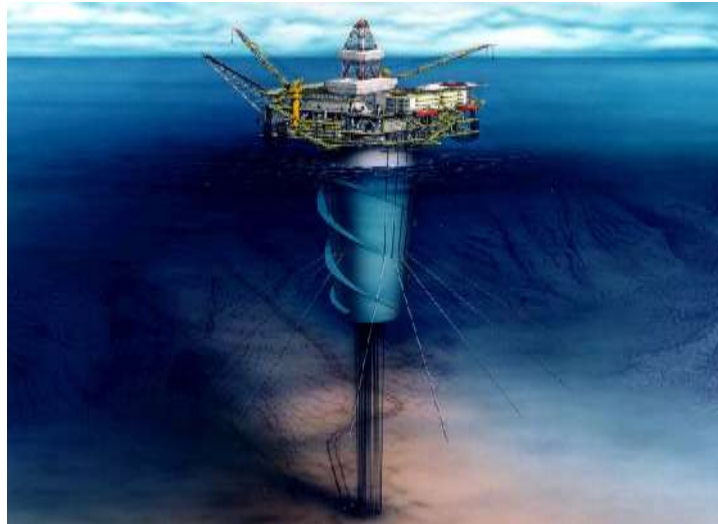




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΓΙΑ
ΤΗΝ ΡΕΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΣΗΣ ΠΟΛΦΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ ΣΕ
ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ**

ΔΑΛΑΜΑΡΙΝΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΚΕΛΕΣΙΔΗΣ Β., ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΜΗΧ.Ο.Π. (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)
ΠΑΛΑΙΟΛΟΓΟΣ Ε., ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΜΗ.ΠΕΡ.
ΓΑΓΑΝΗΣ Β., ΥΠ. Δρ. ΜΗΧ.Ο.Π.

ΧΑΝΙΑ
ΙΟΥΝΙΟΣ, 2009

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής, έγινε με τη βοήθεια και τη συμπαράσταση ορισμένων ανθρώπων που θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα της εργασίας μου αναπληρωτή καθηγητή κ. Κελεσιδή Βασίλειο για την πολύτιμη βοήθειά του, καθώς και τον καθηγητή Babs Oyeneyin ο οποίος επίβλεψε το κομμάτι της εργασίας μου που αφορούσε τον σχεδιασμό του υδραυλικού μοντέλου πτώσης πίεσης, τόσο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν άλλα και για την γνώση την οποία μου πρόσφεραν το διάστημα που δούλεψα μαζί τους.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ.Παλαιολόγο Ευάγγελο, αναπληρωτή καθηγητή και τον κ. Γαγάνη Βασίλειο, υποψήφιο Διδάκτορα για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κ. Μπανδέλη Γρηγόριο για την βοήθειά του όλα αυτά τα χρόνια στο εργαστηριακό κομμάτι της εργασίας μου ο οποίος με βοήθησε να ξεπεράσω πολλά προβλήματα κατά τη διάρκεια της εργασίας μου.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στην κα. Αραμπατζόγλου Μαρία, υπεύθυνη του προγράμματος “Leonardo Da Vinci” για την διευθέτηση των απαραίτητων ενεργειών για την τοποθέτηση μου στο Robert Gordon University την ακαδημαϊκή χρόνια 2006-2007.

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

ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΗ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Καθώς οι υδρογονάνθρακες θα αποτελέσουν και αποτελούν το πλέον οικονομικό και το πιο βέβαιο καύσιμο για τον 21^ο αιώνα, οι εταιρίες πετρελαίου επενδύουν σε τεχνικές οι οποίες τους επιτρέπουν να φέρουν στην επιφάνεια υδρογονάνθρακες που μέχρι 20 χρόνια πριν θεωρούνταν αδύνατη η εκμετάλλευση των συγκεκριμένων ταμιευτήρων.

Παρ'όλες τις προσπάθειες και τις καινούριες τεχνικές που αναπτύχθηκαν, ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα είναι η απουσία κατάλληλων σχεδιαστικών και υπολογιστικών προγραμμάτων τα οποία θα υποστηρίξουν και θα κάνουν ακόμα αποτελεσματικότερες αυτές τις τεχνικές. Από τα μεγαλύτερα προβλήματα είναι η μη δυνατότητα πλήρους πρόβλεψης του προφίλ της πίεσης κατά μήκος της γεώτρησης, κατά την διάρκεια εκτέλεσής της. Επιπρόσθετα δεν υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για ροή μη-Νευτώνειων ρευστών, σε δακτύλιο ομόκεντρο και 100% έκκεντρο, μοντελοποιημένων ως Herschel-Bulkley ρευστών.

Θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της πειραματικής και θεωρητικής εργασίας σε θέματα πτώσης πίεσης μη-Νευτώνειων ρευστών που μοντελοποιούνται ως Herschel-Bulkley, σε ομόκεντρο και 100% έκκεντρο δακτύλιο στο μοντέλο προσομοίωσης οριζόντιας γεώτρησης του εργαστηρίου Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, του Πολυτεχνείου Κρήτης, και των αποτελεσμάτων επίπτωσης διαφόρων εξωγενών παραγόντων στην ρεολογία πολφών γεωτρήσεων.

Τα αποτελέσματα της πτώσης πίεσης θα συγκριθούν με τρία διαφορετικά μοντέλα Υδραυλικής Διατρήσεων (Drilling Hydraulics), του Πολυτεχνείου Κρήτης (TUC), του American Petroleum Institute (API) και του μοντέλου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας (RGU – TUC). Κάθε ένα από αυτά τα τρία θεωρητικά μοντέλα βασίζεται σε διαφορετική μέθοδο για τον καθορισμό του είδους της ροής κατά την κίνηση του ρευστού μέσα στα διατρητικά στελέχη ή τον δακτύλιο της γεώτρησης. Το μοντέλο TUC για τον χαρακτηρισμό της ροής χρησιμοποιεί δύο κρίσιμους αριθμούς Reynolds οι οποίοι μεταβάλλονται με την παροχή, σε αντίθεση με το μοντέλο API το οποίο χρησιμοποιεί δύο σταθερούς κρίσιμους αριθμούς Reynolds. Σε αντίθεση με αυτά τα δύο μοντέλα το μοντέλο RGU – TUC χρησιμοποιεί την $V_{critical}$ για τον προσδιορισμό του είδους της ροής του ρευστού. Αυτό έχει σαν

αποτέλεσμα το μοντέλο RGU – TUC να μην λαμβάνει υπ’ όψιν του καθόλου την μεταβατική ροή σε αντίθεση με τα άλλα δύο μοντέλα, και να χρησιμοποιεί μόνο την στρωτή και τυρβώδη περιοχή ροής για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης

Θα παρουσιαστούν αποτελέσματα της σημαντικής επίπτωσης pH, ηλεκτρολύτη (NaCl), θερμοκρασίας, κλιμάκωσης δειγμάτων στην ρεολογία πολφών γεωτρήσεων που παρασκευάστηκαν ως υδατικά αιωρήματα με πρόσθετα μπεντονίτη, Carbopol 980, Polyanionic cellulose (PAC), Sodium Carboxymethylcellulose (CMC) και συνδυασμούς αυτών.

Από την μελέτη αυτών των ρευστών πρόεκυψε ότι ρευστά όπως Sodium Carboxymethylcellulose (CMC) και Polyanionic cellulose (PAC) για συγκεντρώσεις έως και 1.5% δίνουν Power Law ρευστά, σε αντίθεση με τα πρόσθετα μπεντονίτη και Carbopol 980 τα οποία δίνουν ρευστά Herschel-Bulkley. Επίσης τα ρευστά τα οποία περιέχουν σαν πρόσθετο Carbopol 980 παρουσιάζουν αστάθεια ως προς τις ρεολογικές τους ιδιότητες, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα ρευστά τα οποία μελετήθηκαν, καθώς ίδιας συγκέντρωσης σε πρόσθετο Carbopol 980 ρευστα παρουσίαζαν εντελώς διαφορετικές ρεολογικές ιδιότητες, καθιστώντας αυτού του είδους τα ρευστά ακατάλληλα για χρήση στο σύστημα ροής του εργαστηρίου και για μελέτη της πτώσης πίεσης.

Από την μελέτη της επίδραση της κλιμάκωσης στα ρευστά τα οποία παρασκευαστήκαν προκύπτει το συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται ο όγκος του ρευστού το οποίο παρασκευάζεται μειώνεται η αρχική τάση διολίσθησης (τ_0) του ρευστού με τάση να μετατραπεί από Herschel-Bulkley ρευστό σε Power Law, με αποτέλεσμα να πρέπει να αυξάνουμε την συγκέντρωση όσο προχωρούμε σε αύξηση του όγκου του ρευστού ώστε να διατηρήσουμε τα ίδια ρεολογικά χαρακτηριστικά.

Παράλληλα έγινε μελέτη επίδρασης της θερμοκρασίας στις ρεολογικές ιδιότητες πολφών που περιείχαν σαν πρόσθετα μπεντονίτη και Carboxymethylcellulose (CMC) ταυτόχρονα και από την ανάλυση των αποτελεσμάτων πρόεκυψε ότι αυτού του είδους τα ρευστά μπορούν να αλλάζουν σημαντικά τις ρεολογικές τους ιδιότητες με μικρή αύξηση της θερμοκρασίας δίνοντας έτσι την δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν σαν “έξυπνα” αφού μπορούν να αλλάζουν τις ιδιότητες τους (τ_0 , πτώση πίεσης) σε συνάρτηση με το βάθος μέσα στην γεώτρηση προς όφελος της διάτρησης. Προτείνεται περαιτέρω μελέτη της επίδρασης της

θερμοκρασίας σε αυτού του είδους τα ρευστά με σκοπό την καλύτερη κατανόηση και καταγραφή των επιπτώσεων της θερμοκρασίας, και χρήση τους σαν “έξυπνα” ρευστά.

Για τους παραπάνω λόγους (κόστος παρασκευής ρευστού, σταθερές ρεολογικές ιδιότητες, επίτευξη στρωτής, μεταβατικής και τυρβώδους ροής στο σύστημα ροής του εργαστηρίου) αποφασίστηκε η χρήση πολφού μπεντονίτη για την διεξαγωγή των πειραμάτων πτώσης πίεσης.

Για την μελέτη πτώσης πίεσης χρησιμοποιήθηκε πολφός μπεντονίτη σε δύο διαφορετικές συγκεντρώσεις (1.5% και 1.85% w/v). Ο λόγος για τον οποίο αποφασίστηκε η μελέτη πτώσης πίεσης δύο διαφορετικών ρευστών είναι για επιβεβαίωση των θεωρητικών προσεγγίσεων πτώσης πίεσης. Διεξήχθησαν πειράματα σε ομόκεντρο και σε 100% έκκεντρο δακτύλιο για ένα σύνολο παροχών που κάλυψε όλο το εύρος των μορφών ροής (στρωτής, μεταβατικής και τυρβώδους ροής). Η πτώση πίεσης στον έκκεντρο δακτύλιο είναι μικρότερη κατά 20% με 25% από την αντίστοιχη στον ομόκεντρο δακτύλιο. Από την ανάλυση και την σύγκριση των θεωρητικών προσεγγίσεων με τα πειραματικά δεδομένα πρόκυψε ότι το μοντέλο TUC παρουσιάζει μέση τιμή σφάλματος 10-15%, σε αντίθεση με τα άλλα δύο μοντέλα API και RGU-TUC, τα οποία παρουσιάζουν μέση τιμή σφάλματος 35% και 40% αντίστοιχα.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτει καλύτερη προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων πτώσης πίεσης από το θεωρητικό μοντέλο TUC σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα τα οποία παρουσιάζουν μέτρια προσέγγιση. Το παραπάνω συμβαίνει και για τα δυο διαφορετικά ρευστά (μπεντονίτη 1.5% και 1.85% w/v) καθώς και για ομόκεντρο και 100% έκκεντρο δακτύλιο.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.	1
Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά.	4
Παρουσιάσεις σε συνέδρια.	4
Βραβεία σε διαγωνισμούς.	5
Κεφάλαιο 1 ^ο - Τα βασικά τμήματα της εργασίας.	6
1.1. Ρεολογία.	6
1.2. Μοντέλα Υδραυλικής Διατρήσεων (Drilling Hydraulics Models).	6
1.3. Γιατί θα μελετηθεί η πτώση πίεσης.	7
Κεφάλαιο 2 ^ο - Πολφοί Γεωτρήσεων.	8
2.1. Γενικά στοιχεία.	8
2.2. Ιδιότητες ρευστών διάτρησης.	13
2.3. Ρεολογικά Μοντέλα.	16
Κεφάλαιο 3 ^ο - Υπολογισμός πτώσης πίεσης.	17
3.1. Γενικά.	17
3.2. Μη Νευτώνεια ρευστά διάτρησης και η επίδραση της πτώσης πίεσης από αυτά.	17
3.3. Υπολογιστικά μοντέλα υπολογισμού πτώσης πίεσης.	18
3.3.1. Μοντέλο American Petroleum Institute (API).	18
3.3.2. Μοντέλο TUC.	19
3.3.3. Μοντέλο RGU – TUC.	19
3.3.4. Οδηγίες χρήσης προγράμματος “Rheology”.	20
3.3.5. Καθορισμός Ρεολογικών μοντέλων ρευστών.	26
3.4. Πτώση πίεσης στα διατρητικά στελέχη και στον δακτύλιο της γεώτρησης.	33
Κεφάλαιο 4 ^ο - Διάτρηση Ρυθμιζόμενης Πίεσης (Managed Pressure Drilling)	35
4.1. Εισαγωγή.	35
4.2.1. Τι είναι η τεχνική Managed Pressure Drilling (MPD).	35
4.2.2. Πλεονεκτήματα της Managed Pressure Drilling (MPD).	40
4.2.3. Κατηγορίες και παραλλαγές της Managed Pressure Drilling (MPD).	41

4.2.4. Παραλλαγές της Managed Pressure Drilling (MPD).	43
4.3.1. Τι είναι η τεχνική διάτρησης με υποπίεση (UBD) και τα οφέλη της.	50
Κεφάλαιο 5 ^ο - Παράγοντες που επηρεάζουν την πτώση πίεσης στα διατρητικά στελέχη και τον δακτύλιο.	56
5.1. Εισαγωγή.	56
5.2. Παράγοντες ο οποίοι επηρεάζουν το προφίλ της πτώσης πίεσης κατά την διάρκεια εκτέλεσης της γεώτρησης.	56
5.2.1. Ρεολογία ρευστού διάτρησης.	57
5.2.2. Επίδραση της Πίεσης και της Θερμοκρασίας μέσα στην γεώτρηση.	60
5.2.3. Γεωμετρία της γεώτρησης και των μηχανημάτων διάτρησης	62
5.2.4. Επίδραση της εκκεντρότητας των διατρητικών στελεχών στην γεώτρηση.	63
5.2.5. Επίδραση της περιστροφής των διατρητικών στελεχών μέσα στην γεώτρηση.	63
Κεφάλαιο 6 ^ο - Υδραυλικό μοντέλο υπολογισμού πίεσης RGU – TUC.	65
6.1. Εισαγωγή.	65
6.2. Υδραυλικό μοντέλο υπολογισμού πτώσης πίεσης (RGU – TUC).	65
6.3. Υπολογισμός “παρασιτικών” απωλειών πίεσης στην γεώτρηση.	67
6.4. Διάγραμμα ροής υδραυλικού μοντέλου.	70
6.5. Πτώση πίεσης στις επιφανειακές εγκαταστάσεις.	71
6.6. Πτώση πίεσης στο κοπτικό άκρο.	71
6.7. Βελτιστοποίηση επιλογής κοπτικού άκρου.	71
Κεφάλαιο 7 ^ο - Μοντέλο υπολογισμού πτώσης πίεσης τεχνικής Mud Cap.	73
7.1. Εισαγωγή.	73
7.2. Διάτρηση με την τεχνική Mud Cap.	73
7.3. Μοντέλο υπολογισμού πτώσης πίεσης με χρήση της τεχνικής Mud Cap.	76
7.4. Διάγραμμα ροής υδραυλικού μοντέλου με την τεχνική Mud Cap.	78
7.5. Τεχνική Casing Drilling.	79
7.6. Συνδυασμός της τεχνικής Mud Cap με αυτή του Casing Drilling.	79
7.7. Αποτελέσματα Casing Mud Cap.	81

Κεφάλαιο 8 ^ο - Πειραματικός εξοπλισμός εργαστηρίου Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής.....	95
8.1. Εισαγωγή.	95
8.2. Όργανο μέτρησης ιξώδους.	95
8.2.1. Ρεολογικά μοντέλα για ομοαξονικό κυλινδρικό ιξωδόμετρο.	98
8.3. Διαδικασία Μετρήσεων και Επεξεργασία Δεδομένων.	99
8.4. Σύστημα ροής εργαστηρίου.	101
8.5. Σύστημα μετρήσεων πτώσης πίεσης.	109
8.6. Σύστημα καταγραφής μετρήσεων και εξαγωγής δεδομένων.	120
Κεφάλαιο 9 ^ο - Διαδικασία παρασκευής πολφών.....	124
9.1. Εισαγωγή.	124
9.2. Μπετονίτης.....	124
9.3. Οργανικά πολυμερή πρόσθετα.....	132
9.3.1. Carborpol.....	132
9.3.2. Sodium Carboxymethylcellulose (CMC).	133
9.3.3. Polyanionic cellulose (PAC).	134
9.3.4. Προετοιμασία δειγμάτων πολφού CMC και PAC μικρής κλίμακας.....	135
9.3.5. Προ/σία δειγμάτων πολφού CMC για χρήση στο σύστημα ροής - κλιμάκωση.	136
9.4.1. Προετοιμασία δειγμάτων πολφού CMC και μπετονίτη μικρής κλίμακας.	136
9.4.2. Προετοιμασία δειγμάτων πολφού CMC και μπετονίτη για χρήση στο σύστημα ροής - κλιμάκωση.	136
Κεφάλαιο 10 ^ο - Ρεολογικά χαρακτηριστικά πολφών γεώτρησης.....	137
10.1. Εισαγωγή.	137
10.2. Πολφοί διάτρησης.	137
10.2.1. Επιθυμητά ρεολογικά χαρακτηριστικά του πολφού.....	138
10.2.2. Ρεολογικές ιδιότητες και πειραματικές μετρήσεις Carborpol 980.....	139
10.2.3. Ρεολογικές ιδιότητες και πειραματικές μετρήσεις ρευστού CMC.....	142
10.2.4. Πολφός CMC συγκέντρωσης 0.9 % w/v σε κλίμακα 620 lt σε διάφορες θερμοκρασίες.	152

10.2.5. Πολφός CMC συγκέντρωσης 1.5 % w/v και μπετονίτη 0.25 % w/v, αντίστοιχα σε κλίμακα 620 lt σε διάφορες θερμοκρασίες.	161
10.2.6. Πολφός CMC συγκέντρωσης 0.5 % w/v και μπετονίτη 1.25 % w/v αντίστοιχα σε κλίμακα 500 ml σε διάφορες θερμοκρασίες.	170
10.2.7. Πολφός CMC συγκέντρωσης 1 % w/v και μπετονίτη 2.5 % w/v αντίστοιχα σε κλίμακα 500 ml σε διάφορες θερμοκρασίες.	179
10.3. Συμπεράσματα που προκύπτουν για ρευστά CMC και μπετονίτη.	188
10.4. Ρευστά PAC – L.	191
10.5. Ρευστά Μπετονίτη.	191
10.5.1. Επίδραση pH και NaCl σε δείγματα μπετονίτη.	195
10.6. Συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από τα ρευστά που μελετήθηκαν.	201
Κεφάλαιο 11 ^ο – Πειραματικά δεδομένα πτώσης πίεσης και σύγκριση με τα θεωρητικά μοντέλα.	202
11.1. Εισαγωγή.	202
11.2. Βαθμονόμηση καταγραφικών οργάνων και επιβεβαίωση υπολογιστικών μοντέλων.	202
11.2.1. Μέτρηση πτώσης πίεσης για νερό σε ομόκεντρο δακτύλιο.	203
11.2.2. Μέτρηση πτώσης πίεσης με νερό σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο.	206
11.3. Σύγκριση μοντέλων TUC, RGU – TUC, API για ρευστά Herschel Bulkley, με πειραματικά δεδομένα API.	218
11.4. Πειραματικά αποτελέσματα με Herschel-Bulkley ρευστό στο σύστημα ροής του εργαστηρίου.	232
11.4.1. Μπετονίτης συγκέντρωσης 1.5 % w/v σε ομόκεντρο δακτύλιο.	232
11.4.2. Μπετονίτης συγκέντρωσης 1.85 % w/v σε ομόκεντρο δακτύλιο.	244
11.4.3. Μπετονίτης συγκέντρωσης 1.85 % w/v σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο.	255
11.4.4. Μπετονίτης συγκέντρωσης 1.5 % w/v σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο.	267
11.5. Συμπεράσματα σύγκρισης υπολογιστικών μοντέλων με πειραματικές μετρήσεις πτώσης πίεσης.	276
Κεφάλαιο 12 ^ο - Γενικά συμπεράσματα και μελλοντικές προτάσεις για έρευνα σε συνέχεια αυτής της εργασίας.	278
12.1. Εισαγωγή.	278

12.2. Συμπεράσματα.	278
12.3. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.	285
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.	287

Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 2.1: Ταξινόμηση ρευστών γεώτρησης.	12
Πίνακας 7.1: 12.25 in Hole with 11.75 in Casing	81
Πίνακας 7.2: 12.25 in Hole with 10.75 in Casing.	84
Πίνακας 7.3: 8.5 in Hole with 7.625 in Casing.	87
Πίνακας 7.4: 8.5 in Hole with 7 in Casing.	90
Πίνακας 8.1: Χαρακτηριστικά ιζωδομέτρου.	96
Πίνακας 8.2: Εύρος μετρήσεων οργάνου.	97
Πίνακας 8.3: Βήματα μετρήσεων οργάνου.	100
Πίνακας 8.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας.	106
Πίνακας 8.5: Όρια λειτουργίας DP 15.	110
Πίνακας 8.6: Διαφράγματα εργαστηρίου.	111
Πίνακας 8.7: Χαρακτηριστικά συσκευής CD23.	112
Πίνακας 8.8: Τιμές βαθμονόμησης καταγραφικού οργάνου.	118
Πίνακας 9.1: Συνήθεις τιμές περιεκτικότητας λάσπης γεώτρησης σε μπετονίτη.	125
Πίνακας 10.1: Ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων Carbopol 980	140
Πίνακας 10.2: Ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων CMC 0.7 & 0.9 % w/v 500 ml.	143
Πίνακας 10.3: Ρεολογικά χαρ/κά ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.7 % w/v 620 lt.	145
Πίνακας 10.4: Ρεολογικά χαρ/κά ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.1 % w/v 620 lt.	146
Πίνακας 10.5: Ρεολογικά χαρ/κά ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.5 % w/v 620 lt.	147
Πίνακας 10.6: Ρεολογικά χαρ/κά ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.5 % w/v & μπετονίτη 0.25 % w/v 620 lt.	149
Πίνακας 10.7: Ρεολογικά χαρ/κά ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.9 % w/v σε διάφορες θερμοκρασίες.	153
Πίνακας 10.8: Υπολογισμός πτώσης πίεσης με το μοντέλο API, ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.9 % w/v 620 lt σε διάφορες θερμοκρασίες.	157
Πίνακας 10.9: Υπολογισμός πτώσης πίεσης με το μοντέλο TUC, ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.9 % w/v 620 lt σε διάφορες θερμοκρασίες.	158

Πίνακας 10.10: Ρεολογικά χαρακτηριστικά ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.5 % w/v και μπετονίτη 0.25% w/v αντίστοιχα 620 lt , σε διάφορες θερμοκρασίες.	161
Πίνακας 10.11: Υπολογισμός πτώσης πίεσης με το μοντέλο API, ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.5 % w/v και μπετονίτη 0.25% w/v αντίστοιχα 620 lt , σε διάφορες θερμοκρασίες.....	166
Πίνακας 10.12: Υπολογισμός πτώσης πίεσης με το μοντέλο TUC, ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.5 % w/v και μπετονίτη 0.25% w/v αντίστοιχα 620 lt , σε διάφορες θερμοκρασίες.....	167
Πίνακας 10.13: Ρεολογικά χαρακτηριστικά ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.5 % w/v και μπετονίτη 1.25 % w/v αντίστοιχα 500 ml, σε διάφορες θερμοκρασίες.	170
Πίνακας 10.14: Υπολογισμός πτώσης πίεσης με το μοντέλο API, ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.5 % w/v και μπετονίτη 1.25 % w/v αντίστοιχα 500 ml, σε διάφορες θερμοκρασίες.	175
Πίνακας 10.15: Υπολογισμός πτώσης πίεσης με το μοντέλο TUC, ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.5 % w/v και μπετονίτη 1.25 % w/v αντίστοιχα 500 ml, σε διάφορες θερμοκρασίες.	176
Πίνακας 10.16: Ρεολογικά χαρακτηριστικά ρευστού CMC συγκέντρωσης 1 % w/v και μπετονίτη 2.5 % w/v 500 ml αντίστοιχα, σε διάφορες θερμοκρασίες.	179
Πίνακας 10.17: Υπολογισμός πτώσης πίεσης με το μοντέλο API CMC συγκέντρωσης 1 % w/v και μπετονίτη 2.5 % w/v αντίστοιχα 500 ml, σε διάφορες θερμοκρασίες.	184
Πίνακας 10.18: Υπολογισμός πτώσης πίεσης με το μοντέλο TUC, CMC συγκέντρωσης 1 % w/v και μπετονίτη 2.5 % w/v αντίστοιχα 500 ml, σε διάφορες θερμοκρασίες.	185
Πίνακας 10.19: Ρεολογικές ιδιότητες ρευστών Pac- L 500 ml.....	191
Πίνακας 10.20: Ρεολογικές ιδιότητες ρευστού μπετονίτη 2.5 % w/v 500 ml.....	192
Πίνακας 10.21: Αποτελέσματα ανάλυσης ροής μπετονίτη 2.5 % w/v 500 ml.	192
Πίνακας 10.22: Ρεολογικές ιδιότητες ρευστού μπετονίτη 2.5 % w/v 10 lt.....	193
Πίνακας 10.23: Αποτελέσματα ανάλυσης ροής μπετονίτη 2.5 % w/v 10 lt.	194
Πίνακας 11.1: Θερμοκρασία – Πυκνότητα ρευστού και αρχική ένδειξη DP 15.	203
Πίνακας 11.2: Δεδομένα κυκλοφορίας νερού σε ομόκεντρο δακτύλιο.....	204
Πίνακας 11.3: Θερμοκρασία – Πυκνότητα ρευστού και αρχική ένδειξη DP 15.	206
Πίνακας 11.4: Δεδομένα κυκλοφορίας νερού σε έκκεντρο δακτύλιο.	207
Πίνακας 11.5α: Θεωρητική πτώση πίεσης νερού σε σε 100% έκκεντρο δακτύλιο ομόκεντρο δακτύλιο (Jonsson & Sparrow).....	209
Πίνακας 11.5β: Θεωρητική πτώση πίεσης νερού σε ομόκεντρο δακτύλιο (Jonsson & Sparrow).	209

Πίνακας 11.6: Σύγκριση πειραματικών με θεωρητικές τιμές πτώσης πίεσης νερού σε ομόκεντρο δακτύλιο.	212
Πίνακας 11.7: Σύγκριση πειραματικών με θεωρητικές τιμές πτώσης πίεσης νερού σε 100% έκκεντρο δακτύλιο.	215
Πίνακας 11.8: Σύγκριση θεωρητικών μοντέλων με πειραματικά δεδομένα για την περιοχή των διατρητικών στελεχών.	221
Πίνακας 11.9: Σύγκριση θεωρητικών μοντέλων με πειραματικά δεδομένα για τον δακτυλίου της γεώτρησης.	223
Πίνακας 11.10: Σύγκριση θεωρητικών μοντέλων με πειραματικά δεδομένα για το σύνολο των διατρητικών στελεχών.	226
Πίνακας 11.11: Σύγκριση θεωρητικών μοντέλων με πειραματικά δεδομένα για την περιοχή του δακτυλίου της γεώτρησης.	229
Πίνακας 11.12: Ρεολογικές ιδιότητες ρευστού μπετονίτη 1.5 % w/v κλίμακας 620 lt.	233
Πίνακας 11.13: Θερμοκρασία – Πυκνότητα ρευστού και αρχική ένδειξη DP 15.	235
Πίνακας 11.14: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπετονίτη 1.5 % w/v – σύγκριση με το μοντέλο TUC.	237
Πίνακας 11.15: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπετονίτη 1.5 % w/v – σύγκριση με το μοντέλο API.	238
Πίνακας 11.16: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπετονίτη 1.5 % w/v – σύγκριση με το μοντέλο RGU - TUC.	239
Πίνακας 11.17: Ρεολογικές ιδιότητες ρευστού μπετονίτη 1.85 % w/v κλίμακας 670 lt.	244
Πίνακας 11.18: Θερμοκρασία – Πυκνότητα ρευστού και αρχική ένδειξη DP 15.	245
Πίνακας 11.19: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπετονίτη 1.85 % w/v – σύγκριση με το μοντέλο TUC.	248
Πίνακας 11.20: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπετονίτη 1.85 % w/v – σύγκριση με το μοντέλο API.	249
Πίνακας 11.21: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπετονίτη 1.85 % w/v – σύγκριση με το μοντέλο RGU - TUC.	250
Πίνακας 11.22: Ρεολογικές ιδιότητες ρευστού μπετονίτη 1.85 % w/v κλίμακας 670 lt	257
Πίνακας 11.23: Θερμοκρασία – Πυκνότητα ρευστού και αρχική ένδειξη DP 15.	258

<i>Πίνακας 11.24: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπετονίτη 1.85 % w/v – σύγκριση με το μοντέλο TUC 100 % έκκεντρο δακτύλιο διορθωμένο κατά Hacıislamoglu et Cartalos.</i>	261
<i>Πίνακας 11.25: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπετονίτη 1.85 % w/v – σύγκριση με το μοντέλο API σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο διορθωμένο κατά Hacıislamoglu et Cartalos.</i>	262
<i>Πίνακας 11.26: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπετονίτη 1.85 % w/v – σύγκριση με το μοντέλο RGU - TUC σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο.</i>	263
<i>Πίνακας 11.27: Ρεολογικές ιδιότητες ρευστού μπετονίτη 1.5 % w/v κλίμακας 670 lt.</i>	267
<i>Πίνακας 11.28: Θερμοκρασία – Πυκνότητα ρευστού και αρχική ένδειξη DP 15.</i>	268
<i>Πίνακας 11.29: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπετονίτη 1.5 % w/v – σύγκριση με το μοντέλο TUC 100 % έκκεντρο δακτύλιο διορθωμένο κατά Hacıislamoglu et Cartalos.</i>	270
<i>Πίνακας 11.30: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπετονίτη 1.5 % w/v – σύγκριση με το μοντέλο API σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο διορθωμένο κατά Hacıislamoglu et Cartalos.</i>	271
<i>Πίνακας 11.31: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπετονίτη 1.5 % w/v – σύγκριση με το μοντέλο RGU - TUC σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο.</i>	272

Πίνακας διαγραμμάτων

Διάγραμμα 5.1: Ρεολογικές καμπύλες των τυπικών ρεολογικών μοντέλων.	58
Διάγραμμα 7.1: 12.25 in Hole with 11.75 in Casing.	82
Διάγραμμα 7.2: 12.25 in Hole with 10.75 in Casing.	85
Διάγραμμα 7.3: 8.5 in Hole with 7.625 in Casing.	88
Διάγραμμα 7.4: 8.5 in Hole with 7 in Casing.	91
Διάγραμμα 7.5: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των διαφορετικών σωληνώσεων.	93
Διάγραμμα 8.1: Σύγκριση εφαρμοζόμενων με καταγραφόμενες τιμές πίεσης.	119
Διάγραμμα 10.1: Μεταβολή παραμέτρου τ_0 , ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.9 % w/v 620 lt σε διάφορες θερμοκρασίες.	154
Διάγραμμα 10.2: Μεταβολή παραμέτρου K, ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.9 % w/v 620 lt σε διάφορες θερμοκρασίες.	155
Διάγραμμα 10.3: Μεταβολή παραμέτρου η , ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.9 % w/v 620 lt σε διάφορες θερμοκρασίες.	156
Διάγραμμα 10.4: Μεταβολή αριθμού Reynolds, ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.9 % w/v 620 lt σε διάφορες θερμοκρασίες.	159
Διάγραμμα 10.5: Μεταβολή πτώσης πίεσης, ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.9 % w/v 620 lt σε διάφορες θερμοκρασίες.	160
Διάγραμμα 10.6: Μεταβολή παραμέτρου τ_0 , ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.5 % w/v και μπετονίτη 0.25 % w/v αντίστοιχα 620 lt, σε διάφορες θερμοκρασίες.	163
Διάγραμμα 10.7: Μεταβολή παραμέτρου K, ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.5 % w/v και μπετονίτη 0.25 % w/v αντίστοιχα 620 lt, σε διάφορες θερμοκρασίες.	164
Διάγραμμα 10.8: Μεταβολή παραμέτρου η , ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.5 % w/v και μπετονίτη 0.25 % w/v αντίστοιχα 620lt, σε διάφορες θερμοκρασίες.	165
Διάγραμμα 10.9: Μεταβολή αριθμού Reynolds, ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.5 % w/v και μπετονίτη 0.25% w/v αντίστοιχα 620 lt, σε διάφορες θερμοκρασίες.	168
Διάγραμμα 10.10: Μεταβολή πτώσης πίεσης, ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.5 % w/v και μπετονίτη 0.25% w/v αντίστοιχα 620 lt, σε διάφορες θερμοκρασίες.	169
Διάγραμμα 10.11: Μεταβολή παραμέτρου τ_0 , ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.5 % w/v και μπετονίτη 1.25 % w/v αντίστοιχα 500 ml, σε διάφορες θερμοκρασίες.	172

Διάγραμμα 10.12: Μεταβολή παραμέτρου K , ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.5 % w/v και μπετονίτη 1.25 % w/v αντίστοιχα 500 ml, σε διάφορες θερμοκρασίες	173
Διάγραμμα 10.13: Μεταβολή παραμέτρου n , ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.5 % w/v και μπετονίτη 1.25 % w/v αντίστοιχα 500 ml, σε διάφορες θερμοκρασίες.....	174
Διάγραμμα 10.14: Μεταβολή αριθμού Reynolds, ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.5 % w/v και μπετονίτη 1.25 % w/v αντίστοιχα 500 ml, σε διάφορες θερμοκρασίες	177
Διάγραμμα 10.15: Μεταβολή πτώσης πίεσης, ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.5 % w/v και μπετονίτη 1.25 % w/v αντίστοιχα 500 ml, σε διάφορες θερμοκρασίες	178
Διάγραμμα 10.16: Μεταβολή παραμέτρου τ_o , CMC και μπετονίτη συγκέντρωσης 1 % w/v και 2.5 % w/v 500 ml αντίστοιχα, σε διάφορες θερμοκρασίες.	181
Διάγραμμα 10.17: Μεταβολή παραμέτρου K , CMC και μπετονίτη συγκέντρωσης 1 % w/v και 2.5 % w/v 500 ml αντίστοιχα, σε διάφορες θερμοκρασίες.	182
Διάγραμμα 10.18: Μεταβολή παραμέτρου n , CMC και μπετονίτη συγκέντρωσης 1 % w/v και 2.5 % w/v 500 ml αντίστοιχα, σε διάφορες θερμοκρασίες.	183
Διάγραμμα 10.19: Μεταβολή αριθμού Reynolds, CMC και μπετονίτη συγκέντρωσης 1 % w/v και 2.5 % w/v 500 ml αντίστοιχα, σε διάφορες θερμοκρασίες.	186
Διάγραμμα 10.20: Μεταβολή πτώσης πίεσης, CMC και μπετονίτη συγκέντρωσης 1 % w/v και 2.5 % w/v 500 ml αντίστοιχα, σε διάφορες θερμοκρασίες.	187
Διάγραμμα 10.21: Επίδραση pH στην παράμετρο τ_o , ρευστού μπετονίτη συγκέντρωσης 5 & 6.42 % w/v.	196
Διάγραμμα 10.22: Επίδραση pH στην παράμετρο K , ρευστού μπετονίτη συγκέντρωσης 5 & 6.42 % w/v.	197
Διάγραμμα 10.23: Επίδραση pH στην παράμετρο n , ρευστού μπετονίτη συγκέντρωσης 5 & 6.42 % w/v.	197
Διάγραμμα 10.24: Επίδραση NaCl στην παράμετρο τ_o , ρευστού μπετονίτη συγκέντρωσης 2, 5 & 6.42 % w/v.	198
Διάγραμμα 10.25: Επίδραση NaCl στην παράμετρο K , ρευστού μπετονίτη συγκέντρωσης 2, 5 & 6.42 % w/v.	199
Διάγραμμα 10.26: Επίδραση NaCl στην παράμετρο n ρευστού μπετονίτη συγκέντρωσης 2, 5 & 6.42 % w/v.	200
Διάγραμμα 11.1: Πτώση πίεσης συναρτήσει της παροχής για νερό σε ομόκεντρο δακτύλιο. ..	205

Διάγραμμα 11.2: Πτώση πίεσης συναρτήσει της παροχής για νερό σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο.	208
Διάγραμμα 11.3: Συγκριτικό διάγραμμα πτώσης πίεσης συναρτήσει της παροχής για νερό σε ομόκεντρο και 100 % έκκεντρο δακτύλιο.	210
Διάγραμμα 11.4: Συγκριτικό διάγραμμα πτώσης πίεσης συναρτήσει της παροχής για νερό σε ομόκεντρο με θεωρητικά μοντέλα TUC, API, Jonsson.	213
Διάγραμμα 11.5: Διαφορά % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς για νερό σε ομόκεντρο δακτύλιο.	214
Διάγραμμα 11.6: Συγκριτικό διάγραμμα πτώσης πίεσης συναρτήσει της παροχής για νερό σε 100 % έκκεντρο με θεωρητικά μοντέλα TUC, API, Jonsson.	216
Διάγραμμα 11.7: Διαφορά % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς για νερό σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο.	217
Διάγραμμα 11.8: Διαφορά % θεωρητικών υπολογισμών με πειραματικά δεδομένα στα διατηρητικά στελέχη.	222
Διάγραμμα 11.9: Διαφορά % θεωρητικών υπολογισμών με πειραματικά δεδομένα για τον δακτύλιον της γεώτρησης.	224
Διάγραμμα 11.10: Πτώση πίεσης στα διατηρητικά στελέχη.	227
Διάγραμμα 11.11: Διαφορά % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς πτώσης πίεσης στα διατηρητικά στελέχη.	228
Διάγραμμα 11.12: Πτώση πίεσης στον δακτύλιο της γεώτρησης.	230
Διάγραμμα 11.13 : Διαφορά % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς πτώσης πίεσης στον δακτύλιο της γεώτρησης.	231
Διάγραμμα 11.14: Πτώση πίεσης για ρευστό μπετονίτη 1.5 % w/v στον ομόκεντρο δακτύλιο.	240
Διάγραμμα 11.15: Μεταβολή $Re - \text{Όρια ροής}$, για ρευστό μπετονίτη 1.5 % w/v σε ομόκεντρο δακτύλιο.	241
Διάγραμμα 11.16: Διαφορά % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς για ρευστό μπετονίτη 1.5 % w/v σε ομόκεντρο δακτύλιο.	242
Διάγραμμα 11.17: Διαφορά % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς για ρευστό μπετονίτη 1.5 % w/v σε ομόκεντρο δακτύλιο.	243
Διάγραμμα 11.18: Πτώση πίεσης για ρευστό μπετονίτη 1.85 % w/v σε ομόκεντρο δακτύλιο.	251

<i>Διάγραμμα 11.19: Μεταβολή Re – Όρια ροής, για ρευστό μπετονίτη 1.85 % w/v σε ομόκεντρο δακτύλιο.</i>	<i>252</i>
<i>Διάγραμμα 11.20: Διαφορά % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς για ρευστό μπετονίτη 1.85 % w/v σε ομόκεντρο δακτύλιο.</i>	<i>253</i>
<i>Διάγραμμα 11.21: Διαφορά % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς για ρευστό μπετονίτη 1.85 % w/v σε ομόκεντρο δακτύλιο.</i>	<i>254</i>
<i>Διάγραμμα 11.22: Πτώση πίεσης για ρευστό μπετονίτη 1.85 % w/v σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο.</i>	<i>264</i>
<i>Διάγραμμα 11.23: Διαφορά % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς για ρευστό μπετονίτη 1.85 % w/v σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο.</i>	<i>265</i>
<i>Διάγραμμα 11.24: Διαφορά % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς για ρευστό μπετονίτη 1.85 % w/v σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο.</i>	<i>266</i>
<i>Διάγραμμα 11.25: Πτώση πίεσης για ρευστό μπετονίτη 1.5 % w/v σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο.</i>	<i>273</i>
<i>Διάγραμμα 11.26: Διαφορά % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς για ρευστό μπετονίτη 1.5 % w/v σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο.</i>	<i>274</i>
<i>Διάγραμμα 11.27: Διαφορά % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς για ρευστό μπετονίτη 1.5 % w/v σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο.</i>	<i>275</i>

Πίνακας ρεογραμμάτων

<i>Ρεόγραμμα 10.1: CMC 0.7 % w/v 500 ml.....</i>	<i>143</i>
<i>Ρεόγραμμα 10.2: CMC 0.9 % w/v 500 ml.....</i>	<i>144</i>
<i>Ρεόγραμμα 10.3: CMC 0.9 % w/v 620 lt</i>	<i>145</i>
<i>Ρεόγραμμα 10.4: CMC 1.1 % w/v 620 lt</i>	<i>146</i>
<i>Ρεόγραμμα 10.5: CMC 1.5 % w/v 620 lt</i>	<i>147</i>
<i>Ρεόγραμμα 10.6: CMC συγκέντρωσης 1.5 % w/v & μπετονίτη 0.25 % w/v 620 lt.....</i>	<i>150</i>
<i>Ρεόγραμμα 10.7: CMC συγκέντρωσης 0.9 % w/v 620 lt σε θερμοκρασία 32.9°C.</i>	<i>153</i>
<i>Ρεόγραμμα 10.8: CMC συγκέντρωσης 1.5 % w/v και μπετονίτης 0.25% w/v αντίστοιχα 620 lt σε θερμοκρασία 35°C.</i>	<i>162</i>
<i>Ρεόγραμμα 10.9: CMC συγκέντρωσης 0.5 % w/v και μπετονίτης 1.25 % w/v αντίστοιχα 500 ml σε θερμοκρασία 32.6°C.</i>	<i>171</i>
<i>Ρεόγραμμα 10.10: CMC συγκέντρωσης 0.5 % w/v και μπετονίτης 1.25 % w/v αντίστοιχα 500 ml σε θερμοκρασία 35.6°C.</i>	<i>171</i>
<i>Ρεόγραμμα 10.11: CMC συγκέντρωσης 1 % w/v και μπετονίτης 2.5 % w/v αντίστοιχα 500 ml σε 38.8°C.....</i>	<i>180</i>
<i>Ρεόγραμμα 10.12: CMC συγκέντρωσης 1 % w/v και μπετονίτης 2.5 % w/v αντίστοιχα 500 ml σε 48 °C.....</i>	<i>180</i>
<i>Ρεόγραμμα 10.13: Μπετονίτης 2.5 % w/v 500 ml.</i>	<i>193</i>
<i>Ρεόγραμμα 10.14: Μπετονίτης 2.5 % w/v 10 lt.....</i>	<i>194</i>
<i>Ρεόγραμμα 11.1: Μπετονίτης 1.5 % w/v 620 lt σε ομόκεντρο δακτύλιο.....</i>	<i>233</i>
<i>Ρεόγραμμα 11.2: Μπετονίτης 18.5 % w/v 620 lt σε 100 % ομόκεντρο δακτύλιο.</i>	<i>245</i>
<i>Ρεόγραμμα 11.3: Μπετονίτης 1.85 % w/v 670 lt σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο.</i>	<i>258</i>
<i>Ρεόγραμμα 11.4: Μπετονίτης 1.5 % w/v 670 lt σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο.</i>	<i>267</i>

Πίνακας Διαγραμμάτων ροής

<i>Διάγραμμα ροής 6.1: Διάγραμμα ροής μοντέλου RGU – TUC.</i>	<i>70</i>
<i>Διάγραμμα ροής 7.1: Διάγραμμα Ροής μοντέλου RGU – TUC με την τεχνική Mud Cap.</i>	<i>78</i>
<i>Διάγραμμα ροής 11.1: Παρουσίαση λειτουργίας μοντέλου TUC.</i>	<i>219</i>

Πίνακας εικόνων

<i>Εικόνα 2.1: West Vanguard Blow Out.</i>	9
<i>Εικόνα 2.2: Blow Out σε εκτέλεση υδρομέτρησης.</i>	10
<i>Εικόνα 4.1: Σύστημα παραγωγής αζώτου (Ασπριτάκης 2005).</i>	52
<i>Εικόνα 8.1: Ιξωδόμετρο Grace Instrument M3500a και επιφάνεια εργασίας του λογισμικού.</i>	95
<i>Εικόνα 8.2: Τυπική επιφάνεια εργασίας λογισμικού.</i>	97
<i>Εικόνα 8.3: Δεξαμενή ρευστού.</i>	104
<i>Εικόνα 8.4α: Αντλία συστήματος.</i>	106
<i>Εικόνα 8.4β: Inverter ρύθμισης λειτουργίας αντλίας.</i>	106
<i>Εικόνα 8.5α: Σύστημα ανάδευσης πολφού.</i>	107
<i>Εικόνα 8.5β: Inverter μοτέρ ανάδευσης πολφού.</i>	107
<i>Εικόνα 8.6: Αισθητήρας ροής και ιδιοτήτων ρευστού Rheonic.</i>	108
<i>Εικόνα 8.7: Ηλεκτρονική μονάδα επεξεργασίας και παρουσίασης δεδομένων.</i>	108
<i>Εικόνα 8.8: Αισθητήρας DP – 15 συστήματος ροής.</i>	110
<i>Εικόνα 8.9: Συνδεσμολογία συστήματος μέτρησης πίεσης – πρόσοψη.</i>	113
<i>Εικόνα 8.10: Συνδεσμολογία συστήματος μέτρησης πίεσης – πίσω όψη.</i>	113
<i>Εικόνα 8.11: Συνδεσμολογία συστήματος μέτρησης πίεσης – πίσω όψη και φλάντζα σύνδεσης τμημάτων δακτυλίου.</i>	114
<i>Εικόνα 8.12: Όργανο βαθμονόμησης DP 140.</i>	115
<i>Εικόνα 8.13: Διαδικασία βαθμονόμησης DP 15.</i>	115
<i>Εικόνα 8.14: Διάφραγμα 3 – 28 56 cm H₂O.</i>	116
<i>Εικόνα 8.15: DAQ (Data Acquisition PCI).</i>	120
<i>Εικόνα 8.16: Front Panel του VI του εργαστηρίου.</i>	122
<i>Εικόνα 9.1: Hamilton Beach μίξερ.</i>	127
<i>Εικόνα 11.1: Μπετονίτης στην δεξαμενή του μοντέλου οριζόντιας γεώτρησης.</i>	234
<i>Εικόνα 11.2: Κυκλοφορία μπετονίτη στο μοντέλο οριζόντιας γεώτρησης για την καταγραφή δεδομένων.</i>	234

Πίνακας σχημάτων

Σχήμα 3.1: Κεντρικό παράθυρο του προγράμματος “Rheology”.....	21
Σχήμα 3.2: Παράθυρο εισαγωγής ονόματος, τύπου προβλήματος, γεωμετρίας και μετρικού συστήματος.....	22
Σχήμα 3.3: Εισαγωγή παραμέτρων προβλήματος.....	23
Σχήμα 3.4: Αποτελέσματα επίλυσης προβλήματος με το πρόγραμμα “Rheology”.....	24
Σχήμα 3.5: Προφίλ ταχύτητας ρευστού μέσα στο δακτύλιο.....	25
Σχήμα 3.6: Καθορισμός μέγιστου ρυθμού ροής για τον υπολογισμό της καμπύλης $Q-\Delta P/\Delta L$...	25
Σχήμα 3.7: Υπολογισμός της καμπύλης $Q-\Delta P/\Delta L$ και επισημάνση του σημείου ($Q-\Delta P/\Delta L$) που υπολογίστηκε με βάση τις παραμέτρους του μοντέλου.	26
Σχήμα 3.8 : Κεντρικό παράθυρο του προγράμματος “Fitting Model”.....	27
Σχήμα 3.9: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων	28
Σχήμα 3.10: Επιλογή δεδομένων από το Excel.	29
Σχήμα 3.11: Επιλογή μοντέλου ροής και ορισμός αρχικής τιμής και ορίων παραμέτρων.	30
Σχήμα 3.12: Πρόοδος διαδικασίας επίλυσης.....	31
Σχήμα 3.13: Αποτελέσματα επίλυσης σε μορφή πίνακα και γραφική απεικόνιση προσέγγισης.	33
Σχήμα 4.1: Συμβατική διάτρηση.	36
Σχήμα 4.2: Διάτρηση με χρήση συσκευής BOP.	37
Σχήμα 4.3: Προβλήματα που εμφανίζονται κατά την διάρκεια της διάτρησης.....	39
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα κατηγοριοποίησης Managed Pressure Drilling τεχνικών.....	43
Σχήμα 4.5: Παράδειγμα τεχνικής Mud Cap Drilling.	44
Σχήμα 4.6: U – TUBE αναλογία.	47
Σχήμα 4.7: Παράδειγμα τεχνικής διπλής βαθμίδας.	49
Σχήμα 4.8: Διάταξη κυκλοφορίας ρευστού - αερίου μέσω των στελεχών διάτρησης.	54
Σχήμα 4.9: Διάταξη εισαγωγής αερίου μέσω “παρασιτικού” σωλήνα.	54
Σχήμα 7.1: Τεχνική Mud Cap.	75
Σχήμα 7.2: Παράσταση γεώτρησης ως U-TUBE.....	75
Σχήμα 8.1: Βασικές μονάδες πειραματικού συστήματος ροής.	102

Σχήμα 8.2: Μοντέλο οριζόντιας γεώτρησης εργαστηρίου Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής.....	103
Σχήμα 8.3: Σχηματική παράσταση του αισθητήρα DP – 15.	111
Σχήμα 8.4: Συσκευή ψηφιακής ένδειξης συστήματος ροής.....	112
Σχήμα 8.5: Διακόπτες βαθμονόμησης καταγραφικού οργάνου.....	117
Σχήμα 8.6: Σύστημα DAQ σε H/Y.....	121
Σχήμα 8.7: Διάγραμμα ροής VI εργαστηρίου.....	122
Σχήμα 10.1: Επίδραση της θερμοκρασίας σε ρευστό CMC – Μπετονίτη.....	190
Σχήμα 11.1: Ομόκεντρος δακτύλιος.....	256
Σχήμα 11.2: Έκκεντρος δακτύλιος.....	257

Περίληψη.

Οι διαρκώς και ολοένα αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες του πληθυσμού της γης καθώς και οι απαιτήσεις για ορυκτά καύσιμα όπως το πετρέλαιο κυρίως από τις αναπτυσσόμενες χώρες του κόσμου (Κίνα, Ινδία, Λατινική Αμερική, Αφρικανικές χώρες) αλλά και η οικονομική ανάπτυξη χωρών όπως η Ρωσία (χώρα η οποία έχει στο έδαφος της περίπου το 60% των παγκοσμίων αποθεμάτων φυσικού αερίου, ώθησαν της εταιρίες εκμετάλλευσης και παραγωγής υδρογονανθράκων να στραφούν σε ταμειυτήρες “δυσκολότερους” προς εκμετάλλευση.

Καθώς οι υδρογονάνθρακες θα αποτελέσουν και αποτελεί το πλέον οικονομικό και το πιο βέβαιο καύσιμο για τον 21^ο αιώνα, οι εταιρίες πετρελαίου επενδύουν σε τεχνικές οι οποίες τους επιτρέπουν να φέρουν στην επιφάνεια υδρογονάνθρακες που μέχρι 20 χρόνια πριν θεωρούταν αδύνατη η εκμετάλλευση των συγκεκριμένων ταμειυτήρων.

Έχοντας σαν κυριότερους λόγους τους προαναφερθέντες η βιομηχανία γεωτρήσεων υδρογονανθράκων αποτελεί ένα κλάδο ο οποίος βρίσκεται σε διαρκή εξέλιξη και αποτελεί την αιχμή του δόρατος για τις πετρελαϊκές εταιρίες αλλά και τις πετρελαιοπαραγωγούς χώρες, οι οποίες επενδύουν μεγάλα ποσά για την ανάπτυξη νέων τεχνικών διάτρησης.

Τις δύο τελευταίες δεκαετίες οι τεχνικές Διάτρησης Ρυθμιζόμενης Πίεσης (Managed Pressure Drilling) καθώς και η τεχνική Διάτρησης με Επένδυση (Casing Drilling) κατακτούν όλο και μεγαλύτερο ποσοστό επί του συνόλου των γεωτρήσεων που εκτελούνται κάθε χρόνο. Ο λόγος είναι ότι αυτές οι τεχνικές επέτρεψαν την εκμετάλλευση κοιτασμάτων πολύ μεγάλου βάθους, αλλά και να μειώσουν ταυτόχρονα τον χρόνο που απαιτείται για την εκτέλεση μια γεώτρησης τόσο στην ξηρά αλλά και στην θάλασσα.

Παρ’όλες τις προσπάθειες και τις καινούριες τεχνικές που αναπτύχθηκαν, ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα είναι η απουσία κατάλληλων σχεδιαστικών και υπολογιστικών προγραμμάτων τα οποία θα υποστηρίξουν και θα κάνουν ακόμα αποτελεσματικότερες αυτές τις τεχνικές. Το μεγαλύτερο πρόβλημα το οποίο απορρέει από την απουσία αυτών των προγραμμάτων είναι η μη δυνατότητα πλήρους

πρόβλεψης του προφίλ της πίεσης κατά μήκος της γεώτρησης, κατά την διάρκεια εκτέλεσής της γεώτρησης.

Η ανάπτυξη τέτοιων προγραμμάτων πρόβλεψης πτώσης πίεσης έχει καταστεί τα τελευταία δέκα χρόνια επιτακτική ανάγκη αφού θα βελτιστοποιήσει ακόμα περισσότερο τα οφέλη τα οποία έχουν επιφέρει οι τεχνικές Διάτρησης Ρυθμιζόμενης Πίεσης (Managed Pressure Drilling) και Διάτρησης με Επένδυση (Casing Drilling).

Σε αυτή την εργασία θα παρουσιαστούν τρία διαφορετικά μοντέλα Υδραυλικής Διατρήσεων (Drilling Hydraulics) και θα συγκριθούν με αυτά, πειραματικά δεδομένα τα οποία καταγράφηκαν στο μοντέλο προσομοίωσης οριζόντιας γεώτρησης του εργαστηρίου Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Σκοπός είναι να συγκριθούν τα πειραματικά δεδομένα που καταγράφηκαν, με τους θεωρητικούς υπολογισμούς από τα τρία μοντέλα και να εξαχθούν συμπεράσματα για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης που κάνει το κάθε ένα από αυτά. Επίσης θα γίνει και μια λεπτομερής παρουσίαση του κυριότερου παράγοντα που επιδρά στην πτώση πίεσης κατά την διάρκεια εκτέλεσης μια γεώτρησης και δεν είναι άλλος από τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του πολφού διάτρησης.

Στην συνέχεια θα περιγραφούν περιληπτικά τα περιεχόμενα κάθε κεφαλαίου.

Κεφάλαιο 1^ο: Στο 1^ο Κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στα κυριότερα συστατικά αυτής τη εργασίας τα οποία είναι η ρεολογία των πολφών διάτρησης, τα ρεολογικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής, καθώς και τους λόγους για τους οποίους μελετήθηκε η πτώση πίεσης.

Κεφάλαιο 2^ο: Στο 2^ο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους πολφούς γεωτρήσεων και περιγράφονται οι ιδιότητες τους και τα οφέλη που προκαλεί η χρήση τους σε διαδικασίες διάτρησης.

Κεφάλαιο 3^ο: Στο 3^ο Κεφάλαιο γίνεται αναλυτική αναφορά στα υπολογιστικά μοντέλα πτώσης πίεσης και καθορισμού του είδους του ρευστού που αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο για την εκτέλεση αυτής της εργασίας.

Κεφάλαιο 4^ο: Στο 4^ο Κεφάλαιο γίνεται αναλυτική αναφορά των τεχνικών Διάτρησης Ρυθμιζόμενης Πίεσης (Managed Pressure Drilling).

Κεφάλαιο 5^ο: Στο 5^ο Κεφάλαιο αναλύονται οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την πτώση πίεσης και το προφίλ της πτώσης πίεσης κατά την διάρκεια εκτέλεσης μιας γεώτρησης.

Κεφάλαιο 6^ο: Στο 6^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται διαδικασία σχεδιασμού και ο τρόπος λειτουργίας του υπολογιστικού μοντέλου πτώσης πίεσης το οποίο αποτελεί προϊόν συνεργασίας μεταξύ του εργαστηρίου Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής με το πανεπιστήμιο Robert Gordon University (RGU).

Κεφάλαιο 7^ο: Στο 7^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τεχνικές διάτρησης με Πίεση με Επικάλυψη Πολφού (Mud Cap Drilling) και Διάτρησης με Επένδυση (Casing Drilling). Επίσης θα παρουσιαστούν και αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του συνδυασμού των δύο αυτών τεχνικών και τα οποία παρουσιάστηκαν στο συνέδριο Offshore Europe 2007.

Κεφάλαιο 8^ο: Στο 8^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα όργανα του εργαστηρίου Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Κεφάλαιο 9^ο: Στο 9^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία παρασκευής των πολφών που μελετήθηκαν και γίνεται παρουσίαση κάθε προσθέτου που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή πολφού.

Κεφάλαιο 10^ο: Στο 10^ο Κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των ρευστών τα οποία μελετήθηκαν και των ρεολογικών τους ιδιοτήτων.

Κεφάλαιο 11^ο: Στο 11^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα πτώσης πίεσης και η σύγκριση τους με τα θεωρητικά μοντέλα υπολογισμού πτώσης πίεσης.

Μέρος της εργασίας πραγματοποιήθηκε στο τμήμα Well Design της σχολής Mechanical Engineering του Robert Gordon University της Σκωτίας, από τον Δαλαμαρίνη Παναγιώτη, υπό τη καθοδήγηση του Καθηγητή Babs Oyenein. Αυτό το τμήμα της εργασίας έγινε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Προγράμματος *Leonardo Da Vinci* και με την υποστήριξη της εταιρίας Hellenic Management Accounting

Center (HELMAC) που διαχειρίζεται το συγκεκριμένο πρόγραμμα. Η συγκεκριμένη εργασία έχει δώσει έως σήμερα τις ακόλουθες δημοσιεύσεις.

Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά.

- **V. C. Kelessidis, C. Tsamantaki, P. Dalamarinis, E. Repouskou and E. Tombacz.**

Influence of electrolyte concentration on rheological properties of Zenith and Wyoming bentonite - water suspensions, Mineral Wealth, 144, 31-45, 2007.

- **V. C. Kelessidis, C. Tsamantaki, P. Dalamarinis.**

Effect of pH and electrolyte on the rheology of aqueous Wyoming bentonite dispersions, Applied Clay Science, 38, 243-264, 2007.

- **M. B.Oyeneyin, V.C. Kelessidis, G. Bandelis and P. Dalamarinis.**

Developing a Managed Pressure Drilling Strategy for Casing Drilling Operations, Advanced Materials Research, 62-64, 456-465, 2009.

Παρουσιάσεις σε συνέδρια.

- **V. C. Kelessidis, C. Tsamantaki, P. Dalamarinis.**

Influence of pH and electrolyte concentration on Herschel-Bulkley rheological parameters for Wyoming bentonite-water suspensions. Paper presented to the 3rd Annual European Rheology Conference, April 27-29, 2006, Hersonisos, Crete.

- **V. C. Kelessidis, C. Tsamantaki, P. Dalamarinis and G.E. Mpandelis.**

Static and Dynamic Yield Stress of Water-Bentonite Suspensions, Paper presented at the 2nd International Conference AMIREG, September 25-27 2006, Chania, Greece.

- **P. Dalamarinis , B. Oyeneyin.**

Mud Cap with Casing Drilling, selected from the Society of Petroleum Engineering as one out of best undergraduate student paper across Europe presented in the Offshore Europe Conference, September 4, 2007, Aberdeen, UK.

Βραβεία σε διαγωνισμούς.

➤ **Panagiotis Dalamarinis.**

Mud Cap with Casing Drilling, 3rd place at Europe Offshore student paper contest, Aberdeen, UK, 2007.

Κεφάλαιο 1^ο - Τα βασικά τμήματα της εργασίας.

1.1.Ρεολογία.

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες κατά την διάρκεια διάτρησης μιας γεώτρησης που επηρεάζει την αποτελεσματικότητα των τεχνικών διάτρησης που εφαρμόζονται είναι η ρεολογία του πολφού διάτρησης. Τα ρευστά τα οποία χρησιμοποιούνται ανήκουν στην κατηγορία των μη Νευτώνειων ρευστών και η συμπεριφορά τους κατά την κυκλοφορία τους μέσα σε κάθε τμήμα της γεώτρησης καθορίζουν τις τιμές του προφίλ της πίεσης και της πτώσης πίεσης στα διάφορα τμήματα της γεώτρησης.

Η ρεολογία του πολφού διάτρησης εξαρτάται από τα διάφορα συστατικά από τα οποία αποτελείται, δηλαδή τι τύπου είναι το υγρό της βάσης του πολφού (νερό, πετρέλαιο, θαλασσινό νερό, νερό το οποίο περιέχει διάφορους ηλεκτρολύτες) και το είδος των στερεών (μπεντονίτης, Carborol, CMC, Pac και άλλα συστατικά) που προστίθενται στο υγρό βάσης για την παρασκευή του πολφού.

Συνήθως τα περισσότερα ρευστά διάτρησης, ανήκουν στην κατηγορία των Herschel Buckley ρευστών, και αποτελούν τα πιο “δύσκολα” ρευστά όσον αφορά την μελέτη της ρεολογικής συμπεριφοράς τους, κυρίως στην τυρβώδη περιοχή και τον τρόπο που αυτή επιδρά στην πτώση πίεσης κατά την κυκλοφορία τους μέσα στην γεώτρηση. Αυτό αποτελεί και τον κυριότερο σκοπό αυτής της εργασίας αφού το ενδιαφέρον μας θα εστιαστεί στην μελέτη της πτώσης πίεσης, στο μοντέλο οριζόντιας γεώτρησης, στην τυρβώδη περιοχή ροής και για αυτήν θα αξιολογηθούν τα θεωρητικά μοντέλα με τα οποία θα συγκρίνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα.

1.2. Μοντέλα Υδραυλικής Διατρήσεων (Drilling Hydraulics Models).

Τα μοντέλα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της θεωρητικής πτώσης πίεσης η οποία θα συγκριθεί στην συνέχεια με τα πειραματικά αποτελέσματα είναι τα ακόλουθα.

- Το μοντέλο το οποίο σχεδιάστηκε το 2006 – 2007 στο τμήμα Well Design της σχολής Mechanical Engineering του Robert Gordon University της Σκωτίας, από

τον Δαλαμαρίνη Παναγιώτη, υπό τη καθοδήγηση του Καθηγητή Babs Oyenehin (Dalamarinis, 2007).

- Το μοντέλο το οποίο σχεδίασε ο Αναπληρωτής Καθηγητής Κελεσσίδης Βασίλειος και ο Φουναργιωτάκης Κωνσταντίνος στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, του Πολυτεχνείου Κρήτης (Founargiotakis et al., 2008).
- Το μοντέλο του American Petroleum Institute (API) (API, 2006).

1.3. Γιατί θα μελετηθεί η πτώση πίεσης.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα κατά την εκτέλεση μιας γεώτρησης υδρογονανθράκων είναι η επίτευξη όσο το δυνατόν καλύτερης διαχείρισης του προφίλ της πτώσης πίεσης και της πτώσης πίεσης μέσα στην γεώτρηση. Αυτό είναι και το ζητούμενο αλλά και η καινοτομία την οποίο εισάγουν οι τεχνικές Διάτρησης Ρυθμιζόμενης Πίεσης (Managed Pressure Drilling).

Το να μπορέσουμε να ελέγξουμε αποτελεσματικά το προφίλ της πίεσης μέσα στην γεώτρηση έχει σαν αποτέλεσμα την ελάττωση όλων αυτών των προβλημάτων που σχετίζονται με τις γεωτρήσεις υδρογονανθράκων και αφορούν τον έλεγχο της γεώτρησης και θα παρουσιαστούν στα επόμενα κεφάλαια όπου και θα αναλυθούν οι τεχνικές αυτές.

Εν συντομία μπορούμε να αναφέρουμε ότι ο έλεγχος σε κάποια επιθυμητά όρια της πτώσης πίεσης μέσα στην γεώτρηση επιφέρει :

- Μείωση των προβλημάτων κατά την διάρκεια της διάτρησης.
- Μεγαλύτερη προστασία του ταμιευτήρα.
- Ελαχιστοποίηση του χρόνου και του κόστους διάτρησης.
- Μεγαλύτερη ασφάλεια για το προσωπικό που εκτελεί την διάτρηση.
- Λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Κεφάλαιο 2^ο - Πολφού Γεωτρήσεων.

2.1. Γενικά στοιχεία

Τα ρευστά γεώτρησης αποτελούν το σημαντικότερο στοιχείο στην εκτέλεση μιας γεώτρησης και μας βοηθούν ώστε (Κελεσίδης, 2006) :

- Να καθαρίζουν τα θραύσματα των πετρωμάτων κάτω από το κοπτικό άκρο και να τα μεταφέρουν στην επιφάνεια.
- Να ασκούν υδροστατική πίεση στα τοιχώματα του φρέατος ώστε να αποτρέπουν την εισροή ρευστών του ταμιευτήρα στο φρέαρ.
- Να διατηρούν το φρέαρ καθαρό έως ότου γίνει η επένδυση με σωλήνα.
- Να ψύχουν και να λιπαίνουν την διατρητική στήλη και το κοπτικό άκρο.
- Να δημιουργούν μέσα στην γεώτρηση ένα επιθυμητό προφίλ πτώσης πίεσης και πτώση πίεσης σε κάθε τμήμα της γεώτρησης.

Επιπρόσθετα, τα ρευστά γεώτρησης πρέπει να έχουν τις ακόλουθες ιδιότητες:

- Να επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν καλύτερος σχεδιασμός των ρευστών (οικονομικός και χρηστικός) για κάθε περίπτωση γεώτρησης.
- Να μην προκαλούν μη αναστρέψιμα προβλήματα στα πετρώματα που έρχονται σε επαφή.
- Να μην προκαλούν διάβρωση της διατρητικής στήλης.
- Να είναι εύκολη η παρασκευή τους και σχετικά οικονομική.

Ο βασικός σκοπός φυσικά για τον οποίο είναι απαραίτητη ή δια μέσου του ρευστού απομάκρυνση των στερεών, είναι η παραπέρα συνέχιση της διάτρησης και η αποφυγή κολλημάτων του κοπτικού άκρου και η διατήρηση του επιθυμητού προφίλ πίεσης και της πτώσης πίεσης μέσα στην γεώτρηση. Τα προβλήματα από το μη σωστό καθαρισμό του φρέατος και την διατήρηση της πτώσης πίεσης σε επιθυμητά όρια έχει σαν αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση του κόστους που προκύπτει από κόλλημα της διατρητικής στήλης (εκατοντάδες χιλιάδες US \$, Schlumberger, 2005) ή του κολλήματος του κοπτικού άκρου στις συμβατικές αλλά και στις Managed Pressure Drilling τεχνικές διάτρησης (B. Fossli et al., 2006, J. Petersen et al., 2008). Ο χαμένος χρόνος από την εμφάνιση τέτοιου είδους προβλημάτων μπορεί να φτάσει και στο 70% του συνολικού χρόνου της διάτρησης (Longwell, 2002).

Για τη βέλτιστη λειτουργία των ρευστών γεώτρησης χρησιμοποιούνται πρόσθετα που έχουν σημαντικό κόστος ανεβάζοντας το κόστος του ρευστού γεώτρησης σε δεκάδες εκ. US \$ (Kelessidis, 2007). Η απώλεια του κατά την διάρκεια της διάτρησης μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα την καταστροφή της γεώτρησης και την απώλεια του εξοπλισμού διάτρησης. Σε πολλές περιπτώσεις μάλιστα η απώλεια του ρευστού διάτρησης μπορεί να αποφέρει την απώλεια στον έλεγχο του προφίλ της πίεσης, έχοντας σαν αποτέλεσμα την εισροή υδρογονανθράκων από τον ταμιευτήρα στην γεώτρηση και ακολούθως προς την επιφάνεια και επιφέροντας την δημιουργία των λεγόμενων Blow Out, κάτι το οποίο επιφέρει συνήθως και την απώλεια της πλατφόρμας γεώτρησης σε θαλάσσια περιβάλλοντα (Εικόνα 2.1) αλλά μπορεί να συμβεί και σε υδρογεωτρήσεις (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.1: West Vanguard Blow Out (Norwegian Continental Shelf, Haltenbanken, 1985).



Εικόνα 2.2: Blow Out σε εκτέλεση υδρογεώτρησης που συνέβη στον Άγιο Βασίλειο Κορινθίας το 2008.

Οι κυριότεροι παράγοντες που προσδιορίζουν την επιλογή του ρευστού γεώτρησης είναι:

- Τα είδη των πετρωμάτων που θα απαντηθούν στο φρέαρ.
- Το εύρος των θερμοκρασιών, διαπερατότητας, πιέσεων ρευστών πετρωμάτων, σκληρότητα πετρωμάτων.
- Περιβαλλοντικοί λόγοι.
- Το περιβάλλον στο οποίο γίνεται η γεώτρηση (θαλάσσιο ή χερσαίο).
- Το είδος του ταμιευτήρα.
- Τα όρια της πτώσης πίεσης και του προφίλ της πίεσης τα οποία θέλουμε να διατηρήσουμε στην γεώτρηση κατά την διάτρηση.

Κατά κύριο λόγο, η σύσταση του ρευστού προσδιορίζεται βάσει της πτώσης πίεσης και του προφίλ της πίεσης που θέλουμε να επιτύχουμε στην γεώτρηση. Περισσότερο συχνά χρησιμοποιούνται ρευστά γεώτρησης με βάση το νερό (water based muds – WBM) ενώ τα ρευστά με βάση το πετρέλαιο (oil based muds – OBM) είναι ακριβότερα και απαιτούνται εξειδικευμένοι τρόποι αντιμετώπισης κατά την

γεώτρηση και μετά την γεώτρηση για περιβαλλοντικούς λόγους. Τα ρευστά με βάση το πετρέλαιο χρησιμοποιούνται συνήθως σε γεωτρήσεις με υψηλές θερμοκρασίες και σε πετρώματα τα οποία παρουσιάζουν τάσεις παραμόρφωσης του ανοίγματος της γεώτρησης (κυρίως σχιστολίθων και αλατούχων δομών, Bland et al., 2002, Herzhaft, 2001).

Η χρήση αερίων ως ρευστών γίνεται όταν αντιμετωπίζονται πετρώματα που είναι συμβατά με αέρια και μη διαπερατά. Επίσης η χρήση αερίων σε συνδυασμό ρευστά γεώτρησης χρησιμοποιείται κατά την διάρκεια εκτέλεσης γεωτρήσεων με τις μεθόδους των Under Balanced τεχνικών (Perez-Telez et al, 2002, Sunthankar et al., 2001). Μία γενική ταξινόμηση των ρευστών γεώτρησης παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα.

ΥΓΡΑ			ΜΙΓΜΑΤΑ ΑΕΡΙΩΝ ΥΓΡΩΝ		ΑΕΡΙΑ		
Πολφοί με βάση το νερό και διάφορους ηλεκτρολύτες (NaCl,KCl,κτλ) (Water Based Muds)	Πολφοί με βάση το πετρέλαιο (Oil Based Muds)	Πολφοί με βάση συνθετικά υλικά (Synthetic Based Muds)	Αφροί (Foam)	Πολφοί με αέριο	Αέρας	Φυσικό Αέριο	Αζωτο

Πίνακας 2.1: Ταξινόμηση ρευστών γεώτρησης.

Για αλλαγές ή προσαρμογές των χαρακτηριστικών των ρευστών γεώτρησης προστίθενται διάφορα συστατικά στην επιφάνεια, και η επίδραση τους, στις ιδιότητες των πολφών περιγράφεται παρακάτω.

- Για την αύξηση της πυκνότητας, για την αντιμετώπιση των πιέσεων υπεδάφους, προστίθεται συνήθως βαρύτης ή κάποιο άλλο συστατικό μεγάλου ειδικού βάρους.
- Για την αύξηση του ιξώδους, προστίθενται υλικά (άργιλοι, πολυμερή και γαλακτώματα) για καλύτερο καθαρισμό του φρέατος και για καλύτερο έλεγχο της πτώσης πίεσης και του προφίλ της πίεσης στην γεώτρηση, καθώς επίσης και σε περίπτωση παύσης της διάτρησης να καθυστερήσει την καθίζηση των στερεών μέσα στην γεώτρηση, ώστε να αποφευχθούν “κολλήματα” των διατρητικών στελεχών.
- Για την μείωση του ιξώδους, προστίθενται διασπορείς (dispersants) ή αντισυσσωρευτικά (deflocculants) και χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου θέλουμε να επιτύχουμε μείωση των αναπτυσσόμενων πιέσεων ή και κατάσταση υποπίεσης στην περιοχή ταμιευτήρα (Under Balance Drilling).
- Για την ελάττωση του ρυθμού διήθησης των ρευστών στα πετρώματα προστίθενται άργιλοι, πολυμερή, αμυλώδεις ουσίες, ασφαλικές ουσίες
- Προστίθενται άλατα για προστασία των πετρωμάτων υπεδάφους, για προστασία του ρευστού από μελλοντική επίδραση αλάτων που προέρχονται από τα ρευστά των πετρωμάτων.

Άλλα πρόσθετα περιλαμβάνουν λιπαντικά, αντιδιαβρωτικά, χημικά για την δέσμευση κατιόντων Ca^{++} και συσσωρευτικά (flocculants) ή λεπτυντές (thinners) που βοηθούν στην συσσωμάτωση των μικρών θραυσμάτων πετρωμάτων για την καλύτερη απομάκρυνση των στερεών στην επιφάνεια. Πολλές φορές προστίθεται καυστικό νάτριο για την αύξηση του pH που βοηθά στην καλύτερη λειτουργία των διασπορέων και ελαττώνει την διάβρωση.

2.2. Ιδιότητες ρευστών διάτρησης.

Οι βασικές ιδιότητες κατηγοριοποιούνται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες.

- Πυκνότητα (βάρος λάσπης – mud weight).

- Ρεολογικές ιδιότητες.
- Φιλτράρισμα (διήθηση).

Πυκνότητα

Η πυκνότητα του πολφού (mud weight or density) είναι η μάζα του ρευστού ανά μονάδα όγκου. Συνήθως εκφράζεται σε lbm / gal (ppg), αλλά και ως lbm / ft^3 , ή πτώση πίεσης ανά πόδι (εκατό πόδια) – psi / ft . Η τελευταία μονάδα είναι πολλή χρήσιμη γιατί είναι δυνατόν πολύ γρήγορα να προσδιορισθεί η υδροστατική πίεση του ρευστού σε συγκεκριμένο βάθος του φρέατος ($P = \rho \cdot g \cdot h$).

Η πυκνότητα του ρευστού γεώτρησης ρυθμίζεται ώστε να παρέχεται ικανή υδροστατική πίεση για εξισορρόπηση της πίεσης των ρευστών των πετρωμάτων αλλά και να μην είναι πολύ υψηλή ώστε να προκαλεί θραύση των πετρωμάτων.

Ρεολογικές ιδιότητες.

Ρεολογία είναι μία ευρεία έννοια που περιγράφει την μελέτη της παραμόρφωσης των υλικών υπό την επίδραση δυνάμεων (περιλαμβανομένης και της ροής). Στην ορολογία των γεωτρήσεων, οι όροι ιδιότητες ρευστών και ιξώδες χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των ρευστών γεώτρησης σε κίνηση. Ρευστά υψηλού ιξώδους εκφράζονται ως παχύρρευστα (thick) και χαμηλού ιξώδους ως λεπτόρρευστα (thin).

Το ιξώδες του ρευστού είναι η ιδιότητα αντίστασης σε ροή / κίνηση. Το επιθυμητό ιξώδες για ρευστά γεώτρησης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως πυκνότητα ρευστού, διάμετρος φρέατος, παροχή ρευστού, ρυθμός διάνοιξης, απαιτήσεις πιέσεων, κατάσταση τοιχωμάτων στο φρέαρ. Το ιξώδες του ρευστού γεώτρησης είναι συνάρτηση τριών παραγόντων

- του ιξώδους της συνεχούς φάσης,
- το μέγεθος, μορφή και ποσότητα στερεών σωματιδίων (πλαστικό ιξώδες – plastic viscosity),
- τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων (σημείο εκκίνησης – yield point).

Το ιξώδες της συνεχούς φάσης (νερό ή πετρέλαιο) επηρεάζεται από την θερμοκρασία (του πετρελαίου περισσότερο από το νερό). Ρευστό γεώτρησης με συγκεκριμένο ποσοστό κατά βάρος μεγάλου μεγέθους στερεών παρουσιάζει μικρότερο ιξώδες από ρευστό με ίδιο ποσοστό στερεών αλλά μικρότερου μεγέθους. Αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο αριθμό στερεών σωματιδίων και στην μεγαλύτερη επιφάνεια που πρέπει να διαβραχεί.

Τα κυριότερα υλικά που χρησιμοποιούνται για την αύξηση του ιξώδους είναι άργιλοι (κυρίως μπεντονίτης) και διάφορα πολυμερή. Η ελάττωση του ιξώδους επιτυγχάνεται είτε με την ελάττωση του ποσοστού των στερεών (π.χ. με αραίωση ή με μηχανικά μέσα) ή με την αδρανοποίηση των ελκτικών δυνάμεων με την προσθήκη χημικών.

Φιλτράρισμα (Απώλεια διηθήματος ή απώλεια ρευστού).

Η απώλεια υγρού από το ρευστό γεώτρησης (σε πορώδη πετρώματα) ρυθμίζεται με το υπόστρωμα λάσπης (filter cake) που δημιουργείται από τα στερεά του ρευστού γεώτρησης.

Κατά την γεώτρηση, τα στερεά εναποτίθενται στα τοιχώματα του φρεατίου και το υγρό διαπερνά το δημιουργηθέν υμένιο (film) και εισέρχεται στους πόρους των πετρωμάτων. Αυτό το φαινόμενο πρέπει να περιορισθεί στο ελάχιστο και επιτυγχάνεται με το ρευστό γεώτρησης (είναι μία από τις βασικές του ιδιότητες) που δημιουργεί ένα λεπτό υπόστρωμα στα τοιχώματα του φρέατος και δεν επιτρέπει την διήθηση και διαφυγή υγρού στους πόρους των πετρωμάτων.

Η ρύθμιση της διήθησης είναι πολύ σημαντική για την παραγωγή του κοιτάσματος, για την υποβοήθηση των διαγραφιών μελέτης του υπεδάφους και για την σταθερότητα των τοιχωμάτων του φρέατος. Ταυτόχρονα πρέπει όμως να λαμβάνεται υπόψη και η πιθανότητα να λειτουργεί το υπόστρωμα αυτό ικανοποιητικά για την ελαχιστοποίηση της διήθησης αλλά και να μην διευκολύνει άλλου είδους προβλήματα, όπως το ‘κόλλημα’ της διατρητικής στήλης στα πετρώματα.

2.3. Ρεολογικά Μοντέλα.

Τα ρεολογικά μοντέλα που περιγράφουν την συμπεριφορά ενός ρευστού χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα Νευτώνεια και τα μη Νευτώνεια μοντέλα.

Στην κατηγορία των μη Νευτώνειων μοντέλων, τα βασικότερα, και αυτά τα οποία θα μας απασχολήσουν σε αυτή την εργασία είναι τρία. Το μοντέλο Bingham Plastic, το μοντέλο Power Law, και το μοντέλο Herschel-Bulkley, επειδή η συντριπτική πλειοψηφία των ρευστών διάτρησης είναι μη Νευτώνεια ρευστά (Πίνακας 2.2).

Τα δυσκολότερα ρευστά όσον αφορά την πρόβλεψη της πτώσης πίεσης κατά την κυκλοφορία τους μέσα στην γεώτρηση, και της συμπεριφοράς τους, είναι τα ρευστά Herschel-Bulkley. Για τον προσδιορισμό του κατάλληλου ρεολογικού μοντέλου από τα ρεολογικά δεδομένα σχεδιάστηκε το πρόγραμμα Best Fit από τον Αναπληρωτή Καθηγητή Κελεσίδη Βασίλειο. Αυτό το πρόγραμμα εισάγει και μια επιπλέον παραλλαγή του μοντέλου Herschel-Bulkley, το Golden Herschel-Bulkley.

Νευτώνεια Ρευστά	Μη Νευτώνεια Ρευστά		
	Bingham Plastic	Power Law	Herschel-Bulkley

Πίνακας 2.2: Ταξινόμηση ρευστών γεώτρησης.

Περισσότερες πληροφορίες τόσο για το πρόγραμμα “Best Fit” αλλά και για τα ρεολογικά μοντέλα θα αναφερθούν στα επόμενα κεφάλαια.

Κεφάλαιο 3^ο - Υπολογισμός πτώσης πίεσης.

3.1. Γενικά.

Για την επιτυχία των καινούριων τεχνικών διάτρησης είναι απαραίτητος ο έλεγχος της πτώσης πίεσης μέσα στην γεώτρηση κατά την διάτρηση ώστε να μεγιστοποιηθούν τα οφέλη των τεχνικών Managed Pressure Drilling (MPD).

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στα διάφορα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούνται για τον θεωρητικό υπολογισμό της πτώσης πίεσης καθώς επίσης και τα σημαντικότερα τμήματα στα οποία μας ενδιαφέρει ο θεωρητικός υπολογισμός της πτώσης πίεσης σε μια γεώτρηση.

3.2. Μη Νευτώνεια ρευστά διάτρησης και η επίδραση της πτώσης πίεσης από αυτά.

Κατά την διάρκεια εξέλιξης της βιομηχανίας γεωτρήσεων για την κάλυψη των παγκόσμιων αναγκών σε υδρογονάνθρακες, προέκυψαν σημαντικές εξελίξεις όσον αφορά την φύση των ρευστών που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση γεωτρήσεων. Από τις αρχές του αιώνα και την χρήση νερού ως ρευστού διάτρησης, οι ανάγκες για καλύτερο έλεγχο της γεώτρησης οδήγησαν στην αντικατάσταση του νερού από πολφούς οι οποίοι εκπληρώνουν τις ζητούμενες απαιτήσεις όσον αφορά τον έλεγχο της γεώτρησης (καθαρισμός, έλεγχος πίεσης μέσα στην γεώτρηση, σταθεροποίηση των τοιχωμάτων της γεώτρησης). Αυτά τα ρευστά όμως είναι πολύ πιο πολύπλοκα σε σχέση με το νερό για τον υπολογισμό της πτώσης. Τα ρευστά αυτά ανήκουν στην κατηγορία των μη Νευτώνειων ρευστών, που περιέχουν περισσότερους παραμέτρους για την περιγραφή της ρεολογικής συμπεριφοράς τους.

Τα τελευταία χρόνια γίνεται ολοένα και περισσότερο χρήση των ρευστών Herschel-Bulkley στην βιομηχανία γεωτρήσεων (Kelessidis et al., 2007a, Kelessidis et al., 2006, Fordham et al., 1991, Hemphil et al., 1993). Τούτο έχει ως αποτέλεσμα την προσπάθεια ανάπτυξης υπολογιστικών μοντέλων τα οποία θα εκτιμούν την πτώση πίεσης κατά την διάρκεια του σχεδιασμού της γεώτρησης ώστε να αποφευχθούν κατά την διάρκεια της διάτρησης διάφορα προβλήματα που σχετίζονται με αυτή.

Παρ'όλες τις προσπάθειες για την ανάπτυξη αυτών των μοντέλων δεν έχει επιτευχθεί έως σήμερα η δημιουργία ενός υπολογιστικού μοντέλου για ρευστά Herschel-Bulkley, το οποίο να δίνει καλές προβλέψεις στον υπολογισμό της πτώσης πίεσης σε σχέση με δεδομένα τα οποία καταγράφονται κατά την διάρκεια της διάτρησης.

Στην παρούσα εργασία θα γίνει έλεγχος μεταξύ των τριών υπολογιστικών μοντέλων σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα τα οποία θα καταγράφουν στο μοντέλο της οριζόντιας γεώτρησης του εργαστηρίου Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής, και θα γίνει προσπάθεια να εξαχθούν διάφορα συμπεράσματα όσο αφορά την συσχέτιση που εμφανίζουν.

3.3.Υπολογιστικά μοντέλα υπολογισμού πτώσης πίεσης.

Τα μοντέλα που θα χρησιμοποιηθούν είναι τα API, TUC και RGU – TUC και εμφανίζουν ενδιαφέρον για την σύγκρισή τους, γιατί το κάθε ένα από αυτά παρουσιάζει μια διαφορετική προσέγγιση όσο αφορά τον καθορισμό του είδους της ροής του ρευστού και του υπολογισμού της πτώσης πίεσης.

Τα μοντέλα TUC και API έχουν προσομοιωθεί σε περιβάλλον Matlab (Λιόλιος, 2007) και αποτελούν το πρόγραμμα “Rheology” ενώ το μοντέλο RGU – TUC έχει προσομοιωθεί σε περιβάλλον Excel και την χρονική περίοδο συγγραφής αυτής της εργασίας γίνεται προσπάθεια για την προσομοίωση του σε περιβάλλον Matlab.

3.3.1. Μοντέλο American Petroleum Institute (API).

Το μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε από το American Petroleum Institute (API) (API, 2006). Για τον καθορισμό του είδους της ροής του ρευστού κατά την διάρκεια της κυκλοφορίας του υπολογίζει δύο **σταθερούς** κρίσιμους αριθμούς Reynolds, οι οποίοι παραμένουν σταθεροί για ένα οποιοδήποτε ρευστό με συγκεκριμένες ρεολογικές ιδιότητες και δεν επηρεάζεται από την παροχή του ρευστού. Εάν ο αριθμός Reynolds είναι μικρότερος από τον πρώτο **σταθερό** κρίσιμο Reynolds, τότε η ροή του ρευστού είναι στρωτή, εάν είναι μεταξύ των δύο αυτών αριθμών είναι στην

μεταβατική περιοχή ροής ενώ εάν είναι μεγαλύτερος από τον δεύτερο, η ροή είναι στην τυρβώδη περιοχή.

Στην συνέχεια, μετά τον καθορισμό της ροής του ρευστού, το μοντέλο χρησιμοποιεί τις κατάλληλες εξισώσεις και υπολογίζει την πτώση πίεσης.

3.3.2. Μοντέλο TUC.

Το μοντέλο αυτό το οποίο σχεδιάστηκε από τον Αναπληρωτή Καθηγητή Κελεσιδή Βασίλειο και τον Φουναργιωτάκη Κωνσταντίνο (Founargiotakis et al., 2008), λύνει το πρόβλημα με δοκιμή και σφάλμα, μη γνωρίζοντας το είδος ροής (στρωτή/τυρβώδης) αλλά προσδιορίζοντας το, με την επίλυση των αναπτυχθέντων εξισώσεων για Herschel-Bulkley ρευστά σε δακτύλιο. Στο μοντέλο αυτό οι δύο κρίσιμοι αριθμοί Reynolds είναι συνάρτηση της παροχής του ρευστού. Στην συνέχεια με την χρήση των κατάλληλων εξισώσεων που σχεδιάστηκαν για το συγκεκριμένο μοντέλο υπολογίζεται η τιμή της πτώση πίεσης.

3.3.3. Μοντέλο RGU – TUC

Το υπολογιστικό αυτό μοντέλο αναπτύχθηκε από την συνεργασία του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης και του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Robert Gordon University της Σκωτίας.

Η διαφορά με τα δύο προηγούμενα μοντέλα είναι ότι αυτό το μοντέλο για τον καθορισμό του είδους της ροής του ρευστού χρησιμοποιεί την έννοια της κρίσιμης ταχύτητας v_c .

Εάν η μέση ταχύτητα κυκλοφορίας του ρευστού είναι μικρότερη από την κρίσιμη ταχύτητα v_c , η οποία καθορίζεται από τις ρεολογικές ιδιότητες του ρευστού και την γεωμετρία της γεώτρησης και των διατρητικών στελεχών, τότε η ροή του ρευστού χαρακτηρίζεται ως στρωτή ενώ αν είναι μεγαλύτερη χαρακτηρίζεται ως τυρβώδης. Σε αυτό το μοντέλο απουσιάζει η μεταβατική περιοχή ροής σε σχέση με τα άλλα δύο.

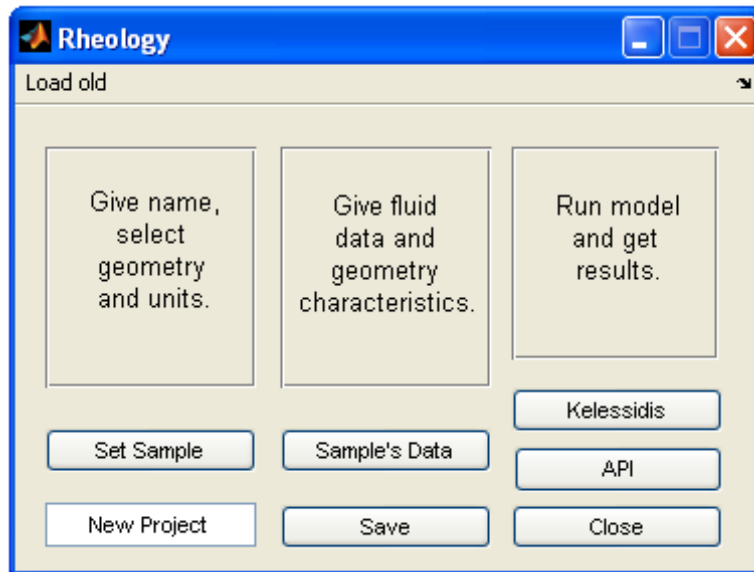
Στην συνέχεια με χρήση των κατάλληλων εξισώσεων που επιλέχτηκαν για τον σχεδιασμό αυτού του μοντέλου υπό την καθοδήγηση του Καθηγητή Babs Oyenehin, γίνεται ο υπολογισμός της πτώσης πίεσης.

3.3.4. Οδηγίες χρήσης προγράμματος “Rheology”.

Γενικά.

Το πρόγραμμα “Rheology” είναι κατασκευασμένο σε περιβάλλον Matlab και υπολογίζει για δεδομένο ρυθμό ροής ρευστού, την πτώση πίεσης ανά μονάδα μήκους σε σωλήνα ή κυκλικό δακτύλιο. Το πρόγραμμα έχει επίσης την δυνατότητα υπολογισμού της ροής με δεδομένη την βαθμίδα της πίεσης. Η επίλυση του προβλήματος δύναται να γίνει με δύο διαφορετικές μεθόδους (Λιόλιος, 2007). Η πρώτη αφορά την νέα μέθοδο που αναπτύχθηκε από τους Κελεσίδη και Φουναργιωτάκη. Η δεύτερη αφορά την μεθοδολογία που προτείνεται από τον οργανισμό τυποποίησης API (API, 2006).

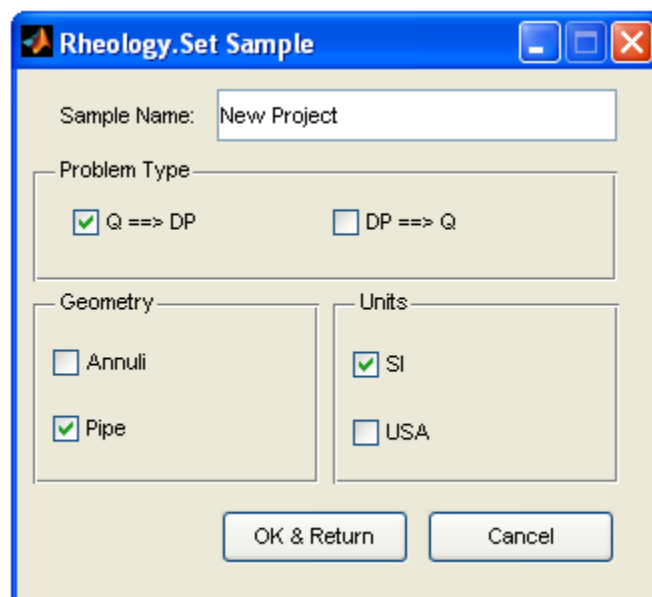
Για την εγκατάσταση του προγράμματος απαιτείται κατ’αρχήν να ορίσουμε τον φάκελο του προγράμματος ως τον τρέχον φάκελο (current directory) του Matlab. Στη συνέχεια η εγκατάσταση του προγράμματος γίνεται με τη εντολή “Rheology_setup” στο command window του Matlab. Κατόπιν, για την εκτέλεση του προγράμματος δίδεται η εντολή “Rheology”. Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται το κεντρικό παράθυρο του προγράμματος. Η χρήση του προγράμματος αποτελείται από τρία διακριτά βήματα: 1) εισαγωγή τύπου προβλήματος, 2) εισαγωγή παραμέτρων και 3) επίλυση και ανάγνωση αποτελεσμάτων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αντί των δύο πρώτων βημάτων είναι δυνατή η φόρτωση δεδομένων από παλαιότερο μοντέλο μέσω της εντολής “Load old”. Στην συγκεκριμένη περίπτωση δίδονται δύο δυνατότητες: α) η φόρτωση μοντέλου όπου είναι γνωστός ο ρυθμός ροής και ζητείται η πτώση πίεσης (“Open Q DP”) και β) η φόρτωση μοντέλου όπου είναι γνωστή η πτώση πίεσης και ζητείται ο ρυθμός ροής (“Open DP Q”).



Σχήμα 3.1: Κεντρικό παράθυρο του προγράμματος “Rheology”.

Εισαγωγή τύπου προβλήματος.

Για την εισαγωγή του τύπου του προβλήματος χρησιμοποιείται το πλήκτρο “Set Sample” το οποίο εμφανίζει το παράθυρο “Rheology.Set Sample” που φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Καταρχήν απαιτείται να οριστεί το όνομα του αρχείου στο οποίο θα αποθηκευτούν τα δεδομένα. Το όνομα του αρχείου δίδεται στο πεδίο “Sample Name”. Στην συνέχεια επιλέγεται στο πεδίο “Problem Type” αν θα είναι γνωστός ο ρυθμός ροής και θα επιλύσουμε ως προς την πτώση πίεσης (“ $Q \Rightarrow DP$ ”) ή το αντίστροφο (“ $DP \Rightarrow Q$ ”). Επίσης στο πεδίο “Geometry” επιλέγεται αν η επίλυση θα γίνει για σωλήνα (“Pipe”) ή για κυκλικό δακτύλιο (“Annuli”). Τέλος, στο πεδίο “Units” ορίζεται το μετρικό σύστημα στο οποίο θα δωθούν οι παράμετροι του προβλήματος (“SI = Διεθνές Σύστημα Μονάδων και USA = Αμερικάνικο Σύστημα Μονάδων). Με το πλήκτρο “OK & Return” τα δεδομένα καταχωρούνται και το πρόγραμμα επιστρέφει στο κεντρικό παράθυρο.



Σχήμα 3.2: Παράθυρο εισαγωγής ονόματος, τύπου προβλήματος, γεωμετρίας και μετρικού συστήματος.

Εισαγωγή παραμέτρων προβλήματος.

Για την εισαγωγή των παραμέτρων του προβλήματος χρησιμοποιείται το πλήκτρο “Sample’s Data” το οποίο ανοίγει το παράθυρο που φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Οι μονάδες των παραμέτρων που φαίνονται στο παράθυρο αλλάζουν από το Διεθνές Σύστημα Μονάδων στο Αμερικάνικο Σύστημα Μονάδων και αντίστροφα ανάλογα με το σύστημα μονάδων που επιλέχθηκε στο προηγούμενο βήμα. Επίσης, αν έχει επιλεγθεί λύση για σωλήνα τότε το πεδίο “d inside” το οποίο αναφέρεται στην εσωτερική διάμετρο του δακτυλίου απενεργοποιείται. Με το πλήκτρο “OK & Return” καταχωρούνται τα δεδομένα και το πρόγραμμα επιστρέφει στο κεντρικό παράθυρο. Οι παράμετροι του προβλήματος όπως και το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί αποθηκεύονται στο αρχείο με το πλήκτρο “Save” που βρίσκεται στο κεντρικό παράθυρο.

Rheology.Samples's data

ty (Pa)

K (Pa.sⁿ)

n

Density (kg/m³)

d outside (m)

d inside (m)

q (m³/s)

OK & Return Cancel

Σχήμα 3.3: Εισαγωγή παραμέτρων προβλήματος.

Επίλυση προβλήματος και ανάγνωση αποτελεσμάτων.

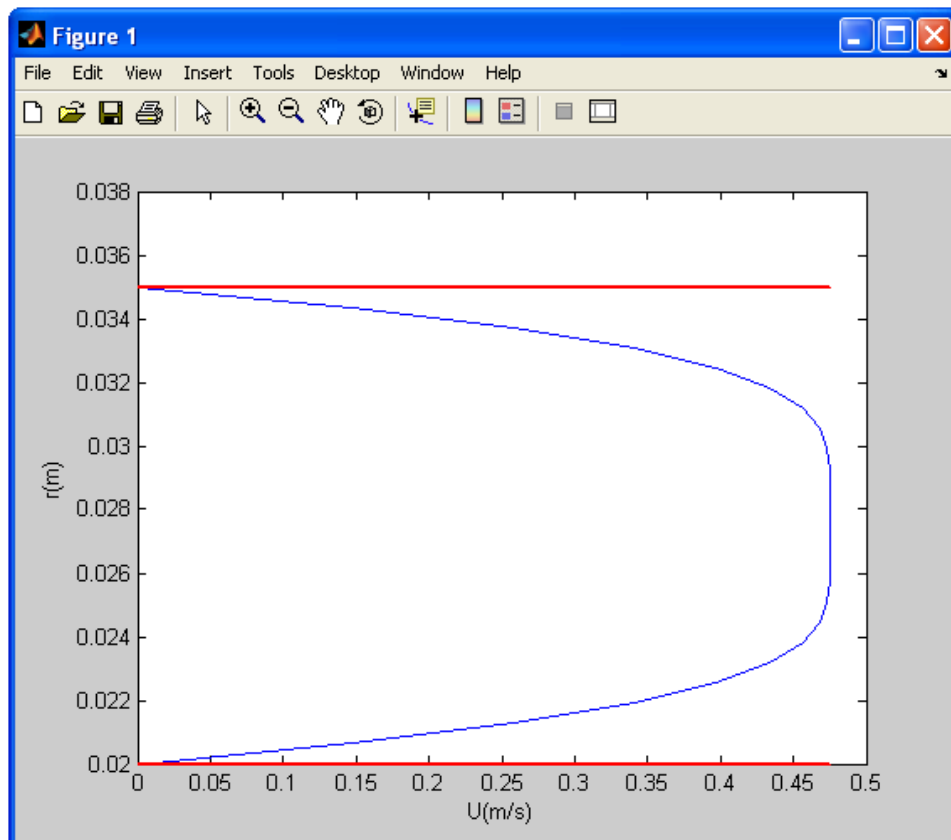
Η επίλυση του προβλήματος μπορεί να γίνει είτε με το πλήκτρο “Kelessidis” είτε με το πλήκτρο “API”. Με το πλήκτρο “Kelessidis” το πρόβλημα επιλύεται με την μέθοδο των Κελεσίδη – Φουνταργιωτάκη ενώ με το δεύτερο πλήκτρο το πρόβλημα επιλύεται με την μέθοδο που προτείνεται από τον οργανισμό τυποποίησης API. Και οι δύο τρόποι επίλυσης οδηγούν στο ίδιο παράθυρο αποτελεσμάτων που φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Στο παράθυρο των αποτελεσμάτων καταρχήν φαίνεται ο τύπος της ροής για τις δεδομένες παραμέτρους, δηλαδή στρωτή ροή (Laminar flow), τυρβώδης ροή (Turbulent flow) και μεταβατική ροή (Transient flow). Επίσης, φαίνεται το μοντέλο ροής που στην περίπτωση του παραδείγματος είναι Herschel-Bulkley. Το παράθυρο περιέχει διάφορες παραμέτρους που έχουν υπολογιστεί κατά την επίλυση (π.χ. πτώση πίεσης DP/DL , ταχύτητα ρευστού V , αριθμός Reynolds κλπ) και πολλές από αυτές δίδονται και στα δύο συστήματα μονάδων (μετρικό και αγγλοσαξονικό). Στην περίπτωση που το πρόβλημα επιλύεται με την μέθοδο των Κελεσίδη – Φουνταργιωτάκη και η ροή είναι στρωτή, τότε το πρόγραμμα εμφανίζει ως αποτέλεσμα και το προφίλ της ταχύτητας του ρευστού μέσα στο σωλήνα ή τον δακτύλιο (Σχήμα 3.5). Τέλος, με το πλήκτρο “Calculate Q-DP Curve” στο κάτω αριστερά μέρος του παραθύρου αποτελεσμάτων είναι δυνατός ο υπολογισμός όλης

της καμπύλης της πτώσης πίεσης συναρτήσει του ρυθμού ροής. Η χρήση του πλήκτρου “Calculate Q-DP Curve” εμφανίζει το παράθυρο που φαίνεται στο Σχήμα 3.6 στο οποίο πρέπει να οριστεί η μέγιστη τιμή ρυθμού ροής μέχρι την οποία θα γίνει ο υπολογισμός (η ελάχιστη είναι ίση με μηδέν). Με το πλήκτρο “Plot” εμφανίζεται η γραφική παράσταση όπως στο Σχήμα 3.7. Το σημείο που υποδεικνύεται με κόκκινο αστέρι είναι το σημείο Q-ΔP/ΔL που υπολογίστηκε με βάση τις παραμέτρους του μοντέλου.

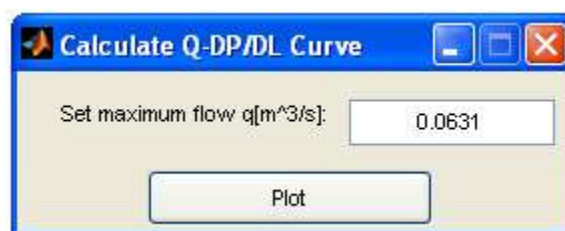
The screenshot shows the 'Rheology.Run & View' window. It has two tabs: 'Laminar flow' and 'Herchel Bulkley'. The 'Herchel Bulkley' tab is active, displaying a table of calculated parameters. At the bottom, there are two buttons: 'Calculate Q-DP Curve' and 'Close'.

Laminar flow		Herchel Bulkley	
DP/ΔL (Pa/m)	9772.4842	DP/ΔL (psi/ft)	1.4174
kp (Pa.s ⁿ)	14.4772	kp (eqcp)	14477.1963
V (m/s)	0.38583	V (ft/s)	1.2659
f	0.9847	np	0.32186
Re	24.3729	gw (s ⁻¹)	262.7204
Re critical 1	2879.8582	Re critical 2	3779.8582
Direct DP (Pa/m)		Aprox DP (Pa/m)	
Direct DP (psi/ft)		Aprox DP (psi/ft)	
Direct f		Aprox f	
Direct gw (s ⁻¹)		Aprox gw (s ⁻¹)	

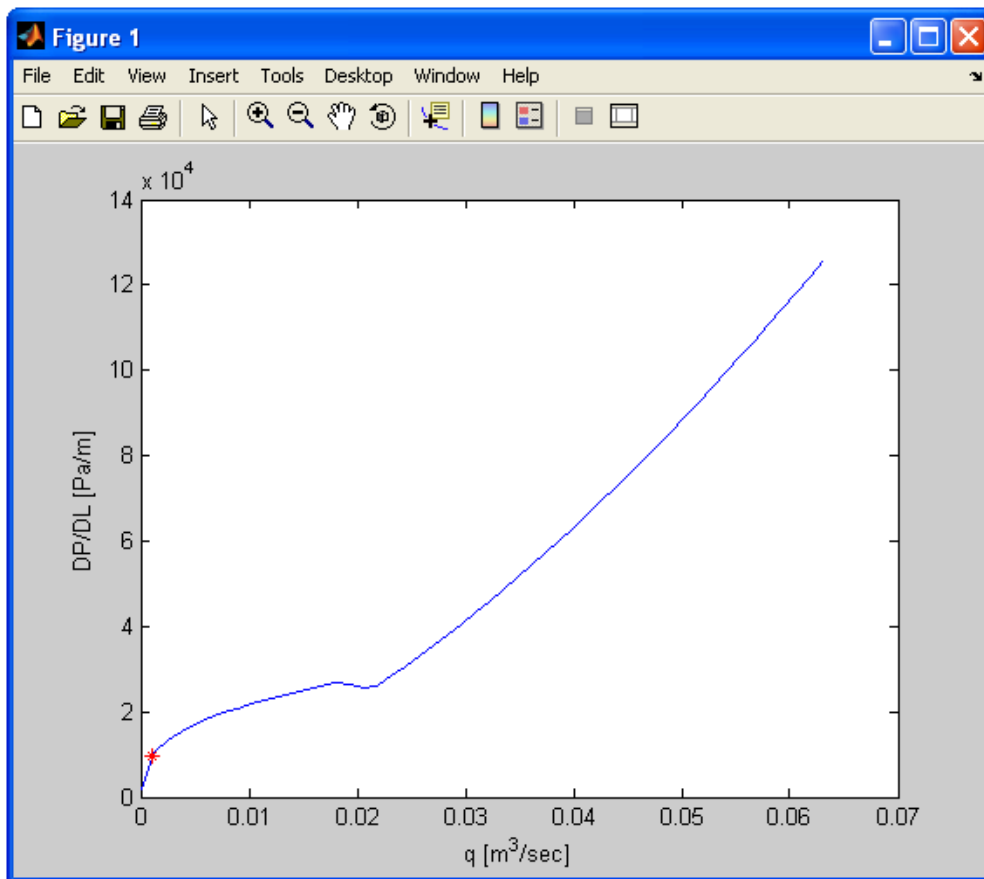
Σχήμα 3.4: Αποτελέσματα επίλυσης προβλήματος με το πρόγραμμα “Rheology”.



Σχήμα 3.5: Προφίλ ταχύτητας ρευστού μέσα στο δακτύλιο.



Σχήμα 3.6: Καθορισμός μέγιστου ρυθμού ροής για τον υπολογισμό της καμπύλης $Q-\Delta P/\Delta L$.



Σχήμα 3.7: Υπολογισμός της καμπύλης $Q-\Delta P/\Delta L$ και επισήμανση του σημείου ($Q-\Delta P/\Delta L$) που υπολογίστηκε με βάση τις παραμέτρους του μοντέλου.

3.3.5. Καθορισμός Ρεολογικών μοντέλων ρευστών.

Γενικά.

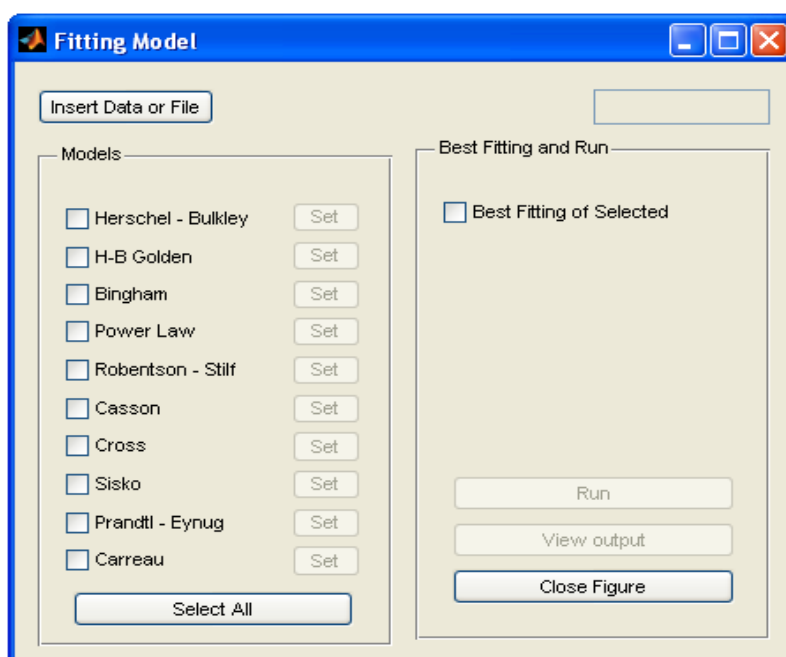
Πριν γίνει ο υπολογισμός για την πτώση πίεσης, την οποία εμφανίζει ένα ρευστό κατά την κυκλοφορία του μέσα στα επιμέρους τμήματα της γεώτρησης, πρέπει να γίνει ο καθορισμός του είδους του ρευστού. Για τον καθορισμό του ρεολογικού μοντέλου χρησιμοποιείται το πρόγραμμα Best Fitting που σχεδιάστηκε από τον Αναπληρωτή Καθηγητή Κελεσίδη Βασίλειο για το εργαστήριο Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής.

Οδηγίες χρήσης προγράμματος “Fitting Model”.

Γενικά.

Το πρόγραμμα “Fitting Model” είναι σχεδιασμένο ώστε να βρίσκει την βέλτιστη προσέγγιση των γνωστών ρεολογικών μοντέλων σε πειραματικά δεδομένα διατμητικής τάσης τ (Pa) συναρτήσει του ρυθμού διάτμησης (s^{-1}) (Λιόλιος, 2007). Η εφαρμογή έχει κατασκευαστεί σε Matlab ενώ η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος. Ειδικότερα έχει χρησιμοποιηθεί η εντολή `fmincon` του optimization toolbox του Matlab για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος.

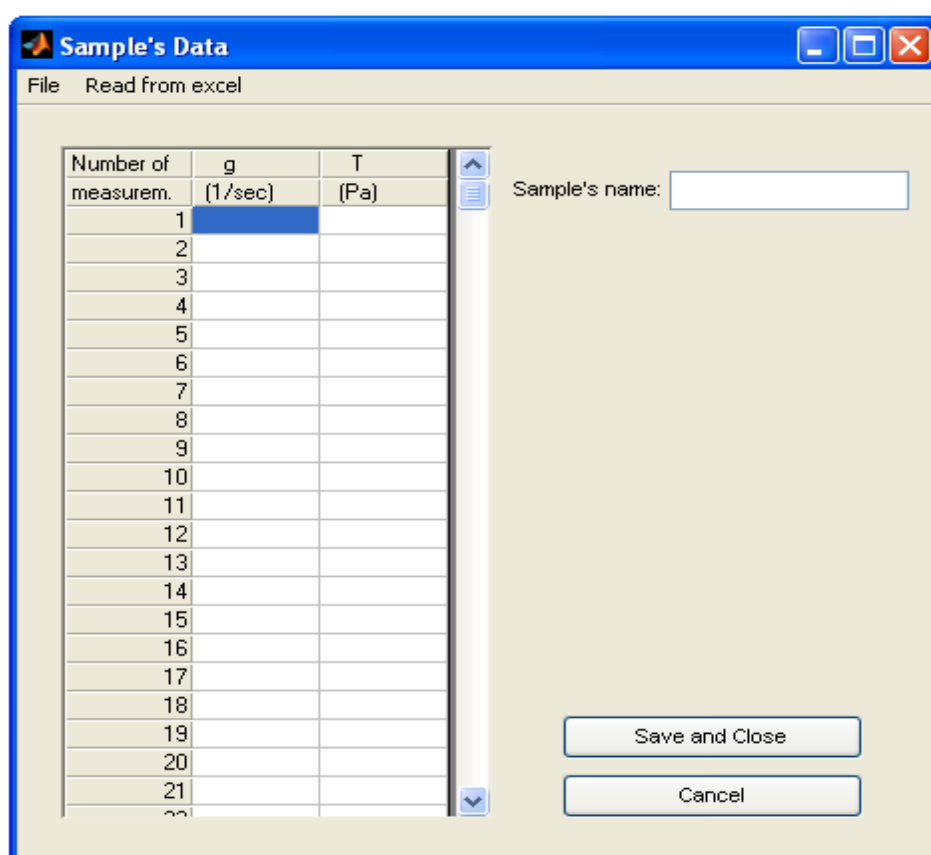
Για την εγκατάσταση του προγράμματος απαιτείται κατ’αρχήν να ορίσουμε τον φάκελο του προγράμματος ως τον τρέχων φάκελο (current directory) του Matlab. Στη συνέχεια η εγκατάσταση του προγράμματος γίνεται με τη εντολή “`setup_best_fitting`” στο command window του Matlab. Κατόπιν, για την εκτέλεση του προγράμματος δίδεται η εντολή “`my_run`”. Στο Σχήμα 3.8 φαίνεται το κεντρικό παράθυρο του προγράμματος. Η χρήση του προγράμματος αποτελείται από τέσσερα διακριτά βήματα: 1) εισαγωγή δεδομένων, 2) επιλογή ρεολογικών μοντέλων, 3) εκτέλεση υπολογισμών – επίλυση και 4) ανάγνωση αποτελεσμάτων.



Σχήμα 3.8 : Κεντρικό παράθυρο του προγράμματος “Fitting Model”.

Εισαγωγή Δεδομένων.

Για την εισαγωγή των πειραματικών δεδομένων επιλέγεται η εντολή “Insert Data or File” και το πρόγραμμα εμφανίζει το παράθυρο εισαγωγής δεδομένων (Σχήμα 3.9). Το πρόγραμμα δίδει την δυνατότητα να εισαχθούν τα δεδομένα με τρεις διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι να πληκτρολογηθούν απευθείας στο παράθυρο εισαγωγής με την πρώτη στήλη να αποτελεί την συχνότητα περιστροφής και την δεύτερη στήλη την διατμητική τάση. Επίσης είναι απαραίτητο να εισαχθεί και ένα όνομα για το αρχείο που θα δημιουργηθεί στο πεδίο “Sample’s name”.

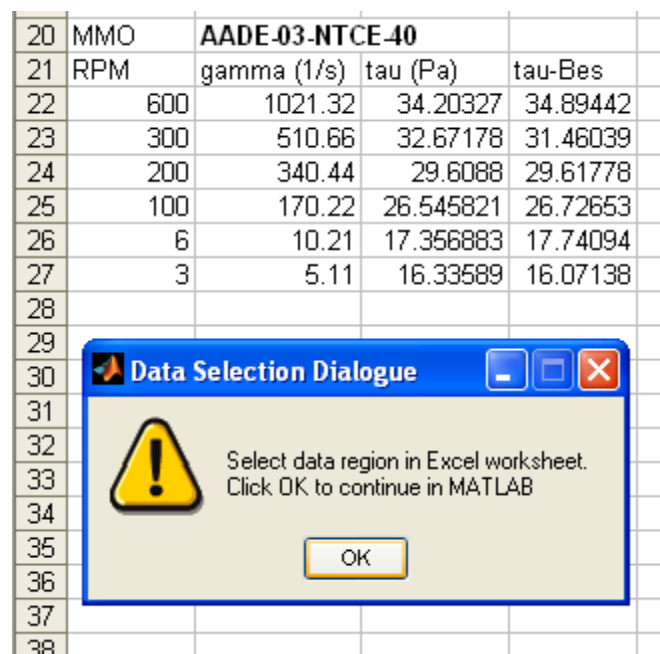


Number of measurem.	g (1/sec)	T (Pa)
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		

Σχήμα 3.9: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων

Ο δεύτερος τρόπος εισαγωγής δεδομένων είναι επιλέγοντάς τα μέσα από ένα αρχείο Excel. Στο παράθυρο επιλέγεται η εντολή “Read from excel” και το πρόγραμμα ανοίγει ένα διάλογο επιλογής του αρχείου excel. Μαζί με το αρχείο Excel το πρόγραμμα ανοίγει ταυτόχρονα και ένα νέο παράθυρο διαλόγου όπου περιμένει να

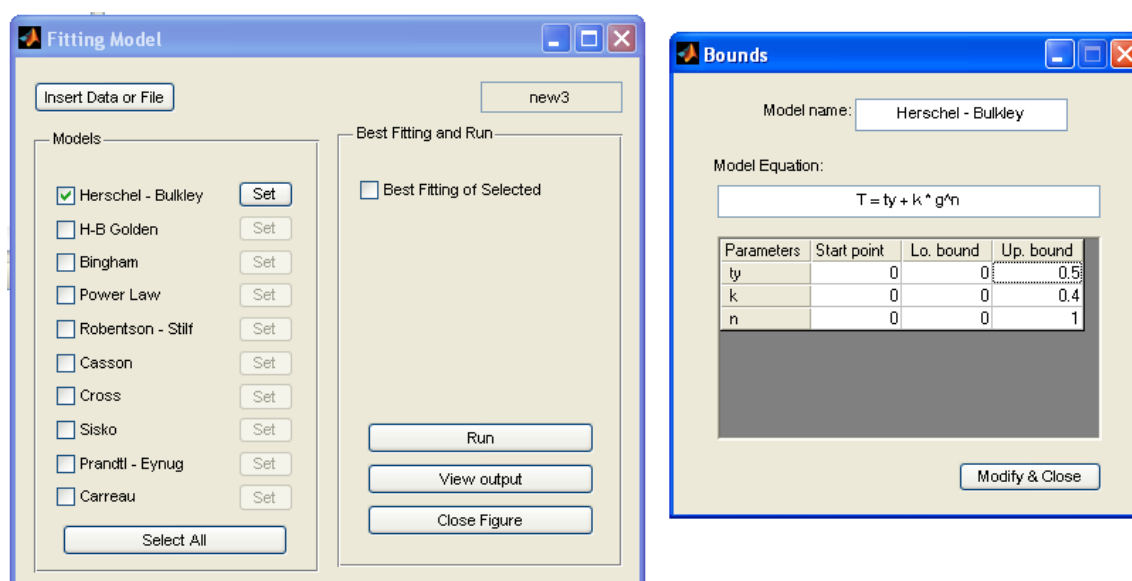
επιλεγούν τα δεδομένα και κατόπιν να πιεστεί το πλήκτρο OK. Για την επιλογή των δεδομένων οι στήλες της συχνότητας περιστροφής και της διατμητικής τάσης θα πρέπει να είναι δίπλα-δίπλα (η επιλογή των στηλών με την χρήση του ctrl δεν λειτουργεί). Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι αλλαγές που γίνονται στο excel με σκοπό οι στήλες της συχνότητας περιστροφής και της διατμητικής τάσης να έρθουν δίπλα-δίπλα δεν αποθηκεύονται κατά το κλείσιμο του excel. Μόλις επιλεγούν τα δεδομένα, εκτελείται η εντολή ok στο παράθυρο διαλόγου (Σχήμα 3.10) με την οποία κλείνει το αρχείο excel και επιστρέφουμε στο Matlab. Επίσης, όπως και στον προηγούμενο τρόπο εισαγωγής δεδομένων θα πρέπει να δοθεί ένα όνομα αρχείου στο πεδίο “Sample’s name”. Ο τρίτος τρόπος εισαγωγής δεδομένων είναι ουσιαστικά το άνοιγμα ενός παλαιότερου αρχείου δεδομένων με την εντολή “File -> Open” όπου επιλέγεται το αρχείο τύπου .mat που επιθυμούμε. Τέλος, και στους τρεις τρόπους εισαγωγής δεδομένων στο τέλος θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί το πλήκτρο “Save and Close” το οποίο θα αποθηκεύσει τα δεδομένα και κατόπιν επιστρέψει στο κεντρικό παράθυρο του προγράμματος.



Σχήμα 3.10: Επιλογή δεδομένων από το Excel.

Επιλογή μοντέλων ροής.

Μετά την εισαγωγή των πειραματικών δεδομένων απαιτείται η επιλογή του ή των ρεολογικών μοντέλων που επιθυμείται να επιλυθούν. Αυτό γίνεται σημειώνοντας (check) το αντίστοιχο κουτί αριστερά από το όνομα του κάθε μοντέλου ροής όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.11. Με την εντολή “Set” που βρίσκεται δεξιά από το όνομα του κάθε μοντέλου εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο διαλόγου (παράθυρο “Bounds” στο Σχήμα 3.11). Στο παράθυρο αυτό αναγράφεται το όνομα του ρεολογικού μοντέλου καθώς και η εξίσωση που χρησιμοποιείται για την προσέγγιση. Στον πίνακα που βρίσκεται στο κάτω μέρος του παραθύρου δίδονται οι αρχικές τιμές των παραμέτρων της εξίσωσης καθώς και το άνω και κάτω όριο μέσα στα οποία αυτές θα κινούνται. Όλες οι τιμές του πίνακα μπορούν να τροποποιηθούν κατάλληλα από το χρήστη. Για το παράδειγμα του Σχήματος 3.11 έχει επιλεγεί το ρεολογικό μοντέλο “Herschel-Bulkley” ενώ οι προεπιλεγμένες τιμές για την αρχική τιμή των παραμέτρων τ_y , K και n είναι 0.5 και τα όρια μέσα στα οποία αυτές κινούνται είναι -10^{100} και 10^{100} .



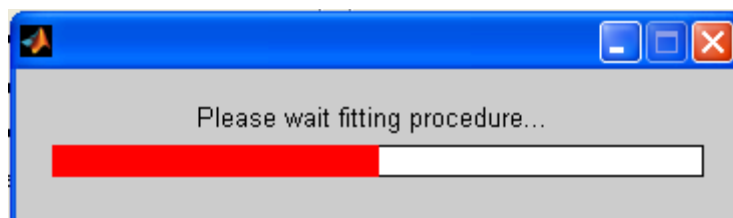
Σχήμα 3.11: Επιλογή μοντέλου ροής και ορισμός αρχικής τιμής και ορίων παραμέτρων.

Το παράθυρο “Bounds” κλείνει με την εντολή “Modify & Close” και με τον τρόπο αυτό αποθηκεύονται οι τροποποιημένες τιμές για τη συγκεκριμένη επίλυση.

Πιέζοντας το πλήκτρο “Select All” που βρίσκεται στο κάτω αριστερό μέρος του βασικού παραθύρου διαλόγου επιλέγονται όλα τα διαθέσιμα ρεολογικά μοντέλα ενώ τσεκάροντας και το “Best Fitting of Selected” που βρίσκεται πάνω δεξιά, μετά την επίλυση επισημαίνεται το ρεολογικό μοντέλο (από όσα έχουν επιλεγεί) που προσεγγίζει καλύτερα τα δεδομένα που έχουν εισαχθεί.

Εκτέλεση υπολογισμών – επίλυση.

Προκειμένου να ξεκινήσει η επίλυση επιλέγεται η εντολή “Run” από το βασικό παράθυρο διαλόγου. Ακολουθεί η εμφάνιση ενός νέου παραθύρου (Σχήμα 3.12) που δείχνει την πρόοδο της διαδικασίας επίλυσης. Το κλείσιμο αυτού του παραθύρου σημαίνει ότι η επίλυση έχει ολοκληρωθεί και ο χρήστης μπορεί να αναγνώσει τα αποτελέσματα.



Σχήμα 3.12: Πρόοδος διαδικασίας επίλυσης.

Ανάγνωση αποτελεσμάτων.

Η ανάγνωση των αποτελεσμάτων της επίλυσης γίνεται επιλέγοντας την εντολή “View Output” από το βασικό παράθυρο διαλόγου του προγράμματος. Έτσι, εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο διαλόγου (Σχήμα 3.13) στο πάνω μέρος του οποίου φαίνονται τα αποτελέσματα σε μορφή πίνακα για καθένα από τα ρεολογικά μοντέλα που έχουν επιλεγεί με όλες τις παραμέτρους της προσέγγισης. Στο κάτω μέρος εμφανίζεται η γραφική απεικόνιση της προσέγγισης που περιέχει τα πειραματικά

δεδομένα (με τη μορφή σημείων) και την καμπύλη προσέγγισης (με τη μορφή συνεχούς γραμμής).

Πάνω στο γράφημα φαίνονται επίσης:

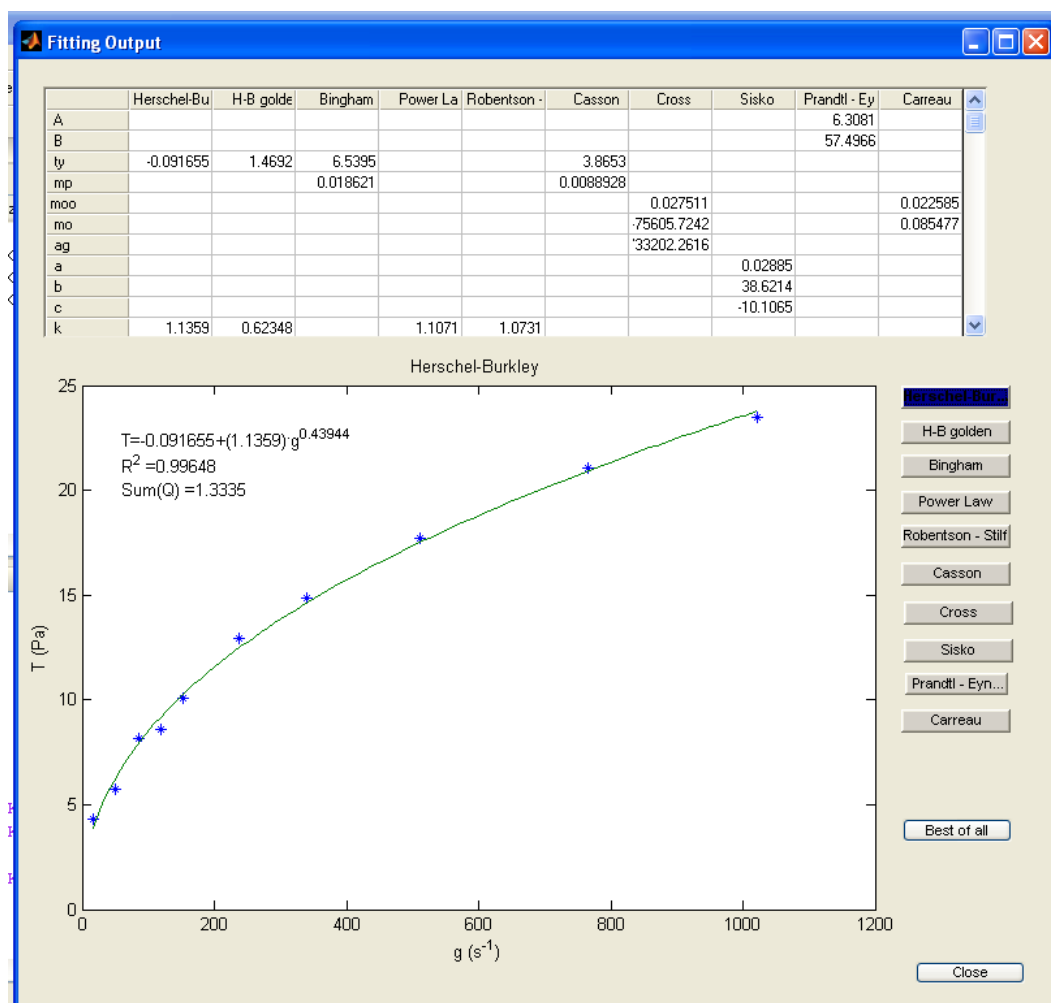
- Η εξίσωση του ρεολογικού μοντέλου.
- Το ΣQ:

$$\sum_i Q^2 = \sum_i \left(y_{\text{ρεολογικ ής εξίσωσης},i} - y_{\text{παραματικ ό,i}} \right)^2 \quad (1)$$

- Ο συντελεστής απόκλισης R^2 (Residual Error):

$$R^2 = \frac{\sum_i \left(y_{\text{παραματικ ό,i}} - \bar{y}_{\text{παραματικ ό,i}} \right)^2 - \sum_i \left(y_{\text{ρεολογικ ής εξίσωσης},i} - y_{\text{παραματικ ό,i}} \right)^2}{\sum_i \left(y_{\text{παραματικ ό,i}} - \bar{y}_{\text{παραματικ ό,i}} \right)^2} \quad (2)$$

Δεξιά της γραφικής παράστασης εμφανίζεται με έντονα γράμματα το ενεργό ρεολογικό μοντέλο, ενώ προκειμένου να εμφανιστούν τα αποτελέσματα κάποιου άλλου ρεολογικού μοντέλου επιλέγεται το αντίστοιχο πλήκτρο στα δεξιά. Τέλος, με την εντολή “Best of all” εμφανίζεται η γραφική απεικόνιση του ρεολογικού μοντέλου (από όσα έχουν επιλεγεί) που προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 3.13: Αποτελέσματα επίλυσης σε μορφή πίνακα και γραφική απεικόνιση προσέγγισης.

3.4. Πτώση πίεσης στα διατρητικά στελέχη και στον δακτύλιο της γεώτρησης.

Γενικά.

Τα μέρη στα οποία ενδιαφέρει ο όσο πιο ακριβής θεωρητικός υπολογισμός της πτώσης πίεσης είναι:

- τα διατρητικά στελέχη, και
- ο δακτύλιος της γεώτρησης

καθώς σε αυτές τις δύο περιοχές υπεισέρχονται οι επιπτώσεις των ρεολογικών ιδιοτήτων του ρευστού, σε αντίθεση με το κοπτικό άκρο όπου η πτώση πίεσης που εμφανίζεται σε αυτό εξαρτάται από την παροχή του ρευστού και την γεωμετρία των ακροφυσίων του.

