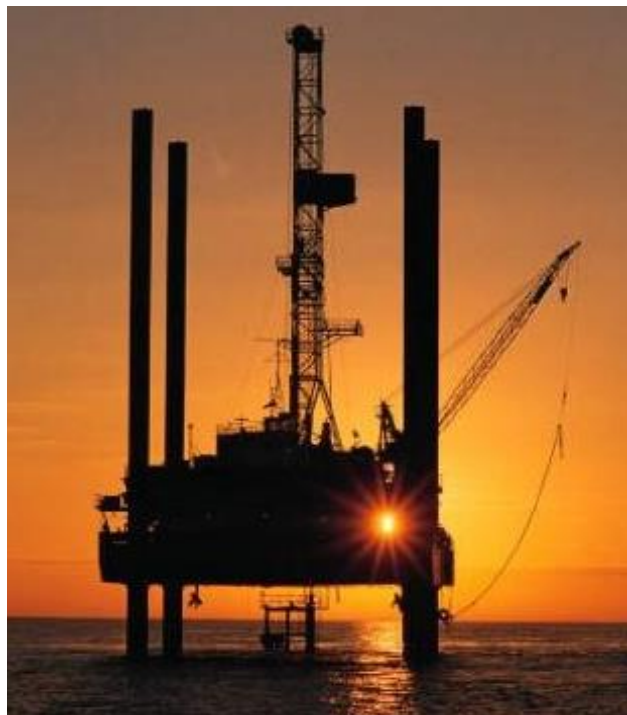




**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**



Διπλωματική διατριβή

«Μελέτη προσρόφησης και ρεολογικών χαρακτηριστικών υδατικών  
αιωρημάτων μπετονίτη που περιέχουν πολυμερή»

Εμμανουήλ Ν. Πουλακάκης

Εξεταστική επιτροπή:

Γεώργιος Χρησιδης, Καθηγητής, Επιβλέπων

Βασίλειος Χ. Κελεσιδης, Καθηγητής

Δημήτριος Μαρινάκης, Δρ.

Χανιά  
Ιούνιος, 2014

Αφιερώνεται στην  
οικογένεια μου.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ.

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας έγινε με την βοήθεια και συμπαράσταση ορισμένων ανθρώπων, τους οποίους και θέλω να ευχαριστήσω. Συγκεκριμένα, ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Κελεσίδη Βασίλειο για την πολύτιμη βοήθεια, τις συμβουλές και την υπομονή του κατά την διάρκεια της συνεργασίας μας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Χρηστίδη Γεώργιο και τον Δρ. κ. Μαρινάκη Δημήτριο που συμμετέχουν στην εξεταστική επιτροπή για τις εύστοχες παρατηρήσεις τους στο κείμενο και την αποδοχή τους στην αξιολόγηση της εργασίας.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα την Χατζησταμού Βασιλική υπ. Διδάκτορα και τον κ. Μπανδέλη Γρηγόρη για την πολύτιμη βοήθεια τους καθ' όλη την διάρκεια αυτής της προσπάθειας καθώς ήταν πρόθυμοι να με βοηθήσουν στην κατανόηση από πλευράς μου, πολλών εννοιών, λύνοντας με διάθεση κάθε μου απορία.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ.

Η συνεχής αύξηση του πληθυσμού της γης καθώς και η διαρκής οικονομική ανάπτυξη που εμφανίζουν χώρες που κατέχουν σημαντικό ποσοστό του παγκόσμιου πληθυσμού, (Κίνα, Ινδία, χώρες Λατινικής Αμερικής) συνεπάγεται ολοένα αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες οι οποίες δημιουργούν μεγαλύτερες απαιτήσεις σε ορυκτά καύσιμα με κυριότερα το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Ως απόρροια των παραπάνω οι εταιρείες εκμετάλλευσης και παραγωγής υδρογονανθράκων για να καλύψουν την αυξανόμενη ζήτηση, οδηγήθηκαν σε εξέταση περιπτώσεων ταμιευτήρων που πριν μερικά χρόνια η εκμετάλλευση τους φάνταζε ασύμφορη οικονομικά ή αδύνατη να πραγματοποιηθεί.

