



Δ.Π.Μ.Σ. «ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ»

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



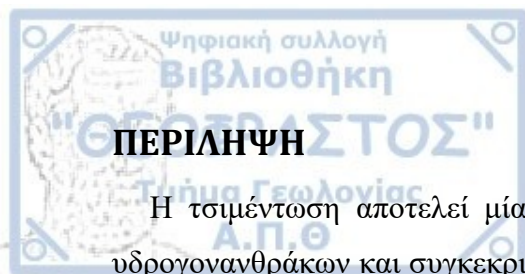
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΣ ΤΙΤΛΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

**«ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΩΣΗΣ
ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ»**

ΚΟΣΚΙΝΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΓΕΩΡΓΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ**

Θεσσαλονίκη 2023



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

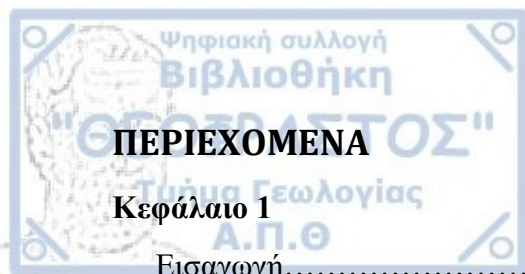
Η τσιμέντωση αποτελεί μία από τις πιο βασικές διαδικασίες κατά την εκμετάλλευση υδρογονανθράκων και συγκεκριμένα κατά το στάδιο της διάνοιξης της γεώτρησης. Παρ' όλα αυτά υπάρχουν διάφορα στάδια τα οποία εμπεριέχουν άλλες πιο σύνθετες και άλλες πιο απλές διαδικασίες. Τα στάδια της έρευνας και εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων περιλαμβάνουν την αναζήτηση, την έρευνα, τη διάτρηση, την παραγωγή και ασφαλώς την εγκατάλειψη.

Με τον όρο τσιμέντωση χαρακτηρίζεται η διαδικασία πλήρωσης ενός συγκεκριμένου τμήματος της γεώτρησης με μίγμα νερού και τσιμέντου με άλλα πρόσθετα. Η διαδικασία αυτή είναι άμεσα συνυφασμένη με τη διαδικασία της σωλήνωσης. Διακρίνεται στην πρωτογενή τσιμέντωση και την τσιμέντωση αποκατάστασης. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος τσιμέντωσης είναι η μέθοδος των δύο πωμάτων (two-plug method).

Με τον όρο τσιμεντοπολφό αναφερόμαστε σε ένα μείγμα τσιμέντου, νερού και άλλων πρόσθετων υλικών. Ο τσιμεντοπολφός θα πρέπει να πληροί συγκεκριμένες προϋποθέσεις έτσι ώστε να μπορέσει να μονώσει τους σχηματισμούς κατά τη διατρητική διαδικασία και να αποφευχθούν διάφορες αστοχίες. Το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου (American Petroleum Institute ή API) εδραίωσε την χρήση μιας κλίμακας κατάταξης των διαφόρων τύπων τσιμέντου, όπου ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν σε κάθε γεώτρηση και στα διάφορα βάθη αυτής, να επιλέγεται και ο κατάλληλος τύπος. Ο πιο διαδεδομένος τύπος τσιμέντου που χρησιμοποιείται, είναι αυτός του τύπου Portland. Αν και πλέον κάθε τσιμεντοβιομηχανία ακολουθεί τη δική της μέθοδο, ο σχεδιασμός του τσιμεντοπολφού είναι πολύ σημαντικός για τη διεκπεραίωση του έργου.

Τα τελευταία χρόνια η παγκόσμια βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου δέχεται πίεση και καλείται να αυξήσει την παραγωγή για να καλύψει την παγκόσμια ζήτηση ενέργειας. Ένας από τους βασικούς τομείς που αναπτύχθηκε για να καλύψει αυτήν την ανάγκη, είναι τα αποθέματα που βρίσκονται κάτω από σχηματισμούς άλατος. Συνεπώς η διάνοιξη μιας γεώτρησης, η σωλήνωση, και κατ' επέκταση η τσιμέντωση της, μπορούν να αποτελέσουν ιδιαίτερες προκλήσεις.

Τέλος, έχει παρατηρηθεί, ότι τα περισσότερα προβλήματα που παρατηρούνται σε ένα πηγάδι, με την πάροδο του χρόνου, σχετίζονται με λάθη που έχουν γίνει κατά το στάδιο της τσιμέντωσης.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή.....	1
---------------	---

Κεφάλαιο 2

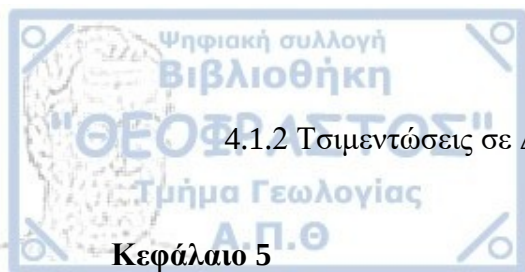
2.1 Διαδικασία τσιμέντωσης.....	2
2.1.1 Πρωτογενής τσιμέντωση.....	2
2.1.2 Δευτερογενής τσιμέντωση.....	10
2.1.3 Τσιμέντωση εγκατάλειψης.....	14
2.2 Διαγραφίες αξιολόγησης τσιμέντωσης.....	15
2.2.1 Συμβατικά εργαλεία αξιολόγησης πρόσδεσης τσιμέντου (CBL-VDL).....	16
2.2.2 Εξελιγμένα συστήματα αξιολόγησης τσιμέντωσης.....	17
2.3 Τσιμεντοπολφός.....	19

Κεφάλαιο 3

3.1 Παρασκευή τσιμέντου.....	23
3.1.1 Επεξεργασία πρώτων υλών.....	25
3.2. Ενυδάτωση.....	28
3.2.1 Ενυδάτωση Πυριτικών αλάτων ασβεστίου του τσιμέντου Portland.....	29
3.2.2 Ενυδάτωση Αργιλικών αλάτων ασβεστίου του τσιμέντου Portland.....	30
3.3. Πρόσθετα τσιμέντων και μηχανισμοί δράσης.....	32
3.3.1 Επιταχυντές (accelators).....	33
3.3.2 Επιβραδυντές (retarders).....	34
3.3.3 Διογκωτές (Extenders).....	36
3.3.4 Πυκνωτές (weighting agents).....	38
3.3.5 Παράγοντες διασποράς (dispersants).....	40
3.4 Ιδιότητες Τσιμεντοπολφού.....	41
3.4.1 Χαρακτηριστικά ρευστής φάσης.....	41
3.4.2 Χαρακτηριστικά Ενδιάμεσης κατάστασης (ρευστό προς στερεό).....	43
3.4.3 Χαρακτηριστικά Συμπαγοποιημένου Τσιμέντου.....	45

Κεφάλαιο 4

4.1 Ειδικές Περιπτώσεις Τσιμέντωσης.....	47
4.1.1 Τσιμέντωση Κατευθυνόμενων Γεωτρήσεων.....	47



4.1.2 Τσιμεντώσεις σε Δόμους Άλατος.....	53
--	----

Κεφάλαιο 5

5.1 Συμπεράσματα.....	58
-----------------------	----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	60
---------------------------	-----------

Στην βιομηχανία των υδρογονανθράκων διακρίνονται τρεις κλάδοι: ο upstream, ο midstream και ο downstream. Στον κλάδο του upstream περιλαμβάνονται όλες οι εργασίες έρευνας και εξόρυξης/παραγωγής των υδρογονανθράκων, δηλαδή η αναζήτηση πιθανών κοιτασμάτων πετρελαίου ή φυσικού αερίου και η όρυξη και λειτουργία παραγωγικών γεωτρήσεων που φέρνουν τους υδρογονάνθρακες από το υπέδαφος στην επιφάνεια. Στον κλάδο midstream περιλαμβάνονται η μεταφορά, η αποθήκευση και η χονδρική εμπορία του αργού ή των προϊόντων διύλισης. Τέλος, στον κλάδο downstream, περιλαμβάνονται η διύλιση και η επεξεργασία των προϊόντων του αργού πετρελαίου και του φυσικού αερίου, καθώς επίσης και η τελική διανομή τους. Συχνά, οι δραστηριότητες του κλάδου midstream εντάσσονται στον κλάδο του downstream (Γεωργακόπουλος Α. 2015).

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στο στάδιο της όρυξης μιας γεώτρησης, και ειδικότερα στη τσιμεντώση αυτής. Αποτελεί μια από τις σημαντικότερες διεργασίες για τη σωστή και ασφαλή διεκπαιρέωση του έργου. Ως πρώτο στάδιο ενεργειών, είναι η τοποθέτηση με ασφάλεια, της κατάλληλης πλατφόρμας όρυξης (Εικόνα 1.1). Μόλις όλα είναι έτοιμα και έχει εξασφαλιστεί η ασφάλεια του γεωτρυπάνου, ξεκινάει η διάνοιξη του πρώτου τμήματος της γεώτρησης, όπου σωληνώνεται και τσιμεντώνεται. Το στάδιο αυτό, το οποίο και αναλύεται εκτενέστερα στα επόμενα Κεφάλαια, αναφέρεται με τον όρο **πρωτογενής τσιμεντώση**.



Εικόνα 1.1: Πλατφόρμες εξόρυξης πετρελαίου. (www.dandm.ru)

Να σημειωθεί ότι μετά την τσιμέντωση του πρώτου τμήματος της γεώτρησης, τοποθετείται το B.O.P. (Blow Out Preventer), το οποίο απομονώνει τις χαμηλές πιέσεις που επικρατούν στο ανώτερο τμήμα της γεώτρησης από τις υψηλές πιέσεις που επικρατούν στα βαθύτερα τμήματα της, διασφαλίζοντας έτσι την ασφάλεια του έργου. Στο σημείο αυτό, πριν συνεχιστεί η περαιτέρω διάνοιξη της γεώτρησης, ακολουθεί εκτίμηση της κατάστασης. Πιο συγκεκριμένα, χρειάζεται να εκτιμηθεί το μέγεθος του έργου, καθώς και η παραγωγικότητα του σε βάθος χρόνου, με άλλα λόγια ο χρόνος ζωής της γεώτρησης. Για να γίνει αυτό, ακολουθούν περαιτέρω σεισμικές μετρήσεις.

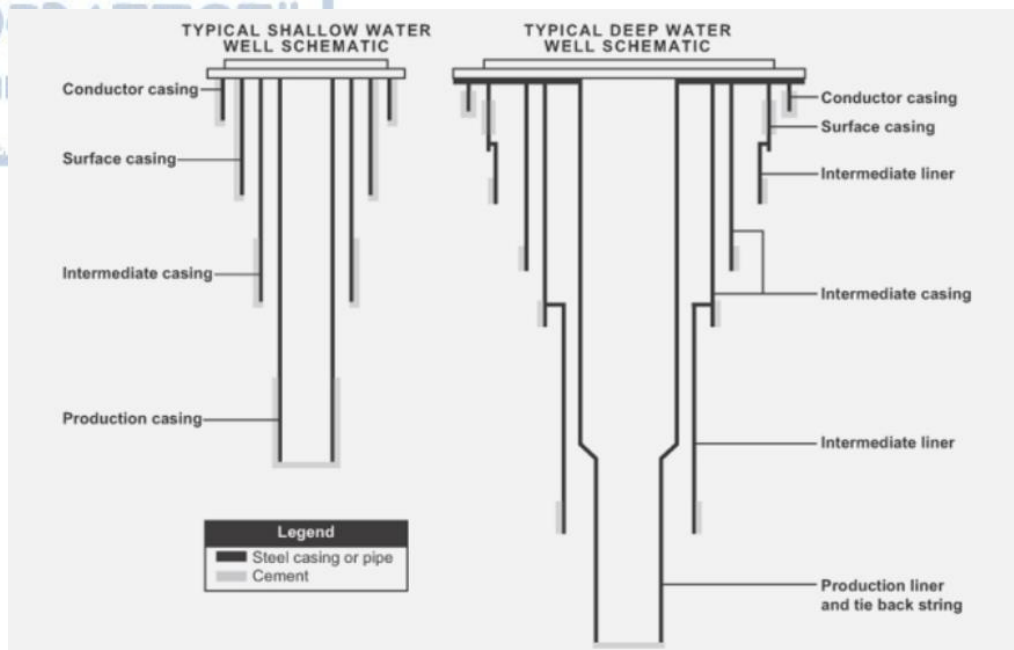
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 Διαδικασία τσιμέντωσης

2.1.1 Πρωτογενής τσιμέντωση

Με τον όρο τσιμέντωση (cementing) κατά τη διαδικασία όρυξης μιας γεώτρησης, χαρακτηρίζεται η δημιουργία ενός αδιαπέρατου στρώματος, μεταξύ των τοιχωμάτων της γεώτρησης και της σωλήνωσης. Η συνένωση αυτή, της σωλήνωσης με τον εκάστοτε σχηματισμό, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός φραγμού στη ροή ρευστών από και προς το σχηματισμό. Ο ρόλος της τσιμέντωσης είναι να απομονώνει τη κάθε ζώνη εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων από τις υπόλοιπες, να σταθεροποιεί τη σωλήνωση και να αποτρέπει την οξείδωση αυτής και να προστατεύει το πηγάδι από τυχόν καταρρεύσεις υλικών (*Σταματάκη, 2017*).

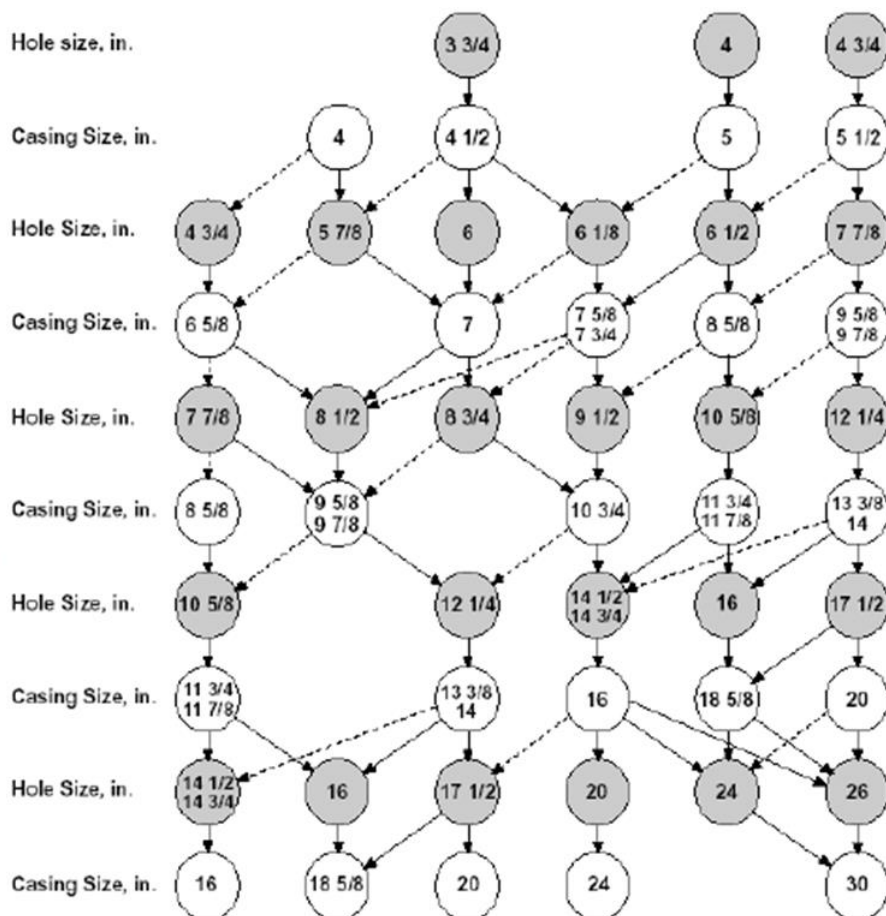
Η πρωτογενής τσιμέντωση λαμβάνει χώρα παράλληλα με τη διαδικασία σωλήνωσης (casing), όπως ευκρινώς φαίνεται στην *Εικόνα 2.1.1.1*, και γίνεται για την απομόνωση και στήριξη των επιμέρους ζωνών, πριν την έναρξη της άντλησης υδρογονανθράκων (πρωτογενής τσιμέντωση). Επιπλέον, υπάρχει και η τσιμέντωση αποκατάστασης, η οποία συμβαίνει κατά τη διάρκεια άντλησης και έχει ως στόχο την αποκατάσταση αλλοιώσεων και αστοχιών της πρωτογενούς τσιμέντωσης (*Μπιωτάκη 2014*). Να σημειωθεί ότι μετά το πέρας της ζωής της γεώτρησης όπου θα πρέπει να εγκαταλειφθεί το πηγάδι, θα πρέπει, εφόσον κρίνεται αναγκαίο, να γίνει εκ νέου τσιμέντωση του, έτσι ώστε να αποφευχθεί η οποιαδήποτε διαρροή σε μεταγενέστερο χρόνο.



Εικόνα 2.1.1.1: Σχηματική απεικόνιση σωλήνωσης ρηχής (αριστερά) και βαθιάς (δεξιά) γεώτρησης.
(www.sec.gov, 2014)

Καθώς το βάθος της διάνοιξης αυξάνεται, η διάμετρος της γεώτρησης και κατ' επέκταση της σωλήνωσης μειώνεται (telescopic structure), μέχρις ότου τοποθετηθεί η τελευταία σωλήνωση (σωλήνωση παραγωγής), όπου και σειρά πλέον έχει η ολοκλήρωση του πηγαδιού. Όπως φαίνεται στην παραπάνω Εικόνα, το πρώτο τμήμα της σωλήνωσης επένδυσης ονομάζεται αγωγός (conductor pipe) και είναι σωλήνας μεγάλης διαμέτρου σε μικρά βάθη. Σκοπός της είναι να προστατεύσει τη βάση της πλατφόρμας εξόρυξης, συγκρατώντας χαλαρά ιζήματα, αλλά και να απομονώσει τους υδροφόρους ορίζοντες. Το δεύτερο τμήμα λέγεται επιφανειακή σωλήνωση (surface casing) και προστατεύει το πηγάδι από την κατάρρευση χαλαρών υλικών, ενώ ταυτόχρονα προστατεύει τα υδροφόρα στρώματα. Το τρίτο τμήμα ονομάζεται ενδιάμεση ή προστατευτική σωλήνωση (intermediate casing) και εξασφαλίζει σε μεγάλο βαθμό την ασφάλεια της γεώτρησης. Τέλος, ακολουθεί η παραγωγική σωλήνωση (production casing), η οποία απομονώνει τις παραγωγικές ζώνες και προσφέρει έλεγχο των ρευστών του ταμιευτήρα. Φτάνει μέχρι το επιθυμητό βάθος απ' όπου θα γίνει και η άντληση. Στην παρακάτω εικόνα, απεικονίζεται η αλληλουχία των σωληνώσεων. Κάποιες φορές χρησιμοποιείται και η σωλήνωση liner (liner casing), το οποίο αγκιστρώνεται στο εσωτερικό τμήμα της παραγωγικής σωλήνωσης. Μερικοί τύποι liner είναι οι ακόλουθοι: drilling liners, production liners, tie back liner, scab liner και scab tie back liner (Khaemba, 2014).

Η διαδικασία του «cementing» λοιπόν είναι άμεσα εξαρτώμενη από τη διαδικασία του «casing», κάτι που γίνεται αντιληπτό παρατηρώντας το Σχήμα 2.1.1.1. Οι δράσεις στα δύο στάδια αυτά γίνονται παράλληλα. Συγκεκριμένα, η επιλογή διαμέτρου της σωλήνωσης εξαρτάται από τη διάμετρο του πηγαδιού. Ακολουθεί η τοποθέτηση και η τσιμέντωση της σωλήνωσης αυτής. Η επιλογή διαμέτρου της επόμενης σωλήνωσης, αλλά και όλων των σωληνώσεων που έπονται, γίνονται σύμφωνα με το διάγραμμα που προαναφέρθηκε.

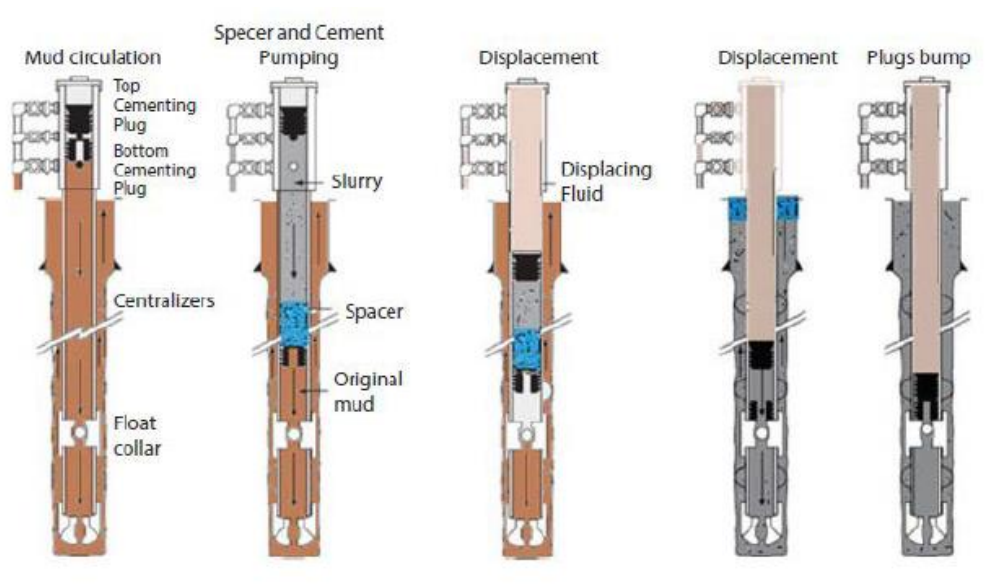


Σχήμα 2.1.1.1: Παρουσιάζονται οι διάφοροι διάμετροι σωληνώσεων αναφορικά με τη διάμετρο της γεώτρησης (Σταματάκη, 2017).

Για τον σχεδιασμό της διαδικασίας σωλήνωσης, πρέπει να συνυπολογιστούν οι επιδράσεις που θα επιφέρουν οι διάφορες μεταβολές πίεσης και θερμοκρασίας, σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή και σε οποιοδήποτε βάθος. Για το λόγο αυτό γίνονται έλεγχοι αντοχής της κάθε σωλήνωσης, έτσι ώστε η επιλογή σωλήνωσης να είναι η βέλτιστη επιλογή ανάλογα με τις

συνθήκες που επικρατούν στη γεώτρηση. Οι προδιαγραφές της σωλήνωσης ποικίλουν ανάλογα με το ειδικό βάρος του πολφού, τις πιέσεις του σχηματισμού, τις πιέσεις ρωγμάτωσης, τις συνθήκες θερμοκρασίας, το πρόγραμμα σωλήνωσης που προβλέπεται να ακολουθηθεί, τη χημική σύσταση των ρευστών που θα διοχετευθούν στη γεώτρηση κ.ά. (Khaemba, 2014).

