

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων**



**Διπλωματική εργασία**  
**Πειραματική Μελέτη της ροής και επικάθισης θραυσμάτων (cuttings) σε οριζόντιες**  
**γεωτρήσεις**

**Του**

**Γεωργίου Βρυώνη**

**Εξεταστική Επιτροπή**

Γιώτης Ανδρέας, Επίκουρος Καθηγητής (Επιβλέπων)

Κελεσίδης Βασίλειος, Καθηγητής

Δρ.Μαρινάκης Δημήτριος, ΕΔΙΠ

ΧΑΝΙΑ

2020

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική ολοκληρώθηκε με την βοήθεια και τη συμπαράσταση ορισμένων ανθρώπων που θα ήθελα να ευχαριστήσω

Κατ' αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας μου επίκουρο καθηγητή Γιώτη Αντρέα για την πολύτιμη βοήθεια και στήριξη του όλο αυτόν το καιρό . Για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε άλλα και για την γνώση την οποία πήρα από εκείνον όλα αυτά τα χρόνια που τον γνώρισα.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω το κ. Μαρινάκη Δημήτριο για την βοήθεια του στο εργαστηριακό κομμάτι της εργασίας μου ο οποίος με βοήθησε να ξεπεράσω πολλά προβλήματα κατά τη διάρκεια του εργαστηρίου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω το καθηγητή Κελεσίδη Βασίλειο για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασία και για το τελικό έλεγχο του κείμενου μου.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την εμπιστοσύνη και την συμπαράσταση που μου έδειξαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

## Πρόλογος

Ο στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής είναι η μελέτη των συνθηκών επικάθησης και επανεκκίνησης των θραυσμάτων σε οριζόντιες γεωτρήσεις συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων, όπως το ιξώδες του φέροντος ρευστού (διατρητικής λάσπης) και η ταχύτητα ροής. Η μελέτη εκτελείται στην υπάρχουσα υποδομή ροής βιομηχανικής κλίμακας (flowloop) στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Το σημείο που ερευνάται είναι στο τμήμα του δακτυλιοειδούς αγωγού που έχει ομόκεντρη συμπεριφορά.

Η διπλωματική εργασία χωρίζεται σε 3 κύρια κεφάλαια:

Στο πρώτο γίνεται μια ιστορική αναδρομή της εξέλιξης της χρησιμότητας της ενέργειας στον κόσμο αλλά και των διαφόρων τεχνικών γεωτρήσεων. Ακολούθως γίνεται αναφορά των προβλημάτων που προκαλούν τα θραύσματα στις γεωτρήσεις αλλά και των παραγόντων που συμβάλλουν στη μετακίνησή τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια ανάλυση για τα ρευστά των γεωτρήσεων και των διαφόρων ρεολογικών ιδιοτήτων τους. Αναλύεται το θεωρητικό μοντέλο των θραυσμάτων στις κατακόρυφες γεωτρήσεις καθώς μελετούνται οι δυνάμεις που ασκούνται στα θραύσματα, η ταχύτητα με την οποία καθιζάνουν σε Νευτώνεια και μη νευτώνια ρευστά αλλά και οι παράγοντες που επηρεάζουν την ταχύτητα αυτών.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η πειραματική μελέτη των θραυσμάτων. Παρουσιάζονται τα μέρη της υπάρχουσας υποδομής ροής βιομηχανικής κλίμακας (flowloop) στο εργαστήριο και γίνεται μελέτη των αντοχών που μπορεί να υποστεί ο δακτυλιοειδής αγωγός. Η μελέτη βασίστηκε σε τρία συστήματα μετακίνησης των θραυσμάτων. Στο κάθε σύστημα διαφοροποιούνταν οι συνθήκες που επικρατούν μέσα στον δακτυλιοειδή αγωγό καθώς μεταβάλλονται διάφορες παράμετροι όπως αυτές της ταχύτητας και του ιξώδους του φέροντος ρευστού. Επίσης γίνεται έρευνα για τον πιο γρήγορο και επιτυχή τρόπο καθαρισμού του δακτυλιοειδούς αγωγού με το φέροντος ρευστό. Τέλος δημιουργήθηκε διάγραμμα φάσης για κάθε εναλλαγή του ιξώδους αναλόγως το πότε εμφανίζεται το κάθε σύστημα μετακίνησης μέσα στο δακτυλιοειδή αγωγό. Τα αποτελέσματα των διαδικασιών έδειξαν ότι όσο πιο λεπτόρρευστο το ρευστό τόσο καλύτερα γίνεται η μετακίνηση των θραυσμάτων και τόσο πιο δύσκολη είναι η επικάθησή τους.

## Πίνακας Περιχομένων

<b>Κεφάλαιο 1: Ιστορική αναδρομή .....</b>	<b>1</b>
1.1 Εισαγωγή .....	1
1.2 Γενικές αρχές γεωτρήσεων .....	6
1.3 Ιστορική αναδρομή των γεωτρήσεων.....	7
1.4 Η Περιστροφική διάτρηση .....	8
1.4.1 Περίληψη .....	8
1.4.2 Βασικά στοιχεία περιστροφική γεώτρησης.....	10
1.4.3 Κοπτικά άκρα .....	11
1.5 Οριζόντιες Γεωτρήσεις .....	12
1.5.1 Ιστορική αναδρομή.....	12
1.6 Θραύσματα (Cutting) .....	12
1.6.2 Προβλήματα που δημιουργούνται από θραύσματα σε οριζόντιες και κεκλιμένες γεωτρήσεις.....	13
1.6.3 Παράμετροι που επηρεάζουν τον καθαρισμό της γεώτρησης από τα θραύσματα .....	13
<b>Κεφάλαιο 2: Διατρητικά ρευστά (Drilling Fluids) .....</b>	<b>21</b>
2.1 Εισαγωγή .....	21
2.2 Κατηγορίες των διατρητικών ρευστών (διατρητικές λάσπες).....	23
2.2.1 Υδατική βάση (water based mud, WBM) .....	24
2.2.2 Ελαϊκή βάση (Oil Based Mud) .....	25
2.3 Ιδιότητες των ρευστών.....	27
2.3.1 Πυκνότητα.....	27
2.3.2 Ρεολογία .....	28
2.3.3 Δύναμη ζελατινοποίησης.....	29
2.3.4 Περιεχόμενο άμμου.....	30
2.3.5 Αναλογία στερεών .....	30
2.4 Ρεολογία των ρευστών γεώτρησης.....	31
2.4.1 Εισαγωγή.....	31
.....	33
2.4.2 Κατηγορίες ρευστών .....	34
2.2.3 Ρεολογικά μοντέλα .....	37
2.5 Ταχύτητα καθίζησης Στερεού Σωματιδίων σε κατακόρυφη γεώτρηση .....	39
2.5.1 Κάθετες Γεωτρήσεις.....	39
2.5.2 Stokes' law .....	41

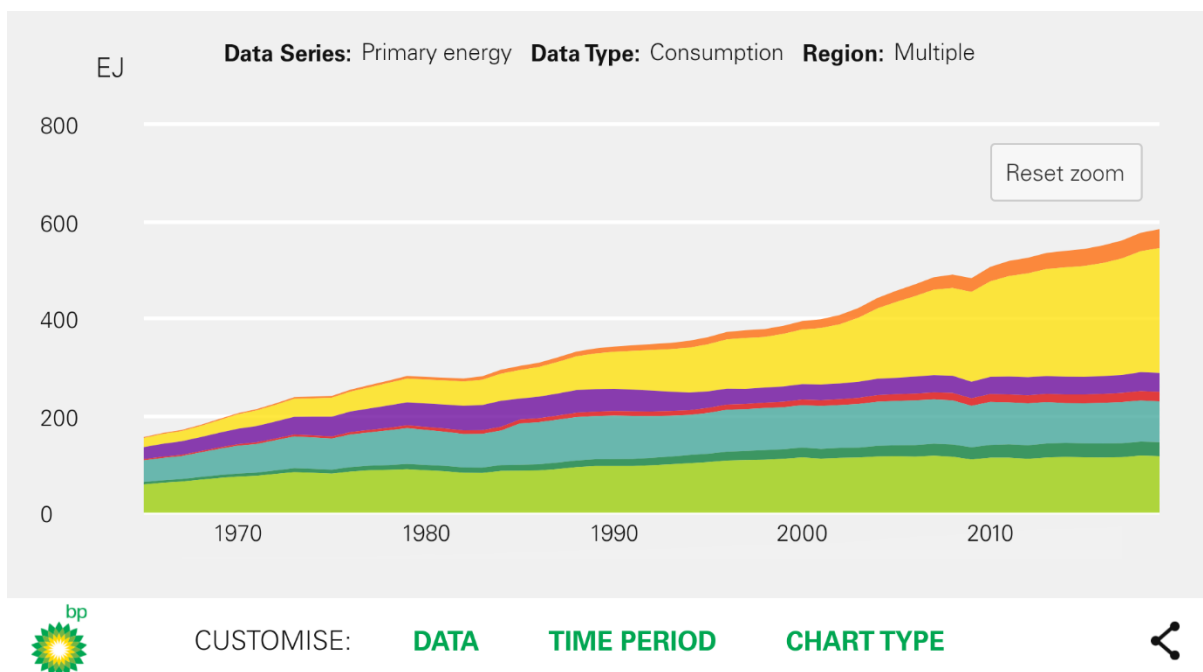
2.5.3 Οριακή ταχύτητα καθίζησης των στερεών σωματιδίων – Άλλες προσεγγίσεις.....	45
<b>Κεφάλαιο 3: Πειραματική μελέτη μεταφοράς θραυσμάτων.....</b>	<b>51</b>
3.1 Πειραματική διάταξη εργαστηρίου Τεχνικής Γεώτρησης και Ρευστομηχανικής.....	51
3.1.1 Εισαγωγή.....	51
3.1.2 Δακτύλιος.....	53
3.1.3 Βάνες.....	54
3.1.4 Δεξαμενή χωρητικότητας.....	55
3.1.5 Αναδευτήρας Περιστρεφόμενος .....	56
3.1.6 Παροχόμετρο μάζας.....	57
3.1.7 Αντλία κυκλοφορίας του ρευστού.....	58
3.1.8 Σύστημα μετρήσεις πτώσης πίεσης.....	59
3.1.9 Ηλεκτρονική μονάδα επεξεργασίας και λειτουργίας συστήματος .....	63
3.1.10 Ομοαξονικό κυλινδρικό Ιξωδόμετρο .....	65
3.2 Pressure test.....	70
3.2.1 Εισαγωγή.....	70
3.2.2 Διαδικασία .....	71
3.2.3 Παροχή.....	71
3.2.4 Μέτρηση αντοχής στη Πίεση .....	73
3.3 Διαδικασία παρασκευής ρευστού .....	74
3.3.1 Εισαγωγή.....	74
8.1.10 Carbopol 980.....	75
8.1.11 Sodium CarboxymethylCellulose (CMC) .....	77
3.4 Προετοιμασία δειγμάτων διατρητικής ρευστού στο ιξωδόμετρο .....	78
3.5 Αποτελέσματα των ρεολογικών χαρακτηριστικών της κάθε διατρητικού ρευστού	78
3.5.1 CMC.....	78
3.5.2 Carbopol 980.....	82
3.5.3 Συμπεράσματα.....	86
3.4 Πειραματική διαδικασία .....	87
3.4.1 Εισαγωγικά .....	87
3.4.2 Ανάλυση συστημάτων .....	89
3.4.3 Καθαρισμός.....	118
3.4.4 Διάγραμμα φάσεων .....	121
<b>Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα και Μελλοντικές εργασίες για έρευνα .....</b>	<b>124</b>
4.1 Συμπεράσματα .....	124
4.2 Μελλοντικές Εργασίες .....	124

<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>127</b>
---------------------------	------------

## Κεφάλαιο 1: Ιστορική αναδρομή

### 1.1 Εισαγωγή

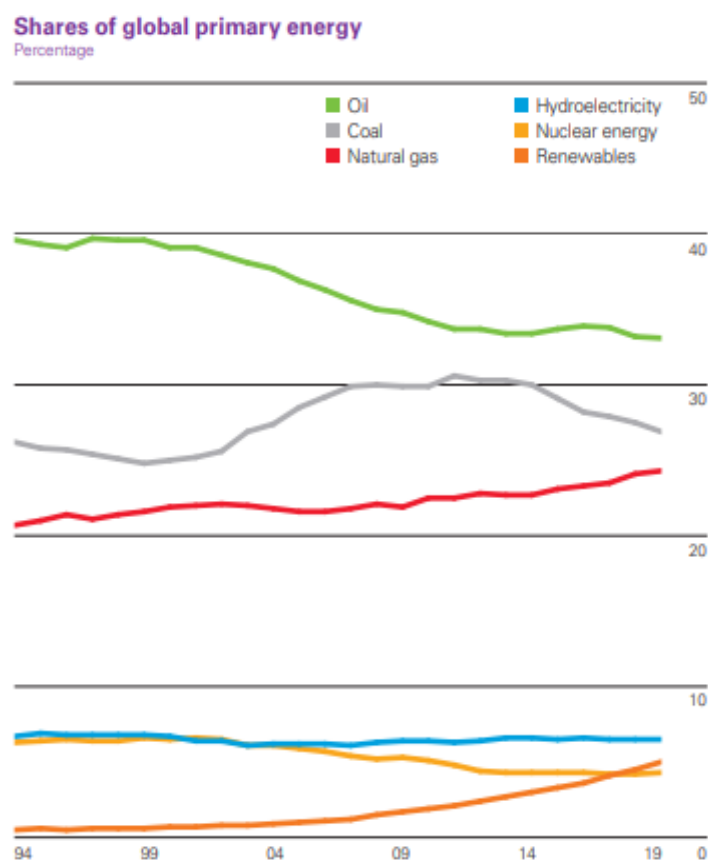
Με το πέρασμα του χρόνου, οι ενεργειακές απαιτήσεις συνεχώς αυξάνονται καθώς οι σύγχρονες κοινωνίες καταναλώνουν τεράστιες ποσότητες ενέργειας για τη θέρμανση χώρων (κατοικιών και γραφείων), τα μέσα μεταφοράς, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και για τη λειτουργία των βιομηχανικών μονάδων παραγωγής προϊόντων. Παράλληλα με την εντατικοποίηση της παραγωγής, αυξάνεται και ο παγκόσμιος πληθυσμός καθώς και το μέσο βιοτικό επίπεδο του πληθυσμού, δημιουργώντας έτσι συνθήκες περαιτέρω αυξημένης ζήτησης ενέργειας. (Statistical Review of World Energy, 2020). Όπως διαπιστώνεται και στο παρακάτω γράφημα χρόνο με το χρόνο η συνολική κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται φτάνοντας σήμερα (2020) στα 583.90 EJ.



Εικόνα 1.1 Παγκόσμια κατανάλωση Ενέργειας αν Περιοχή (Statistical Review of World Energy, 2020)

Στο σχήμα 1.1 με πορτοκαλί χρώμα εμφανίζονται οι χώρες της Μέσης Ανατολής με κατανάλωση 37,61EJ, με κίτρινο οι χώρες της Ασίας – Ειρηνικού με κατανάλωση 249,35 EJ, με μοβ οι χώρες της Κοινοπολιτείας Ανεξαρτήτων Κρατών με κατανάλωση 38,81 EJ, και με κόκκινο της Αφρικής με 19,39 EJ. Η Ευρώπη είναι με γαλάζιο με κατανάλωση 84,74 EJ. Με πράσινο ανοικτό χρώμα είναι βόρεια Αμερική με 114,34 EJ και τέλος η νότια Αμερική με πράσινο σκούρο με 28,61 EJ.

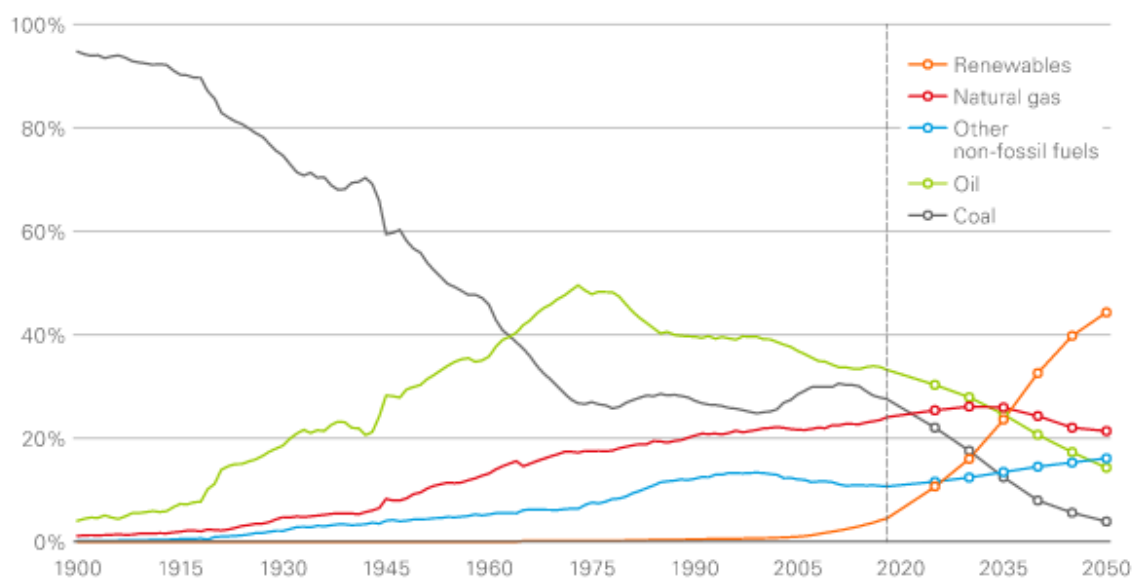
Το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας που χρησιμοποιούμε σήμερα προέρχεται κατά κύριο λόγο από ορυκτά καύσιμα. Όπως βλέπουμε στο πιο κάτω γράφημα μέχρι τις αρχές του 2020 το πετρέλαιο, παρότι μειώνεται με το πέρασμα των χρόνων, κρατάει ακόμη κυρίαρχη θέση στο 33.1%, ακολουθούμενο από τον άνθρακα με ποσοστό 27%. Έχουμε μια αύξηση στη χρήση του φυσικού αερίου και στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στο 24.2 % και στο 5% αντίστοιχα. Η υδροηλεκτρική ενέργεια κατέχει το 6% στη παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας. Το μικρότερο ποσοστό καλύπτει η πυρηνική ενέργεια με μόλις 4.3% (Statistical Review of World Energy, 2020) και κυριότερο χρήστη τη Γαλλία που παράγει το 75% της ηλεκτρικής ενέργειας από πυρηνική. (Nuclear Power in France, 2020)



Εικόνα 1.2 Παγκόσμια κατανάλωση ενέργεια αν πηγές ενέργεια. (Statistical Review of World Energy, 2020)

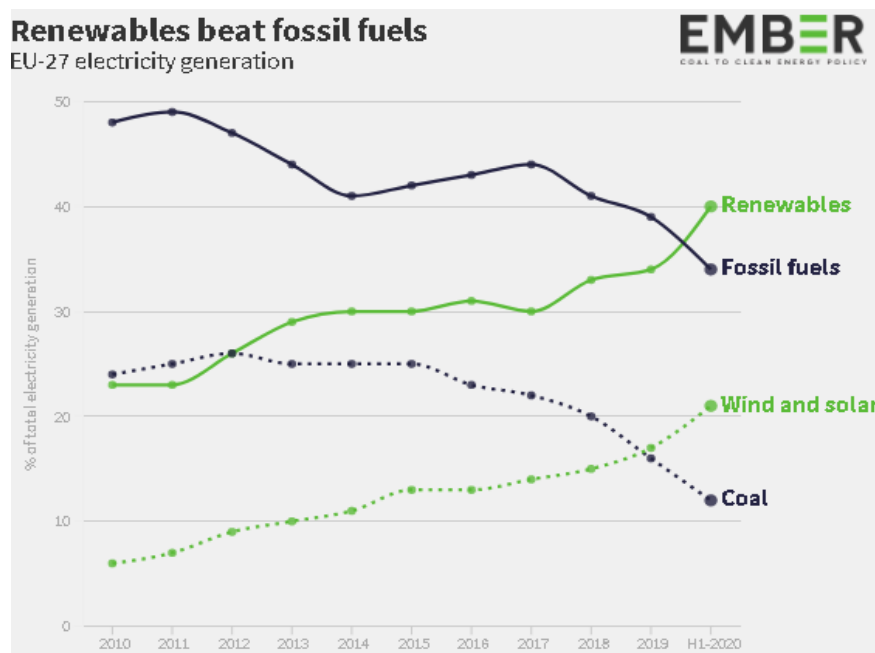


Στο μέλλον το ποσοστό χρήσης ορυκτών καυσίμων στη παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας αναμένεται ότι θα μειώνεται συνεχώς. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω γράφημα η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας στρέφεται όλο ένα και περισσότερο προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ηλιακή , αιολική , υδροηλεκτρική κ.α). Ο πρωταρχικός λόγος είναι η προστασία του περιβάλλοντος με τη μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα που αποδεδειγμένα συνδέεται με το «φαινόμενο του θερμοκηπίου» στον πλανήτη μας. (Shares of primary energy in Rapid, 2020).



Εικόνα 1.3 Μελλοντικό μοντέλο για την παγκόσμια κατανάλωση ενέργεια ανά πηγή ενέργειας (Shares of primary energy in Rapid, 2020)

Μεγάλη αλλαγή έκανε η Ευρώπη σε αυτό τον τομέα, όπου για πρώτη φορά η ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ξεπέρασαν τα ορυκτά καύσιμα στην ηλεκτροπαραγωγή.



Εικόνα 1.4 Κατανάλωση ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή στην Ευρώπη ανά πηγή ενέργειας (Jones & Moore, 2020)

Κατά το πρώτο εξάμηνο του 2020, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική και βιοκαύσιμα συμμετέχουν κατά 40% στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ τα ορυκτά καύσιμα συμμετείχαν μόλις 34%. Πέρσι (2019) τα ποσοστά αυτά ήταν αντίστροφα. Συγκεκριμένα, είχαν τιμές 40% περίπου για τα ορυκτά καύσιμα και 34% για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σε κάποιες χώρες της Ευρώπης η μετάβαση σε ανανεώσιμες είναι σημαντικά ταχύτερη. Η Δανία βασίζεται σήμερα κατά 47% σε αιολική ενέργεια με σημαντικές προοπτικές πλήρους απεξάρτησης από ορυκτά καύσιμα στο εγγύς μέλλον,. (Gronholt-Pedersen, 2020). Η Γερμανία έχει χρήση αιολικών στο 52% και η Ιρλανδία με την χρήση ηλιακών φωτοβολταϊκών και αιολικών έχει 49% και μέχρι 2030 θα φτάσει στο 70%. (Podesta & Tsoni, 2020) (Waldholz, 2020)

Η συνεισφορά των ορυκτών καυσίμων ως πρωτογενής πηγή ενέργειας αναμένεται να συνεχίσει να είναι σημαντική και στα επόμενα 30 χρόνια με δεδομένη την ωριμότητα της τρέχουσας τεχνολογίας στην εξόρυξη και εκμετάλλευσή τους, καθώς και τη διαρκή πρόσβαση σε νέα αποθέματα με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών εξόρυξης (γεωτρήσεις σε πολύ βαθιά νερά, σχιστολιθικό αέριο και πετρέλαιο, υδραυλική ρηγμάτωση πετρωμάτων κ.α) Αντίθετα οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας υπόκεινται στους περιορισμούς που επιβάλλει η στοχαστική τους παραγωγή (Koen & Antunez, 2020)

Με τη πάροδο των χρόνων τα απολήψιμα αποθέματα συνεχώς αυξάνονται λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας στην εξερεύνηση, εξόρυξη και ανάπτυξη των κοιτασμάτων. Άρα υπάρχει δυνατότητα για εκμετάλλευση ταμειυτήρων σε πιο μεγάλα βάθη ή παλαιότερων ταμειυτήρων με σημαντικό βαθμό υπολειπόμενου κορεσμού. Οι εταιρίες πετρελαίου επενδύουν συνεχώς σε τεχνικές οι οποίες τους επιτρέπουν την εκμετάλλευση τους. Η τεχνική γεωτρήσεων είναι ραγδαία εξελισσόμενη τεχνική, που προσπαθεί συνεχώς να ανταπεξέλθει σε διάφορα προβλήματα που εμφανίζονται με τα χρόνια. Ένα από αυτά τα προβλήματα είναι η δημιουργία των επικαθίσεων των θραυσμάτων σε οριζόντιες γεωτρήσεις και οι τρόποι για την επανακινητοποίηση τους.

## 1.2 Γενικές αρχές γεωτρήσεων

Γεώτρηση ονομάζεται η κατασκευή ενός κυλινδρικού κυρίως φρεατίου που ξεκινά συνήθως από την επιφάνεια της γης ή τον θαλάσσιο πυθμένα και φτάνει σε ένα επιθυμητό βάθος με χρήση ειδικού μηχανολογικού εξοπλισμού.

Μηχανική Γεωτρήσεων είναι ο κλάδος επιστήμης και μηχανικής που στοχεύει στη μελέτη, σχεδιασμό και κατασκευή μιας γεώτρησης με οικονομικό αποδοτικό και περιβαλλοντικά συμβατό τρόπο. Ο μηχανικός γεώτρησης έχει την ευθύνη να εξασφαλίσει την αδιάλειπτη λειτουργία της γεώτρησης. Αυτό όμως με το ελάχιστο κόστος, την προστασία της υγείας και της ασφάλειας των εργαζομένων, αλλά και την προστασία του περιβάλλοντος.

Οι γεωτρήσεις κατατάσσονται σε Εξερευνητικές/Δειγματοληπτικές (Exploration) , Περιχάραξης (Appraisal) και Παραγωγής ( Production/ injection)

Σκοπός των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων είναι: (Μόδης & Σταματάκη, 2015)

1. Η συγκέντρωση στοιχείων για την δομή και την σύσταση των γεωλογικών σχηματισμών
2. Η λήψη δειγμάτων από διάφορα βάθη για την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών
3. Η εκτέλεση δοκιμών μέσα στη γεώτρηση για τον προσδιορισμό των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των σχηματισμών στο φυσικό τους περιβάλλον.
4. Ο προσδιορισμός του προσανατολισμού των γεωλογικών στρωμάτων, ρηγμάτων και άλλων τεκτονικών χαρακτηριστικών.
5. Η ανίχνευση και ο εντοπισμός υδροφόρων στρωμάτων και ο προσδιορισμός των υδραυλικών χαρακτηριστικών τους (πορώδες, διαπερατότητα)

Οι δειγματοληπτικές γεωτρήσεις χρησιμοποιούνται στην αναζήτηση και έρευνα κοιτασμάτων, στην φάση της εξερεύνησης και της ανάπτυξης του. Οι γεωτρήσεις δειγματοληψίας είναι χρήσιμες για την μελέτη και την κατασκευή τεχνικών έργων, για την συλλογή στοιχείων και την εύρεση συμπερασμάτων, για την φύση και την κατάσταση των πετρωμάτων καθώς και για τις γεωλογικές , υδρογεωλογικές και τεκτονικές συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον εκτέλεσης του έργου. (Μόδης & Σταματάκη, 2015)

Οι γεωτρήσεις περιχάραξης (Appraisal) είναι γεωτρήσεις που γίνονται όταν ανακαλυφθεί κοιτάσμα υδρογονανθράκων , προκειμένου να εκτιμηθεί η ποσότητα, το μέγεθος του πεδίου, ο πιθανός ρυθμός παραγωγής και οι ιδιότητες του και τα χαρακτηριστικά του υδρογονάνθρακα . Η

διαδικασία αυτή γίνεται συνεχίζεται να γίνεται και στη φάση της παραγωγής. Αυτό εξυπηρετεί να γνωρίζεις συνεχώς της αλλαγές που γίνονται στο ταμειυτήρα και κατά πόσο ακόμα είναι βιώσιμος. (Appraisal and development, 2020)

Στη φάση της παραγωγής ( Production/ injection) όταν ένα κοίτασμα θεωρηθεί κατά την διάρκεια των προηγούμενων διαδικασιών εμπορικά βιώσιμο και εκμεταλλεύσιμο , τότε αρχίζουν οι διαδικασίες για την εξόρυξη των υδρογονανθράκων από το κοίτασμα επάνω στην επιφάνεια . (Upstream | Petroleum Production Phase, 2017)

### 1.3 Ιστορική αναδρομή των γεωτρήσεων

Η αρχή της ιστορίας της βιομηχανίας πετρελαίου και η μηχανική των γεωτρήσεων ξεκίνησε το 1859 στην Πενσυλβάνια των ΗΠΑ. Η αρχική αυτή ανακάλυψη έγινε από τον Edwin Drake μετά από πολλές αποτυχημένες προσπάθειες σε μια περίοδο 5 μηνών. Είχε κάνει έναν εξοπλισμό που αποτελείται από ατμοκινούμενο κρουστικό γεωτρύπανο τύπου Cable- tool που βασιζόταν στην πτώση από ύψος μίας ξύλινης δοκού με στερεωμένη μια σιδερένια κοπτική κεφαλή στο κάτω άκρο. Η ανύψωση της δοκού πραγματοποιούνταν με τη χρήση μίας κατάλληλης ατμομηχανής, ενώ τα σαθρά τοιχώματα του φρεατίου κατά τα πρώτα μέτρα της γεώτρησης στερεώνονταν με τη χρήση σιδερένιων σωλήνων διαμέσου των οποίων κινούταν η διατρητική δοκός. Το Σάββατο 27 Αυγούστου 1859 σε βάθος περίπου 69.5 πόδια (περίπου 21.2 μέτρα) και παρότι ο ρυθμός γεώτρησης ήταν πολύ αργός (περίπου 1 μέτρο ανά μέρα) παρατηρήθηκε η εκροή πετρελαίου που επέπλεε πάνω από το νερό και στη συνέχεια το πηγάδι πλημμύρισε πετρέλαιο. Η αρχική παραγωγή ήταν περίπου 25 bbl/ημέρα και το κάθε βαρέλι είχε κόστος 20 δολάρια (Aoghs, 2016) (Mir-Babayev, 2012)



Εικόνα 1.5 της πρώτης γεώτρησης στην Pennsylvania (1859) (Aoghs, 2016)



Εικόνα 1.6 Γεωτρύπανου τύπου Cable- tool με χρήση ατμοκινητήρα (Cable-tool drilling (Percussion Drilling), 2018)

Οι διάτρηση κάθε φρεατίου γίνεται με τρεις βασικούς τρόπους: (Γιώτης, 2019)

1. Επαναλαμβανόμενη μηχανική κρούση στον πυθμένα της οπής, χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο βαρύ μεταλλικό σωλήνα που ονομάζεται κρουστική διάτρηση.
2. Η περιστροφική διάτρηση είναι η πιο διαδεδομένη και εφαρμόζεται σήμερα αποκλειστικά στις γεωτρήσεις παραγωγής και εξερεύνησης , όσο και χερσαίες και υποθαλάσσιες, αφού επιτρέπει τη διάνοιξη οπών ποικίλης διαμέτρου και μεγάλου βάθους.
3. Συνδυασμός των δύο τύπων διάτρησης , της κρουστικής και της περιστροφικής.

## 1.4 Η Περιστροφική διάτρηση

### 1.4.1 Περίληψη

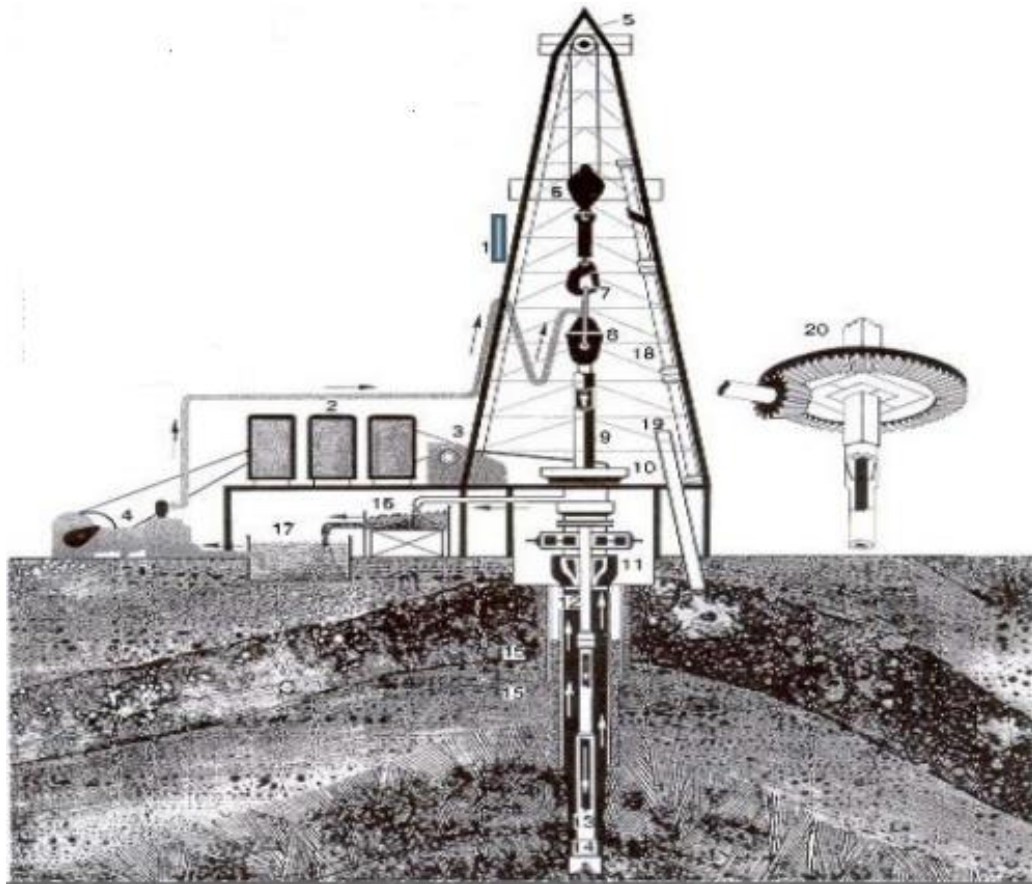
Η περιστροφική διάτρηση είναι η καθιερωμένη τεχνολογία για τη διάνοιξη φρεατίων παραγωγής υδρογονανθράκων που βρίσκονται σε μεγάλο βάθος. Είναι η πιο ευέλικτη από όλες τις μεθόδους διάτρησης αφού εφαρμόζεται με πολλές παραλλαγές. Οι περιστροφικές γεωτρήσεις συσχετίζονται συχνότερα με την θεαματική ανακάλυψη και πρώτη σημαντική εφαρμογή σε ταμειυτήρες υδρογονανθράκων του 1901 Spindletop Hill κοντά στο Beaumont του Τέξας στις Ηνωμένες Πολιτείες με βάθος 1039 ft και με παραγωγή 100 kbbl/day. Στη χερσόνησο Κόλα της Ρωσίας, μια περιστροφική γεώτρηση έφτασε τα 40.000 ft μετά από δέκα χρόνια γεώτρησης για επιστημονικούς σκοπούς. Η τεχνική της περιστροφικής γεώτρησης εφαρμόζεται σήμερα

αποκλειστικά στο σύνολο της παραγωγής ενέργειας όπως πετρέλαιο και φυσικό αέριο, τόσο για χερσαίες όσο και για υποθαλάσσιες. Η ονομασία οφείλεται στην περιστρεφόμενη τράπεζα (rotary table) μέσα από την οποία περνάει η διατρητική στήλη (drill string/stem) και κατευθύνεται προς το πυθμένα της γεώτρησης. Η διατρητική στήλη στο κάτω άκρο της είναι βιδωμένη η διατρητική κεφαλή (drill bit). Η διάνοιξη του φρεατίου πραγματοποιείται με συνεχή περιστροφή και εφαρμογή βάρους της διατρητικής στήλης και της κεφαλής με τη χρήση ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης diesel και έχει ως αποτέλεσμα τη θραύση του πετρώματος υπό την επίδραση της διατμητικής τάσης της κεφαλής. Η περιστροφική διάτρηση πραγματοποιείται με τη χρήση ρευστού, συνήθως διάλυμα νερού ή ελαίου με κάποιο είδος ορυκτού όπως μπεντονίτη, που εισάγεται υπό πίεση από την επιφάνεια. Το ρευστό κατέρχεται διαμέσου της διατρητικής στήλης μέχρι τα ακροφύσια της κεφαλής, αναμιγνύεται με τα θραύσματα του πετρώματος στην επιφάνεια μέσω του φρεατίου και τα μεταφέρει στην επιφάνεια από την εξωτερική πλευρά στον δακτύλιο. (AOGHS, 2006)

#### 1.4.2 Βασικά στοιχεία περιστροφική γεώτρησης

Η μηχανολογική διάταξη του περιστροφικού γεωτρήπανου είναι πολύ πιο σύνθετη από αυτή του κρουστικού γεωτρήπανου. (Klempa, Bujok, Pinka, & Struna, 1996)

Πιο αναλυτικά τα στοιχεία ενός περιστροφικού γεωτρήπανου είναι:



Εικόνα 1.7 Τυπικό περιστροφικό, χερσαίο (ΑΓΟΥΡΙΔΗΣ, 2016), 1: Πύργος (Derrick), 2: Κινητήρες (Engines), 3: Βαρούλκο (Drawworks), 4: Αντλίες λάσπης (Mud pump), 5: Σταθερό σύστημα τροχαλιών (Crown block), 6: Κινητό σύστημα τροχαλιών (Traveling block), 7: Αγκιστρο (Hook), 8: Περιστρεπτός τροφοδότης (swivel), 9: 4/γωνικό ή 6/γωνικό στέλεχος (Kelly), 10: Περιστροφική Τράπεζα (Rotary table), 11: Αποτροπέας εκρήξεων (Blowout preventers), 12: Διατρητικά στελέχη (Drillpipe), 14: Κοπτικό άκρο (Bit), 15: Τσιμεντωμένη σωλήνωση (Cemented casing), 16: Κόσκινα καθαρισμού λάσπης (Shale shaker), 17: Δεξαμενές λάσπης (Mud tanks), 18: Στήριγμα 3 διαδοχικών διατρητικών στελεχών (Stand of 3 joints of pipe), 19: Μικρή οπή στήριξης Kelly ("Rathole" where Kelly is kept during tripping), 20: Λεπτομέρεια περιστροφ. Τράπεζας (Close-up of rotary table)



### 1.4.3 Κοπτικά άκρα

Τα κοπτικά άκρα (drill bits) είναι ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία της διατρητικής στήλης (drill string) που είναι υπεύθυνο για το θραύση του σχηματισμού και τη δημιουργία του φρεατίου. Τα κοπτικά στοιχεία είναι στερεωμένα πάνω στην κεφαλή του άκρου. Το πρώτο εμπορικά επιτυχημένο σχέδιο κοπτικού άκρου σχεδιάστηκε και χρησιμοποιήθηκε στις ΗΠΑ από τον Howard R. Hughes, Sr. στις 10 Αυγούστου 1909 και ο οποίος οδήγησε στη ίδρυση της Hughes Tool Company.

Η επιλογή του κατάλληλου κοπτικού είναι καθοριστικής σημασίας για την επιτυχία μίας γεώτρησης. Η επιλογή έχει ως στόχο:

1. Να εκμεταλλεύεται καλύτερα τα φυσικά χαρακτηριστικά, τις αδυναμίες και τη δομή του πετρώματος, και να επιτυγχάνει έτσι αποτελεσματικότερη όρυξη.
1. Να συμβάλει στην απομάκρυνση των θραυσμάτων όσο το δυνατό πιο άμεσα από τον πυθμένα της γεώτρησης και τη μεταφορά τους στην επιφάνεια.
2. Ο χρόνος ζωής του κοπτικού πρέπει να εξετάζεται προσεκτικά προκειμένου να βελτιστοποιηθεί ο χρόνος της εξορυκτικής δραστηριότητας

Οι βασικοί τύποι κοπτικών που υπάρχουν για την περιστροφική όρυξη βαθιών γεωτρήσεων είναι: (Μόδης & Σταματάκη, 2015)

1. Κοπτικά με ελάσματα (Drag bits)
2. Κοπτικά με περιστρεφόμενους κώνους (Roller Cone Bits-RCB ή Rolling Cutter Bits ή rock bits)
3. Αδαμαντοκορώνες (diamond bits) με εξοχές (*SDC*) από σκληρά υλικά όπως Συνθετικό ή Φυσικό Διαμάντι (*NDC*)
4. Πολυκρυσταλλικά συμπαγή αδαμαντοτρύπανα (Polycrystalline Diamond Compact bits - *PDC*)
5. Θερμικά σταθερά πολυκρυσταλλικά αδαμαντοκοπτικά (thermally stable polycrystalline diamond bits –*TSP bits*).

## 1.5 Οριζόντιες Γεωτρήσεις

### 1.5.1 Ιστορική αναδρομή

Η πρώτη διάνοιξη οριζόντιων πηγαδιών έγινε το 1929 στην πόλη Texon, στο Τέξας. Παρόμοιες γεωτρήσεις έγιναν το 1944 στο Franklin Heavy Oil Field, στην επαρχία Venango στην Πενσυλβάνια σε βάθος 500 ποδιών ενώ πολλά οριζόντια πηγάδια διανοίχτηκαν στην ΕΣΣΔ και την Κίνα κατά τη δεκαετία του 1950 και του 1960, με περιορισμένη επιτυχία και αργότερα την δεκαετία του 1960 με 1970. Η μείωση των τιμών του πετρελαίου σε συνδυασμό με την ανάγκη μείωσης του κόστους της έρευνας και την ανακάλυψη σύγχρονων και οικονομικότερων μηχανημάτων, επαναφέραν στην επιφάνεια την τεχνολογία της οριζόντιας γεώτρησης στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Ενώ η χρήση τεχνολογίας οριζόντιας γεώτρησης έχει αυξηθεί δραματικά από τα μέσα της δεκαετίας του 1980, η ίδια η τεχνολογία χρονολογείται από το 1891, όταν ο εξοπλισμός κάθετης γεώτρησης μετασχηματίστηκε για να εξυπηρετεί την οριζόντια γεώτρηση. Το παγκόσμιο σύνολο για το 1989 ήταν μόλις 200 οριζόντια πηγάδια ενώ το 1990, αυτό το σύνολο έφτασε σχεδόν τα 1.200 φρεάτια, με περίπου 1.000 από αυτά να πραγματοποιήθηκαν στις Ηνωμένες Πολιτείες. (Helms, 2008) (Kemp, 2014) (Batruna & Daggez, 2010)

## 1.6 Θραύσματα (Cutting)

Τα θραύσματα σε μια γεώτρηση είναι τα σπασμένα κομμάτια του πετρώματος που έχουν αφαιρεθεί από μια μέθοδο γεώτρησης είτε αυτή είναι περιστροφική, κρουστική, οριζόντια ή κατευθυνόμενη λόγω της δράσης του κοπτικού άκρου και εμφανίζονται στην επιφάνεια μέσα στο ρευστό. Τα θραύσματα εξετάζονται συνήθως για να καταγραφούν οι διάφοροι σχηματισμοί στο υπέδαφος και άλλες ιδιότητες τους που μπορούν να επηρεάσουν την διάνοιξη της γεώτρησης ή την συνέχεια της οποιαδήποτε μελέτης. Στο τομέα του πετρελαίου, αυτή η μελέτη ονομάζεται mud logging. Μετά από τόσα χρόνια, ακόμη παραμένει διαχρονικό πρόβλημα η αδιάλειπτη μεταφορά των θραυσμάτων του πετρώματος προς την επιφάνεια κατά τη διάνοιξη του φρεατίου χωρίς να δημιουργούνται επικαθήσεις στο φρεάτιο. Τα θραύσματα μεταβάλλουν σημαντικά τις ρεολογικές ιδιότητες του φέροντος ρευστού (διατρητικής λάσπης) προκαλώντας συχνά στενώσεις και επικαθήσεις στους διατρητικούς σωλήνες, ιδιαίτερα σε οριζόντια ή πολύ κεκλιμένα τμήματα. Σε αυτά συχνά παρατηρείται η ύπαρξη δύο στρωμάτων στο κάτω μέρος του φρεατίου λόγω βαρύτητας, όπου το κάτω είναι ακίνητο με τη συσσώρευση των θραυσμάτων και το άνω είναι σε ρευστοποιημένη

(κινούμενη) μορφή. (ekomeri, 2015) (Mahmoud, et al., 2019) (Κουτρούλης & Μιχαλάκης, 2002) (Δαλαμαρίνης, 2009) (Θεοδοσίου, 2005) (Kelessidis & Mpandelis, "Flow Patterns and Minimum Suspension Velocity for Efficient Cuttings Transport in Horizontal and Deviated Wells in Coiled-Tubing Drilling", 2003)

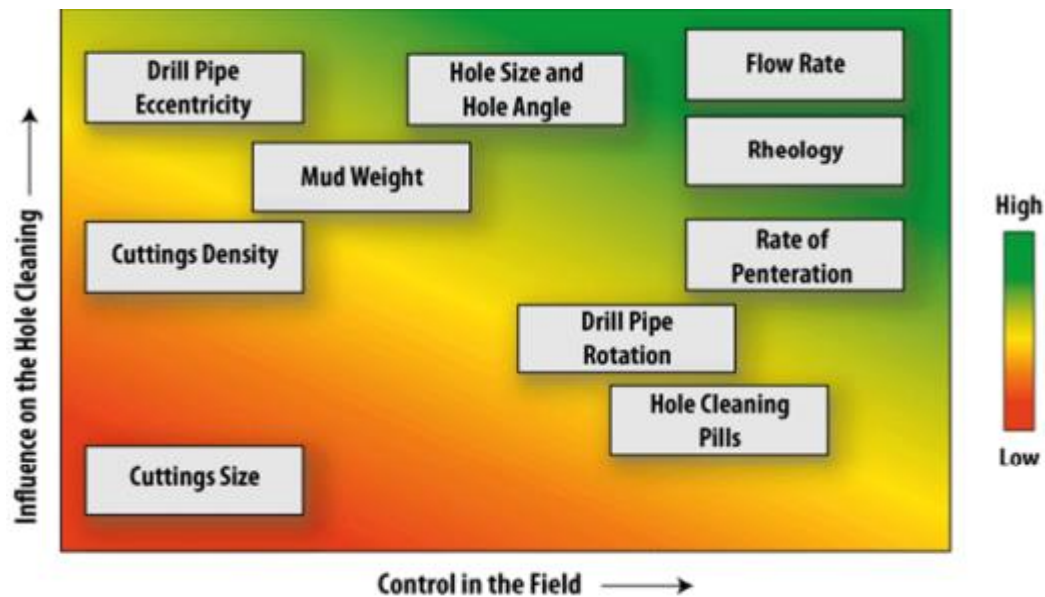
#### 1.6.2 Προβλήματα που δημιουργούνται από θραύσματα σε οριζόντιες και κεκλιμένες γεωτρήσεις

Η παρουσία θραυσμάτων φέρει με τη σειρά της σημαντικά προβλήματα που έχουν ως αιτία την διακοπή της διάτρησης και τη σπατάλη αρκετού χρόνου στην επανεκκίνηση της. Τα σημαντικότερα προβλήματα που δημιουργούνται με την συσσώρευση θραυσμάτων είναι: (Κουτρούλης & Μιχαλάκης, 2002) (Mahmoud, και συν., 2019) (Boxue, et al., 2018)

1. Πρόωρη φθορά του κοπτικού άκρου, άρα μείωση της ταχύτητας διάτρησης ή και τελείως διακοπή της
2. Σφήνωμα της διατρητικής στήλης (stuck pipe)
3. Υψηλή ροπή που επιβαρύνει τη διατρητική στήλη (torque)
4. Υψηλή δύναμη οπισθέλκουσας που δέχεται η διατρητική στήλη (Drag force)
5. Προκαλεί απώλεια του ρευστού (Fluid loss)
6. Σταδιακή απόφραξη της γεώτρησης μαζί με ρηγμάτωση του φρεατίου και έτσι προκαλείται μεταβολή της κυκλοφορίας
7. Δυσκολίες σε άλλες μετέπειτα εργασίες όπως για παράδειγμα στη τσιμεντοποίηση καθώς οι εργασίες για Wireline logging αυξάνονται.

#### 1.6.3 Παράμετροι που επηρεάζουν τον καθαρισμό της γεώτρησης από τα θραύσματα

Η μεταφορά των θραυσμάτων επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους. Η κάθε παράμετρος επιδρά σε διαφορετικό βαθμό στον καθαρισμό της γεώτρησης. Υπάρχουν διάφορες μεταβλητές για την κάθε παράμετρο και ποικίλουν με σκοπό τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας. Ωστόσο, το αποτέλεσμα κάθε παραμέτρου διαφέρει εάν το φρεάτιο είναι κατακόρυφο, κεκλιμένο ή οριζόντιο. Το σχήμα απεικονίζει διάφορες παραμέτρους που επηρεάζουν τον καθαρισμό των γεωτρήσεων και το βαθμό που επηρεάζει η κάθε μέθοδος.