Οι υδρογονάνθρακες αδιαμφισβήτητα αποτελούν το πλέον οικονομικό και αξιόπιστο καύσιμο τον 21<sup>ο</sup> αιώνα. Σαν αποτέλεσμα οι εταιρείες πετρελαίου καλούνται να επενδύσουν σε νέες τεχνικές και μέσα τα οποία θα επιτρέψουν την εκμετάλλευση υδρογονανθράκων που μερικές δεκαετίες πριν οποίο εγχείρημα άντλησης τους θεωρείτο αδύνατο.

Με κυριότερους λόγους αυτούς που προαναφέρθηκαν η βιομηχανία γεωτρήσεων υδρογονανθράκων αποτελεί τροχοπέδη στην διαρκή εξέλιξη των πετρελαϊκών εταιρειών, οι οποίες κάνουν εκτεταμένες έρευνες σε νέες τεχνικές διάτρησης (Διάτρηση Ρυθμιζόμενης Πίεσης, Διάτρηση με Επένδυση), όπως επίσης και στα μέσα που χρησιμοποιούν οι εταιρείες εκμετάλλευσης (πολφοί γεωτρήσεων, κοπτικά άκρα, γεωτρώπανα) κατά την διάρκεια μιας γεώτρησης.

Οι απαιτήσεις για εκμετάλλευση κοιτασμάτων σε μεγαλύτερα βάθη και δυσκολότερες επικρατούσες συνθήκες σε ξηρά και θάλασσα ολοένα και αυξάνονται, έχοντας σαν αποτέλεσμα την εφαρμογή νέων τεχνικών και εφαρμογών διάτρησης σε ολοένα μεγαλύτερο ποσοστό των γεωτρήσεων που πραγματοποιούνται κάθε χρόνο.

Βασικό και αναπόσπαστο κομμάτι στην εκμετάλλευση υδρογονανθράκων είναι ο πολφός γεώτρησης, χωρίς την παρουσία του οποίου είναι πρακτικά αδύνατο να πραγματοποιηθεί μια γεώτρηση. Αυτό συμβαίνει διότι η χρήση του

πολφού εκτελεί κάποιες από τις κυριότερες λειτουργίες σε μια γεώτρηση όπως: η απομάκρυνση θραυσμάτων από τον πυθμένα του πηγαδιού στην επιφάνεια, η ψύξη και λίπανση του κοπτικού άκρου και της διατρητικής στήλης, η ελάττωση του ρυθμού διάβρωσης, η στήριξη ενός μέρους του βάρους του διατρητικού σωλήνα και του σωλήνα προστασίας καθώς και η διασφάλιση της μέγιστης πληροφόρησης για τους διατρηθέντες σχηματισμούς.

Είναι εύκολο να αντιληφθεί κανείς ότι για την διενέργεια κάθε γεώτρησης υπάρχουν ιδιαιτερότητες που καθιστούν επιτακτική την προσαρμογή του πολφού γεώτρησης στις εκάστοτε συνθήκες του ταμιευτήρα. Δεδομένης της ανάγκης εκμετάλλευσης κοιτασμάτων μεγάλου βάθους, παρ' όλες τις καινούριες τεχνικές που αναπτύχθηκαν ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που δημιουργήθηκε ήταν η αδυναμία εφαρμογής των συμβατικών πολφών γεώτρησης λόγω των παραμέτρων που επικρατούν σε μεγάλα βάθη. Λόγω των υψηλότερων θερμοκρασιών και πιέσεων, οι προσπάθειες εφαρμογής αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα όπως υπερβολική απώλεια πολφού, φθορές κοπτικού άκρου και διατρητικής στήλης και αδυναμία συγκράτησης των πλευρικών τοιχωμάτων κάτι που οδηγεί σε αστάθεια του συστήματος η ακόμα και απώλεια της γεώτρησης.