Να διευκρινιστεί ότι με τον όρο *Τσιμέντωση* χαρακτηρίζεται η διαδικασία πλήρωσης ενός τμήματος του δακτυλίου της γεώτρησης μεταξύ των τοιχωμάτων αυτής και της σωλήνωσης, με μίγμα νερού και τσιμέντου (Τύπου Portland), ή νερού και τσιμέντου με άλλα πρόσθετα. Το τσιμέντο συμπιέζεται μέσω της σωλήνωσης, με σκοπό την πλήρωση του κενού χώρου ανάμεσα στα τοιχώματα της γεώτρησης και του εξωτερικού μέρους της σωλήνωσης. Στην πρωτογενή τσιμέντωση μπορούν να εφαρμοστούν δύο μέθοδοι. Χρησιμοποιείται η μέθοδος ενός μόνο σταδίου (Single Stage Cementing Operation), η οποία επιτυγχάνεται με τη χρήση δύο πωμάτων (two-plug method), όπου και απεικονίζεται σχηματικά η διαδικασία στην *Εικόνα 2.1.1.2*, και η μέθοδος των πολλαπλών σταδίων, όπου η διαδικασία ολοκληρώνεται σε δύο φάσεις, (*Εικόνα 2.1.1.3*). Είναι σημαντικό να αναφερθεί το γεγονός ότι η μέθοδος των δύο πωμάτων βοηθά στην αποφυγή πρόκλησης εκρήξεων ("blowout") λόγω αυξημένων πιέσεων.



Εικόνα 2.1.1.2: Απεικόνιση διαδικασίας τσιμέντωσης (two-plug method). (Σταματάκη, 2017)

Συγκεκριμένα, κατά την μέθοδο των δύο πωμάτων, αφού πραγματοποιηθεί η διάνοιξη της γεώτρησης στο επιθυμητό βάθος, απομακρύνεται η διατρητική στήλη, και τοποθετείται η μεγαλύτερης διαμέτρου σωλήνωση, μέχρι τον πυθμένα της γεώτρησης (Nelson 1990). Η σωλήνωση είναι τέτοιας διαμέτρου ώστε να υπάρχει κενός χώρος ανάμεσα στα τοιχώματα της γεώτρησης και του εξωτερικού μέρους της σωλήνωσης. Τοποθετείται το πρώτο πώμα στο εσωτερικό της σωλήνωσης και ξεκινά η συμπίεση του τσιμεντοπολφού και η κυκλοφορία του.



Εικόνα 2.1.1.3: Δεξιά απεικονίζεται το πώμαοροφής (top plug) και δεξιά το πώμα που τοποθετείται πρώτο στον πυθμένα της γεώτρησης (bottom plug). (www.zschinajixie.en.made-in-china.com)

Όπως διακρίνεται και στην *Εικόνα 2.1.1.2*, το πώμα κατεβαίνει και πιέζει τον πολφό της λάσπης ώστε αυτός να κινηθεί και να ανέβει προς την επιφάνεια από την εξωτερική πλευρά της σωλήνωσης. Αυτό το βήμα (displacement - απεικονίζεται στην *Εικόνα 2.1.1.2*), είναι αναγκαίο έτσι ώστε να μπορέσει να απομακρυνθεί η διατρητική 'λάσπη'. Το δεύτερο πώμα τοποθετείται πάνω από τον πολφό και τον συγκρατεί, έτσι ώστε να μην παλινδρομήσει. Στην αποτροπή της παλινδρόμησης εξυπηρετεί το float collar ή αλλιώς πώμα επίπλευσης (*Εικόνα 2.1.1.4*).



Εικόνα 2.1.1.4: Φωτογραφία του εξοπλισμού τσιμέντωσης. (www.slideshare.net)

Η εκτόπιση του τσιμεντοπολφού γίνεται με λάσπη ή νερό. Πρέπει να δοθεί προσοχή στην ευθυγράμμιση της σωλήνωσης. Για να επιτευχθεί χρησιμοποιούνται centralizers (Εικόνα 2.1.1.5). Η τσιμέντωση ολοκληρώνεται όταν παρουσιαστεί αύξηση της πίεσης στην επιφάνεια. Όταν το άνω πόμα ενωθεί με το κάτω, σημαίνει ότι βρίσκονται στο κολάρο προσγείωσης ή επίπλευσης και παρατηρείται αύξηση της πίεσης στην επιφάνεια. Τότε σταματά και η συμπίεση του τσιμέντού. Η τσιμέντωση με τη μέθοδο της χρήσης δύο πωμάτων, αποσκοπεί στην απομόνωση του τσιμεντοπολφού καθώς συμπιέζεται μέσα στη στήλη, για την αποφυγή ανάμειξής του με τη λάσπη της γεώτρησης (Hughes, 1995).



Εικόνα 2.1.1.5: Εφαρμογή Centralizer σε σωλήνα. (www.globusogs.com αριστερά και www.engineerlive.com δεξιά)

Επιπλέον, σημαντικό είναι να αναφερθεί και ο λοιπός εξοπλισμός της τσιμέντωσης, όπως το cement head ή αλλιώς κεφαλή τσιμέντωσης (Εικόνα 2.1.1.6), το guide shoe (Εικόνα 2.1.1.4), ο οδηγός δηλαδή της σωλήνωσης, έτσι ώστε να αποφευχθεί η ενσφήνωση της και τέλος τα scratchers (Εικόνα 2.1.1.6), τα οποία τοποθετούνται εξωτερικά της σωλήνωσης και χρησιμοποιούνται για να διασπών συμπαγοποιημένα κομμάτια της λάσπης και να τα απομακρύνουν. Ορισμένες φορές επιλέγεται και η χρήση float shoe, καθώς προσφέρει τα προνόμια από τη χρήση ενός guide shoe σε συνδυασμό με float collar. Πιο αναλυτικά, το guide shoe είναι αυτό που κατά κύριο λόγο κατευθύνει τη σωλήνωση μέσα στη γεώτρηση, αλλά και αποτρέπει το φρακάρισμα αυτής στην περίπτωση αποκλίνουσας γεώτρησης ή κατά μήκος διαβρωμένων ζωνών. Η χρήση ενός float collar, αποτρέπει την ανάστροφη πορεία του τσιμέντου μέσα στη σωλήνωση. Έτσι λοιπόν, με τη χρήση ενός float shoe, επιτυγχάνεται συνδυαστική κάλυψη, καθώς παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα και των δύο εξαρτημάτων.

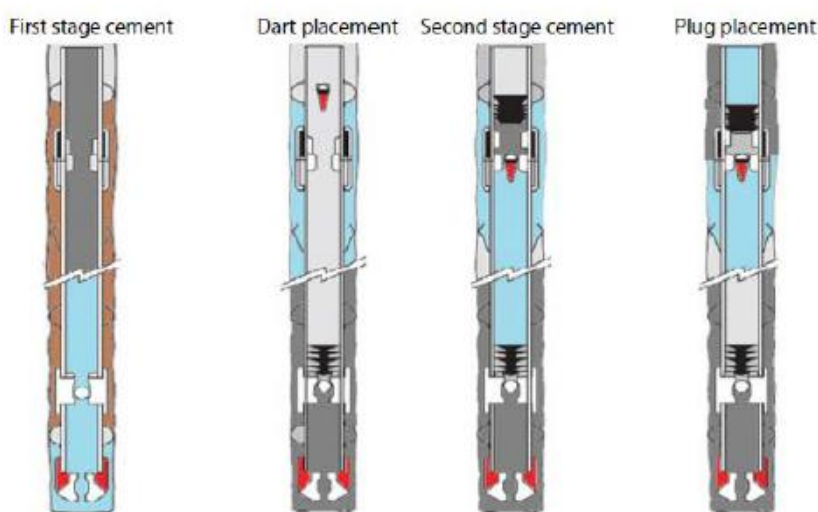
Να σημειωθεί ότι η κεφαλή τσιμέντωσης αποτελεί το συνδετικό κρίκο ανάμεσα στη σωλήνωση και τη μονάδα τσιμέντωσης. Το κομμάτι αυτό του εξοπλισμού είναι σχεδιασμένο

για να συγκρατεί τα πόματα που χρησιμοποιούνται κατά την πρωτογενή τσιμέντωση (Σταματάκη 2017).



Εικόνα 2.1.1.6: Φωτογραφία του εξοπλισμού τσιμέντωσης. Αριστερά η κεφαλή τσιμέντωσης και δεξιά δύο διαφορετικού τύπου scratcher (www.slideshare.net και Σταματάκη, 2017 αντίστοιχα)

Επιπλέον, πέρα από τη τσιμέντωση που πραγματοποιείται σε ένα μόνο στάδιο, μπορεί όπως προαναφέρθηκε να εφαρμοστεί και άλλη μέθοδος, η οποία ολοκληρώνεται σε δύο στάδια (Multi-Stage Cementing Operation) (Εικόνα 2.1.1.7.). Η μέθοδος αυτή επιλέγεται στην περίπτωση όπου υπάρχουν χαλαροί και αδύναμοι σχηματισμοί, καθώς μπορεί και μειώνει την υδροστατική πίεση κατά μήκος εκτεταμένων τμημάτων που έχουν τσιμεντωθεί. Επίσης χρησιμοποιείται για να μειωθεί ο χρόνος άντλησης, ή η συνολική πίεση άντλησης, αλλά και σε περιπτώσεις όπου απαιτείται επιλεκτική τσιμέντωση κατά μήκος της σωλήνωσης, ή ακόμα σε περιπτώσεις όπου απαιτείται τσιμέντωση ολόκληρου τμήματος σωλήνωσης απευθείας (Σταματάκη 2017).



Εικόνα 2.1.1.7: Multi-Stage Cementing Operation. (Σταματάκη, 2017)

Κατά τη μέθοδο αυτή, χρησιμοποιείται επιπλέον εξοπλισμός, ο οποίος ονομάζεται «multi-stage collar» ή «DV collar», και πρόκειται για ένα μικρό τμήμα σωλήνωσης, το οποίο βέβαια παρουσιάζει τις ίδιες ιδιότητες αντοχής με την υπόλοιπη σωλήνωση. Πιο συγκεκριμένα, όπως απεικονίζει και η *Εικόνα 2.1.1.8*, πρόκειται για ένα τμήμα σωλήνωσης με ανοίγματα, το οποίο περιέχει δύο εσωτερικές θήκες. Τα ανοίγματα καλύπτονται από την κατώτερη θήκη.

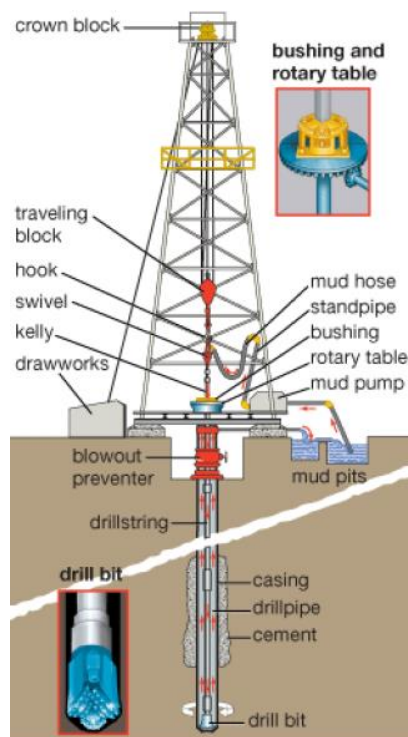


Εικόνα 2.1.1.8: Multi-Stage Collar. Στην φωτογραφία διακρίνεται το τμήμα της σωλήνωσης με τα δύο εξαρτήματα που τοποθετούνται στο εσωτερικό του, καθώς και η σφήνα. (Σταματάκη, 2017)

Κατά το πρώτο στάδιο της διαδικασίας, η οποία βέβαια είναι παρεμφερής με τη μέθοδο του ενός σταδίου τσιμεντώσης, χρησιμοποιείται μικρότερος όγκος τσιμέντου, καθώς τσιμεντώνεται μόνο το κατώτερο τμήμα της σωλήνωσης. (βλέπε *Εικόνα 2.1.1.7*). Το μήκος της σωλήνωσης που θα τσιμεντωποιηθεί εξαρτάται από την πίεση ρωγμάτωσης των σχηματισμών που έρχονται σε επαφή με τη σωλήνωση.

Στο δεύτερο στάδιο της διαδικασίας χρησιμοποιείται ο επιπλέον εξοπλισμός που προαναφέρθηκε (multi-stage collar), και τοποθετείται μέσα στη σωλήνωση σε προκαθορισμένη θέση. Με τη λήξη του πρώτου σταδίου, απελευθερώνεται από την επιφάνεια μία σφήνα η οποία αρχίζει και πιέζει την θήκη να κατέβει προς τα κάτω για να ελευθερωθούν τα ανοίγματα. Όταν η πίεση πάνω από τη σφήνα φτάσει τα 1000-1500 psi, τότε θα αποκαλυφθούν τα ανοίγματα και θα σηματοδοτηθεί η έναρξη της συμπίεσης του τσιμέντου, το οποίο περνά μέσα από τα ανοίγματα και τοποθετείται γύρω από τη σωλήνωση. Μόλις διοχετευθεί η απαραίτητη ποσότητα τσιμέντου, τα ανοίγματα θα κλείσουν από τη ρίψη ενός πώματος, το οποίο θα μετακινήσει την ανώτερη θήκη προς τα κάτω και θα τα καλύψει (Σταματάκη 2017).

Μόλις ολοκληρωθεί η τσιμέντωση, το πηγάδι θα παραμείνει κλειστό για ορισμένο χρονικό διάστημα, ώστε να μπορέσει να πήξει σωστά το τσιμέντο και να σταθεροποιηθεί. Μόλις γίνει συμπαγές το τσιμέντο, η διαδικασία της σωλήνωσης θα συνεχιστεί με σταδιακή όρυξη της γεώτρησης, η οποία θα συνοδεύεται με την τοποθέτηση της κατάλληλης σωλήνωσης επένδυσης και τσιμέντωση της. Μετά την τσιμέντωση της κάθε σωλήνωσης, τοποθετείται το B.O.P. (Blow Out Preventer), στο σημείο που διακρίνεται στην *Εικόνα 2.1.1.8*. (Μπιωτάκη 2014).



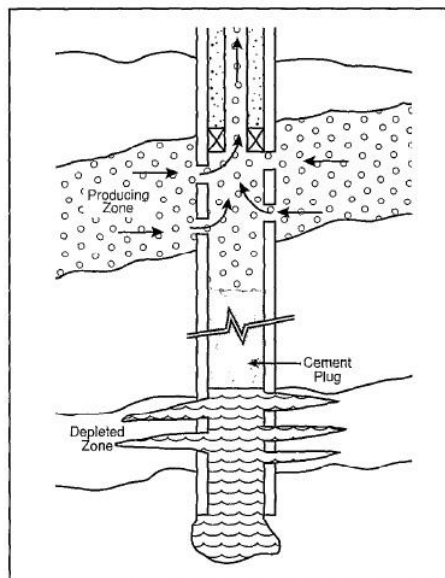
Εικόνα 2.1.1.8: Σχηματική απεικόνιση ολόκληρης της εξέδρας, όπου και φαίνεται το σημείο τοποθέτησης του B.O.P. (Μπιωτάκη 2014)

2.1.2 Δευτερογενής τσιμέντωση

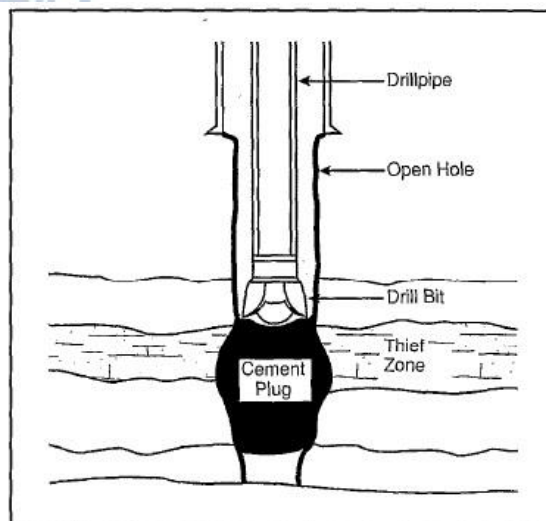
Το στάδιο αυτό της συμπίεσης τσιμέντου (squeeze cementing) αποτελεί εδώ και μισό αιώνα συνήθη διαδικασία, η οποία εκτελείται κάτω από διάφορες συνθήκες. Η συμπίεση τσιμέντου χαρακτηρίζεται ως η διαδικασία κατά την οποία ο τσιμεντοπολφός, κάτω από μεγάλες πιέσεις, αναγκάζεται να εισχωρήσει σε όλους τους κενούς χώρους της σωλήνωσης και του πηγαδιού, με σκοπό να φράξει οποιαδήποτε δίοδο. Όταν στεφθεί με επιτυχία η επιχείρηση αυτή, τότε

δημιουργείται το ονομαζόμενο «**cement filter cake**», με άλλα λόγια το επίστρωμα που φράζει τις διεξόδους διαρροής υλικών. Η προαναφερόμενη διαδικασία έχει πολλές εφαρμογές, τόσο κατά το στάδιο της διάτρησης, όσο και κατά το στάδιο της ολοκλήρωσης. Πιο συγκεκριμένα, οι δράσεις της είναι οι εξής (Nelson 1990):

- Επιδιόρθωση της πρωτογενούς τσιμεντώσης, είτε επειδή έγινε ανάμειξη της λάσπης με τον τσιμεντοπολφό, είτε επειδή το ύψος της τσιμεντώσης δεν ήταν αρκετό.
- Αποσόβηση της εισροής νερού από τη γύρω περιοχή, από μέσα από την παραγωγική ζώνη ή τις γειτονικές της.
- Μείωση του λόγου αέριο/πετρέλαιο (GOR), απομονώνοντας τις ζώνες αερίου.
- Αποκατάσταση της σωλήνωσης, σε σημεία όπου παρατηρούνται διαρροές, λόγω διάβρωσης.
- Εγκατάλειψη μιας ζώνης, είτε μη παραγωγικής, είτε εξαντλημένης (Εικόνα 2.1.2.1).
- Σφράγιση ολική ή κατά τμήματα, σε περιπτώσεις πολλαπλής εκμετάλλευσης ζωνών, έτσι ώστε να περιοριστεί η παραγωγή στην άμεσα ενδιαφερόμενη.
- Σφράγιση περιοχών, λόγω απώλειας τσιμεντοπολφού (Εικόνα 2.1.2.2).
- Προστασία από μετανάστευση αερίων μέσα στην παραγωγική ζώνη.



Εικόνα 2.1.2.1: Αναπαράσταση της διαδικασίας σφράγισης και εγκατάλειψης μιας εξαντλημένης ζώνης. (Erik B. Nelson 1990)



Εικόνα 2.1.2.2: Αναπαράσταση της διαδικασίας σφράγισης μιας περιοχής λόγω απώλειας τσιμεντοπολφού. (Erik B. Nelson 1990)

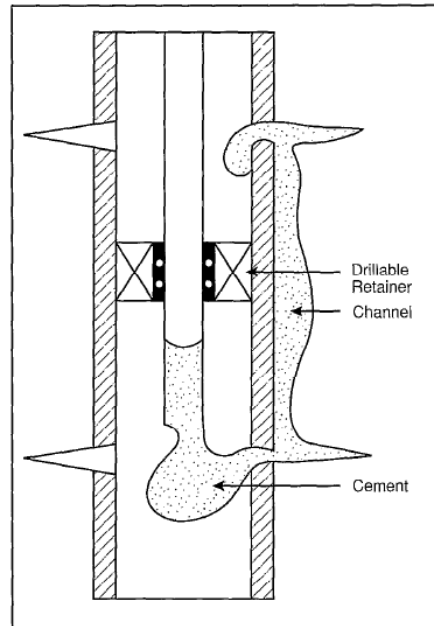
Καθώς συμπιέζεται ο τσιμεντοπολφός, τα σωματίδια του συσσωρεύονται και έτσι συνεχώς αυξάνεται η υδραυλική αντίσταση και το πάχος του επιστρώματος του τσιμέντου. Παράλληλα όμως θα μειώνεται ο ρυθμός εισχώρησης του τσιμεντοπολφού και θα αυξάνεται ο χρόνος αφυδάτωσης του τσιμεντοπολφού. Η δημιουργία του επιστρώματος του τσιμέντου (cement filter cake) είναι αποτέλεσμα τεσσάρων παραμέτρων και συγκεκριμένα της διαπερατότητας του σχηματισμού, του χρόνου, της διαφορικής πίεσης που εφαρμόζεται και τον όγκο του τσιμεντοπολφού. Απαιτείται προσοχή, καθώς εάν για παράδειγμα ο σχηματισμός είναι υψηλής διαπερατότητας, τότε ο τσιμεντοπολφός θα αφυδατωθεί γρήγορα, Με συνέπεια η γεώτρηση να καταρεύσει. Αντίθετα, εάν ο σχηματισμός είναι χαμηλής διαπερατότητας, τότε η αφυδάτωση θα αργήσει, με αποτέλεσμα την καθυστέρηση ολόκληρου του έργου (Erik B. Nelson 1990).

Επίσης, να επισημανθεί ότι η διαδικασία της συμπίεσης του τσιμεντοπολφού γίνεται με δύο τρόπους (Σταματάκη, 2017). Συγκεκριμένα:

- Η χαμηλής πίεσης συμπίεση (Low-pressure squeeze), όπου η πίεση στον πυθμένα του πηγαδιού είναι μικρότερη της πίεσης ρωγμάτωσης του σχηματισμού.
- Η υψηλής πίεσης συμπίεση (High-pressure squeeze), όπου η πίεση στον πυθμένα του πηγαδιού είναι μεγαλύτερη της πίεσης ρωγμάτωσης του σχηματισμού.

Για να πραγματοποιηθούν οι παραπάνω δύο διαδικασίες, υπάρχουν δύο τεχνικές, οι οποίες διαφοροποιούνται από την χρήση ή μη ενός packer (Σταματάκη, 2017). Ειδικότερα:

- The Braden head squeeze, όπου δεν χρησιμοποιείται packer. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται μόνο σε χαμηλής πίεσης συμπίεση τσιμέντου.
- Η συμπίεση με την χρήση packer. Η τοποθέτηση του τσιμεντοπολφού μέσω της τεχνικής αυτής είναι πιο ακριβής. Υπάρχουν δύο είδη packer.



Εικόνα 2.1.2.3: Αναπαράσταση της διαδικασίας συμπίεσης τσιμέντου (Erik B. Nelson 1990)

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί η σειρά των ενεργειών κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της συμπίεσης του τσιμεντοπολφού (squeeze cementing) (Εικόνα 2.1.2.3), η οποία διακρίνεται σε 9 στάδια.

1. Απομονώνονται οι κατώτερες ζώνες με ειδικό πώμα (bridge plug).
2. Τα ανοίγματα (πόροι) ξεπλένονται μέσω του «perforation washing tool» ή διανοίγονται και πάλι μέσω της τεχνικής back-surfing.
3. Τοποθετείται το packer στο επιθυμητό βάθος και ξεκινάει η δοκιμή. Συνήθως πίεση των 1000 psi είναι αρκετή. Στο σημείο αυτό ελέγχεται αν χρειάζεται ή όχι να χρησιμοποιηθεί επιπρόσθετη σωλήνωση (tail pipe).
4. Πραγματοποιείται τεστ συμπίεσεως χρησιμοποιώντας νερό, συνήθως αλατόνερο. Μέσω της δοκιμής αυτής ελέγχεται η διαπερατότητα του σχηματισμού.