Εικόνα 1.8 Παράμετροι που επηρεάζουν το καθορισμό της γεώτρησης (Mahmoud, και συν., 2019)

Το σχήμα είναι καθορισμένο ανάλογα με το βαθμό που επηρεάζει τον καθαρισμό της γεώτρησης και τη δυνατότητα αλλαγής και ελέγχου από το πεδίο. (Κουτρούλης & Μιχαλάκης, 2002) (Mahmoud, και συν., 2019)

Η παράμετροι είναι:

1. Ο ρυθμός ροής του ρευστού (Flow rate)
2. Τύπος ροής (Flow region)
3. Η ρεολογία του ρευστού (Rheology of the mud)
4. Η διάμετρος της γεώτρησης (Hole size)
5. Η κλίση της γεώτρησης (Hole angle)
6. Ο ρυθμός διείσδυσης του κοπτικού (Rate of penetration)
7. Η ταχύτητα περιστροφής της διατρητικής στήλης (Pipe rotation speed)
8. Η εκκεντρότητα της διατρητικής στήλης (Drill Pipe Eccentricity)
9. Το μέγεθος σωματιδίων των θραυσμάτων (Cutting size)
10. Η πυκνότητα του ρευστού (Mud weight)
11. Το σχήμα των θραυσμάτων (Cuttings shape)

#### 1.6.4.1 Ο ρυθμός ροής ( Flow rate)

Ο ρυθμός ροής έχει θετική επίδραση στον καθαρισμό των θραυσμάτων σε μια γεώτρηση. Η επικάθιση των θραυσμάτων ξεκινά μόλις η μέση ταχύτητα του ρευστού είναι κάτω από το MTV. Η κρίσιμη ταχύτητα μεταφοράς (MTV) ορίζεται ως η ελάχιστη ταχύτητα που απαιτείται για την επανακινητοποίηση των σωματιδίων. Το υπόστρωμα που σχηματίζουν τα θραύσματα αρχίζει να μετακινείται μόλις η μέση ταχύτητα του ρευστού είναι μεγαλύτερη από το MTV. Ο σωστός καθαρισμός του φρεατίου επιτυγχάνεται όταν η ταχύτητα του ρευστού πάνω από την επιφάνεια του φρεατίου είναι ικανή να μεταφέρει τα θραύσματα χωρίς περαιτέρω εναπόθεση. Ο ρυθμός ροής επηρεάζεται από:

1. Την υδραυλική ισχύ του γεωτρήσανου
2. Την ισχύ της αντλίας
3. Την ανάλογη απαιτούμενη πυκνότητα

#### 1.6.4.2 Τύπος ροής ( Flow region)

Μελέτες έδειξαν ότι η Τυρβώδης ροή έχει υψηλότερη απόδοση μεταφοράς θραυσμάτων. Σε συνθήκες τυρβώδους ροής, η επίδραση του καθαρισμού της γεώτρησης δεν επηρεάζεται έντονα από τη ρεολογία του ρευστού ή άλλες παραμέτρους, όπως η περιστροφή του γεωτρήσανου ή η κλίση του φρεατίου. Λόγω της μεγάλης ορμής και γρήγορης ανάμιξης στη τυρβώδη ροή, το μόνο που εξαρτάται είναι η ταχύτητα και η πυκνότητα του ρευστού για τον καθαρισμό της γεώτρησης. Ωστόσο, υπό συνθήκες στρωτής ροής, η μεταφορά θραυσμάτων εξαρτάται από τη ρεολογία του ρευστού.

#### 1.6.4.3 Ρεολογία Διατρητικής Λάσπης ( Rheology of the mud)

Οι ρεολογικές ιδιότητες είναι μια από τις πιο σημαντικές ιδιότητες του διατρητικού ρευστού (διατρητικής λάσπης) που σχετίζεται με τον καθαρισμό της γεώτρησης. Για τις οριζόντιες και κεκλιμένες γεωτρήσεις με μεγάλη γωνία κλίσης, τα λεπτόρρευστα, όπως το καθαρό νερό ή ρευστά με χαμηλό ιξώδες είναι πιο αποτελεσματικά στον καθορισμό των θραυσμάτων. Τα λεπτά ρευστά χαμηλού ιξώδους επιτρέπουν την δημιουργία της τυρβώδους ροής σε χαμηλούς ρυθμούς ροής. Έτσι η τυρβώδης ροή προκαλεί την αύξηση της τοπικής ταχύτητας του διατρητικού ρευστού (διατρητικής λάσπης) όταν είναι κοντά στο υπόστρωμα που δημιουργήθηκε από τα θραύσματα, με αποτέλεσμα

την ανύψωση και την γρήγορη αφαίρεση των θραυσμάτων. Ωστόσο, η αύξηση του ιξώδους πάνω από μια οριακή τιμή θα έχει αντίθετα αποτελέσματα. Το ιξώδες πρέπει να μειωθεί μέχρι να φθάσει στο οριακό σημείο και να αλλάξει σε τυρβώδη ροή. Μια περεταίρω μείωση πέρα από το σημείο αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του καθαρισμού των θραυσμάτων λόγω υπερβολικών αναταράξεων.

#### *1.6.4.4 Το διάμετρος της γεώτρησης (Hole size)*

Η διάμετρος της γεώτρησης είναι μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τη μεταφορά θραυσμάτων όπως και άλλες παραμέτρους. Σε παλαιότερα πειράματα (Peden, Ford, & Oyenevin, 1990) χρησιμοποιήθηκαν θραύσματα με μέγεθος που κυμαινόταν από 1,7 έως 2,0 mm με ρευστό μεγάλου ιξώδους με βάση το νερό με προσθήκη CMC (Carboxymethyl cellulose) και XC πολυμερές (xanthan gum) για τη δοκιμή της παραμέτρου της διαμέτρου της γεώτρησης. Η αύξηση της διαμέτρου του φρεατίου σε όλες τις γωνίες επηρέασε τόσο την ανασήκωση των θραυσμάτων όσο και την μεταφορά. Επιπλέον η οριακή ταχύτητα μεταφοράς αυξήθηκε καθώς αυξήθηκε η διάμετρος της γεώτρησης. Το συμπέρασμα λοιπόν το οποίο εξάγεται είναι ότι όσο η διάμετρος του φρεατίου μειώνεται τόσο η ταχύτητα αυξάνεται, έτσι γίνεται πιο εύκολα ο καθαρισμός της γεώτρησης. (Mahmoud, και συν., 2019)

#### *1.6.4.5 Η κλίση της γεώτρησης (Hole angle)*

Η διάτρηση ενός κεκλιμένου φρεατίου με γωνία κλίσης μεγαλύτερη από 30 ° από την κατακόρυφη έχει προβλήματα στην απομάκρυνση θραυσμάτων. Τα θραύσματα σχηματίζουν στρώματα που δεν μπορούν να καθαριστούν με ρυθμούς ροής μικρότερους από αυτά που απαιτείται για τη «ρευστοποίηση» σωματιδίων σε κλίση. Έτσι, οι μηχανισμοί απομάκρυνσης θραυσμάτων σε κεκλιμένα φρεάτια μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις τρόπους μεταφοράς με βάση τη γωνία κλίσης. (Mahmoud, και συν., 2019)

Για τον καθαρισμό των θραυσμάτων η κλίση της γεώτρησης έχει ως παράμετρο την γωνία και χωρίζεται σε τρεις περιοχές:

1. Υψηλές, σε κλίση μεγαλύτερη από 60 °, τα θραύσματα συσσωρεύονται στο κάτω μέρος του φρεατίου της γεώτρησης σχηματίζοντας ακίνητα σταθερά υποστρώματα.

2. Ενδιάμεσες , όταν η γωνία κλίσης κυμαίνεται μεταξύ 30 ° και 60 ° , μπορεί να συσσωρευτούν θραύσματα στη χαμηλή πλευρά ενός φρεατίου και ακόμη και να γλιστρήσουν πίσω στην οπή όταν ο ρυθμός κυκλοφορίας του ρευστού είναι χαμηλός.
3. Σχεδόν κάθετες γωνίες, όταν η γεώτρηση έχει γωνία μικρότερη από 30 ° από την κατακόρυφη, η διαδικασία καθαρισμού πραγματοποιείται απλά με παρόμοιο τρόπο όπως στις κατακόρυφες γεωτρήσεις.

Η αύξηση της γωνίας κλίσης αυξάνει το ύψος των στρωμάτων και επομένως ενισχύει τη συσσώρευση μοσχευμάτων. (Adari, Miska, Kuru, Bern, & Saasen, 2000). Ακόμη η αύξηση της γωνίας κλίσης από 60 σε 90 μπορεί να έχει θετική επίδραση στην αποδοτικότητα καθαρισμού. (Ali Piroozian, 2012) Παρόμοια παρατήρηση έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες μελέτες (Bilgesu, Mishra, & Ameri, 2007) που ανέφερε τη βελτίωση του καθαρισμού των γεωτρήσεων με την αύξηση της γωνίας κλίσης από 75 σε 90 μοίρες.

#### *1.6.4.6 Ο ρυθμός διείδυσης του κοπτικού ( Rate of penetration)*

Ο ρυθμός διείδυσης (ROP) είναι μια σημαντική παράμετρος για το χρονοδιάγραμμα του έργου γεώτρησης και επομένως και για το συνολικό κόστος της. Παρ 'όλα αυτά, το υψηλό ROP δημιουργεί περισσότερη κοπή που έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη για περισσότερο καθαρισμό των θραυσμάτων. Ως εκ τούτου, ο ρυθμός ροής πρέπει να αυξηθεί μαζί με το ROP για να εξισορροπήσει την αύξηση της παραγωγής των θραυσμάτων. Ακόμα μια μεταβλητή που παίζει ρόλο μαζί με το ρυθμό διείδυσης είναι η ταχύτητα περιστροφής της διατρητικής στήλης. Η επίδραση στον καθαρισμό της γεώτρησης είναι μικρότερη όταν έχουμε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής του σωλήνα και αυξάνουμε το ρυθμό διείδυσης του κοπτικού.

#### *1.6.4.7 Ταχύτητα περιστροφής της διατρητικής στήλης ( Pipe rotation speed)*

Ο ρυθμός απομάκρυνσης των θραυσμάτων παρατηρήθηκε ότι αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής του σωλήνα, ειδικά σε γωνίες μεγάλης κλίσης. Η περιστροφή του αγωγού μπορεί να προκαλέσει δευτερεύουσες ροές γνωστές ως Taylor-vortex. Οι ροές Taylor-vortex εξαρτώνται από την περιστροφή δύο ομόκεντρων κυκλικών κυλίνδρων. Πιο συγκεκριμένα, όταν ο εσωτερικός κύλινδρος περιστρέφεται (διατρητική στήλη) και ο εξωτερικός βρίσκεται σε ηρεμία (φρεάτιο) τότε η ροή λαμβάνει τη μορφή στροβιλισμού. Οι στροφές προκαλούν την αύξηση της πτώσης της πίεσης λόγω της τριβής, αυξάνοντας έτσι την διατρητική τάση στην επιφάνεια του

στρώματος των θραυσμάτων. Έτσι η διατρητική τάση ενισχύει τον καθαρισμό του φρεατίου. Η αύξηση της περιστροφής του σωλήνα βελτιώνει τη μεταφορά θραυσμάτων σε όλους τους ρυθμούς ροής. Η πρόσκρουση είναι πιο σημαντική για μικρά σωματίδια. Το αποτέλεσμα της περιστροφής του σωλήνα φαίνεται να είναι αμελητέο καθώς αυξάνεται η διάμετρος της γεώτρησης.

#### *1.6.4.8 Η εκκεντρότητα της διατρητικής στήλης ( Drill Pipe Eccentricity)*

Η εκκεντρότητα των σωλήνων έχει αμελητέα επίδραση στον καθαρισμό των γεωτρήσεων σε χαμηλές γωνίες κλίσης ( $0 - 55^\circ$ ) τόσο για τις τυρβώδεις ροές όσο και για τις στρωτές ροές. Το αποτέλεσμα γίνεται πιο αισθητό σε υψηλότερες κλίσεις ( $55^\circ - 90^\circ$ ). Η εκκεντρότητα δημιουργεί δύο περιοχές στη διατομή ροής: ευρείες και στενές. Το ρευστό αναγκάζεται να ρέει γρήγορα στην ευρεία περιοχή και αργά στη στενή περιοχή. Σε κεκλιμένα και οριζόντια φρεάτια, η εκκεντρότητα του σωλήνα έχει αρνητικές επιπτώσεις στη μεταφορά θραυσμάτων. Αφού στις πλείστες φορές έχουμε θετική εκκεντρότητα, δηλαδή το στενό μέρος στο φρεάτιο βρίσκεται στο κάτω μέρος του φρεατίου, εκεί είναι και που εξαιτίας της βαρύτητας συσσωρεύονται τα θραύσματα. Ωστόσο, ο δακτύλιος με την ευρεία περιοχή στον πυθμένα και τη στενή περιοχή στην κορυφή (δακτύλιος με αρνητική εκκεντρότητα) έχει βελτίωση της μεταφοράς θραυσμάτων, παρόλο που ο δακτύλιος με αρνητική εκκεντρότητα σπάνια εμφανίζεται στην πράξη. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ακόμη ότι η καθαριότητα του φρεατίου δυσκολεύει ακόμα περισσότερο στη χρήση ρευστού με μεγάλο ιξώδες στο στενό μέρος του φρεατίου. Έτσι γίνεται η χρήση και η προτίμηση ρευστού χαμηλού ιξώδους κατά τον καθαρισμό του φρεατίου.

#### *1.6.4.9 Μέγεθος σωματιδίων των θραυσμάτων ( Cutting size)*

Μια έρευνα που έγινε έδειξε ότι αύξηση του μεγέθους κοπής από 3 σε 8 mm έδειξε μια αξιοσημείωτη διαφορά στη μεταφορά κοπής. Τα μεγάλα σωματίδια ήταν πιο εύκολο να μεταφερθούν σε όλους τους ρυθμούς ροής (Bilgesu, Mishra, & Ameri, 2007). Σύμφωνα όμως με τον (Peden, Ford, & Oyenevin, 1990), τα μικρότερα αποκόμματα μεταφέρονται ευκολότερα σε όλες τις γωνίες με ρευστό χαμηλού ιξώδους. Όμως, παρατήρησε ότι τα μεγαλύτερα θραύσματα μεταφέρονται αποτελεσματικότερα με ρευστό υψηλού ιξώδους σε χαμηλές κλίσεις ( $0^\circ - 50^\circ$ ). Σε μια άλλη μελέτη (Li & Walker, 1999) που πραγματοποιήθηκε για το καθαρισμό των γεωτρήσεων χρησιμοποιήθηκαν σωματίδια με διαφορετικές διαμέτρους (λεπτά, ενδιάμεσα και χονδροειδή σωματίδια) και νερό ως διατρητικό ρευστό σε οριζόντια διάταξη. Τα ενδιάμεσα σωματίδια (0,76 mm)



βρέθηκαν να είναι πιο δύσκολο να απομακρυνθούν από τα λεπτά σωματίδια (0,15 mm) και χονδροειδή (7 mm).

#### *1.6.4.10 Η πυκνότητα του λάσπης (Mud weight)*

Η πυκνότητα του διατρητικού ρευστού (διατρητικής λάσπης) είναι χρήσιμη για τη σταθεροποίηση του φρεατίου της γεώτρησης και αποτρέπει την εισβολή ξένων ρευστών μέσα στο φρεάτιο. Επιπλέον, η πυκνότητα είναι αυτή που επηρεάζει τη δυναμική συμπεριφορά του ρευστού, άρα ως αποτέλεσμα έχει την ενίσχυση της ανύψωσης και αφαίρεσης των θραυσμάτων. Ωστόσο, η αύξηση της πυκνότητας προκαλεί μείωση του ROP, γεγονός που αυξάνει το κόστος. Γι' αυτό το λόγο η πυκνότητα του ρευστού δεν αυξάνεται ποτέ για το σκοπό της καθαριότητας της γεώτρησης αλλά για αύξηση της υδροστατικής πίεσης (Mohammadsalehi & Malekzadeh, 2011). Σε επιστημονική μελέτη (Takach, Nakamura, Shariff, & Yu, 2007) που έγινε σε οριζόντια διάταξη, οι δοκιμές έδειξαν τη βελτίωση της αφαίρεσης θραυσμάτων κατά 50% όταν η πυκνότητα ρευστού αυξήθηκε από 7 σε 13,7 lbm / gal .Η αύξηση της πυκνότητας οδηγεί σε αύξηση του αριθμού Reynolds και επομένως δημιουργείται τυρβώδης ροή και συνεπώς καλύτερη μεταφορά θραυσμάτων. Επιπλέον, η πυκνότητα του ρευστού αυξάνει τη δύναμη της πλευστότητας βελτιώνοντας ταυτόχρονα την ανύψωση των θραυσμάτων. Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι ο καλύτερος καθαρισμός της γεώτρησης.

Ωστόσο, για τον καθαρισμό της γεώτρησης ή για την μείωση του προβλήματος της καθίζησης των θραυσμάτων οι πιο πιθανές αλλαγές που γίνονται είναι:

1. Ο ρυθμός ροής και η ρεολογία της λάσπης είναι οι προτιμώμενες ρυθμιζόμενες παράμετροι στο πεδίο λόγω της δυνατότητας ελέγχου τους. Με την μεταβολή κυρίως του ιξώδους βοηθάται η επανακινητοποίηση και μεταφορά των θραυσμάτων.
2. Η αύξηση του ρυθμού διείδυσης του κοπτικού με συνδυασμό την αύξηση του ρυθμού ροής και τη μείωση του ιξώδους έδειξε θετικά αποτελέσματα αποτροπή καθίζησης των θραυσμάτων.
3. Η αλλαγή του κοπτικού άκρου για την αλλαγή του μεγέθους των σωματιδίων μπορεί να βοηθήσει στο καθαρισμό και την μεταφορά των θραυσμάτων.

#### *1.6.4.11 Το σχήμα των θραυσμάτων ( Cuttings shape)*

Τα θραύσματα κατά την κοπή τους από το κοπτικό άκρο παίρνουν διάφορα σχήματα. Τις περισσότερες φορές , τα σχήματά τους είναι ακανόνιστα και δεν ταυτίζονται με κανένα γνωστό

σχήμα. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι ορισμένα μπορεί να μοιάζουν με σφαιρικά, κωνικά, τριγωνικά κ.λπ. Έτσι, κατά την διάτρηση, τα σχήματα των θραυσμάτων καθορίζονται ανάλογα με το πόσο προσεγγίζουν το σχήμα μιας σφαίρας. Αυτό ονομάζεται σφαιρικότητα. Η σφαιρικότητα ενός είναι μονάδα μέτρησης πόσο σφαιρικό είναι ένα αντικείμενο (Wang & Fan, 2013). Έτσι, η σφαιρικότητα για να καθοριστεί ποσοτικά, συμβολίζεται από 0 έως 1 με 1 αυτό που είναι τέλεια σφαιρικό. Ένα σωματίδιο ακανόνιστου σχήματος έχει χαμηλότερη ταχύτητα καθίζησης σε σύγκριση με το αντίστοιχο σφαιρικό σχήμα που έχει την ίδια πυκνότητα. Επομένως, καθώς το σχήμα των θραυσμάτων αποκλίνει από την τιμή 1 της σφαιρικότητας δέχεται υψηλότερη δύναμη οπισθέλκουσας δυσκολεύοντας έτσι τον καθαρισμό τους από το φρεάτιο.

## Κεφάλαιο 2: Διατρητικά ρευστά (Drilling Fluids)

### 2.1 Εισαγωγή

Τα διατρητικά ρευστά (διατρητικές λάσπες) έχουν τεράστια σημασία για την σωστή λειτουργία μιας περιστροφικής γεώτρησης. Αρχικά, από τη δεξαμενή ρευστού γίνεται αναρρόφηση του ρευστού με την βοήθεια της αντλίας ρευστού και αυτό εισέρχεται μέσα στο υποσύστημα κυκλοφορίας. Το ρευστό εισέρχεται από την κορυφή της διατρητικής στήλης που βρίσκεται στην επιφάνεια και κατέρχεται διαμέσου του σωλήνα γεώτρησης μέχρι το κοπτικό άκρο. Τα ακροφύσια του κοπτικού άκρου εκρέουν με πίεση το διατρητικό ρευστό και αυτό ανέρχεται προς την επιφάνεια από τα τοιχώματα του φρεατίου. Οι ρεολογικές ιδιότητες του ρευστού έχουν πρωταρχικό ρόλο στην απομάκρυνση των θραυσμάτων αλλά και άλλων μεταβλητών για την πρόοδο της γεώτρησης. Οι βασικές λειτουργίες του διατρητικού ρευστού είναι: (Γιώτης, 2019) (Κουτρούλης & Μιχαλάκης, 2002) (Δαλαμαρίνης, 2009)

1. Απομάκρυνση θραυσμάτων του κοπτικού άκρου (cuttings) από τη κοπή των πετρωμάτων από το φρεάτιο κατά τη ροή προς την επιφάνεια
2. Μεταφορά ισχύος στα περιστρεφόμενα μέρη του κοπτικού άκρου
3. Εξισορρόπηση των πιέσεων πόρων σχηματισμού για την αποφυγή blowout
4. Ψύξη και λίπανση του κοπτικού άκρου και της διατρητικής στήλης
5. Στεγανοποίηση και αδρανοποίηση των τοιχωμάτων του φρεατίου για τον περιορισμό διαρροής (mud cake)
6. Υποστήριξη και σταθεροποίηση των μη σωληνωμένων τοιχωμάτων του φρεατίου μέχρι να γίνει επένδυση με σωλήνα
7. Αιώρηση των θραυσμάτων σε περίπτωση διακοπής της κυκλοφορίας (Ζελατινοποίηση)
8. Επιτρέπει την ανάκτηση πληροφοριών σχετικά με τους σχηματισμούς που έχουν κοπεί μέσω ανάλυσης των θραυσμάτων.

Επιπλέον το διατρητικό ρευστό πρέπει:

1. Να έχουν τις απαραίτητες ιδιότητες για να επιτρέπουν και να διευκολύνουν την εφαρμογή τεχνικών για κάθε περίπτωση που θα προκύψει κατά την διάρκεια της γεώτρησης
2. Να μην προκαλούν προβλήματα στα πετρώματα που έρχονται σε επαφή
3. Να μην γίνεται διάβρωση της διατρητικής στήλης
4. Η παρασκευή του διατρητικού ρευστού να γίνεται εύκολα

Η επιλογή του διατρητικού ρευστού καθορίζεται από κάποιους βασικούς παράγοντες, όπως:

1. Το κόστος για την παρασκευή του διατρητικού ρευστού
2. Την αναμενόμενη τεχνική απόδοση
3. Την περιβαλλοντική επίπτωση
4. Τα είδη των πετρωμάτων που υπάρχουν στο υπέδαφος
5. Τις ιδιότητες που έχουν τα πετρώματα ( διαπερατότητα , πίεση των πόρων , σκληρότητα πετρωμάτων , θερμοκρασία πετρωμάτων)
6. Την τοποθεσία που θα εκτελεστεί η γεώτρηση ( θαλάσσια ή χερσαία γεώτρηση )
7. Το είδος του ταμιευτήρα
8. Τα όρια της πτώσης πίεσης που καθορίζονται από το διατρητικό ρευστό στα οποία οφείλεται και η σωστή λειτουργία της γεώτρησης.

Ο πιο σημαντικός παράγοντας για τη σύσταση και για τα ορυκτά που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή του διατρητικού ρευστού (διατρητικής λάσπη) είναι πίεση του πυθμένα του φρεατίου που πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την πίεση των πόρων του σχηματισμού και μικρότερη από την πίεση ρηγμάτωσης για αποφυγή οποιασδήποτε εκτίναξης (kick). Στην εκτίναξη πραγματοποιούνται μικρής εκτάσεως εισροές ρευστών του σχηματισμού σε ζώνες υπερπίεσης που ανέρχονται κυρίως από τους εξωτερικούς τοίχους του φρεατίου. Σε χειρότερες καταστάσεις δημιουργείται το φαινόμενο Blowout (Έκρηξη), δηλαδή σημειώνεται μεγάλης έκτασης διαρροή ρευστών σχηματισμού κατά την είσοδο σε ζώνες μεγάλης υπερπίεσης που ανέρχεται στην επιφάνεια τόσο δια μέσου του φρεατίου όσο και του σωλήνα γεώτρησης. (Blowout (well drilling), 2010) (Klempa, Bujok, Pinka, & Struna, 1996)



Εικόνα 2.1 Blowout The Lucas Gusher at Spindletop, Texas (1901) (Blowout (well drilling), 2010)

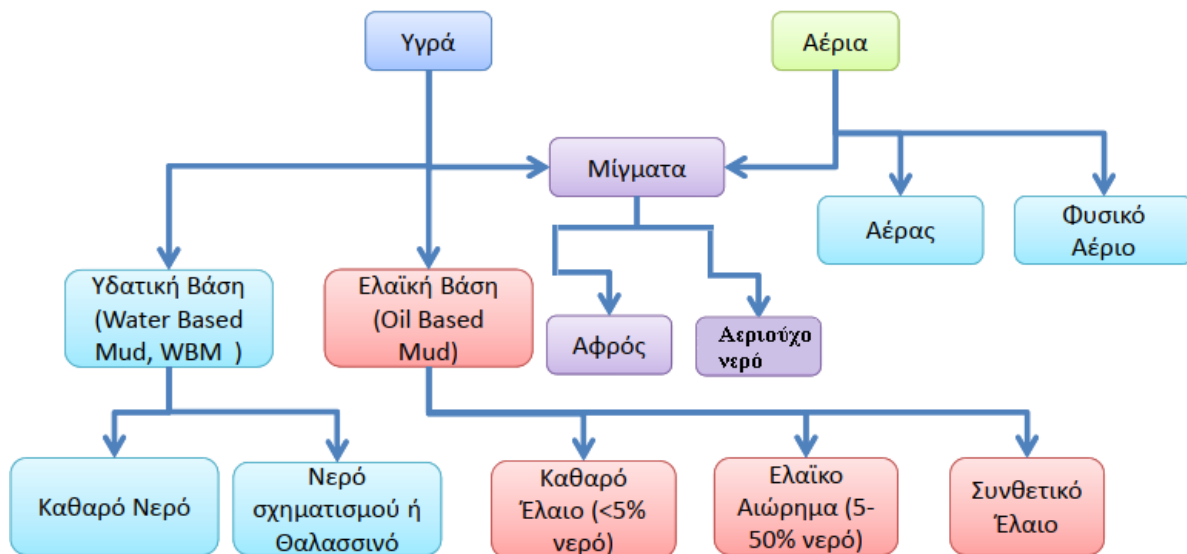


Εικόνα 2.2 Macondo-1 well blowout on the Deepwater Horizon rig, 21 April 2010 (Blowout (well drilling), 2010)

## 2.2 Κατηγορίες των διατρητικών ρευστών (διατρητικές λάσπες)

Τα διατρητικά ρευστά (διατρητικές λάσπες) χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα υγρά και τα αέρια. Τα υγρά χωρίζονται με βάση το υδωρ και τα έλαια. Με υδατική βάση (water based mud, WBM) όπου διαλύτης είναι το νερό το οποίο μπορεί να είναι καθαρό ή νερό του σχηματισμού ή θαλασσινό νερό και τα υγρά με ελαϊκή βάση (Oil Based Mud) όπου εκεί η συνεχής φάση είναι κάποιος υδρογονάνθρακας. Τα υγρά με ελαϊκή βάση χωρίζονται σε:

1. Καθαρά έλαια με ποσότητα νερού μικρότερη του 5%
2. Ελαϊκά Αιωρήματα με ποσότητα νερού 5% - 50%
3. Συνθετικά έλαια



Εικόνα 2.3 Ταξινόμησης διατρητικών ρευστών (Γιώτης, 2019) (Hossain & Al- Majed, 2015)

Τα αέρια που η συνεχής φάση τους είναι κάποιο αέριο, χωρίζονται σε αυτά που γίνεται χρήση καθαρού αέρα και σε αυτά όπου χρησιμοποιείται φυσικό αέριο. Υπάρχουν και περιπτώσεις που γίνεται και μίγμα αυτό των δυο για χρήση αφρού σαν διατρητικό ρευστό. (Klempa, Bujok, Pinka, & Struna, 1996) (Γιώτης, 2019)

### 2.2.1 Υδατική βάση (water based mud, WBM)

Οι διατρητικές λάσπες με υδατική βάση είναι οι πιο κοινό ρευστό γεώτρησης αφού είναι λιγότερο ακριβά από τα ρευστά με ελαϊκή βάση τα οποία χρειάζονται εξειδικευμένους τρόπους αντιμετώπισης όχι μόνο κατά την γεώτρηση αλλά και μετά από αυτήν για περιβαλλοντικούς λόγους. (Γιώτης, 2019) (Klempa, Bujok, Pinka, & Struna, 1996) (Κουτρούλης & Μιχαλάκης, 2002) (Δαλαμαρίνης, 2009) (Skalle, 2011) (Hossain & Al- Majed, 2015)

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης διατρητικού ρευστού (διατρητική λάσπη) με υδατική βάση είναι

1. Το χαμηλό κόστος
2. Η γενική χρήση
3. Η εξαιρετική απόδοσή τους σε στερεούς σχηματισμούς

Τα αρνητικά της χρήσης διατρητικού ρευστού (διατρητική λάσπη) με υδατική βάση είναι:

1. Η αύξηση της διατμητικής τάσης στη διατρητική στήλη
2. Η αστάθεια σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης που γίνεται σε μεγάλα βάθη λόγω της αφυδάτωσης του αργίλου

Τυπική σύσταση με βάση το νερό:

1. Καθαρό νερό ή νερό σχηματισμού ή θαλασσινό με ποσότητα που φτάνει το 80%
2. Αργιλικό ορυκτό, συνήθως μπετονίτης, για τη δημιουργία ιξώδους γαλακτώματος για την βοήθεια στη μεταφορά θραυσμάτων, την βελτίωση σταθεροποίησης των τοιχωμάτων του φρεατίου και τη δημιουργία γέλης για συγκράτηση των θραυσμάτων σε περίπτωση διακοπής της διάτρησης
3. Ρυθμιστή βάρους όπως βαρίτη, ασβεσίτη και σιδερίτη για ρύθμιση της πυκνότητας του ρευστού και επομένως την εξισορρόπηση πιέσεων του σχηματισμού
4. Κάποια στερεά αιωρήματα στεγανοποίησης όπως περλίτης, ψαμμίτης, πλαστικά σωματίδια ή ακόμα ίνες και δίσκοι για τη στεγανοποίηση τυχόν μικρό-ρωγμών
5. Προσθήκη αλάτων όπως NaCl ή KCl για προστασία των πετρωμάτων από τυχόν διόγκωση των τοιχωμάτων από αργιλικούς σχηματισμούς
6. Χημικά Πρόσθετα για καλύτερη ρύθμιση των ρεολογικών και χημικών ιδιοτήτων, όπως ρύθμιση του pH με καυστικό νάτριο (NaOH) που βοηθά στην καλύτερη λειτουργία των διασπορευών και στην ελάττωση της διάβρωσης. Ακόμα άλλα χημικά πρόσθετα είναι τα λιπαντικά, τα αντιδιαβρωτικά, τα χημικά για την δέσμευση κατιόντων ασβεστίου ( $\text{Ca}^{+2}$ ) και τα συσσωρευτικά (floculants) που βοηθούν στην συσσωμάτωση των στερεών στην επιφάνεια.

### 2.2.2 Ελαϊκή βάση (Oil Based Mud)

Συστήματα με βάση το πετρέλαιο αναπτύχθηκαν και εισήχθησαν στη δεκαετία του 1960 για να βοηθήσουν στην αντιμετώπιση πολλών προβλημάτων γεώτρησης όπως: (Γιώτης, 2019) (Γιώτης, 2019) (Klempa, Bujok, Pinka, & Struna, 1996) (Κουτρούλης & Μιχαλάκης, 2002) (Δαλαμαρίνης, 2009) (Skalle, 2011) (Hossain & Al- Majed, 2015)

1. Αργιλικούς σχηματισμούς που αντιδρούν, διογκώνονται ή επιβραδύνουν μετά την έκθεση με το νερό
2. Αύξηση των θερμοκρασιών και πίεση κάτω στο πυθμένα
3. Κόλλημα της διατρητικής στήλης , ροπή και δύναμης της οπισθέλκουσας

. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης διατρητικού ρευστού (διατρητική λάσπη) με ελαϊκή βάση είναι:

1. Μεγαλύτερη ταχύτητα διάτρησης
2. Καλύτερη λειτουργία σε βαθιές γεωτρήσεις λόγω σταθερής σύστασης σε μεγάλες θερμοκρασίες ( Βάθος >4000m) ( $T > 100\text{ C}$ )
3. Αδρανή με τα αργιλικά ορυκτά του σχηματισμού
4. Καλύτερες λιπαντικές ιδιότητες στο μηχανολογικό εξοπλισμό
5. Μικρότερη διατμητική τάση στη διατρητική στήλη άρα λιγότερη σπατάλη ενέργειας
6. Εξαιρετική αντιδιαβρωτική συμπεριφορά
7. Χαμηλότερη τιμή πυκνότητας έως  $7.5\text{ lb/gal}$  ( $\approx 900\text{ kg/m}^3$ )

Τυπική σύσταση με ελαϊκή βάση:

1. Έλαιο όπως diesel , κηροζίνη , λιπαντικά ή συνθετικό βιοδιασπώμενο έλαιο και ορυκτέλαιο με ποσότητα μεγαλύτερη του 50%
2. Νερό μικρότερο του 50%
3. Γαλακτωματοποιητής όπως άλατα λιπαρών οξέων και Χλωριούχο ασβέστιο ( $\text{CaCl}_2$ )
4. Λιπόφιλοι άργιλοι
5. Στερεά υψηλού ειδικού βάρους για ρύθμιση της πυκνότητας όπως Βαρίτης  $\text{BaSO}_4$  και Ασβεστίτης  $\text{CaCO}_3$
6. Κάποιος ρυθμιστής οξύτητας όπως υδροξείδιο του νατρίου ( $\text{NaOH}$ ) για την εξουδετέρωση της διαβρωτικής δράσης σχηματισμών με διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και υδρόθειου ( $\text{H}_2\text{S}$ ).
7. Χημικά πρόσθετα για ρύθμιση ρεολογικών και χημικών ιδιοτήτων , τη ρύθμιση της διαβροχής και τη σταθερότητα του γαλακτώματος



## 2.3 Ιδιότητες των ρευστών

Οι βασικές ιδιότητες των ρευστών χωρίζονται σε:

1. Πυκνότητα
2. Ρεολογία
3. Δύναμη ζελατινοποίησης
4. pH
5. Έλεγχο φιλτραρίσματος ( διήθηση)
6. Περιεχόμενο άμμου
7. Αναλογία στερεών

### 2.3.1 Πυκνότητα

Το βάρος λάσπης ή η πυκνότητα ( mud weight or density) ορίζεται ως η μάζα ανά μονάδα όγκου. Οι μονάδες μέτρησης της πυκνότητας του ρευστού είναι ως συνήθως σε ppg δηλαδή  $\text{kg/m}^3$ ,  $\text{lb/gal}$ , ακόμη  $\text{lb/ft}^3$ , και για την πτώση πίεσης ανά πόδι είναι  $\text{psi/ft}$ .

Η πυκνότητα του ρευστού είναι πολύ σημαντική για τον υπολογισμό των γεωπιέσεων. Η γεωπίεση είναι η αυξητική μεταβολή της πίεσης κατά την εξέλιξη μιας γεώτρησης σε βάθος. Η εκτίμηση γεωπιέσεων είναι σημαντική για την ορθή επιλογή του προγράμματος γεώτρησης, του ρευστού και των σωληνώσεων. Θα πρέπει η πυκνότητα του ρευστού σε οποιοδήποτε βάθος να δώσει υδροστατική πίεση που είναι μεγαλύτερη από την πίεση των πόρων του σχηματισμού και μικρότερη από την πίεση ρηγμάτωσης  $P_{ff}(D) > P_{mud}(D) > P_{fp}(D)$ . Η υπερεκτίμηση της πυκνότητας μπορεί να δημιουργήσει ρωγμές στο σχηματισμό και έτσι απώλεια ρευστού. Πιθανόν εισροή ρευστών του πετρώματος στο φρεάτιο και ίσως δημιουργία blowout. Από την άλλη, η υποεκτίμηση έχει ως αντίκτυπο τη δημιουργία προβληματικής απομάκρυνσης θραυσμάτων και του ρευστού, την πιθανή κατάρρευση των τοιχωμάτων του πηγαδιού και δημιουργεί blowout μέσα από το φρεάτιο. (Mud density, 2020) (Γιώτης, 2019)

Για τον έλεγχο της πυκνότητας του ρευστού γίνεται προσθήκη διάφορων προσθετικών υλικών. Ο βαρύτης ( $\text{BaSO}_4$ ) είναι ο πιο συνηθισμένος, με ελάχιστο ειδικό βάρος  $4,20 \text{ g/cm}^3$ . Το ρευστό με προσθετικό υλικό το βαρύτη έχει πολλά πλεονεκτήματα όπως: (Κουτρούλης & Μιχαλάκης, 2002) ( Δαλαμαρίνης, 2009)

1. Είναι εύχρηστος.

2. Έχει χαμηλό ποσοστό προσθήκης για επίτευξη υψηλών πυκνοτήτων
3. Ελέγχει τις πιέσεις σχηματισμού
4. Βελτιώνει τη σταθερότητα της γεώτρησης
5. Είναι χημικά αδρανής
6. Δεν αντιδρά με άλλα πρόσθετα
7. Παρουσιάζει περιορισμένη διάσπαση σωματιδίων.
8. Έχει χαμηλό κόστος

Ο αιματίτης είναι ένα πιο πυκνό υλικό, με ελάχιστο ειδικό βάρος 5,05 g / cm<sup>3</sup>, κατά API και ISO. Το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO<sub>3</sub>), ειδικό βάρος 2,7 έως 2,8, θεωρείται υλικό στάθμισης αλλά χρησιμοποιείται περισσότερο για τη διαλυτότητα του οξέος παρά για την πυκνότητα. Ο σιδερίτης FeCO<sub>3</sub>, με ειδικό βάρος περίπου 3,8, έχει χρησιμοποιηθεί για την πυκνότητα του ρευστού, αλλά μπορεί να προκαλέσει προβλήματα όταν διαλυθεί μέσα στο ρευστό σε υψηλό pH. Ο ιλμενίτης FeTiO<sub>3</sub>, με ειδικό βάρος 4,6 έχει χρησιμοποιηθεί στη διάτρηση υγρού και τσιμέντου. Μόνο ο βαρύτης και ο αιματίτης έχουν πρότυπα API / ISO. (Oilfield Glossary, 2021)

### 2.3.2 Ρεολογία

Γενικά, η ρεολογία μελετά το πώς η ύλη παραμορφώνεται και ρέει, συμπεριλαμβανομένης της ελαστικότητας, της πλαστικότητας και του ιξώδους της. Είναι η επιστήμη και η μελέτη της παραμόρφωσης και της ροής της ύλης υπό την επίδραση δυνάμεων μαζί συμπεριλαμβανομένης και της ροής. Το poise (P) είναι η μονάδα μέτρησης για το ιξώδες, ισοδύναμο με dyne-s / cm<sup>2</sup>. Επειδή ένα poise (P) αντιπροσωπεύει ένα υψηλό ιξώδες, το 1/100 poise (P) ή ένα centipoise (cP), χρησιμοποιείται για μετρήσεις του ρευστού. Ένα centipoise (cP) ισούται με ένα millipascal-second (mPa/s). Τα διατρητικά ρευστά κατά την κίνηση τους χαρακτηρίζονται με την γνώση των ιδιοτήτων των ρευστών και ιξώδες. Τα ρευστά με υψηλό ιξώδες ορίζονται ως παχύρρευστα (thick) και χαμηλού ιξώδους ως λεπτόρρευστα (thin).

Το ιξώδες του ρευστού ορίζεται ως μέτρο της εσωτερικής τριβής των ρευστών, δηλαδή το πόσο εύκολα ρέει υπό την επίδραση μίας διατμητικής δύναμης.

Το επιθυμητό ιξώδες του διατρητικού ρευστού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως

1. Την πυκνότητα
2. Το ρυθμός διάνοιξης
3. Τις απαιτήσεις πιέσεων
4. Την παροχή
5. Τη διάμετρο του φρεατίου
6. Την κατάσταση των τοιχωμάτων του φρεατίου

Το φαινομενικό ιξώδες είναι το ιξώδες στα μη νευτωνικά ρευστά για συγκεκριμένη τιμή διατμητικής τάσης ( $\sigma$ ) και ρυθμού διάτμησης ( $\dot{\gamma}$ ). Εξαρτάται από τρεις παράγοντες:

1. Το ιξώδες της συνεχούς φάσης που είναι είτε νερό είτε κάποιος υδρογονάνθρακας είτε κάποιο αέριο επηρεάζονται από την θερμοκρασία. Το νερό και το πετρέλαιο επειδή είναι υγρά, η αύξηση της θερμοκρασίας ελαττώνει τις δυνάμεις συνοχής και συνεπώς το ιξώδες τους. Στη χρήση αερίων όπου οι δυνάμεις συνοχής είναι αμελητέες, η μεταφορά οφείλεται στη μοριακή ορμή τους. Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την μεταφορά μοριακής ορμής και κατά συνέπεια αυξάνει το ιξώδες.
2. Από το μέγεθος, τη μορφή και τη ποσότητα σωματιδίων. Τα ρευστά με συγκεκριμένη ποσότητα κατά βάρος σωματιδίων αλλά με μεγάλο μέγεθος στερεών εμφανίζουν μικρότερο ιξώδες από τα ρευστά με αντίστοιχο βάρος αλλά μικρότερο μέγεθος.
3. Αναπτυσσόμενες δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων

Για την αύξηση του ιξώδους γίνεται προσθήκη ποσότητας υλικών όπως άργιλοι σαν τον μπεντονίτη, τα πολυμερή και τα γαλακτώματα. Όταν χρειαστεί μείωση του ιξώδους αυτή επιτυγχάνεται με την ελάττωση του ποσοστού των στερεών με την αραίωση ή με ειδικά μηχανικά μέσα. Ακόμη με την προσθήκη χημικών μπορεί να επιτευχθεί και η αδρανοποίηση των ελκτικών δυνάμεων. (Rheology, 2020) (Viscosity, 2020) (Αυλωνίτης & Αυλωνίτης, 2006) (Γιώτης, 2019) (Δαλαμαρίνης, 2009)

### 2.3.3 Δύναμη ζελατινοποίησης

Η δύναμη ζελατινοποίησης είναι μία από τις σημαντικότερες ιδιότητες των ρευστών διάτρησης, λόγω της ικανότητας της να επιβραδύνει την πτώση στο στερεό και το βάρος του υλικού διάτρησης όταν σταματά η κυκλοφορία. Η μέτρηση της δύναμης ζελατινοποίησης γίνεται με βάση το χρόνο που μπορούν τα θραύσματα να αιωρούνται στο ρευστό όταν η κυκλοφορία σταματά. Στη

διακοπή της λειτουργίας της διάτρησης όσο μεγαλύτερη δύναμη ζελατινοποίησης έχει το ρευστό, τόσο περισσότερη πίεση απαιτεί η αντλία για να ξεκινήσει ξανά η κυκλοφορία. Συνήθως προκαλείται από την υψηλή συγκέντρωση αργίλου όπως ο μπετονίτης. Η μονάδα μέτρησης είναι lbf/100 ft<sup>2</sup> (gel strength, 2020) (Caenn, Darley, & Gray, 2017)

#### 2.3.4 Περιεχόμενο άμμου

Τα σωματίδια άμμου σε ρευστό διάτρησης ορίζονται ως σωματίδια μεγέθους μεγαλύτερου από 74 μm. Μεγάλη ποσότητα άμμου μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την μεγέθυνση του πάχους του τοιχώματος του υποστρώματος λάσπης ή να καθιζάνουν στο κάτω μέρος της τρύπας ενώ η κυκλοφορία σταματά. Ο τακτικός προσδιορισμός της περιεκτικότητας σε άμμο του ρευστού γεώτρησης είναι απαραίτητος επειδή αυτά τα σωματίδια μπορεί να είναι πολύ τραχιά και η υψηλή περιεκτικότητα σε άμμο μπορεί να προκαλέσει υψηλή τριβή στα εξαρτήματα της αντλίας, στις συνδέσεις των σωλήνων, ακόμη και στο κοπτικό άκρο. (sand test, 2020) (Nash, 2007)

#### 2.3.5 Αναλογία στερεών

Τα στερεά σχηματισμού που περιέχονται στο σύστημα του διατρητικού ρευστού, θεωρούνται επιβλαβή για τη λειτουργία της γεώτρησης επειδή παράγουν υψηλό πλαστικό ιξώδες, yield point και δύναμη ζελατινοποίησης και κατασκευάζουν υπόστρωμα λάσπης (filter cakes) κακής ποιότητας. Το yield point είναι το ελαστικό όριο ή το σημείο στο οποίο ένα υλικό δεν μπορεί πλέον να παραμορφώνεται ελαστικά. Όταν το ελαστικό όριο ξεπεραστεί από μια εφαρμοζόμενη τάση, εμφανίζεται μόνιμη παραμόρφωση. Αυτό παρουσιάζεται στα πλαστικά κατά Bingham (Bingham plastic model, 2021) και τα εκθετικού νόμου με τάση διολίσθησης (Herschel – Bulkley Model). Επίσης μειώνουν της συγκέντρωση σε βαρύτητα και έτσι δυσκολεύει τη λειτουργία της γεώτρησης όταν χρειάζεται ρευστό υψηλής πυκνότητας. Τα στερεά προκαλούν υπερβολική φθορά στις αντλίες και σε άλλους εξοπλισμούς της γεώτρησης. Η ποσότητα και η φύση αυτών των στερεών θα επηρεάσει την πυκνότητα και το ιξώδες του ρευστού, θα μεγεθύνει το υπόστρωμα λάσπης, θα δυσκολέψει τον καθαρισμό της γεώτρησης και θα αυξήσει την απώλεια πίεσης λόγω τριβής. Ο έλεγχος στερεών στοχεύει στην οικονομική και αποτελεσματική απομάκρυνση στερεών. Αυτό συνεπάγεται αφαίρεση το συντομότερο δυνατό μετά την εισχώρηση τους στο σύστημα του ρευστού της γεώτρησης, ενώ ακόμη τα σωματίδια είναι στο αρχικό τους μέγεθος. (Drill\_solids, 2021)

## 2.4 Ρεολογία των ρευστών γεώτρησης

### 2.4.1Εισαγωγή

Σε μια γεώτρηση παίζουν σημαντικό ρόλο οι ιδιότητες ροής του ρευστού για την συνέχιση και επιτυχία μιας γεώτρησης. Οι ιδιότητες του ρευστού χρειάζονται για να γνωρίζουμε τα φαινόμενα παραμόρφωσης της μορφής της ύλης αλλά και τη συμπεριφορά ροής μέσα στη γεώτρηση και στα κανάλια μεταφοράς του ρευστού. Τα βασικά είδη ροής είναι:

1. Στρωτή ροή (Laminar Flow): *“ονομάζεται η ροή , κατά την οποία τα σωματίδια του ρευστού κινούνται με σταθερή ταχύτητα κατά στρώματα. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα σωματίδια του ρευστού που βρίσκονται στο ίδιο στρώμα , κινούνται με την ίδια ταχύτητα κατά την διεύθυνση της ροής και μόνο , ανεξάρτητα από τη θέση τους”* (Αυλωνίτης & Αυλωνίτης, 2006). Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται όπως δείχνει και στο πιο κάτω διάγραμμα 2.1 για αριθμό Reynolds  $Re < 2000$ .
2. Τυρβώδης ροή (Turbulent Flow) *“είναι όταν τα σωματίδια του ρευστού, κινούνται ακανόνιστα και τυχαία προς όλες τις κατευθύνσεις. Αποτέλεσμα αυτής της τυχαίας κίνησης είναι ότι οι ιδιότητες του ρευστού σε οποιαδήποτε σημείο μεταβάλλονται συνεχώς κατά τυχαίο τρόπο με το χρόνο και τη θέση .Έτσι οι φυσικές ιδιότητες του ρευστού περιγράφονται κατά στατιστικό τρόπο με μέσες τιμές”* (Αυλωνίτης & Αυλωνίτης, 2006). Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται όπως δείχνει και στο πιο κάτω διάγραμμα 2.1 για αριθμό Reynolds  $Re > 4000$ .

Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι η μετάβαση της ροής του ρευστού από στρωτή σε τυρβώδη δεν γίνεται αμέσως άλλα μεσολαβεί κάποιο ενδιάμεσο τμήμα ροής όπου ονομάζεται μεταβατική ροή. Η εμφάνιση του φαινομένου αυτού γίνεται για αριθμό Reynolds  $2000 < Re < 4000$ .

Ο προσδιορισμός του είδους της ροή γίνεται με αριθμό Reynolds:

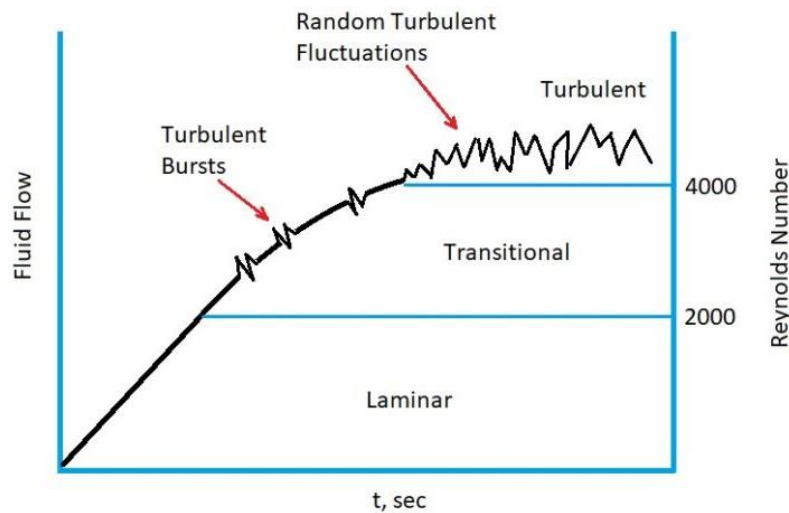
$$Re = \frac{\rho_f * u * d}{\mu}$$

$\rho_f$ : πυκνότητα ρευστού

$u$ : ταχύτητα του ρευστού

$d$ : διάμετρος του αγωγού

μ: ιξώδες του ρευστού



Διάγραμμα 2.1 Δείχνει την περιοχή μετάβασης από στρωτή σε τυρβώδη ροή για ένα ρευστό (Amirault, 2020)

Άρα από το τύπο του Reynolds αυτά που μεταβάλλουν τη μορφή της ροής είναι τα εξής:

1. Η πυκνότητα του ρευστού
2. Η υδραυλική διάμετρος
3. Η ταχύτητα της ροής
4. Το ιξώδες του ρευστού

Ο τύπος της ροής επηρεάζει το προφίλ της ταχύτητας ενός ρευστού μέσα σε ένα αγωγό. Σε στρωτή ροή το προφίλ ταχύτητας ενός ρευστού είναι παραβολικό και στο κέντρο κινείται με υψηλότερη ταχύτητα 2 φορές τη μέση ταχύτητα του ρευστού ενώ κοντά στο τοίχωμα του σωλήνα κινείται με πολύ μικρότερες ταχύτητες (βλ. Εικόνα 2.4 παρακάτω). Όσο μικραίνει ο αριθμός Reynolds, όταν το ρευστό έχει στρωτή ροή, η παραβολή του προφίλ της ταχύτητας μεγαλώνει και η ταχύτητα κοντά στα τοιχώματα τείνει στο μηδέν. Σε τυρβώδη ροή, το προφίλ ταχύτητας είναι «πλήρως αναπτυγμένο», δηλαδή η ροή κινείται κυρίως με την ίδια ταχύτητα εκτός από μια μικρή περιοχή κοντά στο τοίχωμα του σωλήνα. (βλ. Εικόνα 2.4 παρακάτω).



Εικόνα 2.4 Το προφίλ της ταχύτητας ανάλογα με τον τύπο της ροής (Titan, 2020)

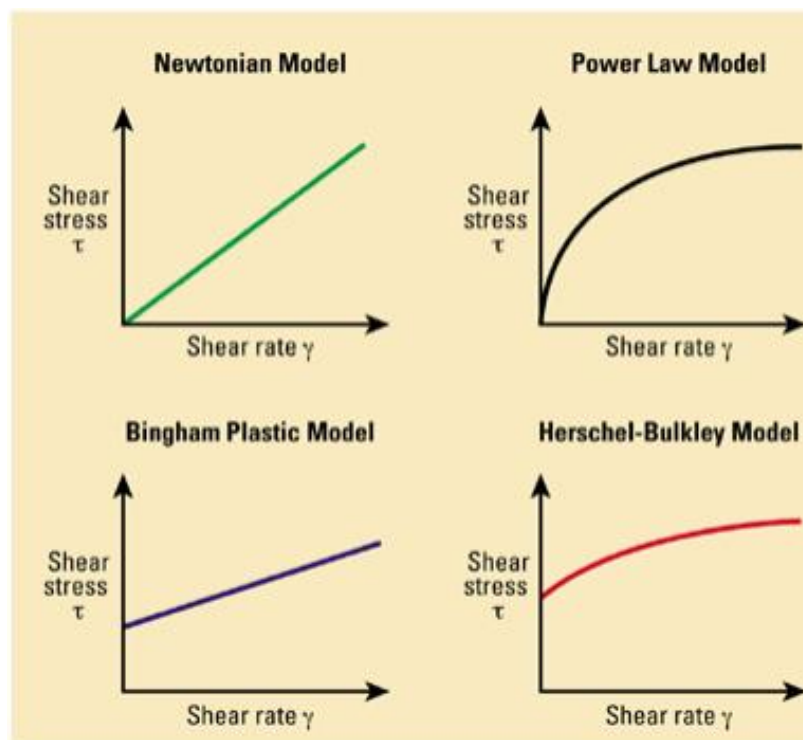
Για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών του ρευστού και την συμπεριφορά της ροής έχουν διατυπωθεί διάφορες κατηγορίες ρευστών. Οι κατηγορίες ρευστών είναι:

1. Νευτώνεια ή Νευτωνικά ρευστά (Newtonian)
2. Μη Νευτώνεια ή Μη Νευτωνικά ρευστά (Non – Newtonian)

Τα μη Νευτώνεια διαιρούνται σε υποκατηγορίες, όπως:

1. Τα πλαστικά μοντέλα (Bingham Plastics Model)
2. Τα εκθετικού νόμου (Power – Law Model)
3. Τα εκθετικού νόμου με τάση διολίσθησης (Herschel – Bulkley Model).

Οι διάφορες συμπεριφορές του ρευστού απεικονίζονται σε μοντέλο ροής σε διαγράμματα καμπύλης και συγκεκριμένα σε διάγραμμα βαθμίδας ταχύτητας (shear rate – περιστροφής ιξωδομέτρου rpm ) με διατμητική τάση (shear stress) και σε διαγράμματα πίεσης ροής με ρυθμό ροής. (Αθανασάκης, 2019)



Διαγράμματα 2.2 Ιδανικές καμπύλες στην επιστήμη των ρευστών γεώτρησης (Dahlem, 2013)

## 2.4.2 Κατηγορίες ρευστών

### 2.4.2.1 Νευτώνεια ή Νευτωνικά ρευστά

Στα Νευτωνικά ρευστά ή η διατμητική τάση είναι ανάλογη του ρυθμού διάτμησης. Είναι η πιο απλή συμπεριφορά των ρευστών όπως δείχνει και το διάγραμμα 2.3 στο σημείο Α, που ξεκινάει από την αρχή των αξόνων και κινείται διαγώνια αναλογικά. Για τα περισσότερα ρευστά όπως ο αέρας και το νερό ισχύουν αυτές οι ιδιότητες.

### 2.4.2.2 Μη Νευτώνεια ή Μη Νευτωνικά ρευστά

Είναι τα ρευστά που το ιξώδες μεταβάλλεται με το ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας και αυτή παύει να είναι γραμμική. Για αυτό το λόγο το ιξώδες σε ένα μη νευτώνειο ορίζεται με το φαινομενικό ιξώδες. Τα μη Νευτώνεια μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

1. Στα ρευστά που το ιξώδες μεταβάλλεται με την διατμητική τάση ή το ρυθμό διάτμησης. Αυτά τα ρευστά είναι τα:
  - i. Ψευδοπλαστικά ρευστά (Pseudoplastic)
  - ii. Διαστελόμενα ή διογκούμενα ρευστά (dilatant)
  - iii. Τα πλαστικά (Bingham Plastics)
2. Στα ρευστά που το ιξώδες μεταβάλλεται με το χρόνο όταν η διατμητική τάση εφαρμόζεται επάνω τους. Αυτά τα ρευστά είναι:
  - i. Τα θιξοτροπικά ρευστά (Thixotropic)
  - ii. Τα ρεοπηκτικά ρευστά (Rheoplectic)

#### 2.4.2.2.1 Ψευδοπλαστικά ρευστά (Pseudoplastic)

Στα ρευστά αυτά έχουμε μείωση στο φαινομενικό ιξώδες με την αύξηση της ταχύτητας διάτμησης και έτσι γίνονται πιο λεπτόρρευστα. Εδώ παρατηρούμε από την καμπύλη Β ότι αποτελείται από 3 μέρη. Στα δυο μέρη συμπεριφέρονται σαν Newtonian, στην αρχή των αξόνων που έχουμε πολύ μικρούς ρυθμούς διάτμησης και στους πολύ μεγάλους. Στο τρίτο μέρος είναι ανάμεσα στα δυο μέρη και στρέφει τα κοίλα προς τα κάτω και έτσι μειώνεται το ιξώδες όσο αυξάνεται ο ρυθμός διάτμησης. Παραδείγματα ρευστών είναι τα γαλακτώματα, τα κολλοειδή, οι χυμοί φρούτων, οι φυσικές κόλλες. (Αυλωνίτης & Αυλωνίτης, 2006)

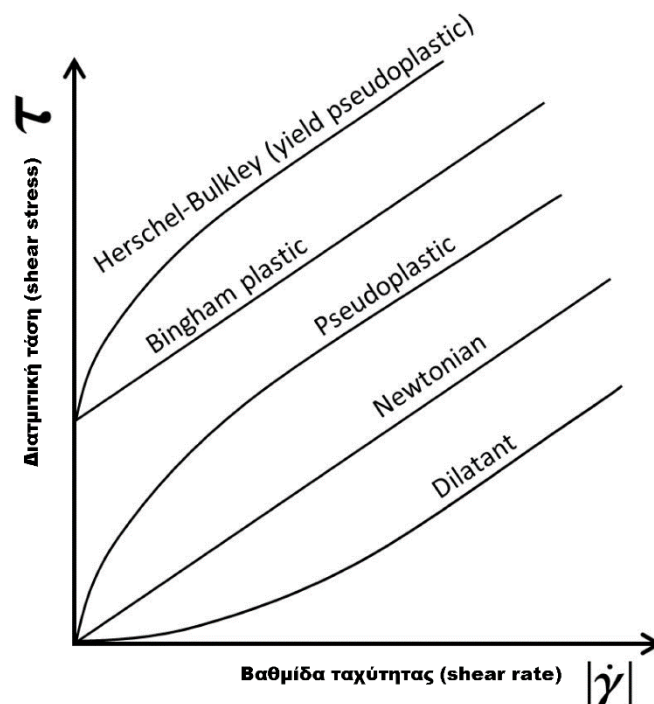


#### 2.4.2.2.2 Διαστελόμενα ή διογκούμενα ρευστά (dilatant)

Στα ρευστά αυτά έχουμε αύξηση του φαινομενικού ιξώδους με την αύξηση της διατρητικής τάσης ή του ρυθμού διάτμησης και έτσι γίνονται πιο παχύρρευστα. Εδώ παρατηρούμε από την καμπύλη Δ σε πολύ χαμηλούς ρυθμούς διάτμησης το ρευστό να είναι πολύ λεπτόρρευστο και έτσι το φαινομενικό ιξώδες να είναι πολύ μικρό. Με την αύξηση του ρυθμού ταχύτητας η καμπύλη στέφει τα κοίλα προς τα πάνω και έτσι γίνεται μεγάλη αύξηση του φαινομενικού ιξώδους μέχρι να φτάσει σε μια γραμμική περίπου συμπεριφορά. Παραδείγματα ρευστών είναι το τσιμεντοσκυρόδεμα και οι αμυλούχες κόλλες. (Αυλωνίτης & Αυλωνίτης, 2006)

#### 2.4.2.2.3 Πλαστικά κατά Bingham (Bingham Plastics)

Αυτά τα συγκεκριμένα ρευστά δεν έχουν ροή όταν η διατμητική τάση είναι μικρότερη κάποιας οριακής τιμής. Από την καμπύλη Γ παρατηρούμε ότι το ρευστό αρχίζει να ρέει και να συμπεριφέρεται σαν τα Νευτώνεια όταν η διατμητική τάση υπερβεί την οριακή τιμή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου ρευστού είναι το διατρητικό ρευστό των γεωτρήσεων και ακολουθεί εκτενέστερη αναφορά πιο κάτω στο μοντέλο του Bingham.



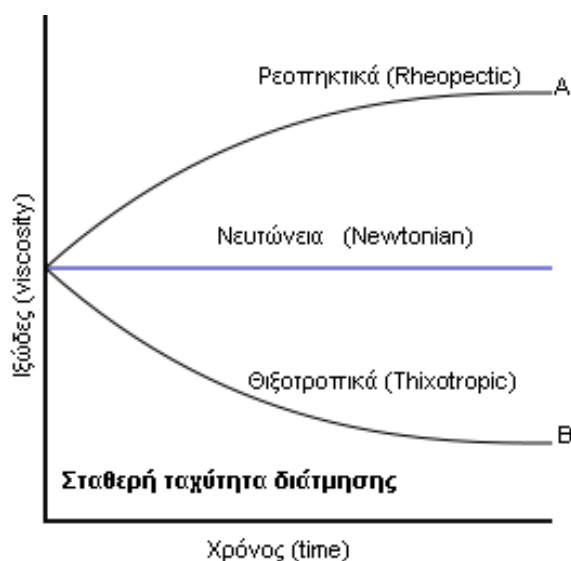
Διάγραμμα 2.3 κατηγορία ρευστών, το πως εξαρτώνται από τη διατμητική τάση

#### 2.4.2.2.4 Θιξοτροπικά ρευστά (Thixotropic)

Τα ρευστά αυτά έχουν μια μείωση του φαινομενικού ιξώδους τους με την αύξηση του χρόνου που ενεργεί η διατμητική τάση, όταν κρατάμε σταθερά την ταχύτητα διάτμησης, τη θερμοκρασία και την πίεση. Αυτά τα ρευστά έχουν εφαρμογή στα χρώματα βαφής. Όσο δεν ασκείται κάποια διατμητική τάση όπως φαίνεται και στο διάγραμμα στη καμπύλη Α έχει μεγάλο ιξώδες έτσι ώστε να μην αποχωρίζεται η χρωστική ουσία του διαλύτη και όσο αυξάνεται ο ρυθμός διάτμησης μειώνεται και το ιξώδες για να μπορεί να απλωθεί η χρωστική ουσία. Μετά, όσο μειώνεται ο ρυθμός διάτμησης αυξάνεται και πάλι για να μένει σταθερό το χρώμα και να μην διαρρέει. (Αυλωνίτης & Αυλωνίτης, 2006) (Kelessidis V., Investigations on the Thixotropy of Bentonite Suspensions, 2008)

#### 2.4.2.2.5 Ρεοπηκτικά ρευστά (Rheopectic)

Τα ρεοπηκτικά ρευστά έχουν αντίθετη ακριβώς συμπεριφορά από τα θιξοτροπικά. Άρα με το χρόνο που ενεργείται η διατμητική τάση έχουμε αύξηση του φαινομένου ιξώδους.. Τη στιγμή που θα αφεθεί ελεύθερο από την διατμητική τάση το φαινομενικό ιξώδες παίρνει την αρχική του τιμή. (Αυλωνίτης & Αυλωνίτης, 2006)



Διάγραμμα 2.4 Μη Νευτώνεια που εξαρτώνται από το χρόνο  
(File:Thixotropic-rheopectic.svg, 2008)

### 2.2.3 Ρεολογικά μοντέλα

#### 2.2.3.1 Νευτώνειο μοντέλο

Η ύπαρξη της εσωτερικής τριβής στα Νευτώνεια ρευστά δηλαδή το δυναμικό ιξώδες (ή ιξώδες) οφείλεται στη μεταβολή της ταχύτητας. Το ιξώδες μπορεί να ορισθεί :

$$\tau = \mu * \frac{du_x(y)}{dy} \leftrightarrow \tau = \mu * \gamma$$

Όπου:  $\tau$  είναι η διατμητική τάση,  $\gamma = \frac{du_x(y)}{dy}$  είναι ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας ή του ρυθμού διάτμησης ή της ταχύτητας στη διεύθυνση του άξονα  $x$  και το  $\mu$  είναι το ιξώδες. Στο S.I οι μονάδες μέτρησης του ιξώδους είναι  $N \cdot s/m^2$  ή  $gr/cm \cdot s$ . Η μονάδα  $gr/cm \cdot s$  είναι poise. Ως συνήθως συμβολίζεται με cP, όπου  $1 \text{ cP} = 0.01 \text{ P}$ .

#### 2.2.3.2 Μοντέλο Πλαστικά κατά Bingham (Bingham Plastics)

Στο μοντέλο αυτό ισχύει:

$$\tau = \mu_p * \dot{\gamma} + \tau_0$$

Εδώ το  $\tau$  για να υπάρχει ροή πρέπει να είναι πιο μεγάλο από το  $\tau_0$ . Θα πρέπει να εφαρμόζεται μια διατμητική τάση που θα υπερβαίνει την τάση διολίσθησης (yield point),  $\tau_0$ . Μετά από αυτή την τιμή τότε το ρευστό αρχίζει να συμπεριφέρεται σαν Νευτώνειο. Το  $\mu_p$  είναι το πλαστικό ιξώδες του υλικού. Οι μονάδες μέτρησης είναι σε cP. (Bingham plastic model, 2021) (Αυλωνίτης & Αυλωνίτης, 2006)

#### 2.2.3.3 Τα εκθετικού νόμου (Power – Law Model)

Το μοντέλο αυτό περιγράφεται από το ρεολογικό μοντέλο δύο παραμέτρων ( $k$ ,  $n$ ), του ψευδοπλαστικού ρευστού του οποίου το ιξώδες μειώνεται καθώς αυξάνεται ο ρυθμός διάτμησης. Τα ρευστά πολυμερούς με βάση το νερό, ειδικά αυτές που κατασκευάζονται με πολυμερές ΧC (xanthan gum) και CMC, ταιριάζουν καλύτερα στη μαθηματική σχέση του Power - Law από το πλαστικό Bingham.

Τα ρευστά Power-Law μπορούν να περιγραφούν μαθηματικά ως εξής:

$$\tau = K * \dot{\gamma}^n$$

Η παράμετρος  $n$  είναι ο δείκτης συμπεριφορά της ροής ( flow – behaviour index ) ή ο εκθέτης power law. Τα ρευστά Power-Law μπορούν να υποδιαιρεθούν σε τρεις διαφορετικούς τύπους ρευστών με βάση την τιμή του δείκτη συμπεριφοράς ροής:

$n$	Τύπος ρευστού
$<1$	Ψευδοπλαστικά
$=1$	Νευτώνειο
$>1$	Διαστελλόμενα

Η δεύτερη παράμετρος για να οριστεί το μοντέλο είναι ο δείκτης συνέφειας της ροής ( $k$ ) και έχει μονάδες μέτρηση στο  $S.I \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$  . Όπως φαίνεται από τις μονάδες μέτρησης της το  $K$  εξαρτάται από την τιμή του  $n$  και όσο πιο μεγάλη τιμή έχει το  $k$  τότε τόσο πιο παχύρευστο είναι. (power-law fluid, 2020) (Αυλωνίτης & Αυλωνίτης, 2006)

#### 2.2.3.4 Τα εκθετικού νόμου με τάση διολίσθησης (Herschel – Bulkley Model).

Είναι ένα μοντέλο ρευστού που περιγράφεται από ένα ρεολογικό μοντέλο τριών παραμέτρων. Ένα ρευστό Herschel-Bulkley μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά ως εξής:

$$\tau = \tau_0 + K * \dot{\gamma}^n$$

όπου

$\tau$  =διατμητική τάση

$\tau_0$  =τάση διολίσθησης (yield point),

$K$  = δείκτης συνέφειας ( consistency index)

$\dot{\gamma}$  = ρυθμού διάτμησης

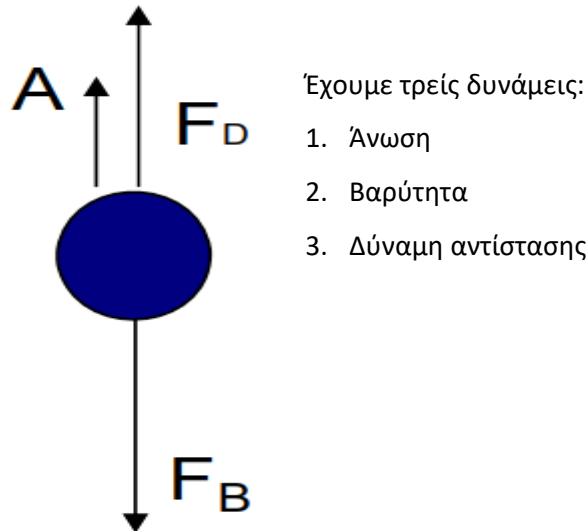
$n$  = δείκτης συμπεριφορά της ροής (flow – behaviour index)

Το μοντέλο αυτό είναι συνδυασμός του μοντέλου του Bingham Plastics και Power-Law. Στην αρχή θα πρέπει να εφαρμόζεται μια διατμητική τάση που θα υπερβαίνει την τάση διολίσθησης  $\tau_0$ (yield point). Μετά από αυτή την τιμή το ρευστό αρχίζει να συμπεριφέρεται ακριβώς σαν το μοντέλο Power-Law και ορίζονται οι άλλες δυο παράμετροι, που είναι ο δείκτης συνέφειας  $K$  ( consistency

index) και ο δείκτης συμπεριφορά της ροής  $n$ . (Herschel-Bulkley fluid, 2020) (Αυλωνίτης & Αυλωνίτης, 2006)

## 2.5 Ταχύτητα καθίζησης Στερεού Σωματιδίων σε κατακόρυφη γεώτρηση

### 2.5.1 Κάθετες Γεωτρήσεις



Εικόνα 2.5 Δυνάμεις αντίστασης που δέχεται το θραύσμα σε κάθετο φρεάτιο. (Χ.ΚΕΛΕΣΙΔΗΣ, Εργαστηριακές σημειώσεις - Κίνηση στερεών μέσα σε Ρευστά. Οριακή ταχύτητα καθόδου σφαιρικού στερεού μέσα σε Νευτώνειο Ρευστό, 2009)

Βαρύτητα ορίζεται η δύναμη που έλκει κάθε σωματίδιο προς τα κάτω.

$$\text{Δηλαδή } B = m_p * g = \rho_p * V_p * g = \rho_p * \frac{\pi * d_p^3}{6} * g \quad (1)$$

Όπου,  $g$ = επιτάχυνση της βαρύτητας ( $m/s^2$ ) ,  $m_p$  = μάζα σωματιδίου (kg) ,  $\rho_p$  = πυκνότητα σωματιδίου ( $kg/m^3$ ) ,  $V_p$ = όγκος σωματιδίου ( $m^3$ ) ,  $d_p$  = διάμετρος σωματιδίου (m)

Άνωση είναι η δύναμη που δέχεται ένα σώμα από το ρευστό μέσα στο οποίο βρίσκεται. Η άνωση έχει κοινή διεύθυνση με το βάρος του σώματος, και αντίθετη φορά. Η άνωση αναφέρεται σε συστήματα που βρίσκονται σε ηρεμία.

$$\text{Δηλαδή } A = \rho_f * V_p * g = \rho_f * \frac{\pi * d_p^3}{6} * g \quad (2)$$

Όπου το  $\rho_f$  = πυκνότητα ρευστού ( $kg/m^3$ )

Δύναμη Αντίστασης ή Δύναμη οπισθέλκουσας είναι η δύναμη που ασκείται από το ρευστό στο στερεό και είναι στην ίδια κατεύθυνση με την ροή του ρευστού ( άρα αντίθετα από την κατεύθυνση του βάρους).

Την στιγμή που εξισορροπούνται οι δυνάμεις που επενεργούν στο σώμα ισχύει

$$(1-2) \Sigma F = 0 \leftrightarrow B - (F_d + A) \leftrightarrow F_d = B - A = \rho_p * \frac{\pi * d_p^3}{6} * g - \rho_f * \frac{\pi * d_p^3}{6} * g =$$

$$(\rho_p - \rho_f) * \frac{\pi * d_p^3}{6} * g \quad (3)$$

ο συντελεστής αντίστασης ή συντελεστής οπισθέλκουσας  $C_D$ , ορίζεται  $C_D = \frac{F_d / A_p}{\rho_f * u_y^2 / 2} \quad (4)$

όπου το  $A_p$  = είναι το εμβαδόν της προβολής του στερεού σώματος σε επίπεδο κάθετο προς την διεύθυνση της ροής.

$$A_p = \frac{\pi d_p^2}{4} \quad (5)$$

$$(4-5) \text{ Άρα } C_D = \frac{(\rho_p - \rho_f) * \frac{\pi * d_p^3}{6} * g}{\rho_f * u_y^2 / 2} \leftrightarrow C_D = \frac{4 * g * d_p * \Delta \rho}{3 * \rho_f * u_y^2} \quad (6)$$

Άρα η ταχύτητα ελεύθερης καθίζησης σε ένα σφαιρικό σωματίδιο διαμέτρου  $d$  και πυκνότητας  $\rho_p$ , αφεθεί ελεύθερο μέσα σε ένα ρευστό, πυκνότητας  $\rho_f$  και ιξώδους  $\mu$ , να καθιζάνει, μετά από ένα χρονικό διάστημα θα αποκτήσει μια οριακή ταχύτητα καθίζησης

$$u_y = \sqrt{\frac{4 * (\rho_p - \rho_f) * g * d_p}{3 * \rho_f * C_D}} \quad (7)$$

όπου  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $C_D$  ο συντελεστής οπισθέλκουσας που είναι ανάλογος με την τιμή του αριθμού Reynolds :

$$Re = \frac{u_y * d_p * \rho_f}{\mu} \quad (8)$$

Μπορούν να διακριθούν τρεις περιοχές καθίζησης σε κάθε μία από τις οποίες ισχύει μια εμπειρική έκφραση του συντελεστή οπισθέλκουσας, ανάλογα με το είδος της ροής του ρευστού, όπως φαίνεται

1. Όταν ο  $Re < 1$  και έχουμε Στρωτή Ροή τότε Stokes ή Creeping Flow (Έρπουσα Ροή)

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (9)$$

2. Όταν  $1 < Re < 1000 \leftrightarrow$  Μεταβατική περιοχή (Transitional flow)

$$C_D = \frac{18.5}{Re^{0.625}} \quad (10)$$

3. Όταν  $1000 < Re < 2 \times 10^5 \leftrightarrow$  Τυρβώδης Περιοχή (Turbulent flow)

$$\text{Έχουμε } C_D = 0.44 \quad (11)$$

### 2.5.2 Stokes' law

Όταν έχουμε στρωτή ροή, δηλαδή πολύ μικρούς αριθμούς Reynolds, η δύναμη αντίστασης που ονομάζεται και επίσης δύναμη της Οπισθέλκουσας που ασκείται σε σφαιρικά αντικείμενα σε ένα ιξώδες ρευστό, μπορεί να μελετηθεί με το Νόμο του Stokes ή Creeping Flow (Έρπουσα Ροή), με (Stokes' law, 2020)

Η δύναμη της οπισθέλκουσας σε μια μικρή σφαίρα που κινείται μέσω ενός ιξώδους ρευστού δίνεται από:  $F_d = 3 * \pi * \mu * d_p * u_y$  (12)

Αφού για  $Re < 1$ , τότε (εξίσωση 9)  $C_D = \frac{24}{Re} \leftrightarrow$

$$\text{Εξίσωση (9,8)} \quad C_D = \frac{24 * \mu}{u_y * d_p * \rho_f} \quad (13)$$

$$\text{Εξίσωση (4)} \quad C_D = \frac{F_d / A_p}{\rho_f * u_y^2 / 2} \leftrightarrow F_d = \frac{\rho_f * u_y^2 * A_p * C_D}{2} \leftrightarrow F_d = \frac{\rho_f * u_y^2 * \pi * d_p^2 * C_D}{8} \quad (14)$$

$$(13,14) \leftrightarrow F_d = \frac{\rho_f * u_y^2 * \pi * d_p^2 * 24 * \mu}{8 * u_y * d_p * \rho_f}$$

Άρα αποδεικνύεται η εξίσωση (12)  $F_d = 3 * \pi * \mu * d_p * u_y$

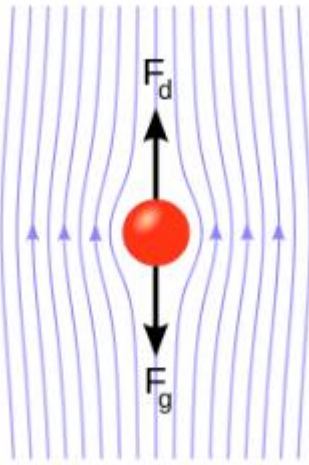
όπου:

- $F_d$ : είναι η δύναμη οπισθέλκουσας - γνωστή ως δύναμη τριβής του Stokes- που ενεργεί στη διεπιφάνεια μεταξύ του ρευστού και του σωματιδίου
- $\mu$ : είναι το ιξώδες (ορισμένοι συγγραφείς χρησιμοποιούν το σύμβολο  $\eta$ )
- $d_p$ : είναι η διάμετρος του σφαιρικού στερεού
- $u_y$ : είναι η ταχύτητα καθίζησης της ροής σε σχέση με το αντικείμενο.

Σε μονάδες S.I,  $F_d$  δίδεται σε newton ( $= \text{kg m s}^{-2}$ ),  $\mu$  σε  $\text{Pa*s}$  ( $= \text{kg}^{-1} \text{s}^{-1}$ ),  $d_p$  σε μέτρα και  $u_y$  σε m/s.

#### Παρατηρήσεις:

- Εδώ μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε ότι η δύναμη οπισθέλκουσας αυξάνεται με την αύξηση του ιξώδους, την διάμετρο του σωματιδίου και την ταχύτητα με την οποία κινείται.



Η ροή του ρεύματος περνάει από μια σφαίρα που πέφτει σε ένα ρευστό με δύναμη  $F_d$  και τη πραγματική βαρύτητα  $F_g$ .

Εικόνα 2.6 Ροή Stokes law από σφαίρα πτώσης σε ρευστό γραμμές ροής, μεταφορά δύναμης  $F_d$  και δύναμη από τη βαρύτητα  $F_g$ . (Stokes' law, 2020)

Στην ταχύτητα καθίζησης, η δύναμη  $F_g$  λόγω της διαφοράς μεταξύ του βάρους και της πλευστότητας – άνωσης (ικανότητα να επιπλέει) της σφαίρας δίνεται από την εξίσωση 3

$$F_g = (\rho_p - \rho_f) * \frac{\pi * d_p^3}{6} * g$$

όπου

$\rho_p$ : η πυκνότητα της σφαίρας

$\rho_f$ : η πυκνότητα του ρευστού

$g$ : η επιτάχυνση της βαρύτητας

$d_p$ : η διάμετρος του σωματιδίου

Απαιτώντας την ισορροπία δυνάμεων  $F_d = F_g$  και επιλύοντας ως προς την ταχύτητα  $u$  δίνει την ταχύτητα

Όταν  $Re < 1 \leftrightarrow$  Εξίσωση Stokes (12)

$$(12,3) \leftrightarrow u_y = \frac{(\rho_p - \rho_f) * \frac{\pi * d_p^3}{6} * g}{3 * \pi * \mu * d_p} \leftrightarrow u_y = \frac{(\rho_p - \rho_f) * d_p^2 * g}{18 * \mu} \quad (15)$$

ή



$$(13) C_D = \frac{24 \cdot \mu}{u_y \cdot d_p \cdot \rho_f} \quad (6) C_D = \frac{4 \cdot g \cdot d_p \cdot \Delta \rho}{3 \cdot \rho_f \cdot u_y^2}$$

$$(13, 6) \leftrightarrow \frac{24 \cdot \mu}{u_y \cdot d_p \cdot \rho_f} = \frac{4 \cdot g \cdot d_p \cdot \Delta \rho}{3 \cdot \rho_f \cdot u_y^2} \leftrightarrow 3 \cdot u_y^2 \cdot \rho_f \cdot 24 \cdot \mu = u_y \cdot d_p^2 \cdot \rho_f \cdot 4 \cdot g \cdot \Delta \rho \leftrightarrow u_y =$$

$$\frac{\rho_f \cdot 4 \cdot g \cdot d_p^2 \cdot \Delta \rho}{3 \cdot \rho_f \cdot 24 \cdot \mu} \leftrightarrow u_y = \frac{g \cdot d_p^2 \cdot \Delta \rho}{18 \cdot \mu} \quad (15)$$

(κάθετα προς τα κάτω εάν  $\rho_p > \rho_f$ , προς τα πάνω εάν  $\rho_p < \rho_f$ ), όπου:

- $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $m / s^2$ )
- $d_p$  είναι η διάμετρος του σφαιρικού σωματιδίου (m)
- $\rho_p$  είναι η πυκνότητα μάζας των σωματιδίων ( $kg / m^3$ )
- $\rho_f$  είναι η πυκνότητα μάζας του ρευστού ( $kg / m^3$ )
- $\mu$  είναι το δυναμικό ιξώδες ( $kg / (m \cdot s)$ ).

Άρα για παράδειγμα έχω μια σφαίρα  $\rho_p = 2600 \text{ kg/m}^3$  με  $d_p = 0.01 \text{ m}$ , πυκνότητα  $\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$  και  $\mu = 1 \text{ cP}$

$$(15) u_y = \frac{(2600 - 1000) \cdot 0.01^2 \cdot 9.81}{18 \cdot 10^{-3}} = \frac{1.5696}{0.018} = 87.2 \text{ m/s}$$

Επιβεβαίωση αν είναι στρωτή με Reynolds

$$(8) Re = \frac{u_y \cdot d_p \cdot \rho_f}{\mu} = \frac{87.2 \cdot 0.01 \cdot 1000}{0.001} = 872000 \text{ άρα δεν ήταν στρωτή αλλά τυρβώδης}$$

**Re > 1000  $\leftrightarrow$  Τυρβώδης περιοχή ( Turbulent flow)**

$$C_D = 0.44 \quad (11)$$

$$(7,11) u_y = \sqrt{\frac{4 \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g \cdot d_p}{3 \cdot \rho_f \cdot C_D}} = \sqrt{\frac{4 \cdot (\rho_p - \rho_f) \cdot g \cdot d_p}{3 \cdot \rho_f \cdot 0.44}} = 1.74 \cdot \sqrt{\frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot g \cdot d_p}{\rho_f}} \quad (16)$$

$$1.74 \cdot \sqrt{\frac{(2600 - 1000) \cdot 9.81 \cdot 0.01}{1000}} = 0.689 \text{ m/s}$$

Επιβεβαίωση αν είναι τυρβώδη ροή με τον αριθμό Reynolds:

$$(8) Re = \frac{u_y \cdot d_p \cdot \rho_f}{\mu} = \frac{0.689 \cdot 0.01 \cdot 1000}{0.001} = 6893.563 \text{ άρα τυρβώδης}$$

Όταν  $1 < Re < 1000 \leftrightarrow$  Μεταβατική περιοχή (Transitional flow)

$$(10,8) C_D = \frac{18.5}{\left(\frac{u_y * d_p * \rho_f}{\mu}\right)^{0.625}}$$

$$(6) C_D = \frac{4 * g * d_p * \Delta \rho}{3 * \rho_f * u_y^2}$$

$$(10,8,6) \leftrightarrow \frac{4 * g * d_p * \Delta \rho}{3 * \rho_f * u_y^2} = \frac{18.5}{\left(\frac{u_y * d_p * \rho_f}{\mu}\right)^{0.625}} \leftrightarrow 18.5 * 3 * \rho_f * u^2 = \left(\frac{u_y * d_p * \rho_f}{\mu}\right)^{0.625} * 4 * g * d_p *$$

$$\Delta \rho \leftrightarrow 18.5 * 3 * \rho_f * u_y^2 * \mu^{0.625} = u_y^{0.625} * d_p^{0.625} * \rho_f^{0.625} * 4 * g * d_p * \Delta \rho \leftrightarrow$$

$$u_y^{1.375} = \frac{d_p^{0.625} * \rho_f^{0.625} * 4 * g * d_p * \Delta \rho}{18.5 * 3 * \rho_f * \mu^{0.625}} \leftrightarrow u_y = \frac{0.148 * d_p^{1.182} * (g * \Delta \rho)^{0.727}}{\rho_f^{0.273} * \mu^{0.455}} \quad (17)$$

## 2.5.3 Οριακή ταχύτητα καθίζησης των στερεών σωματιδίων – Άλλες προσεγγίσεις

### 2.5.3.1 Για Νευτώνεια Ρευστά

Οι βασικές παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν είναι: ( Χ.ΚΕΛΕΣΙΔΗΣ, Εργαστηριακές σημειώσεις - Κίνηση στερεών μέσα σε Ρευστά. Οριακή ταχύτητα καθόδου σφαιρικού στερεού μέσα σε Νευτώνειο Ρευστό, 2009)

$C_D$  : ο συντελεστής αντίστασης

$g$  : η επιτάχυνση βαρύτητας

$d_p$ : η διάμετρος στερεού

$\Delta\rho$ : η διαφορά πυκνότητας στερεού – ρευστού

$\rho_p$ : η πυκνότητα στερεού

$\rho_f$ : η πυκνότητα ρευστού

$u_y$ : η οριακή ταχύτητα καθίζησης στερεού

$Re$ : ο αριθμός Reynolds βασισμένος στην διάμετρο στερεού

$\mu$ : το ιξώδες ρευστού

Καταρχάς βάζω ένα  $u_0$  αρχικό και μετά βρίσκω αριθμό Reynolds από την εξίσωση (8)

$$Re = \frac{u_y * d_p * \rho_f}{\mu}$$

Οι διάφοροι ερευνητές προτείνουν για τους υπολογισμούς στα Νευτώνεια ρευστά:

#### 1. FELICE (1999)

$$C_D = 0.63 + \frac{4.8}{Re^{0.5}} \quad \text{για } Re \in \infty$$

#### 2. CHEREMISINOF & GUPTA ( 1983)

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad \text{για } Re < 3$$

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{1/3}} \quad \text{για } 3 < Re < 500$$

$$C_D = 0.44 \quad \text{για } Re > 500$$

### 3. DORON ET.AL.(1987)

$$C_D = 18.5 * Re^{-0.6} \quad \text{για } 0.1 < Re < 500$$

$$C_D = 0.44 \quad \text{για } 500 < Re < 2 * 10^5$$

### 4. KELESSIDIS & BANDELIS (2004)

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.1407 * Re^{0.6018}) + \frac{0.2118}{1 + 0.4215/Re} \quad \text{για } 0.1 < Re < 10^3$$

Από το  $C_d$  βρίσκω το  $U_1$  και συνεχίζω με επαναληπτική μέθοδο μέχρι το  $U$  να μην μεταβάλλεται

Παράδειγμα των πιο πάνω προσεγγίσεων:

Θεωρούμε πτώση σφαιρίδιου με πυκνότητα  $\rho_p = 2600 \text{ (kg/m}^3\text{)}$  και διάμετρο  $d_p = 0.01 \text{ m}$  ρε  
ρευστό  $\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3$  και  $\mu = 0.001 \text{ kg/m.s}$

$u_{stock} \text{ (m/s) (15)}$	87.2	
Re (8)	872000	Τυρβώδης
$u_y \text{ (m/s) (16)}$	<b>0.689</b>	
Re (8)	6893.563	Τυρβώδης

Πίνακα 2.1 Εύρεση αποτελεσμάτων από τους τύπους στο κεφάλαιο 2.5.2 - Τα νούμερα μέσα στις παρένθεσης είναι ο αριθμός της εξίσωσης που χρησιμοποιήθηκε

Σφαίρα							
$u_y \text{ (m/s)}$	0.690	$u_y \text{ (m/s)}$	0.690	$u_y \text{ (m/s)}$	0.825	$u_y \text{ (m/s)}$	0.549
Re	6896.639	Re	6896.639	Re	8245.395473	Re	5488.281
1. $C_D$ Cheremisinoff	0.44	2. $C_D$ Doron Et Al	0.44	3. $C_D$ Kelessidis	0.308	4. $C_D$ Felice	0.695
$u_y \text{ (m/s)}$	<b>0.690</b>	$u_y \text{ (m/s)}$	<b>0.690</b>	$u_y \text{ (m/s)}$	<b>0.825</b>	$u_y \text{ (m/s)}$	<b>0.549</b>

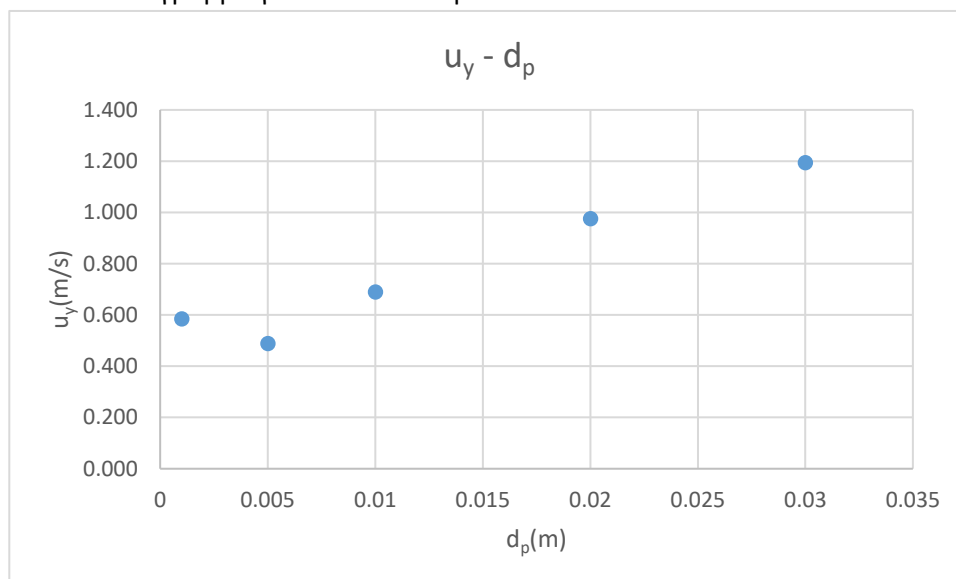
Πίνακας 2.2 Ενδεικτικοί υπολογισμοί ταχύτητα καθίζησης από της εξισώσεις των ερευνητών

Επανάληψη διαδικασίας για διερεύνηση το πως επιδρά η διάμετρο του σωματιδίου στη ταχύτητα του και στο είδος της ροής.

Επίδραση Μεγέθους						
$d_p \text{ (m)}$	$U_{stock} \text{ (m/s) (15)}$	Re(8)	Είδος	$u_y \text{ (m/s) (16)}$	Re	Είδος
0.001	0.872	872	Στρωτή	0.584	584.252	Στρωτή
0.005	21.8	109000	Τυρβώδη	0.487	2437.243	Τυρβώδη
0.01	87.2	872000	Τυρβώδη	0.689	6893.563	Τυρβώδη
0.02	348.8	6976000	Τυρβώδη	0.975	19497.940	Τυρβώδη
0.03	784.8	23544000	Τυρβώδη	1.194	35820.004	Τυρβώδη

Πίνακας 2.3 Επίδραση μεγέθους για την ταχύτητα καθίζησης και το είδος της ροής – Τα αποτελέσματα βρέθηκαν με τους τύπους στο κεφάλαιο 2.5.2. Τα νούμερα μέσα στις παρένθεσης είναι ο αριθμός της εξίσωσης που χρησιμοποιήθηκε

Ενδεικτικό διάγραμμα για τα αποτελέσματα του πίνακα 2.3:



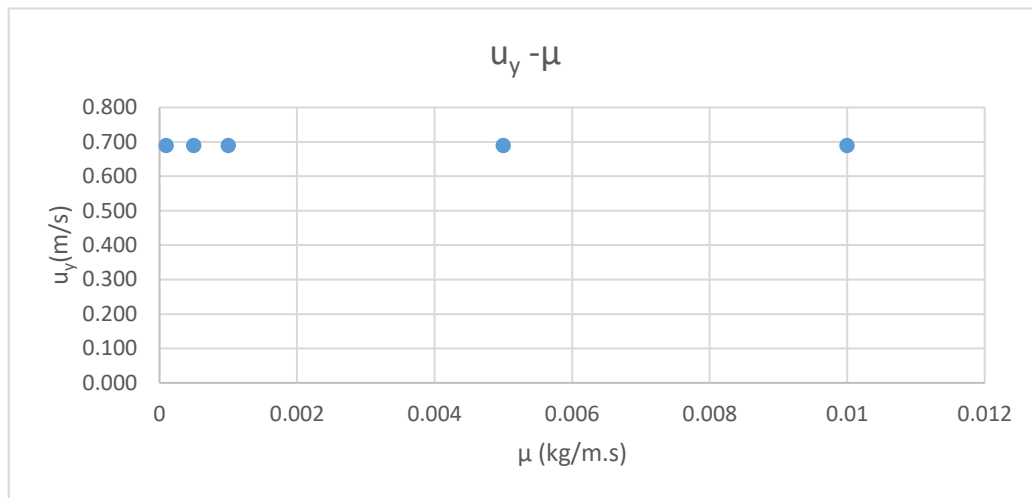
Διάγραμμα 2.5 Σχέση Ταχύτητας με Διάμετρο Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της διαμέτρου έχουμε αύξηση της ταχύτητας ροής για την μετακίνηση των Cuttings. Βέβαια λόγω ροής όμως στην αρχή που έχουμε Στρωτή ροή έχουμε μια μείωση κατά την μετάβαση σε τυρβώδη ροή.

Επανάληψη διαδικασίας για διερεύνηση το πως επιδρά το ιξώδες του ρευστού στη ταχύτητα του σωματιδίου και στο είδος της ροής.

Επίδραση ιξώδες						
$\mu$ (kg/m.s)	$u_{stock}$ (m/s)(15)	Re (8)	Είδος	$u_y$ (m/s) (16)	Re (8)	Είδος
0.0001	872	87200000	Τυρβώδη	0.689	6.894	Τυρβώδη
5.00E-04	174.4	3488000	Τυρβώδη	0.689	34.468	Τυρβώδη
0.001	87.2	872000	Τυρβώδη	0.689	68.936	Τυρβώδη
5.00E-03	17.44	34880	Τυρβώδη	0.689	344.678	Τυρβώδη
0.01	8.72	8720	Τυρβώδη	0.689	689.356	Τυρβώδη

Πίνακας 2.4 Επίδραση ιξώδες για την ταχύτητα καθίζησης και το είδος της ροής - Τα αποτελέσματα βρέθηκαν με τους τύπους στο κεφάλαιο 2.5.2. Τα νούμερα μέσα στις παρένθεσης είναι ο αριθμός της εξίσωσης που χρησιμοποιήθηκε

Ενδεικτικό διάγραμμα για τα αποτελέσματα του πίνακα 2.4:



Διάγραμμα 2.6 Σχέσης Ταχύτητας με ιξώδες, εδώ παρατηρούμε ότι δεν επηρεάζεται η ταχύτητα από το ιξώδες σε τυρβώδη ροή.