Είναι προφανές λοιπόν πως κρίνεται επιτακτική η ανάπτυξη πολφών γεώτρησης με ιδιότητες ικανές να ανταπεξέλθουν στις αυξανόμενες απαιτήσεις και σε αυτό το σημείο η χημική βιομηχανία κάνει την είσοδο της με την εφαρμογή των πολυμερών. Πρόκειται για χημικές ενώσεις οι οποίες σε συνδυασμό με τους συμβατικούς πολφούς γεώτρησης μας δίνουν ρεολογικά χαρακτηριστικά ικανά για να πραγματοποιηθούν γεωτρήσεις σε κοιτάσματα των οποίων η εκμετάλλευση ήταν αδύνατη.

Σε αυτήν την εργασία θα μελετηθούν και θα παρουσιαστούν πολφοί γεώτρησης μπεντονίτη με βάση το νερό σε συνδυασμό με πολυμερή. Συγκεκριμένα μελετηθήκαν δείγματα μπεντονίτη τύπου Wyoming σε συνδυασμό με τα πολυμερή Carbopol 980 και Carboxymethylcellulose (CMC). Τα δείγματα παρασκευάστηκαν και τα αποτελέσματα καταγράφηκαν στο

εργαστήριο Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Σκοπός της εργασίας είναι να μελετηθούν τα πειραματικά δεδομένα έτσι ώστε να προσδιοριστεί η προσρόφηση που εμφανίζουν τα προαναφερθέντα πολυμερή στο μπεντονίτη Wyoming και να εξαχθούν συμπεράσματα για την διαφοροποίηση αυτής σε ένα εύρος περιεκτικότητας. Βασικό ζητούμενο είναι η κατασκευή καμπύλων προσρόφησης για κάθε πολυμερές και η σύγκριση των εκατέρωθεν αποτελεσμάτων. Επίσης θα γίνει μια λεπτομερής παρουσίαση του κυριότερου παράγοντα που μας απασχολεί κατά την εκτέλεση μιας γεώτρησης που δεν είναι άλλος από τα ρεολογικά χαρακτηριστικά του πολφού διάτρησης.

Στην συνέχεια θα περιγραφούν περιληπτικά τα περιεχόμενα κάθε κεφαλαίου.

**Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>:** Στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στους μπεντονίτες που είναι η βάση των πολφών γεώτρησης που παρασκευάζονται. Συγκριμένα θα γίνει παρουσίαση της δομής τους, των κυριότερων ιδιοτήτων τους και τις εφαρμογές τους στην σύγχρονη βιομηχανία και επιστήμη.

**Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>:** Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πολυμερή που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των πολφών γεώτρησης που μελετήθηκαν και αναλύεται η δομή τους όπως και οι κυριότερες ιδιότητες τους.

**Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>:** Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους πολφούς γεώτρησης, μια ιστορική αναδρομή, τα πλεονεκτήματα που αποκομίζουμε με την χρήση τους καθώς και περιπτώσεις που χρησιμοποιήθηκαν πολυμερή σε πολφούς με σκοπό επίλυση σοβαρών προβλημάτων που εμφανιζόταν με τις συμβατικές μεθόδους εκμετάλλευσης.

**Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>:** Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο φαινόμενο της προσρόφησης καθώς αναλύονται τα είδη τα οποία διαχωρίζεται και τις ιδιότητες αυτών.

**Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>:** Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο περιγράφονται οι ρεολογικές ιδιότητες των ρευστών και οι κυριότερες παράμετροι που εμφανίζουν τα διάφορα ρεολογικά μοντέλα.

**Κεφάλαιο 6°:** Στο 6° Κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση των εργαστηριακών οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν για την διεξαγωγή των πειραμάτων.

**Κεφάλαιο 7°:** Στο 7° Κεφάλαιο γίνεται ανάλυση της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για την παρασκευή των υπό μελέτη δειγμάτων και ακολουθεί η περιγραφή των πειραμάτων που έγιναν.

**Κεφάλαιο 8°:** Στο 8° Κεφάλαιο το οποίο είναι και από τα σημαντικότερα αυτής της εργασίας γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων που ακολούθησε την επεξεργασία των δειγμάτων.