5. Στο σημείο αυτό γίνεται η συμπίεση του τσιμεντοπολφού. Αποτελεί κρίσιμο στάδιο, καθώς μπορεί να προκληθεί μόλυνση του πολφού από τα ρευστά του πηγαδιού. Το racker αποτελεί την παράκαμψη, τη δίοδο του τσιμεντοπολφού.

6. Ξεκινά πλέον να εφαρμόζεται πίεση. Εδώ ακολουθείται ένας από τους τρόπους που προαναφέρθηκαν, της υψηλής πιέσεως συμπίεσης ή της χαμηλής πιέσεως συμπίεσης.

7. Η συμπίεση συνεχίζεται μέχρι να παρατηρηθεί μηδενική διαρροή πιέσεως. Από την στιγμή που δεν μειώνεται η πίεση σημαίνει πως η τσιμέντωση είναι επιτυχής. Προσοχή όμως πρέπει να δίνεται στο σημείο αυτό, καθώς εάν δεν σταματήσει η συμπίεση και αυξηθεί η πίεση, μπορεί να προκληθεί ρωγμάτωση του σχηματισμού.

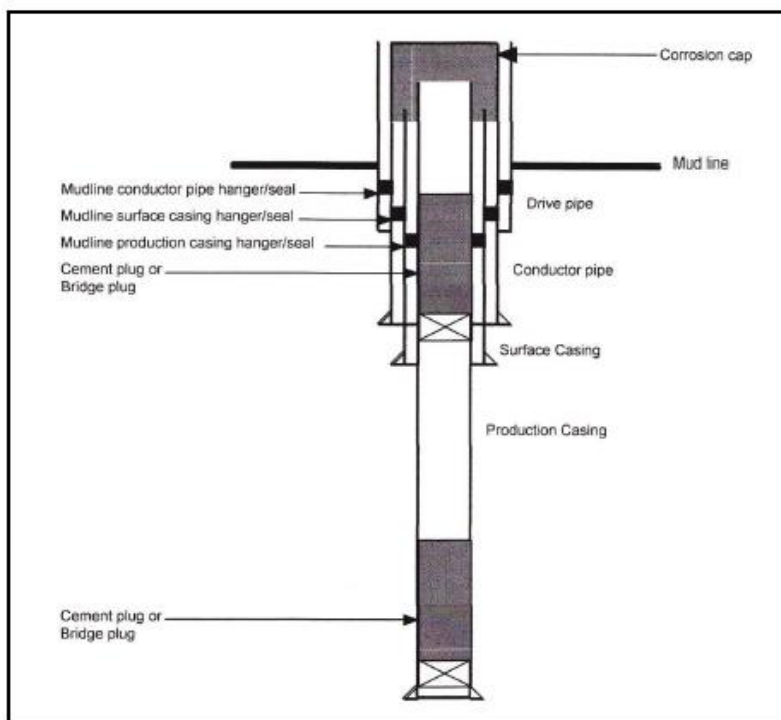
8. Σταματά η άσκηση πίεσης και ελέγχεται το υλικό που επιστρέφει στην επιφάνεια.

9. Απομακρύνεται ο εξοπλισμός και η γεώτρηση μένει άθικτη μέχρι να συμπαγοποιηθεί ο τσιμεντοπολφός, (waiting-on-cement time - WOC).

2.1.3 Τσιμέντωση εγκατάλειψης

Και κατά το στάδιο της εγκατάλειψης, που είναι και το τελικό στάδιο του έργου και ένα κομβικό σημείο για την αποφυγή προβλημάτων και αστοχιών στο μέλλον, πραγματοποιείται τσιμέντωση.

Πρέπει να τονιστεί, ότι η τσιμέντωση λαμβάνει χώρα σε περίπτωση που υπάρχει πιθανότητα να ξαναχρησιμοποιηθεί η γεώτρηση στο μέλλον. Κατά την προσωρινή λοιπόν αυτή εγκατάλειψη, δημιουργείται ένα κάλυμμα, ή αλλιώς καπάκι, από τσιμέντο *Σχήμα 2.1.3.1*, με σκοπό να προστατεύει τις σωληνώσεις κοντά στην επιφάνεια. Διαφέρει η προσωρινή εγκατάλειψη από τη μόνιμη, καθώς στην προσωρινή εγκατάλειψη του πηγαδιού, που είναι και αυτή που χρήζει τσιμέντωσης, δεν αποκόπτεται η σωλήνωση (Markus, 2014).



Σχήμα 2.1.3.1: Σχηματική απεικόνιση της σφράγισης και εγκατάλειψης του πηγαδιού (Markus, 2014)

Πιο συγκεκριμένα, τα πώματα σε ένα εγκαταλελειμμένο πηγάδι, μαζί με τα τσιμέντινα περιβλήματα που κατασκευάστηκαν διαδοχικά κατά το στάδιο της σωλήνωσης, θα πρέπει να δρουν ως φράγμα, ως εμπόδιο, διατηρώντας την ακεραιότητα του πηγαδιού σε βάθος χρόνου. Αποτελούν την ασπίδα του περιβάλλοντος σε τυχόν διαρροές. Εάν η πίεση συνεχίζει να υπάρχει και να αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, είτε ανάμεσα στις σωληνώσεις, είτε ανάμεσα στους σχηματισμούς και τις σωληνώσεις, τότε σημαίνει πως η απομόνωση των σχηματισμών δεν ήταν επιτυχής, και ότι υπάρχει κινητικότητα ρευστών ανάμεσα στους γεωλογικούς ορίζοντες (Lavrov, Torsæter, 2016)

2.2 Διαγραφίες αξιολόγησης τσιμέντωσης

Μετά τις εργασίες τσιμέντωσης, πραγματοποιούνται οι διαγραφίες αξιολόγησης τσιμέντωσης. Αυτά τα αρχεία καταγραφής (Cement Bond Logs – CBL) εκτελούνται συνήθως για να αξιολογηθεί η ποιότητα της πρόσφυσης του τσιμέντου μεταξύ της σωλήνωσης και των τοιχωμάτων της γεώτρησης, πριν διεξαχθεί όποια δοκιμή (well test) ή η λειτουργία παραγωγής

της πετρελαιοπηγής. Σε πολλές χώρες, οι κυβερνητικές αρχές απαιτούν την εκτέλεσή τους σε κάθε γεώτρηση μετά από τις εργασίες τσιμέντωσης, ώστε να διερευνηθεί η σωστή θέση του τσιμέντου και η ποιότητα της πρόσφυσης του και να αξιολογηθεί η υδραυλική και μηχανική σφράγιση του τσιμέντου και κατ' επέκταση της γεώτρησης (Kyri et al., 2015).

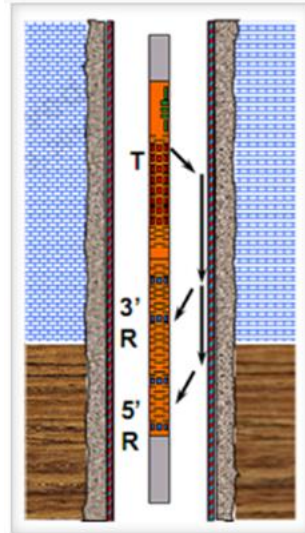
Οι καταγραφές αυτές αποτελούν την βασική μέθοδο αξιολόγησης της εργασίας της τσιμέντωσης, καθώς όχι μόνο μπορούν και απεικονίζουν την ποιότητα πρόσφυσης του τσιμέντου, αλλά και τη κορυφή αυτού, δηλαδή το ύψος της στήλης που τσιμεντώθηκε. Πρόκειται για ηχητικά κύματα τα οποία μεταδίδονται ενσύρματα. Η απόσταση του πομπού από το δέκτη πρέπει να είναι περίπου 91εκ. (Σταματάκη 2017). Η θεμελιώδης αρχή στην οποία στηρίζεται, είναι ότι το ακουστικό σήμα θα είναι περισσότερο εξασθενημένο όταν διαπερνά τσιμέντο από ό,τι εάν η σωλήνωση δεν είχε τσιμεντωθεί επαρκώς. (www.glossary.oilfield.slb.com). Με απλά λόγια, όταν δεν είναι καλή η πρόσφυση του τσιμέντου, ο παλμός θα είναι ισχυρότερος (δυνατός ήχος), ενώ όταν το τσιμέντο προσφύεται καλά, οι δονήσεις του σήματος εξασθενούν(www.production-technology.org).

2.2.1 Συμβατικά εργαλεία αξιολόγησης πρόσδεσης τσιμέντου (CBL-VDL)

Οι πρώτες συσκευές CBL σχεδιάστηκαν κατά το 1960 και περιλάμβαναν μόνο έναν πομπό και έναν δέκτη για τις μετρήσεις. Με τη ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας, άρχισαν να εξελίσσονται και οι συσκευές CBL δίνοντας περισσότερες επιλογές και μεγαλύτερη ακρίβεια και ευελιξία. Έτσι, ο εξοπλισμός CBL άρχισε να συνδυάζεται με την Variable Density Log (VDL) η οποία χρησιμοποιείται για τη μέτρηση διακύμανσης της πυκνότητας, παρέχοντας έτσι μια πιο ολοκληρωμένη πληροφορία. Κατά την εργασία διαγραφιών αξιολόγησης τσιμέντωσης, είναι σημαντικό ο φορατής καταγραφής να βρίσκεται κεντραρισμένος κατά τη μέτρηση και αποτελείται από έναν πομπό και δύο δέκτες: ο πρώτος δέκτης βρίσκεται σε απόσταση 3ft από τον πομπό και χρησιμοποιείται για τη μέτρηση CBL, ενώ ο δεύτερος δέκτης βρίσκεται σε απόσταση 5ft από τον πομπό και χρησιμοποιείται για τη μέτρηση VDL (Εικόνα 2.2.1.1) (www.production-technology.org)

Ο συνδυασμός των δύο αυτών διαγραφιών χρησιμοποιείται για να αξιολογηθεί η ποιότητα της τσιμέντωσης. Είναι πολύ χρήσιμα εργαλεία αλλά φυσικά έχουν και κάποιους περιορισμούς στην αξιολόγηση, όπως πχ το γεγονός ότι δεν μπορούν να προσδιορίσουν την υδραυλική απομόνωση μεταξύ των διαφορετικών ζωνών στον σχηματισμό. Ο απώτερος σκοπός της

αξιολόγησης του τσιμέντου είναι να προσδιορίζεται και να ποσοτικοποιείται ο βαθμός υδραυλικής και μηχανικής σφράγισης που παρέχεται από το τσιμέντο και πίσω από τη σωλήνωση (Kyi et al., 2015).

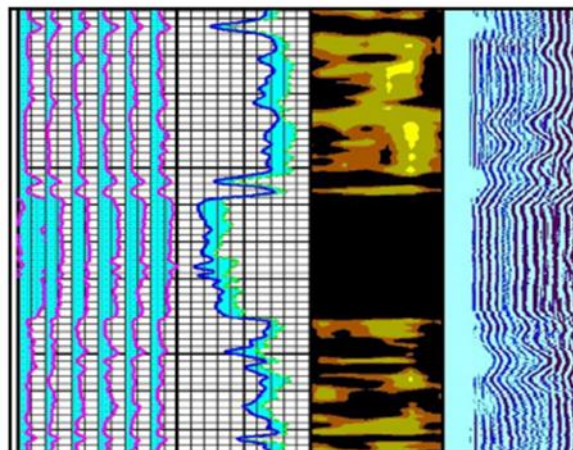


Εικόνα 2.2.1.1: Απεικόνιση εργαλείου καταγραφής διαγραφιών CBL-VDL
(www.production-technology.org)

2.2.2 Εξελιγμένα συστήματα αξιολόγησης τσιμεντώσης

Segmented Bond Log/Cement Map

Το εργαλείο Radial Bond Tool (RBT) είναι ένα πιο εξελιγμένο μοντέλο του CBL, όπου πλέον παρέχει εικόνα 360°. Επίσης, σχεδιάστηκε και το Segmented Bond Log το οποίο περιλαμβάνει έξι βραχίονες με έναν πομπό υπερήχων και ένα δέκτη σε κάθε άκρο. Όπως και για κάθε εργαλείο CBL, μετρίεται το μήκος του υπερηχητικού κύματος που επιστρέφει από τη σωλήνωση και παρέχει μέτρηση χρησιμοποιώντας διαφορετικούς συνδυασμούς ζευγών πομπού και δέκτη στους παρακείμενους βραχίονες. Η καταγραφή που εξάγεται από το σύστημα, αποτελείται από έξι καμπύλες, βάσει των οποίων δημιουργείται ο χάρτης τσιμέντου (cement map) πίσω από τη σωλήνωση (Εικόνα 2.2.2.2). Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι λόγω των βραχιόνων, τα άκρα του βρίσκονται μόνιμα σε επαφή με το εσωτερικό τοίχωμα της σωλήνωσης ελαττώνοντας το φαινόμενο της εκκεντρότητας της σωλήνωσης (eccentering effect), γεγονός που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις καταγραφές CBL. (Kyi et al., 2015).



Εικόνα 2.2.2.1: Παράδειγμα διαγραφίας Segmented Bond Log (στο οποίο διακρίνονται οι έξι καμπύλες μέτρησης) (Kyi et al., 2015).

Ultrasonic Cement Evaluation Log

Ένα άλλο σύστημα αξιολόγησης της τσιμέντωσης, όπως είναι το UltraSonic Imaging Tool (USIT) (Schlumberger) ή το Circumferential Acoustic Scanning Tool (Halliburton), χρησιμοποιεί έναν περιστροφικό μετατροπέα παλμού που σαρώνει το εσωτερικό ολόκληρου του πηγαδιού, εκπέμποντας ένα υπερηχητικό σήμα και παράγει ένα χάρτη σύνθετης ακουστικής αντίστασης. Αυτός ο χάρτης σύνθετης αντίστασης μετατρέπεται σε χάρτη τσιμέντου που βρίσκεται γύρω από το εξωτερικό της σωλήνωσης. Ο χάρτης κωδικοποιείται με χρώμα σύμφωνα με την τιμή της σύνθετης αντίστασης που μετράται σε μονάδες MRayl. Οι τιμές μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για να αναγνωρίσουν τα σημεία κακής πρόσφυσης του τσιμέντου. Επιπρόσθετα, το σύστημα αυτό παρέχει και πρόσθετες μετρήσεις όπως η εσωτερική διάμετρος της σωλήνωσης, το πάχος της, ένδειξη διάβρωσής της κ.α. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό το εργαλείο είναι πιο ευαίσθητο και υπάρχει μέγιστο όριο ειδικού βάρους της λάσπης για την χρήση του (Kyi et al., 2015).

Παρά την ανάπτυξη νέων συστημάτων και τεχνικών για την αξιολόγηση της τσιμέντωσης, κανένα από τα εργαλεία μέχρι στιγμής δεν μπορεί να μετρήσει την υδραυλική απομόνωση (hydraulic isolation), που είναι πραγματικά απαραίτητη πληροφορία. Όλα τα γνωστά εργαλεία μπορούν να δώσουν μόνο μια ένδειξη της ποιότητας της τσιμέντωσης με συμπεράσματα από άλλες φυσικές παραμέτρους, όπως το πλάτος του ηχητικού κύματος και η εξασθένηση του. Όπως και κάθε άλλη ερμηνεία, η αξιολόγηση της εργασίας της τσιμέντωσης υπόκειται στην

εμπειρία του ερμηνευτή. Είναι μια γνώμη που βασίζεται σε ορισμένες υποθέσεις και οποιεσδήποτε επακόλουθες αποφάσεις, όπως εργασίες στερέωσης, συμπίεσης κλπ θα πρέπει να υποστηρίζονται και από άλλα στοιχεία. Επομένως, είναι πολύ κρίσιμη η λήψη αποφάσεων με βάση τα αρχεία διαγραφιών αξιολόγησης της τσιμέντωσης (Kyri et al., 2015).

2.3 Τσιμεντοπολφός

Το τσιμέντο παράγεται κυρίως από ασβεστολιθικά και αργιλικά πετρώματα, όπως είναι ο ασβεστόλιθος, η άργιλος ή ακόμα ο σχιστόλιθος, τα οποία παρουσιάζουν υψηλό ποσοστό περιεκτικότητας σε ανθρακικό ασβέστιο. Συγκεκριμένα, το πέτρωμα κονιοποιείται και αναμειγνύεται διεξοδικά, υπό συγκεκριμένες αναλογίες. Η χημική σύνθεση του τσιμεντοπολφού καθορίζεται και προσαρμόζεται αναλόγως. Το μείγμα που θα προκύψει ψήνεται σε θερμοκρασίες 2600-2800 F (1427-1538 C). Το προϊόν που θα παραχθεί καλείται «clinker», το οποίο έπειτα ψύχεται, κονιοποιείται και αναμειγνύεται με γύψο (5%) και άλλα υλικά, όπως άμμο, βωξίτη και οξείδια σιδήρου, έτσι ώστε να δώσει το τελικό προϊόν που καλείται τσιμέντο τύπου Portland (Σταματάκη 2017). Αυτό αποτελεί το πιο διαδεδομένο τύπο τσιμέντου που χρησιμοποιείται στην πετρελαϊκή βιομηχανία. Το όνομα προέρχεται από το στερεό σχηματισμό αυτών των υλικών που βρίσκεται στο νησί Πόρτλαντ της Αγγλίας (Nelson 1990).

Το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου (American Petroleum Institute ή API) εδραίωσε την χρήση μιας κλίμακας κατάταξης των διαφόρων τύπων τσιμέντου, τα οποία πρέπει να πληρούν καθορισμένες φυσικές και χημικές ιδιότητες. Αναλυτικότερα, η κάθε κλάση, σύμφωνα με το API δίνεται στους Πίνακες 2.3.1α, 2.3.1β και 2.3.1γ.

API Class	Application
A	- Used at depth ranges of 0 to 6000 ft. - Used at temperatures up to 170°F - Used when special properties are not required - Used when well conditions permit - Economical when compared to premium cements
Neat	* Normal Slurry Weight is 15.6 ppg * Normal Mixing Water Requirement - 46% (5.19 gal/sk & 0.693 ft³/sk) * Normal Slurry Yield - 1.17 ft³/sk

Πίνακας 2.3.1α: Ταξινόμηση τσιμέντου κατά API Class (Hughes B, 1995).

B	- Used at depth ranges of 0 to 6000 ft. - Used at temperatures up to 170°F - Used when moderate to high sulfate resistance is required - Used when well conditions permit - Economical when compared to premium cements
Neat	* Normal Slurry Weight is 15.6 ppg * Normal Mixing Water Requirement - 46% (5.19 gal/sk & 0.693 ft³/sk) * Normal Slurry Yield - 1.17 ft³/sk
C	- Used at depth ranges of 0 to 6000 ft. - Used at temperatures up to 170°F - Used when high early-strength is required - Used when its special properties are required - High in tricalcium silicate
Neat	* Normal Slurry Weight is 14.8 ppg * Normal Mixing Water Requirement - 56% (6.31 gal/sk & 0.844 ft³/sk) * Normal Slurry Yield - 1.32 ft³/sk
D,E	- Class D used at depths from 6000 to 10000 ft. and at temperatures from 170 - 260°F - Class E used at depth from 10000 to 14000 ft. and at temperatures from 170 - 290°F - Both used at moderately high temperatures and high pressures - Both available in types that exhibit regular and high resistance to sulfate - Both are retarded with an organic compound, chemical composition and grind - Both are more expensive than Portland cement
Neat	* Normal Slurry Weight - 16.5 ppg * Normal Mixing Water Requirement - 38% (4.28 gal/sk & 0.572 ft³/sk) * Normal Slurry Yield - 4.29 ft³/sk

Πίνακας 2.3.1β: Ταξινόμηση τσιμέντου κατά API Class. (Hughes B, 1995).

F	- Used at depth ranges of 10000 to 16000 ft. - Used at temperatures from 230 - 320°F - Used when extremely high temperatures and pressures are encountered - Available in types that exhibit moderate and high resistance to sulfate - Retarded with an organic additive, chemical composition and grind
Neat	* Normal Slurry Weight - 16.5 ppg * Normal Mixing Water Requirement - 38% (4.28 gal/sk & 0.572 ft³/sk) * Normal Slurry Yield - 1.05 ft³/sk
G,H	- Used at depth ranges from 0 to 8000 ft. - Used at temperatures up to 200°F without modifiers - A basic cement compatible with accelerators or retarders - Usable over the complete ranges of A to E with additives - Additives can be blended at bulk station or at well site - Class H is a coarser grind than Class G
Neat	* Class G slurry weight is 15.8 ppg * Class G mixing water requirement - 44% (4.96 gal/sk & 0.663 ft³/sk) * Class G slurry yield - 1.14 ft³/sk * Class H slurry weight is 15.6 (shallow) to 16.4 (deep) ppg * Class H API water requirement - 46% (5.2 gal/sk & 0.69 ft³/sk) to 38% (4.3 gal/sk & 0.57 ft³/sk) * Class H slurry yield - 1.17 ft³/sk (shallow) to 1.05 ft³/sk (deep)

Πίνακας 2.3.1γ: Ταξινόμηση τσιμέντου κατά API Class (Hughes B, 1995).

Από τον παραπάνω Πίνακα συμπεραίνεται ότι είναι αποδεκτές διάφορες κλάσεις τσιμέντου, αλλά η χρήση τους εξαρτάται τόσο από τις συνθήκες που επικρατούν εντός της γελωτρησης, όσο και από τις οικονομικές δυνατότητες της εκάστοτε επιχείρησης. Να τονιστεί ότι οι διαφορές που υπάρχουν ανάμεσα στα χαρακτηριστικά των κλάσεων, οφείλονται στη διαφορετική περιεκτικότητα των τεσσάρων βασικών συνδυασμών (Πίνακας 2.3.2), που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή της τσιμεντόσκονης, C₂S, C₃S, C₃A και C₄AF (Σταματάκη 2017). Στο επόμενο κεφάλαιο δίνεται εκτενέστερη περιγραφή τους.

API Class	Compounds*					Fineness
	C3S	C2S	C3A	C4AF	CaSO4	SQq. cm/Gram
A	53	24	8	8	3.5	1600-1900
B	44	32	5	12	2.9	1500-1900
C	58	16	8	8	4.1	2000-2400
D&E	50	26	5	13	3	1200-1500
G	52	27	3	12	3.2	1400-1600
H	52	25	5	12	3.3	1400-1600

*Plus free lime, alkali, (Na, K, Mg)

Πίνακας 2.3.2: Η σύσταση των API κλάσεων (Σταματάκη 2017).

Όσον αφορά στις διαφοροποιήσεις ανάμεσα στις κλάσεις, οι κλάσεις A και B είναι οι πιο οικονομικές και χρησιμοποιούνται σε γεωτρήσεις μικρού βάθους. Η κλάση B είναι πιο ανθεκτική σε θευκές ενώσεις από την κλάση A. Αντίθετα, οι κλάσεις D, E και F είναι αποδοτικές σε μεγάλα βάθη, όπου επικρατούν υψηλές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, αλλά είναι αυτές που περιέχουν τους περισσότερους επιβραδυντές, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο χρόνος αναμονής για την στερεοποίηση του τσιμέντου. Τέλος, η τσιμεντόσκονη κλάσεων G και H έχει πιο γενική χρήση, δηλαδή καλύπτει μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και πιέσεων (Σταματάκη 2017).



