالتالي تهريب السائل الإسمنتي وذلك أثناء عزل الطبقات والتأثير السلبي على الطبقات المنتجة (ولاسيما الطبقات ذات المؤشرات الخزنية السيئة والضغط الطبقي المنخفض)، وفي هذه الحالات فإن السمنتة التقليدية (سواء باستخدام السوائل الإسمنتية ذات الكثافة العادية أو السوائل الإسمنتية المخففة) لن تعطي نتائج إيجابية بالشكل الذي يلبي المتطلبات المرجوة منها.

ومع استخدام تكنولوجيا السمنتة على مرحلتين قد حلت الكثير من المشاكل السابقة بشكل جزئي إضافة إلى التغلب على مشكلة عدم وصول السائل الإسمنتي إلى الارتفاعات المقررة خلف مواسير التغليف لكن هذه التكنولوجيا أصبحت لا تلبي جميع المتطلبات المرجوة منها في ظل وجود أساليب وطرق جديدة أقل كلفة دون الإساءة إلى الطبقات النفطية. ومن أهم هذه الأساليب استخدام خلائط إسمنتية مخففة جداً (خلائط إسمنتية رغوية) لسمنتة المجالات التي سببت مشاكل أثناء حفرها, ذات كثافة تساوي كثافة سائل الحفر الذي حفرت به أو أقل.

انطلاقاً من ذلك فإننا سنتناول في هذا المشروع دراسة إمكانية استخدام الخلائط الإسمنتية الرغوية في الحقول السورية

تتضمن هذه الدراسة الفصول الآتية:

الفصل الأول: الإسمنت البورتلاندي. ويتضمن مراحل صناعة الإسمنت البورتلاندي، تصنيف إسمنت آبار النفط والغاز تبعاً لتصنيف معهد البترول الأمريكي.

الفصل الثاني: 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.

الفصل الثالث: استعرضنا عمليات وسمنتة آبار النفط والغاز، بالإضافة إلى المعدات المستخدمة في عمليات السمنتة، وخواص السائل الإسمنتي والحجر الإسمنتي، والأجهزة المستخدمة في تحديد خواصهما، وفي نهاية الفصل تمت دراسة العوامل التي تؤثر على نجاح عمليات السمنتة.

الفصل الرابع: استعرضنا الخلائط الإسمنتية المخففة وميزاتها، بالإضافة إلى الطرق المتبعة في تقليل كثافة الخلائط الإسمنتية المخففة.

الفصل الخامس: يتضمن دراسة الخلائط الإسمنتية الرغوية (مجالات استخدامها- أهم مكوناتها- مواصفاتها المميزة)، المعدات المستخدمة في عملية السمنتة الرغوية، احتمالات التكنولوجية الممكنة لتحضيرها، والعلاقات الرياضية الضرورية لإجراء حسابات عملية السمنتة الرغوية .

الفصل السادس: وهو القسم العملي في هذه الدراسة، حيث تمت دراسة إمكانية استخدام الخلائط الإسمنتية الرغوية في الحقول السورية. وقد تم اختيار عدة آبار من حقول المنطقة الوسطى حيث أنجزت الحسابات الضرورية لإجراء عملية السمنتة.

وفي ختام الدراسة قمنا بصياغة مناسبة لأهم النتائج المستخلصة وما نجده مناسباً كمقترحات تطبيقية نرى فيها الفائدة للتطبيق العملي.

ونأمل أن نكون قد وفقنا في تحقيق بعض من الهدف، الذي يعتبر تحقيقه مرتبط إلى حد كبير بالتطبيق الحقلي الفعلي على البئر مباشرة، وعسى أن نحقق الفائدة المرجوة لتعود بالخير على وطننا الحبيب.

الفصل الأول
الإسمنت البورتلاندي
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 (حسب تعريف ASTM C129)[1,4] .
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 [4,10] :

يوجد ثلاث مراحل رئيسية لإنتاج الإسمنت البورتلاندي:

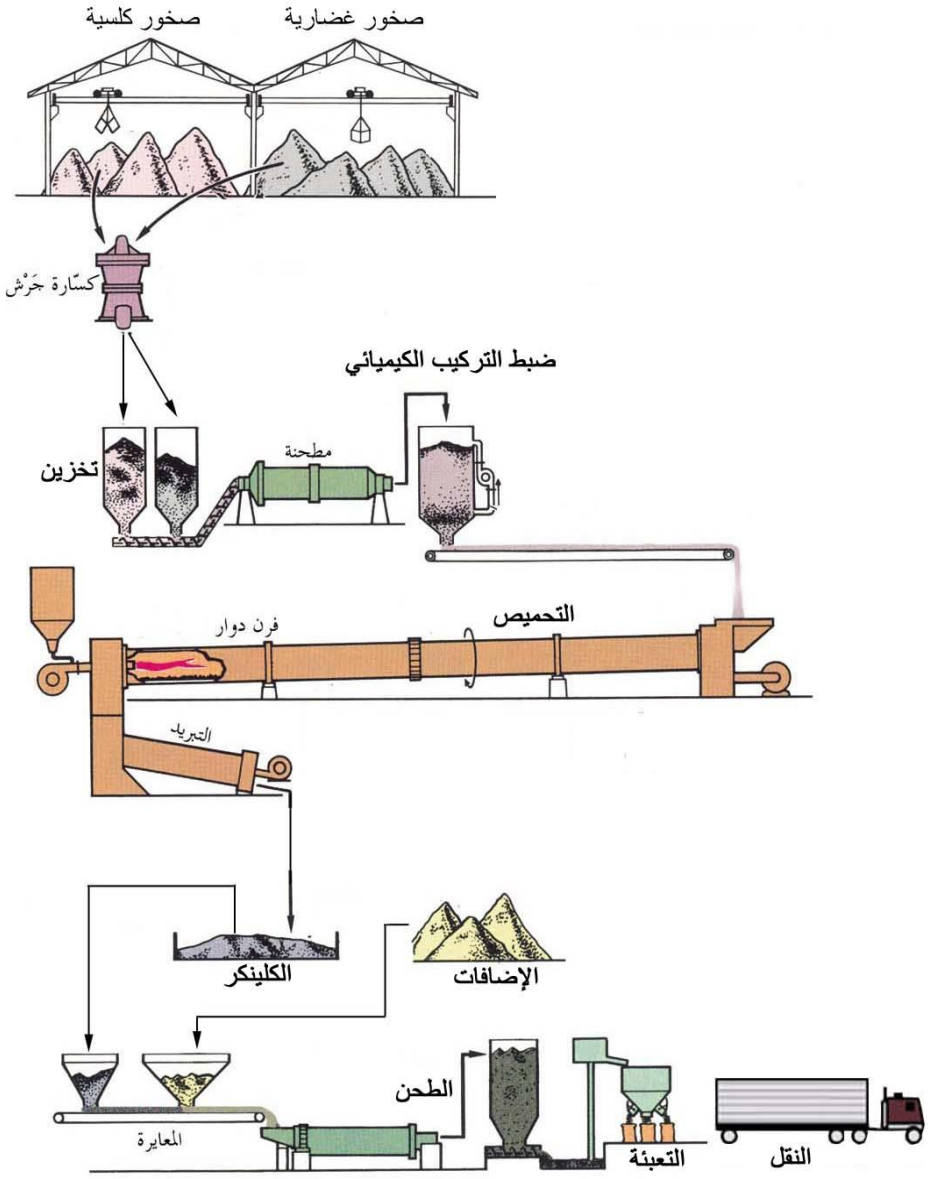
1- تحضير المواد الخام .
2- إنتاج (تشكيل) الكلينكر .
3- تحضير الإسمنت .

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

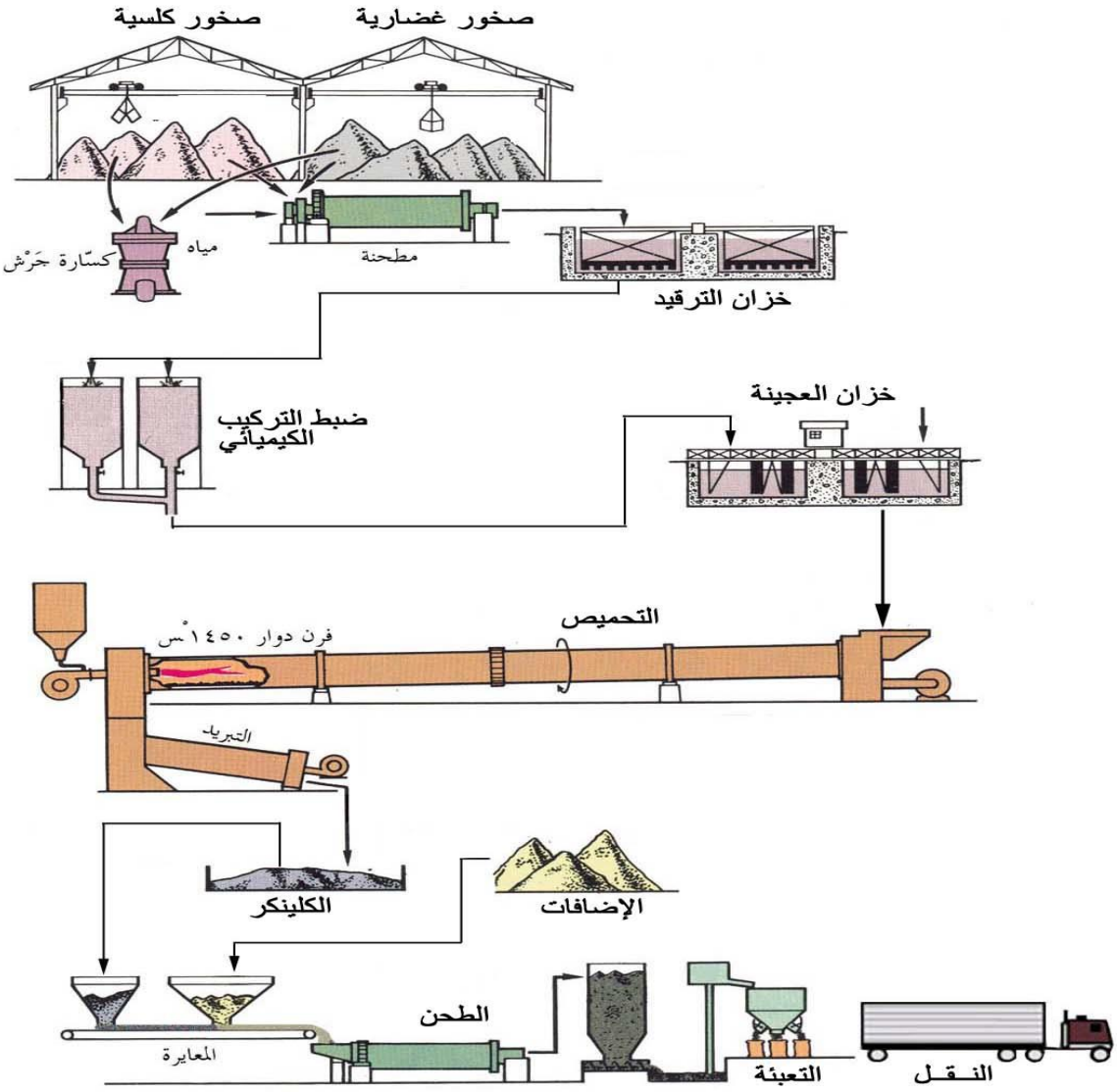
تستخرج الصخور الكلسية و الغضارية من المقالع أو المناجم (quarries or mines) وتنقل إلى مخازن مصانع الإسمنت أو إلى وحدات الإسمنت (Cement plant) حيث تتعرض لعملية تكسير أولي (تحول إلى أحجار صغيرة بقطر أعظمي 6 inches) ثم بعد ذلك تتعرض لعملية تكسير ثانية (Secondary Crushers) أو طحن بالطرق (hammer mills)، وذلك 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 1-1) 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.



الشكل (1-1) صناعة الإسمنت بالطريقة الجافة

أما في **<u>الطريقة الرطبة (Wet Process)</u>**) لتصنيع الإسمنت الشكل (1-2) 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 (1-2) 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 [10].

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 :

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

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

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

1-2-2- 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 الفرن (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 لكربونات لكالسيوم 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،

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، كما أن الغازات الحارة تستخدم أيضاً كمجففات عند مرحلة تحضير المواد الخام. وفي الجدول (1-1) نبين خواص المركبات الكيميائية الرئيسية التي يتكون منها.

الجدول (1-1): 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 الألومينياتي	الطور الحديدي
الشوارد المتحدة (كشوائب)	Mg, Al, Fe	القلويات ,Al 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)[10]

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) (32-36 °F/min) (20 °C/min):

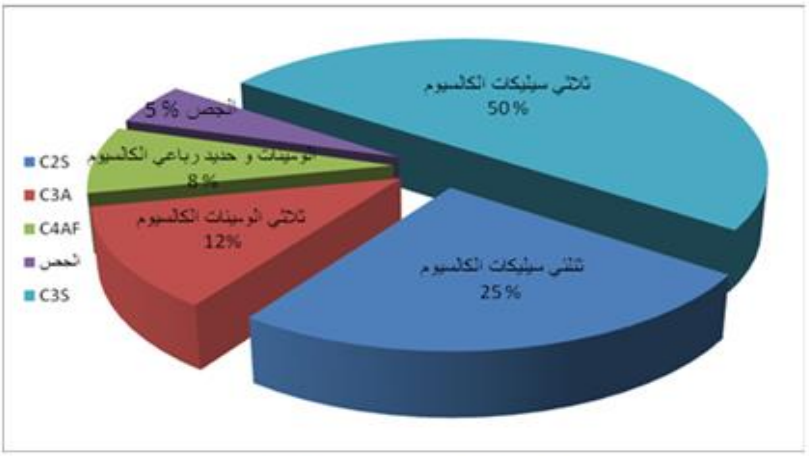
- معدل تبريد بطيء(Slow cooling rate) : ويتم ذلك بمعدل ((7-9 °C/min) حيث أن التبريد البطيء يسمح ببلورة مركبات الكلينكر، وهذا ما يؤمن قابلية أفضل للطحن، وبالنهاية ينتج إسمنت ليس له فعالية هيدروليكية أو أن فعاليته الهيدروليكية قليلة، كما أن الإسمنت المتصلب سوف يظهر مضغوطية مبكرة عالية مع الزمن، ولكن المقاومة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

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

أوما 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 الكلينكروذلك 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 (Supplementary cementation 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[7] فالاختبار 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(1-2) نبين تركيب الإسمنت وخواصه



الشكل(1-4) النسب المئوية لمكونات الاسمنت

الرمز المختصر ID Trade	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%
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) [10].

- ❖ 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).

- **تخزين وتوزيع الإسمنت (Cement Storage & distribution)**:

بعد عملية الطحن فإن الإسمنت يحول عن طريق سير ناقل أو مضخات المسحوق (Powder pump) إلى صوامع تخزين كبيرة عازلة للهواء 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 أنهيدريت ، 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 .

1-3- 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)

1-3-1-تصنيف الإسمنت وفق معهد البترول الأمريكي(API Classification)[1,4]

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 (O - MSR , HSR). وفي الجدول (1-3) نبين مواصفات إسمنت آبار النفط والغاز حسبAPI .

الجدول (1-3) 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 (Ordinary grade) (OSR)
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) .
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 . أما الأنواع G و H هما من أكثر أنواع الإسمنت انتشاراً في حقول النفط وفي الجدول (1-4) نبين المتطلبات الكيميائية و الفيزيائية لإسمنت الصنف

الجدول (1-4) 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 الاحتراق , 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
محتوى الماء الحر .حد أعظمي %	5.8	3.9
المتانة الانضغاطية (MPa) (8 ساعات) في الدرجة 38 °C	2.1	3.5
المتانة الانضغاطية (MPa) (8 ساعات) في الدرجة 60 °C	10.3	15.0
التماسكية العظمى	30.0	10.0
زمن التصلب , حد أدنى (بالدقائق)	90-120	110

وفي الجدول (1-5) نبين المتطلبات الكيميائية لإسمنت آبار النفط حسب (API specification 10A/ ISO 10426)[7]

الجدول (1-5) المتطلبات الكيميائية لإسمنت آبار النفط حسب-API specification 10A/ ISO 10426

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 الاحتراق , 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 %
48[b]	48[b]	NR	NR	NR	NA	سيليكات ثلاثية الكالسيوم (C_3S) — كحدأدنى %
3[b]	3[b]	3[b]	3[b]	3[b]	NA	ألومينات ثلاثية الكالسيوم (C_3A), كحد أقصى %
24[b]	24[b]	24[b]	24[b]	24[b]	NA	كالسيوم رباعي الحديد و الألمنيوم (C_4AF) مع ألومينات ثلاثية الكالسيوم(C_3A) المضاعفة, كحد أقصى
0.75[c]	0.75[c]	NR	NR	NR	NA	المحتوى الكلي للقلويات معبر عنه بأكسيد الصوديوم المكافئ (NO_2) , كحد أقصى %

NR= not required , NA = not applicable

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

صنف الإسمنت						
H	G	D,E, F	C	B	A	

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

وفي الجدول (1-6) نبين ملخص للمتطلبات الفيزيائية و العملية حسب API specification 10A/ ISO 10426-1:2000 :

الجدول (1-6)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)		

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 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	
								ضغط العينة النهائي Mpa(Psi)	درجة حرارة العينة النهائية °C (°F)	رقم الجدول 6	اختبار متانة الإنضغاطية
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 (15- 30 دقيقة لحظة المزج) Bc[a]	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) ،.
not required = NR

الفصل الثاني
إضافات إسمنت آبار النفط والغاز
Additives for oil and gas wells cement

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 إلى درجة حرارة أكبر من ^{o}F 700 ($350C^{o}$)، . كما تصادف ضغوط تتراوح من الضغط الجوي في الآبار الضحلة ، إلى ضغوط أكثر من (21Mpa) 30000 Psi 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.

ويمكن أن تصنف هذه الإضافات إلى [1,4, 10]:

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.

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.

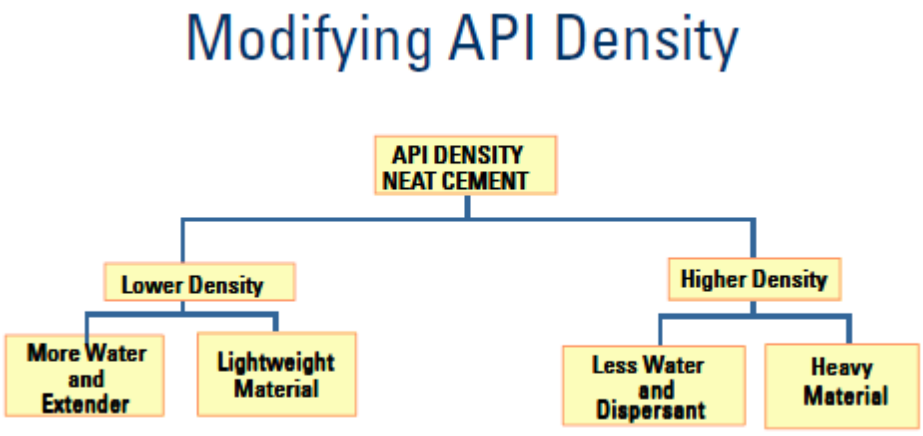
الجدول (2-1) الخصائص الفيزيائية لبض أنواع مثقلات الخلطات الإسمنتية

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

2-3-إضافات مقللة للكثافة(الباسطة) [3]:

(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 (2-1).



الشكل (2-1)- 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	

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. 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. 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.

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 .

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 والمسرعات هي عادةً أملاح غير عضوية ، يعتبر كلور الكالسيوم ($CaCl_2$ - صلب) من المسرعات السائدة الاستعمال في الصناعة النفطية، حيث يستخدم بتركيز (0-5 % BWOW) أوبتركيز(2-4 % BWOC) .

أيضا يعتبر(D044((NaCl من المسرعات الشائعة الاستخدام 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 .

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 ، 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 مثل حمض ألكيلنالفوسفونيك وكلور الصوديوم NaCl بتركيز أكبر من(18%BOWO).