Διατρητικά στελέχη.

Η πτώση πίεσης στα διατρητικά στελέχη εξαρτάται από το είδος και τις ρεολογικές ιδιότητες του ρευστού, την γεωμετρία των στελεχών και την τιμή της παροχής του ρευστού μέσα σε αυτά.

Η πτώση πίεσης η οποία εμφανίζεται μέσα στα διατρητικά στελέχη αποτελεί συνήθως το 40 – 50% της συνολικής πτώσης πίεσης κατά την διάρκεια της διάτρησης και είναι κρίσιμη η διατήρησή της σε όσο το δυνατόν χαμηλότερο επίπεδο, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι φθορές μέσα στα διατρητικά στελέχη εξαιτίας των τριβών λόγω της κυκλοφορίας του ρευστού, έχοντας σαν συνέπεια την μείωση των αντοχών των στελεχών στις τάσεις που εμφανίζονται σε αυτά.

Δακτύλιος της Γεώτρησης.

Η πτώση πίεσης η οποία εμφανίζεται στον δακτύλιο της γεώτρησης είναι ο καθοριστικότερος παράγοντας για τον έλεγχο της γεώτρησης κατά την διάτρηση παρόλο που αποτελεί το 5 – 10% της συνολικής πτώσης πίεσης γιατί αυτή η πίεση είναι υπεύθυνη για τον έλεγχο του προφίλ πίεσης μέσα στον δακτύλιο της γεώτρησης, και βοηθά στην επίτευξη του είδους της διάτρησης σύμφωνα με το οποίο θα εκτελεστεί η γεώτρηση (διάτρηση με υποπίεση, διάτρηση με υπερπίεση, διάτρηση στα επίπεδα πίεσης του γεωλογικού σχηματισμού).

Παρόλο που την πτώση πίεσης στον δακτύλιο διέπουν οι ίδιοι κανόνες με την πτώση πίεσης μέσα στα διατρητικά στελέχη, το γεγονός ότι η κυκλοφορία του ρευστού γίνεται σε δακτύλιο, επηρεάζει την πτώση πίεσης. Σε αυτή την εργασία γίνεται έλεγχος της συσχέτισης των θεωρητικών δεδομένων και των πειραματικών που μετρήθηκαν στον δακτύλιο του μοντέλου οριζόντιας γεώτρησης του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής και ερμηνείας των συμπερασμάτων τα οποία εξάγονται από αυτή την ανάλυση.

Κεφάλαιο 4^ο – Τεχνικές Διάτρηση Ρυθμιζόμενης Πίεσης (Managed Pressure Drilling).

4.1. Εισαγωγή.

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει τις διάφορες τεχνικές Managed Pressure Drilling (MPD) που αναπτύχθηκαν στην βιομηχανία εκμετάλλευσης κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου, καθώς οι ενεργειακές απαιτήσεις και η ανάγκη για αυξημένη παραγωγή υδρογονανθράκων ανάγκασε την εταιρίες εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων να στραφούν σε δυσκολότερα προς εκμετάλλευση κοιτάσματα.

Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν οι κυριότερες και πιο συνηθισμένες τεχνικές που αναπτύχθηκαν, καθώς και τα οφέλη που προκύπτουν, τις διάφορες καινοτομίες τις οποίες εισήγαγαν στην βιομηχανία γεωτρήσεων, καθώς και οποίους περιορισμούς και απαιτήσεις παρουσιάζουν σε σχέση πάντα με τις συμβατικές τεχνικές διάτρησης.

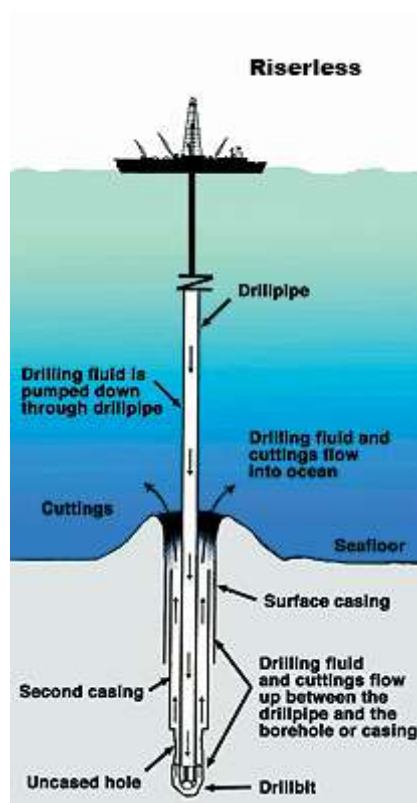
Αυτό το οποίο θα πρέπει να λάβουμε υπ'όψιν μας είναι ότι αυτές οι τεχνικές, οι οποίες θα παρουσιαστούν σε αυτό το κεφάλαιο έχουν σαν σκοπό την μείωση των ατυχημάτων που μπορεί να προκληθούν κατά την διάρκεια εκτέλεσης μιας γεώτρησης, αυξάνοντας τα επίπεδα ασφάλειας για τους εργαζόμενους σε αυτές, την μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την πραγματοποίηση μιας γεώτρησης και τέλος την μείωση του κόστους για την ολοκλήρωση μιας γεώτρησης σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βαθμό θέτοντας σαν πρώτη προτεραιότητα όμως τους δύο προαναφερθέντες λόγους.

4.2.1. Τι είναι η τεχνική Managed Pressure Drilling (MPD).

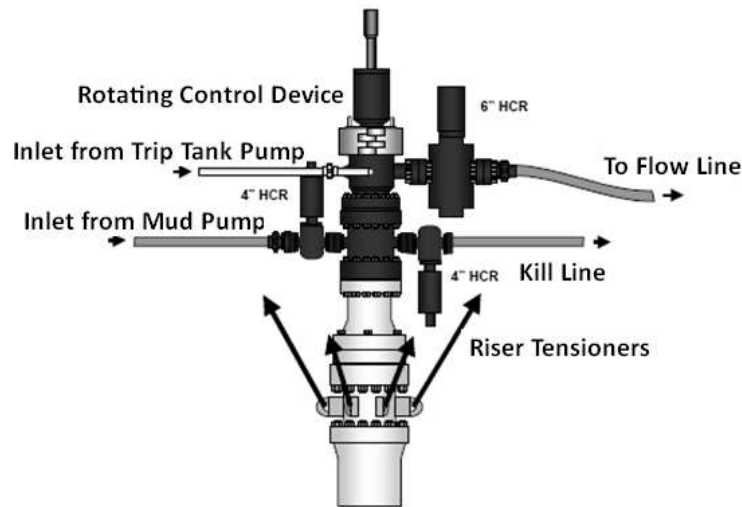
Η ανάγκη να αντιμετωπιστούν προβλήματα τα οποία σχετίζονται με την διαδικασία εκτέλεσης γεωτρήσεων (πετρελαίου ,φυσικού αερίου και νερού μεγάλου βάθους), το μεγάλο κόστος των ρευστών γεώτρησης, το "κόλλημα" και απώλεια των διατρητικών στελεχών, οι εισροές ρευστών πετρωμάτων (kicks), η απώλεια κυκλοφορίας ρευστού γεώτρησης (mud losses), οδήγησαν στην ανάπτυξη μεθόδων έλεγχου της διαδικασίας διάτρησης μιας γεώτρησης. Αυτοί οι λόγοι αποτέλεσαν καθοριστικό στοιχείο για την ανάπτυξη μια καλύτερης και αποτελεσματικότερης

τεχνολογίας και τεχνικής εκτέλεσης γεωτρήσεων πετρελαίου και φυσικού αερίου, το οποίο οδήγησε στην ανάπτυξη των τεχνικών Managed Pressure Drilling (MPD).

Οι τεχνικές Managed Pressure Drilling (MPD) ήρθαν για να αντικαταστήσουν τις συμβατικές γεωτρήσεις σε συγκεκριμένες εφαρμογές (Sweep et al., 2003, Spriggs et al., 2008, Stone and Tian, 2008, Dharma and Toralde, 2008, Fossil et al., 2006). Σε αυτού του είδους τις γεωτρήσεις δεν γίνεται κανένας έλεγχος της πίεσης μέσα στην γεώτρηση ώστε να καθοριστεί σε επιθυμητά επίπεδα, ενώ το όλο σύστημα διάτρησης είναι “ανοικτό” με αποτέλεσμα την μη δυνατότητα ελέγχου της γεώτρησης (Σχήμα 4.1). Σε αντίθεση στα κλειστά συστήματα χρησιμοποιούνται συσκευές BOP (Σχήμα 4.2), οι οποίες όταν ανιχνεύσουν κάποιο πρόβλημα στα όρια της πίεσης επεμβαίνουν και διακόπτουν την παροχή ρευστού από και προς την γεώτρηση, για να αποφευχθούν τυχόν προβλήματα.



Σχήμα 4.1: Συμβατική διάτρηση (JAMSTEC).



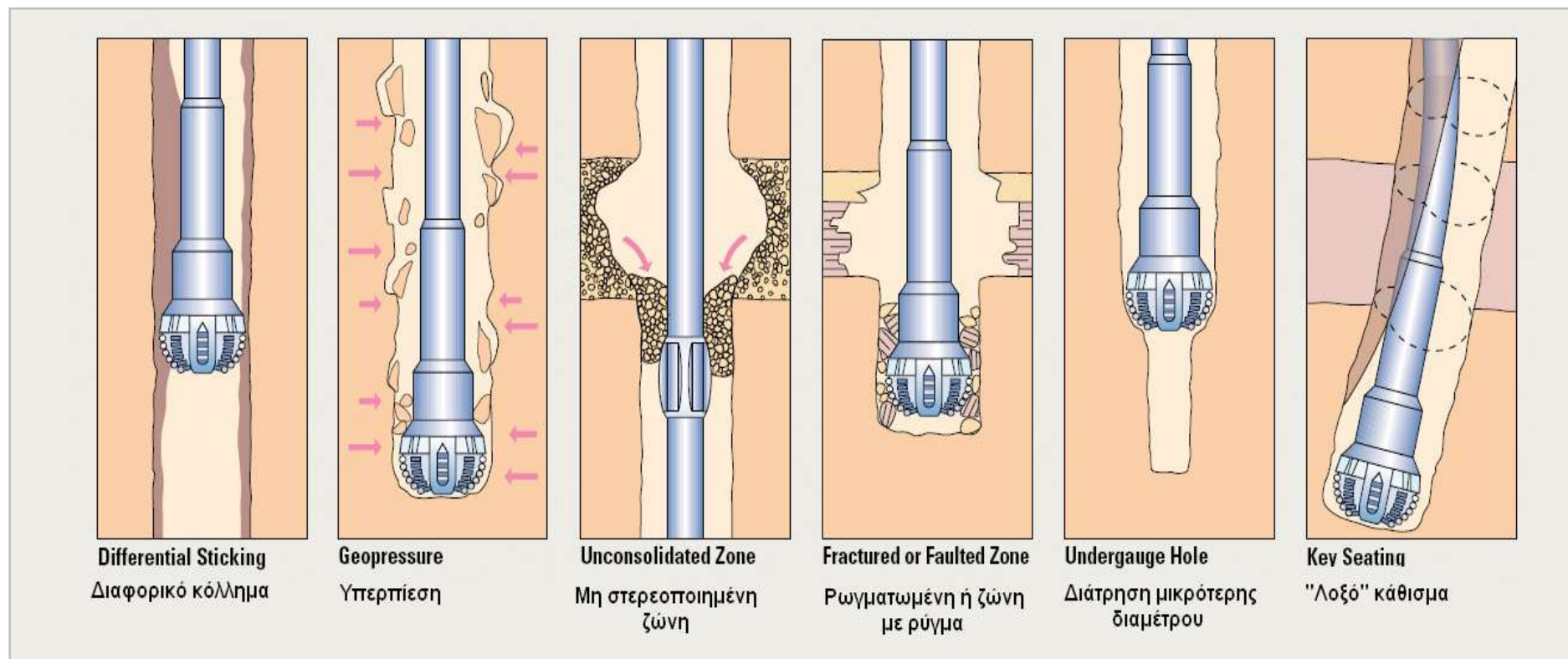
Σχήμα 4.2: Διάτρηση με χρήση συσκευής BOP (Hannegan, 2007).

Οι τεχνικές Managed Pressure Drilling (MPD) είναι μια προσαρμοστική διαδικασία τεχνικής γεωτρήσεων η οποία χρησιμοποιείται για να ελέγχεται με ακρίβεια το προφίλ της πίεσης καθώς και η πτώση πίεσης που εμφανίζεται στο τμήμα του δακτυλίου της γεώτρησης (annulus), σε όλη την περιοχή της γεώτρησης (διατρητικά στελέχη, κοπτικά άκρα, κτλ.) αλλά και για κάθε σημείο της γεώτρησης το οποίο χρήζει ιδιαίτερης μεταχείρισης. Τα κύρια επιτεύγματα της τεχνικής Managed Pressure Drilling (MPD), είναι ο καθορισμός και η επίτευξη των επιθυμητών ορίων της πίεσης (πτώση πίεσης και προφίλ πίεσης), μέσα στο απαιτούμενο εύρος ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες και τις απαιτήσεις που εμφανίζει η κάθε περίπτωση γεώτρησης ξεχωριστά. Τούτο επιτυγχάνεται με την χρήση ενός κλειστού συστήματος επιστροφής του πολφού γεώτρησης (Σχήμα 4.2).

Οι τεχνικές Managed Pressure Drilling (MPD) επιτρέπουν μεγαλύτερο και ακριβέστερο έλεγχο του προφίλ της πτώσης πίεσης στην γεώτρηση, αλλά και της διαφορικής ή στατικής πίεσης σε οποιοδήποτε σημείο του δακτυλίου της γεώτρησης, σε σχέση με τον έλεγχο που παρέχει μόνο η πυκνότητα του πολφού και η παροχή της αντλίας πολφού, που επιτυγχάνεται με τις συμβατικές μεθόδους γεώτρησης.

Οι τεχνικές Managed Pressure Drilling (MPD) εφαρμόστηκαν ώστε να προσφέρουν ασφαλή διαδικασία διάτρησης σε ταμειυτήρες στους οποίους δεν μπορεί

να πραγματοποιηθεί γεώτρηση με συμβατικές μεθόδους (Over balanced drilling) λόγω προβλημάτων που αφορούν την ασφάλεια (τόσο του προσωπικού που εργάζεται για την εκτέλεση της γεώτρησης, των μηχανημάτων καθώς και του ίδιου του ταμιευτήρα), των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την διαδικασία της διάτρησης αλλά και του οικονομικού ρίσκου που παρουσιάζει μια τέτοια επένδυση. Τα συνηθέστερα προβλήματα τα οποία παρουσιάζονται κατά την διάρκεια εκτέλεσης μιας γεώτρησης παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Προβλήματα που εμφανίζονται κατά την διάρκεια της διάτρησης (Aldred et al., 1999).

Συμπερασματικά η Managed Pressure Drilling (MPD) είναι ένα σύνολο από διάφορες τεχνικές διάτρησης, οι οποίες μπορούν να υιοθετηθούν και να εφαρμοστούν για την επίλυση προβλημάτων τα οποία σχετίζονται, και εμφανίζονται κατά την διάρκεια εκτέλεσης μια γεώτρησης (απώλεια πολφού γεώτρησης, “κόλλημα” και απώλεια στελεχών γεωτρύπανου, kicks αερίων και πετρελαίου, hole stability, κτλ.), την ελαχιστοποίηση της πρόκλησης ζημίας στον ταμιευτήρα (formation damage), καθώς και την επίτευξη παραγωγής αερίου ή πετρελαίου (dynamically characterize production reservoir) από έναν ταμιευτήρα κατά την διάρκεια εκτέλεσης μια γεώτρησης, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη δυνατή διαχείριση του ταμιευτήρα.

4.2.2. Πλεονεκτήματα της Managed Pressure Drilling (MPD).

Η διαδικασία Managed Pressure Drilling (MPD) χρησιμοποιεί μια συλλογή από τεχνικές και εργαλεία τα οποία μπορούν να μετριάσουν τα προβλήματα και τα ρίσκα (ασφαλείας, περιβαλλοντικά, οικονομικά) τα οποία σχετίζονται με την εκτέλεση γεωτρήσεων πετρελαίου και φυσικού αερίου, στις οποίες τα όρια διακύμανσης του προφίλ της πτώσης πίεσης, στο τμήμα του δακτυλίου της γεώτρησης, είναι πολύ περιορισμένα. Η παραπάνω απαίτηση επιτυγχάνεται με την διαχείριση του ισοζυγίου στο προφίλ της πτώσης πίεσης (Hannegan, 2006) που εμφανίζεται στο τμήμα του δακτυλίου της γεώτρησης, και πραγματοποιείται με τον έλεγχο και τον καθορισμό των ακόλουθων παραγόντων:

- Πίεση εξόδου (Back pressure).
- Της πυκνότητας του ρευστού γεώτρησης.
- Τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του ρευστού γεώτρησης.
- Το επίπεδο και το ύψος που καταλαμβάνει το ρευστό της γεώτρησης στον δακτύλιο της γεώτρησης.
- Την πτώση πίεσης η οποία οφείλεται στις τριβές λόγω της κυκλοφορίας του ρευστού στα επιμέρους τμήματα της γεώτρησης (διατρητικά στελέχη, κοπτικά άκρα, δακτύλιο γεώτρησης) καθώς και από,
- την γεωμετρία της γεώτρησης.

Τα πλεονεκτήματα τα οποία προσφέρει η Managed Pressure Drilling (MPD) είναι :

- Ο πολφός επιστρέφει στην επιφάνεια σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης (zero back pressure), και η κυκλοφορία του γίνεται με ενέργεια που παρέχεται μέσω των διατρητικών στελεχών.
- Οι τεχνικές Managed Pressure Drilling (MPD) μας δίνουν την δυνατότητα να μειώσουμε προβλήματα τα οποία εμφανίζονται κατά την διάρκεια της διάτρησης, όπως η απώλεια πολφού γεώτρησης (mud losses), το “κόλλημα” και απώλεια των διατρητικών στελεχών, δίνοντας μας την δυνατότητα να μεγιστοποιήσουμε την οικονομία χρόνου και κόστους κατά την διάρκεια εκτέλεσης της γεώτρησης, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο τον μη παραγωγικό χρόνο (Non Productive Time) και τα συνδεδεμένα με αυτόν κόστη.
- Το κλειστό σύστημα που χρησιμοποιείται στις Managed Pressure Drilling (MPD) τεχνικές θεωρείται ασφαλέστερο από τα συστήματα τα οποία χρησιμοποιούνται στις συμβατικές τεχνικές διάτρησης, λόγω του ελέγχου που επιτυγχάνεται στο προφίλ της πίεσης και στην πτώση πίεσης στην γεώτρηση.

4.2.3. Κατηγορίες και παραλλαγές της Managed Pressure Drilling (MPD).

Κάτω από την "ομπρέλα" των Managed Pressure Drilling (MPD) ,βρίσκονται στο ένα άκρο οι συμβατικές τεχνικές διάτρησης υπερπίεσης (Over balanced) και στο άλλο οι τεχνικές διάτρησης υποπίεσης (Under balanced) (Rommetveit et al., 2005, Stone and Tian, 2008, Fossli et al., 2006).

Στις συμβατικές Over balanced τεχνικές, η πίεση η οποία δημιουργείται στο κατώτατο τμήμα της γεώτρησης (υδροστατική πίεση πολφού, πίεση στο κοπτικό άκρο, πίεση στον δακτύλιο της γεώτρησης) ελέγχεται με το να διατηρούμε το προφίλ της πίεσης στον δακτύλιο της γεώτρησης, μεγαλύτερο από την πίεση του γεωλογικού σχηματισμού (pore pressure) στον οποίο γίνεται η γεώτρηση, για όλο το τμήμα της γεώτρησης.

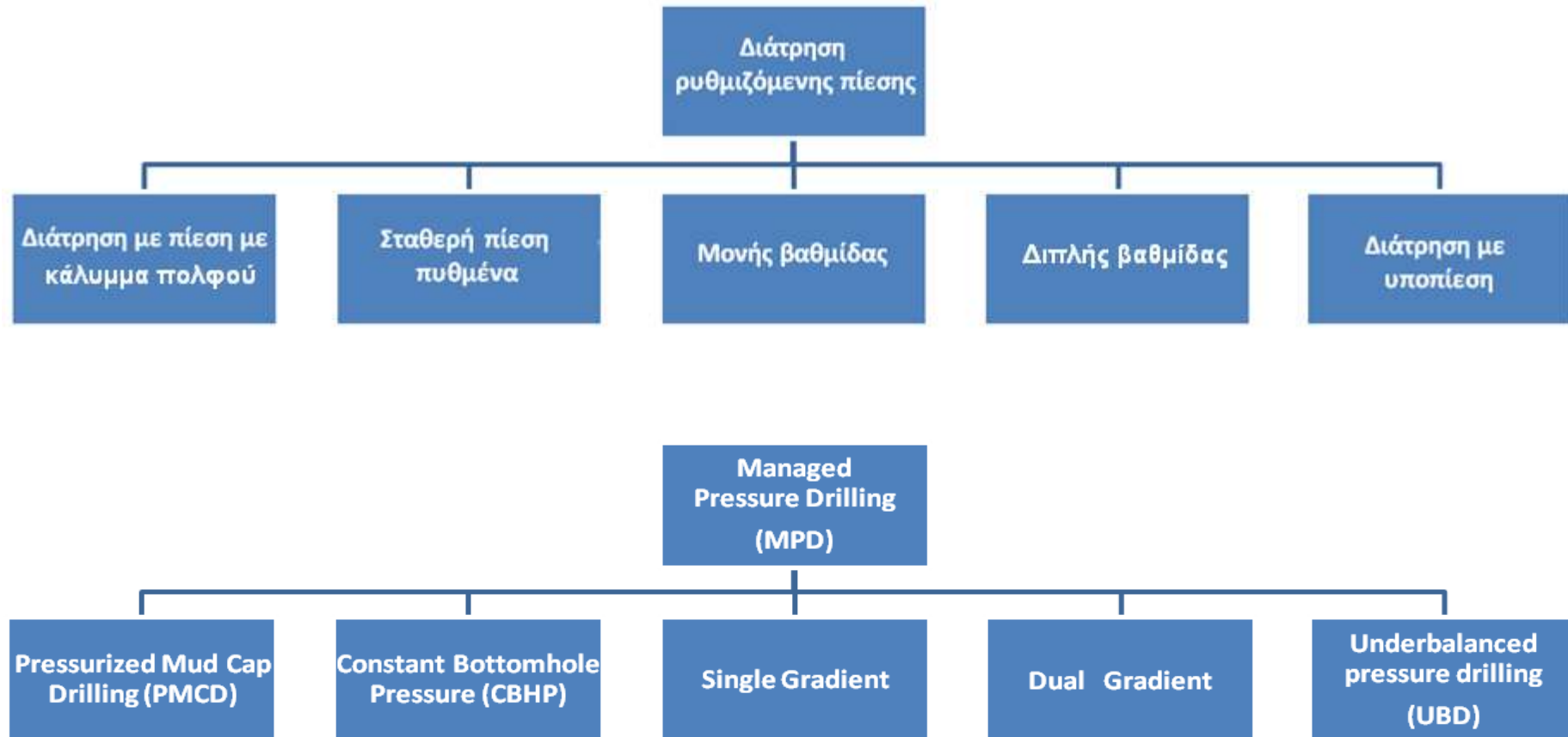
Στις Underbalanced τεχνικές, η πίεση, η οποία δημιουργείται στο κατώτατο τμήμα μιας γεώτρησης (υδροστατική πίεση πολφού, πίεση στο κοπτικό άκρο, πίεση στον δακτύλιο της γεώτρησης) διατηρείται σε μικρότερη τιμή από την πίεση του γεωλογικού σχηματισμού (pore pressure) στον οποίο γίνεται η γεώτρηση, για όλο το τμήμα της γεώτρησης, και σε όλους τους γεωλογικούς σχηματισμούς στους οποίους γίνεται η διάτρηση, είτε αυτοί είναι ζώνες του ταμιευτήρα είτε όχι.

Η International Association of Drilling Contractors (IADC) έχει διαχωρίσει τις Managed Pressure Drilling (MPD) τεχνικές σε δύο κύριες κατηγορίες:

- **Αναδραστική (Reactive) MPD:** Σε αυτήν την κατηγορία η γεώτρηση διεξάγεται με προκαθορισμένα τα σημεία στα οποία θα τοποθετηθούν οι διάφορες σωληνώσεις, με χρήση πολφών συγκεκριμένων ιδιοτήτων. Ο συγκεκριμένος προγραμματισμός προϋποθέτει, κατά την διάρκεια της διάτρησης, την ύπαρξη και χρήση βαλβίδα ρύθμισης στην έξοδο (Choke) και RCD (Rotating Control Device), ενδεχομένως και με τον έλεγχο στα στελέχη διάτρησης (ταχύτητα περιστροφής, εκκεντρότητα) για ασφαλέστερη και αποτελεσματικότερη διαχείριση των απρόβλεπτων τιμών της πίεσης στη γεώτρηση.
- **Προαναδραστική (Proactive) MPD:** Σε αυτή την τεχνική η γεώτρηση είναι σωληνωμένη και οι σχεδιασμοί των πολφών γεώτρησης και των ιδιοτήτων τους (ρεολογικές ιδιότητες, πυκνότητα) γίνονται από την αρχή της διαδικασίας με δεδομένη την σωλήνωση, δίνοντας την δυνατότητα για καλύτερο σχεδιασμό και διαχείριση του προφίλ της πίεσης.

Οι παραλλαγές των Managed Pressure Drilling (MPD) τεχνικών παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.4.

4.2.4. Παραλλαγές της Managed Pressure Drilling (MPD).

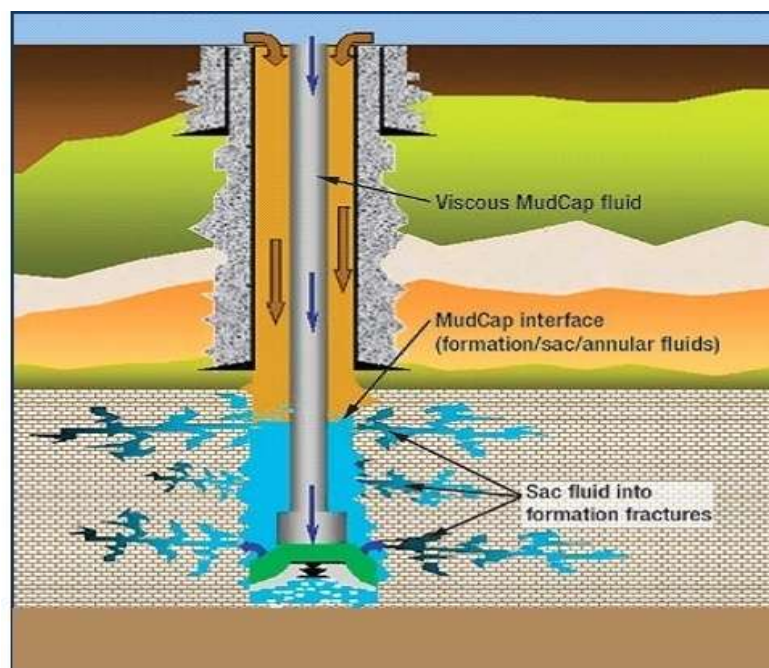


Σχήμα 4.4: Διάγραμμα κατηγοριοποίησης Managed Pressure Drilling τεχνικών (Dalamarinis, 2007).

Διάτρηση με πίεση με κάλυμμα πολφού (PMCD).

Η τεχνική διάτρησης με πίεση με επικάλυψη πολφού αποτελεί ιδανική λύση για περιπτώσεις στις οποίες παρουσιάζονται, σε μεγάλο βαθμό, προβλήματα που σχετίζονται με την απώλεια πολφού γεώτρησης (mud losses). Σε αυτές τις περιπτώσεις υπάρχει τμήμα στο υπέδαφος, στο οποίο πραγματοποιείται η γεώτρηση, και στο οποίο δημιουργούμε μια τεχνητή ή αξιοποιούμε μια υπάρχουσα “ζώνη απόθεσης” η οποία μπορεί να αποδεχθεί τον πολφό της γεώτρησης ο οποίος θα θυσιαστεί (απόρριψη του πολφού σε αυτή την ζώνη στο υπέδαφος για την υλοποίηση της τεχνικής) καθώς και τα τρίματα που προκύπτουν από την διαδικασία της διάτρησης (drill cuttings) (Σχήμα 4.5) (Terwogt et al. 2005, Hannegan, 2005).

Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για την εκτέλεση γεωτρήσεων που έχουμε σοβαρές απώλειες πολφού διάτρησης, όταν εισερχόμαστε κατά την διάτρηση σε ταμιευτήρες που περιέχουν αέρια (φυσικό αέριο και άλλους είδους αέρια) και εμφανίζουν “ρωγματωμένη ασβεστολιθική δομή” (fractured carbonate reservoirs) από την φύση τους, επιτρέποντας για αυτόν τον λόγο την απελευθέρωση προς την επιφάνεια κατά την διάρκεια της διάτρησής τους, αερίου και πετρελαίου, με παράλληλη εισροή σε αυτούς μεγάλης ποσότητας πολφού (mud losses).



Σχήμα 4.5: Παράδειγμα τεχνικής Mud Cap Drilling.

Όταν κατά την εκτέλεση γεωτρήσεων που παρουσιάζουν τις ανωτέρω ιδιαιτερότητες, αρχίσει να παρουσιάζεται απώλεια πολφού από το σύστημα, τότε η στάθμη του πολφού διάτρησης μέσα στον δακτύλιο της γεώτρησης σταδιακά αρχίζει να μειώνεται έως ότου φτάσει σε τέτοιο επίπεδο ώστε η υδροστατική πίεση που ασκεί ο πολφός στον δακτύλιο της γεώτρησης, στο σημείο στο οποίο παρουσιάζεται το πρόβλημα (ζώνη απωλειών - loss zone), να ισούται με την πίεση του ταμιευτήρα (απώλεια πολφού μέσα στον ταμιευτήρα). Όταν συμβεί αυτό, η υδροστατική πίεση του πολφού στο άνω μέρος του ταμιευτήρα, όπου συνήθως είναι συγκεντρωμένα τα αέρια αποθέματα (fractured carbonate reservoirs) μπορεί να είναι αρκετά μικρότερη από την πίεση του ταμιευτήρα. Τούτο συνδυαζόμενο με την μεγάλη διαπερατότητα την οποία παρουσιάζουν τέτοιου είδους ταμιευτήρες, επιτρέπει ροή αερίου από τον ταμιευτήρα στην γεώτρηση, αμέσως μετά την πτώση της στάθμης του πολφού μέσα στον δακτύλιο της γεώτρησης. Σε μια τέτοια περίπτωση ο επανέλεγχος της γεώτρησης μπορεί να ανακτηθεί μόνο με την πλήρωση του δακτυλίου μέχρι το επίπεδο εκείνο ώστε να σταματήσει η διαρροή αερίου από τον ταμιευτήρα. Σε περίπτωση που η πίεση του ταμιευτήρα είναι μικρότερη από την υδροστατική πίεση του πολφού στον δακτύλιο της γεώτρησης (στο σημείο όπου εμφανίζεται το πρόβλημα - under balance situation), μπορεί να ανακτηθεί ο έλεγχος της γεώτρησης με την εισαγωγή στον δακτύλιο της γεώτρησης νερού, για όσο χρονικό διάστημα διαρκούν οι απώλειες. Η διάτρηση τότε μπορεί να συνεχιστεί καθώς το αέριο επανεισάγεται μέσα στην ζώνη απωλειών του ταμιευτήρα (loss zone).

Κατά την διαδικασία διάτρησης με την τεχνική Pressurized Mud Cap Drilling ένα RCD (Rotating Control Device) χρησιμοποιείται για να σφραγίσει τον δακτύλιο της γεώτρησης (well annulus), και εισάγεται πολφός αυξημένου ιξώδους στον δακτύλιο της γεώτρησης μεγαλύτερης πυκνότητας (Cap fluid) από τον ήδη υπάρχοντα πολφό διάτρησης, ο οποίος και συνεχίζει να επανεισάγεται στην γεώτρηση μέσω των διατρητικών στελεχών). Ο πολφός που βρίσκεται στον δακτύλιο της γεώτρησης αποτελείται από τρία διαφορετικά ρευστά:

- Τον πολφό που εισάγεται στην γεώτρηση μέσω των διατρητικών στελεχών και εισέρχεται στον δακτύλιο μέσω των ακροφυσίων του κοπτικού άκρου.
- Τον πολφό που εισάγεται στην γεώτρηση μέσω του δακτυλίου της γεώτρησης.
- Τον πολφό που προκύπτει από την ανάμειξη αυτών των δύο πολφών.

Αυτή η μέθοδος αποτρέπει μεν την μετακίνηση υδρογονανθράκων στην επιφάνεια αλλά έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία υψηλών πιέσεων στην περιοχή του ταμιευτήρα.

Η τεχνική Pressurized Mud Cap Drilling (PMCD) δίνει την δυνατότητα στο προσωπικό που εκτελεί την γεώτρηση να συνεχίσει την διάτρηση με μικρότερες πιέσεις μέσα στην περιοχή του δακτυλίου της γεώτρησης σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους και μπορεί να συνεχιστεί η διάτρηση σε σχηματισμούς οι οποίοι εμφανίζουν προβλήματα (ρωγμές ή ρήγματα) μέχρι το επιθυμητό ή τελικό βάθος γεώτρησης, μειώνοντας τον χρόνο των προβλημάτων που εμφανίζονται λόγω των ιδιοτήτων του συγκεκριμένου είδους ταμιευτήρων, ελαττώνοντας έτσι το κόστος και τον χρόνο εκτέλεσης μιας γεώτρησης, εξαιτίας της μείωσης απωλειών πολφού στον ταμιευτήρα. Η τεχνική Pressurized Mud Cap Drilling (PMCD) αποτελεί την κύρια μέθοδο στην περιοχή της Ασίας όπου μία στις πέντε γεώτρησης παρουσιάζουν προβλήματα μερικής ή ολικής απώλειας πολφού διάτρησης (Hannegan, 2005).

Σταθερή πίεση πυθμένα (Constant Bottom Hole Pressure - CBHP).

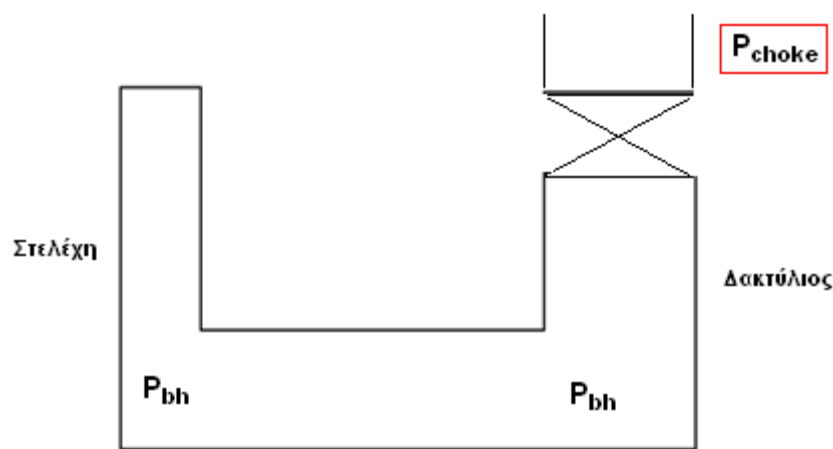
Η τεχνική σταθερής πίεσης πυθμένα (CBHP) ανήκει στην κατηγορία των προαναδραστικών Managed Pressure Drilling (MPD) τεχνικών, και είναι επίσης γνωστή ως Equivalent Circulating Density (ECD) διαχείριση (Hannegan, 2005). Η διάτρηση γίνεται απαραίτητα σε επίπεδα ισορροπίας πιέσεων μεταξύ του δακτυλίου της γεώτρησης και του γεωλογικού σχηματισμού στον οποίο γίνεται η διάτρηση (near balance condition), με χρήση τεχνικών και εργαλείων "Back Pressure" ώστε να είναι δυνατή η διατήρηση μικρής υπερπίεσης (Over balance) μέσα στην γεώτρηση (σε σχέση με την πίεση του ταμιευτήρα), όταν σταματάει να λειτουργεί η αντλία κυκλοφορίας πολφού διάτρησης.

Στην συμβατική διάτρηση, η πίεση η οποία δημιουργείται στο πυθμένα της γεώτρησης ως (Σχήμα 4.6):

$$p_{bh} = \rho_m gh_i + \Delta p_f \quad (3) \quad \text{όπου σε όρους γεωτρήσεων}$$

$$\rho_{bh} = \frac{p_{bh}}{gh_i} + \Delta p_f = \rho_m + \frac{\Delta p_f}{gh_i} = \rho_m + ECD \quad (4)$$

όπου ECD ορίζεται η ισοδύναμη πυκνότητα ρευστού που θα δώσει υδροστατική πίεση ίση με την Δp_f . Όταν έχουμε κανονική κυκλοφορία πολφού στο σύστημα τότε η $p > p_f$ λόγω του ότι αποτελεί το άθροισμα της απώλειας πίεσης λόγω κυκλοφορίας και της υδροστατικής, ενώ σε περίπτωση διακοπής της κυκλοφορίας $\Delta p_f = p_b$ (5) και σε αυτή την περίπτωση χρειάζεται να εφαρμόσουμε μια επιπλέον πίεση στην επιφάνεια για να αντικαταστήσει την Δp_f και να παραμείνει σταθερή η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης.



Σχήμα 4.6: U-TUBE αναλογία.

Η τεχνική σταθερής πίεσης πυθμένα (CBHP) (Σχήμα 4.6) εισάγει σε αυτή την εξίσωση ένα χρήσιμο και σημαντικό παράγοντα. Μία επιπλέον πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής (Back Pressure System) μέσω συστημάτων στην επιφάνεια, ώστε να επαναφέρουμε ή να διατηρήσουμε την πίεση στον δακτύλιο της γεώτρησης στα επιθυμητά επίπεδα.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου σταθερής πίεσης πυθμένα (CBHP) είναι τα ακόλουθα (Hannegan, 2005):

- Λιγότερος μη παραγωγικός χρόνος διάτρησης.
- Αυξημένος έλεγχος της γεώτρησης.
- Ακριβέστερη διαχείριση της πίεσης στην γεώτρηση.

- Αύξηση του ρυθμού διάτρησης.
- Μικρότερη ζημία από τον πολφό διάτρησης και τα σωματίδια του πετρώματος που προέρχονται από την διάτρηση, στην παραγωγικότητα της γεώτρησης
- Δυνατότητα εισαγωγής σωληνώσεων σε μεγαλύτερα βάθη.
- Μικρότερες αλλαγές στην πυκνότητα του πολφού διάτρησης της γεώτρησης έως το τέλος της διαδικασίας, και
- Αύξηση των ανακτήσιμων αποθεμάτων υδρογονανθράκων.

Η τεχνική σταθερής πίεσης πυθμένα (CBHP), προσφέρει σημαντικά οφέλη στην αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με τα “υδραυλικά” (πολφός, πτώση πίεσης, προφίλ πίεσης) μιας γεώτρησης, όταν αυτή λαμβάνει χώρα σε απαιτητικούς σχηματισμούς οι οποίοι παράγουν ήδη υδρογονάνθρακες. Σε αυτές τις περιπτώσεις παρά το αυξημένο κόστος της μεθόδου σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους διάτρησης η επιλογή της, κρίνεται απαραίτητη για την αντιμετώπιση των προβλημάτων. Επίσης η τεχνική αυτή εφόσον αποτελεί τεχνική διαχείρισης του προφίλ της πίεσης απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό για την εκτέλεση της.

Τεχνική μονής βαθμίδας (Single Gradient).

Η τεχνική μονής βαθμίδας (Hannegan, 2005) διαχειρίζεται ένα μόνο ρευστό γεώτρησης, μέσα στην περιοχή του δακτυλίου της γεώτρησης, με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό προφίλ πίεσης και να διατηρηθεί σταθερή η πίεση στο κατώτατο σημείο της γεώτρησης μεταβάλλοντας μόνο τις ακόλουθες παραμέτρους.

$$P_{bh} = P_m + \Delta P_f + P_b \quad (6)$$

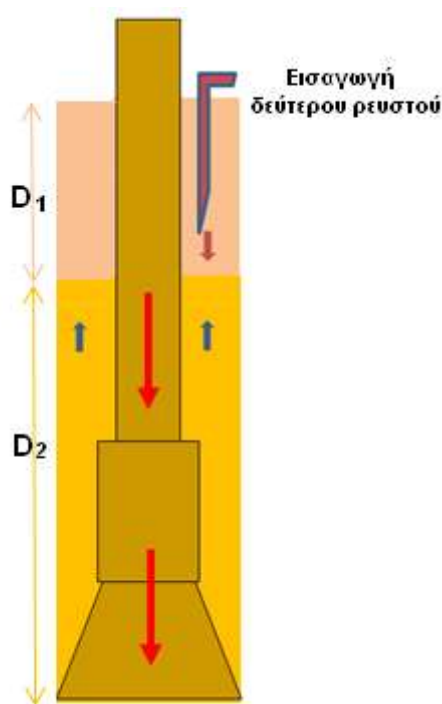
Τεχνική διπλής βαθμίδας (Dual Gradient).

Η τεχνική διάτρησης διπλής βαθμίδας (Dual Gradient) (Σχήμα 4.7) (Hannegan, 2005) βασίζεται στην χρήση δύο πολφών διαφορετικής πυκνότητας, με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτευχθεί ίδια πίεση στο κατώτατο σημείο της γεώτρησης, η οποία συνήθως επιτυγχάνεται με την χρήση ενός μόνο πολφού διάτρησης σταθερής πυκνότητας. Στην πραγματικότητα αυτή η μέθοδος μπορεί να επιτύχει την

αντικατάσταση των χρονοβόρων μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την διαχείριση των πιέσεων που εμφανίζονται στον δακτύλιο της γεώτρησης.

Η μέθοδος αυτή έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτρέπει στους μηχανικούς γεωτρήσεων να εκτελούν γεωτρήσεις σε μεγάλου βάθους σχηματισμούς, όπου χρήση μιας πυκνότητας οδηγεί σε πιθανές ρωγματώσεις των πετρωμάτων, επιτρέποντας παράλληλα την κατάλληλη σωλήνωση κατά μήκος προβληματικών ζωνών τις οποίες συνάντησαν κατά την διάρκεια της διάτρησης σε μικρότερα βάθη.

Η μέθοδος διπλής βαθμίδας (Dual Gradient) επιτυγχάνεται με την εισαγωγή ενός αδρανούς αερίου ή πολφού γεώτρησης μικρής πυκνότητας σε ένα προκαθορισμένο βάθος στο δακτύλιο (Σχήμα 4.7), το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία και ύπαρξη μιας "πίεσης - βάθους" στην περιοχή πάνω από το σημείο εισαγωγής του πολφού ή του αερίου, και μιας δεύτερης "πίεσης – βάθους" κάτω από την περιοχή της εισαγωγής. Αυτή η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης σε θαλάσσια περιβάλλοντα με την χρήση ομόκεντρης εισαγωγής στη γεώτρηση ενός "παρασιτικού σωλήνα" ή στην περίπτωση επιπλεόντων πλατφόρμων γεώτρησης, με την χρήση ενισχυτικών αντλιών διάμεσου της γραμμής των αντλιών της εγκατάστασης γεώτρησης.



Σχήμα 4.7: Παράδειγμα τεχνικής διπλής βαθμίδας.

Η μέθοδος διπλής βαθμίδας (Dual Gradient) είτε βασίζεται σε συστήματα αντλιών, ή σε συστήματα αέρα, ή στην αραίωση του πολφού διάτρησης ο οποίος βρίσκεται στο πάνω τμήμα της γεώτρησης. Έχει ως σκοπό την διατήρηση σταθερής πίεσης στο κατώτατο σημείο της γεώτρησης μέσω της διαχείρισης ενός, ή κάποιου συνδυασμό των παρακάτω συντελεστών στις ακόλουθες εξισώσεις.

Για συστήματα που βασίζονται στην αραίωση του πολφού διάτρησης :

$$p_{bh} = \rho_1 g D_1 + \Delta p_{f1} + \rho_2 g D_2 + \Delta p_{f2} \quad (7)$$

και για συστήματα που βασίζονται στην χρήση ενισχυτικών αντλιών με το ίδιο ρευστό :

$$p_{bh} = \rho_1 g D_1 + \Delta p_{f1} + p_{pump} \quad (8)$$

4.3.1. Τι είναι η τεχνική διάτρησης με υποπίεση (UBD) και τα οφέλη της.

Με τις συμβατικές μεθόδους διάτρησης (Over balanced), παρουσιάζονται προβλήματα τα οποία περιλαμβάνουν απώλεια ρευστού, "κόλλημα" και απώλεια στελεχών γεωτρήπανου, χαμηλοί ρυθμοί διάτρησης, και πρόκληση ζημίας στον ταμιευτήρα (formation damage).

Το ιδανικότερο ρευστό για υψηλούς ρυθμούς διάτρησης και αποφυγής επιγόμωσης του ταμιευτήρα αποτελεί το αέριο. Επειδή όμως πρέπει να προστατευτούν τα τοιχώματα και να μην επιτραπεί εισροή ρευστών ταμιευτήρα χρησιμοποιείται πολφός ικανής πυκνότητας.

Στην τεχνική διάτρησης με υποπίεση (UBD) το προφίλ της πίεσης μέσα στον δακτύλιο της γεώτρησης διατηρείται σκόπιμα χαμηλότερα από την πίεση των γεωλογικών σχηματισμών οι οποίοι βρίσκονται στην ζώνη της γεώτρησης. Ο πρωταρχικός σκοπός αυτής της τεχνικής είναι να ελαχιστοποιήσει την ζημία, λόγω της πίεσης που εμφανίζεται στον δακτύλιο της γεώτρησης, στους σχηματισμούς στους οποίους γίνεται η διάτρηση λόγω υπερπίεσης που υπάρχει στις συμβατικές τεχνικές. Η ύπαρξη αρνητικής διαφορικής πίεσης μεταξύ του γεωλογικού σχηματισμού και της γεώτρησης αυξάνει την παραγωγή των ρευστών και αερίων του

σχηματισμού κατά την διαδικασία της διάτρησης με πιθανούς κινδύνους οι οποίοι όμως αντιμετωπίζονται όπως αναφέρεται στην συνέχεια.

Η τεχνική διάτρησης με υποπίεση (UBD) παρότι αρχικά είναι πιο ακριβή, μπορεί να μειώσει την απώλεια ρευστού, να ελαχιστοποιήσει “κόλλημα” και την απώλεια στελεχών του γεωτρυπάνου, να αυξήσει τον ρυθμό διάτρησης, και το πιο σημαντικό να δημιουργήσει μεγαλύτερη παραγωγικότητα λόγω της ελαχιστοποίησης της πρόκλησης ζημίας στον ταμιευτήρα (formation damage). Για να μεγιστοποιηθούν τα οφέλη της μεθόδου θα πρέπει καθ’όλη την διάρκεια εκτέλεσης της γεώτρησης να διατηρούνται Under balanced συνθήκες συνεχώς. Παρόλα αυτά η τεχνική δεν είναι κατάλληλη για τους περισσότερους αργιλικούς σχιστόλιθους, τους αλατούχους σχηματισμούς, των θρυμματισμένων λιθανθρακοφόρων τμημάτων, των μη ενοποιημένων τμημάτων διαφόρων σχηματισμών και ασβεστολίθων. Εάν αυτοί οι υφιστάμενοι σχηματισμοί είναι εμβαπτισμένοι σε κάποιο υγρό (πχ. νερό), τότε ίσως να είναι πιο κατάλληλο, να γίνει διάτρηση σε αυτούς με υπερπίεση (Over balanced) και στην συνέχεια να γίνει αλλαγή σε συνθήκες διάτρησης υποπίεσης (Under balanced) για τον επιλεγμένο σχηματισμό στον οποίο βρίσκεται ο ταμιευτήρας.

Για την δημιουργία συνθηκών υποπίεσης κατά την διάρκεια της διάτρησης είναι διαθέσιμες τέσσερις τεχνικές:

- Ρευστά διάτρησης μικρής πυκνότητας (Oil Based Muds).
- Εισαγωγή αερίου μέσω των στελεχών διάτρησης.
- Εισαγωγή αερίου μέσω ενός "παρασιτικού" σωλήνα στον δακτύλιο της γεώτρησης.
- Ρευστά διάτρησης με αφρό.

Αέρας, άζωτο και φυσικό αέριο χρησιμοποιούνται ως αέρια φάση σε διάτρηση Under balanced. Όταν είναι διαθέσιμο φυσικό αέριο και μπορεί να ανακτηθεί και να επανεισαχθεί ξανά στην γραμμή τροφοδοσίας -πώλησης, αποτελεί την πιο οικονομική και αποτελεσματική μέθοδο για την επίτευξη συνθηκών διάτρησης Under balanced. Η διάτρηση με εισαγωγή αέρα είναι η πλέον συνηθισμένη, αλλά υπάρχουν σημαντικά προβλήματα διάβρωσης και η πιθανότητα πρόκλησης φωτιάς μέσα στην γεώτρηση. Για αυτούς τους λόγους, το άζωτο έχει επικρατήσει ως το επιλεγμένο αέριο για διάτρηση με συνθήκες υποπίεσης. Το άζωτο χρησιμοποιείται λόγω του σχετικά μικρού κόστους παραγωγής του, διαχείρισης, και μικρής πιθανότητας πρόκλησης

φωτιάς μέσα στην γεώτρηση. Παράγεται από τον ατμοσφαιρικό αέρα μέσα από σύστημα μεμβρανών (Εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1: Σύστημα παραγωγής αζώτου (Ασπριτάκης, 2005).

Ρευστά γεώτρησης μικρής πυκνότητας.

Ο πιο απλός τρόπος για την ελάττωση της υδροστατικής πίεσης μέσα στην γεώτρηση, είναι η χρήση ρευστών γεώτρησης μικρής πυκνότητας, τέτοια όπως το νερό, το ντίζελ και το ακατέργαστο πετρέλαιο. Το κυριότερο πρόβλημα με αυτή την τεχνική είναι ότι η υδροστατική πίεση δεν μπορεί να μειωθεί αρκετά ώστε να παραμείνει Under balanced σε πολλούς ταμιευτήρες.

Εισαγωγή αερίου μέσω των στελεχών διάτρησης.

Με αυτή την τεχνική, αέρας ή άζωτο προστίθεται στο ρευστό της γεώτρησης και τροφοδοτείται μέσω των αντλιών απευθείας στα στελέχη διάτρησης (Σχήμα 4.8) . Στα πλεονεκτήματα της τεχνικής περιλαμβάνονται (Hannegan, 2005):

- Υπάρχει υδροστατικό πλεονέκτημα για όλο το κατακόρυφο βάθος της γεώτρησης.

- Η γεώτρηση δεν χρειάζεται να σχεδιαστεί για συνθήκες Under balanced διάτρησης.
- Χρειάζεται λιγότερο αέριο για να επιτευχθεί η επιθυμητή πίεση σε σύγκριση με την τεχνική εισαγωγής αερίου μέσω "παρασιτικού" σωλήνα.
- Ο ρυθμός διάτρησης μπορεί να αυξηθεί.

Στα μειονεκτήματα αυτής της τεχνικής περιλαμβάνονται:

- Η γεώτρηση μπορεί να επιστρέψει σε κατάσταση υπερπίεσης (Over balanced) εάν διακοπεί η λειτουργία της γεώτρησης (διακοπή διάτρησης και κυκλοφορίας ρευστού).
- Απαιτούνται “εξωτικά” συστήματα μετρήσεων υπεδάφους (MWD).

Εισαγωγή αερίου μέσω ενός “παρασιτικού” σωλήνα.

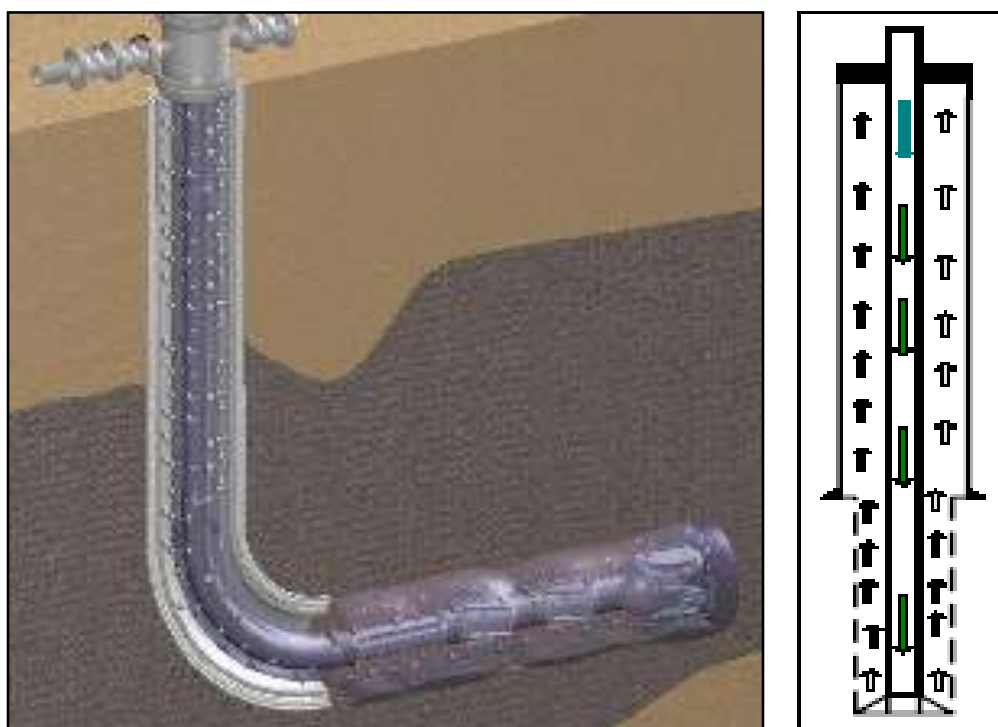
Σε αυτή την τεχνική ένας δεύτερος σωλήνας διατρέχει εξωτερικά την ενδιάμεση σωλήνωση (Σχήμα 4.9) και η εισαγωγή αερίου γίνεται στον δακτύλιο μειώνοντας έτσι την υδροστατική πίεση στον πυθμένα.

Στα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνικής περιλαμβάνονται:

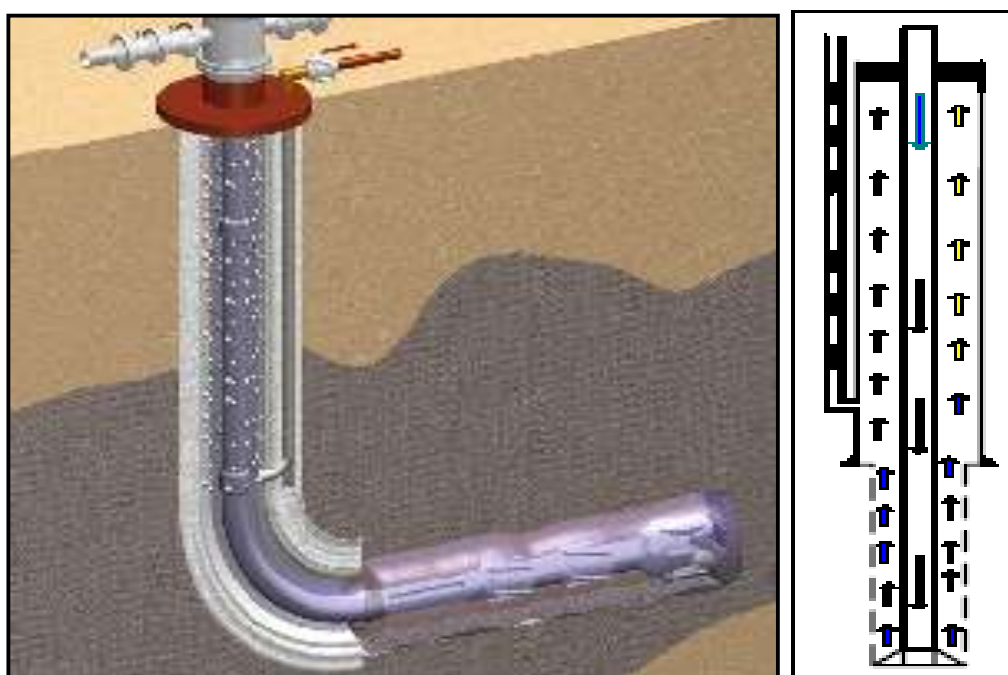
- Δεν υπάρχουν λειτουργικές διαφορές σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο.
- Επιτυγχάνεται σταθερή πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί κοινός εξοπλισμός Measured While Drilling (MWD).

Στα μειονεκτήματα αυτής της τεχνικής περιλαμβάνονται:

- Επιπρόσθετο κόστος.
- Επιπρόσθετος χρόνος.
- Απαιτείται σωλήνωση επιφανείας μεγαλύτερων διαστάσεων.



Σχήμα 4.8: Διάταξη κυκλοφορίας ρευστού - αερίου μέσω των στελεχών διάτρησης (Ασπριτάκης, 2005).



Σχήμα 4.9: Διάταξη εισαγωγής αερίου μέσω “παρασιτικού” σωλήνα (Ασπριτάκης, 2005).

Αφρός σε αντιδιαστολή με διαφασική ροή.

Ένα σύστημα αζώτου - αφρού προκαλεί λιγότερες φθορές σε σχηματισμούς ευαίσθητους στο νερό και χρησιμοποιείται σε περιορισμένη βάση. Παρόλα αυτά οι επιπρόσθετες απαιτήσεις για την παραγωγή ευσταθούς αφρού κάνει το κόστος απαγορευτικό στις περισσότερες περιπτώσεις. Συστήματα αέρα με αναλογίες αερίου - υγρού που κυμαίνονται μεταξύ, 10 προς 1, έως 50 προς 1, είναι απλά και διαχειρίζονται εύκολα, αλλά η διαχείριση της πίεσης και της κυκλοφορίας του αερίου μπορεί να αποτελέσει πρόβλημα. Εξαιτίας αυτού και επειδή είναι αναγκαία η διατήρηση υποπίεσης (Under balanced) το επίπεδο ασφάλειας για τα συστήματα αέρα είναι συνήθως μεγαλύτερο, σε σχέση με πιο σταθερά συστήματα, όπως οι αφροί. Επίσης οι αφροί εμφανίζουν κάποια ευαισθησία στους υδρογονάνθρακες, και η πολύ μεγάλη εισροή υδρογονανθράκων στην γεώτρηση μπορεί να τους αποσταθεροποιήσει. Τα θερμοκρασιακά όρια των άφρων που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι περίπου 180 °F (82 °C), κάτι το οποίο περιορίζει την χρήση τους σε βάθη μεγαλύτερα των 4000 μέτρων, και σε γεωτρήσεις υψηλής θερμοκρασίας (High Temperature Wells).

Κεφάλαιο 5^ο - Παράγοντες που επηρεάζουν την πτώση πίεσης στα διατρητικά στελέχη και τον δακτύλιο.

5.1. Εισαγωγή.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια παρουσίαση των παραγόντων οι οποίοι επηρεάζουν την πτώση πίεσης και το προφίλ της πτώσης πίεσης το οποίο εμφανίζεται κατά την διάρκεια της διάτρησης, τόσο συνολικά για όλη την γεώτρηση όσο και για κάθε επιμέρους τμήμα της.

Σκοπός αυτής της παρουσίασης είναι να περιγράψουμε πως κάθε μια από αυτές τις παραμέτρους επηρεάζει την πτώση πίεσης ή το προφίλ της πτώσης πίεσης στην γεώτρηση, ώστε να χρησιμοποιηθούν με την σειρά τους στο επόμενο κεφάλαιο για τον σχεδιασμό του υδραυλικού μοντέλου πτώσης πίεσης για οποιοδήποτε τμήμα μιας γεώτρησης.

5.2. Παράγοντες ο οποίοι επηρεάζουν το προφίλ της πτώσης πίεσης κατά την διάρκεια εκτέλεσης της γεώτρησης.

Κατά την διάρκεια εκτέλεσης μια γεώτρησης η μεγαλύτερη πρόκληση είναι η επίτευξη καλού καθαρισμού της γεώτρησης από τα θραύσματα του πετρώματος εξαιτίας της διάτρησης σε συνδυασμό με την διατήρηση της πίεσης κατά μήκος της γεώτρησης μέσα σε προκαθορισμένα επιθυμητά όρια. Το χαμηλό όριο είναι μικρότερο από την p_{pore} (πίεση ρευστών των πετρωμάτων) και το υψηλό όριο είναι η p_{frac} (πίεση ρωγμάτωσης των πετρωμάτων).

Η μεταφορά των θραυσμάτων του πετρώματος εξαρτάται από την κυκλοφορία του ρευστού μέσα στην γεώτρηση, και επιτυγχάνεται μέσω της κατάλληλης παροχής από τις αντλίες πολφού.

Οι απώλειες πίεσης στην γεώτρηση εξαρτώνται από:

1. Την ρεολογία του ρευστού διάτρησης.
2. Την επίδραση της πίεσης και της θερμοκρασίας στο ρευστό της γεώτρησης.
3. Την γεωμετρία της γεώτρησης και των μηχανημάτων διάτρησης.

4. Την επίδραση της εκκεντρότητας των στελεχών του γεωτρυπάνου μέσα στην γεώτρηση.
5. Την επίδραση της περιστροφής των στελεχών του γεωτρυπάνου.

5.2.1. Ρεολογία ρευστού διάτρησης.

Η κατηγοριοποίηση των ρευστών γίνεται με κριτήριο τις δυνάμεις οι οποίες διέπουν και χαρακτηρίζουν την κυκλοφορία τους, όταν τα εξαναγκάζουμε σε κίνηση κάτω από ορισμένες συνθήκες. Με βάση την απόκριση των ρευστών στην διατμητική τάση (shear stress) κατηγοριοποιούνται ως Νευτώνεια και μη – Νευτώνεια ρευστά.

Νευτώνεια ρευστά.

Στα Νευτώνεια ρευστά η βαθμίδα ταχύτητας (γ) είναι απευθείας ανάλογη της διατμητικής τάσης (τ) που εφαρμόζεται στο ρευστό. Η σταθερά της αναλογικότητας ονομάζεται ιξώδες (μ). Η σχέση αυτή εκφράζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\tau = \mu \gamma \quad (9)$$

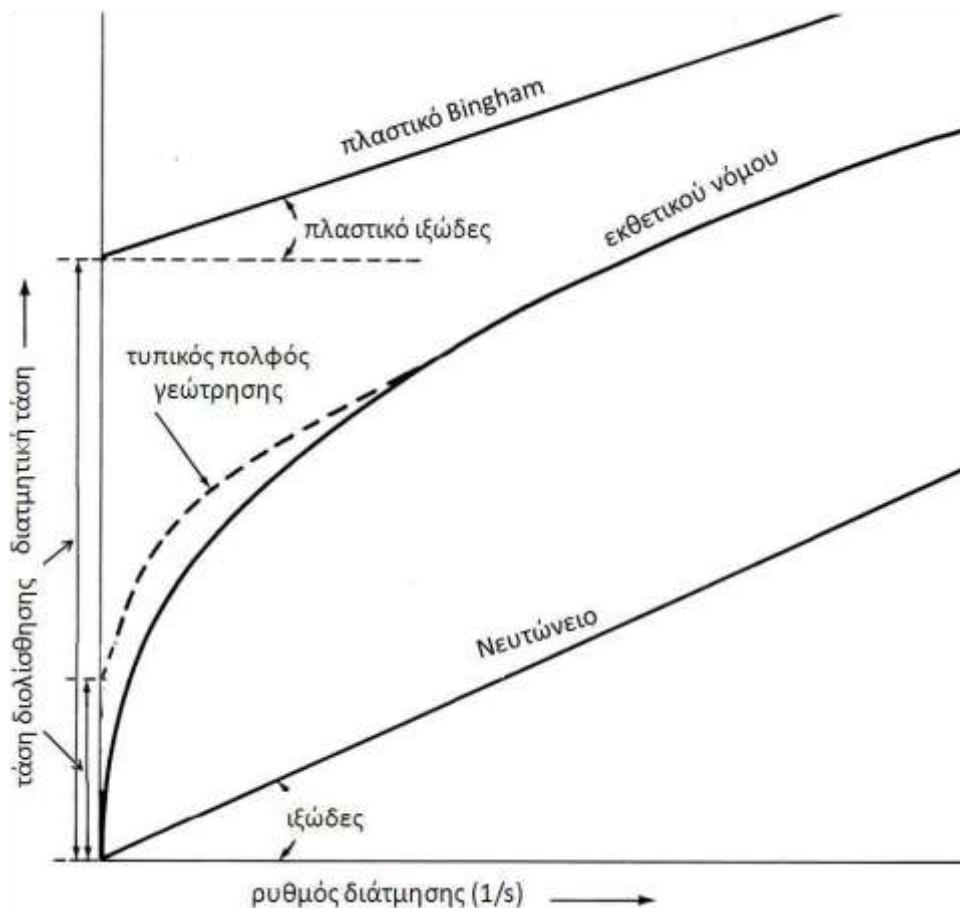
όπου (μ) είναι το ιξώδες του ρευστού και είναι σταθερό για συγκεκριμένη πίεση και θερμοκρασία για οποιαδήποτε διατμητική τάση (τ) και αν εφαρμόσουμε στο ρευστό.

Το ιξώδες εκφράζεται σε poises όπου ένα poise ισούται με 1 dyne-s/cm^2 ή 1 g/cms . Στην βιομηχανία γεωτρήσεων το ιξώδες συνήθως εκφράζεται σε centipoises (cP), όπου 1 cP ισούται με 0.01 poise .

Το ρεόγραμμα ενός ρευστού που εμφανίζει Νευτώνεια συμπεριφορά απεικονίζεται στο διάγραμμα 5.1. Το διάγραμμα δείχνει την γραμμική σχέση της διατμητικής τάσης (τ), σε σχέση με την βαθμίδα ταχύτητας (γ). Επίσης, εφόσον η γραφική παράσταση ξεκινάει από την αρχή των αξόνων, συμπεραίνεται ότι οποιαδήποτε τάση εφαρμοστεί στο ρευστό, αυτό θα αρχίσει να κινείται (Διάγραμμα 5.1).

Μη Νευτώνεια ρευστά.

Η συντριπτική πλειοψηφία των ρευστών διάτρησης, είναι πολύ πολύπλοκα ρεολογικά, ώστε να χαρακτηριστεί η συμπεριφορά τους από την τιμή του ιξώδους τους. Αυτά τα ρευστά τα οποία δεν εμφανίζουν μια γραμμική σχέση μεταξύ της βαθμίδα ταχύτητας ($\dot{\gamma}$), που εμφανίζεται σε αυτά, λόγω της εφαρμογής μιας διατμητικής τάσης (τ) χαρακτηρίζονται σαν μη-Νευτώνεια. Στο Διάγραμμα 5.1 παρουσιάζονται τα διάφορα ρεολογικά μοντέλα αιωρημάτων που προσεγγίζουν οι πολφικοί διάτρησης.



Διάγραμμα 5.1: Ρεολογικές καμπύλες (ρεογράμματα) των τυπικών ρεολογικών μοντέλων (Κελεσίδης, 2009).

Μοντέλο Power Law.

Αυτό το μοντέλο εκφράζει εκείνα τα ρευστά στα οποία η διατμητική τάση (τ) δεν συνδέεται γραμμικά με την βαθμίδα ταχύτητας ($\dot{\gamma}$), και για το οποίο μια απειροελάχιστη διατμητική τάση (τ_0) θα το κάνει να κινηθεί. Η εξίσωση η οποία περιγράφει αυτού του είδους τα ρευστά είναι η:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (10)$$

όπου τ είναι η διατμητική τάση (Pa),

n είναι ο οδηγός συμπεριφοράς της ροής,

K είναι ο οδηγός συνάφειας (Pa s^n), και

$\dot{\gamma}$ είναι η βαθμίδα ταχύτητας (s^{-1}).

Το ρεόγραμμα ενός ρευστού το οποίο περιγράφεται από το μοντέλο Power Law παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5.1.

Ο οδηγός συμπεριφοράς της ροής (n) είναι η κλίση της ευθείας και ο οδηγός συνάφειας, K ισούται με την διατμητική τάση (τ) για την περίπτωση όπου η βαθμίδα ταχύτητας ($\dot{\gamma}$) ισούται με 1. Γίνεται επίσης αντιληπτό ότι το μοντέλο Power Law δίνει Νευτώνειο μοντέλο όταν ο οδηγός συμπεριφοράς της ροής (n) παίρνει την τιμή 1. Σε μια τέτοια περίπτωση ο συντελεστής K αντιπροσωπεύει το ιξώδες του ρευστού. Τα ρευστά αυτά χαρακτηρίζονται ως ψευδοπλαστικά.

Μοντέλο Bingham Plastic.

Τα ρευστά Bingham Plastic, είναι αυτά τα οποία απαιτούν μια μικρή αρχική τάση, ώστε να αρχίσουν να κινούνται, και ακολούθως υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης (τ) και της βαθμίδα ταχύτητας ($\dot{\gamma}$). Η αρχική τάση ονομάζεται τάση διολίσθησης. Αυτό το μοντέλο εκφράζεται από δύο παραμέτρους την αρχική τάση διολίσθησης και το πλαστικό ιξώδες (μ_p) το οποίο είναι ανεξάρτητο από την βαθμίδα ταχύτητας ($\dot{\gamma}$).

Η καταστατική εξίσωση των Bingham Plastic ρευστών είναι η:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} \quad (11)$$

τ_0 είναι η τάση διολίσθησης (Pa).

Το ρεόγραμμα ενός Bingham Plastic ρευστού σχεδιασμένο σε καρτεσιανές συντεταγμένες έχει την μορφή ευθείας γραμμής όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5.1.

Μοντέλο Herschel-Bulkley.

Τα ρευστά Herschel-Bulkley χαρακτηρίζονται από μια αρχική τάση διολίσθησης, όπως και στην περίπτωση των Bingham Plastic ρευστών, και ενός ιξώδους το οποίο εξαρτάται από την βαθμίδα ταχύτητας ($\dot{\gamma}$). Αυτά τα ρευστά συνήθως αποκαλούνται και σαν ψεύδοπλαστικά ρευστά με τάση διολίσθησης και είναι συνδυασμός των μοντέλων Bingham Plastic και Power Law. Το μοντέλο Herschel-Bulkley χρησιμοποιεί την ακόλουθη συσχέτιση για να περιγράψει την ρεολογική συμπεριφορά τους:

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \quad (12)$$

Το μοντέλο γίνεται Power Law, εάν δεν υπάρχει τάση διολίσθησης, ή Bingham Plastic μοντέλο εάν ο οδηγός συμπεριφοράς της ροής (n) ισούται με 1. Το ρεόγραμμα ενός Herschel-Bulkley ρευστού σχεδιασμένο σε καρτεσιανές συντεταγμένες παρουσιάζεται στο διάγραμμα 5.1.

Το μοντέλο ενός Herschel-Bulkley ρευστού μπορεί να περιγράψει από το μοντέλο Power Law εάν η εξίσωση που το περιγράφει πάρει την μορφή:

$$\tau - \tau_0 = K \dot{\gamma}^n \quad (13)$$

5.2.2. Επίδραση της Πίεσης και της Θερμοκρασίας στη ρεολογία του ρευστού.

Είναι ευρέως γνωστό ότι η θερμοκρασία ενός γεωλογικού σχηματισμού αυξάνεται σε σχέση με το βάθος, με την συνήθη θερμοκρασιακή βαθμίδα να είναι

περίπου 1.6 °F / 100ft. Επίσης αυξάνεται και η πίεση του σχηματισμού καθώς προχωράμε σε μεγαλύτερα βάθη. Η πίεση και η θερμοκρασία επιδρούν στην ρεολογία του ρευστού διάτρησης, επηρεάζοντας με αυτό τον τρόπο τις απώλειες πίεσης σε όλο το εύρος της γεώτρησης τόσο μέσα στα διατρητικά στελέχη όσο και στον δακτύλιο της γεώτρησης.

Θερμοκρασία.

Η συνήθης θεώρηση είναι ότι η θερμοκρασία του πολφού διάτρησης μέσα στα διατρητικά στελέχη και στο κοπτικό άκρο είναι ίδια με την θερμοκρασία του πολφού στον δακτύλιο της γεώτρησης. Όμως καθώς προχωράει η διάτρηση ο πολφός θερμαίνεται λόγω του ότι έρχεται σε αυξανόμενη χρονικά επαφή με θερμότερους γεωλογικούς σχηματισμούς, αυξάνοντας την θερμοκρασία του ακόμα περισσότερο καθώς κατευθύνεται προς την επιφάνεια. Σε συγκεκριμένο βάθος (συνήθως στο ¼ με ½ της διαδρομής προς την επιφάνεια του δακτυλίου της γεώτρησης) ο πολφός έρχεται στην υψηλότερη θερμοκρασία την οποία μπορεί να φτάσει, στο σύστημα της γεώτρησης. Μετά την επίτευξη της μέγιστης θερμοκρασίας ο πολφός διάτρησης αρχίζει να ψύχεται και καθώς πλησιάζει την επιφάνεια επειδή συναντά την ψυχρότερο πολφό διάτρηση που επανεισάγεται μέσα στην γεώτρηση από τα διατρητικά στελέχη, και επίσης επειδή οι γεωλογικοί σχηματισμοί είναι ψυχρότεροι σε μικρότερα βάθη. Τελικώς ο πολφός φτάνει στην επιφάνεια θερμότερος από την θερμοκρασία του πολφού που επανεισάγουμε στο σύστημα. Η διαφορά θερμοκρασίας εξαρτάται από το βάθος της γεώτρησης.

Η επίπτωση της θερμοκρασίας στην ρεολογία του πολφού έχει μελετηθεί αλλά κατά κανόνα γίνεται χρήση των ρεολογικών δεδομένων του πολφού στην επιφάνεια και μετασχηματίζονται με την επίδραση της πίεσης και της θερμοκρασίας και στην συνέχεια γίνεται χρήση των ρεολογικών μοντέλων για τον χαρακτηρισμό του πολφού.

Η σχέση η οποία εκφράζει την επίδραση της πίεσης και της θερμοκρασίας στα ρεολογικά χαρακτηριστικά του πολφού είναι η ακόλουθη (Oyeneyin et al., 2009):

$$\tau @ P, T = CF * \tau_s \quad (14)$$

όπου $\tau @ P,T$ είναι η διατμητική τάση (Pa) σε καθορισμένη πίεση και θερμοκρασία.

τ_s είναι η διατμητική τάση (Pa) σε καθορισμένη πίεση (15psi) και θερμοκρασία (60 °F).

CF είναι ο συντελεστής διόρθωσης ο οποίος είναι συνάρτηση της πίεσης και της θερμοκρασίας.

Πίεση.

Καθώς το βάθος της γεώτρησης αυξάνει η πίεση του γεωλογικού σχηματισμού, η οποία εξαρτάται από το είδος του σχηματισμού, έχει το χαρακτηριστικό να αυξάνει. Αυτό μπορεί να επηρεάσει τις ιδιότητες της λάσπης αλλά σε μικρότερο βαθμό από ότι η θερμοκρασία και ουσιαστικά δεν λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς.

5.2.3. Γεωμετρία της γεώτρησης και των μηχανημάτων διάτρησης .

Η γεωμετρία των διατρητικών στελεχών και του δακτυλίου της γεώτρησης, επηρεάζουν τις απώλειες πίεσης κατά την διάρκεια υλοποίησης της γεώτρησης. Για στελέχη γίνεται χρήση των εξισώσεων ροής για σωλήνες ενώ για δακτύλιο γίνεται χρήση της υδραυλικής διαμέτρου d_h :

$$d_h = \frac{4A}{D} = d_2 - d_1 \quad (15)$$

όπου d_1 είναι η εξωτερική διάμετρος των στελεχών ή των σωλήνων, και

d_2 είναι η εσωτερική διάμετρος της γεώτρησης.

Η υδραυλική διάμετρος μεταξύ της γεώτρησης και των στελεχών (drill pipes, drill collars), παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στις απώλειες πίεσης και επηρεάζει την ταχύτητα μεταφοράς του πολφού προς την επιφάνεια της γεώτρησης.

5.2.4. Επίδραση της εκκεντρότητας των διατρητικών στελεχών στην γεώτρηση.

Με την έννοια εκκεντρότητα θέλουμε να περιγράψουμε τον τρόπο με τον οποίο διατρητικά στελέχη είναι διατεταγμένα μέσα στην γεώτρηση και κατά ποσό είναι ομόκεντρα ή όχι. Μια εκτροπή της εκκεντρότητας κατά την διάρκεια της γεώτρησης αποτελεί μια από τις παραμέτρους που επηρεάζουν τις απώλειες πίεσης στον δακτύλιο της γεώτρησης.

Για την περίπτωση ενός έκκεντρου δακτυλίου, οι προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στην ανάπτυξη αρκετών αναλυτικών και περίπλοκων μοντέλων, ώστε να δείξουν τις επιπτώσεις της εκκεντρότητας στην πτώση πίεσης.

Η πτώση πίεσης για έκκεντρο δακτύλιο μπορεί να οριστεί ως συνάρτηση της πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\Delta P / \Delta L_{ecc} = R * \Delta P / \Delta L_{con} \quad (16)$$

όπου $\Delta P / \Delta L$ είναι η πτώση πίεσης στον τομέα εκείνο του δακτυλίου που ορίζεται από το μήκος L και ο συντελεστής R εκφράζει την επίδραση της εκκεντρότητας σε αυτό το τμήμα της γεώτρησης (*Haciislamoglu and Cartalos, 1994*).

5.2.5. Επίδραση της περιστροφής των διατρητικών στελεχών μέσα στην γεώτρηση.

Η διάτρηση με περιστροφή των διατρητικών στελεχών (από την επιφάνεια έως το μέτωπο της διάτρησης), επηρεάζει την πτώση πίεσης ενός ρευστού που κυκλοφορεί μέσα στον δακτύλιο της γεώτρησης, καθώς και μέσα στα διατρητικά στελέχη.

Η ροή του ρευστού μέσα σε ένα κατακόρυφο σωλήνα ο οποίος περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του έχει μια επίδραση στην μέση ταχύτητα του ρευστού που ρέει γύρω και δια μέσω αυτού, και είναι κάτι το οποίο επηρεάζει όλες τις άλλες παραμέτρους, οι οποίες με την σειρά τους επηρεάζονται από την ταχύτητα κυκλοφορίας του ρευστού μέσα σε οποιοδήποτε τμήμα της γεώτρησης. Κάτω από

αυτές τις συνθήκες η κλασσική μέση ταχύτητα του ρευστού αντικαθίσταται από την διανυσματική συνολική ταχύτητα εξαιτίας της επίδρασης της περιστροφής των διατρητικών στελεχών στο ρευστό. Η σχέση η οποία εκφράζει τον συνδυασμό των δύο αυτών ταχυτήτων είναι η ακόλουθη:

$$V_T = \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \quad (17)$$

όπου V_1 είναι η ταχύτητα κυκλοφορίας πολφού εξαιτίας της αντλίας,

V_2 είναι η ταχύτητα που προκαλείται από την περιστροφή των διατρητικών στελεχών.

Κεφάλαιο 6^ο - Υδραυλικό μοντέλο υπολογισμού πίεσης RGU – TUC.

6.1. Εισαγωγή.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια παρουσίαση του σχεδιασμού του υδραυλικού μοντέλου πτώσης πίεσης, για οποιοδήποτε τύπο ρευστού διάτρησης, το οποίο σχεδιάστηκε δίνοντας έμφαση στην διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε ώστε να πάρουμε το τελικό αποτέλεσμα. Θα παρουσιαστούν οι επιμέρους τομείς οι οποίοι συνδυάστηκαν ώστε να υπολογιστούν και να περιληφθούν σε αυτό το μοντέλο, όλα εκείνα τα επιμέρους τμήματα στα οποία δημιουργείται μια πτώση πίεσης ώστε να μπορέσουμε να υπολογίσουμε το σύνολο τους (της πτώσης πίεσης) και να σχεδιάσουμε το προφίλ της πτώσης πίεσης για την γεώτρηση.

Πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι στο κεφάλαιο αυτό, γίνεται και αναφορά στον σχεδιασμό μιας υποενότητας η οποία θα ασχολείται με τον σχεδιασμό και επιλογή των κοπτικών άκρων για οποιαδήποτε περίπτωση διάτρησης (σχεδιασμός διατρητικών στελεχών και κοπτικού άκρου), με βάση την ύπαρξη συγκεκριμένων αντλιών πολφού. Επίσης θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα ροής του υδραυλικού μοντέλου πτώσης πίεσης και τα μεγέθη και δεδομένα που χρησιμοποιούνται για να υπολογίσει η πτώση πίεσης και το προφίλ πίεσης.

Θα περιγράψουν τα βήματα που συνδυάστηκαν για τον σχεδιασμό του υπολογιστικού μοντέλου, και τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης στα επιμέρους τμήματα της γεώτρησης. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από το Robert Gordon University και είναι εμπιστευτικές (Oyeneyin, 2006) . Η διαδικασία όμως που ακολουθήθηκε περιγράφεται παρακάτω.

6.2. Υδραυλικό μοντέλο υπολογισμού πτώσης πίεσης (RGU – TUC).

Σκοπός αυτού του μοντέλου είναι ο καθορισμός του προφίλ της πίεσης, για κάθε τμήμα της γεώτρησης, σε κάθε τμήμα των διατρητικών στελεχών (drill pipes, drill collars, Bit, κτλ) βοηθώντας μας με αυτόν τον τρόπο για τον καλύτερο προσδιορισμό των απωλειών πίεσης σε μια διαδικασία διάτρησης και παρέχοντας μας στοιχεία για τον σχεδιασμό της διαδικασίας της διάτρησης, έχοντας σαν αντικείμενο

την αποτελεσματική διαχείριση του προφίλ της πίεσης, για να επιτύχουμε μείωση του χρόνου διάτρησης και ελαχιστοποίηση του κόστους.

Το υδραυλικό μοντέλο περιλαμβάνει τις επιπτώσεις από την ρεολογία (πυκνότητα, ρεολογικά χαρακτηριστικά) του πολφού διάτρησης, της εκκεντρότητας, της κυκλοφορίας του ρευστού και της περιστροφής των διατρητικών στελεχών στο προφίλ της πίεσης. Οι απώλειες πίεσης κατά την εκτέλεση μια γεώτρησης υπολογίζονται από:

- a) Δp_f η οποία αποτελεί την απώλεια πίεσης λόγω τριβών μέσα στην γεώτρηση, δηλαδή στα στελέχη διάτρησης (drill pipes, drill collars), και στον δακτύλιο της γεώτρησης, λαμβάνοντας υπόψη την ρεολογία του ρευστού διάτρησης, την επίδραση της πίεσης και της θερμοκρασίας, των σχηματισμών στην γεώτρηση και κυρίως στο ρευστό της γεώτρησης, την γεωμετρία των στελεχών και του δακτυλίου, την επίδραση της εκκεντρότητας των στελεχών του γεωτρώπανου μέσα στην γεώτρηση και την επίδραση της περιστροφής των στελεχών του γεωτρώπανου μέσα στην γεώτρηση. Το σύνολο των Δp_f αποτελείται από την απώλεια πίεσης στα διατρητικά στελέχη και στον δακτύλιο της γεώτρησης και εκφράζεται από τον παρακάτω τύπο.

$$\Delta p_f = \Delta p_{f\text{Drillpipe}} + \Delta p_{f\text{Annulus}} \quad (18)$$

- b) $\Delta p_{\text{Surface}}$ η οποία αποτελεί την απώλεια πίεσης από τα μηχανήματα τα οποία βρίσκονται στην επιφάνεια της γεώτρησης και επικουρούν την διαδικασία της διάτρησης (σωληνώσεις), και εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες του πολφού διάτρησης και το μήκος των αγωγών.
- c) $\Delta p_{\text{DrillBit}}$ η οποία αποτελεί την απώλεια πίεσης η οποία επιτυγχάνεται στο κοπτικό άκρο, όταν ο πολφός διάτρησης κινείται μέσω των ακροφυσίων του κοπτικού.

Το σύνολο των παραπάνω πιέσεων αποτελεί την συνολική πίεση της αντλίας, την οποία πρέπει να είναι ικανή η αντλία να αποδώσει για την κυκλοφορία του ρευστού ώστε να επιτευχθεί ο καθαρισμός της γεώτρησης και οι επιθυμητές συνθήκες διάτρησης.

$$\Delta p_{\text{pump}} = \Delta p_{\text{DrillBit}} + \Delta p_{\text{Parasitic losses}} + \Delta p_{\text{Surface}} \quad (19)$$

6.3. Υπολογισμός “παρασιτικών” απωλειών πίεσης στην γεώτρηση.

Βήμα 1^ο

Το υδραυλικό μοντέλο θα λαμβάνει υπόψη του (εξαρχής σχεδιασμός) τα τρία πιο σημαντικά ρεολογικά μοντέλα ρευστών διάτρησης τα οποία είναι Bingham Plastic, Power Law και Herschel-Bulkley και για τα οποία θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα βήματα τα οποία συνθέτουν το υδραυλικό μοντέλο για κάθε τύπο ρευστού. Αφού πρώτα γίνει η κατηγοριοποίηση του ρευστού διάτρησης με βάση τις ρεολογικές μετρήσεις του πολφού διάτρησης, σύμφωνα με τα ρεολογικά μοντέλα τα οποία περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, με τη χρήση ιξωδομέτρων, υπολογίζουμε τα ρεολογικά χαρακτηριστικά που αποτελούν τις σημαντικότερους παραμέτρους του ρευστού (ήτοι το τ_o , n , K , μ_p) που είναι για το γενικευμένο μοντέλο Herschel-Bulkley. Παρόλο που οι παραπάνω συντελεστές αποτελούν χαρακτηριστικά για τα Herschel-Bulkley υπολογίζονται και για τα Bingham Plastic και Power Law ρευστά. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι ότι οι συντελεστές αυτοί χρησιμοποιούνται για τις διαφορές προσεγγίσεις και παραδοχές τις οποίες χρησιμοποιεί το μοντέλο RGU – TUC (Oyeneyin, 2006). Σε περίπτωση υψηλών θερμοκρασιών υπολογίζουμε την επίδραση της θερμοκρασίας και της πίεσης στην διατμητική τάση (τ) δημιουργώντας καινούριο ρεόγραμμα και υπολογίζουμε ξανά τις νέες ρεολογικές παραμέτρους για το ρευστό μας.

Βήμα 2^ο

Σε αυτό το βήμα υπολογίζουμε την ταχύτητα κυκλοφορίας του πολφού διάτρησης, για την δεδομένη παροχή, μέσα στα διατρητικά στελέχη και στον δακτύλιο της γεώτρησης, και είναι συνάρτηση της γεωμετρίας των στελεχών διάτρησης και της γεώτρησης.

Εάν τα διατρητικά στελέχη περιστρέφονται, στην ταχύτητα κυκλοφορίας του ρευστού, λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της περιστροφής και μετατρέπει την ταχύτητα του πολφού σε γραμμική ταχύτητα όπως αναφέρθηκε στο 5^ο Κεφάλαιο.

Βήμα 3^ο

Σε αυτό το βήμα θα καθορίσουμε τα κριτήρια για την επιλογή του είδους της ροής του ρευστού, ανάμεσα σε στρωτή ροή και τυρβώδη ροή, για τον πολφού διάτρησης, όταν κυκλοφορεί μέσα στα διατρητικά στελέχη και στον δακτύλιο της γεώτρησης.

Για τον καθορισμό του είδους της ροής του πολφού διάτρησης, θα εισάγουμε μια νέα παράμετρο την κρίσιμη ταχύτητα V_c η οποία καθορίζει τα όρια μεταξύ της στρωτής και τυρβώδης ροής του ρευστού. Επομένως εάν η ταχύτητα κυκλοφορίας του ρευστού γεώτρησης η οποία υπολογίστηκε στο 4^ο βήμα, είναι μικρότερη από την κρίσιμη ταχύτητα V_c η ροή είναι στρωτή, ενώ αν είναι μεγαλύτερη, είναι τυρβώδης. Η κρίσιμη ταχύτητα V_c εξαρτάται από τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του πολφού διάτρησης και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διατρητικών στελεχών και του δακτυλίου.

Το συγκεκριμένο μοντέλο δεν χρησιμοποιεί τον αριθμό Reynolds (Re) για τον καθορισμό τους είδους της ροής του ρευστού μας, και της μετάβασης της από την στρωτή ροή στην τυρβώδη, αλλά την κρίσιμη ταχύτητα V_c η οποία θα προσδιορίσει με περισσότερη ακρίβεια το είδος της ροής του πολφού.

Βήμα 4^ο

Σε αυτό το βήμα θα υπολογίσουμε τον αριθμό Reynolds (Re). Στην μηχανική των ρευστών, ο αριθμός Reynolds (Re) εκφράζει την αναλογία μεταξύ των αδρανειακών δυνάμεων με τις δυνάμεις ιξώδους και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των διαφορετικών ειδών ροής ενός ρευστού, όπως η στρωτή και τυρβώδης ροή.

Είναι ένας από τους πιο σημαντικούς αδιάστατους αριθμούς στην μηχανική ρευστών και χρησιμοποιείται συνήθως για να παρέχει ένα κριτήριο για τον καθορισμό της δυναμικής ομοιότητας της ροής των ρευστών.

Για την ροή ενός ρευστού μέσα σε σωλήνες για παράδειγμα, το χαρακτηριστικό μήκος είναι η διάμετρος του σωλήνα, εάν αυτός είναι κυκλικός, ή η υδραυλική διάμετρος εάν αναφερόμαστε σε μη κυκλικό τομέα (δακτύλιος). Στρωτή ροή λαμβάνει χώρα για μικρούς αριθμούς Reynolds (Re) ($Re < 2100$), όπου οι

δυνάμεις του ιξώδους επικρατούν, ενώ τυρβώδης ροή λαμβάνει χώρα σε μεγάλους αριθμούς Reynolds (Re) ($Re > 3000$), και επικρατούν οι αδρανειακές δυνάμεις, οι οποίες παράγουν τυχαίες και ακανόνιστες δίνες.

Η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή, καθορίζεται συνήθως από έναν κρίσιμο αριθμό Reynolds ($Re_{critical}$). Μέσα σε ένα συγκεκριμένο εύρος γύρω από αυτό το όριο, υπάρχει μια περιοχή βαθμιαίας μετάβασης, όπου η ροή δεν είναι ούτε πλήρως στρωτή ούτε πλήρως τυρβώδης, και οι προβλέψεις για την συμπεριφορά του ρευστού σε αυτή την περιοχή μπορεί να εμφανίζουν δυσκολίες. Ο αριθμός Reynolds (Re) θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του συντελεστή τριβής (f) ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί στις εξισώσεις υπολογισμού της πτώσης πίεσης.

Βήμα 5^ο

Σε αυτό το βήμα θα υπολογίσουμε τον συντελεστή τριβής (f) που είναι αδιάστατος αριθμός και καθορίζεται από τον αριθμό Reynolds (Re) και την τραχύτητα του αγωγού που όμως δεν λαμβάνεται υπόψη στην βιομηχανία των γεωτρήσεων.

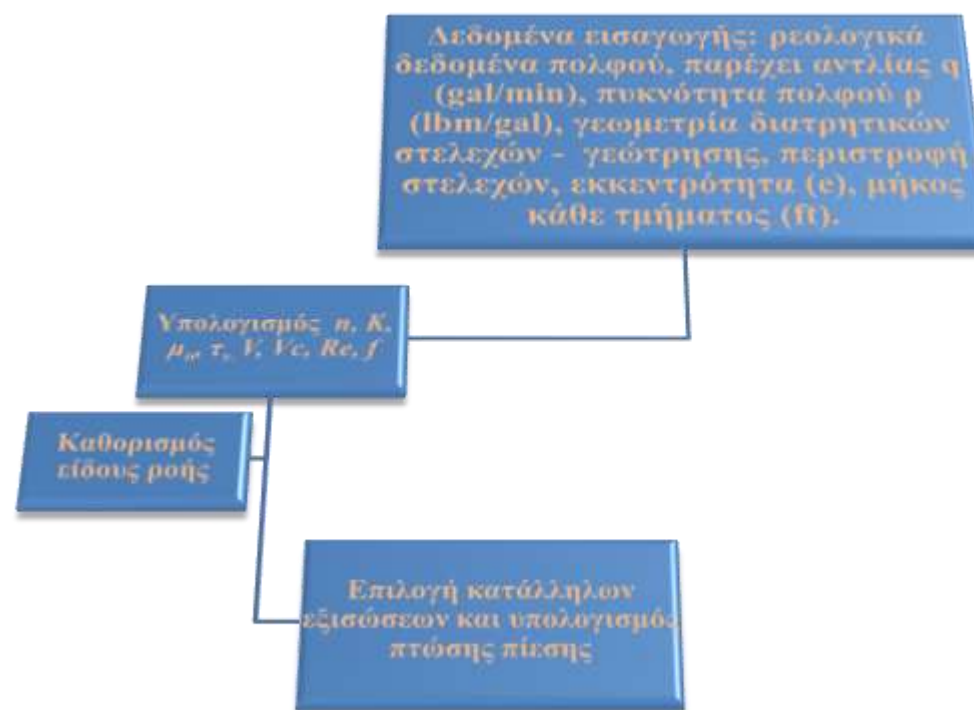
Βήμα 6^ο

Στο βήμα αυτό θα υπολογίσουμε την πτώση πίεσης για κάθε τμήμα της γεώτρησης ξεχωριστά λαμβάνοντας υπόψη όλες τις προαναφερθείσες συνθήκες για κάθε περίπτωση.

Στην συνέχεια, και εφόσον έχει υπολογιστεί η πτώση πίεσης για δακτύλιο και στελέχη για κάθε τμήμα της γεώτρησης θα συμπεριλάβουμε και τις επιπτώσεις στην πτώση πίεσης από την εκκεντρότητα των στελεχών, όπως αναφέρθηκε στο 2^ο Κεφάλαιο. Εφόσον πραγματοποιηθεί και αυτός ο μετασχηματισμός στην πτώση πίεσης, στην συνέχεια προσθέτουμε τις επιμέρους πτώσεις πίεσης και υπολογίζουμε τις συνολικές Δp_f .

Στην επομένη σελίδα στο Διάγραμμα Ροής του μοντέλου RGU – TUC παρουσιάζονται τα στοιχειά εισαγωγής που χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό των παραμέτρων που θα οδηγήσουν στον υπολογισμό της πτώσης πίεσης ανάλογα με το είδος της ροής που επικρατεί στα διατρητικά τέλεση και στον δακτύλιο της γεώτρησης.

6.4. Διάγραμμα ροής υδραυλικού μοντέλου.



Διάγραμμα ροής 6.1: Διάγραμμα ροής μοντέλου RGU – TUC (Dalamarinis, 2007).

6.5. Πτώση πίεσης στις επιφανειακές εγκαταστάσεις.

Η πτώση πίεσης η οποία δημιουργείται στα επιφανειακά μηχανήματα εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες του πολφού διάτρησης και από το είδος αυτών των μηχανημάτων και το μήκος των επιφανειακών σωληνώσεων.

6.6. Πτώση πίεσης στο κοπτικό άκρο.

Η πτώση πίεσης η οποία δημιουργείται στο κοπτικό άκρο εξαρτάται από το μέγεθος των ακροφυσίων του, μέσα από τα οποία διέρχεται ο πολφός διάτρησης για τον καθαρισμό της γεώτρησης και την ψύξη του κοπτικού, καθώς επίσης και από την ταχύτητα κυκλοφορίας του ρευστού στο σύστημα της γεώτρησης. Αγνοείται η ρεολογία του ρευστού λόγω των πολύ υψηλών ταχυτήτων που αναπτύσσονται στα ακροφύσια του κοπτικού άκρου.

6.7. Βελτιστοποίηση επιλογής κοπτικού άκρου.

Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους σκοπός αυτή της εργασίας ήταν ο σχεδιασμός και υλοποίηση ενός υδραυλικού μοντέλου το οποίο θα υπολογίζει την πτώση πίεσης για κάθε τμήμα μιας γεώτρησης κατά την διάρκεια εκτέλεσης της, λαμβάνοντας υπόψη όλες εκείνες τις παραμέτρους οι οποίες την επηρεάζουν κατά την διάρκεια αυτής της διαδικασίας. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ενός προγράμματος υπολογισμού της πτώσης πίεσης στα διατρητικά στελέχη, στον δακτύλιο της γεώτρησης, στο κοπτικό άκρο και στα επιφανειακά μηχανήματα για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας του γεωτρήπανου κατά την διαδικασία της διάτρησης.

Σε αυτή την παράγραφο θα πάμε ένα βήμα παραπέρα και θα παρουσιάσουμε την μέθοδο η οποία χρησιμοποιήθηκε για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του κοπτικού άκρου και των ακροφυσίων του, ώστε να είμαστε σε θέση να επιτύχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα στην διαχείριση της πίεσης, επιλέγοντας με αυτόν τον τρόπο τους κατάλληλους τύπους αντλιών πολφού για την εκτέλεση, όσο πιο αποτελεσματικά και οικονομικά, γίνεται της γεώτρησης μέσω της ιδανικής

κυκλοφορίας του πολφού διάτρησης (ικανοποιητικός καθαρισμός της γεώτρησης με όσο το δυνατόν μικρότερη κυκλοφορία ρευστού) στα διατρητικά στελέχη και στον δακτύλιο της γεώτρησης.

Σύμφωνα με την μέγιστη ικανότητα των αντλιών πολφού που είναι διαθέσιμες γίνεται η κατάλληλη επιλογή των ακροφυσίων του κοπτικού, ώστε η συνολική πτώση πίεσης

$$\Delta p_{pump} = \Delta p_{DrillBit} + \Delta p_{ParasiticLosses} + \Delta p_{Surface} \quad (20)$$

να μην υπερβαίνει αυτή της αντλίας. Μέσω αυτής της παραδοχής υπολογίζονται οι επιθυμητές παροχές του ρευστού για κάθε τμήμα της γεώτρησης (διατρητικά στελέχη και δακτύλιος) δίνοντας μας την δυνατότητα του καθορισμού τόσο του αριθμού όσο και του μεγέθους των ακροφυσίων του κοπτικού άκρου για τον σχεδιασμό της γεώτρησης.

Κεφάλαιο 7^ο - Μοντέλο υπολογισμού πτώσης πίεσης τεχνικής Mud Cap.

7.1. Εισαγωγή.

Στο 7^ο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί ίσως το πιο σημαντικό τμήμα αυτής της εργασίας, το οποίο ήταν ο συνδυασμός του μοντέλου που περιγράφηκε και σχεδιάστηκε στα προηγούμενα κεφαλαία με μια από τις μεθόδους Managed Pressure Drilling (MPD), που για την περίπτωση μας θα είναι η τεχνική Mud Cap, σε συνδυασμό με μια νέα εφαρμοζόμενη τεχνική η οποία ονομάζεται Casing Drilling, καθώς και η αυτόνομη μελέτη της τεχνικής Mud Cap.

Θα παρουσιαστούν οι περαιτέρω προκλήσεις που εμφανίστηκαν από τον συνδυασμό αυτών των τεχνικών καθώς και θα γίνει παρουσίαση αποτελεσμάτων τα οποία προέκυψαν από το μοντέλο και θα αφορούν την επίπτωση του Mud Cap στο Casing Drilling και τι συμπεράσματα προκύπτουν από αυτά.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι τα δεδομένα καθώς και το μοντέλο το οποίο περιγράφεται, και τα οποία θα παρουσιαστούν, έχουν επιβεβαιωθεί, ως προς την σωστή λειτουργία τους από τα υπολογιστικά μοντέλα, εμπορικά και υπό ανάπτυξη μοντέλα σχεδιασμού γεωτρήσεων πετρελαίου και φυσικού αερίου με χρήση Managed Pressure Drilling (MPD) τεχνικών που έχει σχεδιάσει και επιμεληθεί ο επιβλέπων καθηγητής αυτής της εργασίας Καθηγητής Babs Oyenein του School of Engineering του Robert Gordon University της Σκωτίας, δημιουργός του Virtual Well (Oyenein et al., 2007).

7.2. Διάτρηση με την τεχνική Mud Cap.

Όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια στην αρχή αυτής της εργασίας, η μεγαλύτερη πρόκληση κατά την διάρκεια εκτέλεσης μιας γεώτρησης πετρελαίου η φυσικού αερίου, είναι η επίτευξη αποτελεσματικής διαχείρισης της πίεσης και του προφίλ της στην γεώτρηση, ώστε να αποφευχθούν ορισμένα προβλήματα κατά την διάρκεια εκτέλεσης της διάτρησης, όπως είναι το "κόλλημα" και απώλεια των διατρητικών στελεχών, τα kicks, η απώλεια κυκλοφορίας ρευστού διάτρησης (mud losses) και η πρόκληση ζημιάς στις παραγωγικές ζώνες του ταμιευτήρα από την εισχώρηση πολφού διάτρησης σε αυτές (formation damage).

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του χρόνου διάτρησης για ένα έργο, με ταυτόχρονη μείωση του κόστους του, απόρροια της αποφυγής των προαναφερθέντων προβλημάτων.

Η τεχνική διάτρησης Mud Cap Drilling είναι μια κατηγορία της Managed Pressure Drilling (MPD) μεθόδου, στην οποία κύριος σκοπός είναι η δημιουργία μέσα στον δακτύλιο της γεώτρησης ενός καπέλου πολφού πάνω από τον πολφό διάτρησης, κάτι το οποίο βοηθάει στην επίτευξη αποτελεσματικότερης διαχείρισης της πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης, καθώς επίσης και σε κάθε βάθος ενδιαφέροντος, να διατηρείται η πίεση σταθερή στο επιθυμητό επίπεδο σε αυτά τα σημεία με διαφορετικές τεχνικές διάτρησης (Balanced, Over balanced, Under balanced).

Στην τεχνική Mud Cap εισάγεται ένα δεύτερο ρευστό διάτρησης στον δακτύλιο, διαφορετικών ρεολογικών ιδιοτήτων (μεγαλύτερη πυκνότητα, διαφορετικά ρεολογικά χαρακτηριστικά) από τον κανονικό πολφό της γεώτρησης. Η εισαγωγή αυτού του ρευστού γίνεται σε ένα προκαθορισμένο βάθος, και το οποίο εξαρτάται από το προφίλ της πίεσης το οποίο θέλουμε να δημιουργήσουμε μέσα στον δακτύλιο της γεώτρησης. Σκοπός αυτού του δεύτερου ρευστού είναι να πιέσει το πρώτου ρευστό μέσα στον δακτύλιο της γεώτρησης και να επιτευχθεί η κατάλληλη πίεση.

Η παραπάνω διαδικασία έχει σαν αποτέλεσμα την ανάμειξη αυτών των δύο ρευστών με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός τρίτου πολφού διαφορετικών ρεολογικών ιδιοτήτων και πυκνότητας από τα δύο προηγούμενα ρευστά (Σχήμα 7.1).

Για την ανάλυση της τεχνικής Mud Cap και των συνθηκών οι οποίες δημιουργούνται μέσα στον δακτύλιο της γεώτρησης, χρησιμοποιείται η αναλογία του U-TUBE και η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.2.

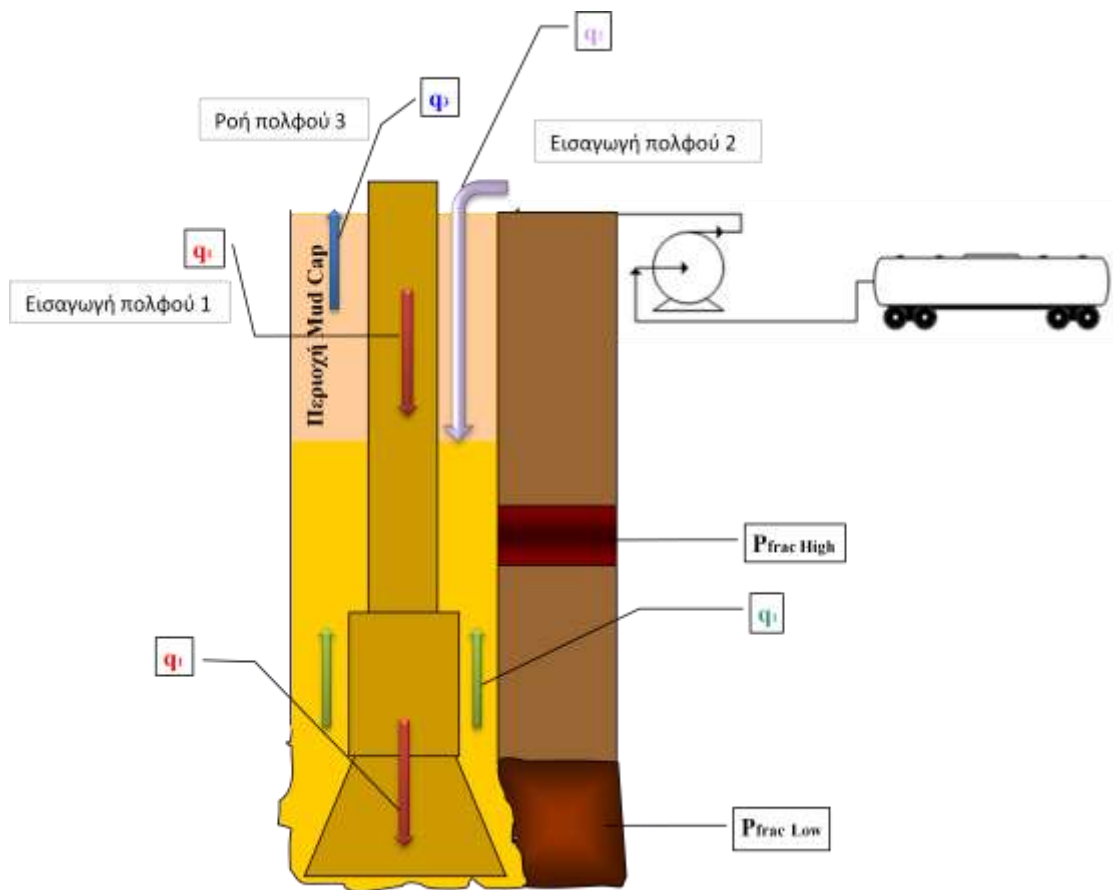
Όπου P_1 είναι πίεση πυθμένα στον δακτύλιο της γεώτρησης ,

P_2 είναι πίεση πυθμένα μέσα στα διατρητικά στελέχη,

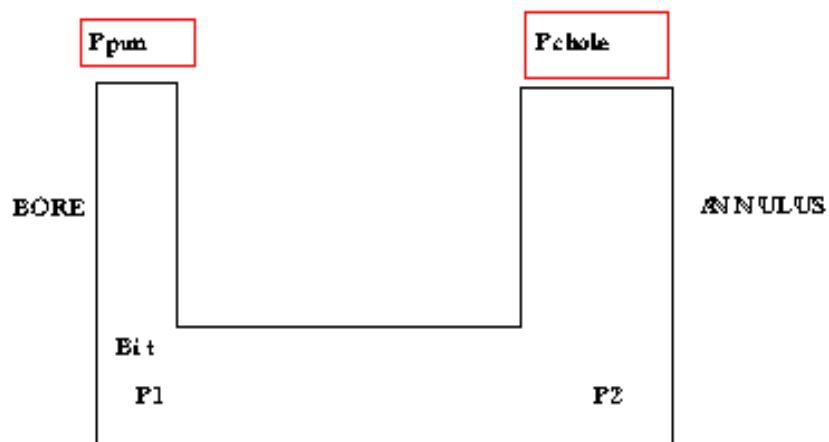
και η σχέση που συνδέει P_1 και P_2 είναι:

$$P_1 = P_2 = BHP \quad (21)$$

και BHP είναι η πίεση πυθμένα (Bottom hole pressure).



Σχήμα 7.1: Τεχνική Mud Cap (Dalamarinis, 2007).



Σχήμα 7.2: Παράσταση γεώτρησης ως U-TUBE.

7.3. Μοντέλο υπολογισμού πτώσης πίεσης με χρήση της τεχνικής Mud Cap.

Βασικό μέλημα στον σχεδιασμό αυτού του μοντέλου ήταν ο υπολογισμός της πτώσης πίεσης στον δακτύλιο της γεώτρησης για οποιοδήποτε βάθος απαιτηθεί. Όπως περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφαλαία το προφίλ της πίεσης και η πτώση πίεσης για οποιοδήποτε τμήμα της γεώτρησης (στο κομμάτι του δακτυλίου) θα είναι το σύνολο των παρασιτικής πτώσης πίεσης, και της υδροστατικής πίεσης που προέρχεται από τα ρευστά μέσα στον δακτύλιο της γεώτρησης (ρευστό Mud Cap, και αρχικό ρευστό διάτρησης).

Στην περιοχή του Mud Cap οι συνθήκες οι οποίες επικρατούν διαφέρουν από αυτές που επικρατούν στο υπόλοιπο τμήμα του δακτυλίου της γεώτρησης. Η ρεολογία του ρευστού σε αυτό το τμήμα γίνεται περισσότερο πολύπλοκη, εξαιτίας της ανάμιξης δύο διαφορετικών ρευστών (ρεολογία και πυκνότητα). Για τον προσδιορισμό της ρεολογίας του ρευστού γίνεται η παραδοχή ότι οι καινούριες ιδιότητες του (ρεολογικά χαρακτηριστικά, πυκνότητα) αποτελούν συνδυασμό των ιδιοτήτων των ρευστών που αναμιγνύονται και ο βαθμός που επηρεάζει τις παραμέτρους αυτές κάθε ρευστό εξαρτάται από την τιμή της παροχής του (Oyeneyin, 2007).

$$\rho_{MudCap} = f(q_1, q_2, \rho_1, \rho_2) \quad (22)$$

$$\tau_{MudCap} = f(q_1, q_2, \tau_1, \tau_2) \quad (23)$$

Όπου : ρ_{MudCap} είναι η πυκνότητα πολφού Mud Cap,

τ_{MudCap} είναι η διατμητική τάση πολφού Mud Cap,

ρ_1 είναι η πυκνότητα πολφού που εισάγεται διαμέσω των στελεχών ,

ρ_2 είναι η πυκνότητα πολφού που εισάγεται στην περιοχή του δακτυλίου,

q_1 είναι η παροχή πολφού που εισάγεται διαμέσω των στελεχών ,

q_2 είναι η παροχή πολφού που εισάγεται στην περιοχή του δακτυλίου,

τ_1 είναι η διατμητική τάση πολφού που εισάγεται διαμέσω των στελεχών,

τ_2 είναι η διατμητική τάση πολφού που εισάγεται στην περιοχή του

δακτυλίου.

Για την περιοχή του Mud Cap όσο αφορά την κυκλοφορία του ρευστού θεωρούμε ότι εκφράζεται από την διαφορά των παροχών $q_1 - q_2$ (Σχήμα 7.2), δηλαδή την “καθαρή παροχή” (net flow) και αυτή η θεώρηση γίνεται για δύο λόγους:

- i. Θεωρείται ότι λόγω της σύγκρουσης των δύο ρευστών με αντίθετες κατευθύνσεις το είδος της ροής που δημιουργείται δεν μπορεί να προσομοιάσει ροή από κάποιο μοντέλο και για αυτόν τον λόγο στους υπολογισμούς των απωλειών πίεσης στον δακτύλιο για την όλη την περιοχή του Mud Cap χρησιμοποιούμε την παροχή $q_3 = q_1 - q_2$ (Oyeneyin 2006).
- ii. Στην συνήθη τεχνική Mud Cap ένα μέρος του πολφού προωθείται μέσα σε μια περιοχή των σχηματισμών στους οποίους γίνεται η διάτρηση και η υπόλοιπη ποσότητα του πολφού οδηγείται προς την επιφάνεια. Η ποσότητα του πολφού που οδηγείται προς την επιφάνεια είναι η

$$q_3 = q_1 - q_2 \quad (24).$$

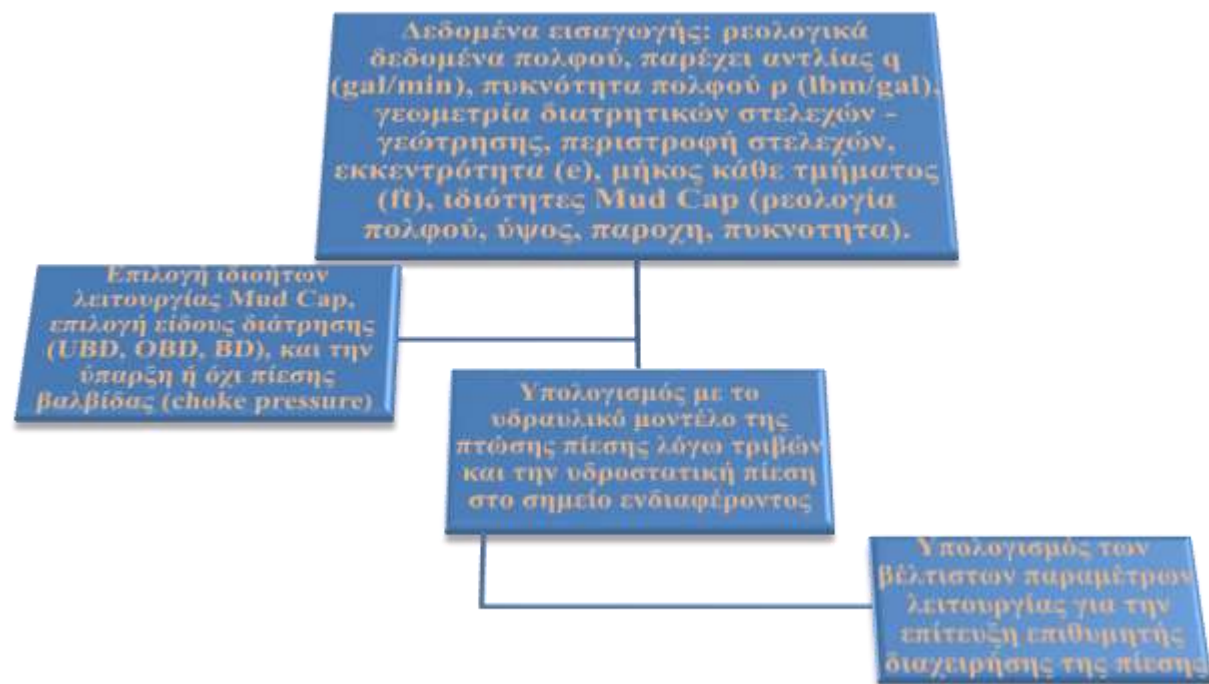
Όπου q_1 είναι η παροχή εισόδου 1^{ου} ρευστού που εισάγεται διαμέσω των στελεχών,

q_2 είναι η παροχή εισόδου 2^{ου} ρευστού που εισάγεται στο κατώτατο τμήμα όριο του Mud Cap που εισάγεται στον δακτύλιο της γεώτρησης,

q_3 είναι η παροχή εξόδου 3^{ου} ρευστού στο τμήμα του Mud Cap.

Συμφώνα με αυτές τις θεωρήσεις σχεδιάστηκε το μοντέλο Mud Cap. Η προσέγγιση αυτή η οποία περιγράφηκε, προτάθηκε από τον καθηγητή Oyeneyin, για τον σχεδιασμό του μοντέλου, καθώς σύμφωνα με εκτιμήσεις και αναλύσεις του Well Design Lab του τμήματος Mechanical Engineering του Robert Gordon University προσομοιάζει καλύτερα από άλλες προσεγγίσεις την πραγματική κατάσταση διάτρησης με την τεχνική Mud Cap. Εφόσον προσδιορισθούν οι ρεολογικές ιδιότητες του, και η συμπεριφορά της ροής του πολφού που προκύπτει από την ανάμειξη των δύο πολφών για το τμήμα του Mud Cap επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός της πτώσης πίεσης της μέσα στον δακτύλιο της γεώτρησης, χρησιμοποιώντας τα βήματα τα οποία περιγράφηκαν στο 6^ο Κεφάλαιο. Στην συνέχεια παρουσιάζεται το Διάγραμμα Ροής του μοντέλου Mud Cap όπου περιγράφονται τα βήματα λειτουργίας του για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης και την επιθυμητή διαχείρισή της.

7.4. Διάγραμμα ροής υδραυλικού μοντέλου με την τεχνική Mud Cap.



Διάγραμμα ροής 7.1: Διάγραμμα Ροής μοντέλου RGU – TUC με την τεχνική Mud Cap (Dalarinis, 2007).

7.5. Τεχνική Casing Drilling.

Η τεχνική Casing Drilling είναι μια μέθοδος η οποία αναπτύχθηκε τα τελευταία χρόνια και διαφέρει ως προς τις άλλες συμβατικές μεθόδους στο ότι η διάτρηση και η σωλήνωση της γεώτρησης γίνονται ταυτόχρονα.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να εισάγονται καινούρια δεδομένα όσον αφορά τις μεθόδους εκτέλεσης μια γεώτρησης αφού μπορεί να μειώσει τον χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση μια γεώτρησης έως και 40% σε συνδυασμό με μια αύξηση του κόστους έως 70% σε σχέση με τις χρησιμοποιούμενες μέχρι σήμερα μεθόδους διάτρησης. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι ότι επιτρέπει την εκμετάλλευση κοιτασμάτων τα οποία παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα όπως αυτά τα οποία καλούνται να λύσουν οι τεχνικές Managed Pressure Drilling (MPD).

Όμως όπως και όλες οι άλλες οι μέθοδοι διάτρησης έτσι και αυτή παρουσιάζει κάποια μειονεκτήματα. Το μεγαλύτερο από αυτά είναι ότι λόγω της ταυτόχρονης εισαγωγής και της σωλήνωσης της γεώτρησης ο δακτύλιος που δημιουργείται μεταξύ των πετρωμάτων και της σωλήνωσης έχει πολύ μικρή υδραυλική διάμετρο. Αυτή η μικρή υδραυλική διάμετρος έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία υψηλών απωλειών πίεσης κατά την κυκλοφορία του πολφού διάτρησης από τον δακτύλιο της γεώτρησης λόγω της πολύς μεγάλης του ταχύτητας με κίνδυνο την ρωγμάτωση των πετρωμάτων. Έτσι η πρόκληση είναι να μπορέσουμε να σχεδιάσουμε την ελάχιστη ταχύτητα κυκλοφορίας του ρευστού μας, μέσα στην γεώτρηση, ώστε να επιτυγχάνουμε καλό καθαρισμό με όσο το δυνατόν λιγότερες απώλειες πίεσης.

7.6. Συνδυασμός της τεχνικής Mud Cap με αυτή του Casing Drilling.

Μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις κατά την διάρκεια εκτέλεσης μιας γεώτρησης πετρελαίου ή φυσικού αερίου, είναι η επίτευξη καλού καθορισμού της γεώτρησης από τα κομμάτια του πετρώματος που σπάει το κοπτικό άκρο, σε συνδυασμό με όσο το δυνατόν λιγότερη απαιτούμενη ενέργεια, και όλα αυτά με την προϋπόθεση ότι το προφίλ της πίεσης θα κυμαίνεται μέσα σε επιθυμητά όρια, ώστε

να αποφευχθούν τα kicks και τα formation damage, σε οποιοδήποτε σημείο της γεώτρησης.

Σκοπός αυτής παραγράφου είναι να μελετήσει την επίδραση του Mud Cap όταν χρησιμοποιώ ταυτόχρονα και την τεχνική Casing Drilling. Εξαιτίας της πολύ μικρής υδραυλικής διαμέτρου μεταξύ της σωλήνωσης και των τοιχωμάτων της γεώτρησης, που δημιουργείται όταν χρησιμοποιώ την τεχνική Casing Drilling. Αυτό έχει σαν επακόλουθο την δημιουργία ενός πολύ υψηλού προφίλ πίεσης, κάτι το οποίο για να το αποφύγουμε είμαστε αναγκασμένοι να προχωρήσουμε στην μείωση της κυκλοφορίας του ρευστού διάτρησης, μεταξύ της σωλήνωσης και των πετρωμάτων σε τέτοιο βαθμό ώστε να έχουμε την ελάχιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα, για την αποτελεσματική απομάκρυνση των σωματιδίων των πετρωμάτων. Ο καθαρισμός της γεώτρησης είναι από τα πιο βασικά πράγματα κατά την εκτέλεση μιας γεώτρησης και για αυτό τον λόγο η παροχή του ρευστού διάτρησης στην γεώτρηση θα πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή για να επιτυγχάνεται ο καθαρισμός.

Για αυτόν τον σκοπό στο μοντέλο δημιουργήθηκε ένα ακόμα τμήμα το οποίο υπολογίζει την ελάχιστη δυνατή ταχύτητα του ρευστού (σε κάθε τμήμα της γεώτρησης και σύμφωνα με αυτά τα όρια προχωρώ στον υδραυλικό σχεδιασμό ώστε να επιτυγχάνεται η ελάχιστη πτώση πίεσης) ώστε να επιτυγχάνεται αποτελεσματικός καθαρισμός της γεώτρησης. Ο καθαρισμός εξαρτάται από τις ιδιότητες του πετρώματος αφού θα πρέπει η ταχύτητα του ρευστού διάτρησης να είναι ίση ή μεγαλύτερη από την v_{slip} (slip velocity), η οποία εξαρτάται από τις ιδιότητες των σωματιδίων (drill cuts). Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της εφαρμογής του Mud Cap όταν εκτελώ διάτρηση με Casing Drilling, και τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζει το ύψος του Mud Cap μέσα στην γεώτρηση, το προφίλ της πτώσης πίεσης, σε σύγκριση με την απλή Casing Drilling τεχνική. Τα αποτελέσματα τα οποία θα παρουσιαστούν αφορούν τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις.

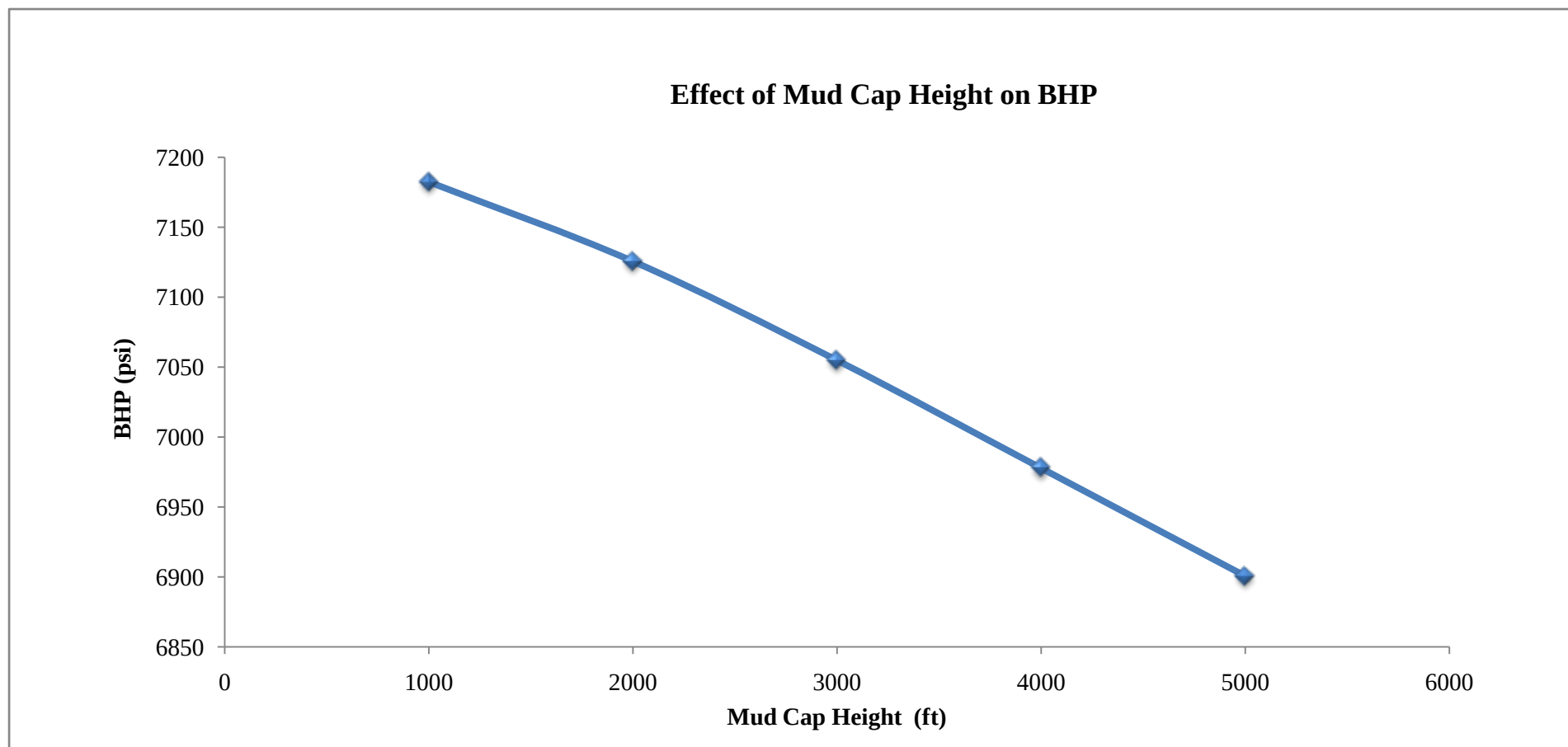
- i. 12 ¼ ίντσες (31.115 cm) διάμετρος γεώτρησης με 10 ¾ (27.305 cm) & 11 ¾ ίντσες (29.845 cm) σωλήνωση.
- ii. 8 ½ ίντσες (21.59 cm) διάμετρος γεώτρησης με 7 (17.78 cm) & 7 ⅝ ίντσες (19.3675 cm) σωλήνωση.

7.7. Αποτελέσματα Casing Mud Cap.

12.25 in Hole with 11.75 in Casing

Height of Mud Cap (ft)	Mud Density ρ_1 (lbm/gal)	Mud Density ρ_2 (lbm/gal)	q_1 (gal/min)	q_3 (gal/min)	q_2 (gal/min)	Eccentricity	RPM	BHP (psi)
1000	9	12	60	25	35	0	0	7182.35
2000	9	12	60	25	35	0	0	7125.58
3000	9	12	60	25	35	0	0	7054.80
4000	9	12	60	25	35	0	0	6977.70
5000	9	12	60	25	35	0	0	6900.60

Πίνακας 7.1: 12.25 in Hole with 11.75 in Casing (Dalarinis 2007).



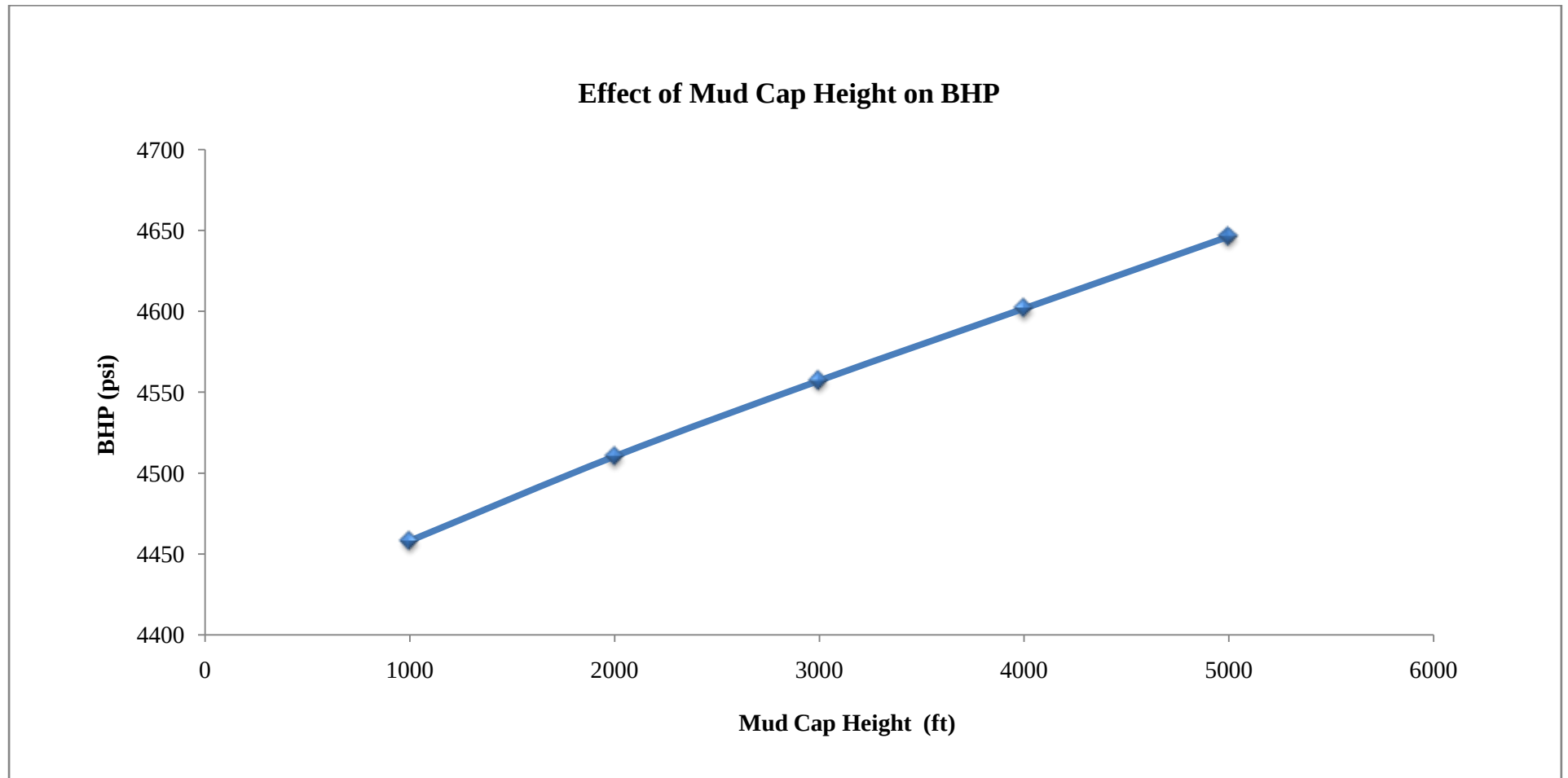
Διάγραμμα 7.1: 12.25 in Hole with 11.75 in Casing (Dalarinis, 2007).