#### 2.5.3.2 Μη Νευτώνεια ρευστά

Η δύναμη οπισθέλκουσας στη ροή γύρω από λείες σφαίρες, κυλίνδρους ή δίσκους δίνεται όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω από την εξίσωση (4,5)

$$F_d = \frac{1}{2} * C_D * \rho_f * u_\gamma * A_p$$

$$A_p = \frac{\pi * d_p^2}{4}$$

Η περιγραφή της συμπεριφοράς μοντέλων για μη Νευτώνεια ρευστά αντιπροσωπεύεται από την εξίσωση power law (εξίσωση Ostwald-de Waele). Μπορεί να προέλθει από την εξίσωση της γραπτής κίνησης για μη-Νεύτωνα ρευστά καθώς το  $C_D$  είναι συνάρτηση τόσο του  $Re_n$  όσο και του  $n$ . (Ceylan, Herdem, & Abbasov, 1999)

$$C_D = 24 * X_n / Re_n \quad (18)$$

όπου

$X_n$  είναι ένας διορθωτικός συντελεστής οπισθέλκουσας ως συνάρτηση του  $n$  έτσι ώστε  $X_n(n) = X_n$  και  $X_n(1) = 1$

$Re_n$  είναι ο τροποποιημένος αριθμός Reynolds που ορίζεται ως

$$Re_n = \rho_f * \frac{d_p^n * u_\gamma^{2-n}}{K} \quad (19)$$

$K$ : είναι ο δείκτης συνέπειας ( consistency index)

Για την λύση του  $X_n$  όπου η τιμή του  $Re_n < 1$  και το  $|n-1| < 1$  δίνονται οι σχέσεις:

1. Kawase and Ulbreth (1985)

$$X_n = 3^{1.5(n-1)} \frac{2+29n-22n^2}{n*(2n+1)*(n+2)} \quad (20)$$

2. Leonov and Isaev (1989)

$$X_n = 3^{n-1} \quad (21)$$

3. Moshev (1989)

$$X_n = (0.832)^{(n-1)/2} \quad (22)$$

Για την λύση του συντελεστή οπισθέλκουσας  $C_D$  για εύρος  $10^{-3} \leq Re_n \leq 10^3$

$$C_D = ((24 * X_n) / Re_n) + (f_2(n) / Re_n^{f_3(n)}) \quad (23)$$

όπου,

$X_n$ : είναι ο συντελεστής συσχέτισης της οπισθέλκουσας επιλέγοντας μια από τις εξισώσεις πιο πάνω (20-22)

$$f_2(n) = 10.5 * n - 3.5$$

$$f_3(n) = 0.32 * n + 0.13$$

Μια άλλη μέθοδος με την προϋπόθεση ότι  $Re_n < 1$  που δίνει τη συνισταμένη δύναμη (F) πάνω από την επιφάνεια της σφαίρας μετά από μαθηματικές πράξεις είναι

$$F = 2 * \pi * R^2 * K * \left(\frac{81}{4}\right)^{\frac{n-1}{2}} * \left(\frac{u_y}{R}\right)^n * \frac{(n^2 - n + 3)}{n^{3n}}$$

και ο συντελεστής οπισθέλκουσας από την εξίσωση (4,5)

$$C_D = \frac{2 * F}{\rho_f * u_y^2 * \pi * R^2} = \frac{24}{Re_n} * X_n \quad R: \text{ ακτίνα σωματιδίου}$$

$$\text{και } X_n = 3^{2n-3} * \frac{n^2 - n + 3}{n^{3n}} \quad (24)$$

Καλύτερα αποτελέσματα έχει διαπιστωθεί ότι δίνονται όταν γίνεται χρήση της εξίσωσης (18)

$C_D = 24 * X_n^* / Re_n$ , όπου το  $X_n^*$  είναι ο τροποποιημένος συντελεστής συσχέτισης της οπισθέλκουσας

1.  $X_n^* = X_n$  για  $Re_n < 1 \times 10^{-5}$
2.  $X_n^* = X_n + \frac{1-n^2}{3n+1} * \log(10^3 * Re_n)$  για  $1 * 10^{-5} \leq Re_n < 1 \times 10^{-3}$
3.  $X_n^* = X_n + \frac{f(n)}{24 Re_n^{g(n)}}$  για  $1 * 10^{-3} \leq Re_n < 10^3$

Όπου  $f(n) = 4 n^4$   $g(n) = \frac{(n-3)}{3}$

Το  $X_n$  είναι από την εξίσωση 24

Επίσης ο Κελεσιδής ( Kelessidis V. , 2004) πρότεινε με διάφορες εξισώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ψευδοπλαστικά ρευστά για τον απευθείας υπολογισμό της ταχύτητας καθίζησης .Καταρχάς υπολογίζεται η διάμετρος χωρίς διάσταση  $d_{p*} = d_p \left( \frac{g \Delta \rho}{\rho} \right)^{\frac{2-n}{2+n}} \left( \frac{\rho}{K} \right)^{\frac{2}{2-n}}$

και τη ταχύτητα χωρίς διάσταση  $u_{y*} = \frac{1}{\left( \frac{18}{(d_{p*})^{1+n}} \right)^{\frac{0.824}{n}} + \left( \frac{0.321}{d_{p*}} \right)^{0.412}} 1,214$

Τέλος υπολογίζεται απευθείας η ταχύτητα καθίζησης :

$$u_{y*} = u_y * \left( \frac{\rho^{n+1}}{g^{n*} K * \Delta \rho^n} \right)^{\frac{1}{2+n}}$$



## Κεφάλαιο 3: Πειραματική μελέτη μεταφοράς θραυσμάτων

### 3.1 Πειραματική διάταξη εργαστηρίου Τεχνικής Γεώτρησης και Ρευστομηχανικής

#### 3.1.1 Εισαγωγή



Εικόνα 3.1 Πειραματική διάταξη

Βασικά στοιχεία της πειραματικής διάταξης

1: Δακτυλιοειδή αγωγό

2: Διαφορικό μανόμετρο

3: Παροχόμετρο RHEONIK RHM 30

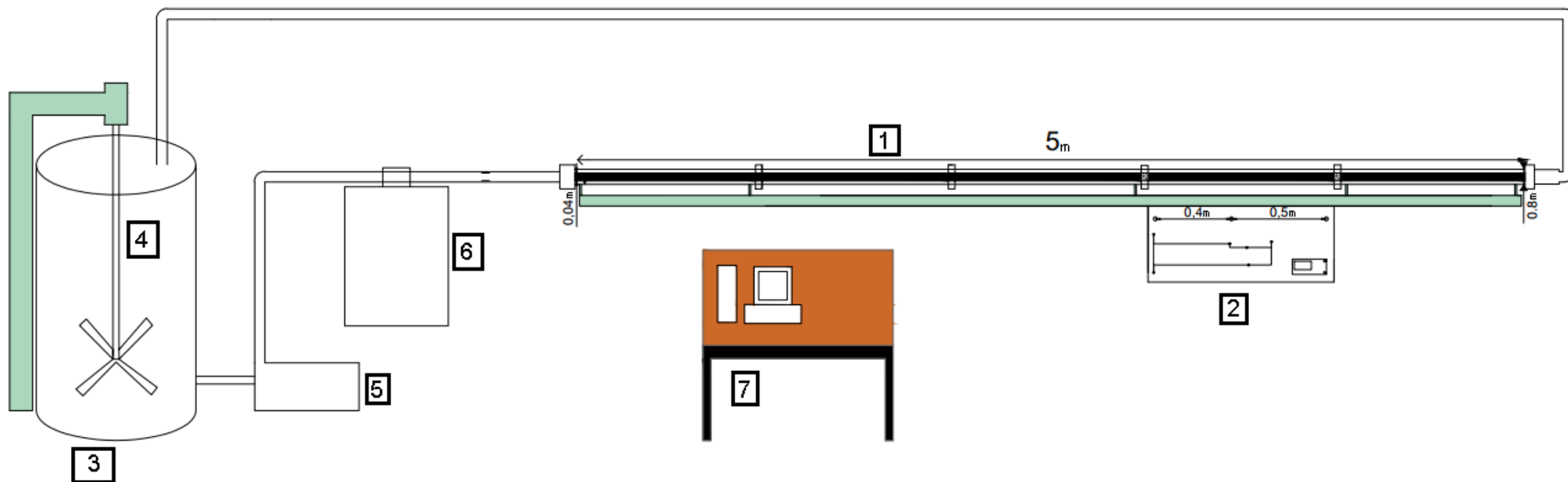
4: Περιοχή μέτρησης πιέσεων

5: Αντλία

6: Δεξαμενή ρευστού

7: Αναδευτήρας

8: Ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου και λειτουργίας συστήματος



Σχήμα 3.2: Βασικά στοιχεία του πειραματικού συστήματος ροής

1-Τμήμα δακτυλίου ,2 – Μετρητικό τμήμα , 3 – Δοχείο επεξεργασίας ρευστού , 4 – Αναδευτήρας ,  
5 – Αντλία , 6 – Παροχόμετρο τύπου Rheonik , 7 – Η/Υ για συλλογή & επεξεργασία δεδομένων

### 3.1.2 Δακτύλιος



Εικόνα 3.3 Δακτύλιος και φλάντζα σύνδεσης τμημάτων δακτυλίου

Το Εργαστήριο Ρευστομηχανικής και Τεχνικής Γεωτρήσεων διαθέτει ένα μοντέλο οριζόντιας γεώτρησης που αποτελείται από δύο σωλήνες διαφορετικής διαμέτρου. Ο εσωτερικός σωλήνας αντιστοιχεί στο διατρητικό σωλήνα σε μία γεώτρηση, ενώ ο εξωτερικός σωλήνας στα τοιχώματα του φρεατίου διαμέσου των οποίων γίνεται η είσοδος των θραυσμάτων σε μια γεώτρηση. Μαζί δημιουργούν το δακτύλιο της γεώτρησης. Η κυκλοφορία του ρευστού έχει την δυνατότητα να κυκλοφορεί μόνο μεταξύ αυτών των δύο σωληνίων δηλαδή στο τμήμα του φρεατίου.

Οι διαστάσεις των σωληνώσεων είναι:

- ➔ Εσωτερικός σωλήνας έχει εξωτερική διάμετρο  $\Phi 40 \text{ mm}$  , εσωτερική  $\Phi 30 \text{ mm}$  και μήκος  $5 \text{ m}$ .
- ➔ Εξωτερικός σωλήνας έχει εσωτερική διάμετρο  $\Phi 70 \text{ mm}$  , εξωτερική  $\Phi 80 \text{ mm}$  και μήκος  $5 \text{ μέτρων}$ . Αποτελούνται από 5 ισομήκη τμήματα του ενός μέτρου συνδεδεμένα μεταξύ τους με φλάντζες για στόχο τη δυνατότητα αντικατάστασης τμημάτων σε περίπτωση βλάβης.
- ➔ Από τα στοιχεία που έχουμε μπορούμε να βρούμε το εμβαδόν της διατομής του δακτυλίου

$$E = \frac{\pi}{4} (d_o^2 - d_i^2) = \frac{\pi}{4} (0,07^2 - 0,04^2) = 2,59 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

Οι σωλήνες έχουν κατασκευαστεί από τμήματα Plexiglas λόγω της διαφάνειας και της μεγάλης αντοχής του υλικού

Η σύνθεση αυτών των δύο σωληνώσεων δημιουργεί ένα ομόκεντρο σύστημα υδραυλικής διαμέτρου

$$d_h = 30 \text{ mm}, \text{ αφού } d_h = \frac{4 * E_{\text{εμβαδό}}}{\text{Περίμετρο}} = d_o - d_i$$

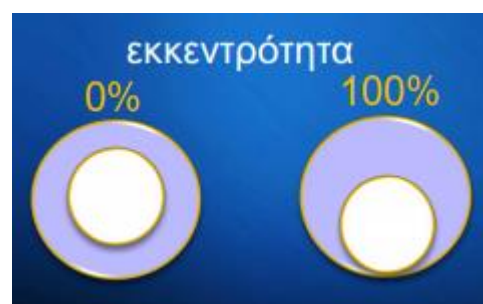
$d_o$ : Η εξωτερική διάμετρος

$d_i$ : Η εσωτερική διάμετρος

Το σύστημα του δακτυλίου παρέχει τη δυνατότητα ρύθμισης της εκκεντρότητας της στήλης.



Εικόνα 3.1 Μεταβλητές ρύθμισης εκκεντρότητας (ΜΑΡΙΝΑΚΗΣ, 2020)



Εικόνα 3.5 Μηδενική και Μέγιστη Εκκεντρότητα (ΜΑΡΙΝΑΚΗΣ, 2020)

Το ρευστό κινείται μεταξύ των δυο σωλήνων και περνάει από περιοχές καταγραφής μετρήσεων όπως πίεση, παροχή και ιδιότητες του ρευστού ( μάζα, θερμοκρασία, πυκνότητας) και μεταφέρεται ξανά μέσα στην δεξαμενή όπου αναμειγνύεται με το υπόλοιπο ρευστό στη δεξαμενή.

Η μαζική παροχή μέσα στο οριζόντιο δακτύλιο περιορίζεται μέχρι 400 kg/min για να αποφευχθούν αστοχίες του συστήματος.

### 3.1.3 Βάνες

Οι βάνες στο σύστημα είναι για να ρυθμίζουν την παροχή του ρευστού στο δακτύλιο. Η ρύθμιση γίνεται χειροκίνητα με την περιστροφή του κοχλία. Οι βάνες που υπάρχουν στο σύστημα είναι περιστρεφόμενης διατηρητής σφαίρας.



Εικόνα 3.6 Βάννα συστήματος

### 3.1.4 Δεξαμενή χωρητικότητας



Εικόνα 3.7 Δεξαμενή ρευστού

Η δεξαμενή ρευστού για την παρασκευή του ρευστού είναι κυλινδρικό δοχείο. Η δεξαμενή μπορεί να πληρωθεί με μέσω συστήματος σωλήνων και άλλων εξαρτημάτων με νερό της βρύσης η απιονισμένο νερό από την στήλη απόσταξης που έχει στο εργαστήριο. Το δοχείο στον πυθμένα είναι επίπεδο. Η έξοδος προς την αντλία παροχής του ρευστού στο σύστημα της οριζόντιας γεώτρησης είναι στα πλευρικά τοιχώματα σε ύψος 8 εκατοστών από τον πυθμένα με διάμετρο 5 εκατοστών. Υπάρχει και εξοπλισμός για να αφαιρεθεί ολόκληρος ο όγκος του ρευστού με την απορροή που βρίσκεται στο πυθμένα. Ακόμα υπάρχει σύστημα ψύξης για διατήρηση της θερμοκρασίας του ρευστού και παράθυρο παρατήρησης της διαδικασίας ανάμειξης των ρευστών. ( Δαλαμαρίνης, 2009)

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοχείου της πειραματικής διάταξης περιγράφονται στο παρακάτω πίνακα:

Ύψος δεξαμενής (m)	1.30
Ύψος ρευστού (m)	0.72
Διάμετρος (T)	0.79

Πίνακας 3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δεξαμενής

### 3.1.5 Αναδευτήρας Περιστρεφόμενος



Εικόνα 3.8 Εσωτερικά της δεξαμενής 1. Σύστημα Ανάδευσης, 2. σύστημα ψύξης(σερπαντίνα), 3 Σύστημα έξοδου προς την αντλία και 4.σύστημα απορροής

Ο αναδευτήρας αποτελείται από 4 ορθογώνιους ανακλαστήρες, μεταλλικά κομμάτια συμμετρικά τοποθετημένα κοντά από την εσωτερική επιφάνεια του δοχείου. Ο αναδευτήρας χρησιμοποιείται για την παρασκευή του ρευστού μέσα στη δεξαμενή και κυρίως για την αποφυγή περιδίνησης του ρευστού και για την βοήθεια κύλισης των διάφορων σωματιδίων που θα παριστάνουν τα θραύσματα στη γεώτρηση προς την έξοδο προς την αντλία.

### 3.1.6 Παροχόμετρο μάζας

Ο αισθητήρας ροής είναι η κεντρική μονάδα της μέτρησης ροής και τοποθετείται σε σειρά με τις σωληνώσεις που οδηγεί το ρευστό στο δακτύλιο. Ο αισθητήρας αυτός έχει την δυνατότητα μέτρησης παροχής μάζας που διέρχεται μέσω αυτού σε (kg/min) , θερμοκρασία του ρευστού ( $^{\circ}\text{C}$ ) και πυκνότητα ( $\text{Kg/m}^3$ ) με απευθείας ένδειξη αλλά και σύνδεση με τον H / Y του εργαστηρίου. ( Δαλαμαρίνης, 2009)



Εικόνα 3.9 Χαρακτηριστικά Παροχόμετρο



Εικόνα 3.10 Παροχόμετρο RHM 30 αισθητήρας ροής



### 3.1.7 Αντλία κυκλοφορίας του ρευστού



Εικόνα 3.11 Φυγοκεντρική αντλία συστήματος

Οι αντλίες είναι μηχανήματα που προσδίδουν σε ένα ρευστό πρόσθετο μανομετρικό ύψος, με σκοπό να υπερνικήσει απώλειες μανομετρικού ύψους από τριβές ή και αν γίνεται να ανυψωθεί το ρευστό σε κάποιο σημείο. Για την κυκλοφορία του ρευστού μέσα στο μοντέλο του οριζόντιου δακτυλίου χρησιμοποιείται η κατηγορία της δυναμικής ή κινητικής αντλίας και πιο συγκεκριμένα της φυγοκεντρικής αντλίας. Η αντλία αποτελείται από μια φτερωτή και το κέλυφος. Το ρευστό κινείται αρχικά με κινητική ενέργεια προς το κέντρο της φτερωτής. Με την φυγόκεντρο δύναμη να ταξιδεύει στη περιφέρεια του, επιταχύνεται το ρευστό λόγω αύξησης της ακτίνας, αφού η γραμμική ταχύτητα του δίσκου είναι μικρότερη στην εσωτερική από την εξωτερική (ακτίνα). Η αντλία μετατρέπει την κινητική ενέργεια σε πίεση με τη βοήθεια του κελύφους. Το πίσω μέρος της αντλίας είναι ο μηχανισμός, δηλαδή ένας μόντορας που δίνει την περιστροφική κίνηση της φτερωτής. Ο αριθμός περιστροφών ρυθμίζεται με ένα μετασχηματιστή inverter. Πλεονεκτήματα των δυναμικών αντλιών είναι:

1. Η απλή κατασκευή
2. Το χαμηλό κόστος
3. Η αθόρυβη λειτουργία



4. Η ομοιόμορφη ροή χωρίς διακυμάνσεις στη παροχή
5. Οικονομική λειτουργία και συντήρηση

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλία είναι τα εξής:

Αντλία PENTAX	
Τύπος	LDP 50-200H
Ισχύς	15KW(20HP)
Συχνότητα περιστροφής	2900 rpm

Πίνακας 3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας

### 3.1.8 Σύστημα μετρήσεις πτώσης πίεσης

Το όργανο είναι ένας ηλεκτρονικός μετρητής της εταιρίας Validyne. Το σύστημα αποτελείται από δύο τμήματα :

1. Τον αισθητήρα
2. Τη συσκευή ψηφιακής ένδειξης

#### 3.1.8.1 Αισθητήρας πίεσης DP-15



Εικόνα 3.12 Αισθητήρας DP-15

Είναι ένας χαρακτηριστικός μεταβλητός αισθητήρας πίεσης και είναι ο πιο οικονομικά αποδοτικός τρόπος να γίνουν οι μετρήσεις πίεσης στο εργαστήριο, όπου οι απαιτήσεις των μετρήσεων πίεσης αλλάζουν συνεχώς. Μετράει την πίεση σε 2 σημεία ,στο σημείο ανάντη και την

θέση κατάντη. Ο αισθητήρας μετράει την μετατόπιση, δηλαδή την παραμόρφωση της μεμβράνης, ανάλογα με πόση διαφορά πίεσης έχουν τα δύο σημεία σωλήνων, που μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική. Μετά την μεταφράζει σε ηλεκτρικό σήμα και την μεταφέρει στη ψηφιακή συσκευή Validyne CD23.

Τα χαρακτηριστικά του διαφράγματος είναι:

Χαρακτηριστικά αισθητήρας DP15	
Εύρος	±0.08 psid FS – 3200 psid FS (ανάλογα με το διάφραγμα)
Ακρίβεια	±0.25%FS
Υπερπίεση	200FS
Θερμοκρασία	-65°F έως + 200° F

Πίνακα 3.3 Όρια λειτουργίας DP15 (ΚΕΛΕΣΙΔΗΣ, 2009)

Τα διαφράγματα που αγοράστηκαν για τις ανάγκες του εργαστηρίου είναι:

Σειρά διαφραγμάτων		
No.	psi	Cm H <sub>2</sub> O
20	0.125	8.8
22	0.200	14.0
28	0.800	56.0
30	1.250	88.0
32	2.000	140.0
34	3.200	225.0
36	5.000	350.0

Πίνακας 3.4 Διαφράγματα εργαστηρίου (ΚΕΛΕΣΙΔΗΣ, 2009)

### 3.1.8.2 Συσκευή ψηφιακής ένδειξης Validyne CD23



Εικόνα 3.13 Συσκευή Validyne CD23 ένδειξης τιμής

Η ψηφιακή συσκευή Validyne CD23 συνδέεται με ειδικό καλώδιο με τον αισθητήρα πίεσης DP-15. Παίρνει με ηλεκτρικό σήμα από τον αισθητήρα την διαφορά πίεσης και την μετατρέπει σε ψηφιακή ένδειξη εμφανίζοντάς την στην οθόνη. Τις μετρήσεις τις μεταφέρει και στον υπολογιστή όπου και καταγράφονται. Περιλαμβάνει ένα διακόπτη που μπορεί να ρυθμιστεί το εύρος των τιμών, ανάλογα με της απαιτήσεις του πειράματος.

Χαρακτηριστικά συσκευής CD23	
Σταθερότητα	0.1%FS
Ευαισθησία	Min $\pm 15$ mV/V για $\pm 10$ VDC FS , ρυθμιζόμενο από το SPAN
Αναλογική έξοδος	$\pm 10$ VDC , 10 mV/V
Εύρος Θερμοκρασίας	-10° C έως +60° C

Πίνακας 3.5 Χαρακτηριστικά συσκευής CD23 (ΚΕΛΕΣΙΔΗΣ, 2009)



Εικόνα 3.14 Σύστημα μέτρηση πίεσης



Εικόνα 3.15 Σύστημα μέτρηση πίεσης

Με την διάταξη που περιλαμβάνει το σύστημα πίεσης του εργαστηρίου είναι δυνατό να μετρηθεί η πίεση σε αποστάσεις 50cm και σε 90 cm μεταξύ τους. Αυτό γίνεται με την βοήθεια των βαλβίδων που είναι δίπλα από τη συσκευή Validyne CD23. Όταν θέλουμε να επιλέξουμε ποια απόσταση θέλουμε να μετρήσουμε απλά κλείνουμε και ανοίγουμε τις επιθυμητές βαλβίδες.

### 3.1.9 Ηλεκτρονική μονάδα επεξεργασίας και λειτουργίας συστήματος



Εικόνα 3.16 Λειτουργική μονάδα

Σε αυτό το σημείο του συστήματος γίνονται οι λειτουργίες για να ξεκινήσει το σύστημα και δίνουμε κάποια δεδομένα για το πως θέλουμε να γίνεται η λειτουργία του: λειτουργία αναδευτήρα, παροχή και έναρξη ή κλείσιμο του συστήματος.



Εικόνα 3.17 Σύστημα λειτουργίας συστήματος Flow loop



Εικόνα 3.18 Ηλεκτρονική μονάδα επεξεργασία RHEONIK

Η ηλεκτρονική μονάδα επεξεργασίας μπορεί να παρουσιάζει τα πιο κάτω δεδομένα που μετράει το Παροχόμετρο σε ψηφιακή μορφή στην οθόνη:

1. Παροχή του ρευστού που υπάρχει στο δακτύλιο (Kg/min)
2. Την πυκνότητα του ρευστού ( $\text{kg/m}^3$ )
3. Την θερμοκρασία του ρευστού ( $^{\circ}\text{C}$ )



Σύστημα λειτουργίας του αναδευτήρα στη δεξαμενή του ρευστού και ρύθμιση της συχνότητας περιστροφής του.

### 3.1.10 Ομοαξονικό κυλινδρικό Ιξωδόμετρο

Το ιξωδόμετρο που διαθέτει το εργαστήριο Ρευστομηχανικής και τεχνικής γεωτρήσεων του Πολυτεχνείου Κρήτης είναι το ψηφιακό αυτόματο όργανο της Grace Instruments. Το μοντέλο είναι το M3500a και είναι ένα κλασσικό ομοαξονικό κυλινδρικό περιστροφικό ιξωδόμετρο τύπου Couette. Τα ιξωδόμετρα τύπου Couette που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία γεωτρήσεων, είναι περιστροφικού τύπου και τροφοδοτούνται είτε χειροκίνητα είτε ηλεκτρονικά. Αποτελούνται από 2 κυλίνδρους. Ο ένας είναι εσωτερικός και είναι συμπαγής χαλύβδινος κύλινδρος, ο οποίος λέγεται "Bob". Ο δεύτερος βρίσκεται εξωτερικά στο περιστρεφόμενο κάλυμμα (rotor sleeve). Ο Bob είναι προσαρμοσμένος με ένα άξονα πάνω στο όργανο, ο οποίος άξονας καταλήγει σε ένα ελατήριο. Όταν ασκηθεί δύναμη περιστροφής στον Bob τότε παραμορφώνεται το ελατήριο και με το πόσο έχει παραμορφωθεί το ελατήριο, το όργανο εκτιμά πόση ροπή ασκήθηκε στον Bob. Ο ρότορας είναι προσαρμοσμένος σε ένα κινητήρα με μεταβλητό αριθμό περιστροφών,. Έτσι μπορούμε να περιστρέψουμε το ρότορα σε ένα εύρος από 3 μέχρι 600 στροφές στο λεπτό. Ο ρότορας περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ( $\omega$ ) για το χρόνο που επιλέχτηκε. Το ρευστό μας μπαίνει ανάμεσα στους δυο κυλίνδρους. Για να επιστραφεί ο ρότορας με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ασκείται μια δύναμη σε αυτόν. Έτσι δημιουργείται κίνηση στο ρευστό ανάμεσα στους δύο κυλίνδρους. Ο Bob που είναι προσαρμοσμένος σε ένα σταθερό άξονα δεν περιστρέφεται, έτσι ασκεί στο ρευστό μια δύναμη ίση σε μέτρο και αντίθετη φορά σε σχέση με τη δύναμη που ασκεί ο ρότορας στο ρευστό. Η δύναμη που ασκεί ο Bob στο ρευστό δημιουργεί παραμόρφωση στο ελατήριο και έτσι καταγράφεται από το ηλεκτρονικό σύστημα της συσκευής. Έτσι το σύστημα υπολογίζει την διατμητική τάση και από το ρυθμό διάτμησης που εξαρτάται από τις στροφές που επιλέχτηκαν, υπολογίζεται το φαινόμενο ιξώδες. Ακόμα το ιξωδόμετρο διαθέτει μια ηλεκτρική αντίσταση με μορφή χιτωνίου για να μπορεί να ζεσταίνει το ρευστό στην επιθυμητή θερμοκρασία. Επιπλέον υπάρχει και ένα θερμόμετρο για να μετρηθεί η θερμοκρασία του ρευστού σε κάθε στιγμή. (Κουτρούλης & Μιχαλάκης, 2002) (Πουλακάκης, 2014) (Ζωγράφου, 2015)

Τα χαρακτηριστικά του ιξωδομέτρου βρίσκονται στους παρακάτω πίνακες 3.1 και 3.2

<b>ΙΞΩΔΟΜΕΤΡΟ</b>	
<b>Περιστρεφόμενο κάλυμμα (rotor sleeve)</b>	
Εσωτερική διάμετρος	1,450 in (36,83 mm)
Συνολικό μήκος	3,425 in (70 mm)
Χαρακτηριστική χαραγή	2,30 in (58,4 mm) από τη βάση
Δύο σειρές από τρύπες 1/8 in (3,18 mm) σε απόσταση 120 deg (2,09 rad) μεταξύ τους, στην περιφέρεια του κυκλικού καλύμματος, ακριβώς κάτω από την χαραγή.	
<b>Εσωτερικός ακίνητος κύλινδρος (Bob)</b>	
Διάμετρος	1,358 in (34,49 mm)
Μήκος κυλίνδρου	1,496 in (38,00 mm)
Έχει επίπεδη βάση, ενώ η κορυφή του έχει κωνική ανάπτυξη, λεπταίνοντας σταδιακά.	
<b>Ταχύτητες περιστροφής</b>	
Έχει εύρος από 0,02 έως 600 στροφές ανά λεπτό	

Πίνακας 3.6 Τεχνικά χαρακτηριστικά του ιξωδομέτρου Grace Instrument M3500a (Κουτρούλης & Μιχαλάκης, 2002)

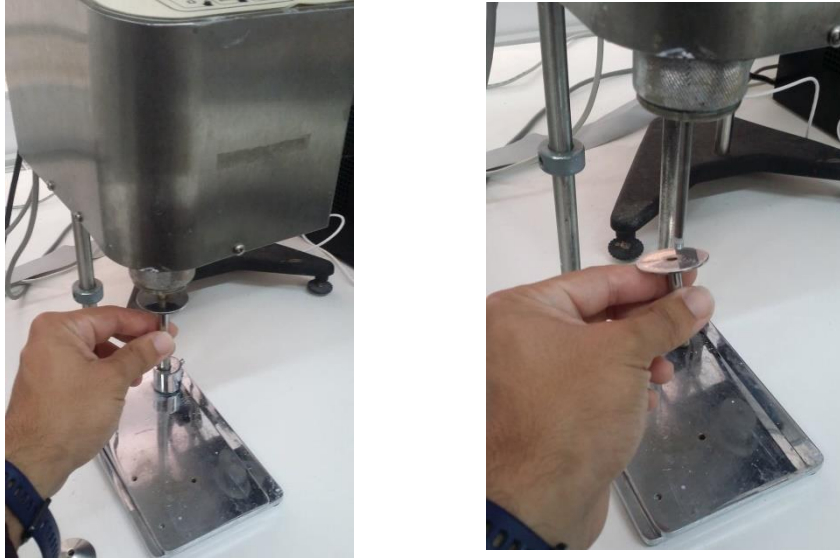
Ταχύτητα περιστροφής	0,02 – 600 rpm (συνεχόμενα)
Ρυθμός διάτμησης	0,0027 – 3254 sec <sup>-1</sup>
Θερμοκρασία	10 oF - 212 oF, (-12 oC - 100 oC)
Πίεση	Ατμοσφαιρική
Ιξώδες	0,5 – 5.000.000 cP
Ροπή	0 – 1 oz-in ή 0 – 5 oz-in
Διατμητική τάση	1 – 37.000 dyn/cm <sup>2</sup>
Ακρίβεια	± 0.5% του συνολικού εύρους

Πίνακας 3.7 Εύρος μετρήσεων ιξωδομέτρου Grace Instrument M3500a (Χ.ΚΕΛΕΣΙΔΗΣ, Εργαστηριακές σημειώσεις - Μέτρηση Ιξώδους Νευτώνειου Ρευστού Επίδραση της Αύξησης Θερμοκρασίας στο Ιξώδες Νευτώνειου Ρευστού, 2009)



#### 3.1.10.1 Προετοιμασία του οργάνου

1. Στην αρχή τοποθετούμε στον άξονα μια ειδική “ποδιά” (dust shield), που στην ουσία είναι μια μεταλλική συσκευή και λειτουργεί προστατευτικά . Η χρήση της δηλαδή είναι για να αποτρέπει τυχόν σταγονίδια κατά την περιστροφή να διεισδύσουν στον άξονα και να επηρεάσουν την μέτρηση, αφού μπορούν να κάνουν αποθέσεις στο ελατήριο ή στο ηλεκτρονικό εξοπλισμό.



Εικόνα 3.20 Τοποθέτηση της ποδιάς στο άξονα

2. Μετέπειτα τοποθετείται ο “Bob”, που είναι ο συμπαγής μεταλλικός κύλινδρος. Για να συνδεθεί στο κάτω μέρος του άξονα περιστρέφουμε με τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Δεν πρέπει να δοθεί μεγάλη δύναμη για να μην προκληθεί βλάβη στο ελατήριο που είναι προσαρμοσμένο στο άξονα. Όταν ο Bob προσαρμοστεί κατάλληλα θα έχει αντίσταση στο ξεβίδωμα.



Εικόνα 3.21 Τοποθέτηση του μεταλλικού κυλίνδρου “Bob”

3. Εξωτερικά τοποθετείται ο ρότορας (rotor) περιμετρικά πάνω στο μοτέρ της συσκευής βιδώνοντας με τη φορά των δεικτών του ρολογιού „ Το μοτέρ της συσκευής μπορεί να περιστρέφεται με αριθμό περιστροφής δικής μας επιλογής από 3 στροφές το λεπτό μέχρι 600. Ο ρότορας έχει μια γραμμή που δείχνει το όριο που μπορεί να πληρωθεί με το ρευστό και ονομάζεται εμβαπτιζόμενο βάθος. Πάνω από αυτό το όριο προκαλείται ζημιά στο όργανο και εσφαλμένες μετρήσεις. Ακόμα έχει 6 τρύπες για την απομάκρυνση του αέρα αφού το ρευστό έρχεται από κάτω προς τα πάνω.



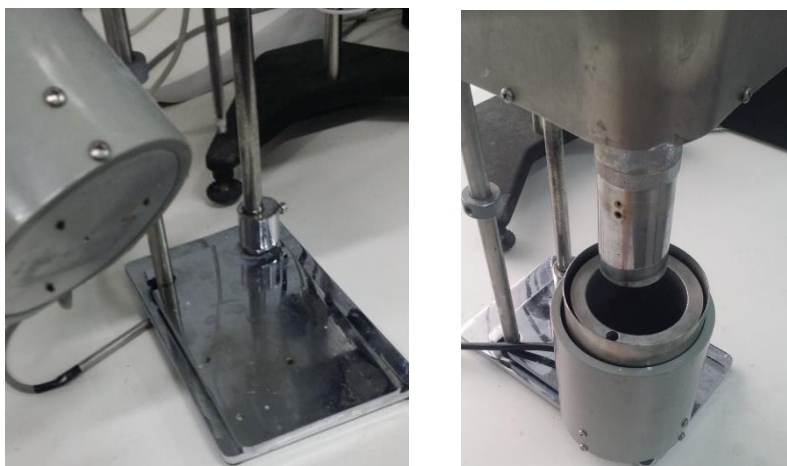
Εικόνα 3.22 Τοποθέτηση του ρότορα

4. Τοποθετούμε το δοχείο με το ρευστό μας σε ένα προστατευτικό δοχείο έτσι ώστε στην περίπτωση υπερχειλίσσης του ρευστού, το ρευστό να εισέρχεται στο προστατευτικό δοχείο για να μην πέσει στη ηλεκτρική αντίσταση. Τοποθετούμε και τα δύο δοχεία στο δοχείο με την ηλεκτρική αντίσταση.



Εικόνα 3.23 Συναρμολόγηση δοχείου

5. Στο κάτω μέρος της διάταξης του κυλιόμενου δαπέδου υπάρχουν 3 τρύπες. Αντίστοιχα στο κάτω μέρος του θερμοδοχείου υπάρχουν 3 στηρίγματα που θα τοποθετηθούν μέσα στις αντίστοιχες τρύπες της διάταξης.



Εικόνα 3.24 Τοποθέτηση του κυλίνδρου στο δάπεδο

6. Προσθέτουμε το θερμόμετρο με τη βοήθεια του κατάλληλου εξαρτήματος.



Εικόνα 3.25 Τοποθέτηση το εξάρτημα για μέτρηση θερμοκρασίας

7. Πριν ξεκινήσουμε τη μέτρηση με το ρευστό, θέτουμε σε λειτουργία το όργανο και αρχίζει να περιστρέφεται ο ρότορας για να γίνει ένας έλεγχος και βαθμονόμηση με το ρευστό, τον αέρα.



Εικόνα 3.26 Κουμπί που θέτει σε λειτουργία το όργανο

8. Τέλος, βυθίζουμε το ρευστό και ρυθμίζουμε τις εντολές στον υπολογιστή ανάλογα με το πως θέλουμε να διεξαχθούν οι μετρήσεις.



Εικόνα 3.27

## 3.2 Pressure test

### 3.2.1 Εισαγωγή

Pressure test είναι η δοκιμή που διεξάγεται μετά την εγκατάσταση οποιουδήποτε αγωγού πριν τεθεί σε λειτουργία ή ακόμη κάθε φορά που θέλουμε να κάνουμε κάτι καινούργιο στον αγωγό. Σκοπός του Pressure test είναι η διερεύνηση των διαφόρων ορίων του αγωγού, τα οποία θα ελέγχουν παραμέτρους όπως η αξιοπιστία, η μέγιστη χωρητικότητα, οι διαρροές, οι σύνδεσμοι και η πίεση. Χωρίς αυτές τις πληροφορίες ο σωλήνας δεν είναι ασφαλής να τεθεί σε λειτουργία αφού ο χειριστής δεν έχει καμία γνώση εάν ο αγωγός πληροί τις απαιτούμενες απαιτήσεις.

Οι πληροφορίες που θα βρεθούν από τις δοκιμές πίεσης βοηθούν στη διατήρηση των προτύπων ασφαλείας και της συντήρησης του αγωγού. Όταν υπάρχει ένα καινούργιο κατασκευασμένο κομμάτι εξοπλισμού, οι αγωγοί έχουν τα αρχικά τους όρια και ξανά χρησιμοποιώντας pressure test δημιουργούνται καινούργια όρια, τα οποία ονομάζονται proof pressure test.

Ανάλογα με τη χρήση τους αλλά και την κρίση του δοκιμαστή που θα κάνει το τεστ διεξάγεται έλεγχος στους αγωγούς για να φανεί κατά πόσο πληρούν τις απαραίτητες προδιαγραφές. (What is Pressure Testing, 2020)

### 3.2.2 Διαδικασία

Καταρχάς έχουν γίνει 2 έλεγχοι σχετικά με την πίεση που αφορούν:

1. Την Παροχή
2. Πόση πίεση μπορεί να αντέξει ο δακτύλιος, δηλαδή τα όρια που μπορεί να δεχτεί

### 3.2.3 Παροχή

Σε αυτή τη φάση απομακρύνεται όλος ο αέρας και μελετάται η πίεση που θα χρησιμοποιηθεί μελλοντικά. Έπειτα παρατηρείται πόση παροχή αντέχει το σύστημα και τι ροή δημιουργείται μέσα στον αγωγό. Τον αέρα θέλουμε να το διώξουμε για να έχουμε μόνο ένα ρευστό που είναι ασυμπίεστο.

Συναρμολογήσαμε ένα μανόμετρο που έχει την δυνατότητα να μετράει από 0-10bar και μετρούσαμε την διαφορά πίεσης από τη δεξαμενή που έχουμε 0 σχετική πίεση μέχρι το σημείο που έχουμε τοποθετήσει το μανόμετρο σε διάφορες παροχές. Βάσει της δικής μας κρίσης, η μέγιστη παροχή που πάρθηκε είναι 350(kg/min)



Εικόνα 3.28 Μανόμετρο

Οι εργαστηριακές μετρήσεις που έχουμε πάρει είναι:

A/A	ΔP(bar)	Q(kg/min)
1	0.7	250
2	0.5	200
3	0.24	170
4	0.07	103

Πίνακας 3.8 μετρήσεων ΔP-Q χωρίς διόρθωση

Επειδή το μανόμετρο έχει μια μικρή απόκλιση της τάξης των 5 centibars, θα έπρεπε να το προσθέσουμε

A/A	ΔP(bar)	Q (kg/min)
1	0.75	250
2	0.55	200
3	0.29	170
4	0.12	103

Πίνακας 3.9 μετρήσεων ΔP-Q με διόρθωση

Όπως διαπιστώνουμε δεν είναι στρωτή η ροή αφού η διαφορά πίεσης με την ταχύτητα δεν είναι ευθέως ανάλογες.

Εξετάζουμε στη συνέχεια τη σχέση της πτώσης πίεσης με την ταχύτητα θεωρώντας ότι  $\Delta P \sim u_f^a$ , με δεδομένη την εξίσωση της πίεσης για τυρβώδη:

$$\frac{\Delta p}{\Delta L} = \frac{\mu^{0.25} * u_f^{1.75} * \rho_f^{0.75}}{4.9 (d_o - d_i)^{1.25}}$$

Θα πρέπει ο λόγος της διαφοράς πίεσης με το λόγο των ταχυτήτων στον εκθέτη να ισούνται , δηλαδή:

$$\begin{aligned} \text{Λόγος μετρήσεων 1,2} &\Leftrightarrow \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \left(\frac{u_{f1}}{u_{f2}}\right)^a \Leftrightarrow \log \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = a * \log \frac{u_{f1}}{u_{f2}} \Leftrightarrow \log \frac{0.75}{0.55} = a * \log \frac{250}{200} \Leftrightarrow \\ 0.1347 &= a * 0.0969 \Leftrightarrow a = \frac{0.1347}{0.0969} = 1.39 \end{aligned}$$

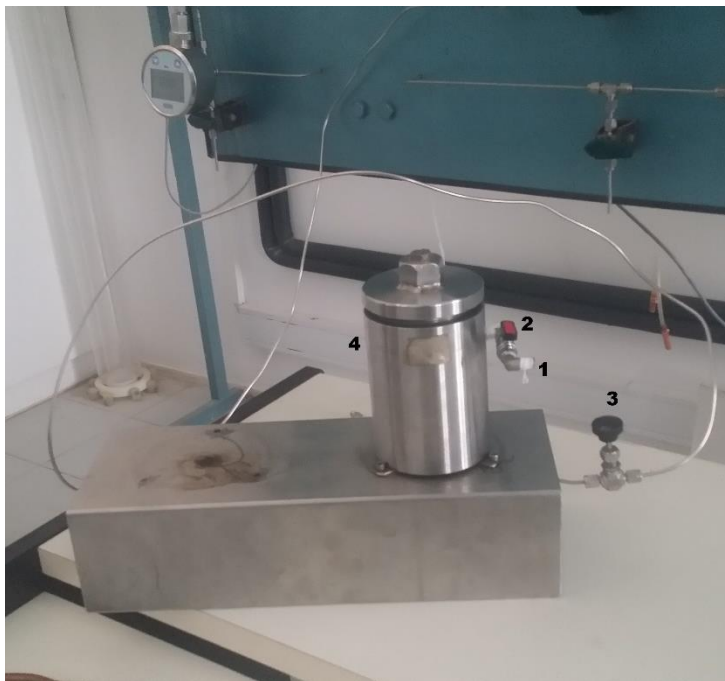


$$\begin{aligned} \text{Λόγος μετρήσεων 3,4} &\leftrightarrow \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = \left(\frac{u_{f1}}{u_{f2}}\right)^a \leftrightarrow \log \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} = a * \log \frac{u_{f1}}{u_{f2}} \leftrightarrow \log \frac{0.29}{0.12} = a * \log \frac{170}{103} \leftrightarrow 0.3832 \\ &= a * 0.2176 \leftrightarrow a = \frac{0.3832}{0.2176} = 1.76 \end{aligned}$$

Άρα διαπιστώνουμε ότι στην περιοχή των μετρήσεων 3 και 4 η σταθερά  $a=1.76$  και ταυτίζεται με τον εκθέτη της παραπάνω εξίσωσης για τυρβώδη ροή.

### 3.2.4 Μέτρηση αντοχής στη Πίεση

Ο δεύτερος έλεγχος που έγινε κατά την εκτέλεση του Pressure test ήταν να μετρήσουμε πόση πίεση μπορεί να δεχτεί ο δακτύλιος χωρίς διαρροές ρευστού. Αφού έχει διαπιστωθεί ότι έχει αφαιρεθεί όλος ο αέρας από τον αγωγό και το μόνο ρευστό που έχει μείνει είναι το νερό που έχουμε στην δεξαμενή, κλείσαμε απότομα την βάννα μαζί με την λειτουργία του συστήματος. Αυτό έχει ως σκοπό να γεμίσει πλήρως ο δακτύλιος με ρευστό και να μην υπάρχει πουθενά διέξοδος. Στη συνέχεια τοποθετούμε ένα δοχείο το οποίο και συνδέουμε με τον δακτύλιο, όπως φαίνεται και στην εικόνα πιο κάτω:



Εικόνα 3.29 Συνδεσμολογία για Pressure test

Μέσα στο δοχείο (4) βάζουμε λίγη ποσότητα ενός ασυμπίεστου ρευστού και το κλείνουμε σφικτά για να μην υπάρχουν διαρροές. Με μια πιστόλα αέρος, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.29 πιο πάνω, εισάγεται το ρευστό μέσα στο δοχείο από μια υποδοχή (1) ενώ ανοίγουμε την είσοδο (2) της και αφού τοποθετήσουμε τον αέρα κλείνουμε τη συγκεκριμένη είσοδο για να μην έχουμε έξοδο του ρευστού από εκεί. Στην συνέχεια με ένα περιστρεφόμενο κοχλία (3) σπρώχνουμε το ασυμπίεστο

ρευστό με την βοήθεια του αέρα που έχουμε τοποθετήσει μέσα. Όπως παρατηρήσαμε, με μία πολύ μικρή ποσότητα που εισχωρήσαμε μέσα στον αγωγό, περίπου όσο είναι μια σταγόνα, η πίεση έχει αυξηθεί με γρήγορους ρυθμούς που αυτό σημαίνει ότι έχει μπει παντού νερό στον αγωγό μας όπως και έπρεπε να γίνει για να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα στο pressure test. Έχουμε μετρήσει και διαπιστώσει ότι μέχρι τα 1.5 bar δηλαδή 21.75 psig δεν παρουσιάστηκε κανένα πρόβλημα όπως τυχόν διαρροή ή παραμόρφωση του αγωγού.

### 3.3 Διαδικασία παρασκευής ρευστού

#### 3.3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό τον σημείο θα γίνει ανάλυση του τρόπου παρασκευής των δειγμάτων και της επιλογής του υλικού με το οποίο έγιναν τα ρευστά τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη στο σύστημα ροής.

Για την διεξαγωγή του πειράματος και την ανάλυση του τρόπου με τον οποίο κατασκευάστηκαν τα ρευστά, θα έπρεπε να γίνει μελέτη των ρεολογικών ιδιοτήτων που θα ήταν χρήσιμες για την διεξαγωγή της διπλωματικής έρευνας.

Τα υλικά που ήταν πιο εύκολα διαθέσιμα για την διεξαγωγή της έρευνας ήταν :

1. Ο Μπεντονίτης
2. Το CMC
3. Το Carbopol 980

Ο Μπεντονίτης απορρίφθηκε λόγω αδύνατης οπτικής παρατήρησης των θραυσμάτων που θα τοποθετηθούν στο flow loop. Κάτι τέτοιο θα καθιστούσε αδύνατη οποιαδήποτε ενέργεια που θα χρειαζόταν για την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας.

Τελικά αποφασίστηκε να γίνει μελέτη και εύρεση των ρεολογικών μοντέλων στα άλλα δυο υλικά , το CMC και Carbopol 980. Αυτά τα υλικά είναι οργανικά πολυμερή. Στα διατρητικά ρευστά σε μια γεώτρηση είναι προσθετικά υλικά για να προσδίδουν διάφορες ιδιότητες στο ρευστό. Η χρήση τους γίνεται με στόχο: (Adewole & Muritala , 2019) (Carboxymethyl Cellulose Sodium (CMC)-Oil Drilling Grade, 2020)

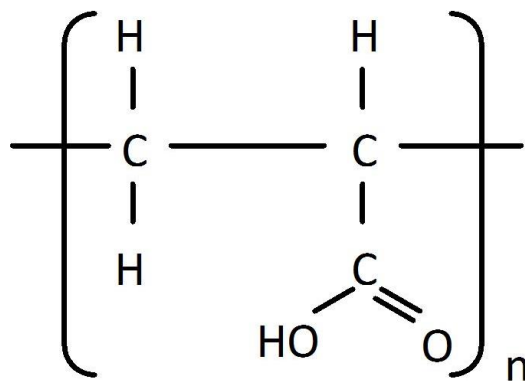
1. Τη σταθεροποίηση των τοιχωμάτων του φρεατίου
2. Τη δημιουργία γέλης για αύξηση της δύναμης ζελατινοποίησης
3. Την αποτροπή συσσωμάτωσης των θραυσμάτων
4. Την αύξηση του ιξώδους



5. Την καλή αντοχή στην αλλαγή της αλατότητας και της θερμοκρασίας

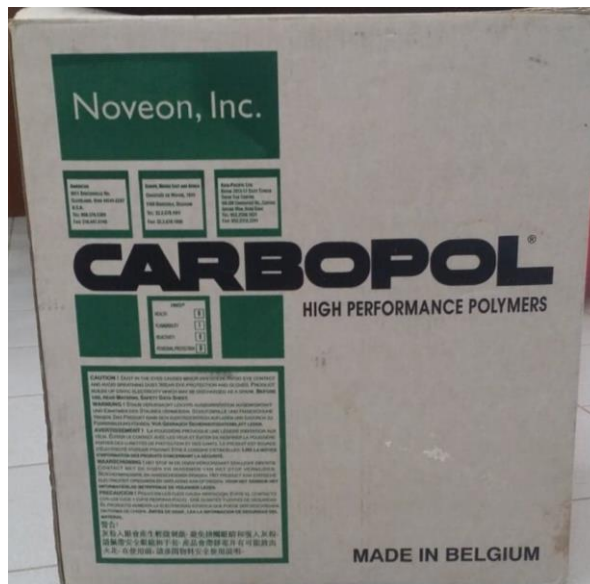
#### 8.1.10 Carbopol 980

Η Carbopol είναι ένα συνθετικό πολυμερές, με πολυακρυλικό οξύ με συνδυασμό αλλυλοσακχαρόζης ή αλλυλοπενταερυθριτόλης, η οποία πολυμερίζεται σε σύστημα συνδιαλυτών. Το πολυμερές Carbopol 980 στην εγκάρσια συνδεδεμένη μορφή δείχνει ένα πολύ υψηλό μοριακό βάρος λόγω της διασύνδεσης πολλών πολυμερών αλυσίδων. Σαν ελεύθερο υλικό είναι υπό μορφή λευκής και ξηρής σκόνης πρωτογενών σωματιδίων διαμέτρου 0,2 μm. Όταν είναι σε διάλυμα με βάση το νερό, η μορφή που έχει είναι παχύρρευστη και κατά κανόνα είναι ένα άχρωμο και άοσμο τζέλ. (Costa, Varges, Fonseca, Naccache, & Mendes, 2019).