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

إن الإضافات المنظمة لفاقد الرشح تستخدم للحفاظ على نسبة ثابتة للماء إلى الجزء الصلب في السائل الإسمنتي

إن مقللات فاقد الرشح هي مشتقات سيللوزية (D059 , D60, D112), حيث تعتبر مشتقات هيدروكسي إيتيل السيللوز (مثل CMHEC) من المقللات الشائعة لفاقد الرشح ، حيث أن

جزئيات بوليمير هيدروكسي إيتيل السيللوز(HEC) تقيد حركة المائع، وتمنعه من التسرب بحرية، وهذا الضياع للماء الحر يؤدي إلى زيادة في لزوجة السائل الإسمنتي.

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

تستخدم إضافات منع الترسب (Anti settling agents) و ذلك كي تعطينا لزوجة كافية للحفاظ على تماسكيه السائل الإسمنتي (slurry consistency),كما أن إضافات منع الترسب تؤدي إلى إنقاص الماء الحر, يعتبر البنتونايت و المشتقات السيللوزية (HEC) من الإضافات الشائعة الاستخدام لترميم هذه اللزوجة) . كما يستخدم عامل منع الترسب D135بتركيز(0.1-1.5%BWOC)ومواد منع ترسب سائلة مثل(D162(:0.005-0.025 gal/ sk .

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 المواد تضاف 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 (2-3) نبين خواص الإضافات المستخدمة في معالجة تهريب السائل الإسمنتي و تطبيقاتها.

2-10- الإضافات الخاصة (Specialty additives)[10] :

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

ينكمش الإسمنت البورتلاندي بحدود (% 4-2)، 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 expands)، 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 .

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)[3]:

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) ، حيث يزداد تراجع المقاومة بازدياد درجة الحرارة . عند درجة حرارة الأعلى من 230 °F تتحول هيدرات سيليكات الكالسيوم الهلامية C-S-Hgel(calcium silicate hydrate) الناتجة عن إماهة الإسمنت إلى α-هيدرات سيليكات ثاني الكالسيوم (α-C_2SH, α-Dicalcium silicate hydrate)، 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 السليكا يتم عند إضافة مسحوق سيليكافلور أو سيليكا رمل بنسبة BWOC 4%-30 إلى الإسمنت .

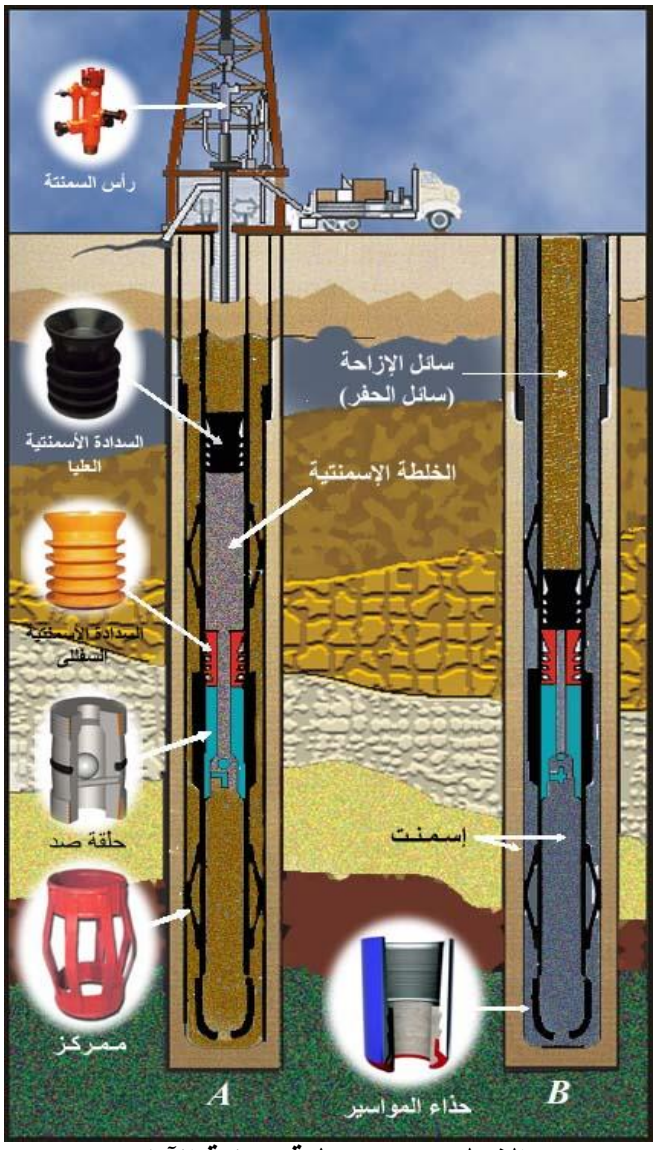
2-10-4-إضافات مانع الرغوة (Anti Foam additives)[3]:

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، ، لذلك فإن إضافات مانع الرغوة تستخدم للحصول 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.

يعتبر الغليكول بولي بروبلين من المواد الفعالة لمنع تشكل الرغوة (defoamer)، حيث يضاف بنسبة BWOW 0.05-0.1% وهي الأكثر شيوعا، وتضاف إلى ماء المزج قبل عملية المزج كما يستخدم بولي غليكول إيتر: بشكله الصلب (0.20 Lb/sk)D046, وشكله السائل(0.05-0.07 gal/sk)D047 .

الفصل الثالث
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 (3-1) يبين رسماً تخطيطياً لعملية سمنتة آبار النفط .



الشكل (3-1) عملية سمنتة الآبار

1-3- أهداف السمنتة (purposesforcementing)[1,10] :

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.
- منع 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.

1-1-3- أنواع العمليات الإسمنتية (Types of cementing operation)[1,4,10]:

- 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 الحل قي 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 أو الإصلاحية:secondary(or Remedial) cementing

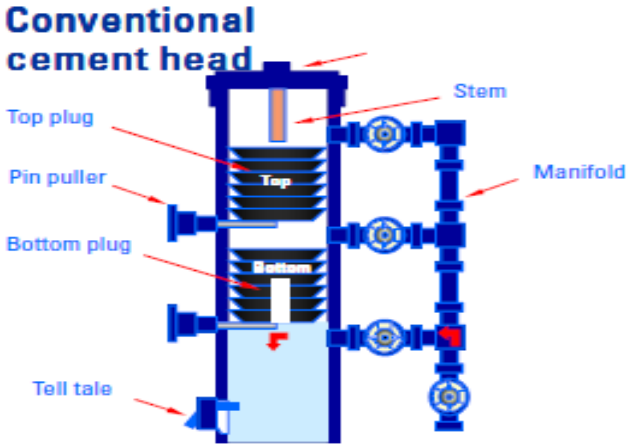
تستخدم السمنتة الثانوية لإغلاق الطبقات غير المنتجة، أو الطبقات المستنزفة، وكذلك لمعالجة مناطق تسرب سوائل الحفر، ولإصلاح التسرب في مواسير التغليف، وأحيانا لإصلاح عمليات السمنتة الأولية. ويحقن الإسمنت إما تحت الضغط (Squeeze job)، أو بعدم باستخدام ضغط ضخ كبير كما في إنشاء الجسور والسدادات الإسمنتية (Plug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

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 بعد ذلك يضخ السائل الإسمنتي بمضخة ثلاثية الشوط ذات طاقة كبيرة بضغط ضخ عالٍ داخل مواسير التغليف عبر رأس السمنتة Head cementing . ورأس السمنتة عبارة عن قطعة صغيرة من ماسورة التغليف بطول يتراوح بين("32-20") ، تنتهي من الأسفل

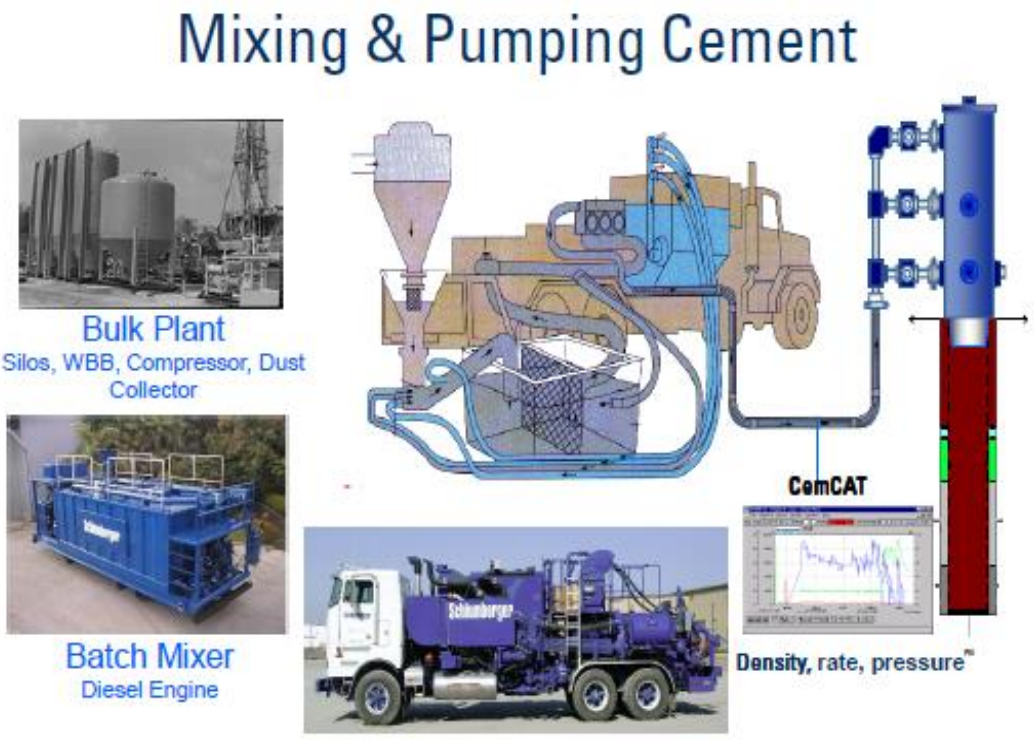
بشرار لربطها مع مواسير التغليف. كما يجهز رأس السمنتة بمجموعة من الخطوط **manifold** التي يتم من خلالها وصل مواسير التغليف مع وحدات ضخ الإسمنت **cement unit** **pumping** أو مع مضخات جهاز الحفر **rig pump** . ويحتوي رأس السمنتة على صماميّ تثبيت (**retainer valve two**) (وهو عبارة عن مسمار لولبي يحفظ الفواصل 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 :

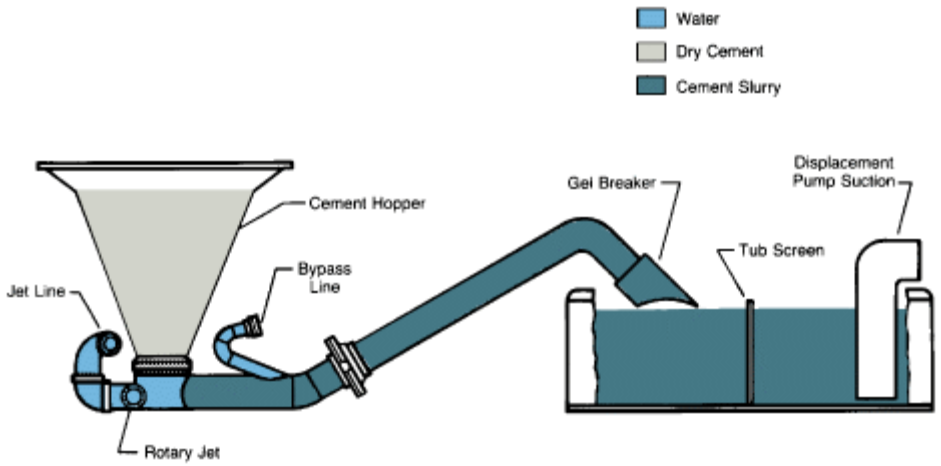
1. رأس سمنتة بفاصل إسمنتي واحد (single plug head): ويحتوي على صمام واحد لحفظ الفاصل .
2. رأس سمنتة بفاصلين إسمنتيين(double plug head) كما في الشكل (3-3).



الشكل (3-2): رأس السمنتة

وفي الشكل (3-3) نين المعدات المستخدمة في عملية السمنتة



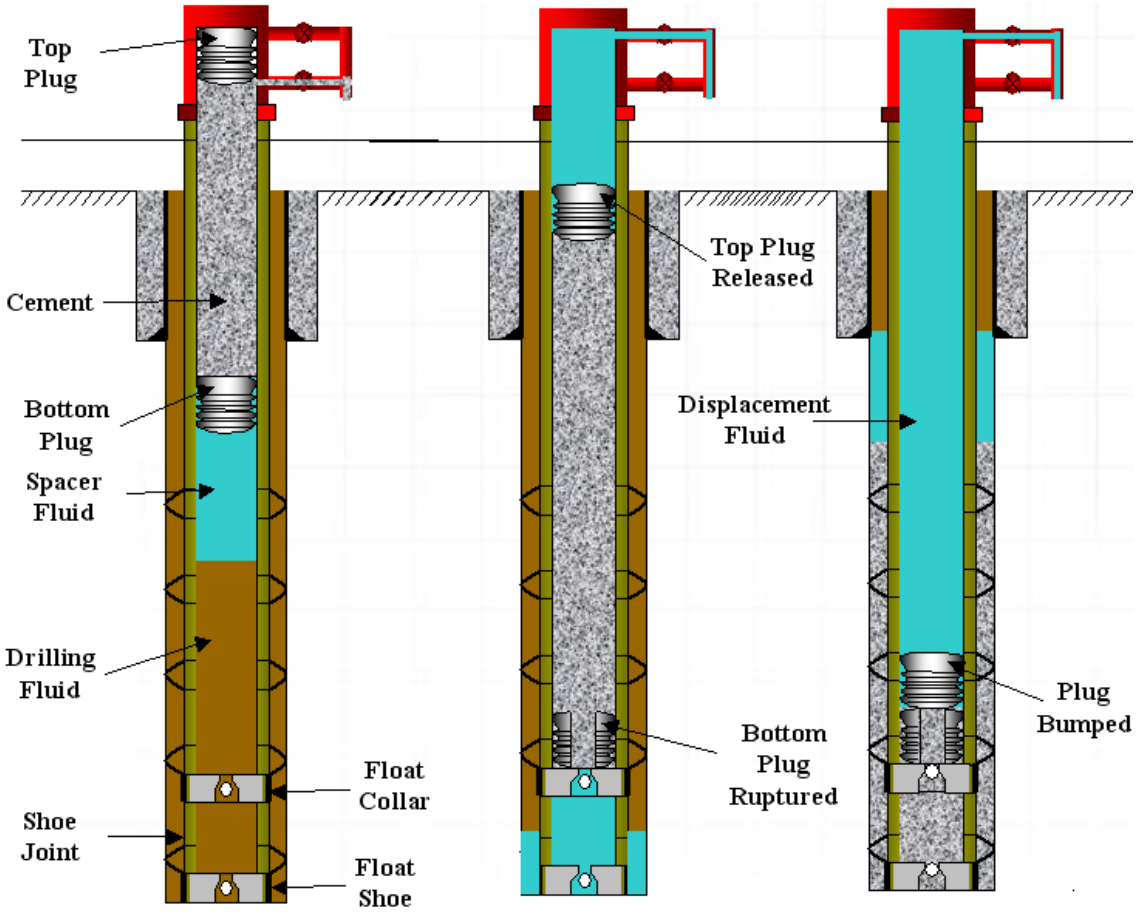


الشكل (3-3): المعدات المستخدمة في عملية السمنتة

3-3- طرق السمنتة (Method of cementing) [10]:

◆ **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 (3-4) 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 بالتموضع 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 (3-4): عملية السمنتة بمرحلة واحدة

◆ **السمنتة متعددة المراحلMulti-stage cementing) :**

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.

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

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

3-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.

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

5-عند سمنتة الطول الكامل لمواسير التغليف.

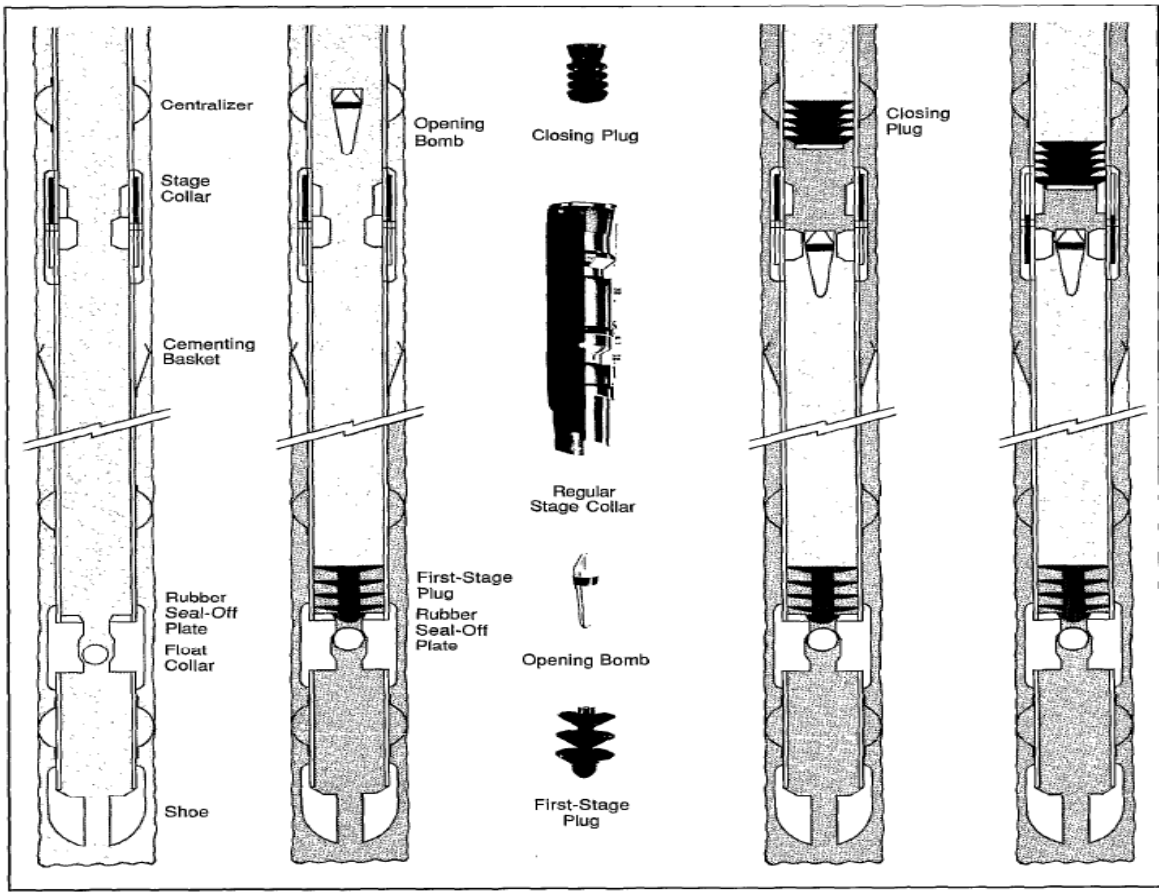
تتم عملية السمنتة على مرحلتين من خلال استخدام وصلة مثقبة تدعى الوصلة الإسمنتية Stage cementing collars)، التي يتم اختيار عمق تثبيتها اعتماداً على ارتفاع عمود السائل الإسمنتي، وعلى مقاومة الطبقات. يتم تثبيت وصلة السمنتة بمرحلتين على ارتفاع يتراوح بين (50-150)

m فوق الطبقة الضعيفة. 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 (3-5) مخطط عملية السمنتة على مرحلتين.



الشكل (3-5): 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.

3-4-خواص السائل الإسمنتي والحجر الإسمنتي :

Cement slurry and Set Cement Properties

3-4-1- خواص السائل الإسمنتي ,[10] :

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

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 تماسكيه 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 من3.5ml 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 صتف 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) .