**Κεφάλαιο 9°:** Στο 9° Κεφάλαιο έχουμε την παρουσίαση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την επεξεργασία των δειγμάτων κατά την πειραματική διαδικασία καθώς και η επισήμανση κάποιων προτάσεων που θα μας βοηθούσε στην μελλοντική έρευνα και κατανόηση πάνω στο συγκεκριμένο τομέα.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.**

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΕΣ.....</b>	<b>1</b>
1.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	1
1.2. ΔΟΜΗ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΩΝ.....	2
1.3. ΓΕΝΝΕΣΗ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΩΝ.....	4
1.4. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΩΝ.....	5
1.4.1. Ιοντοεναλλακτική ικανότητα.....	5
1.4.2. Διόγκωση και ενυδάτωση.....	6
1.4.3. Συνδετική ικανότητα.....	7
1.4.4. Υψηλό ιξώδες και θιξοτροπία.....	7
1.4.5. Ρεολογικές ιδιότητες.....	8
1.5. ΧΡΗΣΕΙΣ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΩΝ.....	10
1.5.1. Πολφοί γεωτρήσεων.....	10
1.5.2. Χυτήρια.....	11
1.5.3. Σφαιροποίηση ζωοτροφών και σιδηρού.....	12
1.5.4. Φαρμακευτικά είδη και ιατρικές εφαρμογές.....	12
1.5.5. Βιομηχανία χρωμάτων.....	13
1.5.6. Βιομηχανία χαρτιού.....	13
1.5.7. Περιβαλλοντικά θέματα.....	13
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΠΟΛΥΜΕΡΗ.....</b>	<b>15</b>
2.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	15
2.2. ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΠΡΟΣΘΕΤΑ.....	15
2.2.1. Carbopol 980.....	16
2.2.2. Sodium CarboxymethylCellulose (CMC).....	18
2.3. ΧΡΗΣΕΙΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΣΕ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ.....	19
2.3.1. Αντιμετώπιση παραγωγικών προβλημάτων στο ανεπτυγμένο πεδίο του Sobhasan στην Ινδία.....	19
2.3.2. Χρήση αμίνης / ΡΗΡΑ στην περιοχή Orito της Κολομβίας.....	20



2.4. ΑΣΦΑΛΗ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΟΛΦΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΝΕΡΟ.....	22
2.5. ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗ ΠΟΛΥΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΠΟΛΦΟΥΣ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΒΑΣΗ ΤΟ ΝΕΡΟ.....	23
2.6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΣΤΙΣ ΡΕΟΛΟΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΓΕΩΤΡΗΤΙΚΩΝ ΠΟΛΦΩΝ ΤΥΠΟΥ KCL/POLYMER.....	25
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΟΛΦΟΙ ΓΕΩΤΡΗΣΩΝ.....</b>	<b>27</b>
3.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	27
3.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ.....	28
3.3. ΒΑΣΙΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΩΝ ΠΟΛΦΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ.....	31
3.3.1. Απομάκρυνση των θραυσμάτων.....	32
3.3.2. Ψύξη και λίπανση.....	33
3.3.3. Στεγανοποίηση των τοιχωμάτων του πηγαδιού.....	34
3.3.4. Έλεγχος υποεπιφανειακών τάσεων.....	34
3.3.5. Αιωρούμενα στερεά και άμμος και απελευθέρωσή τους στην επιφάνεια.....	35
3.3.6. Έλεγχος του ρυθμού διάτρησης.....	35
3.3.7. Υποστήριξη του βάρους της διατρητικής στήλης.....	36
3.3.8. Προστασία των σχηματισμών.....	36
3.3.9. Μέγιστη δυνατή διασφάλιση των πληροφοριών του πηγαδιού.....	36
3.3.10. Μεγιστοποίηση των ρυθμών διάτρησης.....	37
3.4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΠΟΛΦΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ.....	38
3.4.1. Η απουσία άμμου και αποξεστικών σωματιδίων.....	38
3.4.2. Το επαρκές περιεχόμενο κολλοειδούς.....	39
3.4.3. Πυκνότητα.....	42
3.4.4. Το pH του διατρητικού πολφού.....	43
3.4.5. Το άλας και άλλοι σχετικοί ηλεκτρολύτες.....	43