Στο Διάγραμμα 7.1 γίνεται αντιληπτό ότι η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης μειώνεται εξαιτίας της αύξησης του ύψους του Mud Cap μέσα στον δακτύλιο της γεώτρησης. Αυτό οφείλεται στις συνθήκες ροής οι οποίες επικρατούν μέσα στην περιοχή του Mud Cap και παρότι αυξάνουμε την πυκνότητα του πολφού και συνεπώς την υδροστατική του πίεση, η BHP της γεώτρησης μειώνεται.

12.25 in Hole with 10.75 in Casing

Height of Mud Cap (ft)	Mud Density ρ_1 (lbm/gal)	Mud Density ρ_2 (lbm/gal)	q_1 (gal/min)	q_3 (gal/min)	q_2 (gal/min)	Eccentricity	RPM	BHP (psi)
1000	9	12	100	50	50	0	0	4458.00
2000	9	12	100	50	50	0	0	4510.20
3000	9	12	100	50	50	0	0	4557.10
4000	9	12	100	50	50	0	0	4601.66
5000	9	12	100	50	50	0	0	4646.20

Πίνακας 7.2: 12.25 in Hole with 10.75 in Casing (Dalarinis, 2007)



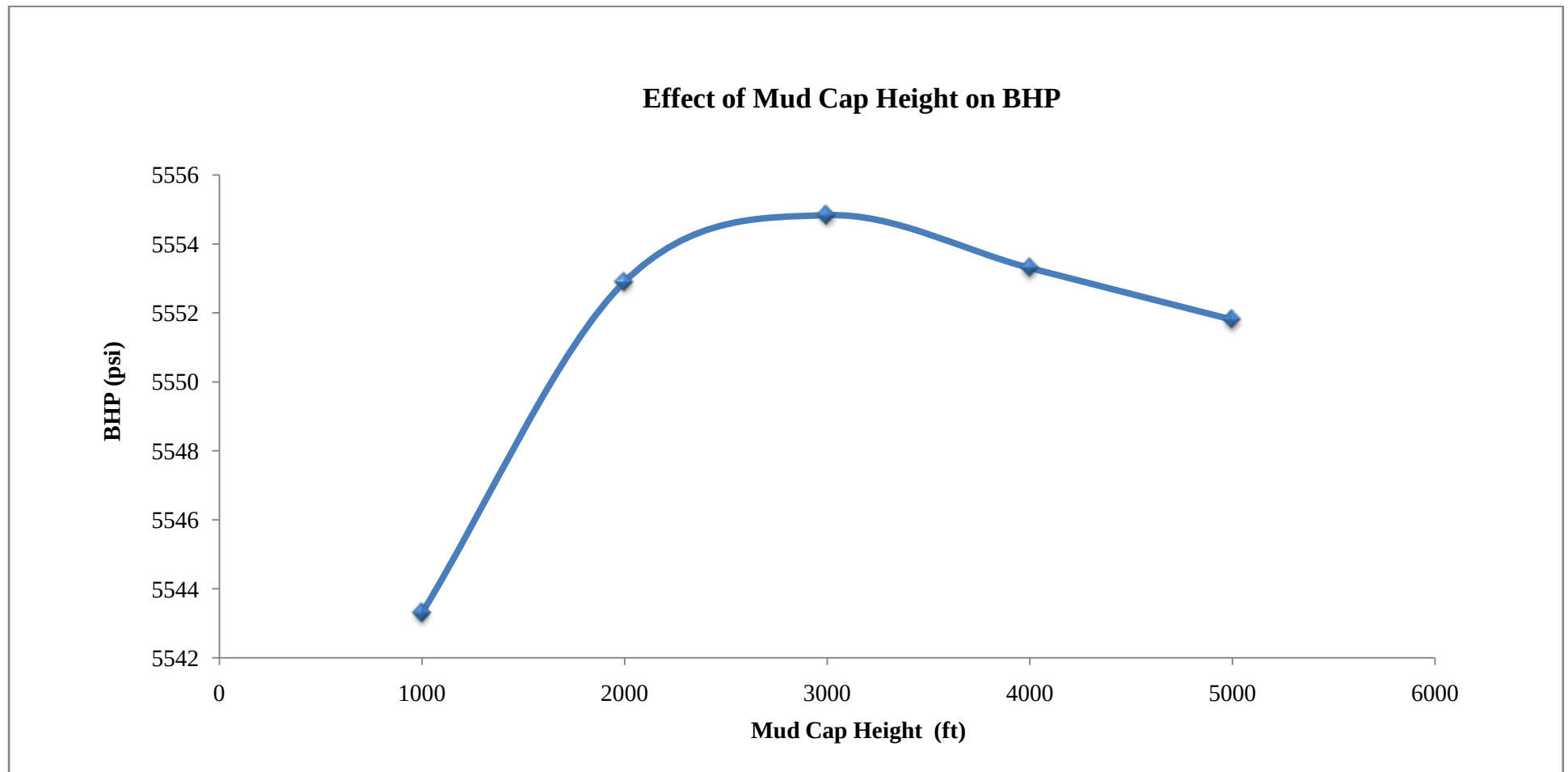
Διάγραμμα 7.2: 12.25 in Hole with 10.75 in Casing (Dalamarinis, 2007).

Στο Διάγραμμα 7.2 γίνεται αντιληπτό ότι η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης αυξάνεται εξαιτίας της αύξησης του ύψους του Mud Cap μέσα στον δακτύλιο της γεώτρησης. Αυτό οφείλεται στο ότι αυξάνουμε την πυκνότητα του πολφού και συνεπώς την υδροστατική του πίεση, η BHP της γεώτρησης αυξάνεται.

8.5 in Hole with 7.625 in Casing

Height of Mud Cap (ft)	Mud Density ρ_1 (lbm/gal)	Mud Density ρ_2 (lbm/gal)	q_1 (gal/min)	q_3 (gal/min)	q_2 (gal/min)	Eccentricity	RPM	BHP (psi)
1000	9	12	100	50	50	0	0	5543.30
2000	9	12	100	50	50	0	0	5552.90
3000	9	12	100	50	50	0	0	5554.83
4000	9	12	100	50	50	0	0	5553.30
5000	9	12	100	50	50	0	0	5551.80

Πίνακας 7.3: 8.5 in Hole with 7.625 in Casing (Dalarinis, 2007).



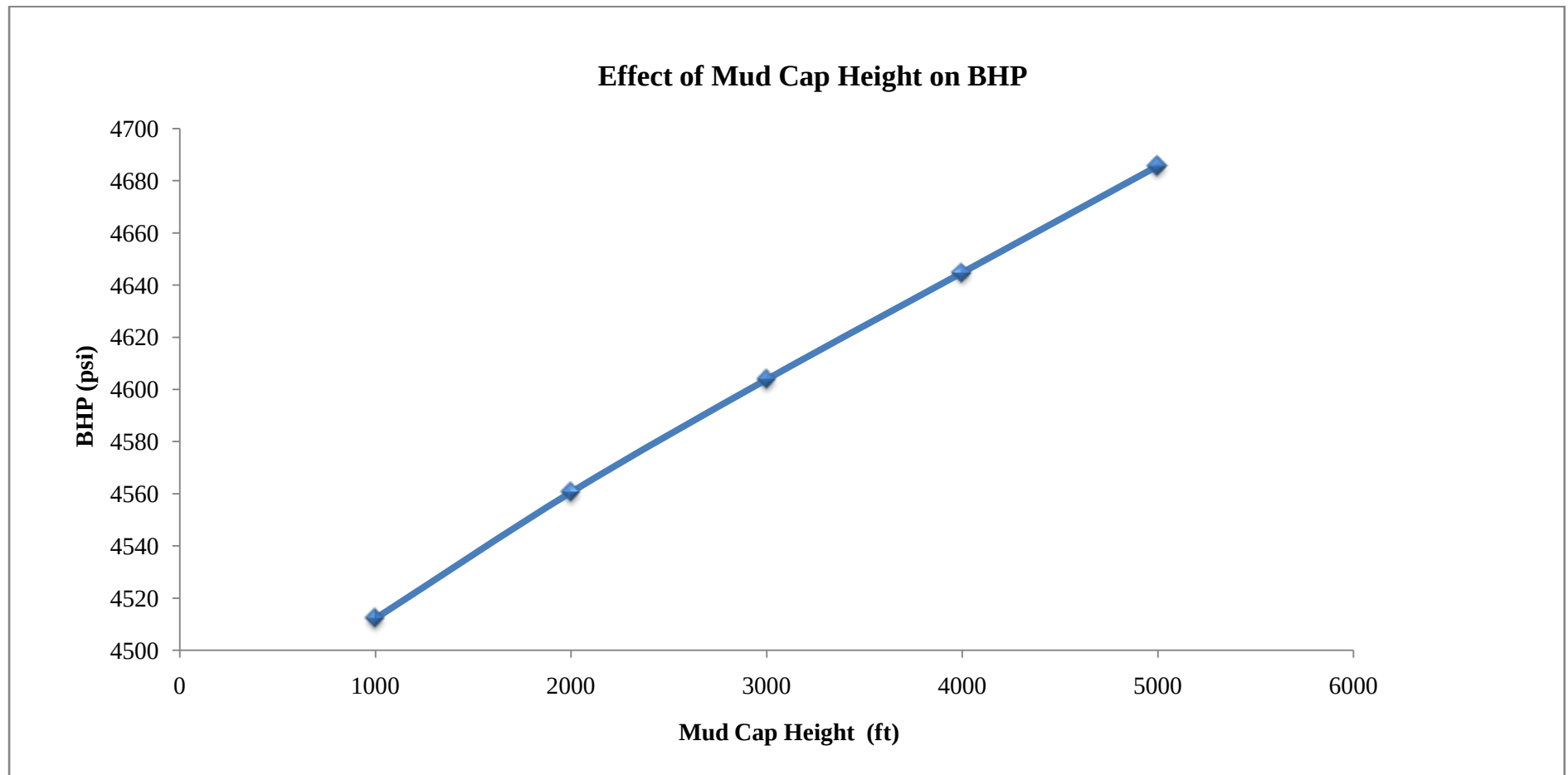
Διάγραμμα 7.3: 8.5 in Hole with 7.625 in Casing (Dalarinis, 2007).

Στο Διάγραμμα 7.3 παρατηρείται η μεταβολή της επίδρασης της αύξησης του ύψους του Mud Cap μέσα στον δακτύλιο της γεώτρησης. Αυτό οφείλεται στις συνθήκες ροής οι οποίες επικρατούν μέσα στην περιοχή του Mud Cap και παρότι αυξάνουμε την πυκνότητα του πολφού και συνεπώς την υδροστατική του πίεση, η BHP. Σκοπός αυτής της μελέτης ήταν να μπορέσουμε να διαπιστώσουμε μέσω της ανάλυσης την μετάβαση στην επίδραση της πίεσης στην γεώτρηση για διαφορές τιμές δακτυλίου στην γεώτρηση μεταξύ της σωλήνωσης και της γεώτρησης για την τεχνική διάτρησης με ταυτόχρονη σωλήνωση.

8.5 in Hole with 7 in Casing

Height of Mud Cap (ft)	Mud Density ρ_1 (lbm/gal)	Mud Density ρ_2 (lbm/gal)	q_1 (gal/min)	q_3 (gal/min)	q_2 (gal/min)	Eccentricity	RPM	BHP (psi)
1000	9	12	100	50	50	0	0	4512.23
2000	9	12	100	50	50	0	0	4560.60
3000	9	12	100	50	50	0	0	4603.84
4000	9	12	100	50	50	0	0	4644.80
5000	9	12	100	50	50	0	0	4685.70

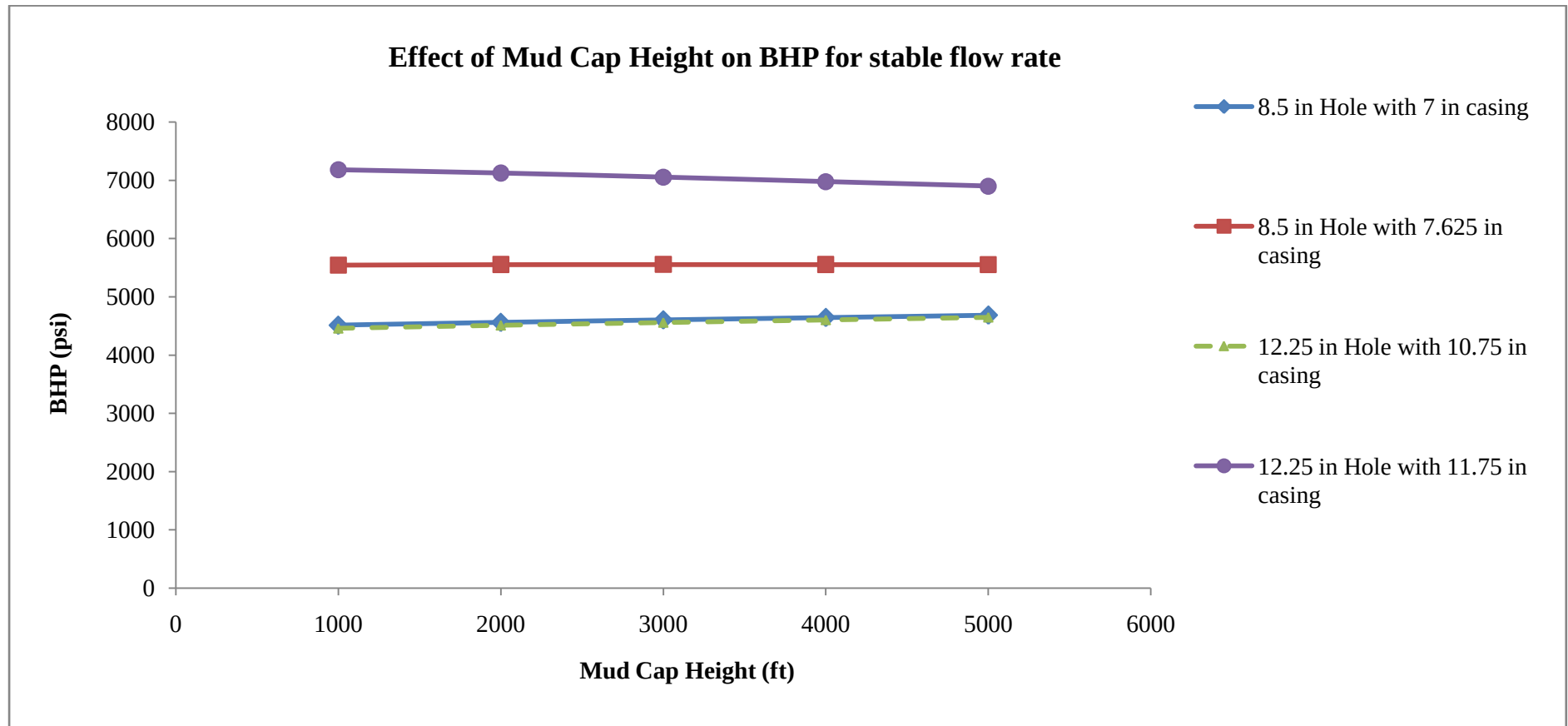
Πίνακας 7.4: 8.5 in Hole with 7in Casing (Dalarinis, 2007).



Διάγραμμα 7.4: 8.5 in Hole with 7in Casing (Dalarinis, 2007).

Στο Διάγραμμα 7.4 γίνεται αντιληπτό ότι η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης αυξάνεται εξαιτίας της αύξησης του ύψους του Mud Cap μέσα στον δακτύλιο της γεώτρησης. Αυτό οφείλεται στο ότι αυξάνουμε την πυκνότητα του πολφού και συνεπώς την υδροστατική του πίεση, η BHP της γεώτρησης αυξάνεται.

Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των διαφορετικών σωληνώσεων



Διάγραμμα 7.5: Συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ των διαφορετικών σωληνώσεων (Dalamarinis, 2007).

Στο Διάγραμμα 7.5 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης για συνδυασμό της τεχνικής Mud Cap με την τεχνική διάτρησης με σωλήνωση. Γίνεται αντιληπτό ότι η συνολική πίεση στον δακτύλιο της γεώτρησης μπορεί να μειωθεί εάν συνδυάσουμε τις δύο αυτές τεχνικές και για ορισμένα μεγέθη υδραυλικής διαμέτρου. Από τα παραπάνω αποτελέσματα προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης κατά την διάρκεια εκτέλεσης διάτρησης με την τεχνική Casing Drilling, μπορεί να ελαττωθεί εάν συνδυαστεί με την τεχνική Mud Cap σε σύγκριση με την μη ύπαρξη Mud Cap (εάν σχεδιαστεί η διάτρηση για συγκεκριμένα μεγέθη διατομής και σωλήνωσης της γεώτρησης, καθώς και το ύψος του ρευστού που παίζει τον ρόλο του Mud Cap).
- Η τεχνική Casing Drilling εμφανίζει μεγάλη πτώση πίεσης στον δακτύλιο της γεώτρησης εξαιτίας της μικρής υδραυλικής διαμέτρου, η οποία μπορεί να ελαττωθεί με την εφαρμογή του Mud Cap.
- Ο συνδυασμός αυτών των δύο τεχνικών μπορεί να επιφέρει ελάττωση στην συνολική πτώση πίεσης στην γεώτρηση εξαιτίας της χρήσης ρευστού το οποίο να προκαλεί μικρή πτώση πίεσης στο εσωτερικό των διατρητικών στελεχών και στο κατώτατο τμήμα του δακτυλίου της γεώτρησης.
- Παρά την προσθήκη, στον δακτύλιο της γεώτρησης, ρευστού μεγαλύτερης πυκνότητας (Mud Cap fluid), η συνολική τιμή της Bottom Hole Pressure μειώνεται εξαιτίας των συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή του Mud Cap και λόγω της προσέγγισης με την οποία αναλύθηκαν τα δεδομένα μας.
- Ο συνδυασμός των δύο αυτών μεθόδων επιφέρει καλύτερη διαχείριση του προφίλ της πίεσης.
- Ο συνδυασμός αυτός των δύο τεχνικών μπορεί να αυξήσει τα επίπεδα ασφαλείας μέσω της μείωσης των πιέσεων, βοηθώντας έτσι στην ελάττωση του κόστους και του χρόνου διάτρησης.
- Πλήρης αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων της μεθόδου Casing Drilling με την εφαρμογή της τεχνικής Mud Cap.

Κεφάλαιο 8^ο - Πειραματικός εξοπλισμός εργαστηρίου Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής.

8.1. Εισαγωγή.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση των οργάνων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο εργαστήριο για την εκπόνηση αυτής της εργασίας. Θα γίνει επίσης μια λεπτομερής αναφορά στον τρόπο λειτουργίας αυτών των οργάνων, και τις αρχές που διέπουν την λειτουργία τους. Τα όργανα τα οποία θα παρουσιαστούν είναι τα ακόλουθα:

- Όργανο μέτρησης ιξώδους και ρεολογικών ιδιοτήτων των ρευστών.
- Το σύστημα ροής που προσομοιώνει οριζόντια γεώτρηση.

8.2. Όργανο μέτρησης ιξώδους.

Ομοαξονικό ιξωδόμετρο περιστρεφόμενου κυλίνδρου.

Πρόκειται για ένα ψηφιακό αυτόματο όργανο της Grace Instruments. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι το M3500a (Εικόνα 8.1) και είναι ένα κλασσικό ομοαξονικό κυλινδρικό περιστροφικό ιξωδόμετρο τύπου Couette.



Εικόνα 8.1: Ιξωδόμετρο Grace Instrument M3500a και επιφάνεια εργασίας του λογισμικού.

Τα βασικά του χαρακτηριστικά είναι:

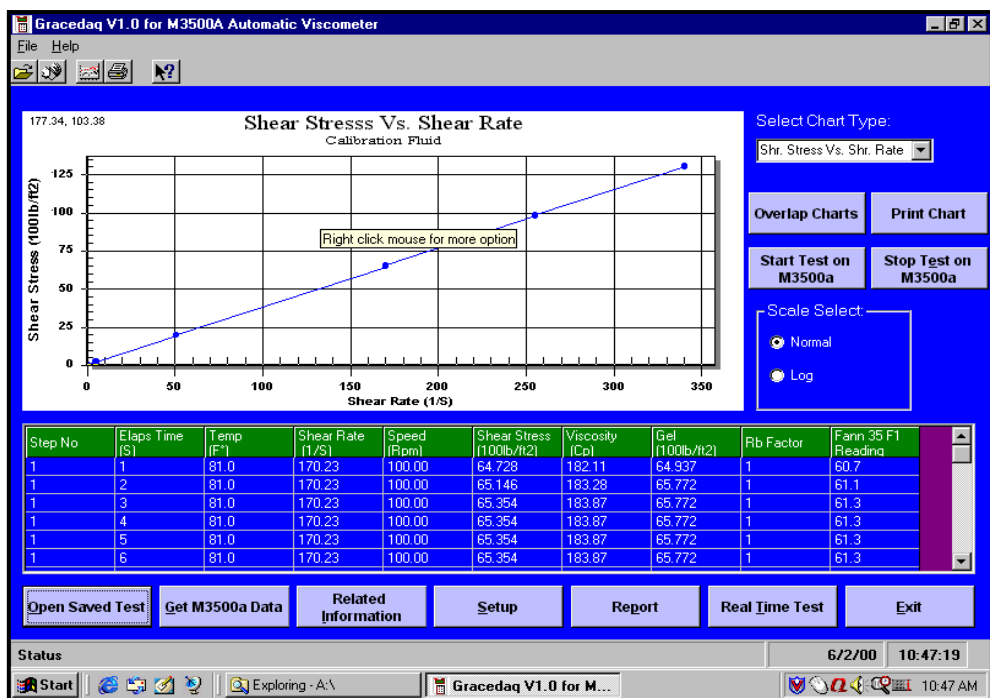
- Έχει εύρος στροφών από 0,02 – 600 rpm συνεχόμενα (χωρίς ενδιάμεση παύση) και όχι μεμονωμένες τιμές (π.χ. 3, 6, 100, 200, 300, 600 rpm)
- Φέρει θερμαινόμενο δοχείο για μετρήσεις σε διαφορετικές θερμοκρασίες (σε ατμοσφαιρική πίεση).
- Διαθέτει λογισμικό (Εικόνα) που επιτρέπει τη ρύθμιση των παραμέτρων του πειράματος μέσω H/Y, καθώς και τη δυνατότητα εκτέλεσης πειράματος σε πραγματικό χρόνο. Τα δεδομένα συλλέγονται σε ψηφιακή μορφή και καταγράφονται σε βάση δεδομένων στον H/Y , για περαιτέρω επεξεργασία.

Περιστρεφόμενο κάλυμμα (rotor sleeve)	
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.	
Εσωτερικός ακίνητος κύλινδρος (Bob)	
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.	

Πίνακας 8.1: Χαρακτηριστικά ιζωδομέτρου.

Ταχύτητα περιστροφής	0.02 – 600 rpm (συνεχόμενα)
Ρυθμός διάτμησης	0.0027 – 3254 sec ⁻¹
Θερμοκρασία	10 °F - 212 °F, (-12 °C - 100 °C)
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 ²
Ακρίβεια	± 0.5 % του συνολικού εύρους

Πίνακας 8.2: Εύρος μετρήσεων οργάνου.



Εικόνα 8.2: Τυπική επιφάνεια εργασίας λογισμικού

Καθιερωμένη διαδικασία ελέγχου ρευστών γεώτρησης.

Το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου (API) έχει προτείνει μια σειρά διαδικασιών πειραματικής μεθοδολογίας για τον προσδιορισμό διαφόρων ιδιοτήτων των ρευστών γεώτρησης, όπως η πυκνότητα, το ιξώδες και τη δύναμη γέλης (gel strength), τη διύλιση, τη χημική ανάλυση κ.α. (API 13I, API 13D). Στην συνέχεια αναπτύσσεται η προτεινόμενη μέθοδος για τον προσδιορισμό του ιξώδους και της δύναμης γέλης. Οι διαδικασίες αυτές πρέπει να εφαρμόζονται όπου είναι δυνατόν, ώστε οι μετρήσεις να είναι τυποποιημένες και τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα με αυτά που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Κελεσίδης, 2007) .

8.2.1. Ρεολογικά μοντέλα για ομοαξονικό κυλινδρικό ιξωδόμετρο.

Ιξωδόμετρο και εξίσωση ροής.

Η γεωμετρία του βασίζεται στα πρότυπα που έχουν οριστεί από το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου (API) για την αξιολόγηση όλων των ρευστών της βιομηχανίας πετρελαίου. Το ρευστό περιέχεται σε ειδικό δοχείο (cup). Ένα εξωτερικό κάλυμμα (rotor sleeve) περιστρέφεται ομόκεντρα γύρω από έναν εσωτερικό συμπαγή κύλινδρο (bob), ο οποίος εξαρτάται από περιστροφικό ελατήριο (torsional spring). Το κενό μεταξύ των δύο κυλίνδρων (rotor – bob) είναι μικρό, περίπου 1mm. Ένας μετρητής, προσαρμοσμένος στο ελατήριο, καταγράφει την γωνία περιστροφής (απόκλισης) κατά τη λειτουργία του οργάνου (Εικόνα 20).

Η δοκιμή του ρευστού γίνεται μεταξύ των δύο ομόκεντρων κυλίνδρων (rotor – bob), ακτίνων R_o και R_i , εκ των οποίων ο εξωτερικός περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω . Ας υποθέσουμε ότι η κίνηση του ρευστού λαμβάνει χώρα κατά επίπεδα ομόκεντρων κύκλων γύρω από τον κοινό άξονα. Καθώς ο εξωτερικός κύλινδρος περιστρέφεται προκαλεί διατμητική τάση μεταξύ των επιπέδων του ρευστού, από το εξωτερικό (R_o) προς το εσωτερικό (R_i).

Αποτέλεσμα αυτού είναι να “επάγεται” ροπή στον εσωτερικό κύλινδρο που μετράται και εξαρτάται από την γωνιακή ταχύτητα βάσει της σχέσης για Νευτώνεια ρευστά με ιξώδες, μ :

$$\text{όπου } S = \frac{R_o}{R_i} \quad (25) \quad \text{και } \omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (26) \quad , \text{όπου } N \text{ τα rpm και}$$

$$\tau = \frac{T}{2\pi LR_i^2} = \frac{2\mu S^2 \omega}{S^2 - 1} \quad (27)$$

Μετρώνται τα T (ροπή) και ω , γνωρίζοντας παράλληλα και τις υπόλοιπες παραμέτρους και συνεπώς υπολογίζουμε το μ .

Για μη Νευτώνεια ρευστά έχουμε τα ζεύγη τιμών T_i (ή τ_i) και ω_i (ή $\dot{\gamma}_i$) και με την χρήση μη γραμμικής παλινδρόμησης προσδιορίζεται ο τύπος του νεολογικού μοντέλου. Για Herschel-Bulkley ρευστά η εξίσωση που περιγράφει το ρεολογικό μοντέλο είναι

$$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \quad (12)$$

για το μοντέλο Power Law $\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (10)$

και τέλος για το Bingham Plastic μοντέλο είναι $\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma} \quad (11)$.

8.3. Διαδικασία Μετρήσεων και Επεξεργασία Δεδομένων.

Σύμφωνα με τις οδηγίες του API που προαναφέρθηκε, ορίζουμε στο λογισμικό του οργάνου (μέσω του H/Y που είναι συνδεδεμένος με το ιξωδόμετρο) κάποια συγκεκριμένα βήματα (steps) χρονικής διάρκειας 60 sec και με σταθερή ταχύτητα περιστροφής του rotor sleeve για κάθε βήμα. Η ταχύτητα στο πρώτο βήμα είναι 600rpm και ορίζουμε εμείς στο όργανο πόσες μετρήσεις θέλουμε να πάρει μέσα στο διάστημα των 60sec. Στο εργαστήριο λαμβάνονται έξι μετρήσεις σε κάθε βήμα (1 ανά 10 sec) είναι ικανοποιητικός αριθμός. Σε κάθε βήμα επίσης ορίζουμε και την επιθυμητή θερμοκρασία του ρευστού μας ή απλά και μόνο την θερμοκρασία περιβάλλοντος στην οποία επιθυμούμε να μετρήσουμε το ιξώδες του ρευστού. Παρακάτω φαίνονται τα βήματα αλλά και οι ταχύτητες περιστροφής που ορίζουμε σύμφωνα με την μεθοδολογία.

Αριθμός βήματος	Ταχύτητα Καλύμματος (rpm)	Διάρκεια (sec)
Βήμα 1	600	60
Βήμα 2	300	60
Βήμα 3	100	60
Βήμα 4	60	60
Βήμα 5	6	60
Βήμα 6	3	60

Πίνακας 8.3: Βήματα μετρήσεων οργάνου.

Το όργανο μετρά ταυτόχρονα και μας δίνει online και στην οθόνη του υπολογιστή αλλά και στην δικιά του οθόνη, την διατμητική τάση, που ασκείται στον εσωτερικό συμπαγή κύλινδρο από το ρευστό (με μετατροπή της απόκλισης του ελατηρίου λόγω της ροπής που αναπτύσσεται από το κινούμενο ρευστό στον εσωτερικό κύλινδρο, όπως αναπτύχθηκε στην αρχή λειτουργίας του οργάνου), την θερμοκρασία, το ιξώδες κατευθείαν σε κάθε χρονική στιγμή μέτρησης και την δύναμη γέλης. Ταυτόχρονα υπολογίζει τον ρυθμό διάτμησης σε κάθε βήμα μετατρέποντας την περιστροφική ταχύτητα που του έχουμε ορίσει σε sec^{-1} .

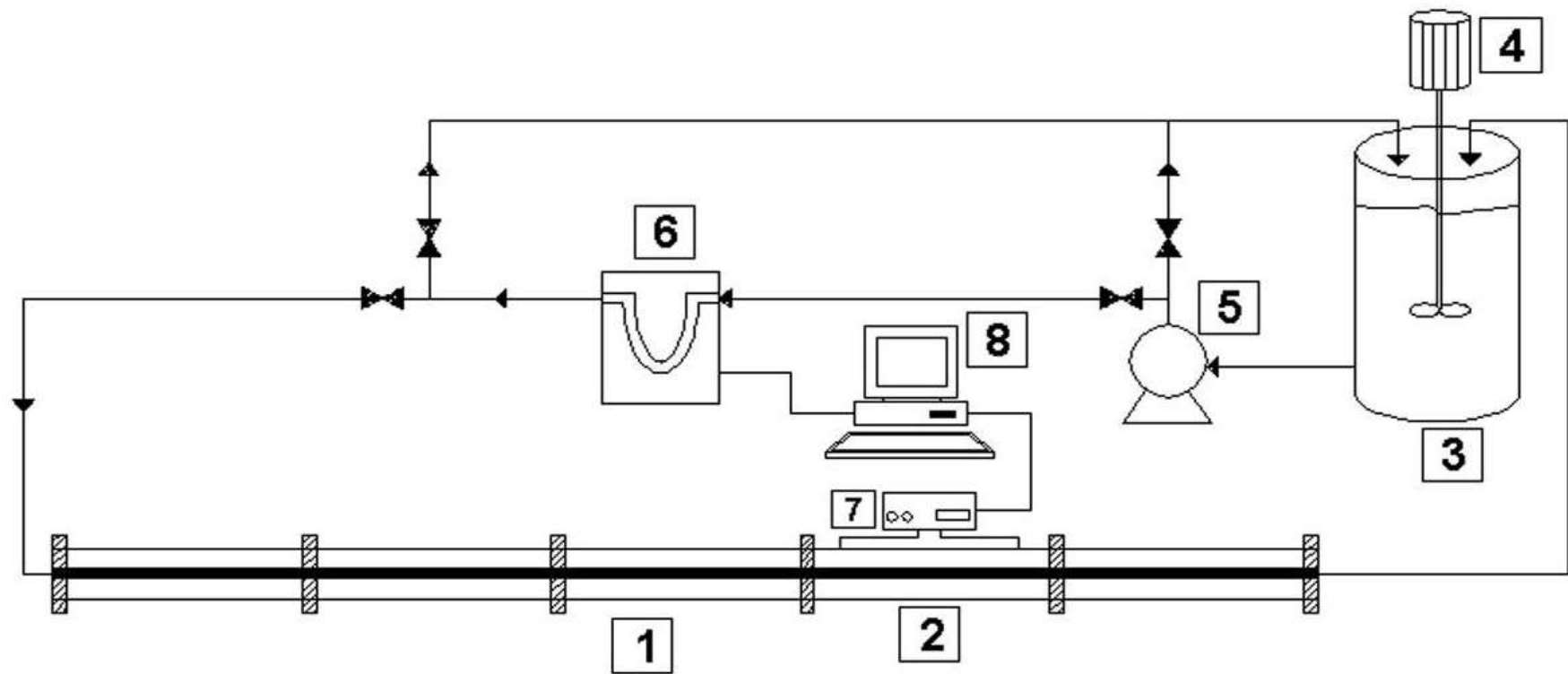
Δίνοντας επομένως εμείς τις διάφορες περιστροφικές ταχύτητες στο περιστροφικό κάλυμμα, δημιουργείται μια διατμητική τάση από το ρευστό στον εσωτερικό κύλινδρο του οργάνου, έτσι σε αναφορά που τελικά μπορούμε να πάρουμε από το όργανο έχουμε τιμές της τ για κάθε βαθμίδα ταχύτητας γ .

Έχουμε έτσι ζεύγη τιμών $\tau - \gamma$ από τα οποία μπορεί να κατασκευαστεί ένα διάγραμμα και να τοποθετηθούν τα ζεύγη αυτά των τιμών. Από την μορφή της καμπύλης που προσαρμόζεται στα δεδομένα, προκύπτουν τα συμπεράσματά μας για το ρεολογικό μοντέλο στο οποίο ανήκει η συμπεριφορά του ρευστού μας και αυτό επιτυγχάνεται μέσω του προγράμματος “Best Fit” που περιγράφηκε παραπάνω.

8.4. Σύστημα ροής εργαστηρίου.

Το μοντέλο οριζόντιας γεώτρησης του εργαστηρίου Ρευστομηχανικής και Τεχνικής Γεωτρήσεων αποτελείται από τα επιμέρους τμήματα:

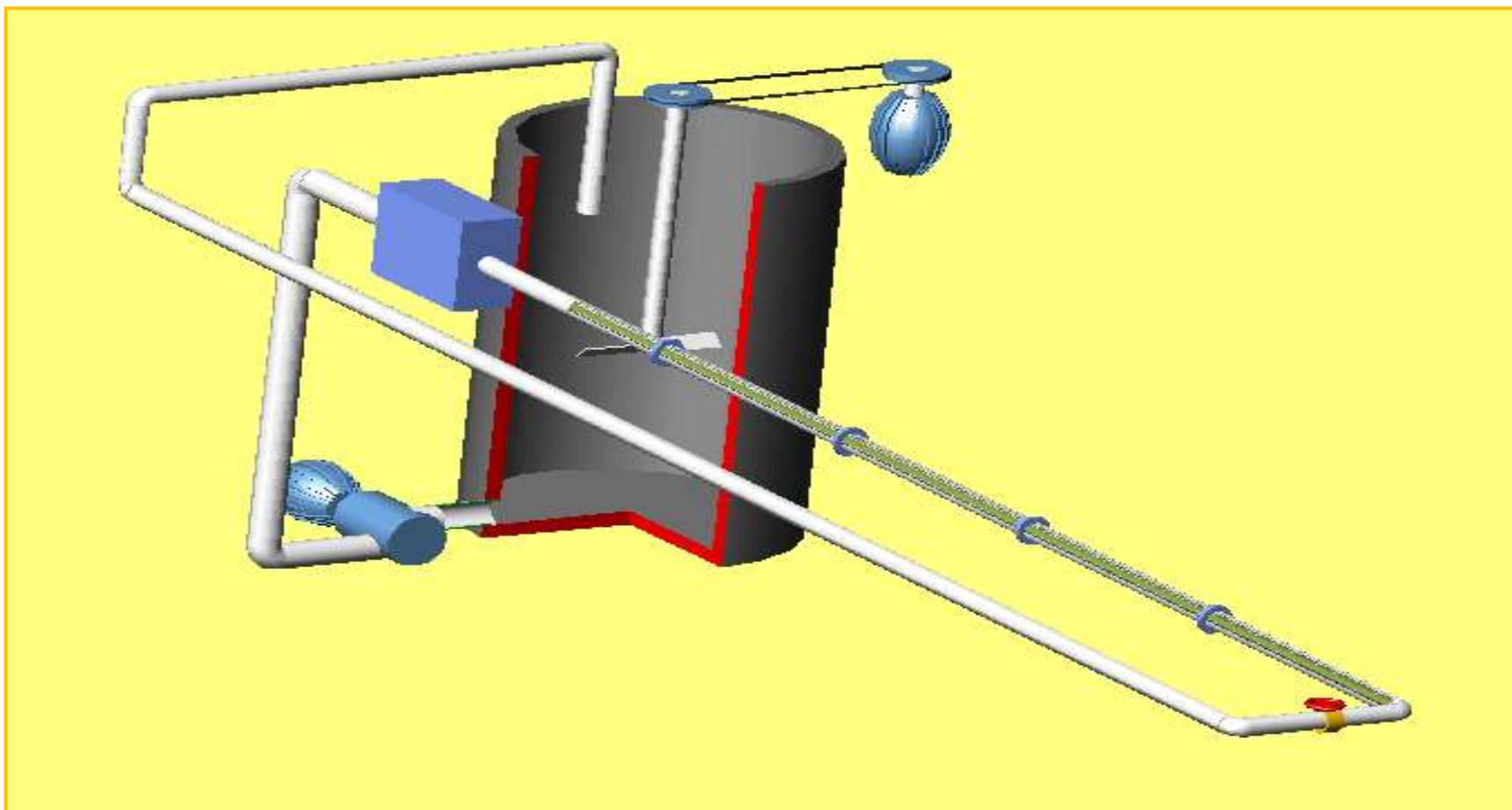
- Δεξαμενή χωρητικότητας 700 λίτρων.
- Μοντέλο οριζόντιας γεώτρησης αποτελούμενο από plexiglas μήκους πέντε μέτρων.
- Αντλία κυκλοφορίας του ρευστού στο μοντέλο της γεώτρησης.
- Αναδευτήρας περιστρεφόμενος.
- Σύστημα μέτρησης κυκλοφορίας, πυκνότητας, θερμοκρασίας ρευστού.
- Σύστημα μετρήσεων πτώσης πίεσης.
- Σύστημα καταγραφής μετρήσεων και εξαγωγής δεδομένων.



Σχήμα 8.1: Βασικές μονάδες πειραματικού συστήματος ροής (Κουτρούλης – Μιχελάκης, 2002).

1 – Τμήμα δακτυλίου. 2 – Μετρητικό τμήμα. 3 – Δοχείο επεξεργασίας ρευστού.

4 – Αναδεντήρας. 5 – Αντλία. 6 – Παροχόμετρο τύπου Coriolis. 7 – Μετρητής διαφορικής πίεσης. 8 – Η/Υ για συλλογή & επεξεργασία δεδομένων.



Σχήμα 8.2: Μοντέλο οριζόντιας γεώτρησης εργαστηρίου Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής (Dalamarinis, 2007).

Δεξαμενή χωρητικότητας 700 λίτρων.

Για την παρασκευή του ρευστού υπάρχει μια δεξαμενή χωρητικότητας 700 λίτρων. Η δεξαμενή μπορεί να εφοδιαστεί με νερό βρύσης ή απιονισμένο νερό από την στήλη απόσταξης που υπάρχει στο εργαστήριο. Η δεξαμενή στο κάτω μέρος της είναι συνδεδεμένη με την αντλία παροχής του ρευστού στο σύστημα της οριζόντιας γεώτρησης και είναι εφοδιασμένη με σύστημα ψύξης για διατήρηση της θερμοκρασίας του ρευστού και παράθυρο παρατήσεως της διαδικασίας ανάμειξης των ρευστών.



Εικόνα 8.3: Δεξαμενή ρευστού.

Δακτύλιος κυκλοφορίας ρευστού.

Το μοντέλο οριζόντιας γεώτρησης του εργαστηρίου Ρευστομηχανικής και Τεχνικής Γεωτρήσεων αποτελείται από δύο σωλήνες διαφορετικής διαμέτρου. Ο εξωτερικός σωλήνας του μοντέλου ο οποίος προσομοιάζει τα τοιχώματα των

πετρωμάτων στα οποία γίνεται η διάτρηση και ουσιαστικά παίζει τον ρόλο του φρέατος της γεώτρησης. Ο εσωτερικός σωλήνας του συστήματος προσομοιάζει τα διατρητικά στελέχη ενός γεωτρύπανου και μαζί με τον εξωτερικό σωλήνα δημιουργούν έναν δακτύλιο γεώτρησης. Η κυκλοφορία του ρευστού γίνεται μέσα στον δακτύλιο των οποίων δημιουργούν αυτές οι δύο σωληνώσεις. Οι διαστάσεις των σωληνώσεων είναι:

- Εξωτερικός σωλήνας εσωτερικής διαμέτρου $\Phi 70$ mm, εξωτερικής $\Phi 80$ mm και μήκους 5 m. Αποτελείται από πέντε τμήματα του ενός μέτρου συνδεδεμένα μεταξύ τους με φλάντζες (Εικόνα 8.11) (Κουτρούλης – Μιχελάκης, 2002).
- Εσωτερικός σωλήνας εξωτερικής ς διαμέτρου $\Phi 40$ mm, εσωτερικής $\Phi 30$ mm, μήκους 5 m.

Η σύνθεση αυτών των δύο σωληνώσεων δημιουργεί ένα ομόκεντρο σύστημα υδραυλικής διαμέτρου $d_h = 3$ cm.

Το μοντέλο της οριζόντιας γεώτρησης έχει την δυνατότητα να μεταβάλλει την εκκεντρότητα, αλλάζοντας την θέση του εσωτερικού σωλήνα, μέσω των οδηγών που βρίσκονται στον εξωτερικό δακτύλιο χωρίς όμως να έχει την δυνατότητα περιστροφής.

Το ρευστό το οποίο κινείται μέσω του συστήματος και αφού περάσει από την περιοχή καταγραφής των μετρήσεων (πίεσης και ιδιοτήτων πολφού) μεταφέρεται ξανά μέσα στην δεξαμενή όπου αναμιγνύεται με το υπόλοιπο ρευστό της δεξαμενής.

Οι δυνατότητες κυκλοφορίας ρευστού μέσα στο σύστημα της οριζόντιας γεώτρησης περιορίζεται, για λόγους ασφάλειας του συστήματος και αποφυγής κάποιας αστοχίας, σε μέγιστη παροχή 400 kg/min.

Αντλία κυκλοφορίας του ρευστού στο μοντέλο της γεώτρησης.

Για την κυκλοφορία του ρευστού μέσα στο μοντέλο της οριζόντιας γεώτρησης χρησιμοποιείται μια αντλία (Εικόνα 8.4α) η οποία είναι συνδεδεμένη στο κάτω μέρος της δεξαμενής πολφού που συνδέεται με inverter (Εικόνα 8.4β) για την ρύθμιση των

στοφών λειτουργίας της αντλίας και της παροχής. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της αντλίας είναι τα ακόλουθα:

ΑΝΤΛΙΑ PENTAX	
Τύπος	CM 40 – 200A
Ισχύς	7.5 KW (10 HP)
Συχνότητα περιστροφής	2900 rpm

Πίνακας 8.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά αντλίας.



Εικόνα 8.4α: Αντλία συστήματος.



Εικόνα 8.4β: Inverter ρύθμισης λειτουργίας αντλίας.

Αναδευτήρας περιστρεφόμενος.

Για την παρασκευή του ρευστού μέσα στην δεξαμενή χρησιμοποιείται ένας αναδευτήρας ο οποίος είναι τοποθετημένος μέσα στην δεξαμενή, και είναι συνδεδεμένος με μοτέρ κίνησης μέσω ιμάντα.

Οι συνθήκες λειτουργίας του αναδευτήρα καθορίζονται από ένα frequency inverter με τον οποίο μπορούμε να ρυθμίσουμε την συχνότητα περιστροφής του.



Εικόνα 8.5α: Σύστημα ανάδευσης πολφού.



Εικόνα 8.5β: Inverter μοτέρ ανάδευσης πολφού.

Σύστημα μέτρησης κυκλοφορίας – ιδιοτήτων ρευστού Rheonic.

Παροχόμετρο μάζας.

Το παροχόμετρο μάζας (Εικόνα 8.6 & 8.7) αποτελείται από δύο κύριες μονάδες:

- Τον αισθητήρα ροής.
- Την ηλεκτρονική μονάδα επεξεργασίας.

Αισθητήρας ροής.

Ο αισθητήρας ροής είναι η κεντρική μονάδα της μέτρησης ροής. Τοποθετείται σε σειρά με τις σωληνώσεις που οδηγούν το ρευστό στο δακτύλιο παρατήρησης. Ο αισθητήρας αυτός έχει την δυνατότητα να μας δίνει στοιχεία για την παροχή του ρευστού που διέρχεται από αυτόν (kg/min), την πυκνότητα (kg/m^3) καθώς και την θερμοκρασία του ρευστού ($^{\circ}\text{C}$).



Εικόνα 8.6: Αισθητήρας ροής και ιδιοτήτων ρευστού Rheonic.

Ηλεκτρονική μονάδα επεξεργασίας.



Εικόνα 8.7: Ηλεκτρονική μονάδα επεξεργασίας και παρουσίασης δεδομένων.

Η ηλεκτρονική μονάδα επεξεργασίας έχει την δυνατότητα να μας πληροφορεί για τα παρακάτω στοιχεία μέσω της οθόνης του:

- Παροχή ρευστού στον δακτύλιο της γεώτρησης (kg/min).
- Την πυκνότητα (kg/m^3), καθώς και
- την θερμοκρασία του ρευστού ($^{\circ}\text{C}$).

8.5. Σύστημα μετρήσεων πτώσης πίεσης.

Μετρητής διαφορικής πίεσης εργαστηρίου.

Το όργανο που επιλέχθηκε για τις ανάγκες του συστήματος είναι ένας ηλεκτρονικός μετρητής της εταιρίας Validyne, για λόγους που αναφέρονται παρακάτω (Κουτρούλης – Μιχελάκης, 2002). Αποτελείται από δύο βασικά τμήματα, τον αισθητήρα και τη συσκευή ψηφιακής ένδειξης. Συνδέονται μεταξύ τους μέσω ειδικού τύπου καλωδίου μεταφοράς ηλεκτρικού σήματος.

Αισθητήρας πίεσης DP – 15.

Πρόκειται για ένα χαρακτηριστικό μεταβλητό αισθητήρα πίεσης (Εικόνα 8.8) που αποτελείται από ένα διάφραγμα μαγνητικά διαπερατού ανοξείδωτου χάλυβα που στερεώνεται μεταξύ δύο σταθερών τμημάτων του ανοξείδωτου χάλυβα. Ενσωματώνεται σε κάθε τμήμα, με μια σερπαντίνα αυτεπαγωγής (πηνίο) σε πυρήνα σχήματος “Ε”. Το άθροισμα των πηνίων, που καλύπτεται από ένα μη μαγνητικό ανοξείδωτο στρώμα, έχει μια επιφάνεια ανθεκτική στη διάβρωση. Το διάφραγμα είναι τοποθετημένο στο κέντρο τους, σε ίσες αποστάσεις (περίπου 0.005 ίντσες) μεταξύ των ποδιών κάθε πυρήνα, για να παρέχει ίσες αντιστάσεις για τις μαγνητικές διόδους ροής κάθε σερπαντίνας.

Μια διαφορά πίεσης που εφαρμόζεται μέσω των αισθητήρων πίεσης εκτρέπει το διάφραγμα προς την κοιλότητα με τη χαμηλότερη πίεση, που μειώνει το ένα χάσμα και αυξάνει άλλο. Δεδομένου ότι η μαγνητική αντίσταση ποικίλλει με το χάσμα και καθορίζει την αξία αυτεπαγωγής κάθε σερπαντίνας, η εκτροπή διαφραγμάτων αυξάνει την αυτεπαγωγή της μιας σερπαντίνας και μειώνει την άλλη. Ο αισθητήρας

DP 15 είναι ένας διαφορικός μετατροπέας πίεσης γενικού σκοπού, με δυνατότητα χρήσης διαφορετικών διαφραγμάτων, έτσι ώστε να καλύπτει το εύρος μεταξύ ± 0.08 psid και ± 3200 psid. Είναι ο οικονομικά πιο αποδοτικός τρόπος να γίνουν οι μετρήσεις πίεσης στο εργαστήριο, όπου οι απαιτήσεις μέτρησης πίεσης αλλάζουν συνεχώς. Ο αισθητήρας DP15 έχει διαθέσιμες 23 διαφορετικές σειρές διαφραγμάτων. Επειδή το διάφραγμα είναι το μόνο κινούμενο μέρος, η απόκριση συχνότητας στους παλμούς πίεσης είναι εξαιρετικά υψηλή. Τα γενικά χαρακτηριστικά του διαφράγματος φαίνονται στον Πίνακα 8.5 και τα διαφράγματα που αγοράστηκαν για τις ανάγκες του εργαστηρίου, στον Πίνακα 8.6.



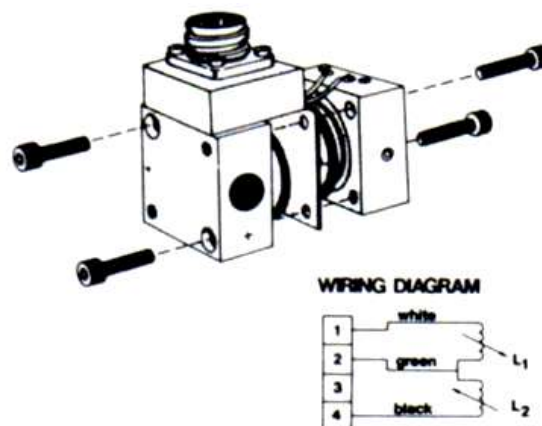
Εικόνα 8.8: Αισθητήρας DP – 15 συστήματος ροής.

Χαρακτηριστικά αισθητήρα DP 15	
Εύρος	± 0.08 psid FS – 3200 psid FS (ανάλογα με το διάφραγμα)
Ακρίβεια	± 0.25 % FS
Υπερπίεση	200 FS
Θερμοκρασία	-65° F έως + 200° F

Πίνακας 8.5: Όρια λειτουργίας DP 15.

Σειρά διαφραγμάτων		
No.	psi	cm H ₂ 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 8.6: Διαφράγματα εργαστηρίου.



Σχήμα 8.3: Σχηματική παράσταση του αισθητήρα DP – 15.

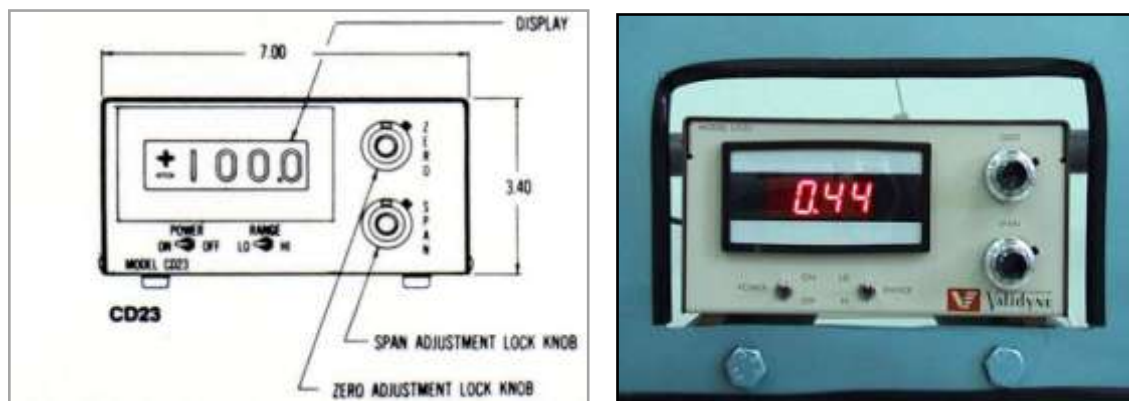
Το διάφραγμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων μέτρησης πτώσης πίεσης ήταν το διάφραγμα 3 - 28 των 56 cm H₂O και ο λόγος επιλογής του θα αναφερθεί όταν παρουσιαστεί η μέθοδος βαθμονόμησης του καταγραφικού οργάνου πτώσης πίεσης DP 15.

Συσκευή ψηφιακής ένδειξης Validyne CD23.

Η συσκευή αυτή (σχήμα 8.4) συνδέεται με ειδικό καλώδιο, με τον αισθητήρα πίεσης, παραλαμβάνει το ηλεκτρικό σήμα και το μετατρέπει σε ψηφιακή ένδειξη. Διαθέτει διακόπτη ρύθμισης χαμηλού ή υψηλού εύρους, ανάλογα με τις απαιτήσεις των μετρήσεων. Φέρει, επίσης, ποτενσιόμετρα 10 στροφών (0 – 1000) για τη ρύθμιση του μηδενισμού (ZERO) και της ευαισθησίας (SPAN) του σήματος. Οι ρυθμιστές αυτοί παρέχουν και αναλογική έξοδο ± 10 VDC, ανάλογη της πίεσης εισόδου. Σε $+10$ VDC, αντιστοιχεί στο 100% της πλήρους κλίμακας.

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

Πίνακας 8.7: Χαρακτηριστικά συσκευής CD23.



Σχήμα 8.4: Συσκευή ψηφιακής ένδειξης συστήματος ροής.



Εικόνα 8.9: Συνδεσμολογία συστήματος μέτρησης πίεσης – πρόσοψη.



Εικόνα 8.10: Συνδεσμολογία συστήματος μέτρησης πίεσης – πίσω όψη.



Εικόνα 8.11: Συνδεσμολογία συστήματος μέτρησης πίεσης – πίσω όψη και φλάντζα σύνδεσης τμημάτων δακτυλίου..

Σύμφωνα με την υπάρχουσα συνδεσμολογία, είναι εφικτή η μέτρηση πίεσης σε αποστάσεις 90 cm και 50 cm μεταξύ τους. Στα πειράματα τα οποία εκτελέστηκαν όλες οι μετρήσεις πτώσης πίεσης πραγματοποιήθηκαν στην απόσταση των 90 cm.

Βαθμονόμηση των καταγραφικών οργάνων πίεσης (Validyne DP 15).

Δεδομένου ότι η έξοδος εξαρτάται από τη ρύθμιση του ZERO και του SPAN του οργάνου, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της σχέσης μεταξύ της πίεσης εισόδου και της ένδειξης.

Η ρύθμιση και βαθμονόμηση του οργάνου πρέπει να γίνει με κατάλληλες συσκευές. Για αυτόν τον λόγο ύστερα από επικοινωνία με την κατασκευάστρια εταιρεία του οργάνου, ύστερα από υπόδειξη τους αγοράστηκε το όργανο βαθμονόμησης DP 140 της εταιρίας Martel Electronics (Εικόνα 8.12).



Εικόνα 8.12: Όργανο βαθμονόμησης DP 140.

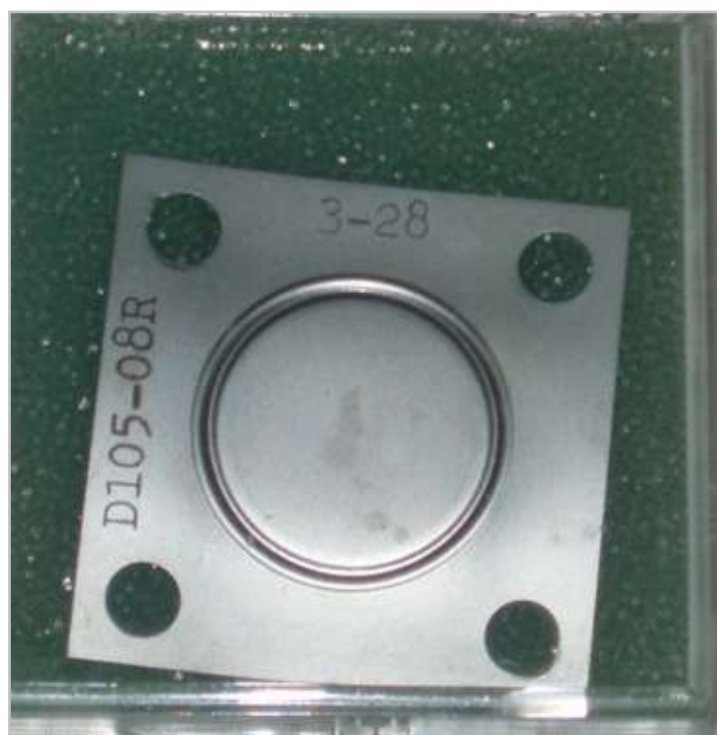
Στην συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία βαθμονόμησης του οργάνου και περιγραφή των βημάτων που ακολουθήθηκαν.

- Ο αισθητήρας του καταγραφικού Validyne DP 15 με την ένδειξη + συνδέεται με το όργανο βαθμονόμησης όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.13.



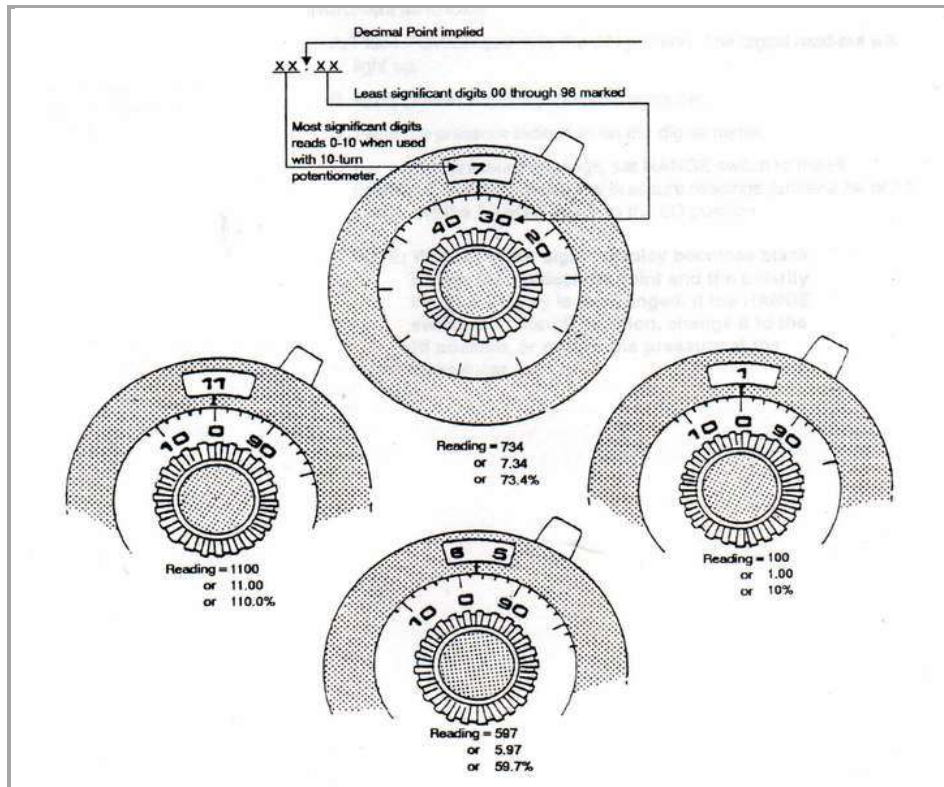
Εικόνα 8.13: Διαδικασία βαθμονόμησης DP 15.

- Τοποθετούμε το διακόπτη εύρους στη χαμηλή θέση. Μηδενίζουμε την πίεση την οποία εφαρμόζουμε στο καταγραφικό όργανο και περιστρέφουμε το ποτενσιόμετρο του ZERO, μέχρι η οθόνη να δείξει μηδέν. Το εύρος (SPAN) έχει ρυθμιστεί αρχικά σε μια τυχαία τιμή μεταξύ του 400 και του 600. Ο μηδενισμός του διαφράγματος 3 - 28 των 56 cm H₂O (ο λόγος για τον οποίο επιλέχτηκε το συγκεκριμένο διάφραγμα ήταν ότι από την ανάλυση την οποία κάναμε με το πρόγραμμα “Rhology” η μέγιστη τιμή πτώσης πίεσης που θα καταγράφει με τα συγκεκριμένα ρευστά δεν θα υπερβεί τα 20 cm H₂O), επιτεύχθηκε στην ρύθμιση 286 του ZERO.



Εικόνα 8.14: Διάφραγμα 3 – 28 56 cm H₂O.

- Τοποθετούμε το διακόπτη εύρους στη υψηλή θέση. Εφαρμόζουμε 100% διαφορά πίεσης (56 cm H₂O) στις στήλες και περιστρέφουμε το ποτενσιόμετρο SPAN, μέχρι η οθόνη της συσκευής να δείξει 56. Η ένδειξη αυτή λήφθηκε με ρυθμισμένο το ποτενσιόμετρο του SPAN στη τιμή 374.



Σχήμα 8.5: Διακόπτες βαθμονόμησης καταγραφικού οργάνου.

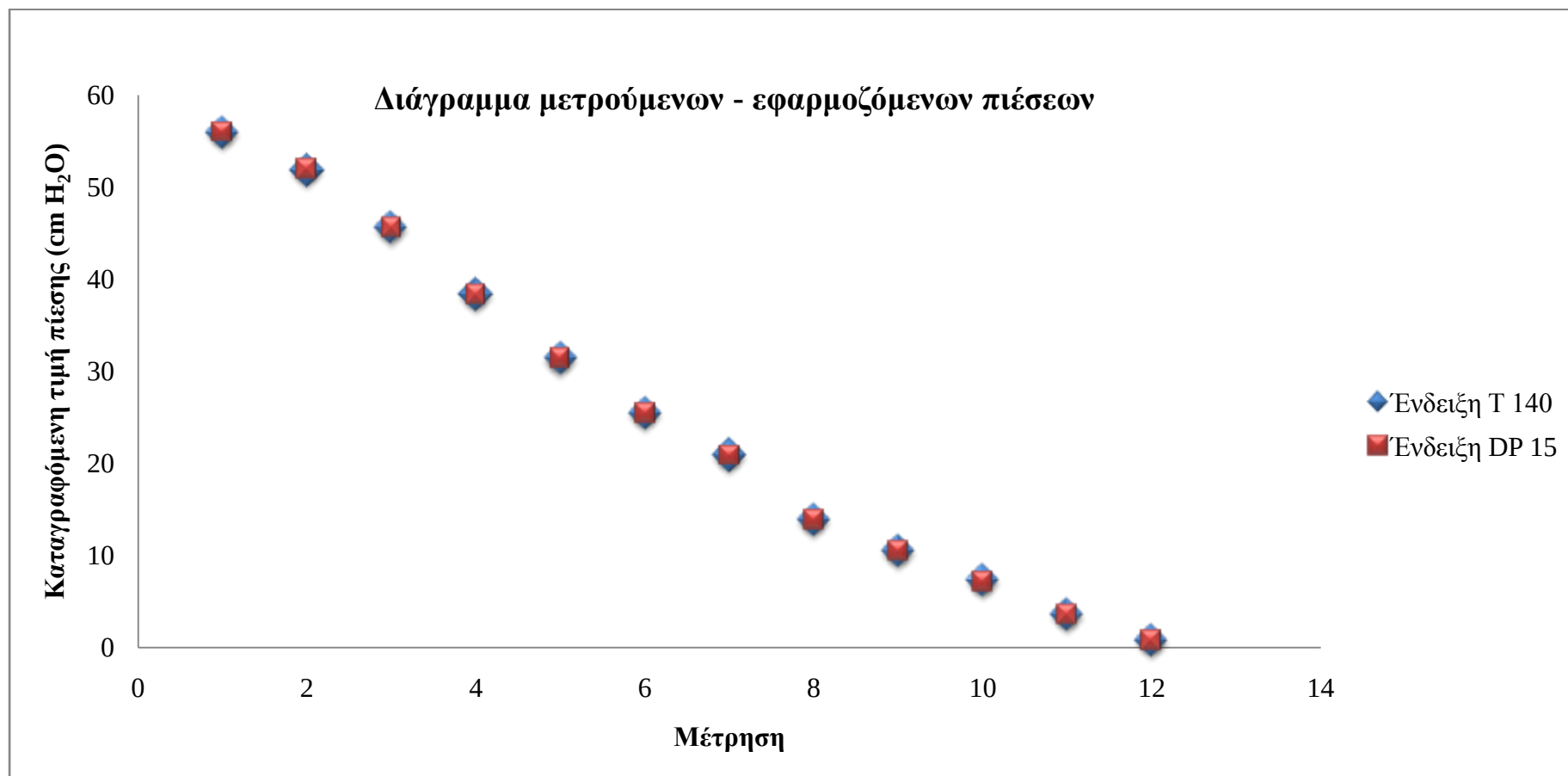
- Στην συνέχεια και αφού έχουμε ρυθμίσει την τιμή SPAN αρχίζουμε και μειώνουμε την πίεση την οποία έχουμε εφαρμόσει στο όργανο μας ευελπιστώντας η τιμή της πίεσης την οποία εφαρμόζουμε στο καταγραφικό όργανο μέσω του οργάνου βαθμονόμησης DP 140 να έχει ίδια τιμή, με την τιμή που εμφανίζει η οθόνη της συσκευής καταγραφής πτώσης πίεσης. Από αυτή την διαδικασία προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

Ένδειξη T 140 (cm H ₂ O)	Ένδειξη DP 15 (cm H ₂ O)
56.0	56.0
51.9	52.0
45.6	45.7
38.4	38.4
31.4	31.4
25.5	25.5
20.9	20.9
13.9	13.9
10.5	10.5
7.3	7.2
3.6	3.6
0.8	0.8

Πίνακας 8.8: Τιμές βαθμονόμησης καταγραφικού οργάνου.

Παρατηρούμε από τις τιμές (Πίνακας 8.8 & Διάγραμμα 8.1) ότι η βαθμονόμηση του οργάνου και του διαφράγματος είναι επιτυχής, αφού όποιες αποκλίσεις μεταξύ της καταγραφείσας και της εφαρμοζόμενης πίεσης είναι μέσα στα όρια του επιτρεπόμενου σφάλματος του οργάνου.

Αφού τελειώσουμε με την βαθμονόμηση του οργάνου το συνδέουμε και πάλι στο σύστημα μας. Όταν συνδεθεί το καταγραφικό όργανο γίνεται εξαέρωση του για να απομακρυνθεί ο αέρας που έχει εισέρθει μέσα στο διάφραγμα, και ελέγχουμε τα σημεία σύνδεσης του οργάνου με τον δακτύλιο για τυχόν παρουσία φυσαλίδων αέρα οι οποίες θα επηρεάσουν τις μετρήσεις.



Διάγραμμα 8.1: Σύγκριση εφαρμοζόμενων με καταγραφόμενες τιμές πίεσης.

8.6. Σύστημα καταγραφής μετρήσεων και εξαγωγής δεδομένων.

Τα δεδομένα τα οποία καταγράφονται από τον μετρητή πίεσης μέσω καλωδίου και με την μορφή ρεύματος μπορούν να διοχετευτούν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή.

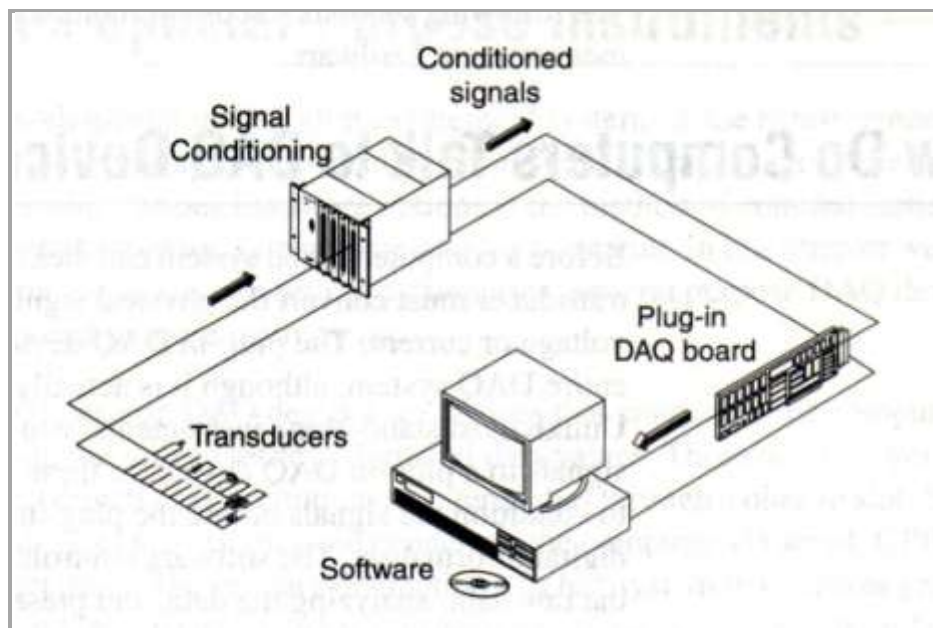
Πριν αυτή την διοχέτευση του σήματος της διαφορικής πίεσης που καταγράφεται στα μετρητικά μας όργανα πρέπει να μεσολαβήσει το κατάλληλο Hardware το οποίο θα ψηφιοποιήσει τα σήματα. Η διαδικασία αυτή γίνεται μέσω καρτών DAQ (Data Acquisition PCI), που εισάγουν το σήμα στον Η/Υ και το λογισμικό επεξεργασίας LabView και αγοράστηκαν από την εταιρεία National Instruments (Εικόνα 8.15).



Εικόνα 8.15: DAQ (Data Acquisition PCI).

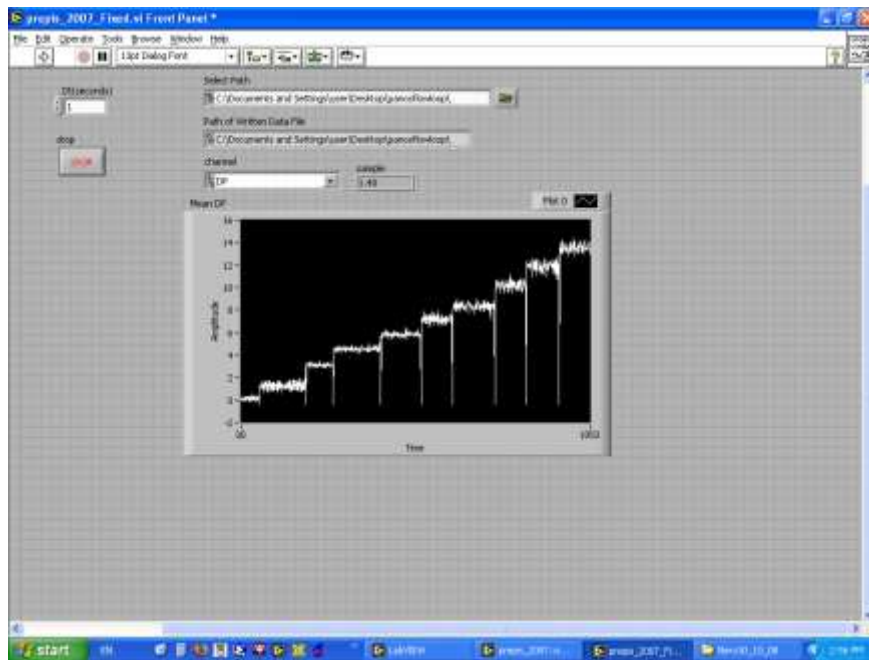
Λογισμικό LabView.

Το LabView είναι γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιεί εικόνες αντί για εντολές, για τη δημιουργία προγραμμάτων. Σε αντίθεση με τις συμβατικές γλώσσες προγραμματισμού, όπου οι οδηγίες καθορίζονται από την εκτέλεση του προγράμματος, το LabView χρησιμοποιεί την εισαγωγή συνεχούς ροής δεδομένων, η οποία και καθορίζει την εκτέλεση.

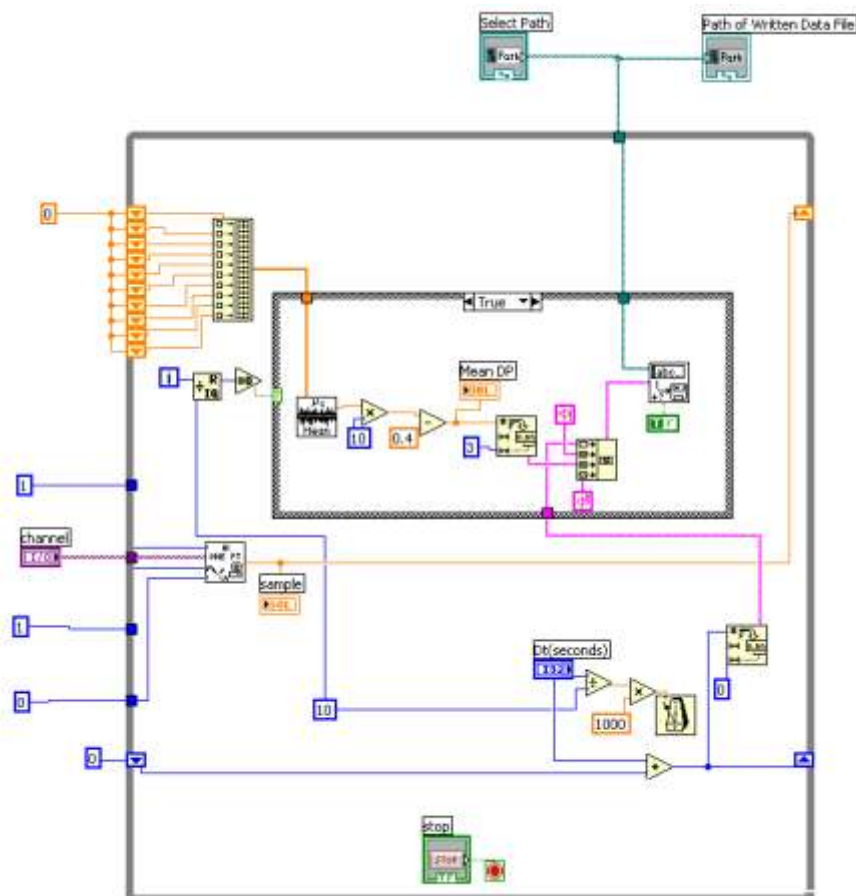


Σχήμα 8.6: Σύστημα DAQ σε H/Y.

Τα δεδομένα τα οποία καταγράφονται και αναλύονται από τα παραπάνω όργανα παρουσιάζονται μέσω ενός (front panel) στην επιφάνεια εργασίας (Εικόνα 8.16) του υπολογιστή ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το σύστημα. Στο Σχήμα 8.7 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία (Visual Basic) του προγράμματος για την καταγραφή των σημάτων.



Εικόνα 8.16: Front Panel του VI του εργαστηρίου.



Σχήμα 8.7: Διάγραμμα ροής VI εργαστηρίου.

Επόμενο βήμα μετά την καταγραφή των δεδομένων είναι η ανάλυση αυτών. Τα αρχεία τα οποία εξάγονται από το LabView επεξεργάζονται στην συνέχεια με το πρόγραμμα Microsoft Excel. Στα δεδομένα τα οποία έχουν καταγραφεί υπολογίζουμε την μέση τιμή από όλες τις μετρήσεις, και αυτή η τιμή αυτή αποτελεί την μέτρηση της πτώσης πίεσης που μας ενδιαφέρει.

Κεφάλαιο 9^ο - Διαδικασία παρασκευής πολφών.

9.1. Εισαγωγή.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία σύμφωνα με την οποία παρασκευάστηκαν τα δείγματα πολφών που μελετήθηκαν, τόσο σε εργαστηριακή αλλά και μεγάλη κλίμακα για χρήση και μελέτη στο σύστημα ροής.

Από αυτή την διαδικασία εξήχθησαν πολύ χρήσιμα συμπεράσματα για την παρασκευή ρευστών διαφόρων πρόσθετων σε μεγάλη κλίμακα και θα παρουσιαστεί επίσης μια μέθοδος για την παρασκευή αυτών σε μεγάλη κλίμακα, με τέτοιο τρόπο ώστε να έρχεται όσο το δυνατόν πιο κοντά με την πρότυπη διαδικασία που για τα δείγματα κλίμακας 500 ml.

Επίσης θα γίνει παρουσίαση της μεθόδου παρασκευής των πολφών, στους οποίους μελετήθηκε η επίδραση pH και NaCl. Ένα από τα πιο συνηθισμένα συστατικά των πολφών διάτρησης είναι ο μπεντονίτης ο οποίος χρησιμοποιείται σε διαφορές περιεκτικότητες ανάλογα με τις ανάγκες της διάτρησης.

Κατά την διάρκεια της διάτρησης το ρευστό διάτρησης έρχεται σε επαφή με διάφορα πετρώματα τα οποία επιδρούν στο pH του ρευστού λόγω της ορυκτολογικής τους σύνθεσης. Επίσης σε θαλάσσια περιβάλλοντα όπου στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται σαν βάση του ρευστού διάτρησης θαλασσινό νερό. Σε αυτή την περίπτωση η αλατότητα του νερού επηρεάζει τις ρεολογικές ιδιότητες του ρευστού.

9.2. Μπεντονίτης.

Είναι βασικό πληρωτικό υλικό των ρευστών γεώτρησης και παραμένει για πολλά χρόνια ως το δεύτερο σε περιεκτικότητα συστατικό μετά το βαρύτι σε πολφούς γεώτρησης. Προστίθεται σε φρέσκο νερό ή σε ήδη παρασκευασμένες λάσπες φρέσκου νερού για ένα ή περισσότερους από τους παρακάτω λόγους:

- Την αύξηση της ικανότητας καθαρισμού του φρέατος

- Την ελάττωση της διήθησης (filtration) του ρευστού στους διαπερατούς σχηματισμούς.
- Τον σχηματισμό μιας λεπτής μεμβράνης ρευστού στα τοιχώματα του φρέατος (filter cake), χαμηλής διαπερατότητας.
- Την βελτίωση της σταθερότητας των τοιχωμάτων του φρέατος σε μη συνεκτικούς σχηματισμούς.
- Την αποφυγή ή αντιμετώπιση της απώλειας κυκλοφορίας (lost circulation).

Το ποσοστό που προστίθεται ποικίλει ανάλογα με τις συνθήκες, αλλά οι προτεινόμενες περιεκτικότητες βρίσκονται στον παρακάτω Πίνακα 10.18.

Μπεντονίτης προστιθέμενος σε:	Φρέσκο νερό		Λάσπη φρέσκου νερού	
	(lb/bbl)	(kg/m ³)	(lb/bbl)	(kg/m ³)
Κανονικές συνθήκες γεώτρησης	13-22	35-60	4-10	11-28
Σταθεροποίηση τοιχωμάτων	25-35	70-100	9-18	25-50
Απώλεια κυκλοφορίας	30-40	85-110	10-20	28-56
Προστιθέμενος σε:	Πετρέλαιο			
	(lb/bbl)	(kg/m ³)		
Απώλεια κυκλοφορίας (Βούλωμα)	400	1100		

Πίνακας 9.1: Συνήθεις τιμές περιεκτικότητας λάσπης γεώτρησης σε μπεντονίτη.

Στα πειράματα τα οποία έγιναν στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής και των οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία, ο μπεντονίτης είναι Wyoming QUICK GEL της εταιρίας BAROID.

Προετοιμασία δειγμάτων πολφού μπεντονίτη μικρής κλίμακας.

Η διαδικασία παρασκευής δειγμάτων προς εξέταση πρέπει να είναι τυποποιημένη, ώστε να προκύπτουν αξιόπιστα και επαναλήψιμα αποτελέσματα. Η διαδικασία αυτή, με βάση τα πρότυπα του API (API 13A, 1993), είναι η εξής.

- Αρχικά ογκομετρώνται 500 ml νερού (φρέσκου ή απιονισμένου ανάλογα με το σκοπό του πειράματος).
- Ζυγίζεται η κατάλληλη ποσότητα μπεντονίτη ανάλογα με το διάλυμα που πρέπει να παρασκευαστεί (π.χ. 25 gr για διάλυμα περιεκτικότητας 5% w/v).
- Το νερό τοποθετείται στο κατάλληλο δοχείο του αναδευτήρα και ξεκινάει η ανάδευση.
- Προστίθεται ο μπεντονίτης με χαμηλούς ρυθμούς έτσι ώστε να αποφεύγεται η συσσωμάτωση.
- αναδεύουμε το δείγμα αναμείκτη (μίξερ) υψηλής ταχύτητας της εταιρείας Hamilton Beach στις 11000 rpm.
- Μετά την προσθήκη όλης της ποσότητας του μπεντονίτη, αναδεύουμε για 5 λεπτά επιπλέον για να πετύχουμε διάλυση.
- Κατεβάζουμε το δοχείο με το μείγμα του πολφού μας, καθαρίζουμε τα τοιχώματα και αναδεύουμε για άλλα 15 λεπτά (συνολικός χρόνος ανάδευσης 20 min στις 11000 rpm).
- Μετά το πέρας των 20 λεπτών το διάλυμα τοποθετείται σε δοχείο και αφήνεται τουλάχιστο 24 ώρες για την επίτευξη πλήρους ενυδάτωσης. Κατά το χρόνο αυτό το ρευστό παίρνει μια μορφή gel.
- Πριν από την ιξωδομέτρηση το δείγμα αναδεύεται πάλι για 5 - 10 λεπτά στον αναμείκτη Hamilton Beach στις 11000 rpm.



Εικόνα 9.1: Hamilton Beach μίξερ.

Στη συνέχεια μετρούνται οι ρεολογικές ιδιότητες του κάθε δείγματος με χρήση του περιστροφικού ιξωδομέτρου τύπου Couette, σε θερμοκρασία δωματίου, στις ταχύτητες περιστροφής 600, 300, 200, 100, 60, 6, και 3 rpm.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων του ιξωδομέτρου επεξεργάζονται με την βοήθεια λογισμικού του εργαστηρίου(πρόγραμμα “Best Fit”), από όπου προκύπτουν οι ρεολογικές παράμετροι του ρευστού μας.

Παρασκευή δειγμάτων για μελέτη μεταβολής του pH σε πολφούς μπεντονίτη.

Η επίδραση του pH σε πολφούς μπεντονίτη μελετήθηκε κατά την διάρκεια αυτής εργασίας και αποτελεί ένα τμήμα της έρευνας η οποία έγινε πάνω στους πολφούς γεωτρήσεων.

Για την παρασκευή των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε απιονισμένο νερό και η διαδικασία για την παρασκευή του δείγματος είναι ίδια με την μέθοδο που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Η διαφορά είναι ότι μετά την ανάμειξη του πολφού για 20 λεπτά, στην συνέχεια γινόταν μέτρηση του pH με την χρήση πεχάμετρου Inolab. Αφού μετριόταν το pH, το δείγμα τοποθετούταν ξανά στο μίξερ και αναδευόταν ενώ παράλληλα προσθέτονταν σε αυτό το κατάλληλο οξύ 0.1 M HCl ή βάση 0.1 M NaOH (Kelessidis et al., 2007). Το μείγμα αναδευόταν στην συνέχεια για δύο λεπτά ώστε να ομογενοποιηθεί και να επιδράσει σε αυτό το οξύ ή η βάση και να μεταβάλει το pH του σύμφωνα με τις απαιτήσεις μας, δηλαδή μείωση με την προσθήκη του HCl και αύξηση με την προσθήκη της βάσης NaOH. Στην συνέχεια μετριόταν ξανά το pH του πολφού και εάν είχε φτάσει στα επιθυμητά επίπεδα αφηνόταν να ενυδατωθεί για τουλάχιστον 16 ώρες. Εάν δεν είχε επιτευχθεί το επιθυμητό pH επαναλαμβανόταν η παραπάνω διαδικασία μέχρι να έρθει το pH στα επιθυμητά επίπεδα.

Την επομένη μέρα και εφόσον είχε ενυδατωθεί το δείγμα γινόταν μέτρηση των ρεολογικών του ιδιοτήτων σύμφωνα με την μέθοδο που περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους, με το περιστροφικό ιξωδόμετρο του εργαστηρίου καθώς επίσης και μέτρηση του pH.

Παρασκευή δειγμάτων με προσθήκη NaCl σε πολφούς μπεντονίτη.

Σκοπός σε αυτή την ενότητα είναι να γίνει αναφορά στην επίδραση της αλατότητας στις ρεολογικές ιδιότητες του ρευστού, χρησιμοποιώντας σαν βάση για το ρευστό διάτρησης που, νερό με περιεκτικότητα σε NaCl 0 M, 0.01 M, 0.1 M για πολφούς μπεντονίτη συγκέντρωσης 2 % w/v και περιεκτικότητας σε NaCl 0,5 M, 1 M για πολφούς μπεντονίτη συγκέντρωσης 5% και 6.42% w/v. Επίσης μελετήθηκε η επίδραση της μεταβολής του pH χρησιμοποιώντας οξύ 0.1 M HCl και βάση 0.1 M NaOH για την επίτευξη της σταθεροποίησης του pH του πολφού στα επιθυμητά όρια. Σκοπός ήταν να παρασκευάσουμε δείγματα με pH σε τιμές μικρότερες και μεγαλύτερες του φυσικού pH που εμφανίζει ο πολφός του μπεντονίτη και κυμαίνεται από 8 έως 9, το οποίο κατά την διαδικασία της διάτρησης μπορεί να μεταβληθεί λόγω

της επίδρασης διαφόρων ορυκτών και μετάλλων τα οποία βρίσκονται στους σχηματισμούς στους οποίους γίνεται η διάτρηση.

Οι δύο αυτοί παράγοντες (pH και NaCl) επηρεάζουν τις ρεολογικές ιδιότητες του ρευστού μας (Van Olphen, 1977, Heller and Keren, 2001, Gray and Darley, 1980, Luckham and Rossi, 1999, Benna et al., 1999), τις τρεις παραμέτρους των Herschel-Bulkley ρευστών (K , n , τ_y). Αυτές οι επιδράσεις θα παρουσιαστούν στο τελευταίο κομμάτι αυτής της εργασίας μαζί με τα υπόλοιπα πειραματικά αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από την έρευνα πάνω στα διατρητικά ρευστά και την πρόβλεψη στην πτώση πίεσης που δημιουργείται μέσα στην γεώτρηση και στα διατρητικά στελέχη κατά την διάρκεια της διάτρησης.

Για την μελέτη της επίδρασης της συγκέντρωσης NaCl στο διάλυμα μπεντονίτη νερού, χρησιμοποιήθηκαν οι προαναφερθέντες μέθοδοι, έχοντας σαν διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση έγινε χρήση διαλύματος απιονισμένου νερού και NaCl συγκέντρωσης 0.0 M, 0.01 M, 0.1 M, 0.5 M, 1 M (Kelesidis et al., 2007) για διάφορες συγκεντρώσεις μπεντονίτη. Σε αυτή την περίπτωση την θέση του νερού πήραν τα αλατούχα διαλύματα και όλα τα βήματα για την παρασκευή και μέτρηση των ρεολογικών ιδιοτήτων του μπεντονίτη παρέμειναν ίδια.

Ο προβληματισμός πάνω στον οποίο στηρίχτηκε αυτή η μελέτη ήταν να μπορέσουμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την επίδραση των δύο αυτών παραγόντων (pH & NaCl) στα ρεολογικά χαρακτηριστικά (τ_o , K , n , μ_p) πολφών μπεντονίτη.

Προετοιμασία δειγμάτων μπεντονίτη για χρήση στο σύστημα ροής - κλιμάκωση.

Μια από τις μεγαλύτερες ίσως προκλήσεις οι οποίες εμφανίστηκαν κατά την διάρκεια αυτής της εργασίας και των επιμέρους τμημάτων της, ήταν η μετάβαση από την παρασκευή πολφού μικρής ποσότητας για ανάλυση των ρεολογικών του ιδιοτήτων, σε μεγάλη κλίμακα στη δεξαμενή του μοντέλου της γεώτρησης για την μελέτη των ρευστών Herschel-Bulkley, στην πτώση πίεσης με συγκεκριμένες ρεολογικές ιδιότητες. Η μεγαλύτερη δυσκολία σε αυτή την προσπάθεια έγκειται στο ότι η παρασκευή όγκου ρευστού σε μεγαλύτερη κλίμακα ενός ρευστού με ίδια

συγκέντρωση δεν παρουσιάζει τις ίδιες ρεολογικές ιδιότητες με την κλίμακα των 500 ml (εκτενέστερη ανάλυση θα γίνει όταν θα παρουσιαστούν τα διάφορα ρευστά, που μελετήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν, και θα παρουσιαστούν οι ρεολογικές τους ιδιότητες).

Όταν πάρθηκε η τελική απόφαση για τις επιθυμητές τιμές για των ρεολογικών ιδιοτήτων που προσδιορίζονται βάσει του 10^{00} Κεφαλαίου του ρευστού Herschel-Buckley το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο οριζόντιας γεώτρησης έπρεπε να μελετηθεί η επίδραση της κλίμακας στην ρεολογία του. Για να επιτευχθεί αυτό, παρασκευάστηκε πρώτα ρευστό μέσα σε δοχείο όγκου 10 λίτρων. Η παρασκευή έγινε με την ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε και με τα διαλύματα των 500 ml. Ανάδευση του μείγματος με αναδευτήρα προσαρμοσμένο σε περιστροφικό τρυπάνι (Black & Decker) για 5 λεπτά. Στην συνέχεια καθαρίζουμε τα τοιχώματα του κουβά και αναδεύουμε για άλλα 15 λεπτά. Στην συνέχεια ο πολφός που παρασκευάσαμε ενυδατώθηκε για μια μέρα και την επομένη μετρήσαμε τα ρεολογικά του χαρακτηριστικά με την μέθοδο που αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους.

Το επόμενο βήμα ήταν η παρασκευή ρευστού στην δεξαμενή του μοντέλου της οριζόντιας γεώτρησης, και με βάση τα αποτελέσματα και συμπεράσματα τα οποία είχαμε εξάγει από την ρεολογική ανάλυση του ρευστού που παρασκευάσαμε στην κλίμακα των 10 λίτρων (εκτενέστερη ανάλυση θα γίνει όταν θα παρουσιαστούν τα διάφορα ρευστά που μελετήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν, και θα παρουσιαστούν οι ρεολογικές τους ιδιότητες).

Το πρώτο βήμα για την παρασκευή του ρευστού στην δεξαμενή ήταν να την γεμίσουμε με νερό μέχρι ένα επιθυμητό όριο (τόσο ώστε ο σωλήνας επιστροφής του ρευστού να καλύπτεται από την στάθμη του ρευστού μέσα στην δεξαμενή ώστε να αποφευχθεί η εισρόφηση αέρα μέσα στον δακτύλιο της οριζόντιας γεώτρησης).

Στην συνέχεια προσθέτουμε την κατάλληλη ποσότητα υλικού (μπεντονίτη), ώστε να παρασκευάσουμε πολφό συγκεκριμένης συγκέντρωσης, ο οποίος θα έχει ρεολογικά χαρακτηριστικά τα οποία θα κυμαίνονται μέσα σε κάποια επιθυμητά όρια. Το υλικό το οποίο προστίθεται μέσα στο νερό της δεξαμενής κοσκινίζεται με σκοπό την μη προσθήκη μεγάλων συσσωματωμάτων τα οποία θα μείνουν αδιάλυτα στο

νερό, ενώ παράλληλα με την προσθήκη του υλικού λειτουργεί και ο αναδευτήρας του συστήματος για την ανάμειξη των υλικών και την παρασκευή του πολφού.

Σε αυτή την φάση των πειραμάτων παρουσιάστηκε το ακόλουθο πρόβλημα. Ο αναδευτήρας μας λόγω του ότι δεν μπορούσε να επιτύχει πολύ μεγάλους ρυθμούς περιστροφής (<100 rpm), είχε σαν αποτέλεσμα την μη σωστή ανάμειξη του υλικού που προσθέταμε (μπεντονίτη) με το νερό, έχοντας σαν αποτέλεσμα την δημιουργία μεγάλων συσσωματωμάτων τα οποία μπορεί να εισχωρούσαν στο όργανο μέτρησης της πίεσης και θα προκαλούσαν προβλήματα κατά την διάρκεια των μετρήσεων.

Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, παράλληλα με την χρήση του αναδευτήρα για την ανάμειξη των υλικών, χρησιμοποιήθηκε και η αντλία κυκλοφορίας του συστήματος για την ανάμειξη του ρευστού. Η αντλία κυκλοφορίας χρησιμοποιήθηκε για να κυκλοφορήσει το ρευστό μέσα στο σύστημα και να γίνει καλύτερη ανάμειξη του, λόγω της γρήγορης κυκλοφορίας του ρευστού (παροχή περίπου 200 – 250 kg/min) μέσα στο δακτύλιο, και της μετάβασης του ρευστού από την φτερωτή της αντλίας. Η διαδικασία αυτή έγινε αφού είχαν κλείσει οι βάνες που απομονώνουν το σύστημα μέτρησης από τον δακτύλιο, για την αποφυγή εισχώρησης κάποιου συσσωματώματος, σε αυτό, και το οποίο θα επηρέαζε στην συνέχεια την διαδικασία των μετρήσεων.

Η χρήση της αντλίας σε συνδυασμό με τον αναδευτήρα κατάφεραν να επιτύχουν ανάμειξη του ρευστού εφάμιλλη με τον προτεινόμενο από το API αναμείκτη (μίξερ) υψηλής ταχύτητας της εταιρείας Hamilton Beach. Η χρήση της αντλίας και του αναδευτήρα για την ανάμειξη του ρευστού έγινε για περίπου 30 με 40 λεπτά ώστε να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη ανάμειξη, εξαιτίας της μη ύπαρξης προτεινόμενης μεθοδολογίας όσο αφορά τον χρόνο ανάμειξης για τόσο μεγάλα συστήματα πολφών σε εργαστηριακό περιβάλλον.

Ο πολφός ο οποίος παρασκευάστηκε τον αφέθηκε να ενυδατωθεί για μια μέρα και την επομένη αφού έγινε ανάδευση με χρήση του αναδευτήρα και της αντλίας για πέντε λεπτά, ακολούθως ελήφθησαν περίπου 500 ml ρευστού για μέτρηση των ρεολογικών του ιδιοτήτων. Τα ρεολογικά χαρακτηριστικά των 500 ml πολφού αντιπροσωπεύουν και τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του πολφού που βρίσκεται στην δεξαμενή μας αφού θεωρούμε ότι ο πολφός μας είναι σε όλη του την μάζα

ομοιογενής. Μετά την διαδικασία ομογενοποίησης του πολφού ακολουθεί μέτρηση της πτώσης πίεσης, μια διαδικασία που θα αναλυθεί στα επόμενα κεφάλαια.

9.3. Οργανικά πολυμερή πρόσθετα.

Όσον αφορά τα ρευστά γεώτρησης, ο όρος οργανικά πολυμερή αναφέρεται σε ένα πλήθος ουσιών που συντίθενται από επαναλαμβανόμενα μονομερή, τα οποία αποτελούνται από ενώσεις του άνθρακα. Οργανικά κολλοειδή υλικά χρησιμοποιούνται στις γεωτρήσεις με στόχο:

- Τη μείωση της διήθησης.
- Την σταθεροποίηση των τοιχωμάτων του φρέατος.
- Την κροκίδωση των θραυσμάτων.
- Την αύξηση της ικανότητας μεταφοράς του ρευστού.
- Την δράση ως λιπαντικά ή γαλακτωματοποιητές.

Σημαντική βελτίωση των ιδιοτήτων του ρευστού παρατηρείται από την προσθήκη ενός και μόνο τέτοιου συστατικού. Μερικά από τα πιο συνηθισμένα οργανικά πρόσθετα είναι τα εξής:

- Carbopol.
- Polyanionic cellulose (PAC).
- Sodium Carboxymethylcellulose (CMC).

9.3.1. Carbopol.

Το Carbopol έχει περιγραφεί σαν ένα μικροτζέλ (Roberts and Barnes, 2001) και λέγεται ότι είναι μία συλλογή από υψηλά αντίθετα συνδεδεμένα πολυμερή σωματίδια, τα οποία ατομικά συμπεριφέρονται ως τζελ αλλά όλα μαζί δρουν αποτελεσματικά σαν μία συγκεντρωμένη διασπορά ακόμα και όταν η πραγματική διασπορά είναι χαμηλή. Το εξωτερικό των σωματιδίων είναι επικαλυμμένο με ελεύθερα αιωρημένες ίνες από τζελ και αυτές αλληλεπιδρούν ισχυρώς με τα αντίστοιχα τους μέλη πάνω στα μικρό - τζελ σωματίδια για να δώσουν υψηλή οριακή ταχύτητα σε χαμηλούς ρυθμούς διάτρησης. Οι περισσότεροι τύποι των Carbopol είναι

πολυμερή μεγάλου μοριακού βάρους. Το Carbopol το οποίο χρησιμοποιήσαμε είναι του τύπου 980 της εταιρείας NOVEON.

Προετοιμασία δειγμάτων πολφού Carbopol 980 μικρής κλίμακας.

Στην περίπτωση που πολφός έχει μόνο προσθετό Carbopol 980 ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε για την παρασκευή πολφού μπεντονίτη με την διαφορά ότι μετά το τέλος της ανάδευσης και αφού αφήσουμε το δείγμα να ηρεμήσει για περίπου μια ώρα κάνουμε εξουδετέρωση του δείγματος με NaOH συγκέντρωσης 18% w/v. Η αναλογία NaOH για την εξουδετέρωση του ρευστού με Carbopol 980 αντιστοιχεί σε 1.8 ml για κάθε 1 gr Carbopol 980 στο δείγμα.

Προετοιμασία δειγμάτων πολφού Carbopol 980 για χρήση στο σύστημα ροής - κλιμάκωση.

Για την παρασκευή πολφού με μόνο προσθετό Carbopol 980 σε μεγάλη κλίμακα η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε παραμένει ίδια με αυτή της παρασκευής πολφού μπεντονίτη που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Στην περίπτωση που πολφός έχει μόνο πρόσθετο Carbopol 980 ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε για την παρασκευή πολφού με την διαφορά ότι μετά το τέλος της ανάδευσης και αφού αφήσουμε το δείγμα να ηρεμήσει για περίπου μια ώρα κάνουμε εξουδετέρωση του δείγματος με NaOH συγκέντρωσης 18% w/v. Η αναλογία NaOH για την εξουδετέρωση του ρευστού με Carbopol 980 αντιστοιχεί σε 1.8 ml για κάθε 1 gr Carbopol 980 στο δείγμα. Η διαφορά με τον πολφό μπεντονίτη είναι ότι μετά την παρασκευή του πολφού δεν χρειάζεται να περιμένουμε το ελάχιστο 16 ώρες για την ενυδάτωση του, ώστε να μετρηθούν οι ρεολογικές του ιδιότητες, μιας και αυτό επιτυγχάνεται σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα (μια με δύο ώρες).

9.3.2. Sodium Carboxymethylcellulose (CMC).

Για τη προσομοίωση των ρευστών γεώτρησης, χρησιμοποιούμε στο εργαστήριο μίγματα νερού και CMC, για να δώσει στο ρευστό τις ρεολογικές

ιδιότητες που επιθυμούμε και επειδή το ρευστό παραμένει διαφανές, πράγμα που διευκολύνει την οπτική παρατήρηση.

Αποτελεί το πλέον ευρείας χρήσεως οργανικό πολυμερές σε γεωτρήσεις. Πρόκειται για ημισυνθετικό υλικό που παρασκευάζεται από χημική επεξεργασία της κυτταρίνης που περιέχεται στα φυτά.

Από χημικής απόψεως, το CMC είναι μια λευκή, άοσμη και μη τοξική σκόνη. Διαλυόμενο, δίνει ένα διαυγές υδατικό διάλυμα ανιονικού πολυμερούς. Η ικανότητά του αυτή καθορίζει και τις φυσικές του ιδιότητες: τη διαλυτότητά του, τη ρεολογία του και τη προσροφητικότητά του. Τα διαλύματα CMC είναι μη Νευτώνεια και παρουσιάζουν αύξηση του φαινομένου ιξώδους, όταν παραμένουν ακίνητα για κάποιο χρονικό διάστημα. Με ανάδευση του διαλύματος, το φαινομενικό ιξώδες μειώνεται.

Είναι σημαντική η επιλογή του κατάλληλου τύπου CMC. Οι υψηλές ειδικές ιδιότητες των διαφόρων τύπων του πρέπει να παράγονται με ακρίβεια σε αυστηρά καθορισμένες συνθήκες, που απαιτούν μεγάλη εμπειρία.

Στα πειράματα τα οποία έγιναν στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής και των οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε αυτή την εργασία, το CMC είναι της εταιρίας AKZO NOBEL.

9.3.3. Polyanionic cellulose (PAC).

Τα προϊόντα Pac τα οποία μελετήθηκαν για να διαπιστώσουμε εάν μπορούν να δημιουργήσουν πολφό ο οποίος θα έχει τις επιθυμητές ιδιότητες ήσαν τα PAC – L, τα οποία προσφέρθηκαν στο εργαστήριο από την εταιρία M – I SWACO.

PAC – L.

Το PAC – L είναι ένα τροποποιημένο φυσικό κυτταρικό πολυμερές, το οποίο προσφέρει έλεγχο της διήθησης στους περισσότερους πολφούς διάτρησης που έχουν σαν βάση τους το νερό, χωρίς να αυξάνει σημαντικά το ιξώδες τους. Το PAC – L

όταν προστεθεί σε πολφό μπεντονίτη QUICK – GEL δημιουργεί ένα ρευστό ιδανικό για διάτρηση σε αμμώδεις σχηματισμούς. Επίσης το PAC – L μπορεί να προστεθεί σε φυτικό ή ορυκτό λαδί για την δημιουργία πολφού.

Εφαρμογές ρευστών PAC – L.

- Παρέχει έλεγχο της διήθησης σε πολφούς που έχουν σαν βάση τους το νερό (εφάλμυρο ή φρέσκο).
- Μειώνει την απώλεια ρευστού χωρίς σημαντική αύξηση του ιξώδους του πολφού.
- Συμπιέζει τους σχιστόλιθους για να εμποδίσει την παραμόρφωσή τους.
- Επιτυγχάνει σταθερότητα των ευαίσθητων σε νερό σχηματισμών της γεώτρησης.
- Βελτιώνει τον καθαρισμό της γεώτρησης.
- Μειώνει την ροπή που εμφανίζεται λόγω της περιστροφής των διατρητικών στελεχών και την πίεση που εμφανίζεται εξαιτίας της κυκλοφορίας του ρευστού μέσα στην γεώτρηση.

Πλεονεκτήματα ρευστών PAC – L.

- Είναι αποτελεσματικά σε ρευστά με βάση το νερό(φρέσκο, εφάλμυρο).
- Είναι αποτελεσματικό σε μικρές ποσότητες για τον έλεγχο της διήθησης.
- Δεν βράζει σε χαμηλή πίεση.
- Είναι συμβατό με άλλα πρόσθετα.
- Είναι ανθεκτικό σε “σκληρά” περιβάλλοντα και σε υλικά μόλυνσης του πολφού.

9.3.4. Προετοιμασία δειγμάτων πολφού CMC και PAC μικρής κλίμακας.

Στην περίπτωση που πολφός έχει προσθετό CMC ή PAC ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε για την παρασκευή πολφού μπεντονίτη με την διαφορά ότι μετά την παρασκευή του πολφού δεν χρειάζεται να περιμένουμε το ελάχιστο 16 ώρες για την ενυδάτωση του, ώστε να μετρηθούν οι ρεολογικές του ιδιότητες, μιας και αυτό επιτυγχάνεται σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα (μια με δύο ώρες).

9.3.5. Προετοιμασία δειγμάτων πολφού CMC για χρήση στο σύστημα ροής - κλιμάκωση.

Στην περίπτωση που πολφός έχει προσθετό CMC ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε για την παρασκευή πολφού μπεντονίτη με την διαφορά ότι μετά την παρασκευή του πολφού δεν χρειάζεται να περιμένουμε το ελάχιστο 16 ώρες για την ενυδάτωση του, ώστε να μετρηθούν οι ρεολογικές του ιδιότητες, μιας και αυτό επιτυγχάνεται σε πολύ μικρότερο χρονικό διάστημα (μία με δύο ώρες).

9.4.1. Προετοιμασία δειγμάτων πολφού CMC και μπεντονίτη μικρής κλίμακας.

Στην περίπτωση που πολφός έχει πρόσθετο CMC και μπεντονίτη ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε για την παρασκευή πολφού μπεντονίτη ανάλογα με ποιο συστατικό προστίθεται πρώτο. Στην συνέχεια και αφού αφήσουμε τον πολφό να ενυδατωθεί (μπεντονίτης 24 ώρες, CMC μια με δύο ώρες) προσθέταμε και το δεύτερο πρόσθετο. Στην συνέχεια αφήναμε τον πολφό να ενυδατωθεί για μια μέρα και μετρούσαμε τις ρεολογικές του ιδιότητες. Ο λόγος για τον οποίο ακολουθήθηκε αυτή η διαδικασία για πολφούς με δύο συστατικά, είναι γιατί δεν υπάρχει κάποια πρότυπη διαδικασία παρασκευής. Για τον λόγο αυτό και για να επιτύχουμε όσο το δυνατό καλύτερη ενυδάτωση των πολφών ακολουθήθηκε αυτή η διαδικασία.

9.4.2. Προετοιμασία δειγμάτων πολφού CMC και μπεντονίτη για χρήση στο σύστημα ροής - κλιμάκωση.

Για την παρασκευή πολφού μπεντονίτη και CMC σε μεγάλη κλίμακα η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι ίδια με αυτή για δείγματα μικρής κλίμακας (όσο αφορά τον χρόνο ενυδάτωσης και προσθήκης των συστατικών), ενώ για την ανάμειξη τους ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία για πολφούς που περιέχουν ένα μόνο προσθετό, όπως περιγράφηκε.

Κεφάλαιο 10^ο - Ρεολογικά χαρακτηριστικά πολφών γεώτρησης.

10.1. Εισαγωγή.

Σε αυτό το κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας θα παρουσιαστούν οι μελέτες οι οποίες έγιναν όσο αφορά την ρεολογία των ρευστών σε πειραματικό επίπεδο και την επίδραση διαφόρων παραγόντων.

Σκοπός αυτής της μελέτης ήταν η εξοικείωση με τα διάφορα υλικά (πολφοί) τα οποία χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία γεωτρήσεων πετρελαίου, φυσικού αερίου και νερού, για την διεξαγωγή της γεώτρησης (καθαρισμός γεώτρησης και επίτευξης επιθυμητού προφίλ πίεσης στην γεώτρηση), έχοντας σαν σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων, σε πρώτη φάση, για την συμπεριφορά των διαφόρων πολφών που παρασκευάστηκαν, αλλά και για την αποκόμιση απαραίτητων γνώσεων πάνω στα διατρητικά ρευστά, ώστε να μπορέσει να σχεδιαστεί ο κατάλληλος πολφός και να μετρηθεί η πτώση πίεσης κατά την ροή στον δακτύλιο.

Επιδίωξη ήταν η δημιουργία ενός ρευστού διάτρησης συγκεκριμένων ρεολογικών ιδιοτήτων, από το οποίο θα παίρναμε πειραματικά δεδομένα στο μοντέλο οριζόντιας γεώτρησης και θα τα συγκρίνουμε με τα θεωρητικά αποτελέσματα από την ανάλυση των τριών υπολογιστικών μοντέλων.

Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας ο οποίος βοήθησε για να έρθει σε πέρας αυτή η έρευνα ήταν η εμπειρία η οποία αποκομίστηκε όλα αυτά τα χρόνια (2005 – 2009) τόσο από τα πειράματα τα οποία έγιναν στο εργαστήριο Ρευστομηχανικής και Τεχνικής Γεωτρήσεων, και την θεωρητική έρευνα και εμπειρία που αποκτήθηκε κατά τον σχεδιασμό του υδραυλικού μοντέλου RGU - TUC στο Robert Gordon University της Σκωτίας.

10.2. Πολφοί διάτρησης.

Σκοπός ήταν η έρευνα για την κατασκευή ενός ρευστού διάτρησης το οποίο θα πληρεί κάποια συγκεκριμένα ρεολογικά κριτήρια ώστε να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο της οριζόντιας γεώτρησης του εργαστηρίου

Ρευστομηχανικής και Τεχνικής Γεωτρήσεων. Τα πρόσθετα τα οποία μελετήθηκαν σε αυτή την έρευνα ήσαν τα ακόλουθα:

- Μπεντονίτης
- Carbopol 980
- PAC - L
- CMC
- Συνδυασμός μπεντονίτη - CMC .

Σκοπός ήταν να μπορέσουμε να παρασκευάσουμε το κατάλληλο ρευστό ώστε να ανταποκρίνεται στα επιθυμητά ρεολογικά όρια τα οποία είχαμε θέσει, αλλά και συνάμα να είναι οικονομικό ώστε να μπορέσει να παραχθεί σε μεγάλες ποσότητες ώστε να χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο της οριζόντιας γεώτρησης. Αναφέρεται ότι για ένα πείραμα απαιτούνται 650 lt πολφού.

10.2.1. Επιθυμητά ρεολογικά χαρακτηριστικά του πολφού.

Οι πολφοί γεωτρήσεων μπορούν να μοντελοποιηθούν ως Herschel-Bulkley ρευστά. Όμως στην τεχνική γεωτρήσεων η μεγαλύτερη πρόκληση παρουσιάζεται με τα ρευστά Herschel-Bulkley, για τα οποία δεν υπάρχουν επαρκή υπολογιστικά μοντέλα τα οποία να υπολογίζουν την πτώση πίεσης σε διαδικασίες διάτρησης για δακτύλιο (Founargiotakis et al., 2006). Το μεγαλύτερο πρόβλημα σε αυτόν τον υπολογισμό για τα Herschel- Bulkley είναι η τυρβώδης περιοχή, καθώς τα υπάρχοντα υπολογιστικά μοντέλα δεν επαρκούν για να προβλέψουν ικανοποιητικά τα πειραματικά δεδομένα. Παράλληλα υπάρχει έλλειψη πειραματικών δεδομένων, ιδιαίτερα για τυρβώδη ροή.

Έτσι η προσπάθεια μας επικεντρώθηκε στην κατασκευή ενός Herschel-Buckley ρευστού το οποίο θα είναι αρκετά λεπτόρευστο ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο σύστημα μας και με τα ακόλουθα ρεολογικά χαρακτηριστικά:

- Η τάση διολίσθησης τ_o μεταξύ 0.2 έως 1 (Pa).
- Ο οδηγός συμπεριφοράς της ροής n 0.6 έως 0.9.
- Ο οδηγός συνάφειας K 0.001 έως 0.1 (Pasⁿ).

Τα όρια αυτά προέκυψαν μετά από θεωρητική ανάλυση η οποία έγινε με τα διάφορα θεωρητικά μοντέλα που είχαμε στην διάθεσή μας, για να επιτύχουμε στρωτή ροή, τυρβώδη ροή και μεταβατική ροη, για τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος ροής (παροχή ως 400 kg/min).

Σκοπός ήταν να πάρουμε αρκετές πειραματικές μετρήσεις από κάθε περιοχή ροής (Στρωτή, Μεταβατική, Τυρβώδης) ώστε να τις συγκρίνουμε με την θεωρητική ανάλυση την οποία θα κάνουμε, για να εξαχθούν τα διάφορα συμπεράσματα για την λειτουργία του κάθε υπολογιστικού μοντέλου που έχουμε στην διάθεσή μας.

10.2.2. Ρεολογικές ιδιότητες και πειραματικές μετρήσεις Carbopol 980.

Αρχικά για το έλεγχο των ρεολογικών ιδιοτήτων ρευστών που περιέχουν σαν συστατικό Carbopol 980, έγιναν πειράματα με την παρασκευή διαλυμάτων σε κλίμακα 500 ml με νερό βρύσης (επειδή σε μεγάλη κλίμακα το ρευστό μας θα παρασκευαζόταν με νερό βρύσης) σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 9.

Από αυτά τα δείγματα, αφού μετρήθηκαν τα ρεολογικά τους χαρακτηριστικά στο ιξωδόμετρο του εργαστηρίου, και σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφηκε, τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με το μοντέλο “Best Fit” για τον προσδιορισμό του είδους του ρευστού. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτή την διαδικασία για διάφορα δείγματα Carbopol 980 παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα.

Συγκέντρωση % w/v	τ_0 (Pa)	K (Pas ⁿ)	n	ΣΣ R ²	Παροχή (m ³ /sec)	Reynolds	Reynolds _{Critical}	Είδος Ροής
0.075	0.10	0.1396	0.6993	0.994				
0.075	0.10	0.0998	0.7386	0.986				
0.075	0.12	0.3539	0.5691	0.999				
0.08	0.10	0.0998	0.7386	0.986				
0.08	1.40	0.3863	0.5901	1.000	0.0080	3689	2609	Τυρβώδης
0.08	0.01	0.4919	0.5413	0.999				
0.09	1.59	0.5256	0.5817	0.999	0.0090	3708	2610	Τυρβώδης
0.09	1.43	0.6112	0.5688	0.999	0.0100	3791	2619	Τυρβώδης
0.09	2.89	0.8274	0.5486	1.000	0.1100	3617	2658	Τυρβώδης
0.10	3.77	0.9096	0.5417	0.999	0.0120	3882	2670	Τυρβώδης
0.10	3.02	0.6777	0.5828	0.999	0.0115	3689	2618	Τυρβώδης
0.10	0.72	0.1625	0.5691	0.999	0.0045	4209	2659	Τυρβώδης
0.10	0.90	0.2093	0.6443	1.000				
0.095	0.35	0.3722	0.6212	0.999				
0.095	0.67	0.7677	0.5344	1.000				
0.095	0.56	0.4005	0.6120	0.999				
0.085	0.44	0.3752	0.5865	1.000				
0.085	0.14	0.3757	0.5846	0.998				
0.085	1.03	0.2723	0.6429	0.999				

Πίνακας 10.1: Ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων Carborol 980 και εκτιμώμενες μορφές ροής σε διάφορες παροχές για τα ρευστά που εμφάνισαν τιμή τ_0 μεγαλύτερη του 1 Pa .

Από τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται στον παραπάνω Πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι το ρευστό το οποίο αναζητούσαμε, ώστε να είναι Herschel Bulkley ρευστό και να έχει κάποια συγκεκριμένα ρεολογικά χαρακτηριστικά, με την ροή να είναι στην τυρβώδη περιοχή, σε παροχές τις οποίες το μοντέλο μας μπορεί να λειτουργήσει με ασφάλεια, είναι ρευστό με περιεκτικότητα σε Carbopol 980 0.1% w/v. Ο καθορισμός του είδους της ροής του ρευστού μας για συγκεκριμένες παροχές λειτουργίας του συστήματος ροής, έγινε με την χρήση του προγράμματος “Rheology” και το μοντέλο TUC.

Κατασκευή ρευστού Carbopol 980 σε μεγάλη κλίμακα.

Μετά τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από την παρασκευή των δειγμάτων των 500 ml αποφασίστηκε η κατασκευή ενός δείγματος μεγάλης κλίμακας στη δεξαμενή του εργαστηρίου. Για την κατασκευή του ρευστού χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα συστατικά:

- 620 lt νερού βρύσης.
- 620 gr σκόνης Carbopol 980 για την παρασκευή ρευστού συγκέντρωσης 0.1% w/v.
- 1116 ml NaOH για την εξουδετέρωση του δείγματος μετά την παρασκευή του.

Μετά την παρασκευή του δείγματος σε μεγάλη κλίμακα έγινε αντιληπτό ότι κατά την κυκλοφορία του ρευστού στο σύστημα, κόλλησαν τα μετρητικά όργανα της πτώσης πίεσης εξαιτίας του ότι το ρευστό μας ήταν περισσότερο παχύρευστο από ότι ήταν αναγκαίο για την κυκλοφορία του μέσα στα σωληνάκια που μεταφέρουν το ρευστό από τον δακτύλιο στο όργανο μέτρησης, αλλά και μέσα στο όργανο μέτρησης.

Ύστερα από αυτή την εξέλιξη έγινε εμφανές ότι για το σύστημα μας απαιτείται ρευστό χαμηλότερης συγκέντρωσης σε Carbopol 980 αλλά λόγω του ότι με τα αποτελέσματα τα οποία είχαμε από την παρασκευή των δειγμάτων μικρής κλίμακας, ένα ρευστό μικρότερης συγκέντρωσης σε Carbopol 980 δεν θα πληρούσε τις ρεολογικές μας απαιτήσεις κυρίως όσο αφορά την τιμή της τάσης διολίσθησης τ_0 που είχαμε θέσει, και για αυτόν τον λόγο αποφασίστηκε να μην μελετηθεί η πτώση πίεσης σε δακτύλιο με χρήση ρευστού Carbopol 980.

Παρά την μη επιλογή του Carborol 980 για συστατικό του πολφού μας από τα πειράματα τόσο σε μικρή αλλά και μεγάλη κλίμακα προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Θετικά Συμπεράσματα.

- Το ρευστό το οποίο δημιουργείται είναι διαφανές και μπορούν να μελετηθούν οπτικά περαιτέρω ιδιότητες, όπως μεταφορά θραυσμάτων (cuttings transfer).
- Το είδος της ροής που επιτυγχάνεται μέσα στα όρια λειτουργίας του μοντέλου μας, ανήκει και στις τρεις περιοχές ροής (στρωτή, μεταβατική, τυρβώδης).

Αρνητικά Συμπεράσματα.

- Είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί επαναληψιμότητα στα ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων ακόμα και της ίδιας συγκέντρωσης Carborol 980.
- Η εξουδετέρωση που απαιτεί το ρευστό με υψηλής περιεκτικότητας NaOH (18% w/v) καθιστά την διαδικασία παρασκευής του επικίνδυνη.
- Υψηλό οικονομικό κόστος για την παρασκευή δειγμάτων κλίμακας των 700 λίτρων.
- Πολύ παχύρευστο υλικό στις επιθυμητές συγκεντρώσεις για χρήση στο σύστημά μας για συγκεκριμένες ρεολογικές παραμέτρους.
- Δύσκολο στην παρασκευή του ρευστού, γιατί απαιτεί NaOH για την εξουδετέρωση του (έλεγχος pH).

10.2.3. Ρεολογικές ιδιότητες και πειραματικές μετρήσεις ρευστού CMC.

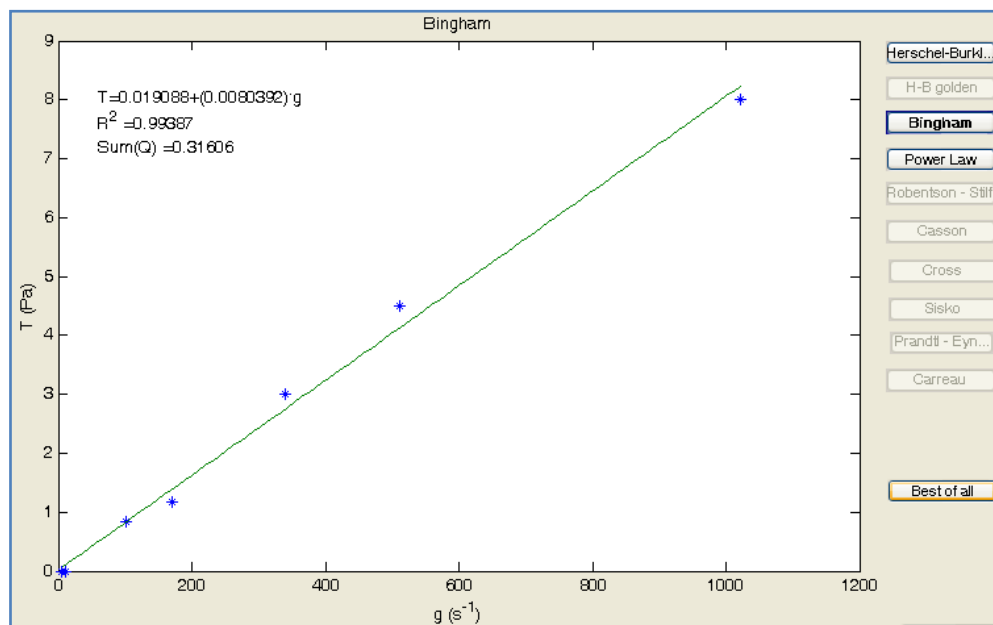
Επόμενο βήμα για την διαδικασία επιλογής ρευστού ήταν η μελέτη πολφών και η παρασκευή πολφών με κύριο συστατικό το CMC, και την επιλογή του αν πληρεί τις προϋποθέσεις που είχαν τεθεί εξ'αρχής (Herschel-Buckley ρευστό με συγκεκριμένες ρεολογικές ιδιότητες).

Επειδή δεν είχαν ξαναγίνει πειράματα για τον έλεγχο και την συμπεριφορά των ρεολογικών ιδιοτήτων ρευστών με CMC, αποφασίστηκε να παρασκευαστούν αρχικά δύο δείγματα, και με βάση τα αποτελέσματα τα οποία θα προκύψουν να προχωρήσουμε στην κατασκευή μεγάλης κλίμακας ρευστού.

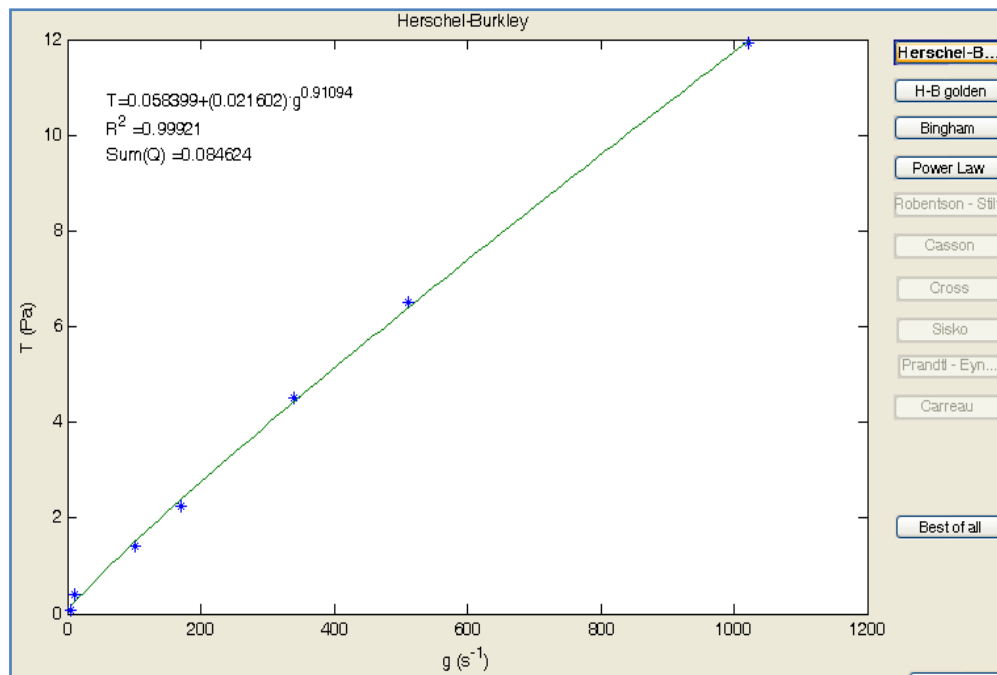
Αρχικά παρασκευάστηκαν δείγματα CMC συγκέντρωσης 0.7% και 0.9% w/v σε νερό βρύσης. Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από την μέτρηση των ρεολογικών ιδιοτήτων των δύο αυτών ρευστών αναλύθηκαν με το πρόγραμμα “Best Fit” και έδωσαν τα ακόλουθα αποτελέσματα όσο αφορά το είδος των ρευστών και των ρεολογικών ιδιοτήτων τους (Πίνακας 10.2, Ρεόγραμμα 10.1 και 10.2).

Ταυτότητα Ρευστού (Συγκέντρωση CMC)	Είδος Ρευστού	τ_0 (Pa)	K (Pas ⁿ)	n	$\Sigma \Sigma R^2$	ΣQ^2
CMC 0.7% w/v 500 ml	Bingham Plastic	0.02	0.008	1.000	0.994	0.316
CMC 0.9% w/v 500 ml	Herschel-Bulkley	0.06	0.022	0.911	0.999	0.085

Πίνακας 10.2: Ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων CMC 0.7% & 0.9% w/v 500 ml.



Ρεόγραμμα 10.1: CMC 0.7% w/v 500 ml.



Ρεόγραμμα 10.2: CMC 0.9% w/v 500 ml.

Από τα παραπάνω ρεολογικά αποτελέσματα προέκυψε το συμπέρασμα ότι πρέπει να κατασκευάσουμε ρευστό σε μεγάλη κλίμακα αρχίζοντας από συγκεντρώσεις CMC της τάξεως 0.7% w/v και πάνω και να μελετήσουμε τα ρεολογικά χαρακτηριστικά τους, και να ελέγξουμε εάν είναι μέσα στα επιθυμητά όρια τα οποία έχουμε θέσει(είδος ρευστού, ρεολογικά χαρακτηριστικά, μετάβαση στην Τυρβώδης περιοχή μέσα στα όρια λειτουργίας του μοντέλου οριζόντιας γεώτρησης του εργαστηρίου).

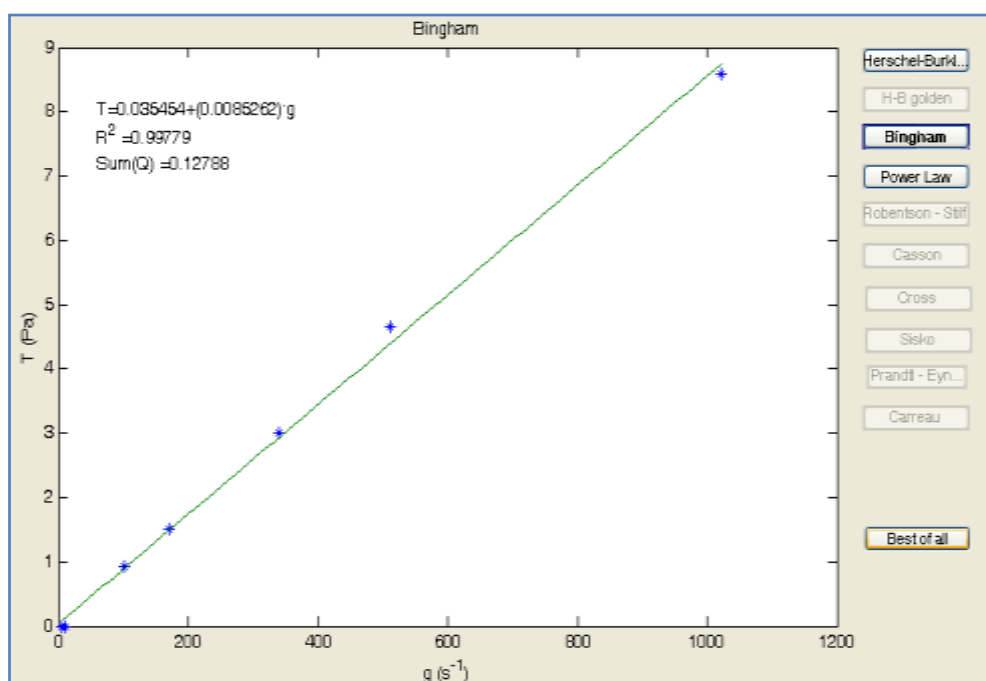
Αρχικά κατασκευάστηκε σε μεγάλη κλίμακα ρευστό περιεκτικότητας 0.7% w/v σε CMC. Για την κατασκευή χρησιμοποιήθηκαν:

- 620 lt νερού βρύσης,
- 434 gr CMC.

Μετά την παρασκευή του δείγματος σε μεγάλη κλίμακα σύμφωνα με τα βήματα τα οποία είχαν περιγράψει σε προηγούμενο κεφάλαιο έγινε μέτρηση των ρεολογικών ιδιοτήτων του ρευστού και η ανάλυση τους με το πρόγραμμα “Best Fit” έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα (Πίνακας 10.3, Ρεόγραμμα 10.3).

Ταυτότητα Ρευστού (Συγκέντρωση CMC)	Είδος Ρευστού	τ_0 (Pa)	K (Pas ⁿ)	n	ΣΣ R ²	ΣQ ²
CMC 0.7% w/v 620 lt	Bingham Plastic	0.04	0.008	1	0.998	0.128

Πίνακας 10.3: Ρεολογικά χαρακτηριστικά ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.7% w/v 620 lt.



Ρεόγραμμα 10.3: CMC 0.9% w/v 620 lt .