تحدد كثافة السائل الإسمنتي بالنسبة الصغرى والعظمى (ماء / إسمنت) المسموح بها حسب قياس API. 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

أما السائل الإسمنتي ذو الكثافة العالية فيستخدم في الطبقات ذات الضغوط الطبقية العالية، أو الطبقات القابلة للتهدم 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)[1,10]**

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– مقاومة الانضغاط- 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 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 تماسكيه 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:

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

حيث أن Q_{30}: حجم فاقد الرشح بعد $30min/cm^3$
Q_t: حجم فاقد الرشح بعد الزمن t (cm^3).
إن 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).
يستخدم البنتونايت للتحكم بفاقد الرشح عندما يتطلب استخدام سائل إسمنتي بكثافة قليلة.

- **زمن تكاثف السائل الإسمنتي (زمن التثخن) (Thickening time) [10]:**

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 تماسكيه 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 ولكن تعتبر(70Bc) في الواقع أو بشكل أساسي كقيمة للزوجة العظمى القابلة للضخ .

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:

$$Tm = V_c/V_m = V_c/sacks/min \qquad (2\text{-}3)$$

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

زمن التحضير على السطح Ts: وهو الزمن 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:

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

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.

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 rpm)، 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 تماسكيه السائل الإسمنتي. وفي الجدول (2-3) نبين المتطلبات المقبولة لزمن تثخين السائل الإسمنتي.

الجدول (3-2): المتطلبات المقبولة لزمن تثخين السائل الإسمنتي

الصنف	زمن التثخين الأصغري min	زمن التثخين الأعظمي Min
A	90	NR
B	90	NR
C	90	NR
D	90	NR
	100	NR
E	100	NR
	154	NR
F	100	NR
	190	NR
G	90	120
H	90	120

- **الماء الحر (الثبوتية) ((Free Water (Stability) :**

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 .

- **سيولة السائل الإسمنتي أو خاصية الانتشار(Fluidity of the slurry):**

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 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[10].

وفي الشكل (3-6) نبين جهاز تحديد سيولة السائل الإسمنتي.



الشكل (3-6): جهاز تحديد سيولة السائل الإسمنتي.

3-4-2- خواص الحجر الإسمنتي (Set Cement Properties):

1- متانة الحجر الإسمنتي (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 .

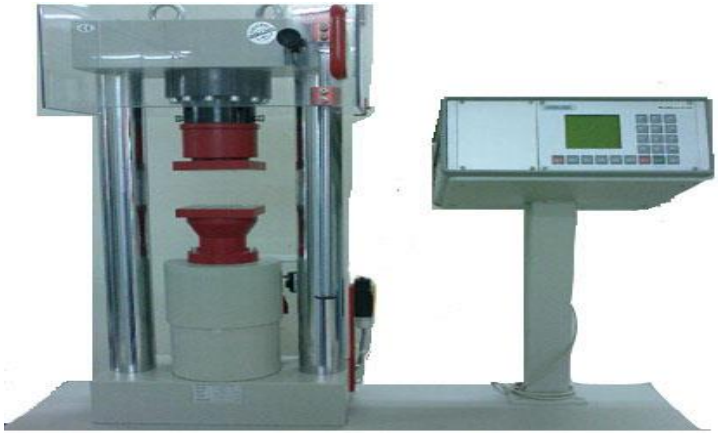
من الناحية الهندسية يجب تحديد المقاومة التي يبلغها الإسمنت المتصلب ليكون قادراً على أداء المهام الآتية :

- 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 شاقوليه 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 (3-7) يبين جهاز تحديد مقاومة انضغاط النموذج. وفي الجدول (3-4) نبين القيم الدنيا لمتانة الانضغاط عند زمن معين، وذلك تبعاً لكل صنف من أصناف الإسمنت [1,4].

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

صنف الإسمنت	درجة الحرارة النهائية للمعالجة		الضغط النهائي للمعالجة		القيمة الدنيا للمتانة الانضغاطية عند زمن معين			
					8 h ± 15 min		24 h ± 15 min	
	°C	°F	Mpa	PS	Mpa	PSi	Mpa	PSi
A	38	100	atm .	—	1.4	200	12.4	1800
B	38	100	atm .	—	2.1	300	10.3	1500
C	38	100	atm .	—	3.4	500	13.8	2000
D	77	170	20.7	30	NR		6.9	1000
	110	230	20.7	30	3.4	500	13.8	2000
E	77	170	20.7	30	NR		6.9	1000
	143	290	20.7	30	3.4	500	13.8	2000
F	110	230	20.7	30	NR		6.9	1000
	160	320	20.7	30	3.4	500	6.9	1000
G , H	38	100	atm .	—	2.1	300	NR	NR
	60	140	atm .	—	10.3	150	NR	NR



الشكل (3-7): 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)[22] :

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. ويتم 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 فوالب 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:

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

حيث:

K- ثابت النفوذية المطلقة (m^2) .

Q -غزارة عبور الهواء ضمن العينة(m^3 / 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[10]:
(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)[22] 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.

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).

الانكماش الحجمي للإسمنت المتصلب (Shrinkage of the set cement)[10]:

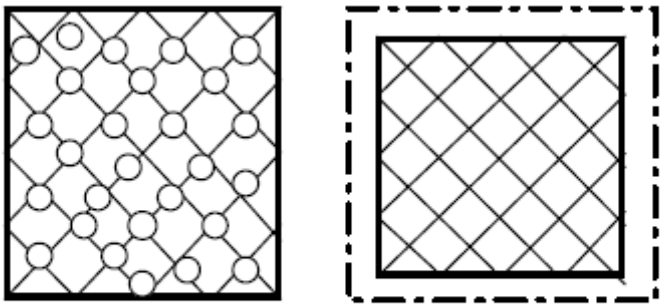
أي تغير الحجم خلال فترة التصلب. إن إماهة الإسمنت البورتلاندي هي عبارة عن نتيجة تداخل عمليات فيزيائية وكيميائية متكاملة ومتزامنة. ويمكن أن نميز العمليتين الأساسيتين الآتيتين:

- 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 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(3-8) 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 (3-8): تغير الحجم خلال فترة التصلب.

3-5- العوامل التي تؤثر على عملية السمنتة[10]:

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:

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- نوعية السائل 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 على الأقل مساوية لكثافة سائل الحفر الموجود في البئر. وعادة" تكون كثافة السائل الإسمنتي 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 ما بين 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 للماء، التي 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- تهيئة مواسير التغليف والبئر قبل عملية السمنتة.

❖ **تهيئة مواسير التغليف:** 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.

❖ **إنزال مواسير التغليف داخل البئر:** 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 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.

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 القاشطات (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 و3%-2 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:

☒ **- شاقوليه البئر:**

عمليا"، فإن معظم الآبار النفطية غير شاقوليه 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 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 الاعتيادي يجب أن يحقق الشرط الآتي:

$$D_B = (1.30 - 1.35)\, D_{csg} \qquad \textbf{(6-3)}$$

حيث D_B: قطر البئر، (إنش).

$\mathbf{D_{csg}}$: قطر مواسير التغليف ، (إنش).

5- إزاحة سائل الحفر من قبل السائل الإسمنتي:

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:

$$\mathbf{C_s = (\rho_{fc} - \rho_{md})\frac{d}{\tau_m}} \qquad \textbf{(7-3)}$$

حيث أن :

ρ_{fc}, ρ_{md}: كثافة سائل الحفر والسائل الإسمنتي على التوالي

d: المسافة بين جدار البئر ومواسير التغليف $d = (D_B - D_{csg})/2$.

D_B , D_{csg}: قطر مواسير التغليف وقطر البئر على التوالي

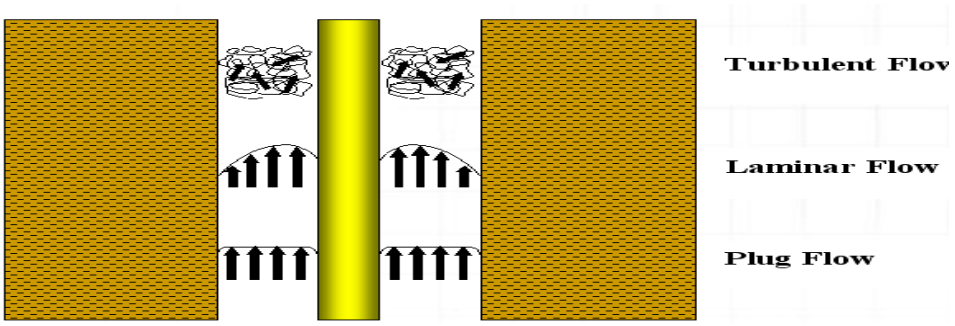
$\boldsymbol{\tau_m}$: جهد القص(shear stress) لسائل الحفر .

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:

.نوعية الجريان، الشكل (3-9):

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، في الجريان الصفحي، 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 (3-9): نوعية 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.

- **تأثير خواص سائل الحفر والسائل الإسمنتي على كفاءة الإزاحة:**

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 بمقدار-3.5 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 ما بين 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.

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 .

- **<u>الترابط الهيدروليكي (Hydraulic Bond)</u>**

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 .

الفصل الرابع
الخلائط الإسمنتية المخففة
Lightweight cement slurries

4-1- مقدمة:

في سمنتة آبار النفط و الغاز عادة فإن الضغط الهيدروستاتيكي الذي يشكله عمود السائل الإسمنتي يجب ألا يتجاوز ضغط تشقيق الطبقة عند أي نقطة في المجال المفتوح من البئر . فإذا تجاوز هذا الضغط ضغط تشقق الطبقة فإن ذلك سوف يؤدي إلى مشكلة فقدان للسائل الإسمنتي في الطبقة[8] ، الجدول (4-1).

الجدول (4-1) تصنيف شدة التهريب.

نوع التهريب	شدة التهريب
تسرب	أقل من 10 bbl/hr (1.5 m^3/hr)
تهريب جزئي (مع راجع)	أكثر من 10 bbl/hr لكن مع وجود راجع
تهريب كلي	عدم وجود راجع

تعتبر مشكلة فقدان السوائل خلال عمليات الحفر , وإنزال مواسير التغليف وعمليات السمنتة في الطبقات ذات النفوذية العالية, والطبقات المتكهفة , والطبقات المتشققة ، والطبقات ذات الضغوط الطبقية المنخفضة ، من المشاكل الكثيرة الانتشار في آبار النفط و الغاز ، وتتميز بكلفة عالية جداً ، حيث تكلف مئات الملايين من الدولارات كل عام . تؤدي هذه المشكلة إلى عدم وصول السائل الإسمنتي في الفراغ الحلقي إلى الارتفاع المخطط له ، أو إلى وجود ترابط سيئ في المجال المسمنت ، وبذلك يفقد السائل الإسمنتي إحدى أهم وظائفه في تدعيم مواسير التغليف وعزل الطبقات ، وما ينتج عن ذلك من حدوث تآكل لمواسير التغليف، ينجم عنه فقدان العازلية وحدوث اتصال هيدروديناميكي بين البئر والتشكيلات الجيولوجية، ويتبعه بالضرورة فقدان في الطاقة الطبقية، وحدوث مشاكل بيئية ناجمة عن تسرب المائع الطبقي إلى المخزون المائي. إن هذه المشاكل قد لا تكون واضحة مباشرة بعد استثمار البئر، و لكن مع مرور الزمن تتفاقم ، وقد تصبح غير قابلة للإصلاح ، و في بعض الحالات، فإن عمليات السمنتة الإصلاحية يمكن أن تكون كافية لإصلاح الضرر، و لكنها قد تكون مكلفة وتستهلك زمناً كبيراً ، كما أن احتمال نجاحها قليل .

إن اختيار التقنيات المختلفة [10] والمواد التي تخفف أو تقلل من فقدان السوائل خلال عملية السمنتة موضحة في الجدول (4-2) .

الجدول (4-2): التقنيات المختلفة التي تقلل من فقدان السائل الإسمنتي



في بعض الحالات يكون تقليل كثافة السائل الإسمنتي كافٍ لتجنب فقدانه، وهذه الكثافة يمكن تخفيضها باستخدام سائل إسمنتي رغوي، أو بإضافة مواد باسطة، وهي مواد ذات كثافة قليلة، تسمح بإمكانية زيادة نسبة الماء إلى الإسمنت. كما أن اختلاف نظام الضخ لخلطات إسمنتية مختلفة، كخلطة إسمنتية أمامية (Lead slurry) وخلطة إسمنتية تابعة (tail slurry) يمكن أن تقلل من مشاكل فقدان السائل. كما أن تخفيض ضغط الاحتكاك خلال الإزاحة يمكن أن يخفف بعض مشاكل التهريب، لأن تقليل ضغط الاحتكاك يخفض من الضغط المطبق بواسطة السائل الإسمنتي على الطبقة. كما تعتبر عملية ضبط الخواص الريولوجية للسائل الإسمنتي باستخدام مقللات اللزوجة، وتغير تركيز الإضافات المقللة لفاقد الرشح , وإضافات منع ترسب حبيبات الإسمنت، أو إنقاص معدل الضخ، من العوامل التي تقلل الضياعات خلال عملية السمنتة. كما أن السمنتة المرحلية التي تستخدم لسمنتة جزء من البئر على مراحل باستخدام أدوات خاصة، والتي تعزل كل مرحلة عن الأخرى، هذه العملية تقلل من ارتفاع عمود السائل الإسمنتي، وتقلل من الضغط الهيدروستاتيكي والديناميكي ولكن من جهة أخرى، فإن عمليات السمنتة المتعددة المراحل تتطلب زمنا أكبر من الزمن الذي تتطلبه عملية السمنتة بمرحلة واحدة، بالإضافة إلى خطورة تلوث السائل الإسمنتي في المرحلة الأولى بالسائل الإسمنتي للمرحلة الثانية، كما أن الوصلة الإسمنتية تعتبر نقطة ضعف في مواسير التغليف .

إن الاختيار الآخر لإنقاص الضياعات إلى الحد الأدنى خلال عملية السمنتة هو استخدام خلائط إسمنتية تيكسوتروبية (Thixotropic)، وهي سوائل تتهلم عند توقف الضخ، حيث تنمو مقاومة

التهلم بسرعة كبيرة في حال ضياعها في الطبقة، وتؤدي إلى إغلاق لمنطقة التهريب . ولتجنب تهريب السائل الإسمنتي في الطبقة، فإن كثافة السائل الإسمنتي النظامي يجب أن تقلل إلى الحد الذي يصبح عنده الضغط الهيدروستاتيكي وضغط الاحتكاك أقل من ضغط تشقق الطبقة، وهذا يتم باستخدام خلطات إسمنتية مخففة، حيث أن هذه الخلطات تحمي مواسير التغليف من المشاكل أثناء الارتفاع الكبير الذي تصل إليه في الفراغ الحلقي، مقارنة مع الارتفاع الذي تصله السوائل الإسمنتية النظامية، كما أن استخدامها يعطي إمكانية قليلة لتشقق الطبقات، أو حدوث فقدان للسوائل الإسمنتية في الطبقات المتشققة والمتكهفة، كما أنه يؤدي إلى إمكانية سمنتة الطبقات على مرحلة واحدة، أو على الأقل إنقاص عدد مراحل السمنتة .

ومن المهم الإشارة إلى أن هذه الطرق التي تستخدم لتقليل كثافة السائل الإسمنتي، والتي سوف تنتج عنها خلطات إسمنتية مخففة، يمكن أن تعطي أحيانا أفضل الحلول، ولكنها ليست الحل الأفضل لكل الحالات، ففي عمليات سمنتة الآبار في العالم، فإن كل بئر هو حالة قائمة بحد ذاتها (Case –by-Case) ومن المهم قبل اختيار الخلطة الإسمنتية المخففة معرفة المشاكل و الأهداف و الفوائد التي يراد تطبيقها في الآبار بشكل استثنائي .

4-1-1- استخدام الخلائط الإسمنتية المخففة[4,10]:

تستخدم السوائل الإسمنتية المخففة (وزن نوعي قليل) في الآبار التي استعمل فيها سائل حفر بوزن نوعي قليل، والتي أدت إلى تسرب السائل المخفف في الطبقة ولم يتم عزلها جيداً قبل عملية التغليف. كما تستخدم في الآبار التي تتطلب رفع الإسمنت في الفراغ الحلقي إلى مسافة كبيرة عن حذاء مواسير التغليف (سمنتة الطبقات الغازية، والتي يرفع فيها الإسمنت حتى السطح، طول المجال المفتوح من البئر كبير ويتكون من طبقات تتطلب بأكملها العزل بالإسمنت وعزل المجالات ذات الضغوط الطبقية المنخفضة. يخفف الوزن النوعي للسائل الإسمنتي باستعمال نسب مرتفعة من الماء إلى الإسمنت، حيث تستخدم القيم العظمى لهذه النسب، والتي يتمكن عندها الخليط من التصلب علما أن النسبة المسموح بها هي (% 65). إذا كانت القيمة العظمى لنسبة الماء إلى مسحوق الإسمنت غير كافية (مازال الوزن النوعي للسائل أكبر من اللازم) تعالج الخلطة الإسمنتية بمقللات للوزن النوعي، والتي تدعى المواد الباسطة (Extenders).

4-1-2- الإضافات المخففة للوزن النوعي للسوائل الإسمنتية[3,4,10]:

تستخدم المواد المقللة للوزن النوعي للسائل الإسمنتي (Cement Extenders) لإنجاز واحد أو كل من الأهداف التالية :

1- إنقاص كثافة السائل الإسمنتي :

إن إنقاص كثافة السائل الإسمنتي تؤدي إلى إنقاص الضغط الهيدروستاتيكي خلال عملية السمنتة و هذا يسهم في منع حدوث تهريب للسائل الإسمنتي (Lost circulation) وحدوث تشقق للطبقة الضعيفة (break down of weak formation) .

إضافة إلى ذلك فإن عدد مراحل سمنتة الآبار يمكن أن تنخفض(تقليل من عدد مراحل السمنتة) .زيادة إنتاجية السائل الإسمنتي:

تقلل المواد الباسطة من كمية الإسمنت اللازم لإنتاج حجم معين من السائل الإسمنتي

تصنف المواد المقللة للوزن النوعي للسائل الإسمنتي إلى ثلاث مجموعات و التي تعتمد على آلية إنقاص الكثافة و زيادة الإنتاجية و غالبا يستخدم أكثر من نوع من المواد الباسطة في نفس السائل الإسمنتي.

-مواد تسمح بزيادة نسبة الماء إلى الإسمنت (Water extender)، ومثال هذه المواد الغضار (clays)، والذي يسمح بزيادة كبيرة لنسبة الماء إلى المسحوق الإسمنتي (يمكّن من استخدام القيمة الحدية العظمى). ومثل هذه المواد الباسطة تحافظ على تجانسية السائل الإسمنتي، وتمنع ظهور نسبة كبيرة من الماء الحر.