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ.....</b>	<b>45</b>
4.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	45
4.2. ΕΙΔΗ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ.....	47
4.3. ΙΣΟΘΕΡΜΕΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ.....	48
4.3.1. Γενικά.....	48
4.3.2. Μοντέλα σταθερού pH.....	48
4.3.2.1.Ισόθερμη Langmuir.....	49
4.3.2.2.Ισόθερμη Freundlich.....	50
4.3.2.3.Γραμμική ισόθερμη.....	51
4.3.2.4.Ισόθερμη Redlich-Peterson.....	52
4.3.2.5.Ισόθερμη B.E.T.....	52
4.3.3. Μοντέλα σε μεταβλητό pH.....	53
4.3.3.1.Μοντέλο σταθερής χωρητικότητας CCM.....	54
4.3.3.2.Μοντέλο διάχυτης στοιβάδας (DDLm).....	55
4.3.4. Κινητική της προσρόφησης.....	56
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΡΕΟΛΟΓΙΑ.....</b>	 <b>57</b>
5.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	57
5.2. ΡΕΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	58
5.2.1 Νευτώνεια ρευστά.....	58
5.2.2 Μη Νευτώνεια ρευστά.....	58
5.2.2.1 Μοντέλο πλαστικό Bingham.....	59
5.2.2.2 Μοντέλο Power law.....	59
5.2.2.3 Μοντέλο Herschel- Burlkley.....	61
5.3. ΙΞΩΔΕΣ.....	61
5.4. ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟ ΙΞΩΔΕΣ.....	62
5.5. ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟ ΙΞΩΔΕΣ.....	62
5.5.1. Θερμοκρασία.....	62
5.5.2. Πίεση.....	63
5.6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ - ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΑ ΡΕΥΣΤΑ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ.....	64

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ.....</b>	<b>65</b>
6.1. ΟΜΟΑΞΟΝΙΚΟ ΙΞΩΔΟΜΕΤΡΟ .....	65
6.2.ΦΑΣΜΑΤΟΦΩΤΟΜΕΤΡΙΑ ΥΠΕΡΙΩΔΟΥΣ - ΟΡΑΤΟΥ.....	70
6.3. ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ (F.T.I.R.).....	72
6.4. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΙΔΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....	74
6.5. ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ – pH.....	75
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ-ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>77</b>
7.1. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	77
7.1.1. Προετοιμασία δειγμάτων πολφού μπεντονίτη Wyoming.....	77
7.1.2. Παρασκευή δειγμάτων με προσθήκη NaCl σε πολφούς μπεντονίτη-CMC.....	78
7.1.3. Προετοιμασία δειγμάτων πολφού Carbopol 980.....	80
7.1.4. Προετοιμασία δειγμάτων πολφού CMC (Carboxymethylcellulose).....	80
7.1.5. Προετοιμασία δειγμάτων πολφού μπεντονίτη σε συνδυασμό με πολυμερές.....	81
7.2. ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ - ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ.....	82
7.2.1. Πρότυπη καμπύλη αναφοράς.....	82
7.2.2. Προετοιμασία δειγμάτων για την μέτρηση προσρόφησης.....	83
7.2.3. Επεξεργασία των μετρήσεων.....	84
7.3. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΦΑΣΜΑΤΟΦΩΤΟΜΕΤΡΙΑ (FT- IR).....	87
7.4. ΜΕΛΕΤΗ ΡΕΟΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.....	87
7.4.1. Γενικά.....	87
7.4.2. Εισαγωγή δεδομένων.....	88
7.4.3. Επιλογή μοντέλων ροής.....	89
7.4.4. Ανάγνωση των αποτελεσμάτων.....	90