Εικόνα 3.30 Γενική χημική δομή πολυμερών Carbopol (Ochiuz, Grigoras, & Ghiciuc, 2015)

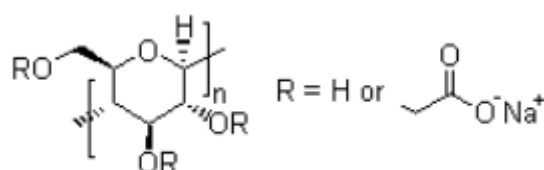
Ο τύπος πολυμερούς που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία είναι Carbopol 980 της εταιρείας Noveon, Inc



Εικόνα 3.31 Carbopol 980

#### 8.1.11 Sodium CarboxymethylCellulose (CMC)

Το CMC είναι οργανικό πολυμερές που πλέον έχει ευρεία χρήση σε γεωτρήσεις. Το CMC είναι ένα παράγωγο κυτταρίνης που λαμβάνεται με χημική τροποποίηση της φυσικής κυτταρίνης. Η CMC είναι ένα από τα πιο σημαντικά υδατοδιαλυτά πολυμερή για τα διατритικά ρευστά γεωτρήσεων με πολλά πλεονεκτήματα που δεν έχουν άλλα φυσικά ή σύνθετα υλικά. Το CMC, σαν ελεύθερο υλικό, έχει τη μορφή λευκής σκόνης και είναι άγευστο, άοσμο, ανθεκτικό στη μούχλα, μη τοξικό, άφλεκτο και διαλύεται εύκολα σε νερό για να γίνει διάφανο διάλυμα. Το διάλυμα CMC είναι μη νευτώνειο ρευστό και έχει καλές ιδιότητες πάχυνσης. (INC, 2020)



Εικόνα 3.32 Δομικός τύπος του CMC (INC, 2020)

Στην πειραματική διαδικασία στο εργαστήριο της Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής χρησιμοποιήθηκε CMC της εταιρίας AKZO NOBEL.



Εικόνα 3.33 CMC- 8.1.11 Sodium CarboxymethylCellulose

### 3.4 Προετοιμασία δειγμάτων διατρητικής ρευστού στο ιξωδόμετρο

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την παρασκευή των δειγμάτων για εξέταση των ρεολογικών χαρακτηριστικών τους είχε σαν βάση τα πρότυπα του API, ώστε να υπάρξουν αξιόπιστα και επαναλήψιμα αποτελέσματα. Η διαδικασία είναι η εξής:

1. Ογκομετρώνται για αρχή σε ένα ογκομετρικό ποτήρι 250ml (gr) νερού φρέσκου είτε απιονισμένο ανάλογα με το σκοπό του πειράματος.
2. Ανάλογα με το διάλυμα που πρέπει να παρασκευαστεί ζυγίζεται η κατάλληλη ποσότητα CMC ή Carborol 980. Για παράδειγμα για περιεκτικότητα διαλύματος 1% θα προσθέσουμε 2.5gr
3. Το νερό τοποθετείται σε κατάλληλο δοχείο του αναδευτήρα Hamilton Beach mixer και αρχίζουμε την ανάδευση αρχικά σε χαμηλές στροφές .
4. Προστίθεται το CMC ή Carborol 980 με αργό ρυθμό έτσι ώστε να μην δημιουργηθούν συσσωματώματα.
5. Όταν προστεθεί όλη η ποσότητα του CMC ή Carborol 980, συνεχίζεται η ανάδευση για ακόμα 10 λεπτά σε μεγαλύτερους ρυθμούς περιστροφής για να πετύχουμε την διάλυση.
6. Το διάλυμα τοποθετείται σε δοχείο και αφήνεται περίπου 2 ώρες έτσι ώστε να επιτευχθεί πλήρως η ενυδάτωση. Στη διάρκεια της αναμονής σχηματίζει μια μορφή gel.
7. Τέλος , πριν από την μέτρηση του ιξώδους στο ιξωδόμετρο το δείγμα αναδεύεται ξανά για περίπου 5 με 10 λεπτά.

### 3.5 Αποτελέσματα των ρεολογικών χαρακτηριστικών της κάθε διατρητικού ρευστού

Για την επιλογή του υλικού θα έπρεπε να διερευνήσουμε κάποια ρεολογικά χαρακτηριστικά. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η διαύγεια του υλικού στο νερό , το ιξώδες και το μοντέλο που το αντιπροσωπεύει. Έχουμε επιλέξει να διερευνήσουμε ένα εύρος ιξώδους 1cP – 100cP. Οι συγκεντρώσεις με CMC ή Carborol 980 ήταν 2.65% ,2.39 % , 2.12% , 1.85% , 1.6% , 1,33% , 1% , 0.8%.

#### 3.5.1 CMC

Τα αποτελέσματα που έχουν παρθεί από το ιξωδόμετρο έχουν διορθωθεί μέσω του προγράμματος excel με την συνάρτηση solver. Έγινε μια συσχέτιση παλινδρόμησης για ποιο μοντέλο ταυτίζεται περισσότερο και για να έχει το ελάχιστο δυνατόν σφάλμα. Οι τελικές μέτρησης για κάθε συγκέντρωση είναι:

CMC 0.8%		
Shear Rate (1/s)	Shear Stress (dyn/cm <sup>2</sup> )	Viscosity (cP)
85.115	7.740	9.09
170.230	14.875	8.74
255.345	21.798	8.54
340.460	28.586	8.40
510.690	41.891	8.20
680.920	54.937	8.07
851.150	67.796	7.97
1021.380	80.506	7.88

Πίνακας 3.10 Δεδομένα CMC με σύσταση 0.8%

CMC 1%		
Shear Rate (1/s)	Shear Stress (dyn/cm <sup>2</sup> )	Viscosity (cP)
85.12	18.3	21.50
170.23	32.18	18.90
255.35	44.77	17.53
340.46	56.59	16.62
510.69	78.73	15.42
680.92	99.52	14.62
851.15	119.35	14.02
1021.38	138.46	13.56

Πίνακας 3.11 Δεδομένα CMC με σύσταση 1%

CMC 1.33%		
Shear Rate	Shear Stress	Viscosity
(1/s)	(dyn/cm <sup>2</sup> )	(cP)
85.12	24.12	28.35
170.23	44.49	26.13
255.35	63.63	24.92
340.46	82.03	24.09
510.69	117.33	22.98
680.92	151.26	22.21
851.15	184.19	21.64
1021.38	216.35	21.18

Πίνακας 3.12 Δεδομένα CMC με σύσταση 1.33%

CMC 1.6%		
Shear Rate	Shear Stress	Viscosity
(1/s)	(dyn/cm <sup>2</sup> )	(cP)
5.11	3.39	66.33
10.21	5.99	58.69
170.23	60.80	35.72
340.46	107.60	31.61
510.69	150.26	29.42
680.92	190.42	27.97
851.15	228.84	26.89
1021.38	265.91	26.03

Πίνακας 3.13 Δεδομένα CMC με σύσταση 1.6%

CMC 1.85%		
Shear Rate	Shear Stress	Viscosity
(1/s)	(dyn/cm <sup>2</sup> )	(cP)
85.12	58.3659	68.573
170.23	102.7710	60.372
255.35	143.0878	56.037
340.46	180.9597	53.152
510.69	251.9497	49.335
680.92	318.6349	46.795
851.15	382.2916	44.915
1021.38	443.6345	43.435

Πίνακας 3.14 Δεδομένα CMC με σύσταση 1.85%

CMC 2.12%		
Shear Rate	Shear Stress	Viscosity
(1/s)	(dyn/cm <sup>2</sup> )	(cP)
85.12	71.7046	84.244
170.23	124.1493	72.930
255.35	171.1581	67.030
340.46	214.9519	63.136
510.69	296.3430	58.028
680.92	372.1675	54.657
851.15	444.1045	52.177
1021.38	513.0880	50.235

Πίνακας 3.15 Δεδομένα CMC με σύσταση 2.12%

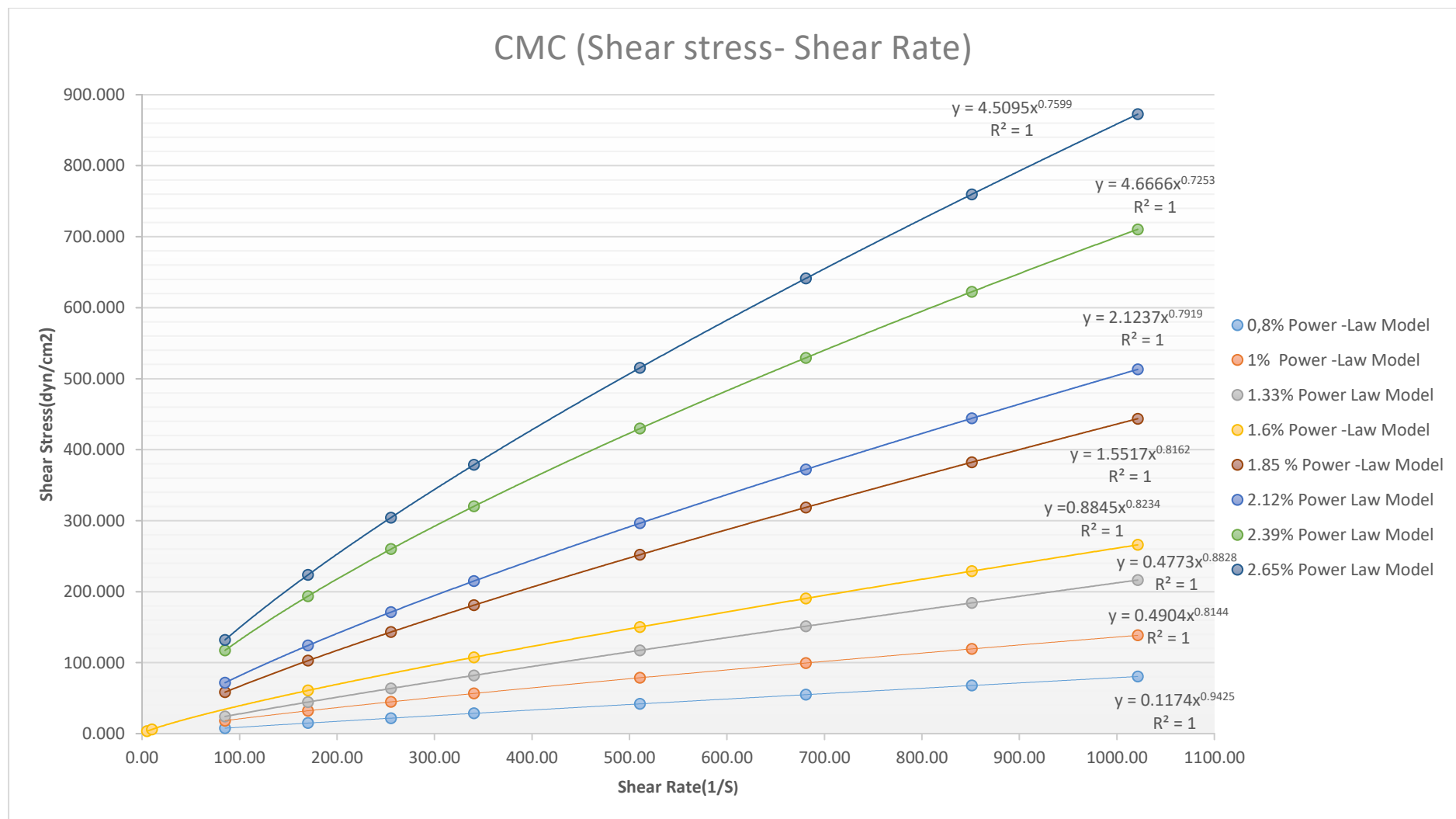
CMC 2.39%		
Shear Rate	Shear Stress	Viscosity
(1/s)	(dyn/cm <sup>2</sup> )	(cP)
85.12	117.1602	137.649
170.23	193.6909	113.782
255.35	259.9104	101.788
340.46	320.2126	94.053
510.69	429.6876	84.139
680.92	529.3801	77.745
851.15	622.3775	73.122
1021.38	710.3657	69.550

Πίνακας 3.16 Δεδομένα CMC με σύσταση 2.39%

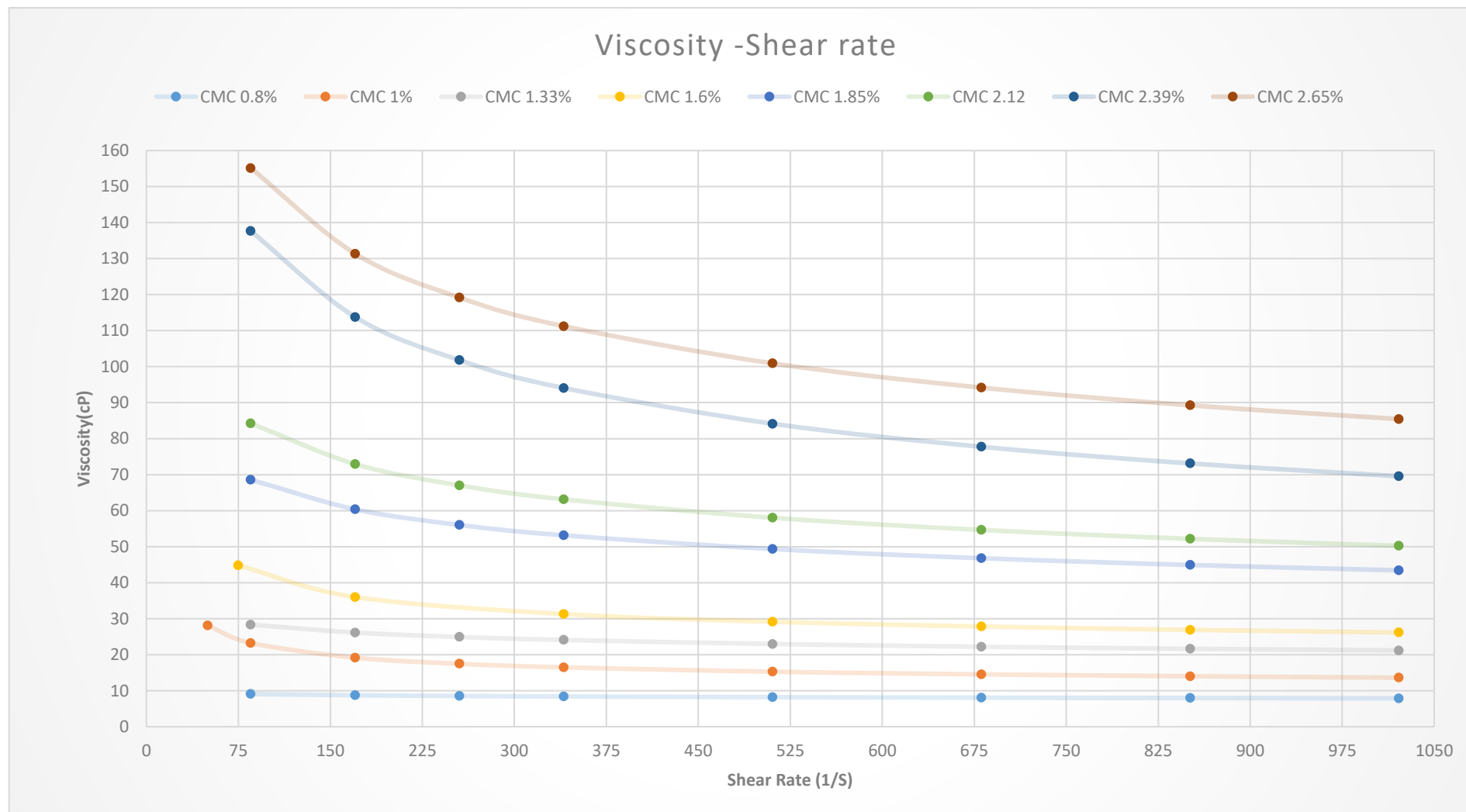
CMC 2.65%		
Shear Rate	Shear Stress	Viscosity
(1/s)	(dyn/cm <sup>2</sup> )	(cP)
85.12	132.05	155.14
170.23	223.61	131.36
255.35	304.30	119.17
340.46	378.66	111.22
510.69	515.30	100.90
680.92	641.21	94.17
851.15	759.70	89.26
1021.38	872.60	85.43

Πίνακας 3.17 Δεδομένα CMC με σύσταση 2.65%

Από τα αποτελέσματα έχουν κατασκευαστεί 2 διαγράμματα για την κατανόηση των ρεολογικών χαρακτηριστικών.



Ρεόγραμμα 3.1 Shear Stress- Shear rate για διάφορες συγκεντρώσεις CMC



Ρεόγραμμα 3.2 Viscosity - Shear rate για διάφορες συγκεντρώσεις CMC

### 3.5.2 Carbopol 980

Η διαδικασία εύρεσης των αποτελεσμάτων ήταν ίδια με το CMC όπως περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 3.5.1. Οι τελικές μέτρησης για κάθε συγκέντρωση είναι:

Carbopol 980 0.8%		
Shear Rate	Shear Stress	Viscosity
(1/s)	(dyn/cm <sup>2</sup> )	(cP)
85.12	12.00	14.10
170.23	20.72	12.17
255.35	28.53	11.17
340.46	35.80	10.51
510.69	49.29	9.65
680.92	61.84	9.08
851.15	73.73	8.66
1021.38	85.13	8.34

Πίνακας 3.20 Δεδομένα Carbopol 980 με σύσταση 0.8%

Carbopol 980 1%		
Shear Rate	Shear Stress	Viscosity
(1/s)	(dyn/cm <sup>2</sup> )	(cP)
85.12	25.73	30.23
170.23	41.26	24.24
255.35	54.38	21.30
340.46	66.16	19.43
510.69	87.20	17.08
680.92	106.08	15.58
851.15	123.49	14.51
1021.38	139.82	13.69

Πίνακας 3.18 Δεδομένα Carbopol 980 με σύσταση 1%

Carbopol 980 1.33%		
Shear Rate	Shear Stress	Viscosity
(1/s)	(dyn/cm <sup>2</sup> )	(cP)
85.12	59.72	70.16
170.23	81.97	48.15
255.35	100.09	39.20
340.46	115.96	34.06
510.69	143.64	28.13
680.92	167.89	24.66
851.15	189.87	22.31
1021.38	210.19	20.58

Πίνακας 3.19 Δεδομένα Carbopol 980 με σύσταση 1.33%

Carbopol 980 1.6%		
Shear Rate	Shear Stress	Viscosity
(1/s)	(dyn/cm <sup>2</sup> )	(cP)
85.12	78.43	92.15
170.23	109.87	64.54
255.35	136.50	53.46
340.46	160.42	47.12
510.69	203.23	39.80
680.92	241.69	35.49
851.15	277.20	32.57
1021.38	310.52	30.40

Πίνακας 3.21 Δεδομένα Carbopol 980 με σύσταση 1.6%

Carbopol 980 1.85%		
Shear Rate	Shear Stress	Viscosity
(1/s)	(dyn/cm <sup>2</sup> )	(cP)
85.12	107.20	125.95
170.23	142.34	83.62
255.35	168.66	66.05
340.46	190.50	55.95
510.69	226.57	44.37
680.92	256.52	37.67
851.15	282.60	33.20
1021.38	305.97	29.96

Πίνακας 3.22 Δεδομένα Carbopol 980 με σύσταση 1.85%

Carbopol 980 2.12%		
Shear Rate	Shear Stress	Viscosity
(1/s)	(dyn/cm <sup>2</sup> )	(cP)
85.12	129.34	151.96
170.23	170.28	100.03
255.35	204.85	80.22
340.46	235.83	69.27
510.69	291.19	57.02
680.92	340.81	50.05
851.15	386.56	45.42
1021.38	429.45	42.05

Πίνακας 3.23 Δεδομένα Carbopol 980 με σύσταση 2.12%



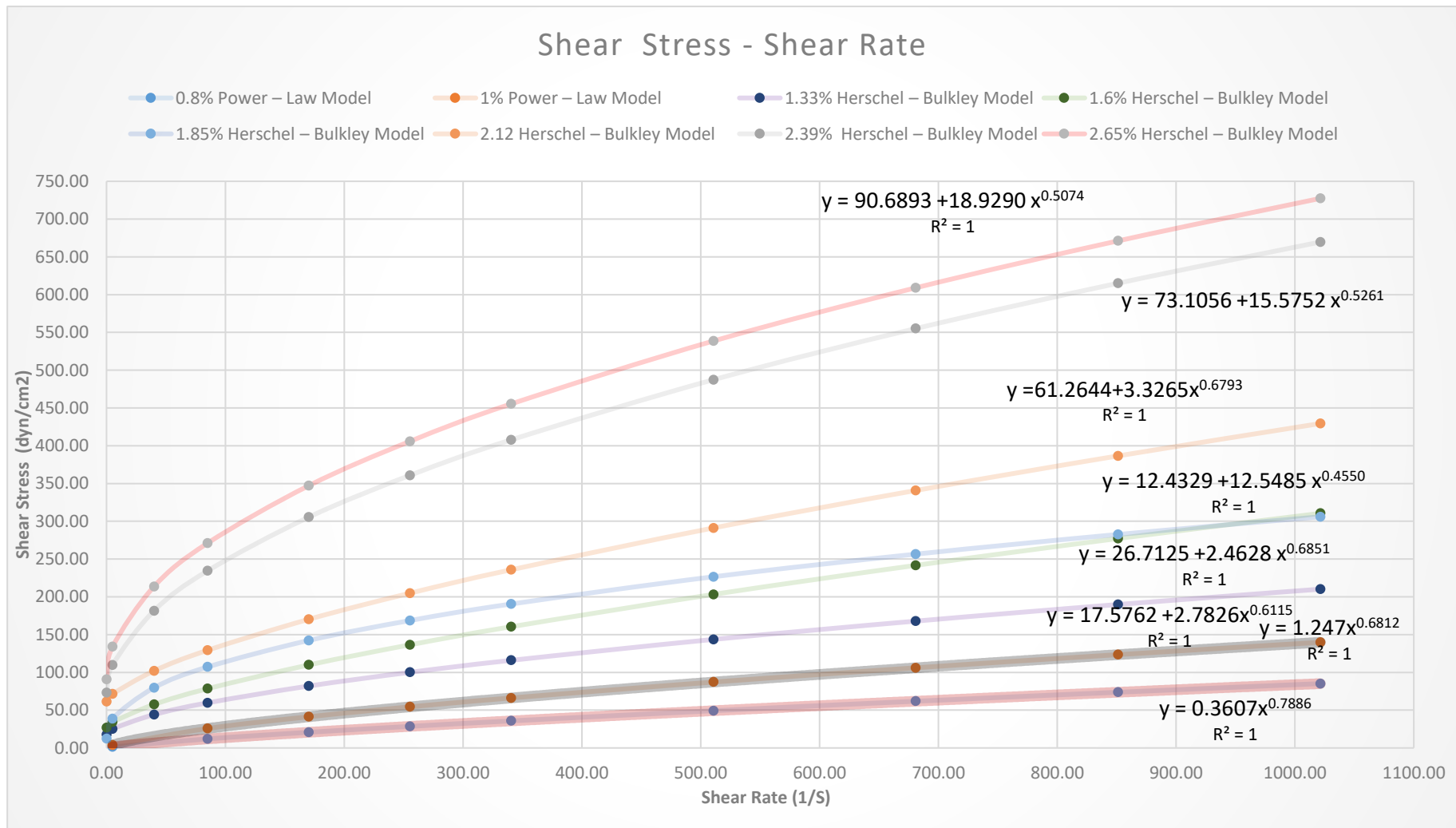
Carbopol 980 2.39%		
Shear Rate	Shear Stress	Viscosity
(1/s)	(dyn/cm <sup>2</sup> )	(cP)
85.12	234.50	275.51
170.23	305.52	179.47
255.35	360.79	141.29
340.46	407.80	119.78
510.69	487.38	95.44
680.92	555.08	81.52
851.15	615.13	72.27
1021.38	669.70	65.57

Πίνακας 3.24 Δεδομένα Carbopol 980 με σύσταση 2.39%

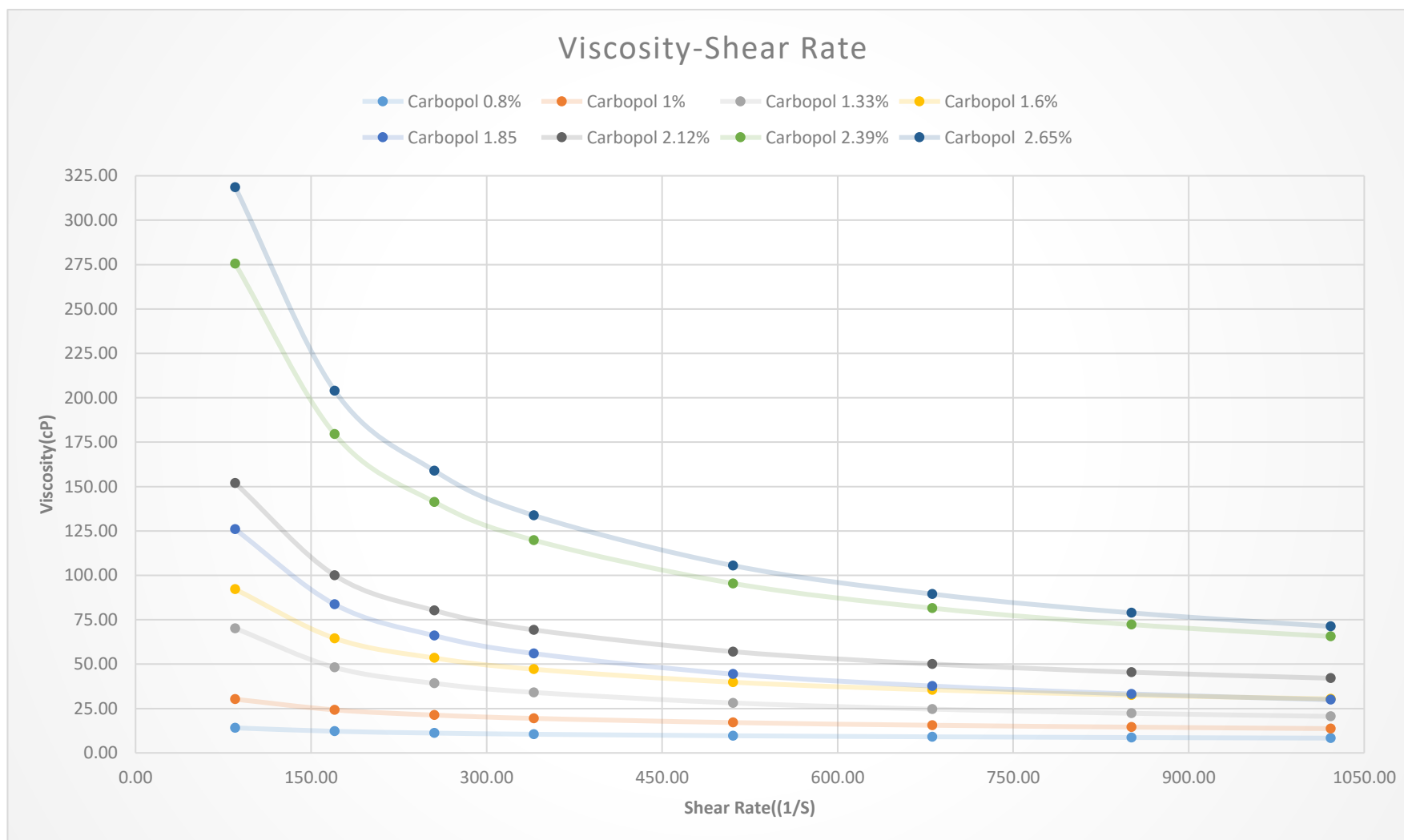
Carbopol 980 2.65%		
Shear Rate	Shear Stress	Viscosity
(1/s)	(dyn/cm <sup>2</sup> )	(cP)
85.12	271.16	318.58
170.23	347.22	203.97
255.35	405.81	158.93
340.46	455.34	133.74
510.69	538.63	105.47
680.92	609.03	89.44
851.15	671.17	78.85
1021.38	727.43	71.22

Πίνακας 3.25 Δεδομένα Carbopol 980 με σύσταση 2.65%

Από τα αποτελέσματα έχουν κατασκευαστεί 2 ρεογράμματα για την κατανόηση των ρεολογικών χαρακτηριστικών:



Ρεόγραμμα 3.3 Shear Stress- Shear rate για διάφορες συγκεντρώσεις Carborol 980

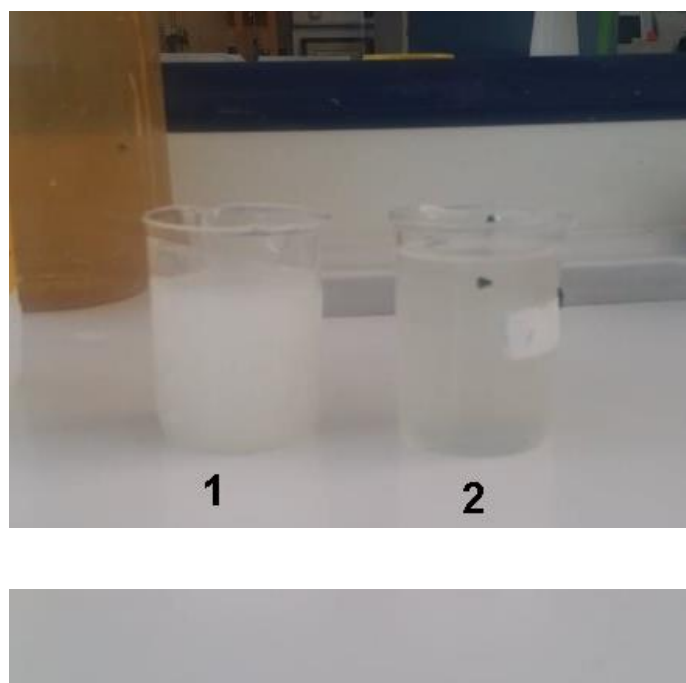


Ρεόγραμμα 3.4 Viscosity - Shear rate για διάφορες συγκεντρώσεις Carbopol 980

### 3.5.3 Συμπεράσματα

Από την ρεολογική μελέτη των διάφορων ρευστών το πρότυπο ροής που περιγράφει καλύτερα τα υδατικά διαλύματα CMC σε όλες τις συγκεντρώσεις, είναι το πρότυπο Power-Law εκτός από της συγκεντρώσεις 1% και 1.6%, όπου το πρότυπο Herschel – Bulkley Model με ψευδοπλαστικές ιδιότητες αφού το  $n < 1$ . Στις μικρές συγκεντρώσεις το ρευστό τείνει να γίνει Νευτώνειο αφού το  $n$  είναι ίσο με 1. Το Φαινόμενο ιξώδες όπως φαίνεται από της μετρήσεις μας κυμαίνεται για ρυθμός διάτμησης 85.12 (1/s) – 1021.38 (1/s) στη μεγαλύτερη συγκέντρωση, δηλαδή στα 2.65% σε εύρος τιμών 85.43 cP -155.14 cP , ενώ στη μικρή συγκέντρωση, δηλαδή στα 0.8% σε εύρος τιμών 7.88 cP - 9.09 cP ανάλογα με την διατμητική τάση που δέχεται το διατρητικό ρευστό. Το Carborol 980 από την άλλη, σε όλες τις συγκεντρώσεις έχει μοντέλο Herschel – Bulkley Model εκτός από τις 0.8% και 1% που έχει μοντέλο Power-Law model με ψευδοπλαστικές ιδιότητες αφού το  $n < 1$ . Το Φαινόμενο ιξώδες όπως φαίνεται από της μετρήσεις μας κυμαίνεται για ρυθμός διάτμησης 85.12 (1/s) – 1021.38 (1/s) στη μεγαλύτερη συγκέντρωση δηλαδή στα 2.65% σε εύρος τιμών 71.22 cP - 318.58 cP και στην μικρή συγκέντρωση δηλαδή στα 0.8% σε εύρος τιμών 14.10 cP -8.34 cP ανάλογα με την διατμητική τάση που δέχεται. Το Carborol 980 όπως φαίνεται και από τις τιμές του φαινομένου ιξώδες και το συντελεστή  $k$  στις εξισώσεις που είναι καταχωρημένες επάνω στο διάγραμμα είναι πολύ πιο παχύρευστο υλικό από το CMC. Το CMC έχει καλύτερη τιμή του εκθέτη  $n$ , δηλαδή είναι πιο κοντά στη τιμή του 1, και έτσι το εύρος του φαινομένου ιξώδες δεν έχει μεγάλες αποκλίσεις από αλλαγές της διατμητικής τάσης. Επίσης η διαύγεια των διαλυμάτων είναι ξεκάθαρα προς την πλευρά του CMC και έχει καλύτερη διαλυτότητα στο νερό.

Ακόμα μία παρατήρηση που έγινε είχε να κάνει με την καθαριότητα του υλικού αφού το CMC ήταν πιο εύκολο να καθαριστεί από τα συσκευάσματα.



Εικόνα 3.34 Διαφορά διαύγειας ρευστών. 1.Carborol 980 2. CMC

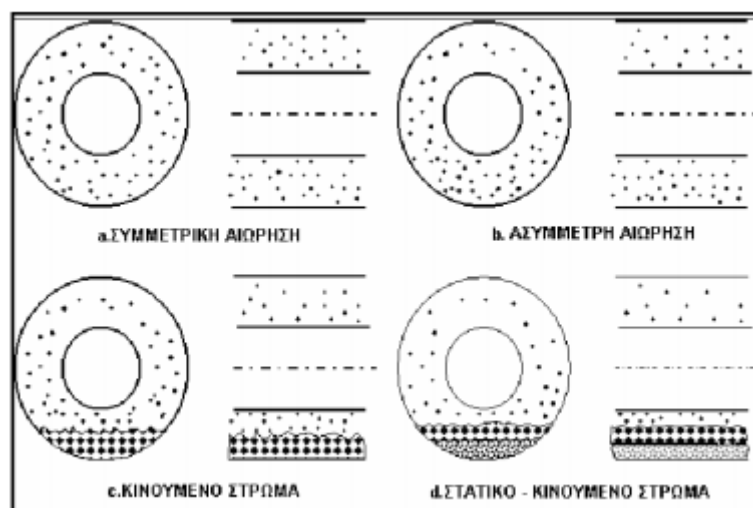
### 3.4 Πειραματική διαδικασία

#### 3.4.1 Εισαγωγικά

Κατά την λειτουργία της γεώτρησης, το μίγμα στερεού και ρευστού μέσα σε οριζόντιους αγωγούς, μπορεί να κατανεμηθεί σε διάφορες γεωμετρικές μορφές. Η κατανομή των δυο φάσεων εξαρτάται από την παροχή, το σχήμα, την κλίση και το μέγεθος του αγωγού. Ακόμη εξαρτάται από τη συγκέντρωση των στερεών και τις διάφορες ιδιότητες του ρευστού και των στερεών.

Υπάρχουν 4 μορφές ροής ρευστού και στερεού για ροή σε ομόκεντρο δακτύλιο: (Kelessidis & Mpandelis, "Flow Patterns and Minimum Suspension Velocity for Efficient Cuttings Transport in Horizontal and Deviated Wells in Coiled-Tubing Drilling", 2003)

- a) Η Συμμετρική Αιώρηση
- b) Η Ασύμμετρη Αιώρηση
- c) Το Κινούμενο Στρώμα
- d) το Στατικό- Κινούμενο Στρώμα



3.35 Μορφές ροής ρευστού - στερεού, για ροή σε ομόκεντρο δακτύλιο (Κουτρούλης & Μιχαλάκης, 2002) (Kelessidis & Mpandelis, "Flow Patterns and Minimum Suspension Velocity for Efficient Cuttings Transport in Horizontal and Deviated Wells in Coiled-Tubing Drilling", 2003)

Κατά την διεξαγωγή του πειράματος παρατηρήθηκαν οι ακόλουθοι τρεις τρόποι (διαμορφώσεις) μεταφοράς στερεών σωματιδίων:

1. Η μεταφορά μεμονωμένων σωματιδίων χωρίς στρώμα μέσα στο δακτυλιοειδή αγωγό
2. Η μεταφορά μεμονωμένων σωματιδίων άνωθεν ενός στατικού στρώματος σωματιδίων
3. Η μεταφορά σωματιδίων με τη μορφή λόφων (donus)

Σε κάθε περίπτωση από τις τρεις μπορεί να εμφανιστούν κάποια σωματίδια που αιωρούνται.

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα αποτελέσματα του κάθε συστήματος με την σειρά που προέκυψαν κατά την διεξαγωγή του πειράματος και την επεξεργασία τους. Η διπλωματική εστίασε στο τμήμα του δακτυλιοειδή αγωγού που η εκκεντρότητα είναι σχεδόν ίση με 0. Στα πειράματα ασχοληθήκαμε κυρίως με τις οριζόντιες δυνάμεις και πως αυτές επηρεάζουν την μέση ταχύτητα των σωματιδίων χρονικά στο οριζόντιο άξονα. Οι παράμετροι που μεταβάλλονταν στο πείραμα είναι το ιξώδες, η παροχή του ρευστού και ο ρυθμός περιστροφής του αναδευτήρα. Τα δεδομένα συλλέχτηκαν με 2 τρόπους:

1. Με βιντεοσκόπηση με κάμερα Canon EOS 200D
2. Με οπτική παρακολούθηση με χρονόμετρο

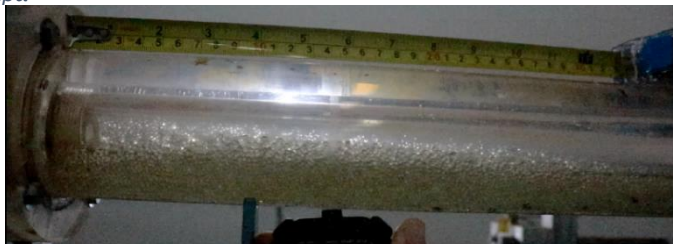
Ελήφθησαν δεδομένα για 3 ρευστά. Αυτά είναι ρευστό με 1cP, το καθαρό νερό. Με CMC με συγκέντρωση 0.8% που αντιπροσωπεύει το ρευστό με περίπου φαινόμενο ιξώδες γύρος στα 10 cP και ρευστό με CMC με συγκέντρωση 1.6% που αντιπροσωπεύει το ρευστό με περίπου φαινόμενο ιξώδες γύρος στα 30 cP. Από τα δεδομένα που συλλέχτηκαν, έγινε επεξεργασία μέσω του υπολογιστή για αποκοπή του βίντεο σε εικόνες για εύρεση της φαινόμενης ταχύτητας σωματιδίων στο τύπο ροής, το χρόνο που χρειάζεται να αδειάσει η περιοχή για το κάθε ρευστό και στο τέλος δημιουργηθήκαν διαγράμματα φάσης για κάθε ρευστό που δείχνει την περιοχή του κάθε συστήματος. Πιο κάτω παρουσιάζονται 3 στιγμιότυπα της κίνησης των σωματιδίων μέσα στο δακτυλιοειδή αγωγό.



Εικόνα 3.36 Αρχική καταγραφή πορεία των σωματιδίων κατά την ροή από εικόνα μέσω της κάμερα. Η κατεύθυνση της ροής δείχνεται με το κόκκινο βέλος.



Εικόνα 3.37 Μεσαία καταγραφή πορεία των σωματιδίων κατά την ροή από την κάμερα



Εικόνα 3.38 Τελική καταγραφή πορεία των σωματιδίων κατά την ροή από την κάμερα

Τα σωματίδια ήταν γυάλινες χάντρες με διάμετρο  $d_p = 2,05-2,4 \text{ mm}$  και πυκνότητα  $\rho_p = 20.8 \text{ ppb} = 2.49 \text{ g/cm}^3$  (Kelessidis & Mpandelis, "Flow Patterns and Minimum Suspension Velocity for



Εικόνα 3.41 Μικρότερο μέγεθος σωματιδίων



Εικόνα 3.42 Μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων

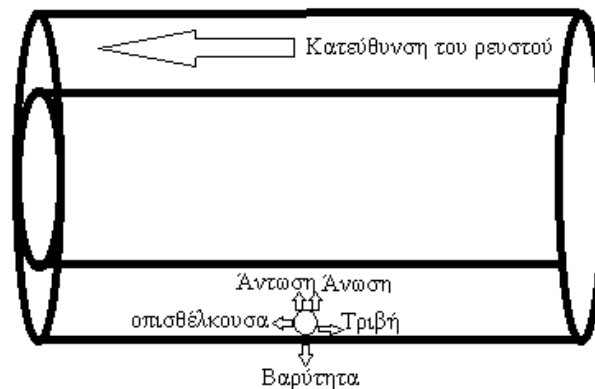
Efficient Cuttings Transport in Horizontal and Deviated Wells in Coiled-Tubing Drilling", 2003)

Σε όλα τα πειράματα που διεξάχθηκαν χρησιμοποιήθηκε ίδια ποσότητα ρευστού στη δεξαμενή και ίδια ποσότητα σφαιριδίων για να μπορεί να γίνει σωστή σύγκριση των δεδομένων χωρίς να περιπλέκονται άλλη παράγοντες. Η ποσότητα ρευστού ήταν 320 L και η συγκέντρωση σωματιδίου ήταν 4%.

### 3.4.2 Ανάλυση συστημάτων

#### 3.4.2.1 Η μεταφορά μεμονωμένων σωματιδίων χωρίς στρώμα μέσα στο δακτυλιοειδή αγωγό

Για την κατανόηση του εργαστηριακού πειράματος θα πρέπει να διερευνηθούν οι δυνάμεις στα μοντέλα των τριών πιο πάνω συστημάτων. Για την περίπτωση που το σωματίδιο κινείται μεμονωμένα χωρίς στρώμα σε δακτυλιοειδή αγωγό έχουμε το εξής πρότυπο μεταφοράς (Zeinali1, Toma, & Kuru, 2016)



Εικόνα 3.43 Ισορροπία δυνάμεων σε ένα σωματίδιο κατά τη ροή του σωλήνα όταν δεν υπάρχει στρώμα

Στο κατακόρυφο άξονα ασκούνται οι εξής δυνάμεις:

1. Η Άνωση (buoyancy), είναι μια στατική δύναμη που προκαλείται από το ρευστό. Η πίεση στο ρευστό αυξάνεται όσο αυξάνεται το βάθος. Έτσι ένα αντικείμενο που είναι βυθισμένο μέσα σε ένα ρευστό του ασκείται μια δύναμη στο πάνω μέρος μικρότερη από τη δύναμη που ενεργεί στο κάτω μέρος. Έτσι προκαλείται η μεγαλύτερη δύναμη αντίθετα από την βαρύτητα. (Science wiki, 2021)

Η αντίστοιχη μαθηματική εξίσωση είναι  $A = \rho_f * g * V_p$ , όπου:

- i.  $\rho_f$ : πυκνότητα ρευστού
- ii.  $g$ : η επιτάχυνση βαρύτητας
- iii.  $V_p$ : όγκος βυθισμένου σώματος

Η άνωση μπορεί να μετασχηματιστεί στο σύστημα μας όπως αναφέραμε και πιο πάνω σε

$$A = \rho_f * V_p * g = \rho_f * \frac{\pi * d_p^3}{6} * g \quad (3.1)$$

2. Βαρύτητα είναι η δύναμη που έλκει κάθε σωματίδιο προς τα κάτω.

$$\Delta\lambda\alpha\delta\acute{\eta} \ B = m_p * g = \rho_p * V_p * g = \rho_p * \frac{\pi * d_p^3}{6} * g \quad (3.2)$$

Άρα στο σύστημα μας η πραγματική βαρύτητα  $F_g$  είναι η διαφορά των δυο αυτών δυνάμεων

$$(1-2) \ \Sigma F = 0 \Leftrightarrow B - A \Leftrightarrow F_g = B - A = \rho_p * \frac{\pi * d_p^3}{6} * g - \rho_f * \frac{\pi * d_p^3}{6} * g = (\rho_p - \rho_f) * \frac{\pi * d_p^3}{6} * g \quad (3.3)$$

3. Η δύναμη ανύψωσης (lift force) είναι η δυναμική δύναμη και εμφανίζεται στην περίπτωση που το ρευστό μέσα στο οποίο είναι βυθισμένο το σώμα έχει ταχύτητα. Είναι μια δύναμη ανύψωσης που προκύπτει όταν η ταχύτητα του ρευστού είναι διαφορετική στις διάφορες επιφάνειες του αντικειμένου, οπότε υπάρχει διαφορά πίεσης και αυτή η διαφορά πίεσης δημιουργεί δύναμη ανύψωσης. (Science wiki, 2021)

$$\text{Η αντίστοιχη μαθηματική εξίσωση είναι } L = \frac{1}{2} C_L * \rho_f * A_p * u_y^2 \quad (3.4)$$

- i.  $C_L$ : συντελεστής ανύψωσης (Lift coefficient)
- ii.  $\rho_f$ : πυκνότητα ρευστού
- iii.  $A_p$ : επιφάνεια σώματος κάθετη στη ροή
- iv.  $u_y$ : ταχύτητα σώματος ως προς το ρευστό στο κατακόρυφο άξονα

Αν η δύναμη ανύψωσης,  $L$ , ξεπεράσει την δύναμη (3.3) που η κατεύθυνση της είναι προς τα κάτω, μπορεί να ανυψώσει τα σωματίδια από το στρώμα της ροής. Αυτό το φαινόμενο γίνεται αισθητό σε στρωτή ροή που το προφίλ της ταχύτητας είναι διαφορετικό σε κάθε επίπεδο ροής.

Στο οριζόντιο άξονα ασκούνται οι εξής δυνάμεις:

1. Η οπισθέλκουσα (drag force) όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω είναι η δύναμη που ασκείται από το ρευστό στο στερεό και είναι στην ίδια κατεύθυνση με την ροή του ρευστού. Η διαφορά στις οριζόντιες γεωτρήσεις από τις κατακόρυφες γεωτρήσεις είναι η δύναμη που δίνει την κίνηση στα θραύσματα και η οποία είναι η οπισθέλκουσα αφού έχει την ίδια



κατεύθυνση με τη ροή του ρευστού γεώτρησης . Ακόμη λόγω του ότι το σύστημα της ροής έχει κίνηση και δεν είναι ακίνητο, η ταχύτητα της δύναμης οπισθέλκουσα είναι η:

$$u_s = u_f(t) - u_{\text{σφαιριδίου}}(t) \text{ (Loth \& Dorgan, 2009) (Yang, Zhang, Yuan, \& Mei, 2018)}$$

$u_f$  = η ταχύτητα του ρευστού για συγκεκριμένη χρονική στιγμή

$u_{\text{σφαιριδίου}}$  = ταχύτητα του σφαιριδίου για την συγκεκριμένη χρονική στιγμή

Η αντίστοιχη μαθηματική έκφραση είναι  $F_d = \frac{A_p \cdot \rho_f \cdot (u_s)^2 \cdot C_D}{2}$  (3.5)

$A_p$  = είναι το εμβαδόν της προβολής του στερεού σώματος σε επίπεδο κάθετο προς την διεύθυνση της ροής.

$\rho_f$  = πυκνότητα ρευστού

$C_D$ : ο συντελεστής οπισθέλκουσας

2. Η τριβή (Friction) είναι η δύναμη αντίστασης της κίνηση δύο σωμάτων που οι επιφάνειές τους εφάπτονται. Η φορά της δύναμης τριβής είναι πάντα αντίθετη προς την φορά της κίνησης.

Η δύναμη χωρίζεται σε 2 κατηγορίες :

- i. Στατική τριβή που είναι η δύναμη που εμποδίζει ένα σώμα να κινηθεί όσο ακόμα το σώμα είναι ακίνητο.
- ii. Τριβή ολίσθησης είναι η δύναμη που αντιστέκεται στην σχετική κίνηση των σωμάτων που εφάπτονται και βρίσκονται σε κίνηση.

Η τριβή στο σύστημα υπάρχει ανάμεσα στο εσωτερικό επίπεδο του εξωτερικού αγωγού και στην επιφάνεια του σωματιδίου που κινείται πάνω σε αυτό. Τα σωματίδια αρχίζουν να κινούνται όταν η δύναμη οπισθέλκουσας της ροής είναι μεγαλύτερη από την αντίσταση των σωματιδίων που δημιουργείται από την στατική τριβή. Μετέπειτα η δύναμη αυτή μετατρέπεται σε τριβή ολίσθησης και επιβραδύνει την ταχύτητα των σωματιδίων κατά την κίνηση τους.