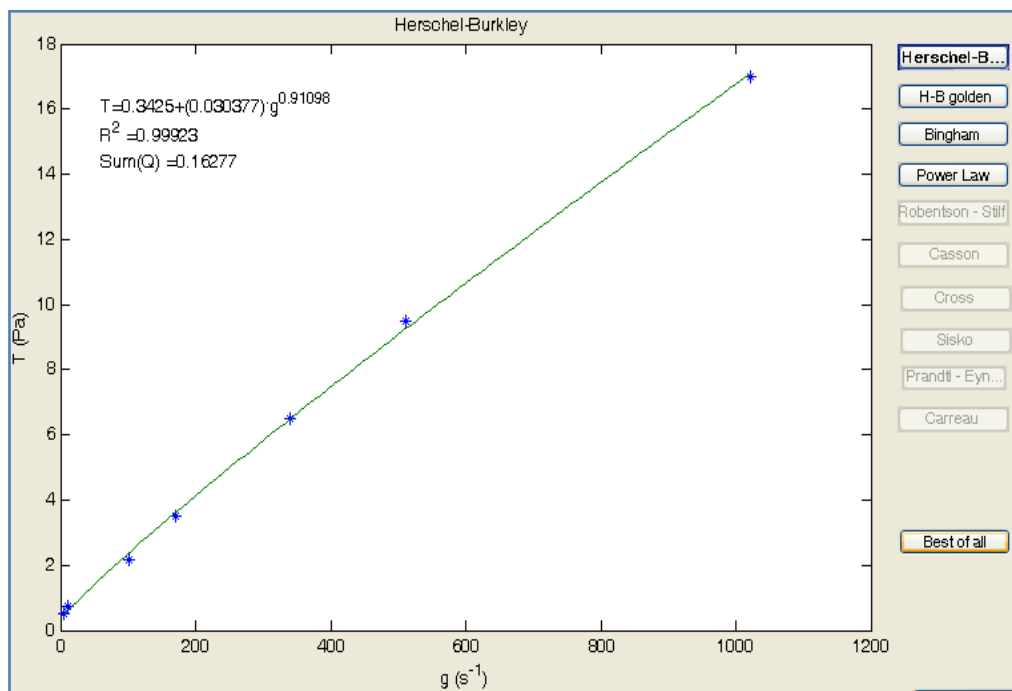
Επειδή από την ανάλυση το ρευστό που προέκυψε είναι Bingham Plastic με μικρή τιμή τ_0 , αποφασίστηκε στο ήδη υπάρχον ρευστό να προστεθεί επιπλέον ποσότητα CMC ώστε να μελετηθεί η περίπτωση αύξησης της τιμής τ_0 και μετασχηματισμού σε Herschel-Bulkley.

Η διαδικασία με την οποία παρασκευάστηκε το ρευστό ήταν η προσθήκη, στο ήδη υπάρχον ρευστό συγκέντρωσης 0.7% w/v CMC, 248 gr CMC και χρησιμοποιώντας την ίδια διαδικασία ανάμειξης και αναμονής για ωρίμανση, με το αρχικό δείγμα, προέκυψε ρευστό περιεκτικότητας 1.1% w/v με 682 gr CMC σε 620 lt

νερού βρύσης. Στην συνέχεια έγινε μέτρηση των ρεολογικών ιδιοτήτων του ρευστού και η ανάλυση τους με το πρόγραμμα “Best Fit” έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα (Πίνακας 10.4, Ρεόγραμμα 10.4).

Ταυτότητα Ρευστού (Συγκέντρωση CMC)	Είδος Ρευστού	τ_0 (Pa)	K (Pas ⁿ)	n	ΣΣ R ²	ΣQ ²
CMC 1.1% w/v 620 lt	Herschel-Bulkley	0.34	0.030	0.911	0.999	0.163

Πίνακας 10.4: Ρεολογικά χαρακτηριστικά ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.1 % w/v 620 lt.



Ρεόγραμμα 10.4: CMC 1.1% w/v 620 lt .

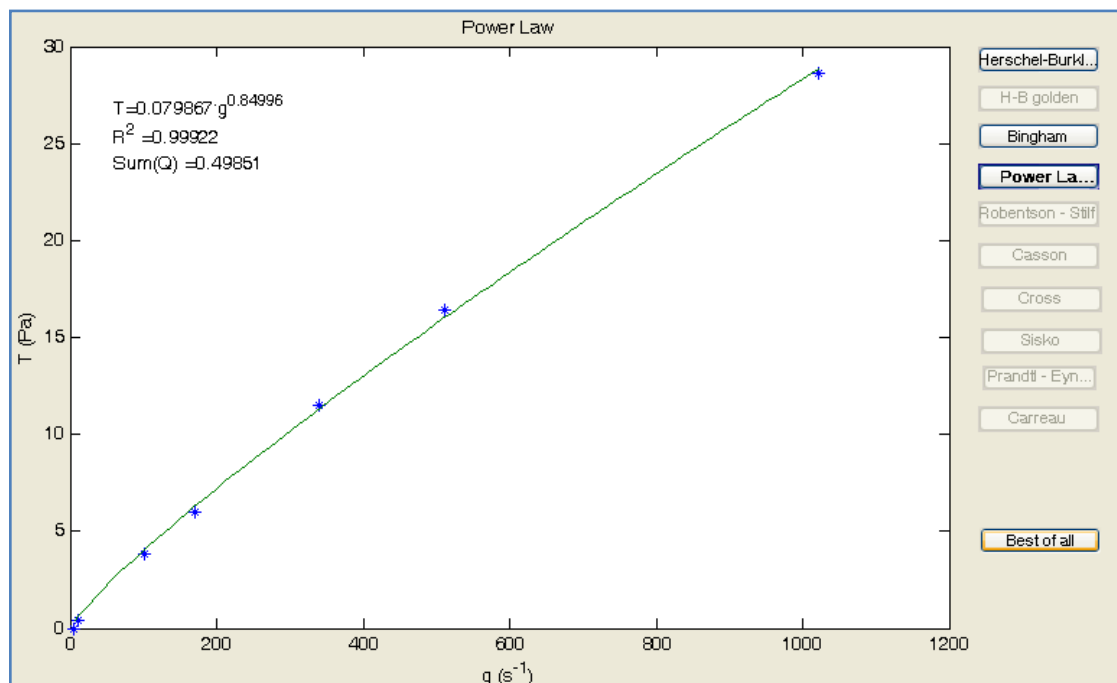
Το ρευστό το οποίο προέκυψε πληρούσε όλες τις προδιαγραφές που είχαμε θέσει όσο αφορά την ρεολογία, αλλά όχι και της μετάβασης στην Τυρβώδη περιοχή ώστε να μπορέσει να γίνει αναλυτική μελέτη της πτώσης πίεσης με το συγκεκριμένο ρευστό. Εξαιτίας αυτού του λόγου αποφασίστηκε η προσθήκη στο ήδη υπάρχον

ρευστό επιπλέον ποσότητας CMC ώστε να μελετηθεί αν μεγαλύτερη συγκέντρωση CMC μπορεί να μας δώσει ένα ρευστό το οποίο θα πληρεί όλες τις απαιτήσεις μας.

Προστέθηκαν 248 gr CMC στο ήδη υπάρχον ρευστό CMC, συγκέντρωσης 1.1% w/v, χρησιμοποιώντας την ίδια διαδικασία ανάμειξης και αναμονής για ωρίμανση με το αρχικό δείγμα, προέκυψε ρευστό συγκέντρωσης 1.5% w/v με 930 gr CMC σε 620 lt νερού βρύσης. Στην συνέχεια έγινε μέτρηση των ρεολογικών ιδιοτήτων του ρευστού και η ανάλυση τους με το πρόγραμμα “Best Fit” έδωσε τα παρακάτω αποτελέσματα (Πίνακας 10.5, Ρεόγραμμα 10.5).

Ταυτότητα Ρευστού (Συγκέντρωση CMC)	Είδος Ρευστού	τ_0 (Pa)	K (Pas ⁿ)	n	$\Sigma \Sigma R^2$	ΣQ^2
CMC 1.5% w/v 620 lt	Power Law	0	0.0799	0.85	0.999	0.498

Πίνακας 10.5: Ρεολογικά χαρακτηριστικά ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.5% w/v 620 lt.



Ρεόγραμμα 10.5: CMC 1.5% w/v 620 lt .

Το ρευστό το οποίο προέκυψε από την τελευταία διαδικασία ήταν ρευστό τύπου Power Law, κάτι το οποίο δεν μας ενδιαφέρει και έτσι η χρήση ρευστού το οποίο θα έχει σαν κύριο συστατικό το CMC απορρίπτεται. Επίσης δεν επιχειρήθηκε η παρασκευή ρευστού μεγαλύτερης συγκέντρωσης σε CMC εξαιτίας ότι το ρευστό μας σε περιεκτικότητα 1.5% w/v είναι αρκετά παχύρρεστο και μια επιπλέον προσθήκη υλικού θα προκαλούσε παρόμοια προβλήματα “κολλήματος” των οργάνων μέτρησης πτώσης πίεσης, όπως συνέβη στην περίπτωση του ρευστού με Carborol.

Παρά την μη επιλογή του CMC για συστατικό του πολφού μας από τα πειράματα τόσο σε μικρή αλλά και μεγάλη κλίμακα προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Θετικά Συμπεράσματα.

- Το ρευστό το οποίο δημιουργείται είναι διαφανές και μπορούν να μελετηθούν οπτικά, περαιτέρω ιδιότητες όπως μεταφορά θραυσμάτων (cutting transfer).
- Εύκολο στην παρασκευή ρευστό.
- Η μέτρηση πτώσης πίεσης για ρευστό CMC μπορεί να γίνει λίγες ώρες μετά την παρασκευή του αφού δεν απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα για να ενυδατωθεί.
- Μπορεί να δώσει σε διαφορετικές συγκεντρώσεις, διαφορετικού είδους ρευστά.

Αρνητικά Συμπεράσματα.

- Υψηλό κόστος για την παρασκευή δειγμάτων κλίμακας 600 λίτρων.
- Παρασκευή ρευστού Herschel-Bulkley, αλλά εκτός των ρεολογικών ορίων τα οποία είχαμε θέσει.

Προσθήκη Μπεντονίτη σε πολφό CMC.

Μετά το πέρας της μελέτης των δειγμάτων με CMC, και εξαιτίας του ότι αδυνατούσαν να μας δώσουν ρευστό Herschel-Bulkley, γεννήθηκε η ιδέα να προστεθούν στο δείγμα συγκέντρωσης 1.5% w/v CMC 620 lt, μικρές ποσότητες μπεντονίτη, ώστε να μπορέσουμε να αυξήσουμε την τιμή της μεταβλητής τ_0 και να μελετήσουμε εάν αυτό το καινούριο μείγμα πληρεί τις ρεολογικές απαιτήσεις τις

οποίες έχουμε θέσει, αλλά και τις απαιτήσεις όσο αφορά την ροή του ρευστού που μπορούμε να επιτύχουμε στο μοντέλο της οριζόντιας γεώτρησης. Ο λόγος μη χρήσης μπεντονίτη αποκλειστικά στο σύστημα ροής προτιμήθηκε κατά την διαδικασία επιλογής του κατάλληλου ρευστού, επειδή ο πολφός μπεντονίτη δεν είναι διαφανές ρευστό όπως τα CMC, Carbopol 980 και PAC. Η απαίτηση για παρασκευή διαφανούς ρευστού προέκυψε από την επιθυμία για οπτική μελέτη της μεταφοράς σωματιδίων στο σύστημα ροής.

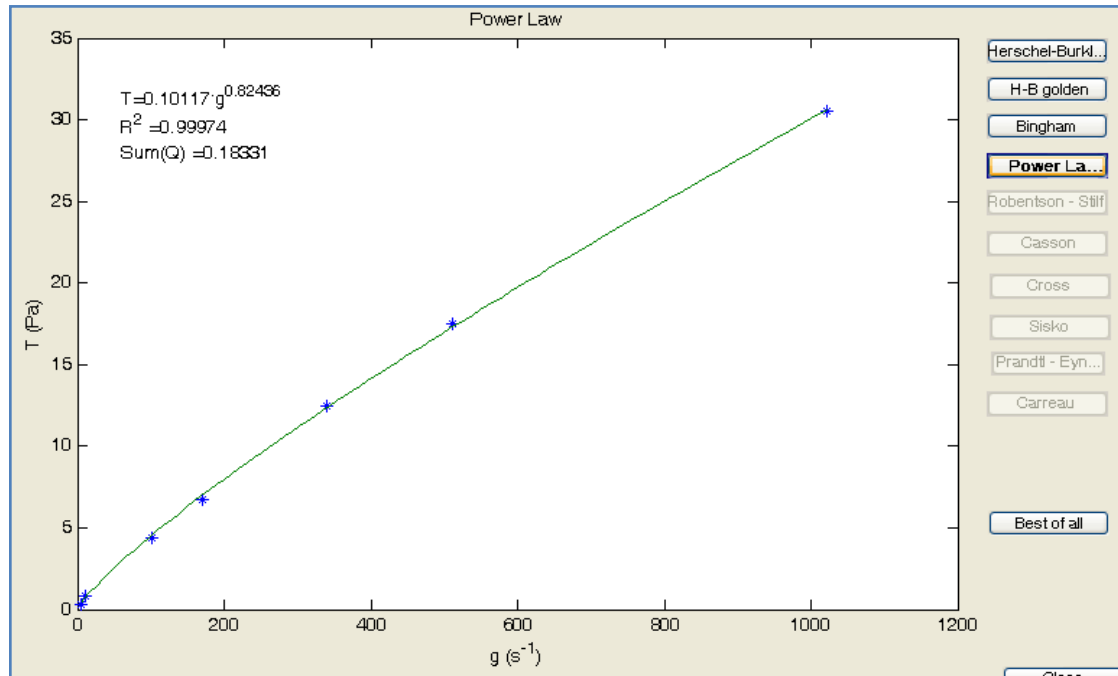
Η προσθήκη του μπεντονίτη έγινε στο ήδη υπάρχων δείγμα CMC, σε ποσότητα 0.25% w/v, δηλαδή 1550 gr μπεντονίτη, και η ανάμειξη του μίγματος έγινε με την μέθοδο που περιγράψαμε στην ενότητα παρασκευής των δειγμάτων με αναμονή μιας ημέρας έτσι ώστε να ενυδατωθεί πλήρως ο μπεντονίτης. Στο καινούριο ρευστό το οποίο είχαμε παρασκευάσει μετρήσαμε τις ρεολογικές του ιδιότητες, και από την ανάλυση των δεδομένων προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα (Πίνακας 10.6, Ρεόγραμμα 10.6). Ο λόγος για τον οποίο έγιναν δύο μετρήσεις για τον προσδιορισμό των ρεολογικών ιδιοτήτων του ρευστού μας είναι επειδή θέλαμε να διαπιστώσουμε εάν τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του πολφού παρουσιάζουν σταθερότητα με την πάροδο του χρόνου. Για αυτό τον λόγο έγινε η πρώτη μέτρηση μετά την ενυδάτωση του μίγματος και η δεύτερη μέτρηση μια μέρα μετά.

Ταυτότητα Ρευστού (Συγκέντρωση CMC)	Είδος Ρευστού	τ_0 (Pa)	K (Pas ⁿ)	n	$\Sigma \Sigma R^2$
CMC 1.5% w/v & μπεντονίτη 0.25% w/v 620 lt Μέτρηση 1	Power Law	0	0.12	0.808	0.999
CMC 1.5% w/v & μπεντονίτης 0.25% w/v 620 lt Μέτρηση 2	Power Law	0	0.10	0.824	0.999

Πίνακας 10.6: Ρεολογικά χαρακτηριστικά ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.5% w/v & μπεντονίτη 0.25% w/v 620 lt.

Όπως είναι εμφανές παρά την προσθήκη του μπεντονίτη το ρευστό παρέμεινε Power Law ως προς το είδος. Περαιτέρω προσθήκη μπεντονίτη δεν έγινε γιατί το ρευστό το οποίο είχαμε παρασκευάσει ήταν στα όρια ώστε να μπορεί να μετρηθεί η πτώση πίεσης στο σύστημα μας, εξαιτίας του ότι το ρευστό θα γινόταν παχύρευστο

σε βαθμό ώστε να μην είναι δυνατή η σωστή λειτουργία των μετρητικών συστημάτων πτώσης πίεσης.



Ρεόγραμμα 10.6: CMC συγκέντρωσης 1.5% w/v & μπεντονίτη 0.2 % w/v 620 lt..

Συμπεράσματα για πολφούς CMC.

Παρόλη την μη επιθυμητή εμφάνιση των ζητούμενων ιδιοτήτων από τα ρευστά τα οποία παρασκευάσαμε, εξήχθηκαν πολλά συμπεράσματα όσο αφορά, τα ρευστά CMC. Το κυριότερο συμπέρασμα ήταν ότι η κατασκευή ρευστού με την προσθήκη CMC, έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ρευστού Power Law έως την συγκέντρωση που μελετήθηκε, αλλά και με την μετέπειτα προσθήκη μπεντονίτη.

Ένα ακόμη πολύ σημαντικό συμπέρασμα το οποίο εξήχθη και είναι κυρίως κάτι το οποίο παρατηρήθηκε από την εμπειρία της παρασκευής και μελέτης των ρευστών διάτρησης, όλα αυτά τα χρόνια, ήταν ότι το ρευστό το οποίο παρασκευάστηκε με την προσθήκη του μπεντονίτη στο ρευστό CMC, ήταν, ότι τόσο μακροσκοπικά όσο και από άποψη υφής αλλά και κυκλοφορίας των ρευστών αυτών

μέσα στο σύστημα της οριζόντιας γεώτρησης, διέφεραν από τα μέχρι τώρα ρευστά τα οποία είχαν μελετηθεί.

Αυτή η παρατήρηση σε συνδυασμό με την παρατήρηση ότι κατά την διάρκεια της κυκλοφορίας του ρευστού μέσα στο σύστημα της οριζόντιας γεώτρησης, είχαμε μια αύξηση της θερμοκρασίας (μικρή μεταβολή της τάξεως έως 2 °C) του ρευστού κάτι το οποίο γέννησε την περιέργεια να μελετήσουμε την επίδραση της θερμοκρασίας σε αυτά τα ρευστά.

Μελέτη επίδρασης θερμοκρασίας σε ρευστά CMC, και ρευστά CMC με μπεντονίτη.

Για την μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας σε αυτά τα ρευστά αποφασίστηκε να μελετηθεί η μεταβολή των ρεολογικών ιδιοτήτων των ρευστών εάν τα θερμάνουμε στην συσκευή ιξωδομέτρησης, και να αναλύσουμε τις ρεολογικές τους ικανότητες ώστε να βγουν κάποια συμπεράσματα, όσο αφορά την επίδραση της θερμοκρασίας σε αυτά.

Ο σκοπός για τον οποίο έγινε αυτή η μελέτη σε διάφορες θερμοκρασίες, έγινε για τον λόγο ότι σε κανονικές συνθήκες διάτρησης, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η αυξανόμενη θερμοκρασία των γεωλογικών σχηματισμών που διατρώνται, σε σχέση με το βάθος, αυξάνει και την θερμοκρασία του ρευστού διάτρησης, η οποία με την σειρά της επιδρά στις ρεολογικές ιδιότητες του ρευστού διάτρησης.

Σκοπός μας ήταν, για κάθε συγκεκριμένο ρευστό στο οποίο μελετήσαμε την θερμοκρασία, να εξάγουμε στοιχεία για την ρεολογική του συμπεριφορά, θεωρώντας ότι οι διάφορες θερμοκρασίες τις οποίες μελετήσαμε αντιπροσωπεύουν την θερμοκρασία του ρευστού σε διάφορα βάθη.

Η μέτρηση των ρεολογικών ιδιοτήτων των ρευστών έγινε με την μέθοδο η οποία αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, με την διαφορά ότι τώρα για να αυξηθεί η θερμοκρασία, θερμαίναμε το ρευστό μας στο ειδικό δοχείο του ιξωδομέτρου M 3500, με την ρύθμιση της επιθυμητής θερμοκρασίας μέσα από το

πρόγραμμα ελέγχου του. Για να έρθει το ρευστό στην θερμοκρασία την οποία είχαμε ορίσει, ζεσταινόταν για διάστημα 10 λεπτών με ταυτόχρονη ανάμειξη του ρευστού με την χρήση του κυλίνδρου του ιξωδομέτρου σε ταχύτητα 3 rpm. Αυτή η διαδικασία γινόταν κάθε φορά μεταξύ των μετρήσεων για τις ρεολογικές ιδιότητες του ρευστού, και για κάθε θερμοκρασία. Η μελέτη αυτή έγινε για τέσσερα είδη ρευστών :

1. Πολφός CMC συγκέντρωσης 0.9% w/v σε κλίμακα 620 lt .
2. Πολφός CMC και μπεντονίτη συγκέντρωσης 1.5% w/v και 0.25% w/v, αντίστοιχα σε κλίμακα 620 lt.
3. Πολφός CMC και μπεντονίτη συγκέντρωσης 0.5% w/v και 1.25% w/v, αντίστοιχα σε κλίμακα 500 ml.
4. Πολφός CMC και μπεντονίτη συγκέντρωσης 1% w/v και 2.5% w/v, αντίστοιχα σε κλίμακα 500 ml.

Στα αποτελέσματα παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα για το κάθε ρευστό και η μεταβολή των ρεολογικών τους παραμέτρων με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης παρουσιάζονται υπολογισμοί $\Delta p - Q$ για το σύστημα ροής του εργαστηρίου για την κάθε θερμοκρασία που μελετήθηκε, με υπολογισμούς σύμφωνα με τα μοντέλα TUC και API όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3.

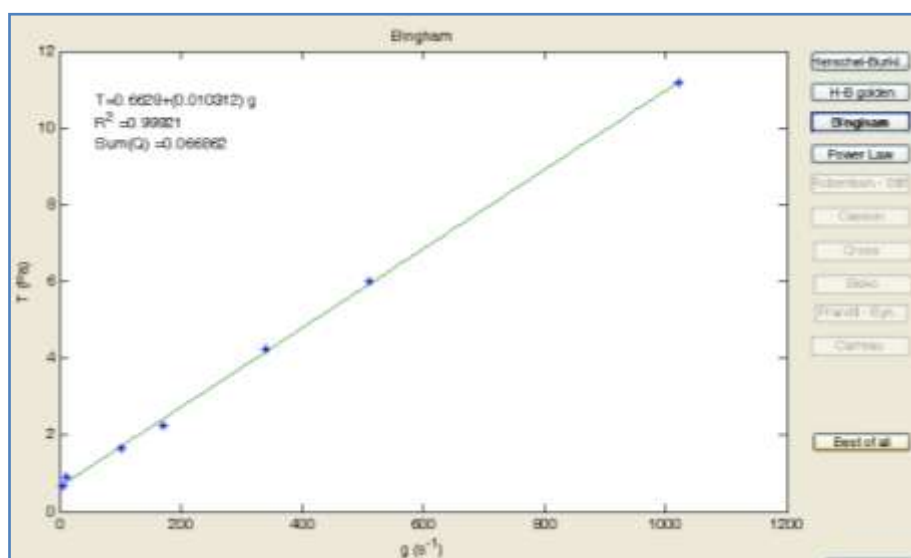
10.2.4. Πολφός CMC συγκέντρωσης 0.9% w/v σε κλίμακα 620 lt σε διάφορες θερμοκρασίες.

Από την ανάλυση των ρεολογικών ιδιοτήτων του συγκεκριμένου ρευστού σε σχέση με την επίδραση της θερμοκρασίας, καθώς και από την χρήση των ρεολογικών δεδομένων στο πρόγραμμα “Rheology”, για παροχή $0.0025 \text{ m}^3/\text{sec}$ ($\approx 150 \text{ kg/min}$) για υποθετική κυκλοφορία στο μοντέλο οριζόντιας γεώτρησης του εργαστηρίου (ο λόγος για τον οποίο επιλέχτηκε αυτή η παροχή γιατί αποτελεί μια ενδιάμεση τιμή κυκλοφορίας σε σχέση με το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο λειτουργίας του μοντέλου ροής), προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα (Πίνακας 10.7, Ρεόγραμμα 10.7) :

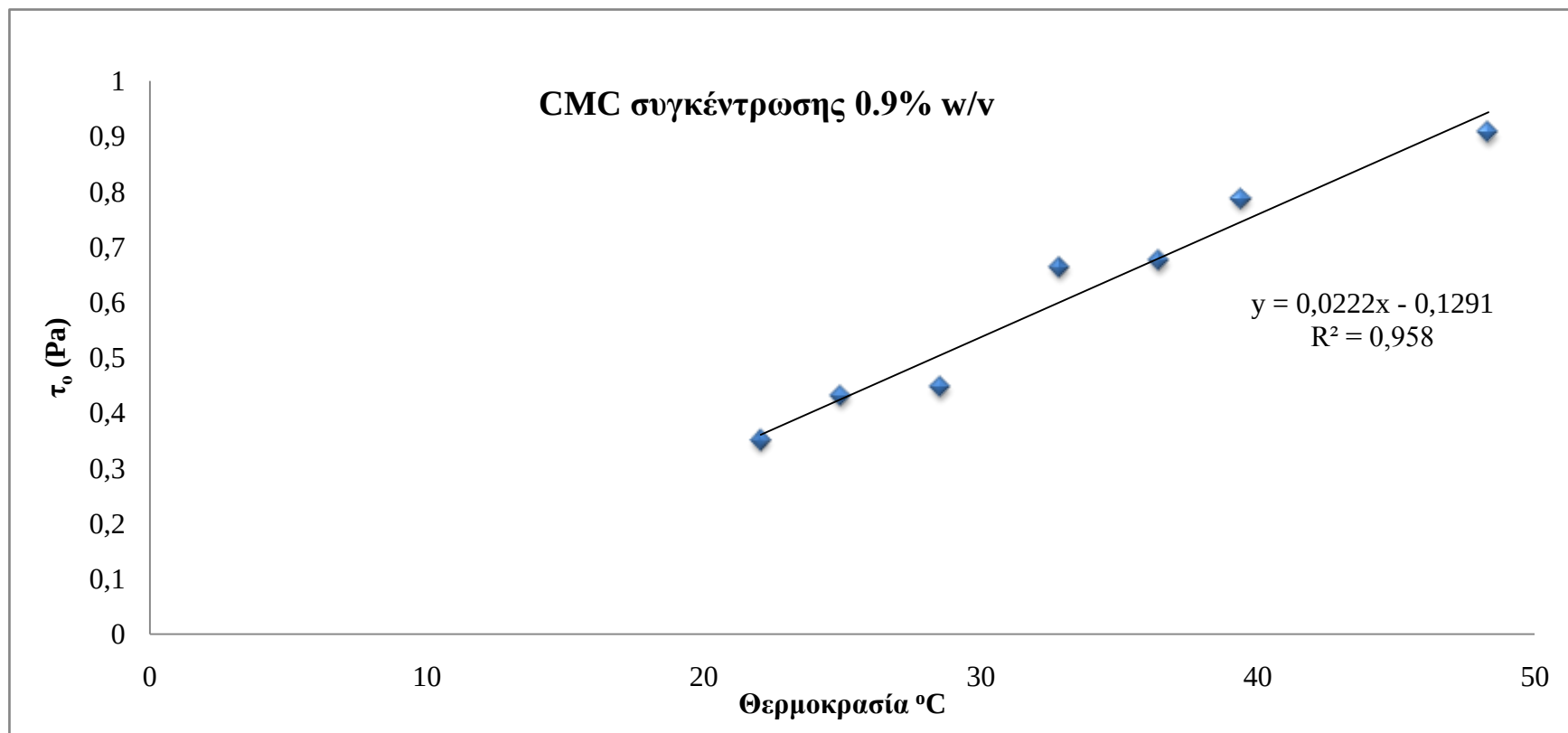
Θερμοκρασία °C	Είδος Ρευστού	τ_0 (Pa)	K (Pas ⁿ)	n	$\Sigma \Sigma R^2$
22.1	Herschel-Bulkley	0.35	0.0206	0.9435	0.999
25.0	Herschel-Bulkley	0.43	0.0168	0.9613	0.999
28.5	Herschel-Bulkley	0.45	0.0140	0.9763	0.999
32.9	Bingham Plastic	0.66	0.0103	1.0000	0.999
36.4	Bingham Plastic	0.67	0.0095	1.0000	0.998
39.4	Bingham Plastic	0.79	0.0086	1.0000	0.997
48.3	Bingham Plastic	0.91	0.0068	1.0000	0.997

Πίνακας 10.7: Ρεολογικά χαρακτηριστικά ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.9% w/v σε διάφορες θερμοκρασίες.

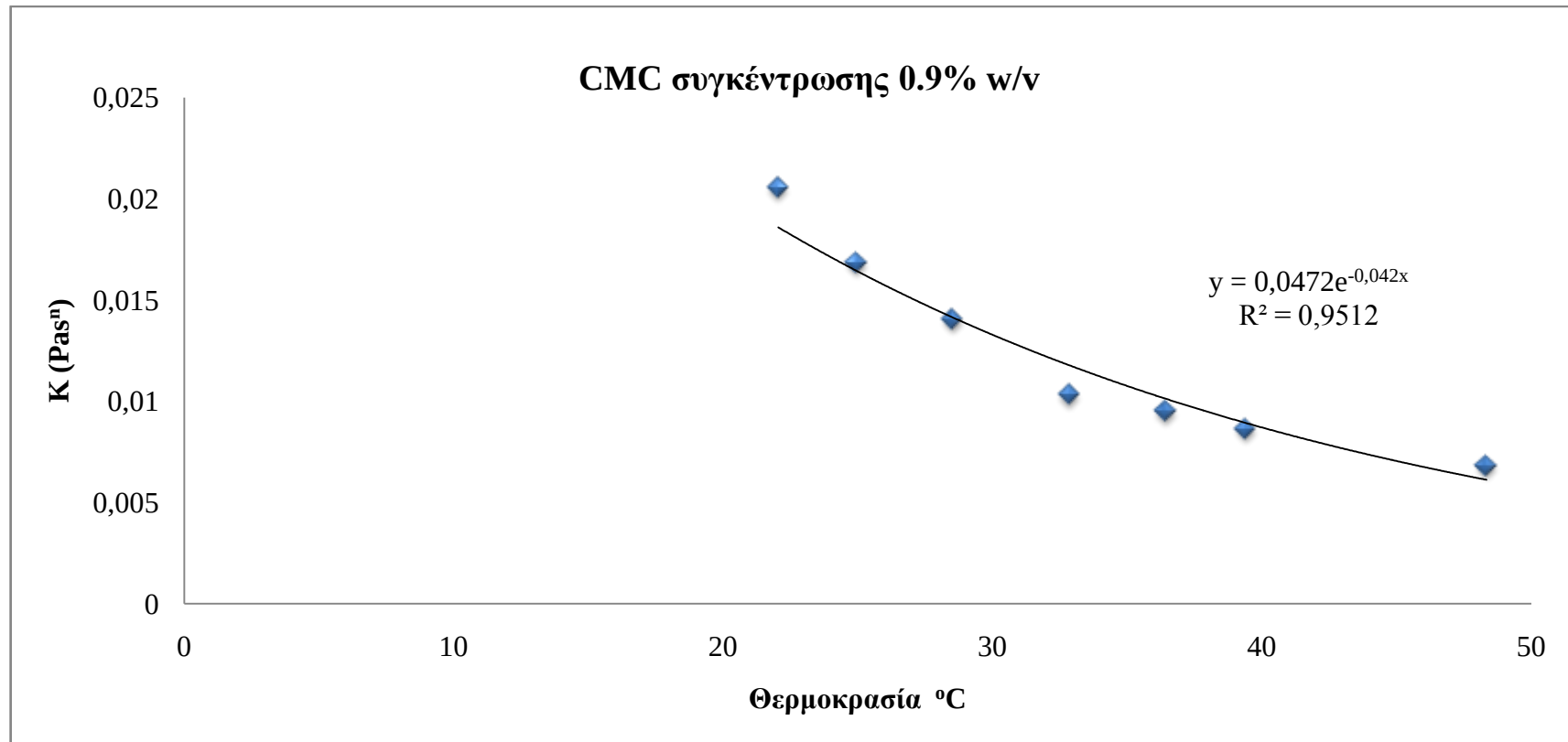
Στον Πίνακα 10.7 βλέπουμε ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας το ρευστό το οποίο μελετάμε μετατρέπεται από Herschel-Bulkley σε Bingham Plastic, δηλαδή έχουμε μια αύξηση της παραμέτρου n (τείνει στη μονάδα) με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης παρατηρείται ότι υπάρχει πολύ καλή προσέγγιση όσο αναφορά τον βαθμό συσχέτισης R^2 . Ενδεικτικά παρουσιάζεται και το Ρεόγραμμα 10.7 του πολφού CMC συγκέντρωσης 0.9% w/v σε κλίμακα 620 lt για θερμοκρασία 32.9 °C. Παρακάτω παρουσιάζεται η επίπτωση της αύξησης της θερμοκρασίας στην τάση διολίσθησης τ_0 (Διάγραμμα 10.1), τον οδηγό συνάφειας K (Διάγραμμα 10.2) και τον οδηγό συμπεριφοράς της ροής n (Διάγραμμα 10.3).



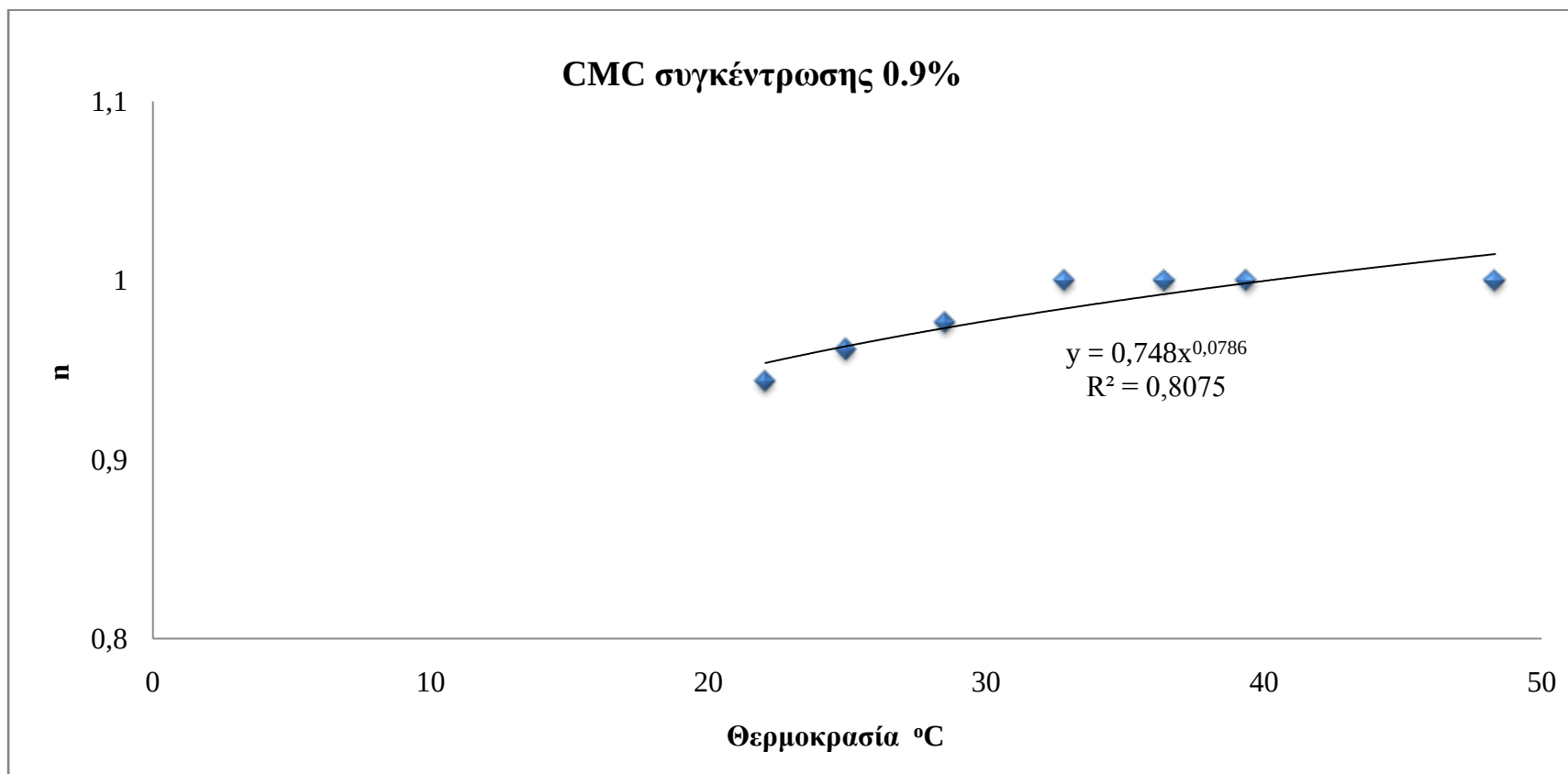
Ρεόγραμμα 10.7: CMC συγκέντρωσης 0.9% w/v 620 lt σε θερμοκρασία 32.9 °C.



Διάγραμμα 10.1: Μεταβολή παραμέτρου τ_0 , ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.9% w/v 620 lt σε διάφορες θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 10.2: Μεταβολή παραμέτρου K , ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.9% w/v 620 lt σε διάφορες θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 10.3: Μεταβολή παραμέτρου n , ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.9% w/v 620 lt σε διάφορες θερμοκρασίες.

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι με αύξηση της θερμοκρασίας η τάση διολίσθησης τ_o αυξάνεται (Διάγραμμα 10.1), οδηγός συνάφειας K μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (Διάγραμμα 10.2) και ο οδηγός συμπεριφοράς της ροής n αυξάνεται μέχρι να πάρει την τιμή ένα (Διάγραμμα 10.3) και να μεταβάλει το είδος του ρευστού από Herschel-Bulkley σε Bingham Plastic.

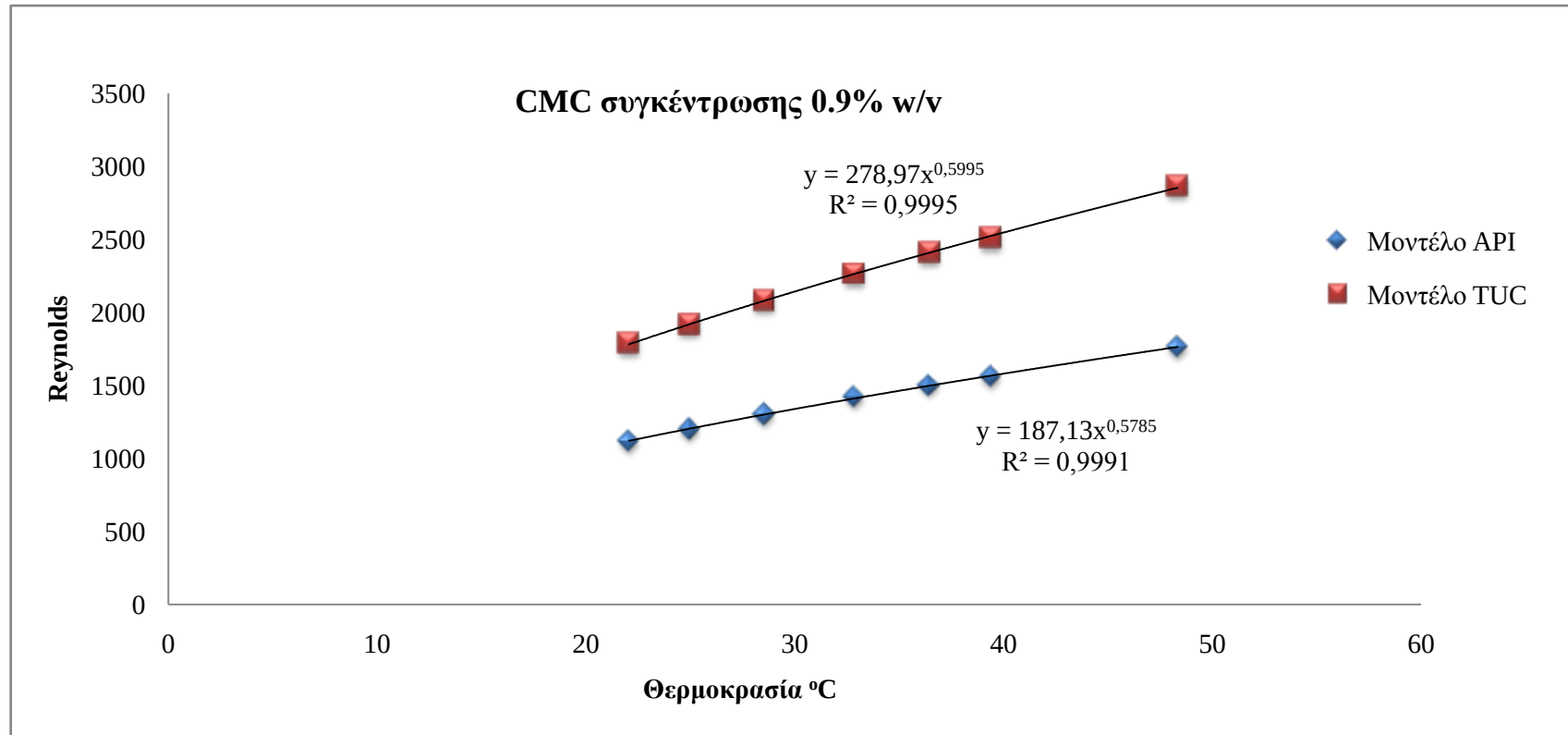
Στην συνέχεια παρουσιάζεται η επίπτωση της θερμοκρασίας στην τιμή της πτώσης πίεσης και του αριθμού Reynolds για υποθετική κυκλοφορία του ρευστού στο σύστημα ροής του εργαστηρίου, για τα μοντέλα API και TUC (Πίνακας 10.8 και 10.9) και οι μεταβολές στον αριθμό Reynolds και στην πτώση πίεσης από την αύξηση της θερμοκρασίας παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 10.4 και 10.5 αντίστοιχα.

Θερμοκρασία °C	Πτώση Πίεσης Μοντέλο API (Pa/m)	Re API	Re _{critical1} API	Re _{critical2} API	Είδος Ροής Μοντέλο API
22.1	893.4	1118.21	2177.4	3077.4	Στρωτή
25.0	832.5	1200.0	2153.0	3053.0	Στρωτή
28.5	768.1	1300.6	2132.5	3032.5	Στρωτή
32.9	706.7	1423.5	2100.0	3000.0	Στρωτή
36.4	664.9	1502.4	2100.0	3000.0	Στρωτή
39.4	641.4	1557.5	2100.0	3000.0	Στρωτή
48.3	568.0	1760.8	2100.0	3000.0	Στρωτή

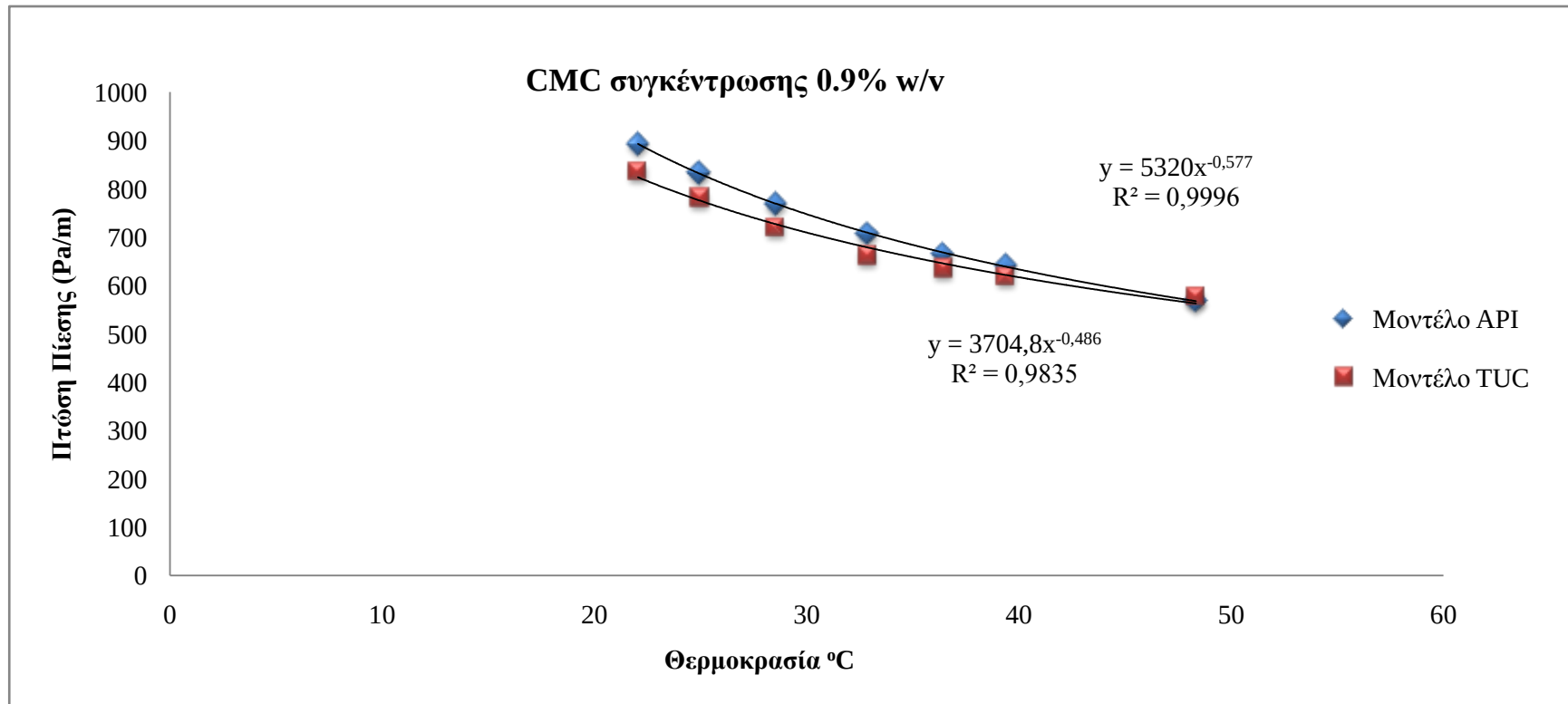
Πίνακας 10.8: Υπολογισμός πτώσης πίεσης με το μοντέλο API, ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.9% w/v 620 lt σε διάφορες θερμοκρασίες.

Θερμοκρασία °C	Πτώση Πίεσης Μοντέλο TUC (Pa/m)	Re TUC	Re _{critical1} TUC	Re _{critical2} TUC	Είδος Ροής Μοντέλο TUC
22.1	836.9	1786.9	2254.4	3154.4	Στρωτή
25.0	781.6	1918.0	2264.6	3164.6	Στρωτή
28.5	720.9	2079.4	2264.6	3164.6	Στρωτή
32.9	662.3	2263.6	2326.6	3226.6	Στρωτή
36.4	636.0	2411.0	2339.8	3239.8	Μεταβατική
39.4	619.7	2506.4	2385.1	3285.1	Μεταβατική
48.3	576.2	2867.1	2449.1	3349.1	Μεταβατική

Πίνακας 10.9: Υπολογισμός πτώσης πίεσης με το μοντέλο TUC, ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.9% w/v 620 lt σε διάφορες θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 10.4: Μεταβολή αριθμού Reynolds, ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.9% w/v 620 lt σε διάφορες θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 10.5: Μεταβολή πτώσης πίεσης , ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.9% w/v 620 lt σε διάφορες θερμοκρασίες.

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι με αύξηση της θερμοκρασίας ο αριθμός Reynolds αυξάνεται (Διάγραμμα 10.4) ενώ η πτώση πίεσης για υποθετική κυκλοφορία στο μοντέλο ροής του εργαστηρίου μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (Διάγραμμα 10.5).

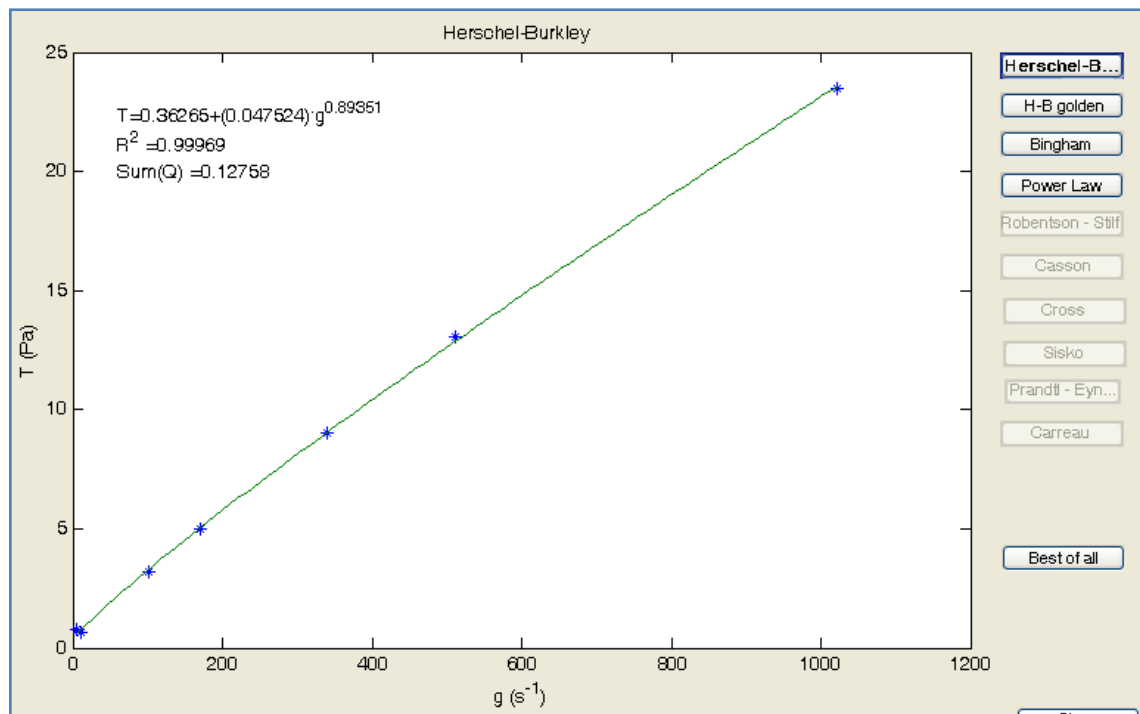
10.2.5. Πολφός CMC συγκέντρωσης 1.5% w/v και μπεντονίτη 0.25% w/v, αντίστοιχα σε κλίμακα 620 lt σε διάφορες θερμοκρασίες.

Από την ανάλυση των ρεολογικών ιδιοτήτων του συγκεκριμένου ρευστού σε σχέση με την επίδραση της θερμοκρασίας προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα (Πίνακας 10.10, Ρεόγραμμα 10.8) :

Θερμοκρασία °C	Είδος Ρευστού	τ_0 (Pa)	K (Pas ⁿ)	n	$\Sigma \Sigma R^2$
23	Power Law	0.00	0.1012	0.8244	0.999
25	Power Law	0.00	0.0948	0.8264	0.999
30	Herschel-Bulkley	0.15	0.0669	0.8612	0.999
35	Herschel-Bulkley	0.36	0.0475	0.8935	0.999
39	Herschel-Bulkley	0.52	0.0389	0.9049	0.999
45	Herschel-Bulkley	0.79	0.0247	0.9494	0.999
50	Herschel-Bulkley	0.82	0.0232	0.9406	0.999

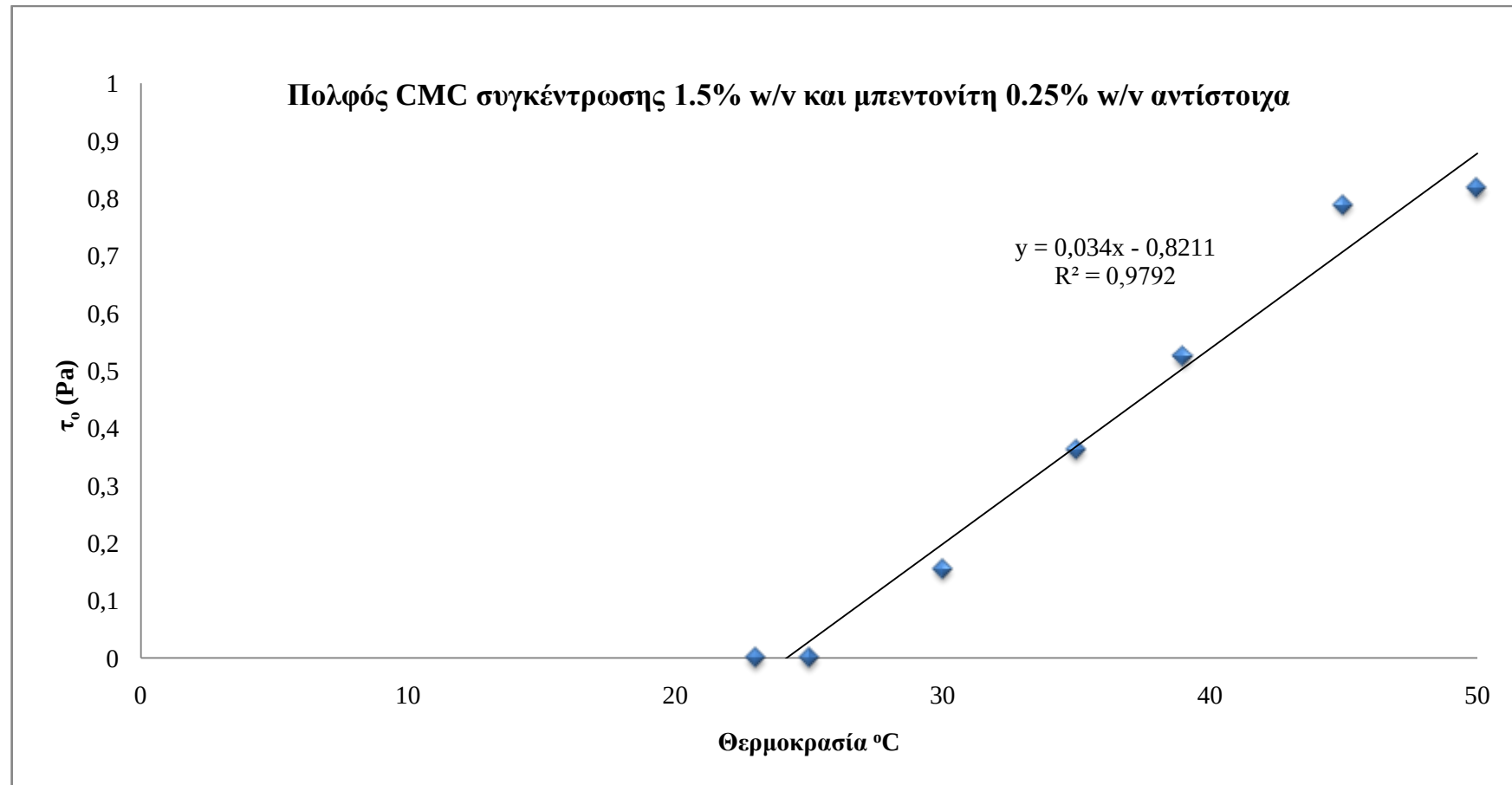
Πίνακας 10.10: Ρεολογικά χαρακτηριστικά ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.5 % w/v και μπεντονίτη 0.25% w/v αντίστοιχα 620 lt , σε διάφορες θερμοκρασίες.

Από τον Πίνακα 10.10 και το Διάγραμμα 10.6 παρατηρούμε ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας το ρευστό το οποίο μελετάμε μετατρέπεται από Power Law σε Herschel-Bulkley, δηλαδή έχουμε μια αύξηση της παραμέτρου τ_0 με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης παρατηρείται ότι υπάρχει πολύ καλή προσέγγιση όσο αναφορά τον βαθμό συσχέτισης R^2 . Ενδεικτικά παρουσιάζεται και το ρεόγραμμα του πολφού CMC συγκέντρωσης 1.5 % w/v και μπεντονίτη 0.25% w/v αντίστοιχα 620 lt σε θερμοκρασία 35 °C (Ρεόγραμμα 10.8).

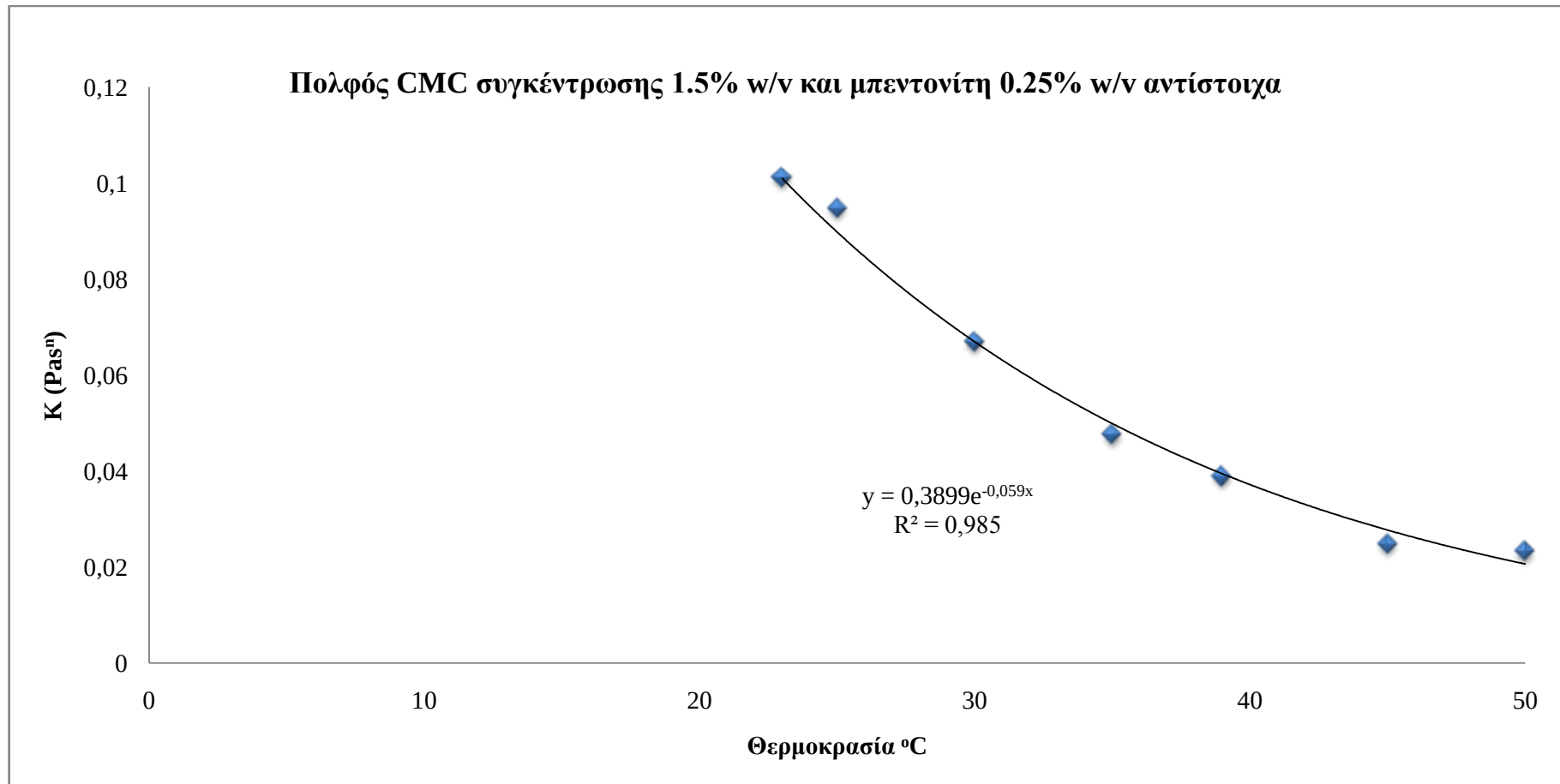


*Περίγραμμα 10.8: CMC συγκέντρωσης 1.5 % w/v και μπεντονίτης 0.25% w/v
αντίστοιχα 620 lt σε θερμοκρασία 35 °C.*

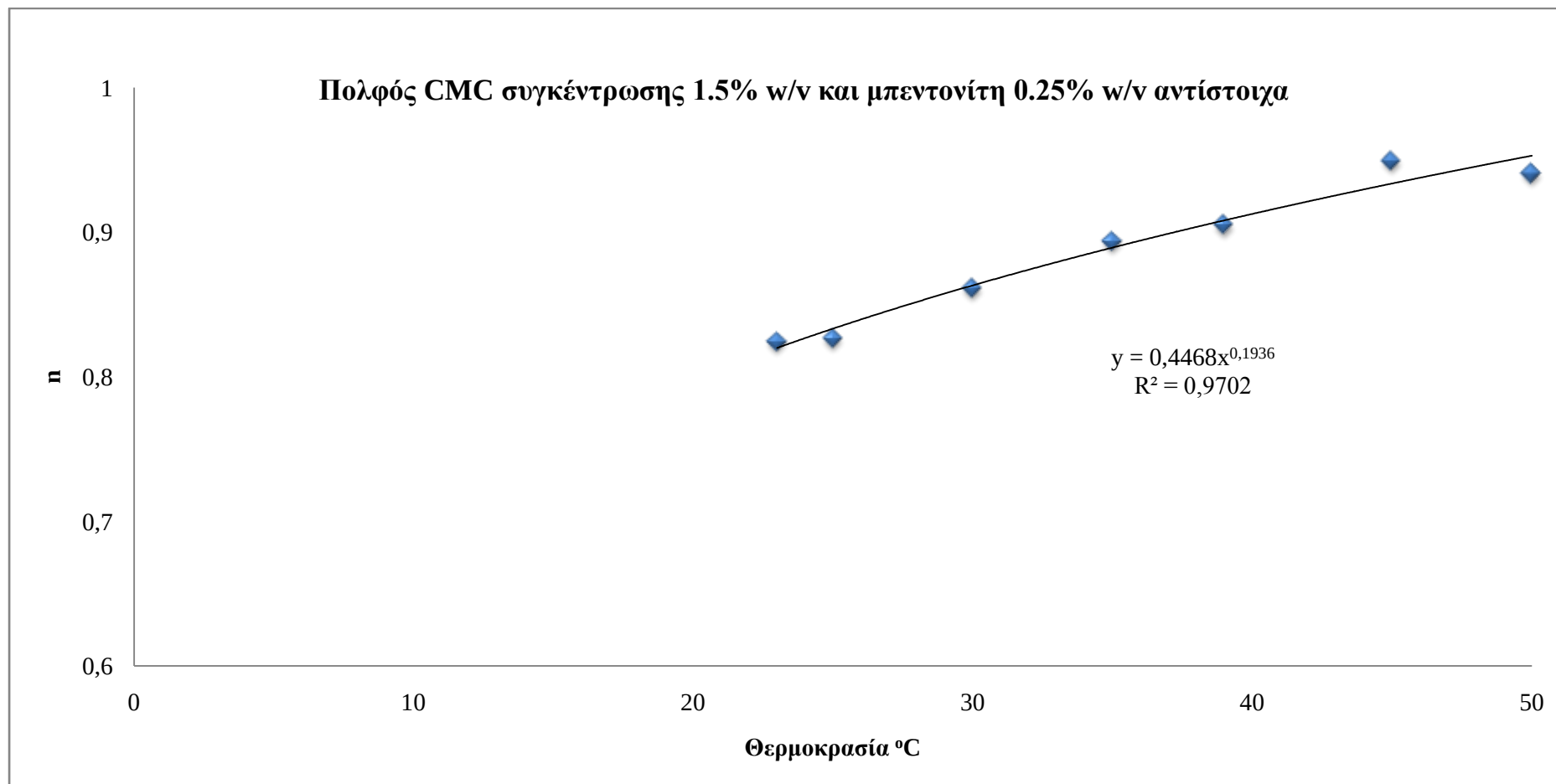
Παρακάτω παρουσιάζεται η επίπτωση της αύξησης της θερμοκρασίας στην τάση διολίσθησης τ_o (Διάγραμμα 10.6), τον οδηγό συνάφειας K (Διάγραμμα 10.7) και τον οδηγό συμπεριφοράς της ροής n (Διάγραμμα 10.8).



Διάγραμμα 10.6: Μεταβολή παραμέτρου τ_0 , ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.5% w/v και μπεντονίτη 0.25% w/v αντίστοιχα 620 lt, σε διάφορες θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 10.7: Μεταβολή παραμέτρου K, ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.5% w/v και μπεντονίτη 0.25% w/v αντίστοιχα 620 lt, σε διάφορες θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 10.8: Μεταβολή παραμέτρου n , ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.5% w/v και μπεντονίτη 0.25% w/v αντίστοιχα 620lt, σε διάφορες θερμοκρασίες.

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι με αύξηση της θερμοκρασίας η τάση διολίσθησης τ_o αυξάνεται (Διάγραμμα 10.6). Ο οδηγός συνάφειας K μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (Διάγραμμα 10.7), ενώ ο οδηγός συμπεριφοράς της ροής n αυξάνεται και τείνει στην μονάδα (Διάγραμμα 10.8) και να μεταβάλει το είδος του ρευστού σε Bingham Plastic.

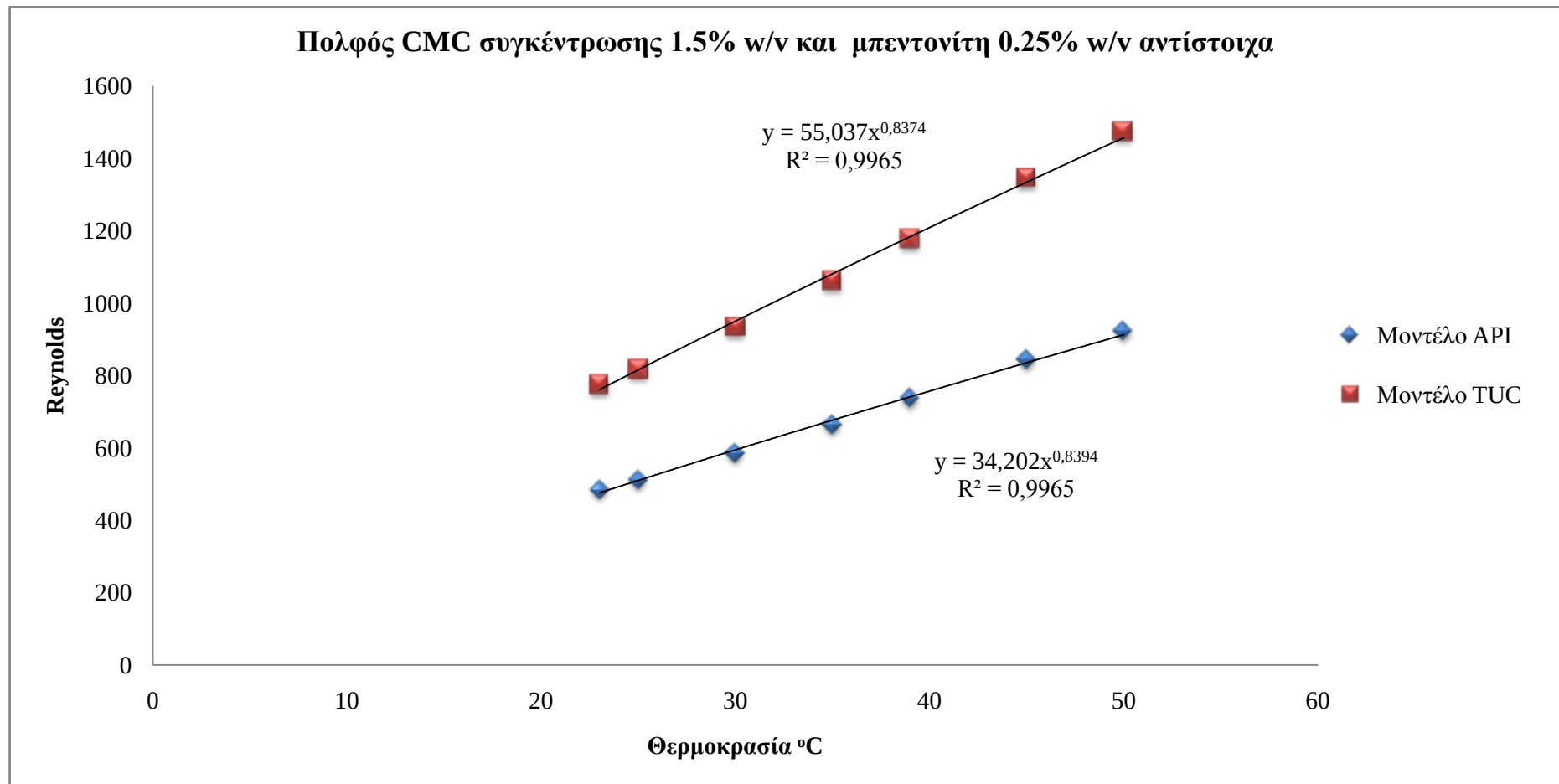
Στην συνέχεια, με την χρήση των ρεολογικών δεδομένων στο πρόγραμμα “Rheology”, παρουσιάζεται για παροχή $0.0025 \text{ m}^3/\text{sec}$ ($\approx 150 \text{ kg/min}$) και υποθετική κυκλοφορία στο μοντέλο του μοντέλου ροής του εργαστηρίου, η επίπτωση της θερμοκρασίας στην τιμή της πτώσης πίεσης και του αριθμού Reynolds για τα μοντέλα API και TUC. Παρακάτω παρουσιάζεται η επίπτωση της θερμοκρασίας στον αριθμό Reynolds και στην τιμή της πτώσης πίεσης και για υποθετική κυκλοφορία του ρευστού στο σύστημα ροής του εργαστηρίου, για τα μοντέλα API και TUC (Πίνακας 10.11 και 10.12, Διαγράμματα 10.9 και 10.10 αντίστοιχα).

Θερμοκρασία °C	Πτώση Πίεσης Μοντέλο API (Pa/m)	Re API	Re _{critical1} API	Re _{critical2} API	Είδος Ροής Μοντέλο API
23	2062.5	484.4	2340.6	3240.6	Στρωτή
25	1955.3	510.9	2337.9	3237.9	Στρωτή
30	1710.2	584.1	2290.1	3190.1	Στρωτή
35	1505.1	663.7	2245.9	3145.9	Στρωτή
39	1356.3	736.5	2230.3	3130.3	Στρωτή
45	1185.9	842.4	2169.3	3069.3	Στρωτή
50	1081.8	923.4	2181.4	3081.0	Στρωτή

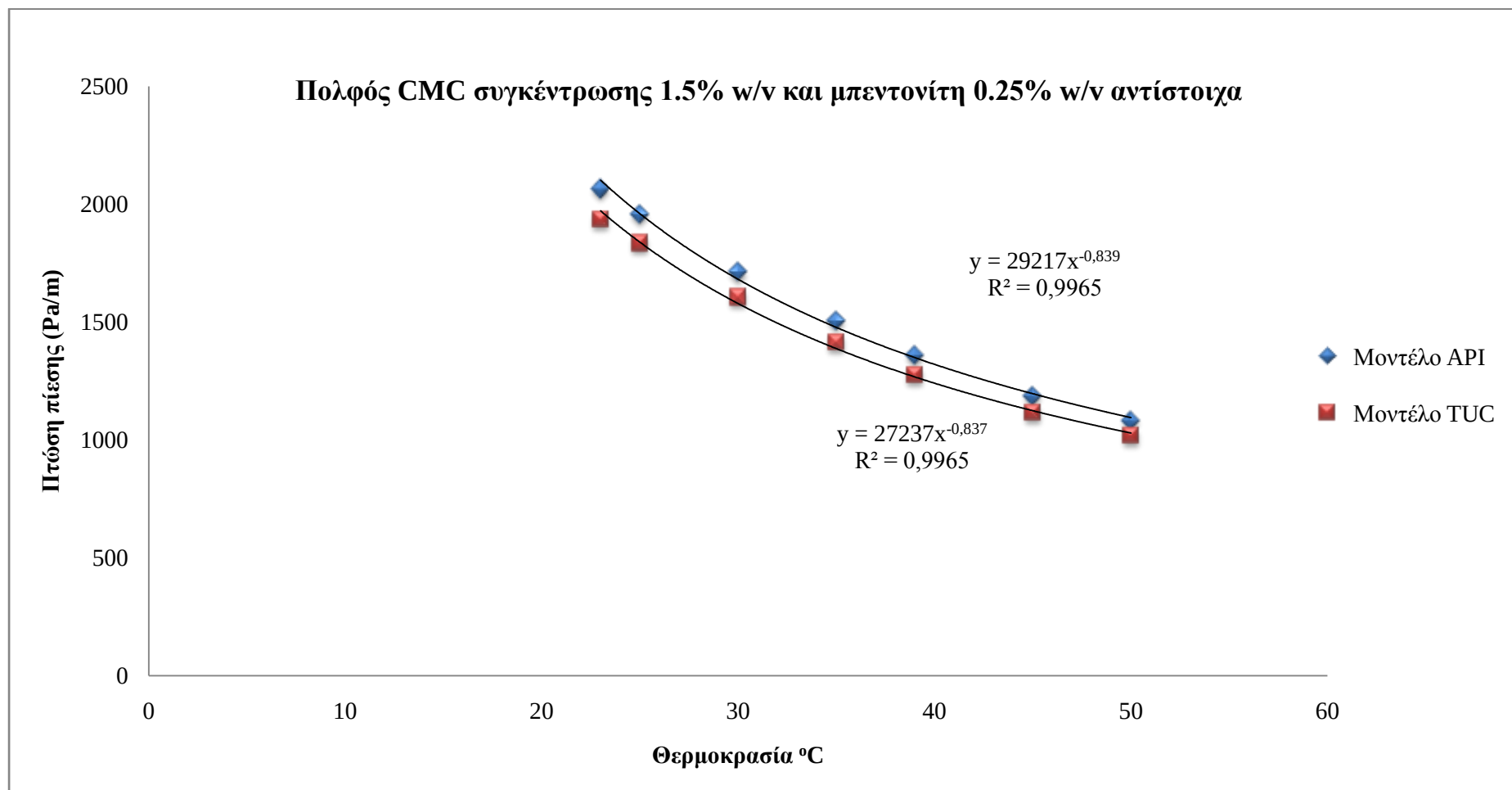
Πίνακας 10.11: Υπολογισμός πτώσης πίεσης με το μοντέλο API, ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.5 % w/v και μπεντονίτη 0.25% w/v αντίστοιχα 620 lt , σε διάφορες θερμοκρασίες.

Θερμοκρασία °C	Πτώση Πίεσης Μοντέλο TUC (Pa/m)	Re TUC	Re _{critical1} TUC	Re _{critical2} TUC	Είδος Ροής Μοντέλο TUC
23	1935.0	774.7	2302.0	3202.0	Στρωτή
25	1834.4	817.2	2299.7	3199.7	Στρωτή
30	1605.4	933.8	2278.1	3178.1	Στρωτή
35	1413.7	1060.4	2274.0	3174.0	Στρωτή
39	1274.5	1176.2	2293.1	3193.2	Στρωτή
45	1113.8	1345.9	2310.0	3210.0	Στρωτή
50	1016.4	1474.9	2338.4	3238.4	Στρωτή

Πίνακας 10.12: Υπολογισμός πτώσης πίεσης με το μοντέλο TUC, ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.5 % w/v και μπεντονίτη 0.25% w/v αντίστοιχα 620 lt , σε διάφορες θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 10.9: Μεταβολή αριθμού Reynolds, ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.5 % w/v και μπεντονίτη 0.25% w/v αντίστοιχα 620 lt , σε διάφορες θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 10.10: Μεταβολή πτώσης πίεσης, ρευστού CMC συγκέντρωσης 1.5 % w/v και μπεντονίτη 0.25% w/v αντίστοιχα 620 lt , σε διάφορες θερμοκρασίες.

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι με αύξηση της θερμοκρασίας ο αριθμός Reynolds αυξάνεται (Διάγραμμα 10.9) ενώ η πτώση πίεσης για υποθετική κυκλοφορία στο μοντέλο ροής του εργαστηρίου μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (Διάγραμμα 10.10).

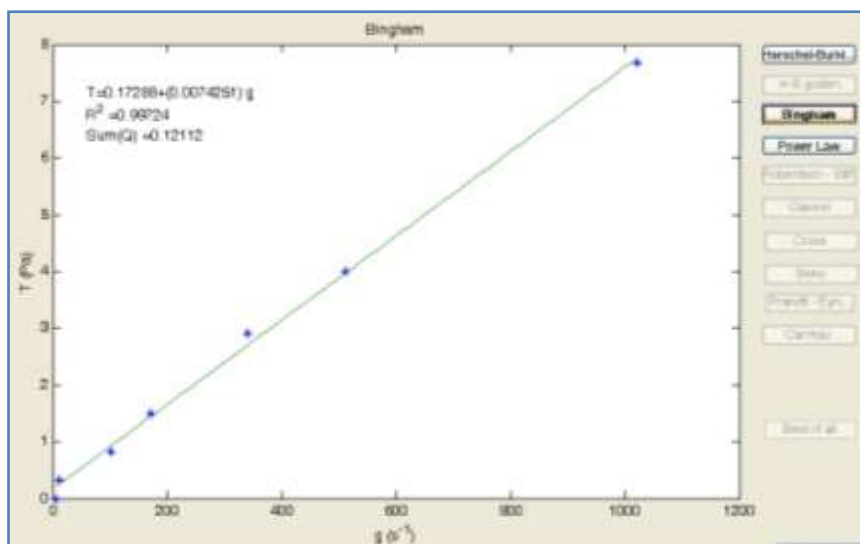
10.2.6. Πολφός CMC συγκέντρωσης 0.5% w/v και μπεντονίτη 1.25% w/v αντίστοιχα σε κλίμακα 500 ml σε διάφορες θερμοκρασίες.

Από την ανάλυση των ρεολογικών ιδιοτήτων του συγκεκριμένου ρευστού σε σχέση με την επίδραση της θερμοκρασίας προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα (Πίνακας 10.13, Ρεόγραμμα 10.9 και 10.10) :

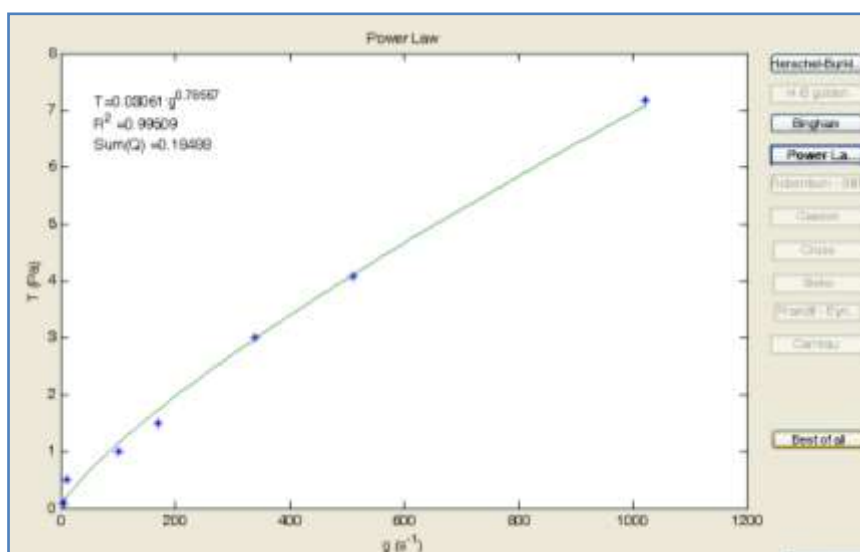
Θερμοκρασία °C	Είδος Ρευστού	τ_y (Pa)	K (Pas ⁿ)	n	$\Sigma \Sigma R^2$
25.6	Power Law	0.00	0.0452	0.7530	0.996
26.3	Power Law	0.00	0.0306	0.8074	0.995
29.2	Bingham Plastic	0.31	0.0077	1.0000	0.998
32.6	Bingham Plastic	0.17	0.0074	1.0000	0.997
35.6	Power Law	0.00	0.0306	0.7856	0.995
43.2	Bingham Plastic	0.44	0.0060	1.0000	0.988
49.5	Bingham Plastic	0.52	0.0055	1.0000	0.997

Πίνακας 10.13: Ρεολογικά χαρακτηριστικά ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.5% w/v και μπεντονίτη 1.25% w/v αντίστοιχα 500 ml, σε διάφορες θερμοκρασίες.

Στον Πίνακα 10.13 βλέπουμε ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας το ρευστό το οποίο μελετάμε μετατρέπεται από Power Law σε Bingham Plastic ενώ στις ενδιάμεσες θερμοκρασίες (32.6 °C & 35.6 °C) παρατηρείται μια ανωμαλία, δηλαδή έχουμε μια αύξηση της παραμέτρου τ_o με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ ο οδηγός συμπεριφοράς της ροής n αυξάνεται μέχρι να πάρει την τιμή ένα . Επίσης παρατηρείται ότι υπάρχει πολύ καλή προσέγγιση όσο αναφορά τον βαθμό συσχέτισης R^2 . Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα ρεογράμματα του πολφού CMC συγκέντρωσης 0.5% w/v και μπεντονίτη 1.25% w/v αντίστοιχα 500 ml σε θερμοκρασία 32.6 & 35.6 °C (Ρεογραμμα 10.9 και 10.10).

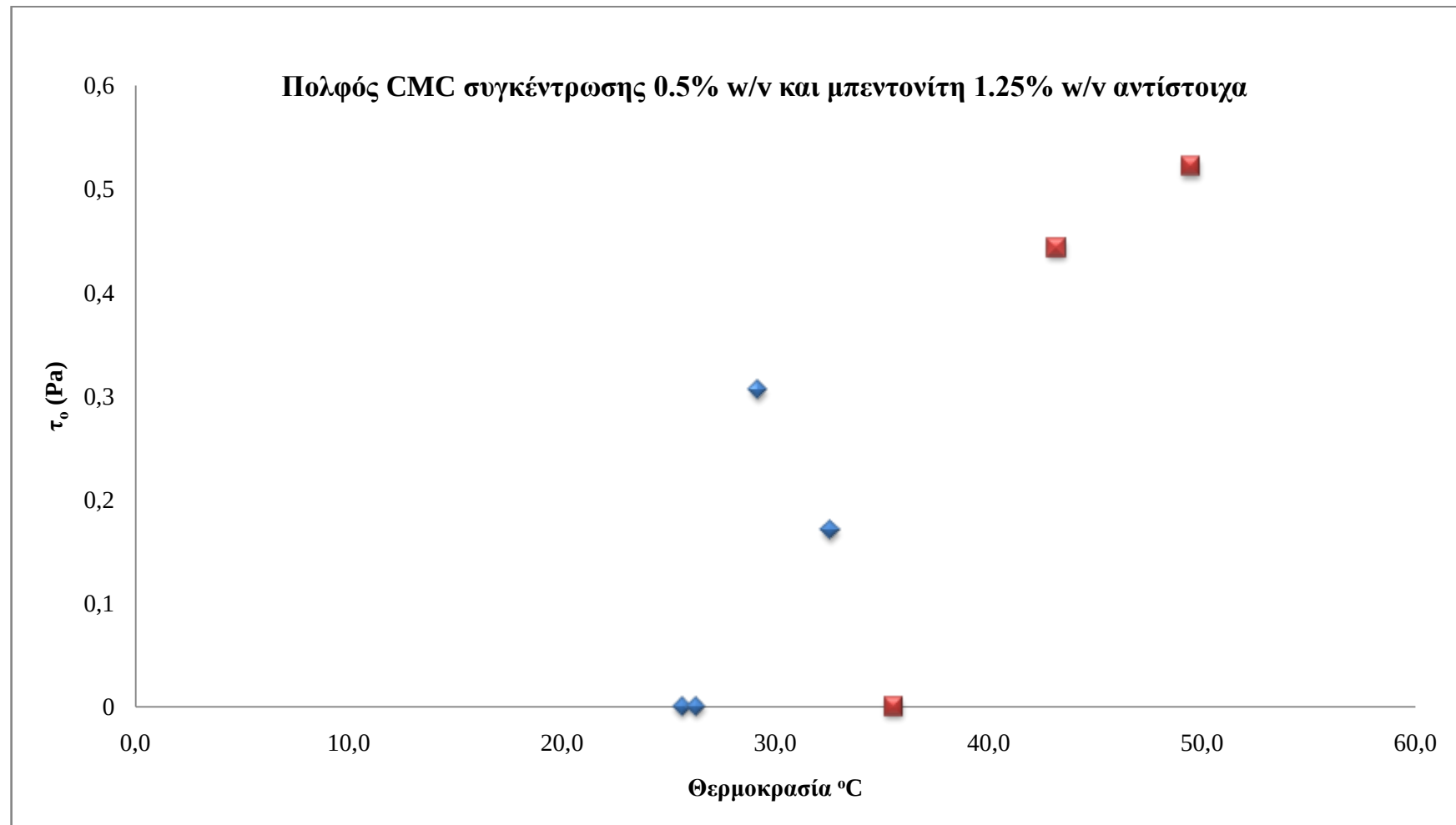


Ρεόγραμμα 10.9: CMC συγκέντρωσης 0.5% w/v και μπεντονίτης 1.25% w/v αντίστοιχα 500 ml σε θερμοκρασία 32.6°C.

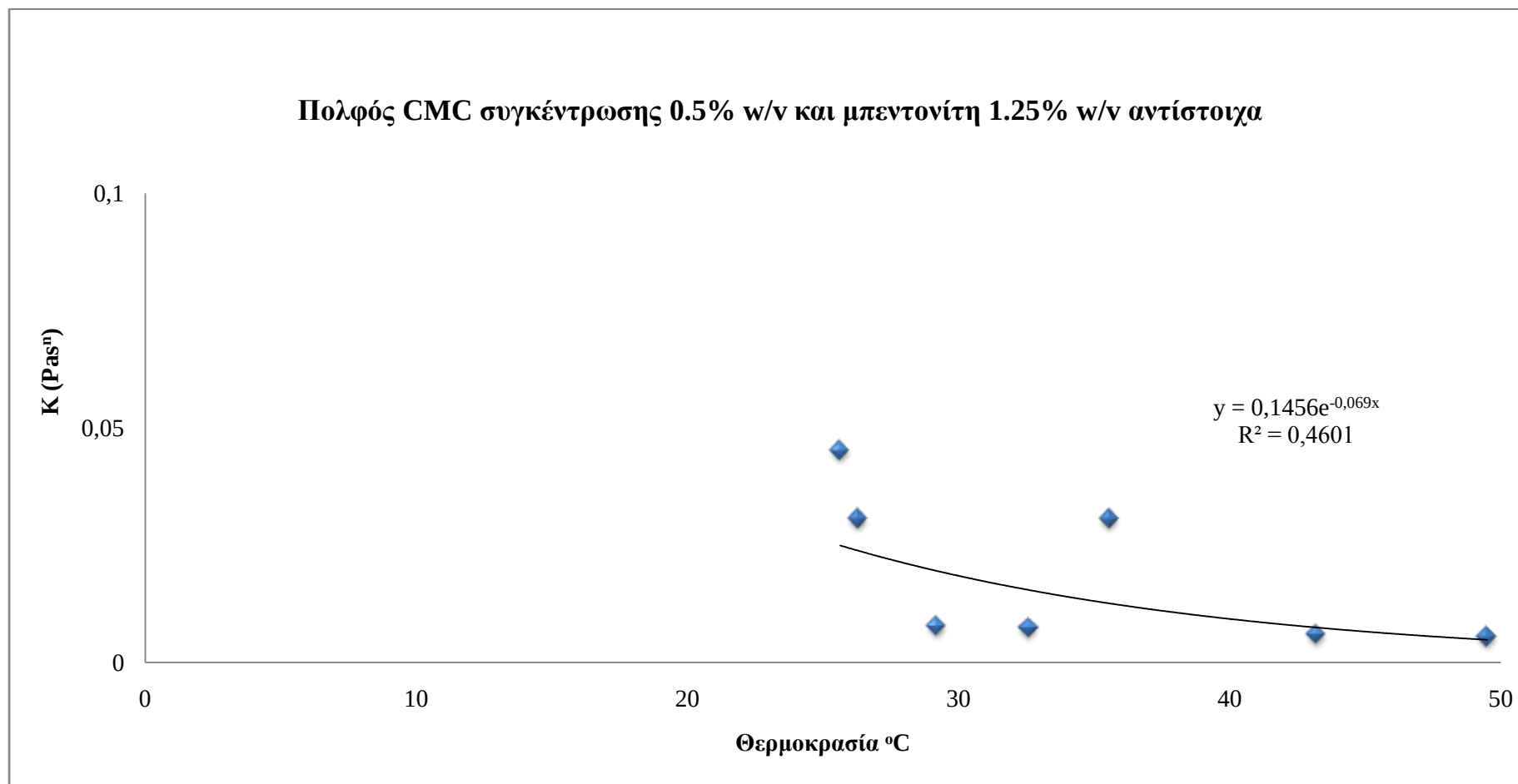


Ρεόγραμμα 10.10: CMC συγκέντρωσης 0.5% w/v και μπεντονίτης 1.25% w/v αντίστοιχα 500 ml σε θερμοκρασία 35.6°C.

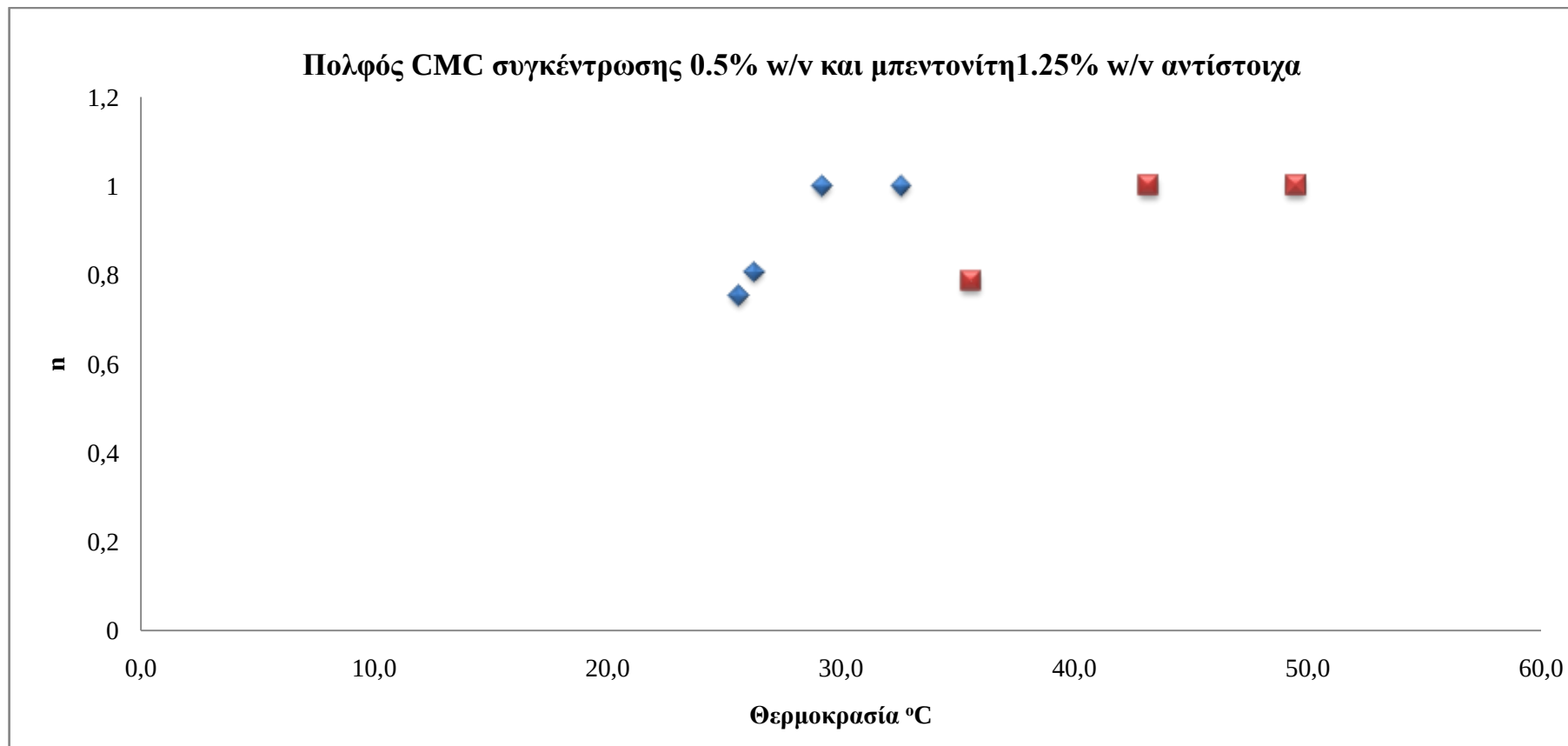
Παρακάτω παρουσιάζεται η επίπτωση της αύξησης της θερμοκρασίας στην τάση διολίσθησης τ_o (Διάγραμμα 10.11), τον οδηγό συνάφειας K (Διάγραμμα 10.12) και τον οδηγό συμπεριφοράς της ροής n (Διάγραμμα 10.13).



Διάγραμμα 10.11: Μεταβολή παραμέτρου τ_0 , ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.5% w/v και μπεντονίτη 1.25% w/v αντίστοιχα 500 ml, σε διάφορες θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 10.12: Μεταβολή παραμέτρου K , ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.5% w/v και μπεντονίτη 1.25% w/v αντίστοιχα 500 ml, σε διάφορες θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 10.13: Μεταβολή παραμέτρου n, ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.5% w/v και μπεντονίτη 1.25% w/v αντίστοιχα 500 ml, σε διάφορες θερμοκρασίες

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι με αύξηση της θερμοκρασίας η τάση διολίσθησης τ_0 αυξάνεται (Διάγραμμα 10.11) παρουσιάζοντας μια ανωμαλία στην περιοχή θερμοκρασιών 32.6 °C και 35.6 °C. Ο οδηγός συνάφειας K μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (Διάγραμμα 10.12) παρουσιάζοντας μια ανωμαλία στην περιοχή θερμοκρασιών 32.6 °C και 35.6 °C, ενώ ο οδηγός συμπεριφοράς της ροής n αυξάνεται και τείνει στην μονάδα (Διάγραμμα 10.13) και να μεταβάλει το είδος του ρευστού σε Bingham Plastic παρουσιάζοντας μια ανωμαλία στην περιοχή θερμοκρασιών 32.6 °C και 35.6 °C.

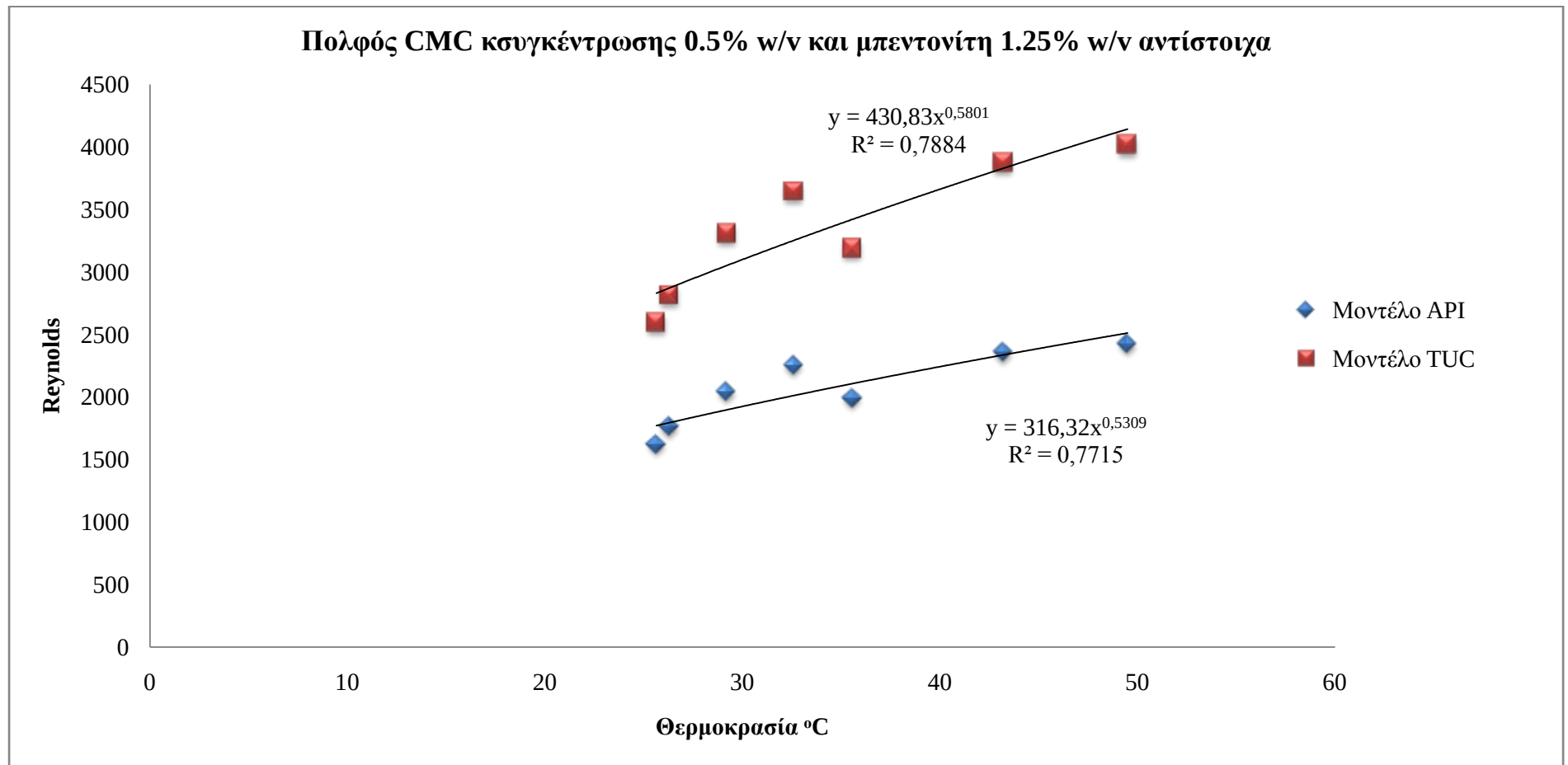
Στην συνέχεια, με την χρήση των ρεολογικών δεδομένων στο πρόγραμμα “Rheology”, παρουσιάζεται για παροχή 0.0025 m³/sec ($\approx$ 150 kg/min) και υποθετική κυκλοφορία στο μοντέλο του μοντέλου ροής του εργαστηρίου, η επίπτωση της θερμοκρασίας στην τιμή της πτώσης πίεσης και του αριθμού Reynolds για τα μοντέλα API και TUC. Παρακάτω παρουσιάζεται η επίπτωση της θερμοκρασίας στον αριθμό Reynolds και στην τιμή της πτώσης πίεσης και για υποθετική κυκλοφορία του ρευστού στο σύστημα ροής του εργαστηρίου, για τα μοντέλα API και TUC (Πίνακας 10.14 και 10.15, Διαγράμματα 10.14 και 10.15 αντίστοιχα).

Θερμοκρασία °C	Πτώση Πίεσης Μοντέλο API (Pa/m)	Re API	Re _{critical1} API	Re _{critical2} API	Είδος Ροής Μοντέλο API
25.6	615.5	1623.0	2438.4	3338.4	Στρωτή
26.3	567.5	1760.0	2363.9	3263.9	Στρωτή
29.2	505.7	2043.2	2100.0	3000.0	Στρωτή
32.6	513.3	2255.6	2100.0	3000.0	Μεταβατική
35.6	501.7	1993.2	2393.8	3293.8	Στρωτή
43.2	530.0	2356.2	2100.0	3000.0	Μεταβατική
49.5	541.8	2425	2100.0	3000.0	Μεταβατική

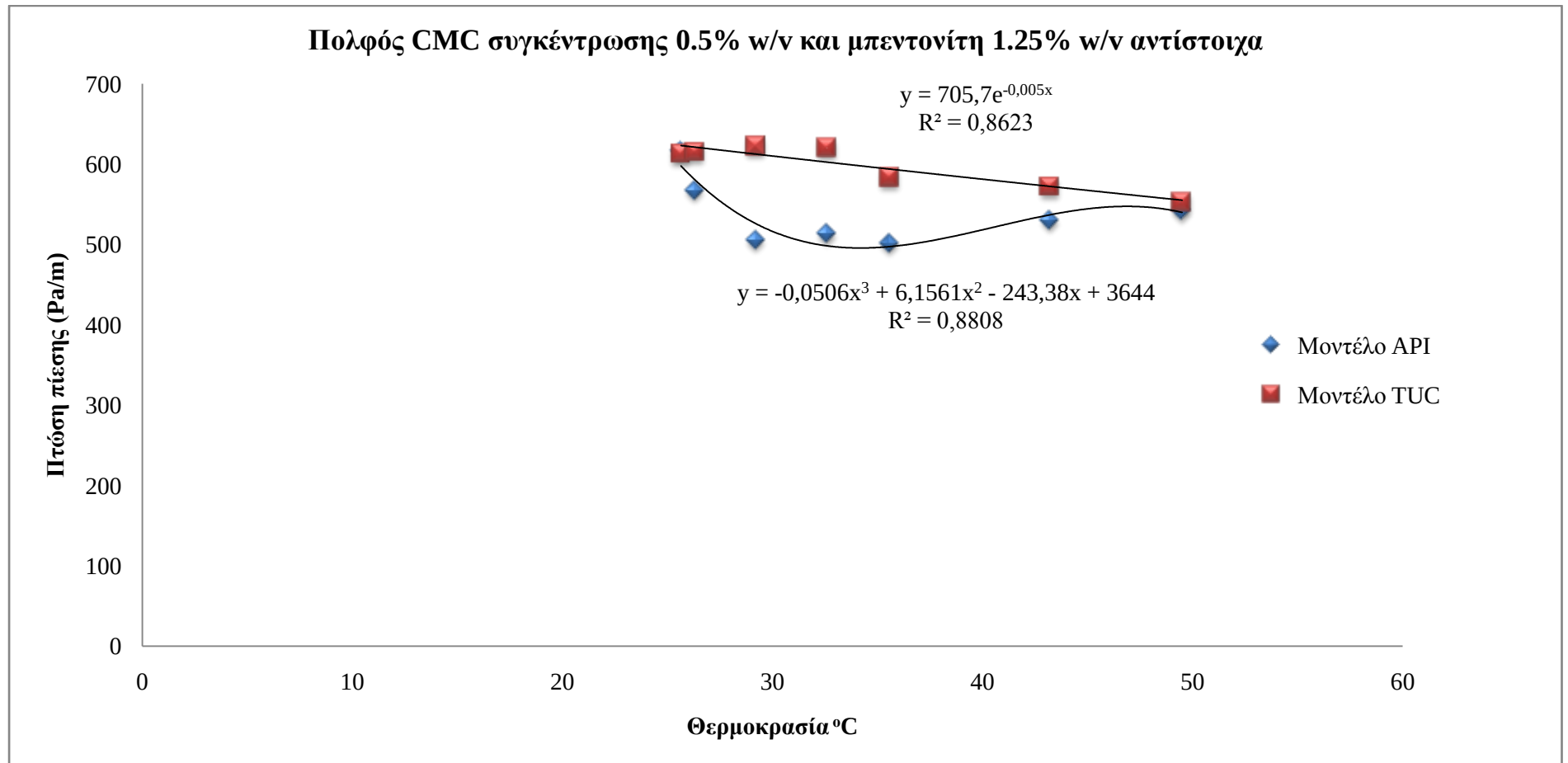
Πίνακας 10.14: Υπολογισμός πτώσης πίεσης με το μοντέλο API, ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.5% w/v και μπεντονίτη 1.25% w/v αντίστοιχα 500 ml, σε διάφορες θερμοκρασίες.

Θερμοκρασία °C	Πτώση Πίεσης Μοντέλο TUC (Pa/m)	Re TUC	Re _{critical1} TUC	Re _{critical2} TUC	Είδος Ροής Μοντέλο TUC
25.6	613.4	2595.8	2384	3284	Μεταβατική
26.3	615.2	2815.5	2321.5	3221.5	Μεταβατική
29.2	623.2	3311.6	2212.4	3112.4	Μεταβατική
32.6	620.1	3642.8	2163	3063	Τυρβώδης
35.6	583.4	3187.97	2346.6	3246.6	Μεταβατική
43.2	572.3	3874.5	2276.4	3176.4	Τυρβώδης
49.5	553	4016.7	2313.9	3213.9	Τυρβώδης

Πίνακας 10.15: Υπολογισμός πτώσης πίεσης με το μοντέλο TUC, ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.5% w/v και μπεντονίτη 1.25% w/v αντίστοιχα 500 ml, σε διάφορες θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 10.14: Μεταβολή αριθμού Reynolds, ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.5% w/v και μπεντονίτη 1.25% w/v αντίστοιχα 500 ml, σε διάφορες θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 10.15: Μεταβολή πτώσης πίεσης, ρευστού CMC συγκέντρωσης 0.5% w/v και μπεντονίτη 1.25% w/v αντίστοιχα 500 ml, σε διάφορες θερμοκρασίες.

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι με αύξηση της θερμοκρασίας ο αριθμός Reynolds αυξάνεται (Διάγραμμα 10.14) ενώ η πτώση πίεσης για υποθετική κυκλοφορία στο μοντέλο ροής του εργαστηρίου μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (Διάγραμμα 10.15) παρουσιάζοντας μια ανωμαλία στην περιοχή θερμοκρασιών 32.6 °C και 35.6 °C.

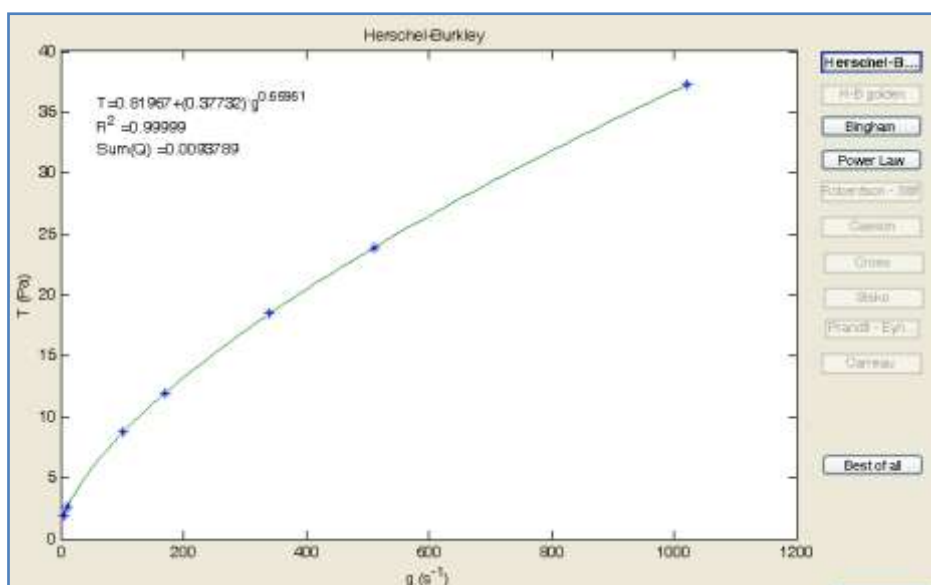
10.2.7. Πολφός CMC συγκέντρωσης 1% w/v και μπεντονίτη 2.5% w/v αντίστοιχα σε κλίμακα 500 ml σε διάφορες θερμοκρασίες.

Από την ανάλυση των ρεολογικών ιδιοτήτων του συγκεκριμένου ρευστού σε σχέση με την επίδραση της θερμοκρασίας προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα (Πίνακας 10.16, Ρεόγραμμα 10.11 και 10.12) :

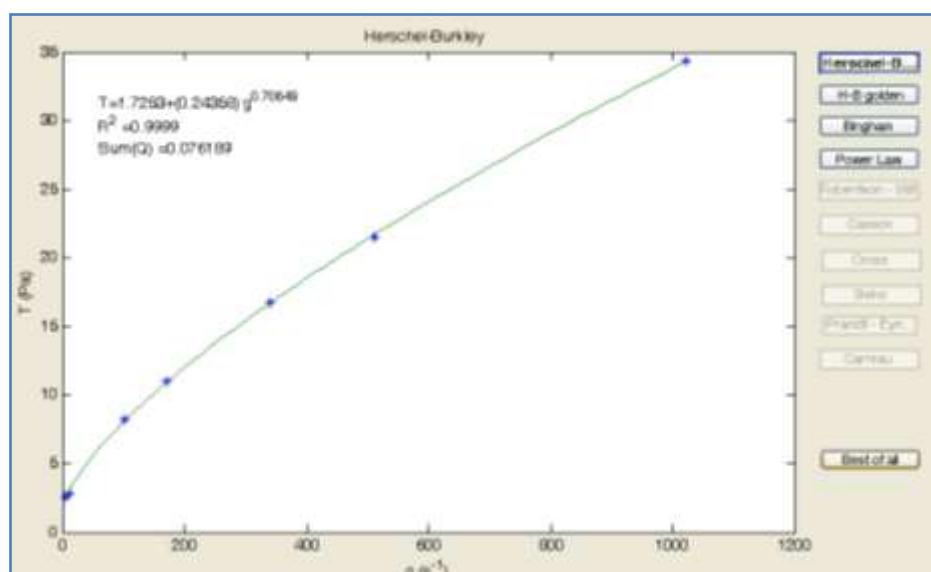
Θερμοκρασία °C	Είδος Ρευστού	τ_y (Pa)	K (Pas ⁿ)	n	$\Sigma \Sigma R^2$
22.0	Power Law	0.00	0.4906	0.6474	0.999
24.8	Herschel-Bulkley	0.67	0.4167	0.6727	0.999
28.3	Herschel-Bulkley	0.82	0.3888	0.6761	0.999
32.4	Herschel-Bulkley	0.57	0.4037	0.6633	0.999
35.9	Herschel-Bulkley	0.78	0.3688	0.6684	0.999
38.8	Herschel-Bulkley	0.82	0.3773	0.6596	0.999
48.0	Herschel-Bulkley	1.73	0.2436	0.7065	0.999

Πίνακας 10.16: Ρεολογικά χαρακτηριστικά ρευστού CMC συγκέντρωσης 1% w/v και μπεντονίτη 2.5% w/v αντίστοιχα 500 ml, σε διάφορες θερμοκρασίες.

Στον Πίνακα 10.16 βλέπουμε ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας το ρευστό το οποίο μελετάμε μετατρέπεται από Power Law σε Herschel-Bulkley ενώ στις υψηλότερες θερμοκρασίες (38.8 °C & 48 °C) παρατηρείται διπλασιασμός της παραμέτρου τ_o , ενώ ο οδηγός συμπεριφοράς της ροής n αυξάνεται οδηγός συνάφειας K μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης παρατηρείται ότι υπάρχει πολύ καλή προσέγγιση όσο αναφορά τον βαθμό συσχέτισης R^2 . Ενδεικτικά παρουσιάζονται τα ρεογράμματα του πολφού CMC συγκέντρωσης 1% w/v και μπεντονίτη 2.5% w/v αντίστοιχα 500 ml σε θερμοκρασία 38.8 & 48 °C (Ρεόγραμμα 10.11 και 10.12).

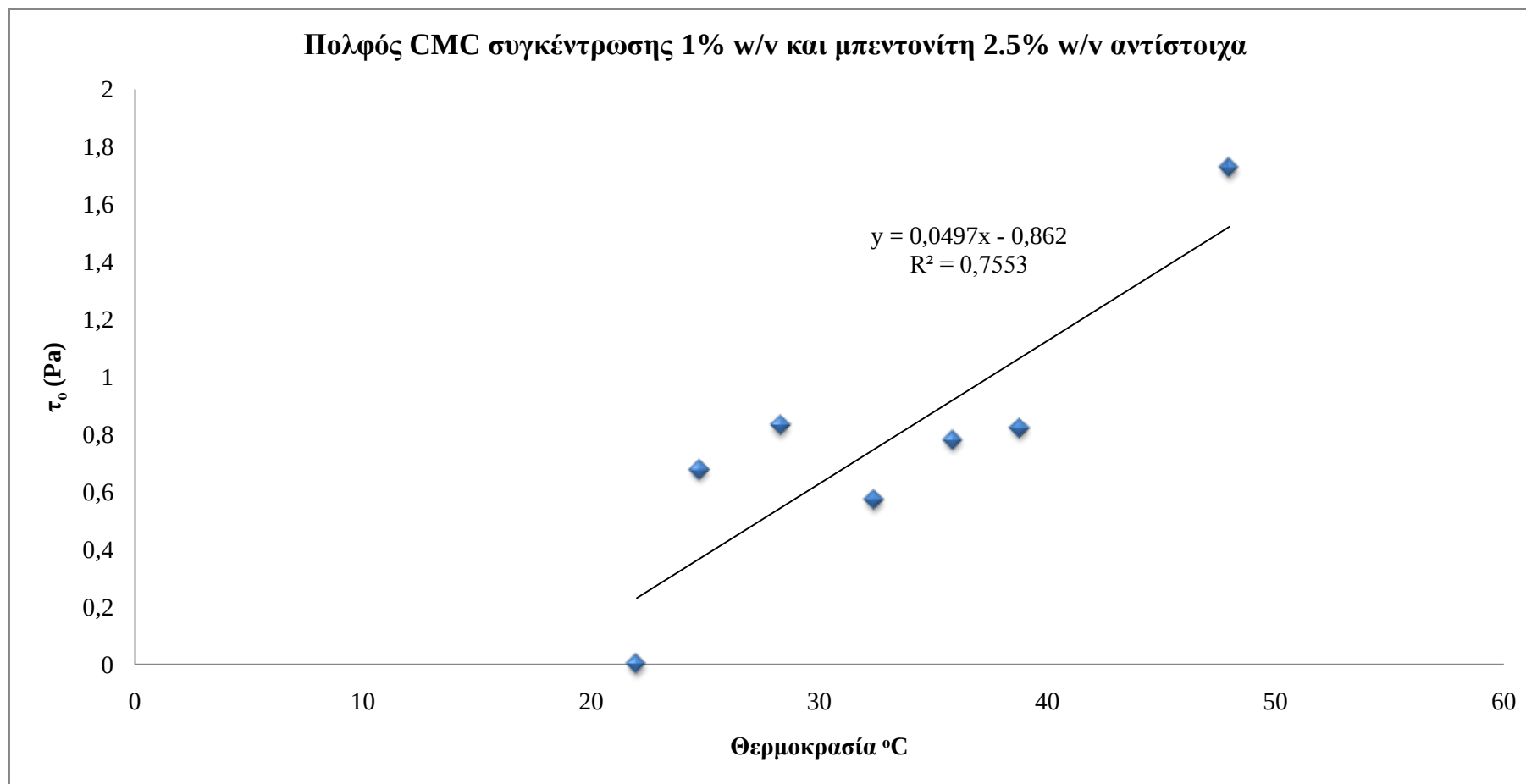


Ρεόγραμμα 10.11: CMC συγκέντρωσης 1% w/v και μπεντονίτης 2.5% w/v αντίστοιχα 500 ml σε 38.8 °C.

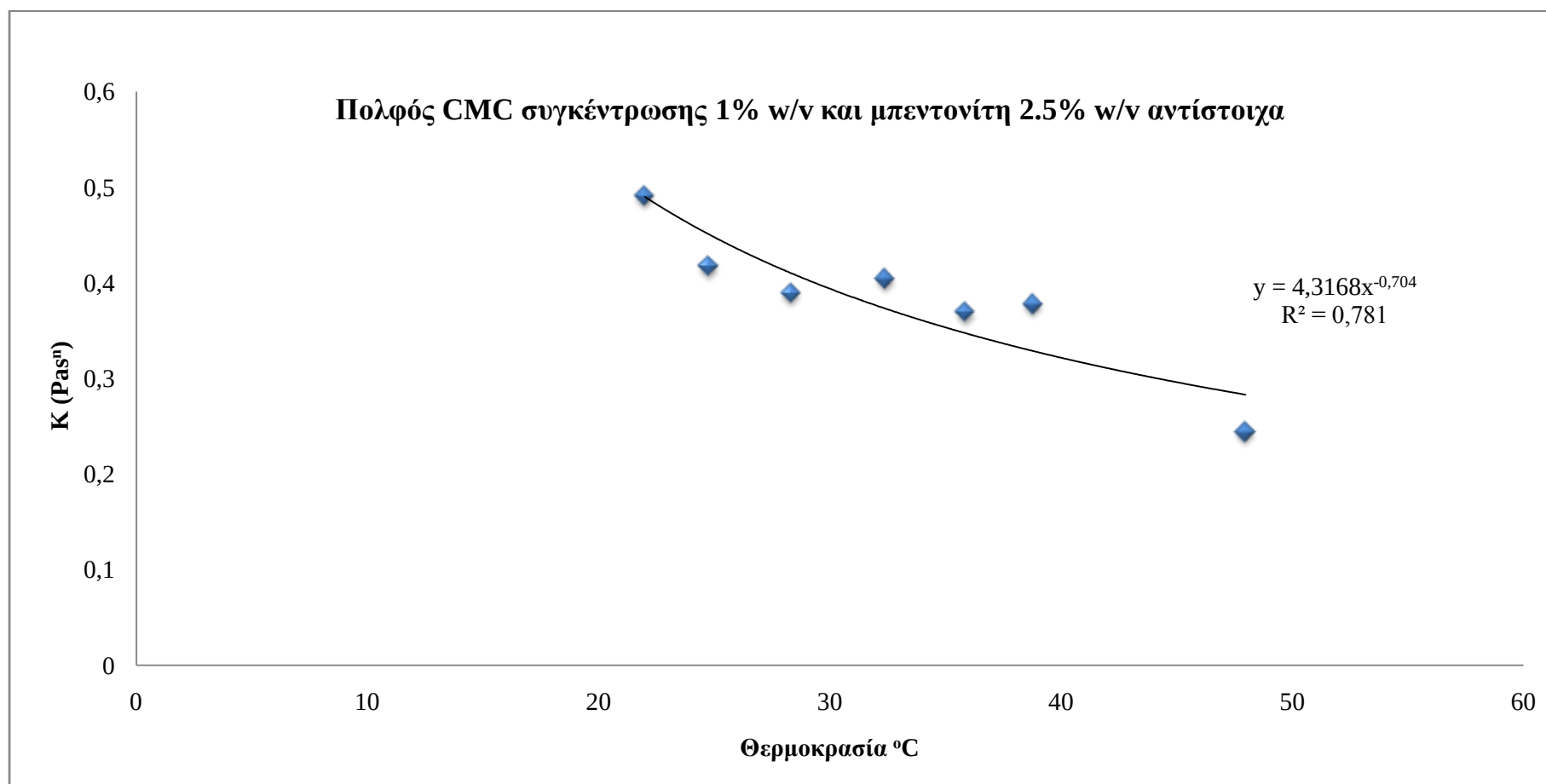


Ρεόγραμμα 10.12: CMC συγκέντρωσης 1% w/v και μπεντονίτης 2.5% w/v αντίστοιχα 500 ml σε 48 °C.

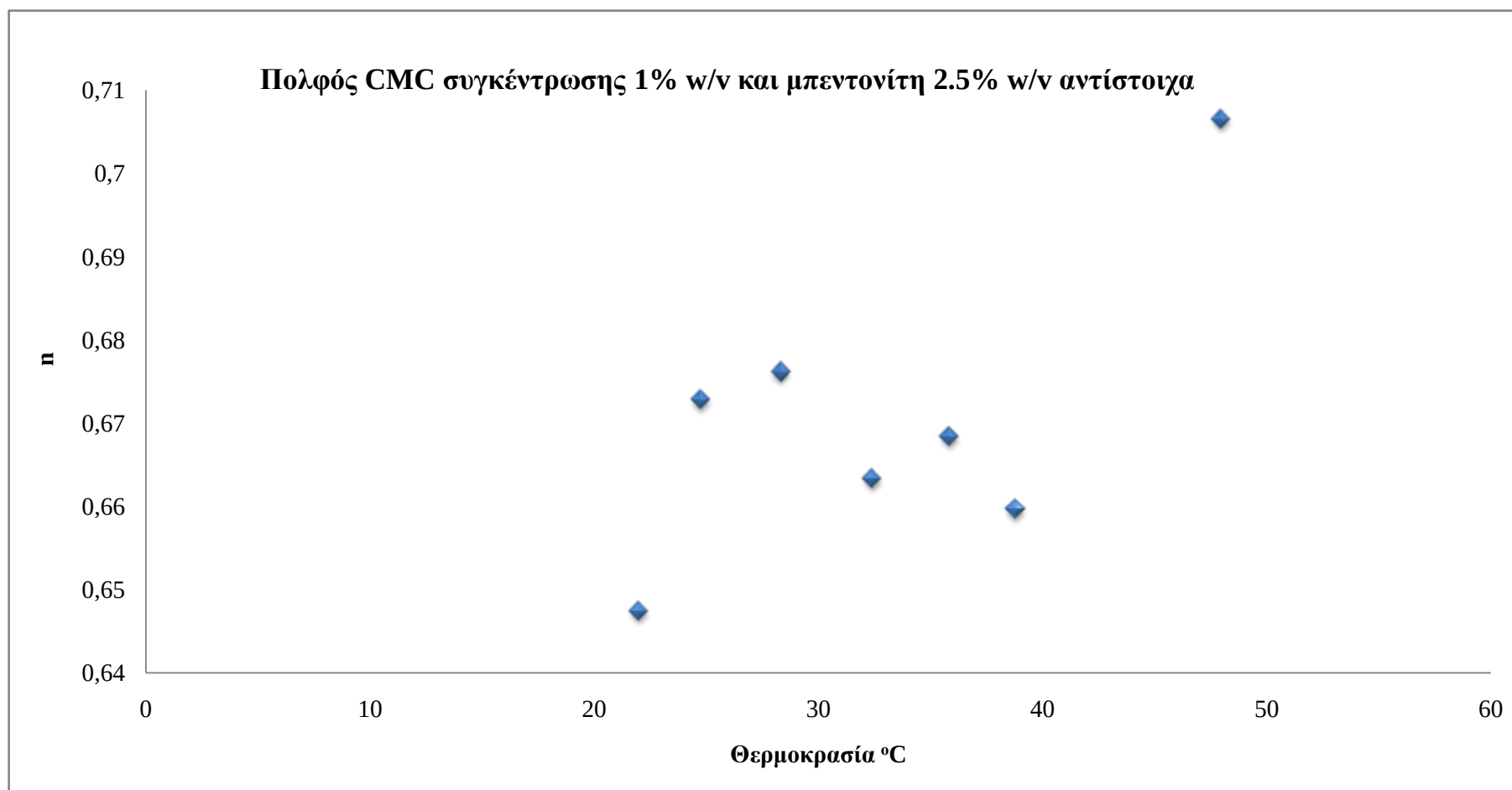
Παρακάτω παρουσιάζεται η επίπτωση της αύξησης της θερμοκρασίας στην τάση διολίσθησης τ_o (Διάγραμμα 10.16), τον οδηγό συνάφειας K (Διάγραμμα 10.17) και τον οδηγό συμπεριφοράς της ροής n (Διάγραμμα 10.18).



Διάγραμμα 10.16: Μεταβολή παραμέτρου τ_0 , CMC και μπεντονίτη συγκέντρωσης 1% w/v και 2.5% w/v 500 ml αντίστοιχα, σε διάφορες θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 10.17: Μεταβολή παραμέτρου K, CMC και μπεντονίτη συγκέντρωσης 1% w/v και 2.5% w/v 500 ml αντίστοιχα, σε διάφορες θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 10.18: Μεταβολή παραμέτρου n , CMC και μπεντονίτη συγκέντρωσης 1% w/v και 2.5% w/v 500 ml αντίστοιχα, σε διάφορες θερμοκρασίες.

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι με αύξηση της θερμοκρασίας η τάση διολίσθησης τ_o αυξάνεται (Διάγραμμα 10.16). Ο οδηγός συνάφειας K μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (Διάγραμμα 10.17), ενώ ο οδηγός συμπεριφοράς της ροής n αυξάνεται μέχρι την θερμοκρασία των 30 °C, από την περιοχή των 30 °C έως 40 °C μειώνεται για να αυξηθεί ξανά μετά τους 40 °C (Διάγραμμα 10.18).

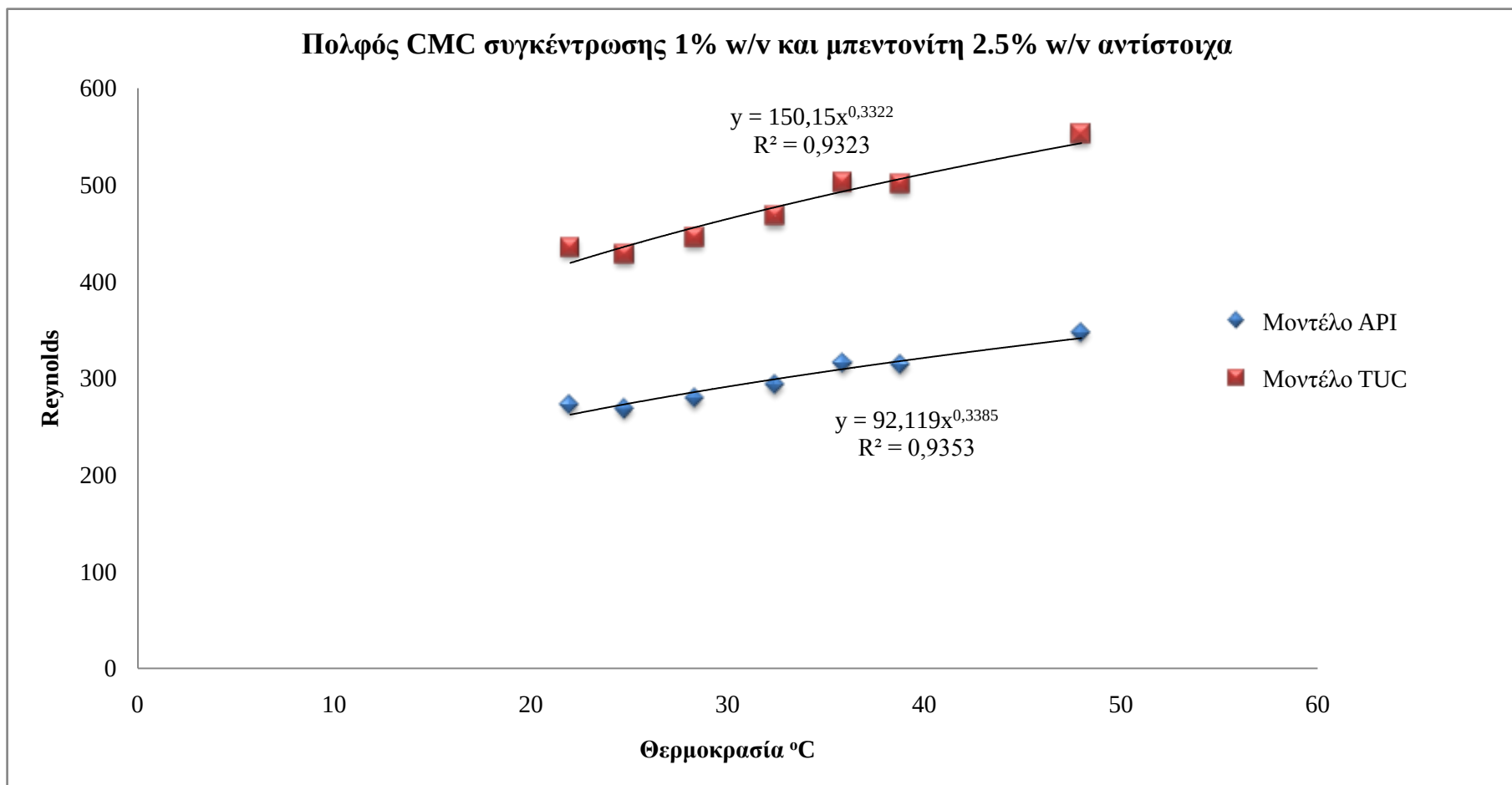
Στην συνέχεια, με την χρήση των ρεολογικών δεδομένων στο πρόγραμμα “Rheology”, παρουσιάζεται για παροχή 0.0025 m³/sec ($\approx$ 150 kg/min) και υποθετική κυκλοφορία στο μοντέλο του μοντέλου ροής του εργαστηρίου, η επίπτωση της θερμοκρασίας στην τιμή της πτώσης πίεσης και του αριθμού Reynolds για τα μοντέλα API και TUC. Παρακάτω παρουσιάζεται η επίπτωση της θερμοκρασίας στον αριθμό Reynolds και στην τιμή της πτώσης πίεσης και για υποθετική κυκλοφορία του ρευστού στο σύστημα ροής του εργαστηρίου, για τα μοντέλα API και TUC (Πίνακας 10.17 και 10.18, Διαγράμματα 10.19 και 10.20 αντίστοιχα).