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 - ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>92</b>
8.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	92
8.2 ΠΡΟΤΥΠΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.....	92
8.2.1. Πρότυπη καμπύλη πολυμερούς CMC.....	92
8.2.2. Πρότυπη καμπύλη πολυμερούς Carbopol 980.....	95
8.3. ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ.....	97
8.3.1. Προσρόφηση CMC σε μπεντονίτη 3% (w/v).....	97
8.3.2. Προσρόφηση CMC σε μπεντονίτη 4% (w/v).....	100
8.3.3. Προσρόφηση πολυμερούς Carbopol 980 σε μπεντονίτη 3% (w/v).....	103
8.3.4. Προσρόφηση πολυμερούς Carbopol 980 σε μπεντονίτη 4%(w/v).....	107
8.3.5. Ισόθερμες καμπύλες προσρόφησης.....	111
8.4. ΡΕΟΛΟΓΙΑ.....	112
8.4.1 Ρεολογία πολφών μπεντονίτη 3% (w/v) με CMC.....	112
8.4.2 Ρεολογία πολφών μπεντονίτη 4% (w/v) με CMC.....	114
8.4.3 Ρεολογία πολφών μπεντονίτη 3% (w/v) με Carbopol 980.....	116
8.4.4 Ρεολογία πολφών μπεντονίτη 4% (w/v) με Carbopol 980.....	118
8.4.5. Ρεολογικά χαρακτηριστικά διαλυμάτων CMC.....	120
8.4.6. Ρεολογικά χαρακτηριστικά διαλυμάτων Carbopol 980.....	122
8.4.7. Επίδραση προσθήκης NaCl στις ρεολογικές ιδιότητες πολφών μπεντονίτη – CMC.....	124
8.5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΣΤΟ pH ΠΟΛΦΩΝ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ.....	128
8.6. ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΦΑΣΜΑΤΟΦΩΤΟΜΕΤΡΙΑ (FT-IR).....	131
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9 - ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>133</b>
9.1. ΓΕΝΙΚΑ.....	133
9.2. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΣΕ ΠΟΛΦΟΥΣ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ.....	134
9.2.1. Πρότυπη καμπύλη αναφοράς.....	134
9.2.2. Προσρόφηση CMC σε πολφούς μπεντονίτη.....	134
9.2.3. Προσρόφηση Carbopol 980 σε πολφούς μπεντονίτη.....	136
9.2.3.1. Σύγκριση των αποτελεσμάτων προσρόφησης με υπάρχουσες μελέτες.....	138

9.3. ΡΕΟΛΟΓΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	138
9.3.1. Συμπεράσματα για πολφούς CMC.....	138
9.3.2. Συμπεράσματα για πολφούς Carborol 980.....	139
9.3.3. Συμπεράσματα για πολφούς μπεντονίτη – CMC.....	139
9.3.4. Συμπεράσματα για πολφούς μπεντονίτη - Carborol 980.....	141
9.3.4.1. Σύγκριση των ρεολογικών αποτελεσμάτων με υπάρχουσες μελέτες...	144
9.3.5. Επίδραση προσθήκης NaCl στις ρεολογικές ιδιότητες πολφών μπεντονίτη – CMC.....	145
9.4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ pH ΣΕ ΠΟΛΦΟΥΣ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ.....	146

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>148</b>
--------------------------	------------

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΡΕΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΟΛΦΩΝ CMC – ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ.....</b>	<b>152</b>
--------------------------------------------------------------	------------

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΡΕΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΟΛΦΩΝ CARBOROL 980 – ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ.....</b>	<b>160</b>
---------------------------------------------------------------------------	------------

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΡΕΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΟΛΦΩΝ CMC – NaCl – ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ .....</b>	<b>171</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΠΙΝΑΚΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΙΞΩΔΟΜΕΤΡΗΣΗΣ.....</b>	<b>176</b>

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.