3.4.2.1.1 Αποτελέσματα για το διατρητικό ρευστό με ιξώδες 1 cP για μεταφορά μεμονωμένων σωματιδίων χωρίς στρώμα μέσα στο δακτυλιοειδή αγωγό

Για ιξώδες 1cP , όπου το ρευστό ήταν απλό νερό τα αποτελέσματα ήταν:

Q	Ταχύτητα ροής ( $u_f$ )(3.6)	Ταχύτητα σφαιριδίων ( $u_s$ ) (3.7)	Re (3.8)	Τύπος ροής
Kg/min	m/s	m/s		
38	0.24	0.11	7297.30	Τυρβώδης
45	0.29	0.13	8687.26	Τυρβώδης
55	0.36	0.15	10656.37	Τυρβώδης
65	0.42	0.19	12509.65	Τυρβώδης
75	0.48	0.22	14478.76	Τυρβώδης
85	0.55	0.26	16447.88	Τυρβώδης
95	0.61	0.31	18301.16	Τυρβώδης
105	0.68	0.35	20270.27	Τυρβώδης
115	0.74	0.41	22239.38	Τυρβώδης
125	0.80	0.44	24092.66	Τυρβώδης
135	0.87	0.52	26061.78	Τυρβώδης
145	0.93	0.60	28030.89	Τυρβώδης

Πίνακας 3.26 Πίνακας αποτελεσμάτων για ρευστό με ιξώδες 1cP

Η ταχύτητα της ροής υπολογίστηκε με το εξής τύπο  $Q = \frac{u_f}{E} \leftrightarrow u_f = Q * E$  (3.6)

Η ταχύτητα των σφαιριδίων υπολογίστηκε με οπτική παρουσία και στην αποκοπή του βίντεο σε εικόνες. Για κάθε μέτρηση πάρθηκαν 3 τουλάχιστο μετρήσεις με το χρονόμετρο και υπολογίστηκε μέσος όρος που χρειάζεται το σφαιρίδιο να καλύψει την οριζόντια απόσταση. Ακόμη έγινε αποκοπή το βίντεο σε εικόνες και πάρθηκαν χρόνοι για την ίδια οριζόντια απόσταση για επαλήθευση. Έτσι βάση του  $u_{\text{σφαιριδίου}} = \frac{x}{t}$  (3.7), βρέθηκε η ταχύτητα των σφαιριδίων.



Εικόνα 3.44 Πορεία του σωματιδίου για απόσταση 60cm με παροχή 95kg/min



Εικόνα 3.45 Πορεία του σωματιδίου για απόσταση 60cm με παροχή 115kg/min

Ο υπολογισμός του Αριθμού Reynolds για Νευτωνικά ρευστά υπολογίζεται:

$$Re = \frac{\rho_f * u_f}{\mu} * (d_o - d_i) \quad (3.8) \text{ όπου,}$$

$d_p$  διάμετρος αγωγού,  $\rho_f$  είναι η πυκνότητα του ρευστού,  $u_f$  είναι η ταχύτητα του ρευστού και το  $\mu$  το ιξώδες του ρευστού

Για Power – law ρευστά όπως είναι το CMC ο υπολογισμός του Αριθμού Reynolds υπολογίζεται:

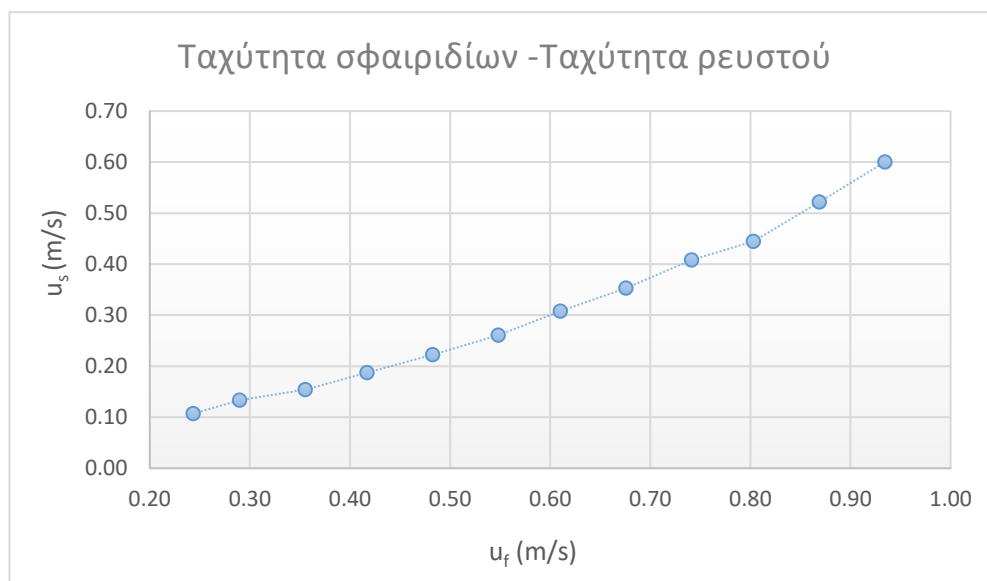
$$Re = \frac{\rho_f * u_f^{(2-n)}}{K} * (d_o - d_i)^n \quad (3.9) \text{ (Kelessidis \& Mpandelis, 2004) (Rooki, Ardejani, Moradzadeh, Kelessidis, \& Nourozi, 2012)}$$

Εάν ο αριθμός Reynolds είναι μικρότερος από 2000, η ροή είναι στρωτή. Στην περιοχή με αριθμό Reynolds μεταξύ 2000 και 4000 περίπου η ροή είναι ασταθής και έτσι γίνεται η έναρξη των αναταράξεων. Η ροή είναι στο μεταβατικό στάδιο.

Αν ο αριθμός Reynolds είναι μεγαλύτερος από 3500, η ροή είναι τυρβώδη. (Reynolds Number, 2020)

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 3.26 έχει παρατηρηθεί ότι για όλες τις παροχές έχουμε τυρβώδη ροή.

Τα αποτελέσματα του πίνακα 3.26 σε μορφή διαγράμματος έχουν ως εξής (διάγραμμα 3.1) :



Διάγραμμα 3.1 Ταχύτητα κίνησης σφαιριδίου με ταχύτητα ρευστού, με ρευστό το νερό- ιξώδες 1cP

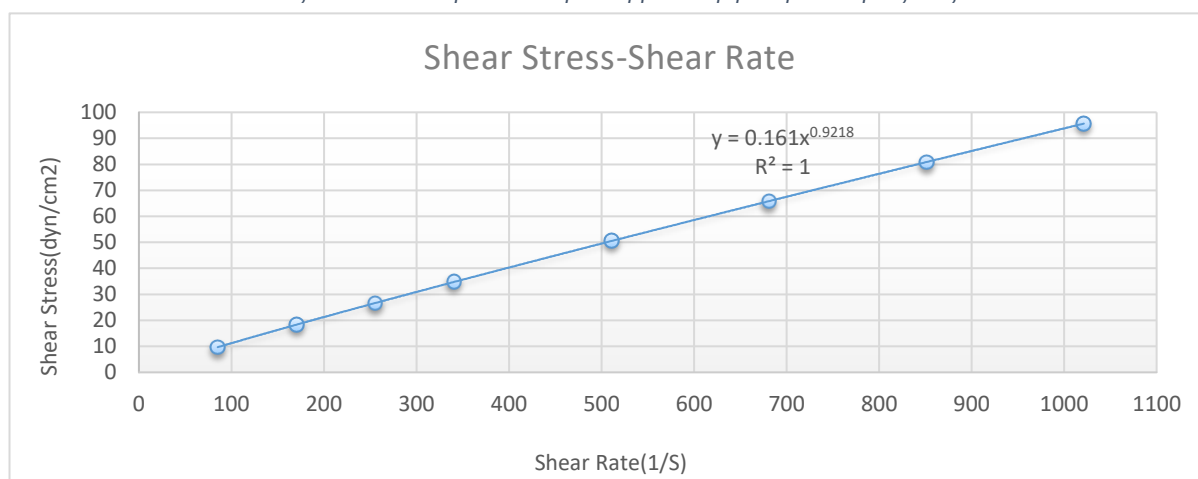
Η ταχύτητα των σωματιδίων αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας της ροής. Η διαφορά που έχουν οι δύο ταχύτητες οφείλεται στις δυνάμεις τριβής όπως αναφέρεται και στην εικόνα 3.43. Ένας άλλος παράγοντας είναι η ταχύτητα καθίζησης που ωθεί τα σωματίδια προς τα κάτω. Επίσης λόγω του προφίλ της ταχύτητας που δημιουργεί η τυρβώδης ροή που στα άκρα των τοιχωμάτων του αγωγού έχουμε μικρότερες ταχύτητες.

#### 2.4.2.1.2 Αποτελέσματα για διατρητικό ρευστό με φαινόμενο ιξώδες 10 cP

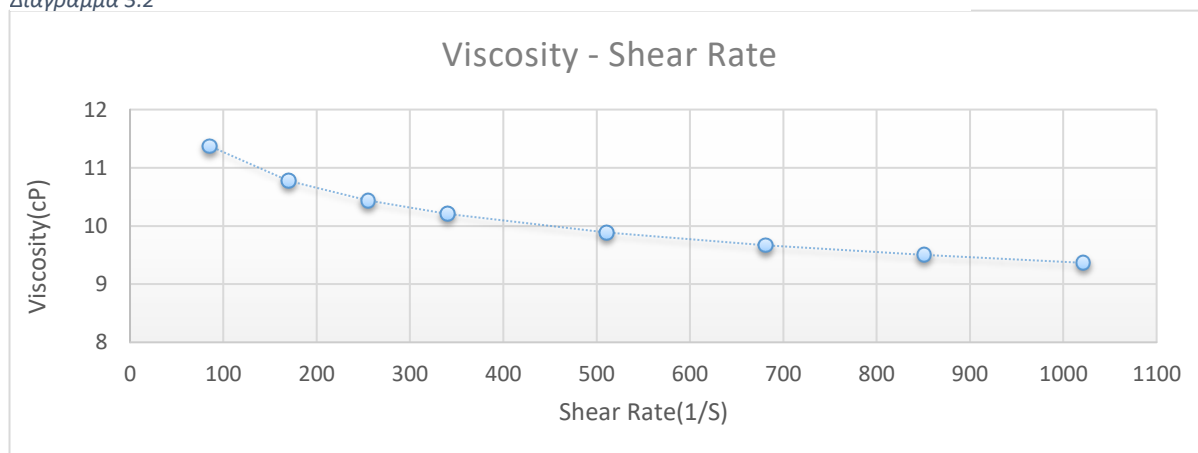
Για φαινόμενο ιξώδες 10cP , θα έπρεπε να παρασκευαστεί ένα καινούργιο διατρητικό ρευστό με τις ιδιότητες αυτές. Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω στο υποκεφάλαιο 3.3 και 3.4.1 , το υλικό που έχει επιλεγεί ήταν το CMC. Από τα αποτελέσματα που έχουν διεξαχθεί θα έπρεπε να ρίξουμε 0.8% συγκέντρωση CMC μέσα στη δεξαμενή με το νερό. Στα 320 λίτρα νερό που υπήρχε στη δεξαμενή τοποθετήθηκε 2.56 kg CMC. Αφού τελείωσε η διαδικασία παρασκευή του ρευστού στη δεξαμενή ελέγχθηκε το ρευστό στο ιξωδόμετρο για να μην υπάρξει καμία αμφιβολία ότι θα έχει της ιδιότητες που χρειαζόντουσαν για την διεξαγωγή του πειράματος. Τα αποτελέσματα της επαλήθευσής ήταν:

Speed (Rpm)	Shear Rate (1/S)	Shear Stress (dyn/cm2)	Viscosity (cP)
50	85.12	9.68	11.37
100	170.23	18.34	10.77
150	255.35	26.65	10.44
200	340.46	34.75	10.21
300	510.69	50.50	9.89
400	680.92	65.83	9.67
500	851.15	80.86	9.50
600	1021.38	95.66	9.36

Πίνακας 3.27 Αποτελέσματα επαλήθευση για διατρητικό ρευστό με ιξώδες 10 cP



Διάγραμμα 3.2



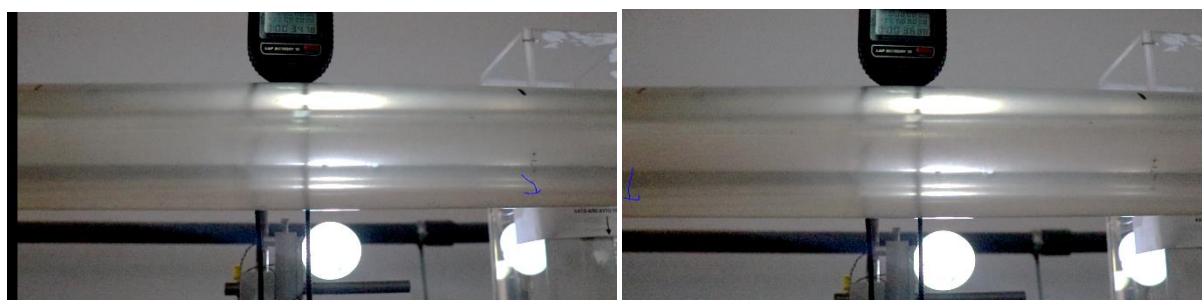
Διάγραμμα 3.3

Τα αποτελέσματα του πειράματος για το ρευστό αυτό είναι:

Q (kg/min)	Ταχύτητα ροής ( $u_f$ ) (3.6) (m/s)	Ταχύτητα σφαιριδίων ( $u_s$ ) (3.7) (m/s)	Re (3.9) -	Τύπος ροής -
55	0.36	0.07	803.01	Στρωτή
65	0.42	0.09	954.56	Στρωτή
75	0.48	0.11	1117.51	Στρωτή
85	0.55	0.12	1282.22	Στρωτή
95	0.61	0.14	1438.66	Στρωτή
105	0.68	0.19	1606.23	Στρωτή
115	0.74	0.23	1775.09	Στρωτή
125	0.80	0.26	1935.09	Στρωτή
135	0.87	0.34	2106.14	Τυρβώδης
145	0.93	0.43	2278.21	Τυρβώδης
155	1.00	0.52	2441.03	Τυρβώδης
165	1.06	0.69	2614.89	Τυρβώδης

Πίνακας 3.28 Πίνακας αποτελεσμάτων του διατρητικού ρευστού με φαινόμενο ιξώδες 10cP

Η διαδικασία εύρεσης των αποτελεσμάτων ήταν ακριβώς η ίδια.

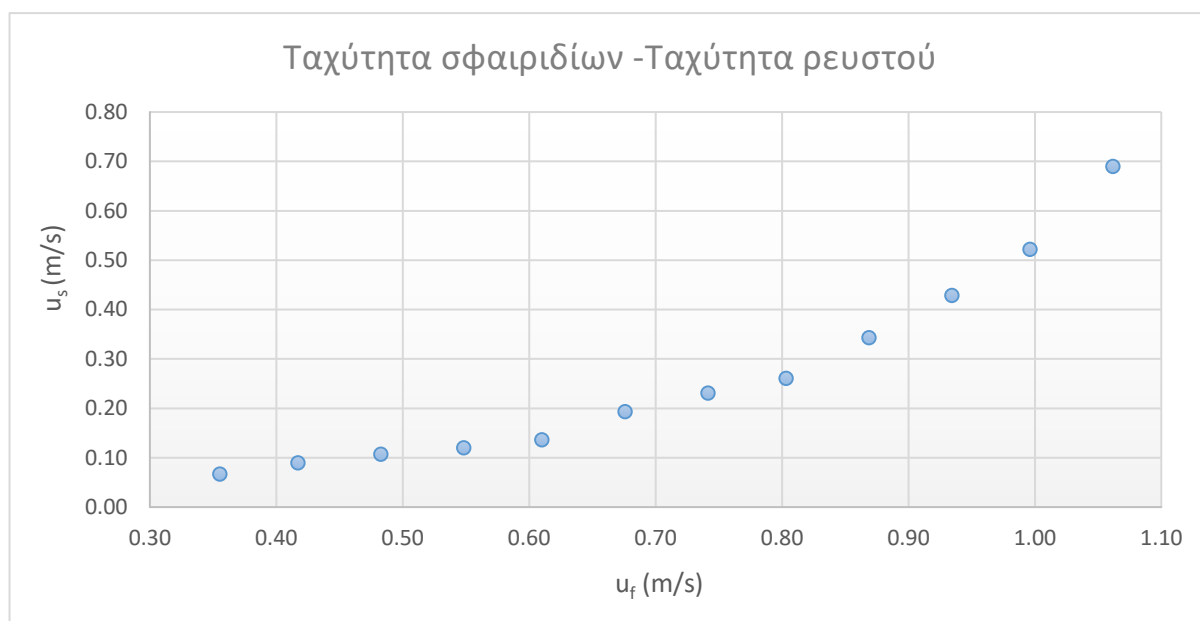


Εικόνα 3.46 Πορεία του σωματιδίου για απόσταση 30cm με παροχή 95kg/min



Εικόνα 3.47 Πορεία του σωματιδίου για απόσταση 30cm με παροχή 115kg/min

Τα αποτελέσματα σε μορφή διαγράμματος έχουν ως εξής (διάγραμμα 3.4) :



Διάγραμμα 3.4 Ταχύτητα κίνησης σφαιριδίου με ταχύτητα ρευστού για διατριτικό ρευστό με φαινόμενο ιξώδες 10cP

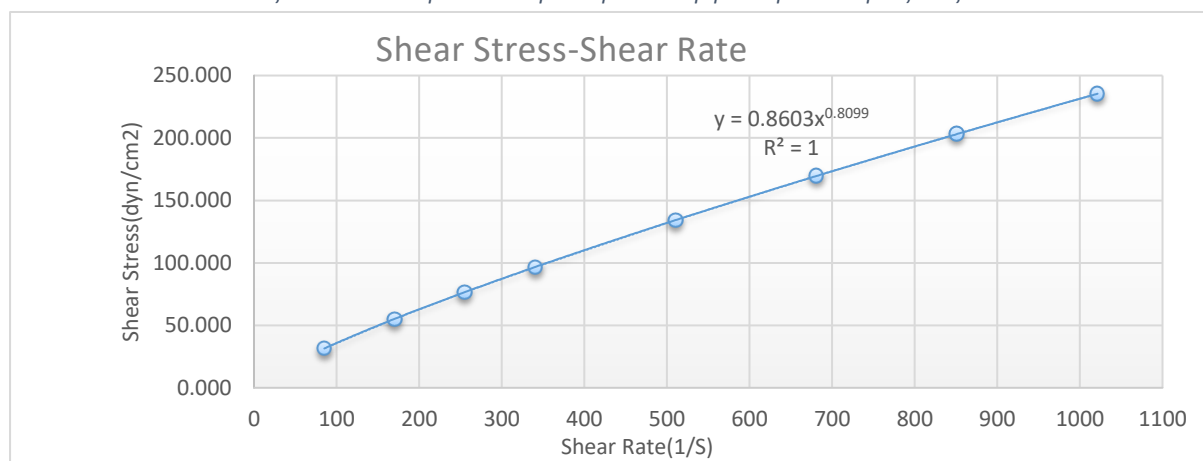
Η ταχύτητα των σωματιδίων παρατηρούμε και πάλι ότι αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας της ροής. Η μεγαλύτερη διαφορά της ταχύτητας ροής με την ταχύτητα των σωματιδίων οφείλεται κυρίως στη αλλαγής στο τύπο της ροής. Ο τύπος της ροής έχει αλλάξει για της παροχές 55 μέχρι την 125 kg/min. Έτσι το προφίλ της ταχύτητας έχει την μορφή της στρωτής ροής. Άρα, έχουμε απότομη μείωση της ταχύτητας ειδικά κοντά στα τοιχώματα του αγωγού. Όπως παρατηρούμε στις παροχές 135 μέχρι 165 kg/min ο τύπος της ροή αλλάζει σε τυρβώδη. Έτσι εμφανίζεται μια απότομη αύξηση της ταχύτητας των σωματιδίων όπως παρατηρείτε και στην απότομη αύξηση της κλίσης της καμπύλης του διαγράμματος 3.4.

### 3.4.2.1.3 Αποτελέσματα για διατρητικό ρευστό με φαινόμενο ιξώδες 30 cP

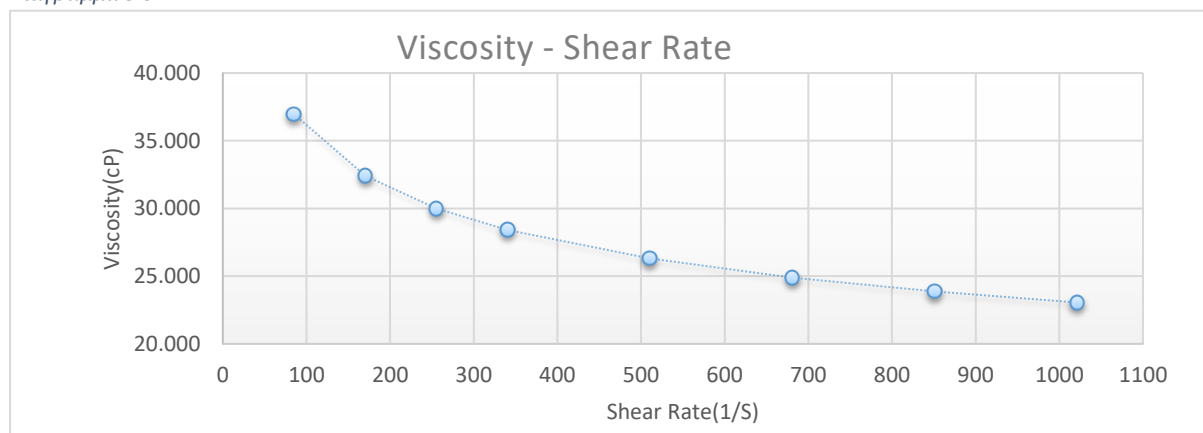
Όπως και προηγουμένως η αλλαγή των ιδιοτήτων του ρευστού έγινε με προσθήκη CMC. Το καινούργιο ρευστό χρειαζόταν για να παρασκευαστεί 1.6% συγκέντρωσης CMC. Άρα, στα 320 λίτρα νερό χρειαζόνταν 5,12kg. Έτσι προστέθηκαν ακόμα 2.56kg CMC στο υπάρχουσα ρευστό για να γίνει πιο παχύρευστο και να φτάσει στα 30cP. Αφού τελείωσε η διαδικασία παρασκευή του ρευστού στη δεξαμενή ελέγχθηκε το ρευστό στο ιξωδόμετρο για να μην υπάρξει καμία αμφιβολία ότι θα έχει της ιδιότητες που χρειαζόντουσαν για την διεξαγωγή του πειράματος. Τα αποτελέσματα της επαλήθευσής ήταν:

Speed	Shear Rate	Shear Stress	Viscosity
(Rpm)	(1/S)	(dyn/cm <sup>2</sup> )	(cP)
50	85.11	31.46	36.97
100	170.23	55.16	32.40
150	255.35	76.60	30.00
200	340.46	96.70	28.40
300	510.69	134.29	26.30
400	680.92	169.53	24.90
500	851.15	203.11	23.86
600	1021.38	235.43	23.05

Πίνακας 3.29 Αποτελέσματα επαλήθευση του διατρητικού ρευστού με ιξώδες 30 cP



Διάγραμμα 3.5



Διάγραμμα 3.6

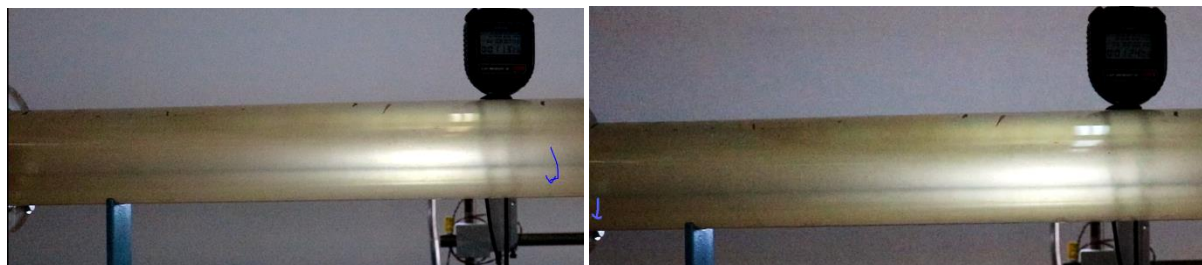


Τα αποτελέσματα του πειράματος για το ρευστό αυτό είναι:

Q	Ταχύτητα ροής ( $u_f$ )(3.6)	Ταχύτητα σφαιριδίων ( $u_s$ )(3.7)	Re (3.9)	Τύπος ροής
(kg/min)	(m/s)	(m/s)	-	-
55	0.355	0.037	186.44	Στρωτή
65	0.417	0.058	225.14	Στρωτή
75	0.483	0.074	267.39	Στρωτή
85	0.548	0.089	310.66	Στρωτή
95	0.610	0.115	352.24	Στρωτή
105	0.676	0.136	397.24	Στρωτή
115	0.741	0.179	443.01	Στρωτή
125	0.803	0.206	486.76	Στρωτή
135	0.869	0.230	533.89	Στρωτή
145	0.934	0.267	581.65	Στρωτή
155	0.996	0.294	627.15	Στρωτή
165	1.062	0.333	676.05	Στρωτή
175	1.126	0.392	724.60	Στρωτή
185	1.190	0.455	773.35	Στρωτή

Πίνακας 3.30 Πίνακας αποτελεσμάτων για το ρευστό με ιξώδες 30cP

Η διαδικασία εύρεσης των αποτελεσμάτων ήταν ακριβώς η ίδια.



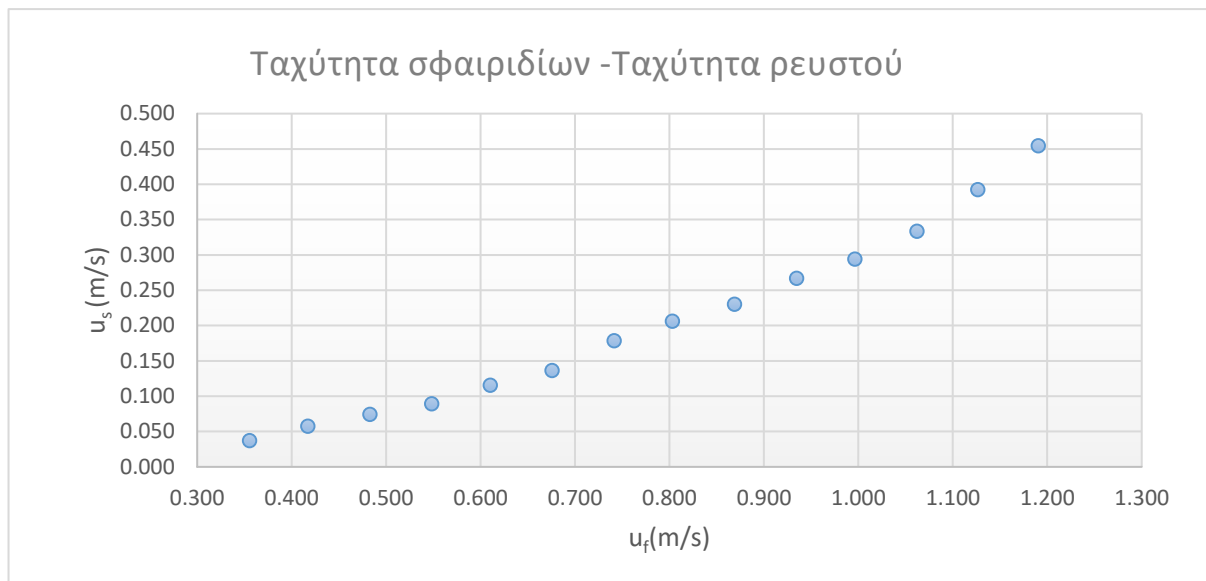
Εικόνα 3.48 Πορεία του σωματιδίου για απόσταση 40cm με παροχή 55kg/min



Εικόνα 3.49 Πορεία του σωματιδίου για απόσταση 20cm με παροχή 95kg/min



Τα αποτελέσματα σε μορφή διαγράμματος έχουν ως εξής (διάγραμμα 3.7) :



Διάγραμμα 3.7 Ταχύτητα κίνησης σφαιριδίου με ταχύτητα διατρητικού ρευστού με ιξώδες 30cP

Η ταχύτητα των σωματιδίων και πάλι αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας της ροής. Σε όλες τις παροχές ο τύπος της ροής είναι στρωτή ροή. Η ταχύτητα των σωματιδίων είναι πάρα πολύ μικρή κυρίως λόγω του προφίλ της ταχύτητας αφού ο αριθμός Reynolds είναι πάρα πολύ χαμηλός.

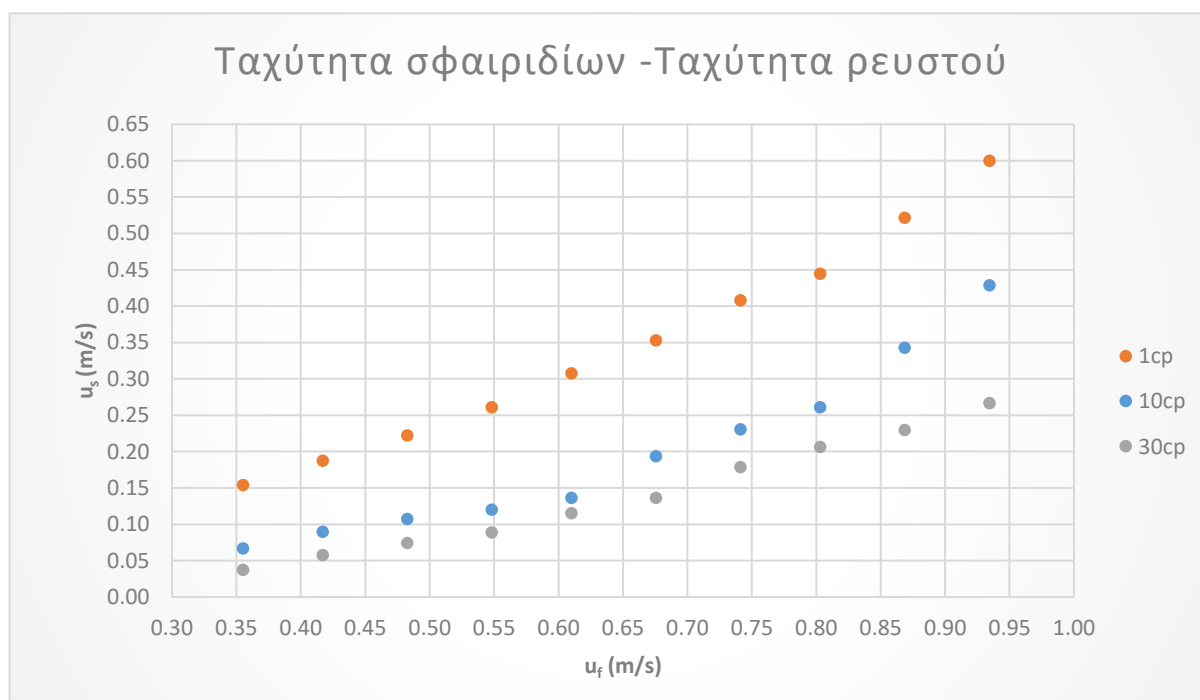
### 2.4.2.1.3 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Μέσω μιας αναλυτικής σύγκρισης των τριών διαφορετικών ρευστών βλέπουμε πως επιδρά το ιξώδες στην κίνηση των σωματιδίων. Ακολουθεί ένας συνοπτικός πίνακας με τα αποτελέσματα του συστήματος όπως και η παρουσίαση της αναλογίας μεταξύ της ταχύτητας σωματιδίου και της ταχύτητας ρευστού.

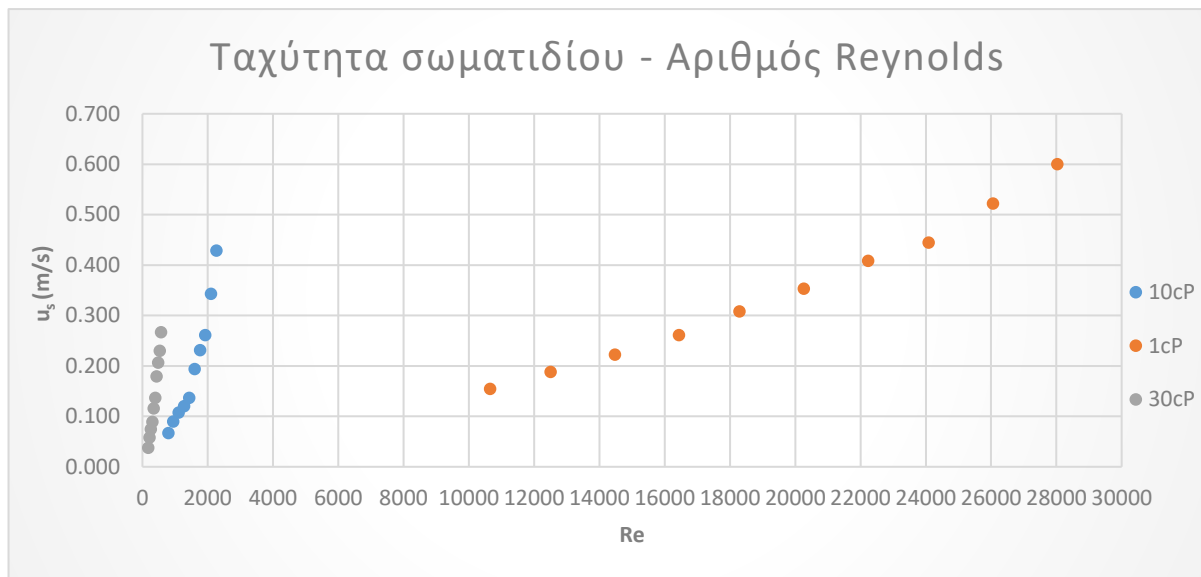
Q	$u_f$	$u_s$ -1cP	$u_s$ -10cP	$u_s$ -30cP	$u_s / u_f$ - 1cP	$u_s / u_f$ - 10cP	$u_s / u_f$ - 30cP
(kg/min)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	-	-	-
55	0.355	0.154	0.067	0.037	0.433	0.188	0.105
65	0.417	0.188	0.090	0.058	0.450	0.215	0.152
75	0.483	0.222	0.107	0.074	0.460	0.222	0.168
85	0.548	0.261	0.120	0.089	0.476	0.219	0.182
95	0.610	0.308	0.136	0.115	0.504	0.224	0.189
105	0.676	0.353	0.194	0.136	0.522	0.286	0.202
115	0.741	0.408	0.231	0.179	0.551	0.311	0.241
125	0.803	0.444	0.261	0.206	0.553	0.325	0.257
135	0.869	0.522	0.343	0.230	0.601	0.395	0.265
145	0.934	0.600	0.429	0.267	0.642	0.459	0.285

Πίνακας 3.31 Συνοπτικός πίνακας με όλα τα αποτελέσματα του συστήματος με διαφορετικό ιξώδες. ( $u_f$  = ταχύτητα ρευστού,  $u_s$  = ταχύτητα σωματιδίων)

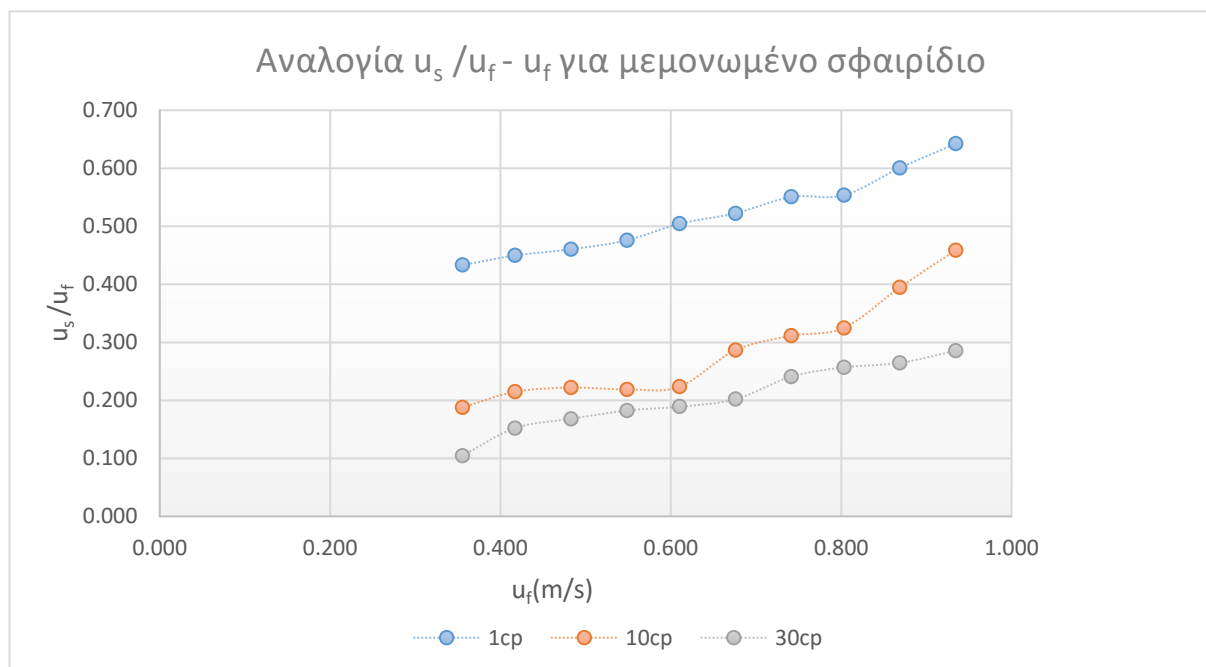
Τα αποτελέσματα με μορφή διαγράμματος είναι:



Διάγραμμα 3.8 Συνοπτικό διάγραμμα ταχύτητα κίνησης σωματιδίου και ταχύτητας ρευστού



Διάγραμμα 3.9 Διάγραμμα ταχύτητα κίνησης σωματιδίου με αριθμό Reynolds ροής



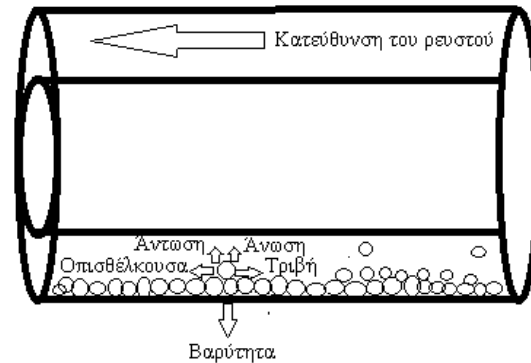
Διάγραμμα 3.10 Διάγραμμα αναλογίας ταχύτητας κίνησης σωματιδίου με ταχύτητα ρευστό ως προς ταχύτητας του ρευστού

Από τα διαγράμματα τα πιο πάνω παρατηρούμε ότι πιο κοντά στη ταχύτητα του ρευστού με μεγάλη διαφορά από τις άλλες δυο είχε το ρευστό με ιξώδες 1cP. Η αναλογία αυτή ήταν περίπου στη πιο χαμηλή παροχή με τιμή 0,45 ενώ στις πιο μεγάλη παροχή με τιμή 0,65. Η μεγάλη αυτή διαφορά που έχει το ρευστό με τα υπόλοιπα όπως αναφερθήκαμε και πιο πάνω είναι ο τύπος της ροής που είναι τυρβώδης. Εδώ παρατηρούμε πόσο σημαντική και μεγάλη είναι η επίδραση της τριβής που δέχεται από τα τοιχώματα. Αφού περίπου το 45% αυτής της διαφοράς της ταχύτητας της ροής και της ταχύτητα των σωματιδίων οφείλεται στη δύναμη της τριβής που δημιουργείται λόγω της ταχύτητας της καθίζησης που τα σπρώχνει συνεχώς προς τα κάτω. Ακόμα μια σημαντική

παρατήρηση που έχει διαπιστωθεί είναι ότι μεταξύ του ρευστού με ιξώδες 10cP και του ρευστού με ιξώδες 30cP, ασχέτως ότι η διαφορά του ιξώδες είναι μεγαλύτερη από το ρευστό 1cP και 10cP δεν είχε τεράστιες διαφορά μετακίνηση της καμπύλης των διαγραμμάτων όπως είχε με το ρευστό με ιξώδες 1cP. Άρα το αποτέλεσμα είναι ότι στη στρωτή ροή έχουμε μικρές μεταβολές στη ταχύτητα της ροής σε σχέση με τη ταχύτητα των σωματιδίων με την αλλαγή του ιξώδες. Τέλος στη καμπύλη με το ρευστό 10cP βλέπουμε στις τρεις τελευταίες μετρήσεις μεγάλη αύξηση της κλίσης. Είναι λόγω ότι έχει μεταβεί από στρωτή σε τυρβώδη ροή. Η αλλαγή του τύπου της ροής μπορεί να αντιληφθεί και από το διάγραμμα 3.9. Αφού τιμές με αριθμό Reynolds  $>2000$  είναι σε τυρβώδη ροή.

### 3.4.2.2 Η μεταφορά μεμονωμένων σωματιδίων άνωθεν ενός στατικού στρώματος σωματιδίων

Για την περίπτωση της κύλιση σωματιδίων με στατικό στρώμα σωματιδίων σε δακτυλιοειδή αγωγό έχουμε το εξής σύστημα:

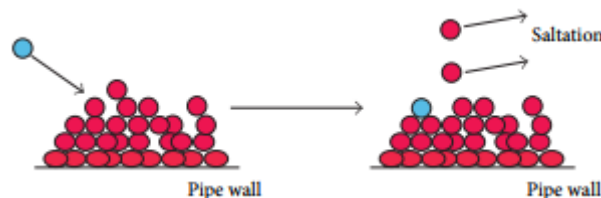


Εικόνα 3.50 Ισορροπία δυνάμεων σε ένα σωματίδιο κατά τη ροή του σωλήνα όταν υπάρχει στρώμα

Στη περίπτωση που τα σωματίδια κινούνται επάνω στο στρώμα ακίνητων σωματιδίων όπως δείχνει η παραπάνω εικόνα 3.50 έχουμε ακριβώς τις ίδιες δυνάμεις με το πιο πάνω σύστημα όταν τα σωματίδια κινούνται μεμονωμένα στο δακτυλιοειδή αγωγό. Η διαφορά είναι στη δύναμη της τριβής. Η δύναμη της τριβής σε αυτό το σύστημα είναι πολύ μεγαλύτερη λόγω του μεγαλύτερου συντελεστή τριβής που υπάρχει. Η μεγαλύτερη ταχύτητα που δημιουργεί το στρώμα των σωματιδίων καθιστά πιο δύσκολη την κίνηση των σωματιδίων που κινούνται από πάνω. Ακόμα λόγω της τυχαίας κατανομής που σχηματίζουν τα σωματίδια, δημιουργούνται κενά που μπορεί να εμποδίσουν ή και να παγιδεύσουν άλλα σωματίδια κατά την κίνηση τους.

Στα σωματίδια που αιωρούνται, η δύναμη τριβής είναι αμελητέα και μπορεί να αγνοηθεί αφού δεν υπάρχει κάποιο επίπεδο να εφάπτεται στα σωματίδια κατά την κίνηση τους. Η μόνη δύναμη που δέχονται τότε είναι η δύναμη της οπισθέλκουσας. Άρα, στην αρχή έχουν μια επιταχυνόμενη κίνηση μέχρι να φτάσουν την ταχύτητα του ρευστού. Τότε η δύναμη της οπισθέλκουσας μηδενίζεται και τα σωματίδια κινούνται με την ίδια ταχύτητα με την ροή σε ευθύγραμμη ομαλή κίνηση. Αυτό συνεχίζεται μέχρι η βαρύτητα να τα καθιζάνει κάτω. Μετά συνεχίζουν με μια διαφορετική πορεία και μπορεί όπως

- 1) Να εγκλωβιστούν μέσα στο στρώμα
- 2) Να κινούνται μεμονωμένα επάνω στο στρώμα
- 3) Να συγκρουστούν επάνω σε ένα άλλο σωματίδιο και να ξανά έρθουν σε αιώρηση ή να αναγκάσουν κάποιο σωματίδιο σε αιώρηση



Εικόνα 3.51 Πιθανή πορεία σωματιδίου κατά την ροή μέσα σε αγωγό (Wei, et al., 2013)

Στην περίπτωση που ο δακτυλιοειδής αγωγός έχει στρώμα, η ταχύτητα της ροής είναι πιο μεγάλη από την περίπτωση που ο αγωγός είναι άδειος. Είναι το ίδιο φαινόμενο όπως τη εικόνα 3.52 που δείχνει ένα ασυμπίεστο ρευστό που ρέει κατά μήκος ενός σωλήνα και κατά την διαδρομή υπάρχει

μείωση της ακτίνας. Επειδή το ρευστό είναι ασυμπίεστο, η ίδια ποσότητα ρευστού πρέπει να ρέει σε οποιοδήποτε σημείο του σωλήνα σε δεδομένο χρόνο για να διασφαλιστεί η συνέχεια της ροής. Στη περίπτωση της περιοχής 2, όπου η διατομή του σωλήνα μειώνεται, η ταχύτητα πρέπει αναγκαστικά να αυξηθεί. Αυτό ονομάζεται εξίσωση συνέχειας (equation of continuity) και ισχύει για οποιοδήποτε ασυμπίεστο ρευστό. Το φαινόμενο της εξίσωσης της συνέχειας μπορεί να παρατηρηθεί όταν το νερό ρέει από ένα σωλήνα σε ένα στενό ακροφύσιο ή όταν κλείνουμε την οπή από το λάστιχο όταν τρέχει με νερό. Έτσι παρατηρούμε μεγαλύτερες ταχύτητες. Με άλλα λόγια, η ταχύτητα αυξάνεται όταν μειώνεται η περιοχή διατομής και η ταχύτητα μειώνεται όταν αυξάνεται η περιοχή διατομής.

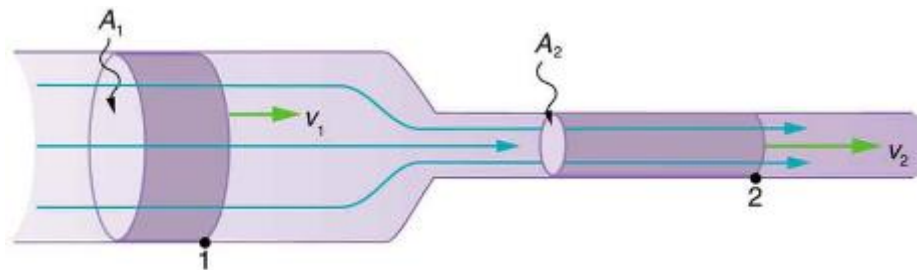
Η αντίστοιχη μαθηματική εξίσωση της συνέχειας :

$$Q_1 = Q_2 \leftrightarrow E_1 * u_{f1} = E_2 * u_{f2} \quad (3.6)$$

$Q$ : Παροχή συστήματος

$E$ : Διατομή περιοχής

$u_f$ : Ταχύτητα ροής



Εικόνα 3.52 Ταχύτητα ροής σε αγωγό σε δύο διαφορετικές περιοχές διατομής 1,2 (Flow Rate and Its Relation to Velocity, 2020)

Συνεπώς, εξαιτίας της εξίσωσης της συνέχειας (equation of continuity), εφόσον δημιουργείται στατικό στρώμα θραυσμάτων έχουμε μικρότερη διατομή που μένει στον δακτυλιοειδή αγωγό για να ρέει το ρευστό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας του ρευστού μέσα στο δακτυλιοειδή αγωγό.