Εικόνα 2.3.1: Μονάδα παρασκευής τσιμεντοπολφού. (www.gnsolidscontrol.com)

Σε μια μονάδα παρασκευής τσιμεντοπολφού (Εικόνα 2.3.1), τα στερεά υλικά που αναφέρθηκαν προηγουμένως, αναμιγνύονται με νερό (mixwater). Η ποσότητα του νερού που θα χρησιμοποιηθεί κάθε φορά φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

API Class	Mixwater Gals/Sk.	Slurry Weight Lbs/Gal.
A	5.2	15.6
B	5.2	15.6
C	6.3	14.8
D	4.3	16.4
E	4.3	16.4
F	4.3	16.2
G	5.0	15.8
H	4.3	16.4

Πίνακας 2.3.3.: Η απαιτούμενη ποσότητα νερού, ανάλογα με την εκάστοτε API κλάση, αλλά και την πυκνότητα του τσιμέντου.

Πιο συγκεκριμένα, η ποσότητα του νερού που θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε περίπτωση, είναι απαραίτητη για τη σωστή ενυδάτωση της τσιμεντόσκονης, έτσι ώστε να ενυδατωθεί πλήρως χωρίς περίσσεια ποσότητα νερού. Σε περίπτωση που δε γίνει σωστός υπολογισμός της ποσότητας του νερού και αυτό κρίνεται ανεπαρκές, τότε η πυκνότητα και το ιξώδες του πολφού θα αυξηθούν, με συνέπεια να μειωθεί η ικανότητα συμπίεσης του. Να σημειωθεί, ότι κατά τη διάρκεια του έργου της τσιμεντώσης, οι ανάγκες σε νερό μπορεί να διαφέρουν από βάθος σε βάθος, λόγω διαφορετικών συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας (Σταματάκη 2017).

Τέλος, όσον αφορά το νερό, σε χερσαίες γεωτρήσεις χρησιμοποιείται γλυκό «φρέσκο» νερό, ενώ σε θαλάσσιες, το νερό της θάλασσας. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι το «φρέσκο» νερό μπορεί να φέρει οργανικά υπολείμματα φυτών και ανόργανα άλατα, τα οποία επηρεάζουν την απόδοση του τσιμέντου Portland. Τέλος, προτιμώνται κυρίως τα πρόσθετα σε υγρή μορφή, καθώς ο τελικός πολφός ομογενοποιείται καλύτερα (Nelson 1990).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 Παρασκευή τσιμέντου

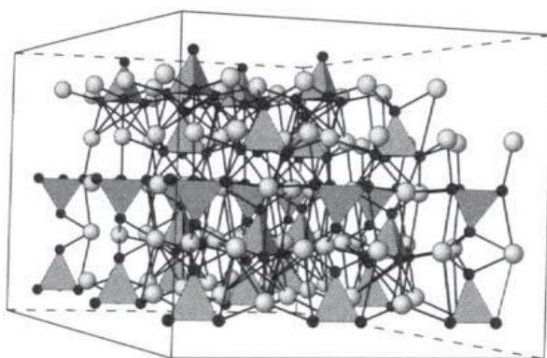
Ο επικρατέστερος τύπος τσιμέντου στην πετρελαιοβιομηχανία, όπως προαναφέρθηκε, είναι το Portland Cement (Ordinary Portland Cement, type I) (Μπιωτάκη 2014). Τέτοιου είδους τσιμέντα παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται σε χημικές αντιδράσεις που προκαλούνται μεταξύ του νερού και των συστατικών που υπάρχουν στο τσιμέντο. Η «πήξη» και η «σκλήρυνση» (setting and hardening) δεν προκύπτει μόνον όταν το μίγμα τσιμέντου/νερού αφηθεί σε συνθήκες αέρα, αλλά ακόμη και αν αυτό τοποθετηθεί σε υγρό περιβάλλον. Αυτή η ιδιότητα προκύπτει από την εξαιρετικά χαμηλή διαπερατότητα του υλικού, σε συνδυασμό με την ικανότητα να μην διαλύεται στο νερό (Nelson, 1990).

Όπως έχει προαναφερθεί, το τσιμέντο Portland αποτελείται κυρίως από το μίγμα τεσσάρων συστατικών: πυριτικού τριασβεστίου (C_3S), πυριτικού διασβεστίου (C_2S), αργλικό τριασβέστιο (C_3A) και σιδηρο-αργλικό-τετρασβέστιο (C_4AF). Στον πίνακα 3.1.1 παρουσιάζεται ενδεικτικά η ορυκτολογική σύσταση του τσιμέντου Portland, καθώς επίσης και κάποιες συντομογραφίες που έχουν επικρατήσει διεθνώς.

Συστατικό	Ποσοστό σε τσιμέντο Portland	Ορυκτολογικές ενώσεις
πυριτικό τριασβέστιο (C_3S)	45-75%	$C=CaO$ $S=SiO_2$
πυριτικό διασβέστιο (C_2S)	7-32%	$C=CaO$ $S=SiO_2$
αργιλικό τριασβέστιο (C_3A)	2-13%	$C=CaO$ $A=Al_2O_3$
σιδηροαργιλικότετρασβέστιο (C_4AF)	2-18%	$C=CaO$ $A=Al_2O_3$ $F=Fe_2O_3$

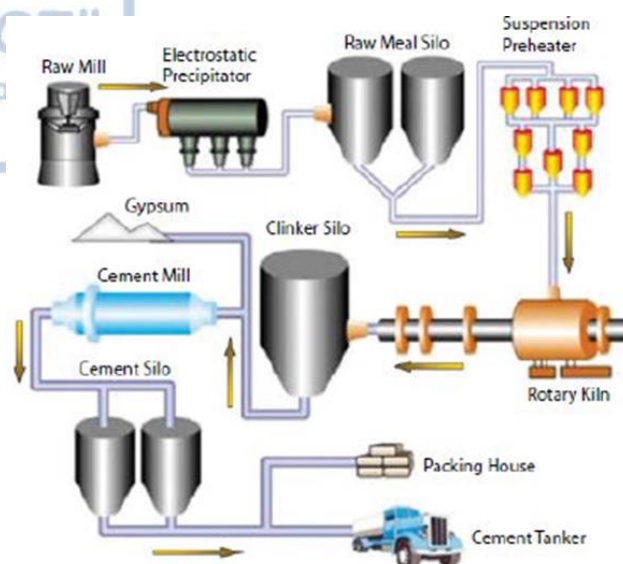
Πίνακας 3.1.1: Σύσταση ορυκτολογικών συστατικών τσιμέντου Portland.

Αυτές οι ενώσεις σχηματίζονται σε κλίβανο μετά από μια σειρά αντιδράσεων σε θερμοκρασίες έως $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, χρησιμοποιώντας ως πρόδρομα υλικά ασβεστόλιθο, πυρόλιθο και οξείδια του αργιλίου και σιδήρου.



Εικόνα 3.1.1: Κρυσταλλική δομή πυριτικού τριασβεστίου (C_3S).

Κατά τη διαδικασία παρασκευής του τσιμέντου Portland, οι προαναφερθείσες πρώτες ύλες λιοτριβούνται και προστίθενται σε τέτοια αναλογία, ώστε το μίγμα να έχει την επιθυμητή σύσταση. Μετά την ανάμιξη, το μίγμα τροφοδοτείται στον κλίβανο, θερμοκρασία 1500°C και μετατρέπεται σε ένα ενδιάμεσο συμπαγές προϊόν που ονομάζεται «clinker». Αφού ψυχθεί, προστίθεται μια μικρή ποσότητα γύψου (3%-5%) και το μίγμα κονιοποιείται. Το κονιοποιημένο προϊόν είναι πλέον το τσιμέντο Portland (Nelson, 1990).



Εικόνα 3.1.2: Σχηματική απεικόνιση της πορείας δημιουργίας του τσιμεντοπολφού. Αποτελεί τον εξοπλισμό επιφανείας (Σταματάκη 2017).

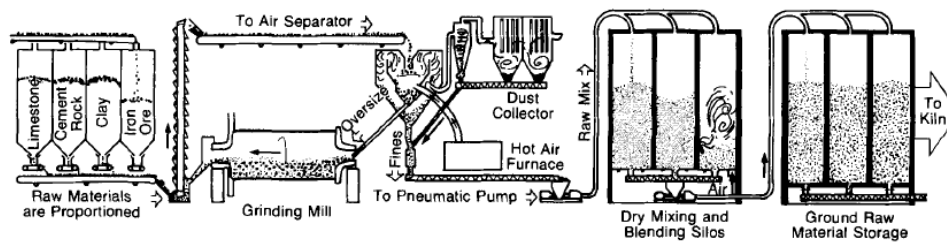
3.1.1 Επεξεργασία πρώτων υλών

Αν και πλέον κάθε τσιμεντοβιομηχανία ακολουθεί τη δική της μέθοδο, υπάρχουν δύο γενικές διαδικασίες:

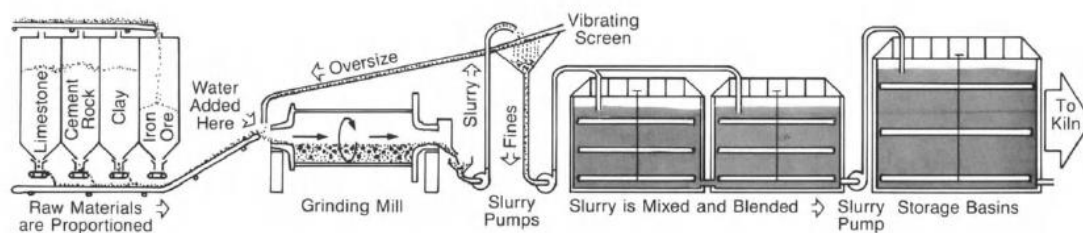
- *Η ξηρή μέθοδος*, κατά την οποία η άλεση και η ανάμιξη γίνονται με ξηρά υλικά. Πιο συγκεκριμένα, οι πρώτες ύλες λιοτριβούνται και ξηραίνονται σε περιστροφικούς στεγνωτήρες και στη συνέχεια αλέθονται σε περιστρεφόμενους χαλύβδινους σωλήνες. Έπειτα το υλικό διέρχεται από ένα διαχωριστή μεγέθους, στον οποίο η ταχύτητα του αέρα είναι επαρκής ώστε να μεταφέρει το αλεσμένο υλικό της απαιτούμενης λεπτότητας. Τα πιο χονδρόκοκκα σωματίδια απορρίπτονται με φυγοκέντρωση και ξαναπερνούν τη διαδικασία (Σχήμα 3.1.1.1).
- *Η υγρή μέθοδος*, κατά την οποία στις εργασίες λείανσης και ανάμιξης χρησιμοποιούνται ενυδατωμένα υλικά (υπό τη μορφή πολτού). Αρχικά, οι πρώτες ύλες ζυγίζονται σε ξηρή κατάσταση. Προστίθεται το νερό και η μείωση του μεγέθους πραγματοποιείται αλέθοντας τον πολτό σε ένα μύλο. Η ταξινόμηση μεγέθους πραγματοποιείται αφού ο πολτός διαπεράσει μια δονούμενη σίτα. Το πιο χονδρόκοκκο υλικό επιστρέφει και επανασυνδέεται στο μύλο. Ο πολτός αποθηκεύεται σε λεκάνες

εξοπλισμένες με περιστρεφόμενους βραχίονες και πεπιεσμένο αέρα, ώστε να διατηρείται το μίγμα ομοιογενές (Σχήμα 3.1.1.2).

Για πολλά χρόνια, η υγρή μέθοδος εφαρμοζόταν συχνότερα, καθώς ήταν πιο ακριβής ο έλεγχος του ακατέργαστου μίγματος. Ωστόσο, η υγρή μέθοδος απαιτεί πολύ περισσότερο καύσιμο για τον κλίβανο, ώστε να εξατμιστεί το νερό, με αποτέλεσμα το αυξημένο κόστος των καυσίμων να αναγκάσει την χρήση της ξηρής μεθόδου (Nelson, 1990).



Σχήμα 3.1.1.1: Διάγραμμα ροής ξηρής μεθόδου παρασκευής τσιμέντου.

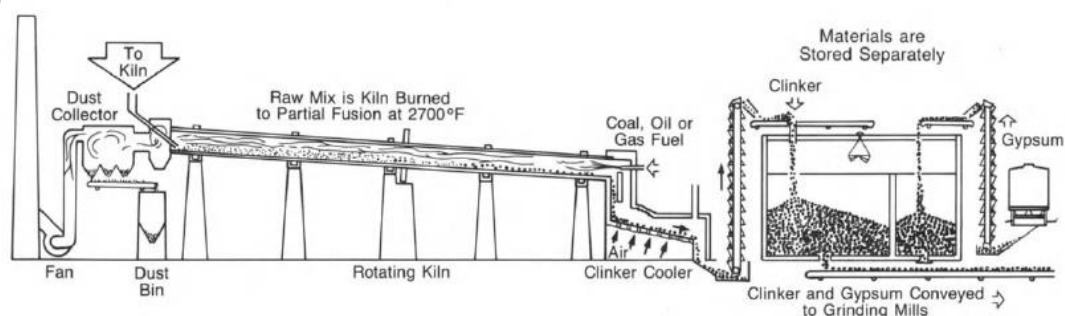


Σχήμα 3.1.1.2: Διάγραμμα ροής υγρής μεθόδου παρασκευής τσιμέντου.

Θερμική επεξεργασία

Αφού έχει επιτευχθεί το επιθυμητό μέγεθος σωματιδίων και ανάμιξης των πρώτων υλών, το υλικό περνά από μια θερμική επεξεργασία, η οποία πραγματοποιείται σε έναν περιστρεφόμενο κλίβανο. Ο κλίβανος έχει μια ελαφρά κλίση προς τα κάτω και περιστρέφεται με ταχύτητα 1-4 RPM, με αποτέλεσμα το στερεό υλικό να διαπερνά τον σωλήνα (κλίβανο) καθώς αυτός περιστρέφεται (Σχήμα 3.1.1.3). Μια σειρά φυσικών διεργασιών λαμβάνουν χώρα

μέσα στον κλίβανο (εξάτμιση, αφυδροξυλίωση, πυροσυσσωμάτωση) και οι πρώτες ύλες μετατρέπονται στο ενδιάμεσο προϊόν “clinker”(Nelson, 1990).



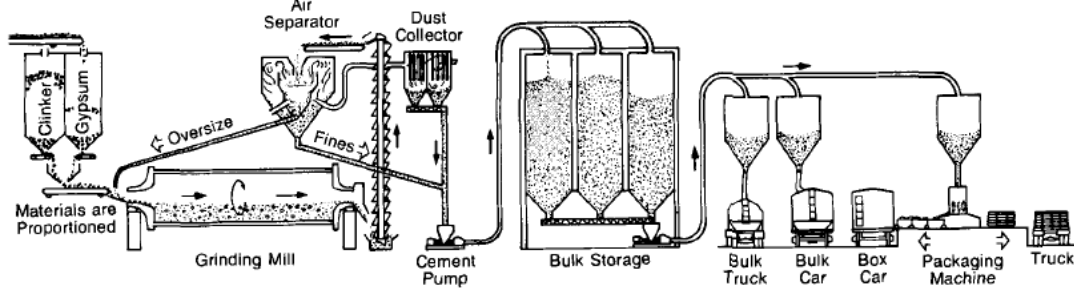
Σχήμα 3.1.1.3: Διάγραμμα ροής θερμικής επεξεργασίας στερεού τσιμέντου.

Ψύξη

Η ποιότητα του clinker και το τελικό προϊόν είναι άμεσα εξαρτώμενα από το στάδιο της ψύξης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα της ψύξης καθορίζει την στερεοχημική διάταξη των κρυστάλλων του τελικού στερεού τσιμέντου. Για παράδειγμα, όταν ο βαθμός ψύξης είναι αργός (πχ 4°C - 7°C) το αργλικό τριασβέστιο (C_3A) και το σιδηρο-αργλικό-τετρασβέστιο (C_4AF) αποκτούν υψηλό βαθμό κρυσταλλικότητας, ενώ το πυριτικό τριασβέστιο (C_3S) και το πυριτικό διασβέστιο (C_2S) αποκτούν υψηλό βαθμό ταξινόμησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα λιγότερο ‘υδραυλικό’ τσιμέντο (Nelson, 1990).

Άλεση

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1.1.4, το τελικό τσιμέντο παράγεται από την άλεση του clinker υπό την προσθήκη γύψου. Το μεγαλύτερο μέρος του τσιμέντου παράγεται σε σωληνοειδείς μύλους που περιέχουν χαλύβδινες μπάλες. Ανάλογα με το είδος του τσιμέντου που παράγεται, το clinker κονιορτοποιείται προς μια συγκεκριμένη τάξη μεγέθους από 1-100μm (Nelson, 1990).

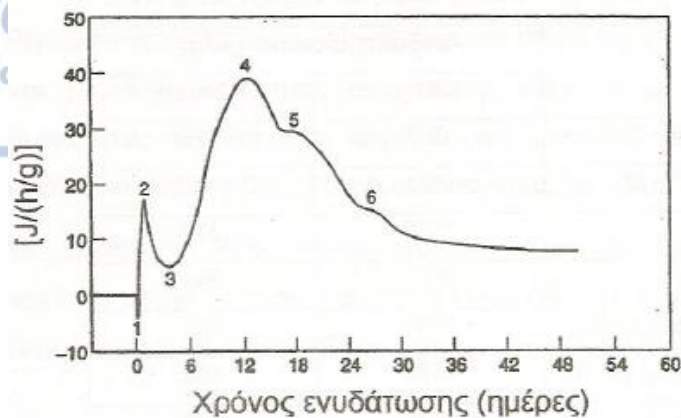


Σχήμα 3.1.1.4.: Διάγραμμα ροής άλεσης κατά την παρασκευή στερεού τσιμέντου.

3.2. Ενυδάτωση τσιμέντου

Η ενυδάτωση του τσιμέντου ίσως αποτελεί και το πιο σημαντικό στάδιο, καθώς καθορίζει και τις τελικές ιδιότητες του γαλακτώματος και πραγματοποιείται με την ανάμιξη της τσιμεντόσκονης με νερό. Οι χημικές αντιδράσεις του τσιμέντου Portland με το νερό ευθύνονται για την πήξη και σκλήρυνση του κονιάματος και κατά την ανάμιξη τους δημιουργείται μια εύπλαστη μάζα, γνωστή ως «πάστα». Ως αρχή ενυδάτωσης του τσιμέντου ορίζεται η χρονική στιγμή ανάμιξης του με το νερό και τελειώνει όταν το τσιμέντο πήξει τελείως και έχει αποκτήσει την τελική του μορφή, με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά αντοχής και σκληρότητας. Σε κάποια στάδια της διαδικασίας της ενυδάτωσης, παρατηρείται έκλυση θερμότητας, λόγω δημιουργίας και καταστροφής χημικών δεσμών μεταξύ των επιμέρους συστατικών. Η θερμότητα ενυδάτωσης που εκλύεται εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σύσταση του τσιμέντου, καθώς τα πυριτικά κυρίως άλατα ευθύνονται για τα μεγάλα ποσά θερμότητας (Ρήγα Μ., Σκαντζός Η., 2009). Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 3.1, το τσιμέντο αποτελείται από πυριτικά και αργιλικά άλατα ασβεστίου για τα οποία θα αναφερθεί η ενυδάτωση του καθενός ξεχωριστά (Τσίπρας 2015, Μπιωτάκη, 2014).

Στο διάγραμμα 3.2.1 απεικονίζεται η καμπύλη έκλυσης θερμότητας κατά την ενυδάτωση ενός τυπικού τσιμέντου Portland, συναρτήσει του χρόνου. Η αντίδραση είναι εξώθερμη και παρατηρείται μια ακαριαία έκλυση θερμότητας με την ανάμιξη του νερού με το τσιμέντο, η οποία οφείλεται στη διαλυτοποίηση του θεικού άλατος. Στη συνέχεια, η έκλυση θερμότητας φτάνει στη μέγιστη τιμή κι από εκεί και πέρα σημειώνεται μια σταδιακή ύφεση (Ρήγα Μ., Σκαντζός Η., 2009).



Διάγραμμα 3.2.1 Έκλυση θερμότητας συναρτήσει του χρόνου, κατά την ενυδάτωση ενός τυπικού τσιμέντου Portland (Ρήγα Μ., Σκαντζός Η., 2009).

3.2.1 Ενυδάτωση Πυριτικών αλάτων ασβεστίου του τσιμέντου Portland

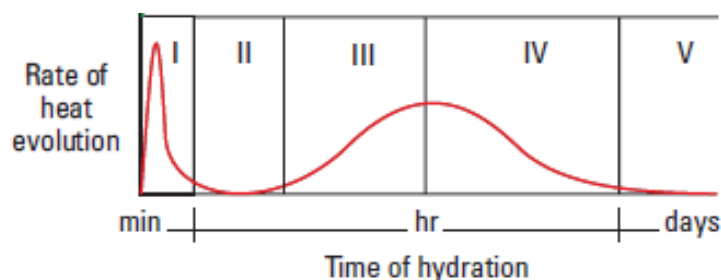
Ενυδάτωση του Πυριτικού Τριασβεστίου C_3S

Η ενυδάτωση του πυριτικού τριασβεστίου αποτελεί μια εξώθερμη διαδικασία και με τη βοήθεια ενός αγωγίμου θερμιδομέτρου λαμβάνεται το θερμόγραμμα στο *Διάγραμμα 3.2.1.1*. Στο εν λόγω διάγραμμα διακρίνονται οι πέντε φάσεις ενυδάτωσης του πυριτικού τριασβεστίου (C_3S) (Nelson, 1990):

1. *Περίοδος προεπαγωγής (Pre-induction period)*, η οποία ξεκινά κατά την ανάμιξη του κονιάματος με το νερό και διαρκεί μόλις μερικά λεπτά και συνήθως συνοδεύεται από έκλυση θερμότητας.
2. *Λανθάνουσα περίοδος (Induction period)*, κατά την οποία ο ρυθμός θερμικής μεταβολής πέφτει κατακόρυφα, και επομένως η δραστηριότητα ενυδάτωσης είναι πολύ μικρή. Σε αυτό το στάδιο απελευθερώνονται πολλά ιόντα ασβεστίου και υδροξυλίου και διαρκεί έως μερικές ώρες.
3. *Περίοδος επιτάχυνσης (Acceleration period)*, κατά την οποία το υδροξείδιο του ασβεστίου $Ca(OH)_2$ αρχίζει να κρυσταλλώνει σε μεγάλο βαθμό, ενώ παράλληλα σχηματίζονται και άλλα πυριτικά άλατα ασβεστίου ($C-S-H$), τα οποία επικάθονται και αναπτύσσονται στον ελεύθερο χώρο του υδατικού διαλύματος.
4. *Περίοδος επιβράδυνσης (Deceleration period)*, κατά την οποία ο ρυθμός της ενυδάτωσης αρχίζει να μειώνεται αισθητά. Το σύστημα αρχίζει να «σκληραίνει» και

να αποκτά αντοχή, καθώς μειώνεται το πορώδες. Σε φυσιολογικές συνθήκες, η περίοδος αυτή όπως και η περίοδος επιτάχυνσης διαρκούν μερικές μέρες.