Θερμοκρασία °C	Πτώση Πίεσης Μοντέλο API (Pa/m)	Re API	Re _{critical1} API	Re _{critical2} API	Είδος Ροής Μοντέλο API
22.0	3669.3	272.3	2583.1	3483.1	Στρωτή
24.8	3723.9	268.3	2548.3	3448.3	Στρωτή
28.3	3579.8	279.0	2543.7	3443.7	Στρωτή
32.4	3412.1	292.8	2561.3	3461.3	Στρωτή
35.9	3170.8	315.1	2566.3	3466.3	Στρωτή
38.8	3178.0	314.3	2566.3	3466.3	Στρωτή
48.0	2875.4	347.4	2502.1	3402.1	Στρωτή

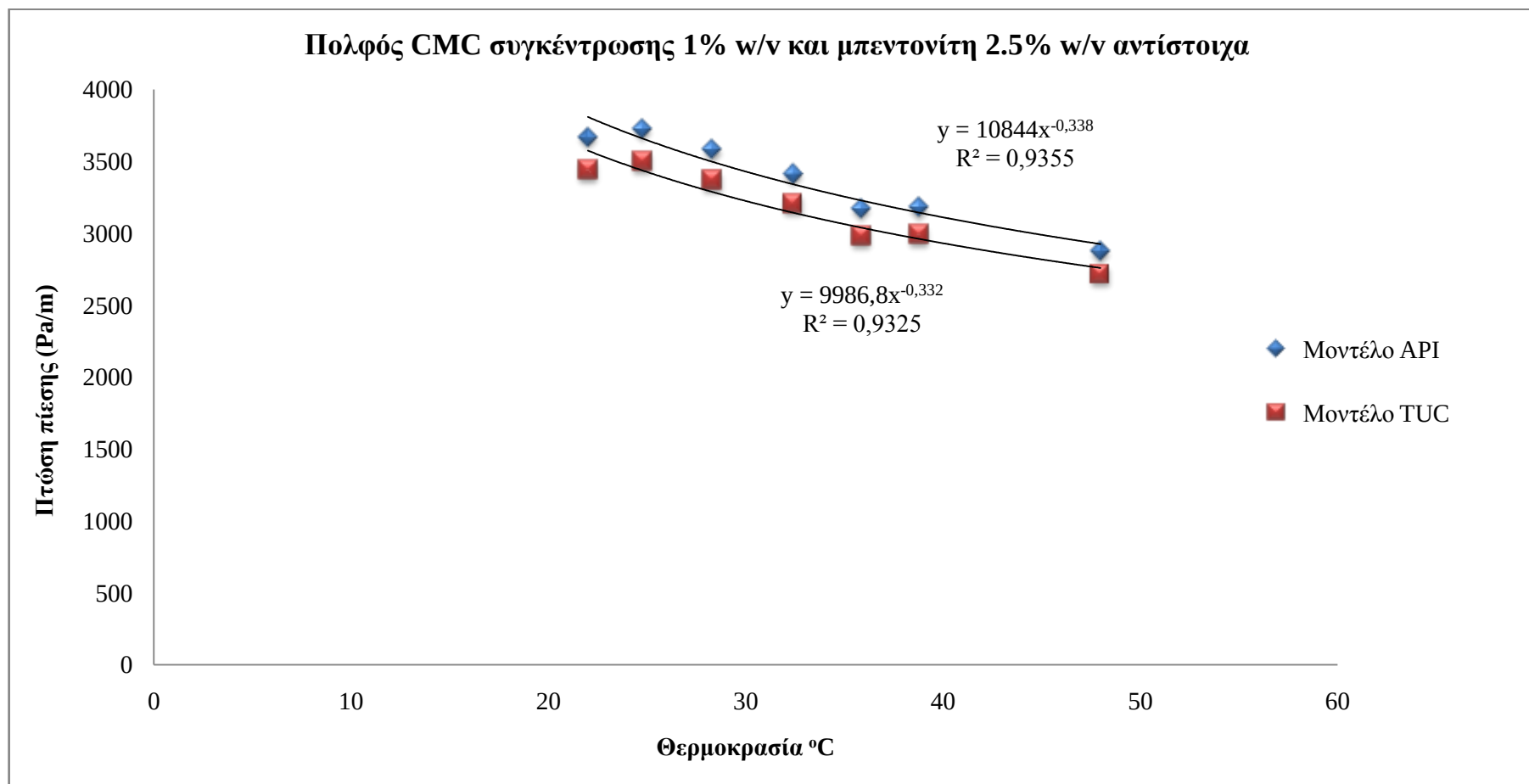
Πίνακας 10.17: Υπολογισμός πτώσης πίεσης με το μοντέλο API CMC συγκέντρωσης 1% w/v και μπεντονίτη 2.5% w/v αντίστοιχα 500 ml, σε διάφορες θερμοκρασίες.

Θερμοκρασία °C	Πτώση Πίεσης Μοντέλο TUC (Pa/m)	Re TUC	Re _{critical1} TUC	Re _{critical2} TUC	Είδος Ροής Μοντέλο TUC
22.0	3442.5	435.5	2505.5	3405.5	Στρωτή
24.8	3501.5	428.1	2504.15	3404.15	Στρωτή
28.3	3367.9	445.1	2508.1	3408.1	Στρωτή
32.4	3207.9	467.3	2512.5	3412.5	Στρωτή
35.9	2983.9	502.4	2528.3	3428.2	Στρωτή
38.8	2991.1	501.2	2530	3430	Στρωτή
48.0	2714.5	552.2	2533.6	3433.6	Στρωτή

Πίνακας 10.18: Υπολογισμός πτώσης πίεσης με το μοντέλο TUC, CMC συγκέντρωσης 1% w/v και μπεντονίτη 2.5% w/v αντίστοιχα 500 ml, σε διάφορες θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 10.19: Μεταβολή αριθμού Reynolds, CMC και μπεντονίτη συγκέντρωσης 1% w/v και 2.5% w/v 500 ml αντίστοιχα, σε διάφορες θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 10.20: Μεταβολή πτώσης πίεσης, CMC και μπεντονίτη συγκέντρωσης 1% w/v και 2.5% w/v 500 ml αντίστοιχα, σε διάφορες θερμοκρασίες.

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι με αύξηση της θερμοκρασίας ο αριθμός Reynolds αυξάνεται (Διάγραμμα 10.19) ενώ η πτώση πίεσης για υποθετική κυκλοφορία στο μοντέλο ροής του εργαστηρίου μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας (Διάγραμμα 10.20).

10.3. Συμπεράσματα που προκύπτουν για ρευστά CMC και μπεντονίτη.

Μια από τις βασικότερες απαιτήσεις κατά την διάρκεια εκτέλεσης μιας γεώτρησης είναι ο όσο το δυνατόν καλύτερος καθαρισμός της από τα θραύσματα των πετρωμάτων, παράλληλα με την εμφάνιση όσο το δυνατόν μικρότερων πιέσεων στην γεώτρηση.

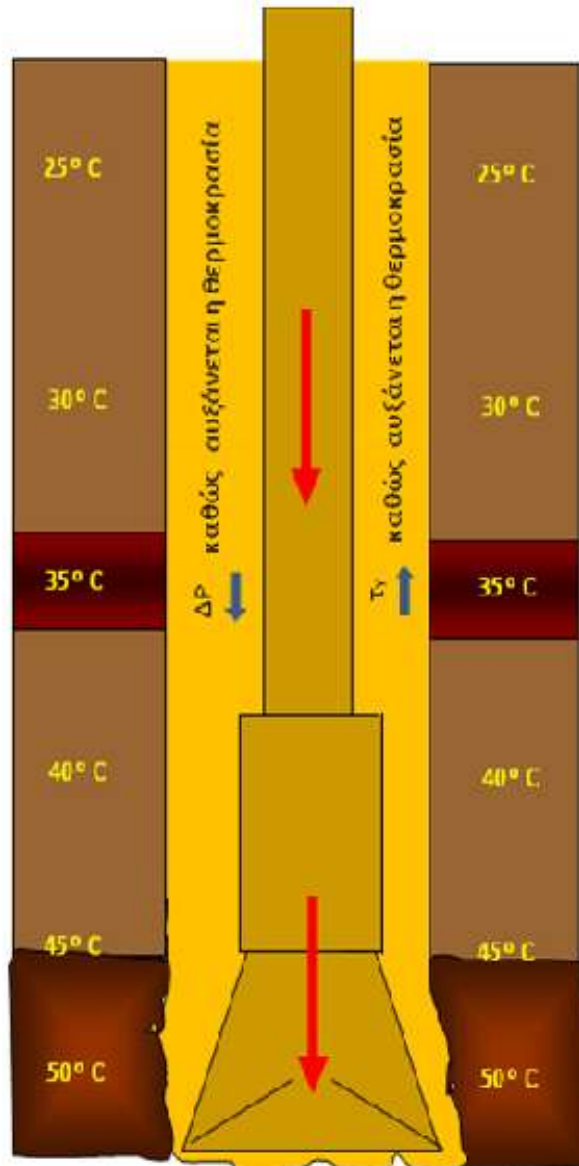
Επίσης μια από τις πιο ουσιώδεις απαιτήσεις από τα ρευστά γεώτρησης, είναι η εμφάνιση από το ρευστό διάτρησης τάσης διολίσθησης ικανής να συγκρατήσει τα σωματίδια που βρίσκονται στον δακτύλιο της γεώτρησης για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, ώστε να αποφευχθεί το κόλλημα των διατρητικών στελεχών στην γεώτρηση, λόγω της καθίζησης τους και της εναπόθεσης τους μέσα στην περιοχή της γεώτρησης.

Οι δύο απαιτήσεις αυτές συνιστούν τον κύριο παράγοντα ο οποίος καθορίζει τον υδραυλικό σχεδιασμό της γεώτρησης όσο αφορά την επιλογή του ρευστού. Το πρόβλημα όμως σε αυτόν τον σχεδιασμό είναι ότι για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, πολλές φορές απαιτούνται περισσότερο του ενός ρευστά για να καλυφθούν οι ανάγκες σε κάθε τμήμα της γεώτρησης. Για παράδειγμα στα κατώτερα τμήματα της γεώτρησης απαιτείται ρευστό το οποίο θα έχει μεγαλύτερη τιμή τάσης διολίσθησης για να μην επιτρέψει στα σωματίδια των πετρωμάτων να καθιζάνουν με γρήγορους ρυθμούς και να προκαλέσουν προβλήματα στην γεώτρηση, εάν για οπουδήποτε λόγο σταματήσει η κυκλοφορία του ρευστού στην γεώτρηση, με όσο το δυνατόν λιγότερη εμφάνιση πτώση πίεσης από την κυκλοφορία του ρευστού στο συγκεκριμένο τμήμα της γεώτρησης. Στην περίπτωση μας για τις ρεολογικές ιδιότητες του κάθε ρευστού μπεντονίτη και CMC, σε μεγαλύτερη θερμοκρασία από αυτή του περιβάλλοντος, θεωρήσαμε ότι αποτελούσαν τις ρεολογικές ιδιότητες του ρευστού σε διαφορετικά βάθη μέσα στην γεώτρηση, με την αύξηση της θερμοκρασίας να αντιστοιχεί σε

αύξηση του βάθους της γεώτρησης. Σύμφωνα με αυτή την θεώρηση και με βάση τα δεδομένα από τις αναλύσεις και μετρήσεις των ρεολογικών ιδιοτήτων των ρευστών, προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα :

- Τα ρευστά που μελετήθηκαν αλλάζουν τις ρεολογικές τους ιδιότητες σε σχέση με την θερμοκρασία (άρα σε σχέση με το βάθος) σε μεγάλο βαθμό.
- Έχουν την ιδιότητα να αυξάνουν την τιμή της τάσης διολίσθησης (τ_y) τους σε σχέση με την θερμοκρασία (άρα και με το βάθος της γεώτρησης), αποτρέποντας έτσι την γρήγορη καθίζηση των σωματιδίων μέσα στην γεώτρηση. Αυτό έχει επίπτωση κυρίως στα όρια μετάβασης στρωτής – τυρβώδους ροής.
- Με την αύξηση της θερμοκρασίας η πτώση πίεσης κατά την κυκλοφορία τους μειώνεται.
- Με την αύξηση της θερμοκρασίας η παράμετρος K του ρευστού μειώνεται με κυριότερη συνέπεια την αύξηση του αριθμού Reynolds.
- Με την αύξηση της θερμοκρασίας η παράμετρος n του ρευστού αυξάνεται (τείνει να γίνει Νευτώνειο).
- Μπορούν να συμπεριφερθούν σαν “έξυπνα ρευστά” διάτρησης αφού μεταβάλουν τις ρεολογικές τους ιδιότητες προς όφελος της διαδικασίας της διάτρησης (σε συνάρτηση με το βάθος). Το ερώτημα που γενάτε είναι εάν αυτή η ιδιότητα τους είναι επαναλήψιμη.
- Ένα τέτοιο ρευστό να αντικαταστήσει περισσότερα του ενός ρευστά αφού από μόνο του μπορεί να φέρει τα οφέλη που προκαλούν διαφορετικά ρευστά σε για κάθε τμήμα της γεώτρησης.
- Ένα τέτοιου είδους ρευστό μπορεί να “αντιληφθεί” το βάθος στο οποίο βρίσκεται (εξαιτίας της επίδρασης της θερμοκρασίας στο ρευστό) και να συμπεριφερθεί ανάλογα ως προς την αντιμετώπιση του ρυθμού καθίζησης των σωματιδίων όταν διακοπεί η κυκλοφορία του ρευστού στον δακτύλιο της γεώτρησης.
- Επιτυγχάνει συμπεριφορά παρόμοια, ή και καλύτερη, πολύ ακριβότερων ρευστών διάτρησης.
- Είναι εύκολα ως προς την παρασκευή τους ρευστά.
- Είναι πολύ οικονομικά ρευστά διάτρησης αφού τα συστατικά παρασκευής του είναι οικονομικά.

Στο Σχήμα 10.1 παρουσιάζεται ένα το οποίο παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο επιδρούν στις ρεολογικές του ιδιότητες αυτών των ρευστών και στην πτώση πίεσης, κατά την κυκλοφορία τους, το βάθος της γεώτρησης και η θερμοκρασία.



Σχήμα 10.1: Επίδραση της θερμοκρασίας σε ρευστό CMC – Μπεντονίτη.

10.4. Ρευστά PAC – L.

Με το υλικό PAC – L παρασκευάστηκαν ρευστά με τρεις διαφορετικές συγκεντρώσεις σε PAC – L και σε κλίμακα 500 ml λόγω της μη ύπαρξης κατάλληλης ποσότητας για παρασκευή σε μεγάλη κλίμακα αλλά και λόγω κόστους. Από την ανάλυση των ρεολογικών δεδομένων των ρευστών προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα (Πίνακας 10.9) :

Ταυτότητα Ρευστού (Συγκέντρωση PAC – L)	Είδος Ρευστού	τ_0 (Pa)	K (Pas ⁿ)	n	$\Sigma \Sigma R^2$
Pac – L 0.5 % w/v 500 ml	Power Law	0.000	0.0288	0.8283	0.998
Pac – L 1 % w/v 500 ml	Herschel-Bulkley	0.007	0.0552	0.8894	0.999
Pac – L 1.5 % w/v 500 ml	Power Law	0.000	0.35882	0.7120	0.999

Πίνακας 10.19: Ρεολογικές ιδιότητες ρευστών PAC- L 500 ml.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα γίνεται εμφανές ότι για συγκέντρωση PAC – L 1.1% w/v, το ρευστό το οποίο προκύπτει είναι ρευστό Herschel-Buckley που είναι το ζητούμενο αλλά με πολύ μικρό αριθμό τ_y . Ρευστό με μεγαλύτερη συγκέντρωση PAC – L δεν παρασκευάστηκε εξαιτίας του ότι ήδη το ρευστό με συγκέντρωση 1.5% w/v είναι παχύρευστο για μελέτη στο μοντέλο οριζόντιας γεώτρησης του εργαστηρίου. Για αυτόν το λόγο απορρίφθηκε η χρήση του PAC – L για την μελέτη πτώσης πίεσης.

10.5. Ρευστά Μπεντονίτη.

Επόμενο ρευστό το οποίο μελετήθηκε για να διαπιστώσουμε εάν πληρεί τα κριτήρια τα οποία είχαμε θέσει ήταν πολφοί μπεντονίτη συγκέντρωσης 2.5% w/v. Η απόφαση για την παρασκευή ρευστών μπεντονίτη πάρθηκε μετά την αδυναμία παρασκευής ενός ρευστού από τα προαναφερθέντα υλικά, το οποίο να ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένες απαιτήσεις (ρεολογικά χαρακτηριστικά, κατάσταση ροής που μπορεί να επιτευχθεί στο σύστημα μας, πτώση πίεσης).

Ο λόγος για τον οποίο ο μπεντονίτης επιλέχτηκε τελευταίος για μελέτη είναι, ότι πρωταρχικός στόχος ήταν η παρασκευή ρευστού το οποίο θα ήταν διάφανο για περαιτέρω μελέτη κίνησης σωματιδίων μέσα σε αυτό. Αφού αυτό δεν επιτευχθεί προχωρήσαμε στην μελέτη ρευστών μπεντονίτη.

Αρχικά παρασκευάστηκε πολφός μπεντονίτη συγκέντρωσης 2.5% w/v με σκοπό να ελεγχθεί αν το συγκεκριμένο ρευστό ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις μας. Για την παρασκευή χρησιμοποιήθηκαν :

- 500 ml νερού βρύσης, και
- 12.5 gr μπεντονίτη QUICK – GEL.

Από την ανάλυση των ρεολογικών δεδομένων του συγκεκριμένου δείγματος προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα (Πίνακας 10.20) :

Ταυτότητα Ρευστού (Συγκέντρωση μπεντονίτη)	Είδος Ρευστού	τ_0 (Pa)	K (Pas ⁿ)	n	$\Sigma \Sigma R^2$
Μπεντονίτης 2.5% w/v 500 ml	Herschel-Bulkley	2.12	0.1725	0.515	0.996

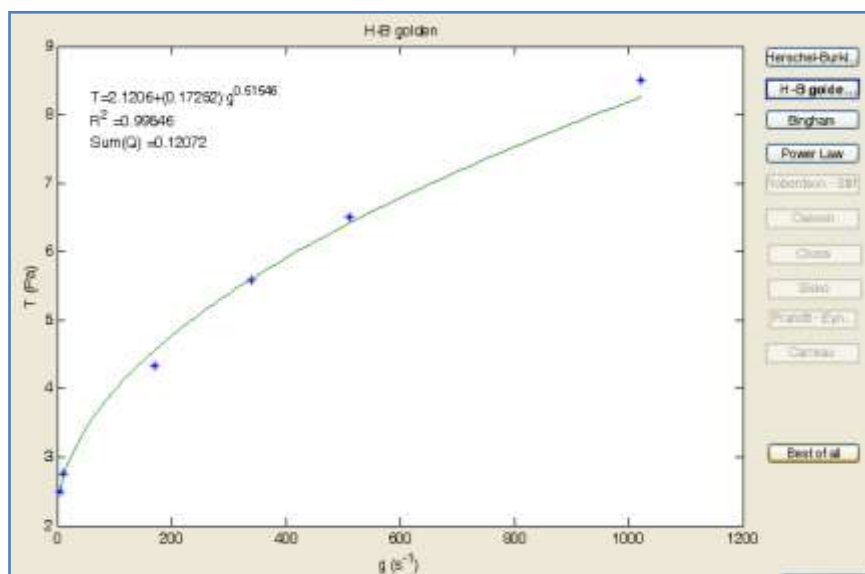
Πίνακας 10.20: Ρεολογικές ιδιότητες ρευστού μπεντονίτη 2.5 % w/v 500 ml.

Από την ανάλυση των ρεολογικών δεδομένων στο πρόγραμμα “Rheology” και το μοντέλο TUC διαπιστώσαμε ότι το συγκεκριμένο ρευστό πληρώνει τις απαιτήσεις μας, όσο αφορά την ρεολογία και το είδος της ροής του ρευστού.

Παροχή Q (m ³ /s)	Είδος Ροής TUC	Re _{critical 1} TUC	Re _{critical 2} TUC	Re TUC
0.0020	Στρωτή	2897	3797	1105
0.0030	Μεταβατική	2870	3770	2185
0.0045	Τυρβώδης	2863	3763	4235

Πίνακας 10.21: Αποτελέσματα ανάλυσης ροής μπεντονίτη 2.5 % w/v 500 ml.

Η ανάλυση έδειξε ότι ο μπεντονίτης σε συγκέντρωση 2.5% w/v είναι ικανός να επιτύχει μέσω κυκλοφορίας στο μοντέλο οριζόντιας γεώτρησης του εργαστηρίου και τα τρία είδη ροής (στρωτή ροή, μεταβατική και τυρβώδης ροή) και μάλιστα για τις μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές κυκλοφορίας του ρευστού μας (στο μοντέλο μας), η ροή να βρίσκεται “βαθιά” μέσα στην Τυρβώδη περιοχή, κάτι το οποίο ήταν και το ζητούμενο να παρασκευαστεί ένα ρευστό το οποίο θα είναι Herschel-Bulkley.



Ρεόγραμμα 10.13: Μπεντονίτης 2.5% w/v 500 ml.

Επόμενο βήμα αφού βρέθηκε το ζητούμενο ρευστό ήταν η παρασκευή του σε μεγαλύτερη κλίμακα για να δούμε εάν θα παραμείνουν τα ρεολογικά χαρακτηριστικά παρόμοια με αυτά της κλίμακας των 500 ml. Για τον λόγο αυτό παρασκευάστηκε ρευστό με περιεκτικότητα σε μπεντονίτη 2.5% w/v και κλίμακα 10 lt. Τα αποτελέσματα από την ανάλυση των ρεολογικών ιδιοτήτων του συγκεκριμένου ρευστού είναι τα ακόλουθα (Πίνακας 10.22):

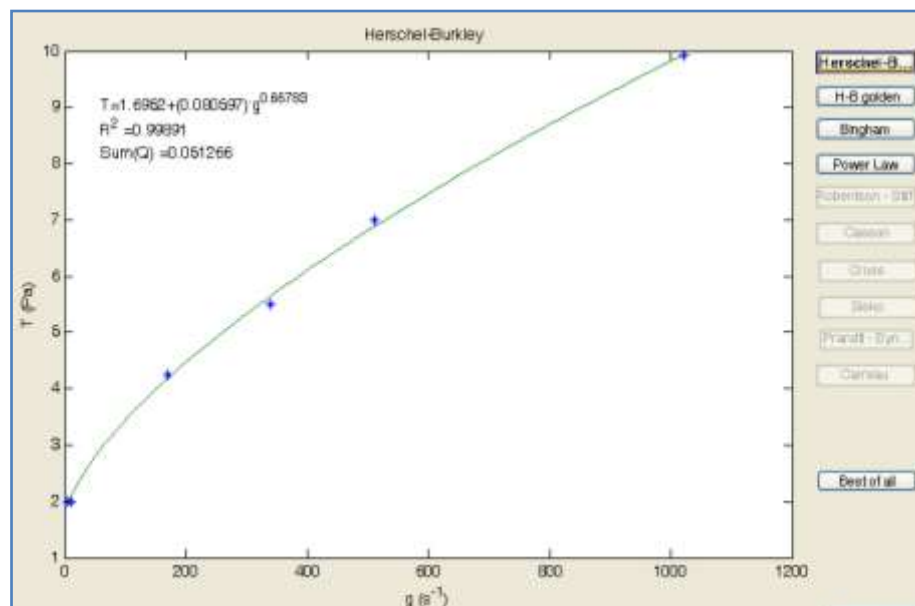
Ταντότητα Ρευστού (Συγκέντρωση μπεντονίτη)	Είδος Ρευστού	τ_0 (Pa)	K (Pas ⁿ)	n	ΣR^2
Μπεντονίτης 2.5 % w/v 10 lt	Herschel-Bulkley	1.69	0.1081	0.6678	0.999

Πίνακας 10.22: Ρεολογικές ιδιότητες ρευστού μπεντονίτη 2.5% w/v 10 lt.

Από την ανάλυση των ρεολογικών δεδομένων στο πρόγραμμα “Rheology” και το μοντέλο TUC διαπιστώσαμε ότι το συγκεκριμένο ρευστό πληρώνει τις απαιτήσεις μας, όσο αφορά την ρεολογία και το είδος της ροής του ρευστού.

Παροχή $Q \text{ (m}^3/\text{s)}$	Είδος Ροής TUC	$Re_{\text{critical 1}}$ TUC	$Re_{\text{critical 2}}$ TUC	Re TUC
0.002	Στρωτή	2704	3604	923
0.003	Μεταβατική	2666	3566	1701
0.005	Τυρβώδης	2612	3512	3630

Πίνακας 10.23: Αποτελέσματα ανάλυσης ροής μπεντονίτη 2.5% w/v 10 lt.



Ρεόγραμμα 10.14: Μπεντονίτης 2.5% w/v 10 lt.

Όπως γίνεται αντιληπτό, οι ρεολογικές ιδιότητες των δύο ρευστών εκπληρώνουν τις προϋποθέσεις που είχαμε θέσει. Επίσης η επεξεργασία των ρεολογικών δεδομένων στο πρόγραμμα “Rheology” για το ρευστό των 10 lt έδειξε ότι για παροχή ρευστού της τάξης 0.005 m³/sec (79.3 gpm) η ροή του ρευστού είναι Τυρβώδης. Από τα

παραπάνω αποτελέσματα αποφασίστηκε να παρασκευαστεί ρευστό μπεντονίτη σε μεγάλη κλίμακα με συγκέντρωση παρεμφερή των προαναφερθέντων δειγμάτων. Τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από την μελέτη των ρευστών μπεντονίτη είναι τα ακόλουθα :

- Πολύ οικονομικό ρευστό ως προς την παρασκευή του (για την παρασκευή πολφού μπεντονίτη συγκέντρωσης 2% w/v σε κλίμακα 620 lt απαιτούνται 12400 gr μπεντονίτη ο οποίος κοστίζει περίπου 10 €).
- Εύκολο ως προς την παρασκευή του ρευστό.
- Παρουσιάζει επαναληψιμότητα όσο αφορά τις ρεολογικές του ιδιότητες, για διαφορετικά ρευστά ίδιας συγκέντρωσης.
- Το ρευστό το οποίο παρασκευάστηκε σαν ύφη αλλά και μακροσκοπικά ήταν λιγότερο παχύρευστο από τα υπόλοιπα ρευστά που παρασκευάστηκαν.

10.5.1. Επίδραση pH και NaCl σε δείγματα μπεντονίτη.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο μελετήθηκαν οι επιπτώσεις των pH και NaCl σε διάφορα ρευστά μπεντονίτη. Η επίδραση του pH μελετήθηκε σε πολφούς μπεντονίτη Wyoming QUICK GEL σε συγκεντρώσεις

- 6.42% w/v, και
- 5% w/v

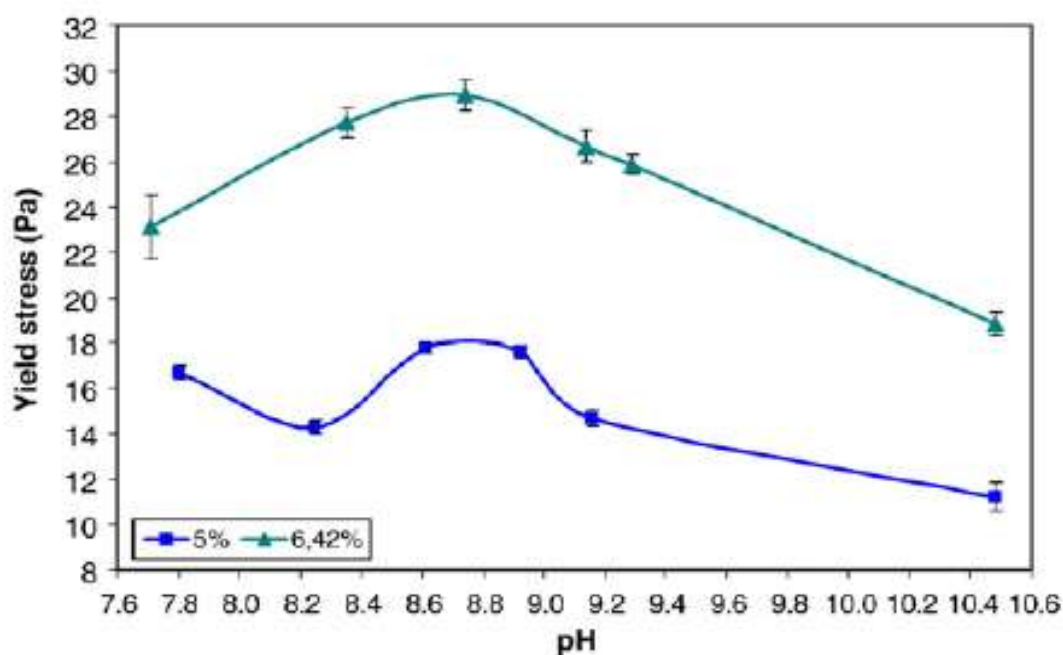
με την τιμή του pH να ρυθμίζεται σε τιμές μεταξύ 7.5 έως 10.5.

Η επίδραση του ηλεκτρολύτη NaCl μελετήθηκε σε πολφούς μπεντονίτη Wyoming QUICK GEL

- συγκέντρωσης μπεντονίτη 2% w/v, σε ρευστό συγκέντρωσης ηλεκτρολύτη 0.0 M, 0.01 M και 0.1 M
- μπεντονίτη 6.42% w/v, σε ρευστό συγκέντρωσης ηλεκτρολύτη 0.5 M και 1 M, και
- μπεντονίτη 5% w/v, σε ρευστό συγκέντρωσης ηλεκτρολύτη 0.5 M και 1 M.

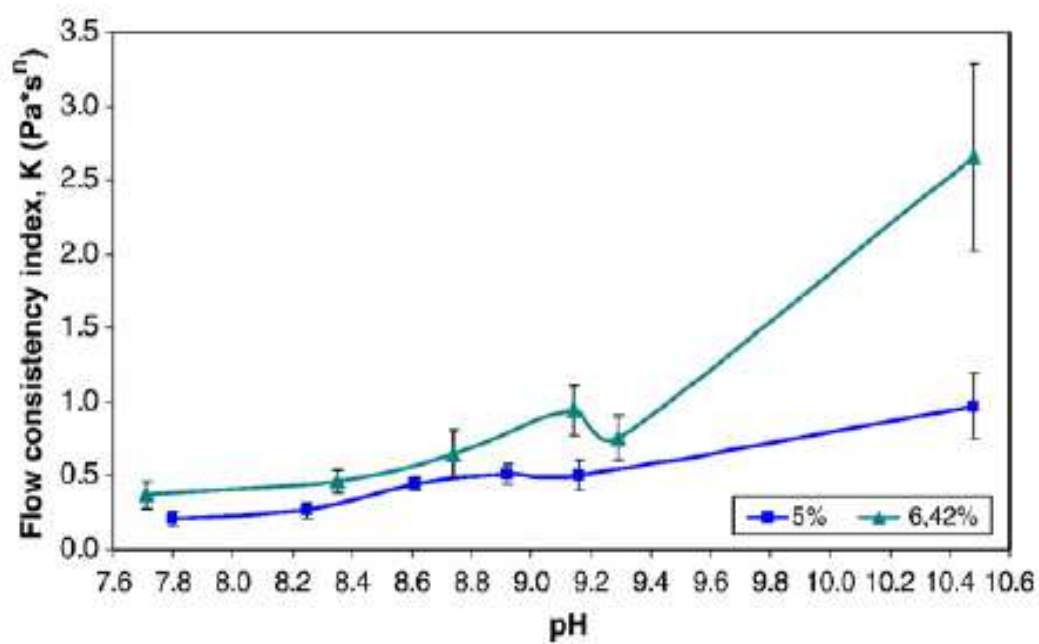
Επίδραση pH.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 10.21 αφορούν την επίδραση της μεταβολής του pH στην τιμή της τάσης διολίσθησης τ_o . Το συμπέρασμα το οποίο προκύπτει είναι ότι ο πολφός μπεντονίτη παρουσιάζει την μέγιστη τιμή τάσης διολίσθησης τ_y σε δείγματα στα οποία έχει παραμείνει αμετάβλητο το pH τους, ενώ τα δείγματα στα οποία μεταβάλαμε το pH τους (είτε μείωση, είτε αύξηση) εμφάνισαν μείωση της τάσης διολίσθησης τ_o .

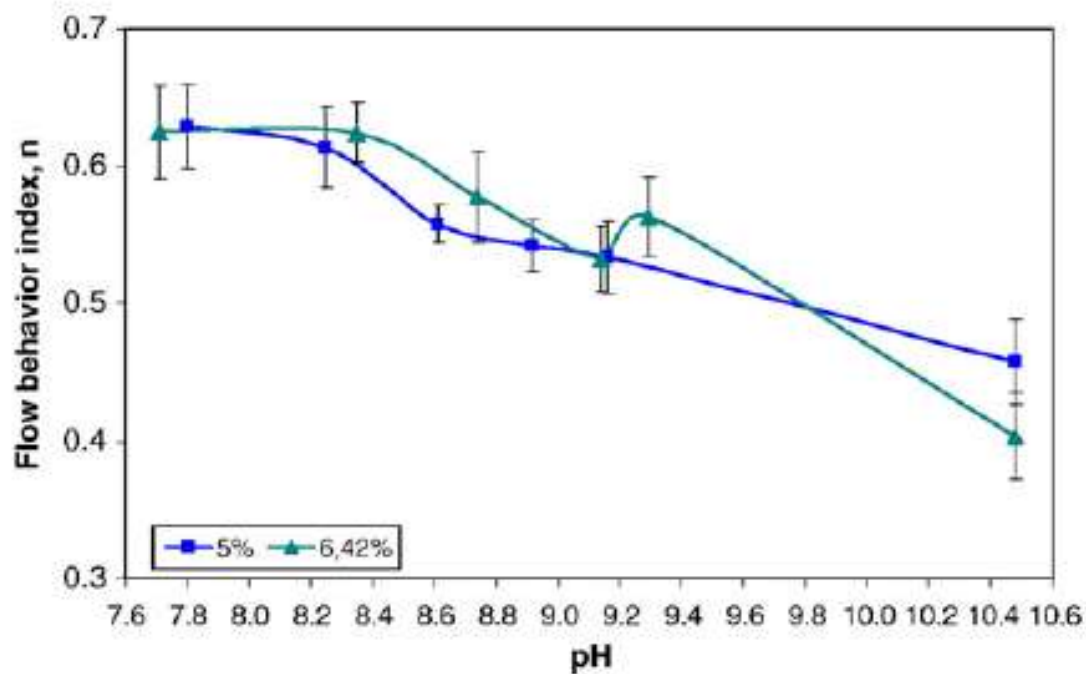


Διάγραμμα 10.21: Επίδραση pH στην παράμετρο τ_o , ρευστού μπεντονίτη συγκέντρωσης 5 & 6.42% w/v.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 10.22 αφορούν την επίδραση της μεταβολής του pH στην τιμή του οδηγού συνάφειας K . Το συμπέρασμα το οποίο προκύπτει είναι ότι ο πολφός μπεντονίτη παρουσιάζει αύξηση της παραμέτρου K όσο αυξάνει το pH του πολφού μας. Παράλληλα παρουσιάζει απότομη αύξηση της τιμής K από τιμή pH 9.3 και πάνω, σε σχέση με την επίδραση από τιμές pH 7.7 έως 9.2.



Διάγραμμα 10.22: Επίδραση pH στην παράμετρο K, ρευστού μπεντονίτη συγκέντρωσης 5 & 6.42% w/v.



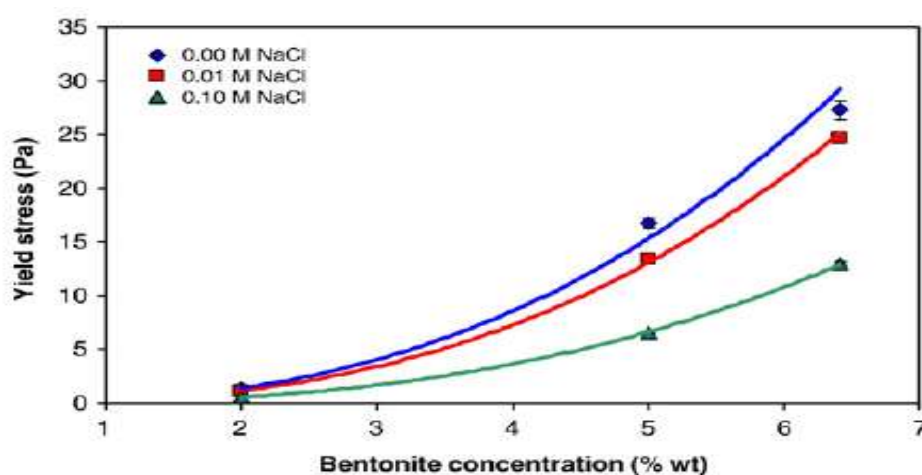
Διάγραμμα 10.23: Επίδραση pH στην παράμετρο n, ρευστού μπεντονίτη συγκέντρωσης 5 & 6.42% w/v.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 10.23 αφορούν την επίδραση της μεταβολής του pH στην τιμή του οδηγού συμπεριφοράς της ροής n . Το συμπέρασμα το οποίο προκύπτει είναι ότι ο πολφός μπεντονίτη παρουσιάζει μείωση της παραμέτρου n όσο αυξάνει το pH του πολφού μας. Από τα παραπάνω διαγράμματα και τα δεδομένα προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Η τιμή τ_0 των δειγμάτων μειώνεται με την μεταβολή του pH πέρα από την τιμή τ_0 του “τυφλού” δείγματος μπεντονίτη και για τις δύο συγκεντρώσεις για τις οποίες μελετήθηκε η επίδραση του pH.
- Η τιμή του συντελεστή K αυξάνεται με την αύξηση του pH.
- Η τιμή του συντελεστή n μειώνεται με την αύξηση του pH.

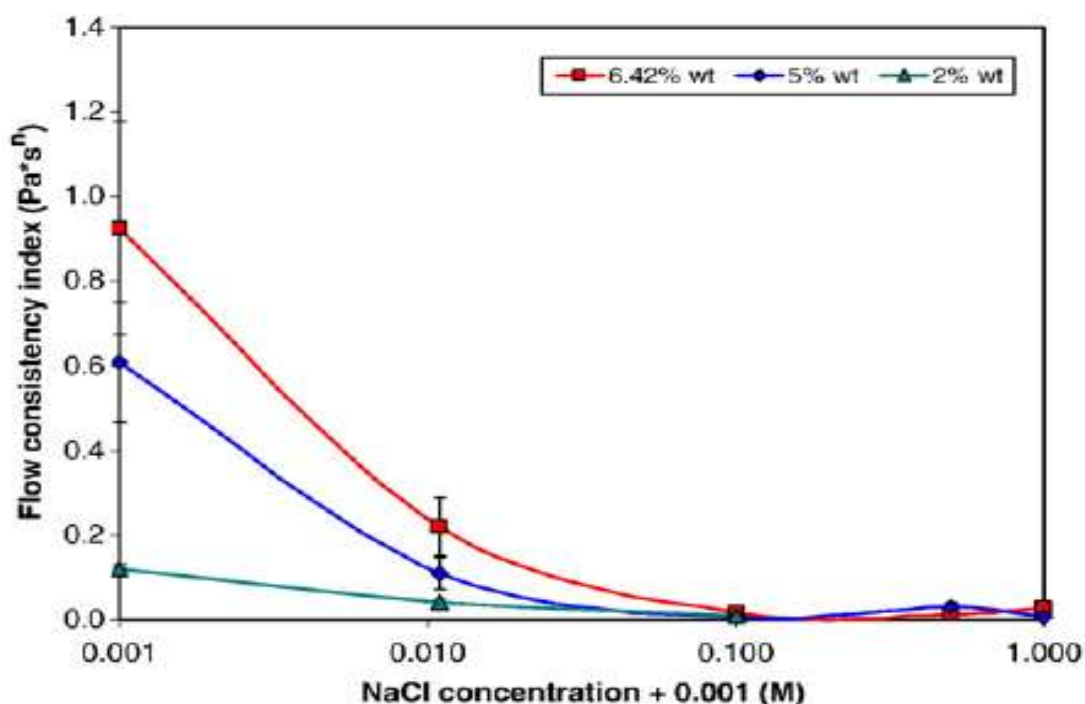
Επίδραση ηλεκτρολύτη NaCl.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 10.24 αφορούν την επίδραση της μεταβολής του ηλεκτρολύτη στην τιμή της τάσης διολίσθησης τ_0 . Το συμπέρασμα το οποίο προκύπτει είναι ότι ο πολφός μπεντονίτη παρουσιάζει αύξηση της αρχικής τάσης διολίσθησης τ_0 με την αύξηση της συγκέντρωσης NaCl στο διάλυμα. Επίσης γίνεται αντιληπτό ότι η επίδραση της συγκέντρωσης NaCl στην αρχική τάση διολίσθησης τ_0 αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης μπεντονίτη στο διάλυμα.



Διάγραμμα 10.24: Επίδραση NaCl στην παράμετρο τ_y , ρευστού μπεντονίτη συγκέντρωσης 2, 5 & 6.42% w/v.

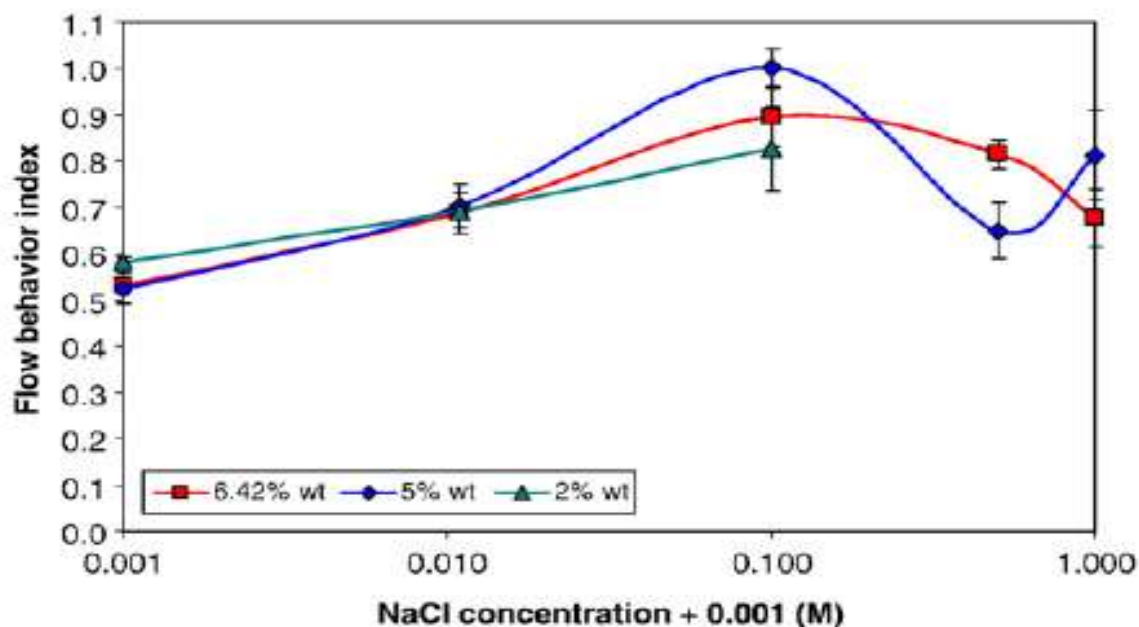
Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 10.25 αφορούν την επίδραση της μεταβολής της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη στην τιμή του οδηγού συνάφειας K . Το συμπέρασμα το οποίο προκύπτει είναι ότι ο πολφός μπεντονίτη παρουσιάζει μείωση του οδηγού συνάφειας K με την αύξηση της συγκέντρωσης NaCl στο διάλυμα. Επίσης γίνεται αντιληπτό ότι η επίδραση της συγκέντρωσης NaCl στον οδηγό συνάφειας K αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης μπεντονίτη στο διάλυμα. Ένα ακόμα συμπέρασμα το οποίο εξάγεται είναι ότι η μεγαλύτερη μείωση στην τιμή του οδηγού συνάφειας K παρατηρείται για αύξηση της συγκέντρωσης ηλεκτρολύτη από 0.001 M σε 0.01 M, και περαιτέρω αύξηση της οδηγεί στον μηδενισμό του οδηγού συνάφειας K .



Διάγραμμα 10.25: Επίδραση NaCl στην παράμετρο K , ρευστού μπεντονίτη συγκέντρωσης 2, 5 & 6.42% w/v.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 10.26 αφορούν την επίδραση της μεταβολής της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη στην τιμή του οδηγού συμπεριφοράς της ροής n . Το συμπέρασμα το οποίο προκύπτει είναι ότι ο πολφός μπεντονίτη παρουσιάζει αύξηση της παραμέτρου n όσο αυξάνει η συγκέντρωση του

ηλεκτρολύτη στο διάλυμα μέχρι συγκέντρωση 0.1 M, ενώ η περαιτέρω αύξηση οδηγεί σε μείωση της τιμής του οδηγού συμπεριφοράς της ροής n .



Διάγραμμα 10.26: Επίδραση NaCl στην παράμετρο n ρευστού μπεντονίτη συγκέντρωσης 2, 5 & 6.42% w/v.

Από τα παραπάνω διαγράμματα και τα δεδομένα προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Η τιμή τ_0 των δειγμάτων μειώνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης του NaCl.
- Η τιμή του συντελεστή K αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης του NaCl.
- Η τιμή του συντελεστή n αυξάνεται για συγκεντρώσεις NaCl έως 0.1 M, ενώ με περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης του NaCl η τιμή αρχίζει και μειώνεται.

Περισσότερες πληροφορίες για την επίδραση της συγκέντρωσης ηλεκτρολύτη NaCl και της τιμής του pH σε πολφούς μπεντονίτη παρουσιάζονται στην εργασία Kelessidis et al., 2007b.

10.6. Συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από τα ρευστά που μελετήθηκαν.

Από την μελέτη διαφορετικών ειδών ρευστών, και την ανάλυση και ερμηνεία των ρεολογικών τους ιδιοτήτων προέκυψαν ορισμένα πολύ χρήσιμα συμπεράσματα.

- Ρευστά τα οποία περιέχουν σαν πρόσθετο Carbopol 980 είναι δύσκολα ως προς την παρασκευή αλλά και την μελέτη, επειδή δεν εμφανίζουν σταθερές ρεολογικές ιδιότητες, για ίδια συγκέντρωση Carbopol 980 στο μείγμα.
- Ρευστά τα οποία περιέχουν CMC ή PAC εμφανίζονται σταθερά ως προς τις ρεολογικές τους ιδιότητες και είναι εύκολα στην μελέτη των ρεολογικών ιδιοτήτων τους.
- Ρευστά τα οποία περιέχουν πρόσθετα μπεντονίτη εμφανίζουν σταθερότητα ως προς τις ρεολογικές τους ιδιότητες.
- Ο συνδυασμός πρόσθετων CMC και μπεντονίτη για παρασκευή ρευστού διάτρησης, εμφανίζει ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά όσο αφορά την επίδραση της θερμοκρασίας στις ρεολογικές ιδιότητές τους.
- Η κλίμακα στην οποία παρασκευάζουμε τα ρευστά επηρεάζει τις ρεολογικές ιδιότητες και το είδος του ρεολογικού μοντέλου που περιγράφει την συμπεριφορά τους (Bingham Plastic, Power Law, Herschel-Bulkley). Για παράδειγμα αποδείχτηκε ότι όσο αυξανόταν η κλίμακα για τα ρευστά τα οποία παρασκευάστηκαν, είχε σαν συνέπεια την μείωση της τιμής της αρχικής τάσης διολίσθησης τ_0 .

Κεφάλαιο 11^ο - Πειραματικά δεδομένα πτώσης πίεσης και σύγκριση με τα θεωρητικά μοντέλα.

11.1. Εισαγωγή.

Μετά την επιλογή των ρευστών αποφασίσαμε να προχωρήσουμε στην παρασκευή πολφού μπεντονίτη, για την καταγραφή της πτώσης πίεσης κατά την ροή στο μοντέλο της οριζόντιας γεώτρησης και την σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων με τους θεωρητικούς υπολογισμούς με τα τρία υπολογιστικά μοντέλα.

11.2. Βαθμονόμηση καταγραφικών οργάνων και επιβεβαίωση υπολογιστικών μοντέλων.

Πριν την κατασκευή του ρευστού και την μελέτη της πτώσης πίεσης έπρεπε να γίνουν δύο πολύ σημαντικές διαδικασίες.

- Η βαθμονόμηση των καταγραφικών οργάνων πτώσης πίεσης (Validyne DP 15) (περιγράφηκε στο 8^ο Κεφάλαιο).
- Μελέτη της εγκυρότητας των υπολογιστικών μοντέλων.

Παρόλο που έγινε η βαθμονόμηση του οργάνου (8^ο Κεφάλαιο), επόμενο βήμα είναι ο έλεγχος αυτής της βαθμονόμησης. Για να γίνει αυτό γεμίζουμε την δεξαμενή με νερό και μετράμε την πτώση πίεσης σε 90 cm την οποία προκαλεί η κυκλοφορία του νερού στο σύστημα μας για διάφορες παροχές κυκλοφορίας.

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία μέτρησης της πτώσης πίεσης καταγράφηκε η αρχική ένδειξη του οργάνου Validyne DP 15. Αυτό έγινε για να ελέγξουμε εάν παρουσιάζει κάποια απόκλιση από την τιμή 0 την οποία πρέπει να εμφανίζει. Παρατηρήθηκε ότι η τιμή είχε μεταβληθεί σε -0.1 ($-0.1/56 \approx -0.1\%$ σφάλμα) (Πίνακας 11.1). Αυτό είναι κάτι το οποίο μπορεί να οφείλεται στο ότι μετακινήσαμε το όργανο Validyne DP 15 από τον πάγκο στον οποίο έγινε η βαθμονόμηση στο σύστημα ροής, από μικρή κλίση την οποία μπορεί να εμφανίζει το σύστημα ροής η από μικρή απορύθμιση του οργάνου. Παρόλα αυτά προχωρήσαμε στην μελέτη της πτώσης πίεσης γιατί αυτή η απόκλιση την οποία εμφάνισε βρίσκεται μέσα στα

στατιστικά όρια σφάλματος του διαφράγματος που δίνει ο κατασκευαστής του οργάνου ($\pm 0.25\%$ σφάλμα). Επίσης καταγράφηκαν οι τιμές της θερμοκρασίας και της πυκνότητας του ρευστού (Πίνακας 11.1). Ακολούθως έγινε καταγραφή πτώσης πίεσης για νερό σε διάφορες παροχές και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.2 και το Διάγραμμα 11.1.

11.2.1. Μέτρηση πτώσης πίεσης για νερό σε ομόκεντρο δακτύλιο.

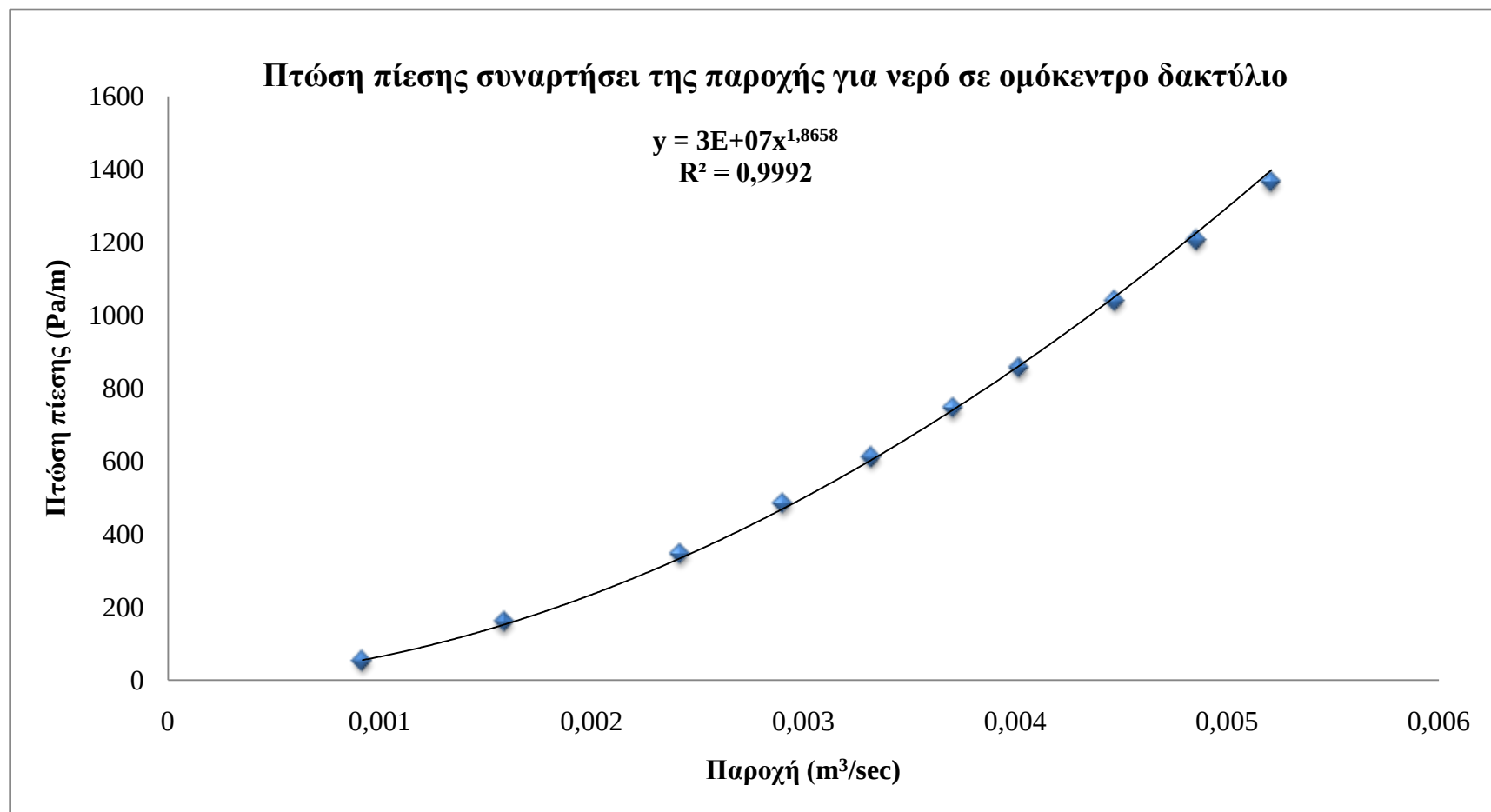
Νερό 620 lt	
Αρχική Ένδειξη DP 15	-0.1
Θερμοκρασία Ρευστού °C	22.7
Πυκνότητα Ρευστού (kg/m ³)	1004
Πυκνότητα Ρευστού ¹ (kg/m ³)	1003

Πίνακας 11.1: Θερμοκρασία – Πυκνότητα ρευστού και αρχική ένδειξη DP 15. Η πυκνότητα του νερού που παρουσιάζεται στον Πίνακα διαφέρει από την “πραγματική” λόγω του ότι το νερό προερχόταν από το σύστημα ύδρευσης του Πολυτεχνείου και περιείχε διάφορα στερεά τα οποία σε συνδυασμό με διάφορα κατάλοιπα που υπήρχαν στην δεξαμενή του συστήματος επηρέασαν την πυκνότητα του.

¹ Η δεύτερη τελική πυκνότητα του ρευστού μετρήθηκε με τον ζυγό πυκνότητας της εταιρείας OFITE για επιβεβαίωση της τιμής την οποία παίρναμε από το όργανο Rheonic.

Παροχή (kg/min)	Παροχή (lt/min)	Παροχή (m ³ /sec)	Πτώση Πίεσης (cm H ₂ O)	Πτώση Πίεσης (Pa/m)
55	55.10	0.000918	0.53	52.0
95	95.17	0.001586	1.62	159.0
145	145.26	0.002421	3.52	344.8
174	174.31	0.002905	4.93	483.2
199	199.36	0.003323	6.23	610.5
222	222.40	0.003707	7.60	744.5
241	241.43	0.004024	8.73	855.0
268	268.48	0.004475	10.62	1039.6
291	291.52	0.004859	12.32	1206.7
312	312.56	0.005209	13.93	1364.4

Πίνακας 11.2: Δεδομένα κυκλοφορίας νερού σε ομόκεντρο δακτύλιο για θερμοκρασία 22.7 °C.



Διάγραμμα 11.1: Πτώση πίεσης συναρτήσει της παροχής για νερό σε ομόκεντρο δακτύλιο.

Από τα αποτελέσματα και την ερμηνεία της γραφικής παράστασης βλέπουμε ότι η σχέση που συνδέει την παροχή με την πτώση πίεσης είναι εκθετική και για να γίνουν αποδεκτές οι τιμές που καταγράψαμε θα πρέπει ο εκθέτης της εξίσωσης $\Delta P = aQ^\beta$ (28) που συνδέει την παροχή με την πτώση πίεσης, δηλαδή η τιμή της μεταβλητής β να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1.7 – 1.9 (Jonsson and Sparrow, 1965), κάτι το οποίο ισχύει για την περίπτωση μας, αφού η τιμή του είναι 1.8658.

11.2.2. Μέτρηση πτώσης πίεσης με νερό σε 100% έκκεντρο δακτύλιο.

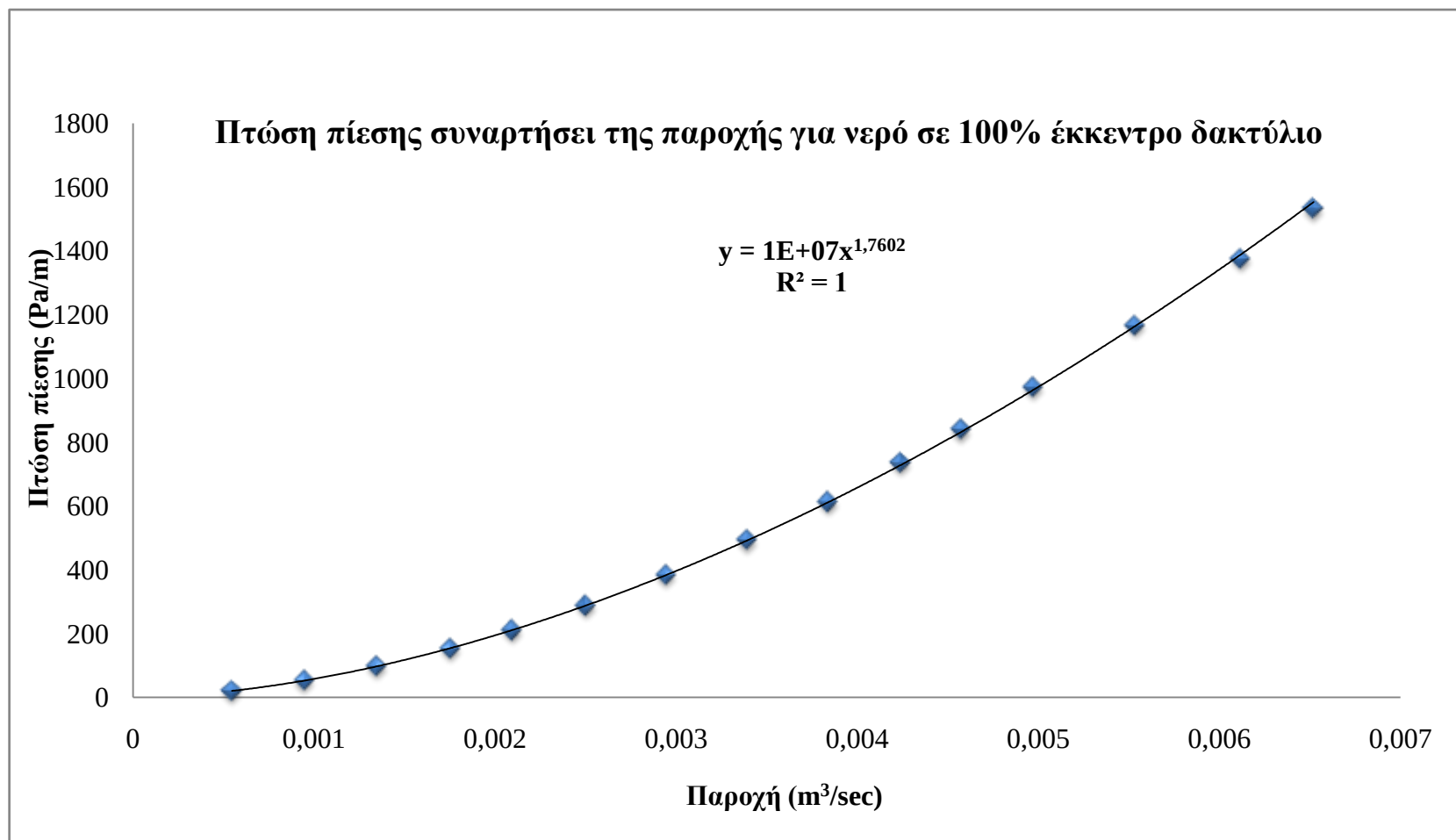
Μετά το τέλος των μετρήσεων πτώσης πίεσης ρευστών Herschel-Bulkley (βλέπε παρακάτω) και τον καθαρισμό του συστήματος μας από το ρευστό, μετρήθηκε η πτώση πίεσης σε 90 cm που προκαλεί η κυκλοφορία νερού στον έκκεντρο δακτύλιο για διάφορες παροχές στο σύστημα μας με σκοπό να δούμε την πτώση πίεσης σε 100% έκκεντρο δακτύλιο, να γίνει μια σύγκριση με την πτώση πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο, και να εξεταστεί και η βαθμονόμηση του οργάνου. Πριν ξεκινήσει η διαδικασία μέτρησης της πτώσης πίεσης καταγράφηκε η αρχική ένδειξη του οργάνου Validyne DP 15. Αυτό έγινε για να ελέγξουμε εάν παρουσιάζει κάποια απόκλιση από την τιμή 0 την οποία πρέπει να εμφανίζει. Παρατηρήθηκε ότι η τιμή είχε μεταβληθεί σε -0.22 ($-0.1/56 \approx -0.39\%$ σφάλμα). Επίσης καταγράφηκαν οι τιμές της θερμοκρασίας και της πυκνότητας του ρευστού (Πίνακας 11.3). Ακολούθως έγινε καταγραφή πτώσης πίεσης για νερό σε διάφορες παροχές και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.4 και το Διάγραμμα 11.2.

Νερό 620 lt	
Αρχική Ένδειξη DP 15	-0.22
Θερμοκρασία Ρευστού °C	21.1
Πυκνότητα Ρευστού (kg/m ³)	1002

Πίνακας 11.3: Θερμοκρασία – Πυκνότητα ρευστού και αρχική ένδειξη DP 15.

Παροχή (kg/min)	Παροχή (lt/min)	Παροχή (m ³ /sec)	Πτώση Πίεσης (cm H ₂ O)	Πτώση Πίεσης (Pa/m)
32.8	32.73	0.000546	0.20	19.6
56.8	56.69	0.000945	0.53	52.0
81.0	80.84	0.001347	0.99	95.8
105.5	105.29	0.001755	1.57	153.6
126.0	125.75	0.002096	2.14	209.9
150.5	150.20	0.002503	2.93	286.7
177.0	176.65	0.002944	3.92	384.2
204.0	203.59	0.003393	5.03	492.3
231.0	230.54	0.003842	6.25	612.5
255.0	254.49	0.004242	7.51	735.2
275.0	274.45	0.004574	8.56	838.9
299.0	298.40	0.004973	9.93	972.7
333.0	332.34	0.005539	11.91	1165.8
368.0	367.27	0.006121	14.05	1375.9
392.0	391.22	0.006520	15.64	1532.1

Πίνακας 11.4: Δεδομένα κυκλοφορίας νερού σε 100% έκκεντρο δακτύλιο για θερμοκρασία 21.1 °C.



Διάγραμμα 11.2: Πτώση πίεσης συναρτήσει της παροχής για νερό σε 100% έκκεντρο δακτύλιο.

Από τα αποτελέσματα και την ερμηνεία της γραφικής παράστασης βλέπουμε ότι η σχέση που συνδέει την παροχή με την πτώση πίεσης είναι εκθετική και για να γίνουν αποδεκτές οι τιμές που καταγράψαμε θα πρέπει ο εκθετής της εξίσωσης $\Delta P = aQ^\beta$ που συνδέει την παροχή με την πτώση πίεσης, δηλαδή η τιμή της μεταβλητής β να κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1.7 – 1.9, κάτι το οποίο ισχύει για την περίπτωση μας, αφού η τιμή του είναι 1.7602, και μάλιστα ιδανική τιμή θεωρείται η 1.82 (Jonsson et al., 1965). Στους Πίνακες 11.5α και 11.5β γίνεται σύγκριση των μετρούμενων με τις ημιθεωρητικές προσεγγίσεις για πτώση πίεσης όπως πρόέκυψαν από τα αποτελέσματα ερευνών των Jonsson και Sparrow-1965.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται διάγραμμα σύγκρισης πτώσης πίεσης νερού σε ομόκεντρο και 100% έκκεντρο δακτύλιο. Επίσης στο Διάγραμμα 11.3 παρουσιάζεται σύγκριση των πειραματικών τιμών πτώσης πίεσης για νερό σε ομόκεντρο και 100% έκκεντρο δακτύλιο με τις εξισώσεις που προτείνουν οι Jonsson και Sparrow (1965) για πτώση πίεσης σε ομόκεντρο και έκκεντρο δακτύλιο, για Νευτώνεια ρευστά, και είναι βασισμένες σε λεπτομερείς πειραματικές μετρήσεις.

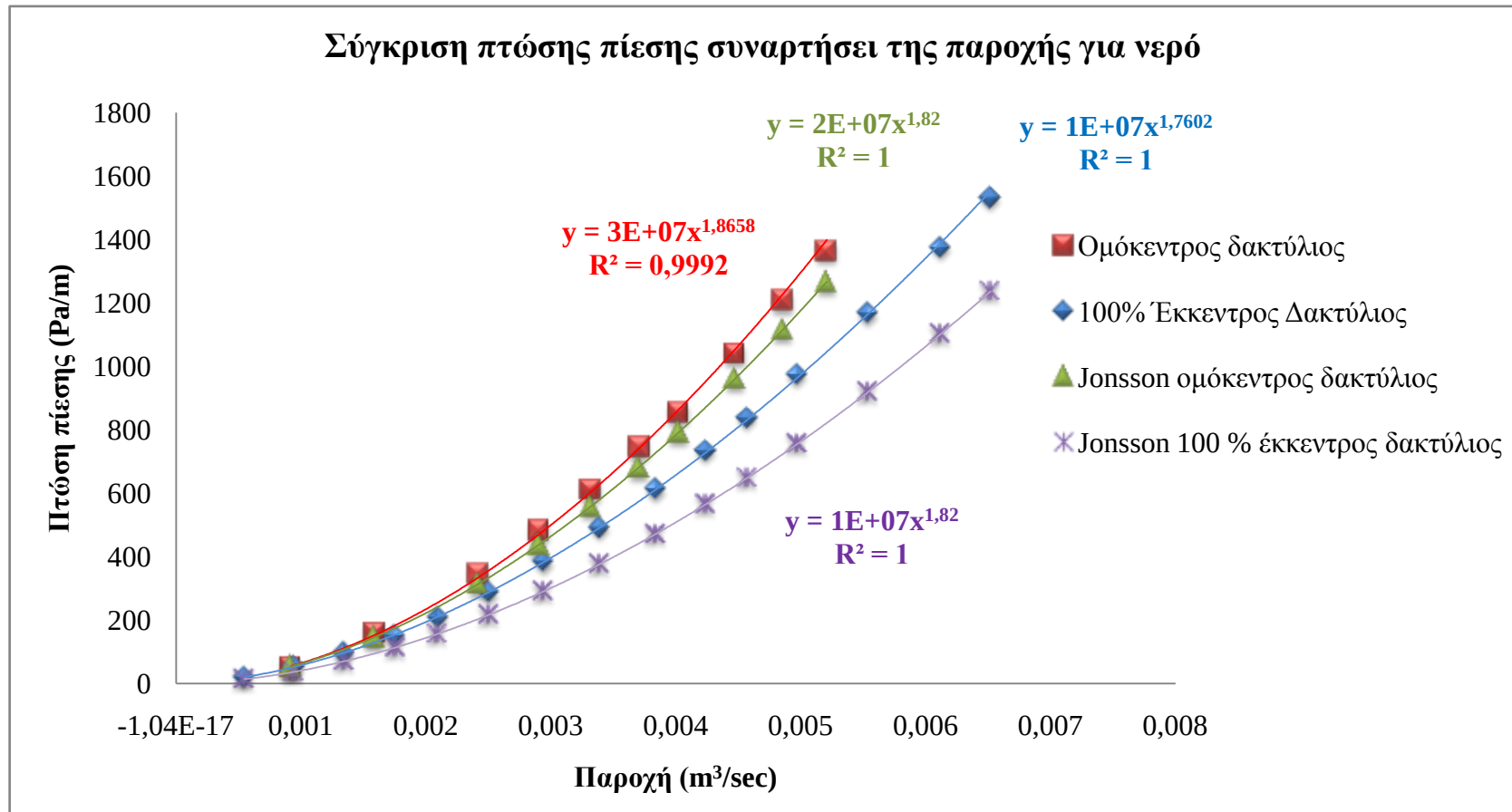
Παροχή (m ³ /sec)	Πτώση Πίεσης (Pa/m)	Διαφορά ² (%)
0.000546	13.5	-31%
0.000945	36.7	-29%
0.001347	70.1	-28%
0.001755	113.4	-26%
0.002096	156.7	-25%
0.002503	216.5	-24%
0.002944	290.8	-24%
0.003393	376.6	-24%
0.003842	472.2	-23%
0.004242	565.3	-23%
0.004574	648.5	-23%
0.004973	755.2	-22%
0.005539	918.8	-21%
0.006121	1102.1	-20%
0.006520	1236.4	-19%

Πίνακας 11.5α: Θεωρητική πτώση πίεσης νερού σε 100% έκκεντρο δακτύλιο (Jonsson & Sparrow).

Παροχή (m ³ /sec)	Πτώση Πίεσης (Pa/m)	Διάφορα (%)
0.000918	53.8	3%
0.001586	145.4	-9%
0.002421	313.9	-9%
0.002905	437.4	-9%
0.003323	558.5	-9%
0.003707	681.5	-8%
0.004024	791.4	-7%
0.004475	960.1	-8%
0.004859	1115.3	-8%
0.005209	1266.1	-7%

Πίνακας 11.5β: Θεωρητική πτώση πίεσης νερού σε ομόκεντρο δακτύλιο (Jonsson & Sparrow).

² Θεωρητικές τιμές–Πειραματικές τιμές
Πειραματικές τιμές



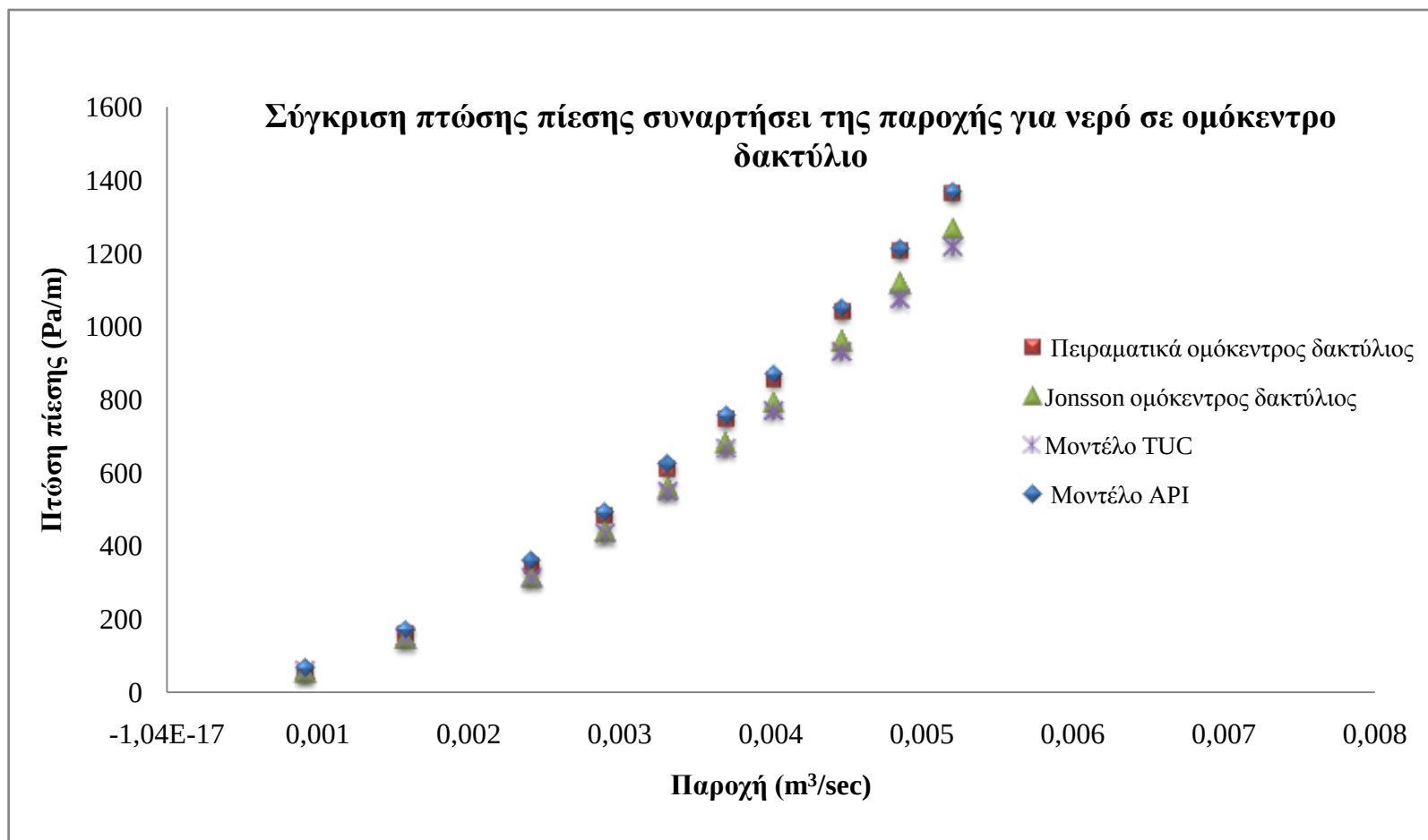
Διάγραμμα 11.3: Συγκριτικό διάγραμμα πτώσης πίεσης συναρτήσει της παροχής για νερό σε ομόκεντρο και 100% έκκεντρο δακτύλιο.

Επίσης παρουσιάζεται σύγκριση των πειραμάτων τιμών πτώσης πίεσης με νερό σε ομόκεντρο (Πίνακας 11.6, Διάγραμμα 11.4 και 11.5) και 100 % έκκεντρο δακτύλιο (Πίνακας 11.7, Διάγραμμα 11.6 και 11.7), με τα θεωρητικά μοντέλα TUC και API. Για τον μετασχηματισμό της πτώσης πίεσης σε έκκεντρο δακτύλιο χρησιμοποιήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στην ενότητα 11.4.3 πολλαπλασιάζοντας την θεωρητική πτώση πίεσης με τον συντελεστή R που εκφράζει την επίδραση της εκκεντρότητας.

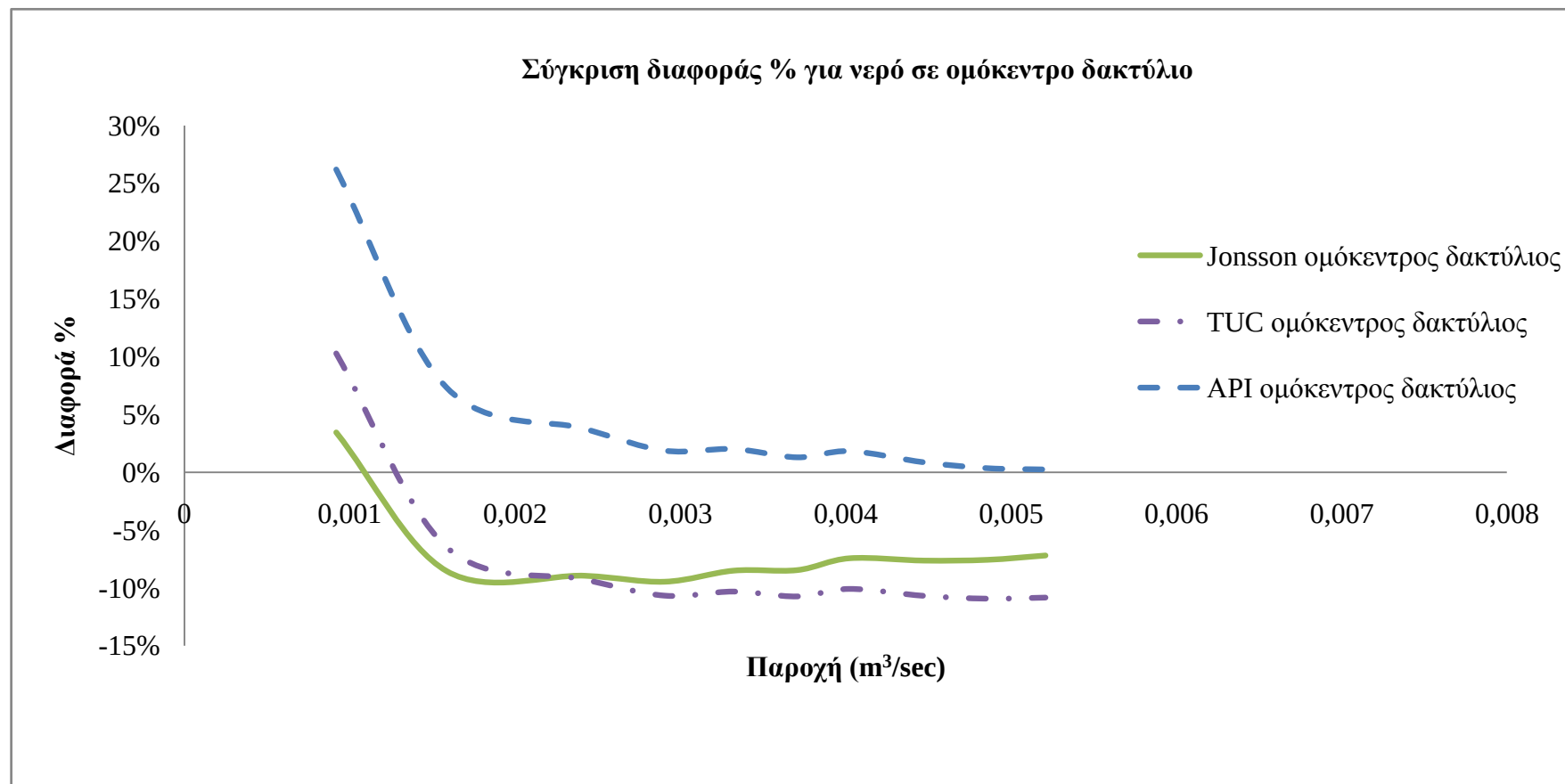
Ο λόγος για τον οποίο έγινε αυτή η ανάλυση είναι για να ελεγχθεί αν τα δύο αυτά μοντέλα (TUC και API), παρότι έχουν σχεδιαστεί για μη Νευτώνεια ρευστά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το νερό. Το μοντέλο $RGU - TUC$ δεν χρησιμοποιήθηκε για αυτή την σύγκριση επειδή η προσέγγιση την οποία ακολουθεί για τον υπολογισμό των ρεολογικών ιδιοτήτων των ρευστών (τ_o , K , n) δεν ενδείκνυται για ρευστά όπως το νερό.

Παροχή (m ³ /sec)	Πειραματική πτώση πίεσης (Pa/m)	Πτώση πίεσης Μοντέλο TUC (Pa/m)	Διαφορά % TUC	Πτώση πίεσης Μοντέλο API (Pa/m)	Διαφορά % API
0.000918	52.0	57.3	10%	65.6	26%
0.001586	159.0	148.7	-6%	170.6	7%
0.002421	344.8	312.8	-9%	357.7	4%
0.002905	483.2	431.6	-11%	492.2	2%
0.003323	610.5	547.4	-10%	622.7	2%
0.003707	744.5	664.5	-11%	754.1	1%
0.004024	855.0	768.6	-10%	870.6	2%
0.004475	1039.6	928.3	-11%	1048.4	1%
0.004859	1206.7	1074.6	-11%	1210.9	0%
0.005209	1364.4	1216.3	-11%	1367.6	0%

Πίνακας 11.6: Σύγκριση πειραματικών με θεωρητικές τιμές πτώση πίεσης νερού σε ομόκεντρο δακτύλιο.



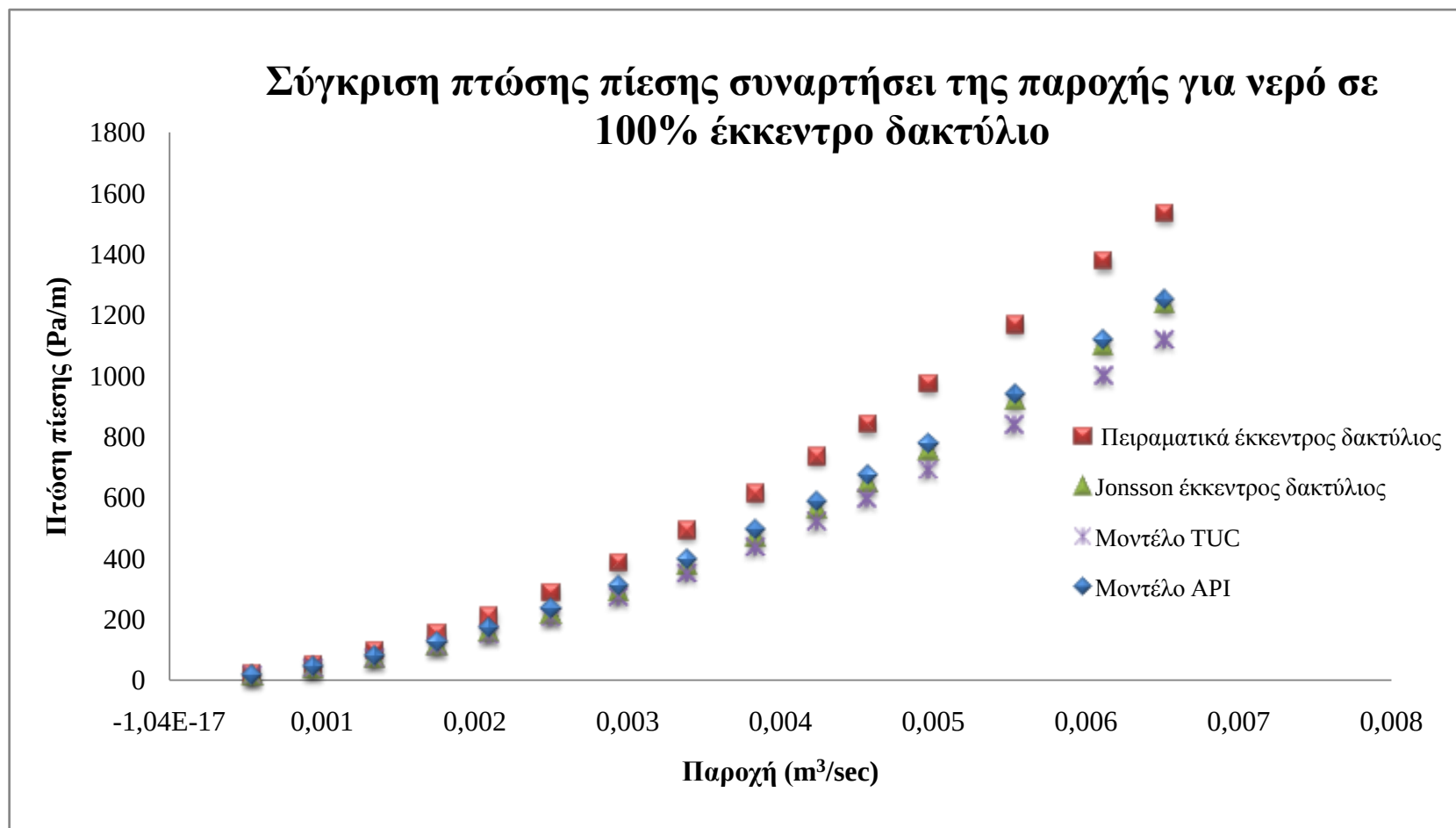
Διάγραμμα 11.4: Συγκριτικό διάγραμμα πειραματικής πτώσης πίεσης συναρτήσει της παροχής για νερό σε ομόκεντρο με θεωρητικά μοντέλα TUC, API, Jonsson.



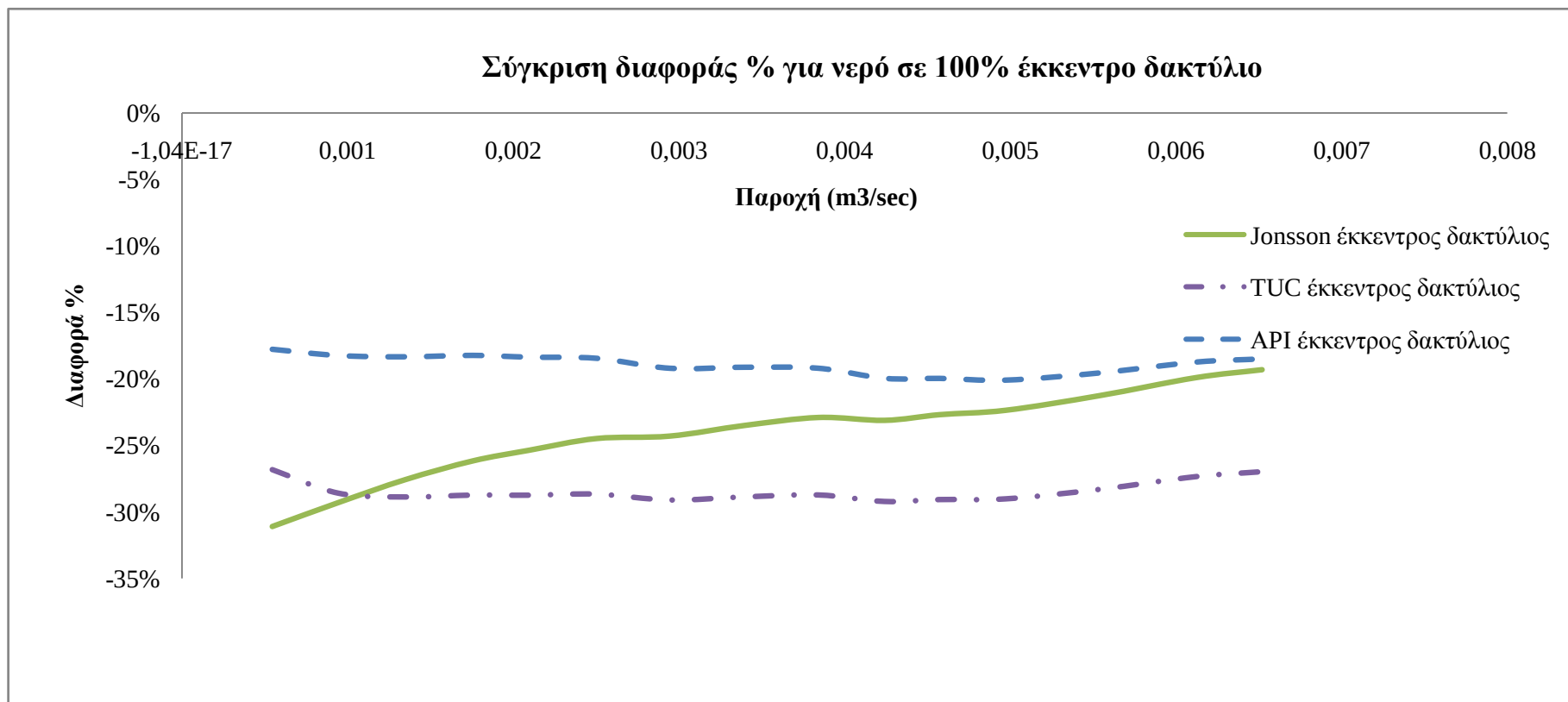
Διάγραμμα 11.5: Διαφορά % πειραματικών τιμών για νερό σε ομόκεντρο δακτύλιο με θεωρητικούς υπολογισμούς .

Παροχή (m ³ /sec)	Πειραματική πτώση πίεσης (Pa/m)	Πτώση πίεσης Μοντέλο TUC*R (Pa/m)	Διαφορά % TUC	Πτώση πίεσης Μοντέλο API*R (Pa/m)	Διαφορά % API
0.000546	19.6	14.4	-27%	16.1	-18%
0.000945	52.0	37.1	-29%	42.5	-18%
0.001347	95.8	68.9	-29%	79.1	-18%
0.001755	153.6	109.5	-29%	125.6	-18%
0.002096	209.9	149.6	-29%	171.4	-18%
0.002503	286.7	204.5	-29%	233.8	-18%
0.002944	384.2	272.4	-29%	310.5	-19%
0.003393	492.3	350.2	-29%	398.2	-19%
0.003842	612.5	436.5	-29%	494.9	-19%
0.004242	735.2	520.4	-29%	588.6	-20%
0.004574	838.9	594.9	-29%	671.5	-20%
0.004973	972.7	690.4	-29%	777.4	-20%
0.005539	1165.8	836.5	-28%	938.8	-20%
0.006121	1375.9	999.6	-27%	1118.1	-19%
0.006520	1532.1	1118.9	-27%	1248.7	-18%

Πίνακας 11.7: Θεωρητική πτώση πίεσης νερού σε 100% έκκεντρο δακτύλιο με τον συντελεστή R να εκφράζει την επίδραση της εκκεντρότητας.



Διάγραμμα 11.6: Συγκριτικό διάγραμμα πτώσης πίεσης συναρτήσει της παροχής για νερό σε 100% έκκεντρο με θεωρητικά μοντέλα TUC, API, Jonsson.



Διάγραμμα 11.7: Διάφορα % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς για νερό σε 100% έκκεντρο δακτύλιο.

11.3. Σύγκριση μοντέλων TUC, RGU – TUC, API για ρευστά Herschel-Bulkley, με πειραματικά δεδομένα API.

Για τον έλεγχο των τριών θεωρητικών μοντέλων χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα τα οποία δίνονται από το API (API 13 D, 2006). Με βάση τα δεδομένα, τα οποία είναι διαθέσιμα στο παράρτημα, εισάγονται στα θεωρητικά μοντέλα τα γεωμετρικά στοιχεία και τα αποτελέσματα υπολογισμού πτώσης πίεσης τα οποία προκύπτουν από κάθε μοντέλο και συγκρίνονται με τα “προτεινόμενα” δεδομένα που παραθέτει το API.

Η προσέγγιση του μοντέλου API για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης ρευστών Herschel-Bulkley είναι η ακόλουθη.

Διατηρητικά στελέχη.

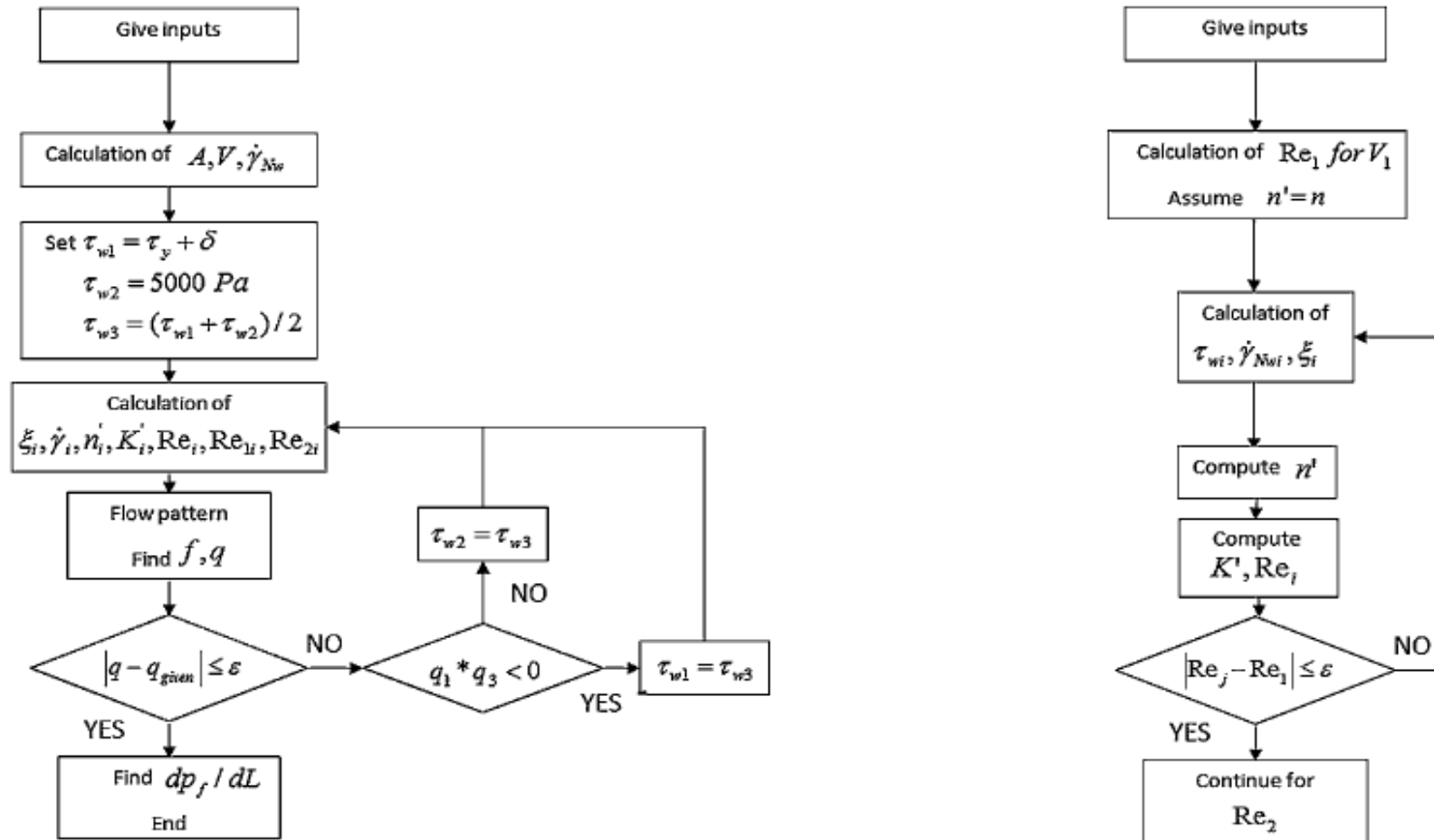
$$\Delta p = \frac{\alpha f \rho V^2 L}{\beta d_i} \quad (29)$$

Δακτύλιος.

$$\Delta p = \frac{\alpha f \rho V^2 L}{\beta d_{hyd}} \quad (30)$$

Η προσέγγιση του μοντέλου RGU –TUC για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης ρευστών Herschel-Bulkley είναι ως περιγράφηκε στο 6^ο Κεφάλαιο.

Η προσέγγιση του μοντέλου TUC για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης ρευστών Herschel-Bulkley παρουσιάζεται στο Διάγραμμα ροής 11.1 και περιγράφεται αναλυτικά από τους Founargiotakis et al. (2008).



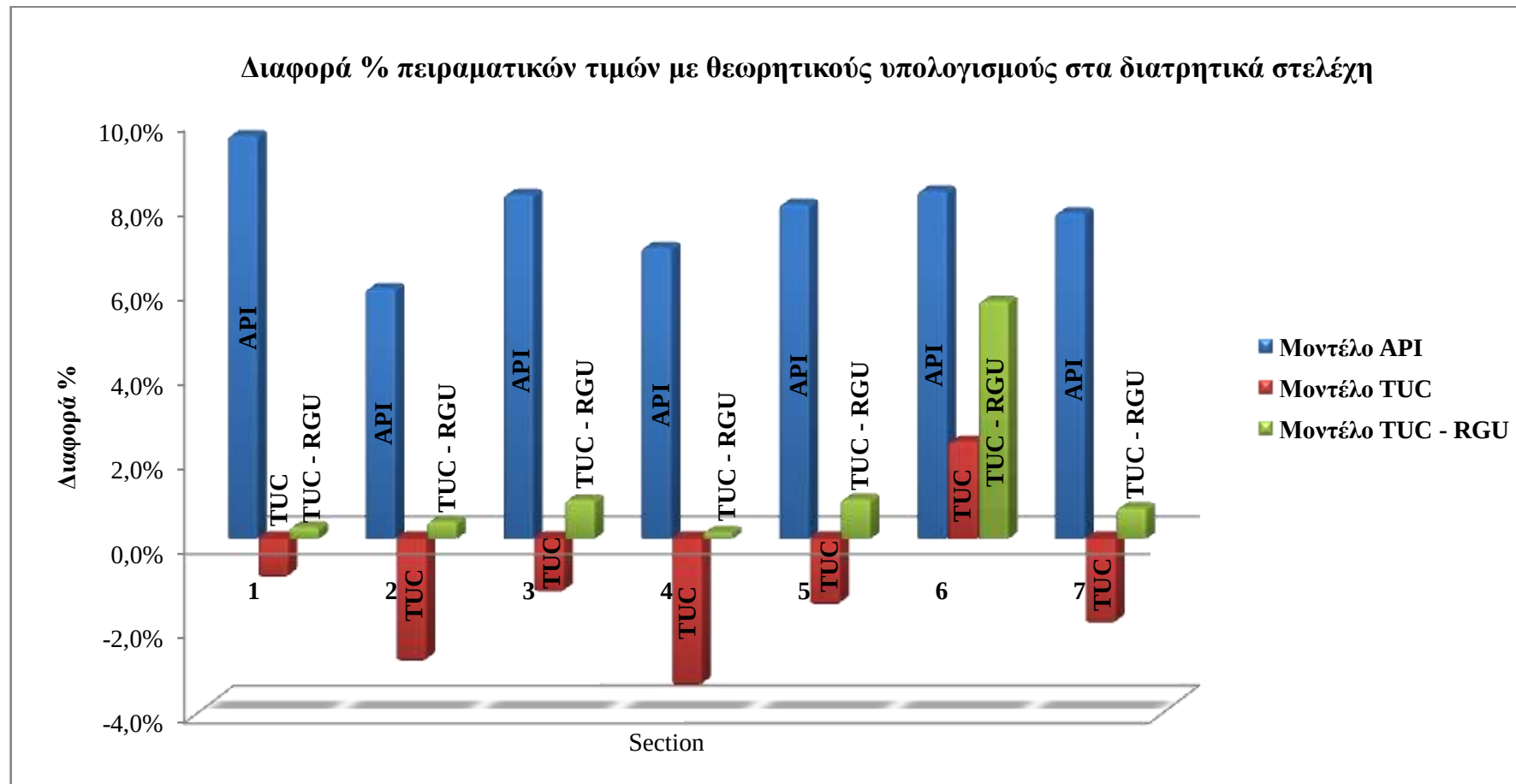
Διάγραμμα ροής 11.1: Παρουσίαση λειτουργίας μοντέλου TUC (Founargiotakis et al., 2008).

Τα αποτελέσματα αφορούν τόσο την πτώση πίεσης μέσα στα διατρητικά στελέχη αλλά και στον δακτύλιο της γεώτρησης, σε διαφορετικά τμήματα της γεώτρησης αλλά και για διάφορες παροχές κυκλοφορίας ρευστού. Το ρευστό του οποίου μελετήθηκε η πτώση πίεσης ανήκει στην κατηγορία των Herschel-Bulkley ρευστών. Τα αποτελέσματα αυτά παραθέτονται στους παρακάτω πίνακες.

Για παροχή 420 gpm ($0.154 \text{ m}^3/\text{s}$), σε κάθε τμήμα της γεώτρησης οι τιμές της πτώσης πίεσης τόσο στα διατρητικά στελέχη όσο και στον δακτύλιο της γεώτρησης είναι τα ακόλουθα.

Διατρητικά Στελέχη							
SECTION	Πειραματικές τιμές API (psi)	Θεωρητικές τιμές Μοντέλο API (psi)	Θεωρητικές τιμές Μοντέλο TUC (psi)	Θεωρητικές τιμές Μοντέλο RGU – TUC (psi)	Διαφορά % API	Διαφορά % TUC	Διαφορά % RGU - TUC
1	214.0	234.4	212.0	214.6	9.5%	-0.9%	0.3%
2	97.0	102.7	94.2	97.4	5.9%	-2.9%	0.4%
3	553.0	598.0	545.9	558.1	8.1%	-1.3%	0.9%
4	633.0	676.6	610.9	634.0	6.9%	-3.5%	0.2%
5	139.0	150.0	136.8	140.3	7.9%	-1.6%	0.9%
6	73.0	79.0	74.7	77.1	8.2%	2.3%	5.6%
Συνολική Πτώση Πίεσης (psi)	1709.0	1840.7	1674.4	1721.5	7.7%	-2.0%	0.7%

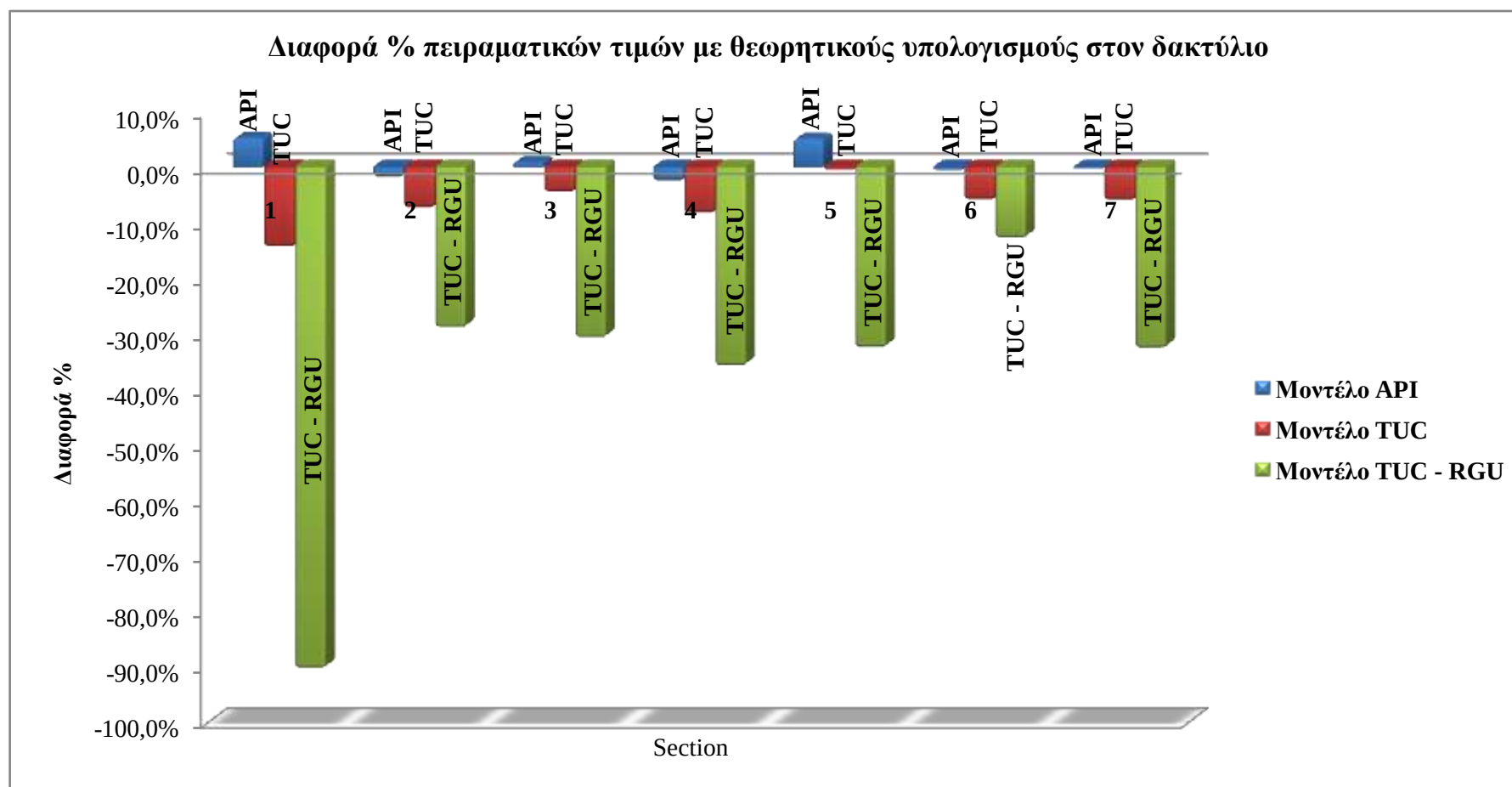
Πίνακας 11.8: Σύγκριση θεωρητικών μοντέλων με πειραματικά δεδομένα για την περιοχή των διατρητικών στελεχών.



Διάγραμμα 11.8: Διαφορά % πειραματικών δεδομένων στα διατρητικά στελέχη με θεωρητικούς υπολογισμούς.

Δακτύλιος							
SECTION	Πειραματικές τιμές API (psi)	Θεωρητικές τιμές Μοντέλο API(psi)	Θεωρητικές τιμές Μοντέλο TUC (psi)	Θεωρητικές τιμές Μοντέλο RGU – TUC (psi)	Διαφορά % API	Διαφορά % TUC	Διαφορά % RGU - TUC
1	8.0	8.4	6.8	0.8	5.4%	-14.5%	-90.5%
2	44.0	43.1	40.7	31.2	-2.0%	-7.5%	-29.1%
3	260.0	262.4	247.9	179.6	0.9%	-4.6%	-30.9%
4	292.0	284.3	267.4	187.0	-2.6%	-8.4%	-36.0%
5	75.0	78.9	74.5	50.5	5.2%	-0.6%	-32.7%
6	37.0	36.7	34.8	32.2	-0.7%	-6.1%	-13.0%
Συνολική Πτώση Πίεσης (psi)	716.0	713.9	672.2	481.2	-0.3%	-6.1%	-32.8%

Πίνακας 11.9: Σύγκριση θεωρητικών μοντέλων με πειραματικά δεδομένα για τον δακτύλιο της γεώτρησης.



Διάγραμμα 11.9: Διαφορά % πειραματικών δεδομένων στον δακτύλιο της γεώτρησης με θεωρητικούς υπολογισμούς.

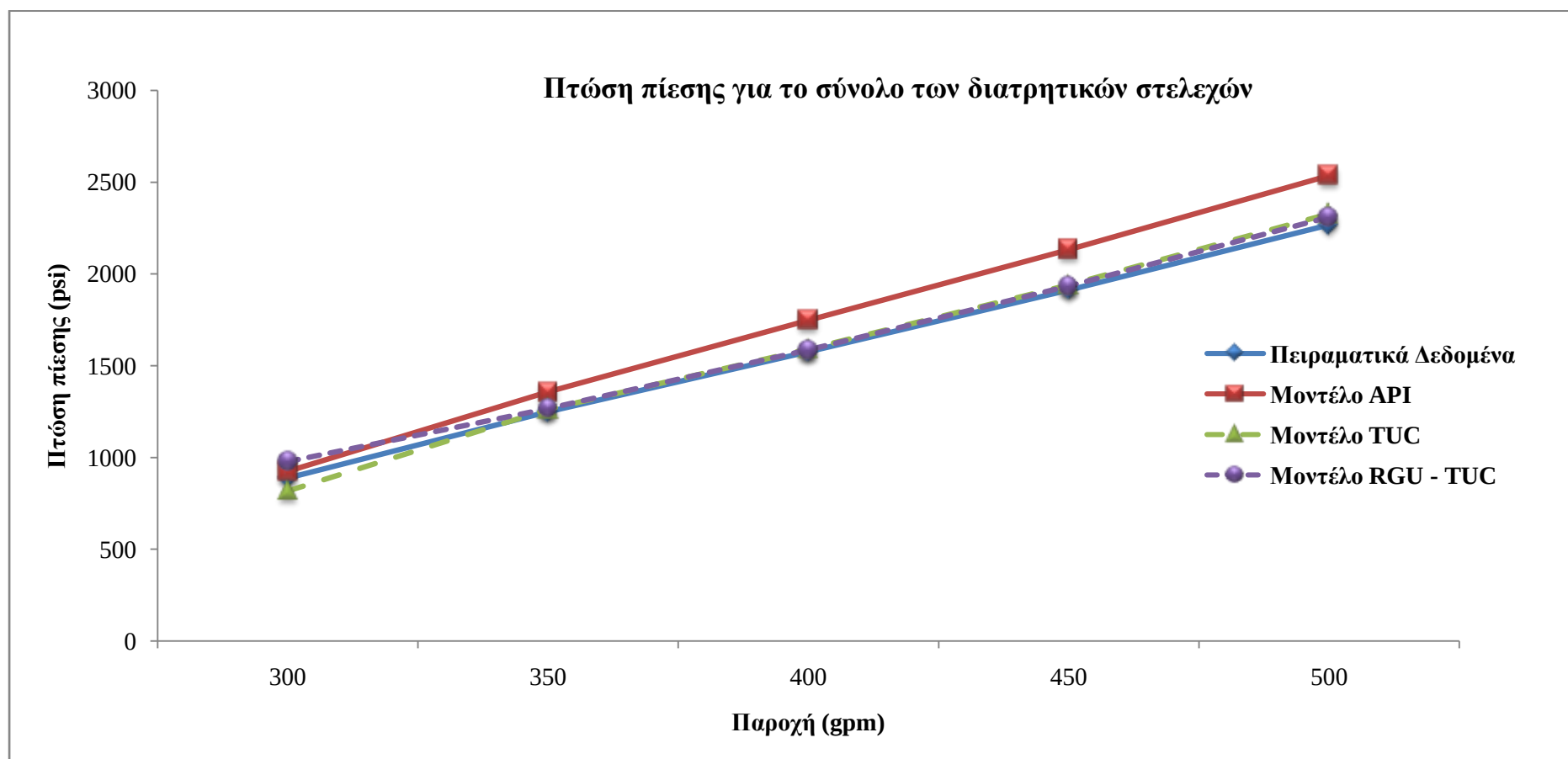
Από το Διάγραμμα 11.8 προκύπτει ότι καλύτερη προσέγγιση με τις μετρήσεις πτώσης πίεσης στα διατρητικά στελέχη (API 13 D, 2006) δίνει το μοντέλο RGU – TUC, με το μοντέλο TUC να έχει επίσης πολύ καλή προσέγγιση. Σε αντίθεση το μοντέλο API δίνει την χειρότερη προσέγγιση από τα τρία μοντέλα.

Στο Διάγραμμα 11.9 προκύπτει ότι καλύτερη προσέγγιση με τις μετρήσεις πτώσης πίεσης στον δακτύλιο της γεώτρησης (API 13 D, 2006) δίνουν τα μοντέλα TUC και API. Σε αντίθεση το μοντέλο RGU – TUC δίνει την χειρότερη προσέγγιση από τα τρία μοντέλα.

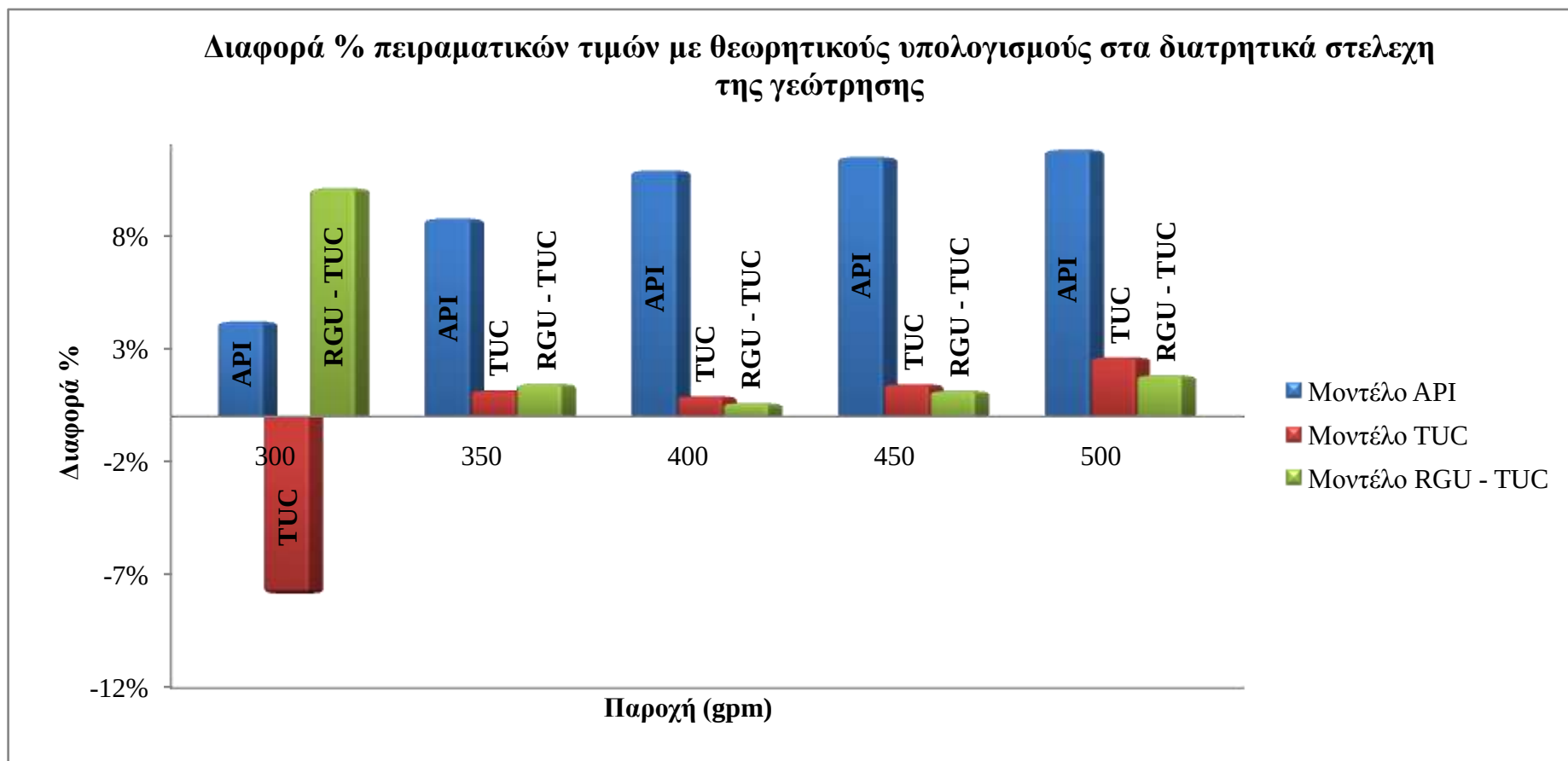
Πραγματοποιήθηκαν επίσης αναλύσεις για το σύνολο της πτώσης πίεσης στην γεώτρηση για διαφορετικές παροχές, και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την θεωρητική ανάλυση σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα είναι τα ακόλουθα.

Διατρητικά Στελέχη							
Παροχή (gpm)	Πειραματικές τιμές API (psi)	Θεωρητικές τιμές Μοντέλο API (psi)	Θεωρητικές τιμές Μοντέλο TUC (psi)	Θεωρητικές τιμές Μοντέλο RGU – TUC (psi)	Διαφορά % API	Διαφορά % TUC	Διαφορά % RGU - TUC
300	887.0	924.3	817.6	976.6	4.2%	-7.8%	10.1%
350	1248.0	1357.2	1262.5	1266.2	8.8%	1.2%	1.5%
400	1576.0	1747.4	1590.3	1585.6	10.9%	0.9%	0.6%
450	1912.0	2131.3	1939.5	1933.9	11.5%	1.4%	1.1%
500	2268.0	2535.4	2327.6	2309.5	11.8%	2.6%	1.8%

Πίνακας 11.10: Σύγκριση θεωρητικών μοντέλων με πειραματικά δεδομένα για το σύνολο των διατρητικών στελεχών.



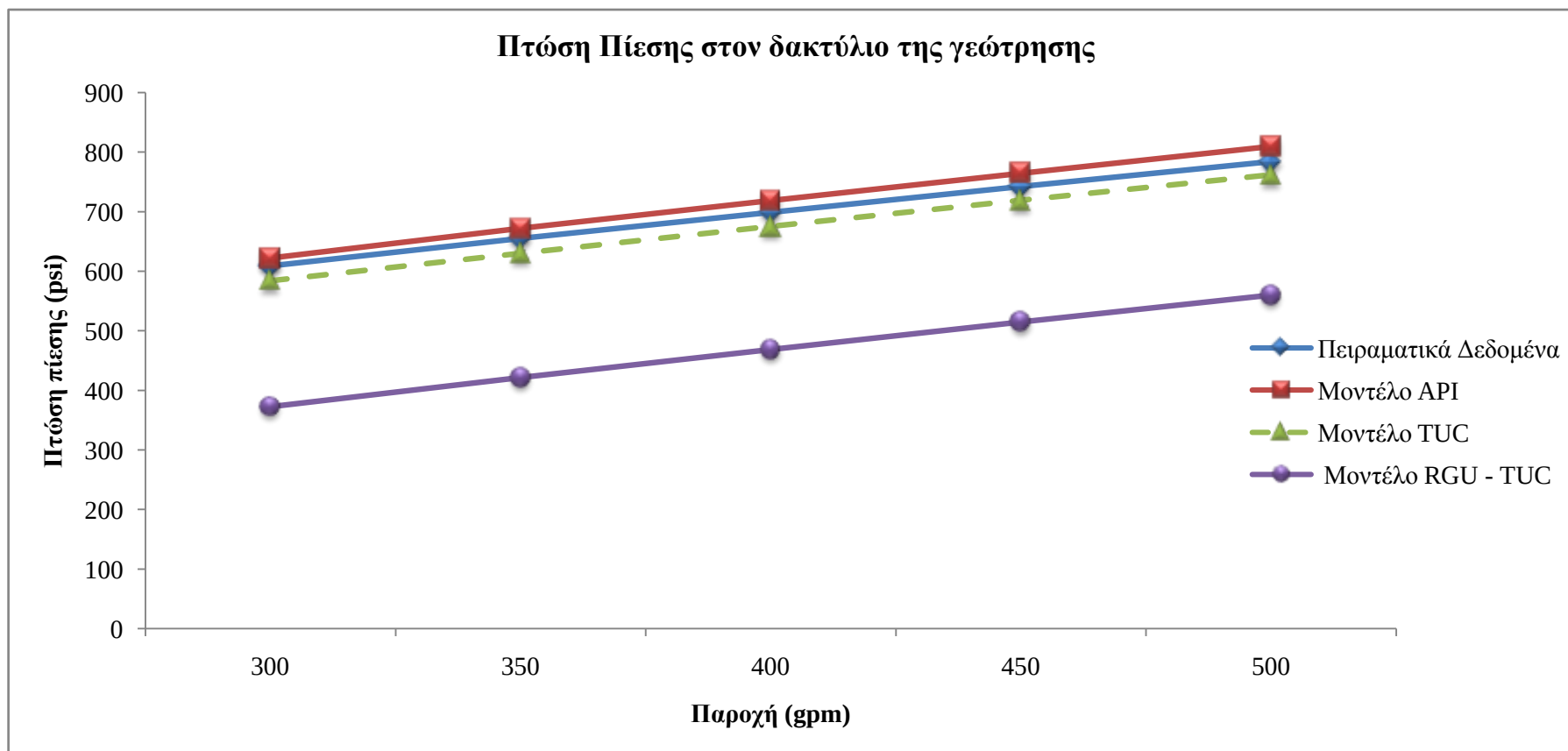
Διάγραμμα 11.10: Πτώση πίεσης στα διατρητικά στελέχη.



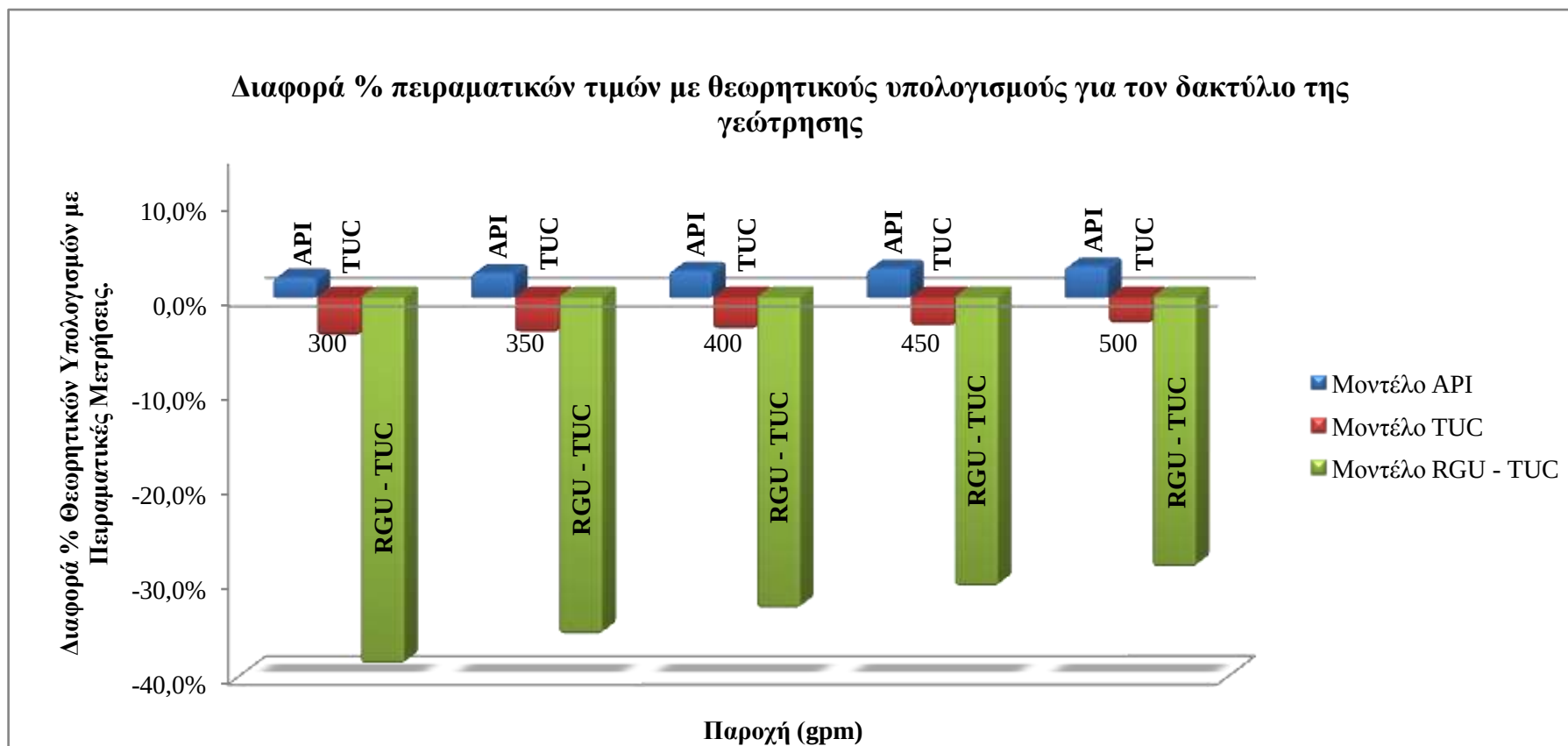
Διάγραμμα 11.11: Διαφορά % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς πτώσης πίεσης στα διατρητικά στελέχη.

Δακτύλιος							
Παροχή (gpm)	Πειραματικές τιμές API (psi)	Θεωρητικές τιμές Μοντέλο API (psi)	Θεωρητικές τιμές Μοντέλο TUC (psi)	Θεωρητικές τιμές Μοντέλο RGU – TUC (psi)	Διαφορά % API	Διαφορά % TUC	Διαφορά % RGU - TUC
300	609	621.9	584.0	372.5	2.1%	-4.1%	-38.8%
350	655	671.9	630.2	421.3	2.6%	-3.8%	-35.7%
400	699	718.7	675.1	468.6	2.8%	-3.4%	-33.0%
450	742	764.6	719.0	514.7	3.0%	-3.1%	-30.6%
500	784	809.7	761.9	559.8	3.3%	-2.8%	-28.6%

Πίνακας 11.11: Σύγκριση θεωρητικών μοντέλων με πειραματικά δεδομένα του δακτύλιου της γεώτρησης.



Διάγραμμα 11.12: Πτώση πίεσης στον δακτύλιο της γεώτρησης.



Διάγραμμα 11.13 : Διαφορά % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς πτώσης πίεσης στον δακτύλιο της γεώτρησης.

Από τα Διαγράμματα 11.10,11.11, 11.12 & 11.13 προκύπτουν κάποια πολύ σημαντικά συμπεράσματα.

- Τα μοντέλα TUC και API εμφανίζουν πολύ καλή συσχέτιση δεδομένων τόσο για τα διατρητικά στελέχη όσο και για τον δακτύλιο.
- Το μοντέλο RGU – TUC εμφανίζει πολύ καλή συσχέτιση δεδομένων σε σχέση με τα αλλά δύο μοντέλα όσο αφορά τα διατρητικά στελέχη αλλά λιγότερο καλή συσχέτιση για την περιοχή του δακτυλίου.
- Και για τα τρία μοντέλα το σφάλμα το οποίο εμφανίζουν σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα που προσφέρονται για σύγκριση είναι μέσα στα αποδεκτά όρια λειτουργίας ενός θεωρητικού υπολογιστικού μοντέλου.

11.4. Πειραματικά αποτελέσματα με Herschel-Bulkley ρευστό στο σύστημα ροής του εργαστηρίου.

Μετά την βαθμονόμηση και τον έλεγχο των θεωρητικών μοντέλων, προχωρήσαμε στην παρασκευή ρευστού μπεντονίτη σε μεγάλη κλίμακα για την μελέτη της πτώσης πίεσης τόσο σε ομόκεντρο όσο και σε 100% έγκεντρο δακτύλιο. Τα ρευστά τα οποία είχαν παρασκευαστεί σε μικρότερη κλίμακα ήταν σε συγκέντρωση 2.5% w/v, επειδή όμως υπήρχε ο φόβος ότι το ρευστό αυτό μπορεί να ήταν πολύ παχύρευστο και να προκαλούσε τα ίδια προβλήματα με το Carbopol 980 όταν παρασκευάστηκε σε μεγάλη κλίμακα, αποφασίστηκε η παρασκευή αρχικά πολφού μπεντονίτη συγκέντρωσης 1.5% w/v και να αυξάνεται σταδιακά η συγκέντρωση του ρευστού σε μπεντονίτη έως ότου επιτύχουμε τα επιθυμητά ρεολογικά χαρακτηριστικά.

11.4.1. Μπεντονίτης συγκέντρωσης 1.5% w/v σε ομόκεντρο δακτύλιο.

Για την παρασκευή αυτού του ρευστού χρησιμοποιήθηκαν :

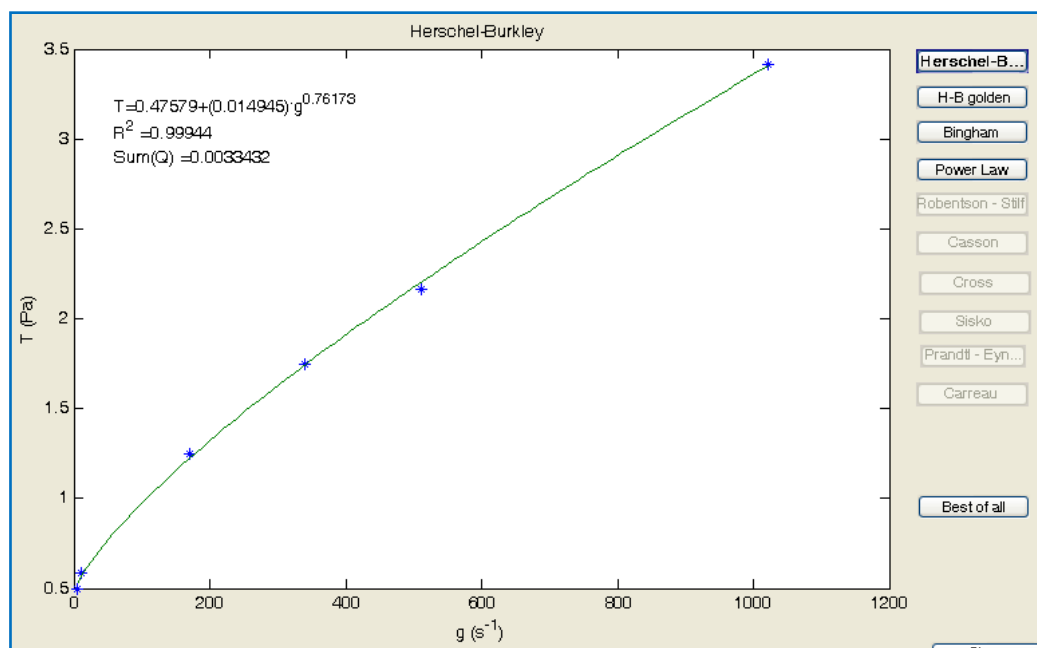
- 620 lt νερού βρύσης, και
- 9300 gr μπεντονίτη.

Το ρευστό παρασκευάστηκε με την μέθοδο η οποία περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια και από την ανάλυση των ρεολογικών του δεδομένων προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα (Πίνακας 11.12 και Ρεόγραμμα 11.1).

Είδος ρευστού	τ_0 (Pa)	K (Pas ⁿ)	n	$\Sigma \Sigma R^2$	ΣQ^2
Herschel-Bulkley	0.47	0.0149	0.7618	0.999	0.003

Πίνακας 11.12: Ρεολογικές ιδιότητες ρευστού μπεντονίτη 1.5 % w/v κλίμακας 620 lt.

Από τα παραπάνω δεδομένα και την ανάλυση τους στο πρόγραμμα “Rheology” αποδείχθηκε ότι το συγκεκριμένο ρευστό ικανοποιεί τις απαιτήσεις μας και αποφασίστηκε η μελέτη της πτώσης πίεσης με το ρευστό μπεντονίτη συγκέντρωσης 1.5% w/v. Στην Εικόνα 11.1 και 11.2 παρουσιάζεται κυκλοφορία πολφού μπεντονίτη στο σύστημα ροής του εργαστηρίου.



Ρεόγραμμα 11.1: Μπεντονίτης 1.5 % w/v 620 lt σε ομόκεντρο δακτύλιο.



Εικόνα 11.1: Μπεντονίτης στην δεξαμενή του μοντέλου οριζόντιας γεώτρησης.



Εικόνα 11.2: Κυκλοφορία μπεντονίτη στο μοντέλο οριζόντιας γεώτρησης για την καταγραφή δεδομένων.

Οι μετρήσεις της πτώσης πίεσης στον δακτύλιο για διάφορες παροχές έδωσαν τα ακόλουθα πειραματικά δεδομένα και την αντίστοιχη θεωρητική ανάλυση για κάθε μοντέλο, που παρουσιάζονται στους Πίνακες 11.14, 11.15, 11.16. Επίσης στον Πίνακα 11.13 παρουσιάζονται οι τιμές της θερμοκρασίας και της πυκνότητας του ρευστού κατά την διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος.

Μπεντονίτης 1.5% w/v 620 lt	
Αρχική Ένδειξη DP 15	- 0.1
Αρχική Θερμοκρασία Ρευστού °C	27
Τελική Θερμοκρασία Ρευστού °C	28
Αρχική Πυκνότητα Ρευστού (kg/m³)	1012
Τελική Πυκνότητα Ρευστού (kg/m³)	1011
Τελική Πυκνότητα Ρευστού³ (kg/m³)	1010

Πίνακας 11.13: Θερμοκρασία – Πυκνότητα ρευστού και αρχική ένδειξη DP 15.