-إضافة مواد ذات كثافة قليلة، حيث تكون كثافة هذه المواد أقل من كثافة الإسمنت البورتلاندي (3.15 g/m³)، إذ تنخفض كثافة السائل الإسمنتي بشكل هام باستخدام هذه المواد .
-مواد باسطة غازية (Gaseous Extenders): مثل النتروجين أو الهواء الذي يمكن أن يستخدم لتحضير الإسمنت الرغوي بكثافة قليلة بصورة استثنائية، وبمقاومة انضغاط كافية , حيث أن تحضير وإزاحة مثل هذا النظام معقدة.
وفيما يلي نبين أنواع الخلائط الإسمنتية المخففة [10, 9] :

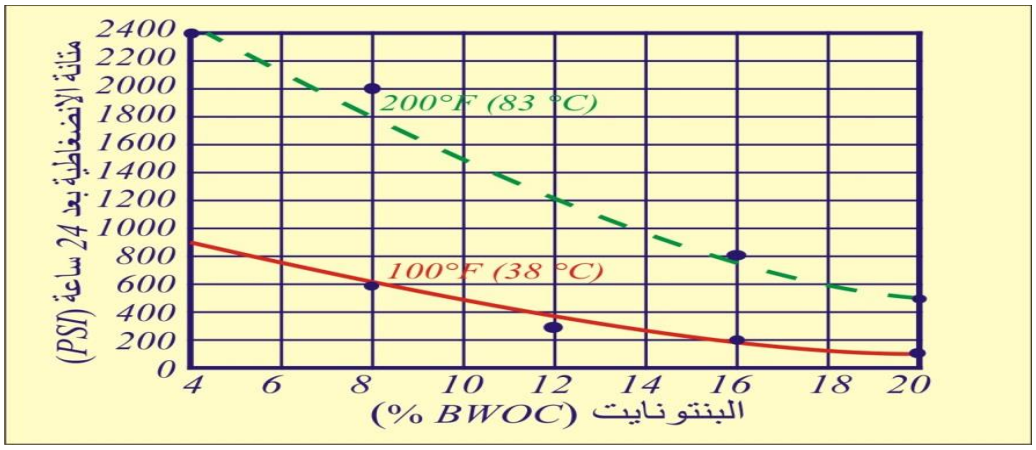
4-2- الخلائط الإسمنتية المحضرة باستخدام الغضار(البنتونايت):

يعتبر البنتونايت من أهم المواد المقللة للوزن النوعي للسائل الإسمنتي، وذلك بسبب وزنه النوعي المنخفض، بالمقارنة مع الوزن النوعي للمسحوق الإسمنتي من جهة، ولكونه يحتفظ بكمية إضافية من الماء، وبالتالي يسمح بزيادة كبيرة لنسبة الماء إلى مسحوق الإسمنت، الأمر الذي يؤدي إلى تناقص الوزن النوعي للسائل الإسمنتي.

يضاف البنتونايت بتركيز حتى (20% BOWC)، ولكن عند إضافته بتركيز أعلى من (6%) تزداد لزوجة السائل الإسمنتي ومتانة الجل، لذلك يجب معالجة السائل الإسمنتي بمقللات اللزوجة. وحسب متطلبات API فإنه يجب إضافة (5.3 %) من الماء إلى كل 1 % من البنتونايت، ومن جهة أخرى يجب أن يتم تحديد المحتوى المثالي للماء مع الإسمنت بشكل خاص كما يظهر الجدول (4-3). إن كثافة السائل الإسمنتي تنقص، وتزداد مقاومة الخضوع بسرعة مع زيادة تركيز البنتونايت. كما أن مقاومة الانضغاط للسائل الإسمنتي الشكل(4-1) تنخفض مع زيادة تركيز البنتونايت، لذلك فإن مثل هذا الإسمنت أقل مقاومة لتأثير المياه الكبريتية والسوائل الأكالة، حيث أن التركيز العالي للبنتونايت يؤدي إلى التحكم بفاقد الرشح. بالإضافة إلى ذلك فإن البنتونايت يعتبر من المواد الباسطة الفعالة عند درجات الحرارة المرتفعة.

الجدول (4-3): تأثير إضافة البنتونايت على خواص السائل الإسمنتي.

البنتونايت %	الصنف G – 44% ماء		
	حجم الماء (gal / sk)	كثافة الخلطة الإسمنتية (lb / gal)	الانتاجية (ft^3 / sk)
0	4.97	15.8	1.14
2	6.17	15	1.31
4	7.36	14.4	1.48
6	8.56	13.9	1.65
8	9.76	13.5	1.82
10	10.95	13.1	1.99
12	12.15	12.7	2.16
16	14.55	12.3	2.51
20	16.94	11.9	2.85



الشكل (4-1) تأثير إضافة البنتونايت على المتانة الانضغاطية للحجر الإسمنتي.

إن وجود التركيز العالي لشوارد Ca^{++} في الطور المائي للسائل الإسمنتي يعيق (يمنع) إماهة البنتونايت، لذلك فإن الخواص الباسطة للبنتونايت يمكن أن تكون فعالة بشكل كبير إذا حدثت إماهة كاملة للغضار في الماء قبل مزج السائل الإسمنتي. إن السائل الإسمنتي الذي يحتوي 2% من البنتونايت المماه يكافئ 8% من البنتونايت المضاف بشكل جاف كما في الجدول (4-4).

الجدول (4-4): تأثير إضافة البنتونايت الجاف, البنتونايت المهدرج مسبقاً على خواص السائل الإسمنتي

بنتونايت % قبل الإماهة	بنتونايت جاف ممزوج %	ماء نقي	كثافة الخلطة (lb / gal)		خضوع السائل (ft^3 / sk)	
			قبل الإماهة	جافة وممزوجة	قبل الإماهة	جاف وممزوج
0.0	0	5.2	-	15.6	-	1.18
0.5	2	6.4	14.8	14.8	1.34	1.35
1.0	4	7.6	14.1	14.2	1.5	1.52
1.5	6	8.8	13.5	13.7	1.66	1.59
2.0	8	10	13.1	13.3	1.83	1.86
2.5	10	11.2	12.7	12.9	1.99	2.03
3.0	12	12.4	12.4	12.6	2.16	2.2
4.0	16	14.8	11.9	12.2	2.48	2.55
5.0	20	17.2	11.5	11.8	2.81	2.89

فالإماهة الكاملة للغضار ذي النوعية الجيدة تحدث في 30 min . كما أن زمن التكاثف للخلطات الإسمنتية المعالجة بالغضار المماه هي بشكل عام نفسه للخلطات الإسمنتية المعالجة بالغضار الجاف. ويجب أن يلاحظ أن الغضار المماه لا يظهر أي تغيير في المتانة النهائية للحجر الإسمنتي البنتونايت يمكن أن يماه أو يهدرج في مياه البحر أو المياه القليلة الملوحة، لأن الملح يمنع الإماهة, وتنخفض نقطة الخضوع للسائل الإسمنتي . ولا يعتبر البنتونايت فعالاً كمواد باسطة في الخلطات الإسمنتية ذات درجات الملوحة العالية . ولذلك في مثل هذه الظروف يستخدم غضار الأتابولغيت $(Mg, Al)_5 Si_8O_{22}(OH)_2.4H_2O$, والذي يعرف بالجيل- ملح (Salt-gel)، وهو بشكل ألياف أبرية، والتي تعطي لزوجة عند تشتتها في الماء ، بخلاف البنتونايت, الذي لا يعطي أي تحسين في التحكم بفاقد الرشح، والذي نحصل عليه عندما يوجد الأتابولغيت في السائل الإسمنتي.

4-3- الخلائط الإسمنتية المحضرة باستخدام سيليكات الصوديوم:

تتفاعل السيليكات مع أكسيد الكالسيوم (Lime) في الإسمنت أو مع كلور الكالسيوم لتشكل سيليكات الكالسيوم الهلامية (Calcium silicate gel) ، حيث أن التركيب الهلامي يعطي المزيج لزوجة فعالة، والذي يسمح باستخدام كمية كبيرة من ماء المزج دون حدوث انفصال للماء الحر. وهذه عملية منفصلة بشكل كلي عن تلك الآلية المتبعة عند إضافة المواد الباسطة الغضارية , التي تمتص الماء.

تستخدم سيليكات الصوديوم بشكل متكرر على الأغلب، وتوجد بشكل سائل أو صلب . إن الميزة الهامة للسيليكات هي فعاليتها, لأنها سهلة الاستخدام والتخزين, ومن جهة أخرى, فإن ميلها كمسرع يؤدي إلى إنقاص فاعلية الإضافات الأخرى, و بشكل خاص مبطئات التصلب وعوامل ضبط فاقد الرشح .

إن سيليكات الصوديوم الصلبة , Na_2SiO_3 (ميتا سيليكات الصوديوم) ,والتي تمزج عادة بشكل جاف مع الإسمنت، إذا أضيفت إلى الماء العذب قبل تحضير السائل الإسمنتي، فإن التركيب الهلامي (gel) يمكن أن لا يتشكل إذا لم يتم إضافة كلور الكالسيوم . إن التركيز اللازم إضافته من(Na_2Sio_3) تتراوح بين (% 3 - 0.2%) من وزن الإسمنت، هذا التركيز يعطي كثافة للسائل الإسمنتي تتراوح بين (11-14.5 lb/gal) (g/cm^3 1.35-1.75).

كما أن سيليكات الصوديوم السائلة (Na_2O (3-5)Sio_3)، والتي تدعى أيضا الماء الزجاجي (Water glass) تضاف إلى ماء الخلط قبل مزج السائل الإسمنتي.

إذا وجد كلور الكالسيوم في السائل الإسمنتي, فإنه يجب أن يضاف إلى ماء الخلط قبل إضافة سيليكات الصوديوم، لكي نحصل على خواص فعالة للمواد الباسطة .

4-4-الخلائط الإسمنتية المحضرة باستخدام البوزولان:

يعتبر البوزولان **(Pozzolans)** من المجموعات الأكثر أهمية كمواد باسطة للإسمنت والمحددة وفق تعريف ASTM المواصفة C-219-55 كالتالي : هي مواد سيليكونية أو مواد سيليسية وألومينية, والتي لا تملك خواص الإسمنت, ولكن عند تفاعلها مع هيدروكسيد الكالسيوم عند درجة الحرارة العادية تنتج مركبات تمتلك خواص الإسمنت .

يوجد نوعان من البوزولان:

1- بوزولان طبيعي، والذي يشمل الرمادي البركاني والتراب الدياتومي .

2- بوزولان صناعي، مثل بعض الرماد المتطاير Fly ashes .

4-4-1-الخلائط الإسمنتية المحضرة باستخدام التراب الدياتومي :

يتألف التراب الدياتومي (**Diatomaceous Earth)** من هياكل سيليكونية من الدياتوم المترسب من الماء العذب، أو من الماء المالح . إن المكون الرئيسي للتراب الدياتومي هو الأوبال, و هو شكل غير متبلور من السيليكا المائية، يحتوي على(% 10) من الماء . من أجل استخدام البوزولان كواد باسطة، فإن التراب الدياتومي يطحن بنعومة تقترب من نعومة الإسمنت وبالتالي فإن هذه المادة تتميز بمساحتها السطحية العالية ووزنها النوعي المنخفض نسبياً ($2.1\ g_f/cm^3$) .إن إضافة هذه المادة تقلل كثافة الملاط الإسمنتي بسبب وزنها المنخفض. بالإضافة إلى زيادة كمية الماء المطلوب استخدامها فإن إضافة التراب الدياتومي يمنح أو يضفي على الملاط الإسمنتي خواصاً مشابهة لتلك الخواص التي نحصل عليها عند استخدام خلطات إسمنتية مخففة باستخدام البنتونايت. إضافة إلى ذلك، وبسبب فعالية البوزولان فإن متانة الحجر الإسمنتي الذي يحتوي على تراب دياتومي هي أقوى من مثيلاتها التي تحتوي على البنتونايت. ولكن السيئة الرئيسية للتراب الدياتومي هي كلفته العالية

4-4-2-الخلائط الإسمنتية المحضرة باستخدام الرماد المتطاير:

ينتج الرماد المتطاير (Fly ashes) من وحدات الطاقة (Power Plants) التي تحرق مسحوق الفحم (Pulverized Coal) . ينتقل هذا الرماد في الغازات كجزيئات منصهرة، والتي

تتصلب بأشكال كروية خشنة . إن المكون الرئيسي للرماد المتطاير هو الزجاج والذي يتألف بشكل رئيسي من السيليكا والألومينا وأكسيد الحديد, أوكسيد الكالسيوم, القلويات, الكوارتز, الهيماتيت والمغناتيت، بالإضافة إلى بعض المواد القابلة للاحتراق. إن تركيب وخواص الرماد المتطاير يمكن أن تتغير بشكل واسع، وتعتمد على مصدر الفحم وفعالية وحدات الطاقة، وتبعاً لذلك فإن الوزن النوعي للرماد المتطاير يمكن أن يتغير من gf/cm^3 (2 to 2.7) و تبعا لمواصفات ASTM يمكن أن نميز ثلاثة أنواع من الرماد المتطاير : النوع F , N و النوع C, كما في الجدول(4-5).

الجدول (4-5): المتطلبات الكيميائية للرماد المتطاير

	نوع المعادن الممزوجة		
	N	**F**	**C**
أكسيد السيليكون مع أكسيد الألمنيوم و أكسيد الحديد, حد أدنى %	70	70	50
ثلاثي أكسيد الكبريت, حد أعظمي %	4	5	5
محتوى الرطوبة , حد أعظمي %	3	3	3
الفاقد بالاحتراق , حد أعظمي %	10	12	6

.

يعتبر استخدام النوع C للرماد المتطاير كمواد باسطة من أجل سمنتة آبار النفط جديداً نسبياً. بسبب وجود كمية لا بأس بها من أوكسيد الكالسيوم في مثل هذه الرماد المتطاير.
كما تستخدم بعض أنواع الرماد المتطاير من النوع (C) كمركب رئيسي في سمنتة الآبار، والتي استخدمت عند سمنتة الآبار الضحلة ذات درجة الحرارة الأكثر من ($120\ F°(\ 49\ c^0$)، حيث تنمو متانة الانضغاط للحجر الإسمنتي بسرعة أكبر من تلك التي تستخدم أنظمة الإسمنت البورتلاندي التقليدية.

4-4-3-الخلائط الإسمنتية المحضرة باستخدام السيليكا [10] :

تستخدم السيليكا في سمنتة الآبار، وتنقسم إلى نوعين: كوارتز- α وسيليكافوم condensed silica fume). تستخدم السيليكا كوارتز- α في معظم الحالات، وبشكل متكرر في الآبار الحرارية من أجل منع تراجع مقاومة الإسمنت. وdستخدم بشكل روتيني قطرين من الجزيئات: الرمل السيليكاتي بقطر وسطي حوالي 100 µm, وسيليكا فلور بقطر وسطي 15 µm . ونتيجة الكلفة العالية فإن تلك المواد تستخدم نادراً من أجل تخفيف السائل الإسمنتي لوحده .

أما السيليكافوم المكثفة (condensed silica fume)، والتي تدعى أيضا (ميكرو سيليكا) (micro silica)، فهي نواتج ثانوية (by product) لإنتاج السيلكون والفيروسيليكون (ferrosilicon) وخلائط أخرى من السيلكون .الجزيئات بشكل منفرد تكون زجاجية, وهي كريات ميكروية غير متبلورة، وهذا يعني أن قطر الجزيئات عادة يتراوح بين 0.1 µm و 0.2 µm وهو أنعم بحوالي 100-50 مرة من الإسمنت البورتلاندي أو الرماد المتطاير، وبالتالي فإن السطح النوعي يكون كبيراً جداً (15000-25000 m^2/Kg) .

تعتبر السيليكافوم المكثفة ذات فعالية عالية بسبب نعومتها و نقاوتها , وهي من أكثر المواد البوزولانية الفعالة والمتوفرة . إن الدرجة العالية لفعالية البوزولان تسمح بإدخال نظام إسمنت بكثافة قليلة مع معدل أعلى لنمو المتانة الانضغاطية. كما أن السطح النوعي الكبير للسيليكافوم يتطلب نسبة عالية من الماء لتحضير سائل إسمنتي قابل للضخ، لذلك فإن كثافة هذه الخلطات تكون قليلة (11 lb/gal) ($1.32g/Cm^{3)}$)، إذ يمكن أن تحضر بدون انفصال كمية من الماء الحر، أو تكون كمية الماء المنفصلة قليلة. إن التركيز العادي لهذه المواد حوالي 15% من وزن الإسمنت (BWOC) و يمكن أن تستخدم حتى 28% .

إن نعومة السيليكافوم أيضا تسمح بالتحكم بفاقد الرشح , ويمكن أن تنقص من نفوذية الحجر الإسمنتي. ولهذه الأسباب تستخدم أيضا لمنع انتقال السوائل في الفراغ الحلقي، إضافة إلى إدخالها كمصدر السيليكا في نظام سمنتة الآبار الحرارية

4-5-الخلائط الإسمنتية المخففة المحضرة باستخدام البرليت المتمدد[9] :

(Expanded Perlite):

البرليت بصيغته الطبيعية هو عبارة عن صخر بركاني زجاجي (يحتوي على ماء بنسبة 1-) (6%، والذي يتمدد عندما يسخن إلى درجة حرارة عالية. عادة يكون ناتج البرليت المتمدد ذا كثافة مطلقة 7.75 lb/ ft^3 ، والتي تسمح بتحضير خلائط إسمنتية بكثافة قليلة 2 lb/ gal(1.44 g/ Cm^3) ، حيث تضاف كمية قليلة من البنتونايت (2%- 4% BWOC)، وذلك لمنع طفو جزيئات البرليت في السائل الإسمنتي من جهة، ولتقليل كمية الماء المنفصل (الحر) من جهة أخرى .

يحتوي البرليت المتمدد على مسامات مفتوحة ومغلقة. تحت الضغط الهيدروستاتيكي فإن الفراغ المفتوح سوف يملأ بالماء، أما المغلقة فتتحطم، وكنتيجة لذلك يصبح البرليت أكثر ثقلاً . لذلك , ولتحضير الخلطة الإسمنتية باستخدام البرليت المتمدد، والتي سوف يكون لها كثافة معطاة عند قاع البئر, من الضروري مزج الخلائط الإسمنتية الأقل كثافة عند السطح. عند 3000 Psi يبلغ الوزن النوعي للبريت المتمدد (2.4 gf/cm^3)

من أهم إيجابيات استخدام البرليت إعطاء مقاومة أقل للحجر الإسمنتي، الذي يؤدي إلى عمليات تثقيب أفضل.

- الحصول على كثافة أقل للملاط الإسمنتي بسبب كثافة البرليت المنخفضة إضافة إلى استعمال كمية إضافية من الماء.
- الجسيمات الحبيبية للبرليت تساعد على إغلاق الشقوق، وتقليل تهريب السائل الإسمنتي في الطبقة.

4-6- الخلائط الإسمنتية المخففة المحضرة باستخدام الغيلسونايت (Gilsonite) :

الغيلسونايت هو عبارة عن هيدروكربونات صلبة (مادة إسفلتية غير فعالة وخفيفة، يبلغ وزنها النوعي$1.07g_f/cm^3$. يمكن الحصول على خلطات إسمنتية ذات كثافة قليلة (12 lb/ gal(1.44 g/ Cm^3)) وذلك عند استخدام 50 lb من الغيلسونايت لكل كيس من الإسمنت البورتلاندي دون استعمال كمية كبيرة من الماء (2 gal/ft^3). والغيلسونايت هو جزيئات حبيبية سوداء صلبة بقطر أعلى من 0.6 Cm ، وغالبا ما يستعمل لمنع أو معالجة فقدان دورة سائل الحفر . تبلغ نقطة الانصهار للغيلسونايت ((196 ºC) 385 ºF). لذلك فإن الجزيئات يمكن أن تميل للانصهار عند درجة حرارة أعلى من (240 ºF 116 ºC)، و نتيجة لذلك فإن استخدام الغيلسونايت يجب أن لا يوصى به في الآبار التي تكون فيها درجة الحرارة الستاتيكية عند قاع البئر فوق درجة حرارة (149 °C) 300 °F .

4-7-الخلائط الإسمنتية المخففة المحضرة باستخدام مسحوق الفحم(Powdered coal):

يعتبر مسحوق الفحم مادة باسطة، وهو مشابه جداً للغيلسونايت، وذو وزن نوعي أعلى بقليل (1.3 gf/cm^3). وعلى شاكلة الغيلسونايت, فإن مسحوق الفحم يطحن بخشونة، وغالباً ما يستخدم كمواد لمنع تهريب سائل الحفر. وبخلاف الغيلسونايت فإن نقطة انصهار مسحوق الفحم تبلغ (538 °C) 1000 °F, والتي تسمح باستخدام مسحوق الفحم في سمنتة الآبار الحرارية. يضاف مسحوق الفحم عادة بمقدار (25 lb & 12.5) لكل كيس من الإسمنت البورتلاندي. والخلطات الإسمنتية المحضرة بمسحوق الفحم يكون لها كثافة 11.9 lb/gal 1.43 gr/Cm^3)

4-8-الخلائط الإسمنتية المخففة المحضرة باستخدام الميكرو سفير (الكريات الميكروية):

تعتبر طريقة تحضير الخلطات الإسمنتية المخففة باستخدام الكريات الميكروية (الميكرو سفير) من الطرق الحديثة المستخدمة في سمنتة الآبار. والميكروسفير هي كريات صغيرة مليئة بالغاز(مزيج من Co_2 و N_2) , وزنها النوعي يتراوح عادةً بين 0.6 - 0.4 ، حيث أن مثل هذه الأوزان النوعية القليلة تسمح بتحضير خلطات إسمنتية مخففة بكثافة قليلة ($1.02\ g/\ Cm^3$) 8.5lLb/gal وتعطي حجراً إسمنتياً ذا نفوذية قليلة, ومتانة انضغاط عالية وهذه الكريات الصغيرة تتوفر بنوعين , زجاج وسيراميك).