5. *Περίοδος διάχυσης (Diffusion period)*, κατά την οποία η ενυδάτωση πλέον συνεχίζεται με πολύ αργό ρυθμό, καθώς το πορώδες μειώνεται όλο και περισσότερο. Το σύστημα των ενυδατωμένων φάσεων γίνεται όλο και πιο πυκνό αυξάνοντας την αντοχή του στο μέγιστο.



Διάγραμμα 3.1.1.1: Διάγραμμα ρυθμού θερμικής μεταβολής με το χρόνο, για το σύστημα C3S-νερό.

Ενυδάτωση του Πυριτικού Διασβεστίου C_2S

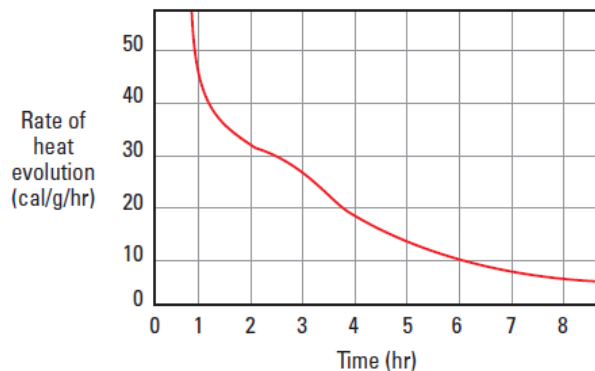
Ο ρυθμός ενυδάτωσης του πυριτικού διασβεστίου (C_2S) είναι αισθητά μικρότερος σε σχέση με το ρυθμό ενυδάτωσης του πυριτικού τριασβεστίου (C_3S), και αυτό διότι το πυριτικό τριασβέστιο (C_3S) βρίσκεται σε περίσσεια. Η ενυδάτωση του πυριτικού διασβεστίου (C_2S) είναι σημαντική και συμβάλλει μόνον στις μακροχρόνιες ιδιότητες του στερεοποιημένου τσιμέντου. Ο ρυθμός ενυδάτωσης εξαρτάται από παράγοντες όπως το είδος και η συγκέντρωση των σταθεροποιητών, η θερμοκρασία και ο χρόνος «ψησίματος» των πρώτων υλών του κλίνκερ, η λεπτότητα και η αναλογία νερό/τσιμέντο (Nelson, 1990; Τσίπρας, 2015).

3.2.2 Ενυδάτωση Αργιλικών αλάτων ασβεστίου του τσιμέντου Portland

Ενυδάτωση αργιλικού τριασβεστίου (C_3A)

Το ενυδατωμένο αργιλικό τριασβέστιο είναι αρκετά μετασταθές και καθιζάνει ως εξαγωνικοί κρύσταλλοι, όπου τελικά μετατρέπεται σε μια πιο σταθερή κυβική στερεοχημεία. Σε φυσιολογικές συνθήκες, αυτή η αντίδραση διαρκεί μέχρι μερικές ημέρες. Όπως φαίνεται και το *Διάγραμμα 3.2.2.1*, ο ρυθμός ενυδάτωσης είναι φανερά πιο ομαλός σε σχέση με το ρυθμό

ενυδάτωσης των πυριτικών αλάτων του ασβεστίου. Αυτή η ομαλότητα, βοηθάει στη ρεολογία του τσιμεντοπολτού, για αυτό και τα αργιλικά άλατα του ασβεστίου, επηρεάζουν κυρίως τις ρεολογικές ιδιότητες του μίγματος (Nelson, 1990; Τσίπρας, 2015).



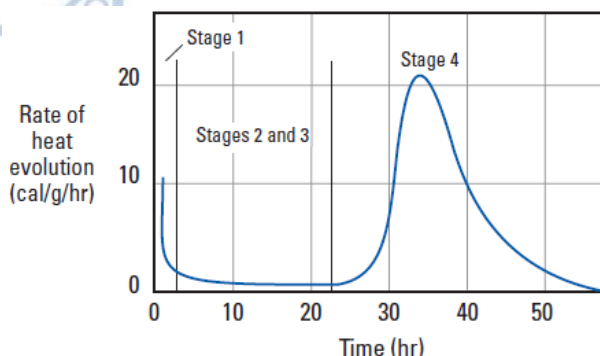
Διάγραμμα 2.2.2.1: Διάγραμμα ρυθμού θερμικής μεταβολής προς χρόνο αργλικού τριασβεστίου (σύστημα C₃A-νερό).

Αξίζει ακόμη να σημειωθεί ότι η ύπαρξη θεικού ασβεστίου (γύψου) προκαλεί την αντίδρασή του με το αργλικό τριασβέστιο, παρουσία νερού, σχηματίζοντας έτσι κρυστάλλους εττριγκίτη (Mak et al., 2015). Αυτή η χημική αντίδραση προκαλεί μια θετική διαφορά όγκων (δηλαδή διόγκωση), και καθώς οι κρύσταλλοι εττριγκίτη αναπτύσσονται γρήγορα στο μη ενυδατωμένο τσιμέντο, ταυτόχρονα επιβραδύνουν και την ενυδάτωσή του (Samo L. Et al, 2016). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι χωρίς την προσθήκη γύψου, ο τσιμεντοπολτός θα σκλήραινε ακαριαία (Portland Cement Association, 2001). Η παρουσία εττριγκίτη στον τσιμεντοπολτό, όσο είναι είναι ακόμη σε ρευστή κατάσταση, δεν είναι προβληματική, αλλά ο σχηματισμός του ή ο ανασχηματισμός του στο σκυρόδεμα, μπορεί να προκαλέσει εκτεταμένες ζημιές, λόγω της προκύπτουσας διαφοράς όγκου (Samo L. Et al, 2016). Επομένως, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην περιεκτικότητα σε αργλικό τριασβέστιο, ώστε ο σχηματισμός εττριγκίτη να είναι ελεγχόμενος. (Portland Cement Association, 2001)

Ενυδάτωση σιδηρο-αργλικού-τετρασβεστίου (C₄AF)

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 3.2.2.2, το σιδηρο-αργλικό-τετρασβέστιο έχει τον πιο γρήγορο ρυθμό θερμικής μεταβολής από κάθε άλλο συστατικό του κλίνκερ. Παρόλα αυτά, η αντιδραστικότητα της σιδηρικής φάσης μπορεί να μειωθεί με την αύξηση του σιδήρου (Fe).

Ενώ, υπό την παρουσία γύψου, ο βαθμός της αντίδρασης μπορεί να αυξηθεί (Nelson, 1990; Τσίπρας, 2015).



Διάγραμμα 3.2.2.2: Διάγραμμα ρυθμού θερμικής μεταβολής ως προς το χρόνο του σιδηροαργλικού τετρασβεστίου (C₄AF-νερό).

3.3. Πρόσθετα τσιμεντών και μηχανισμοί δράσης

Ο σχεδιασμός ενός τσιμεντοπολτού είναι πολύ σημαντικός και πρέπει να γίνεται κατά περίπτωση ώστε να διασφαλιστεί μια ανάμειξη χωρίς προβλήματα, με την επιθυμητή ρεολογία, τον έλεγχο απώλειας υγρών και το σωστό χρόνο διόγκωσης (thickening time). Κατά την ανάμειξη του τσιμεντοπολτού χρησιμοποιούνται πολλών ειδών χημικά, όπως πχ επιβραδυντικά, πρόσθετα ελέγχου απώλειας υγρών, διασκορπιστικά κλπ. Δεν υπάρχουν πρότυπες κατευθυντήριες γραμμές για να βοηθήσουν τους μηχανικούς γεώτρησης και τους επιστήμονες στον αποτελεσματικό σχεδιασμό του βέλτιστου τσιμεντοπολτού, καθώς κάθε πηγάδι είναι διαφορετικό και αποτελείται και από διαφορετικά τμήματα. Η επιλογή πρόσθετων για το σχεδιασμό του τσιμεντοπολτού, βασίζεται στον τύπο του σχηματισμού, το βάθος, τη θερμοκρασία και την πίεση (Al-Yami et al., 2017).

Στον τσιμεντοπολφό προστίθενται διάφορες ουσίες, με σκοπό τον έλεγχο της πυκνότητας και του ιξώδους του, αλλά και της απώλειας ρευστών. Υπάρχουν πάνω από 100 πρόσθετα, τα οποία όμως ταξινομούνται σε κατηγορίες. Ακολουθούν επιγραμματικά οι κατηγορίες (Σταματάκη 2017), με περαιτέρω ανάλυση στην πορεία.

- Accelerators: Χημικές ουσίες, των οποίων η χρήση αποσκοπεί στην μείωση του χρόνου στεγανοποίησης του τσιμέντου. Τέτοιες ουσίες είναι το NaCl, CaCl₂, κ.ά.

- Retarders: Πρόκειται για χημικές ουσίες που επιβραδύνουν τη διαδικασία πήξης και στερεοποίησης του τσιμέντου, όπως για παράδειγμα το CMHEC.
- Extenders: Χημικές ουσίες οι οποίες μειώνουν την πυκνότητα του τσιμεντοπολφού, όπως μπεντονίτης ή ποζολάνη.
- Weighting agents: Υλικά τα οποία αυξάνουν την πυκνότητα του τσιμεντοπολφού, όπως ο βαρίτης, ο αιματίτης, κτλ.
- Dispersants: Χημικές ουσίες, όπως διάφορα πολυμερή, τα οποία μειώνουν το ιξώδες και αυξάνουν τη ροή του τσιμέντου.
- Fluid-loss additives: Πρόκειται για υλικά, κυρίως οργανικά πολυμερή, τα οποία έχουν ως στόχο την αποφυγή αφυδάτωσης του πολφού και τη μείωση απώλειας ρευστών στους σχηματισμούς.
- Lost circulation control agents: Υλικά τα οποία ελέγχουν την απώλεια τσιμεντοπολφού σε αδύναμους και ρωγματωμένους σχηματισμούς.

3.3.1 Επιταχυντές (accelators)

Χλωριούχο ασβέστιο

Το χλωριούχο ασβέστιο είναι από τους πιο αποτελεσματικούς και οικονομικούς επιταχυντές, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3.3.1.1. Συνήθως χρησιμοποιείται σε συγκεντρώσεις 2-4% κατά βάρος (Nelson, 1990).

Χρόνος πήξης τσιμεντοπολτού με το πρόσθετο CaCl ₂ σε διάφορες θερμοκρασίες (hr:min)			
% CaCl ₂	33°C	39°C	45°C
0	4:00	3:30	2:32
2	1:17	1:11	1:01
4	1:15	1:02	0:59

Πίνακας 3.3.1.1: Χρόνος πήξης τσιμεντοπολτού με προσθήκη χλωριούχου ασβεστίου σε διάφορες αναλογίες και σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

Χλωριούχο νάτριο

Το χλωριούχο νάτριο επηρεάζει πολύ τον χρόνο πήξης καθώς επίσης και τη συμπιεστική δύναμη (compressive strength) που δημιουργείται στο τσιμέντο Portland. Σε συγκεντρώσεις μέχρι 15% κατά βάρος λειτουργεί ως επιταχυντής, ενώ όταν η συγκέντρωση υπερβεί το 20% λειτουργεί ως επιβραδυντής (Nelson, 1990; Τσίπρας, 2015).

Θαλασσινό νερό

Το θαλασσινό νερό είναι η καλύτερη επιλογή ως πρόσθετος επιταχυντής για τις παρασκευές τσιμεντοπολτού σε θαλάσσιες γεωτρήσεις. Περιέχει έως και 2.5% NaCl κατά βάρος, που προκαλεί επιτάχυνση της διαδικασίας σκλήρυνσης του τσιμεντοπολτού, αλλά η σύνθεση του φυσικά ποικίλλει σε όλο τον κόσμο (Nelson, 1990; Τσίπρας, 2015).

3.3.2 Επιβραδυντές (retarders)

Οι επιβραδυντές είναι χημικά τα οποία επιβραδύνουν τον χρόνο «σταθεροποίησης» (setting time) σε ένα σύστημα τσιμεντοπολτού. Στην περίπτωση ενός φρέατος του οποίου η θερμοκρασία είναι περίπου 50°C, η προσθήκη επιβραδυντή είναι περιττή. Αν όμως η θερμοκρασία αυξάνεται, αυξάνεται και η διαδικασία ενυδάτωσης του πυριτικού τριασβεστίου, κι επομένως ο χρόνος πήξης μειώνεται. Επομένως, σε αυτήν την περίπτωση, οι επιβραδυντές πρέπει να περιλαμβάνονται στο σχεδιασμό της τσιμέντωσης (Al-Yamietal., 2017). Ο μηχανισμός δράσης των επιβραδυντών δεν έχει ακόμη διαλευκανθεί και επικρατούν τέσσερις βασικές θεωρίες για το πως ακριβώς λειτουργούν.(Nelson, 1990).

- Θεωρία της προσρόφησης: Ο επιβραδυντής προσροφάται στις επιφάνειες των προϊόντων της ενυδάτωσης αναστέλλοντας έτσι την επαφή τους με το νερό.
- Θεωρία της καθίζησης: Ο επιβραδυντής αντιδρά με τα ιόντα ασβεστίου, υδροξυλίου ή και τα δύο στην υδάτινη φάση, σχηματίζοντας ένα αδιάλυτο και αδιαπέρατο στρώμα γύρω από τους κόκκους του τσιμέντου.
- Θεωρία της πυρήνωσης: Ο επιβραδυντής προσροφάται στους πυρήνες των ενυδατωμένων προϊόντων, αναστέλλοντας την άμεση ανάπτυξή τους.

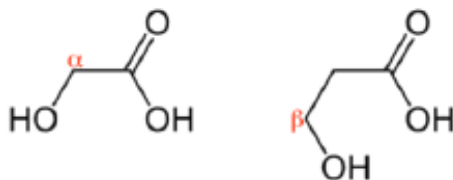
- Θεωρία συμπλοκοποίησης: Ο επιβραδυντής δημιουργεί χηλικούς δεσμούς με τα ιόντα ασβεστίου, αποτρέποντας τον σχηματισμό πυρήνων.

Λιγνοσουλφονικά

Οι πιο κοινοί επιβραδυντές που χρησιμοποιούνται στις τσιμεντώσεις γεωτρήσεων είναι τα λιγνοσουλφονικά άλατα ασβεστίου και νατρίου, τα οποία αποτελούν ανεπεξέργαστα πολυμερή ξύλου εμπλουτισμένα με διάφορες ποσότητες σακχαριτών. Το μοριακό τους βάρος κυμαίνεται από 20.000-30.000g/mol και συνήθως προστίθεται σε τσιμεντοπολτούς σε συγκεντρώσεις 0.1-1.5% κατά βάρος. Τα λιγνοσουλφονικά άλατα επηρεάζουν την κινητική ενυδάτωσης σύμφωνα με τις θεωρίες προσρόφησης και πυρήνωσης. Το λιγνοσουλφονικό ασβέστιο συμβάλλει επίσης και στον έλεγχο απώλειας υγρών (Nelson, 1990; Al-Yami et al., 2017).

Υδροξυκαρβοξυλικά οξέα

Η επιβραδυντική δράση των υδροξυκαρβοξυλικών οξέων και αλάτων τους οφείλεται στην παρουσία των ομάδων α- και β- (Εικόνα 3.3.2.1). Αυτές οι ομάδες δίνουν τη δυνατότητα να δημιουργούνται χηλικοί δεσμοί με μεταλλοϊόντα, όπως το ασβέστιο, και έτσι να σχηματίζονται σταθερές δομές δαχτυλιδιού, οι οποίες προσροφώνται μερικώς από την ενυδατωμένη επιφάνεια του τσιμέντου, αποτρέποντας τον σχηματισμό πυρήνων. Τα πιο συνηθισμένα υδροξυκαρβοξυλικά είναι τα άλατα του γλυκονικού και του γλυκοεπτονικού, ενώ το κιτρικό οξύ χρησιμοποιείται, εκτός από επιβραδυντικό, και για την αποτελεσματική διασπορά του τσιμέντου (Τσίπρας, 2015; Al-Yami et al., 2017).



Εικόνα 3.3.2.1: Υδροξυκαρβοξυλικά οξέα με θέσεις α- (αριστερά) και β- (δεξιά).

Παράγωγα Κυτταρίνης

Αυτοί οι πολυσακχαρίτες προέρχονται από το ξύλο και είναι πολύ σταθεροί στο μίγμα του τσιμεντοπολτού σε φυσιολογικές συνθήκες. Ο μηχανισμός της επιβράδυνσης οφείλεται στην προσρόφηση των προϊόντων κυτταρίνης στην ενυδατωμένη επιφάνεια του τσιμέντου και αποτρέπει περαιτέρω ενυδάτωση. Οι δεσμοί αιθυλενοξειδίου καθώς επίσης και οι καρβοξυλομάδες που υπάρχουν, είναι οι ενεργές τοποθεσίες και είναι υπεύθυνες για την προσρόφηση. Το πιο κοινό κυτταρινικό υλικό που χρησιμοποιείται ως επιβραδυντής είναι η καρβοξυ-μεθυλ-υδροξυ-εθυλοκυτταρίνη, η οποία συχνά χρησιμοποιείται και για τον έλεγχο απώλειας ρευστών (Τσίπρας, 2015; Al-Yami et al., 2017).

Οργανοφωσφορικά

Τα οργανοφωσφορικά είναι από τα πιο ισχυρά επιβραδυντικά τσιμέντωσης και είναι ένας από τους λόγους που χρησιμοποιούνται σε χαμηλή συγκέντρωση. Έχουν υψηλή απόδοση σε μεγάλες θερμοκρασίες, ή σε εφαρμογές που η επέκταση του χρόνου πήξης σε μεγαλύτερη από 24 ώρες κρίνεται απαραίτητη. Ο μηχανισμός δράσης δεν έχει ακόμη διαλευκανθεί, αλλά θεωρείται ότι λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο με τους υπόλοιπους επιβραδυντές, αναστέλλοντας την ενεργοποίηση πυρήνων μέσω προσρόφησης (Τσίπρας, 2015; Al-Yami et al., 2017).

3.3.3 Διογκωτές (Extenders)

Οι διογκωτές τσιμέντου λειτουργούν τουλάχιστον με έναν από δύο διαφορετικούς τρόπους (Nelson, 1990; Al-Yami et al., 2017):

- **Μείωση της πυκνότητας του τσιμεντοπολτού** που συνεπάγεται και μείωση της υδροστατικής πίεσης κατά τη διάρκεια της τσιμέντωσης. Αυτό βοηθά στην πρόληψη από απώλεια κυκλοφορίας (Lost circulation) που μπορεί να δημιουργηθεί σε χαλαρούς σχηματισμούς.
- **Αύξηση της απόδοσης του τσιμεντοπολτού:** τα πρόσθετα διογκωτικά μειώνουν την ποσότητα του τσιμέντου που απαιτείται να παραχθεί για ένα συγκεκριμένο όγκο, εξασφαλίζοντας μεγάλη οικονομία.

Ανάλογα με το μηχανισμό μείωσης πυκνότητας ή αύξησης απόδοσης τσιμεντοπολτού, οι διογκωτές κατηγοριοποιούνται στις παρακάτω τρεις κατηγορίες. Πολλές φορές, μπορεί να χρησιμοποιηθούν παραπάνω από ένας τύπος διογκωτικού, για κάποια εφαρμογή (Nelson, 1990; Al-Yami et al., 2017)

- *Διογκωτικά νερού:* ο άργιλος και διάφοροι άλλοι παράγοντες επιτρέπουν την προσθήκη περισσότερου νερού για διόγκωση τού πολτού. Τέτοια διογκωτικά διατηρούν ένα ομοιογενές μίγμα αποτρέποντας την απώλεια νερού.
- *Χαμηλής πυκνότητας συσσωματώματα:* Η συγκεκριμένη κατηγορία αποτελείται από υλικά χαμηλότερης πυκνότητας από το τσιμέντο Portland ($d=3.2\text{g/cm}^3$). Επομένως, η πυκνότητα του τσιμεντοπολτού μειώνεται με την προσθήκη σημαντικών ποσοτήτων από τέτοιου είδους υλικά.
- *Αέριοι διογκωτές:* άζωτο ή αέριο γενικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή αφρωδών τσιμεντών, χαμηλής πυκνότητας αλλά επαρκούς πίεσης.

Αργίλικά

Το πιο συνηθισμένο διογκωτικό με βάση την άργιλο είναι ο μπεντονίτης, ο οποίος αποτελείται τουλάχιστον κατά 85% από το ορυκτό «σμεκτίτη». Ο μπεντονίτης έχει την ιδιότητα να διογκώνεται αρκετές φορές από τον αρχικό όγκο του όταν έρχεται σε επαφή με το νερό, προκαλώντας αυξημένο ιξώδες, αντοχή υλικού και δυνατότητα «εναιώρησης» σωματιδίων. Ο μη ενυδατωμένος μπεντονίτης προτιμάται περισσότερο, διότι τα ιόντα ασβεστίου που υπάρχουν στο τσιμέντο εμποδίζουν την ενυδάτωσή του. Ακόμη, ο μπεντονίτης συμβάλλει στη μείωση των ρευστών, ενώ δεν είναι ιδιαίτερα αποδοτικός σε τσιμεντοπολτό που έχει χρησιμοποιηθεί αλατόνερο (Nelson, 1990; Al-Yami et al., 2017).

Πυριτικό νάτριο

Τα διογκωτικά πυριτικών αλάτων αντιδρούν με τον ασβεστόλιθο ή το χλωριούχο ασβέστιο που περιέχεται στο τσιμέντο, σχηματίζοντας ένα πυριτικό πήκτωμα ασβεστίου, σαν γέλη. Η δομή της γέλης παρέχει επαρκές ιξώδες ώστε να επιτρέψει την προσθήκη επιπλέον νερού. Τα πυριτικά άλατα διατίθενται σε στερεή ή και υγρή μορφή. Βέβαια, εξαιτίας αυτής της τάσης, τείνουν να μειώσουν την αποτελεσματικότητα άλλων πρόσθετων.

Ποζολάνες

Οι ποζολάνες είναι από τα πιο σημαντικά πρόσθετα διογκωτικών. Όχι μόνο επειδή διογκώνουν το σύστημα του τσιμεντοπολτού, αλλά επειδή επίσης αντιδρούν με το απελευθερωμένο υδροξείδιο του ασβεστίου κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου, πράγμα που συμβάλλει στην αντοχή και στη θλίψη του τελικού υλικού. Χωρίζονται σε δύο τύπους, τις φυσικές ποζολάνες και τις συνθετικές, και περιλαμβάνουν ηφαιστειακή τέφρα, μικροπυριτία, μετακαολίνη και κοκκώδη σκωρία υψικάινου. Γενικά, οι ποζολάνες προστίθενται στο τσιμέντο σε μεγάλες συγκεντρώσεις σε σχέση με άλλα προσθετα, από 20% έως 80% (Nelson, 1990; Al-Yami et al., 2017).