Στον Πίνακα 11.14 παρουσιάζεται σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων πτώσης πίεσης με τους θεωρητικούς υπολογισμούς από το μοντέλο TUC. Επίσης παρουσιάζονται τα όρια μετάβασης για κάθε περιοχή ροής, όπως και το είδος της ροής του ρευστού με βάση την τιμή του αριθμού Reynolds για κάθε παροχή. Από τις τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.14 προκύπτει ότι η μετάβαση στην Τυρβώδη περιοχή σύμφωνα με το μοντέλο TUC επιτυγχάνεται για παροχή 0.00219 m³/s και η πρόβλεψη της πτώσης πίεσης παρουσιάζει τιμές σφάλματος έως 34%.

Στον Πίνακα 11.15 παρουσιάζεται σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων πτώσης πίεσης με τους θεωρητικούς υπολογισμούς από το μοντέλο API. Επίσης παρουσιάζονται τα όρια μετάβασης για κάθε περιοχή ροής, όπως και το είδος της ροής του ρευστού με βάση την τιμή του αριθμού Reynolds για κάθε παροχή. Από τις τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.15 προκύπτει ότι η μετάβαση στην Τυρβώδη περιοχή σύμφωνα με το μοντέλο API επιτυγχάνεται για παροχή 0.00264

³ Η δεύτερη τελική πυκνότητα του ρευστού μετρήθηκε με τον ζυγό πυκνότητας της εταιρείας OFITE για επιβεβαίωση της τιμής την οποία παίρναμε από το όργανο Rheonic.

m^3/s , δηλαδή σε μεγαλύτερη παροχή σε σχέση με το μοντέλο TUC, και η πρόβλεψη της πτώσης πίεσης παρουσιάζει τιμές σφάλματος έως 69% που είναι έως και δύο φορές μεγαλύτερο από το σφάλμα που εμφανίζει το μοντέλο TUC.

Στον Πίνακα 11.16 παρουσιάζεται σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων πτώσης πίεσης με τους θεωρητικούς υπολογισμούς από το μοντέλο RGU-TUC. Επίσης παρουσιάζονται τα όρια μετάβασης για κάθε περιοχή ροής, όπως και το είδος της ροής του ρευστού με βάση την τιμή της κρίσιμης ταχύτητας V_c . Από τις τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.16 προκύπτει ότι η μετάβαση στην Τυρβώδη περιοχή σύμφωνα με το μοντέλο API επιτυγχάνεται για παροχή $0.00124 \text{ m}^3/\text{s}$, δηλαδή σε μικρότερη παροχή σε σχέση με το μοντέλο TUC και API. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του σχεδιασμού του μοντέλου, σύμφωνα με τον οποίο δεν λαμβάνεται υπόψη η Μεταβατική περιοχή ροής και έχουμε μετάβαση από την Στρωτή ροή κατευθείαν στην Τυρβώδη περιοχή. Η πρόβλεψη της πτώσης πίεσης παρουσιάζει τιμές σφάλματος έως 84% που είναι έως και τρεις φορές μεγαλύτερο από το σφάλμα που εμφανίζει το μοντέλο TUC, ενώ σε σχέση με το μοντέλο API έχει μικρότερη διαφορά και κυρίως στην Τυρβώδη περιοχή όπου εκεί η διαφορά των δύο μοντέλων (API και TUC) ως προς την πρόβλεψη της πτώσης πίεσης είναι ακόμα μικρότερη.

Στο Διάγραμμα 11.14 παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα πτώσης πίεσης μπεντονίτη συγκέντρωσης 1.5% σε ομόκεντρο δακτύλιο στο σύστημα ροής του εργαστηρίου για διάφορες παροχές, καθώς και οι θεωρητικές προσεγγίσεις από τα τρία μοντέλα. Στο Διάγραμμα 11.15 παρουσιάζεται ο αριθμός Reynolds του ρευστού για κάθε μια από τις παροχές στις οποίες έγινε καταγραφή της πτώσης πίεσης, καθώς και τα όρια της κάθε περιοχής ροής. Επίσης παρουσιάζεται για το μοντέλο RGU-TUC η ταχύτητα κυκλοφορίας του ρευστού στο σύστημα για κάθε μια από τις παροχές και η τιμή της κρίσιμης ταχύτητας V_c που αποτελεί το όριο μετάβασης από την Στρωτή ροή στην Τυρβώδη. Τέλος στα Διαγράμματα 11.16 και 11.17 παρουσιάζεται η διαφορά % που έχει η θεωρητική προσέγγιση του κάθε μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα με το μοντέλο TUC να εμφανίζει την μικρότερη διαφορά σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα.

Παροχή (kg/min)	Παροχή (m ³ /sec)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (cm H ₂ O)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (Pa/m)	Μοντέλο TUC (Pa/m)	Διαφορά %	Re TUC	Re _{critical1} TUC	Re _{critical2} TUC	Είδος Ροής Μοντέλο TUC
43	0.00071	1.39	136.7	162.6	19%	742.9	2814.8	3714.8	Στρωτή
75	0.00124	1.67	164.2	204.6	25%	1795.8	2734.4	3634.4	Στρωτή
104	0.00171	2.35	230.1	243.2	6%	2970.7	2682.1	3582.1	Μεταβατική
133	0.00219	3.42	335.2	330.6	-1%	4374.9	2605.2	3505.2	Τυρβώδης
160	0.00264	4.12	403.7	462.3	15%	5826.8	2541.7	3441.7	Τυρβώδης
182	0.00300	4.42	433.7	580.2	34%	7064.7	2508.4	3408.4	Τυρβώδης
202	0.00333	5.53	542.2	695.5	28%	8230.5	2486.6	3386.6	Τυρβώδης
218	0.00359	6.59	646.1	793.2	23%	9189.0	2472.9	3372.9	Τυρβώδης
248	0.00408	8.54	837.4	989.5	18%	11044.1	2453.5	3353.5	Τυρβώδης
276	0.00455	10.22	1002.7	1187.6	18%	12838.1	2440.3	3340.3	Τυρβώδης
302	0.00497	11.64	1141.7	1384.2	21%	14553.5	2430.9	3330.9	Τυρβώδης
332	0.00547	13.61	1334.7	1625.7	22%	16587.7	2422.5	3322.5	Τυρβώδης
360	0.00593	15.40	1509.8	1865.0	24%	18535.0	2416.3	3316.3	Τυρβώδης

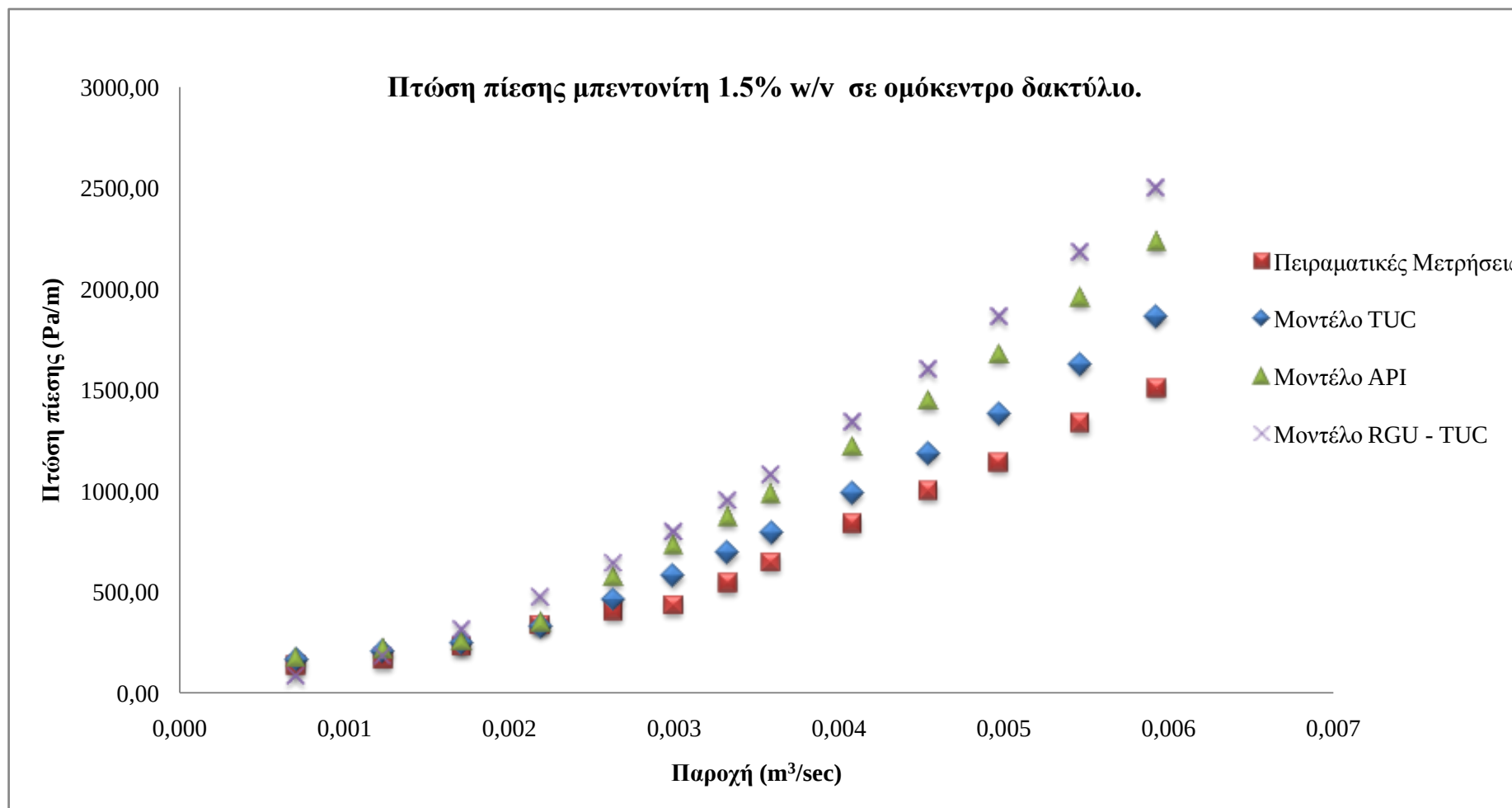
Πίνακας 11.14: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπεντονίτη 1.5% w/v – σύγκριση με το μοντέλο TUC.

Παροχή (kg/min)	Παροχή (m ³ /sec)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (cm H ₂ O)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (Pa/m)	Μοντέλο API (Pa/m)	Διάφορα %	Re API	Re _{critical1} API	Re _{critical2} API	Είδος Ροής Μοντέλο API
43	0.00071	1.39	136.7	173.69	27%	463.3	2426.3	3326.3	Στρωτή
75	0.00124	1.67	164.2	216.88	32%	1128.9	2426.3	3326.3	Στρωτή
104	0.00171	2.35	230.1	252.27	10%	1866.4	2426.3	3326.3	Στρωτή
133	0.00219	3.42	335.2	349.3	4%	2698.8	2426.3	3326.3	Μεταβατική
160	0.00264	4.12	403.7	574.4	42%	3542.7	2426.3	3326.3	Τυρβώδης
182	0.00300	4.42	433.7	732.4	69%	4272	2426.3	3326.3	Τυρβώδης
202	0.00333	5.53	542.2	871.8	61%	4963.8	2426.3	3326.3	Τυρβώδης
218	0.00359	6.59	646.1	987.2	53%	5535.4	2426.3	3326.3	Τυρβώδης
248	0.00408	8.54	837.4	1217.5	45%	6646.3	2426.3	3326.3	Τυρβώδης
276	0.00455	10.22	1002.7	1448.7	44%	7725.5	2426.3	3326.3	Τυρβώδης
302	0.00497	11.64	1141.7	1677.3	47%	8760.8	2426.3	3326.3	Τυρβώδης
332	0.00547	13.61	1334.7	1957.2	47%	9991.9	2426.3	3326.3	Τυρβώδης
360	0.00593	15.40	1509.8	2233.6	48%	11173.4	2426.3	3326.3	Τυρβώδης

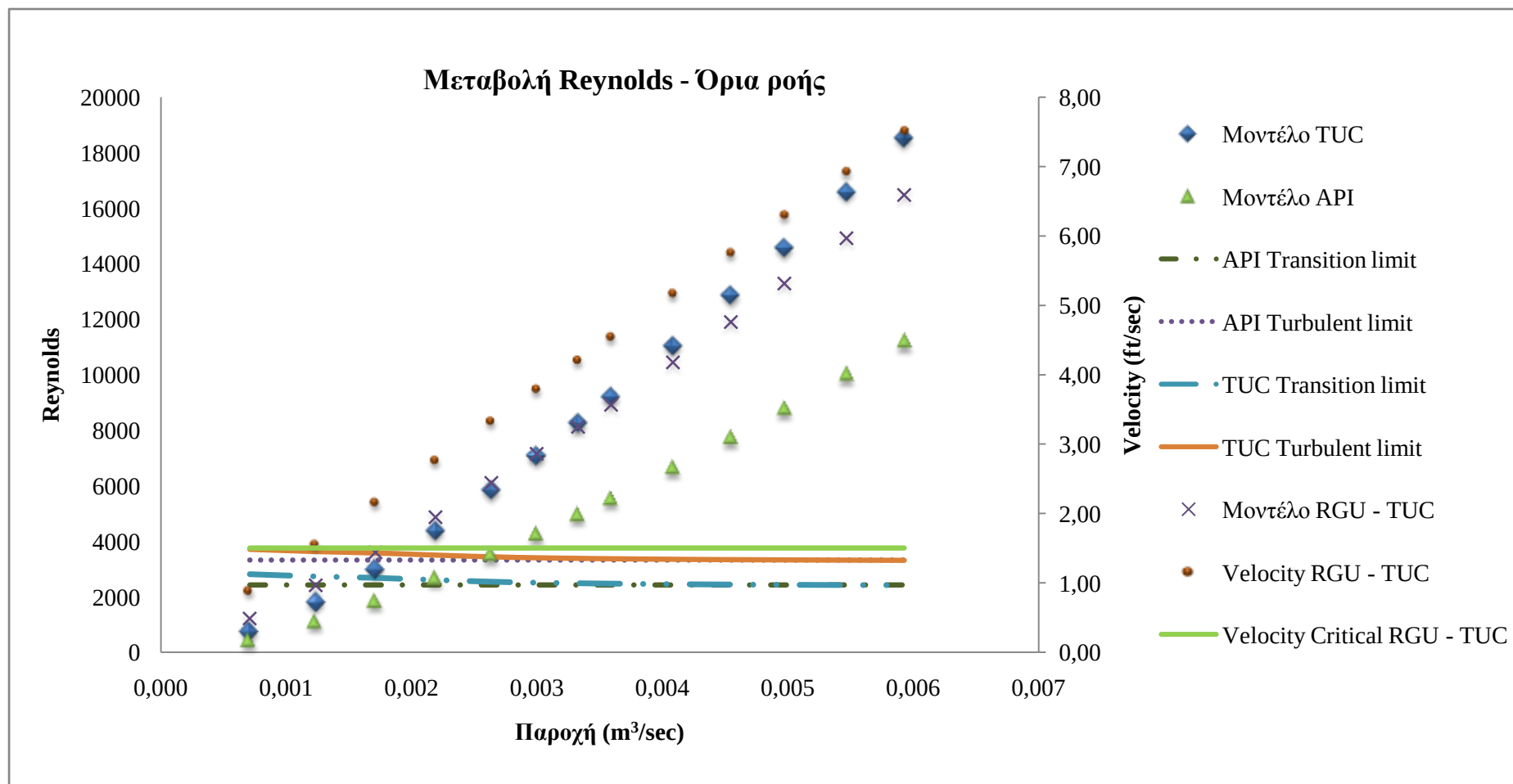
Πίνακας 11.15: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπεντονίτη 1.5% w/v – σύγκριση με το μοντέλο API.

Παροχή (kg/min)	Παροχή (m ³ /sec)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (cm H ₂ O)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (Pa/m)	Μοντέλο RGU -TUC (Pa/m)	Διάφορα %	Re RGU -TUC	V (ft/sec)	V _{critical} (ft/sec)	Είδος Ροής Μοντέλο RGU -TUC
43	0.00071	1.39	136.7	80.4	-41%	1225.7	0.90	1.50	Στρωτή
75	0.00124	1.67	164.2	180.6	10%	2420.0	1.56	1.50	Τυρβώδης
104	0.00171	2.35	230.1	312.2	36%	3609.3	2.17	1.50	Τυρβώδης
133	0.00219	3.42	335.2	471.4	41%	4875.8	2.77	1.50	Τυρβώδης
160	0.00264	4.12	403.7	642.5	59%	6112.3	3.34	1.50	Τυρβώδης
182	0.00300	4.42	433.7	797.2	84%	7155.3	3.79	1.50	Τυρβώδης
202	0.00333	5.53	542.2	949.4	75%	8128.2	4.21	1.50	Τυρβώδης
218	0.00359	6.59	646.1	1078.6	67%	8922.3	4.54	1.50	Τυρβώδης
248	0.00408	8.54	837.4	1338.7	60%	10446.1	5.17	1.50	Τυρβώδης
276	0.00455	10.22	1002.7	1601.4	60%	11905.9	5.75	1.50	Τυρβώδης
302	0.00497	11.64	1141.7	1862.1	63%	13291.5	6.30	1.50	Τυρβώδης
332	0.00547	13.61	1334.7	2182.2	63%	14923.5	6.92	1.50	Τυρβώδης
360	0.00593	15.40	1509.8	2499.3	66%	16476.7	7.51	1.50	Τυρβώδης

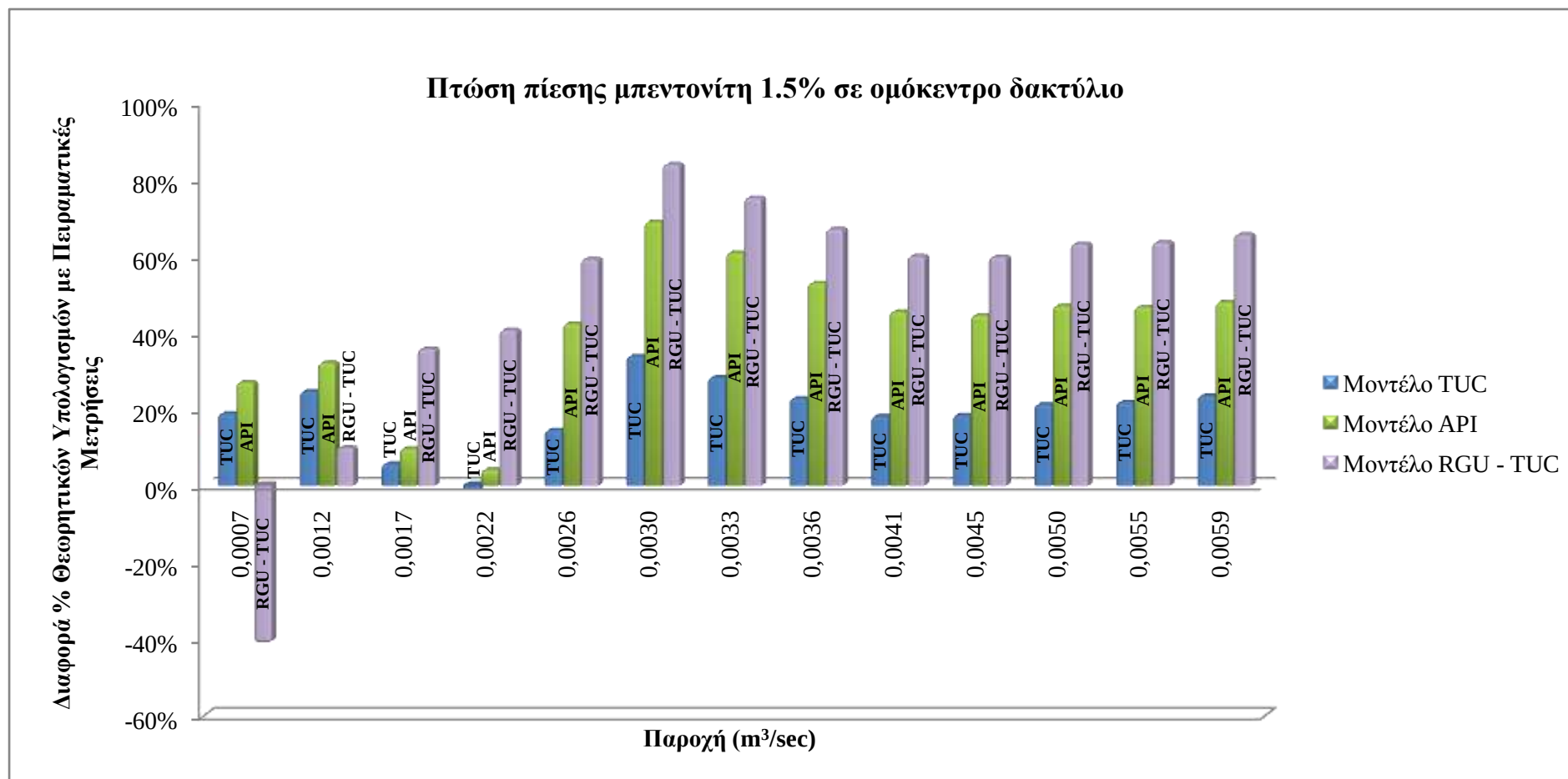
Πίνακας 11.16: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπεντονίτη 1.5% w/v – σύγκριση με το μοντέλο RGU - TUC.



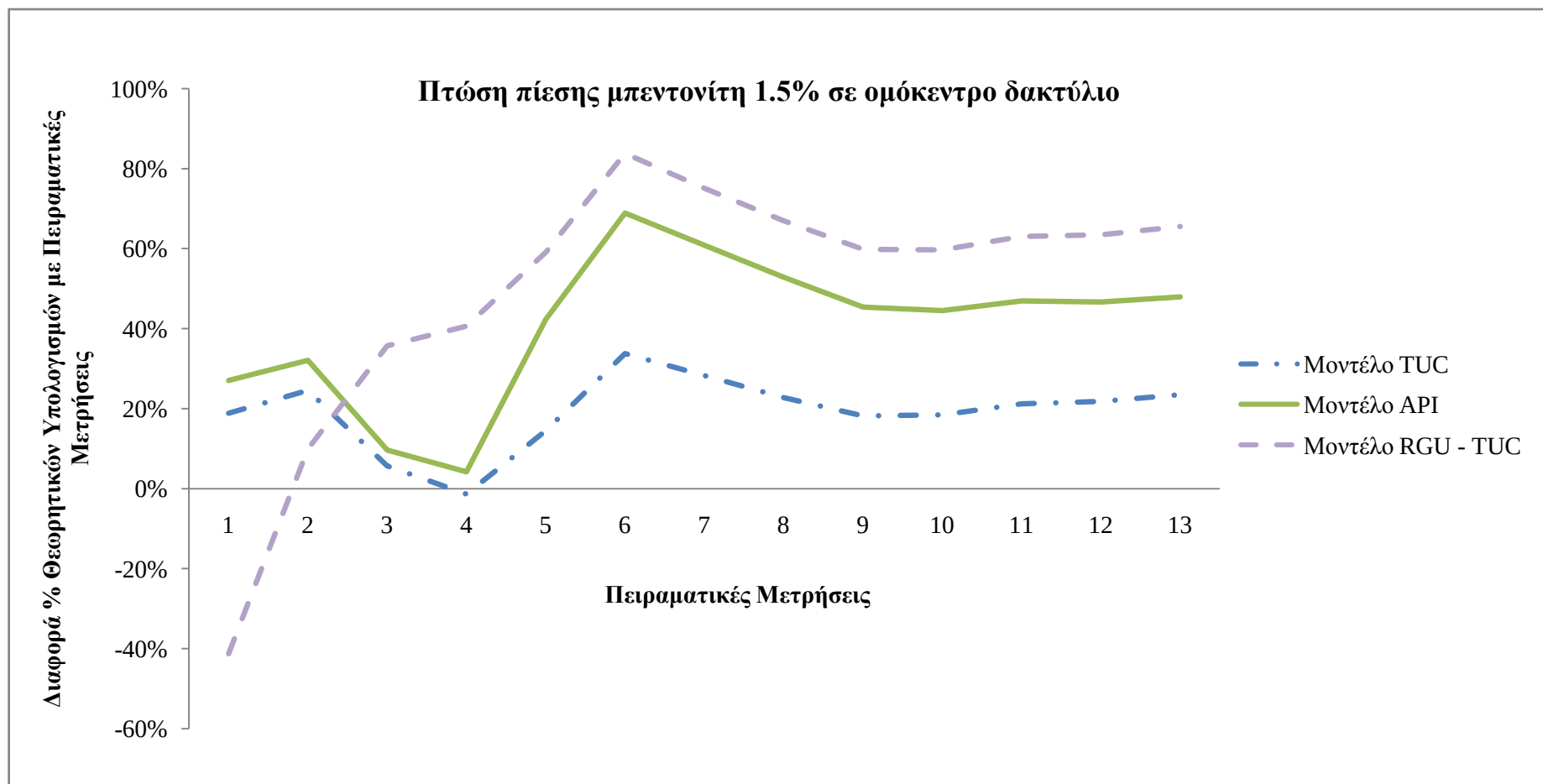
Διάγραμμα 11.14: Πτώση πίεσης για ρευστό μπεντονίτη 1.5% w/v στον ομόκεντρο δακτύλιο.



Διάγραμμα 11.15: Μεταβολή Re – Όρια ροής, για ρευστό μπεντονίτη 1.5% w/v σε ομόκεντρο δακτύλιο.



Διάγραμμα 11.16: Διάφορα % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς για ρευστό μπεντονίτη 1.5% w/v σε ομόκεντρο δακτύλιο.



Διάγραμμα 11.17: Διάφορα % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς για ρευστό μπεντονίτη 1.5 % w/v σε ομόκεντρο δακτύλιο.

11.4.2. Μπεντονίτης συγκέντρωσης 1.85% w/v σε ομόκεντρο δακτύλιο.

Επόμενο βήμα ήταν η παρασκευή και ενός δεύτερου ρευστού μπεντονίτη μεγαλύτερης συγκέντρωσης ώστε να παρασκευαστεί ένα ρευστό με μεγαλύτερη τάση διολίσθησης από αυτή του πολφού συγκέντρωσης 1.5% w/v.

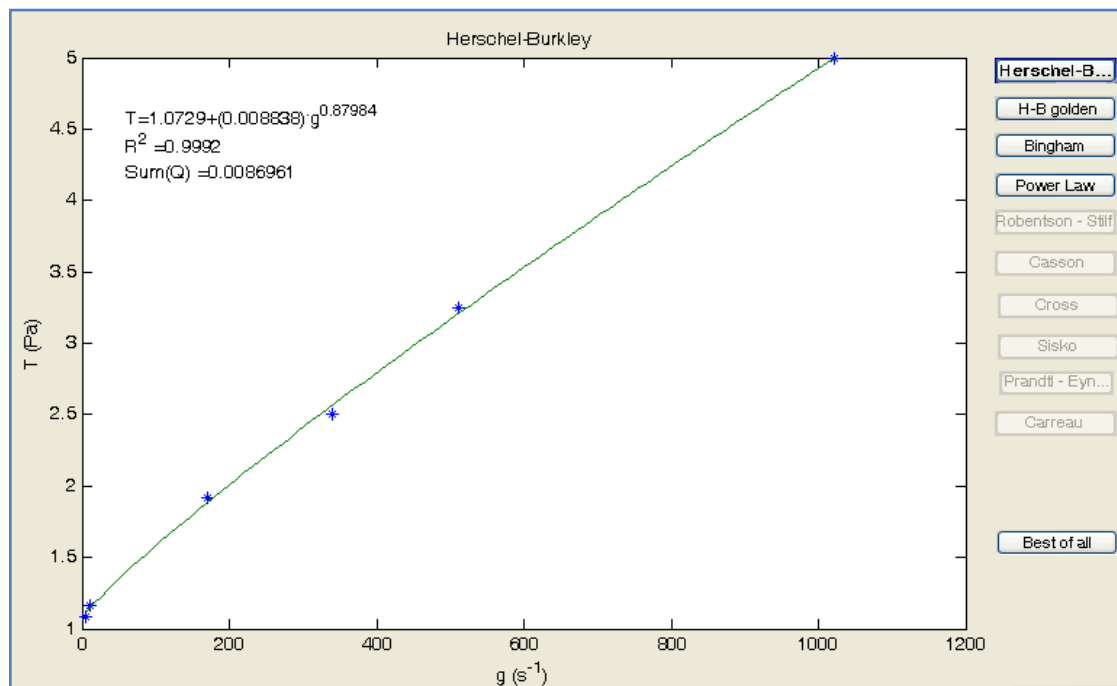
Για τον λόγο αυτό προσθέσαμε επιπλέον στο υπάρχον δείγμα των 620 lt, 3100 gr (συνολική ποσότητα μπεντονίτη 12400 gr) ώστε να αυξηθεί η συγκέντρωση στο 2 % w/v. Το ρευστό το οποίο παρασκευάστηκε όμως ήταν παχύρρευστο και για αυτό τον λόγο προκάλεσε προβλήματα μετρήσεων (κόλλημα των μετρητικών οργάνων). Για τον λόγο αυτό αποφασίστηκε η αραίωση του ρευστού με την προσθήκη νερού βρύσης. Το νερό το οποίο προστέθηκε ήταν 50 lt. Μετά από αυτή την προσθήκη ο πολφός απέκτησε συγκέντρωση 1.85% w/v. Το ρευστό αυτό ήταν ιδανικό για την μελέτη της πτώσης πίεσης καθώς δεν προκαλούσε προβλήματα στο καταγραφικό όργανο πτώσης πίεσης.

Από την ανάλυση των ρεολογικών του δεδομένων προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.17 και το Ρεόγραμμα 11.2.

Είδος ρευστού	τ_0 (Pa)	K (Pas ⁿ)	n	$\Sigma \Sigma R^2$	ΣQ^2
Herschel-Bulkley	1.07	0.0088	0.8798	0.9992	0.009

Πίνακας 11.17: Ρεολογικές ιδιότητες ρευστού μπεντονίτη 1.85% w/v κλίμακας 670 lt.

Από τα παραπάνω δεδομένα και την ανάλυση τους στο πρόγραμμα “Rheology” αποδείχτηκε ότι το συγκεκριμένο ρευστό ικανοποιεί τις απαιτήσεις μας και αποφασίστηκε η μελέτη της πτώσης πίεσης με ρευστό μπεντονίτη συγκέντρωσης 1.85% w/v.



Ρεόγραμμα 11.2: Μπεντονίτης 1.85% w/v 670 lt σε ομόκεντρο δακτύλιο.

Οι μετρήσεις της πτώσης πίεσης στον δακτύλιο για διάφορες παροχές έδωσαν τα ακόλουθα πειραματικά δεδομένα και την αντίστοιχη θεωρητική ανάλυση για κάθε μοντέλο, που παρουσιάζονται στους Πίνακες 11.19, 11.20, 11.21. Επίσης στον Πίνακα 11.18 παρουσιάζονται οι τιμές της θερμοκρασίας και της πυκνότητας του ρευστού κατά την διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος.

Μπεντονίτης 1.85% w/v 670 lt	
Αρχική Ένδειξη DP 15	-0.04
Αρχική Θερμοκρασία Ρευστού °C	25.5
Τελική Θερμοκρασία Ρευστού °C	26
Αρχική Πυκνότητα Ρευστού (kg/m ³)	1013
Τελική Πυκνότητα Ρευστού (kg/m ³)	1011

Πίνακας 11.18: Θερμοκρασία – Πυκνότητα ρευστού και αρχική ένδειξη DP 15.

Στον Πίνακα 11.19 παρουσιάζεται σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων πτώσης πίεσης με τους θεωρητικούς υπολογισμούς από το μοντέλο TUC. Επίσης παρουσιάζονται τα όρια μετάβασης για κάθε περιοχή ροής, όπως και το είδος της ροής του ρευστού με βάση την τιμή του αριθμού Reynolds για κάθε παροχή. Από τις τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.19 προκύπτει ότι η μετάβαση στην Τυρβώδη περιοχή σύμφωνα με το μοντέλο TUC επιτυγχάνεται για παροχή $0.0029 \text{ m}^3/\text{s}$ και η πρόβλεψη της πτώσης πίεσης παρουσιάζει τιμές σφάλματος έως 16%.

Στον Πίνακα 11.20 παρουσιάζεται σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων πτώσης πίεσης με τους θεωρητικούς υπολογισμούς από το μοντέλο API. Επίσης παρουσιάζονται τα όρια μετάβασης για κάθε περιοχή ροής, όπως και το είδος της ροής του ρευστού με βάση την τιμή του αριθμού Reynolds για κάθε παροχή. Από τις τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.20 προκύπτει ότι η μετάβαση στην Τυρβώδη περιοχή σύμφωνα με το μοντέλο API επιτυγχάνεται για παροχή $0.00324 \text{ m}^3/\text{s}$, δηλαδή σε μεγαλύτερη παροχή σε σχέση με το μοντέλο TUC, και η πρόβλεψη της πτώσης πίεσης παρουσιάζει τιμές σφάλματος έως 42% που είναι περίπου τρεις φορές μεγαλύτερο από το σφάλμα που εμφανίζει το μοντέλο TUC.

Στον Πίνακα 11.21 παρουσιάζεται σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων πτώσης πίεσης με τους θεωρητικούς υπολογισμούς από το μοντέλο RGU-TUC. Επίσης παρουσιάζονται τα όρια μετάβασης για κάθε περιοχή ροής, όπως και το είδος της ροής του ρευστού με βάση την τιμή της κρίσιμης ταχύτητας V_c . Από τις τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.21 προκύπτει ότι η μετάβαση στην Τυρβώδη περιοχή σύμφωνα με το μοντέλο RGU-TUC επιτυγχάνεται για παροχή $0.00153 \text{ m}^3/\text{s}$, δηλαδή σε μικρότερη παροχή σε σχέση με το μοντέλο TUC και API. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του σχεδιασμού του μοντέλου, σύμφωνα με τον οποίο δεν λαμβάνεται υπόψιν η Μεταβατική περιοχή ροής και έχουμε μετάβαση από την Στρωτή ροή κατευθείαν στην Τυρβώδη περιοχή. Η πρόβλεψη της πτώσης πίεσης παρουσιάζει τιμές σφάλματος έως 64%, και σε σχέση με το μοντέλο API στην Τυρβώδη περιοχή η διαφορά των δύο μοντέλων είναι περίπου 4%.

Στο Διάγραμμα 11.18 παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα πτώσης πίεσης μπεντονίτη συγκέντρωσης 1.85% σε ομόκεντρο δακτύλιο στο σύστημα ροής του εργαστηρίου για διάφορες παροχές, καθώς και οι θεωρητικές προσεγγίσεις από τα

τρία μοντέλα. Στο Διάγραμμα 11.19 παρουσιάζεται ο αριθμός Reynolds του ρευστού για κάθε μια από τις παροχές στις οποίες έγινε καταγραφή της πτώσης πίεσης, καθώς και τα όρια της κάθε περιοχής ροής. Επίσης παρουσιάζεται για το μοντέλο RGU-TUC η ταχύτητα κυκλοφορίας του ρευστού στο σύστημα για κάθε μια από τις παροχές και η τιμή της κρίσιμης ταχύτητας V_c που αποτελεί το όριο μετάβασης από την Στρωτή ροη στην Τυρβώδη. Τέλος στα Διαγράμματα 11.20 και 11.21 παρουσιάζεται η διαφορά % που έχει η θεωρητική προσέγγιση του κάθε μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα με το μοντέλο TUC να εμφανίζει την μικρότερη διαφορά σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα.

Παροχή (kg\min)	Παροχή (m ³ /sec)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (cm)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (Pa/m)	Μοντέλο TUC (Pa/m)	Διάφορα %	Re TUC	Re _{critical1} TUC	Re _{critical2} TUC	Είδος Ροής Μοντέλο TUC
42	0.00069	2.58	252.6	264.5	5%	436.5	2916.9	3816.9	Στρωτή
66	0.00109	2.87	281.5	305.7	9%	932.6	2844.6	3744.6	Στρωτή
93	0.00153	3.19	313.2	348.0	11%	1636.3	2783.7	3683.7	Στρωτή
123	0.00203	3.61	354.1	392.3	11%	2523.7	2731.3	3631.3	Στρωτή
144	0.00237	5.22	511.5	430.1	-16%	3228.1	2693.5	3593.5	Μεταβατική
176	0.00290	7.13	699.6	586.6	-16%	4512.6	2582.6	3482.7	Τυρβώδης
197	0.00324	8.47	830.8	734.2	-12%	5416.7	2517.5	3417.6	Τυρβώδης
217	0.00357	9.29	911.3	882.8	-3%	6290.9	2472.6	3372.6	Τυρβώδης
235	0.00387	11.19	1097.4	1023.9	-7%	7091.0	2441.4	3341.4	Τυρβώδης
257	0.00423	13.18	1292.5	1205.7	-7%	8086.1	2411.6	3311.6	Τυρβώδης
273	0.00450	13.68	1341.1	1344.5	0%	8821.7	2394.1	3294.1	Τυρβώδης
303	0.00499	16.17	1585.8	1619.5	2%	10225.7	2368.0	3268.0	Τυρβώδης
317	0.00522	17.44	1710.6	1754.4	3%	10891.3	2358.2	3258.2	Τυρβώδης
351	0.00578	19.45	1907.4	2099.3	10%	12533.2	2338.7	3238.7	Τυρβώδης
372	0.00613	20.78	2037.4	2324.4	14%	13564.0	2329.0	3229.0	Τυρβώδης

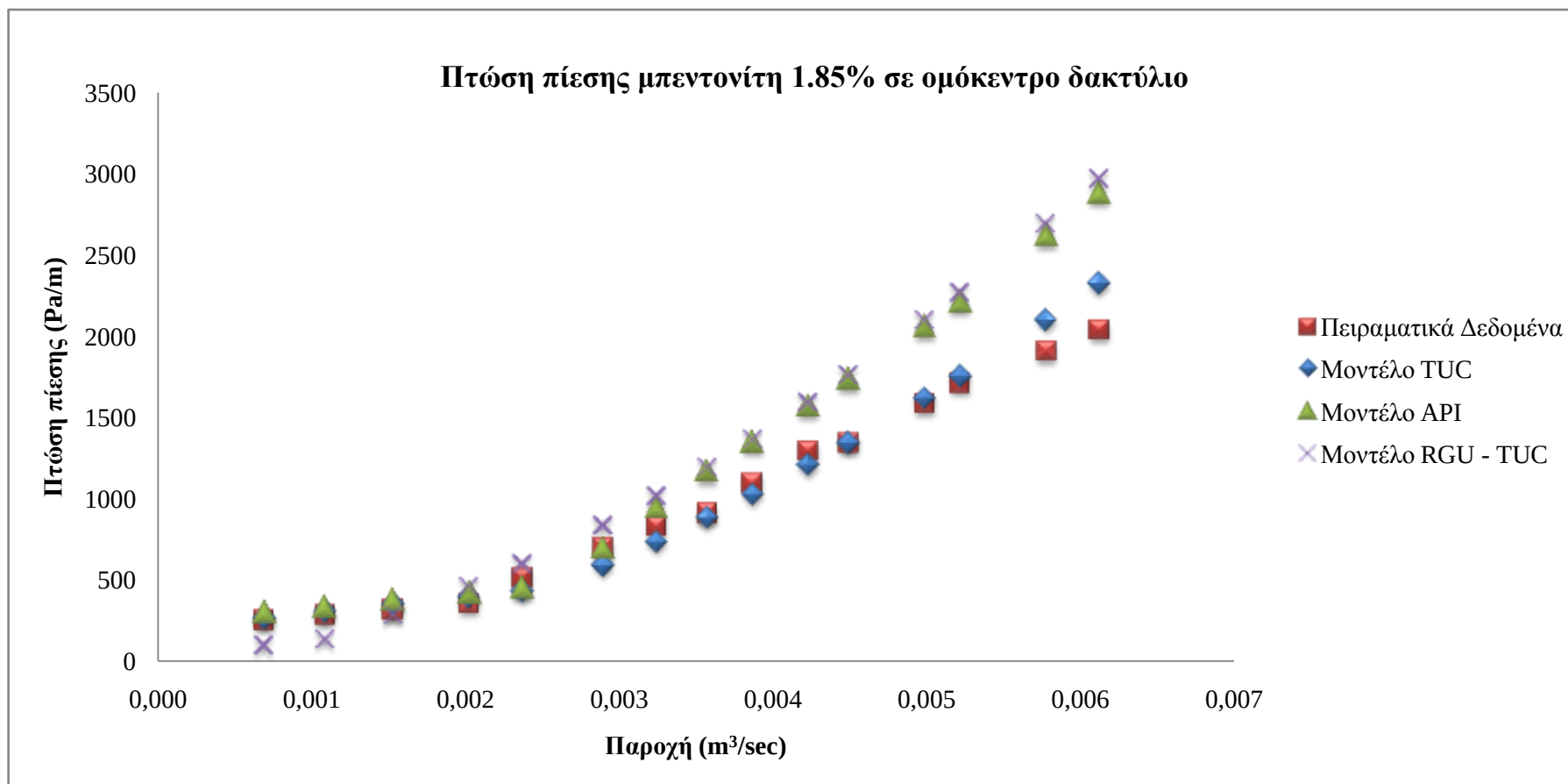
Πίνακας 11.19: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπεντονίτη 1.85% w/v – σύγκριση με το μοντέλο TUC.

Παροχή (kg/min)	Παροχή (m ³ /sec)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (cm)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (Pa/m)	Μοντέλο API (Pa/m)	Διαφορά %	Re API	Re _{critical1} API	Re _{critical2} API	Είδος Ροής Μοντέλο API
42	0.00069	2.58	252.6	297.4	18%	258.7	2264.6	3164.6	Στρωτή
66	0.00109	2.87	281.5	336.3	19%	565.0	2264.6	3164.6	Στρωτή
93	0.00153	3.19	313.2	378.8	21%	998.0	2264.6	3164.6	Στρωτή
123	0.00203	3.61	354.1	422.6	19%	1561.3	2264.6	3164.6	Στρωτή
144	0.00237	5.22	511.5	454.8	-11%	1996.0	2264.6	3164.6	Στρωτή
176	0.00290	7.13	699.6	695.7	-1%	2710.0	2264.6	3164.6	Μεταβατική
197	0.00324	8.47	830.8	952.4	15%	3207.0	2264.6	3164.6	Τυρβώδης
217	0.00357	9.29	911.3	1170.4	28%	3698.4	2264.6	3164.6	Τυρβώδης
235	0.00387	11.19	1097.4	1350.7	23%	4154.1	2264.6	3164.6	Τυρβώδης
257	0.00423	13.18	1292.5	1570.1	21%	4726.6	2264.6	3164.6	Τυρβώδης
273	0.00450	13.68	1341.1	1734.6	29%	5152.7	2264.6	3164.6	Τυρβώδης
303	0.00499	16.17	1585.8	2058.3	30%	5971.8	2264.6	3164.6	Τυρβώδης
317	0.00522	17.44	1710.6	2216.5	30%	6362.3	2264.6	3164.6	Τυρβώδης
351	0.00578	19.45	1907.4	2620.2	37%	7330.2	2264.6	3164.6	Τυρβώδης
372	0.00613	20.78	2037.4	2883.0	42%	7940.9	2264.6	3164.6	Τυρβώδης

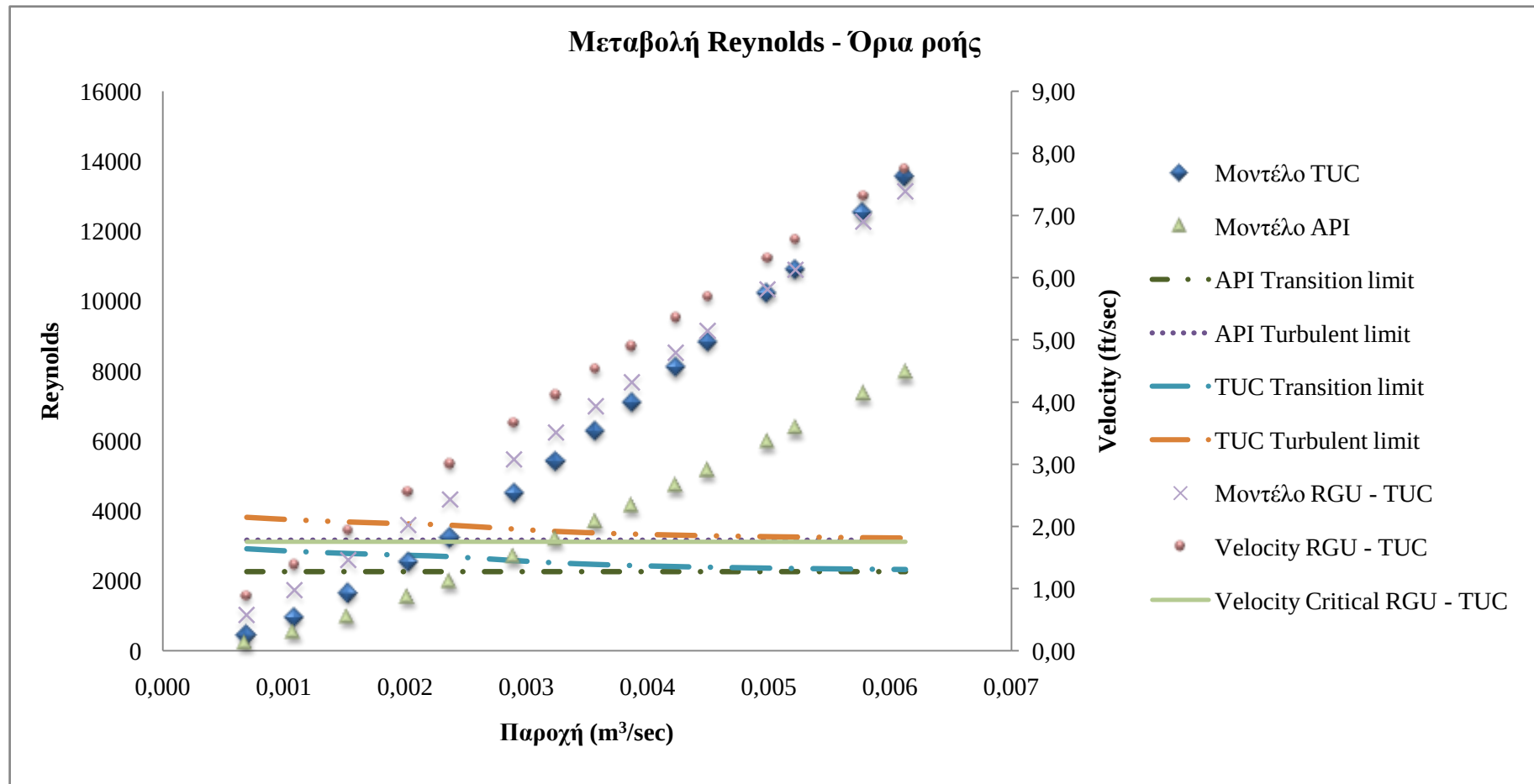
Πίνακας 11.20: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπεντονίτη 1.85% w/v – σύγκριση με το μοντέλο API.

Παροχή (kg/min)	Παροχή (m ³ /sec)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (cm)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (Pa/m)	Μοντέλο RGU -TUC (Pa/m)	Διάφορα %	Re RGU -TUC	V (ft/sec)	V _{critical} (ft/sec)	Είδος Ροής Μοντέλο RGU -TUC
42	0.00069	2.58	252.6	92.0	-64%	1022.9	0.88	1.75	Στρωτή
66	0.00109	2.87	281.5	133.8	-52%	1736.0	1.38	1.75	Στρωτή
93	0.00153	3.19	313.2	283.7	-9%	2593.4	1.94	1.75	Τυρβώδης
123	0.00203	3.61	354.1	455.6	29%	3597.4	2.56	1.75	Τυρβώδης
144	0.00237	5.22	511.5	595.1	16%	4326.3	3.00	1.75	Τυρβώδης
176	0.00290	7.13	699.6	836.0	19%	5471.6	3.67	1.75	Τυρβώδης
197	0.00324	8.47	830.8	1011.8	22%	6243.3	4.11	1.75	Τυρβώδης
217	0.00357	9.29	911.3	1191.9	31%	6991.3	4.52	1.75	Τυρβώδης
235	0.00387	11.19	1097.4	1364.1	24%	7674.8	4.90	1.75	Τυρβώδης
257	0.00423	13.18	1292.5	1587.4	23%	8522.5	5.36	1.75	Τυρβώδης
273	0.00450	13.68	1341.1	1758.4	31%	9146.5	5.69	1.75	Τυρβώδης
303	0.00499	16.17	1585.8	2098.1	32%	10333.6	6.32	1.75	Τυρβώδης
317	0.00522	17.44	1710.6	2264.9	32%	10894.5	6.61	1.75	Τυρβώδης
351	0.00578	19.45	1907.4	2691.5	41%	12274.3	7.32	1.75	Τυρβώδης
372	0.00613	20.78	2037.4	2969.9	46%	13138.1	7.76	1.75	Τυρβώδης

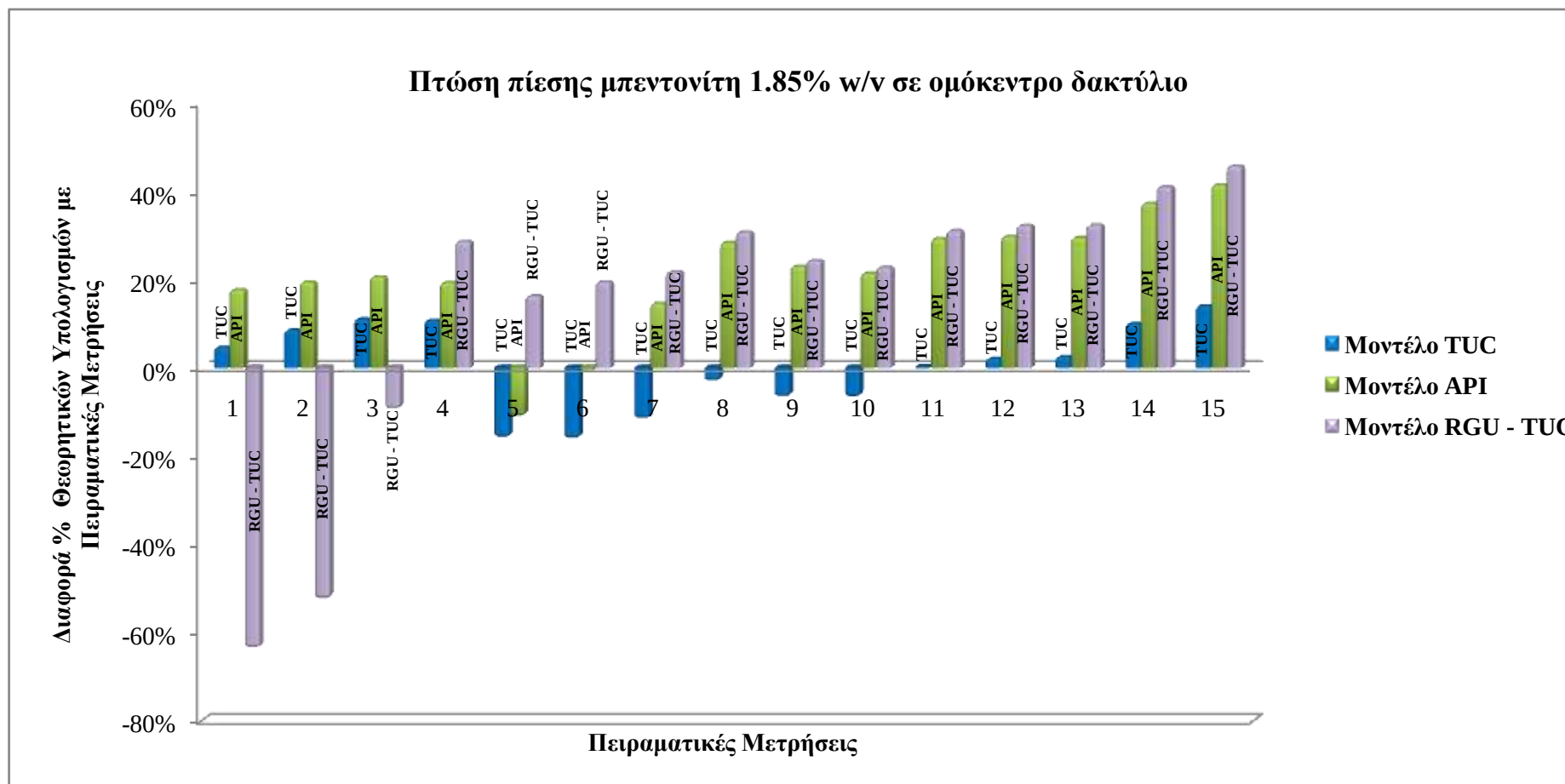
Πίνακας 11.21: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπεντονίτη 1.85 % w/v – σύγκριση με το μοντέλο RGU - TUC.



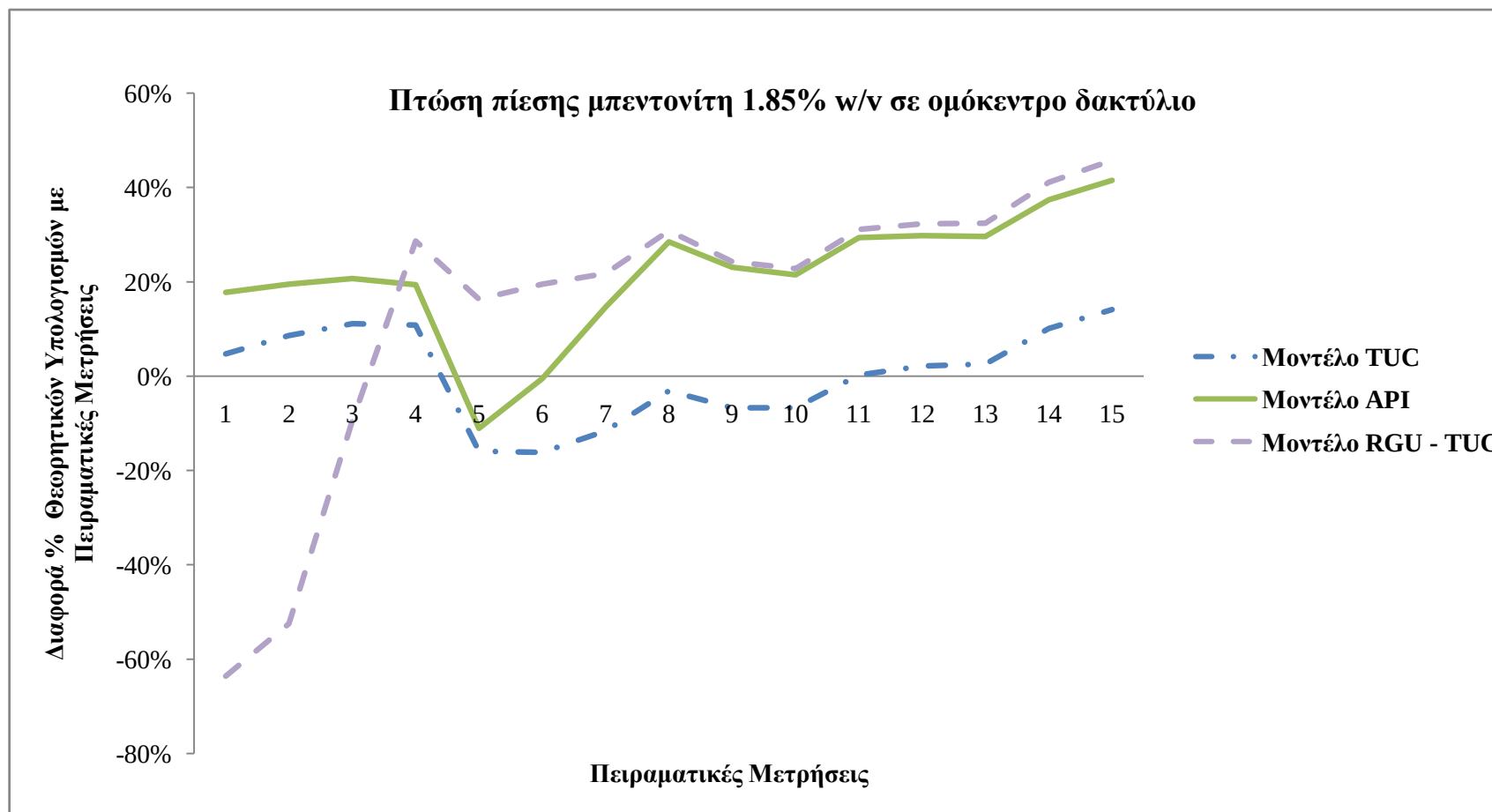
Διάγραμμα 11.18: Πτώση πίεσης για ρευστό μπεντονίτη 1.85% w/v σε ομόκεντρο δακτύλιο



Διάγραμμα 11.19: Μεταβολή Re – Όρια ροής, για ρευστό μπεντονίτη 1.85% w/v σε ομόκεντρο δακτύλιο.



Διάγραμμα 11.20: Διάφορα % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς για ρευστό μπεντονίτη 1.85% w/v σε ομόκεντρο δακτύλιο.



Διάγραμμα 11.21: Διάφορα % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς για ρευστό μπεντονίτη 1.85% w/v σε ομόκεντρο δακτύλιο.

11.4.3. Μπεντονίτης συγκέντρωσης 1.85% w/v σε 100% έκκεντρο δακτύλιο.

Επόμενο βήμα ήταν να πραγματοποιηθούν μετρήσεις πτώσης πίεσης σε έκκεντρο δακτύλιο. Για να επιτευχθεί αυτό ρυθμίσαμε τον εσωτερικό σωλήνα του μοντέλου μας σε 100% έκκεντρη θέση μέσω των οδηγών που υπάρχουν στο σύστημα, και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις και θεωρητική ανάλυση της πτώσης πίεσης. Για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης όσο αφορά την επίδραση της εκκεντρότητας χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες εξισώσεις, πολλαπλασιάζοντας τα θεωρητικά δεδομένα τα οποία προέκυπταν από την ανάλυση με το πρόγραμμα “Rheology” για τα μοντέλα API και TUC για ομόκεντρο δακτύλιο και μετασχηματιζόταν σε πίεση σε έκκεντρο. Αντίθετα το μοντέλο RGU - TUC περιλαμβάνει την επίδραση της εκκεντρότητας στον σχεδιασμό του και αυτή χρησιμοποιήθηκε σαν τιμή εισόδου στο συγκεκριμένο πρόγραμμα.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της επίδρασης της εκκεντρότητας είναι οι ακόλουθες (Haciislamoglu et al., 1994).

$$\Delta P / \Delta L_{ecc} = R * \Delta P / \Delta L_{con} \quad (16)$$

όπου $\Delta P / \Delta L$ είναι η πτώση πίεσης στον ομόκεντρο δακτύλιο (Σχήμα 11.1) και ο συντελεστής R υποδηλώνει την επίδραση της εκκεντρότητας που περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις.

Για στρωτή ροή:

$$R = 1 - 0.072 (e/n)(d_i/d_o)^{0.8454} - 1.5e^2(\sqrt{n})(d_i/d_o)^{0.1852} - 0.96e^3(\sqrt{n})(d_i/d_o)^{0.2527} \quad (31)$$

και για τυρβώδη ροή:

$$R = 1 - 0.048 (e/n)(d_i/d_o)^{0.8454} - (2/3)e^2(\sqrt{n})(d_i/d_o)^{0.1852} - 0.285e^3(\sqrt{n})(d_i/d_o)^{0.2527} \quad (32)$$

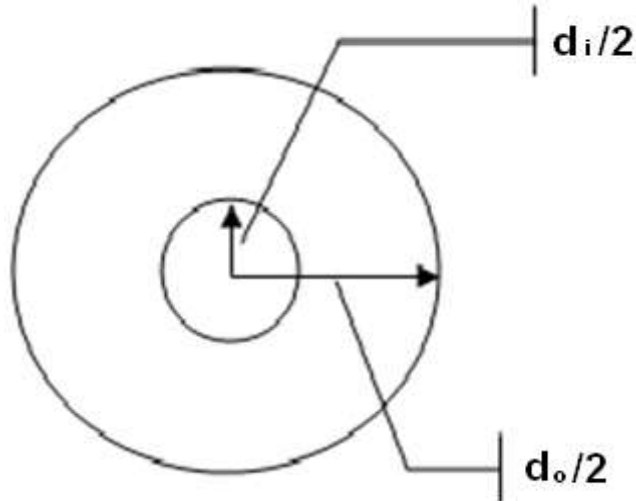
όπου n είναι ο οδηγός συμπεριφοράς της ροής,

d_i είναι η εξωτερική διάμετρος του εσωτερικού σωλήνα (ίντσες),

d_o είναι η εσωτερική διάμετρος της γεώτρησης (ίντσες), και

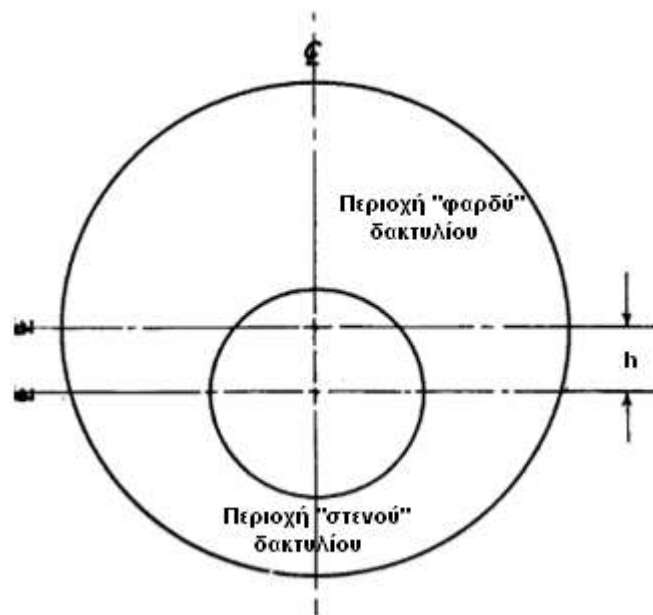
$$e = 100 \frac{2h}{d_o - d_i} \quad (33)$$

όπου h είναι η απόσταση των κέντρων των σωλήνων (Σχήμα 11.2).



Σχήμα 11.1: Ομόκεντρος δακτύλιος.

Επισημαίνεται ότι η άνω προσέγγιση είναι καθαρά εμπειρική καθώς η στρωτή ή η τυρβώδης ροή εκτιμάται για ομόκεντρο δακτύλιο, ενώ στην περίπτωση του 100% έκκεντρου δακτύλιου είθισται να ορίζονται δύο περιοχές ροής στον δακτύλιο, ο φαρδύς και ο στενός δακτύλιος (Σχήμα 11.2), και έχουμε διάφορες προσεγγίσεις για στρωτή και τυρβώδη ροή στο φαρδύ και στο στενό τμήμα του δακτυλίου (Guillot,1990- Cementing).



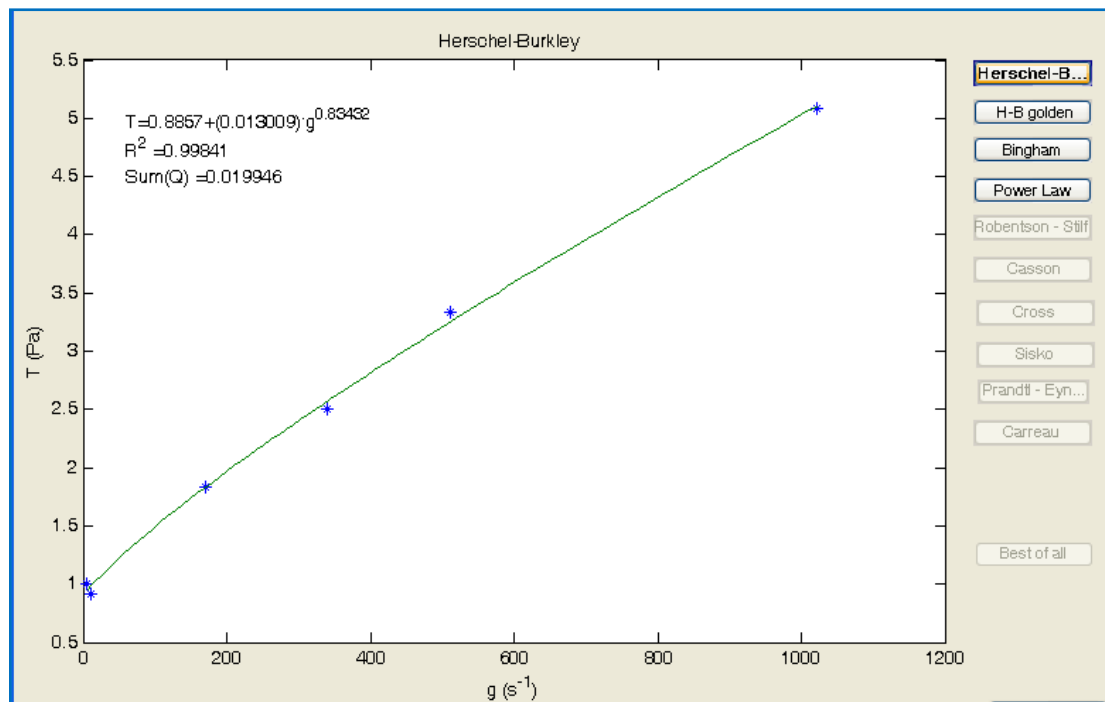
Σχήμα 11.2: Έκκεντρος δακτύλιος.

Ο πολφός για αυτές τις μετρήσεις ήταν ο ίδιος με τον πολφό των μετρήσεων που έγιναν σε ομόκεντρο δακτύλιο. Έγινε εκ νέου μέτρηση των ρεολογικών του δεδομένων και από την ανάλυση των προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.22 και το Ρεόγραμμα 11.3.

Είδος ρευστού	$\tau_0(\text{Pa})$	$K (\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$	n	$\Sigma\Sigma R^2$	ΣQ^2
Herschel-Bulkley	0.89	0.0130	0.8343	0.998	0.020

Πίνακας 11.22: Ρεολογικές ιδιότητες ρευστού μπεντονίτη 1.85 % w/v κλίμακας 670 lt σε 100% έκκεντρο δακτύλιο.

Από τα παραπάνω δεδομένα και την ανάλυση τους στο πρόγραμμα “Rheology” αποδείχτηκε ότι το συγκεκριμένο ρευστό ικανοποιεί τις απαιτήσεις μας και αποφασίστηκε η μελέτη της πτώσης πίεσης με ρευστό μπεντονίτη συγκέντρωσης 1.85% w/v σε 100% έκκεντρο δακτύλιο.



Ρεόγραμμα 11.3: Μπεντονίτης 1.85 % w/v 670 lt σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο.

Οι μετρήσεις της πτώσης πίεσης στον δακτύλιο για διάφορες παροχές έδωσαν τα ακόλουθα πειραματικά δεδομένα και την αντίστοιχη θεωρητική ανάλυση για κάθε μοντέλο, που παρουσιάζονται στους Πίνακες 11.24, 11.25, 11.26. Επίσης στον Πίνακα 11.23 παρουσιάζονται οι τιμές της θερμοκρασίας και της πυκνότητας του ρευστού κατά την διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος.

Μπεντονίτης 1.85% w/v 670 lt	
Αρχική Ένδειξη DP 15	- 0.02
Αρχική Θερμοκρασία Ρευστού °C	20.4
Τελική Θερμοκρασία Ρευστού °C	23.1
Αρχική Πυκνότητα Ρευστού (kg/m ³)	1013
Τελική Πυκνότητα Ρευστού (kg/m ³)	1012

Πίνακας 11.23: Θερμοκρασία – Πυκνότητα ρευστού και αρχική ένδειξη DP 15.

Στον Πίνακα 11.24 παρουσιάζεται σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων πτώσης πίεσης με τους θεωρητικούς υπολογισμούς από το μοντέλο TUC οι οποίοι έχουν μετασχηματιστεί με την προσέγγιση των Hacıislamoglu et Cartalos, 1994. Παρατηρείται ότι ο συνδυασμός του θεωρητικού μοντέλου TUC με την προσέγγιση των Hacıislamoglu et Cartalos, 1994, δίνει πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων με τις θεωρητικές προσεγγίσεις παρουσιάζοντας μέγιστη τιμή σφάλματος 11% με σύνηθες σφάλμα στο 5% για την πλειοψηφία των μετρήσεων. Από τον Πίνακα 11.24 αυτό απουσιάζουν οι αριθμοί Reynolds για το ρευστό για τον λόγο ότι ο τύπος που χρησιμοποιεί το μοντέλο για τον προσδιορισμό του, αντιστοιχεί σε ομόκεντρο δακτύλιο και η πρόβλεψη δεν θα ανταποκρινόταν στον πραγματικό αριθμό Reynolds που χαρακτηρίζει την ροή του ρευστού στον έκκεντρο δακτύλιο.

Στον Πίνακα 11.25 παρουσιάζεται σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων πτώσης πίεσης με τους θεωρητικούς υπολογισμούς από το μοντέλο API οι οποίοι έχουν μετασχηματιστεί με την προσέγγιση των Hacıislamoglu et Cartalos, 1994. Παρατηρείται ότι ο συνδυασμός του θεωρητικού μοντέλου TUC με την προσέγγιση των Hacıislamoglu et Cartalos, 1994, δίνει πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων με τις θεωρητικές προσεγγίσεις παρουσιάζοντας μέγιστη τιμή σφάλματος 34% με σύνηθες σφάλμα στο 20% για την πλειοψηφία των μετρήσεων. Το σφάλμα αυτό είναι περίπου δύο φορές μεγαλύτερο από το σφάλμα το οποίο παρουσιάζει ο συνδυασμός TUC με Hacıislamoglu et Cartalos. Από τον Πίνακα 11.25 αυτό απουσιάζουν οι αριθμοί Reynolds για το ρευστό για τον λόγο ότι ο τύπος που χρησιμοποιεί το μοντέλο για τον προσδιορισμό του, αντιστοιχεί σε ομόκεντρο δακτύλιο και η πρόβλεψη δεν θα ανταποκρινόταν στον πραγματικό αριθμό Reynolds που χαρακτηρίζει την ροή του ρευστού στον έκκεντρο δακτύλιο.

Στον Πίνακα 11.26 παρουσιάζεται σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων πτώσης πίεσης με τους θεωρητικούς υπολογισμούς από το μοντέλο RGU-TUC. Επίσης παρουσιάζονται τα όρια μετάβασης για κάθε περιοχή ροής, όπως και το είδος της ροής του ρευστού με βάση την τιμή της κρίσιμης ταχύτητας V_c . Από τις τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.26 προκύπτει ότι η μετάβαση στην Τυρβώδη περιοχή σύμφωνα με το μοντέλο RGU-TUC επιτυγχάνεται για παροχή $0.00166 \text{ m}^3/\text{s}$, δηλαδή από την πρώτη μέτρηση πτώσης πίεσης. Η πρόβλεψη της πτώσης πίεσης

παρουσιάζει τιμές σφάλματος έως 51%, με σύνηθες σφάλμα στο 30% για την πλειοψηφία των μετρήσεων..

Στο Διάγραμμα 11.22 παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα πτώσης πίεσης μπεντονίτη συγκέντρωσης 1.85% σε 100% έκκεντρο δακτύλιο στο σύστημα ροής του εργαστηρίου για διάφορες παροχές, καθώς και οι θεωρητικές προσεγγίσεις από τα τρία μοντέλα. Στα Διαγράμματα 11.23 και 11.24 παρουσιάζεται η διαφορά % που έχει η θεωρητική προσέγγιση του κάθε μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα με το μοντέλο TUC να εμφανίζει την μικρότερη διαφορά σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα.

Παροχή (kg\min)	Παροχή (m ³ /sec)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (cm)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (Pa/m)	Μοντέλο TUC (Pa/m)	Διαφορά %
101	0.00166	1.60	156.8	166.2	6%
122	0.00201	2.24	219.4	181.8	-17%
147	0.00242	3.05	299.4	283.3	-5%
173	0.00285	3.58	351.17	373.3	6%
193	0.00318	4.22	414.2	458.6	11%
213	0.00350	5.35	525.0	549.3	5%
237	0.00390	7.20	705.7	665.5	-6%
254	0.00418	7.99	784.0	752.6	-4%
273	0.00449	8.90	872.6	854.5	-2%
299	0.00492	9.59	940.7	1001.9	7%
316	0.00520	11.54	1131.6	1103.1	-3%
354	0.00582	13.29	1303.7	1343.0	3%
371	0.00610	14.62	1434.0	1456.4	2%

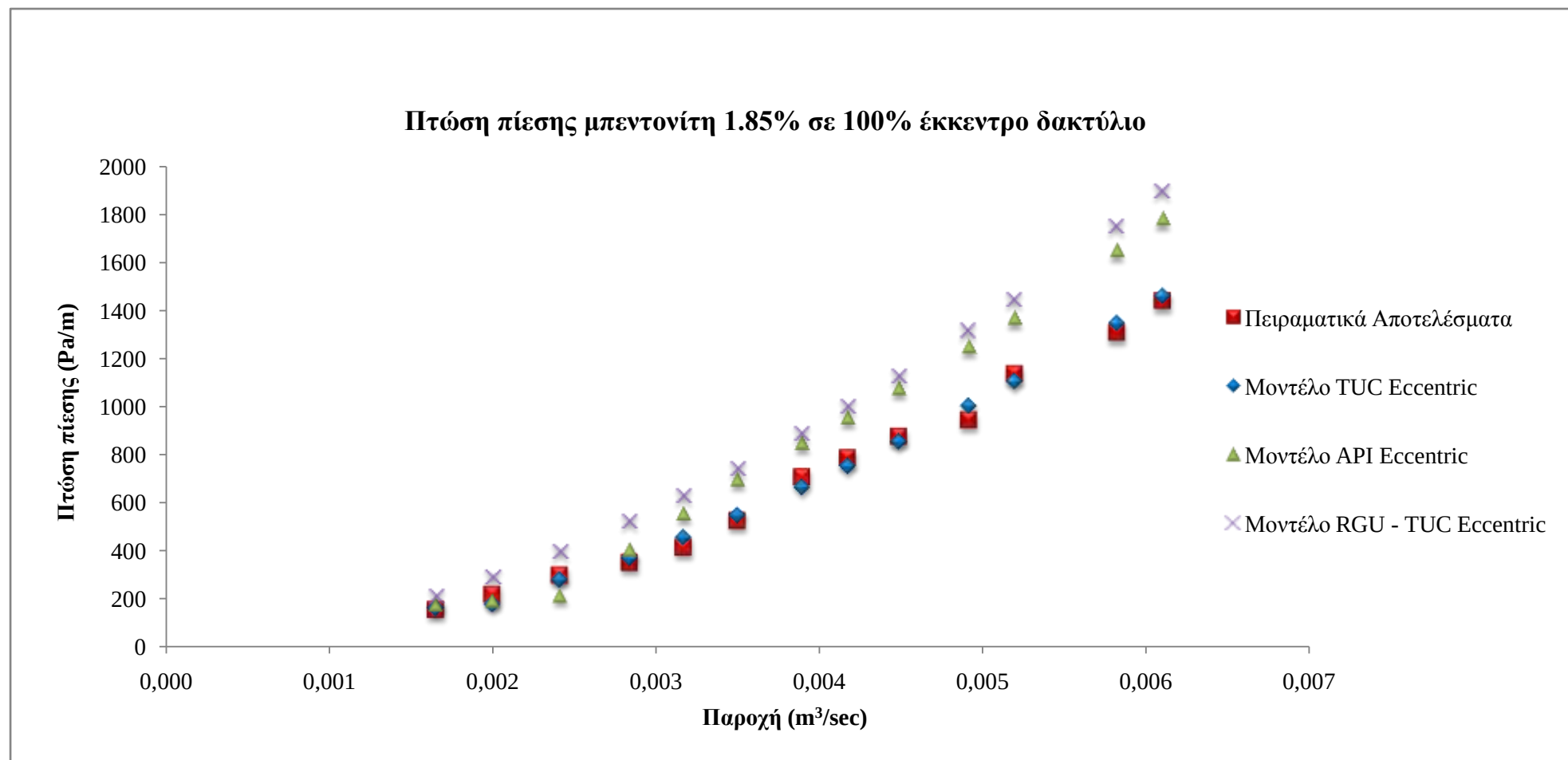
Πίνακας 11.24: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε 100% έκκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπεντονίτη 1.85% w/v – σύγκριση με το μοντέλο TUC 100% έκκεντρο δακτύλιο διορθωμένο κατά Hacıislamoglu et Cartalos.

Παροχή (kg/min)	Παροχή (m ³ /sec)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (cm)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (Pa/m)	Μοντέλο API (Pa/m)	Διαφορά %
101	0.00166	1.60	156.8	177.6	13%
122	0.00201	2.24	219.4	193.67	-12%
147	0.00242	3.05	299.4	213.6	-29%
173	0.00285	3.58	351.17	404.4	15%
193	0.00318	4.22	414.2	555.2	34%
213	0.00350	5.35	525.0	696.0	33%
237	0.00390	7.20	705.7	847.7	20%
254	0.00418	7.99	784.0	953.3	22%
273	0.00449	8.90	872.6	1074.5	23%
299	0.00492	9.59	940.7	1247.8	33%
316	0.00520	11.54	1131.6	1366.4	21%
354	0.00582	13.29	1303.7	1646.6	26%
371	0.00610	14.62	1434.0	1778.7	24%

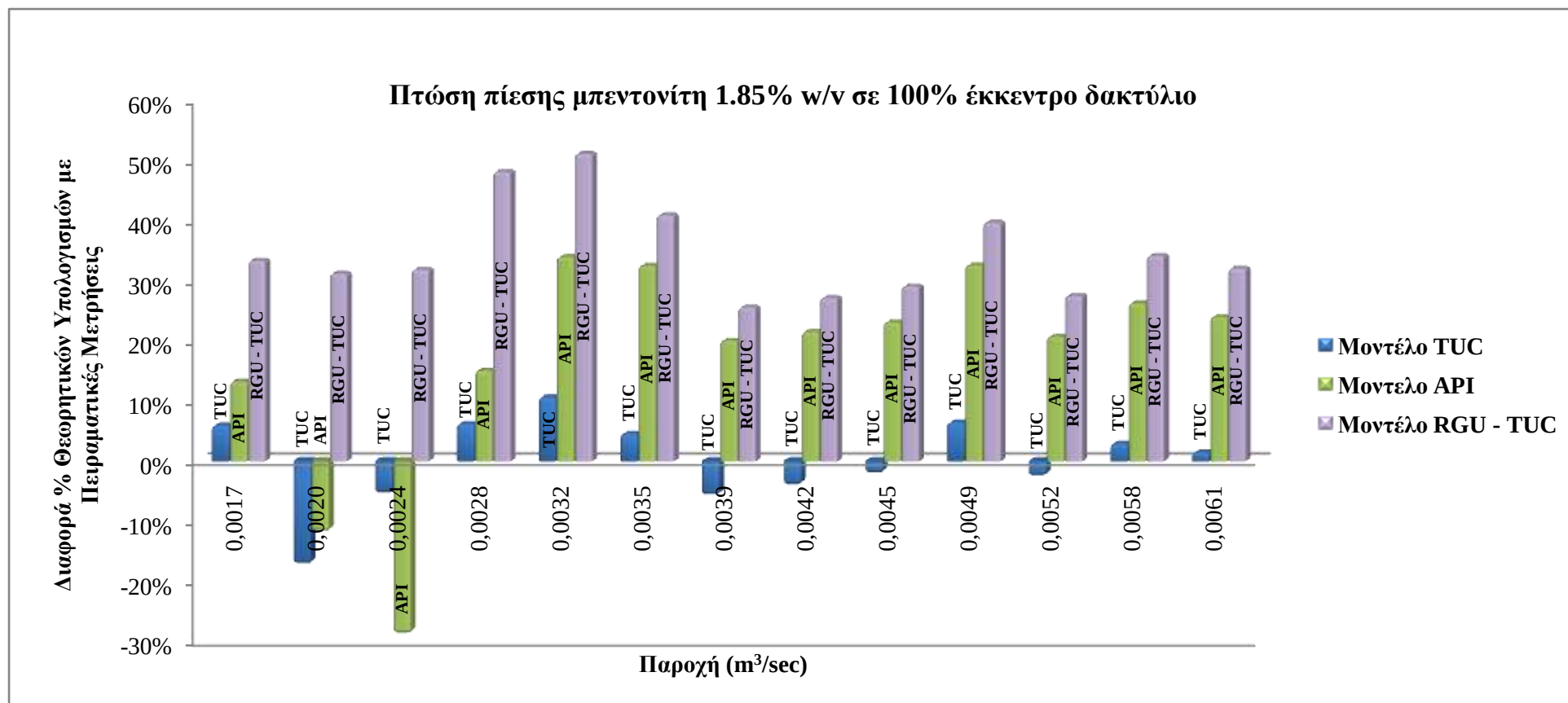
Πίνακας 11.25: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπεντονίτη 1.85% w/v – σύγκριση με το μοντέλο API σε 100% έκκεντρο δακτύλιο διορθωμένο κατά Hacıislamoglu et Cartalos.

Παροχή (kg/min)	Παροχή (m ³ /sec)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (cm)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (Pa/m)	Μοντέλο RGU -TUC (Pa/m)	Διάφορα %	V (ft/sec)	V _{critical} (ft/sec)	Είδος Ροής Μοντέλο RGU -TUC
101	0.00166	1.60	156.8	209.1	33%	2.10	1.75	Τυρβώδης
122	0.00201	2.24	219.4	288.0	31%	2.54	1.75	Τυρβώδης
147	0.00242	3.05	299.4	394.9	32%	3.06	1.75	Τυρβώδης
173	0.00285	3.58	351.17	520.3	48%	3.60	1.75	Τυρβώδης
193	0.00318	4.22	414.2	626.2	51%	4.02	1.75	Τυρβώδης
213	0.00350	5.35	525.0	740.1	41%	4.44	1.75	Τυρβώδης
237	0.00390	7.20	705.7	886.8	26%	4.94	1.75	Τυρβώδης
254	0.00418	7.99	784.0	997.2	27%	5.29	1.75	Τυρβώδης
273	0.00449	8.90	872.6	1126.8	29%	5.69	1.75	Τυρβώδης
299	0.00492	9.59	940.7	1314.5	40%	6.23	1.75	Τυρβώδης
316	0.00520	11.54	1131.6	1443.6	28%	6.58	1.75	Τυρβώδης
354	0.00582	13.29	1303.7	1749.7	34%	7.37	1.75	Τυρβώδης
371	0.00610	14.62	1434.0	1894.4	32%	7.73	1.75	Τυρβώδης

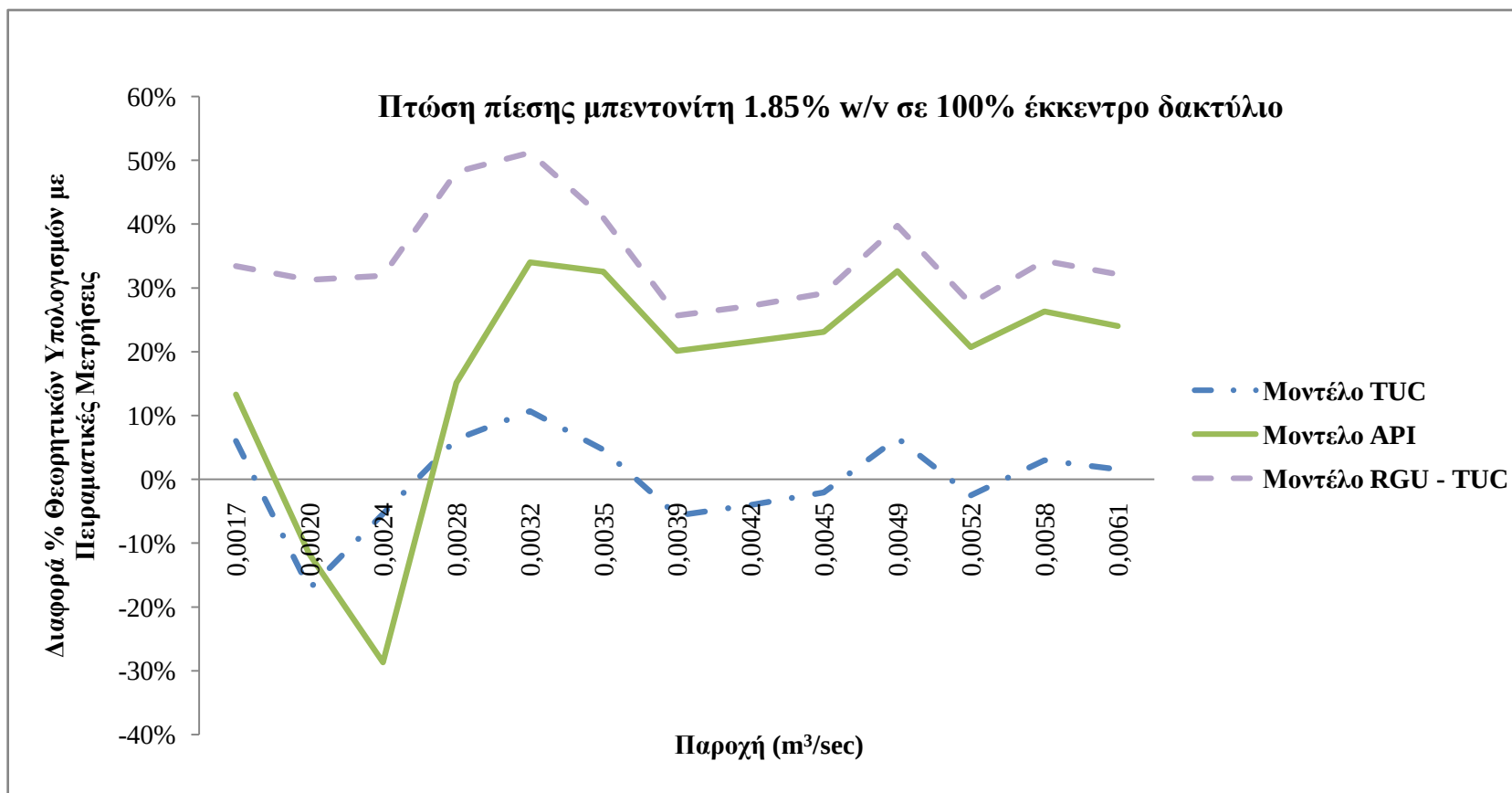
Πίνακας 11.26: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπεντονίτη 1.85 % w/v – σύγκριση με το μοντέλο RGU - TUC σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο.



Διάγραμμα 11.22: Πτώση πίεσης για ρευστό μπεντονίτη 1.85% w/v σε 100% έκκεντρο δακτύλιο.



Διάγραμμα 11.23: Διαφορά % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς για ρευστό μπεντονίτη 1.85% w/v σε 100% έκκεντρο δακτύλιο.



Διάγραμμα 11.24: Διαφορά % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς για ρευστό μπεντονίτη 1.85% w/v σε 100% έκκεντρο δακτύλιο.

11.4.4. Μπεντονίτης συγκέντρωσης 1.5% σε 100% έκκεντρο δακτύλιο.

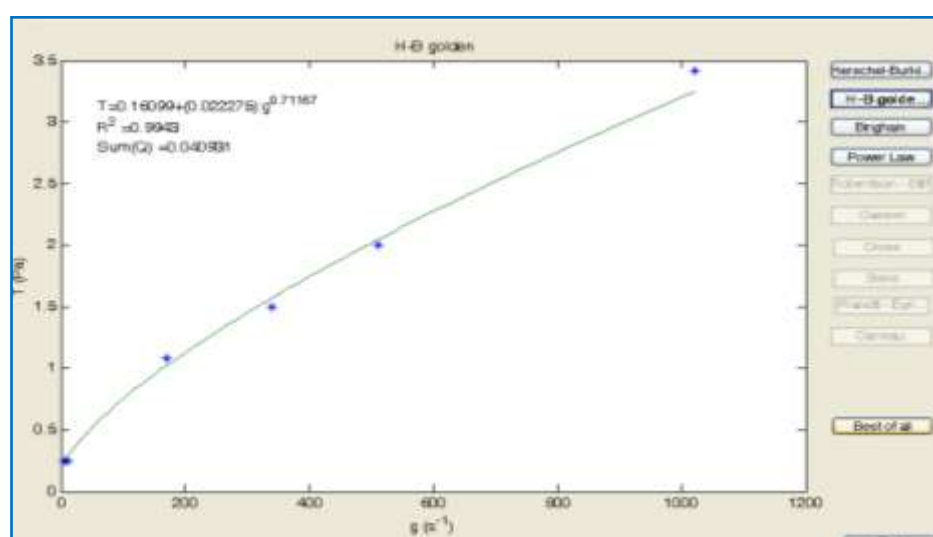
Επόμενο βήμα ήταν η μέτρηση της πτώσης πίεσης σε έκκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπεντονίτη συγκέντρωσης 1.5% w/v. Για να επιτευχθεί αυτό χωρίς να χρειαστεί να παρασκευάσουμε καινούριο δείγμα αφαιρέσαμε 127 lt πολφού μπεντονίτη συγκέντρωσης 1.85% w/v και προσθέσαμε ίση ποσότητα νερού βρύσης ώστε το τελικό μας ρευστό να έχει συγκέντρωση μπεντονίτη 1.5% w/v.

Από την ανάλυση των ρεολογικών του δεδομένων, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.27 και το Ρεόγραμμα 11.4.

Είδος ρευστού	$\tau_0(\text{Pa})$	$K (\text{Pas}^n)$	n	$\Sigma \Sigma R^2$	ΣQ^2
Herschel-Bulkley Golden	0.16	0.0223	0.7117	0.994	0.040931

Πίνακας 11.27: Ρεολογικές ιδιότητες ρευστού μπεντονίτη 1.5% w/v κλίμακας 670 lt σε 100% έκκεντρο δακτύλιο.

Από τα παραπάνω δεδομένα και την ανάλυση τους στο πρόγραμμα “Rheology” αποδείχτηκε ότι το συγκεκριμένο ρευστό ικανοποιεί τις απαιτήσεις μας και αποφασίστηκε η μελέτη της πτώσης πίεσης με ρευστό μπεντονίτη συγκέντρωσης 1.5% w/v σε 100% έκκεντρο δακτύλιο.



Ρεόγραμμα 11.4: Μπεντονίτης 1.5% w/v 670 lt σε 100% έκκεντρο δακτύλιο.

Οι μετρήσεις της πτώσης πίεσης στον δακτύλιο για διάφορες παροχές έδωσαν τα ακόλουθα πειραματικά δεδομένα και την αντίστοιχη θεωρητική ανάλυση για κάθε μοντέλο, που παρουσιάζονται στους Πίνακες 11.29, 11.30, 11.31. Επίσης στον Πίνακα 11.28 παρουσιάζονται οι τιμές της θερμοκρασίας και της πυκνότητας του ρευστού κατά την διάρκεια εκτέλεσης του πειράματος.

Μπεντονίτης 1.85% w/v 670 lt	
Αρχική Ένδειξη DP 15	- 0.02
Αρχική Θερμοκρασία Ρευστού °C	22.6
Τελική Θερμοκρασία Ρευστού °C	23.5
Αρχική Πυκνότητα Ρευστού (kg/m³)	1010
Τελική Πυκνότητα Ρευστού (kg/m³)	1010

Πίνακας 11.28: Θερμοκρασία – Πυκνότητα ρευστού και αρχική ένδειξη DP 15.

Στον Πίνακα 11.29 παρουσιάζεται σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων πτώσης πίεσης με τους θεωρητικούς υπολογισμούς από το μοντέλο TUC οι οποίοι έχουν μετασχηματιστεί με την προσέγγιση των Haciislamoglu et Cartalos, 1994. Παρατηρείται ότι ο συνδυασμός του θεωρητικού μοντέλου TUC με την προσέγγιση των Haciislamoglu et Cartalos, 1994, δίνει πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων με τις θεωρητικές προσεγγίσεις παρουσιάζοντας μέγιστη τιμή σφάλματος 51% με σύνηθες σφάλμα στο 15% για την πλειονηφία των μετρήσεων. Από τον Πίνακα 11.29 αυτό απουσιάζουν οι αριθμοί Reynolds για το ρευστό για τον λόγο ότι ο τύπος που χρησιμοποιεί το μοντέλο για τον προσδιορισμό του, αντιστοιχεί σε ομόκεντρο δακτύλιο και η πρόβλεψη δεν θα ανταποκρινόταν στον πραγματικό αριθμό Reynolds που χαρακτηρίζει την ροή του ρευστού στον έκκεντρο δακτύλιο.

Στον Πίνακα 11.30 παρουσιάζεται σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων πτώσης πίεσης με τους θεωρητικούς υπολογισμούς από το μοντέλο API οι οποίοι έχουν μετασχηματιστεί με την προσέγγιση των Haciislamoglu et Cartalos, 1994. Παρατηρείται ότι ο συνδυασμός του θεωρητικού μοντέλου TUC με την προσέγγιση των Haciislamoglu et Cartalos, 1994, δίνει πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ των

πειραματικών μετρήσεων με τις θεωρητικές προσεγγίσεις παρουσιάζοντας μέγιστη τιμή σφάλματος 59% με σύνηθες σφάλμα στο 10% για την πλειοψηφία των μετρήσεων. Το σφάλμα αυτό είναι περίπου ίδιο με το σφάλμα το οποίο παρουσιάζει ο συνδυασμός TUC με Haciislamoglu et Cartalos. Από τον Πίνακα 11.30 αυτό απουσιάζουν οι αριθμοί Reynolds για το ρευστό για τον λόγο ότι ο τύπος που χρησιμοποιεί το μοντέλο για τον προσδιορισμό του, αντιστοιχεί σε ομόκεντρο δακτύλιο και η πρόβλεψη δεν θα ανταποκρινόταν στον πραγματικό αριθμό Reynolds που χαρακτηρίζει την ροή του ρευστού στον έκκεντρο δακτύλιο.

Στον Πίνακα 11.31 παρουσιάζεται σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων πτώσης πίεσης με τους θεωρητικούς υπολογισμούς από το μοντέλο RGU-TUC. Επίσης παρουσιάζονται τα όρια μετάβασης για κάθε περιοχή ροής, όπως και το είδος της ροής του ρευστού με βάση την τιμή της κρίσιμης ταχύτητας V_c . Από τις τιμές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.31 προκύπτει ότι η μετάβαση στην Τυρβώδη περιοχή σύμφωνα με το μοντέλο RGU-TUC επιτυγχάνεται για παροχή $0.00129 \text{ m}^3/\text{s}$. Η πρόβλεψη της πτώσης πίεσης παρουσιάζει τιμές σφάλματος έως 36%, με σύνηθες σφάλμα στο 20% για την πλειοψηφία των μετρήσεων..

Στο Διάγραμμα 11.25 παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα πτώσης πίεσης μπεντονίτη συγκέντρωσης 1.5% σε 100% έκκεντρο δακτύλιο στο σύστημα ροής του εργαστηρίου για διάφορες παροχές, καθώς και οι θεωρητικές προσεγγίσεις από τα τρία μοντέλα. Στα Διαγράμματα 11.26 και 11.27 παρουσιάζεται η διαφορά % που έχει η θεωρητική προσέγγιση του κάθε μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα με το μοντέλο TUC να εμφανίζει την μικρότερη διαφορά σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα και να ακολουθεί το μοντέλο API με σχεδόν παρόμοια συσχέτιση (θεωρητικών υπολογισμών – πειραματικών μετρήσεων).

Παροχή (kg/min)	Παροχή (m ³ /sec)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (cm)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (Pa/m)	Μοντέλο TUC (Pa/m)	Διάφορα %
44	0.00073	0.42	40.8	61.6	51%
78	0.00129	1.40	136.9	85.1	-38%
112	0.00185	1.98	194.6	173.0	-11%
146	0.00241	3.17	310.9	268.0	-14%
176	0.00290	3.91	383.4	364.6	-5%
210	0.00347	5.36	526.1	487.9	-7%
250	0.00413	7.43	728.8	650.6	-11%
271	0.00447	8.70	853.4	743.4	-13%
295	0.00487	10.87	1065.6	855.6	-20%
315	0.00520	11.80	1157.5	953.9	-18%
338	0.00558	12.52	1228.2	1072.4	-13%
372	0.00614	13.65	1338.6	1257.7	-6%

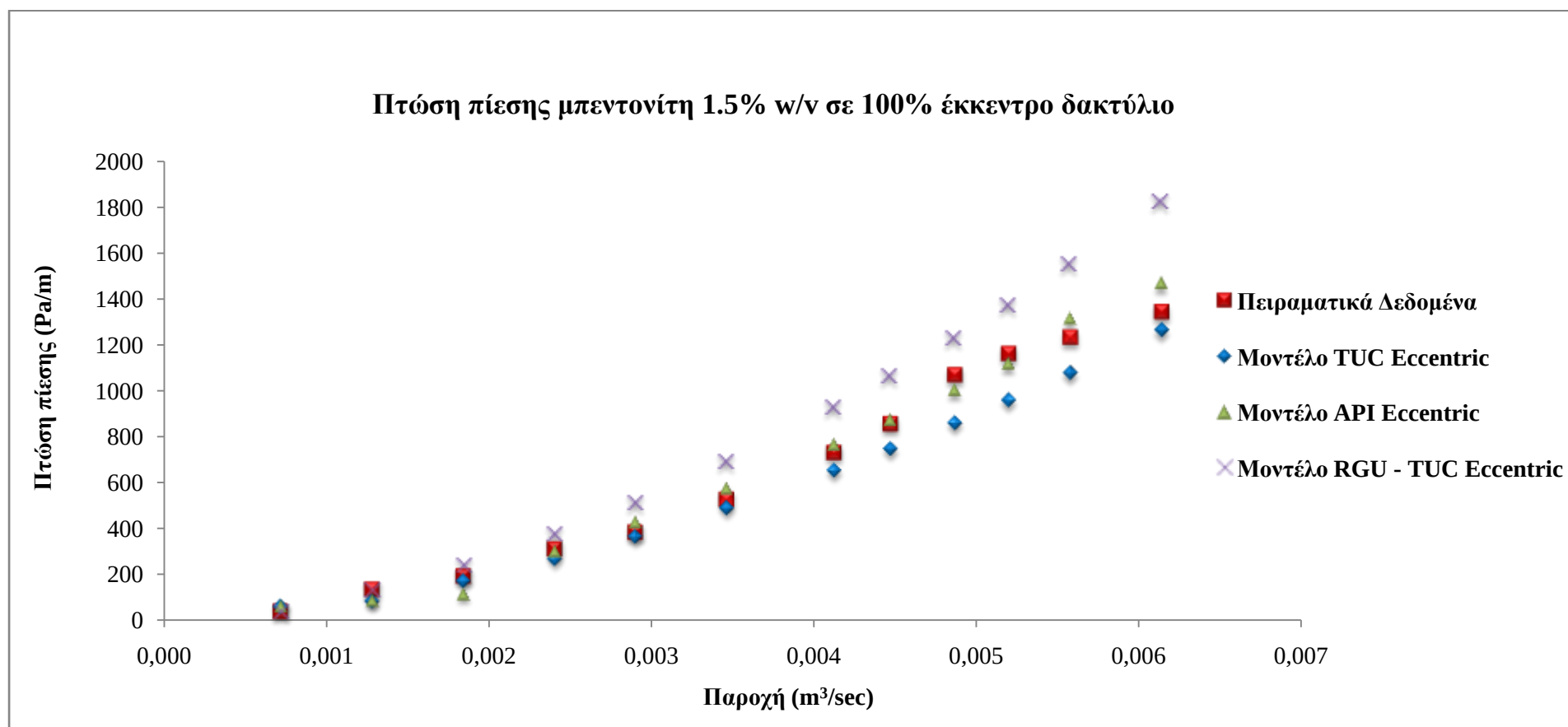
Πίνακας 11.29: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπεντονίτη 1.5% w/v – σύγκριση με το μοντέλο TUC 100% έγκεντρο δακτύλιο διορθωμένο κατά Hacıislamoglu et Cartalos.

Παροχή (kg/min)	Παροχή (m ³ /sec)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (cm)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (Pa/m)	Μοντέλο API (Pa/m)	Διαφορά %
44	0.00073	0.42	40.8	65.0	59%
78	0.00129	1.40	136.9	90.0	-34%
112	0.00185	1.98	194.6	116.1	-40%
146	0.00241	3.17	310.9	301.9	-3%
176	0.00290	3.91	383.4	428.1	12%
210	0.00347	5.36	526.1	573.5	9%
250	0.00413	7.43	728.8	762.8	5%
271	0.00447	8.70	853.4	870.4	2%
295	0.00487	10.87	1065.6	999.9	-6%
315	0.00520	11.80	1157.5	1113.3	-4%
338	0.00558	12.52	1228.2	1308.9	7%
372	0.00614	13.65	1338.6	1462.0	9%

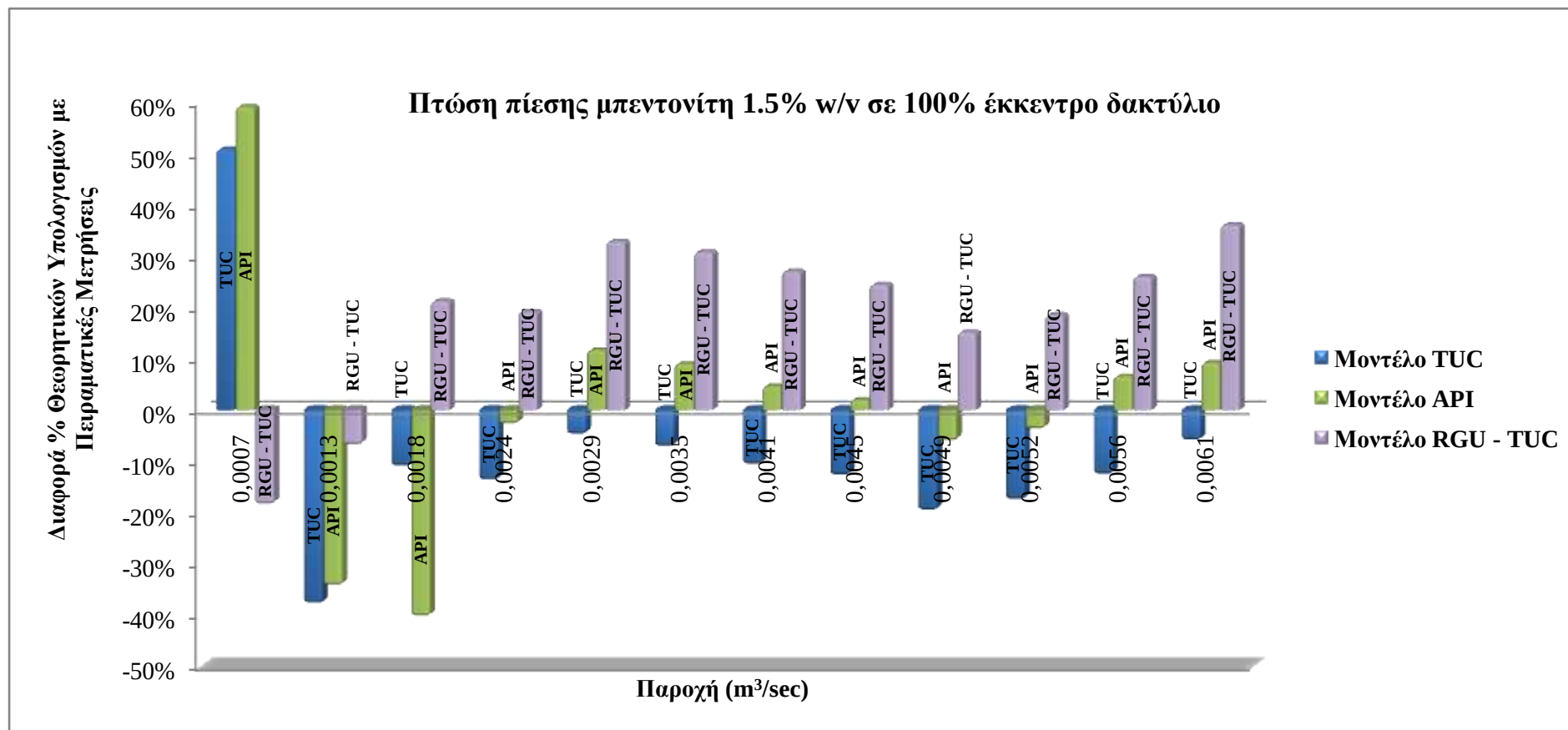
*Πίνακας 11.30: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπεντονίτη 1.5 % w/v – σύγκριση με το μοντέλο API σε 100 %
έκκεντρο δακτύλιο διορθωμένο κατά Hacıislamoglu et Cartalos.*

Παροχή (kg/min)	Παροχή (m ³ /sec)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (cm)	Πειραματική τιμή πτώσης πίεσης (Pa/m)	Μοντέλο RGU -TUC (Pa/m)	Διάφορα %	V (ft/sec)	V _{critical} (ft/sec)	Είδος Ροής Μοντέλο RGU -TUC
44	0.00073	0.42	40.80	33.25	-19%	0.19	1.37	Στρωτή
78	0.00129	1.40	136.93	127.44	-7%	1.63	1.37	Τυρβώδης
112	0.00185	1.98	194.61	235.96	21%	2.34	1.37	Τυρβώδης
146	0.00241	3.17	310.87	370.57	19%	3.05	1.37	Τυρβώδης
176	0.00290	3.91	383.35	509.39	33%	3.68	1.37	Τυρβώδης
210	0.00347	5.36	526.07	688.11	31%	4.39	1.37	Τυρβώδης
250	0.00413	7.43	728.77	925.95	27%	5.22	1.37	Τυρβώδης
271	0.00447	8.70	853.40	1062.25	24%	5.66	1.37	Τυρβώδης
295	0.00487	10.87	1065.60	1227.37	15%	6.16	1.37	Τυρβώδης
315	0.00520	11.80	1157.53	1372.41	19%	6.58	1.37	Τυρβώδης
338	0.00558	12.52	1228.18	1547.37	26%	7.06	1.37	Τυρβώδης
372	0.00614	13.65	1338.58	1821.67	36%	7.77	1.37	Τυρβώδης

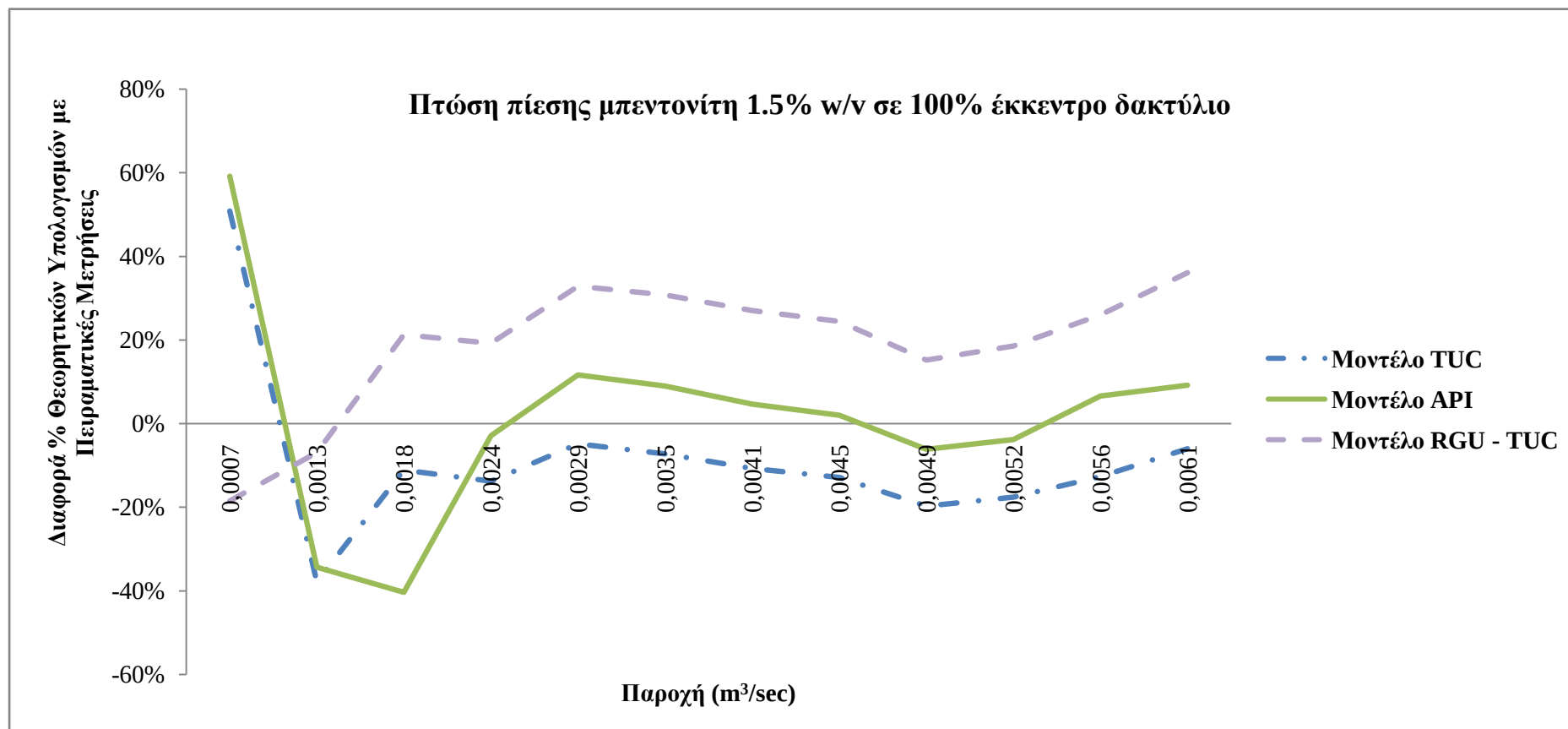
Πίνακας 11.31: Δεδομένα πτώσης πίεσης σε ομόκεντρο δακτύλιο για ρευστό μπεντονίτη 1.5% w/v – σύγκριση με το μοντέλο RGU - TUC σε 100% έκκεντρο δακτύλιο.



Διάγραμμα 11.25: Πτώση πίεσης για ρευστό μπεντονίτη 1.5% w/v σε 100% έκκεντρο δακτύλιο.



Διάγραμμα 11.26: Διάφορα % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς για ρευστό μπεντονίτη 1.5% w/v σε 100% έκκεντρο δακτύλιο.



Διάγραμμα 11.27: Διάφορα % πειραματικών τιμών με θεωρητικούς υπολογισμούς για ρευστό μπεντονίτη 1.5% w/v σε 100% έκκεντρο δακτύλιο.

11.5. Συμπεράσματα σύγκρισης υπολογιστικών μοντέλων με πειραματικές μετρήσεις πτώσης πίεσης.

Από τις παραπάνω μετρήσεις και αναλύσεις που παρουσιάστηκαν και αφορούν πτώση πίεσης πολφού μπεντονίτη συγκέντρωσης 1.5% και 1.85% σε ομόκεντρο και 100% έκκεντρο δακτύλιο, στο σύστημα ροής του εργαστηρίου, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Μοντέλο TUC

- Το μοντέλο TUC είναι αυτό που εμφανίζει την καλύτερη προσέγγιση πτώσης πίεσης τόσο σε ομόκεντρο όσο και σε 100% έκκεντρο δακτύλιο και για τα δύο ρευστά μπεντονίτη που μελετήθηκαν.
- Η προσέγγιση του είναι καλύτερη από τα άλλα δύο μοντέλα για όλα τα είδη ροής στα οποία έγιναν μετρήσεις πτώσης πίεσης (στρωτή, μεταβατική, τυρβώδης).
- Σε τυρβώδη ροή το μοντέλο TUC εμφανίζει την καλύτερη προσέγγιση.
- Ο συνδυασμός του μοντέλου TUC με τις εξισώσεις που αναπτύχθηκαν από τους Haciislamoglu και Cartalos (1994), αποτελούν πολύ καλό συνδυασμό για την πρόβλεψη πτώσης πίεσης σε έκκεντρο δακτύλιο.
- Το μοντέλο TUC εμφανίζει καλύτερη προσέγγιση από τα άλλα δύο μοντέλα, για ροή ρευστού στην στρωτή και μεταβατική περιοχή.
- Το σφάλμα που εμφανίζει το μοντέλο TUC παρουσιάζει μέγιστη τιμή έως 30% , με μια μέση τιμή σφάλματος 10 – 15% και ελάχιστο σφάλμα 2% .
- Το σφάλμα το οποίο παρουσιάζει το μοντέλο TUC είναι μέσα στα επιτρεπόμενα όρια για υπολογιστικό μοντέλο και μάλιστα πολύ μικρότερο από αντίστοιχα μοντέλα υπολογισμού πτώσης πίεσης (API, RGU – TUC).
- Για 100% έκκεντρο δακτύλιο το μοντέλο TUC με την προσέγγιση των Haciislamoglu και Cartalos (1994) δίνει τιμές σφάλματος 10 – 15%.

Μοντέλο API

- Το μοντέλο API εμφανίζει μέτρια προσέγγιση πτώση πίεσης τόσο σε ομόκεντρο όσο και σε 100% έκκεντρο δακτύλιο.
- Το σφάλμα το οποίο παρουσιάζει το μοντέλο φτάνει σε τιμές έως και 65% , με μέση τιμή σφάλματος 35%.

- Το σφάλμα του μοντέλου API εμφανίζεται έως και δύο με τρεις φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο σφάλμα του μοντέλου TUC.
- Η προσέγγιση η οποία έχει αναπτυχθεί από το API για τον υπολογισμό πτώση πίεσης ρευστών Herschel-Bulkley εμφανίζει αδυναμία σε σχέση με την προσέγγιση TUC.
- Για 100% έκκεντρο δακτύλιο το μοντέλο API με την προσέγγιση των Haciislamoglu και Cartalos (1994) δίνει τιμές σφάλματος 10 – 25%.

Μοντέλο RGU - TUC

- Το μοντέλο RGU - TUC εμφανίζει μέτρια προσέγγιση πτώση πίεσης τόσο σε ομόκεντρο όσο και σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο, η οποία ακολουθεί τις τιμές πτώσης πίεσης που υπολογίζονται από το μοντέλο API παρουσιάζοντας σφάλμα 2 -3 % μεγαλύτερο το API.
- Το σφάλμα το οποίο παρουσιάζει το μοντέλο φτάνει σε τιμές έως και 65 %, με μέση τιμή σφάλματος 40 %.
- Το σφάλμα του μοντέλου RGU - TUC εμφανίζεται έως και δύο με τρεις φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο σφάλμα του μοντέλου TUC, ενώ παρόμοιο σφάλμα με το μοντέλο API.
- Η προσέγγιση η οποία ακολουθήθηκε στον σχεδιασμό του μοντέλου RGU - TUC για τον υπολογισμό πτώση πίεσης ρευστών Herschel-Bulkley εμφανίζει παρόμοια αποτελέσματα με την προσέγγιση του μοντέλου API.
- Η μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται από το μοντέλο RGU – TUC για τον υπολογισμό πτώσης πίεσης ρευστών Herschel-Bulkley, και αποτελεί μετατροπή της μεθόδου για Power Law ρευστά, εμφανίζει σχεδόν ίδια προσέγγιση με την ανεξάρτητη μέθοδο που αναπτύχθηκε από το API για ρευστά Herschel-Bulkley.
- Το μοντέλο RGU – TUC εμφανίζει μεγάλη υστέρηση στον υπολογισμό πτώσης πίεσης για περιοχές ροής στην στρωτή και μεταβατική περιοχή, εξαιτίας της προσέγγισης την οποία χρησιμοποιεί για τον καθορισμό του είδους της ροής του ρευστού ($V_{critical}$). Αυτό έχει να κάνει με το ότι δεν υπάρχει μεταβατική περιοχή ροής και λόγο του ότι εμφανίζει νωρίτερα την τυρβώδη περιοχή σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα (API & TUC).
- Για 100% έκκεντρο δακτύλιο το μοντέλο API με την προσέγγιση των Haciislamoglu και Cartalos (1994) δίνει τιμές σφάλματος 20 – 40%.

Κεφάλαιο 12^ο - Γενικά συμπεράσματα και μελλοντικές προτάσεις για έρευνα σε συνέχεια αυτής της εργασίας.

12.1. Εισαγωγή.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα τα οποία πρόέκυψαν μέσα από αυτή την έρευνα και παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα σε συνέχεια αυτής.

12.2. Συμπεράσματα.

Συμπεράσματα που προκύπτουν από θεωρητική ανάλυση του συνδυασμού της τεχνικής Casing Drilling με αυτή του Mud Cap.

- Η πίεση στον πυθμένα της γεώτρηση κατά την διάρκεια εκτέλεσης διάτρησης με την τεχνική Casing Drilling, μπορεί να ελαττωθεί εάν συνδυαστεί με την τεχνική Mud Cap σε σύγκριση με την μη ύπαρξη Mud Cap (εάν σχεδιαστεί η διάτρηση για συγκεκριμένα μεγέθη διατομής και σωλήνωσης της γεώτρησης, καθώς και το ύψος του ρευστού που παίζει τον ρόλο του Mud Cap.
- Η τεχνική Casing Drilling εμφανίζει μεγάλη πτώση πίεσης στον δακτύλιο της γεώτρησης εξαιτίας της μικρής υδραυλικής διαμέτρου, η οποία μπορεί να ελαττωθεί με την εφαρμογή του Mud Cap.
- Ο συνδυασμός αυτών των δύο τεχνικών μπορεί να επιφέρει ελάττωση στην συνολική πτώση πίεσης στην γεώτρηση εξαιτίας της χρήσης ρευστού το οποίο να προκαλεί μικρή πτώση πίεσης στο εσωτερικό των διατρητικών στελεχών και στο κατώτατο τμήμα του δακτυλίου της γεώτρησης.
- Παρά την προσθήκη στον δακτύλιο της γεώτρησης ρευστού μεγαλύτερης πυκνότητας (Mud Cap fluid), η συνολική τιμή της Bottom Hole Pressure μειώνεται εξαιτίας των συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή του Mud Cap και λόγω της προσέγγισης με την οποία αναλύθηκαν τα δεδομένα μας.
- Ο συνδυασμός των δύο αυτών μεθόδων επιφέρει καλύτερη διαχείριση του προφίλ της πίεσης.

- Ο συνδυασμός αυτός των δύο τεχνικών μπορεί να αυξήσει τα επίπεδα ασφαλείας μέσω της μείωσης των πιέσεων, βοηθώντας έτσι στην ελάττωση του κόστους και του χρόνου διάτρησης.
- Ο συνδυασμός της τεχνικής Casing Drilling με αυτής του Mud Cap επιτρέπει την πλήρη εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων που εισάγει η πρώτη στην βιομηχανία γεωτρήσεων.

Συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από την μελέτη των ρευστών.

Ρευστά Carbopol 980.

Τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από την μελέτη των ρευστών Carbopol 980 είναι τα ακόλουθα :

Θετικά Συμπεράσματα.

- Το ρευστό το οποίο δημιουργείται είναι διαφανές και μπορούν να μελετηθούν οπτικά περαιτέρω συνθήκες, όπως μεταφορά θραυσμάτων (cuttings transfer).
- Το είδος της ροής που επιτυγχάνεται μέσα στα όρια λειτουργίας του συστήματος ροής ανήκει και στις τρεις περιοχές ροής (στρωτή, μεταβατική, τυρβώδης).

Αρνητικά Συμπεράσματα.

- Είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί επαναληψιμότητα στα ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων ακόμα και της ίδιας συγκέντρωσης Carbopol 980.
- Η εξουδετέρωση που απαιτεί το ρευστό με υψηλής περιεκτικότητας NaOH (18% w/v) καθιστά την διαδικασία παρασκευής του μη ασφαλή.
- Έχει υψηλό οικονομικό κόστος για την παρασκευή δειγμάτων κλίμακας των 700 λίτρων.
- Δημιουργείται πολύ παχύρευστο υλικό στις επιθυμητές συγκεντρώσεις για χρήση στο σύστημά μας για συγκεκριμένες ρεολογικές παραμέτρους.
- Είναι δύσκολο στην παρασκευή του ρευστού, γιατί απαιτεί NaOH για την εξουδετέρωση του (έλεγχος pH).

Συμπεράσματα για πολφούς CMC.

Τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από την μελέτη των ρευστών CMC είναι τα ακόλουθα :

Θετικά Συμπεράσματα.

- Το ρευστό το οποίο δημιουργείται είναι διαφανές και μπορούν να μελετηθούν οπτικά, περαιτέρω συνθήκες όπως μεταφορά θραυσμάτων (cutting transfer).
- Είναι εύκολο η παρασκευή ρευστού.
- Η μέτρηση πτώσης πίεσης για ρευστό CMC μπορεί να γίνει λίγες ώρες μετά την παρασκευή καθώς δεν απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα για να ενυδατωθεί.
- Μπορεί να δώσει σε διαφορετικές συγκεντρώσεις, διαφορετικού είδους ρευστά.

Αρνητικά Συμπεράσματα.

- Υψηλό κόστος για την παρασκευή δειγμάτων κλίμακας 600 λίτρων.
- Παρασκευή ρευστού Herschel-Bulkley, αλλά εκτός των ρεολογικών ορίων τα οποία είχαμε θέσει για κάλυψη εύρους στρωτής, μεταβατικής και τυρβώδης ροής.

Γενικά Συμπεράσματα.

- Παρόλη την μη επιθυμητή εμφάνιση των ζητούμενων ιδιοτήτων από τα ρευστά τα οποία παρασκευάσαμε, εξήχθηκαν πολλά συμπεράσματα όσο αφορά, τα ρευστά CMC. Το κυριότερο συμπέρασμα ήταν ότι η κατασκευή ρευστού με την προσθήκη CMC, έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ρευστού Power Law έως την συγκέντρωση που μελετήθηκε, αλλά και με την μετέπειτα προσθήκη μπεντονίτη.
- Ένα ακόμη πολύ σημαντικό συμπέρασμα το οποίο εξήχθη και είναι κυρίως κάτι το οποίο παρατηρήθηκε από την εμπειρία της παρασκευής και μελέτης των ρευστών διάτρησης, όλα αυτά τα χρόνια, ήταν ότι το ρευστό το οποίο παρασκευάστηκε με την προσθήκη του μπεντονίτη στο ρευστό CMC, ήταν τόσο μακροσκοπικά όσο και από άποψη υφής αλλά και κυκλοφορίας διαφορετικά από τα μέχρι τώρα ρευστά τα οποία είχαν μελετηθεί.
- Αυτή η παρατήρηση σε συνδυασμό με την παρατήρηση ότι κατά την διάρκεια της κυκλοφορίας του ρευστού μέσα στο σύστημα της οριζόντιας γεώτρησης, είχαμε

μια αύξηση της θερμοκρασίας (μικρή μεταβολή της τάξεως έως 2 °C) του ρευστού κάτι το οποίο δημιούργησε την περιέργεια να μελετήσουμε την επίδραση της θερμοκρασίας σε αυτά τα ρευστά.

Συμπεράσματα για ρευστά CMC και μπεντονίτη με την επίδραση της θερμοκρασίας.

Τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από την μελέτη των ρευστών μπεντονίτη και CMC είναι τα ακόλουθα :

- Τα ρευστά που μελετήθηκαν αλλάζουν τις ρεολογικές τους ιδιότητες σε σχέση με την θερμοκρασία (άρα σε σχέση με το βάθος) σε μεγάλο βαθμό.
- Έχουν την ιδιότητα να αυξάνουν την τιμή της τάσης διολίσθησης (τ_0) τους σε σχέση με την θερμοκρασία (άρα και με το βάθος της γεώτρησης), αποτρέποντας έτσι την γρήγορη καθίζηση των σωματιδίων μέσα στην γεώτρηση. Αυτό έχει επίσης επίπτωση στα όρια μετάβασης στρωτής – τυρβώδους ροής.
- Με την αύξηση της θερμοκρασίας η πτώση πίεσης κατά την κυκλοφορία τους μειώνεται.
- Με την αύξηση της θερμοκρασίας η συνάφεια των ρευστών (K) μειώνεται με κυριότερη συνέπεια την αύξηση του αριθμού Reynolds.
- Με την αύξηση της θερμοκρασίας ο οδηγός συμπεριφοράς της ροής (n) του ρευστού αυξάνεται (τείνει να γίνει Νευτώνειο).
- Μπορούν να συμπεριφερθούν σαν “έξυπνα ρευστά” διάτρησης αφού μεταβάλουν τις ρεολογικές τους ιδιότητες προς όφελος της διαδικασίας της διάτρησης (σε συνάρτηση με το βάθος). Το ερώτημα που γεννάται είναι εάν αυτή η ιδιότητα τους είναι επαναλήψιμη.
- Ένα τέτοιο ρευστό μπορεί να αντικαταστήσει περισσότερα του ενός ρευστά αφού από μόνο του μπορεί να φέρει τα οφέλη που προκαλούν διαφορετικά ρευστά σε κάθε τμήμα της γεώτρησης.
- Ένα τέτοιου είδους ρευστό μπορεί να “αντιληφθεί” το βάθος στο οποίο βρίσκεται (εξαιτίας της επίδρασης της θερμοκρασίας στο ρευστό) και να συμπεριφερθεί ανάλογα ως προς την αντιμετώπιση του ρυθμού καθίζησης των σωματιδίων όταν διακοπεί η κυκλοφορία του ρευστού στον δακτύλιο της γεώτρησης.

- Επιτυγχάνεται συμπεριφορά παρόμοια ή και καλύτερη απ'ότι με την χρήση πολύ ακριβότερων ρευστών διάτρησης.
- Είναι εύκολα ρευστά ως προς την παρασκευή τους.
- Είναι πολύ οικονομικά ρευστά διάτρησης αφού τα συστατικά παρασκευής του είναι οικονομικά.

Συμπεράσματα για ρευστά μπεντονίτη.

Τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από την μελέτη των ρευστών μπεντονίτη είναι τα ακόλουθα :

- Πολύ οικονομικό ρευστό ως προς την παρασκευή του (για την παρασκευή πολφού μπεντονίτη συγκέντρωσης 2% w/v σε κλίμακα 620 lt απαιτούνται 12.40 kg μπεντονίτη ο οποίος κοστίζει περίπου 10 €).
- Εύκολο ως προς την παρασκευή του ρευστό.
- Παρουσιάζει επαναληψιμότητα όσο αφορά τις ρεολογικές του ιδιότητες, για διαφορετικά ρευστά ίδιας συγκέντρωσης.
- Το ρευστό το οποίο παρασκευάστηκε ήταν σαν ύφη αλλά και μακροσκοπικά ήταν λιγότερο παχύρευστο από τα υπόλοιπα ρευστά που παρασκευάστηκαν.

Συμπεράσματα επίδρασης pH και NaCl σε ρευστά μπεντονίτη.

Τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν από την μελέτη επίδρασης pH και NaCl σε ρευστά μπεντονίτη είναι τα ακόλουθα :

Επίδραση NaCl

- Η τιμή τ_0 των δειγμάτων μπεντονίτη μειώνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης του NaCl στο διάλυμα.
- Η τιμή του συντελεστή K δειγμάτων μπεντονίτη αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης του NaCl στο διάλυμα.
- Η τιμή του συντελεστή n δειγμάτων μπεντονίτη αυξάνεται για συγκεντρώσεις NaCl στο διάλυμα έως 0.1 M, ενώ με περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης του NaCl η τιμή αρχίζει και μειώνεται.

Επίδραση pH

- Η τιμή τ_0 των δειγμάτων μπεντονίτη μειώνεται με την μεταβολή του pH πέρα από την τιμή τ_0 του “τυφλού” δείγματος μπεντονίτη και για τις δύο συγκεντρώσεις για τις οποίες μελετήθηκε η επίδραση του pH.
- Η τιμή του συντελεστή (K) δειγμάτων μπεντονίτη αυξάνεται με την αύξηση του pH.
- Η τιμή του συντελεστή (n) δειγμάτων μπεντονίτη μειώνεται με την αύξηση του pH.

Συμπεράσματα σύγκρισης υπολογιστικών μοντέλων με πειραματικές μετρήσεις πτώσης πίεσης.

Μοντέλο TUC

- Το μοντέλο TUC είναι αυτό που εμφανίζει την καλύτερη προσέγγιση πτώσης πίεσης τόσο σε ομόκεντρο όσο και σε 100% έκκεντρο δακτύλιο και για τα δύο ρευστά μπεντονίτη που μελετήθηκαν.
- Η προσέγγιση του είναι καλύτερη από τα άλλα δύο μοντέλα για όλα τα είδη ροής στα οποία έγιναν μετρήσεις πτώσης πίεσης (στρωτή, μεταβατική, τυρβώδης).
- Σε τυρβώδη ροή το μοντέλο TUC εμφανίζει την καλύτερη προσέγγιση.
- Ο συνδυασμός του μοντέλου TUC με τις εξισώσεις που αναπτύχθηκαν από τους Haciislamoglu και Cartalos (1994), αποτελούν πολύ καλό συνδυασμό για την πρόβλεψη πτώσης πίεσης σε έκκεντρο δακτύλιο.
- Το μοντέλο TUC εμφανίζει καλύτερη προσέγγιση από τα άλλα δύο μοντέλα, για ροή ρευστού στην στρωτή και μεταβατική περιοχή.
- Το σφάλμα που εμφανίζει το μοντέλο TUC παρουσιάζει μέγιστη τιμή έως 30% , με μια μέση τιμή σφάλματος 10 – 15% και ελάχιστο σφάλμα 2% .
- Το σφάλμα το οποίο παρουσιάζει το μοντέλο TUC είναι μέσα στα επιτρεπόμενα όρια για υπολογιστικό μοντέλο και μάλιστα πολύ μικρότερο από αντίστοιχα μοντέλα υπολογισμού πτώσης πίεσης (API, RGU – TUC).
- Για 100% έκκεντρο δακτύλιο το μοντέλο TUC με την προσέγγιση των Haciislamoglu και Cartalos (1994) δίνει τιμές σφάλματος 10 – 15%.