#### 2.4.2.1.4 Αποτελέσματα για διατρητικό ρευστό με ιξώδες 1 cP με στατικό στρώμα στο πυθμένα

Για ιξώδες 1cP , όπου το ρευστό ήταν απλό νερό τα αποτελέσματα ήταν:

Q (kg/min)	$u_s$ (Στο στερεό) (3.7) (m/s)	$u_s$ (Αιώρημα) (3.7) (m/s)	$u_f$ (3.6) (m/s)	Re (3.8) -	Τύπος ροής -
45	0.135	-	0.377	11306.53	Τυρβώδης
55	0.219	-	0.462	13869.35	Τυρβώδης
65	0.357	-	0.543	16281.41	Τυρβώδης
75	0.435	-	0.628	18844.22	Τυρβώδης
85	-	0.680	0.714	21407.04	Τυρβώδης
95	-	0.811	0.794	23819.1	Τυρβώδης
105	-	0.882	0.879	26381.91	Τυρβώδης
115	-	0.968	0.965	28944.72	Τυρβώδης

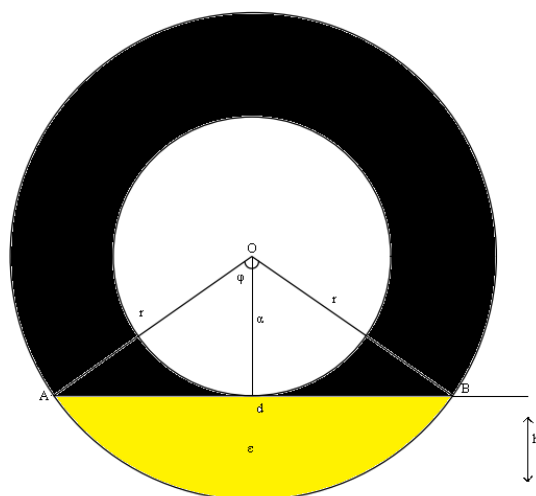
Πίνακας 3.32 Πίνακας αποτελεσμάτων για διατρητικό ρευστό το νερό με ιξώδες 1cP

Η διαδικασία εύρεσης των αποτελεσμάτων ήταν ακριβώς η ίδια με το σύστημα του μεμονωμένου σφαιριδίου. Η μόνη διαφορά ήταν στην ταχύτητα του ρευστού. Λόγω του ύψους του στρώματος η διατομή του αγωγού μικραίνει. Άρα λόγω της εξίσωσης της ασυνέχειας αυξάνεται η ταχύτητα του ρευστού μέσα στον αγωγό. Για να υπολογιστεί η καινούργια ταχύτητα μέσα στον αγωγό θα πρέπει να γνωρίζουμε την διατομή που απομένει στον αγωγό μετά την ολοκλήρωση του στρώματος. Το στρώμα μέσα στον δακτυλιοειδή αγωγό δημιουργείται ρυθμίζοντας τη στροφές του αναδευτήρα και την παροχή του ρευστού. Όσο αυξάνονται η στροφές του αναδευτήρα τόσο περισσότερα σωματίδια εισέρχονται μέσα στο δακτυλιοειδή αγωγό και επομένως αυξάνεται το πάχος των στρωμάτων. Τα σωματίδια ξεκινάνε να εισέρχονται περίπου σε μια παροχή 55 kg/min και σε μια παροχή 125 kg/min δεν μπορεί να σχηματιστεί κανένα στρώμα από σωματίδια. Άρα ρυθμίζοντας αυτές της δύο μεταβλητές μπορεί να επιτευχθεί στρώμα σωματιδίου με το ανάλογο πάχος που επιθυμείτε. Το πάχος που έχει επιλεχθεί για την διεξαγωγή των πειραμάτων είναι 1.5 cm.



Εικόνα 3.53 Δακτυλιοειδής αγωγός με το στρώμα. Με κίτρινο χρώμα απεικονίζει το στρώμα, ενώ με μαύρο τη διατομή ενδιαφέροντος.

Για τον υπολογισμό του εμβαδού της μαύρης περιοχής όπως δείχνει στην εικόνα 3.53 θα πρέπει να υπολογιστούν κάποιοι παράμετροι όπως δείχνει το πιο κάτω σχήμα.



Εικόνα 3.54 Γεωμετρική παράμετροι για το υπολογισμό της διατομής ενδιαφέροντος

Για να υπολογιστεί η περιοχή ενδιαφέροντος θα πρέπει να αφαιρεθεί από όλη τη διατομή το εμβαδόν της κίτρινης περιοχής. Για να γίνει αυτό θα χρειαστεί να υπολογιστεί η παρακάτω εξίσωση:  $\varepsilon = (OAB)_{\text{κυκλικού τόξου}} - (OAB)_{\text{τριγώνου}}$  (Κυκλικό τμήμα υπολογισμός περιμέτρου, εμβαδόν, τόξο, χορδή, γωνία, 2015) (ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΣ , ΒΛΑΜΟΣ , ΚΑΤΣΟΥΛΗΣ , ΜΑΡΚΑΤΗΣ , & ΣΙΔΕΡΗΣ , 2011)

Η μαθηματική εξίσωση για  $(OAB)_{\text{κυκλικού τόξου}}$  είναι  $\frac{\pi * r^2 * \varphi}{360}$  (3.7), ενώ του  $(OAB)_{\text{τριγώνου}}$  είναι  $\frac{AB * a}{2}$  (3.8)

Άρα η μαθηματική εξίσωση για τον υπολογισμό του εμβαδού της κίτρινης περιοχής είναι  $\varepsilon = \frac{\pi * r^2 * \varphi}{360} - \frac{AB * a}{2}$  (3.9)

Τα δεδομένα που γνωρίζουμε είναι το ύψος του κυκλικού τμήματος ( $h$ ) = 1,5 cm, και το μήκος των ακτινών του εξωτερικού ( $r$ ) = 3,5 cm και εσωτερικού αγωγού ( $a$ ) = 2 cm .

Από την τριγωνομετρία γνωρίζουμε ότι το ύψος ενός κυκλικού τμήματος είναι

$$h = r * (1 - \cos(\frac{\varphi}{2})), \text{ άρα μπορούμε να υπολογίσουμε την γωνία } \varphi = 2 * \text{τοξ}\cos(1 - \frac{h}{r}) \leftrightarrow \varphi = 2 * \text{τοξ}\cos(1 - \frac{1.5}{3.5}) = 1.9251 \text{ rad} = 110.3^\circ$$

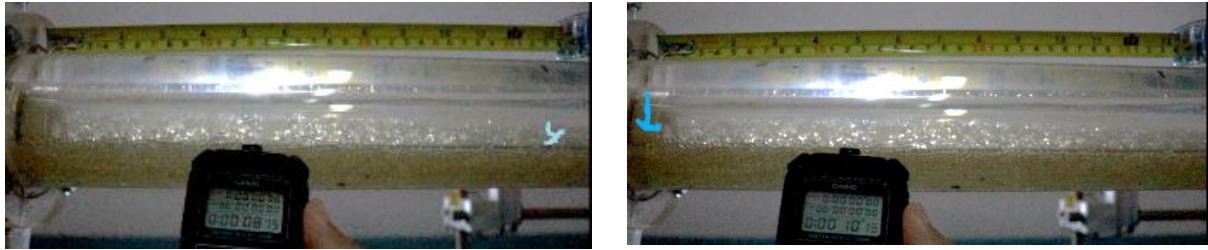
Το μήκος της χορδής υπολογίζεται φέροντας μια κάθετο στη βάση του τριγώνου OAB και με το βοήθεια του πυθαγόρειου θεωρήματος επί 2.  $AB = 2 * \sqrt{r^2 - a^2} \leftrightarrow AB = 2 * \sqrt{3.5^2 - 2^2} \leftrightarrow AB = 5.745 \text{ cm}$

$$\text{Από την εξίσωση (3.9) το } \varepsilon = \frac{\pi * 3.5^2 * 110.3}{360} - \frac{5.745 * 2}{2} \leftrightarrow 6.05 \text{ cm}^2$$

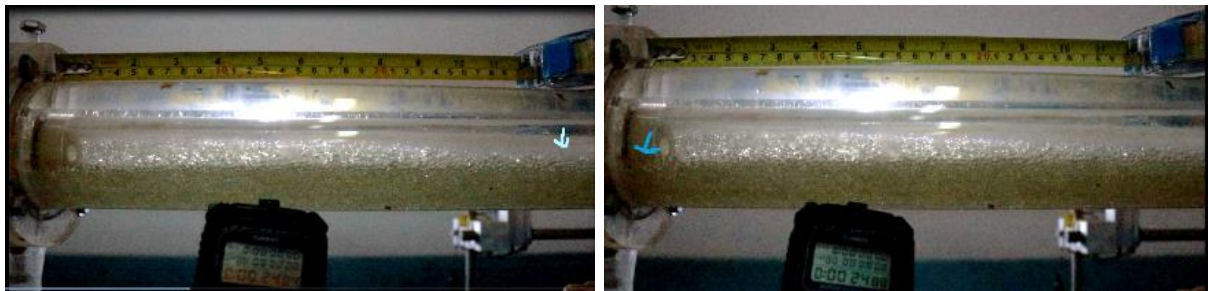
Επομένως, σε αυτό το σύστημα η διατομή ενδιαφέροντος είναι  $E * = E - \varepsilon = 25.9 \text{ cm}^2 - 6.05 \text{ cm}^2 = 19.85 \text{ cm}^2$



Παρουσιάζονται κάποια στιγμιότυπα του πειράματος με κύλιση σωματιδίων με στατικό στρώμα σωματιδίων για ιξώδες 1 cP:

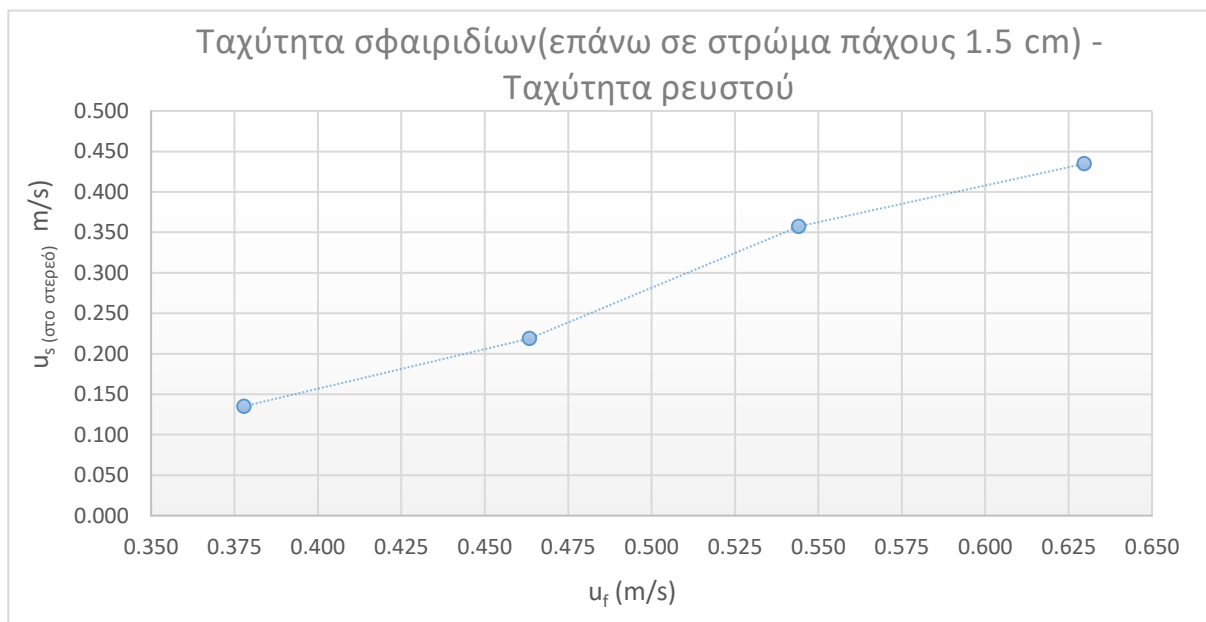


Εικόνα 3.55 Πορεία κύλιση του σωματιδίου στο στρώμα για απόσταση 30cm με παροχή 55kg/min

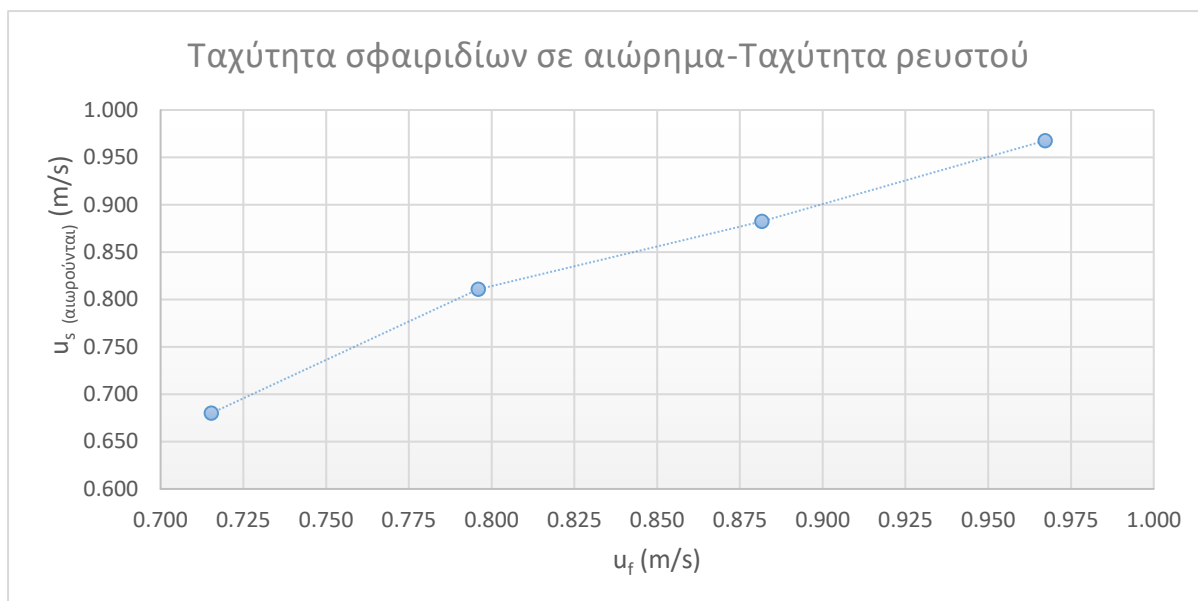


Εικόνα 3.56 Πορεία κύλιση του σωματιδίου στο στρώμα για απόσταση 30cm με παροχή 65kg/min

Τα αποτελέσματα του πίνακα 3.32 σε μορφή διαγράμματος έχουν ως εξής :



Διάγραμμα 3.11 Ταχύτητα κίνησης σφαιριδίων με ταχύτητα ρευστού για διατρητικό ρευστό με ιξώδες 1cP όταν τα σωματίδια κυλάνε επάνω σε στρώμα πάχους 1.5 cm



Διάγραμμα 3.12 Ταχύτητα σφαιριδίων με ταχύτητα ρευστού για ρευστό που είναι το νερό με ιξώδες  $1\text{cP}$  όταν τα σωματίδια αιωρούνται πάνω από στρώμα πάχους  $1.5\text{ cm}$

Η ταχύτητα των σωματιδίων συνεχώς αυξάνεται όσο αυξάνεται και η παροχή του ρευστού. Στο διάγραμμα 3.11 διαπιστώνουμε πολύ μικρές ταχύτητες σωματιδίων αναλογικά με της ταχύτητες του ρευστού. Οι ταχύτητες των σωματιδίων είναι πολύ πιο μικρές και από τις ταχύτητες που υπάρχουν στο διάγραμμα 3.1 όταν τα σωματίδια έρχονταν στο σύστημα μεμονωμένα χωρίς στρώμα. Αυτό οφείλεται στις μεγάλες τριβές που προκαλεί η τραχεία υφή του στρώματος. Έτσι επιβραδύνεται συνεχώς η ταχύτητα του σωματιδίου ανεξαρτήτου ότι η ταχύτητα του ρευστού είναι μεγαλύτερη λόγω της μικρότερης διατομής που προκαλείται από το στρώμα των σωματιδίων. Όταν η παροχή αυξηθεί αρκετά και τα σωματίδια μπορούν να αιωρούνται όπως παρουσιάζετε στο διάγραμμα 3.12 η ταχύτητα των σωματιδίων είναι ίδια με την ταχύτητα του ρευστού. Αυτό οφείλεται όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω στην ανάλυση των δυνάμεων του συστήματος και στο ότι η μόνη δύναμη που δέχεται το σωματίδιο όταν αιωρείται είναι η δύναμη οπισθέλκουσα. Τα σωματίδια θα συνεχίσουν να αιωρούνται με την ίδια ταχύτητα μέχρι η ταχύτητα καθίζησης λόγω της βαρύτητας να τα καθιζάνει προς τα κάτω όπως αναφερθήκαμε και στο υποκεφάλαιο 3.4.2.2.

#### 2.4.2.1.5 Αποτελέσματα για διατρητικό ρευστό με φαινόμενο ιξώδες 10 cP

Τα αποτελέσματα του πειράματος για το ρευστό αυτό είναι:

Q	$u_s$ (Στο στερεό) (3.7)	$u_s$ (Αιώρημα) (3.7)	$u_f$ (3.6)	Re(3.9)	Τύπος ροής
(kg/min)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	-	-
55	-	-	0.463	1390.99	Στρωτη
57	0.119	-	0.479	1439	Στρωτη
60	0.185	-	0.504	1519.21	Στρωτη
65	0.242	-	0.544	1648.03	Στρωτη
75	0.323	-	0.630	1923.54	Στρωτη
85	0.423	0.732	0.715	2201.22	Τυρβώδης
95		0.789	0.796	2464.33	Τυρβώδης
105		0.857	0.882	2745.57	Τυρβώδης
115		0.938	0.967	3028.38	Τυρβώδης
125		1.034	1.048	3295.88	Τυρβώδης
135		1.200	1.134	3581.39	Τυρβώδης

Πίνακας 3.33 Πίνακας αποτελεσμάτων για το διατρητικό ρευστό με ιξώδες 10cP

Η διαδικασία εύρεσης των αποτελεσμάτων περιγράφεται πιο πάνω.

Παρουσιάζονται κάποια στιγμιότυπα του πειράματος με κύλιση σωματιδίων με στατικό στρώμα σωματιδίων για ιξώδες 10 cP:

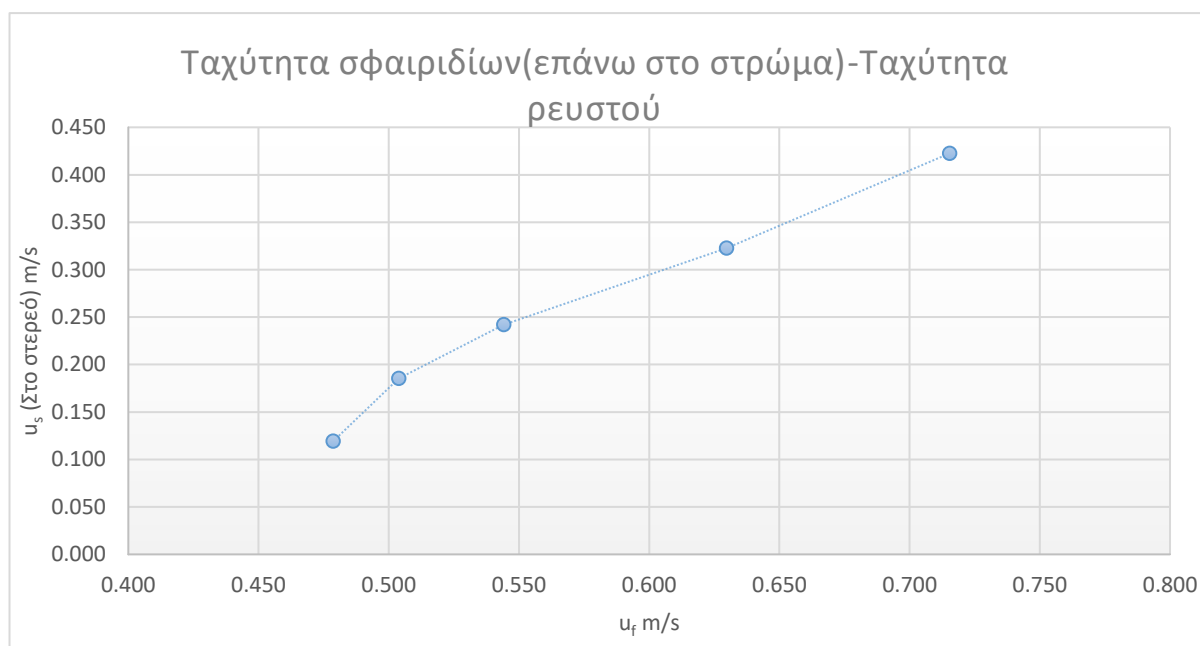


Εικόνα 3.57 Πορεία κύλιση του σωματιδίου στο στρώμα για απόσταση 30cm με παροχή 57kg/min

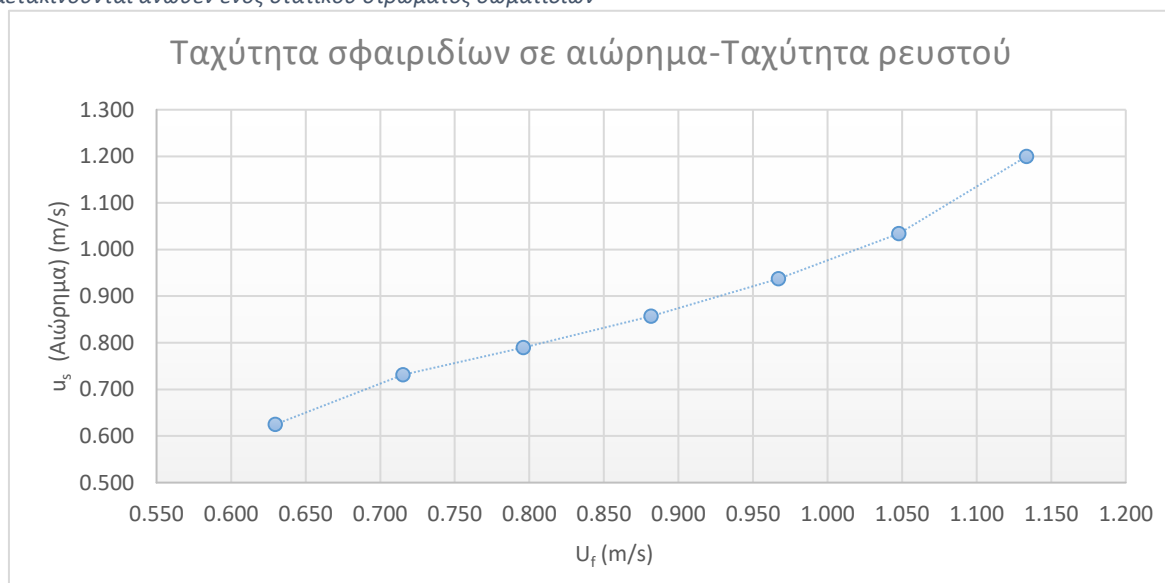


Εικόνα 3.58 Πορεία του σωματιδίου σε αιώρηση που διανύει σε απόσταση 30cm με παροχή 105kg/min

Τα αποτελέσματα του πίνακα 3.33 σε μορφή διαγράμματος έχουν ως εξής :



Διάγραμμα 3.13 Ταχύτητα σφαιριδίων με ταχύτητα ρευστού για διατρητικό ρευστό με ιξώδες 10 cP όταν τα σωματίδια μετακινούνται άνωθεν ενός στατικού στρώματος σωματιδίων



Διάγραμμα 3.14 Ταχύτητα σφαιριδίων με ταχύτητα ρευστού για ρευστό με ιξώδες 10 cP όταν τα σωματίδια αιωρούνται στο στρώμα

Όπως και στα προηγούμενα η ταχύτητα των σωματιδίων αυξάνεται όσο αυξάνεται και η παροχή του ρευστού. Στο διάγραμμα 3.13 διαπιστώνουμε και πάλι πολύ μικρές ταχύτητες σωματιδίων αναλογικά με της ταχύτητες του ρευστού. Αυτό οφείλεται όπως και προηγουμένως στις μεγάλες τριβές που προκαλεί η τραχεία υφή του στρώματος. Όταν η παροχή αυξηθεί αρκετά και τα σωματίδια μπορούν να αιωρηθούν όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα 3.14 , η ταχύτητα των σωματιδίων είναι ίδια με την ταχύτητα του ρευστού. Αυτό οφείλεται στην ανάλυση των οριζόντιων δυνάμεων του συστήματος που η μόνη δύναμη που δέχεται το σωματίδιο είναι η δύναμη

οπισθέλκουσα. Αυτό που είναι ενδιαφέρον σε αυτή τη φάση είναι ότι τα σωματίδια ξεκινάνε να κινούνται σε μια μεγαλύτερη παροχή έναντι του προηγούμενου ρευστού. Στο ρευστό με 1cP τα σωματίδια αρχίζουν να κινούνται σε παροχή 45kg/min ενώ στο ρευστό με 10 cP αρχίσαν με παροχή 57 kg/min. Αυτό οφείλεται κυρίως στο αριθμό Reynolds που έχει χαμηλότερες τιμές. Έτσι ο τύπος της ροής στα αρχικά στάδια είναι στρωτή. Έτσι το προφίλ της ταχύτητα στο κάτω μέρος του στρώματος είναι πολύ χαμηλή και επομένως η ταχύτητα που έχουν τα σωματίδια δεν είναι αρκετή. Η δύναμη της οπισθέλκουσα δεν είναι αρκετή για να υπερνικήσει την στατική τριβή για να αρχίσουν τα σωματίδια να κινούνται.

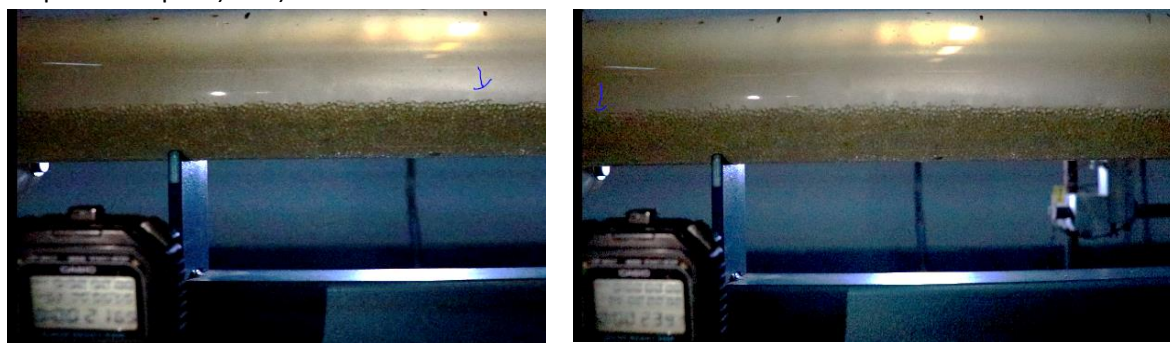
#### 3.4.2.2.1 Αποτελέσματα για διατρητικό ρευστό με φαινόμενο ιξώδες 30 cP

Q	$u_s$ (Στο στερεό) (3.7)	$u_s$ (Αιώρημα) (3.7)	$u_f$ (3.6)	Re(3.9)	Τύπος ροής
(kg/min)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	-	-
55	-	-	0.462	254.20	Στρωτη
57	-	-	0.477	263.98	Στρωτη
60	0.089	-	0.503	280.40	Στρωτη
65	0.094	-	0.543	306.97	Στρωτη
75	0.125	-	0.628	364.57	Στρωτη
85	0.172	-	0.714	423.57	Στρωτη
95	0.190	0.909	0.794	480.26	Στρωτη
105		1.000	0.879	541.61	Στρωτη
115		1.176	0.965	604.02	Στρωτη
125		1.333	1.045	663.67	Στρωτη
135		1.429	1.131	727.93	Στρωτη
145		1.818	1.216	793.05	Στρωτη

Πίνακας 3.34 αποτελεσμάτων για ρευστό με ιξώδες 30 cP

Η διαδικασία εύρεσης των αποτελεσμάτων είναι η ίδια και περιγράφεται πιο πάνω.

Παρουσιάζονται κάποια στιγμιότυπα του πειράματος με κύλιση σωματιδίων με στατικό στρώμα σωματιδίων για ιξώδες 30 cP:



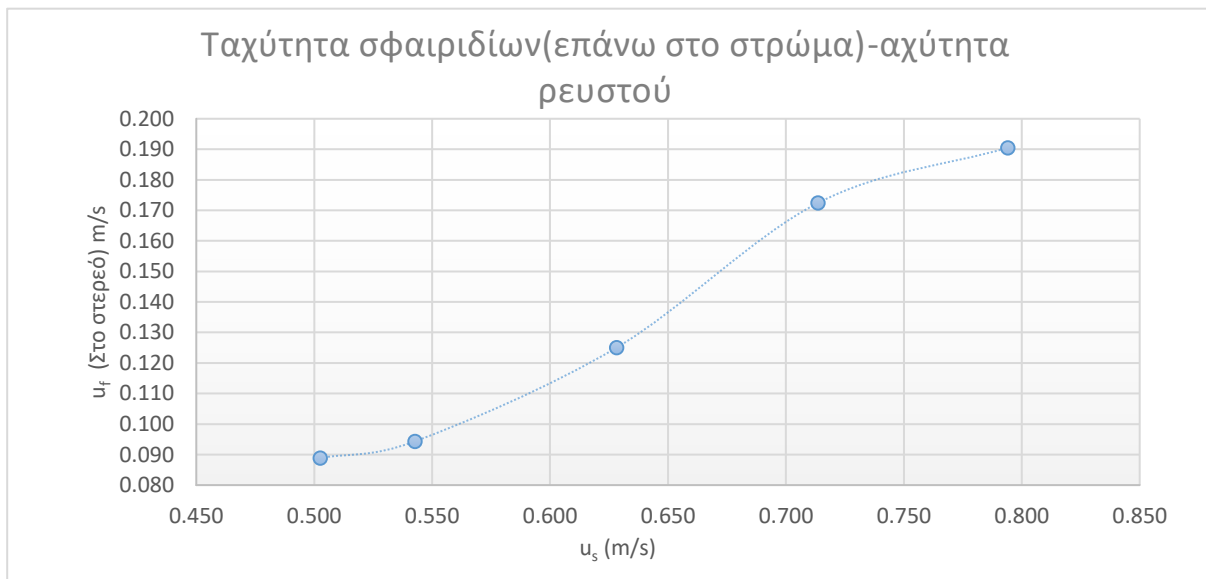
Εικόνα 3.59 Πορεία κύλιση του σωματιδίου στο στρώμα για απόσταση 20cm με παροχή 60kg/min



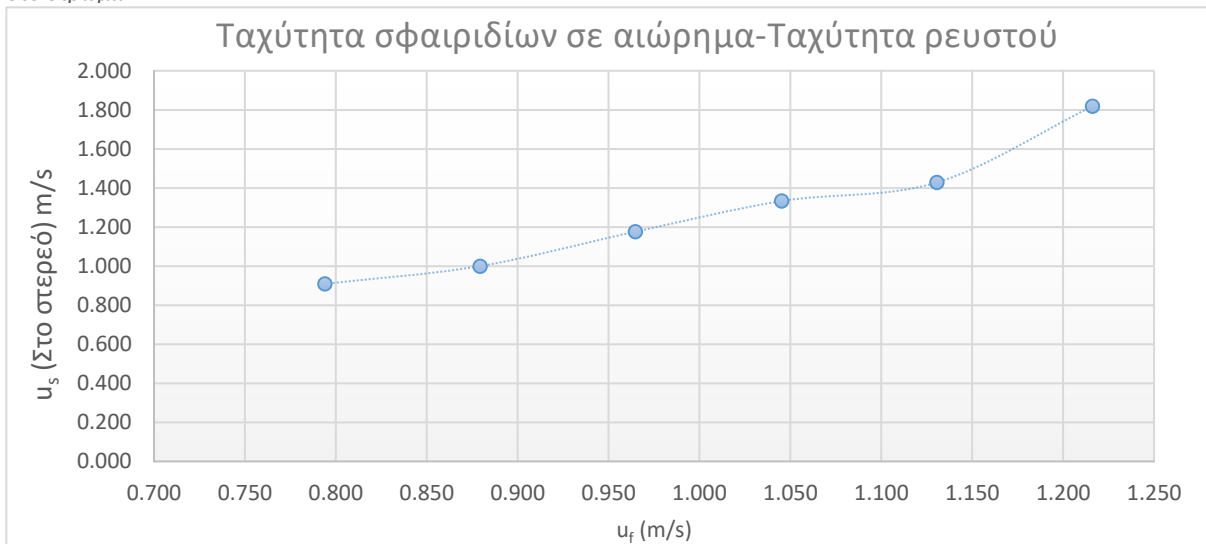


Εικόνα 3.60 Πορεία του σωματιδίου σε αιώρηση που διανύει σε απόσταση 20cm με παροχή 105kg/min

Τα αποτελέσματα σε του πίνακα 3.34 σε μορφή διαγράμματος έχουν ως εξής :



Διάγραμμα 3.15 Ταχύτητα σφαιριδίων με ταχύτητα ρευστού για ρευστό με ιξώδες 30 cP όταν τα σωματίδια κυλάνε επάνω στο στρώμα



Διάγραμμα 3.16 Ταχύτητα σφαιριδίων με ταχύτητα ρευστού για ρευστό με ιξώδες 30 cP όταν τα σωματίδια αιωρούνται

Όπως και στα προηγούμενα η ταχύτητα των σωματιδίων αυξάνεται όσο αυξάνεται και η παροχή του ρευστού. Στο διάγραμμα 3.15 διαπιστώνουμε και πάλι πολύ μικρές ταχύτητες σωματιδίων αναλογικά με της ταχύτητες του ρευστού. Αυτό οφείλεται όπως και προηγουμένως στις μεγάλες τριβές που προκαλεί η τραχεία υφή του στρώματος. Όπως και προηγουμένως τα σωματίδια ξεκινάνε να κινούνται σε μια μεγαλύτερη παροχή έναντι του προηγούμενων ρευστών. Σε αυτό το ρευστό αρχίζουν να κινούνται σε παροχή 60kg/min. Αυτό οφείλεται κυρίως στο αριθμό Reynolds που έχει χαμηλότερες τιμές. Ο τύπος της ροής είναι στρωτή σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Μεγάλο ενδιαφέρον δείχνουν τα δεδομένα του διαγράμματος 3.16, όπου η ταχύτητα των σωματιδίων είναι μεγαλύτερη από τη μέση ταχύτητα του ρευστού. Αυτό είναι λόγω του ότι το ρευστό έχει στρωτή ροή και όπως αναφερθήκαμε στο υποκεφάλαιο 2.4.1 η ταχύτητα μπορεί να φτάσει μέχρι 2 φορές τη μέση ταχύτητα του ρευστού. (Εικόνα 2.4)

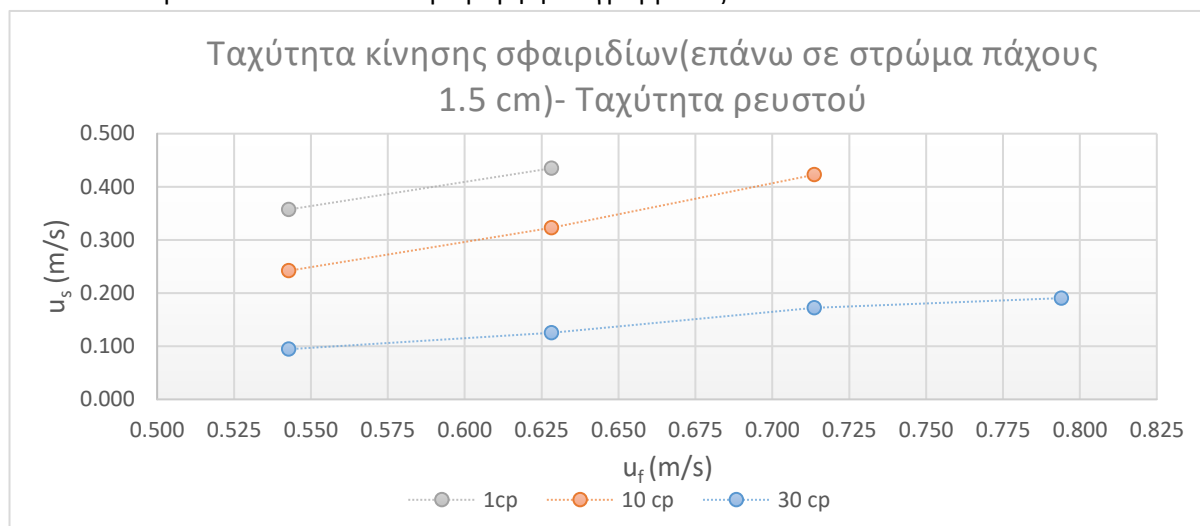
#### 3.4.2.2.2 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Μια αναλυτική σύγκριση των τριών διαφορετικών ρευστών δείχνει πως επιδρά το ιξώδες στη κίνηση των σωματιδίων. Στον πιο κάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα του συστήματος, όπως και η αναλογία ταχύτητας σωματιδίου και ταχύτητας ρευστού:

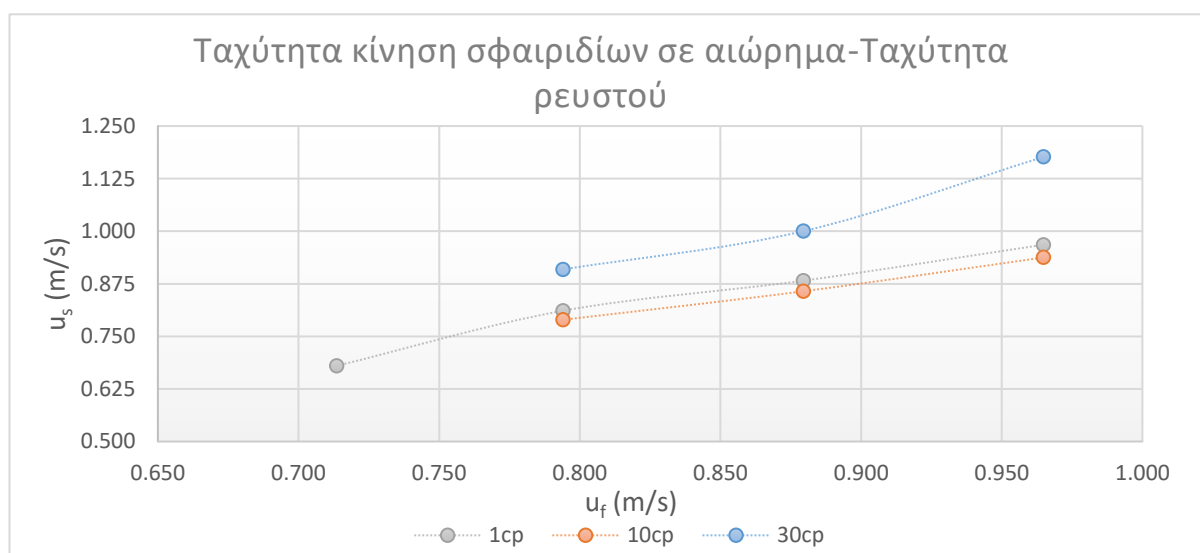
Φαινόμενο ιξώδες		30cP	10cP	1cP
Q	$u_f$	$u_s$ (Στο στερεό)	$u_s$ (Στο στερεό)	$u_s$ (Στο στερεό)
(kg/min)	(m/s)	(m/s)	(m/s)	
65	0.543	0.094	0.242	0.357
75	0.628	0.125	0.323	0.435
85	0.714	0.172	0.423	-
95	0.794	0.190	-	-
Q (kg/min)	$u_f$ m/s	$u_s$ (Αιώρημα) (m/s)	$u_s$ (Αιώρημα) m/s	$u_s$ (Αιώρημα) m/s
85	0.714	-	-	0.680
95	0.794	0.909	0.789	0.811
105	0.879	1.000	0.857	0.882
115	0.965	1.176	0.938	0.968

Πίνακας 3.35 Συνοπτικός πίνακας με όλα τα αποτελέσματα του συστήματος με διαφορετικό ιξώδες

Τα αποτελέσματα του πίνακα 3.35 με μορφή διαγράμματος είναι:



Διάγραμμα 3.17 Συνοπτικό διάγραμμα ταχύτητα σωματιδίου που κινείται επάνω στο στρώμα και ταχύτητας ροής



Διάγραμμα 3.18 Συνοπτικό διάγραμμα ταχύτητα σωματιδίου σε αιώρηση και ταχύτητας ροής

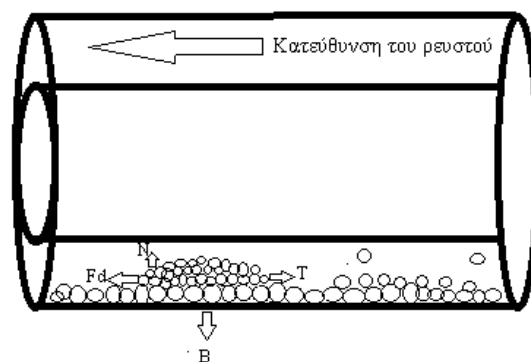
Στο διάγραμμα 3.17 παρατηρούμε πως τα σωματίδια μέσα στο νερό με ιξώδες 1 cP κινούνται επάνω στο στρώμα με μεγαλύτερη ταχύτητα από τα σωματίδια μέσα σε ρευστό με φαινόμενο ιξώδες 10 cP και αντίστοιχα αυτό έχει μεγαλύτερη ταχύτητα από τα σωματίδια μέσα σε ρευστό με φαινόμενο ιξώδες 30cP. Αυτό οφείλεται στο αριθμό Reynolds που είναι μεγαλύτερος όσο το ιξώδες μικραίνει. Ακόμα τα σωματίδια μέσα στο νερό με ιξώδες 1cP έρχονται πιο γρήγορα σε αιώρηση. Αυτό είναι λόγω του τύπου του ρευστού που είναι σε τυρβώδη ροή και δημιουργεί μεγαλύτερες αναταράξεις στο προφίλ της ταχύτητας. Στο διάγραμμα 3.18 τα σφαιρίδια με φαινόμενο ιξώδες 30cP αιωρούνται με μεγαλύτερες ταχύτητες από τη μέση ταχύτητα του ρευστού ενώ το ρευστό με φαινόμενο ιξώδες 10cP και μέσα στο νερό με ιξώδες 1 cP κινούνται με την ίδια ταχύτητα του



ρευστού. Αυτό οφείλεται στο προφίλ της ταχύτητας που στο ρευστό με φαινόμενο ιξώδες 30 cP είναι σε στρωτή ροή και επομένως η ταχύτητα μπορεί να φτάσει μέχρι 2 φορές τη μέση ταχύτητα του ρευστού. Το ρευστό με φαινόμενο ιξώδες 10cP έχει μια ενδιαμέση συμπεριφορά. Στην αρχή έχει στρωτή ροή γι' αυτό και τα σωματίδια αργούνε να έρθουν σε αιώρηση. Μετά αλλάζει η κατάσταση της ροής σε τυρβώδη και έτσι τα σωματίδια αιωρούνται με μια ταχύτητα κοντά στη ταχύτητα του ρευστού.

### 3.4.2.3 Η μεταφορά σωματιδίων με τη μορφή λόφων (dunes)

Για την περίπτωση που τα σωματίδια έρχονται με μορφή λόφων (dunes) έχουμε το εξής σύστημα:



Εικόνα 3.61 Ισορροπία δυνάμεων κατά τη κύλιση σωματιδίων με μορφή λόφου σε ροή μέσα σε δακτυλιοειδή σωλήνα όταν υπάρχει στρώμα.  $N$ : Άνωση,  $B$ : Βαρύτητα,  $F_d$ : Οπισθέλκουσα,  $T$ : Τριβή

Το φαινόμενο με τη κύλιση σωματιδίων με μορφή λόφων (dunes) έγινε πιο αισθητό σε πιο τυρβώδεις καταστάσεις. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι εξαιτίας του προφίλ της ταχύτητας που δημιουργεί τεράστιες αναταράξεις και ο στη συγκέντρωση των σωματιδίων στο δακτυλιοειδή αγωγό. Το φαινόμενο αυτό είχε μια σταθερή περίοδο που επαναλαμβάνεται σε κάποιο συγκεκριμένο χρόνο. Ήταν δυνατό να υπολογιστεί η συχνότητα αυτή και ακόμα η ταχύτητα που κινείται μέσα στο δακτυλιοειδή αγωγό. Όταν dunes είχε κάνει την διαδρομή στον αγωγό, παρατηρήθηκε ότι το ύψος του στρώματος είχε χαμηλώσει. Ακόμη τα σωματίδια που κινούνταν επάνω στο χαμηλότερο στρώμα είχαν πιο μικρή ταχύτητα. Αυτό οφείλεται στην εξίσωση της συνέχειας (3.6) (equation of continuity) όπως αναφερθήκαμε πιο πάνω. Τα σωματίδια που αιωρούνται θα πρέπει να κινούνται με την ταχύτητα του ρευστού αφού η μόνη δύναμη που δέχονται είναι η δύναμη της οπισθέλκουσας μέχρι να καθιζάνουν κάτω λόγω της ταχύτητας καθίζησης. (Dabirian, Gavrielatos, Mohan, & Shoham, 2019)

(Kelessidis & Mpandelis, "Flow Patterns and Minimum Suspension Velocity for Efficient Cuttings Transport in Horizontal and Deviated Wells in Coiled-Tubing Drilling", 2003)

#### 3.4.2.3.1 Αποτελέσματα σε συνθήκες ροής dunes για διατρητικό ρευστό με ιξώδες 1 cP

Για ιξώδες 1cP , όπου το ρευστό ήταν απλό νερό τα αποτελέσματα ήταν:

Q	Περίοδος	$U_{dunes}$	$U_f$
(kg/min)	(s)	(m/s)	(m/s)
45	Δεν υπάρχει	Δεν υπάρχει	0.378
55	Δεν υπάρχει	Δεν υπάρχει	0.463
65	32.91	0.018	0.544
75	26.52	0.044	0.630
85	14.22	0.055	0.715
95	12.34	0.088	0.796
105	6.8	0.114	0.882
115	5.41	0.184	0.967

Πίνακας 3.36 Πίνακας αποτελεσμάτων για ρευστό με ιξώδες 1cP

Η διαδικασία ήταν να βρεθεί η περίοδος του λόφου (dunes) σε κάθε παροχή , δηλαδή κάθε πόσα δευτερόλεπτα περνάει ένα καινούργιος λόφος (dunes). Τα αποτελέσματα είναι στη στήλη 2 του πίνακα 3.36. Μετέπειτα μετρήθηκε ο χρόνος που ήθελε ο λόφος(dunes) να διανύσει μια συγκεκριμένη απόσταση για την εύρεση της ταχύτητας του. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στη στήλη 3 του πίνακα 3.36.