3.3.4 Πυκνωτές (weighting agents)

Τα πυκνωτικά πρόσθετα αναμιγνύονται με τον τσιμεντοπολτό προκειμένου να αυξηθεί η συνολική πυκνότητα, σε περιπτώσεις όπως υψηλή πίεση των σχηματισμών (pore pressure), σε ασταθή φρέατα κλπ. Οι κύριες προδιαγραφές που πρέπει να έχουν αυτά τα πρόσθετα περιλαμβάνουν το υψηλότερο ειδικό βάρος από το τσιμέντο, την ομοιόμορφη κατανομή σωματιδίων και το να είναι χημικά αδρανή ώστε να μην παρεμβαίνουν με το τσιμέντο ή τα φωρατές καταγραφής (logging tools) (Nelson, 1990; Al-Yami et al., 2017).

Οι πιο συνηθισμένοι πυκνωτές τσιμεντοπολτού είναι ο ιλμενίτης, ο αιματίτης, ο βαρύτης και το τετραοξείδιο του μαγγανίου.

Ιλμενίτης

Ο ιλμενίτης είναι ένα μαύρο κοκκώδες υλικό με ειδικό βάρος 4,45. Η μορφή του υλικού στην οποία παρέχεται έχει ακανόνιστη κατανομή μεγέθους σωματιδίων, πράγμα που απαιτεί το ιξώδες του πολτού να πρέπει να ρυθμιστεί προσεκτικά για να αποφευχθεί η καθίζηση. Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 5, πυκνότητες τσιμεντοπολτού άνω των 20 lbm/gal είναι πολύ εύκολα προσβάσιμες χρησιμοποιώντας ιλμενίτη.

Αιματίτης

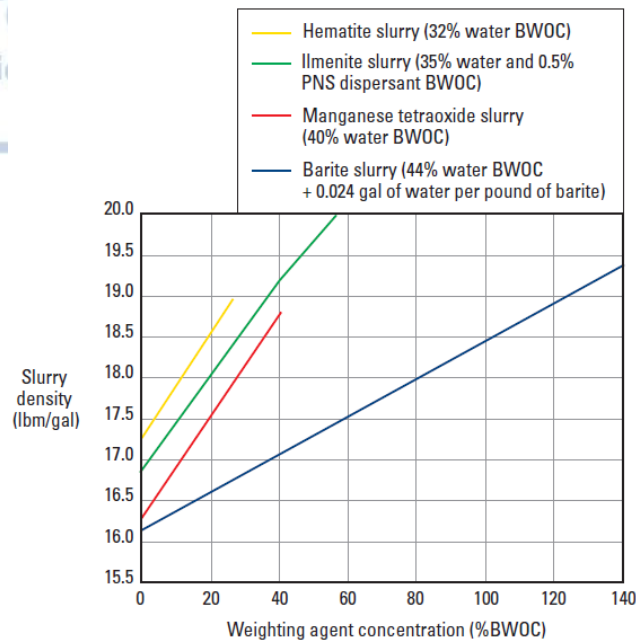
Ο αιματίτης έχει τη μορφή κόκκινων κρυσταλλικών κόκκων, με σταθερή κατανομή μεγέθους σωματιδίων, με υψηλό ειδικό βάρος 4,95 και αποτελεί έναν πολύ αποτελεσματικό παράγοντα αύξησης της πυκνότητας. Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 5, συνήθως χρησιμοποιείται για την παρασκευή πολτών τσιμέντου με πυκνότητες έως 19 lbm/gal, αλλά μπορεί να προστεθεί και σε υψηλότερες συγκεντρώσεις, αρκεί να προστεθεί και κάποιος παράγοντας διασποράς.

Βαρύτης

Ο βαρύτης είναι μια λευκή σκόνη και χρησιμοποιείται πολύ συχνά στις γεωτρήσεις πετρελαίου, καθώς είναι ευρέως διαθέσιμος στις περισσότερες τοποθεσίες εξορύξεων. Αν και έχει ειδικό βάρος 4.33, απαιτείται επιπλέον νερό για να «ενυδατωθούν» τα σωματίδια του και να δράσουν, γεγονός που μειώνει την αποτελεσματικότητά του. Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 5, δεν είναι το ίδιο αποτελεσματικός σε σύγκριση με τα υπόλοιπα πρόσθετα, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή τσιμεντοπολτού έως 19 lbm/gal.

Τετραοξείδιο του μαγγανίου

Το τετραοξείδιο του μαγγανίου είναι μια καστανοκόκκινη σκόνη με ειδικό βάρος 4,84 και διατίθεται σε στερεή ή υγρή μορφή. Η τελευταία μορφή χρησιμοποιείται κυρίως σε θαλάσσιες εφαρμογές. Τα σωματίδια της σκόνης είναι τόσο μικρά που δεν καθιζάνουν εύκολα σε σχέση με τα άλλα πρόσθετα. Τσιμεντοπολτοί με πυκνότητα έως 22 lbm/gal μπορούν να παρασκευαστούν με συνδυασμό του τετραοξειδίου του μαγγανίου με αιματίτη.

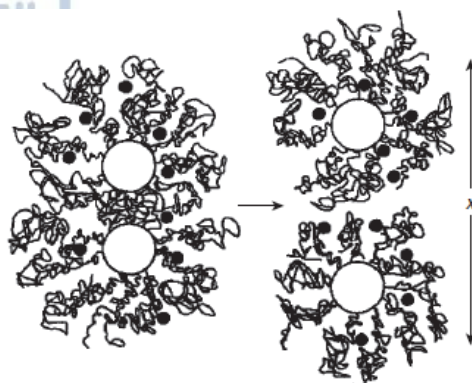


Διάγραμμα 3.3.4.1: Διάγραμμα πυκνότητας προς συγκέντρωσης πυκνωτικού παράγοντα, για τους τέσσερις συνηθέστερους πυκνωτές.

3.3.5 Παράγοντες διασποράς (dispersants)

Αυτοί οι παράγοντες βοηθούν στη μείωση του ιξώδους του τσιμεντοπολτού. Η πυκνότητα ενός τσιμεντοπολτού είναι μια άμεση συνάρτηση του στερεού περιεχομένου που υπάρχει στον πολτό. Οι παράγοντες διασποράς επιδρούν στα επιφανειακά φορτία των σωματιδίων, που καθορίζουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους, ώστε να αποκτήσει ο τσιμεντοπολτός την επιθυμητή ρεολογία. Υπάρχουν πολλών ειδών χημικοί παράγοντες διασποράς, όπως η σουλφονική πολυναφθαλίνη (η οποία αποφεύγεται να χρησιμοποιείται στις θαλάσσιες εξορύξεις λόγω της τοξικότητας της στους υδρόβιους μικροοργανισμούς), το σουλφονικό πολυστυρένιο, διάφορα πολυκαρβοξυλικά προϊόντα κ.α. Αυτό που αξίζει να σχολιαστεί είναι ο μηχανισμός δράσης τους και το πως επηρεάζουν τη ρεολογία του τσιμεντοπολτού.

Οι ανιονικοκοί παράγοντες διασποράς λειτουργούν με προσρόφηση στην επιφάνεια του τσιμέντου, φορτίζοντας τις ομάδες τους αρνητικά. Επομένως, η ηλεκτροστατική απώθηση των αρνητικά φορτισμένων σωματιδίων, οδηγεί σε αποτελεσματική διασπορά. Ανάλογα με τη χημική δομή του παράγοντα διασποράς, το φαινόμενο αποδίδεται σε ηλεκτροστατικές απωθήσεις, στερικές απωθήσεις μεταξύ των κόκκων τσιμέντου ή και τα δύο (Εικόνα 3.3.5.1).



Εικόνα 2.3.5.1: Σχηματική απεικόνιση στερικής απώθησης μεταξύ κόκκων τσιμέντου, όπου έχουν επιφανειακά προσροφηθεί πολυμερικοί παράγοντες διασποράς.

3.4 Ιδιότητες Τσιμεντοπολφού

3.4.1 Χαρακτηριστικά ρευστής φάσης

Ρεολογικό προφίλ τσιμεντοπολτού

Η ροή του τσιμεντοπολφού και η μετατόπιση ρευστών που προκαλεί κατά τη διάρκεια της γεώτρησης, επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις ρεολογικές ιδιότητες των ρευστών και από την πυκνότητα. Από ρεολογική άποψη, οι τσιμεντοπολφοί είναι μη-Νευτώνια υγρά. Έχουν μια τάση διολίσθησης (yield stress), που σημαίνει ότι για να τεθεί ο πολτός σε κίνηση, θα πρέπει να εφαρμοστεί μια συγκεκριμένη τιμή τάση διάτμησης. Αυτό σημαίνει ότι σε έναν αγωγό, όπως είναι ένας δακτύλιος γεώτρησης, πρέπει να ασκηθεί ένας συγκεκριμένος βαθμός πίεσης, ώστε να ξεκινήσει η ροή (Lavrov and Torsæter, 2016).

Τα ρευστά τσιμεντών είναι μη-Νευτώνεια, διότι η σχέση μεταξύ διατμητικής τάσης και τάσης διολίσθησης, δεν είναι απευθείας ανάλογη (Μπιωτάκη, 2014; Lavrov and Torsæter, 2016). Το πιο συνηθισμένο μοντέλο που περιγράφει τη ρεολογική συμπεριφορά των τσιμεντοπολφών είναι το μοντέλο Bingham Plastic, σύμφωνα με το οποίο δεν υπάρχει ροή του ρευστού μέχρις ότου η εφαρμοζόμενη τάση διάτμησης (shear stress) τ , υπερβεί την τάση διολίσθησης (yield stress) τ_y . Από αυτό το σημείο και μετά, οι δύο παράμετροι είναι ανάλογοι, με μια σταθερά αναλογίας που ονομάζεται πλαστικό ιξώδες (plastic viscosity) μ_p , όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 3.4.1.

Το μοντέλο Bingham plastic εκφράζεται με τη σχέση (1) :

$$\tau = \mu_p \cdot \gamma + \tau_y \quad (1)$$

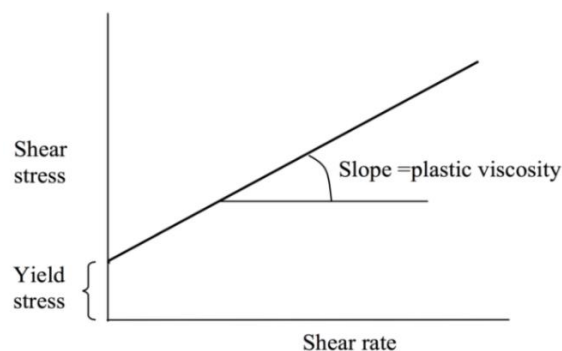
όπου τ = τάση διάτμησης, Pa (shear stress)

τ_y = τάση διολίσθησης, (yield stress)

γ = ρυθμός διάτμησης, (s^{-1}) (shear rate)

μ_p = πλαστικό ιξώδες (Plastic viscosity)

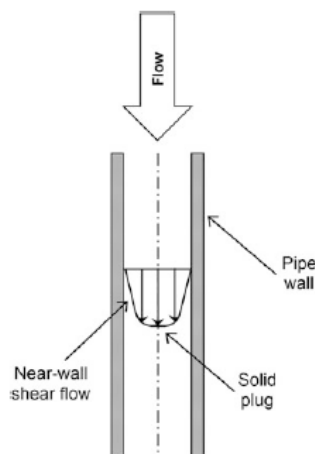
Γενικότερα, τα ρευστά ανάλογα με την ελάττωση ή αύξηση του ιξώδους, μετά από αύξηση του ρυθμού διάτμησης, κατηγοριοποιούνται και ως ψευδοπλαστικά (pseudoplastic) ή διασταλτικά (dilatants) αντίστοιχα. Ενώ, αν μετά από αύξηση του ρυθμού διάτμησης, το ιξώδες ελαττώνεται ή αυξάνεται, κατηγοριοποιούνται και ως θιξοτροπικά (thixotropic) ή ρεοπεκτικά (rheoplectic) αντίστοιχα. Τα περισσότερα ρευστά γεώτρησης (είτε mud slurries είτε cementing slurries) είναι ψευδοπλαστικά με θιξοτροπική συμπεριφορά (Μπιωτάκη, 2014).



Διάγραμμα 3.4.1. Διάγραμμα τάσης διάτμησης (shear stress) προς ρυθμό διάτμησης (shear rate) ρεολογικού μοντέλου Bingham plastic (Πηγή: Hasanzadeh et al. 2017).

Η ύπαρξη διατμητικής τάσης έχει σημαντικές επιπτώσεις στη ροή μέσα στους σωλήνες της γεώτρησης του διάκενου μεταξύ των σωλήνων και των σχηματισμών. Πιο συγκεκριμένα, η

διατμητική τάση είναι χαμηλότερη από την τάση διολίσθησης στο σημείο γύρω από τον άξονα του σωλήνα, με αποτέλεσμα το ρευστό να ρέει κανονικά στην περιοχή των τοιχωμάτων, και κινείται σαν ένα συμπαγές πώμα στην κεντρική περιοχή του σωλήνα (Εικόνα 3.4.1)(Lavron and Torsæter, 2016).



Εικόνα 3.4.1 Σχηματική απεικόνιση του προφίλ της ροής ρευστών σε μια σωλήνωση (Lavron, Torsæter, 2016) .

Η στατική σταθερότητα είναι ακόμη ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του τσιμεντοπολφού, η οποία περιγράφει το πόσο καλά ο τσιμεντοπολφός διατηρεί την ομοιογενή του πυκνότητα σε κατάσταση ηρεμίας. Τα στερεά σωματίδια στον πολτό τείνουν να καθιζάνουν, πράγμα που μπορεί να προκαλέσει επιπλέον πίεση στο δακτύλιο στο κάτω μέρος της γεώτρησης. Αυτό επίσης μπορεί να προάγει και την εισροή ρευστών του σχηματισμού στο πάνω μέρος του τσιμεντοπολφού, όπου θα έχει πιο χαμηλή πυκνότητα, πράγμα που θα προκαλέσει και ανομοιογένεια στην τελική φόρμα του τσιμέντου αφού συμπαγοποιηθεί (Lavron and Torsæter, 2016).

3.4.2 Χαρακτηριστικά Ενδιάμεσης κατάστασης (ρευστό προς στερεό)

Ενυδάτωση

Αφού ο τσιμεντοπολφός φτάσει στο κάτω μέρος της γεώτρησης, εισέρχεται στο διάκενο μεταξύ των σωληνώσεων και των σχηματισμών και συμπιέζεται προς τα πάνω μέχρι να φτάσει

στο επιθυμητό ύψος. Στη συνέχεια, αφήνεται για να συμπαγοποιηθεί πλήρως. Η συμπαγοποίηση οφείλεται στην ενυδάτωση του τσιμέντου, η οποία όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ξεκινά αμέσως μετά την ανάμιξη της τσιμεντόσκονης με το νερό (Lavrov and Torsæter, 2016).

Η ενυδάτωση συνεπάγεται αλλαγές τόσο στη δομή όσο και στις ιδιότητες του τσιμέντου. Καθώς το εναιώρημα του τσιμέντου ενυδατώνεται, σταδιακά αυξάνεται η αντοχή σε εφελκυσμό (tensile strength) και η αντοχή σε διάτμηση (shear strength). Η αντοχή σε εφελκυσμό ορίζεται ως η μέγιστη τάση εφελκυσμού που μπορεί να αντέξει ένα υλικό, χωρίς να σπάσει. Η αντοχή σε διάτμηση ορίζεται ως η μέγιστη τάση διάτμησης που μπορεί να αντέξει ο πολτός πριν αρχίσει να ρέει. Η αντοχή σε διάτμηση είναι ισοδύναμη με την τάση διάτμησης, και αρχίζει να αυξάνεται καθώς ο πολτός συμπαγοποιείται (Lavrov and Torsæter, 2016).

Η ενυδάτωση του τσιμέντου επίσης αποτελεί μια εξώθερμη αντίδραση, κατά την οποία απελευθερώνεται θερμότητα. Η θερμότητα, κάνει τη θερμοκρασία του συστήματος να αυξάνεται, το οποίο προκαλεί ελαφρώς μια διαστολή στη διάμετρο της σωλήνωσης. Έτσι, όταν η θερμοκρασία επανέλθει στο φυσιολογικό της, μπορεί να σχηματιστεί ένα μικρό διάκενο μεταξύ του τσιμέντου και των σωλήνων. Η απελευθέρωση θερμότητας είναι η βάση μιας τεχνικής αξιολόγησης για την ποιότητα της τσιμεντώσης του πηγαδιού, όπως είναι οι διαγραφίες θερμοκρασίας. Τέτοιου είδους καταγραφές μπορούν να εκτελεστούν μετά την ολοκλήρωση της εργασίας τσιμεντώσης, και διευκολύνουν στην εύρεση του ακριβούς ύψους της κορυφής της γεώτρησης (Lavrov and Torsæter, 2016).

Πορώδες

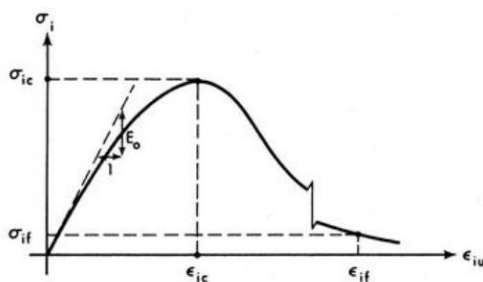
Ως πορώδες ορίζεται η αναλογία του όγκου πόρων προς τον συνολικό όγκο του υλικού. Αν ένα πορώδες υλικό περιέχει ένα συνδεδεμένο σύστημα πόρων και του εφαρμοστεί πίεση, τότε θα θέσει το ρευστό που υπάρχει στους πόρους σε κίνηση. Κατά τη διάρκεια της ενυδάτωσης/συμπαγοποίησης του τσιμέντου, η μείωση του πορώδους οδηγεί σε σημαντική μείωση της διαπερατότητας. Όταν η διαπερατότητα ενός τσιμεντοπολτού είναι 1D, η διαπερατότητα του συμπαγοποιημένου τσιμέντου είναι της τάξης 1-10 μ D. Η ταχεία μείωση της διαπερατότητας κατά τη συμπαγοποίηση, συνεπάγεται σε τσιμέντο πολύ καλής ποιότητας (Lavrov and Torsæter, 2016).

3.4.3 Χαρακτηριστικά Συμπαγοποιημένου Τσιμέντου

Κατά τη διάρκεια ζωής μιας γεώτρησης, το τσιμέντο εκτίθεται σε μια ποικιλία συνθηκών όπως κύκλοι θέρμανσης/ψύξης, μηχανικές καταπονήσεις, δονήσεις, εισροή ρευστών από τους σχηματισμούς κ.α. Επομένως, οι ιδιότητες του συμπαγοποιημένου τσιμέντου επηρεάζουν την στεγανοποίηση του και η κατανόηση τους είναι ζωτικής σημασίας για την ευστάθεια και την ακεραιότητα της γεώτρησης. Οι ιδιότητες του τσιμέντου μπορούν να υποδιαιρεθούν σε μηχανικές, διεπιφανειακές, υδραυλικές και θερμικές (Lavrov and Torsæter, 2016).

Οι μηχανικές ιδιότητες χαρακτηρίζουν την απόκριση του τσιμέντου στα μηχανικά φορτία και στην παραμόρφωση. Το τσιμέντο θεωρείται ότι λειτουργεί με ελαστική συμπεριφορά μέχρι ένα συγκεκριμένο επίπεδο φόρτωσης. Μόλις υπερβεί αυτό το επίπεδο, αποκτά μη ελαστική συμπεριφορά με μη γραμμική σχέση τάσης-παραμόρφωσης (Διάγραμμα 3.4.3.1). Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούνται τέσσερις φάσεις (Μπιωτάκη, 2014):

- Η ελαστική φάση: όπου επιβάλλεται φορτίο μικρότερο ή ίσο του 50% της μέγιστης αντοχής του τσιμέντου.
- Η φάση ανάπτυξης πρώτων ρωγμών: παρατηρείται μείωση του μέτρου ελαστικότητας.
- Η φάση ρωγμάτωσης: η οποία διακρίνεται από σταδιακή μείωση του μέτρου της ελαστικότητας σχεδόν κατά το ήμισυ.
- Η τελική φάση: οι ρωγμές έχουν προκαλέσει αστάθεια με αποτέλεσμα τη θραύση.



Διάγραμμα 3.4.3.1.: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης τσιμέντου.

Οι τιμές αντοχής σε θλίψη και εφελκυσμό είναι σημαντικά χαρακτηριστικά του τσιμέντου. Για παράδειγμα, ο σχηματισμός ρωγμάτωσης και διάδοσής του στο τσιμέντο, δημιουργείται από την πίεση που του ασκείται όταν η διάμετρος των σωληνώσεων αυξάνεται. Το φαινόμενο

αυτό, ελέγχεται, μεταξύ άλλων, και από την αντοχή εφελκυσμού του τσιμέντου. Συγκριτικά με άλλα υλικά (πχ. Κρυσταλλικά πετρώματα ή ενοποιημένοι ψαμμίτες) το τσιμέντο έχει πολύ μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη, παρά αντοχή σε εφελκυσμό (Lavrov and Torsæter, 2016).

Διεπιφανειακές ιδιότητες

Οι διασυνδέσεις μεταξύ τσιμέντου και σωλήνωσης, ή μεταξύ τσιμέντου και πετρώματος, είναι γνωστά πιθανά αδύναμα σημεία. Η τοπική έλλειψη συγκόλλησης μπορεί να ανακαλυφθεί εκτελώντας διαγραφίες τσιμέντου, αφού ολοκληρωθεί η τσιμέντωση. Ωστόσο, ακόμη και όταν η σύνδεση μεταξύ τους είναι καλή, η τοπική αντοχή διεπαφής σε αυτά τα σημεία μπορεί να είναι πολύ χαμηλότερα από την ισχύ του τσιμέντου σε οποιοδήποτε άλλο σημείο της τσιμέντωσης (Lavrov and Torsæter, 2016).

Υδραυλικές ιδιότητες

Οι υδραυλικές ιδιότητες καθορίζουν τη δυνατότητα δημιουργίας διαρροής κατά μήκος της γεώτρησης ή του ρυθμού με τον οποίο το περίβλημα τσιμέντου θα υποβαθμιστεί χημικά. Η διαρροή κατά μήκος του δακτυλίου μπορεί να δημιουργήσει επικοινωνία μεταξύ των γεωλογικών σχηματισμών ή ακόμα να μεταφέρει ρευστά του σχηματισμού στην επιφάνεια. Ειδικότερα, η διαρροή μπορεί να οφείλεται σε μικροσκοπικά κανάλια αερίου και 'κατάγματα' στο τσιμέντο. Εάν το τσιμέντο είναι απαλλαγμένο από αυτά τα ελαττώματα, η ικανότητα διαρροής καθορίζεται από τη διαπερατότητά του. Γενικότερα όμως, η διαπερατότητα των τσιμέντων που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι αρκετά χαμηλή ώστε να αποφευχθεί διαρροή, εφόσον το τσιμέντο παραμένει άθικτο (Lavrov and Torsæter, 2016).