إن التطبيقات الأصلية (Original) للميكرو سفير كانت من أجل عملية السمنتة الأولية للماسورة الدليلة وللمواسير السطحية، حيث تصادف عادة طبقات ذات ضغوط تشقيق قليلة وطبقات تؤدي لتهريب السائل الإسمنتي. و من جهة أخرى, فإنها تستخدم اليوم بشكل كبير جداً, وفي كثير من الحالات فإن عملية السمنتة باستخدام الميكرو سفير يمكن أن تؤدي إلى عدم الحاجة لإجراء عملية السمنتة على مراحل، و لكن يوجد بعض الحدود لتطبيقها، وهي عدم قدرتها على تحمل الضغوط الهيدروستاتيكية العالية, لذلك لا يمكن أن تستخدم في الآبار العميقة.

الفصل الخامس
السمنتة الرغوية
Foam cementing

يعتبر اختراق الآبار عملية معقدة, بسبب وجود الطبقات التي تؤدي إلى تهريب سوائل الحفر والسوائل الإسمنتية, ولذلك فإن تطبيق السمنتة التقليدية باستخدام السوائل الإسمنتية ذات الكثافة العادية, وحتى المخففة, لا تعطي نتائج إيجابية. كما أن استخدام السوائل الإسمنتية الحاوية على مواد سادة, وكذلك تكنولوجيا السمنتة على مراحل أصبحت غير فعالة من وجهة نظر تقنية اقتصادية. في هذه الحالة لابد من استخدام سوائل إسمنتية بكثافة 1200-1300 kg/m^3 وأقل من ذلك.

إن أكثر السوائل الإسمنتية المخففة فعاليةً من وجهة نظر تقنية واقتصادية هي السوائل المخففة باستخدام الطور الغازي, والتي ارتبط تطورها وانتشارها بتوفر مولدات الرغوة الفعالة والمستقرة من جهة, وتوفر تقنيات تطبيق هذه الأنظمة بنجاح في جميع الظروف البئرية من جهة أخرى.

5-1- مجالات استخدام السوائل الإسمنتية الرغوية:

تستخدم السوائل الإسمنتية الرغوية في الحالات الآتية[5,7]:

1 – عزل مجالات التهريب, وتدعيم جدران البئر في مناطق التكهف.

2 – سمنتة مواسير التغليف التي تعزل مجالات سببت أثناء حفرها فقدان دوران سائل الحفر.

3 – تستخدم كقاعدة لصب الجسر الإسمنتي العادي, وذلك في حالات فقدان الدوران.

4 – عزل الطبقات المنتجة ذات الخواص الخزنية السيئة, أو ضعيفة الإنتاجية.

وفي كثير من الحالات استخدمت السوائل الإسمنتية الرغوية لإلغاء السمنتة على مراحل, ولاسيما في المراحل الوسطية للآبار.

5-2- المواد المستخدمة في تحضير السوائل الإسمنتية الرغوية:

لتحضير السوائل الإسمنتية الرغوية تستخدم المواد الآتية[8]:

5-2-1- الإسمنت البورتلاندي:

وهو مكون من ثمانية أصناف A,B,C,D,E,F,G,H تلبي جميع متطلبات تدعيم الآبار النفطية والغازية, وفق تصنيف معهد النفط الأمريكي. وأكثر الأصناف ترشيحاً للاستخدام في تحضير السوائل الإسمنتية الرغوية: الصنفان H و G , اللذان ينتجان دون أية إضافات أثناء الطحن, باستثناء منظم الشك. وهذان النوعان يمكنهما الاستجابة لمسرعات ومبطئات التصلب, وبالتالي أصبحا الأكثر استخداماً, إذ أنهما يمكن أن يحلا مكان أي صنف من الأصناف السابقة الذكر, وهما مصممان للاستخدام حتى أعماق تصل إلى 2440 m دون أية إضافة. والفرق بين الصنفين هو أن الصنف H مطحون بشكل أكثر خشونة من الصنف G , إذ أن سطحه النوعي يتراوح بين 200-300 m^2/kg , ويمزج عند الاختبار مع الماء بنسبة $w/c = 0.38$, أما الصنف G فيبلغ سطحه النوعي بين 270-350 m^2/kg , ويمزج عند الاختبار مع الماء بنسبة $w/c = 0.44$. كما أنه بالعلاقة مع تركيب المياه الطبقية ذات التأثير التاكلي, ووجود توضعات كيميائية ثانوية في مقطع البئر, فإنه من الضروري استخدام مواد إسمنتية ذات ثبات تآكلي كبير, وذلك بما يتطابق مع الوسط التآكلي.

5-2-2 – سائل الخلط :

يتم اختيار سائل الخلط بالعلاقة مع الشروط الحرارية البئرية, والقدرة التآكلية للوسط عند درجة حرارة الأعماق. وعند غياب التأثير التآكلي للوسط يفضل استخدام الماء النقي. أما عند وجود مياه طبقية يمكن أن تبدي تأثيراً سلبياً على الحجر الإسمنتي, أو توضعات كيميائية ملحية, فمن المفضّل استخدام سائل خلط ملحي, ذي تركيب قريب من تركيب المياه الطبقية, أو محاليل المغنيزيوم، حيث ينصح باستخدام محلول كلور المغنيزيوم لتلافي حدوث انتقالات تناضحية بين السائل الإسمنتي والطبقة.

5-2-3 – مولدات الرغوة:

وتستخدم لبعثرة فقاعات الغاز (الهواء) في ماء خلط السائل الإسمنتي, وذلك بهدف التخفيض الحاد في كثافته وتقليل ناقليته الحرارية. وتستخدم لهذا الغرض مخفضات التوتر السطحي Surfactants , كالمواد المساعدة على الاستحلاب والتبلل وتشكيل الرغوة. وتوجد هذه المواد على شكل شاردي Anionic Surfactants , أو غير شاردي Nonionic Surfactants , أو على شكل غير متشرد Amphoteric Surfactants .

تتشرد مخفضات التوتر السطحي الموجبة إلى شوارد عضوية كبيرة موجبة, وشوارد لا عضوية بسيطة سالبة, وتتألف عادةً من أملاح الأمينات, أو البولي أمينات الدهنية. كما تتشرد مخفضات التوتر السطحي السالبة إلى شوارد عضوية كبيرة سالبة وشوارد لا عضوية بسيطة موجبة, ويعتبر الصابون مثالاً تقليدياً لهذه المواد, مثل زيتات الصوديوم $[C_8HCH{:}CH(CH)COO^{-}\ Na^{+}]$. أما مخفضات التوتر السطحي غير المتشردة فتتألف من بوليميرات غير قابلة للتشرد مثل فينول أكسيد – 30- إيتيلين أكسيد $C_6H_6\text{-}O\text{-}(CH_2CH_2O)_{30}H$. وتؤدي المنشطات السطحية وظائف مشتركة, إذ يمكن أن تكون وسائط استحلاب ومولد رغوة في آنٍ واحد, كمادة التكسابون $CH_3(CH_2)_{11}OSO_3Na$ وغيرها.

5-2-4 – المشتت الصلب:

وهو يقوم بمهمة تشتيت وتأمين استقراريه الخليطة الإسمنتية الرغوية. وتعتبر المواد الغضارية من أهم المواد التي يمكنها تأمين هذه الاستقرارية, وأكثر الغضاريات مقدرةً على تأمين هذه الخواص هي مجموعة البنتونايت Bentonite clay , وأهم معادنها: المونتموريلونيت بنوعيه الصودي والكلسي، وأقلها مجموعة الكاولينيت Caolinite ذي المردود الضعيف والتبعثر السيء بالماء مقارنةً بالبنتونيت.

5-2-5 – الطور الغازي:

ويستخدم للقيام بدور التخفيض الحاد لكثافة السائل الإسمنتي, والحجر الإسمنتي المتشكل منه, وتقليل ناقليته الحرارية. وكطور غازي, يمكن استخدام الهواء، أو غاز النتروجين, الذي يضخ باستخدام ضواغط خاصة. وتقترح بعض الأبحاث استخدام غاز عوادم محركات الاحتراق الداخلي, وذلك عن طريق توصيلها مع خط سحب الضواغط.

5-2-6 – إضافات كيميائية صلبة أو سائلة:

وتستخدم لضبط الخواص الجريانية والارتشاحية للسوائل الإسمنتية, وسرعة التصلب, وموانع التآكل والرغوة. وتستخدم لهذا الغرض مواد كيميائية معدنية عضوية وبوليميرية.

5-3- خواص السوائل الإسمنتية الرغوية[8, 9]:

5-3-1 – الخواص الريولوجية:

إن الخواص والمواصفات الواجب توفرها في السوائل الإسمنتية الرغوية والحجر الناتج عن تصلبها في الفراغ الحلقي للبئر, يمكن صياغتها انسجاماً مع الظروف الجيولوجية والحرارية والتقنية لاستخدامها.

تقاس كثافة السائل الإسمنتي الرغوي ρ_{fc} باستخدام أجهزة قياس كثافة سوائل الحفر التقليدية أو باستخدام الطريقة الوزنية الحسابية.

من أجل ضمان إمكانية ضخ السائل الإسمنتي الرغوي أو إزاحته بنجاح إلى الفراغ الحلقي للبئر، فإن سيولته (انتشاره) يجب أن تقع في المجال (16-19 cm) مقاسةً بمخروط قياسي قطر قاعدته الصغرى 36 mm , والكبرى 64 mm , وارتفاعه 60 mm .

زمن بداية ونهاية الشك ومتانة الحجر المتشكل منه يجب أن تحقق متطلبات المواصفة (*GOST* 1581–85)

وهي الآتية:

زمن بداية الشك : $T(20\text{-}50C^{o}) \geq 1h\text{-}45min$

زمن نهاية الشك : $T(20\text{-}50C^{o}) \geq 8h$

كما أن نفاذية الحجر الإسمنتي المتشكل من السوائل الإسمنتية الرغوية يجب أن تقارن بنفاذية الحجر الإسمنتي المتشكل من السوائل الإسمنتية بالكثافة العادية.

5-3-2 - استقراريه الخليطة الإسمنتية الرغوية:

يتم تقييم مقدرة السوائل الإسمنتية على الإرغاء بطريقة سحب الهواء عند الخلط السريع. ويوجد معاملان لتقييم هذه المقدرة [8]:

آ - العامل الرغوي (β):

ويحسب بالشكل الآتي: نصب في وعاء زجاجي مدرج (بيشر مدرج بسعة $800\ cm^3$) حجماً مقداره $200\ cm^3$ من السائل الإسمنتي العادي. يشغل الخلاط بسرعة 4000-6000 RPM ولحظة إضافة مولد الرغوة بالتركيز المحدد للكمية المدروسة تضبط الميقاتية، ويستمر الخلط 3-6 min. يراقب مستوى السائل في الوعاء, وعند الوصول إلى الارتفاع الأعظمي للرغوة ضمن الفترة المذكورة, نوقف الخلاط ونقرأ حجم السائل الإسمنتي المتشكل في الكأس المدرج (V_F, cm^3) , وبذلك نحسب العامل الرغوي بالعلاقة:

$$\beta = \frac{V_F}{200} \qquad (1\text{-}5)$$

وعندما يبلغ العامل الرغوي للخليطة الإسمنتية العادية أو المخففة $\beta = 1.5-3.0$ فإنها تمكننا من الحصول على سائل إسمنتي رغوي بكثافة $\rho_{fc} = 600-1200\ \ kg/m^3$

ولتحديد كمية مولد الرغوة الأنسب يتم إجراء مجموعة تجارب لاختيار تركيز مولد الرغوة الذي يعطي أكبر قيمة للعامل الرغوي β .

ولكن استخدام هذا المعامل محدد بفترة الخلط, ولا يعطي إمكانية التأكد من المحافظة على الرغوة في السائل الإسمنتي, إذ يمكن أن تضمحل الرغوة أو تتلاشى بعد ترك السائل الإسمنتي في حالة سكون.

ب - معامل الاستقرارية S_p :

ومن المهم جدا للحفاظ على جودة عمليات السمنتة، أن تحافظ الرغوة الإسمنتية المتشكلة على استقرارها دون أن ينفصل الطور الغازي عن السائل، وذلك خلال فترة انتظار التصلب. ولذلك تم اقتراح اختبار آخر للسائل الإسمنتي الرغوي، وهو معامل الاستقرارية، الذي يحدد مدى انخفاض مستوى الخليطة الإسمنتية الرغوية بعد تجمدها (في نهاية فترة الشك). ويعطى معامل الاستقرارية بالعلاقة:

$$Sp = \frac{h_1}{h_2} \qquad (2\text{-}5)$$

حيث إن :

h_1 – ارتفاع مستوى السائل الإسمنتي الرغوي في نهاية فترة الشك (بعد التصلب) ، (m).

h_2 - ارتفاع مستوى السائل الإسمنتي الرغوي بعد التحضير مباشرةً , (m).

وتقاس S_p في وعاء زجاجي قياسي($d = 25-30\ \ mm$ $h = 250-300\ \ mm$.)،

مدرج بدقة ($1\ \ mm^3$)، ويستخدم أيضا لتحديد الثباتية الترسيبية لسوائل الحفر والسوائل الإسمنتية.

ج - درجة تهوية الخليطة الإسمنتية الرغوية:

إن درجة إشباع الخليطة الإسمنتية بالغاز (درجة التهوية) تحدد بالعلاقة الآتية:

$$\alpha_g = \frac{\rho_c - \rho_{fc}}{\rho_{fc} - \rho_a} \qquad (3\text{-}5)$$

حيث إن:

ρ_c – كثافة الخليطة الإسمنتية العادية (دون تهوية)، (kg/m^3).

ρ_{fc} - كثافة الخليطة الإسمنتية الرغوية، (kg/m^3).

ρ_a – كثافة الهواء بالشروط السطحية، وتعطى بالعلاقة:

$$\rho_a = \frac{p_o}{Z.R.T.g} = 1.205 kg/m^3 \qquad (4\text{-}5)$$

P_0 – الضغط الجوي، (Pa).

T- درجة حرارة السائل الإسمنتي الرغوي، (كالفن).

Z- معامل انضغاطية الغاز المستخدم للتهوية.

R- الثابتة العامة للغازات

g- تسارع الجاذبية الأرضية (m/s^2)

ويختار تركيب السائل الإسمنتي الرغوي بحيث يحقق الشرط:

$$\alpha_g \geq \alpha_\pi \qquad (5\text{-}5)$$

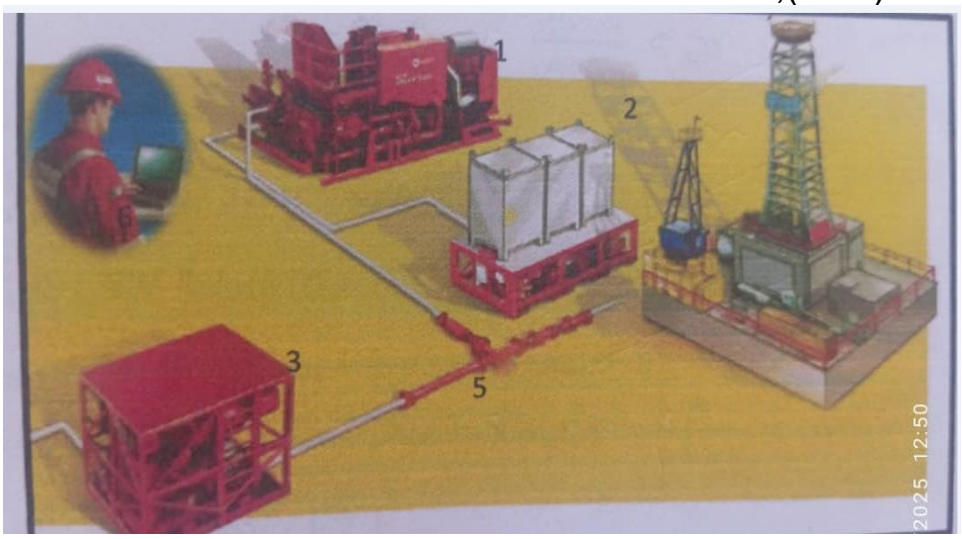
حيث إن:

α_g - درجة إشباع السائل الإسمنتي الرغوي بالغاز محسوبة بالشروط السطحية من الضغط ودرجة الحرارة.

α_π- درجة إشباع السائل الإسمنتي الرغوي بالغاز محسوبة بالشروط الطبقية (P,T).

5-4- المعدات المستخدمة في عملية السمنتة الرغوية:

يمكن التعرف على مجموعة المعدات المستخدمة لإنجاز عملية إسمنتية رغوية على البئر من خلال الشكل (5-1),



الشكل (5-1): مخطط واقعي لتوزع معدات تنفيذ عملية إسمنتية رغوية يتم تطبيقها من قبل شركة Halliburton .

ويظهر على هذا المخطط الوحدات الآتية:

5-4-1 – وحدة ضخ الإسمنت (Cementing unit):

هذه الوحدة تستخدم نظام التحكم التلقائي بالكثافة (Automatic density control) من أجل إنتاج سائل ثابت عند الكثافة المرغوبة, وهي تتحكم بوحدتي الحقن والنتروجين, وذلك بالاعتماد على النسبة المئوية لإنتاج السائل الإسمنتي.

5-4-2 – وحدة النتروجين (Nitrogen unit):

تستخدم هذه الوحدة نظام التحكم التلقائي للتحكم الدقيق بنسبة الهيجان (الاضطراب) للنتروجين, وذلك لمطابقة المواصفات الخاصة بالعمل. ويمكن تقسيم وحدة النتروجين إلى قسمين, وذلك حسب طريقة الحصول على هذا الغاز:

1 – النتروجين البارد (الجاهز):

ويكون في حالة سائلة ومحفوظ في خزانات, وهو أحد النواتج الثانوية للصناعات الكيميائية, وأهمها عمليات التكسير والتحسين التي تتم على النفط الخام في مصافي التكرير, حيث ينتج غاز N_2 بكميات كبيرة, ويخزن في خزانات, ويمكن نقله في حالته السائلة. من أهم مميزات هذا النوع نقاوته, التي تصل إلى 99% , ولذلك يعتبر أهم مصادر الغاز المرشحة للاستخدام في عمليات الحفر (هنا العمليات الإسمنتية الرغوية), وذلك في حال توفره بالكميات المطلوبة, كما أن تكاليف نقله إلى وحدة الحفر غير كبيرة.

وفي هذه الحالة فإن المعدات المستخدمة هي :

- معدات نقل N_2 إلى منصة الحفر.
- محول النتروجين, الذي يضخ السائل تحت ضغط قبل تحوله إلى غاز.
- خزانات عمل, وخزانات إضافية, بالإضافة إلى الأنابيب والخراطيم والمقاييس.

2 - النتروجين المولد:

ويمكن الحصول عليه من الهواء الجوي, وذلك باستخدام نظام توليد الهيدروجين, وهو عبارة عن نظام فلترة, يتم فيه استخلاص غاز N_2 من الهواء الجوي, أي فصله عن الأكسجين O_2 , وغاز ثاني أكسيد الكربون CO_2 , وبخار الماء H_2O .