Παρουσιάζονται κάποια στιγμιότυπα του πειράματος με κύλιση των λόφων (dunes) με στατικό στρώμα σωματιδίων για ιξώδες 1 cP:



Εικόνα 3.62 Εκκίνηση λόφου , Τελική πορεία λόφου για απόσταση 30cm , ξανά εμφάνιση του λόφου για παροχή 65kg/min



Εικόνα 3.64 Εκκίνηση λόφου , Τελική πορεία λόφου για απόσταση 30cm , ξανά εμφάνιση του λόφου για παροχή 85kg/min



Εικόνα 3.65 Εκκίνηση λόφου , Τελική πορεία λόφου για απόσταση 30cm , ξανά εμφάνιση του λόφου για παροχή 95kg/min

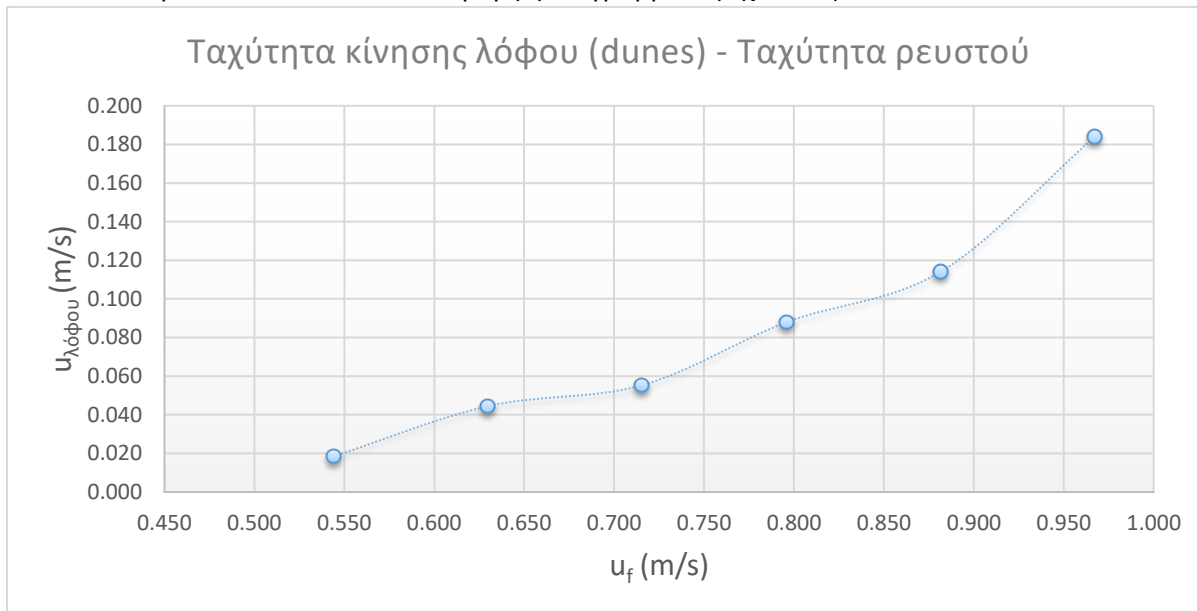


Εικόνα 3.66 Εκκίνηση λόφου , Τελική πορεία λόφου για απόσταση 30cm , ξανά εμφάνιση του λόφου για παροχή 105kg/min

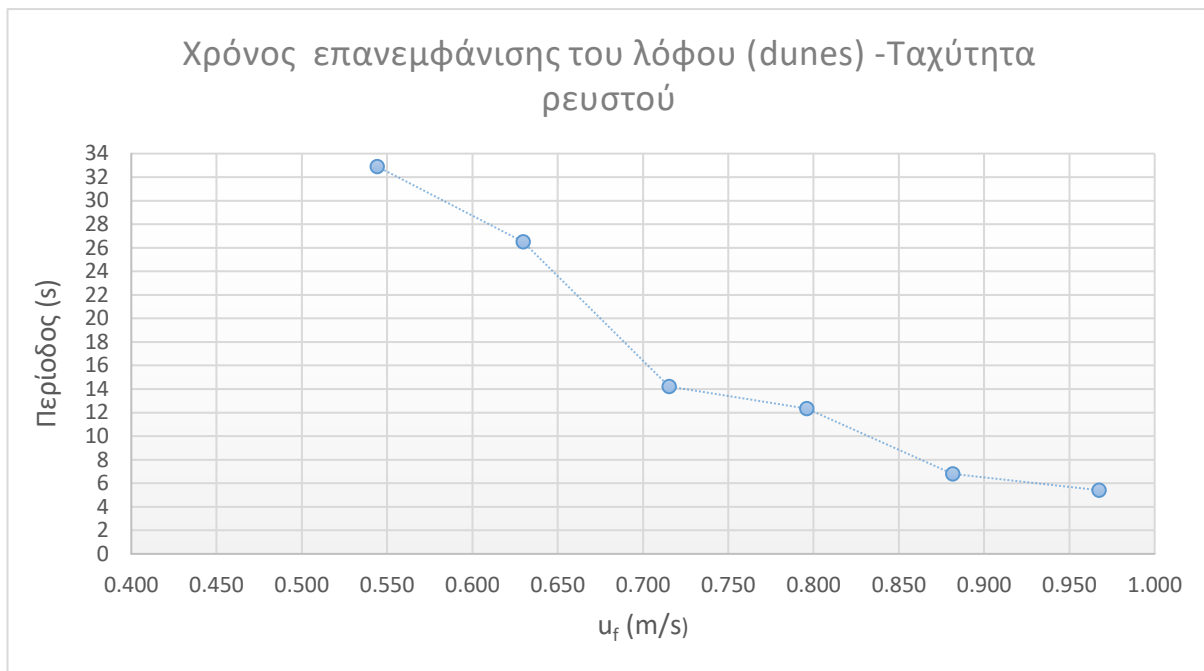


Εικόνα 3.67 Εκκίνηση λόφου , Τελική πορεία λόφου για απόσταση 30cm , ξανά εμφάνιση του λόφου για παροχή 115kg/min

Τα αποτελέσματα του πίνακα 3.36 σε μορφή διαγράμματος έχουν ως :



Διάγραμμα 3.19 Ταχύτητα λόφου (dunes) με ταχύτητα ρευστού για ρευστό με ιξώδες 1cP



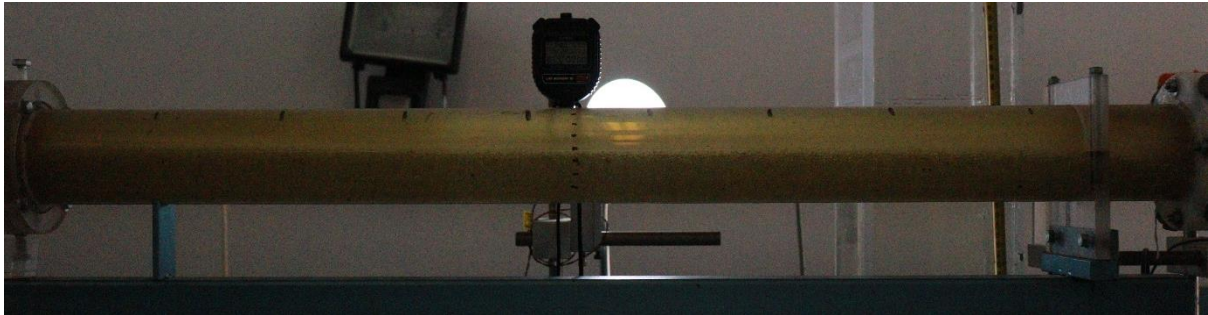
Διάγραμμα 3.20 Περίοδος του κινούμενων λόφων με τη ταχύτητα του ρευστού

Το πείραμα έγινε μόνο για το νερό με ιξώδες 1cP που ο σχηματισμός και κίνηση των λόφων (dunes) ήταν ικανοποιητικός για να παρθούν μετρήσεις. Από τα διαγράμματα 3.19 και 3.20 παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται είναι η παροχή του ρευστού αυξάνεται και η ταχύτητα που κινείτε ο λόφος(dunes). Ακόμη όσο αυξάνεται η παροχή τόσο μικραίνει η περίοδο εμφάνισης των λόφων (dunes). Για τα ρευστά με φαινόμενο ιξώδες 10cP και 30cP τα λοφάκια (dunes) καταστρέφονταν κατά την πορεία του αγωγού ή ήταν πολύ μικρά για να υπάρξει καθαρή εικόνα. Αυτό συμβαίνει λόγω ότι τα ρευστά με φαινόμενο ιξώδες 10cP και 30cP δεν δημιουργούν αρκετές αναταράξεις για την δημιουργία dunes.

### 3.4.3 Καθαρισμός

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η διαδικασία και οι μετρήσεις που έχουν γίνει για το πιο από τα ρευστά μπορεί να αδειάσει πιο γρήγορα τον δακτυλιοειδή αγωγό από τα σωματίδια. Η μεθοδολογία ήταν να γεμίσουμε όσο μπορούμε το δακτυλιοειδή αγωγό στην περιοχή που ασχολούμαστε με εκκεντρότητα ίση με 0. Η περιοχή είχε μήκος 1m και διατομή  $E = 0.00259\text{m}^2$  ενώ το πάχος του στρώματος ήταν  $h=1.5\text{cm}$ . Ακολουθώντας, κλείνοντας τον αναδευτήρα, εμποδίζοντας έτσι την εισαγωγή σωματιδίων. Επομένως γινόταν κινητοποίηση του στατικού στρώματος που έχει

δημιουργηθεί και τελικά αδειάζει ο αγωγός. Τότε μετρούσαμε το χρόνο που θέλει η περιοχή της στήλης να αδειάσει τελείως.



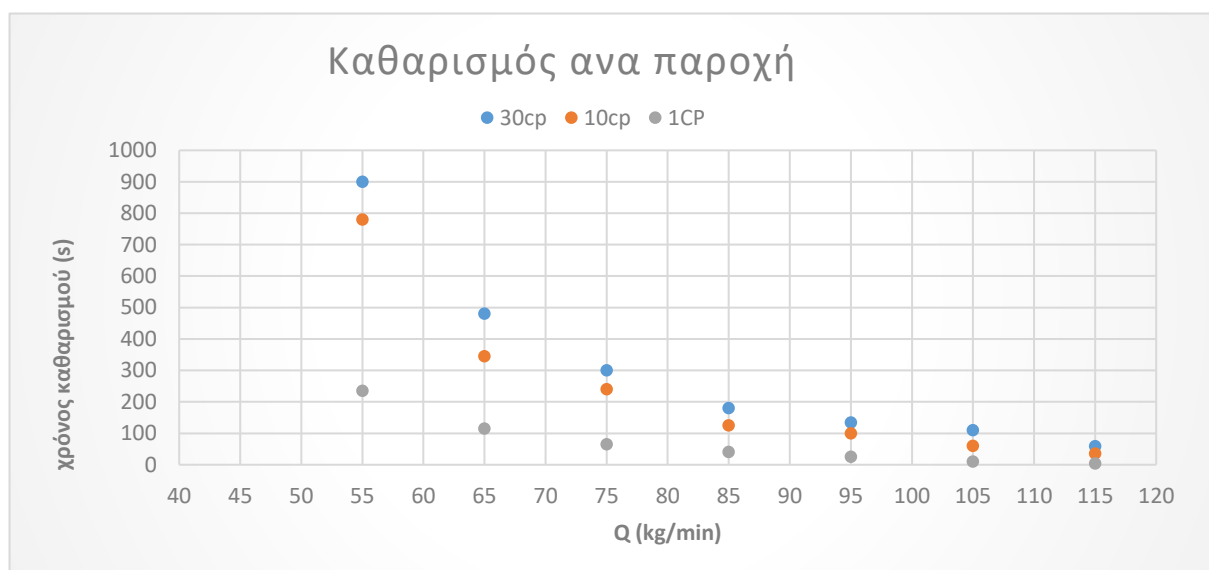
Εικόνα 3.68 Ποσότητα σωματιδίου στο αγωγό

Τα αποτελέσματα του πειράματος ήταν:

30cP		10cP		1cP	
Q	Χρόνος	Q	Χρόνος	Q	Χρόνος
(kg/min)	(s)	(kg/min)	(s)	(kg/min)	(s)
55	900	55	780	55	235
65	480	65	345	65	115
75	300	75	240	75	65
85	180	85	125	85	40
95	134	95	100	95	25
105	110	105	60	105	10
115	59	115	35	115	4

Πίνακας 3.37 Χρόνου καθαρισμού για διαφορετικό ιξώδες

Τα αποτελέσματα του πίνακα 3.37 σε μορφή διαγράμματος έχουν ως εξής:



Διάγραμμα 3.21 Χρόνος καθαρισμού σωματιδίου ανά παροχή για κάθε ιξώδες

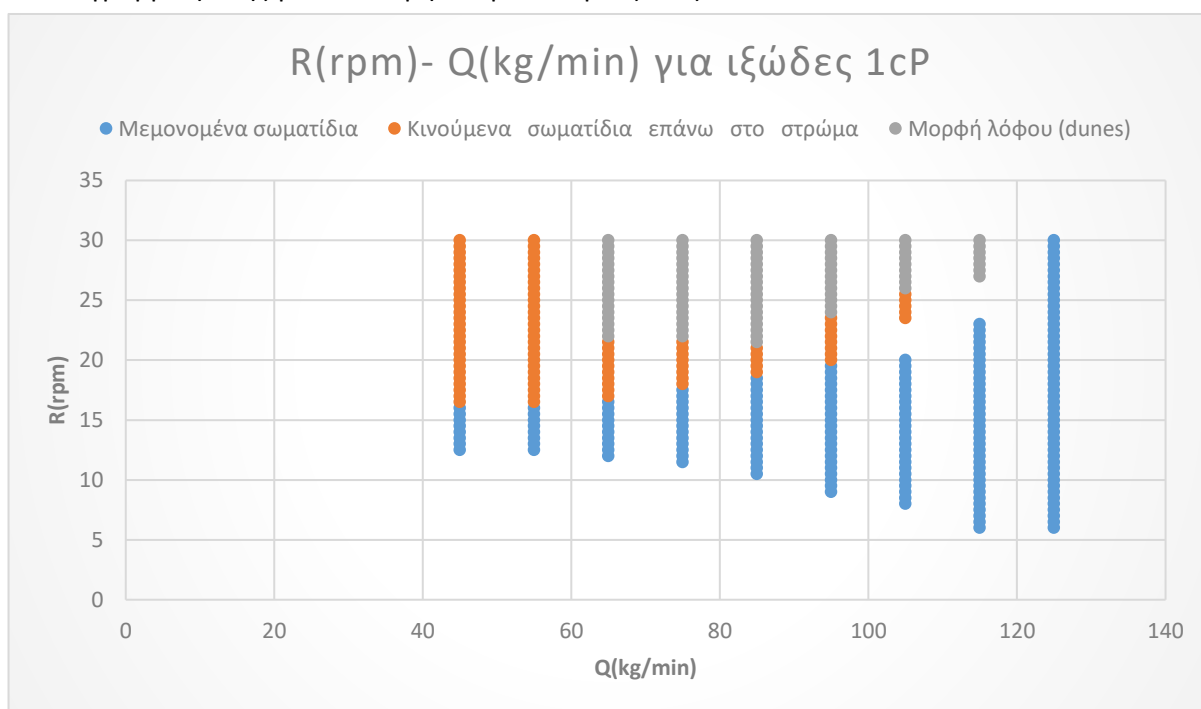
Το ρευστό το οποίο καθαρίζεται πιο γρήγορα είναι το ρευστό με ιξώδες 1 cP. Ακόμη ο καθαρισμός γινόταν πιο ομοιόμορφος , δηλαδή σε όλο το πάχος του στρώματος των σωματιδίων. Αυτό οφείλεται στη τυρβώδη ροή του και τις τεράστιες αναταράξεις που δημιουργεί στο προφίλ της ταχύτητας σε όλο το ύψος της στήλης (Εικόνα 2.4). Το ρευστό με ιξώδες 10 cP καθαρίζεται λίγο πιο γρήγορα από το ρευστό 30 cP και αυτό οφείλεται στο ότι και τα δύο έχουν στρωτή ροή. Έτσι στη στρωτή ροή δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές. Παρατηρήθηκε ακόμη στα δυο ρευστά πως ο καθαρισμός δεν ήταν ομοιόμορφος. Αρχικά καθαριζόταν το πάνω μέρος του στρώματος και μετά ακολουθούσε το κάτω μέρος του στρώματος. Αυτό οφείλεται και πάλι στο προφίλ της ταχύτητας (Εικόνα 2.4)



### 3.4.4 Διάγραμμα φάσεων

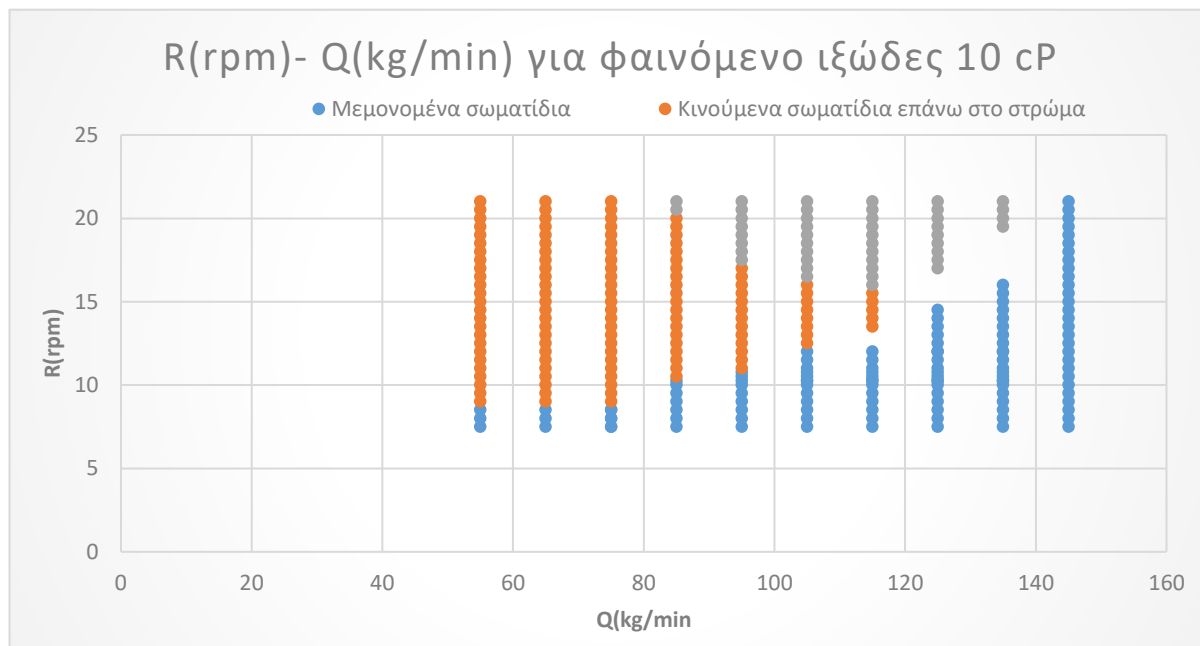
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ένα διάγραμμα φάσης για κάθε ρευστό. Το διάγραμμα φάσης απεικονίζει ποιο σύστημα από τα 3 που αναφέρθηκαν πιο πάνω θα σχηματιστεί στον αγωγό. Αυτό προσδιορίζεται μέσω των διαγραμμάτων από την παροχή του ρευστού και τις στροφές του αναδευτήρα ανά λεπτό (R). Η στροφές του αναδευτήρα (R) εξυπηρετούσαν για την αιώρηση των σωματιδίων μέσα στη δεξαμενή και μετέπειτα προς τον σύστημα του δακτυλιοειδούς αγωγού. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των στροφών τόσο περισσότερα σωματίδια ανυψώνονται στη δεξαμενή και επομένως στον δακτυλιοειδή αγωγό. Έτσι ο αριθμός των στροφών του αναδευτήρα μας βοηθούσε για να έχουμε την επιθυμητή ποσότητα μέσα στο δακτυλιοειδή αγωγό. Βέβαια ο ακριβής αριθμός της ποσότητας των σωματιδίων που μπαίνει και βγαίνει από τον αγωγό δεν μπορεί να προσδιοριστεί όπως γίνεται στις πραγματικές οριζόντιες γεωτρήσεις.

Το διάγραμμα φάσης για το διατρητικό ρευστό με ιξώδες 1 cP είναι:



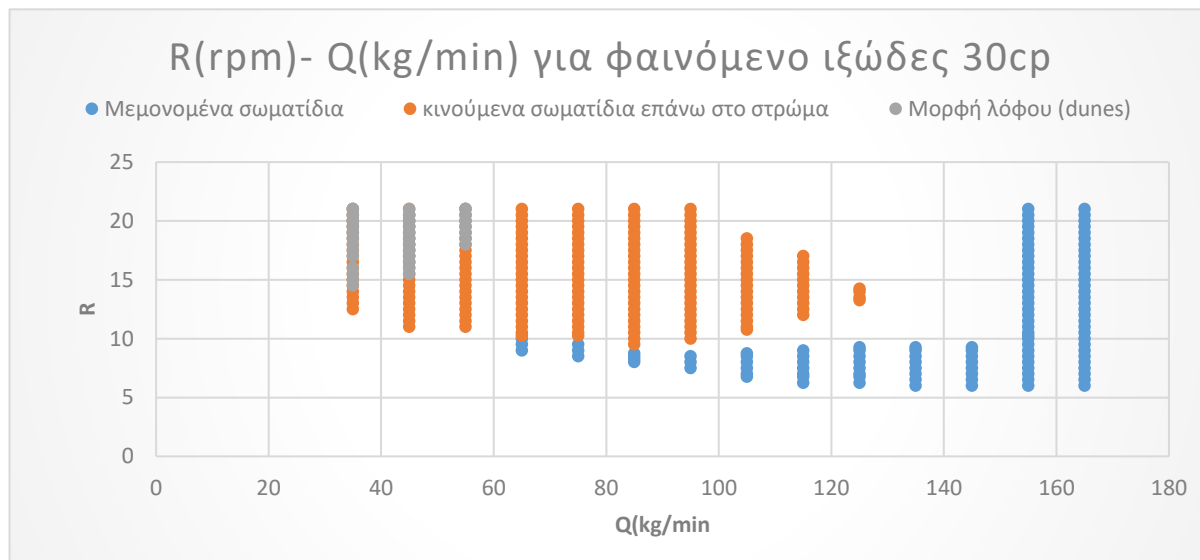
Διάγραμμα 3.22 Διάγραμμα φάσης για διατρητικό ρευστό το νερό με ιξώδες 1cP

Το διάγραμμα φάσης για το διατρητικό ρευστό με φαινόμενο ιξώδες 10 cP είναι:



Διάγραμμα 3.23 Διάγραμμα φάσης για διατρητικό ρευστό με φαινόμενο ιξώδες 10 cP

Το διάγραμμα φάσης για το διατρητικό ρευστό με φαινόμενο ιξώδες 30 cP είναι:



Διάγραμμα 3.24 Διάγραμμα φάσης για διατρητικό ρευστό με φαινόμενο ιξώδες 30 cP

Στα πιο πάνω διαγράμματα τα κενά σημεία που παρουσιάζονται στις αρχικές παροχές είναι λόγω της ταχύτητας του ρευστού η οποία δεν είχε την απαραίτητη δύναμη να τα σπρώξει μέσα στο δακτυλιοειδή αγωγό. Τα κενά σημεία που έχουν τα διαγράμματα στις μεγάλες παροχές είναι εξαιτίας



του μεταβατικού σταδίου από το ένα σύστημα στο άλλο ή λόγω του φαινόμενου κινούμενου στρώματος όπως αναφέρεται στην εικόνα 3.35. Όπως παρατηρούμε από τα διαγράμματα το ρευστό με ιξώδες 1cP δεν μπορεί να σχηματίσει στρώμα σε μεγάλες παροχές, μέχρι 115 kg/min. Το ρευστό με ιξώδες 10cP μέχρι 135 kg/min ενώ το ρευστό με ιξώδες 30 cP μέχρι 145kg/min. Επομένως όσο πιο μικρό είναι το ιξώδες του ρευστού σε ίδιες ταχύτητες και διάμετρο αγωγού δυσκολεύει το σχηματισμό στρώματος με θραύσματα μέσα σε μία γεώτρηση. Ακόμη, το ρευστό με το μικρό ιξώδες παρατηρούμε ότι υπάρχουν περισσότερες περιοχές με το σύστημα μεμονωμένου σωματιδίου και κινούμενων λόφων(dunes). Επίσης, όσο πιο μεγάλο είναι το ιξώδες σε ένα ρευστό έχουμε περισσότερες περιοχές μεταβατικού σταδίου ή κινούμενου στρώματος έναντι των ρευστών με μικρό ιξώδες.

## Κεφάλαιο 4: Συμπεράσματα και Μελλοντικές εργασίες για έρευνα

### 4.1 Συμπεράσματα

Στη παρούσα διπλωματική εργασία αναπτυχθήκαν τρεις βασικούς μηχανισμούς μεταφορά στερεών σωματιδίων σε οριζόντιο δακτύλιο. Τα συστήματα αυτά ήταν η μεταφορά μεμονωμένων σωματιδίων χωρίς στρώμα, η μεταφορά μεμονωμένων σωματιδίων άνωθεν ενός στατικού στρώματος σωματιδίων και η μεταφορά σωματιδίων με τη μορφή λόφων (dunes). Στο κάθε μηχανισμό μεταφοράς διαπιστώσαμε πως όσο πιο λεπτόρρευστο είναι το ρευστό τόσο καλύτερα γίνεται η μεταφορά των θραυσμάτων. Ακόμη η συσσώρευση των θραυσμάτων στο κάτω μέρος του δακτυλίου ήταν πιο δύσκολο να σχηματιστή. Επίσης η αιώρηση των θραυσμάτων γινόταν πιο εύκολη όσο πιο λεπτόρρευστο ήταν το ρευστό. Η δημιουργία των λόφων (dunes) ήταν πολύ εμφανείς σε πιο λεπτόρρευστα ρευστά και διάρκεια κίνησης τους ήταν συνεχής με μια σταθερή συχνότητα.

Επίσης, έγινε μέθοδος καθαρισμού της στήλης όταν ήταν γεμάτη από στερεά σωματίδια. Διαπιστώθηκε ότι όσο πιο λεπτόρρευστο είναι το ρευστό τόσο πιο γρήγορα και ομοιόμορφα καθαρίζεται ο δακτυλιοειδής αγωγός.

Τέλος με βάση των πειραμάτων αναπτυχθήκαν διαγράμματα φάσεων για το κάθε ρευστό. Διαπιστώθηκε ότι όσο πιο λεπτόρρευστο ήταν το ρευστό τόσο πιο δύσκολο να σχηματιστή στατικό στρώμα. Ακόμη σε λεπτόρρευστα ρευστά είναι πιο εύκολη η δημιουργία των κινούμενων λόφων (dunes). Επίσης, παρατηρήθηκε ότι όσο πιο παχύρρευστο είναι το ρευστό τόσο μεγαλύτερη πιθανότητα δημιουργίας κινούμενου στρώματος.

### 4.2 Μελλοντικές Εργασίες

Μέσα από την εργασία και την μελέτη του θέματος της διπλωματικής όλο αυτόν το καιρό προέκυψαν καινούργιες ιδέες για περαιτέρω έρευνα στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής. Η προτάσεις μου για μελλοντική μελέτη είναι:

1. Κατ' αρχήν να μελετηθεί ξανά πειραματικά οι συνθήκες επικάθησης και επανεκκίνησης των θραυσμάτων σε οριζόντιες γεωτρήσεις όμως αυτή την φορά σε έκκεντρο σημείο του σωλήνα
2. Να μελετηθεί η μεταφορά στερεών σωματιδίων σε διάφορες κλίσεις του δακτυλίου

3. Να μελετηθεί πειραματικά η κίνηση των θραυσμάτων σε οριζόντιες γεωτρήσεις με πυκνότητα ίση με το ρευστό της γεώτρησης.
4. Να μελετηθεί πειραματικά η επίδραση διάφορων συνθηκών στο ποσοστό καθαρισμού του συστήματός με στόχο την εύρεση ενός πιο αποτελεσματικού τρόπου βάσης απόδοσης, χρόνου και οικονομικής άποψης
5. Μελέτη της λειτουργίας του συστήματος και μεταφοράς σωματιδίων σε μια κατάσταση τριφασικής ροής (αέρας + νερό + στερεά).

## Ονοματολογία

A : Δύναμη της άνωσης (N)

$A_p$  : Εμβαδόν του στερεού

B: Δύναμη της βαρύτητας (N)

$C_D$  : Συντελεστής οπισθέλκουσας

$C_L$  : συντελεστής ανύψωσης

d: διάμετρος του αγωγού ( m)

$d_p$ : διάμετρος σωματιδίου (m)

$d_{p*}$ : διάμετρος σωματιδίου χωρίς διαστάσεις

$d_o$ : εξωτερική διάμετρος δακτυλίου (m)

$d_i$ : εσωτερική διάμετρος δακτυλίου (m)

$d_h$ : υδραυλική διάμετρος (m)

E: Εμβαδόν δακτυλίου

$E^*$ : Εμβαδόν δακτυλίου με στατικό στρώμα σωματιδίου

$\epsilon$ : Εμβαδόν στατικού στρώματος σωματιδίου

$F_d$ : Δύναμη της Οπισθέλκουσας (N)

$F_g$  : Δύναμη της πραγματικής βαρύτητας (N)

g : επιτάχυνση της βαρύτητας ( $m/s^2$ )

$h$ : πάχος στατικού στρώματος σωματιδίων (cm)

$K$ : δείκτης συνάφειας ( consistency index)

$L$  : δύναμη ανύψωσης (N)

$m_p$  : μάζα σωματιδίου (kg)

$n$  = δείκτης συμπεριφορά της ροής (flow – behaviour index)

$\rho_f$  : πυκνότητα ρευστού ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\rho_p$  : πυκνότητα σφαιριδίου ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$Q$  : Παροχή συστήματος ( $\text{kg}/\text{min}$ )

$R$ : ακτίνα σωματιδίου (m)

$Re$ : Αριθμός Reynolds

$Re_n$  : είναι ο τροποποιημένος αριθμος Reynolds

$r$ : εξωτερική ακτίνα δακτυλίου (cm)

$u_f$  : ταχύτητα ρευστού (m/s)

$u_s$  : Οριζόντια ταχύτητα σφαιριδίου (m/s)

$u_{dunes}$  : Ταχύτητα των λόφων (dunes)

$u_y$  : Ταχύτητα καθίζησης (m/s)

$u_{y*}$ : Ταχύτητα καθίζησης χωρίς διαστάσης

$V_p$  : όγκος σωματιδίου ( $\text{m}^3$ )

$\chi_n$  : διορθωτικός συντελεστής οπισθέλκουσας

$\alpha$ : εσωτερική ακτίνα δακτυλίου (cm)

$\mu$ : ιξώδες ( $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ )

## Βιβλιογραφία

- Adari, R., Miska, S., Kuru, E., Bern, P., & Saasen, A. (2000, October 1-4). Selecting Drilling Fluid Properties and Flow Rates For Effective Hole Cleaning in HighAngle and Horizontal Wells. *SPE 63050*, σσ. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, October 2000.
- Adewole, J., & Muritala, K. (2019, February 16). "Some applications of natural polymeric materials in oilfield operations: a review". *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 9, σσ. 2297–2307.
- Ali Piroozian, I. I. (2012). "Impact of drilling fluid viscosity, velocity and hole inclination on cuttings transport in horizontal and highly deviated wells". *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 2, σσ. Pages 149–156.
- Amirault, S. (2020). *Transitional Flow*. Ανάκτηση από S.B.A. Invent: <https://sbainvent.com/fluid-mechanics/transitional-flow/>
- AOGHS. (2006, September 1). *Making Hole – Drilling Technology*. Ανάκτηση από American Oil & Gas Historical Society: <https://aoghs.org/technology/oil-well-drilling-technology/>
- Aoghs. (2016, April 14). *First American Oil Well*. Ανάκτηση από American oil & gas historical society: <https://aoghs.org/petroleum-pioneers/american-oil-history/>
- Appraisal and development*. (2020). Ανάκτηση από Delek Drilling: <https://www.delekdrilling.com/geology/appraisal-and-development>
- Batrana, M., & Daggez, A. (2010). *Drilling and Completion of horizontal wells*.
- Bilgesu, H., Mishra, N., & Ameri, S. (2007, October 17). "Understanding the Effect of Drilling Parameters on Hole Cleaning in Horizontal and Deviated Wellbores Using Computational Fluid Dynamics". *Paper presented at the Eastern Regional Meeting, Lexington, Kentucky USA, October 2007*, σσ. Paper Number: SPE-111208-MS.
- Bingham plastic model*. (2021). Ανάκτηση από Oilfield Glossary: [https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/b/bingham\\_plastic\\_model.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/b/bingham_plastic_model.aspx)
- Blowout (well drilling)*. (2010, Juny 19). Ανάκτηση από wikipedia: [https://en.wikipedia.org/wiki/Blowout\\_\(well\\_drilling\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Blowout_(well_drilling))
- Boxue, P., Shuyan, W., Guodong, L., Xiaoxue, J., Huilin, L., & Zhenjie, L. (2018, April 15). "Numerical prediction of flow behavior of cuttings carried by Herschel-Bulkley fluids in horizontal well using kinetic theory of granular flow". *Powder Technology*, σσ. Volume 329, 15 April 2018, Pages 386-398.
- Cable-tool drilling (Percussion Drilling)*. (2018, 02 28). Ανάκτηση από oilfieldteam: <https://oilfieldteam.com/en/a/learning/Cable-tool-drilling-280218>

- Caenn, R., Darley, H., & Gray, G. (2017). "Chapter 3 - Evaluating Drilling Fluid Performance". *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids (Seventh Edition)*, σσ. Pages 55-91.
- Carboxymethyl Cellulose Sodium (CMC)-Oil Drilling Grade*. (2020). Ανάκτηση από IRO Group Inc.: <https://www.irochemical.com/product/Mud-Drilling/CMC.htm>
- Ceylan, K., Herdem, S., & Abbasov, T. (1999). "A theoretical model for estimation of drag force in the flow of non-newtonian fluids around spherical solid particles". *Powder Technology*, Volume 103, Issue 3 , Pages 286 - 291.
- Costa, C., Vargas, P., Fonseca, B., Naccache, M., & Mendes, P. d. (2019). "Rheological Characterization of Carbopol® Dispersions in Water and in Water/Glycerol Solutions". *MDPI*, σσ. Fluids 2019, 4(1), 3; <https://doi.org/10.3390/fluids4010003>.
- Dabirian, R., Gavrielatos, I., Mohan, R., & Shoham, O. (2019). "Experimental investigation and modeling of moving bed to moving dunes transition". *Powder Technology*, Pages 262-268 Volume 357.
- Dahlem, A. (2013, 06 17). "Automatic Adjustment of Drilling Fluid Properties". *Διπλωματική Εργασία -University of Stavanger - Faculty of Science and Technology*. Ανάκτηση από Automatic Adjustment of Drilling Fluid Properties: <https://core.ac.uk/download/pdf/52078401.pdf>
- Deng, K. A. (2016, October 15). *Directional Drilling*. Ανάκτηση από <https://directionaldrillingkon.blogspot.com/2016/10/introduction-directional-drilling-has.html>
- Drill\_solids*. (2021). Ανάκτηση από Oilfield Glossary: [https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/d/drill\\_solids.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/d/drill_solids.aspx)
- Drilling tools and deflection methods. (1996). <https://www.slideshare.net/AliAlghamdi16/drilling-tools-and-deflection-methods>.
- ekomeri. (2015). *Drilling fluid : Type and Function*. Ανάκτηση από <https://medium.com/@ekomeri/drilling-fluid-type-and-function-9ff851aafcbf>
- Evolution of directional drilling since 1900* . (n.d.). Ανάκτηση από <http://www.iadc.org/wp-content/uploads/2015/08/preview-dd.pdf>
- File:Thixotropic-rheopectic.svg*. ( 2008 , March 28 ). Ανάκτηση από wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Thixotropic-rheopectic.svg>
- Flow Rate and Its Relation to Velocity*. (2020). Ανάκτηση από lumenlearning: <https://courses.lumenlearning.com/physics/chapter/12-1-flow-rate-and-its-relation-to-velocity/>
- gel strength*. (2020). Ανάκτηση από Oilfield Glossary: [https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/g/gel\\_strength.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/g/gel_strength.aspx)
- Global direct primary energy consumption*. (2017). Ανάκτηση από Our World in Data: <https://ourworldindata.org/grapher/global-primary-energy>

- Global Geotech.* (2011-2020). Ανάκτηση από TSP Cube Set Core Bits:  
<https://www.globalgeotech.co.uk/tsp-cube-set-core-bits.htm>
- Gronholt-Pedersen, J. (2020, JANUARY 2). *Denmark sources record 47% of power from wind in 2019.* Ανάκτηση από Reuters: <https://www.reuters.com/article/us-climate-change-denmark-windpower-idUSKBN1Z10KE>
- Helms, L. (2008). Horizontal Drilling. Vol. 35, No. 1. Ανάκτηση από  
<https://www.dmr.nd.gov/ndgs/documents/newsletter/2008Winter/pdfs/Horizontal.pdf>
- Herschel-Bulkley fluid.* (2020). Ανάκτηση από Oilfield Glossary:  
[https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/h/herschel-bulkley\\_fluid.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/h/herschel-bulkley_fluid.aspx)
- Hossain, M., & Al- Majed, A. A. (2015). *Fundamentals of SUSTAINABLE DRILLING ENGINEERING.* Scrivener.
- INC, I. G. (2020). *Carboxymethyl Cellulose Sodium (CMC)-Oil Drilling Grade.* Ανάκτηση από IRO GROUP INC: <https://www.irochemical.com/product/Mud-Drilling/CMC.htm>
- Inglis, T. (1987). *Volume 2: Directional Drilling.* Petroleum Engineering and Development Studies.
- Jones, D., & Moore, C. (2020, July 22nd). *Renewables beat fossil fuels - A half-yearly analysis of Europe's electricity transition.* Ανάκτηση από Ember: <https://ember-climate.org/project/renewables-beat-fossil-fuels/>
- Kelessidis, V. (2008, Jul 22 ). Investigations on the Thixotropy of Bentonite Suspensions. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, σσ. Volume 30, 2008 - Issue 18 , Pages 1729-1746.
- Kelessidis, V. C., & Bandelis, G. (2004). "Hydraulic Parameters Affecting Cuttings Transport For Horizontal Coiled Tubing Drilling". σσ. in 7th National Congress on Mechanics, 2004.
- Kelessidis, V., & Mpandelis, G. (2003). "Flow Patterns and Minimum Suspension Velocity for Efficient Cuttings Transport in Horizontal and Deviated Wells in Coiled-Tubing Drilling". *This Paper was prepared for presentation at the SPE/CoTA Coiled Tubing Conference held in Houston, Texas U.S.A, 8-9 April 2003*, σσ. Paper Number: SPE-81746-PA.
- Kelessidis, V., & Mpandelis, G. (2004). "Measurements and prediction of terminal velocity of solid spheres falling through stagnant pseudoplastic liquids". *Powder Technology*, σσ. Volume 147, Issues 1–3, 11 October 2004, Pages 117-125.
- Kelessidis, V. (2004, July 7). "An explicit equation for the terminal velocity of solid spheres falling in pseudoplastic liquids". *Chemical Engineering Science*, σσ. Volume 59, Issue 21 Pages 4437-4447.
- Kemp, J. (2014, JULY 14). *The real shale revolution: Kemp.* Ανάκτηση από Reuters:  
<https://www.reuters.com/article/us-shale-usa-kemp/the-real-shale-revolution-kemp-idUSKBN0FJ26220140714>
- Klempa, M., Bujok, P., Pinka, J., & Struna, L. K. (1996). *Fundamentals of Onshore Drilling.* Ανάκτηση από <http://geologie.vsb.cz/DRILLING/drilling/theory.html>

- Koen , A., & Antunez, P. (2020, FEBRUARY 26). Ανάκτηση από Sciencealert:  
<https://www.sciencealert.com/here-s-how-heat-can-be-used-to-store-renewable-energy>
- Li, J., & Walker, S. (1999). "Sensitivity Analysis of Hole Cleaning Parameters in Directional Wells". *This paper was prepared for presentation at the 1999 SPE/ICoTA Coiled Tubing Roundtable held in Houston, Texas, 25–26 May 1999*, σ. SPE 54498.
- Loth, E., & Dorgan, A. (2009, March 11). "An equation of motion for particles of finite Reynolds number and size". *Environmental Fluid Mechanics* 9, 187–206.
- Mahmoud, H., Hamza, A., Nasser, M., Hussein, I., Ahmed, R., & Karami, H. (2019). *Journal of Petroleum Science and Engineering*.
- Mir-Babayeve, M.-Y. (2012, January - February). *A BRIEF HISTORY OF OIL AND GAS WELL DRILLING*. Ανάκτηση από Visions: <http://www.visions.az/en/news/366/4ca556e3/>
- Mohammadsalehi, M., & Malekzadeh, N. (2011, September 20-22). "Optimization of Hole Cleaning and Cutting Removal in Vertical, Deviated and Horizontal Wells". *This paper was prepared for presentation at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition held in Jakarta, Indonesia, 20-22 September 2011*, σ. SPE 143675.
- Mud density*. (2020). Ανάκτηση από Oilfield Glossary:  
[https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/m/mud\\_density.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/m/mud_density.aspx)
- Nash, W. (2007, April 1). *Effects of High Sand Content in Drill Mud*. Ανάκτηση από nationaldriller:  
<https://www.nationaldriller.com/articles/84758-effects-of-high-sand-content-in-drill-mud>
- Naturel Diamonds Drilling Bits*. (2016 , JANUARY 13). Ανάκτηση από DRILLING COURSE:  
<https://www.drillingcourse.com/2016/01/naturel-diamonds-drilling-bits.html>
- Newtonian fluid*. (n.d.). Ανάκτηση από Oilfield Glossary:  
[https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/n/newtonian\\_fluid.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/n/newtonian_fluid.aspx)
- Nuclear Power in France*. (2020, Σεπτέμβριος ). Ανάκτηση από <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/france.aspx>
- Ochiuz, L., Grigoras, A. G., & Ghiciuc, C. M. (2015, March 4th). *Intechopen*. Ανάκτηση από Hydrophilic Matrix Tablets Based on Carbopol for Improving the Oral Bioavailability of Sodium Alendronate: <https://www.intechopen.com/books/advances-in-osteoporosis/hydrophilic-matrix-tablets-based-on-carbopol-for-improving-the-oral-bioavailability-of-sodium-alendr>
- Oilfield Glossary. (2021). *weight material*. Ανάκτηση από  
[https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/w/weight\\_material.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/w/weight_material.aspx)
- Pakdemirli, M., & Aksoy, Y. (2010, June 16). "Approximate Analytical Solutions for Flow of a Third-Grade Fluid Through a Parallel-Plate Channel Filled with a Porous Medium". *Transport in Porous Media* 83, σσ. Pages 375–395.
- Peden, J., Ford, J., & Oyeneyin, M. (1990, October 22). "Comprehensive Experimental Investigation of Drilled Cuttings Transport in Inclined Wells Including the Effects of Rotation and



- Eccentricity". *Paper presented at the European Petroleum Conference, The Hague, Netherlands, October 1990.*, σσ. SPE-20925-MS.
- Podesta, A., & Tsoni, M. (2020, July 20). *State aid: Commission approves support for production of electricity from renewable sources in Ireland*. Ανάκτηση από European Union: [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_20\\_1370](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1370)
- power-law fluid*. (2020). Ανάκτηση από Oilfield Glossary: [https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/p/power-law\\_fluid.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/p/power-law_fluid.aspx)
- Primary direct energy consumption by source, World*. (2019). Ανάκτηση από Our World in Data: <https://ourworldindata.org/grapher/primary-energy-consumption-by-source>
- Reynolds Number*. (2020). Ανάκτηση από nuclear-power: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/fluid-dynamics/reynolds-number/>
- Rheology*. (2020). Ανάκτηση από Oilfield Glossary: <https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/r/rheology.aspx>
- Rooki, R., Ardejani, F., Moradzadeh, A., Kelessidis, V., & Nourozi, M. (2012). "Prediction of terminal velocity of solid spheres falling through Newtonian and non-Newtonian pseudoplastic power law fluid using artificial neural network". *International Journal of Mineral Processing*, σσ. Volumes 110–111, 18 July 2012, Pages 53-61.
- sand test*. (2020). Ανάκτηση από Oilfield Glossary: [https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/s/sand\\_test.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/s/sand_test.aspx)
- Science wiki. (2021). *Fandom*. Ανάκτηση από Science wiki: <https://science.fandom.com/el/wiki/%CE%86%CE%BD%CF%89%CF%83%CE%B7>
- Shares of primary energy in Rapid*. (2020). Ανάκτηση από global energy system to 2050: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook/introduction/overview.html>
- Skalle, P. (2011). *Drilling Fluid Engineering*. Ventus Publishing ApS.
- Statistical Review of World Energy*. (2020). Ανάκτηση από Bp: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>
- Stokes' law*. (2020, August 14). Ανάκτηση από wikipedia: [https://en.wikipedia.org/wiki/Stokes%27\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Stokes%27_law)
- Takach, N., Nakamura, D., Shariff, M., & Yu, M. (2007, November 11). "An Experimental Study of Hole Cleaning Under Simulated Downhole Conditions". *Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, California, U.S.A., November 2007.*, σσ. SPE-109840-MS.
- Titan. (2020). *High Viscosity Fluid Flow Meters*. Ανάκτηση από Titan - flowmeters: <https://www.flowmeters.co.uk/high-viscosity-fluid-flow-meters/>

- Upstream / Petroleum Production Phase*. (2017). Ανάκτηση από Oil & Gas Portal: <http://www.oil-gasportal.com/upstream/petroleum-production-phase/>
- Viscosity*. (2020). Ανάκτηση από Oilfield Glossary: <https://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/v/viscosity.aspx>
- Waldholz, R. (2020, Apr 01). *Germany marks first ever quarter with more than 50 pct renewable electricity*. Ανάκτηση από Clean energy wire: <https://www.cleanenergywire.org/news/germany-marks-first-ever-quarter-more-50-pct-renewable-electricity>
- Wang, D., & Fan, L.-S. (2013). "Particle characterization and behavior relevant to fluidized bed combustion and gasification systems". *Fluidized Bed Technologies for Near-Zero Emission Combustion and Gasification - Woodhead Publishing Series in Energy*, σσ. Pages 42-76.
- Wei, N., Meng, Y., Li, G., Wan, L., Xu, Z., Xu, X., & Zhang, Y. (2013, June 25). "Cuttings Transport Models and Experimental Visualization of Underbalanced Horizontal Drilling". *Hindawi Publishing Corporation*, σσ. Mathematical Problems in Engineering Volume 2013, Article ID 764782, 6 pages.
- What is Pressure Testing*. (2020). Ανάκτηση από Vp Groundforce: <https://www.vpgroundforce.com/gb/footer-links/useful-links/industry-resources/what-is-pressure-testing/>
- Yang, L., Zhang, J., Yuan, H., & Mei, N. (2018, April 6). "Analysis of the motion of small-scale ellipsoidal particles in a horizontal laminar flow field". *Particuology*, Volume 40, October 2018, Pages 44-51.
- Zeinali1, H., Toma, P., & Kuru, E. (2016, 10 5). "Selective Removal of Particles and Shifting of Particle-Size Distribution during Pipeline Transport of Sediment Deposits under Turbulent Flow". *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, σσ. Volume 7 Issue 4 - November 2016 - 04016009 1-12.
- ΑΓΟΥΡΙΔΗΣ, Ι. (2016, Νοέμβριος). "ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΣΕ ΠΛΩΤΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ". *Διπλωματική Εργασία - ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ*.
- Αθανασάκης, Ν. (2019). "Ρεολογικές ιδιότητες πολφών μαγνησιούχων μπεντονιτών και σεπιολίθων σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών. *Διπλωματική Εργασία Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά*.
- ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΣ, Η., ΒΛΑΜΟΣ, Π., ΚΑΤΣΟΥΛΗΣ, Γ., ΜΑΡΚΑΤΗΣ, Σ., & ΣΙΔΕΡΗΣ, Π. (2011). Κεφάλαιο 11: Μέτρηση κύκλου. Στο *ΕΥΚΛΕΙΔΕΙΑ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ Τευχος Β*. Ινστιτούτο Τεχνολογίας Υπολογιστών & Εκδόσεων «Διόφαντος».
- Αυλωνίτης, Σ., & Αυλωνίτης, Δ. (2006). *Μηχανική των Ρευστών*.
- Γιώτης, Α. (2019). Σημειώσεις μαθήματος τεχνική γεωτρήσεων.
- Δαλαμαρίνης, Π. (2009). "ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΡΕΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΠΟΛΦΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ". ΧΑΝΙΑ: Διπλωματική Εργασία - Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

- Ζωγράφου, Μ. (2015). "Μελέτη επίδρασης πολυμερούς ΡΗΡΑ( Partially Hydrolyzed Polycrylamide) στις ρεολογικές ιδιότητες πολφών γεωτρήσεων με βάση τον μπεντονίτη". *Διπλωματική Εργασία - Πολυτεχνείο Κρήτης - Τμήμα μηχανικών ορυκτών πόρων , Χανιά.*
- Θεοδοσίου, Ζ. (2005). " Σύστημα συλλογής και ανάλυσης σήματος αναλογικής κάμερας για την μελέτη κίνησης διφασικού μίγματος σε αγωγούς". *Διπλωματική Εργασία -Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.*
- ΚΕΛΕΣΙΔΗΣ, Β. Χ. (2009). Πτώση Πίεσης κατά την Ροή Πραγματικού Ρευστού σε Δακτυλιοειδή Αγωγό. *Πολυτεχνείο Κρήτης, 10-11.*
- Κουτρούλης, Α., & Μιχαλάκης, Α. (2002). " Σχεδιασμός, Μελέτη , Κατασκευή Συστήματος Ροής για τη μεταφορά θραυσμάτων με ρευστά Γεώτρησης σε Οριζόντιο και κεκλιμένο δακτύλι. *Επίδραση διαφόρων παραμετρών στην ικανότητα μεταφοράς και πρώτα αποτελέσματα.* Χανιά: Διπλωματική Εργασία - Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά .
- Κυκλικό τμήμα υπολογισμός περιμέτρου, εμβαδόν, τόξο, χορδή, γωνία.* (2015, 08 02). Ανάκτηση από helppost: <https://www.helppost.gr/ypologismos-geometria/kykliko-tmima/>
- ΜΑΡΙΝΑΚΗΣ, Δ. (2020). Εργαστηριακές σημειώσεις - Πτώση Πίεσης κατά την Ροή Πραγματικού Ρευστού σε Δακτυλιοειδή Αγωγό. *Πολυτεχνείο Κρήτης.*
- Μόδης, Κ., & Σταματάκη, Σ. (2015). *Εισαγωγή στη Μεταλλευτική Έρευνα.*
- Πουλακάκης, Ε. (2014, Ιούνιο). Μελέτη προσρόφησης και ρεολογικών χαρακτηριστικών υδατικών αιωρημάτων μπεντονίτη που περιέχουν πολυμερή. *Πολυτεχνείο Κρήτης Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, 64-68.*
- Σιανούδης, Ι. (n.d.). Προσδιορισμός του συντελεστή εσωτερικής της πτώσης μικρών σφαιρών. Ανάκτηση από <http://physics.teiath.gr/physics/pdf/M8.pdf>
- Χ.ΚΕΛΕΣΙΔΗΣ, Β. (2009). Εργαστηριακές σημειώσεις - Κίνηση στερεών μέσα σε Ρευστά. Οριακή ταχύτητα καθόδου σφαιρικού στερεού μέσα σε Νευτώνειο Ρευστό. *Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, σ. 4.*
- Χ.ΚΕΛΕΣΙΔΗΣ, Β. (2009). Εργαστηριακές σημειώσεις - Μέτρηση Ιξώδους Νευτώνειου Ρευστού Επίδραση της Αύξησης Θερμοκρασίας στο Ιξώδες Νευτώνειου Ρευστού. *Πολυτεχνείο Κρήτης , Χανιά.*