<b>Πίνακας 4.1:</b> Σύγκριση Φυσικής- Χημικής ρόφησης αερίων από επιφάνεια στερεών (Γιδαράκος, 2005).....	47
<b>Πίνακας 6.1:</b> Χαρακτηριστικά ιξωδομέτρου.....	67
<b>Πίνακας 6.2:</b> Εύρος μετρήσεων οργάνου.....	68
<b>Πίνακας 7.1:</b> Δείγματα μελέτης επίδρασης NaCl στη ρεολογία και pH πολφών μπεντονίτη-CMC.....	79

<b>Πίνακας 7.2:</b> Δείγματα πολφών μπεντονίτη-CMC για μελέτη προσρόφησης.....	86
<b>Πίνακας 7.3:</b> Δείγματα πολφών μπεντονίτη-CMC για μελέτη προσρόφησης.....	86
<b>Πίνακας 8.1:</b> Αποτελέσματα φασματοφωτόμετρου για πρότυπη καμπύλη πολυμερούς CMC 1 %.....	93
<b>Πίνακας 8.2:</b> Αποτελέσματα φασματοφωτόμετρου για πρότυπη καμπύλη πολυμερούς Carborol 980.....	95
<b>Πίνακας 8.3:</b> Παρασκευασθέντα δείγματα για την μελέτη προσρόφησης του πολυμερούς CMC σε πολφό μπεντονίτη 3%(w/v).....	97
<b>Πίνακας 8.4:</b> Αποτελέσματα μετρήσεων φασματοφωτόμετρου DR/4000U για προσρόφηση CMC σε πολφό μπεντονίτη 3%(w/v).....	98
<b>Πίνακας 8.5:</b> Επεξεργασία αποτελεσμάτων προσρόφησης CMC σε πολφό μπεντονίτη 3% (w/v).....	99
<b>Πίνακας 8.6:</b> Παρασκευασθέντα δείγματα για την μελέτη προσρόφησης του πολυμερούς CMC σε πολφό μπεντονίτη 4%(w/v).....	100
<b>Πίνακας 8.7:</b> Αποτελέσματα μετρήσεων φασματοφωτόμετρου DR/4000U για προσρόφηση CMC σε πολφό μπεντονίτη 4%(w/v).....	101
<b>Πίνακας 8.8:</b> Επεξεργασία αποτελεσμάτων προσρόφησης CMC σε πολφό μπεντονίτη 4% (w/v).....	102
<b>Πίνακας 8.9:</b> Παρασκευασθέντα δείγματα για την μελέτη προσρόφησης του πολυμερούς Carborol 980 σε πολφό μπεντονίτη 3%(w/v).....	104
<b>Πίνακας 8.10:</b> Αποτελέσματα μετρήσεων φασματοφωτόμετρου DR/4000U για προσρόφηση Carborol 980 σε πολφό μπεντονίτη 3%(w/v).....	104
<b>Πίνακας 8.11:</b> Επεξεργασία αποτελεσμάτων προσρόφησης Carborol 980 σε πολφό μπεντονίτη 3% (w/v).....	105
<b>Πίνακας 8.12:</b> Παρασκευασθέντα δείγματα για την μελέτη προσρόφησης του πολυμερούς Carborol 980 σε πολφό μπεντονίτη 4%(w/v).....	107
<b>Πίνακας 8.13:</b> Αποτελέσματα μετρήσεων φασματοφωτόμετρου DR/4000U για προσρόφηση Carborol 980 σε πολφό μπεντονίτη 4%(w/v).....	108

<b>Πίνακας 8.14:</b> Επεξεργασία αποτελεσμάτων προσρόφησης Carborol 980 σε πολφό μπεντονίτη 4% (w/v).....	109
<b>Πίνακας 8.15:</b> Ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων μπεντονίτη 3% (w/v) 1000 ml – CMC.....	113
<b>Πίνακας 8.16 :</b> Ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων μπεντονίτη 4% w/v 1000 ml – CMC.....	115
<b>Πίνακας 8.17 :</b> Ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων μπεντονίτη 3% w/v 1000 ml – Carborol 980.....	117
<b>Πίνακας 8.18:</b> Ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων μπεντονίτη 4% w/v 1000 ml – Carborol 980.....	119
<b>Πίνακας 8.19:</b> Ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων CMC (500 ml).....	121
<b>Πίνακας 8.20:</b> Ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων Carborol 980 .....	123
<b>Πίνακας 8.20:</b> Ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων μπεντονίτη 6.42% (w/v 500 ml) – CMC – NaCl.....	126
<b>Πίνακας 8.21:</b> Επίδραση προσθήκης CMC και NaCl στο pH πολφών μπεντονίτη περιεκτικότητας 6.42% (w/v) 500ml.....	125
<b>Πίνακας 8.22:</b> Επίδραση προσθήκης Carborol 980 στο pH πολφών μπεντονίτη περιεκτικότητας 4% (w/v) 1000ml.....	130
<b>Πίνακας 8.23:</b> Επίδραση προσθήκης Carborol 980 στο pH πολφών μπεντονίτη περιεκτικότητας 3% (w/v) 1000ml.....	129
<b>Πίνακας 8.24:</b> Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των παραμέτρων προσρόφησης σύμφωνα με την ισόθερμη Freundlich.....	111
<b>Πίνακας 8.25:</b> Ανάλυση ταινιών απορρόφησης του δείγματος μπεντονίτη....	131