Θερμικές ιδιότητες

Ένας από τους μηχανισμούς ανάπτυξης καταγμάτων στα τσιμέντα γεωτρήσεων συνδέεται με τη θέρμανση και την ψύξη. Σε αυτήν την περίπτωση, εκτός από τις μηχανικές ιδιότητες, παίζουν ρόλο και οι θερμικές ιδιότητες του τσιμέντου, και ιδιαίτερα ο συντελεστής θερμικής διαστολής (thermal expansion coefficient) και η αντίθεση μεταξύ σωλήνωσης, τσιμέντου και πετρώματος. Άλλες θερμικές ιδιότητες περιλαμβάνουν τη θερμική αγωγιμότητα (thermal

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 Ειδικές Περιπτώσεις Τσιμέντωσης

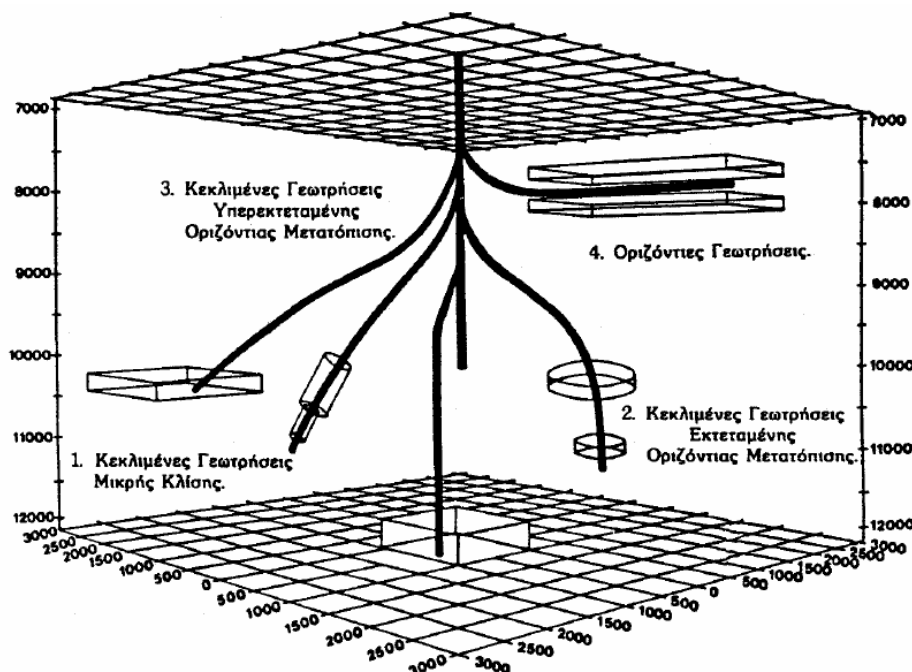
4.1.1 Τσιμέντωση Κατευθυνόμενων Γεωτρήσεων

Κατά τα τελευταία χρόνια της δεκαετίας του 1980 σημειώθηκε ραγδαία ανάπτυξη στον τομέα των κατευθυνόμενων γεωτρήσεων. Η ανάγκη για εκμετάλλευση κοιτασμάτων που δεν μπορούν να προσεγγιστούν με κάθετη γεώτρηση, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη εξέλιξη των τεχνολογικών εξοπλισμών και συστημάτων, συνέβαλλαν στην διεθνή εξάπλωση και εφαρμογή των κατευθυνόμενων γεωτρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν πολλές περιπτώσεις κοιτασμάτων που δεν μπορούν να προσεγγιστούν με κάθετη γεώτρηση, όπως (Σημειώσεις Σταματάκη, Κεφ. 9, 2003):

- η ανάπτυξη κοιτασμάτων που βρίσκονται κάτω από πυκνοκατοικημένες περιοχές, ή σε περιοχές όπου λόγω του δύσβατου τοπογραφικού ανάγλυφου η προσέγγισή τους καθίσταται από δυσχερή ως και αδύνατη,
- η προσέγγιση, από ξηράς, παράκτιων σχηματισμών,
- η ανάπτυξη σχηματισμών που βρίσκονται κάτω από ή πλευρικά ενός δόμου άλατος,
- η ταυτόχρονη προσβολή πολλών ζωνών παράλληλης στρωμάτωσης,
- η ταυτόχρονη προσβολή πολλών παραγωγικών σχηματισμών μικρών διαστάσεων, διεσπαρμένων στον ίδιο χώρο,
- η όρυξη γεώτρησης με σκοπό την προσέγγιση και στη συνέχεια αχρήστευση μιας γειτονικής -εξαιρετικά προβληματικής- γεώτρησης,
- προγράμματα όρυξης πολλαπλών γεωτρήσεων από το ίδιο επιφανειακό -χερσαίο ή θαλάσσιο- σημείο,
- η ανάπτυξη-εκμετάλλευση υποθαλάσσιων σχηματισμών μεγάλης επιφανειακής εξάπλωσης (η πλειοψηφία των έργων).

Η διαδικασία κατευθυνόμενης γεώτρησης (οριζόντια ή κεκλιμένη) αποτελεί τη μελέτη και τον προγραμματισμό μιας γεώτρησης που παρεκκλίνει από την τροχιά της, προς συγκεκριμένη

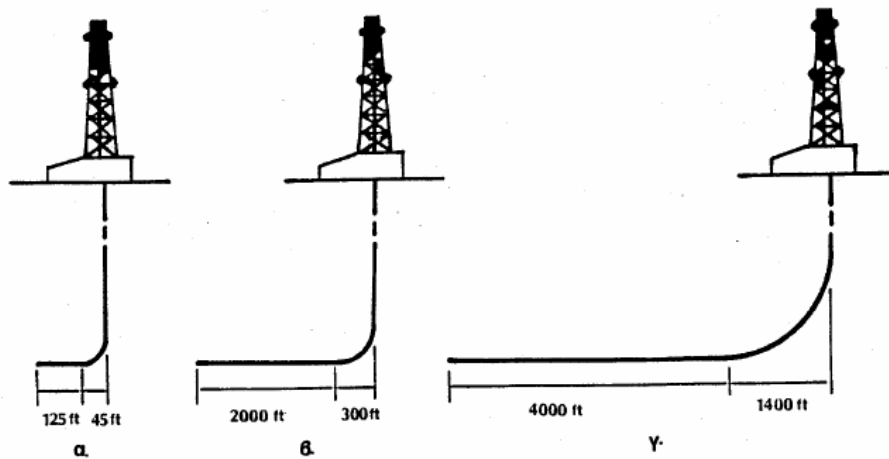
κατεύθυνση με σκοπό την προσέγγιση ενός προκαθορισμένου στόχου που βρίσκεται στο υπέδαφος (Σπηλιωτάκος 2018)(Εικόνα 4.1.1.1). Η επιθυμητή παρέκκλιση δίνεται στη γεώτρηση, έτσι ώστε να προσεγγιστεί με το συντομότερο δυνατό δρόμο, ένας ή και περισσότεροι γεωλογικοί σχηματισμοί «στόχου» (Σημειώσεις Σταματάκη, Κεφ. 9, 2003).



Εικόνα 4.1.1.3: Κατευθυνόμενη διάτρηση: κεκλιμένες και οριζόντιες γεωτρήσεις (Σημειώσεις Σταματάκη, Κεφ.9, 2003).

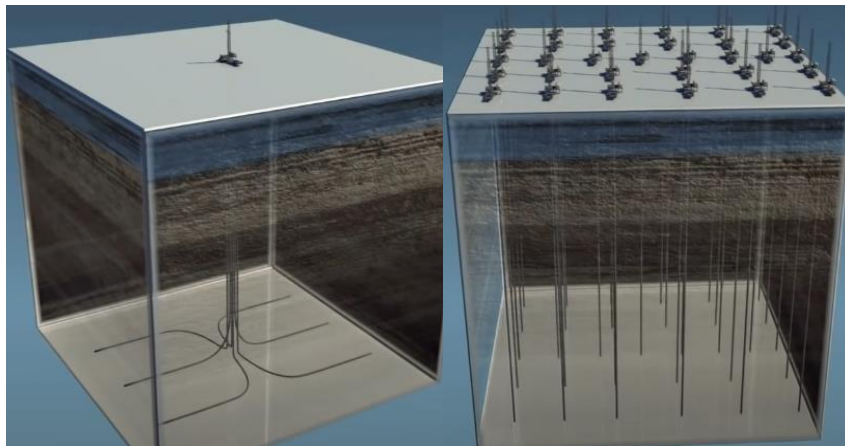
Η διάτρηση κεκλιμένων γεωτρήσεων με εκτεταμένη οριζόντια μετατόπιση (extended-reach drilling) και η **οριζόντια διάτρηση** (horizontal drilling) δανείζονται μεθόδους και εξοπλισμό από την κατευθυνόμενη διάτρηση κεκλιμένων γεωτρήσεων (όπου η μέγιστη γωνία κλίσης της γεώτρησης δεν υπερβαίνει τις 60°-65°, ενώ συχνά η έναρξη της όρυξής στην επιφάνεια πραγματοποιείται με το γεωτρύπανο υπό κλίση). Για το λόγο αυτό και γίνεται χρήση του σύνθετου όρου "**κατευθυνόμενη διάτρηση κεκλιμένων-οριζόντιων γεωτρήσεων**" (Σημειώσεις Σταματάκη, Κεφ. 9, 2003).

Οι οριζόντιες γεωτρήσεις ταξινομούνται πλέον, διεθνώς, με βάση το μήκος της «ακτίνας καμπυλότητας» σε τρεις κατηγορίες, έτσι ώστε να επιλέγεται ο σωστός τύπος τροχιάς, βάση των συνθηκών που επικρατούν σε κάθε περίπτωση, αλλά και για τη χρήση του απαραίτητου μηχανολογικού εξοπλισμού και τεχνικών (Σημειώσεις Σταματάκη, Κεφ. 9, 2003).



Εικόνα 4.1.1.2: Οι τρεις κατηγορίες οριζόντιων γεωτρήσεων: α. οριζόντιες γεωτρήσεις μικρής ακτίνας καμπυλότητας (ultra-short ή short-radius horizontal wells), β. οριζόντιες γεωτρήσεις μέσης ακτίνας καμπυλότητας (medium-radius horizontal wells), γ. οριζόντιες γεωτρήσεις μεγάλης ακτίνας καμπυλότητας (long-radius horizontal wells).

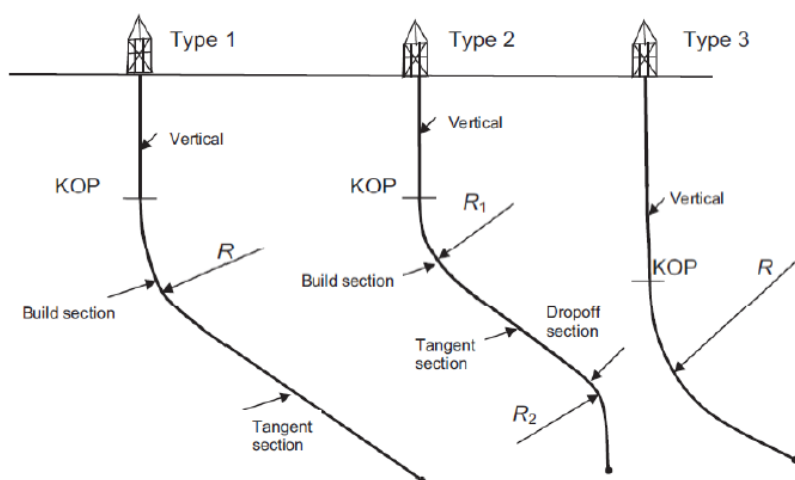
Υπάρχουν πολλοί λόγοι για να πραγματοποιηθεί μια οριζόντια γεώτρηση. Αρχικά, μια οριζόντια γεώτρηση διαπερνά μεγαλύτερο τμήμα του κοιτάσματος, σε σχέση με μια κάθετη γεώτρηση, οδηγώντας σε αποτελεσματικότερη παραγωγή αερίου ή πετρελαίου (Εικόνα 4.1.1.3) (Danilović et al., 2006).



Εικόνα 4.1.1.3: Αντιστοιχία απόδοσης παραγωγής των οριζόντιων γεωτρήσεων (αριστερά) σε κατακόρυφες γεωτρήσεις (δεξιά) (www.youtube.com/watch?v=fBQCQ6HL2Yw).

Οι κατευθυνόμενες τεχνικές διάτρησης (οριζόντιες ή κεκλιμένες) μπορούν να υποδιαιρεθούν σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες, ανάλογα με τη μορφή της τροχιάς που εφαρμόζεται στην πράξη (Εικόνα 4.1.1.3) (Σπηλιωτάκος 2018) (Σημειώσεις Σταματάκη, Κεφ. 9, 2003):

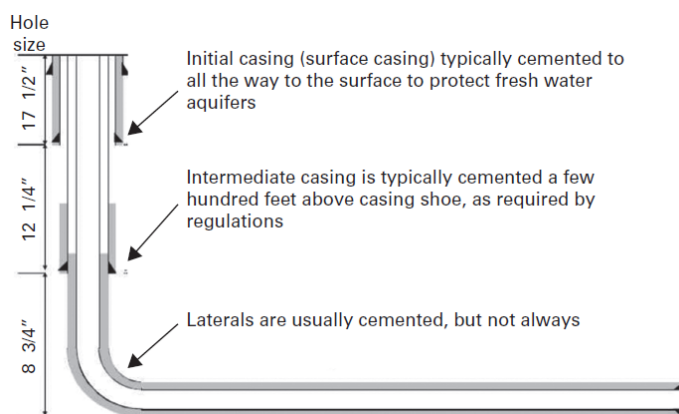
1. **Τύπος 1:** Το τμήμα αύξησης της γωνίας κλίσης (build section), εμφανίζεται μετά το Kick-off point το οποίο συνηθίζεται να τοποθετείται σε μικρό βάθος. Μόλις επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή παρέκκλισης, ακολουθεί το εφαπτομενικό τμήμα (tangent section), μέχρι να προσεγγιστεί ο στόχος της γεώτρησης.
2. **Τύπος 2:** Σε αυτόν τον τύπο τροχιάς, παρατηρείται πάλι παρέκκλιση από την κατακόρυφη διεύθυνση σε μικρό βάθος, συνεχίζοντας με το τμήμα αύξησης της γωνίας κλίσης μέχρι μια μέγιστη τιμή. Η τιμή διατηρείται σταθερή κατά το εφαπτομενικό τμήμα. Στη συνέχεια, μειώνεται σταδιακά (drop-off point) μέχρι να επιστρέψει η τροχιά στην κατακόρυφη διεύθυνση.
3. **Τύπος 3:** Στον συγκεκριμένο τύπο τροχιάς, η παρέκκλιση της γεώτρησης γίνεται σε πολύ μεγαλύτερο βάθος, σε σχέση με τους άλλους δύο τύπους. Μετά το τμήμα αύξησης γωνίας κλίσης, ακολουθεί ένα ευθύγραμμο ή εφαπτομενικό τμήμα υπό σχεδόν οριζόντια διεύθυνση, μέχρι το στόχο της γεώτρησης.



Εικόνα 4.1.1.3: Απεικόνιση των τριών κατηγοριών οριζόντιων γεωτρήσεων (μικρή ακτίνα, μεσαία ακτίνα, μεγάλη ακτίνα) (Nelson, 1990).

Σε ένα γενικότερο πλαίσιο, θα μπορούσε κανείς να πει ότι η κατασκευή μιας οριζόντιας γεώτρησης αποτελείται από το *κάθετο τμήμα* (vertical section), το *τμήμα παρέκκλισης τροχιάς* (build-upsection) και το *οριζόντιο/σχεδόν-οριζόντιο τμήμα* (near-horizontallateral) (Abdel-Alim et al, 1994). Αν και κάθε κατασκευή γεώτρησης διαφέρει από τόπο σε τόπο, αναλόγως με τους γεωλογικούς και νομικούς παράγοντες, υπάρχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά σε όλες τις

περιπτώσεις. Για παράδειγμα, η επιφανειακή σωλήνωση συνήθως εκτείνεται πέρα από το βάθος των υδροφόρων οριζόντων, και τσιμεντώνεται μέχρι την επιφάνεια, ώστε να αποφευχθεί η μόλυνση των υδροφόρων από τα γεωτρητικά ρευστά. Η ενδιάμεση σωλήνωση εκτείνεται σε βάθος μέχρι το σημείο kick-off, δηλαδή πριν ξεκινήσει η γεώτρηση να αλλάζει διεύθυνση. Αυτή η σωλήνωση τσιμεντώνεται πάνω από 100m ώστε να δημιουργήσει ένα σταθερό υδραυλικό φράγμα, πέραν της σωλήνωσης, ώστε οι υδρογονάνθρακες να μην καταφέρουν να διαρρέυσουν. Έτσι, σχηματίζονται τρεις φραγμοί κοντά στην επιφάνεια, ώστε να αποφευχθεί η διαρροή των υδρογονανθράκων κατά την άντληση μέσω του οριζόντιου παραγωγικού σωλήνα: η σωλήνωση παραγωγής (production casing), η τσιμέντωση της παραγωγικής σωλήνωσης, και η τσιμέντωση της ενδιάμεσης σωλήνωσης (Εικόνα 4.1.1.4) (Cambridge University Press 2019).

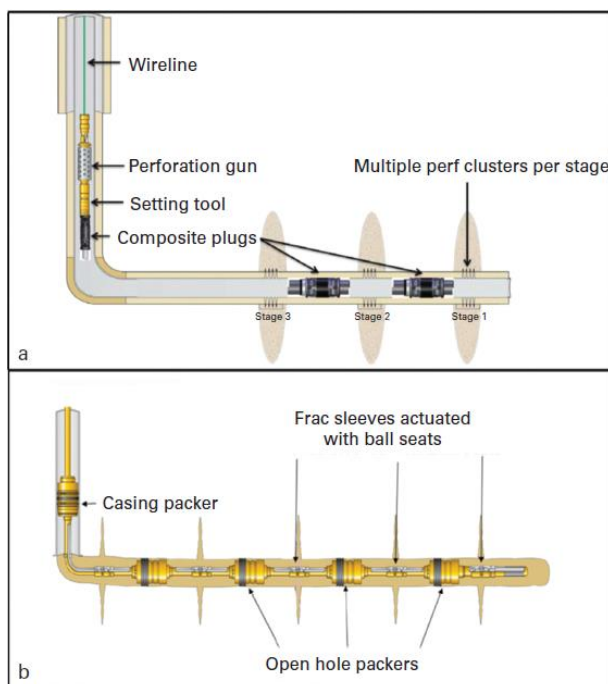


Εικόνα 4.1.1.4: Απλοποιημένο διάγραμμα σωληνήνωσης-τσιμέντωσης οριζόντιας γεώτρησης (Cambridge University Press 2019).

Ολοκλήρωση Οριζόντιας Τσιμέντωσης

Οι διάφορες εργασίες ολοκλήρωσης (completion) μιας οριζόντιας γεώτρησης, προσφέρουν διάφορους τρόπους διαχείρισης της απόδοσης του κοιτάσματος. Η επιλεγμένη μέθοδος ολοκλήρωσης πρέπει να έχει σχεδιαστεί ώστε να ταιριάζει στα χαρακτηριστικά και τους περιορισμούς της παραγωγής. Εξαρτάται δηλαδή από χαρακτηριστικά όπως ο βαθμός σταθεροποίησης των σχηματισμών, η ανάγκη για άμεση διακοπή νερού ή αερίου, ο αναμενόμενος ρυθμός ροής, η βιωσιμότητα του κοιτάσματος, η κατανομή των πόρων των

πετρωμάτων κλπ. Επομένως, κάθε επιλογή εργασίας ολοκλήρωσης μιας γεώτρησης γίνεται με γνώμονα τη σταθερότητα του φρέατος, με το χαμηλότερο δυνατό κόστος (Cambridge University Press 2019). Ετσι, συνήθως, ακόμη και τα οριζόντια τμήματα σωληνώνονται και τσιμεντώνονται, αλλά υπάρχουν και πολλές περιπτώσεις ανοιχτού φρέατος (open hole completion).



Εικόνα 4.1.1.5: Σχηματική απεικόνιση των δύο πιο συνηθισμένων μεθόδων ολοκλήρωσης πηγαδιών: (α) Η μέθοδος plug-and-perf που χρησιμοποιεί χωριστά plugs για απομόνωση των τμημάτων ενός σωληνομένου και τσιμεντωμένου πηγαδιού, και (β) Η μέθοδος sliding sleeve που χρησιμοποιείται συνήθως σε open hole wells (Cambridge University Press 2019).

Δύο από του πιο συνηθισμένους τύπους ολοκλήρωσης οριζόντας γεώτρησης είναι η μέθοδος *plug-and-perf* και η μέθοδος *sliding sleeve* (Εικόνα 4.1.1.5). Η μέθοδος *sliding sleeve* παρόλο που δεν απαιτεί τσιμεντώση και σωλήνωση (σε αντίθεση με τη μέθοδο *plug-and-perf*) είναι πιο συνηθισμένη, καθώς δεν απαιτεί πολλαπλές γραμμές καλωδίων για το εργαλείο διάτρησης (perforation tool). Ωστόσο, δεν είναι το ίδιο αποτελεσματική όσο η μέθοδος *plug-and-perf* (Cambridge University Press 2019).

Συνοψίζοντας, οι τεχνικές κατευθυνόμενων γεωτρήσεων χρησιμοποιούνται ως εναλλακτικές μέθοδοι γεώτρησης πετρελαίου και φυσικού αερίου σε καταστάσεις όπου είναι αδύνατη η κατακόρυφη όρυξη ή το σχήμα του κοιτάσματος είναι εύκολο να προσπελαστεί

διαφορετικά, ή για βελτίωση απόδοσης ταμειυτήρα (Milad et al., 2020). Οι προσεκτικές εργασίες τσιμεντώσεως και σωλήνωσης, και η προσοχή στις ειδικές λεπτομέρειες κατά το σχεδιασμό εκτέλεσης, οι οριζόντιες γεωτρήσεις μπορούν να αποφέρουν επιτυχημένα αποτελέσματα. Έτσι, πιο συνοπτικά, τα πλεονεκτήματα κεκλιμένων ή οριζόντιων γεωτρήσεων είναι (www.petroblogweb.wordpress.com):

- Αύξηση παραγωγής λόγω μεγαλύτερου μήκους της γεώτρησης που διαπερνά τον ταμειυτήρα.
- Προσέγγιση κοιτασμάτων - στόχων που δεν μπορούν να προσεγγιστούν με κάθετη γεώτρηση.
- Μειωμένη πίεση φρέατος.
- Πιο αποτελεσματικό σύστημα αποστράγγισης, που οδηγεί σε μεγαλύτερη απόληψη.
- Η απόληψη υδρογονανθράκων μετά από εισροή νερού βελτιώνεται σημαντικά στην περίπτωση οριζόντιων γεωτρήσεων.
- Γενική μείωση στην παραγωγή άμμου.