إن فعالية مولد النتروجين قد تصل إلى 50% , أي أنه إذا كانت كمية النتروجين المطلوبة $1m^3$ /s فإن كمية الهواء الجوي التي نحتاجها هي $2\ m^3/s$, وإذا كانت استطاعة ضواغط الهواء $0.5\ m^3$ /s , فإننا نحتاج إلى أربعة ضواغط, والمعدات التي نحتاجها هنا هي:

- ضواغط, مهمتها سحب الهواء الجوي إلى داخل المولد, وقد نحتاج إلى 3 أو 4 ضواغط , وذلك حسب كمية النتروجين المطلوبة.
- مولد النتروجين.
- معزز Booster , ويقوم بدور حقن غاز النتروجين.
- أنابيب ومقاييس وصمامات.
- منقي النتروجين.

ورغم أن هذه المعدات قد حلت مشكلة متاعب النقل للنتروجين الجاهز, إلا أنها ترافقت مع سلبيات أخرى, منها: أن هذا الكم الكبير من المعدات يأخذ مساحةً كبيرة حول منصة وحدة الحفر, وهذا الأمر مزعج, وخاصةً في منصة الحفر البحرية.

3 – نتروجين الغازات العادمة:

إن الغازات العادمة التي تطلقها المحركات تحتوي على نسبة كبيرة من غاز النتروجين, ويمكن الاستفادة منها في تلبية متطلبات السمنتة الرغوية. ولهذا الغرض تتم تغذية المحرك بالبروبان, فينتج عن عمل المحرك غازات عادمة درجة حرارتها 900 Fº , وتتألف من النتروجين N_2 بنسبة % 75 , وثاني أكسيد الكربون CO_2 بنسبة % 10 , وبخار الماء H_2O بنسبة % 19 , والأكسجين O_2 بنسبة % 1 , والتي بدورها تمرّر عبر محفز بهدف تقليل نسبة الأكسجين, الذي يسبب مشاكل تآكل كبيرة.

5-4-3 – وحدة الحقن (Injection unit):

تضيف هذه الوحدة مزيج محرضات الرغوة والمشتتات والمنشطات .

5-4-4 – مولد الرغوة أو مضخة الرغوة (T) (Foam unit):

وتعتبر من أهم الأجزاء في هذه المنظومة, حيث تقوم بإضافة طاقة إلى السائل لخلق رغوة مستقرة ومتوازنة. ويظهر الشكل (7-2) الأجزاء المكونة لهذا المولد, حيث يتم من خلال الفتحات ذر أو رش النتروجين بشكل منتظم داخل السائل الإسمنتي النظيف, وبضغط أعلى من الضغط الذي يدخل به السائل الإسمنتي النظيف. وهذه التقنية تؤمن عدم رجوع النتروجين باتجاه مضخته. ويحتاج مولد الرغوة إلى ضغط خلفي مقداره 2500 psi .



الشكل (5-2) الأجزاء المكونة لمولد (مضخة) الرغوة.

5-4-5 – الحاسوب النقال (Lap top computer):

يقوم هذا الحاسوب بجمع المعلومات عن عملية السمنتة, ويتصل بكوابل مع كل وحدة, ويسمح بذلك للفنيين بالعودة والقيام بمحاكاة بئريه، مستخدمين برامج معلوماتية خاصة, تستخدم بشكل مباشر المعلومات البئرية الحقيقية.

إن عملية عزل المجالات (The zone seal) المختلفة في البئر تعتمد على نظام أتمتة متكامل وشامل يضمن سير عملية السمنتة بشكل متواصل وموافق للتصميم الهندسي الموضوع. ولإعطاء أفضل النتائج فقد تمت برمجة وحدات التحكم لكل قسم من الأقسام (خلط السائل الإسمنتي, حقن المنشطات السطحية, حقن النتروجين) بشكل مسبق اعتماداً على نتائج تم استخلاصها من برامج حاسوبية.

إن جميع المعدات تم ربطها ووصلها مع بعضها البعض بحيث تعمل بشكل متوافق مع نسبة إنتاج السائل الإسمنتي, وبهذا لا يوجد اعتماد على الإشارات اليدوية والتصحيحات الشفهية, كما يتم الحفاظ على توازن واحد في كل شيء.

5-5- تكنولوجيا سمنتة الآبار باستخدام الخلائط الإسمنتية الرغوية:

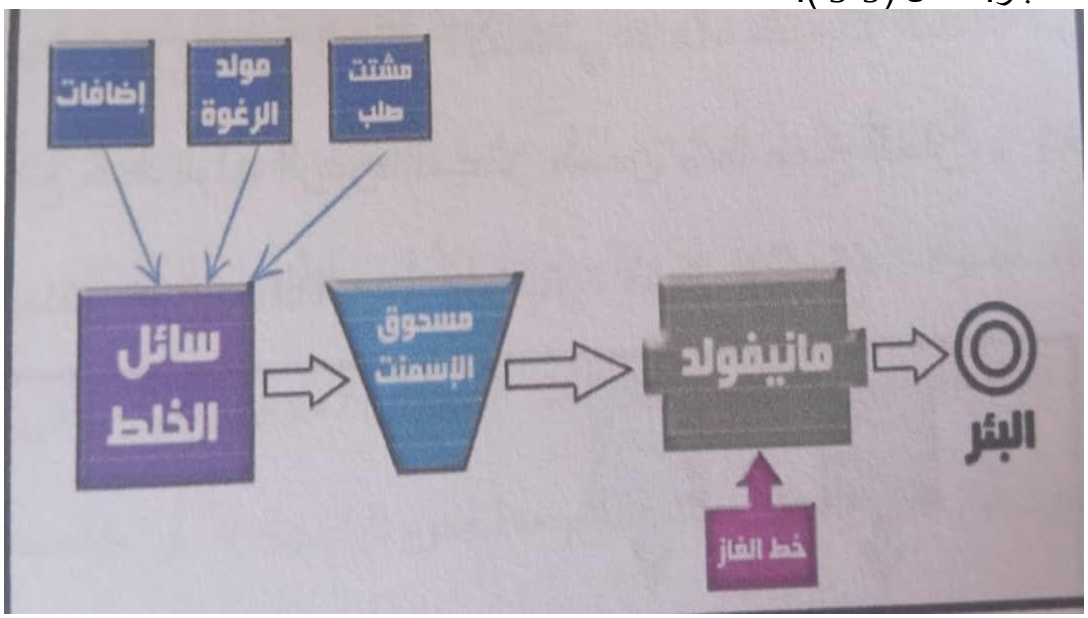
يتم تحضير الخلائط الإسمنتية الرغوية وفق عدة احتمالات, مرتبطة بتوفر الإمكانيات التقنية الضرورية لتنفيذها.

5-5-1- الاحتمالات التكنولوجية لتحضير الخلائط الإسمنتية الرغوية:

يوجد ثلاث احتمالات تكنولوجية لتحضير الخلائط الإسمنتية الرغوية[8,9]:

1 – الاحتمال التكنولوجي الأول:

وفق هذا الاحتمال يتم خلط مولد الرغوة والمشتت الصلب وبقية الإضافات مع الطور السائل ويضخ الخليط إلى وحدة السمنتة (بونكر مع مشتت هيدروليكي وأكريكات), ويضخ السائل الإسمنتي إلى مانيفولد السمنتة, الذي يلتقي مع خط الغاز, ويوجه السائل الإسمنتي الرغوي إلى خط البئر. الشكل (5-3).



الشكل(5-3): مخطط تحضير الخلائط الإسمنتية الرغوية وفق الاحتمال التكنولوجي الأول.

2 - الاحتمال التكنولوجي الثاني:

وفيه يتم التحضير المنفصل للطور الصلب (المسحوق الإسمنتي + المشتت الصلب) والطور السائل (ماء الخلط + إضافات ضبط الخواص), ومن ثم يحقن مولد الرغوة على خط ضخ السائل الإسمنتي الذي يلتقي مع خط الغاز بواسطة مشتت هيدروليكي لتشكيل الرغوة, التي تحقن في البئر، الشكل (5-4).



الشكل (5-4): مخطط تحضير الخلائط الإسمنتية الرغوية وفق الاحتمال التكنولوجي الثاني.

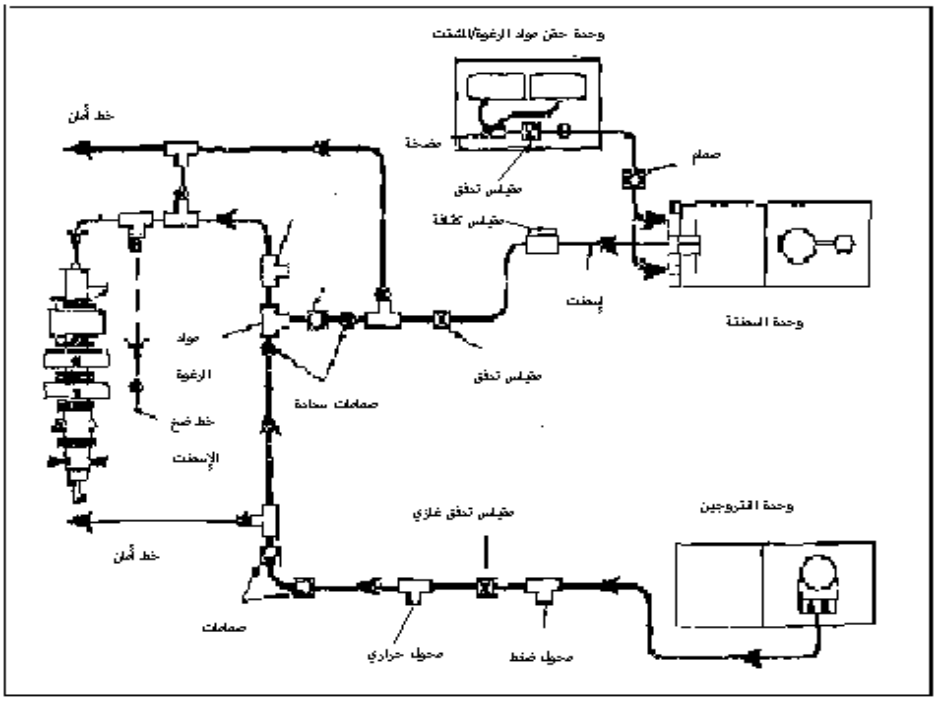
3 - الاحتمال التكنولوجي الثالث:

هنا يضاف المشتت الصلب إلى المسحوق الإسمنتي, أما بقية الإضافات (عدا مولد الرغوة) فتضاف إلى الطور السائل, الذي يضخ إلى وحدة السمنتة, حيث يخرج منها السائل الإسمنتي باتجاه مانيفولد السمنتة. ويتصل المانيفولد مع خط ضخ مولد الرغوة المبعثر ضمن خط ضخ الغاز, ويخرج منه السائل الإسمنتي الرغوي الناتج باتجاه البئر. الشكل (5-5).



الشكل (5-5): مخطط تحضير الخلائط الإسمنتية الرغوية وفق الاحتمال التكنولوجي الثالث.

ويوضح الشكل (5-6) مخطط توزع المعدات لدى إنجاز عملية إسمنتية رغوية مطبقة من قبل شركة Halliburton وفق الاحتمال التكنولوجي الأول.



الشكل (5-6): مخطط تنفيذ عملية إسمنتية رغوية لشركة Halliburton .

وتقترح بعض الدراسات أن يتم تحضير الخلائط الإسمنتية الرغوية في ظروف معملية, حيث يتم التدخل في تركيب الإسمنت الجاف في ورشة الطحن, وإضافة كل تلك المواد الضرورية في المرحلة الأولى لطحن الكلينكر. في هذه الظروف يختار المنشط السطحي والإضافات الصلبة

الأخرى بحيث تكون جافة وقابلة للسحق. بيد أن ذلك قد يتطلب استخدام مطاحن قياسية, أو خاصة بطبيعة المواد المضافة, وكذلك مكابيل تعمل بآلية منتظمة وقابلة للتحكم.

5-5-2 – طرق تنفيذ عملية السمنتة الرغوية:

إن حساب وتنفيذ عملية السمنتة الرغوية يمتاز عن السمنتة العادية بوجود طور غازي انضغاطي مشتت على شكل كرات غازية ضمن طور سائل غير انضغاطي, مما يستوجب تمييز طريقتين لإنجاز عملية السمنتة الرغوية[8]:

1 – السمنتة بكثافة ثابتة للسائل الإسمنتي الرغوي على طول المجال المسمنت, وبالتالي فإن درجة الإشباع بالغاز سوف تكون متغيرة مع العمق كتابع للضغط ودرجة الحرارة.

2 - السمنتة بدرجة إشباع بالغاز ثابتة للسائل الإسمنتي الرغوي على طول المجال المسمنت وبالتالي فإن كثافة هذا السائل سوف تكون متغيرة مع العمق.

إن اختيار أيّ من الطريقتين يشترط وجود معدات ومواد ونوعية محددة للخلطات والمحاليل, وشروط جيولوجية, وهذه الأخيرة تتصف بمعامل شذوذ للضغط الطبقي K_a , ومؤشر ضغط التهريب $K_{П}$, وعندئذ يجب أن تتحقق المتراجحة:

$$K_a < \frac{\rho_{fc}}{\rho_{\omega}} \le K_{П} \qquad (6\text{-}5)$$

حيث إن :

ρ_{ω} - كثافة الماء النقي.

ρ_{fc} - كثافة السائل الإسمنتي الرغوي.

بعد اختيار طريقة السمنتة يوضع مخطط تكنولوجي لتحضير السائل الإسمنتي, ولتنفيذ عملية السمنتة. وكمحطة لتوليد الغاز يمكن استخدام ضواغط مكبسيه ذات ضغط عالٍ, وضواغط ذات ضغط منخفض (بما فيها الضواغط الموجودة على جهاز الحفر).

- إذا كانت السمنتة تتم بالطريقة الثانية: في هذه الحالة يعطى تدفق مضخات أجهزة ضخ السائل الإسمنتي, ومعدات توليد الغاز بقيم حسابية ثابتة.
- إذا كانت السمنتة تتم بالطريقة الأولى: فإن المعامل الحسابي للإشباع بالغاز يبقى ثابتاً مع تغير تدفق محطة توليد الغاز عند بقاء تدفق المضخات ثابتاً, أو بتغيير تدفق المضخات عند تدفق ثابت لمحطة توليد الغاز.

إن الإسمنت الرغوي اللزج والمتمدد ببطء يساعد في تحسين الإزاحة بشكل أكبر مما هو عليه في السوائل الإسمنتية العادية (اللارغوية). وعندما تخرج الرغوة المضخوخة من أسفل مواسير التغليف, فإن السائل المغذّى بالطاقة يبدأ بالتمدد بحيث ترتفع الرغوة في الفراغ الحلقي, بينما ينخفض الضغط الهيدروستاتيكي.

وتفيد المواد المخفضة للتوتر السطحي في صنع الرغوة المستقرة, وهي تساعد في تحسين التصاق الإسمنت مع مواسير التغليف من جهة, ومع جدران البئر من جهة أخرى. والفقاعات المتمددة ذات الرغوة المستقرة لا تندمج مع بعضها البعض, بل تستقر على شكل خلايا صغيرة أو فقاعات ضمن السائل الإسمنتي. إن هذه الفقاعات غير مترابطة داخلياً وغير مندمجة, مما يعطي حجراً إسمنتياً ذا كثافة منخفضة, ونفوذية منخفضة أيضاً, ومتانة عالية.

5-6- حسابات السمنتة الرغوية[8, 9]:

من أجل إجراء حسابات عملية السمنتة الرغوية يفترض تحديد المعايير الأساسية عند درجات إشباع السائل الإسمنتي بالطور الغازي: ثابتة أومتغيرة مع العمق، وتحقق شرط المحافظة على هذه المعايير طيلة فترة السمنتة حتى في شروط التهريب

لذلك لابد من قبول الفرضيات الآتية:

1- السائل الإسمنتي متجانس (فقاعات الغاز موزعة بشكل متجانس في السائل) وبالتالي يجب إهمال انحلالية الغاز في الطور السائل.

2- إهمال تأثير الحرارة الناتجة عن هدرجة الإسمنت.
3- إهمال تباين السرعة النسبية للطورين الغازي والسائل خلال الضخ والإزاحة.
4- سمنتة الجزء السفلي (الذي يغطي الطبقة المنتجة بإسمنت عادي غير رغوي)

5-6-1 – حساب تركيب السائل الإسمنتي الرغوي:

بعد تحضير السائل الإسمنتي الرغوي في المخبر يجب حساب التركيب المفصل لهذا السائل من أجل تنفيذ العملية الإسمنتية على البئر.

1- كثافة السائل الإسمنتي عند محتوى معين من الماء (w/c):

تحسب كثافة السائل الإسمنتي بالعلاقة:

$$\rho_{fc}=\frac{(1+m)\rho_s\rho_f}{\rho_f+m\rho_s} \qquad (7\text{-}5)$$

حيث إن:

m - نسبة كتلة الماء إلى كتلة الإسمنت (w/c).

ρ_s - كثافة الطور الصلب الجاف (المسحوق الإسمنتي + الإضافات الصلبة), (kg/m^3).

ρ_f - كثافة سائل الخلط، (kg/m^3).

كثافة الطور الصلب الجاف ρ_s تحسب بالشكل الآتي:

$$\rho_s=\frac{\rho_{pc}+n_1\rho_1+n_2\rho_2+.....+n_i\rho_i}{1+n_1+n_2+.....+n_i} \qquad (8\text{-}5)$$

حيث إن:

ρ_{pc} - كثافة المسحوق الإسمنتي, (kg/m^3).

$\rho_1,\rho_2,...\rho_i$ - كثافات الإضافات ذات الأرقام : i ... , 2 , 1 التي تضاف إلى الإسمنت , (kg/m^3).

$n_1,n_2.....n_i$ - نسبة كتلة الإضافات i ..., 2, 1 إلى كتلة المسحوق الإسمنتي في واحدة حجم السائل الإسمنتي .

2-كتلة الطور الصلب اللازمة لتحضير واحدة الحجم من السائل الإسمنتي:

تحسب كتلة الطور الصلب اللازمة لتحضير واحدة الحجم من السائل الإسمنتي بالعلاقة الآتية:

$$M_s=\frac{\rho_{fc}}{1+m} \qquad (9\text{-}5)$$

3- كتلة المسحوق الإسمنتي اللازمة لتحضير واحدة الحجم من السائل الإسمنتي:

تحسب كتلة المسحوق الإسمنتي بالعلاقة:

$$M_c=\frac{M_s}{1+n_1+n_2+....+n_i} \qquad (10\text{-}5)$$

4- كميات المواد اللازمة لتحضير الحجم الكلي للسائل الإسمنتي:

آ – كمية المسحوق الإسمنتي (C):

تحسب كمية المسحوق الإسمنتي بالعلاقة:

$$C = K \,.\, M_C \,.\, V_{fc} \quad ; \quad (\ kg\ ) \qquad (11\text{-}5)$$

حيث إن:

K – معامل الهدر عند السمنتة, ويأخذ بالاعتبار ضياع الطور الصلب الجاف عند تعبئة معدات خلط وتحضير السائل الإسمنتي (K = 1.05– 1.1).

ب – كمية المادة المضافة الأولى (M_1):

$$M_1 = n_1.C \quad (\text{Kg}) \qquad (12\text{-}5)$$

ج - كمية المادة المضافة الثانية (M_2):

$$M_2 = n_2.C \quad (\text{Kg}) \qquad (13\text{-}5)$$

د - كمية المادة المضافة رقم (i):

$$M_i = n_i.C \qquad (14\text{-}5)$$

5- حجم سائل الخلط (m^3):

يحسب حجم سائل الخلط بالعلاقة:

$$V_f = \frac{m(c + M_1 + M_2 + ... + M_i}{K.\rho_f} \qquad (15\text{-}5)$$

6- عدد أجهزة الضخ اللازم لإجراء عملية السمنتة:

ويحسب بالعلاقة:

$$i_c = \frac{C + M_1 + M_2 + ... + M_i}{\rho_{TS}.V_{CM}} \qquad (16\text{-}5)$$

حيث إن:

ρ_{TS} - الكتلة النوعية للمزيج الإسمنتي (إسمنت + إضافات صلبة)(kg/m^3).