Μοντέλο API

- Το μοντέλο API εμφανίζει μέτρια προσέγγιση πτώση πίεσης τόσο σε ομόκεντρο όσο και σε 100% έκκεντρο δακτύλιο.
- Το σφάλμα το οποίο παρουσιάζει το μοντέλο φτάνει σε τιμές έως και 65% , με μέση τιμή σφάλματος 35%.
- Το σφάλμα του μοντέλου API εμφανίζεται έως και δύο με τρεις φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο σφάλμα του μοντέλου TUC.
- Η προσέγγιση η οποία έχει αναπτυχθεί από το API για τον υπολογισμό πτώση πίεσης ρευστών Herschel-Bulkley εμφανίζει αδυναμία σε σχέση με την προσέγγιση TUC.
- Για 100% έκκεντρο δακτύλιο το μοντέλο API με την προσέγγιση των Hacıislamoglu και Cartalos (1994) δίνει τιμές σφάλματος 10 – 25%.

Μοντέλο RGU - TUC

- Το μοντέλο RGU - TUC εμφανίζει μέτρια προσέγγιση πτώση πίεσης τόσο σε ομόκεντρο όσο και σε 100 % έκκεντρο δακτύλιο, η οποία ακολουθεί τις τιμές πτώσης πίεσης που υπολογίζονται από το μοντέλο API παρουσιάζοντας σφάλμα 2 -3 % μεγαλύτερο το API.
- Το σφάλμα το οποίο παρουσιάζει το μοντέλο φτάνει σε τιμές έως και 65 %, με μέση τιμή σφάλματος 40 %.
- Το σφάλμα του μοντέλου RGU - TUC εμφανίζεται έως και δύο με τρεις φορές μεγαλύτερο από το αντίστοιχο σφάλμα του μοντέλου TUC, ενώ παρόμοιο σφάλμα με το μοντέλο API.
- Η προσέγγιση η οποία ακολουθήθηκε στον σχεδιασμό του μοντέλου RGU - TUC για τον υπολογισμό πτώση πίεσης ρευστών Herschel-Bulkley εμφανίζει παρόμοια αποτελέσματα με την προσέγγιση του μοντέλου API.
- Η μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται από το μοντέλο RGU – TUC για τον υπολογισμό πτώσης πίεσης ρευστών Herschel-Bulkley, και αποτελεί μετατροπή της μεθόδου για Power Law ρευστά, εμφανίζει σχεδόν ίδια προσέγγιση με την ανεξάρτητη μέθοδο που αναπτύχθηκε από το API για ρευστά Herschel-Bulkley.
- Το μοντέλο RGU – TUC εμφανίζει μεγάλη υστέρηση στον υπολογισμό πτώσης πίεσης για περιοχές ροής στην στρωτή και μεταβατική περιοχή, εξαιτίας της

προσέγγισης την οποία χρησιμοποιεί για τον καθορισμό του είδους της ροής του ρευστού ($V_{critical}$). Αυτό έχει να κάνει με το ότι δεν υπάρχει μεταβατική περιοχή ροής και λόγο του ότι εμφανίζει νωρίτερα την τυρβώδη περιοχή σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα (API & TUC).

- Για 100% έκκεντρο δακτύλιο το μοντέλο API με την προσέγγιση των Haciislamoglu και Cartalos (1994) δίνει τιμές σφάλματος 20 – 40%.

12.3. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Μέσα από αυτή την εργασία και τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάστηκαν και μελετήθηκαν πρόέκυψαν ιδέες για περαιτέρω έρευνα σε διάφορους τομείς στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής, και θα παρουσιαστούν παρακάτω.

Προτάσεις για μελέτη ρευστών.

- Προτείνεται η περαιτέρω μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας στις ρεολογικές ιδιότητες και συμπεριφοράς ρευστών διάτρησης (μπεντονίτη, Carbopol, CMC, Pac, συνδυασμός αυτών).
- Προτείνεται η περαιτέρω μελέτη πολφών οι οποίοι θα περιέχουν περισσότερα του ενός πρόσθετα για την παρασκευή τους (πχ. μπεντονίτη με Carbopol, Carbopol με CMC, κτλ.).
- Προτείνεται η παρασκευή πολφών που θα έχουν ως βάση το λάδι, φυτικό ή ορυκτό (Oil Based Muds), για μελέτη των ρεολογικών τους ιδιοτήτων και συμπεριφοράς.

Προτάσεις για μελέτες στο σύστημα ροής του εργαστηρίου.

- Προτείνεται η μελέτη πτώσης πίεσης πολφών που θα έχουν ως βάση το λάδι, φυτικό ή ορυκτό (Oil Based Muds) στο σύστημα ροής και σύγκριση των μετρήσεων με τα τρία υπολογιστικά μοντέλα.
- Μελέτη της επίδρασης της θερμοκρασίας στην πειραματική πτώσης πίεσης ρευστών Herschel-Bulkley στο σύστημα ροής, με την προσθήκη συστήματος θέρμανσης του ρευστού προς μελέτη στην δεξαμενή του συστήματος.

- Τοποθέτηση συστημάτων παροχής αέρα στο σύστημα ροής ώστε να μελετηθεί πτώση πίεσης σε συνθήκες που θα προσομοιώνουν διάτρηση με υποπίεση (Under Balanced Drilling).
- Μελέτη πτώσης πίεσης για διαφορετικές εκκεντρότητες του δακτυλίου ροής.
- Επέκταση του συστήματος ροής ώστε να συμπεριλαμβάνει και κάθετο τμήμα ροής στο οποίο θα μελετηθούν πτώση πίεσης και μεταφορά θραυσμάτων (cuttings transfer port).
- Τροποποίηση του συστήματος ώστε να μπορέσει να εγκατασταθεί σύστημα περιστροφής του εσωτερικού σωλήνα του δακτυλίου για την μελέτη της επίδρασης της περιστροφής των διατρητικών στελεχών στην πτώση πίεσης παράλληλα με την επίδραση της εκκεντρότητας.
- Τροποποίηση του συστήματος για την διοχέτευση στον δακτύλιο, ρευστών διαφορετικής πυκνότητας ταυτόχρονα με σκοπό να μελετηθούν συνθήκες διάτρησης διπλής βαθμίδος ρευστού (Dual Gradient) και Mud Cap.

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στον σχεδιασμό υπολογιστικών μοντέλων.

- Επέκταση του μοντέλου RGU – TUC με την προσθήκη επιπλέον τεχνικών διάτρησης (πχ. Under Balanced Drilling, MPD) και υπολογισμό πτώσης πίεσης, με παράλληλη μελέτη στο σύστημα ροής και σύγκριση αποτελεσμάτων.
- Προσθήκη στο μοντέλο TUC επίδρασης εκκεντρότητας (πχ. Haciislamoglu et Cartalos,1994) και περιστροφής των διατρητικών στελεχών, μέσω ήδη υπαρχόντων εξισώσεων.
- Προσπάθεια ανάπτυξης εξισώσεων για την επίδραση της εκκεντρότητας μέσω πειραμάτων σε ρευστά γεωτρήσεων στο σύστημα ροής.
- Σχεδιασμός προγραμμάτων (Casing design, Pipe design, Horizontal drilling support) τα οποία θα πλαισιώνουν τα ήδη υπάρχοντα μοντέλα υπολογισμού πτώσης πίεσης (TUC, RGU – TUC), με σκοπό την δημιουργία ενός πλήρους πακέτου σχεδιασμού γεωτρήσεων (Well Design) για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική Βιβλιογραφία

Ασπριτάκης Ι.

ΥΠΟ-ΣΤΑΘΜΙΣΜΕΝΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ (UNDERBALANCED DRILLING), Χανιά, Φεβρουάριος 2005.

Κελεσίδης Β.

Μέτρηση ιξώδους Νευτώνειου ρευστού – Επίδραση αύξησης της θερμοκρασίας στο ιξώδες Νευτώνειου ρευστού. Εφαρμοσμένη ρευστομηχανική, Σημειώσεις εργαστηρίου, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2007.

Κελεσίδης Β.

Τεχνική Γεωτρήσεων, Χανιά, Φθινόπωρο 2006.

Α. Γ. Κουτρούλης, Α. Σ. Μιχαλάκης

“ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ, ΜΕΛΕΤΗ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΡΑΥΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΡΕΥΣΤΑ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΚΑΙ ΚΕΚΛΙΜΕΝΟ ΔΑΚΤΥΛΙΟ. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΤΗΝ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΠΡΩΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ”, Χανιά, 2002.

Λιόλιος Π.

ΟΔΗΓΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ “FITTING MODEL” ΚΑΙ “RHEOLOGY”, Χανιά, Φεβρουάριος 2007.

Διεθνής Βιβλιογραφία

Aldred W., Plumb D., Bradford I., Cook J., Gholkar V., Cousins L., Minton R., Fuller J., Goraya S., Tucker D.

Managing Drilling Risk, Oilfield Review, Summer 1999.

American Petroleum Institute (API)

Specification for drilling fluid materials. Specifications 13, 1993.

American Petroleum Institute (API)

Recommended practice standard procedure for laboratory testing drilling fluids, Specifications 13I, 2000.

American Petroleum Institute (API)

Recommended practice for field testing water based drilling fluids, Spec 134-1, 2003.

American Petroleum Institute (API)

Rheology and Hydraulics of Oil – Well Drilling Fluids, API RECOMMENDED PRACTICE 13D FIFTH EDITION, JUNE 2006.

Benna, M., Kbir-Ariguib, N., Magnin, A., Bergaya, F.

Effect of pH on rheological properties of purified sodium bentonite suspensions. J. Colloid Interface Sci. 218, 442–455, 1999.

Bland R.G., Baker Hughes INTEQ Drilling Fluids; Waughman R.R., Woodside Energy Ltd.; Tomkins P.G., Halliday W.S., Baker Hughes INTEQ Drilling Fluids; Pessier R.C., Isbell M.R., Hughes Christensen Company

Water-Based Alternatives to Oil-Based Muds: Do They Actually Exist? IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Texas, 26-28 February 2002.

Dalamarinis P.

HYDRAULICS OPTIMIZATION FOR EFFECTIVE MANAGE PRESSURE DRILLING, Aberdeen, UK, 2007.

Dalamarinis P.

Mud Cap with Casing Drilling, selected from the Society of Petroleum Engineering as one out of best undergraduate student paper across Europe to present it on the Europe Offshore Conference, September 4, 2007, Aberdeen, UK.

Dharma Nyoman, ConocoPhillips, and Toralde J.S.S., Weatherford Managed-Pressure Drilling and Downhole Isolation Technologies Deliver High Rate Gas Wells, SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, 28-29 January 2008.

- Fordham, E.J., Bittleston, S.H., Tehrani, M.A.
Viscoplastic flow in centered annuli, pipes and slots. *Ind. Eng. Chem. Res.* 29, 517–524, 1991.
- Fossli B., SPE, Ocean Riser Systems AS, and Sangesland S., SPE, Norwegian U. of Science and Technology
- Controlled Mud-Cap Drilling for Subsea Applications: Well-Control Challenges in Deep Waters, *SPE Drilling & Completion*, 21, 133-140, June 2006
- Founargiotakis K., Kelesidis V. C., Maglione R.
Laminar, transitional and turbulent flow of Herschel-Bulkley fluids in concentric annulus, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 86, 676-683, 2008.
- Gray, H.C.H., Darley, G.R.
Composition and Properties of Oilwell Drilling Fluids, Gulf Pub Co., 1980.
- Haciislamoglu M. and Cartalos U.
“Practical Pressure Loss Predictions I Realistic Annular”, paper SPE 28304 presented at the SPE 69th Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA, U.S.A., 25-28 September 1994.
- Hannegan D. M.
Managed Pressure Drilling, A “new” way of looking at drilling hydraulics, *SPE 2006 -2007 Distinguished Lecturer Series*, 2007.
- Hannegan D. M., Weatherford Intl. Inc.
“Case Studies-Offshore Managed Pressure Drilling”, paper SPE 101855 presented at the 2006 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, U.S.A., 24-27 September 2006.
- Hannegan D. M., P.E., Weatherford International
“Managed Pressure Drilling in Marine Environments-Case Studies”, paper SPE/IADC 92600 presented at the SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, The Netherlands, 23-25 February 2005.
- Heller, H., Keren, R., 2001. Rheology of Na-rich montmorillonite suspension as affected by electrolyte concentration and shear rate. *Clays Clay Miner.* 49, 286–291.
- Hemphill, T., Campos, W., Tehrani, M.A., 1993. Yield power law model accurately predicts mud rheology. *Oil Gas J.* 91, 45–50.
- Herzhaft B., Peysson Y., Institut Français du Pétrole; Isambourg P., Delepoulle A., TotalFina Elf; Toure A., Cenergis

Rheological Properties of Drilling Muds in Deep Offshore Conditions SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, Netherlands, 27 February-1 March 2001.

Jonsson V. K., Sparrow E. M.

Experiments on turbulent flow phenomena in eccentric annulus ducts, J. Fluids Mech., Vol. 25, part 1, pp 65- 86, 1966.

Kelessidis V.C., Maglione R., Tsamantaki C., Aspirtakis Y.

Optimal determination of rheological parameters for Herschel–Bulkley drilling fluids and impact on pressure drop, velocity profiles and penetration rates during drilling Journal of Petroleum Science and Engineering, 53, 203–224, 2006.

Kelessidis V. C., Tsamantaki C., Dalamarinis P.

Influence of pH and electrolyte concentration on Herschel-Bulkley rheological parameters for Wyoming bentonite-water suspensions. Paper presented to the 3rd Annual European Rheology Conference, Hersonisos, Crete, April 27-29, 2006.

Kelessidis V. C., Tsamantaki C., Dalamarinis P. and Mpandelis G.E.

Static and Dynamic Yield Stress of Water-Bentonite Suspensions, Paper presented at the 2nd International Conference AMIREG, Chania, Greece, September 25-27 2006.

Kelessidis V. C., Tsamantaki Christina, Dalamarinis P., Repouskou E. and Tombacz E.

Influence of electrolyte concentration on rheological properties of Zenith and Wyoming bentonite - water suspensions, Mineral Wealth, 144, 31-45, 2007a.

Kelessidis V. C., Tsamantaki Christina, Dalamarinis P.

Effect of pH and electrolyte on the rheology of aqueous Wyoming bentonite dispersions, Applied Clay Science, 23 January 2007b.

Kelessidis V. C.

Sustainable drilling for oil and gas: challenging drilling environments demand new formulations of bentonite based drilling fluids, 3rd International Conference on Sustainable Development Indicators 1 in the Minerals Industry, Milos island, Greece, June 2007.

Lonwell H. L.

The future of oil and gas industry: Past approaches and new challenges, WorlOil, 5, 100-114, 2002.

Luckham, P.F., Rossi, S.

The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. Adv. Colloid Interface Sci., 82, 43–92, 1999.

Oyeneyin M. B., Burge P., Lisa H., Chris A.
The Virtual Well Engineering – A Real – Time Surveillance Tool for Managed Pressure Drilling Operations, Advanced Materials Research Vol. 18 – 19, p. 277- 285, June 2007.

Oyeneyin M. B., Kelessidis V.C., Bandelis G. and Dalamarinis P.
Developing a managed pressure drilling strategy for casing drilling operations, Advanced Materials Research 62-64, 456-465, 2009.

Perez-Tellez C., Louisiana State University-PEMEX; Smith J.R., J.K. Edwards, Louisiana State University

A New Comprehensive, Mechanistic Model for Underbalanced Drilling Improves Wellbore Pressure Predictions SPE International Petroleum Conference and Exhibition in Mexico, Villahermosa, Mexico, 10-12 February 2002.

Petersen J., SINTEF Petroleum Research; Bjorkevoll K. S., SPE, SINTEF Petroleum Research; Rommetveit R., SPE, SINTEF Petroleum Research

Dynamic Pre-Modeling of MPD Operations Enabled Optimal Procedures and Operations, IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia, 25-27 August 2008

Roberts G. P., Barnes H. A.
New measurements of the flow-curves for Carbopol dispersions without slip artefacts, Rheol Acta 40, 499-503, 2001

Rommetveit R.
Managed Pressure Drilling; from UBD to managing pressures using new techniques, presented at SPE Membership Meeting, Bergen, Norway 16 November 2005.

Schlumberger
Data Consulting Services, Bench-marking deep drilling final report 2005.

Spriggs Paul and Frink Philip J., Blade Energy Partners
MPD Planning: How Much Is Enough? SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, 28-29 January 2008.

Stone Charles R. “Rick”, SPE, and Tian Shifeng, SPE, Signa Engineering Corporation
Sometimes Neglected Hydraulic Parameters of Underbalanced and Managed Pressure Drilling SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, 28-29 January 2008.

Sunthankar A.A., Kuru E., Miska S., University of Tulsa; Kamp A., INTEVEP
New Developments in Aerated Mud Hydraulics for Drilling in Inclined Wells, SPE
Production and Operations Symposium, Oklahoma City, Oklahoma, 24-27 March
2001.

Sweep M.N., ChevronTexaco Exploration & Production Technology Company;
Bailey J.M., ChevronTexaco Overseas Petroleum Inc.; Tengizchevroil, LLC; Stone
C.R., Signa Engineering Corp.

Closed Hole Circulation Drilling: Case Study of Drilling a High-Pressure Fractured
Reservoir - Tengiz Field, Tengiz, Republic of Kazakhstan SPE/IADC Drilling
Conference, Amsterdam, Netherlands, 19-21 February 2003.

Terwogt J.H., SPE, Makiaho L.B., and van Beelen N., SPE, Shell Malaysia
Exploration and Production; B.J.G edge, SPE, and J. Jenkins, Weatherford Drilling
and Well Services

“Pressured Mud Cap Drilling from A Semi-Submersible Drilling Rig”, paper
SPE/IADC 92294 presented at the SPE/IADC Drilling Conference, Amsterdam, The
Netherlands, 23-25 February 2005.

Van Olphen, H.

Introduction to Clay Colloidal Chemistry, 2nd ed., Wiley, New York, 1977.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

This years' European Student Paper Contest will take place Tuesday 4 September from 08.30 in room 15/16 of the Aberdeen Exhibition & Conference Centre

STUDENT PAPER CONTEST

Don't miss your chance to see 11 students competing in three separate divisions: Undergraduate, Masters and PHD. These students have been selected from a large number of entries and will be competing to present a full technical paper in the SPE Annual Technical Conference in California later this year.

The contest will take place for a full day comprising of 20 minutes presentations, followed by 10 minutes for judge's questions. Please refer to the timetable. Please come along and support the students in this contest.

For more information please contact Theresa Callanan at tcallanan@spe.org

SPE EUROPEAN STUDENT PAPER CONTEST - TUESDAY 4 SEPTEMBER 2007

08.30	Dalamarinis Panagiotis Mud Cap with Casing Drilling Robert Gordon University & Technical University of Crete Undergraduate	11.00	Hendry Shen Polynomial Solutions for Well Frictions in 3 Dimensions University of Stavanger Masters	14.00	Paul Emeka Eke Constructed Treatment Wetlands: Innovative Technology for Petroleum Industry University of Edinburgh PHD
09.00	Ismet Yucetas Optimisation of Drag Torque and Inclination Angle for Multilateral Horizontal Well Junctions Middle East Technical University, Turkey Undergraduate	11.30	Tim Christian Hooijkaas FEM Modeling of Steam Injection into Heavy Oil Reservoirs Delft University of Technology Masters	14.30	Ghailan Al. Muntasher A Study of Polyacrylamide-Based Gels Crosslinked with Polythyleneimine Delft University of Technology PHD
09.30	Denis Akhlyarov Gel Preparation and Properties Control for Operations in Pipeline Transport UFA State University Undergraduate	12.00	Albert Kweku Longdon-Nyewan Possibilities of Microbial Enhanced Oil Recovery (MEOR) in Danish Chalk Rock Aalborg University Esbjerg, Denmark Masters	15.00	Ran Qi Design of Carbon Dioxide Storage and Enhanced Oil Recovery in the North Sea Using Streamline-Based Simulation Imperial College London PHD
10.00	Coffee Break	12.30 - 13.30	Working Lunch	15.30	Coffee Break and Judges Decision
10.30	Francesco Verre Applicability of Water Shut-off Treatments for Horizontal Wells in Heavy Oil Reservoirs Imperial College London Masters	13.30	Joel Akononou How Does the String Rotation Affect the Critical Buckling Load Ecole des Mines de Paris PHD	16.30	Prize Giving Ceremony

SPE EUROPE OFFSHORE STUDENT CONTEST (UNDERGRADUATE LEVEL)

MUD CAP WITH CASING DRILLING

DALAMARINIS PANAGIOTIS

Supervisor Professor : Babs Oyeneyin

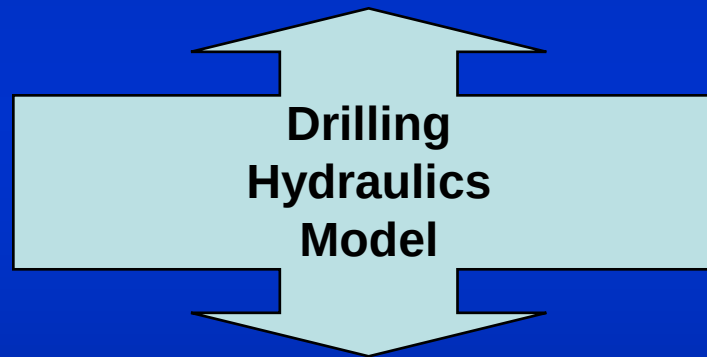
Outline

- Introduction
- Scope of Work
- What is Mud Cap ?
- Challenges of Mud Cap
- What is Casing drilling ?
- Drilling hydraulics Package
- Analysis Casing Drilling with Mud Cap
- Conclusions
- Future Work

Scope of Work

- Casing drilling
- Mud Cap technique(MPD method)

Combine into one
technique



Consider :

Effect of Mud Cap Height on BHP,
Pressure Profile & ECD

Drilling Optimization

Main Aim : •Reduce time and Well cost

•Do that safely

That can be achieved by avoid drill problems (Mud losses, kicks, formation damage)

Means : • Casing drilling

• Manage pressure drilling techniques

- Mud cap
- Dual gradient
- CBHP (Constant Bold Hold Pressure)
- Under Balanced Drilling
- Etc

What is Mud Cap ?

Mud Cap

Deals with three different drilling liquids

- Drilling fluid
- Injection fluid
- Mixture fluid (Mud Cap Area fluid)

Apply at different depths into the well

Benefits :

- Efficiency manage on pressure profile
- Efficiency on very depth wells & problem well environments
- Help us to avoid & manage Mud looses, kicks & formation damage

Challenges of Mud Cap

- The fluid properties of the Mud Cap Area fluid depend from the 2 (two) drilling fluids
- The circulation into Mud Cap Area defers from circulation at conventional drilling
- It should be design a special part at the Drilling Hydraulics Model so we can calculate the pressure profile with Mud Cap technique

What is Casing drilling ?

Benefits :

- Avoid formation damage
- Avoid Mud losses
- Higher HSE criteria

Reduce time & cost

Challenges

We have small well annulus



High pressure profile & losses

We have to keep minimum fluid velocity



Efficiency cuttings transfer which sets the limits for the smallest pump rates for our drilling fluids

V-slip depends from fluid properties and formation properties

Scope of this work

Combination of Casing drilling with Mud Cap technique

Challenges :

- Dealing with drilling fluids for each area so it provide us with minimum ΔP_f & effective cuttings transfer

- To see how the merge of these two methods affects the wellbore pressure profile

- The effect of:
 - Mud Cap height
 - RPM
 - Eccentricity
 - Fluids density

on total bottom hole pressure and pressure profile and how from these properties we can manage effectively the pressure profile and bring it to desired limits

How the model works

Fluid Rheology and Density

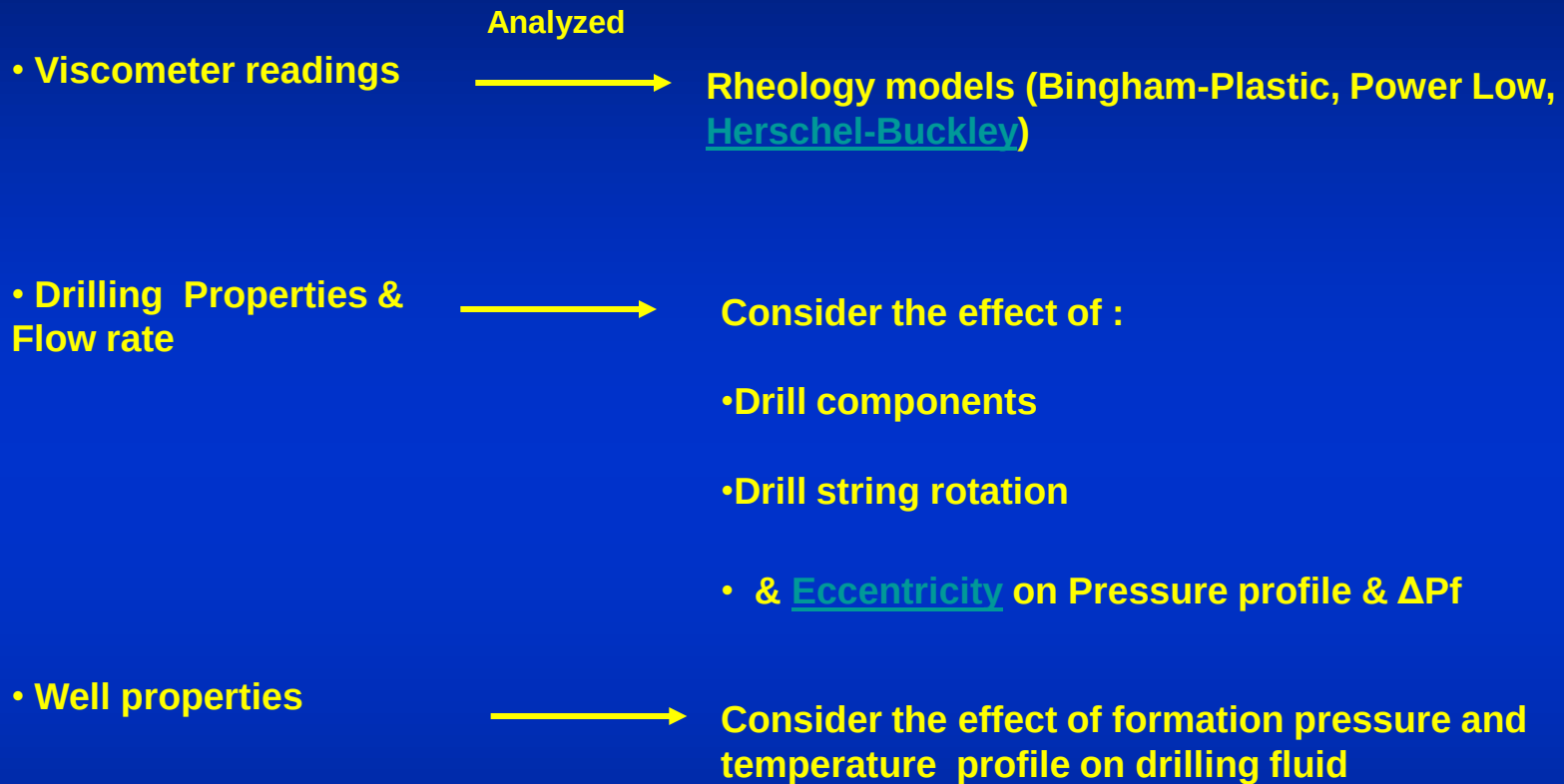
Well properties (depth, well diameter, formation pressure & temperature profile)

Drilling Properties (Drill string components, RPM, Eccentricity, Pump rate)



- Pressure Profile
- ECD

Input Parameters



Well bore Pressure Profile

Analysis Casing Drilling with Mud Cap

20-in casing in 26in hole

10.75-in & 11.75-in casing in 12.25-in hole

7-in and 7.625-in casing in 8.5-in hole

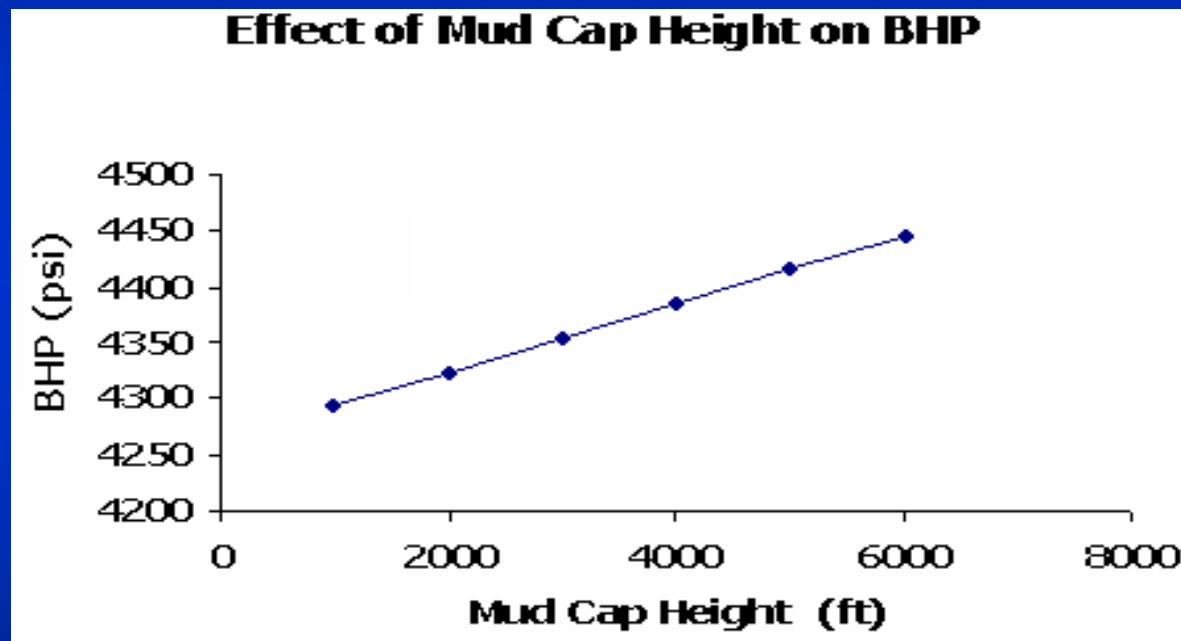
20-in Casing in 26-in hole

TVD = 8712

$\rho_1 = 9$ (lbm /gal)

$\rho_2 = 12$ (lbm /gal)

Gap = 3-in



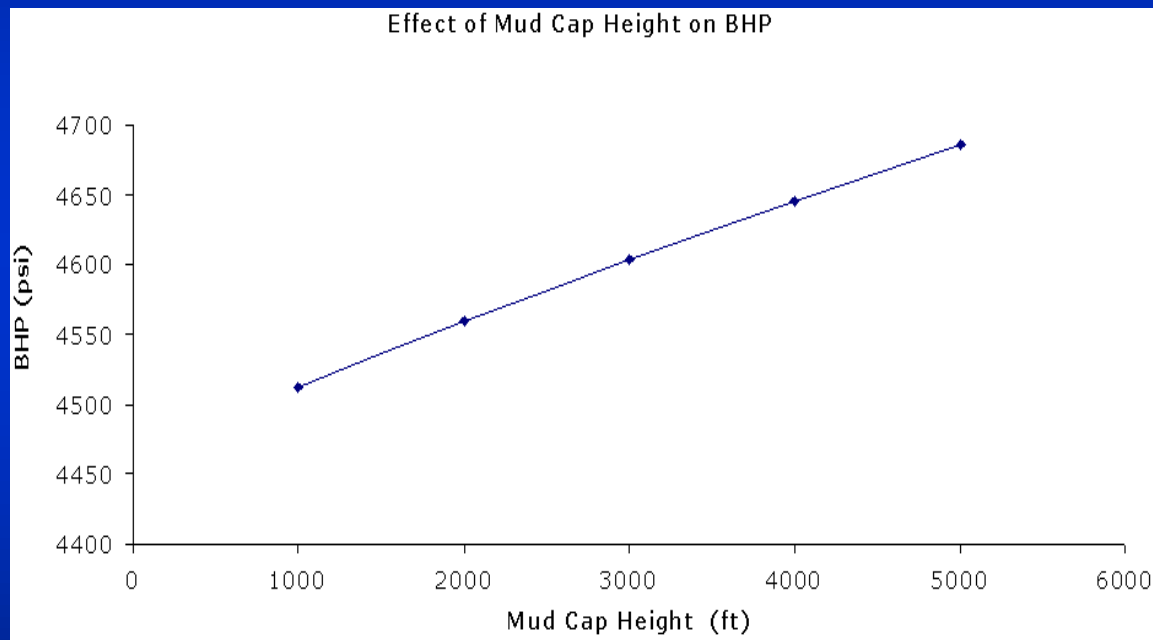
7-in Casing in 8.5-in hole

TVD = 8712

$\rho_1 = 9$ (lbm /gal)

$\rho_2 = 12$ (lbm /gal)

Gap = 0.75-in



10.75-in Casing in 12.25-in hole

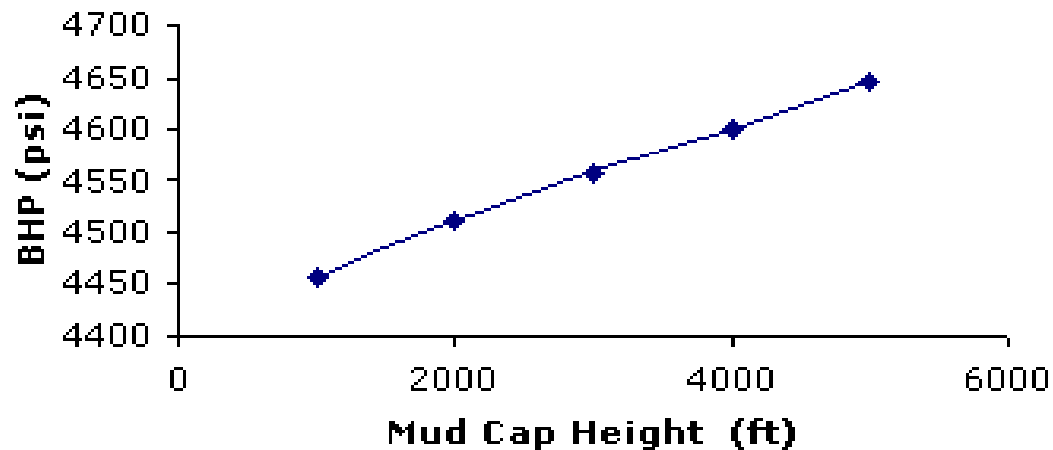
TVD = 8712

$\rho_1 = 9$ (lbm /gal)

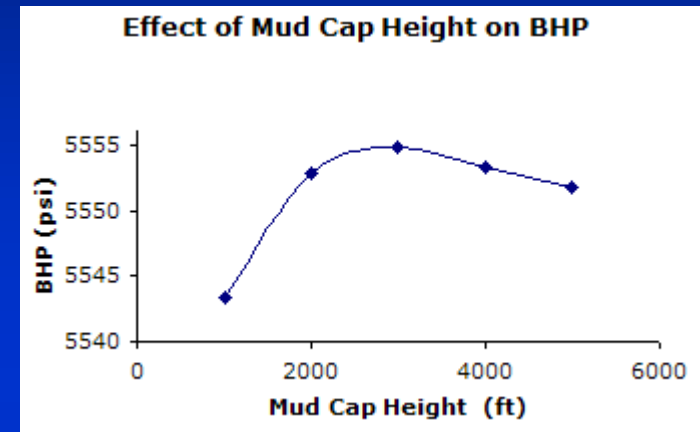
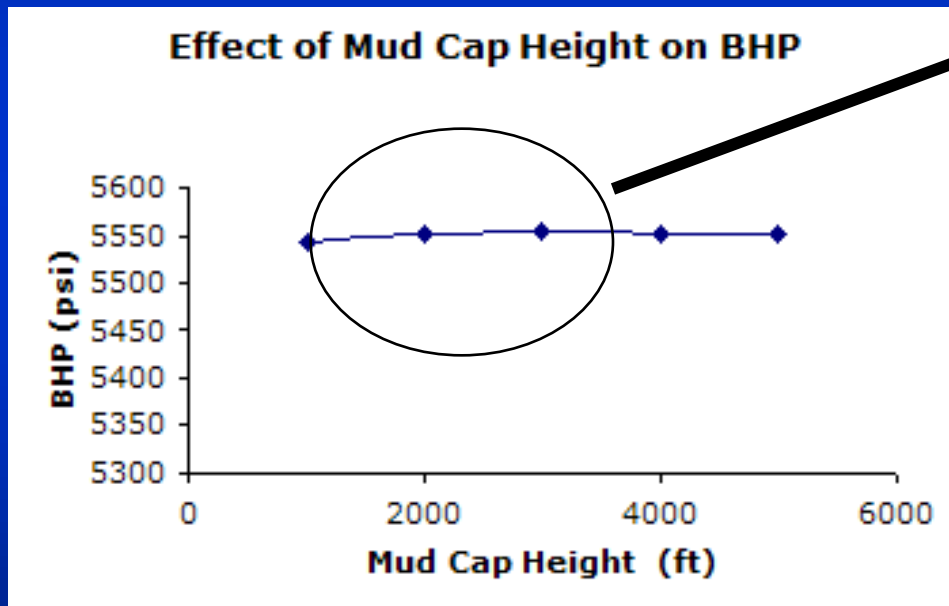
$\rho_2 = 12$ (lbm /gal)

Gap = 0.75-in

Effect of Mud Cap Height on BHP



7.625-in Casing in 8.5-in hole



TVD = 8712

$\rho_1 = 9$ (lbm /gal)

$\rho_2 = 12$ (lbm /gal)

Gap = 0.4375-in

11.75-in Casing in 12.25-in hole

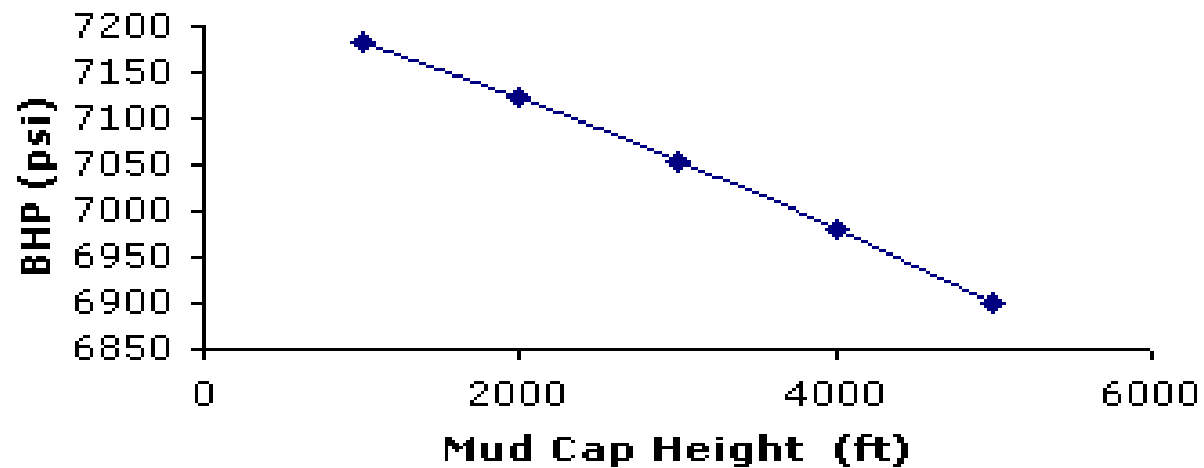
TVD = 8712

$\rho_1 = 9$ (lbm /gal)

$\rho_2 = 12$ (lbm /gal)

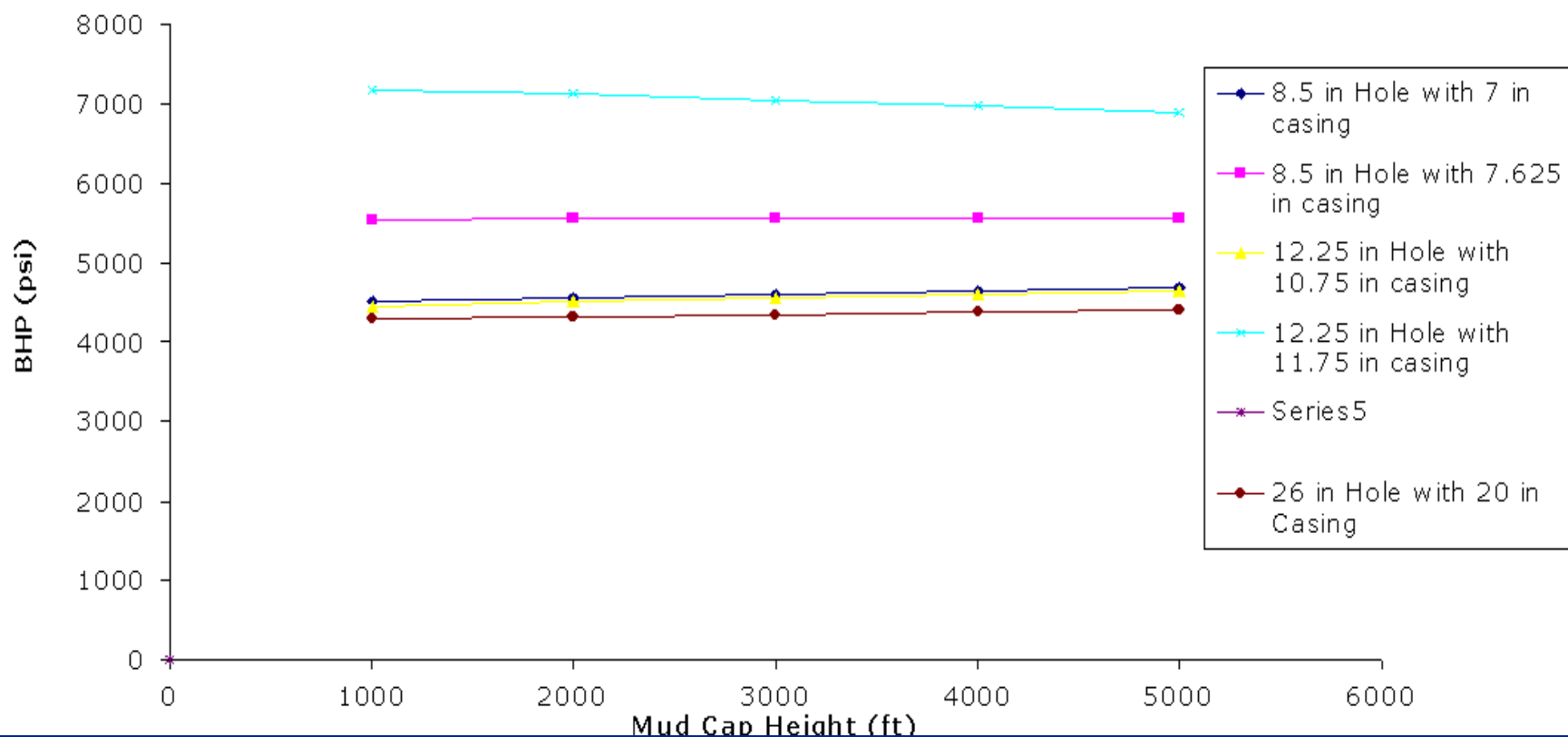
Gap = 0.25-in

Effect of Mud Cap Height on BHP



Comparison between the different casing

Effect of Mud Cap Height on BHP for stable flow rate



Conclusions

Pressure losses can be reduced if Mud Cap combined with Casing drilling (if we deal with specific gap sizes & Mud Cap Height)

We can have less pressure losses if we work the small hydraulic annulus, of Casing drilling, over a limit and if we study the changes which caused by Mud Cup Height

The small annulus of Casing Drilling produce higher Pressure losses which can be reduced by exploiting Mud Cap

Despite we add higher mud density ρ_2 , overall BHP and pressure profile can be reduced

Using both methods we offer optimal pressure profile management

This combination can help us to work more higher HSE criteria by minimize total pressures, and reduce the cost and the time of drilling operation (by help us to avoid drill problems)

Full exploitation of Casing drilling by adding Mud Cap

Future Work

Further development of the Drilling Hydraulic model so we can analyze laboratory data from laboratory vertical and horizontal well models and compare them with the data from field operations

The study of Casing drilling and with other MPD techniques

Feedback / Optimisation of pressure profile

Deal with Herschel-Buckley fluids

Thanks for your attention

$$\tau - \tau_o = K \cdot \gamma^n$$

$$\tau_o = 2\theta_3 - \theta_6$$

$$\Delta p_{f_{ec \text{ annulus}}} = R \cdot \Delta p_{f_{conc \text{ annulus}}}$$

Effect of Mud Cap Height on BHP for stable flow rate

Height of Mud Cap (ft)	Mud Density ρ_1 (lbm/gal)	Mud Density ρ_2 (lbm/gal)	Mud Density ρ_3 (lbm/gal)	q_1 (gal/min)	q_2 (gal/min)	q_3 (gal/min)	BHP (psi)
1000	9	12	9.55	440	100	340	4294
2000	9	12	9.55	440	100	340	4324
3000	9	12	9.55	440	100	340	4354
4000	9	12	9.55	440	100	340	4384
5000	9	12	9.55	440	100	340	4415

Effect of Mud Cap Height on BHP for stable flow rate

Height of Mud Cap (ft)	Mud Density ρ_1 (lbm/gal)	Mud Density ρ_2 (lbm/gal)	Mud Density ρ_3 (lbm/gal)	q_1 (gal/min)	q_2 (gal/min)	q_3 (gal/min)	BHP (psi)
1000	9	12	10	100	50	50	4512,23
2000	9	12	10	100	50	50	4560,6
3000	9	12	10	100	50	50	4603,84
4000	9	12	10	100	50	50	4644,8
5000	9	12	10	100	50	50	4685,7

Effect of Mud Cap Height on BHP for stable flow rate

Height of Mud Cap (ft)	Mud Density ρ_1 (lbm/gal)	Mud Density ρ_2 (lbm/gal)	Mud Density ρ_3 (lbm/gal)	q_1 (gal/min)	q_2 (gal/min)	q_3 (gal/min)	BHP (psi)
1000	9	12	10	100	50	50	4458
2000	9	12	10	100	50	50	4510,2
3000	9	12	10	100	50	50	4557,1
4000	9	12	10	100	50	50	4601,66
5000	9	12	10	100	50	50	4646,2

Effect of Mud Cap Height on BHP for stable flow rate

Height of Mud Cap (ft)	Mud Density ρ_1 (lbm/gal)	Mud Density ρ_2 (lbm/gal)	Mud Density ρ_3 (lbm/gal)	q_1 (gal/min)	q_2 (gal/min)	q_3 (gal/min)	BHP (psi)
1000	9	12	10	100	50	50	5543,3
2000	9	12	10	100	50	50	5552,9
3000	9	12	10	100	50	50	5554,83
4000	9	12	10	100	50	50	5553,3
5000	9	12	10	100	50	50	5551,8

Effect of Mud Cap Height on BHP for stable flow rate

Height of Mud Cap (ft)	Mud Density ρ_1 (lbm/gal)	Mud Density ρ_2 (lbm/gal)	Mud Density ρ_3 (lbm/gal)	q_1 (gal/min)	q_2 (gal/min)	q_3 (gal/min)	BHP (psi)
1000	9	12	10.1	60	35	25	7182,35
2000	9	12	10.1	60	35	25	7125,58
3000	9	12	10.1	60	35	25	7054,8
4000	9	12	10.1	60	35	25	6977,7
5000	9	12	10.1	60	35	25	6900,6



Casing Used for Drill string Operation:

- Casing rotated**
- Casing on bottom at all times**

Developing a Managed Pressure Drilling Strategy for Casing Drilling Operations

M. B.Oyeneyin^{1,a}, V.C. Kelessidis^{2,b}, G. Bandelis^{2,c} and P. Dalamaritis^{2,d}

¹The Robert Gordon University, Aberdeen, UK

²University of Crete, Greece

^ab.oyeneyin@rgu.ac.uk, ^bkelesidi@mred.tuc.gr, ^cgbandelis@yahoo.gr, ^dpdalamarinis@isc.tuc.gr

Keywords: Casing Drilling; Managed Pressure Drilling; Drilling Hydraulics; Real-Time Visualisation; Desktop Simulator

Abstract. Casing drilling can be an effective method of reducing drilling costs and minimising drilling problems but its uptake around the world has been slow with only a few wells drilled so far with casing. Complex geological features like the high overburden on top of shallow unconsolidated reservoirs characteristic of offshore West Africa can benefit from casing drilling when effectively combined with Managed Pressure Drilling technique. For the industry to develop a managed pressure drilling capability that will allow today's generation of complex wells to be drilled safely with casing, it is necessary to develop models that include the effect of eccentricity, rotation and fluid rheology at bottom hole conditions on flow and pressure regimes, and to embed these models within an easy to use, intuitive well design package for pre planning and as a real time tool to monitor and provide forward simulations based on real time rig and downhole data. The paper presents new results of the theoretical predictions of the wellbore pressure regimes incurred when different types of drilling fluid flows in concentric and eccentric horizontal annuli. The concentric and eccentric casing drilling results are compared with parallel predictions from conventional drilling results from developed analytical solutions integrated into the VisWELL(Desktop Simulator), which is used in simulating well operations.

Introduction

Well engineers face ever increasing technical challenge of drilling in complex environments and complex geological features such as

- Drilling of high pressure/high temperature wells with very narrow pore pressure-frac pressure window
- The rejuvenation of mature, depleted fields
- The use of extended reach drilling techniques to develop marginal and satellite fields from existing platforms
- Drilling through massive naturally fractured stratigraphic columns like the Sirte Basin in Libya
- Drilling through a combination of complex geological features such as Platen overlaid by Zechstein with potential for alternate losses and well flows as observed in certain parts of Southern North Sea
- Drilling through shallow unconsolidated reservoirs with very high overburden such as in Gulf of Guinea

In many of these challenging environments the use of overbalanced drilling techniques becomes difficult as the tolerance between formation pressure, pressure exerted by the drilling fluid and the pressure at which the formation will fracture becomes very tight. This leads, at best to an increase in drilling costs to loss of the well itself or in extreme cases a loss of control of the well. There is an emerging drilling method known as "managed pressure drilling" designed to overcome the difficulties described above and make the drilling of these complex wells both feasible and safe. Managed Pressure Drilling simply involves carry out well construction operations within a strict operating pressure window. Otherwise known as "walking the line" or "at balance drilling" [1],

MPD involves a rigorous definition of the entire wellbore pressure profile rather than mere bottom hole pressure analysis.

The key to effective MPD is an appreciation of the complexities of the hydraulics (pressure and flow regime) in the wellbore and the relationship with formation pressure and formation fracture pressure.

Example of MPD techniques include

- Underbalanced Drilling .
- Mud Cap Drilling
- Dual Gradient [Variable Density] drilling
- Back Pressure regulation
- Annular pump evacuation
- Circulating Friction

Issues on underbalanced drilling were covered in detail at previous MPC presentation [2].

In this paper the focus is on casing drilling with circulating friction MPD technique.

Management of pressure hot spots in complex geological features such as massive naturally fractured stratigraphic features as in Sirte Basin in Libya, High overburden pressure conditions coupled with shallow unconsolidated reservoirs in deep water environments offshore West Africa or HP-HT wells with narrow pore pressure-frac pressure operating windows pose further problems of losses, differential sticking leading to non-productive time, poor hole quality, sloughing shales/wellbore instability, difficulty in running casing and increased drilling costs. These problems can be minimised with coupled managed pressure drilling with casing. Well construction time is reduced and tripping time is also massively reduced if not eliminated.

The development of appropriate strategy for the management of MPD operations including engineered choice of which technique to use for well specific conditions required to “realising the limit” is rather complex and requires an integrated approach to finding the optimum solution to solving the problem. This requires integration of key aspects of wellbore hydraulics, casing string or drillstring dynamics and impact on string eccentricity, string rotary speed, effect of bottom hole conditions on rheology and pressure regimes. The integration of all these factors that allows for effective planning, well specific MPD process and optimisation plus real-time monitoring and diagnosis is the specific objective of the VisWELL .

For the industry to develop a managed pressure drilling capability that will allow today’s generation of complex wells to be drilled safely, efficiently and reduce cost and problems , it is necessary to develop models that can be used to carry out effective planning, assess the operating window and application of each MPD techniques as well as process optimisation and to embed these models within an easy to use, intuitive well engineering tool that can be used for pre planning and as a real time tool to monitor and provide “ looking ahead” forward simulations based on real time rig and downhole data. This is what has been achieved with the VisWELL.

Some of the key issues affecting successful MPD operations are:

- The appropriate fit-for-purpose MPD technique to use
- How can these techniques be optimised on a well-by- well basis?
- What are the operating windows for casing drilling in complex geologies?
- The effect of drillpipe eccentricity on flow regime, pressure regime and hole cleaning
- What is the prevailing string eccentricity?

- The ability to analyse the causes of drillpipe eccentricity and relationship with drillstring torque/drag conditions
- Ability to analyse the effects of transients
- The ability to define the rheological properties of multi phase drilling fluids at bottom hole conditions

Eccentricity, coupled with drillstring rotation affect the annular velocities in the well and the prevailing multiphase flow patterns as well as pattern profile which then has an effect on hole cleaning and pressure regimes in the wellbore. .

The integration of all these factors that allows for effective planning, well specific MPD process and optimisation plus real-time monitoring and diagnosis is the specific objective of the VisWELL.

The VisWELL is the product name for MPD applications that allows the well engineering team to interact with virtual representation of the well and near wellbore environment. The VWE is unique in that for the first time:

- The well engineer or team can visualise the complete wellbore and near well bore drilling process in real-time
- Manipulate these conditions in virtual reality environment
- Perform sensitivity and parametric studies in real time.

With the VisWELL, the individual well engineer or a team working in collaboration can, while planning a well, perform iterative parametric studies to identify the operating boundary conditions through simulations.

Also by linking the VisWELL with appropriate downhole sensors, realtime display of actual drilling process/operations can be displayed onsite and linked to company office for system problem diagnosis and optimisation.

In preceding papers the results of various parameters on conventional drilling process and its optimisation have been presented [3, 4]. In the follow-up research work specific models have been developed to predict prevailing level of eccentricity in extended reach wells. These models have been coupled with hydraulics and hole cleaning analysis models for conventional drilling operations analysis with or without RPM. The effects of eccentricity and RPM were developed from first principles based on approximate solutions some highlights of which are presented below.

Why Casing Drilling?

Drilling with casing has proven to be an effective method of reducing drilling costs and solving drilling problems.

Growing commercial activity shows that drilling with casing is gaining increasing acceptance as a practical method of reducing drilling costs and solving drilling problems especially in challenging environments. This activity includes both onshore applications where the entire well is drilled with casing and offshore applications especially in the Gulf of Mexico [3].

Most Casing Drilling activity has been focused on drilling vertical intervals, but interest in drilling with casing in directional wells is increasing as the processes for drilling straight holes become proven, the benefits of Casing Drilling are demonstrated, and more versatile tools become available.

Vertical wells can be drilled with casing using a simple system consisting primarily of a special bit attached to the casing that can be drilled out to run subsequent casing strings. For directional holes a retrievable Casing Drilling system is required because of the need to recover the expensive

directional drilling and guidance tools, the need to have the capability to replace failed equipment before reaching casing point, and the need for quick and cost effective access to the formations below the casing shoe.

Casing drilling system enables a well to be drilled and cased simultaneously using standard oilfield casings as the drillstring. The casing provides hydraulic and mechanical energy to a retrievable drilling assembly suspended from a profile nipple located near the bottom of the casing. The profile nipple has the same drift diameter as the casing and can be used to land cementing equipment once the drilling assembly is removed.

Typical Casing drilling BHA is as shown in Fig 1 and it is generally made up of a pilot bit, an underreamer, MWD, NMDC, stabilizer profile nipple and DLA.

Generally, the standard drilling BHA is connected to the casing with a DLA [Drilllock] that provides a running/retrievable interface, mechanical attachment to the casing and a hydraulic seal.

Successful directional Casing Drilling operations require more than simply having directional tools available that can be run below the casing. BHA response may be quite different when drilling with casing as compared to drilling with conventional systems. Torque and drag must be managed through selecting the casing connections, stabilization, and operational practices at the well site. Special surface handling equipment is often required to make the Casing Drilling process efficient.

Solid centralisers can be added to the casing for directional performance, casing wear management, dogleg control and centralisation for cementing purposes. Once BHA is landed in the profile nipple, drilling can progress in similar manner to conventional drilling. Casing drilling operation can utilise a top drive for conventional rotary drilling or sliding can be achieved with mud motor cum steerable system for oriented directional work.

There are now standard casing drive assemblies that easily adapt to top drives and readily provide casing makeup thus eliminating power tongs, support casing weights thus eliminating elevators and stabbers as well as allowing casing to be rotated to bottom.

Merits of Casing Drilling

With casing drilling a number of issues associated with conventional drilling operations using standard drillstrings are eliminated or minimized. Examples of the merits of casing drilling include:

- Time and effort involved in tripping operations are eliminated which reduces well construction and rig times. With attendant reduction in well construction time and cost
- Casing drilling eliminates the standard casing running or casing reaming obtained the standard process
- Problems associated with running casing in crooked holes or tortuous extended reach wells are eliminated
- There is potential for better quality holes and increased penetration rate with casing drilling
- There has been reported cases of better well control especially in Gulf of Mexico[3, 4]
- The lay down of drillpipes and collars becomes irrelevant
- There is potential for reduced circulation time and circulating pressures
- There is potential for high annular velocities because of small casing annular clearance. This allows for the minimum annular velocities required for effective hole cleaning being readily achieved at lower pump rates.
- There is potential for less ECD problems and better ECD management with casing drilling especially when coupled with MPD

MPD Hydraulics

Consider the Basic U-Tube Analogy of Well Profile as presented in Fig 1.

Irrespective of the MPD technique, the following equations represent the overarching hydraulics equation for a typical well. :

$$\text{BHP}_A [P_A] = \text{BHP}_B [P_B] \quad \dots(1)$$

P_A & P_B are the bottom hole pressures at specific depths in string bore and annular section respectively.

From the Figure below,

$$P_A = P_{s1} + P_{H1} + P_{H2} - \Delta P_{LOSS}.$$

$$\Delta P_{\text{LOSS}} = \Delta P_{\text{LOSS1}} + \Delta P_{\text{LOSS2}} + \Delta P_{\text{MOTTOR}} + \Delta P_{\text{BIT}} + \Delta P_{\text{Surface}} \quad \dots(2)$$

$\Delta P_{\text{Surface}}$ is the pressure drop in the standard rig surface facilities. The correlation for surface facilities pressure drop is presented as :

$$\Delta P_{\text{surface}} = C^* q^x * PV^y \quad \dots(3)$$

PV = Drilling fluid plastic viscosity

$\Delta P_{LOSS1,2}$ represent the sum of the frictional pressure drop in the bore of the drill string components

$$\Delta P_{\text{MOTOR}} = \text{Pressure drop in the mud motor if used}$$

ΔP_{Bit} = Pressure drop across the drillbit nozzles given as :

$$\Delta P_{BIT} = \frac{\rho^* q^2}{12032 * C_d * [TFA]^2} \quad \dots (4)$$

$[\rho]$ = Drilling Fluid Density, ppg

[q] = Operational pump rate, gpm

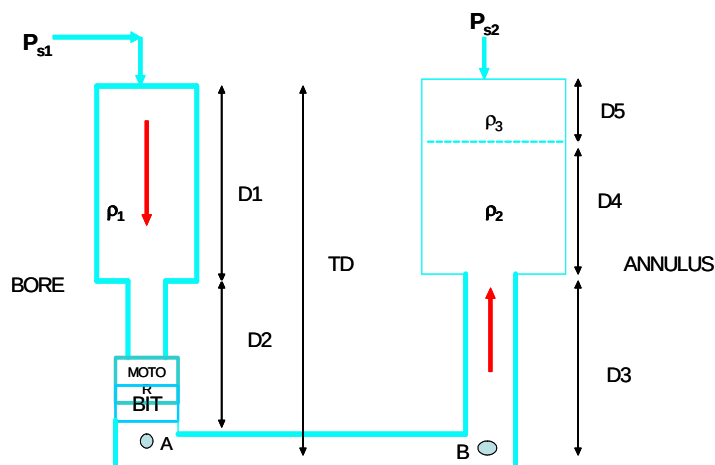
$$C_d = \text{Bit Nozzles Discharge coefficient, TFA} = \text{Bit Nozzles Total Flow Area, in}^2$$


Fig 1 : U-Tube Analogy of Well Profile

P_H represent the hydrostatic pressure in the appropriate section of the hole and it is a function of the prevailing fluid density

$$P_H = \text{Hydrostatic head imposed by the drilling fluid [In field units]} = 0.052 * \rho * \text{TVD} \quad \dots(5)$$

TVD is the true vertical height of specific fluid column, [ft]

$$P_B = P_{s2} + P_{H3} + P_{H4} + P_{H5} + \Delta P_{\text{LOSSannulus}} \quad \dots(6)$$

$$\Delta P_{\text{LOSSannulus}} = \Delta P_{\text{LOSS3}} + \Delta P_{\text{LOSS4}} + \Delta P_{\text{LOSS5}} \quad \dots(7)$$

ΔP_{LOSS} depend on flow regime, RPM, eccentricity, and rheology. Rheology in turn depends on the downhole condition of pressure and temperature.

$P_A = P_B = \text{Bottom Hole Circulation Pressure} = \text{BHCP}$

$$\text{ECD at any Depth} = \frac{\text{BHCP}}{0.052 * \text{TVD}} \quad \dots(8)$$

ΔP_{LOSS} represent the frictional losses in either the bore or annulus of the casing string as illustrated in Fig 1. These losses are affected by string eccentricity in the hole, fluid rheology at prevailing pressure and temperature conditions and string RPM

Effect of RPM

The analysis of the effect of string RPM is based on the premise that string rotation will exert a tangential velocity [a function of angular velocity] on the fluid flow over and above the average fluid velocity. Thus there is a vector sum velocity here defined as:

$$V_T = \sqrt{v_2^2 + v_M^2} \quad \dots(9)$$

Where v_M = Fluid mean velocity

v_2 = Fluid tangential velocity.

These velocities impose corresponding shear rates on the drilling fluids thus generating corresponding effective viscosities.

Depending on the fluid rheology the corresponding effective viscosities appropriate models have been custom developed for Bingham Plastic, Power Law and Herschel-Buckley Fluids. Appropriate corrections are also made for the effect of prevailing wellbore temperature and pressure effect on the rheology using purposely developed HP-HT models for fluid rheology.

For pseudoplastic fluids for example, The flow regime and effective viscosities in drillstring bore can be predicted using the following equation :

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\rho v_M d}{\mu_{\text{eff}}} \\ \mu_{\text{eff}} &= K \gamma^{n-1} \end{aligned} \quad \begin{aligned} \gamma' &= \sqrt{\gamma_{ax}^2 + \gamma_{\tan}^2} \\ \gamma_{ax} &= \frac{8v_M}{d} \left[\frac{3n+1}{3n} \right] \\ \gamma_{\tan} &= \frac{\Omega r}{d} \end{aligned}$$

$$\text{Where } \Omega = \text{Angular velocity} = \frac{2\pi}{60} * RPM \quad \dots(10)$$

d = bore diameter of string

v_m = average fluid velocity through the string bore

Effect of Wellbore Pressure and Temperature

Effect of wellbore pressure and temperature is compensated for in terms of the effect on drilling fluid rheology.

Thus at prevailing wellbore pressure and temperature the fluid shear stress as measured at room temperature is corrected as follows :

$$\tau @ P, T = CF * \tau_s \quad \dots(11)$$

τ = Fluid shear stress at defined pressure and temperature

τ_s = Fluid shear stress at standard temperature (60°F) and standard pressure (15psi)

CF = Correction factor which is a function of pressure and temperature.

Effect of Eccentricity

It is recognized from outset in this programme of work that in order to accurately predict the pressure profile in a wellbore, it is essential to predict the prevailing drillstring eccentricity.

The string eccentricity is here analysed based on the string loading and wellbore trajectory and the corresponding pressure regimes. Appropriate models have been purposely developed and procedures developed to establish the eccentricity profiles throughout the measured length of wellbore trajectory.

Analysis of the effect of eccentricity is thus carried out using the following equation :

$$\Delta P_{\text{Eccent}} = R * \Delta P_{\text{Conc}} \quad \dots(12)$$

R = Pressure Gradient Ratio

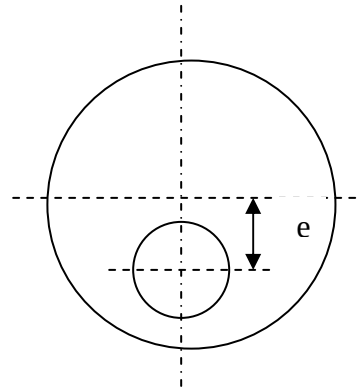
This R represents the eccentricity correction factor and it depends on fluid rheology and fluid flow regime.

ΔP_{Conc} = Pressure profile for concentric case

ΔP_{Eccen} = Pressure profile for eccentric case.

For lamina flow of pseudoplastic fluid for example R can be computed from the following equation:

$$\begin{aligned}
 R_{Lam} = & 1 - 0.072 * \frac{e_{avg}}{n} * \left[\frac{d_1}{d_2} \right]^{0.8454} \\
 & - 1.5 * e_{avg}^2 * \sqrt{n} \left[\frac{d_1}{d_2} \right]^{0.1852} \\
 & + 0.96 * e_{avg}^3 * \sqrt{n} * \left[\frac{d_1}{d_2} \right]^{0.2527} \\
 & \dots(13)
 \end{aligned}$$



e_{avg} = Average Drillstring eccentricity.

Highlights of Results

The major highlights from the simulation results for circulating friction method are presented in Tables 1 to 4 and Figs 3 to 5.

Table 1: Casing vs Drillstring Drilling – 120 RPM[300°F]

	Casing	Drilling	Drillstring	Drilling
	Concentric	50% Eccent	Concentric	50% Eccent.
ECD[ppge]	13.5	12.5	9.93	9.78
Pump P, psi	2415	1998	1584	1519

Table 2: Effect of RPM & ECCENTRICITY

	CONCENTRIC	CASING	50%ECC	CASING
	0RPM	120RPM	0RPM	120RPM
ECD[ppge]	13.1	13.5	12.4	12.5
Pump P, psi	2322	2415	2019	1998

Table 3: Effect of Temperature[DRILLSTRING]

	120°F	300°F	400°F
ECD[ppge]	10.68	9.93	9.7
Pump P, psi	2109	1584	1420

Table 4: Effect of Temperature[CASING DRILLING]

	120°F	300°F
ECD[ppge]	16	12.76
Pump P, psi	3773	2101

Conclusion

In this paper an attempt has been made to introduce the concept of Managed Pressure Drilling with emphasis on casing drilling.

Results of casing drilling versus conventional drillstring drilling technique are presented together with the effects of RPM and eccentricity. In order to optimise the process a new engineering tool for drilling operations simulation – the VisWELL has been developed.

Drilling engineers live in a data rich but information poor environment. The use of VisWELL visualisation techniques aids the transition to information richness through real-time downhole operation modeling, visualisation for well management and real time problem diagnosis and process optimisation by the supervisory team

Future developments include the ability for real-time simulation of well control as well as torque/drag analysis.

References

- [1]. www.shell.com : At balance drilling
- [2]. Oyeneyin, M.Babs; Phil Burge, Lisa Hogg and Chris Anderson : “The Virtual Well Engineer – Answer To Real-time Wellbore Surveillance in Managed Pressure Drilling”, Paper No MPC2006-011, Proceedings of the Mediterranean Petroleum Conference, pp48-62, (2006).
- [3]. Warren, Tommy, Bruce Houtchens, Garreth Madell: “Casing Drilling Technology Moves to More Challenging Applications”, Paper AADE01-NC-HO-32 presented at the 2001 National Drilling Conference (2001)
- [4]. Tessari, R.M, and Gareth Madell: “Casing Drilling – A revolutionary approach to reducing well costs”. SPE/IADC Paper No 52789 (1999)

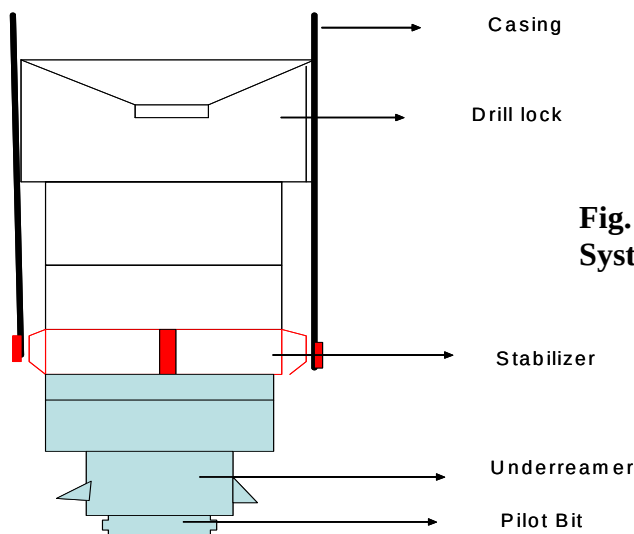


Fig. 2: Schematic of a Casing Drilling System [After Reference 3]

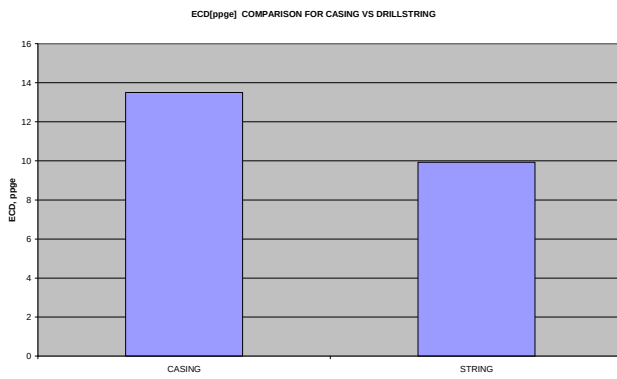


Fig. 3 : Effect of Casing Drilling Vs Drillstring Drilling

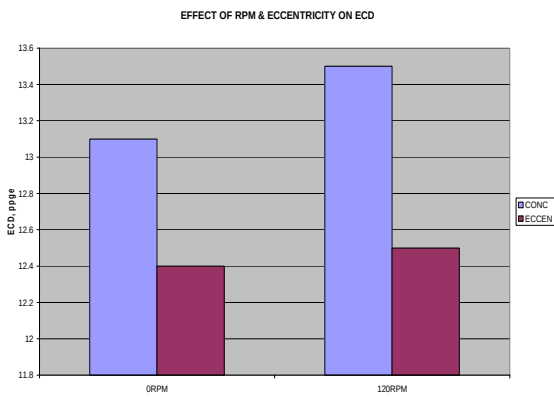


Fig. 4 : Effect of RPM & Eccentricity on Wellbore Pressure

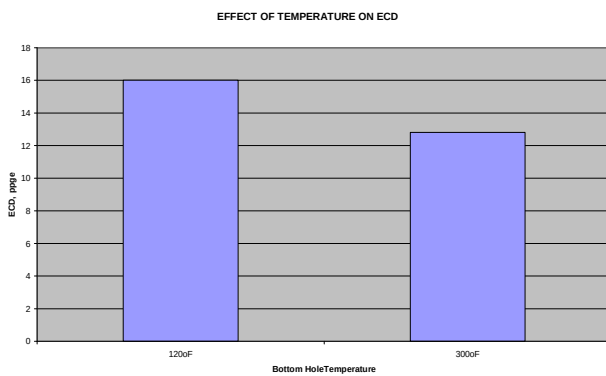


Fig. 5: Effect of Temperature on Wellbore Pressure Pr

Advances in Materials and Systems Technologies II

doi:10.4028/3-908454-12-3

Developing a Managed Pressure Drilling Strategy for Casing Drilling Operations

doi:10.4028/3-908454-12-3.456



Effect of pH and electrolyte on the rheology of aqueous Wyoming bentonite dispersions

Vassilios C. Kelessidis*, Christina Tsamantaki, Panayiotis Dalamarinis

Mineral Resources Engineering Department, Technical University of Crete, Polytechnic City, 73100 Chania, Greece

Received 15 October 2006; received in revised form 19 January 2007; accepted 23 January 2007

Abstract

The influence of pH between 7.5 and 10.5, for 5% and 6.42% aqueous Wyoming bentonite dispersions and of NaCl for 2%, 5% and 6.42% of Wyoming-bentonite in water for a range of salt concentrations up to 1.0 M has been investigated. The dispersions were prepared according to American Petroleum Institute procedures and rheological data were obtained with a Couette viscometer. Data were represented very well by the Herschel–Bulkley model for all experimental conditions.

The effect of pH and electrolyte concentration is significant, affecting the type of association of the montmorillonite particles thus influencing the rheology, the three Herschel–Bulkley parameters and the apparent viscosity. There is a maximum of the yield stress, flow consistency index and apparent viscosity at the natural pH of the dispersions, while there is monotonous decrease of these parameters with increasing salt concentration. Various scenarios of particle associations are discussed and comparison with similar data from literature is also performed.

© 2007 Elsevier B.V. All rights reserved.

Keywords: Wyoming bentonite dispersions; Effect of pH; Effect of salt; Herschel–Bulkley

1. Introduction

Aqueous bentonite dispersions are of significant value to many industries and in particular to oil-well drilling and waste-treatment industries. In the former, the dispersions have normally alkaline pH ranging between 9 and 12 (Gray and Darley, 1980) while in the latter, pH may range from acidic to alkaline, particularly for adsorption of toxic metals (Khan et al., 1995; Abollino et al., 2003). Montmorillonite particles are plate like with their faces (F) negatively charged while

their edges (E), constituting less than 5% of the total surface area (Delgado et al., 1986; Ramos-Tejada et al., 2001; Zhang and Yin, 2002), are conditionally charged, positive at pH values below the isoelectric point (iep) and negative at pH values higher than the (iep). The (iep) is defined as the pH of the dispersion at which the edges have zero charge (van Olphen, 1977). The value of the (iep) is not really known (de Kretser et al., 1998) and it may depend on bentonite type (Sohm and Tadros, 1989). Many researchers reported that the (iep) of montmorillonite dispersions ranges between 5.0 and 8.0 (Anderson and Sposito, 1991; de Kretser et al., 1998; Benna et al., 1999; Missana and Adell, 2000; Abend and Lagaly, 2000; Duran et al., 2000; Ramos-Tejada et al., 2001; Lagaly and Ziesmer, 2003; Tombácz and Szekeres, 2004). Thus, the pH of the medium governs

* Corresponding author. Tel.: +30 28210 37621; fax: +30 28210 37874.

E-mail address: kelesidi@mred.tuc.gr (V.C. Kelessidis).

the type of montmorillonite particle association giving its viscosity and yield stress (van Olphen, 1977; de Kretser et al., 1998; Lagaly and Ziesmer, 2003). Hence, the effect of pH on the rheology of these dispersions is of prime interest and several studies have been devoted on this subject (Brandenburg and Lagaly, 1988; Benna et al., 1999; Yildiz et al., 1999; Duran et al., 2000; Ramos-Tejada et al., 2001; Tombácz and Szekeres, 2004; Laribi et al., 2006). Complete understanding, though, of the effect of pH on particle association and the resulting macroscopic structure giving the rheological behavior of these dispersions is still elusive from the research community, particularly for concentrated dispersions.

It is long known that the presence of inorganic salts and in particular of NaCl destabilizes aqueous-bentonite dispersions because the electrical double layer, which forms around the clay mineral particles and keeps them in dispersion, is compressed by the cations (van Olphen, 1977; Luckham and Rossi, 1999) allowing the formation of aggregates thus changing the mode of particle association. Several studies have been performed to assess the phenomenon, with many dealing with dilute bentonite concentrations (Adachi et al., 1998; Abend and Lagaly, 2000; Heller and Keren, 2001; Tombácz and Szekeres, 2004) but some also assessing the behavior of more concentrated bentonite dispersions (Heath and Tadros, 1983; Ramos-Tejada et al., 2001; M'bodj et al., 2004). The amount of NaCl used varied from very dilute concentrations, ranging from 0.0001 M to 0.1 M (Miano and Rabaioli, 1994; Ramos-Tejada et al., 2001; Tombácz and Szekeres, 2004; Sakairi et al., 2005; Laribi et al., 2006) to greater than 0.1 M NaCl solutions (de Kretser et al., 1998; Penner and Lagaly, 2000; Lagaly and Ziesmer, 2003; M'bodj et al., 2004).

Bentonite is added to water based drilling fluids in quantities varying between 3 to 7 wt.% (Gray and Darley, 1980; Bourgoyne et al., 1991) and gives dispersions with shear thinning rheological behavior, modeled in recent works as Herschel–Bulkley fluid (Fordham et al., 1991; Hemphill et al., 1993; Maglione and Ferrario, 1996; Maglione et al., 2000; Kelessidis et al., 2005; Kelessidis et al., 2006) with the model given by Herschel and Bulkley (1926).

$$\tau = \tau_y + K(\dot{\gamma})^n \quad (1)$$

where τ , τ_y are the shear stress and the yield stress respectively, K , n are the flow consistency and flow behavior indices and $\dot{\gamma}$ is the shear rate. Many times, these dispersions have been modeled as Bingham plastic fluids, with a linear rheogram normally observed only at

high shear rates, with the model given by Bourgoyne et al. (1991).

$$\tau = \tau_{yB} + \mu_p \dot{\gamma} \quad (2)$$

where τ_{yB} , μ_p are the Bingham yield stress and plastic viscosity, respectively.

Drilling fluids have pH ranging between 9 and 12, while salt water drilling fluids are also used with NaCl concentration ranging up to 1.0 M (API, 2000). Formation waters of high salinity may also be encountered, with NaCl equivalent values ranging between 0.05 M and 1.0 M (Gray and Darley, 1980; Argillier et al., 1999). Similarly, in wastewater treatment, pH values of these dispersions may range between 2 and 13 (Khan et al., 1995; Abollino et al., 2003).

The scope of this paper is to assess the effect on rheology of pH and NaCl concentration of aqueous Wyoming bentonite dispersions, the bentonite most often used in drilling fluid formulation (Gray and Darley, 1980), at high bentonite concentrations, choosing three concentrations of 2%, 5% and 6.42 wt.%. The assessment is performed by measuring the rheological properties of these dispersions, deriving the Herschel–Bulkley rheological parameters and determining the changes observed at different pH and NaCl concentrations which could reveal information about the mode of particle association at these different conditions.

2. Methods and procedures

Bentonite–water dispersions were prepared using Wyoming bentonite, a natural sodium montmorillonite commercial product used in drilling fluid formulation under the brand name QUIK-GEL (kindly supplied by Haliburton-Cebo Holland). The cation exchange capacity (CEC) of this bentonite was [70.1 meq/100 g] while particle size was less than 70 μm , with majority of particles having sizes of around 10 μm . The influence of pH and of electrolyte concentration was determined for 2%, 5% and 6.42 wt.% of Wyoming bentonite in deionized water. The dispersions were prepared according to American Petroleum Institute procedures (API, 1993). Viscometric data were obtained with a continuously varying rotational speed Grace M3500 rotating viscometer, with an inner cylinder diameter of 1.7245 cm and an outer rotating cylinder diameter of 1.8415 cm, thus giving a diameter ratio $\delta=1.06785$, at a temperature of 25 °C and speeds of 600, 300, 200, 100, 60, 6 and 3 rpm. At each shear rate, shear stress data were recorded (electronically) every 10 s for a total of 60 s before changing to the next, lower, shear rate. The values of the stress obtained at each shear rate were then averaged and associated to the particular shear rate. The preparation and measurement protocol (API, 1993) allowed

reproducible results to be obtained in the above mentioned manner. The rheological parameters were determined applying non-linear regression to the data for the Herschel–Bulkley model and linear regression for the Bingham plastic model. This procedure to obtain the yield stress of non-Newtonian fluids from concentric cylinder data has been suspected of wall-slip occurring on the solid walls (Yoshimura et al., 1988; Alderman et al., 1991). However, because of the experimental approach followed here, that of intensive preshearing prior to measurements, following API procedures (API, 1993), no slip is expected to occur. This has been further confirmed from comparative studies in the same laboratory of similar dispersions, using concentric cylinder and the vane geometry (Alderman et al., 1991; Nguyen and Boger, 1992), which showed no significant variation among the yield stresses obtained with the two techniques (Tsamantaki et al., 2006).

The samples were adjusted to different pH values using 0.1 M NaOH and 0.1 M HCl solutions and pH values were measured with Inolab pH meter. The effect of electrolyte concentration (NaCl) was studied by adding bentonite in appropriate electrolyte solution following the API mixing procedure. Three electrolyte concentrations, the 0.0 M (deionized water as the standard solution), 0.01 M and 0.1 M, were studied before and reported elsewhere (Kelessidis et al., in press). This work extends the previous study with measurements of 2% bentonite at 0.0 M, 0.01 M and 0.1 M electrolyte concentrations and with measurements for the 5% and 6.42% bentonite at 0.5 M and 1.0 M NaCl.

After mixing, each bentonite dispersion was poured in a covered container and left for 16 h at room temperature for full hydration. Prior to measurement, the sample was stirred for 5 min at high shear rate (11,000 rpm) and the final pH measurement was performed, followed by the rheological measurement. It is the final pH value measured that is reported in the results. As the pH of the dispersion changes during the hydration period, pH measurements were also performed to determine the time evolution of pH of these aqueous-bentonite dispersions. The final pH range covered was 7.8 to 10.5. The procedure followed to study pH evolution started by mixing the amount of clay into deionized water followed by addition of the appropriate amount of the acid or the basic solution and stirring the dispersion in a Hamilton–Beach mixer at 11000 rpm for 5 min, taking then the pH value. After the time lapse period (20 min), the sample was stirred again in the mixer at the high speed for 5 min and the new pH measurement was performed. This continued until the final measurement, at the 16 h hydration period, was taken.

3. Results

3.1. Effect of pH

The flow curves of the 5 wt.% and 6.42 wt.% Wyoming bentonite in water at different final pH values have all shown characteristics of yield-pseudoplastic fluids. The rheograms for the 6.42% bentonite concen-

tration at different pH are shown in Fig. 1. From the flow curves, the Bingham plastic and Herschel–Bulkley model parameters have been determined using linear and non-linear regression routines from MatLab™. The Herschel–Bulkley rheological model fitted the data extremely well giving correlation coefficients between 0.980 and 0.999 and very low sum of square error values, while the Bingham plastic model gave correlation coefficients varying from 0.91 to 0.96. Hence, for all these dispersions, the Herschel–Bulkley rheological model described much better their rheological behavior, in accordance to findings of previous works (Kelessidis et al., 2005; Laribi et al., 2005; Kelessidis et al., 2006).

The variation of the Herschel–Bulkley yield stress (τ_y) with pH for the 5% and 6.42% bentonite concentrations is shown in Fig. 2 while the variation of the flow consistency index (K) and of the flow behavior index (n) with pH for these dispersions is shown in Figs. 3 and 4 respectively, with the error bars corresponding to the standard errors, as estimated for each parameter from the non-linear regression MatLab™ routines. There is a maximum of the yield stress for the 6.42 wt.% bentonite at a pH value of 8.7, which is slightly lower than the natural pH value of 9.1. For more alkaline dispersions but also for less alkaline dispersions, the yield stress decreases monotonously with reductions around 34% and 21%, respectively. The 5 wt.% bentonite dispersion shows also a maximum at almost the same pH value as the 6.42% dispersion, with a maximum at a pH value between 8.6 and 8.9, very close to the natural pH of 8.9. For more alkaline dispersions, the yield stress decreases monotonously with a reduction of 39%, similar to the 6.42% concentration. For less alkaline dispersions, however, it exhibits different behavior than the 6.42% concentration with a local minimum at pH of 8.3, showing an increasing trend for less alkaline dispersions.

The flow consistency index shows an increasing trend with increasing pH for both bentonite concentrations. Local maxima, for both concentrations are also

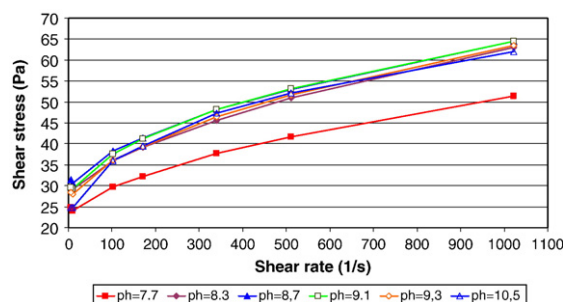


Fig. 1. Rheograms of 6.42% bentonite dispersion at different pH. Natural pH 9.1.

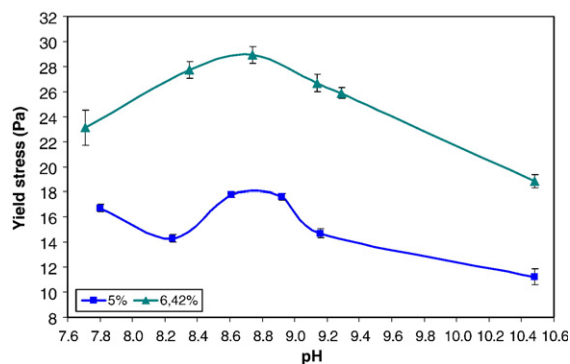


Fig. 2. Variation of yield stress (τ_y) with pH at the two bentonite concentrations. Natural pH of 5% was 8.9 and of 6.42% was 9.1.

observed, occurring at the value of pH very close to the natural pH for both concentrations, at pH of 8.9 for 5% and at pH of 9.1 for the 6.42% dispersion. Very high values of K are observed for the highest pH value of about 10.5, with a ratio between the two extremes of pH measurements ranging from a ratio of 4.0 for the 5%, to about 7.0 for the 6.42%.

The flow behavior index decreases continuously with pH, starting from a value of around 0.62 and decreasing to values of around 0.40, for both concentrations. A slight variation, breaking the monotonous decrease is also observed at the natural pH values for both concentrations. Thus, the higher the pH, the more the shear thinning behavior of these bentonite dispersions.

Rheological models are good for prediction of pressure losses during the flow of these dispersions in conduits of various shapes, particularly for laminar flow. However, the understanding of the flow behavior of the fluid and in particular of bentonite particle association at different environmental conditions, like pH and electrolyte concentration, is very difficult through the study of the variation of the model rheological parameters,

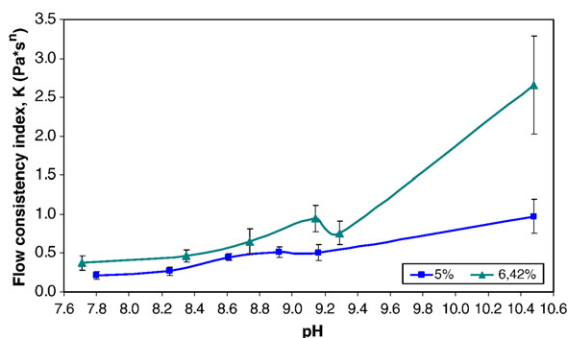


Fig. 3. Variation of flow consistency index (K) with pH at the two bentonite concentrations.

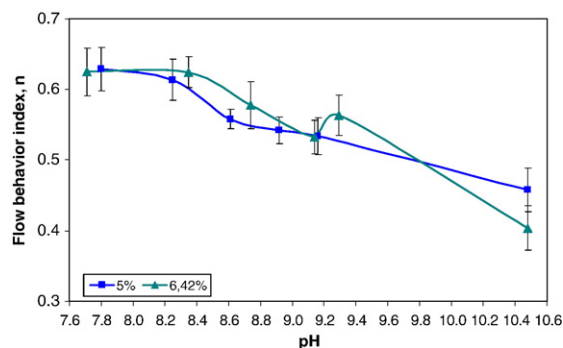


Fig. 4. Variation of flow behavior index (n) with pH at the two bentonite concentrations.

especially when three parameters are involved, as is the case of Herschel–Bulkley model. While it is fairly straight forward to assess the impact of variation of the yield stress, this is not the case for the effect of the flow consistency and of the flow behavior indices. On the other hand, the apparent viscosity, η , defined as the ratio of the shear stress over the shear rate, $\eta = \tau/\dot{\gamma}$, which is a function of the shear rate for these dispersions, $\eta = \eta(\dot{\gamma})$, could reveal trends and provide information related to the particle association, as a function of the imposed shear rate.

The apparent viscosity at different pH values and for all tested shear rates is shown in Fig. 5 for the 5% concentration. The results show that the apparent viscosity presents a maximum, for all shear rates, at a pH value very close to the natural pH of the dispersions and a small minimum at pH of 8.2. The variation though of the maximum from the minimum is not great. For the 6.42% bentonite dispersions, the apparent viscosity showed less variation but a small maximum was again observed at the natural pH.

3.2. pH evolution during hydration

The pH of bentonite dispersions changes with time during the hydration period and measurements have indicated that it stabilizes after the 16 h hydration period. Addition of small amounts of HCl or NaOH solutions after full hydration resulted in spontaneous decrease or increase of pH, thus indicating stabilization of pH after the hydration period.

In Fig. 6 the evolution of pH with time for a 6.42% bentonite dispersion is shown for different starting pH values. Full stabilization of pH depends on the pH value and takes the full hydration period for pH less than the natural pH, while for pH greater than the natural pH, stabilization of pH occurs faster. Furthermore, for pH

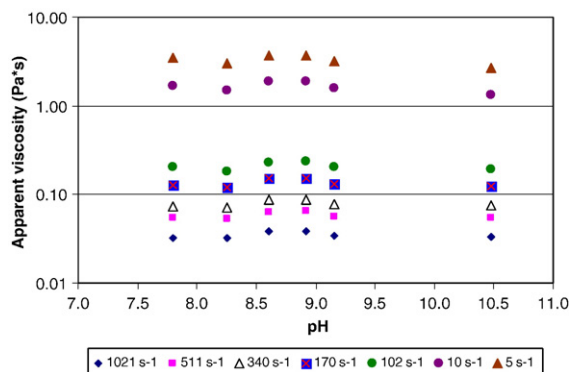


Fig. 5. Variation of apparent viscosity of 5.0% bentonite dispersion at different shear rates with pH. Natural pH of the dispersion was 8.9.

greater than the natural pH, the change between the initial and final values is very small and one observes a slight decrease for the most alkaline values. For pH values less than the natural pH, the difference between initial and final pH becomes greater as the dispersion becomes more acidic. There is, also, a small shift of pH at the natural state of 0.3 pH units after 16 hr hydration period.

In Fig. 7, the relationship between the pH measured at mixing time versus the final pH after full hydration is shown from three series of experiments, two with a concentration of 6.42% bentonite and one with 5% bentonite concentration. The behavior is similar for both bentonite concentrations. Furthermore, the coincidence of almost all measurements at the same bentonite concentration shows the reproducibility of not only the measuring process but also of the occurring phenomenon. The data show the great disparity between original and final pH values, for pH less than the natural one, and

the small change for pH values greater than the natural one.

It is known that pH evolves with time during clay mineral hydration period (Tombácz and Szekeres, 2004; Laribi et al., 2006) but quantitative results have not been reported except by Avenna and De Pauli (1998). The latter authors reported that for very dilute dispersions (0.074 wt.%) of Na-montmorillonite from Argentina with particle size less than 2 μm , in 0.014 M NaCl dispersion and in other electrolyte concentrations, the increase of the original pH of 8.3 with NaOH addition was accomplished in less than 30 s and remained invariable with time. For pH with values between 5 to 8, adjustment of pH with standard HCl solution was accomplished in 10–15 min. The results presented above show that for the much more concentrated dispersions of 5% and 6.42% Wyoming bentonite, fairly fast pH adjustment is observed only for pH values greater than the natural one (pH $\sim$ 9.0), while for smaller than the natural one pH values, full pH evolution is accomplished only after the full hydration period. Differences of the raw material, of the bentonite concentration as well as in the mixing procedures could explain the variations observed.

3.3. Effect of electrolyte

The flow curves of the dispersions in different electrolyte solutions, augmented with data of Kelessidis et al. (in press), have shown typical yield-pseudoplastic behavior, with the shear stresses increasing with bentonite concentration. Typical rheograms for the 6.42% concentration at different salt concentrations are shown in Fig. 8. The effect of increasing salt concentration is to reduce the shear stresses experienced

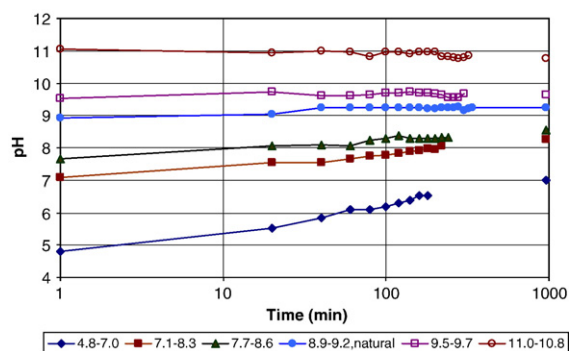


Fig. 6. Change of pH of a 6.42% bentonite dispersion with time during the hydration period. The values given are the initial and final measured values. Full hydration was accomplished after 16 h (960 min).

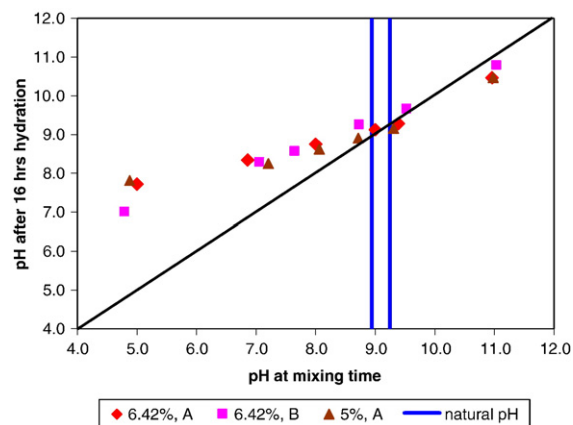


Fig. 7. Final pH of the dispersion versus original pH at mixing time for 5% and 6.42% bentonite dispersions.

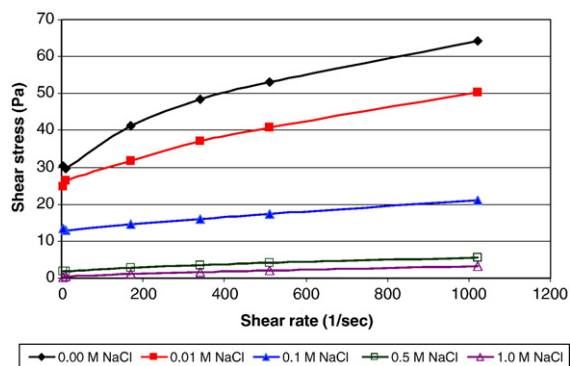


Fig. 8. Flow curves of 6.42 wt.% Wyoming bentonite dispersions in electrolyte solutions.

by the fluids at the same shear rates. In fact, for the highest salt concentrations, no shear stress is measured for the smallest rotational speeds. The relationship between yield stress (τ_y) and electrolyte (NaCl) concentration is shown in Fig. 9 while the relationships between flow consistency index and flow behavior index (K, n) and electrolyte concentration are shown in Figs. 10 and 11, respectively. There is a continuous decrease in the yield stress with increasing salt concentration for all three bentonite concentrations with a sharp decrease at 0.5 M and 1.0 M to very small values. Similar decrease is observed for the flow consistency index, but the sharp decrease and very small values are observed even at 0.1 M salt concentration. The flow behavior index shows an increasing trend toward the value of 1.0 for all three bentonite concentrations up to a salt concentration of 0.1 M, while it decreases again at the higher salt concentrations for the 5% and 6.42% bentonite concentrations.

Figs. 12, 13, and 14 show the change of the Herschel–Bulkley rheological parameters with bentonite concen-

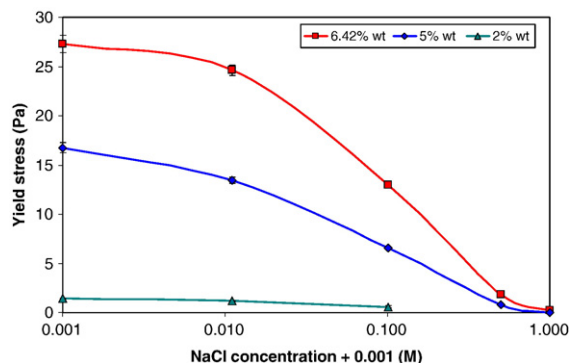


Fig. 9. Yield stress of Wyoming bentonite dispersions in electrolyte solutions.

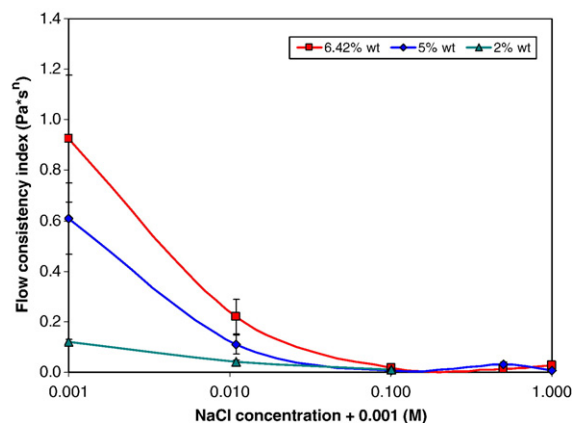


Fig. 10. Flow consistency index of Wyoming bentonite dispersions in electrolyte solutions.

tration at various electrolyte concentrations. The yield stress relationship to the solid concentration exhibits power law dependence with the weight percent concentration of bentonite for the 0.0 M, 0.01 M and 0.1 M salt concentrations. The lines drawn in Fig. 12 correspond to power law curves fitting the data, giving excellent fits, for the 0.0 M salt concentration

$$\tau_y = 0.238(x)^{2.59} \text{ Pa} \quad R_c^2 = 0.9974 \quad (3)$$

for the 0.01 M,

$$\tau_y = 0.193(x)^{2.62} \text{ Pa} \quad R_c^2 = 0.9997 \quad (4)$$

and for the 0.1 M,

$$\tau_y = 0.092(x)^{2.66} \text{ Pa} \quad R_c^2 = 1.0000 \quad (5)$$

where (x) is the percent weight concentration of bentonite. No such relationships could be found for the higher salt concentrations as they exhibited very small yield stress values. The scaling laws depicted by

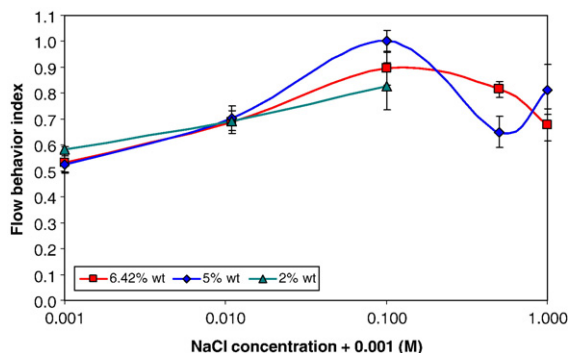


Fig. 11. Flow behavior index of Wyoming bentonite dispersions in electrolyte solutions.

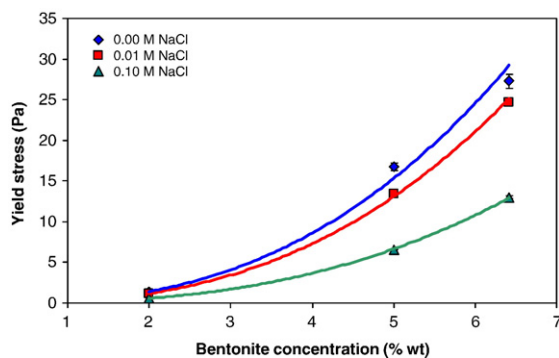


Fig. 12. Variation of the yield stress with bentonite concentration at different electrolyte concentrations.

Eqs. (3), (4), and (5) give all very similar exponent values, around 2.60. This value is very close to the value reported by Laribi et al. (2005), who found a value of 2.78 when testing Wyoming bentonite at four different concentrations, ranging between 7 and 14%. Laribi et al. (2005) also reported an exponent of 2.54 for a Tynesian bentonite, while Ramos-Tejada et al. (2001) have reported power exponents around 2.0 to 3.0 for a Spanish bentonite, but for the Bingham plastic yield stress.

The flow consistency index increases with bentonite concentration at 0.0 M and 0.01 M while it remains fairly constant at very small values for the 0.1 M salt concentration. The dependence of K on x is very strong for the bentonite dispersions with no salt while it diminishes as the salt concentration increases. Presence of salt in the dispersion also influences the variation of the flow behavior index with solid concentration. It presents a maximum at 5%, giving almost Bingham plastic behavior at 0.1 M salt concentration, it remains invariant at the low salt concentration of 0.01 M and it shows a small minimum for no salt in the 5% bentonite concentration.

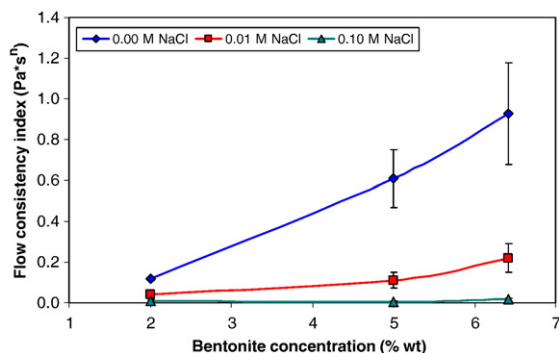


Fig. 13. Variation of the flow consistency index with bentonite concentration at different electrolyte concentrations.

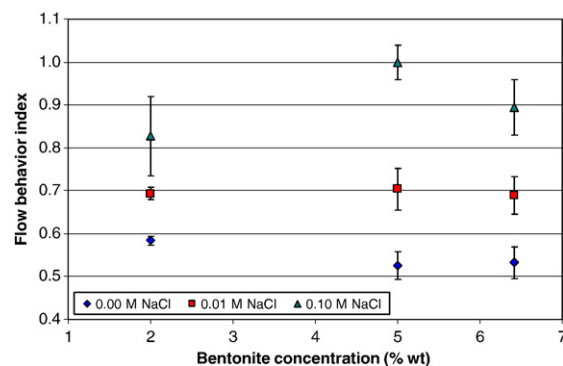


Fig. 14. Variation of the flow behavior index with bentonite concentration at different electrolyte concentrations.

The apparent viscosity of the three bentonite concentrations continuously decreased with increasing electrolyte concentration and showed a drastic decrease for NaCl concentrations higher than 0.1 M for which it approached the suspending medium viscosity for all shear rates. The 5% dispersion showed no variation of the apparent viscosity with shear rate at 1.0 M indicating a break up of the colloidal dispersion. On the contrary, the 6.42% dispersion did not exhibit similar behavior.

4. Discussion

Montmorillonite particles are characterized by negatively charged faces (F) and pH dependent charges of the edges (E) and association of these particles can be of three modes, EF, EE and FF (van Olphen, 1977; Lagaly and Ziesmer, 2003; Tombácz and Szekeres, 2004; Laribi et al., 2006). EF association is thought to occur primarily at pH values less than the isoelectric point (iep) giving a house of cards structure (van Olphen, 1977). At pH values greater than (iep), both edges and faces are negatively charged and particle association could be EF, EE and FF, with the EF and EE giving looser structures because the area of contact between the edges and the faces is smaller, while the FF gives the strongest structures, because the area of contact is larger (Benna et al., 1999; Lagaly and Ziesmer, 2003). In this work, the effect of pH in the alkaline range, greater than (iep), has been studied. Similarly, the effect of the electrolyte was studied at the natural pH of the medium, higher than the (iep). Thus, for both studies, no positive edge to negative face contact is expected.

Few investigators have used the Herschel–Bulkley model to describe the rheological behavior of clay suspensions (Coussot and Piau, 1994; Coussot, 1995; Laribi et al., 2005) but none so far has studied the effect of pH and salt concentration on Herschel–Bulkley

rheological parameters, as it was done in this study. Most investigators have used in the past the high shear rate Bingham plastic model and have attempted to describe interparticle associations at different conditions using the Bingham yield stress and the plastic viscosity. To this end, the effect of pH on Bingham yield stress has been studied by Khandal and Tadros (1988), Sohm and Tadros (1989), Yildiz et al. (1999), Duran et al. (2000), Ramos-Tejada et al. (2001) and Laribi et al. (2006). On the other hand, Brandenburg and Lagaly (1988) used the apparent viscosity at a specific shear rate (94.5 s^{-1}). Similarly the effect of salt concentration on Bingham yield stress has been studied by Abend and Lagaly (2000) and Tombácz and Szekeres (2004), while M'bodj et al. (2004) and Sakairi et al. (2005) have used the yield stress obtained by the vane technique (Alderman et al., 1991). Heath and Tadros (1983) used the yield stress derived by a similar to the vane technique, while Heller and Keren (2001) used the apparent viscosity to study the effect of salt.

In this study, all derived rheograms, under all conditions, have exhibited curvature and hence, the Herschel–Bulkley model was found most appropriate for the data of this work. Hence, this study focused on the variation of the Herschel–Bulkley rheological parameters with pH and electrolyte concentration, and in particular of the yield stress, in an effort to reveal further information about montmorillonite particle association under these conditions. A maximum on the Herschel–Bulkley yield stress has been obtained for both studied bentonite concentrations at the natural pH (i.e. when no acid or alkali was added), while addition of NaOH or HCl, to increase or decrease the pH, resulted essentially in a decrease of the yield stress. Furthermore, the apparent viscosities at all shear rates have shown a maximum at the natural pH for both concentrations. In contrast, previous investigators have reported a minimum on the yield stress at neutral pH (Yildiz et al., 1999; Benna et al., 1999) or of the apparent viscosity (Brandenburg and Lagaly, 1988), while at alkaline pH, an increase in the yield stress has been reported (Yildiz et al., 1999; Benna et al., 1999). Others have reported a continuous decrease of the yield stress when pH changed from acidic to alkaline (Duran et al., 2000; Ramos-Tejada et al., 2001). A maximum on the yield stress has only been reported by Sohm and Tadros (1989) and Laribi et al. (2006) at pH of 7.0 and 8.5, respectively. Laribi et al. (2006) attributed this maximum to EE association between positive and negative edges. It is questionable, however, whether any positive edges exist in the suspension at this pH value, higher than the (iep), especially if the spillover effect is taken

into account (Callaghan and Ottewill, 1974; de Kretser et al., 1998).

The question is then posed about the type of particle association in the alkaline range where faces and edges are negatively charged, in the absence of electrolyte which will produce different yield stresses, and in particular at the natural pH of the dispersion where the maximum of the yield stress has been measured. Scanning electron microscope studies, currently under way, are expected to reveal additional information about particle association at different pH values. Preliminary results are shown in Fig. 15. What is observed is that the platelets flex and seem to associate primarily by the EF mode and create structures resembling lenticular pores, similar to the ones reported by van Damme et al. (1985) and M'bodj et al. (2004), who, however, attributed them to random aggregation of sheets rather than the EF association appearing in Fig. 15. EF association at alkaline pH and certain salt concentrations has been also suggested by Permien and Lagaly (1994). However, other investigators report and suggest band like structures resulting from FF association which gives larger flakes and stronger gels (Norris, 1954; Callaghan and Ottewill, 1974; de Kretser et al., 1998; Luckham and Rossi, 1999; Duran et al., 2000; Tombácz and Szekeres, 2004).

Salt addition to the dispersions at the natural pH, for values up to 1.0 M, showed that the Herschel–Bulkley yield stress and the flow consistency index, as well as the apparent viscosity at all shear rates, decreased monotonously with increasing NaCl concentration for all three bentonite concentrations, while the flow behavior index gave an increasing trend with increase in salt concentration, showing a Bingham plastic or even Newtonian behavior at the very high salt concentrations

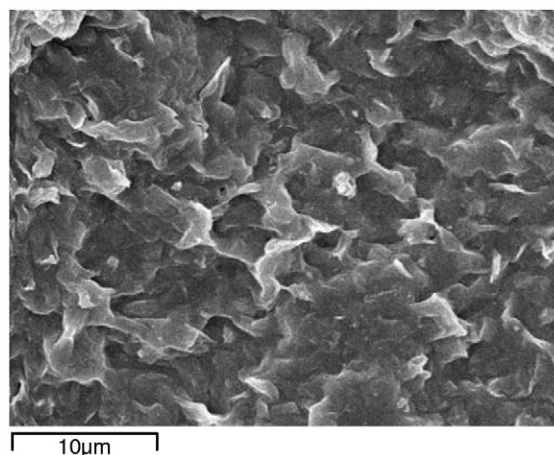


Fig. 15. SEM of hydrated 6.42% Wyoming bentonite at pH of 9.1.

studied. For salt concentrations less than 0.5 M, the smooth decrease observed is attributed to the compression of (edl) of the bentonite particles. For salt concentrations greater than 0.5 M, the observed sharp decrease in the values of all rheological parameters is attributed to the large flocs that form from FF association leading to sedimentation (Abend and Lagaly, 2000). The results from this work further show that this mechanism may be clay concentration dependent because at the 0.5 M and 1.0 M salt concentrations, the destabilization induced by flocculation was observed particularly for the 5% bentonite concentration, while the 6.42% dispersion still maintained some colloidal stability.

Results similar to this work have been reported by Sakairi et al. (2005) for bentonite concentrations up to 2% but very low salt concentrations (0.00001 M to 0.001 M). On the contrary, several reports have indicated that for salt concentrations less than 0.5 M, firstly a minimum is observed on the yield stress of the dispersions, at very low salt concentrations, followed by a maximum at higher salt concentrations up to the value of around 0.5 M (Yildiz et al., 1999; Abend and Lagaly, 2000; Heller and Keren, 2001). M'bodj et al. (2004) reported a maximum of the yield stress while Heath and Tadros (1983) reported increasing yield stress with increasing salt concentration.

It may then be concluded that there are contradicting results on the effect of pH and of electrolyte concentration on the rheology of sodium montmorillonite aqueous dispersions. Differences in the raw material could partly explain the differences observed, as many investigators use the material as it is commercially sold, as it was done in this study, while others purify the raw material. Also variations of the original raw material are observed, as some investigators use naturally occurring sodium montmorillonite while others use soda activated montmorillonite. Similarly, all studies have covered from low clay to high clay concentrations and this may also affect the results of the effects of the different conditions. Preparation procedures should have the most drastic effect on the measured properties and this could explain the differences observed, as there exists no standard protocol. This work adhered strictly to API preparation procedures (API, 1993) which give reproducible results, but different investigators follow widely varying mixing and preparation procedures ranging from no hydration at all (for e.g. Sohm and Tadros, 1989) to several days hydration period (for e.g. Laribi et al., 2006), from vigorous preshearing prior to measurement (API 1993 and in this study) to minimal preshearing (Ramos-Tejada et al., 2001). Differences of

the reporting property could also explain the discrepancies, with many investigators reporting the effect of the varying parameters on the Bingham yield stress, extrapolated from high shear rates, or the apparent viscosity at a specific shear rate, or the directly measured yield stress of the fluids. In this work, it was found that the Herschel–Bulkley rheological parameter fitted experimental data very well and therefore the variation of the three model parameters with respect to pH and salt concentration has been reported.

5. Conclusions

The effect of pH and of electrolyte concentration on the rheological properties of Wyoming bentonite dispersions has been studied at two bentonite concentrations. The rheograms have been fitted very well by the Herschel–Bulkley model while the Bingham plastic model resulted in fairly poor fit. The differences to reported results are attributed to the raw material used, but primarily to the preparation procedures. In the study presented here the procedures suggested by American Petroleum Institute for drilling fluid evaluation, have been followed.

For the range of pH values studied, between 7.7 and 10.5, a maximum on the yield stress, the flow consistency index and the apparent viscosity at all shear rates has been observed at approximately the natural pH of both 5% and 6.42% concentrations, while at the highest pH, the flow consistency index increased drastically. The flow behavior index exhibited a monotonous decrease with pH. The maximum is attributed to edge to face particle associations, as revealed also by scanning electron microscope images. Changes of pH of the dispersions during the 16 h hydration period have been also presented, with significant increase of pH when starting from acidic values and a small decrease when starting from alkaline values.

Addition of salt decreases the yield stress, the flow consistency index and the apparent viscosity at all shear rates for all three studied bentonite concentrations of 2%, 5% and 6.42%, over the range of electrolyte concentrations from 0.0 M to 1.0 M. The flow behavior index increases up to 0.1 M and then decreases somewhat and fluctuates for 0.5 M and 1.0 M of salt. For the lower than 0.5 M salt concentrations, the decrease of the rheological parameters, is attributed to the compression of the electric double layer which disrupts the network structure while at the higher concentrations, the sharper decrease is attributed to the formation of FF associations which lead to larger flocs causing sedimentation.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge Dr. E. Repusku for the SEM picture, Mrs. O. Pantelaki for the particle size analysis, Mrs. P. Makri for the CEC measurements and Mrs. G. Potsi for conducting the 2% experiments, all of Mineral Resources Engineering Dept., Technical University of Crete.

Funding for this work was from the European Social Fund and National Resources – (EPEAEK-II) Pythagoras.

Baroid – Cebo Holland kindly provided the quantity of Wyoming bentonite.

References

- Abend, S., Lagaly, G., 2000. Sol-gel transitions of sodium montmorillonite dispersions. *Appl. Clay Sci.* 16, 201–227.
- Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Sarzanini, C., Mentasti, E., 2003. Adsorption of heavy metals on Na-montmorillonite. Effect of pH and organic substances. *Water Res.* 37, 1619–1627.
- Adachi, Y., Nakaishi, K., Tamaki, M., 1998. Viscosity of dilute suspension of sodium montmorillonite in an electrostatically stable condition. *J. Colloid Interface Sci.* 198, 100–105.
- Alderman, N.J., Meeten, G.H., Sherwood, J.D., 1991. Vane rheometry of bentonite gels. *J. Non-Newton. Fluid Mech.* 39, 291–310.
- American Petroleum Institute Specifications 13A, 1993. Specification for Drilling Fluid Materials.
- American Petroleum Institute Specifications 13I, 2000. Recommended Practice Standard Procedure for Laboratory Testing of Drilling Fluids.
- Anderson, S.J., Sposito, G., 1991. Cesium adsorption method for measuring accessible structural surface charge. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 1569–1576.
- Argillier, J.F., Audibert, A., Longeron, D., 1999. Performance evaluation and formation damage potential of new water-based drilling formulas. *SPE Drill. Complet.* 14, 266–273.
- Avenna, M.J., De Pauli, C.P., 1998. Proton adsorption and electrokinetics of an argentinean montmorillonite. *J. Colloid Interface Sci.* 202, 195–204.
- Benna, M., Kbir-Ariguib, N., Magnin, A., Bergaya, F., 1999. Effect of pH on rheological properties of purified sodium bentonite suspensions. *J. Colloid Interface Sci.* 218, 442–455.
- Bourgoyne Jr., A.T., Chenevert, M.E., Millheim, K.K., Young Jr., F.S., 1991. *Applied Drilling Engineering*. SPE Textbook Series, vol. 2.
- Brandenburg, U., Lagaly, G., 1988. Rheological properties of sodium montmorillonite dispersions. *Appl. Clay Sci.* 3, 263–279.
- Callaghan, I.C., Ottewill, R.H., 1974. Interparticle forces in montmorillonite gels. *Discuss. Faraday Soc.* 57, 110–118.
- Coussot, P., 1995. Structural similarity and transition from Newtonian to non-Newtonian behavior for clay-water suspensions. *Phys. Rev. Lett.* 74, 3971–3974.
- Coussot, P., Piau, J.-M., 1994. On the behavior of fine mud suspensions. *Rheol. Acta* 33, 175–184.
- Delgado, A., Gonzalez-Caballero, F., Bruque, J.M., 1986. On the zeta-potential and surface-charge density of montmorillonite in aqueous-electrolyte solutions. *J. Colloid Interface Sci.* 113, 203–211.
- de Kretser, R.G., Scales, P.J., Boger, D.V., 1998. Surface chemistry–rheology inter-relationships in clay suspensions. *Colloids Surf., A Physicochem. Eng. Asp.* 137, 307–318.
- Duran, J.D.G., Ramos-Tejada, M.M., Arroyo, F.J., Gonzalez-Caballero, F., 2000. Rheological and electrokinetic properties of sodium montmorillonite suspensions. *J. Colloid Interface Sci.* 229, 197–117.
- Fordham, E.J., Bittleston, S.H., Tehrani, M.A., 1991. Viscoplastic flow in centered annuli, pipes and slots. *I EC Res.* 29, 517–524.
- Gray, H.C.H., Darley, G.R., 1980. *Composition and Properties of Oilwell Drilling Fluids*. Gulf Pub Co.
- Heath, D., Tadros, Th.F., 1983. Influence of pH, electrolyte and poly(vinyl alcohol) addition on the rheological characteristics of aqueous dispersions. *J. Colloid Interface Sci.* 93, 307–319.
- Heller, H., Keren, R., 2001. Rheology of Na-rich montmorillonite suspension as affected by electrolyte concentration and shear rate. *Clays Clay Miner.* 49, 286–291.
- Hemphill, T., Campos, W., Tehrani, M.A., 1993. Yield power law model mode accurately predicts mud rheology. *Oil Gas J.* 91, 45–50.
- Herschel, W.H., Bulkley, R., 1926. Konsistenzmessungen von Gummi-Benzollösungen. *Kolloid-Z.* 39, 291–300.
- Kelessidis, V.C., Mihalakis, A., Tsamantaki, C., 2005. Rheology and rheological parameter determination of bentonite–water and bentonite–lignite–water mixtures at low and high temperatures. *Proceedings of the 7th World Congress of Chem Engr.*
- Kelessidis, V.C., Maglione, R., Tsamantaki, C., Aspirtakis, Y., 2006. Optimal determination of rheological parameters for Herschel–Bulkley drilling fluids and impact on pressure drop, velocity profiles and penetration rates during drilling. *J. Pet. Sci. Eng.* 53, 203–224.
- Kelessidis, V.C., Tsamantaki, C., Dalamarinis, P., Repouskou, R., Tombacz E., in press. Influence of electrolyte concentration on rheological properties of Zenith and Wyoming bentonite-water suspensions. *Mineral Wealth*, paper.
- Khan, S.A., Rehman, R., Khan, M.A., 1995. Adsorption of chromium (III), chromium (VI) and silver (I) on bentonite. *Waste Manage.* 15, 271–282.
- Khandal, R.K., Tadros, Th.F., 1988. Application of viscoelastic measurements to the investigation of the swelling of sodium montmorillonite suspensions. *J. Colloid Interface Sci.* 125, 122–128.
- Lagaly, G., Ziesmer, S., 2003. Colloid chemistry of clay minerals: the coagulation of montmorillonite dispersions. *Adv. Colloid Interface Sci.* 100–102, 105–128.
- Laribi, S., Fleureau, J.M., Grossiord, J.L., Kbir-Ariguib, N., 2005. Comparative yield stress determination for pure and interstratified smectite clays. *Rheol. Acta* 44, 262–269.
- Laribi, S., Fleureua, J.M., Grossiord, J.L., Kbir-Ariguib, N., 2006. Effect of pH on the rheological behavior of pure and interstratified smectite clays. *Clays Clay Miner.* 54, 29–37.
- Luckham, P.F., Rossi, S., 1999. The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. *Adv. Colloid Interface Sci.* 82, 43–92.
- Maglione, R., Ferrario, G., 1996. Equations determine flow states for yield-pseudoplastic drilling fluids. *Oil Gas J.* 94, 63–66.
- Maglione, R., Robotti, G., Romagnoli, R., 2000. In-situ rheological characterization of drilling mud. *SPE J.* 5, 377–386.
- M’bodj, O., Kbir-Ariguib, N., Ayadi, M.T., Magnin, A., 2004. Plastic and elastic properties of the systems interstratified clay–water–electrolyte–xanthan. *J. Colloid Interface Sci.* 273, 675–684.
- Miano, F., Rabaioli, M.R., 1994. Rheological scaling of montmorillonite suspensions: the effect of electrolytes and polyelectrolytes. *Colloids Surf., A Physicochem. Eng. Asp.* 84, 229–237.

- Missana, T., Adell, A., 2000. On the applicability of DLVO theory to the prediction of clay colloids stability. *J. Colloid Interface Sci.* 230, 150–156.
- Nguyen, Q.D., Boger, D.V., 1992. Measuring the flow properties of yield stress liquids. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 24, 47–88.
- Norrish, K., 1954. The swelling of montmorillonite. *Discuss. Faraday Soc.* 18, 120–134.
- Penner, D., Lagaly, G., 2000. Influence of organic and inorganic salts on the aggregation of montmorillonite suspensions. *Clays Clay Miner.* 48, 246–255.
- Permien, T., Lagaly, G., 1994. The rheological and colloidal properties of bentonite suspensions in the presence of organic compounds: III. The effect of alcohols on the coagulation of sodium montmorillonite. *Colloid Polym. Sci.* 272, 1306–1312.
- Ramos-Tejada, M.M., Arrovo, F.J., Peren, R., Duran, J.D.G., 2001. Scaling behavior of the rheological parameters of montmorillonite suspensions: correlation between interparticle interaction and degree of flocculation. *J. Colloid Interface Sci.* 235, 251–259.
- Sakairi, N., Kobayashi, M., Adachi, Y., 2005. Effects of salt concentration on the yield stress of sodium montmorillonite suspension. *J. Colloid Interface Sci.* 283, 245–250.
- Sohm, R., Tadros, Th.F., 1989. Viscoelastic properties of sodium montmorillonite (Gelwhite H) suspensions. *J. Colloid Interface Sci.* 132, 62–71.
- Tombácz, E., Szekeres, M., 2004. Colloidal behavior of aqueous montmorillonite suspensions: the specific role of pH in the presence of indifferent electrolytes. *Appl. Clay Sci.* 27, 75–94.
- Tsamantaki, C., Kelessidis, V.C., Dalamarinis, P., Mpandelis, G.E., 2006. Static and dynamic yield stress of water–bentonite suspensions. In: Agioutantis, Z., Exadaktylos, G. (Eds.), Paper presented at the AMIREG 2006 Conference, Chania, Greece, Sept. 25–27.
- van Damme, H., Levitz, P., Fripiat, J.J., Alcover, J.F., Gatineau, L., Bergaya, F., 1985. In: Boccata, N., Daoud, M. (Eds.), *Physics of Finely Divided Matter*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 24–30.
- van Olphen, H., 1977. *Introduction to Clay Colloidal Chemistry*, 2nd ed. Wiley, New York.
- Yildiz, N., Sarikaya, Y., Calimli, A., 1999. The effect of electrolyte concentration and pH on the rheological properties of the original and the Na₂CO₃ activated Kutahya bentonite. *Appl. Clay Sci.* 14, 319–327.
- Yoshimura, A.S., Prud'Homme, R.K., Princen, H.M., Kiss, A.D., 1988. A comparison of techniques for measuring yield stresses. *J. Rheol.* 31, 699–710.
- Zhang, L.M., Yin, D.Y., 2002. Preparation of a new lignosulfonate-based thinner: introduction of ferrous ions. *Colloids Surf., A Physicochem. Eng. Asp.* 210, 13–21.



MINERAL WEALTH

ISSN 0253 - 9462

THE QUARTERLY PUBLICATION OF THE SCIENTIFIC SOCIETY OF THE MINERAL WEALTH TECHNOLOGISTS

JULY - SEPTEMBER 2007

No 144

OWNER

THE SCIENTIFIC SOCIETY OF THE
MINERAL WEALTH TECHNOLOGISTS

BOARD OF DIRECTORS

G. CANELLOPOULOS	President
N. APOSTOLIDIS	General Secretary
K. PAPANIKOLAOU	Treasurer
G. ANASTASSAKIS	Member
R. LIVADAROS	Member

EDITOR

GEORGIOS ANASTASSAKIS
4, MAGNESIAS STR., GR 112 51 ATHENS

DIRECTOR

G. CANELLOPOULOS

EDITOR'S COMMITTEE

C. SAKKAS
N. APOSTOLIDIS
A. KELEPERTSIS

ADDRESS

4, MAGNESIAS STR., GR 112 51 ATHENS
TEL./FAX: 210 8234695
TEL.: 210 8643649 - 210 6201561
E-mail: info@eetop.gr
CODE: 1521

PRINTED BY

SPECTRUM GRAPHIC ARTS LTD
43-49 ATHINAS STR., KALLITHEA, TEL.: 9411040

SUBSCRIPTION RATES INLAND

	€
Individuals	30,00
Students	15,00
Private and other companies	40,00
Organizations, Banks, S.A.	60,00
Price per copy	10,00

SUBSCRIPTION RATES ABROAD US \$ €

Individuals	115,00	100,00
Companies	220,00	200,00

• The scientific articles published in "Mineral Wealth" have been approved by the magazine's "Review Committee" that is composed of eminent greek and foreign scientists of high prestige.

• The articles express the writers' views.

• Original articles, published or not, are not returnable to the writers.

• Material published in "Mineral Wealth" may not be reproduced without prior permission from "M.W."

TABLE OF CONTENTS

	Page
- EDITORIAL	4
- M. MIGIROU, D. ROZOS <i>Origin and geomechanical behaviour of the terrestrial Neogene formations from Thiva and Dervenochoria sites (Greece)</i>	7
- N.-M.P. KAKALIS <i>Feasibility issues in model-based process control</i>	23
- V. KELESSIDIS, C. TSAMANTAKI, P. DALAMARINIS, E. REPOUSKOU, E. TOMBACZ <i>Influence of electrolyte concentration on rheological properties of Zenith and Wyoming Bentonite - water suspensions</i>	31
- O.A. OKUNLOLA, A.I. AKINTOLA, R.O. EGBEYEMI <i>Geological setting, petrochemistry and petrogenetic affinity of Precambrian amphibolite of Lema-Ndeji area, central Nigeria</i>	47
- Z. AGIOUTANTIS <i>International Mining Review</i>	56
- CH. TOMPOULOGLLOU <i>Monitoring of innovation trends</i>	61
- News	65
- Letters	69

Cover illustration:

Phodochrosite - quartz
from Chalkidiki, Greece
(N. Albantakis' collection).

ΙΔΙΟΚΤΗΤΗΣΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΩΝ ΟΡΥΚΤΟΥ ΠΛΟΥΤΟΥ**ΔΙΟΙΚΟΥΣΑ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

Γ. ΚΑΝΕΛΟΠΟΥΛΟΣ	Πρόεδρος
Ν. ΑΠΟΣΤΟΛΙΔΗΣ	Γ. Γραμματέας
Κ. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ	Ταμίας
Γ. ΑΝΑΣΤΑΣΑΚΗΣ	Μέλος
Ρ. ΛΕΙΒΑΔΑΡΟΣ	Μέλος

ΕΚΔΟΤΗΣΓΕΩΡΓΙΟΣ ΑΝΑΣΤΑΣΑΚΗΣ
ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ 4, 112 51 ΑΘΗΝΑ**ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ**

Γ. ΚΑΝΕΛΟΠΟΥΛΟΣ

ΣΥΝΤΑΚΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗΚ. ΣΑΚΚΑΣ
Ν. ΑΠΟΣΤΟΛΙΔΗΣ
Α. ΚΕΛΕΠΕΡΤΖΗΣ**ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ**ΜΑΓΝΗΣΙΑΣ 4, 112 51 ΑΘΗΝΑ
ΤΗΛ./FAX: 210 8234695
ΤΗΛ.: 210 8643649 - 210 6201561
E-mail: info@eetop.gr
ΚΩΔΙΚΟΣ: 1521**ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΤΥΠΟΓΡΑΦΕΙΟΥ**ΣΠΕΚΤΡΟΥΜ ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΤΕΧΝΕΣ Ε.Π.Ε.
ΑΘΗΝΑΣ 43-49, ΚΑΛΛΙΘΕΑ, ΤΗΛ.: 9411040**ΣΥΝΔΡΟΜΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ**

	€
Ιδιώτες	30,00
Φοιτητές	15,00
Προσωπικές Εταιρίες, ΕΠΕ κ.λπ.	40,00
Ανώνυμες Εταιρίες, Τράπεζες,	
Οργανισμοί κ.λπ.	60,00
Τιμή τεύχους	10,00

ΣΥΝΔΡΟΜΕΣ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ

	US \$	€
Ιδιώτες	115,00	100,00
Εταιρίες	220,00	200,00

• Οι δημοσιευόμενες επιστημονικές εργασίες έχουν εγκριθεί από την "Review Committee" του Ο.Π. που αποτελείται από διακεκριμένους και αδιαμφισβήτητου κύρους Έλληνες και ξένους επιστήμονες.

• Τα άρθρα εκφράζουν τις απόψεις των συγγραφέων.

• Πρωτότυπα εργασιών, δημοσιευμένων ή μη, δεν επιστρέφονται στους συγγραφείς.