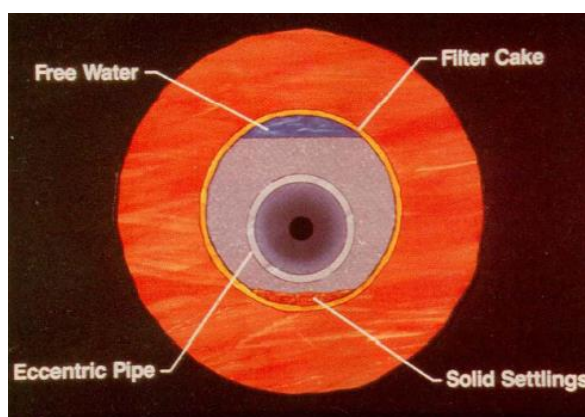
4.1.2 Ιδιότητες τσιμεντοπολφού στις κατευθυνόμενες γεωτρήσεις

Όπως και στις συμβατικές γεωτρήσεις υδρογονανθράκων, οι ιδιότητες του τσιμεντοπολφού, είναι απολύτως απαραίτητες για μια επιτυχημένη γεώτρηση. Στην περίπτωση όμως των κατευθυνόμενων γεωτρήσεων, κάποιες από τις ιδιότητες του τσιμεντοπολφού είναι πιο κρίσιμες, σε σχέση με τις γεωτρήσεις που έχουν ανεπαίσθητη απόκλιση από την κάθετο. Οι δύο πιο σημαντικές ιδιότητες του τσιμεντοπολφού, για αυτήν την κατηγορία γεωτρήσεων, είναι η σταθερότητα του (slurry stability) και η απώλεια ρευστών (fluid loss) (Nelson, 1990)..

Σταθερότητα τσιμεντοπολφού

Η σταθερότητα του τσιμέντου είναι πάντα σημαντική, αλλά ακόμη περισσότερο σε μια αποκλίνουσα γεώτρηση. Υπάρχουν δύο ιδιότητες που καθορίζουν τη σταθερότητα του τσιμέντου: το «ελεύθερο» νερό (free water) και η καθίζηση (sedimentation) (Εικόνα 4.1.1.6). Το ελεύθερο νερό είναι σημαντικό γιατί μπορεί να μεταναστεύσει σε υψηλό σημείο της γεώτρησης, και να δημιουργήσει ένα ανοιχτό κανάλι μέσω του οποίου μπορούν να ρέουν τα ρευστά της γεώτρησης ανεξέλεγκτα. Από την άλλη, η καθίζηση μπορεί να προκληθεί σε

χαμηλής αντοχής τσιμέντο με μεγάλο πορώδες, στο κάτω μέρος της γεώτρησης. Έτσι, μπορεί να συμβεί απώλεια ζωνικής απομόνωσης, με αποτέλεσμα τη μετανάστευση ρευστών και μειωμένο έλεγχο της αποδοτικότητας της δεξαμενής. Παρόλο που η εμφάνιση του ελεύθερου νερού και της καθίζησης μπορούν να συμβούν μαζί, δεν είναι απαραίτητα συνδεδεμένα μεταξύ τους. Επομένως, πρέπει να διεξάγονται δοκιμές ώστε να επιβεβαιώνεται ότι δεν συμβαίνει τίποτα από τα δύο. Το ελεύθερο νερό και η καθίζηση μπορούν να προληφθούν με χημικά μέσα, όπως η προσθήκη παραγόντων διόγκωσης ή και μεταλλικών αλάτων που σχηματίζουν σύμπλοκα υδροξειδίων (Nelson, 1990; Sabbins 1990).



Εικόνα 4.1.1.6: Απεικόνιση των προβλημάτων (free water και solid settlements) που μπορεί να παρουσιαστούν σε μία οριζόντια γεώτρηση (τομή) (Πηγή: Sabbins 1990).

Απώλεια ρευστών

Ο έλεγχος απώλειας ρευστών είναι ιδιαίτερα σημαντικός στις οριζόντιες γεωτρήσεις, επειδή η έκθεση σε διαπερατές τομές είναι πολύ πιο εκτεταμένη σε σχέση με τις κατακόρυφες γεωτρήσεις. Οι χαμηλές τιμές απώλειας ρευστών είναι απαραίτητες για τη διατήρηση των προσεκτικά σχεδιασμένων ρεολογικών ιδιοτήτων του τσιμεντοπολφού. Ο ρυθμός απώλειας των ρευστών θα πρέπει να είναι πάντα μικρότερος από 50ml / 30min (Nelson, 1990).

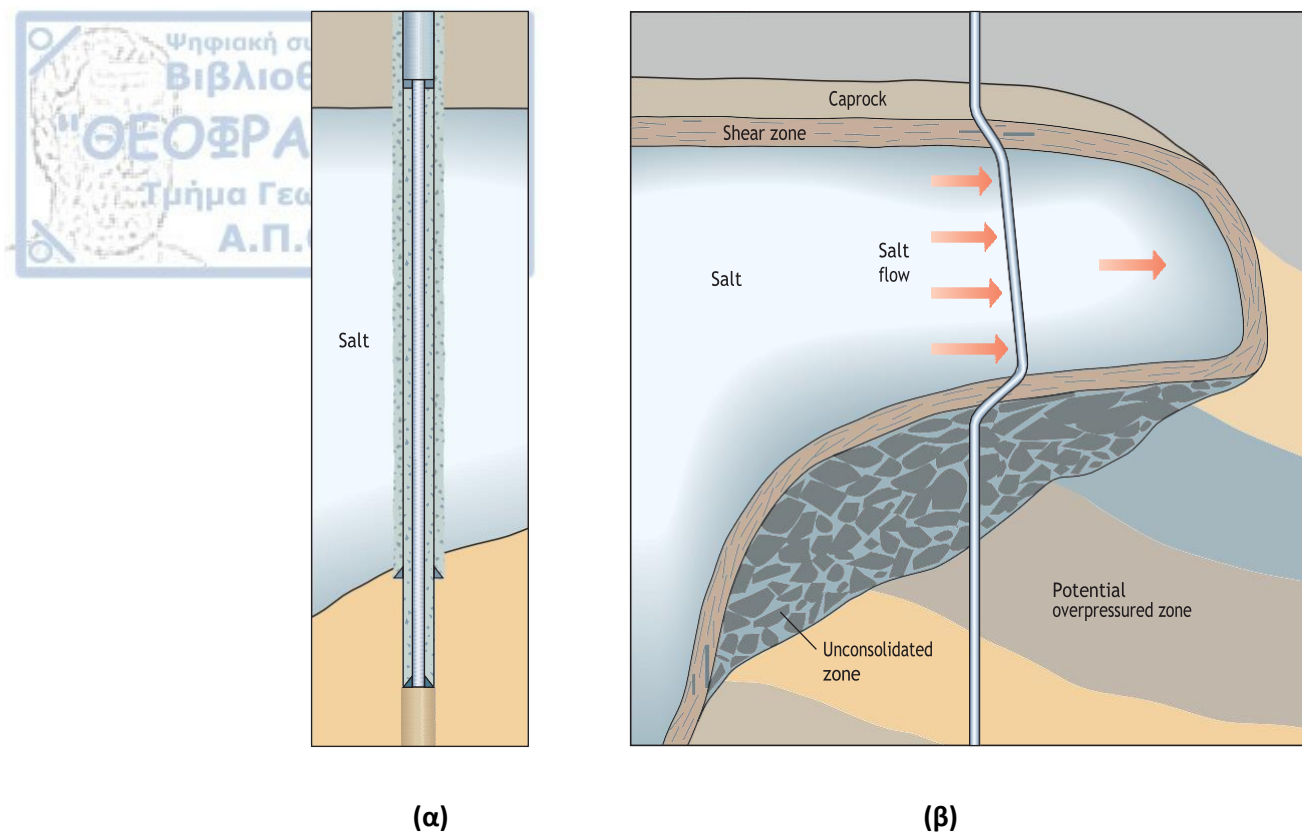
4.1.2 Τσιμεντώσεις σε Δόμους Άλατος

Η παγκόσμια βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου δέχεται πίεση και καλείται να αυξήσει την παραγωγή για να καλύψει την παγκόσμια ζήτηση ενέργειας. Ένας από τους βασικούς τομείς που αναπτύχθηκε για να καλύψει αυτήν την ανάγκη, είναι τα αποθέματα που

βρίσκονται κάτω από μαζικούς σχηματισμούς άλατος (*Hunter et al. 2010*). Η προσέγγιση τέτοιων κοιτασμάτων, όταν δεν είναι εφικτό να προσεγγιστούν με διάτρηση γύρω από το δόμο άλατος, γίνεται μέσω όρυξης των σχηματισμών άλατος. Φυσικά, η σωλήνωση και η τσιμεντώση τέτοιων ζωνών μπορούν να δημιουργήσουν ιδιαίτερες τεχνικές προκλήσεις, που σχετίζονται με την επίδραση της διάλυσης του αλατιού, με τους κινδύνους που παρουσιάζονται κατά το φαινόμενο του ερπυσμού (creep), αλλά και στην ακεραιότητα του φρέατος (*Hunter et al. 2010*).

Οι δυσκολίες που αντιμετωπίζονται κατά τη διάτρηση τέτοιων σχηματισμών, αποτελούν συνάρτηση των μοναδικών χαρακτηριστικών του άλατος. Τα στρώματα άλατος διατηρούν σχετικά χαμηλή πυκνότητα ακόμη και μετά τον ενταφισμό τους. Δεδομένου ότι άλλοι σχηματισμοί στο ίδιο βάθος ή και βαθύτερα, αυξάνουν την πυκνότητά τους με την πάροδο του χρόνου, όσο υπερφορτώνονται, τα στρώματα άλατος τείνουν να είναι λιγότερο πυκνά από τους γειτονικούς σχηματισμούς (*Perez et al. 2008*). Η διείδυση σε έναν δόμο άλατος παρουσιάζει ακόμη μια μοναδική πρόκληση. Υπό συνεχή και σταθερή πίεση, το άλας παραμορφώνεται σημαντικά ως συνάρτηση του χρόνου, των συνθηκών φόρτωσης και των φυσικών ιδιοτήτων του. Αυτό το φαινόμενο, γνωστό ως «ερπυσμός» (creep) επιτρέπει στο άλας να ρέει στην κοιλότητα για να αντικαταστήσει τον όγκο που αφαιρείται από το τρυπάνι. Ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες, η εισβολή μπορεί να συμβεί αρκετά γρήγορα, να κολλήσει ο σωλήνας του τρυπανιού και να εγκαταλειφθεί το πηγάδι ή να χρειαστεί να επιτευχθεί κάποια παράκαμψη από γύρω (*Perez et al. 2008*). Η ερπυστική συμπεριφορά του πετρώματος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την ανάλυση της ευστάθειας υπογείων έργων μόνιμης (ή μακροχρόνιας) χρήσης, τα οποία μετά τη διάνοιξή τους υποβάλλονται συχνά σε περίπου σταθερά φορτία.

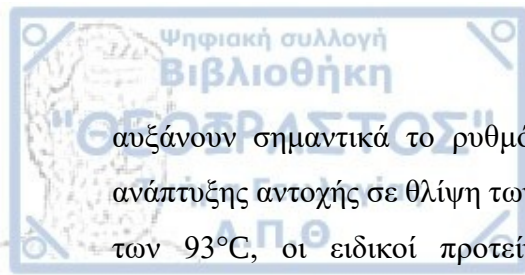
Μόλις διατρυθεί ένας σχηματισμός άλατος, πρέπει να σωληνωθεί και να τσιμεντωθεί. Κατά τη διάτρηση, η μετακίνηση του άλατος αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την τσιμεντώση, καθώς δημιουργεί ανομοιομορφία στην σωλήνωση, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει και σε κατάρρευση (*Εικόνα 4.1.2.1*). Επομένως, εκτός από την απομόνωση και τη βασική δομική υποστήριξη που απαιτείται σε κάθε τσιμεντώση, ένας κατάλληλα σχεδιασμένος τσιμεντοπολφός για τοποθέτηση σε μια ζώνη άλατος πρέπει επίσης να εξασφαλίζει την ομοιομορφία στην περίπτωση ερπυσμού. Για να γίνει αυτό, το τσιμέντο θα πρέπει να διαθέτει αντοχή σε κάμψη και εφελκυσμό ώστε να αντέχει στις πιέσεις και τα φορτία των σωληνώσεων κατά τη διάρκεια ζωής του φρέατος (*Perez et al. 2008*).



Εικόνα 4.1.2.1: Τσιμέντωση σε μετακινούμενο δόμο άλατος. Η καταπολέμηση των επιπτώσεων της ανομοιομορφίας που προκαλείται από την μετακίνηση του άλατος, απαιτεί την επιστροφή του τσιμέντου στην κορυφή του δόμου. Σε αυτήν την περίπτωση (α), έχει τοποθετηθεί σωλήνωση η οποία έχει τσιμεντωθεί σε μεγαλύτερης διαμέτρου σωλήνωση, ώστε να μειωθεί η παραμόρφωση. Η κίνηση του σχηματισμού άλατος (β), θα συνεχίσει να φορτώνει τη σωλήνωση και μπορεί να προκαλέσει αστοχία με την πάροδο του χρόνου (Perez et al. 2008).

Οι ειδικοί στην παρασκευή τσιμεντοπολφού, συνήθως χρησιμοποιούσαν κορεσμένους με αλάτι πολτούς σε περιπτώσεις μεγάλων στρωμάτων άλατος, υποθέτοντας ότι θα συνδέεται καλύτερα με τον σχηματισμό, θα αντισταθούν σε χημικές αντιδράσεις, θα μειώσουν την τάση της μετανάστευσης των αερίων και θα είναι λιγότερο διαλυτοί (Joseph, 1978). Ωστόσο, σε συγκεντρώσεις πάνω από περίπου 18% κατά βάρος σε αλάτι, επιβραδύνεται ο χρόνος πήξης τού τσιμεντοπολφού, μειώνεται η υδραυλική αντοχή και προωθείται η απώλεια ρευστών και η ανάπτυξη ελεύθερου νερού. Αυτό είχε σαν συνέπεια να στραφούν σε τσιμέντο του οποίου η περιεκτικότητα σε αλάτι να βασίζεται στον σχηματισμό. Σε ένα περιβάλλον άλατος, έχει βρεθεί ότι πολφοί χαμηλής περιεκτικότητας σε αλάτι (10% κατά βάρος σε χλωριούχο νάτριο ή λιγότερο) αναπτύσσουν πρόωμη αντοχή και ευνοϊκή ρεολογία (Perez et al. 2008).

Η θερμοκρασία αποτελεί επίσης βασικό παράγοντα που πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά τον σχεδιασμό τσιμεντοπολφών για χρήση σε σχηματισμούς άλατος. Οι υψηλές θερμοκρασίες



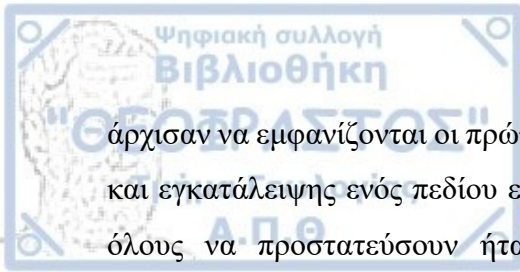
αυξάνουν σημαντικά το ρυθμό διάλυσης του άλατος και μετριάζουν μεγάλο μέρος της ανάπτυξης αντοχής σε θλίψη των πλούσιων με αλάτι τσιμεντοπολφών. Σε θερμοκρασίες κάτω των 93°C, οι ειδικοί προτείνουν 10-18% περιεκτικότητα σε χλωριούχο νάτριο. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 93°C, προτιμάται η περιεκτικότητα από 18-36% σε χλωριούχο νάτριο (Perez et al. 2008).

Καθώς άρχισε να εδραιώνεται παγκοσμίως η εκμετάλλευση κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου, ήταν πλέον αναγκαίο να δημιουργηθεί μια νομοθεσία με ακριβείς προδιαγραφές τόσο για την έρευνα, όσο και για την εκμετάλλευση αλλά και την εγκατάλειψη των γεωτρήσεων.

Έγινε λοιπόν κατανοητή η σημαντικότητα της τσιμέντωσης των γεωτρήσεων με σωστές προδιαγραφές. Μέσω της τσιμέντωσης επιτυγχάνονται λιγότερες αστοχίες, τόσο κατά την άντληση των υδρογονανθράκων, καθώς διατηρεί σταθερή τη σωλήνωση και μονώνει τους γειτονικούς σχηματισμούς, όσο όμως και κατά το στάδιο της εγκατάλειψης της, καθώς σφραγίζει και προστατεύει το περιβάλλον από διαρροές που θα μπορούσαν να αποτελέσουν καταστροφή για το οικοσύστημα. Να σημειωθεί ότι, η τσιμέντωση θεωρείται πλεονέκτημα και σημαντική βοήθεια, μόνο όταν πραγματοποιείται σωστά, τηρώντας τα κατάλληλα μέτρα και προϋποθέσεις.

Καμία «συνταγή» δεν θεωρείται πανάκια. Για τη σωστή διεκπεραίωση ενός έργου πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πολλές παράμετροι και να συνυπολογίζονται μεγέθη και ενέργειες. Η τεχνολογία της τσιμέντωσης περιλαμβάνει πολλές επιστημονικές ειδικότητες της μηχανικής, της χημείας, της γεωλογίας, της φυσικής και του πετρελαίου. Κάθε μία από αυτές ερευνάται διεξοδικά και είναι άκρως σημαντική για την παρασκευή ενός τσιμέντου με τα κατάλληλα χαρακτηριστικά και προδιαγραφές. Ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες κάθε γεώτρησης (χαρακτηριστικά των σχηματισμών, των συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας, του περιβάλλοντος) τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του τσιμεντοπολφού πρέπει να ποικίλουν ώστε να είναι σε θέση να ξεπερνούν τυχόν δυσκολίες που μπορεί να προκύψουν κατά τη διάρκεια της τσιμέντωσης. Η κάθε επιλογή, η κάθε κίνηση, μπορεί να επιφέρει τεράστια επιτυχία στο έργο, αλλά μπορεί και να αποτελέσει την καταστροφή του.

Επιπρόσθετα, όταν ξεκίνησε η μελέτη και η εκμετάλλευση υδρογονανθράκων, δεν υπήρχε νομοθεσία σχετικά με την εγκατάλειψη μιας γεώτρησης και τον τρόπο διαχείρισης της μετά το πέρας της ζωής της. Στην αρχή λοιπόν, καθώς η περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση ήταν ένα άγνωστο ακόμη κεφάλαιο για την ανθρωπότητα, η εγκατάλειψη μιας γεώτρησης σήμαινε την αποχώρηση από το πεδίο, αφήνοντας ουσιαστικά «τρύπες» στη γη. Πολλά χρόνια αργότερα,



άρχισαν να εμφανίζονται οι πρώτες μεταρρυθμίσεις και νομοθεσίες στον τομέα της σφράγισης και εγκατάλειψης ενός πεδίου εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων. Αυτό που επιβαλλόταν σε όλους να προστατεύσουν ήταν οι υπόγειοι σχηματισμοί, από τις διάφορες διαρροές υδρογονανθράκων (Markus, 2014).

Στη συνέχεια όμως η τσιμέντωση άρχισε να γίνεται όλο και πιο σημαντική και απαραίτητη κατά τη διαδικασία σφράγισης της γεώτρησης, με την προοπτική αποφυγής ρύπανσης των υδροφόρων οριζόντων.



Γεωργακόπουλος Α. (2015). Κοιτασματολογία Πετρελαίου. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Θεσσαλονίκη.

Μπιωτάκη Α. (2014). Μελέτη μηχανικών ιδιοτήτων τσιμέντων γεωτρήσεων υδρογονανθράκων με χρήση οργάνων NMR και με δοκιμές αντοχής σε μονοαξονική θλίψη. Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάδα.

Σπηλιωτάκος Χ. (2018). Σχεδιασμός κατευθυνόμενων γεωτρήσεων υδρογονανθράκων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Σταματάκη Σ. (2017). Διαφάνειες μαθήματος «Ορυξη γεωτρήσεων» του Δ.Μ.Π. Έρευνα και Εκμετάλλευση Υδρογονανθράκων. Θεσσαλονίκη.

Τσίπρας Θ. (2015). Χαρακτηρισμός και Μελέτη Ενυδάτωσης Τσιμέντων Γεωτρήσεων τύπου G. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

ΞΕΝΗ

Abdel-Alim H., Fouad K., J. (1994). King Saud University, Vol. 6, Eng. Sci. (2)3, pp. 265-279 (A.H. 1414/1994).

Baker H. (1995). Drilling engineering workbook.

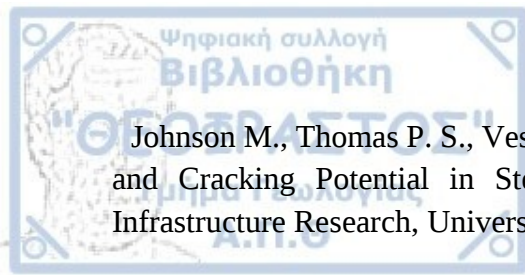
Bernhart M. (2014). Well Abandonment Strategies.

Catala G., De Montmollin V., Hayman A., et.al. (1991). Modernizing Well Cementing Design and Evaluation. Oilfield Review, April 1991.

Danilović D., Karović Maričić V., Ristović I. (2006). Faculty of Mining and Geology, University of Belgrade, Belgrade, Serbia.

Dastgerdi M. E., Manshad A. K., Mohammadi A. H. (2020). Optimization of perforated liner parameters in horizontal oil wells. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 10, p. 3505–3514.

Hasanzadeh B. (2017). Testing and modeling of the thixotropic behavior of cementing material. University of Louisville, Kentucky.



Johnson M., Thomas P. S., Vessalas K. & Baweja D. (2015). Role of Ettringite in Expansion and Cracking Potential in Steam Cured Precast Concrete Elements. Centre for Built Infrastructure Research, University of Technology Sydney.

Ko Ko Kyi, Goh Jin Wang A. (2015). Issues with Cement Bond and Cement Evaluation Logs - Case studies from offshore Malaysia. International Petroleum Technology Conference, Doha, Qatar.

Lavrov A., Torsæter M. (2016). Physics and Mechanics of Primary Well Cementing.

Lubej S., Ivan A., Jelušič P., Kosec L., Ivanič A. (2014). The effect of delayed ettringite formation on fine grained aerated concrete mechanical properties. Science and Engineering of Composite Materials, vol. 23, no. 3, 2016, pp. 325-334.

Messenger J. U. (1978). Cementing against evaporites. United States Patent.

Nelson Erik B. (1990). Well cementing. Schlumberger Educational Services. Sugar Land, Texas.

Perez M. A., Clyde R., D'Ambrosio P., Idrael R., Leavitt T., Nutt L. (2008). Meeting the subsalt challenge, Oilfield review, Autumn.

Piklowska A. (2017). Cement slurries used in drilling – types, properties, application. Department of Drilling, Oil and Gas, AGH University of Science and Technology. Cracow, Poland. Materials Science 149-165.

Portland Cement Association. (2001). Ettringite Formation and the Performance of Concrete.

Sabbins L. F. (1990). Problems in Cementing Horizontal wells. Haliburton Services. J Pet Technol 42 (04): 398–400.

Wamala Khaemba A. (2014). Well design, cementing techniques and well work-over to land deep production casings in the Menengai Field. Geothermal Development Company, Ltd. Nakuru, Kenya.

Zoback Mark D., Kohli Arjun H. (2019). Horizontal Drilling and Multi-Stage Hydraulic Fracturing. Stanford University, California. Cambridge University Press. pp. 233-262.



www.petrowiki.spe.org.

www.production-technology.org

www.youtube.com/watch?v=fBQCQ6HL2Yw

www.petroblogweb.wordpress.com

www.glossary.oilfield.slb.com