V_{CM}- سعة البونكر في جهاز خلط واحد, (m^3).

2-6-7 – حساب بارامترات نظام السمنتة:

ذكرنا سابقاً أن السمنتة الرغوية تتم بإحدى طريقتين[8 ,7]:

1- السمنتة بدرجة متغيرة للإشباع بالغاز.

2- السمنتة بدرجة ثابتة للإشباع بالغاز.

ولذلك فإن بارامترات نظام السمنتة تختلف حسب الطريقة المتبعة في إنجاز هذه العملية.

1-2-6-5 – السمنتة بدرجة متغيرة للإشباع بالغاز:

آ – بدون وجود عمود من السائل الإسمنتي النظيف في الجزء العلوي من الفراغ الحلقي(الشكل 5-7):

إن الشرط الذي يستبعد عنده تهريب المزيج الغازي – السائل في أكثر الطبقات ضعفاً هو:

$$P_L = \rho_{fc}.g.L + P_0 \qquad (17\text{-}5)$$

حيث إن:

P_L- ضغط التهريب (Pa).

P_o - الضغط الجوي (Pa).

g – تسارع الجاذبية الأرضية (m/s^2).

L – العمق المطابق لغطاء الطبقة المؤدية للتهريب (m).

ρ_{fc} - كثافة السائل الإسمنتي الرغوي (kg/m^3).

وبالتالي فإن كثافة السائل الإسمنتي الرغوي التي يستبعد عندها التهريب هي:

$$\rho_{fc} = \frac{P_L - P_0}{g.L} \qquad (18-5)$$

- درجة تشبع السائل الإسمنتي بالغاز مع العمق تعطى بالعلاقة

$$\alpha_{(L)} = \frac{Q_g}{Q_c} = \frac{\rho_c - \rho_{fc}}{\rho_{fc} - \frac{\rho_{fc}.g.L + P_0}{\tilde{Z}.R.\tilde{T}.g}} \times \frac{\rho_{fc}.g.L + P_0}{\tilde{Z}.R.\tilde{T}.g.\rho_g} \quad (19\text{-}5)$$

حيث إن:

Q_g - الكمية المصروفة من الغاز (الهواء) في الشروط العادية, (m^3/s).

Q_c- الكمية المصروفة من السائل الإسمنتي في الشروط العادية, (m^3/s).

ρ_c - كثافة السائل الإسمنتي العادي (دون تهوية), (kg/m^3).

ρ_{fc} - كثافة السائل الإسمنتي الرغوي، (kg/m^3).

ρ_g- كثافة الغاز في الشروط العادية، (kg/m^3).

$\tilde{Z}$ - القيمة الوسطية لمعامل انضغاطية الغاز.

$\tilde{T}$ - درجة الحرارة الوسطية لعمود البئر، ($^{\circ}K$).

R – الثابتة العامة للغازات.

- حجم الغاز الموجود في السائل الإسمنتي الرغوي في مجال التغذية (التشبع بالهواء): ويحسب بالعلاقة:

$$V_g = \frac{F_a \times \tilde{Z}.R.\tilde{T}\ (\rho_c - \rho_{fc})}{\rho_{fc}} \ln \left| \frac{P_0 - \tilde{Z}.R.\tilde{T}.g.\rho_c}{P_{\Pi} - \tilde{Z}.R.\tilde{T}.g.\rho_c} \right| \quad (20\text{-}5)$$

حيث إن : F_a - مساحة مقطع الفراغ الحلقي للبئر, (m^2).

- حجم السائل الإسمنتي في الفراغ الحلقي للبئر:
ويحسب بالعلاقة:

$$V_c = V_a - V_g \quad (21\text{-}5)$$

حيث إن:

V_a - حجم الفراغ الحلقي للبئر,(m^3).

V_g- حجم الغاز الموجود في السائل الإسمنتي (m^3).

ويكون مقدار التوفير في المسحوق الإسمنتي على حساب استخدام السائل الإسمنتي الرغوي بدلاً من السائل الإسمنتي العادي:

$$C = (V_a - V_c)\rho_c \quad (22\text{-}5)$$

- زمن الضخ t للسائل الإسمنتي الرغوي في البئر عند التدفق الثابت للضواغط, والتدفق المتغير لأجهزة ضخ السوائل الإسمنتية:

ويحسب بالعلاقة:

$$t = \frac{F_a(\rho_c - \rho_{fc})}{Q_g.\rho_{fc}.\rho_g} \left[-\rho_{fc}.L - \rho_c.\tilde{Z}.R.\tilde{T}.\ln \frac{\rho_c \tilde{Z}.R.T.g - (\rho_{fc}.g.L + P_o}{\rho_c.\tilde{Z}.R.\tilde{T}.g - P_o} \right] \quad (23\text{-}5)$$

- تغير تدفق مضخات أجهزة الضخ (الأكريكات) Q_c مع العمق:

ويحسب بالعلاقة:

$$Q_c(L) = \frac{Q_g.\tilde{Z}.R.\tilde{T}.g.\rho_g(\rho_{fc} - \frac{\rho_{fc}.g.L + P_o}{\tilde{Z}.R.T.g})}{(\rho_c - \rho_{fc})(\rho_{fc}.g.L + P_o} \qquad (24\text{-}5)$$

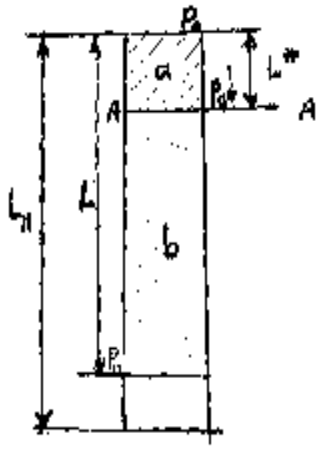
ب – عند وجود عمود من السائل الإسمنتي النظيف في الجزء العلوي من الفراغ الحلقي, والذي يضمن استقرار السائل الإسمنتي الرغوي, والبارامترات الفيزيائية المطلوبة للحجر الإسمنتي المتشكل منه:

- ارتفاع عمود السائل الإسمنتي النظيف L^* :
ويمكن حسابه بالعلاقة:

$$L^* = \frac{P_a - P_o}{\rho_c.g} \qquad (25\text{-}5)$$

الضغط P_a في المقطع A – A بين عمودي السائل الإسمنتي النظيف والسائل الإسمنتي الرغوي (الشكل 5-8) يعطى بالعلاقة:

$$P_a = \frac{X - \sqrt{X^2 - 4Y}}{2} \qquad (26\text{-}5)$$



الشكل (5-8)

حيث إن :

$$X = L.\rho_c.g + P_o + \tilde{Z}.R.\tilde{T}.g.\rho_c - \frac{\rho_c}{\alpha.\rho_g}(P_\Pi - L.\rho_c.g - P_o) \qquad (27\text{-}5)$$

$$Y = P_\Pi.\tilde{Z}.R.\tilde{T}.g.\rho_c \qquad (28\text{-}5)$$

- الكثافة المطلوبة للسائل الإسمنتي الرغوي:

$$\rho_{fc} = \frac{P_\Pi - P_a}{(L - L^*).g} \qquad (29\text{-}5)$$

- درجة تشبع السائل الإسمنتي بالغاز مع العمق في الشروط العادية التي تضمن استقرار السائل الإسمنتي الرغوي والبارامترات الفيزيائية المطلوبة للحجر الإسمنتي المتشكل منه:

تحسب درجة تشبع السائل الإسمنتي بالغاز مع العمق بالعلاقة:

$$\alpha(L)=\frac{\rho_c-\rho_{fc}}{\rho_{fc}-\frac{\rho_{fc}.g(L-L^*)+\mathrm{P}_a}{\tilde{Z}.R.\tilde{T}.g}}.\frac{\rho_{fc}.g(L-L^*)+\mathrm{P}_a}{\tilde{Z}.R.\tilde{T}.g.\rho_g} \qquad (30\text{-}5)$$

- تشبع السائل الإسمنتي بالغاز محسوبة في شروط الضغط تحت عمود السائل الإسمنتي النظيف درجة, والتي تضمن استقرار السائل الإسمنتي الرغوي, والبارامترات الفيزيائية المطلوبة للحجر الإسمنتي المتشكل منه:

$$\alpha_{\mathrm{P}}=\frac{\rho_c-\rho_{fc}}{\rho_{fc}-\frac{\mathrm{P}_a}{\tilde{Z}.R.T.g}} \qquad (31\text{-}5)$$

- حجم الغاز الموجود في السائل الإسمنتي الرغوي في مجال التغذية (التشبع بالهواء):
يحسب حجم الغاز الموجود في السائل الإسمنتي بالعلاقة:

$$V_g=\frac{F_a.\tilde{Z}.R.\tilde{T}(\rho_c-\rho_{fc})}{\rho_{fc}}\ln\left|\frac{\mathrm{P}_a-\tilde{Z}.R.\tilde{T}.g.\rho_c}{\mathrm{P}_{\Pi}-\tilde{Z}.R.\tilde{T}.g.\rho_c}\right| \qquad (32\text{-}5)$$

- زمن ضخ السائل الإسمنتي الرغوي في البئر: ويحسب بالعلاقة الآتية (33-5):

$$t=\frac{F_a(\rho_c-\rho_{fc})}{Q_g.\rho_{fc}.\rho_g}\left\{-\rho_{fc}(L-L^*)-\rho_c.\tilde{Z}.R.\tilde{T}.\ln\frac{\rho_c.\tilde{Z}.R.\tilde{T}.g-\left[\rho_{fc}.g(L-L^*)+\mathrm{P}_a\right]}{\rho_c.\tilde{Z}.R.\tilde{T}.g-\mathrm{P}_a}\right\}$$

- تغير تدفق مضخات أجهزة الضخ الإسمنتية (الأكريكات) بالعلاقة مع عمق البئر:

يمكن حساب تغير تدفق المضخات بالعلاقة:

$$Q_c(L)=\frac{Q_g\tilde{Z}.R.\tilde{T}.g\rho_g\left[\rho_{fc}-\frac{\rho_{fc}.g\left(L-L^*\right)+\mathrm{P}_a}{\tilde{Z}.R.\tilde{T}.g}\right]}{\left(\rho_c-\rho_{fc}\right)\left[\rho_{fc}.g\left(L-L^*\right)+\mathrm{P}_a\right]} \qquad (34\text{-}5)$$

5-6-2-2 – السمنتة بدرجة ثابتة للإشباع بالغاز:

آ – بدون وجود عمود من السائل الإسمنتي النظيف في الجزء العلوي من الفراغ الحلقي:

- درجة الإشباع بالغاز للسائل الإسمنتي تعطى بالعلاقة:

$$\alpha=\frac{\rho_c}{\rho_g}.\frac{\frac{\mathrm{P}-\mathrm{P}_o}{\rho_c.g}-L}{L-\tilde{Z}.R.\tilde{T}.\ln(\frac{\mathrm{P}}{\mathrm{P}_o})} \qquad (35\text{-}5)$$

حيث إن : P - ضغط عمود السائل الإسمنتي الرغوي مع العمق L .

- عمق هبوط مستوى السائل الإسمنتي الرغوي في مجال السمنتة نتيجة انفصال فقاعات الغاز في الجزء غير المستقر من السائل الإسمنتي L_d (5-36):

$$L_d = \frac{1}{1+\frac{\rho_c}{\alpha.\rho_g}}.\tilde{Z}.R.\tilde{T}.\ln\frac{\alpha_{\text{P}}.\tilde{Z}.\tilde{T}}{\alpha_{\text{P}}.Z_o.T_o}+\frac{1}{g}\left(\frac{\alpha_{\text{P}}.\tilde{Z}.\tilde{T}}{\alpha_{\text{P}}.Z_o.T_o}-\text{P}_o\right)\left(\frac{1}{\alpha.\rho_g+\rho_c}-\frac{1}{\rho_c}\right)$$

حيث إن:

Z_o- معامل انضغاطية الغاز في الشروط العادية .

T_o - درجة الحرارة العادية (Kº) .

- حجم الغاز الموجود في السائل الإسمنتي يعطى بالعلاقة:

$$V_g = F_a.\tilde{Z}.R.\tilde{T}.\frac{\eta}{\eta+1}\ln\frac{\text{P}_\Pi}{\text{P}_o} \qquad (37\text{-}5)$$

حيث إن :

η - المعامل الكتلي للتشبع بالغاز , ويعطى بالشكل :

$$\eta = \alpha\frac{\rho_g}{\rho_c} \qquad (38\text{-}5)$$

- زمن ضخ السائل الإسمنتي الرغوي عند تدفق ثابت لمضخات أجهزة الضخ الإسمنتية والضواغط يحسب بالعلاقة:

$$t = \frac{F_a\left(1-\tilde{Z}.R.\tilde{T}.\frac{\eta}{\eta+1}\ln\frac{\text{P}}{\text{P}_o}\right)}{Q_c} \qquad (39\text{-}5)$$

ب - عند وجود عمود من السائل الإسمنتي النظيف في الجزء العلوي من الفراغ الحلقي, والذي يضمن استقرار السائل الإسمنتي الرغوي والبارامترات الفيزيائية المطلوبة للحجر الإسمنتي المتشكل منه:

- درجة تشبع السائل الإسمنتي بالغاز, التي تضمن استقرار السائل الإسمنتي الرغوي, والبارامترات الفيزيائية المطلوبة للحجر الإسمنتي المتشكل منه تحسب بالعلاقة:

$$\alpha = \frac{\rho_c}{\rho_g}.\frac{\frac{\text{P}_\Pi-\text{P}_a}{\rho_c.g}-\left(L-L^*\right)}{\left(L-L^*\right)-\tilde{Z}.R.\tilde{T}.\ln\frac{\text{P}_\Pi}{\text{P}_a}} \qquad (40\text{-}5)$$

الضغط P_a في المقطع A– A بين عمودي السائل الإسمنتي النظيف والسائل الإسمنتي الرغوي (الشكل 5-10) يتحدد بالحل المشترك على الكومبيوتر للمعادلات (5-41) و (7-42) على الشكل الآتي (7-41):

$$\frac{P_{\Pi} - P_o - L.\rho_c.g}{P_o - P_a + L.\rho_c.g - \rho_c.g.\tilde{Z}.R.\tilde{T}.\ln\left(\frac{P_{\Pi}}{P_a}\right)} = \alpha_P^{\min} \frac{P_a}{\tilde{Z}.R.\tilde{T}.g.\rho_c}$$

$$\rho_c.g.\tilde{Z}.R.\tilde{T}.\ln P_a - 2P_a + P_o + L.\rho_c.g - \rho_c.g.\tilde{Z}.R.\tilde{T}.\ln P_{\Pi} + \rho_c.g.\tilde{Z}.R.\tilde{T} = 0 \quad (42\text{-}5)$$

حيث إن :

$\alpha_P^{\min}$- درجة التشبع الصغرى بالغاز للسائل الإسمنتي, محسوبة في شروط الضغط الجوي, والتي تضمن استقرار السائل الإسمنتي الرغوي والبارامترات الفيزيائية المطلوبة للحجر الإسمنتي المتشكل منه.

- **كثافة السائل الإسمنتي الرغوي الواقع تحت عمود السائل الإسمنتي النظيف حسب بالشكل الآتي:**

آ – عند المعامل الكتلي المحدد للإشباع بالغاز η :

تحسب كثافة السائل الإسمنتي الرغوي في هذه الحالة بالعلاقة:

$$\rho_{fc} = \frac{\eta}{\eta + \frac{P_a}{\tilde{Z}.R.\tilde{T}.g.\rho_c}}\left(\frac{P_a}{\tilde{Z}.R.T.g} - \rho_c\right) + \rho_c \qquad (43\text{-}5)$$

ب – عند القيمة المحسوبة ل $\alpha_P^{\min}$:

وهنا تحسب كثافة السائل الإسمنتي الرغوي بالعلاقة:

$$\rho_{fc} = \frac{\rho_c + \frac{\alpha_P^{\min}.P_a}{\tilde{Z}.R.\tilde{T}.g}}{\alpha_P^{\min} + 1} \qquad (44\text{-}5)$$

- **حجم الغاز الموجود في السائل الإسمنتي في مجال التشبع بالغاز:**

يمكن حساب حجم الغاز الموجود في السائل الإسمنتي بالعلاقة:

$$V_g = F_a.\tilde{Z}.R.\tilde{T}.\frac{\eta}{\eta+1}\ln\frac{P_{\Pi}}{P_a} \qquad (45\text{-}5)$$

- **زمن ضخ السائل الإسمنتي الرغوي في البئر:**

ويحسب بالعلاقة:

$$t = \frac{F_a\left[\left(L - L^*\right) - \tilde{Z}.R.\tilde{T}\frac{\eta}{\eta+1}\ln\frac{P_{\Pi}}{P_a}\right]}{Q_c} \qquad (46\text{-}5)$$

الفصل السادس
دراسة إمكانية استخدام الخلائط الإسمنتية الرغوية في الحقول السورية

6-1- مقدمة :

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 ، وعلى عملية إصلاح وتحسين الآبار .

حيث أنه مع ازدياد أعماق الحفر تتفاقم مشكلة تهريب سائل الحفر , وبالتالي تهريب السائل الإسمنتي وذلك أثناء عزل الطبقات والتأثير السلبي على الطبقات المنتجة(ولاسيما الطبقات ذات المؤشرات الخزنية السيئة والضغط الطبقي المنخفض), وفي هذه الحالات فإن السمنتة التقليدية (سواء باستخدام السوائل الإسمنتية ذات الكثافة العادية أو السوائل الإسمنتية المخففة) لن تعطي نتائج إيجابية بالشكل الذي يلبي المتطلبات المرجوة منها .

ومع استخدام تكنولوجيا السمنتة على مرحلتين (أو أكثر) قد حل الكثير من المشاكل السابقة بشكل جزئي, إضافة إلى التغلب على مشكلة عدم وصول السائل الإسمنتي إلى الارتفاعات المقررة خلف مواسير التغليف لكن هذه التكنولوجيا أصبحت لا تلبي جميع المتطلبات المرجوة منها في ظل وجود أساليب وطرق جديدة أقل كلفة دون الإساءة إلى الطبقات النفطية . ومن أهم هذه الأساليب استخدام خلائط إسمنتية مخففة جداً (خلائط إسمنتية رغوية) لسمنتة المجالات التي سببت مشاكل أثناء حفرها, ذات كثافة تساوي كثافة سائل الحفر الذي حفرت به أو أقل.

6-2-هدف الدراسة:

تهدف هذه الدراسة إلى دراسة إمكانية استخدام الخلائط الإسمنتية الرغوية في الحقول السورية والتي تؤدي إلى:

1- حل مشكلة تهريب السائل الإسمنتي أثناء عملية السمنتة والذي ينعكس إيجاباً على تلوث المجال المنتج برواشح سائل الإسمنت و في تسهيل عمليات إحياء الآبار (تقليل زمن إحياء البئر) المنتجة من الطبقات ذات الخواص الخزنية السيئة.

2- توفر إمكانية تكنولوجية لتنفيذ عملية سمنتة الآبار العميقة بمرحلة واحدة وبالتالي الاستغناء عن صمام المرحلتين .

3-التقليل من استهلاك الإسمنت وذلك بفضل وجود فقاعات من الغاز في تركيب السائل الإسمنتي الرغوي وما يرافق ذلك من اختصار في عمليات الضخ وتوفير في حجم العمل والطاقة المستهلكة.

4-التقليل من الكلفة العالية لعمليات السمنتة الإصلاحية حيث أن الفشل في انجاز عملية عزل جيدة لمواسير التغليف نتيجة تهريب السائل الإسمنتي يتميز بكلفة عالية جداً (يمكن أن تصل إلى 140$ مليون دولار سنوياً مع حوالي 12% تنفق على الإسمنت وإضافات الإسمنت).