• Δεν επιτρέπεται καμία αναδημοσίευση από τον «ΟΡΥΚΤΟ ΠΛΟΥΤΟ» χωρίς την προηγούμενη γραπτή άδεια του περιοδικού.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
– ΑΠΟΨΕΙΣ	5
– Μ. ΜΙΓΚΙΡΟΥ, Δ. ΡΟΖΟΣ Προέλευση και γεωμηχανική συμπεριφορά των χερσαίων Νεογενών σχηματισμών περιοχής Θηβών - Δερβενοχω- ρίων	7
– Ν.-Μ.Π. ΚΑΚΑΛΗΣ Θέματα εφικτότητας σε συστήματα ρύθμισης προβλεπτι- κού μοντέλου	23
– Β. ΚΕΛΕΣΙΔΗΣ, Κ. ΤΣΑΜΑΝΤΑΚΗ, Π. ΔΑΛΑΜΑΡΙΝΗΣ, Ε. ΡΕΠΟΥΣΚΟΥ, Ε. ΤΟΜΒΑΤΖ Επίδραση της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη στις ρεολο- γικές ιδιότητες των αιωρημάτων μπεντονίτη των περιοχών Zenith και Wyoming	31
– Ο.Α. ΟΚΥΝΛΟΛΑ, Α.Ι. ΑΚΙΝΤΟΛΑ, Ρ.Ο. ΕΓΒΕΥΕΜΙ Γεωλογική διάταξη, πετροχημεία και πετρογενετική συγ- γένεια των αμφιβολιτών του Προκαμβρίου της περιοχής Lema-Ndeji, κεντρική Νιγηρία	47
– Ζ. ΑΠΟΥΤΑΝΤΗΣ Τα περιοδικά του κλάδου στον κόσμο γράφουν	56
– Χ. ΤΟΜΠΟΥΛΟΓΛΟΥ Νέες τεχνολογίες	61
– Μικρά ενημερωτικά	65
– Γράμματα	69

Εικόνα εξωφύλλου:
Ροδοχρωσίτης - χαλαζίας Χαλκιδικής
(Συλλογή Ν. Αλμπαντάκη).

INFLUENCE OF ELECTROLYTE
CONCENTRATION ON
RHEOLOGICAL PROPERTIES OF
ZENITH AND WYOMING
BENTONITE-WATER SUSPENSIONS

VASSILIOS C. KELESSIDIS¹,
C. TSAMANTAKI¹, P. DALAMARINIS¹,
E. REPOUSKOU¹, E. TOMBACZ²

ABSTRACT

The influence of electrolyte (NaCl) concentration on the rheological properties of water-bentonite suspensions has been investigated using Zenith and Wyoming bentonites at 5.0% and 6.42 %wt concentrations and three electrolyte concentrations of 0.0 M, 0.01 M and 0.1 M. The rheological data was fitted to Bingham plastic and to Herschel-Bulkley model. The latter fitted the data extremely well for all samples tested, while the former did not provide good correlation coefficients. Wyoming-bentonite suspensions gave shear stress values which decrease with increasing electrolyte concentration indicating flocculation and resulted in monotonic decrease of the yield stress and the flow consistency index with increasing electrolyte concentration, while the flow

behavior index showed an increasing trend. Zenith-bentonite suspensions gave maximum shear stress values at 0.01 M salt concentration thus showing a maximum on the yield stress and on the flow consistency index while the flow behavior index exhibited an opposite behavior to the flow consistency index. An equation predicting yield stress as function of the ionic strength of the dispersing medium and of clay concentration has been used but solution was found only for one salt concentration, 0.01 M, with values giving opposite trend from measurements thus indicating further research into the subject.

Keywords: bentonite suspension, rheology, effect of salt, Zenith, Wyoming, Herschel-Bulkley, Bingham plastic.

Introduction

Aqueous bentonite suspensions have many and differing applications in a variety of industries such as oil-well, geothermal and water-well drilling, wastewater treatment, ceramics, cement, moulding sands, paint and paper. They are also used as thixo-

tropic fluids in wall and road construction, in grouting and tunneling, as sealants in landfill, as binders for iron-pellet preparation, as adsorbing material in hygiene sand for cat litter.

Water bentonite suspensions have strong colloidal properties and increase the viscosity of the dispersing medium. They behave as non-Newtonian fluids when sheared while under certain circumstances have the unique ability to gel when not sheared. It is this property that makes bentonite valuable to drilling industry because the suspension can support and transfer rock cuttings from the bot-

¹ Dept. Mineral Resources Engineering, Technical University of Crete, Greece

² Dept. of Colloidal Chemistry, Univ. of Szeged, Hungary
MINERAL WEALTH, accepted for publication

* Corresponding author: Polytechnic City, 73100 Chania,
kelesidi@mred.tuc.gr, Tel: +30-28210-37621.

tom of the hole to the surface. In addition, bentonite reduces water loss into permeable formations by forming a filter cake of very low permeability on the walls of the borehole.

Significant research has been performed in the past to study the rheological behavior of bentonite suspensions but the research community does not have full understanding of the mechanism of viscosity and gel generation when bentonite is added in water. After the necessary period of hydration of bentonite particles, the rheology of bentonite suspensions depends among other things on bentonite concentration, the presence of ions and in particular electrolytes, temperature and pH of the suspension.

The transition between stable colloidal dispersions and coagulated, or flocculated, systems is a decisive process in practical applications of millions of tons of bentonite used but there is still no clear understanding of the mechanisms of gelation of bentonite suspensions. Gelation is a process by which individual flocks, or aggregates, form a network transforming the liquid into a gel that upon very soft movement (very low shear) behaves like a solid which at room temperature occurs at sodium montmorillonite concentrations of 1 to 3% wt (Luckham and Rossi, 1999; Abend and Lagaly, 2000). The presence of electrolytes in the suspension, particularly salts, promotes gelation. If the suspension forms a gel, a certain force (shear stress) is required to force the suspension to flow and the stress at which this happens is called the yield stress of the fluid.

Many researchers postulate that gelation results from edge-to-face particle interaction, shown in Fig. 1a (vanOlphen, 1977; Benna et al., 1999; Luckham and Rossi, 1999; Duran et al., 2000). Lagaly and Ziesmer (2003) suggest that coagulation is initiated by negative-edge-to-negative-edge association (Fig. 1b). Others postulate band type aggregate models as the mechanism of gelation which results from face-to-face association, as depicted in Fig. 1c (Norrish, 1954; Callahan and Ottewill, 1974;

Luckham and Rossi, 1999). Edge-to-face or edge-to-edge association leads to card-house like structures while face-to-face association leads to thicker and larger flakes. There are reports that the strongest structures are formed when there is attraction between positively charged edges and negatively charged faces (Sakairi et al., 2005). It should be noted that for drilling fluids, pH is alkaline, normally higher than 8.0, well above the isoelectric point of the suspensions which ranges between pH of 5.0 up to pH of 7.0 (Benna et al., 1999; Abend and Lagaly, 2000; Duran et al., 2000) and therefore positive-edge-to-negative-face association cannot occur.

M'bodj et al. (2004) reported that pictures of scanning electron microscope (SEM) reveal a system of lenticular pores thus not confirming any association of edge-to-face. Similar systems of this type of pores created by association of bentonite particles of aqueous suspensions have been revealed by SEM pictures of filter cakes created with Zenith and Wyoming bentonites with an API filter press for 6.42% bentonite concentration in deionized water and reproduced here in Figure 2.

Addition of salt affects rheological properties of bentonite suspensions. Luckham and Rossi (1999) indicate that small amounts of NaCl decrease both the yield value and the plastic viscosity. With higher amounts of NaCl there is a gradual increase of both yield stress and plastic viscosity and this is attributed to electrostatic particle interaction. At very high salt concentrations, yield stress tends to decrease because of face-to-face association and formation of thicker particles, i.e. aggregation, reducing the number of links within the clay structure. Miano and Rabaioli (1994) also found that with an increase in electrolyte content there was transition from edge-to-face into face-to-face association. One could question, however, the association between negatively charged particles for the suggested face-to-face association or similarly between edge-to-face association at alkaline pH, where the edges are known to be negatively charged, a question also

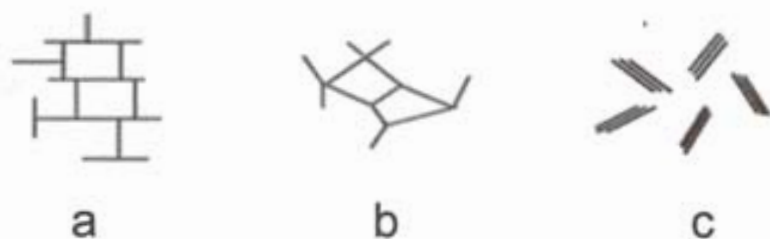


FIGURE 1: Modes of particle association in clay suspensions: a) edge-to face (card-house), b) edge-to-edge and c) face-to-face (adapted from Luckham and Rossi, 1999).

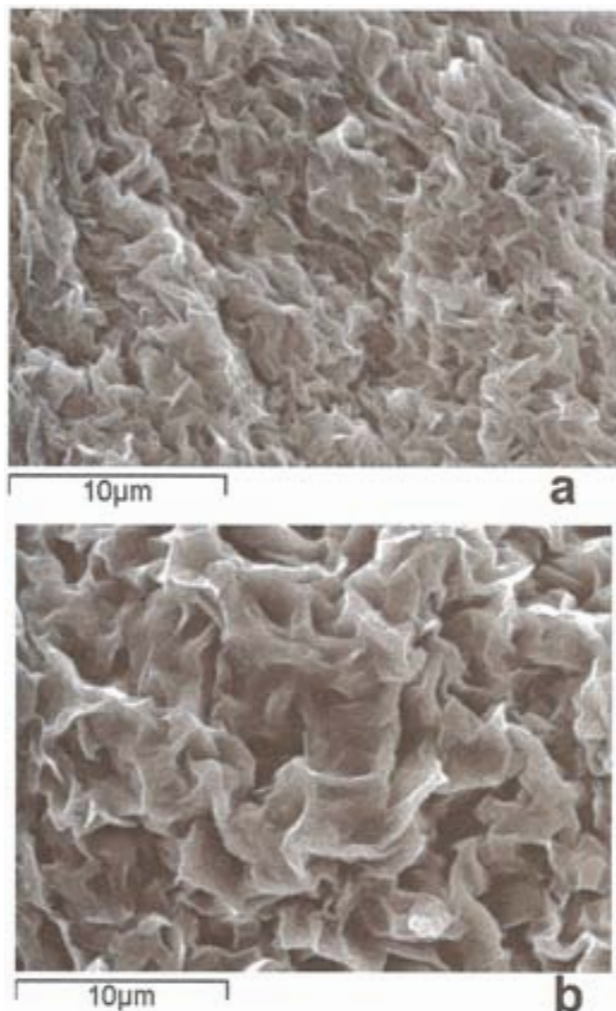


FIGURE 2: SEM pictures of API filter cake of bentonite suspensions. a) 6.42% Zenith, b) 6.42% Wyoming (from Kelessidis et al., 2007).

posed by Tombacz and Szekeres (2004).

Abend and Lagaly (2000) found that both plastic viscosity and yield stress, which were determined at high shear rates ($\dot{\gamma} \rightarrow 1000 \text{ s}^{-1}$) and not from the extension of the full flow curve, decreased to a minimum at low NaCl concentrations and then increased at salt concentrations between 0.02 M to 0.1 M, with the results showing signs of decrease at very high salt concentrations.

M'Bodj et al. (2004) found a continuous increase of the yield stress, measured by the vane technique (Alderman et al., 1991), of 5% bentonite suspension of smectite with 15% illite, up to a salt (NaCl) concentration of 0.112 M and then measured a sharp decrease followed by a continuous decrease up to the maximum NaCl concentration used of 0.381 M. Sakairi et al. (2005) found a decrease in the yield stress, measured also by the vane technique, with

increasing salt concentration, for concentrations varying between 10^{-5} M to 10^{-2} M NaCl using commercial bentonite, for concentrations between 0.6 to 2%.

The concentration of bentonite in water suspensions varies and it may range between 3 to 7% for formulation of drilling fluids (Gray and Darley, 1980; Bourgoyne et al., 1991). The quantities of bentonite used in the drilling industry account for more than 15% of total amount produced worldwide, while in US only, use of bentonite for oil-well drilling accounted for 24% for 2003 (USGS, 2005). The most significant producer worldwide is USA with Greece coming second (SAMI, 2004). Leading brands from the two countries are the Wyoming bentonite from USA, a naturally occurring Na^+ - montmorillonite and the Zenith bentonite from Greece, a Ca^{++} - montmorillonite which is treated and converted to Na^+ - montmorillonite for use in oil-well drilling fluids. Bentonite clays in fresh water are very effective drilling fluids but many times, the drilling fluids are exposed to saline conditions in the wellbore and the high salt concentrations encountered disrupt their good performance. Formation water salinities have been reported to range between 0.05 M and 1.0 M (Gray and Darley, 1980; Argillier et al., 1999). Hence it is imperative to study the effects of electrolytes and in particular NaCl on the rheological properties of bentonite suspensions.

It is the purpose of this work to investigate the effect of salt (NaCl) on the rheological properties of water - bentonite suspensions using the Wyoming and Zenith bentonites and attempt to describe the differences among the results obtained.

Experimental methodology

Bentonite-aqueous suspensions with or without electrolyte were prepared using Zenith bentonite, supplied kindly by S&B Industrial Minerals S.A. and Wyoming bentonite, supplied kindly by Halliburton-Cebo Holland. The particle size distribution of the two bentonites ranged between 1 to 10 microns for both bentonites. The influence of electrolyte (NaCl) concentration on the rheological parameters was examined for both bentonite types at two concentrations, namely, 5.0% wt. (g bentonite per 100 g water) and 6.42% wt. in aqueous electrolyte solutions of concentrations of 0.0 M, 0.01 M and 0.1 M. The suspensions were prepared according to American Petroleum Institute preparation procedures (API, 1993; API, 2000) and left for 16 hours for full hydra-

tion. Prior to rheological measurements, the sample was stirred for 5 minutes in the high speed mixer and the pH value of the suspension was measured with an Inolab pH meter. The rheological properties were measured with a continuously varying rotational speed Grace M3500a concentric viscometer, with $R_1 = 17.245 \text{ mm}$ and $R_2 = 19.00 \text{ mm}$, at 600, 300, 200, 100, 6 and 3 rpm, and room temperature. Shearing at each rate lasted one minute taking six measurements during this time (one measurement every 10 seconds), and averaging the measurements.

Rheological data were fitted to the Bingham plastic model (Bingham, 1922).

$$\tau = \tau_B + \mu_p \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

where τ is the measured shear stress and $\dot{\gamma}$ is the imposed shear rate with the two rheological parameters, the Bingham yield stress (τ_B) and the plastic viscosity (μ_p). The data was also fitted to the Herschel-Bulkley model (Herschel-Bulkley, 1926)

$$\tau = \tau_{HB} + K(\dot{\gamma})^n \quad (2)$$

with the three rheological parameters, the Herschel-Bulkley yield stress (τ_{HB}), the flow consistency index (K) and the flow behavior index (n). The Herschel-Bulkley model has not been used widely in the past, but it describes many real clay suspensions much better than the Bingham plastic model (Fordham et al., 1991; Hemphill et al., 1993; Maglione et al., 2000; Kelessidis et al., 2005; Laribi et al., 2006) and it becomes the rheological model of choice for oil-well drilling industry (Power and Zamora, 2003; Kelessidis et al., 2006).

Experimental Results

The flow curves of these suspensions are shown in Figure 3 for the two concentrations. Linear regression to the experimental data gave the Bingham plastic rheological parameters while non-linear regression gave the Herschel-Bulkley rheological parameters, all shown in Table A1. Also shown are the natural pH values of the suspensions and the two indicators of the goodness of fit, the correlation coefficient R_c^2 and the sum of square errors between predicted and measured shear stress values, $\sum Q^2$.

TABLE A1: Zenith bentonite

a) Rheological parameters of the Bingham plastic model for 5.0% wt

Bingham Plastic					
Electrolyte concentration	pH	$\tau_y \text{ (Pa)}$	$\mu_p \text{ (cP)}$	R_c^2	$\sum Q^2 \text{ (Pa}^2\text{)}$
0.00 M	9.55	7.627	6.1	0.9175	2.4724
0.01 M	9.39	10.951	5.4	0.9286	1.6993
0.1 M	8.74	6.928	6.3	0.9651	1.0737

b) Rheological parameters of the Bingham plastic model for 6.42% wt

Bingham Plastic					
Electrolyte concentration	pH	$\tau_y \text{ (Pa)}$	$\mu_p \text{ (cP)}$	R_c^2	$\sum Q^2 \text{ (Pa}^2\text{)}$
0.00 M	9.64	17.178	7.9	0.9143	4.2964
0.01 M	9.41	29.421	7.0	0.8337	7.2996
0.1 M	8.83	15.589	8.3	0.9139	4.7772

c) Rheological parameters of the Herschel-Bulkley model for 5.0% wt

Herschel-Bulkley						
Electrolyte concentration	pH	$\tau_y \text{ (Pa)}$	$K \text{ (Pa} \cdot \text{s}^{2-n}\text{)}$	n	R_c^2	$\sum Q^2 \text{ (Pa}^2\text{)}$
0.00 M	9.55	6.433	0.2278	0.4904	0.9979	0.0637
0.01 M	9.39	10.220	0.1015	0.5857	0.9810	0.4502
0.1 M	8.74	6.286	0.0744	0.6493	0.9986	0.0444

d) Rheological parameters of the Herschel-Bulkley model for 6.42% wt

Herschel-Bulkley						
Electrolyte concentration	pH	$\tau_y \text{ (Pa)}$	$K \text{ (Pa} \cdot \text{s}^{2-n}\text{)}$	n	R_c^2	$\sum Q^2 \text{ (Pa}^2\text{)}$
0.00 M	9.64	15.680	0.2805	0.4968	0.9927	0.3652
0.01 M	9.41	26.290	1.1710	0.2990	0.9782	0.9586
0.1 M	8.83	13.940	0.2973	0.4998	0.9989	0.0628

One can observe a slight decrease of pH values of the suspensions with increasing salt concentration. The Bingham plastic model does not fit the data well giving low correlation coefficients and high sum of square errors. The Herschel-Bulkley model gives a near perfect fit for the 0.0 M and 0.1 M salt concentrations and a less than perfect but still very good fit for the 0.01 M salt concentration, at both bentonite concentrations. It is therefore evident that the Herschel-Bulkley model exhibits a much better fitting behavior than the Bingham plastic model, and this result renders it to be considered a very good representation of the rheology of these suspensions.

The apparent viscosity of the suspensions is defined by

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3)$$

and for non-Newtonian fluids depends on the shear rate. The variation of the apparent viscosity with shear rate is shown in Figure 4 for the the two concentrations of Zenith bentonite at different salt concentrations.

It is evident from the rheograms and the apparent viscosity plots that all samples tested show typical yield pseudoplastic behavior. The rheograms at 0.01

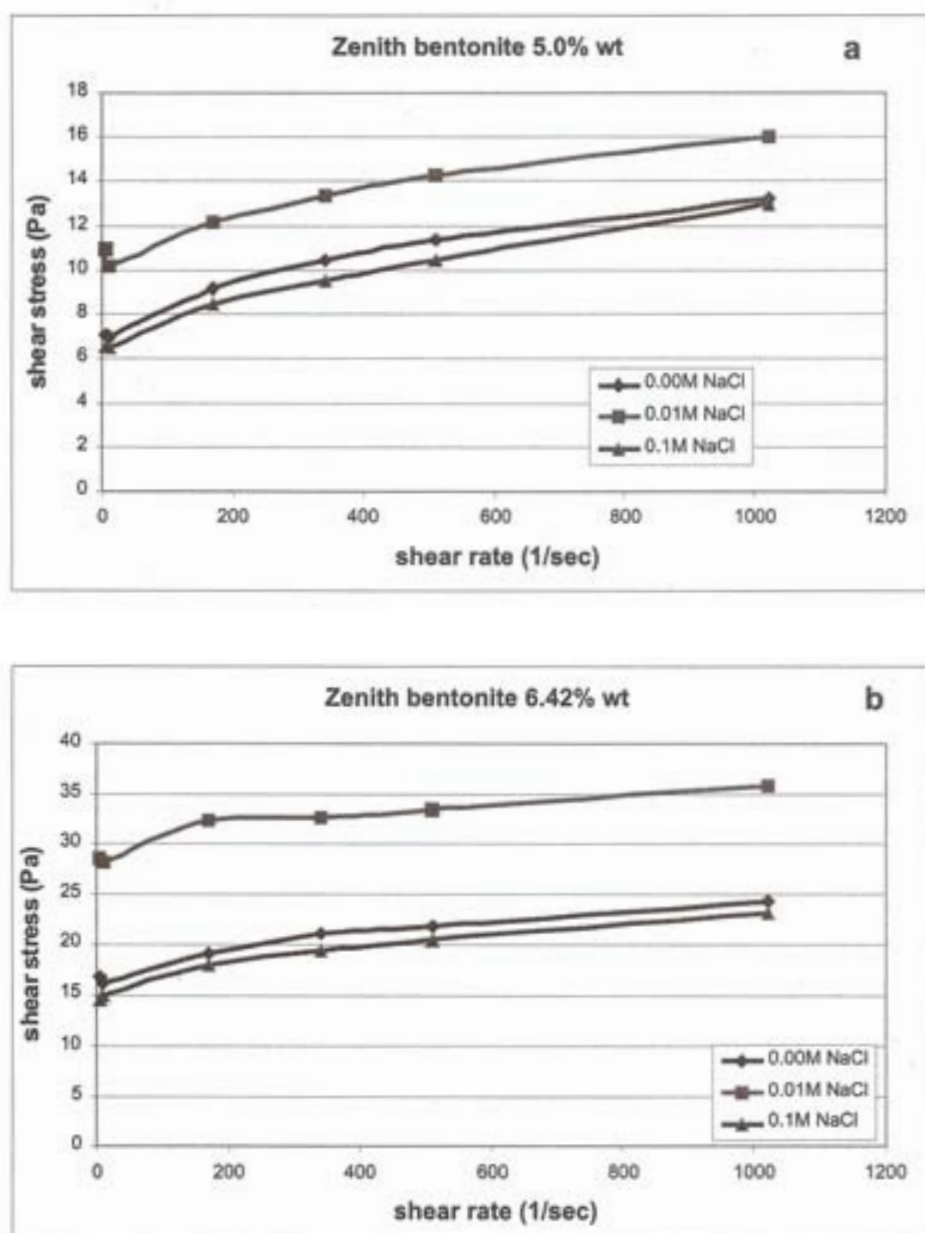


FIGURE 3: Flow behavior of Zenith bentonite suspensions in electrolyte solutions. a) 5.0% wt; b) 6.42% wt.

M NaCl concentration are situated higher than the 0.0 M concentration, while the rheograms at 0.1 M are situated lower than the 0.0 M concentration for both bentonite concentrations. It is very interesting to note that in the suspensions with 0.0 M and 0.1 M, the apparent viscosity is almost the same at all shear rates for both bentonite concentrations. This is not observed, though, for the 0.01 M salt concentration, where the apparent viscosity exhibits a maximum, with the deviation from the 0.0 M and 0.1 M

being larger for the 6.42% bentonite concentration.

The effect of salt concentration on the rheological parameters of the Herschel-Bulkley model is shown in Figure 5a for τ_{HB} , Figure 5b for K and Figure 5c for n .

The yield stress of the fluid, from Bingham plastic or Herschel-Bulkley model, which gives an indication of the association of bentonite particles, exhibits a maximum at 0.01 M NaCl concentration for both bentonite concentrations. The plastic viscos-

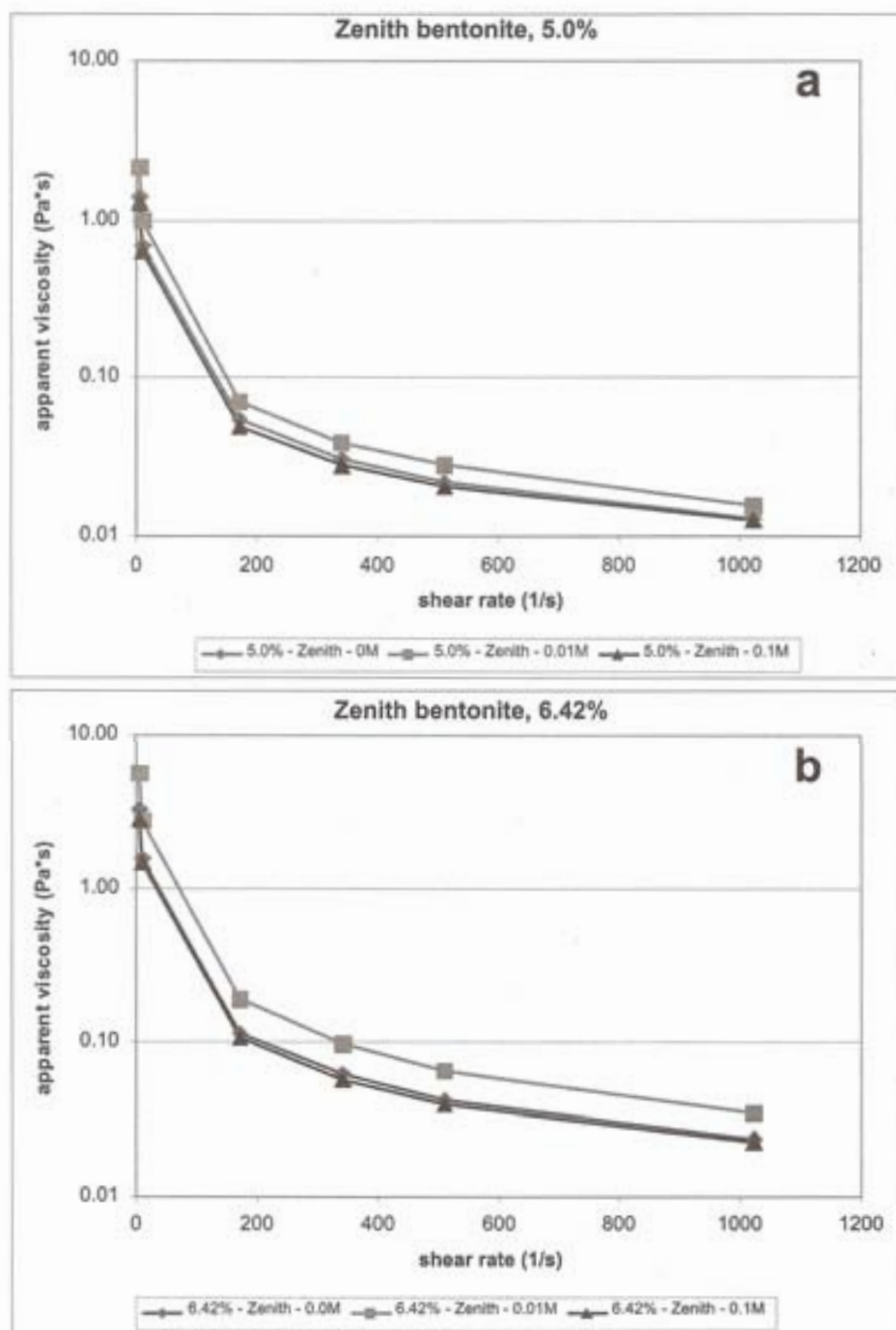


FIGURE 4: Apparent viscosity of Zenith bentonite water suspension at various NaCl concentrations, a) 5.0% wt; b) 6.42% wt.

ity, for both bentonite concentrations, showed also a variation but to a much less extent than the yield stress, exhibiting a minimum at 0.01 M.

The flow consistency index (K), which is more difficult to interpret in terms of colloidal properties because its effect is combined with the flow behavior index (n), exhibits different behavior at the two bentonite concentrations studied. At 5.0%, there is continuous decrease in K with increasing electrolyte concentration while (n) shows a continuous increase, with $n \rightarrow 1$ indicating Newtonian behavior. Hence, as the electrolyte concentration is increased, the fluid becomes less dispersed exhibiting behavior closer to Newtonian. At 6.42% bentonite concentration, (K) shows a maximum at 0.01 M NaCl, while (n) shows a minimum at the same salt concentration, thus following an opposite trend to that of (K), much the same behavior as for the 5.0% bentonite concentration, but giving a different combined effect. In fact, the low value of (n) of 0.3 for 0.01 M shows an extremely non-Newtonian behavior with a very small variation of measured shear stress with shear rate. This indicates more of a solid rather than a liquid, and this is also evidenced by the very high yield value obtained, which is the highest among all samples.

The ratio of τ_B / μ_p for the Bingham plastic model is an index of the quality of bentonite suspensions for characterizing drilling fluids with low values indicating stable suspensions and high values indicating flocculation (Chilingarian et al., 1986; API, 1993). For the suspensions of this study, this ratio ranges between 1:1 to 2:1 (Pa/cP) for the 5.0% bentonite concentration and between 2:1 to 3:1 for the 6.42% bentonite concentration, giving thus small ratios and hence stable suspensions and more importantly, the ratio does not change drastically with salt concentration. In addition, the values of the plastic viscosity are relatively small, similar to the values obtained for other bentonite suspensions from the island of Milos (Christidis and Scott, 1996) and from Kimolos (Christidis, 1998).

The values of the rheological parameters for water suspensions of Wyoming bentonite, for the two rheological models, Bingham plastic and Herschel-Bulkley, are given in Table A2 while the flow curves are shown in Figure 6. From Table A2 it is evident that, overall, the model that describes better the rheological behavior of all Wyoming bentonite electrolyte suspensions is the Herschel-Bulkley model, giving very high correlation coefficients and low sum

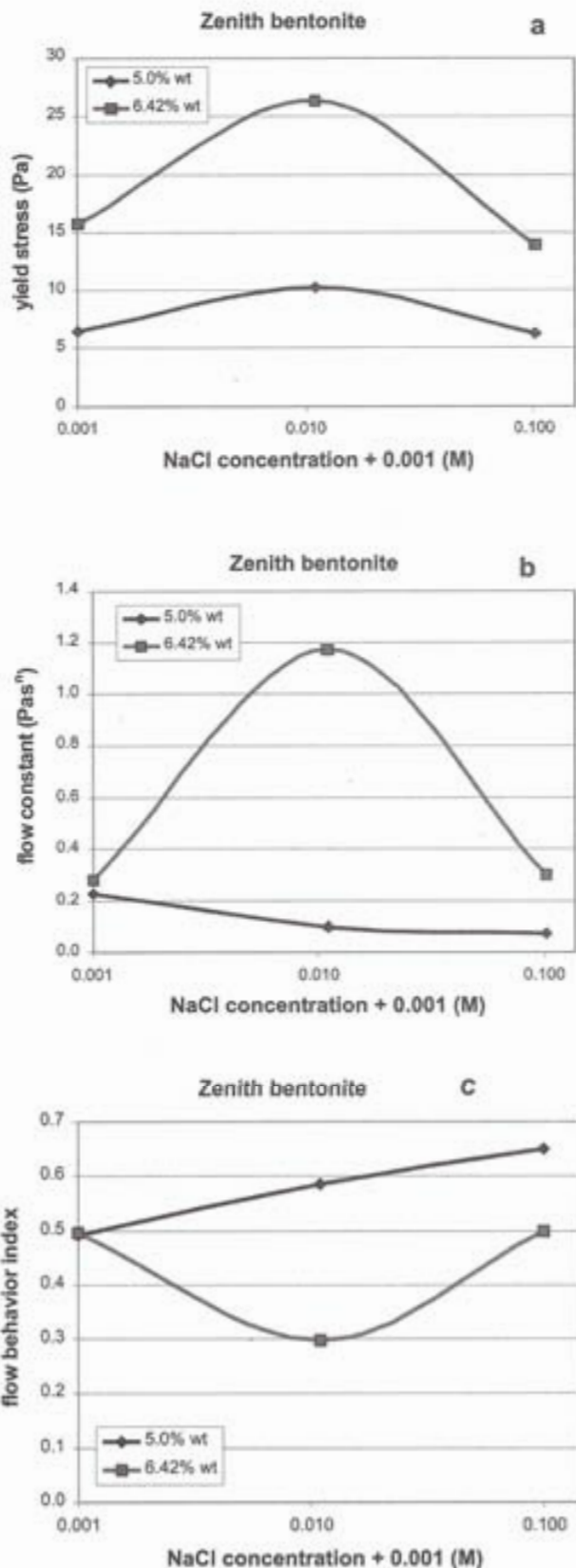


FIGURE 5: Variation of Herschel-Bulkley rheological parameters of Zenith bentonite suspensions in electrolyte solutions. a) yield stress, b) flow consistency index, c) flow behavior index.

of square errors, with the 5.0% bentonite concentration at 0.1M NaCl giving only a Bingham plastic model.

The Bingham plastic model does not give a very good fit for the 0.01 M suspension while it gives a very poor fit for the 0.0 M NaCl. The natural pH values of the Wyoming suspensions are lower than the pH values of the Zenith suspensions probably because the latter is treated and the crystal lattice was dissolved partly in the more alkaline samples.

The rheograms show that the Wyoming bentonite suspensions, for the same solid concentration as the Zenith bentonite suspensions, give about two to three times higher values of the shear stresses than the Zenith suspensions. Furthermore, they behave differently than the Zenith counterparts, in that the rheograms give lower shear stresses as the salt concentration increases, contrary to the Zenith suspensions where a maximum was observed at 0.01 M NaCl. The ratios τ_B/μ_p are about 1:1 for the 5.0% and between 1:1 to 2:1 for the 6.42% bentonite concentration, thus indicating again stable suspensions.

The apparent viscosities of these suspensions are

shown for the different salt concentrations in Figure 7. The graphs in Figure 7 exhibit the yield pseudoplastic behavior of these suspensions with the apparent viscosity continuously decreasing with an increase in shear rate. Furthermore, they show that the apparent viscosity of Wyoming bentonite suspensions at both concentrations decreases as the salt concentration increases, for all shear rates.

The effect of the salt concentration on the rheological parameters of the Herschel-Bulkley model is shown in Figure 8a for τ_{HB} , Figure 8b for K and Figure 8c for n . From Table A2 it is evident that the Bingham plastic yield stress and the plastic viscosity decrease with an increase in electrolyte concentration, showing a typical feature of non-coagulated suspensions. Increasing the ionic strength of the medium the yield stress decreases continuously due to the secondary electroviscous effect which causes a decrease in the thickness of the electric double layer around the bentonite particles decreases. This feature has not been observed for the Zenith bentonite suspensions probably because of the pretreatment to convert it to sodium-

TABLE A2: Wyoming bentonite

a) Rheological parameters of the Bingham plastic model for 5.0% wt

Bingham Plastic					
Electrolyte concentration	pH	τ_y (Pa)	μ_p (cP)	R_c^2	$\sum Q^2$ (Pa ²)
0.00 M	8.79	20.343	21.1	0.9307	24.7463
0.01 M	8.60	14.554	13.9	0.9736	3.8817
0.1 M	8.19	6.597	6.1	0.9987	06.4285

b) Rheological parameters of the Bingham plastic model for 6.42% wt

Bingham Plastic					
Electrolyte concentration	pH	τ_y (Pa)	μ_p (cP)	R_c^2	$\sum Q^2$ (Pa ²)
0.00 M	8.95	32.867	33.9	0.9326	61.7015
0.01 M	8.69	26.723	24.6	0.9717	13.1539
0.1 M	8.14	13.183	7.9	0.9941	0.2806

c) Rheological parameters of the Herschel-Bulkley model for 5.0% wt

Herschel-Bulkley						
Electrolyte concentration	pH	τ_y (Pa)	K (Pa * s ²⁻ⁿ)	n	R_c^2	$\sum Q^2$ (Pa ²)
0.00 M	8.79	16.750	0.6088	0.5258	0.9987	0.4532
0.01 M	8.60	13.450	0.1110	0.7036	0.9977	0.3328
0.1 M	8.19	6.597	0.0061	1.0000	0.9987	06.4258

d) Rheological parameters of the Herschel-Bulkley model for 6.42% wt

Herschel-Bulkley						
Electrolyte concentration	pH	τ_y (Pa)	K (Pa * s ²⁻ⁿ)	n	R_c^2	$\sum Q^2$ (Pa ²)
0.00 M	8.95	27.270	0.9258	0.5330	0.9983	1.5300
0.01 M	8.69	24.620	0.2189	0.6887	0.9980	0.9340
0.1 M	8.14	13.000	0.0166	0.8943	0.9968	0.1517

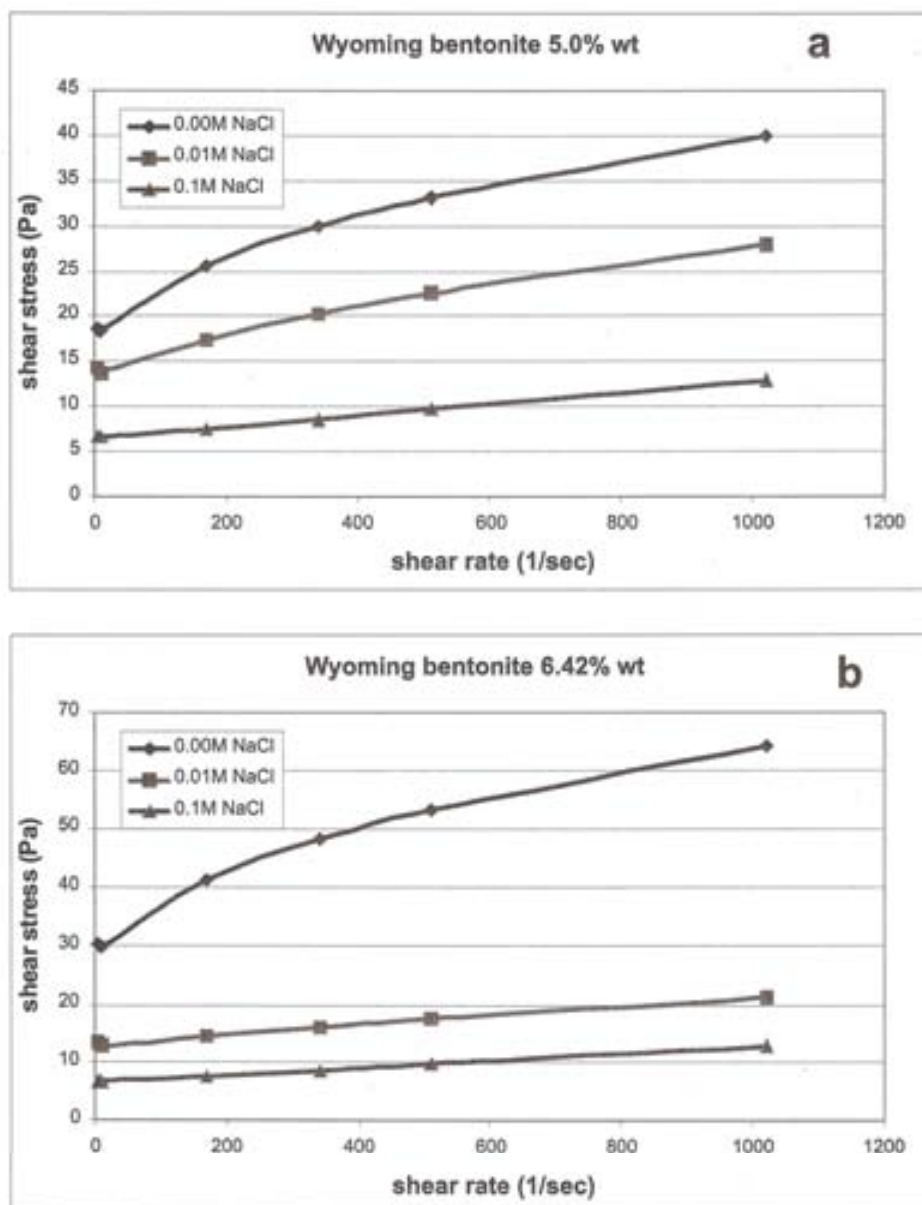


FIGURE 6: Flow behavior of Wyoming bentonite suspensions in electrolyte solutions. a) 5.0% wt, b) 6.42% wt.

montmorillonite.

Similarly for the Herschel-Bulkley rheological parameters (Table A2 and Figure 8), the yield stress and the flow consistency index decrease continuously with increasing salt concentration while the flow behavior index increases for both bentonite concentrations and at 5.0% the fluid behaves as Bingham plastic ($n=1$) while at 6.42% the behavior is close to Newtonian ($n=0.89$). It should be noted that the flow consistency index decreases drastically at 0.01 M at both bentonite concentrations showing a liquefying effect of the 0.01 M NaCl concentration on the Wyoming bentonite suspension.

Discussion

The effects of different inorganic salts on the rheology of bentonite - water suspensions has been investigated previously using Wyoming bentonite (Abend and Lagaly, 2000; Penner and Lagaly, 2001; Tombacz and Szekeres, 2004) and bentonite from Milos, although not specifically the Zenith type (Abend and Lagaly, 2000).

The continuous decrease of the values of the rheological parameters observed with Wyoming bentonite, both at 5.0% and 6.42% probably indicate that the minimum on the yield stress, followed by a maximum, which is normally observed when adding salts to the suspension (Abend and Lagaly,

2000), has not been reached at these high bentonite concentrations and thus higher salt concentrations are needed in order to achieve this minimum. On the contrary, the Zenith suspensions showed maximum yield stress values at 0.01 M NaCl and no minimum was observed, as was the case reported by Abend and Lagaly for the Milos bentonite (Prassa deposit), tested at 2% bentonite concentration. The

plastic viscosity of the Zenith bentonite suspensions showed a minimum versus the electrolyte concentration at 0.01 M as observed by Abend and Lagaly (2000).

Yildiz et al. (1999) have reported that for a 4% Ca-bentonite from Turkey, activated by Na_2CO_3 and converted to sodium-bentonite, the rheological properties decreased for up to 0.005 M NaCl, then

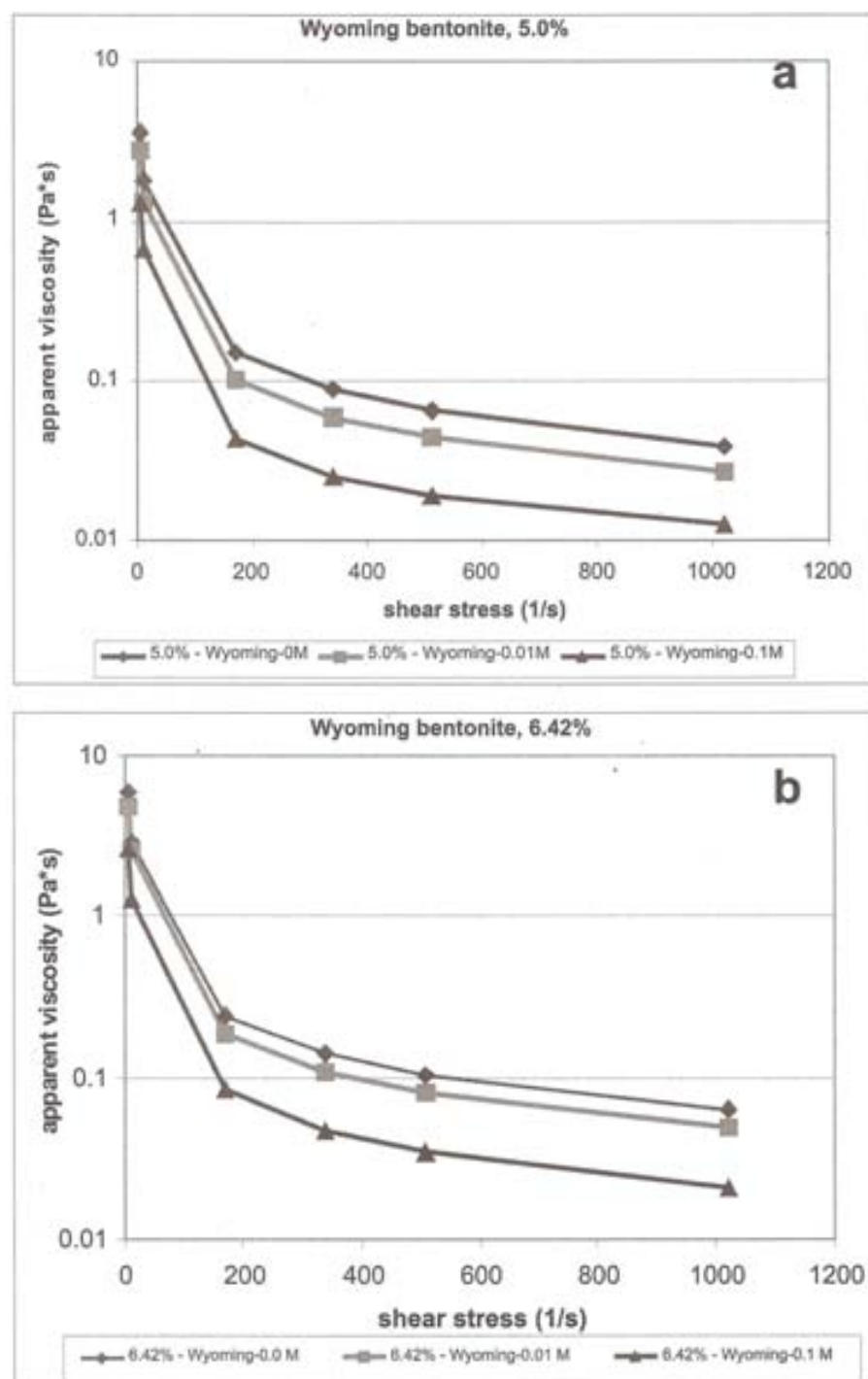


FIGURE 7: Apparent viscosities of Wyoming bentonite water suspensions at various NaCl concentrations. a) 5.0% wt, b) 6.42 % wt.

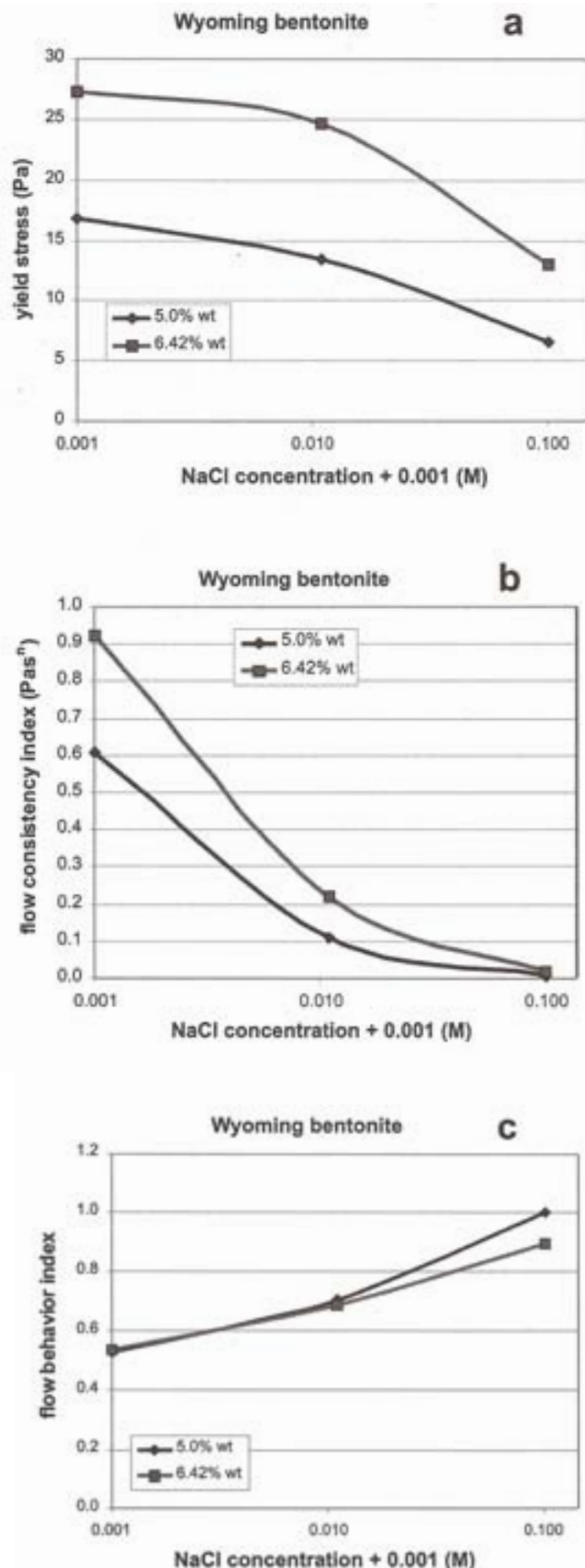


FIGURE 8: Rheological parameters of Wyoming bentonite suspensions in electrolyte solutions. a) yield stress, b) flow consistency index, c) flow behavior index.

increased for up to 0.085 M NaCl. It should be noted though that their rheological parameter values were derived only from the linear part of the rheogram ignoring the full curve.

Krusteva et al. (1999) studied the effect of NaCl on 6% Bulgarian bentonite - water suspensions at four different NaCl concentrations (2.05 M, 0.63 M, 0.33 M and 0.034 M) with results showing a small effect of the electrolyte for the concentrations between 2.05 and 0.63 M on the apparent viscosity for a range of shear rates, similar to the results obtained in this study for the 5.0% Zenith bentonite - water suspensions.

Penner and Lagaly (2001) found that the apparent viscosity of 2% Wyoming bentonite suspension, evaluated though at 120 s⁻¹ shear rate, showed a minimum at NaCl of 0.016 M and a sharp increase for NaCl greater than 0.016 M up to 0.2 M.

Ramos-Tejada et al. (2001) found that the yield stress of various concentrations of Spanish bentonite-water suspensions, ranging from 5 to 10%, shows a maximum at 0.01 M NaCl concentration, of the three concentrations studied (0.001 M, 0.01 M and 0.1 M) as is the case of Zenith bentonite in this study, even though the pH of the suspension was 5.0 which is on the acidic range compared to the study performed in this work.

Tombacz and Szekeres (2004) have postulated that with two different Wyoming bentonites, tested at 4% bentonite concentration, the isoelectric point of the suspensions was at pH of 6.5. They have further postulated that edge-to-face coagulation takes place at acidic pH (pH=4.0) at 0.025 to 0.026 M NaCl concentration, while edge-to-face attraction is induced at approximately 0.05 M NaCl for pH at the isoelectric point. At pH in the range of 8.0 to 8.5, the overall interaction among the bentonite particles is repulsion between uniformly charged particles at dilute NaCl concentrations (less than 0.1 M). At higher than 0.1 M NaCl concentrations, they interpret their results with the formation of face-to-face aggregates and concluded that the pH of the suspension is a decisive factor for the way bentonites particles interact.

Laribi et al. (2006) observed no differences on the yield stress and the plastic viscosity at 0.1 M NaCl, of 10% Wyoming bentonite - water suspension and of 10% Tynisian bentonite (containing 10% illite) - water suspension, maybe because the tested concentrations were much higher than either the concentrations used in this study or previous work.

The effect of the salt on the rheological parameters of the suspensions studied in this work is similar to results reported by some investigators and different to results from other investigators. The observed variations among all reported data should be a direct result of the different raw material used but also, and maybe more importantly, on the fact that not all studies have followed the same preparation procedures, which can affect drastically suspension properties. In this work, adherence was made to API procedures for drilling fluids (API, 2000) which however, is not the case for most of the reported prior work. It is evident, however, based on the work of this study as well as earlier work, that addition of salt influences the rheological parameters of the suspensions of both bentonite types and at both concentrations studied. It is the magnitude of the effect that is different among different studies and depends not only on the bentonite type used but also on the preparation procedures.

Several theoretical attempts have been reported to relate microscopic parameters of colloid suspensions of sodium montmorillonite to macroscopic properties and more particularly to the yield stress by relating it to particle-to-particle interaction potential. Recently, Sakari et al. (2005), using Gouy-Chapman theory to estimate the repulsion between two plates, have proposed that the yield stress could be related to the volume fraction of the particles and to the ionic strength of the medium by,

$$\tau_y = 64 \cdot n_0 \cdot k \cdot T \cdot Y_0^2 \cdot \exp \left[\kappa \delta \left(\frac{1}{\phi} - 1 \right) \right] \quad (6)$$

where

n_0 are the moles of electrolyte per liter of the dispersion medium

k is Boltzman constant, which is equal to $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J / K}$

δ is the thickness of the clay particle, taken as

ϕ is the volume fraction of bentonite particles, related to the mean distance d between the particles and to the thickness of the particles by $1nm = 10^{-9} m$

$$\phi = \frac{\delta}{\delta + d} \quad (7)$$

Y_0^2 is a function of the surface potential of the clay particle and is given a value of 0.56, for the case of NaCl electrolyte at 300 K

κ is the reciprocal Debye length, estimated for the case of NaCl electrolyte at 300 K to be $3.29 \cdot 10^9 \cdot \sqrt{n_0} \text{ m}^{-1}$

It should be noted that the Sakairi et al. (2005) equation is with a typographical error with a different sign in the exponential term given in equation (6) above. The same error was repeated in the article of Laxton and Breg (2006).

Obviously the suggested equation holds only for suspensions containing electrolytes and it fails to predict the appearance of yield stress for fresh water suspensions (eqn. 6 gives a zero yield stress for a null salt concentration). Never-the-less, it offers a starting point, at least for identifying the effect of electrolyte concentration on the yield stress of the suspension.

Sakairi et al. (2005) found qualitative agreement of their predictions with measurements of the yield stress of sodium-montmorillonite suspensions with salt concentrations ranging from 10^{-5} M to 10^{-2} M . However, the absolute values were grossly in error with the differences being a function of the electrolyte concentration of the medium. For salt concentrations greater than 10^{-3} M , the model overestimated the yield value from 1 to 1000 times more, while for salt concentrations less than 10^{-3} M , the model under predicted the yield stress with values ranging from 0.1 to 1.0, thus indicating that it can represent fairly well suspensions with electrolyte concentrations around 10^{-3} M .

Laxton and Breg (2006) attempted to modify the equation proposed by Sakairi et al. (2005) by accounting not only electrostatic repulsion forces but also electrostatic attractive forces and related the yield stress to the zeta potential of the suspension, ζ , that can also be measured. They used the experimentally derived values of τ_y and ζ to adjust their model predictions so that in the end their predictions matched well their experimental results making therefore their procedure questionable.

An attempt was made to use equation (6) to predict yield stresses and compare them to the measured values for the suspensions used in this work at different ionic strengths. Equation (6) gives, after taking $\delta = 1nm = 10^{-9} m$ and $T = 300 \text{ K}$ (26.7° C)

$$\tau_y = 1.4838 \cdot 10^{-19} (n_0) \exp \left[3.29 \sqrt{n_0} \left(\frac{1}{\phi} - 1 \right) \right] \quad (8)$$

Hence, values of τ_y can be estimated as functions of the volumetric bentonite concentration, ϕ , and of the ionic strength of the dispersing medium, n_0 .

The behavior of the function given by equation

(8) has been found to be peculiar giving meaningful results of yield stress between 0.1 to 100 Pa, but only over a very narrow range of ϕ and n_0 . Results of the computations for two ionic strengths $n_0 = 0.01$ M and $n_0 = 0.1$ M, the case considered in this work, are shown in Figure 9 for the volumetric concentrations that give meaningful τ_y results. It should be noted that the form of equation (8) shows that for a given volumetric concentration, ϕ , the yield stress continuously increases with an increase in electrolyte concentration, which is contrary to the measurements for Wyoming bentonite suspensions while the Zenith suspensions showed a maximum at 0.01 M, not exhibited by the form of equation (8).

The results show that for 0.01 M NaCl concentration, meaningful yield stress values are predicted for an extremely narrow range of volumetric clay concentrations, between 0.6 to 0.75 %. For the 0.1 M NaCl concentration, the meaningful yield stress values are obtained for a range of volumetric concentrations between 2% and 2.4%. A very low yield stress of 0.042 Pa is estimated for the maximum concentration value of 2.4% which corresponds to approximately 6.42% weight concentration, if the density of the bentonite particles is taken as 2.625 g/cm³. The yield stress of Wyoming bentonite suspension was 13.2 Pa while that of Zenith bentonite suspension was 13.9 Pa. Hence, equation (8) predicted values which are 300 times lower than measurements for both bentonites. This result is contrary to the

result obtained by Sakairi et al. (2005). Thus, additional theoretical work is needed in order to be able to predict macroscopic properties of bentonite suspensions (the yield stress) using microscopic property information and appropriate theories on the interactions among the bentonite particles.

Conclusions

The rheological properties and the effect of salt (NaCl) concentration of Zenith and Wyoming bentonite-water suspensions has been studied at two solid concentrations of 5.0% wt. and 6.42% wt. at the natural pH (within the range of 8.6 to 9.8) of the suspensions. The results show that there is a moderate to significant effect on the yield stress and plastic viscosity, if the rheological model of Bingham plastic is used or the yield stress and the combined effect of the flow consistency and flow behavior indices, if the Herschel-Bulkley model is used. The Herschel-Bulkley model properly fitted all derived data for both bentonites used and for all NaCl concentrations.

For Wyoming bentonite suspensions, there is a monotonic decrease of shear stress values at all shear rates with increasing electrolyte concentration for both bentonite concentrations. This results in monotonic decrease of the yield stress and of the flow consistency index with electrolyte concentration. The flow behavior index shows the opposite trend, with increasing tendency for increasing NaCl

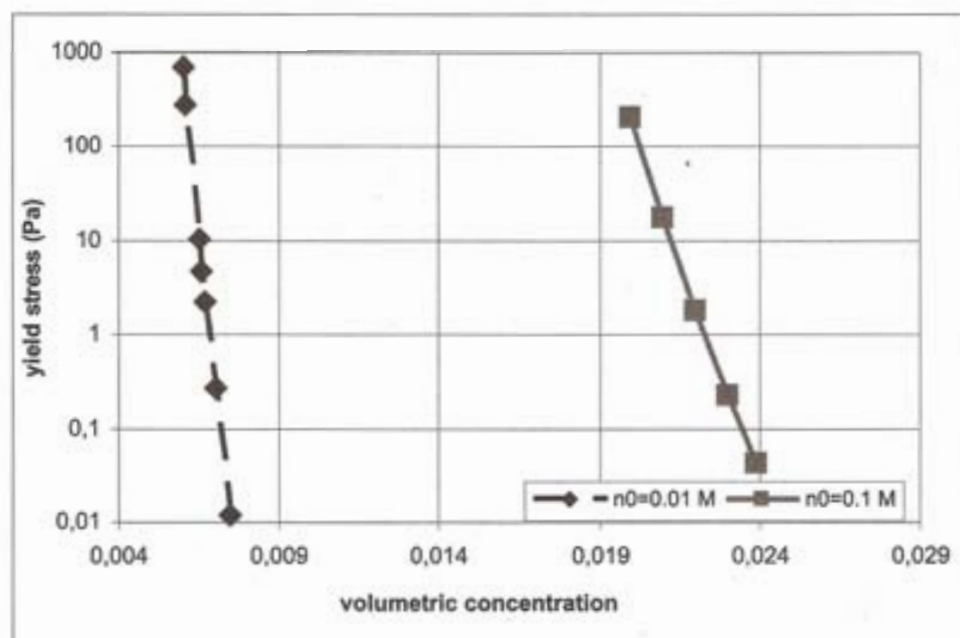


FIGURE 9: Predicted yield stress values at different ionic strengths of bentonite suspensions.

concentration, giving a more Newtonian behavior.

Zenith bentonite suspensions exhibit different behavior and show a maximum of yield stress at 0.01 M, with lower or higher values of the yield stress for salt concentration less than 0.01 M or larger than 0.01 M respectively. The flow consistency index showed similar behavior to the yield stress for the 6.42% bentonite concentration while it decreased with increasing salt concentration at 5.0%. The flow behavior index showed the opposite trend to the behavior of the flow consistency index.

An attempt was made to use a suggested equation which predicts the yield stress from the volumetric concentration of the clay and the ionic strength of the dispersing medium, which in the past has given the correct trends but with very big differences in absolute values. It was found that the equation provides solutions over a very narrow range of volumetric concentration, thus not giving a solution for 0.01 M NaCl concentration while it grossly under predicted the measurements at 0.1 M NaCl, thus necessitating additional work on the subject.

REFERENCES

- ABEND, S., LAGALY, G., 2000. Sol - gel transitions of sodium montmorillonite dispersions. *Appl. Clay Sci.*, 16:201 - 227.
- ALDERMAN, N. J., MEETEN, G. H. and SHERWOOD, J. D., 1991. Vane rheometry of bentonite gels, *J. non-Newtonian Fluid Mech.*, 39, 291-310.
- API, American Petroleum Institute Specifications 13A, 1993. Specification for drilling fluid materials.
- API, American Petroleum Institute Specifications 13I, 2000. Recommended practice standard procedure for laboratory testing drilling fluids.
- ARGILLIER, J. F., AUDIBERT, A. and LONGERON, D., 1999. Performance evaluation and formation damage potential of new water-based drilling formulas, *SPE Drill. and Compl.*, 14 (4), 266-273.
- BENNA, M., KBIR - ARIGUIB, N., MAGNIN, A. and BERGAYA, F., 1999. Effect of pH on rheological properties of purified sodium bentonite suspensions. *Journal of Coll. and Interf. Sci.*, 218: 442 - 455.
- BINGHAM, E. C., FLUIDITY and Plasticity, MCGRAW-HILL, New York, 1922.
- BOURGOYNE, A. T. JR., CHENEVERT, M. E., MILLHEIM, K. K. and YOUNG, F. S. JR., 1991, *Applied Drilling Engineering*, SPE Textbook Series, Vol. 2.
- CALLAHAN, I. C. and OTTEWILL, R. H., 1974. Interparticle forces in montmorillonite gels. *Disc. Faraday Soc.*, 57:110 - 118.
- CHILINGARIAN, G. V., ALP, E., CAENN, R., AL-SALEM, M., USLU, S., GONZALES, S., DOROV, R., MATHUR, R. M. and YEN, T.F., 1986, Drilling fluid evaluation using yield point - plastic viscosity correlation, *Energy Sources*, 8, 233-244.
- CHRISTIDIS, G. E. and SCOTT, P. W., 1996, Physical and chemical properties of bentonite deposits of Milos island, Greece, *Trans. IMM, Sect. B., Appl. Earth Sci.*, 105, B165-B174.
- CHRISTIDIS, G. E., 1998, Physical and chemical properties of some bentonite deposits of Kimolos island, Greece, *Applied Clay Science*, 13, 79-98.
- DURAN, J. D. G., RAMOS-TEJADA, M. M., ARROYO, F. J. and GONZALEZ-CABALLERO, F., 2000. Rheological and electrokinetic properties of sodium montmorillonite suspensions, *J. Colloidal and Interf. Sci.*, 229:197 - 117.
- E.J. FORDHAM, S. H. BITTLESTON, M. A. TEHRANI, Viscoplastic flow in centered annuli, pipes and slots. *I & EC Research* 29 (1991), 517-524.
- GRAY, H. C. H. and DARLEY, G. R., 1980. Composition and properties of oil - well drilling fluids, Gulf Pub. Co.
- HEMPHILL, T., W. CAMPOS, M. A. TEHRANI, 1993. Yield power law model mode accurately predicts mud rheology. *Oil and Gas J.* 91, 45-50.
- HERSCHEL, W.H., BULKLEY, R., 1926. Konsistenzmessungen von Gummi-Benzollösungen. *Kolloid Z.* 39, 291-300.
- KELESSIDIS, V. C., A. MIHALAKIS, C. TSAMANTAKI, Rheology and rheological parameter determination of bentonite-water and bentonite-lignite-water mixtures at low and high temperatures. *Proceedings of the 7th World Congress of Chem. Engr., Glasgow, 2005.*
- KELESSIDIS, V. C., C. TSAMANTAKI, N. PASADAKIS, E. REPOUSKOU and E. HAMILAKI, 2007. Permeability, porosity and surface characteristics of filter cakes from water-bentonite suspensions, 6th International Conference on Advances in Fluid Mechanics, 8-10 May 2006, Skiathos, Greece, published in 'Computational Methods in Multiphase Flow IV, WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol. 56, 173-182, A.A. Mammoli, and C.A. Brebbia Editors, WIT Press.
- KELESSIDIS, V.C., MAGLIONE, R., TSAMANTAKI, C., and ASPIRTAKIS, Y., 2006. Optimal determination of rheological parameters for Herschel-Bulkley drilling fluids and impact on pressure drop, velocity profiles and penetration rates during drilling, *J. of Petr. Science and Engineering*, 53, 203-224.

- KRUSTEVA, E. D., DONEVA, T. A. and VASSILIEFF, C. S., 1999, Pseudoplasticity of filter cakes explains cross-flow microfiltration, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 149, 499-506.
- LAGALY, G., and ZIESMER, S., 2003. Colloid chemistry of clay minerals: the coagulation of montmorillonite dispersions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 100-102:105-128.
- LARIBI, S., FLEUREUA, J-M., GROSSIORD, J-L. and KBIR-ARIGUIB, N., 2006, Effect of pH on the rheological behavior of pure and interstratified smectite clays, *Clays and Clay Min.*, 54, 29-37.
- LAXTON, P. B. and BERG, J. C., 2005, Relating clay yield stress to colloidal parameters, *J. Colloid Interf. Sci.*, 296, 749-755.
- LUCKHAM, P. F. and ROSSI, S., 1999. The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. *Adv. In Colloid and Interf. Sci.*, 82:43-92.
- M'BODJ, O., KBIR-ARIGUIB, N., AYADI, M. T. and MAGNIN, A., 2004, Plastic and elastic properties of the systems interstratified clay-water-electrolyte-xanthan, *J. Colloid Inter. Sci.*, 273, 675-684.
- MAGLIONE, R., G. ROBOTTI, and R. ROMAGNOLI, *In-situ Rheological Characterization of Drilling Mud. SPE J.* 5 (2000) 377-386.
- MIANO, F. and RABAIOLI, M. R., 1994. Rheological scaling of montmorillonite suspensions: the effect of electrolytes and polyelectrolytes. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 84:229-237.
- NORRISH, K., 1954. The swelling of montmorillonite. *Discuss. Faraday Soc.*, 18:120-134.
- PENNER, D. and LAGALY, G., 2000. Influence of organic and inorganic salts on the aggregation of montmorillonite suspensions. *Clays Clay Miner.*, 48:246-255.
- POWER, D. and ZAMORA M., 2003. Drilling fluid yield stress: Measurement techniques for improved understanding of critical drilling fluid parameters, paper AADE-03-NTCE-35 presented at the AADE National Technical Conference, Houston, TX, April 1-3.
- RAMOS-TEJADA, M. M., ARROVO, F. J., PEREN, R. and DURAN, J.D.G., 2001, Scaling behavior of the rheological parameters of montmorillonite suspensions: Correlation between interparticle interaction and degree of flocculation, *J. of Colloid and Interf. Science*, 235, 251-259.
- SAKAIRI, N., KOBAYASHI, M. and ADACHI, Y., 2005, Effects of salt concentration on the yield stress of sodium montmorillonite suspensions, *J. Colloid and Interf. Sci.*, 283, 245-250.
- SAMI, South African's Mineral Industry (SAMI) 2003/2004, Dept. Minerals and Energy South Africa, 2004.
- TOMBACZ, E. AND SZEKERES, M., 2004, Colloidal behavior of aqueous montmorillonite suspensions: the specific role of pH in the presence of indifferent electrolytes, *Applied Clay Sci.*, 27, 75-94.
- USGS, U.S. Geological Survey, 2005. Bentonite statistics, in Kelly, T.D., and Matos, G.R., comps., *Historical statistics for mineral and material commodities in the United States: U.S. Geological Survey Data Series 140*, available online at <http://pubs.usgs.gov/ds/2005/140/>. (Accessed March 17, 2006).
- VANOLPHEN, H., 1977. *Introduction to clay colloidal chemistry*. 2nd ed., Wiley, N.Y.
- YILDIZ, N., SARIKAYA, Y. and CALIMLI, A., 1999, The effect of electrolyte concentration and pH on the rheological properties of the original and the Na₂CO₃ activated Kutahya bentonite, *Applied Clay Sci.*, 14, 319-327.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank S&B Industrial Minerals SA for the kind provision of Zenith bentonite. Similarly, Halliburton-Cebo group, Holland and Technochimiki LTD, Greece for the kind provision of

Wyoming bentonite. Particle size distribution measurements were performed at the Laboratory of Ore Processing, Mineral Resources Engineering Department.

Manuscript received from:

- the authors on 5.4.06
- the Review Committee on 17.10.06

Παραλαβή εργασίας:

- αρχική από τους συγγραφείς στις 5.4.06
- τελική από την Κριτική Επιτροπή στις 17.10.06

Static and Dynamic Yield Stress of Water-Bentonite Suspensions

C. Tsamantaki, V.C. Kelessidis, P. Dalamarinis and G.E. Mpandelis

Department of Mineral Resources Engineering, Technical University of Crete, Hania, Greece

ABSTRACT

Water-bentonite suspensions exhibit a yield stress which is defined as the minimum applied stress for flow. Considerable debate exists about the yield stress being a material property, hence different measuring methods should give similar answers, but several investigators have demonstrated that it is an engineering reality.

Yield stress is normally estimated indirectly from the rheogram obtained with a viscometer following an extrapolation to zero shear rate (the dynamic yield stress), but the technique may be prone to errors because of slip flow. Direct measurements, not prone to such errors, rely on an independent assessment of the yield stress, normally carried out with the vane method (the static yield stress).

In this paper results are presented and compared regarding the yield stress of 14 different water-bentonite suspensions measured using both the direct and the indirect methods. In order to obtain a wide range of yield stress values, two different types and two concentrations of bentonite at various pH were tested. Rheological data were obtained using a rotational speed viscometer and a yield stress vane measuring device. Measured vane yield stress values ranged from 5 Pa to 83 Pa.

Rheological data collected with the rotating viscometer were fitted using various conventional techniques (interpolation, linear and non-linear regression analysis) as well as using a golden section yield stress search methodology based on Herschel-Bulkley model, developed in house. The vane instrument measures directly the yield stress of the suspensions and requires no further data handling.

A comparison of the measured values of the

yield stress with the direct and the indirect method is then made for the water-bentonite samples. Not very large differences are observed among different techniques and the variations are discussed. Similar data from literature are also analyzed and the comparison shows that differences on the various estimation methods are much larger than the differences observed in this study.

1. INTRODUCTION

Water-bentonite suspensions at concentrations more than 1% exhibit a yield stress, which is defined as 'the stress above which the material flows like a viscous fluid' (Bingham, 1922). The true existence of the yield stress and whether it is a material property has been debated over many years (Barnes and Walters, 1985; Hartnett and Hu, 1989; Astarita, 1990; Evans, 1992; Schurtz, 1992; Watson, 2004) but many researchers consider it a true material property (Nguyen and Boger, 1983; Cheng, 1986; Kelessidis et al., 2005; 2006b).

Several rheological models, which incorporate a yield stress, have been suggested and are used extensively by industry and research personnel, like the Bingham plastic model (1922), the Casson model (1957), the Robertson-Stiff model (1976) and the Herschel-Bulkley model (1926). All models have been used with success in various applications to predict parameters of great interest like pressure losses and velocity profiles for the flow of these fluids in conduits of various shapes like pipe or annulus geometry.

The successful match of predictions with laboratory and field measurements using rheological models with a yield stress (for e.g.

Merlo et al., 1995; Maglione et al., 2000; Hansen et al., 1999; Kelessidis et al., 2006a) is a direct proof that the yield stress is indeed an engineering reality. Furthermore, drilling industry relies heavily on the existence of a yield stress of the drilling fluids for suspending weighting solids (barite) and for transferring drill cuttings to surface (Bourgoyne et al., 1991; Kelessidis et al., 2005). In drilling fluid industry, bentonite is the main ingredient used for building up the yield stress of these fluids.

Various measuring techniques of the yield stress have been reported in the past and exist in practice. One distinguishes two major categories, direct measuring devices and indirect measuring techniques.

Direct measurement techniques rely on an independent assessment of the yield stress, normally carried out with the rotating vane method (Nguyen and Boger, 1983; Alderman et al., 1991; Glenn et al., 2000; Liddel and Boger, 1996; Stokes and Telford, 2004), a technique used widely in soil mechanics and adapted for use in fluids. The vane has four thin blades and is rotated at very slow speed while immersed in the material. The resulting torque is measured continuously as a function of time and analysis of the curve provides the yield stress which is often called the static yield stress. The technique is not prone to errors of the indirect ones because no wall slippage occurs with the material yielding in itself and secondly, it causes less structural disruption, which is particularly important for fluids having fragile gel structure like water-bentonite suspensions. The vane technique, although an established method used with many suspensions, it has not been used widely in the drilling fluids industry (Power and Zamora, 2003).

With the indirect technique, the yield stress is estimated from the rheogram obtained with a viscometer after extrapolating the $\tau - \dot{\gamma}$ (shear stress-shear rate) curve, obtained with a variety of instruments like, the rotating cylinders, the cone and plate and the parallel plate (Govier and Aziz, 1972) to zero shear rate. It is often called the dynamic yield stress. This technique has been criticized and the estimated yield stress has not been considered a true fluid yield stress because its accuracy depends on the assumed model, the consistency of the data as well as on the instrument used (Nguyen and Boger, 1992).

In addition, at very low shear rates, slippage of the fluid near the wall may occur giving false readings. It is for these reasons that researchers should be aware not only of these problems (Guillot, 1990; Alderman et al., 1991; Nguyen and Boger, 1992) but also of the methods used to identify them if such problems occur (Yoshimura et al., 1988).

Using various water-bentonite suspensions which cover a large range of yield stress values, this work aims to compare static yield stress values obtained with the vane method with dynamic yield stress values obtained with a rotating viscometer and derived utilizing four different techniques.

2. MATERIALS AND PREPARATION

Bentonite-deionized water suspensions of 5.0% and 6.42% were prepared using two different commercial bentonite products used in oil-well drilling, Zenith© bentonite, kindly supplied by S&B Industrial Minerals S.A. and Wyoming bentonite, kindly supplied by Halliburton-Cebo Holland. Particle size was less than 70 μm , with the majority of particles having sizes of around 10 μm for both bentonites.

Samples were prepared according to American Petroleum Institute procedures (API 13A, 1993). A Hamilton Beach high speed mixer was used for stirring the samples at 11,000 rpm for 20 minutes. Each sample was then adjusted at the desirable pH value (using 1M NaOH and 5M HCl solutions), the sample was agitated for five minutes and the pH was measured with Inolab meter. The sample was then poured in a covered container and left undisturbed for 16 hours for full hydration at room temperature. Prior to testing, the sample was stirred for five minutes at 11,000 rpm and the new pH value was recorded and it is this pH value reported in the results, which ranged from acidic (pH of 5.29) to alkaline (pH of 11.06).

3. EQUIPMENT AND METHODS

Rheological data for yield stress determination were obtained at 25°C using two instruments, a continuously varying rotational speed Grace M3500a concentric cylinder viscometer and a Brookfield yield stress vane measuring device. The samples were tested first with the rotating

viscometer and immediately after with the vane instrument.

3.1 M3500a Viscometer

This is a variable speed rotational viscometer (Grace Instruments) with speeds of 0.01 to 600 rpm connected to a PC for data storing and analysis. The inner cylinder diameter is 1.7245cm and the outer rotating cylinder diameter is 1.8415 cm thus giving a diameter ratio of $\delta=1.06785$. Viscometric data were obtained at speeds of 600, 300, 200, 100, 60, 6 and 3 rpm.

A number of techniques have been proposed by different groups to estimate the dynamic yield stress (Power and Zamora, 2003). In this paper, the following five techniques were applied.

1. The first method uses the Bingham plastic model (Bourgoyne et al., 1991) but utilizing only the high shear rate readings. According to API 13B-1 (API, 2003), the 600 rpm and 300 rpm readings are sufficient to provide information regarding the rheological properties of the suspension. The computed parameters are the plastic viscosity (PV) and the yield stress (or sometimes called yield point) of the fluid (YP),

$$PV = \theta_{600} - \theta_{300} \text{ (cP)} \quad (1)$$

$$YP = 0.4788 * (\theta_{300} - PV) \text{ (Pa)} \quad (2)$$

where θ is the dial reading (degree of deflection) of the instrument.

2. Another choice is to calculate the low-shear yield point ($LSYP$) (Power and Zamora, 2003) using only the low shear rate readings of 6 and 3 rpm,

$$LSYP = 0.4788 * (2 * \theta_3 - \theta_6), \text{ if } \theta_3 < \theta_6 \text{ (Pa)} \quad (3)$$

$$LSYP = 0.4788 * \theta_6, \text{ if } \theta_3 > \theta_6 \text{ (Pa)} \quad (4)$$

3. The rheological data obtained at all shear rates can be fitted to the linear Bingham plastic model (Bingham, 1922)

$$\tau = \tau_B + \mu_p \dot{\gamma} \quad (5)$$

where τ is the measured shear stress and $\dot{\gamma}$ is the imposed shear rate, (τ_B) is the yield

stress and (μ_p) is the plastic viscosity.

4. The non-linear Herschel-Bulkley model (1926) can be used to fit the data,

$$\tau = \tau_{HB} + K (\dot{\gamma})^n \quad (6)$$

using three rheological parameters, the Herschel-Bulkley yield stress (τ_{HB}), the flow consistency index (K) and the flow behavior index (n). These parameters are obtained by non-linear regression methods from conventional numerical scheme, thus the equation (6) becomes

$$\tau = \tau_{HB,num.pac.} + K (\dot{\gamma})^{n,num.pac.} \quad (7)$$

5. Finally, the rheological data are fitted to the Herschel-Bulkley model, by non-linear regression method, but using the in house developed methodology of golden section search for yield stress,

$$\tau = \tau_{HB,golden} + K (\dot{\gamma})^{n,golden} \quad (8)$$

This technique yields results with similar or sometimes better accuracy than most numerical packages. It has been developed to overcome problems encountered when the yield stress is less than about 2 Pa, because in these situations it has been observed that most standard numerical packages may give negative yield stress values, a physical impossibility (Kelessidis et al., 2006b).

3.2 Vane Rheometer

Direct measurements are performed with a Brookfield yield stress vane measuring device (Fig. 1). It operates at very low shear rates ($\dot{\gamma} \rightarrow 0$) and the software of the instrument provides the yield stress value with no further data handling. The operating principle of the vane rheometer is to drive a vane spindle immersed in the test suspension through a calibrated spiral spring. The resistance of the suspension to movement is measured by observing the increasing torque as the motor rotates.

Two different four blade vane spindles were used, one with length of 4.333 cm, diameter of 2.167 cm and a shear stress measurement range 2-20 Pa, while the second had length of 2.535 cm, diameter of 1.267 cm and a shear

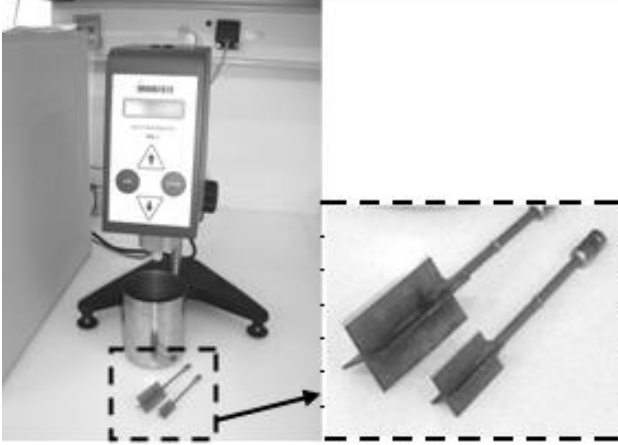


Figure 1: Vane rheometer from Brookfield.

stress measurement range of 10-100Pa. The minimum rate of rotation for the Brookfield viscometer was 0.1 rpm, and this value was used for all tests. Typical data from vane meter are represented graphically in Figure 2. The vane yield stress, τ_{vane} , is determined as the plateau value of shear stress versus time curve and is computed from,

$$\tau_{vane} = (TK * YMC * T_m) / 10 \quad (9)$$

where, τ_{vane} is the yield stress of the suspension (Pa) and T_m is the maximum torque (Fig. 2). TK and YMC are the torque and the yield multiplier constants respectively, both provided by the manufacturer. They depend on the size and shape of the vane spindle in use.

The yield stress from the vane measurements can be also computed theoretically, as suggested by Nguyen and Boger (1983) and Alderman et al. (1991) and is denoted by τ'_{vane} . It is related

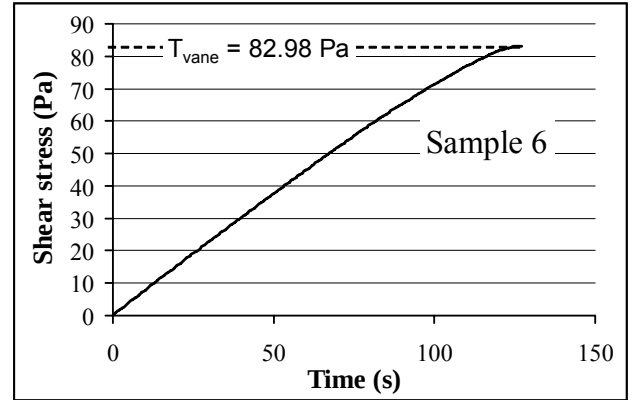


Figure 2: Data representation from Vane Rheometer.

to the maximum torque T_m and the vane dimensions by,

$$T_m = \tau'_{vane} \left(\pi D^3 / 2 \right) (H / D + 1 / 3) \quad (10)$$

where H is the height of the vane and D is the diameter of the vane.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1 Dynamic and static measurements

The rheological data obtained with the rotational viscometer were processed with the five aforementioned techniques to get values for yield stress and are shown in Table 1, together with the correlation coefficient. Data from literature (Power and Zamora, 2003) with similar type of water-based drilling fluids, covering a range of 0.12 to 10.20 Pa were also analyzed using the same techniques.

For all the data of Table 1, as well as for the literature data (not shown), it was evident that the Herschel-Bulkley model fitted the data

Table 1: Drilling laboratory data.

Sample No.	pH upon hydr.	YP (Pa)	τ_B (Pa)	R_B^2	τ_{HB} num. pack (Pa)	R_{HB}^2 num. pack	τ_{HB} golden (Pa)	R_{HB}^2 golden	LSYP (Pa)	τ_{vane} (Pa)
1	7.31	8.20	6.92	0.9092	5.51	0.9993	5.45	0.9995	5.44	5.66
2	8.02	8.51	7.79	0.9492	7.06	0.9993	7.13	0.9991	6.84	7.54
3	9.47	10.78	9.46	0.9115	8.23	0.9908	8.09	0.9639	8.20	8.34
4	11.06	46.93	35.34	0.8497	19.15	0.9991	20.48	0.9966	26.46	23.83
5	6.93	13.90	12.04	0.8454	7.91	0.9985	7.26	0.9979	8.91	11.45
6	10.77	101.90	92.11	0.7625	77.53	0.9670	75.50	0.9531	80.97	82.98
7	7.60	25.53	23.06	0.9637	20.80	0.9984	21.79	0.9949	20.07	24.06
8	7.69	26.94	23.89	0.9445	20.92	0.9977	19.90	0.9617	20.54	23.95
9	8.87	13.35	12.08	0.9504	10.36	0.9987	10.04	0.9991	9.94	14.71
10	10.56	49.89	38.64	0.8393	21.76	0.9984	23.50	0.9949	29.65	17.31
11	6.52	50.91	45.90	0.9509	40.85	0.9984	44.22	0.9952	39.82	43.12
12	5.29	23.42	19.97	0.9733	17.09	0.9993	16.09	0.9698	16.79	22.59
13	8.98	47.47	93.93	0.9364	32.95	0.9991	33.00	0.9866	33.73	37.25
14	10.41	51.92	33.84	0.9248	21.34	0.9981	21.50	0.9988	22.34	30.95

much better than the Bingham plastic model, a result similar to previous works (Fordham et al., 1991; Hemphil et al., 1993), hence, it should be the model of choice for these fluids (Kelessidis et al., 2006a, 2006b).

Comparison between the two approaches to determine the Herschel-Bulkley rheological parameters (numerical package versus golden section search) indicates the very good fitting obtained by both techniques, as the values of the correlation coefficient are very close to unity. It is worth mentioning that use of the conventional numerical scheme gave meaningless negative value of yield stress for one of the fluids from Power and Zamora (2003) and for this case, only the golden section search technique was used.

Referring to the other two indirect techniques which are based on specific viscometer readings, YP gives the highest values among all yield stress predictions, whereas $LSYP$ results in lower values and close enough to τ_{HB} values. This should be expected since YP and $LSYP$ values are derived by interpolation of the high ($\theta_{600}, \theta_{300}$) and low (θ_6, θ_3) shear rate readings respectively.

Results of yield stress measurements using the vane method (τ_{vane}) are also reported in Table 1. In addition, τ'_{vane} , has also been computed, with the results showing that the latter values were found to be within 3.7% of τ_{vane} values. This difference was observed for all samples, indicating most probably a systematic error, either in the instrument itself or in the theoretical equation. The manufacturer gives an accuracy of the instrument value of $\pm 2\%$.

4.2 Comparison of static and dynamic measurements

The vane yield stress values were compared to the values computed with the indirect techniques. The torque curves of sample 3 and sample 10 are shown in Figures 3 and 4 respectively and they are adequate representations of the overall behavior of all examined samples. In Figure 3 the direct yield stress value (τ_{vane}) lies above the $LSYP$ value and the ones obtained by Herschel-Bulkley model, whereas in Figure 4 the vane seems to give the lowest of all yield

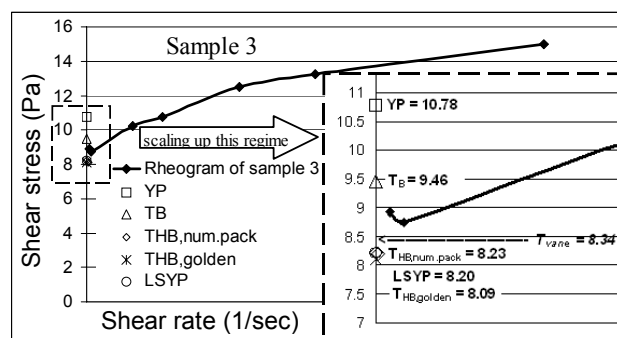


Figure 3: Rheogram of sample 3.

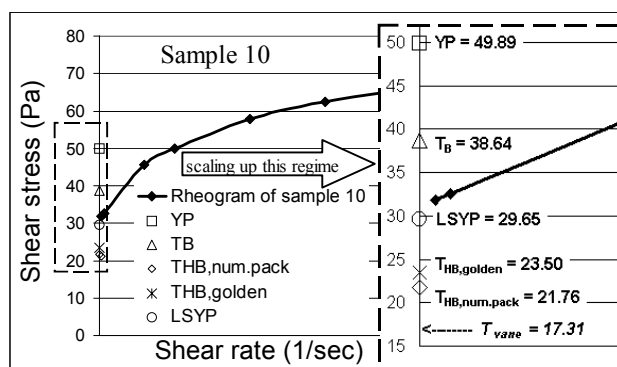


Figure 4: Rheogram of sample 10.

stress values.

In order to better understand the relationships among the various yield stress values computed by different methods (YP , $LSYP$, τ_B , $\tau_{HB,num.pac.}$ and $\tau_{HB,golden}$) the ratios of these parameters over the corresponding static value τ_{vane} , denoted by τ_y^* , have been calculated. It is evident that ratios having values closest to unity give dynamic yield stresses that are very close to the static ones.

Figure 5 shows this comparison. For the majority of samples of this work, the different techniques give similar yield stress values and close to the directly obtained ones from static measurements. However, for some samples, these methods give ratios with significant distribution (e.g. samples 4, 10, 14). The aforementioned observation implies that the dynamic yield stresses may not be very similar to the static ones with the particular conclusion depending on the examined sample.

The dimensionless yield stresses have also been plotted versus pH of the suspensions in Figure 6. It appears that for low pH and up to natural pH of the suspensions (pH ~ 9), the

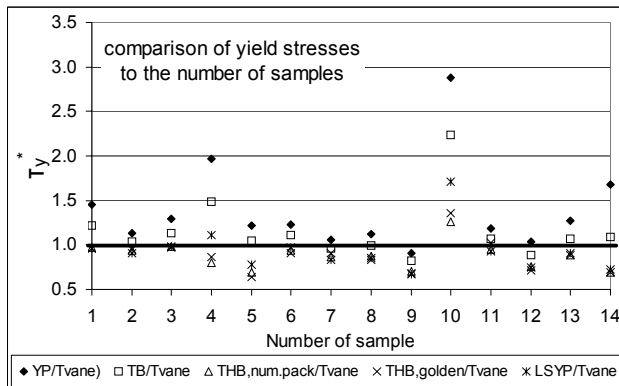


Figure 5: Shear stress analysis vs number of samples.

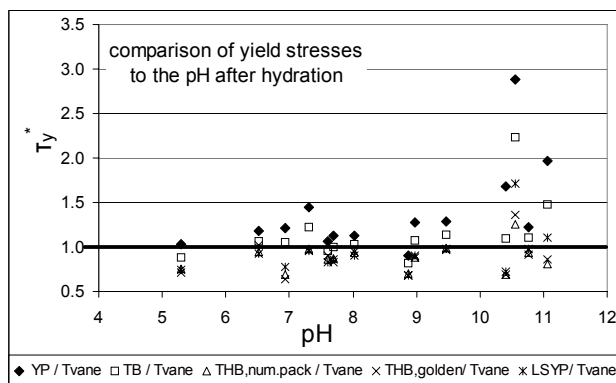


Figure 6: Shear stress analysis vs pH of samples.

tested methods of computing yield stress do not present great deviations from each other. Conversely, at the higher pH values (pH>10), the different methods give yield stresses which differ significantly among each other.

The degree of deviation (D_d) of the various dynamic yield stresses from the static yield stresses is introduced. This parameter helps to capture even better the relationship as well as the discrepancies between the two parameters. It is given by

$$D_d = \sum (\tau_y^* - 1)^2 \quad (11)$$

where $\sum$ represents the summation for the total number of samples used.

Figure 7 shows the statistical analysis of the degree of deviation versus τ_y^* values obtained with the five different techniques from data of this work. A similar analysis has been performed for the data of Power and Zamora (2003) with the results illustrated in Figure 8.

Values closest to zero indicate that the particular indirect technique gives a value that is closest to the value obtained by the direct vane

measurement. It is evident that the option of using the Herschel-Bulkley model seems to be the best for approaching direct measurements of τ_y . Specifically, both Figures 7 and 8 point out to the utilization of a conventional numerical scheme as the most suitable to determine drilling fluid yield stress from standard rotational Couette viscometer "smooth" data. This is of course true only when the use of the numerical package does not produce negative yield stress values, for which cases, the golden section search methodology (Kelessidis et al., 2006b) should be used, giving equally good results.

Furthermore, the low-shear yield point (LSYP) calculation proves to be an easy and quick method because it yields results similar to the actual measured static values. This is reasonable since the method uses the low shear rate viscometric readings of 6 and 3 rpm.

Results with large differences from the direct measurements are obtained when yield stresses are computed from the high shear rates computations (YP) and when experimental data are fitted to the Bingham plastic model (τ_B), with YP being the least suitable one method for yield

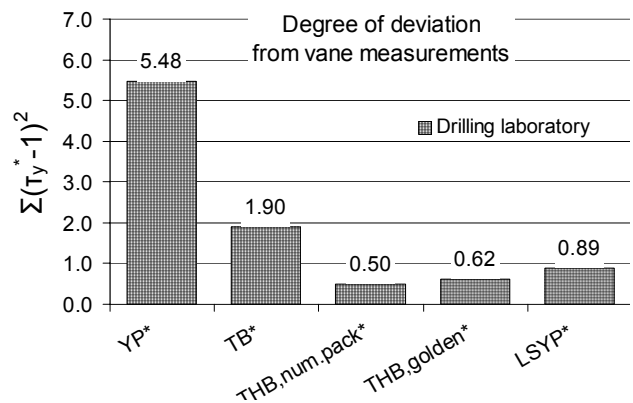


Figure 7: Statistical analysis of Drill. Lab. Data.

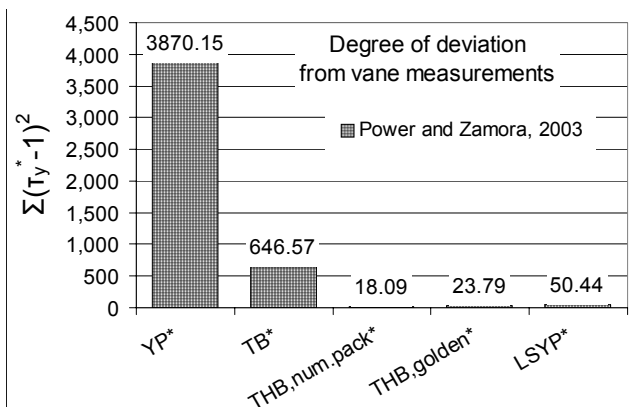


Figure 8: Analysis of Power and Zamora, 2003 data.

stress determination. Of course, the Bingham plastic model is a model of two parameters, thus less accurate than the three-parameter Herschel-Bulkley model and cannot really fit rheological data of bentonite suspensions which normally exhibit non-linear behavior for shear rates less than about 200s^{-1} . Similarly, Y_P values involve only the high shear rate readings of 600 and 300 rpm and cannot approach the lower sensitive regime of drilling fluid yield stress at low shear rates.

5. CONCLUSIONS

Results are presented from a study conducted to compare and explain differences observed between directly and indirectly obtained yield stress values. This has been achieved with rheological data of water-bentonite suspensions obtained using a conventional Couette viscometer and a vane rheometer. The differences observed were also compared with similar data from literature. The following conclusions were drawn:

- The yield stress estimated from the three parameter Herschel-Bulkley model approaches better the true yield stress obtained with the vane, compared to the two-parameter Bingham plastic model and to the yield stress estimated from the 600 and 300 rpm rotational speeds of the viscometer.
- The extrapolation of rheological data using conventional numerical packages is the most suitable alternative for determining the yield stress of drilling fluids with the exception of fluids with low yield stress values for which it may give negative yield stresses.
- The yield stress obtained with the golden section search methodology developed in house results also in very good estimations and at the same time prevents potential errors of deriving negative and meaningless yield stress values.
- Low-shear yield point ($LSYP$) is an easy and quick method for yield stress estimation because it yields similar results to the actual vane yield stress values.
- Application of Bingham plastic model on all shear rate data and yield point computation from the high shear rate data give noticeable deviations from the direct vane yield stress

value because both approaches cannot fit the sensitive non-linear low shear rate readings.

- Higher discrepancies for all employed yield stress methods towards the vane yield stress were observed for samples with high alkaline pH values.
- Similar conclusions can be derived about differences between static and dynamic yield stresses from literature, although, the differences are quite much larger ranging from about 50:1 between literature and this work results for the good techniques (Herschel-Bulkley yield stress and $LSYP$) to about 800:1 for the bad techniques (yield point and Bingham yield stress).

REFERENCES

- Alderman, N.J., G.H. Meeten and J.D. Sherwood, 1991. Vane rheometry of bentonite gels. *J. non-Newtonian Fluid Mech.* pp. 291-310.
- American Petroleum Institute Specifications, 13A, 1993. Specification for drilling fluid materials.
- American Petroleum Institute Specifications, 13B-1, 2003. Recommended practice for field testing water based drilling fluids.
- Astarita, G., 1990. Letter to the Editor: The engineering reality of the yield stress, *J. Rheol.* 34:275-277.
- Barnes, H.A. and K. Walters, 1985. The yield stress myth?, *Rheol. Acta* 24:323-326.
- Bingham, E.C., 1922. *Fluidity and Plasticity*, McGraw-Hill, New York.
- Bourgoyne, A.T., M.E. Chenevert, K.K. Millheim and F.S.Jr. Young, 1991. *Applied Drilling Engineering*, SPE Textbook Series, Vol. 2, Richardson, TX.
- Casson, N., 1957. A flow equation for pigment-oil suspensions of the printing ink type. In: Mill. C. C. Edts. *Rheology of disperse systems*. Proceedings of the Conference of the British Society of Rheology, University College, Swansea, Pergamon, London.
- Cheng, D.C-H., 1986. Yield stress: A time dependent property and how to measure it, *Rheol. Acta* 25:542-554.
- Evans, I.D., 1992. Letter to the editor: On the nature of the yield stress, *J. Rheol.* 36:1313-1316.
- Fordham, E.J., S.H. Bittleston and M.A. Tehrani, 1991. Viscoplastic flow in centered annuli, pipes and slots, *I and EC Res.*, 29:517-524.
- Glenn, T.A., K.M. Keener and C.R. Daubert, 2000. A mixer viscometry approach to use vane tools as steady shear rheological attachments, *Applied Rheology*, 10:80-89.
- Govier, G.W. and K. Aziz, 1972. *The flow of complex mixtures in pipes*, Krieger, Malabar, FL.
- Guillot, D., 1990. *Rheology of well cement slurries*. Well Cementing, edited by E.B. Nelson, Schlumberger Educational Services, Houston.

- Hansen, S.A., R. Rommetveit, N. Sterri, B. Aas and A. Merlo, 1999. A new hydraulic model for slim hole drilling applications, paper SPE 57579 presented at the SPE /IADC Middle East Drilling Technology Conference, Abu Dhabi Nov. 8-10.
- Hartnett, J.P. and R.Y.Z., Hu, 1989. Technical Note: The yield stress – an engineering reality, *J. of Rheol.* 33:671-679.
- Hemphil, T., W. Campos and A. Tehrani, 1993. Yield power law model mode accurately predicts mud rheology, *OGJ*, Aug. 23, 45 – 50.
- Herschel, W. and R. Bulkley, 1926. Konsistenzmessungen von Gummi-Benzollösungen. *Kolloid Z.* 39 291–300.
- Kelessidis, V.C., A. Mihalakis and C. Tsamantaki, 2005. Rheology and rheological parameter determination of bentonite–water and bentonite–lignite–water mixtures at low and high temperatures. *Proceedings of the 7th World Congress of Chem. Engr., Glasgow.*
- Kelessidis, V.C., K. Founargiotakis and C. Brouzos, 2006a. Laminar, transitional and turbulent flow of Herschel-Bulkley fluids in concentric annulus, 3rd Annual European Rheology Conference, Hersonissos, Greece, April 23-26.
- Kelessidis, V.C., R. Maglione, C. Tsamantaki and Y. Aspirotakis, 2006b. Optimal determination of rheological parameters for Herschel-Bulkley drilling fluids and impact on pressure drop, velocity profiles and penetration rates during drilling, *J. Petr.Science and Engineering*, accepted for publication.
- Liddel, P.V. and D.V. Boger, 1996. Yield stress measurements with the vane, *J. non-Newtonian Fluid Mech.* 63: 235-261.
- Maglione, R., G. Robotti and R. Romagnoli, 2000. In-situ Rheological Characterization of Drilling Mud. *SPE J.* 5: 377-386.
- Merlo, A., R. Maglione and C. Piatti, 1995. An innovative model for drilling fluid hydraulics. Paper SPE 29259 presented at the Asian-Pacific Oil and Gas Conf., Kuala-Lumpur, Malaysia.
- Nguyen, Q.D. and D.V. Boger, 1983. Yield stress measurements of concentrated suspensions, *J. Rheol.* 27:321-349.
- Nguyen, Q.D. and D.V. Boger, 1992. Measuring the flow properties of yield stress liquids, *Ann. Review Fluid Mech.* 24: 47-88.
- Power, D. and M. Zamora, 2003. Drilling fluid yield stress: Measurement techniques for improved understanding of critical drilling fluid parameters, paper AADE-03-NTCE-35 presented at the AADE National Technical Conference, Houston, TX April 1-3.
- Robertson, R.E. and H.A. Stiff, 1976. An improved rheological model for relating shear stress to shear rate in drilling fluids and cement slurries, *Soc. Pet. Engrs. J.* 161 31-36.
- Schurtz, J., 1992. Letter to the editor: A yield value in a true solution? *J. Rheol.* 36:1319-1321.
- Stokes, J.R. and J.H. Telford, 2004. Measuring the yield behavior of structured fluids, *J. non-Newtonian Fluid Mech.* 124, 137-146.
- Watson, J.H., 2004. The diabolical case of the recurring yield stress, *Applied Rheology* 14:40-45.
- Yoshimura, A.S., R.K. Prud'Homme, H.M. Princen and A.D. Kiss, 1988. A comparison of techniques for measuring yield stresses, *J. Rheol.* 31:699-710.

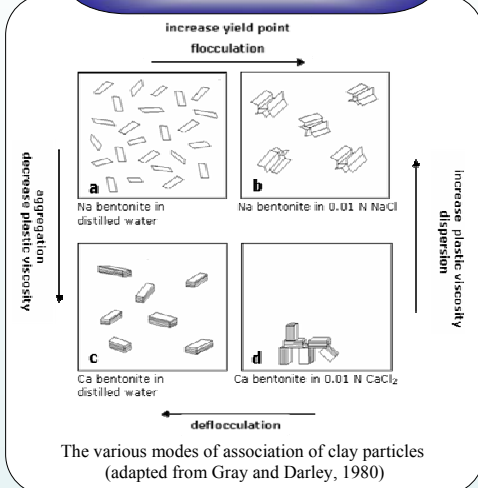
Influence of pH and Electrolyte Concentration on Herschel – Bulkley Rheological Parameters for Wyoming Bentonite – Water Suspensions

KELESSIDIS C. Vassilios, TSAMANTAKI Christina and DALAMARINIS Panayiotis

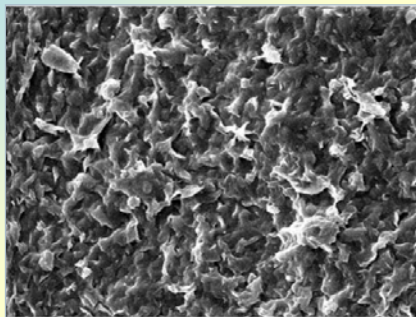
Mineral Resources Engineering Department, Technical University of Crete, Chania, GREECE (contact: kelesidi@mred.tuc.gr)

INTRODUCTION : Water – bentonite suspensions are essential elements in drilling industry. They must possess superb rheological properties to perform several functions. The presence of salts or the pH of the environment influence significantly these properties. As of today no conclusive evidence exists on the mechanisms involved in inflicting these changes. The scope of this work is to provide data for determining these mechanisms.

PLATELET ASSOCIATION



SEM OF HYDRATED SUSPENSION



30 μm

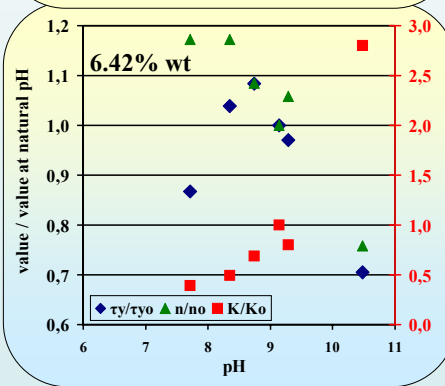
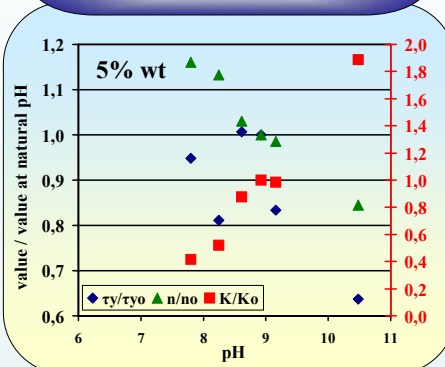
MATERIALS & METHODS

- ✓ Wyoming bentonite at 5% & 6.42%wt (based on 1 lt of deionized water).
- ✓ Examining pH influence : HCl & NaOH solutions for fixing pH values of the suspensions between 4 and 11.
- ✓ Examining electrolyte concentration : 0.0, 0.01 & 0.1 M of NaCl.
- ✓ API preparation & testing procedures.
- ✓ Rheograms taken at room temperature with Grace M3500a Couette type Viscometer with $R_1 = 17.245\text{mm}$ and $R_2 = 19.00\text{mm}$. Rotation for 1min at each speed, 6 measurements and computing average. 600,300,200,100,6,3 RPM.

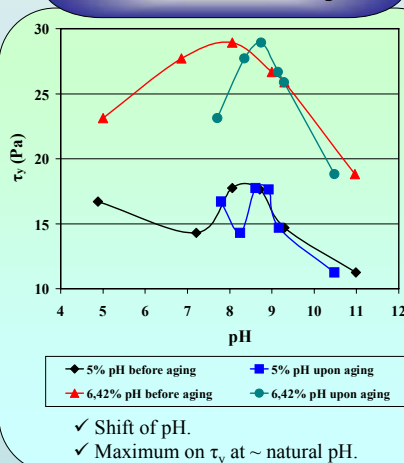
DATA FITTING

- ✓ Herschel – Bulkley rheological model
 $\tau = \tau_y + K(\dot{\gamma})^n$
- ✓ Non – linear regression
- ✓ Computing R_c^2
- ✓ Computing $\Sigma(\tau - \tau_y)^2$, $i = 1-6$

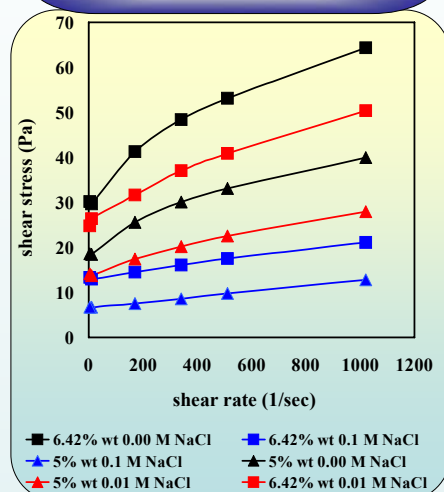
EFFECT OF pH



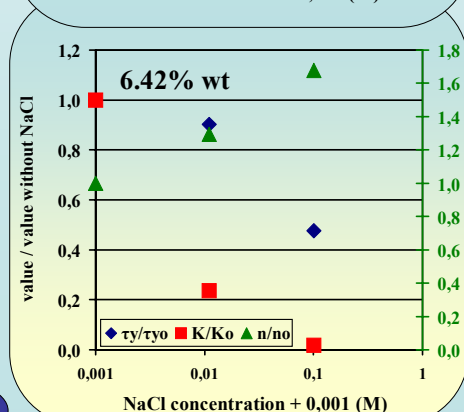
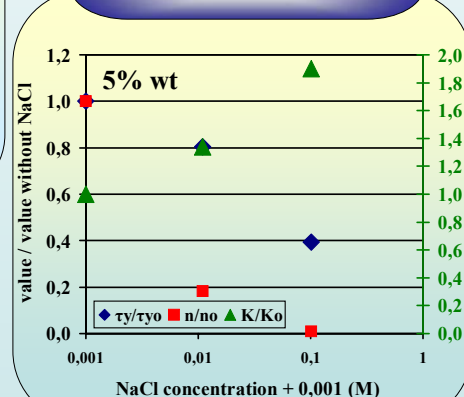
YIELD STRESS VS pH



FLOW BEHAVIOR IN NaCl



EFFECT OF NaCl



CONCLUSIONS

- ✓ Herschel – Bulkley model correctly describes rheological behavior of tested suspensions.
- ✓ pH & NaCl significantly affect rheological properties.
- ✓ Drastic shift of acid pH values measured upon mixing to neutral pH values after the 16 hours hydration period.
- ✓ Maximum τ_y has been observed at natural pH for both bentonite concentrations.
- ✓ Significant increase in K at alkaline pH.
- ✓ Continuous decrease in n from 0.63 to 0.4 when pH increases from 7.7 to 10.48.
- ✓ Decrease of τ_y (2.5:1) and drastic decrease in K (100:1) with salt concentration.
- ✓ Increase in n from 0.5 towards Newtonian behavior with salt concentration.
- ✓ The observed effects are similar in trends to the trends reputed in literature, but different in magnitude, which is primarily attributed to preparation procedures of water – bentonite suspensions.

Acknowledgements:

- ✓ Partial funding by the European Social Fund and National Resources – (EPEAEK-II) Pythagoras.
- ✓ Baroid – Cebo Holland kindly provided the quantity of Wyoming bentonite.

MONITORING DRILLING BIT PARAMETERS ALLOWS OPTIMIZATION OF DRILLING RATES

Assoc. Prof. V.C. Kelessidis¹, P. Dalamarinis¹

¹ Mineral Resources Engineering Dept. Technical University of Crete, **Greece**
kelesidi@mred.tuc.gr

ABSTRACT

Drilling for mineral resources can be one of the most expensive processes in the exploration and production. Hence, drilling industry has been striving since its inception for developing drilling techniques which allow for fast drilling rates but ensuring the safety of the well and of the workers. Parameters affecting the drilling process can be cast in two major categories, rig and bit related parameters and formation parameters. The first category includes weight on bit, torque, rotational speed, and hydraulic parameters like flow rate, density and rheology of the drilling fluid. The second category includes local stresses, rock compaction, mineralogy, abrasivity of formation, formation fluids. The drilling parameters can be controlled while formation parameters have to be dealt with. To achieve faster drilling rates, drilling industry has developed and uses a multitude of sensors which monitor the above parameters while at the same time allow for estimation of formation parameters. This information must then be analyzed, either in-situ or post-drilling for the design of new wells and appropriate software packages have been developed which perform these tasks to a certain extend but has been accepted widely, maybe because of the great complexity of the drilling process. In this paper we review such available packages and address the issues of the capability of a particular software package, Payzone, to be used and tuned, with monitored drilling data, so that one can design future wells using information provided from an existing well. Bibliographic drilling data are used from various drilling wells, the data monitoring is analyzed with the view of having the best available data and future designs are proposed which would allow for faster drilling rates.

Keywords: drilling optimization, drilling rates, data monitoring, drillability

INTRODUCTION

Drilling may be the most expensive process during the exploration campaign and the ability to predict penetration rates under given subsurface conditions with the various drilling rigs is very essential for the safe design and the accurate cost prediction before the start of the drilling campaign. Prior experimental and field evidence has already demonstrated that penetration rate depends on two groups of parameters, formation properties and drilling parameters. In the first group, these involve local stresses, rock compaction, mineralogical content, and fluid pore pressure. The most significant drilling parameters are applied weight on bit and torque, rotary speed and hydraulic parameters (flow rate, density and rheology of drilling fluid). Bit condition is equally important because there is blunting while drilling progresses, which depends on the formation being drilled. Drilling tools have evolved significantly over the years but modelling of the drilling process and the interaction of bit – formation rock has yet to be modelled adequately, which would allow for better penetration rate prediction.

Improvements in bit design and on operating procedures could offer, especially in deep wells, improvements in rate of penetration (ROP), with numbers indicated in the range of +25% which could translate to significant savings [1]. While drill bit design is at the hands of capable drill bit companies, operating procedures can only be applied by the operator and availability of such models or simulators could allow for better operating procedures, especially in a long drilling campaign in the same field. For e.g. when using PDC bits, one is never sure whether to increase weight on bit (WOB) or revolutions per minute (RPM). In a field study [2] it was shown through testing that doubling the bit RPM in 6,000-psi rock while keeping WOB constant resulted in 70% increase in ROP, however, doubling WOB, with RPM constant, resulted in 300% increase in ROP. Availability of a good rock-bit interaction model via a well tuned simulator, such as the one that will be analyzed below, could alleviate necessity for such lengthy and expensive experiments. Of course, besides the simulator, one needs the real data from previous similar wells, hence the monitoring of almost everything that is moving is more than essential for such successful application of the simulator. Drilling data are then essential, gathered from the sensors installed on the rig, for running the simulator and as such the following data is needed, surface weight-on-bit, torque, rotary speed, pump pressure, flow rate, nozzle configuration, detailed bit grading.

Use of a software program in combination with real time monitoring of drilling parameters together with the availability of a drillability model allows one to calculate optimum weight-on-bit, pump pressures and rotary speeds [3]. Use of simulators to predict effects of changing parameters has been attempted in the past [4,5,6] but requirements are such that in order to model the process with fair degree of accuracy, a large number of parameters is needed, making them fairly complex, expensive and not very flexible in terms of simulating various encountered conditions, thus, they have not been accepted widely. Another approach is to produce a simple simulator but based on phenomenological modeling; having thus the basic parameters in place and the proper model, using then real data from previously run conditions, to tune the simulator, one can produce similar results to the real world. Then, the simulator can be used to predict conditions for the operating parameters in a new drilling campaign in the same field. Such a drilling simulator, under the name of Payzone, has been developed in recent years [7,8,9]. Recent developments allow for a slightly different approach to drilling simulator allowing the prediction of rock mechanical strength, based on the input of the monitoring parameters, giving input to the formation change and alarming the operator of any changes [10,11,12].

The Payzone simulator allows for defining different lithologies along the wellbore, in terms the rock type, strength, and abrasivity. Rock-type data are usually available in a typical LAS file, strength data are sometimes given, sometimes not, and in these cases, estimation is made, either from databases for similar rocks or they are estimated from sonic data, although these are fairly crude estimates. This parameter will be further explored later. When all the data is loaded, the simulator is adjusted to reproduce the drilling performance observed in the offset or reference well. Then any well can be re-drilled to see if a better set of operating conditions can be specified. In the same way, a new well can be “drilled” and its drilling performance optimized [7-9].

MAIN FEATURES OF SIMULATOR

The Payzone drilling is developed for teaching and research purposes [7,8] and it is fairly flexible and simple to use. Besides the capabilities, although not so advanced, which give a picture of the well drilled and present also the Lithology and drill time log, the main feature is the prediction of drilling rate, using Eqn. (1),

$$ROP = (flow_factor)(C)(aggressivity)(RPM)(tooth_length)(G) \quad (1)$$

where

$$G = 1 - \exp \left[- \left(\frac{WOB}{UCS} \right)^{curv} \left(\frac{12}{D^{2.5} * 0.4 * tooth_length} \right) \right] \quad (2)$$

where, RPM is rotary speed, tooth_length is the average length of the bit teeth, UCS is unconfined compressed stress of the rock, D is bit diameter, WOB is applied weight on bit; the following modifiable by the user constants are used: C is a constant; (aggressivity) is a formation and bit characteristic constant ranging between 20% and 100% and normally is given the value of 35%; (curv) is a formation – WOB interaction constant and it is usually given the value of 1.5; (flow_factor) is a constant, ranging between 50% and 100% and defines the capability of the system to adequately clean the bit front by the cuttings [9].

A similar rock-bit interaction model, with adjustable parameters, is the one that has been presented by Teale [13] who introduced the concept of specific energy, the energy required by the rig to drill a unit volume of rock. The model has been used by many researchers and practitioners in the years that followed [14,15] and is given as,

$$ROP = \frac{\mu (RPM) D WOB / A_{bit}}{\frac{UCS}{eff} - \frac{WOB}{A_{bit}}} \quad (3)$$

where, (A_{bit}) is the bit diameter, (μ) is the coefficient of friction between drill string and formation, converting applied WOB to torque, and (eff) is the efficiency of transmitting the rock destruction power of the drilling rig to the rock.

One can show that the two models could give similar results when simulating experimental data. For e.g., using the above equations and experimental data used by Abouzeid and Cooper [9], the results of Fig. 1 were derived, which show that both models, when properly adjusting the constants, could reflect reality. In this simulation, the Payzone model was used with the following parameters (aggressivity=25, curv=1.5, Tlen=0.5667), while for Teale's model the parameter values used were (eff=0.20) and

for the coefficient of friction ($\mu=0.25$). Of course, Payzone has full capabilities for simulating a real drilling process, as it is presented below.

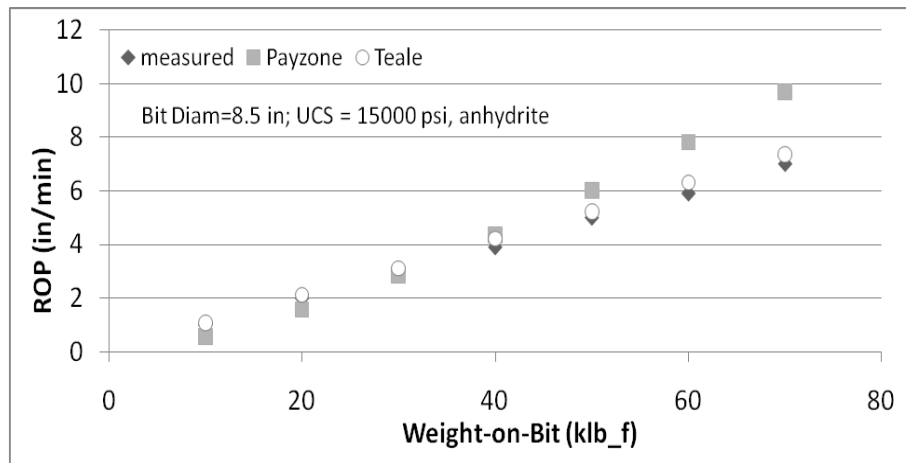


Fig. 1. Simulation of experimental data for anhydrite, with Payzone and Teale's equation.

ANALYSIS OF CASE STUDIES

Several case studies have been analyzed and experience so far has indicated that Payzone simulator could be used effectively to predict new well designs and parameters, after tuning it to the real experimental data. We have used available publicly data, primarily from North sea in last decades. For this presentation we will be presenting one such case, well 31/3-3 for which a well completion report was available [16]. As indicated above, the first steps were to input all available data, especially lithologies and drill bit records. Estimation of UCS was made from external sources, based on the information of Lithology. We have then tried to re-construct the drill time log, i.e. re-drill the well, by adjusting the main bit parameters, using the options available on the simulator window. We have focused on one depth interval, between 1917 and 2414 m, which was simulated with 18 formation intervals with four main lithologies, soft sand, hard sand, coal and shale. Drilling base case was by applying 85 to 190 kN, 50 to 180 RPM and approximately 2400 lpm flow rate. The actual drilling process was simulated well as the data in Fig. 2 indicate where the reported real drilling time is given versus the re-drilled time given by Payzone.

Having simulated the data well, we wanted to see what would be the effect if operating parameters were changed, for e.g the weight-on-bit, the rotary speed and the flow rate, each one individually and all at the same time. In Fig. 3, we show the results of the simulations with all other parameters constant, applying extra weight on bit of 44.5 kN (4.5 tons) which represents an increase between 25 and 50%, and extra 50 RPM, which represents an increase of 50 to 63%.

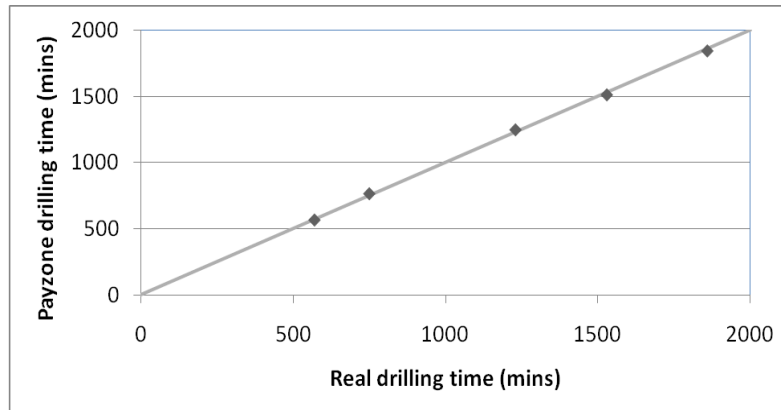


Fig. 2. Simulation of real drilling data, well 31/3-3, from 1917-2414 m.

The results show the beneficial effect of increasing the WOB, giving increased performance by 28-35%, of RPM, giving an increase of 14 to 28%, for the given conditions, with WOB of course having more significant effect. An increase of the flow rate has given a slightly smaller effect than the increase in RPM. Applying all increases at the same time, i.e. plus 4.5 tons, plus 50 RPM and plus 200 lpm, the results of Fig. 4 are obtained, which show reductions of the order of 35 to 50%, depending on the particular section.

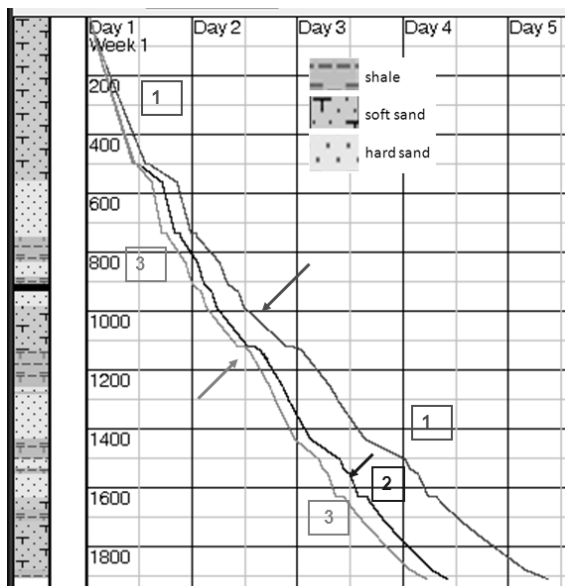


Fig. 3. Normal drilling curve [1], drilling curve with RPM+50 rpm [2] and drilling curve with WOB+45 kN [3].

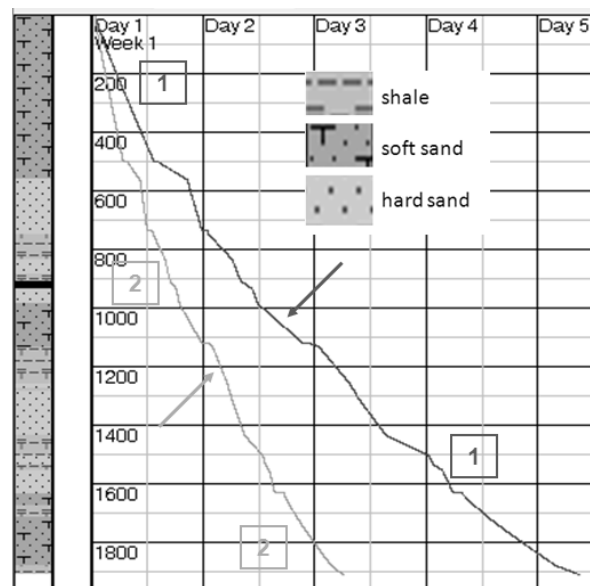


Fig. 4. Base drilling time plot [1] and simulated drilling time plot [2] by having extra 4.5 tons, extra 50 RPM and extra 200 lpm.

One of the main parameters affecting the drillability of any formation and of course dictating drilling efficiency is the compressive strength of the rock, as it is also evident from equations (2) and (3) above. It is a parameter that still intrigues researchers and practitioners because it is not definite how should it be used in order to predict rock drillability [17,18]. Furthermore, the accuracy of the values of this parameter is still questionable [19]. The simulator can thus be used to determine the effect of the errors made in estimating UCS for the various rocks encountered in the drilling of a well on

the prediction of rate of penetration. In Fig. 5, we present the results for such a simulation, for the same sections as above, by increasing UCS by 50% for the different rocks encountered, as this type of error is not uncommon [19]. The results show that an error in UCS by 50% could have significant effect on the prediction of drilling time for given formation which, depending on the conditions, may range between 58 and 96%, giving an overall increase in total drilling time for the sections chosen for the simulation of 82%.

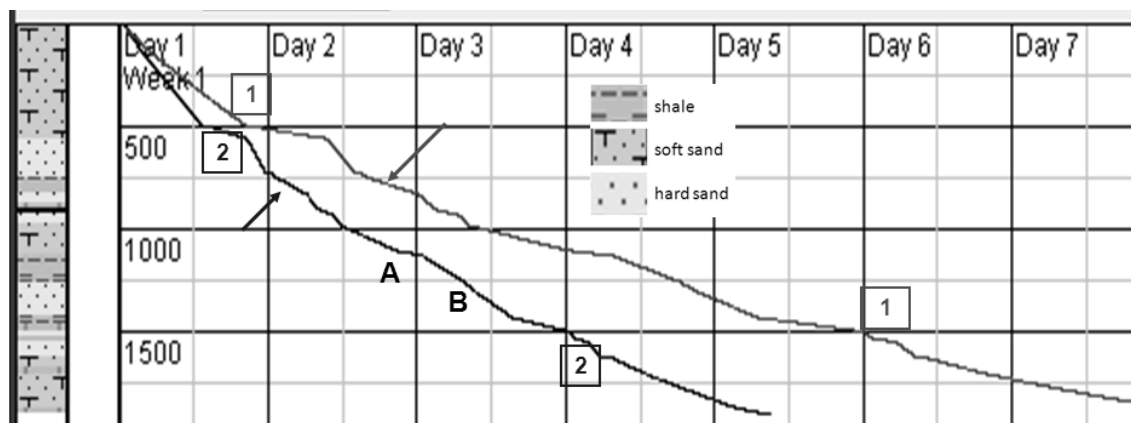


Fig. 5. Normal drilling time plot [2] and simulated drilling time plot [1] when UCS for all formations encountered is estimated as increased by 50%.

CONCLUSIONS

Prediction of rate of penetration is among the most sought after parameters in a drilling campaign for oil and gas exploration as it allows for optimization of drilling parameters to decrease drilling costs and enhance drilling process safety. There have been attempts to have available such simulators but none has been widely accepted because of the severe requirements for running them.

Recent advances made available simulators which could be used onsite having been adjusted with real time drilling data so that they can be used in future campaigns in similar fields. In order for this to be successful, real time drilling monitoring is essential with the main parameters at hand such as weight on bit, torque, rotary speed, flow rate. We have been testing one such simulator, Payzone, to verify its capabilities and determine how different drilling parameters affect drilling process, using publicly reported data. For the case on hand, data from the North Sea were used.

The simulator uses a drilling advance model with a few adjustable parameters that can be fine-tuned with available drilling monitoring data. Our analysis has shown that the drilling rate model is similar to the equation proposed by Teale, in terms of specific energy, which contains two adjustable parameters. Fine tuning this model as well use of the Payzone simulator, similar results can be obtained. However, the latter allows for simulation of full drilling activity with several enhancements.

Re-engineering the well and re-drilling it is possible with no major difficulties. The key-parameters to fine tune the simulator are overall drilling time and rate of penetration, for the sections to be analyzed. For the case on hand, an almost perfect 1:1 correspondence

between simulated and real drilling time has been achieved. Increasing WOB, RPM and flow rate had all beneficial effect, i.e. a good reduction in drilling time, for the situation analyzed, with WOB having the most significant effect. Application of all enhancements at the same time shows that overall decrease in the drilling time can be of the order of 30 to 50% on the average, thus bringing significant savings for drilling new wells.

An assessment was also made on the effect of errors on estimation of rock strength, one of the main parameters affecting rate of penetration, because recent analysis shows that significant errors occur currently. Full simulation showed that increasing UCS by 50%, can have a dramatic effect on reduction of rate of penetration, giving overall increases in drilling time by up to 82%, thus sending the message for better techniques and methodologies to estimate rock strength.

REFERENCES

1. MR Isbell and Berzas, S.K. Re-engineered Drilling Laboratory is a Premium Tool Advancing Drilling Technology by Simulating Downhole Environments. Paper ASME ETCE99-6653 presented at the ASME Energy Sources Technology Conference and Exhibition, Houston, 1–3 Feb. 1999.
2. P Langille, J Hildebrand and K Massie, Aggressive Drilling Parameters, PDC-Bit Innovations Cut Run Times in Abrasive Oklahoma Granite Wash, J Petrol. Tech. March, 36-41, 2008.
3. DC Mannon, Reducing well cost by increasing drilling efficiency, paper AADE-01-NC-HO-35 presented at the AADE 2001 National Drilling Conference, Houston, Texas, March 27 - 29, 2001.
4. KK Millheim, and Huggins R. L., An engineering simulator for drilling, Parts I & II. papers SPE 12075 & 12210, presented at the 58th Annual Technical Conference and Exhibition, San Francisco, CA, 5-8 October 1983.
5. JF Brett, and Yoder, D. L., Use of an engineering simulator for drilling rigs, paper SPE/IADC 13480 presented at the 1985 SPE/IADC Drilling Conference, New Orleans, LA, 5-8 March 1985.
6. AS Bamford, Z Wang, Well control simulation integrated with real rig equipment to improve training and skills validation, paper SPE 27269 presented at the International Conf., Jakarta, 25-27 Jan. 1994.
7. GA Cooper, AG Cooper, G Bihn, An interactive drilling simulator for teaching and research, paper SPE 30213 presented at the Petroleum Computer Conference, Houston, TX, 11-14 June, 1995.
8. GA Cooper, JF Mota, AG Cooper, Integrated petroleum engineering simulation and decision making teaching program, paper SPE 36660 presented at the SPE Annual Technical Conf, Denver CO, 6-9 Oct. 1996.
9. A.A. Abouzeid and G.A. Cooper, Experimental verification of a drilling simulator, paper presented at the 8th International Conference on Mining, Petroleum and Metallurgical Engineering, Suez Canal University, Egypt, 17 – 19 March 2003.
10. RK Bratli, Hareland, G., Stene, G.W., Dunsæd, G.W., and Gjelstad, G., Drilling Optimization Software Verified in the North Sea,” paper SPE 39007 presented at the SPE LACPEC Conference, Rio de Janeiro, 30 August-2 Sept. 1997.

11. RP Rampersad, Hareland, G., and Boonyapaluk, P.: "Drilling Optimization Using Drilling Data and Available Technology," paper SPE 27034 presented at the SPE LAPEC Conference, Buenos Aires, 27-29 April, 1994.
12. G Hareland, PR. Rampersad and S Hellvik, OM. Skår, Simulation can help optimize drilling and cut costs, *Drilling Contractor*, 42-47, Jul/Aug 2000.
13. R Teale R. The concept of specific energy in rock drilling, *Int. J. Rock Mechanics and Mining*, 2, 57-73, 1965.
14. Bilgin N., The cuttability of evaporates, *Bull. IAEG*, 25, 85-90, 1982.
15. E Detournay, CP Tan, Dependence of drilling specific energy on bottom hole pressure in shales, paper SPE/ISRM 78221 presented at the SPE/ISRM Rock Mechanics Conference, Irving TX 2-23 Oct. 2002.
16. Saga Petroleum, 31/3-3 Well Completion Report, <http://www.npd.no/engelsk/cwi/pbl/en/well/all/447.htm>, accessed Febr. 2009.
17. W Calhoun, R Ewy, New Confined Compressive Strength Calculation Improves Bit Selection and Bit Performance, paper AADE-05-NTCE-61 presented at the AADE National Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, April 5-7, 2005.
18. H Rabia. Specific energy as a criterion for bit selection, *JPT*, July, paper SPE 12355, 1225-1229, 1986.
19. VC Kelessidis, Need for better knowledge of in-situ unconfined compressive strength of rock (UCS) to improve rock drillability prediction, paper to be presented at the 3rd AMIREG Conference, Athens, 7-9 Sept. 2009.