6-3- تقييم الواقع الحقلي [9,11] :

من خلال تقييم الواقع الحقلي لبعض الآبار في حقول السلسلة التدمرية نلاحظ:

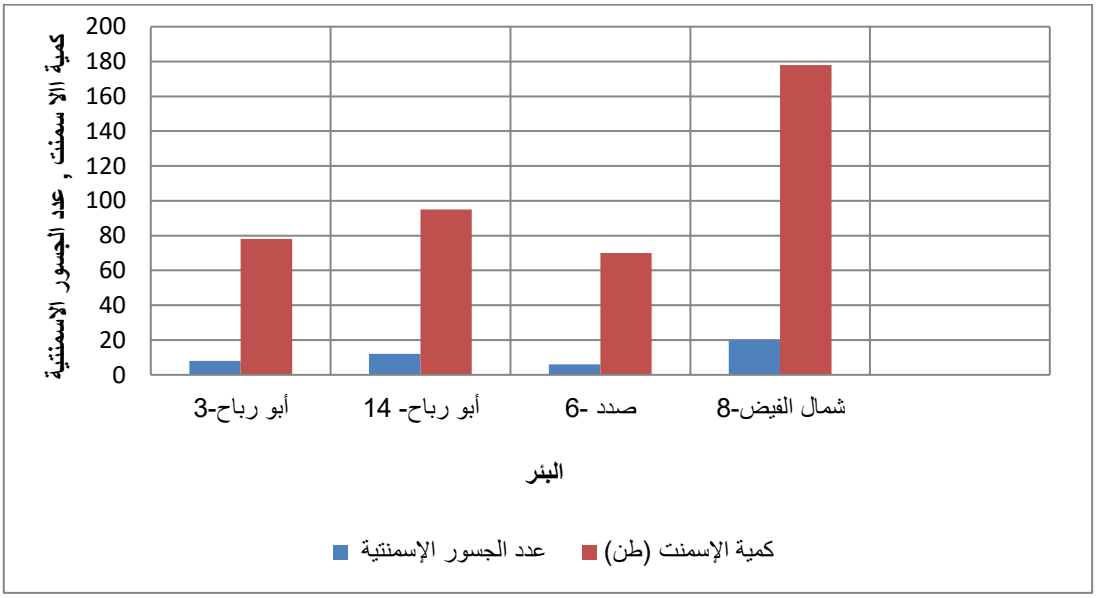
1- تعاني معظم آبار حقول المنطقة الوسطى من مشكلة التهريب حيث يتكرر صب الجسر الإسمنتي أكثر من مرة وكذلك أثناء السمنتة مما أدى إلى عدم وصول السائل الإسمنتي إلى الارتفاع المقرر في الفراغ الحلقي في المرحلتين السطحية والوسطية الأولى.

2- معظم الآبار التي حفرت في حقول المنطقة الوسطى فقد تم تطبيق طريقة السمنتة على مرحلتين تجنباً لحدوث تهريب شديد للسائل الإسمنتي في المرحلة الوسطية والتي تغطي كامل طبقات الكامشوكا والسرجيلو) وكذلك في المرحلة الإنتاجية وكذلك الكوراشينا أنهيدريت، وطبقة الكوراشينا دولوميت التي تشكل الهدف النهائي من الحفر

3- شهدت آبار حقول المنطقة الوسطى استهلاكاً كبيراً للإسمنت نتيجة تهريب السوائل الإسمنتية وكذلك أثناء صب الجسور الإسمنتية [11]، ونبين في الجدول (6-1) عدد الجسور الإسمنتية وكميات الإسمنت المستهلكة لدى إنجاز بعض الابار في حقول المنطقة الوسطى.

الجدول (6-1) : عدد الجسور الإسمنتية وكميات الإسمنت المستهلكة لدى إنجاز بعض الابار في حقول المنطقة الوسطى.

البئر	أبو رباح 3	أبو رباح 14	صدد6	شمال الفيض 8
استهلاك الإسمنت Tonf	78	95	70	178
عدد الجسور الإسمنتية	8	12	6	20



الشكل (6-1) عدد الجسور الإسمنتية وكميات الإسمنت المستهلكة لدى إنجاز بعض الابار في حقول المنطقة الوسطى.

4- إن عمليات السمنتة العادية تتم بمرحلتين دون وصول السائل الإسمنتي للمرحلة الثانية إلى السطح حيث أظهرت قياسات ترابط الإسمنت (CBL)عدم وجود إسمنت خلف مواسير التغليف الإنتاجية للمرحلة الثانية [11] وهذا لا يتوافق مع التوجهات الحديثة لتكنولوجيا بناء الآبار حيث تتعرض مواسير التغليف في الجزء غير المعزول بالإسمنت للتآكل مع الزمن وبالتالي يجعل هذه الآبار مرشحة لعمليات السمنتة الإصلاحية

6-4-حساب عمليات السمنتة الرغوية لبعض الآبار في حقول المنطقة الوسطى:

- ✓ **بئر أبو رباح-3:**

- نسبة الماء إلى الإسمنت $m = \frac{w}{c} = 0.485$
- كثافة السائل الإسمنتي النظامي: $\rho_{fc} = 1.85\ g/cm^3$
- عمق وصلة المرحلتين : L=2200 m
- مساحة مقطع الفراغ الحلقي : $A_{an} = 0.0221m^2$

1-حساب الضغط الذي يستبعد عنده حدوث تهريب المزيج الغازي

$$P_{2200} = 2200 \times 1100 \times 10 + 1.10^5 = 243 \times 10^5 \ Pa$$

2-نحسب حجم الغاز الموجود في السائل الإسمنتي في مجال التغذية (التشبع) بالغاز باستخدام العلاقة التالية:

$$V_g = \frac{Aan.\check{Z}R\check{T}(\rho_c - \rho_{fc})}{\rho_{fc}} ln \left| \frac{p_0 - \check{Z}R\check{T}.g.\rho_c}{p_{fr} - \check{Z}R\check{T}.g.\rho_c} \right|$$

$$V_g = \frac{0.0221 \times 1 \times 29.27 \times 297\ (1850 - 1100)}{1100} ln$$
$$\frac{10^5 - 1 \times 29.27 \times 297 \times 9.81 \times 1850}{243 \times 10^5 - 1 \times 29.27 \times 297 \times 9.81 \times 1850}$$

$V_g = 21.82\ m^3$

3-حجم السائل الإسمنتي الرغوي في مجال السمنتة الرغوية:

$V_c = V_{an} - V_g = 0.0221 \times 2200 - 21.82 = 26.8 m^3$

4 -حساب كمية الإسمنت اللازمة لتحضير $1\ m^3$ من السائل الإسمنتي

$$q_c = \frac{\gamma_{fc}}{1+m} = \frac{1.85}{1+0.485} = 1.245\ tf/m^3$$

5-حساب كمية الإسمنت للسمنتة العادية :

$$G_C = K.V_g.q_c = 1.05 \times (\ 0.0221 \times 2200) \times 1.245 = 63.5tf$$

ويكون الوفر في كمية الإسمنت نتيجة استخدام السمنتة الرغوية:

$$G_C = K.V_g.q_c = 1.05 \times 21.82 \times 1.245 = 28.5\ tonf$$

- ✓ **<u>أبو رباح -14:</u>**
- ✓ عمق وصلة المرحلتين : L= 1302 m

مساحة مقطع الفراغ الحلقي : $A_{an} = 0.0139 m^2$

1- حساب الضغط عند العمق 1302 m

$$P_{1302} = 1302 \times 1100 \times 10 + 1.10^5 = 144.22 \times 10^5 \ Pa$$

2- نحسب حجم الغاز الموجود في السائل الإسمنتي في مجال التغذية (التشبع) بالغاز بالعلاقة:

$$V_g = \frac{Aan.\check{Z}R\check{T}(\rho_c - \rho_{fc})}{\rho_{fc}} ln \left| \frac{p_0 - \check{Z}R\check{T}.g.\rho_c}{p_{fr} - \check{Z}R\check{T}.g.\rho_c} \right|$$

$$V_g = \frac{0.0139 \times 1.0 \times 29.27 \times 297\ (1850 - 1100)}{1100}$$

$$ln \frac{10^5 - 1.0 \times 29.27 \times 297 \times 9.81 \times 1850}{144.22 \times 10^5 - 1.0 \times 29.27 \times 297 \times 9.81 \times 1850} = 7.84\ m^3$$

3-حساب حجم السائل الإسمنتي في مجال الإشباع بالغاز:

$V_c = V_{an} - V_g = 0.0139 \times 1302 - 7.84 = 10.26\ m^3$

4-حساب كمية الإسمنت للسمنتة العادية :

$$G_C = K.V_g.q_c = 1.05 \times (\ 0.0139 \times 1302) \times 1.245 = 23.7tf$$

5- كمية الإسمنت التي جرى توفيرها هي:

$$G_C = V_g.q_c.k = 7.84 \times 1.245 \times 1.05 = 10.3\ tonf$$

✓ **بئر صدد-6:**

عمق وصلة المرحلتين : L=2212 m

مساحة مقطع الفراغ الحلقي : $A_{an} = 0.0137\ m^2$

1- الضغط عند (2212 m): $P_{2212} = 243.32 \times 10^5\ Pa$

2- نحسب حجم الغاز الموجود في السائل الإسمنتي في مجال التغذية (التشبع) بالغاز بالعلاقة:

$$V_g = \frac{0.0137 \times 1.0 \times\ 29.27 \times\ 297\ (1850 - 1100)}{1100}$$

$$ln\frac{10^5 - 1.0 \times 29.27 \times 297 \times 9.81 \times 1850}{243.32 \times 10^5 - 1.0 \times 29.27 \times 297 \times 9.81 \times 1850} = 13.55m^3$$

3-حجم السائل الإسمنتي في مجال الإشباع بالغاز:

$V_c=V_{an}-V_g=0.0137\times2212-13.55=16.75\ m^3$

4-حساب كمية الإسمنت للسمنتة العادية :

$$G_C = K.V_g.q_c = 1.05 \times (\ 0.0137 \times 2212) \times 1.245 = 39.61tf$$

ويكون الوفر في كمية الإسمنت باستخدام السمنتة الرغوية 17.72 tonf

3- بئر شمال الفيض-8:

عمق وصلة المرحلتين : L=1797 m ,

مساحة مقطع الفراغ الحلقي : $A_{an} = 0.0141\ m^2$

1-الضغط عند (1797 m): $P_{1797} = 197.67 \times 10^5\ Pa$

2- نحسب حجم الغاز الموجود في السائل الإسمنتي في مجال التغذية (التشبع) بالغاز بالعلاقة

$$V_g = \frac{0.0141 \times 1 \times\ 29.27 \times\ 297\ (1900 - 1110)}{1110} ln$$

$$\frac{10^5 - 1 \times 29.27 \times 297 \times 9.81 \times 1850}{197.67 \times 10^5 - 1 \times 29.27 \times 297 \times 9.81 \times 1850}$$

$V_g=12.69\ m^3$

3-حجم السائل الإسمنتي في مجال الإشباع بالغاز:

$V_g=0.0141\times1797-12.69=12.65\ m^3$

-حساب كمية الإسمنت للسمنتة العادية :

$$G_C = K.V_g.q_c = 1.05 \times (\ 0.0141 \times 1797) \times 1.245 = 33.13tf$$

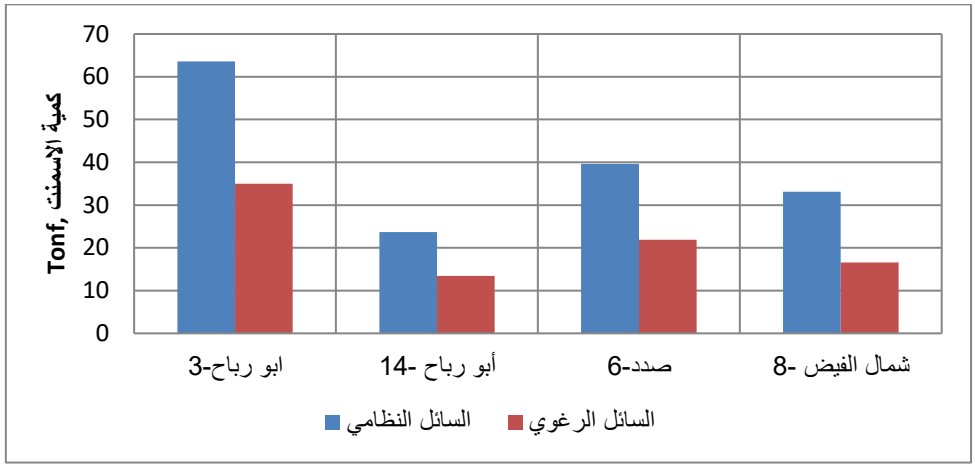
ويكون الوفر في كمية الإسمنت باستخدام السمنتة 16.59 tonf

وفي الجدول (6-2) نبين نتائج حساب عملية السمنتة للمرحلة الإنتاجية لبعض آبار السلسلة التدمرية في حالة السمنتة العادية والسمنتة الرغوية

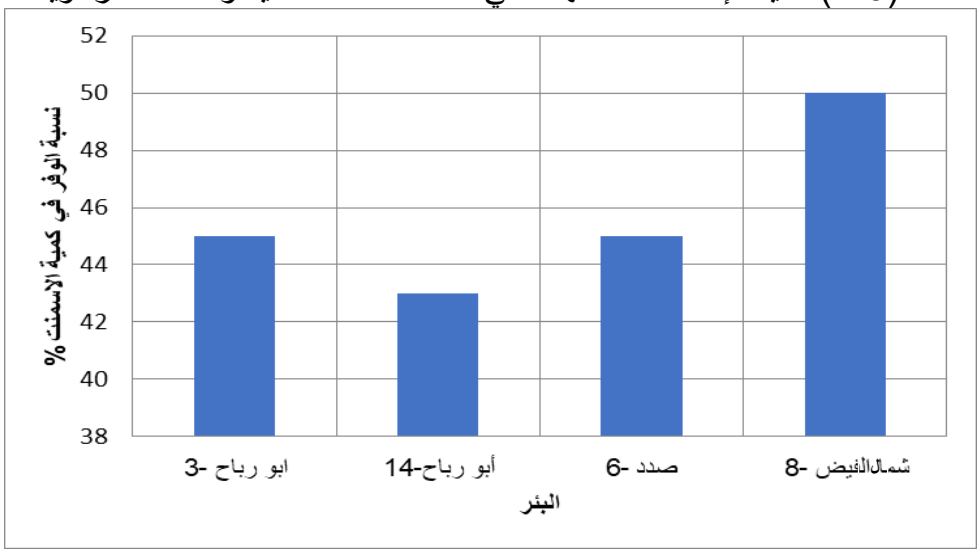
الجدول (6-2) نتائج حساب عملية السمنتة للمرحلة الإنتاجية لبعض آبار حقول المنطقة الوسطى في حالة السمنتة العادية والسمنتة الرغوية

البئر		أبو رباح -3	أبو رباح -14	صدد -6	شمال الفيض-8
عمق المرحلة الإنتاجية,m		2755	2238	3317	2435
عمق وصلة المرحلتين,m		2200	1302	2212	1797
سمنتة عادية على مرحلتين	حجم السائل الإسمنتي m^3	48.62	18.1	30.3	25.34
	كمية الإسمنت Tonf	63.5	23.7	39.61	33.13
سمنتة رغوية مرحلة واحدة	حجم السائل الإسمنتي m^3	26.8	10.26	16.75	12.65
	كمية الإسمنت Tonf	35	13.4	21.89	16.54
	حجم الغاز m^3	21.82	7.84	13.55	12.69
الوفر في كمية الإسمنت Tonf		28.5	10.3	17.72	16.59
النسبة المئوية للوفر في كمية الإسمنت %		%45	%43	%45	%50

وفي الشكل (6-2) نبين كمية الإسمنت المستهلكة في حالة السمنتة العادية(نظامي) والسمنتة الرغوية



الشكل (6-2) كمية الإسمنت المستهلكة في حالة السمنتة العادية والسمنتة الرغوية .



الشكل (6-3) النسبة المئوية للوفر في كمية الإسمنت نتيجة استخدام الخلطة الإسمنتية الرغوية

6-5-مناقشة النتائج وصياغة المقترحات

أولاَ- من خلال دراسة الواقع الحقلي لبعض الآبار في حقول السلسلة التدمرية نلاحظ :

1- أن معظم آبار حقول المنطقة الوسطى تعاني من مشكلة التهريب الكبير للسائل الإسمنتي نتيجة تكرار صب الجسر الإسمنتي لأكثر من مرة وكذلك أثناء عملية السمنتة مما أدى إلى عدم وصول السائل الإسمنتي إلى الارتفاع المقرر في الفراغ الحلقي بالإضافة استهلاك كميات كبيرة من الإسمنت .

2- إن عمليات السمنتة العادية تتم على مرحلتين دون وصول السائل الإسمنتي للمرحلة الثانية إلى السطح وهذا يعرض مواسير التغليف للتآكل مع الزمن وبالتالي الزيادة في الكلفة العالية لعمليات السمنتة الإصلاحية.

ثانياً- من خلال إجراء حسابات عملية السمنتة باستخدام الخلائط الإسمنتية الرغوية على المراحل الإنتاجية لبعض آبار حقول المنطقة الوسطى نلاحظ:

1- توفير 43 % من كمية الإسمنت على الأقل
2- إمكانية سمنتة المراحل الإنتاجية بالكامل سمنتة رغوية مع بقاء جزء سفلي خال من الرغوة.

لذلك نقترح: استخدام الخلائط الإسمنتية الرغوية في سمنتة آبار حقول المنطقة الوسطى والتي تؤدي إلى:

1- حل مشكلة تهريب السائل الإسمنتي وبالتالي التقليل من التلوث الناجم عن عملية السمنتة التقليدية والذي يسهم في تسهيل عمليات إحياء الآبار المنتجة من الطبقات ذات الخواص الخزنية السيئة.

2- توفر إمكانية تكنولوجية لتنفيذ عملية سمنتة الآبار العميقة بمرحلة واحدة وبالتالي الاستغناء عن صمام المرحلتين مع ما يتضمنه ذلك من توفير في الزمن والمعدات والإمكانيات.

3-التقليل من كميات الإسمنت المستهلكة بفضل وجود فقاعات من الغاز في تركيب السائل الإسمنتي الرغوي .

4-التقليل من الكلفة العالية جداً لعمليات السمنتة الإصلاحية حيث أن الفشل في انجاز عملية عزل جيدة لمواسير التغليف نتيجة تهريب السائل الإسمنتي يتميز بكلفة عالية جداً(يمكن أن تصل إلى أكثر من 140$ مليون دولار سنوياً)

المراجع العلمية

1-باللغة الإنكليزية

1. API Standard, **"10A Specification for Cements and Materials for Well Cementing"**, 22nd, Edition2000 , American Petroleum Institute ,Washington .
2. **"A safety Net for Controlling Lost Circulation"** ,Lee Francis , Lee Hornsby , Nils Nosland , 2003-2004, P20-27.
3. **"Cement additives specialty products**" , company web master , December 2004.
4. **Cement standard and Specificating**,PortlandCement Association , 2008.
5. Oldson M.T.,1998-**Application of foam cement** in lberta.j.of canda.petrol.Technol.,vol.24,No.5,49-57
6. Romero,SN and Monroy,RR 2006 -**Preventing lost circulation by use lightweight slurries with reticular systems** ,vol.21
7. Ron Crook, Seth Moore, Melissa Miller, 1999 – **Fully engineered foam–cementing process improves zonal isolation.** Halliburton energy services Inc.

2- باللغة العربية

8-خضور , محمد ,فرج , يوسف , 2013-2014- هندسة الحفر-2 القسم العملي , منشورات جامعة البعث.

9-خضور, محمد,2015-2016 استخدام السوائل الإسمنتية المخففة في بعض الحقول السورية.

10- فرج ,يوسف , 2012, تحسين جودة سمنتة وعازلية الآبار باستخدام خلطات اسمنتية مخففة ومتوسعة خلف مواسير التغليف , أطروحة دكتوراه , منشورات جامعة البعث.

11- فرج , يوسف ,2022-2023, تقييم عمليات السمنتة لعدد من الآبار في حقول المنطقة الوسطى ,