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.

<b>Σχήμα 1.1:</b> Μπεντονίτης τύπου Wyoming που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία.....	1
<b>Σχήμα 1.2 :</b> Δομή των σμεκτιτών των αργιλικών ορυκτών.....	3
<b>Σχήμα 1.3 :</b> Διοκταεδρικοί και τριοκταεδρικοί σμεκτίτες.....	4

<b>Σχήμα 1.4:</b> Δημιουργία κολλοειδών αιωρημάτων νατριούχων σμηκτιτών.....	9
<b>Σχήμα 2.1:</b> Σχηματική αναπαράσταση δομής Carborol 980.....	17
<b>Σχήμα 2.2:</b> Το Carborol 980 στη φυσική του κατάσταση.....	17
<b>Σχήμα 2.3:</b> Σχηματική αναπαράσταση της δομής του CMC.....	18
<b>Σχήμα 3.1:</b> Σχηματική αναπαράσταση κίνησης διατρητικού ρευστού.....	30
<b>Σχήμα 3.2:</b> Γεώτρηση πετρελαίου στην περιοχή του κόλπου του Μεξικού.....	28
<b>Σχήμα 3.3:</b> Εργασία πρόσθεσης στελεχών διατρητικής στήλης κατά την γεώτρηση πετρελαίου.....	44
<b>Σχήμα 4.1:</b> Σχηματική αναπαράσταση προσρόφησης.....	46
<b>Σχήμα 4.2:</b> Ισόθερμη Freundlich.....	51
<b>Σχήμα 4.3:</b> Σύγκριση μοντέλων προσρόφησης.....	52
<b>Σχήμα 4.4:</b> Σχηματική αναπαράσταση επιφανειακής συμπλοκοποίησης ιόντων (Drever, 1997).....	54
<b>Σχήμα 5.1:</b> Απεικόνιση γραμμικής και τυρβώδους ροής.....	57
<b>Σχήμα 5.2:</b> Καμπύλες ρεολογικών μοντέλων.....	60
<b>Σχήμα 5.3:</b> Αναπαράσταση σχέσης ιξώδους-θερμοκρασίας.....	62
<b>Σχήμα 5.4:</b> Εξάρτηση πίεσης- θερμοκρασίας.....	63
<b>Σχήμα 6.1:</b> Σχηματική παράσταση ομοαξονικού ιξωδομέτρου.....	65
<b>Σχήμα 6.2:</b> Ιξωδόμετρο Grace Instrument M3500a.....	66
<b>Σχήμα 6.3:</b> Τυπική επιφάνεια εργασίας λογισμικού.....	68
<b>Σχήμα 6.4:</b> Τυπικό διάγραμμα κατά την πραγματοποίηση πειράματος σε πραγματικό χρόνο.....	69
<b>Σχήμα 6.5:</b> Τυπικά διαγράμματα Διατμητικής τάσης – Ρυθμού διάτμησης.....	69
<b>Σχήμα 6.6:</b> Το φασματοφωτόμετρο που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των μετρήσεων DR/4000U.....	70
<b>Σχήμα 6.7:</b> Σχηματικό διάγραμμα ποσοτικής φασματοφωτομετρίας.....	71
<b>Σχήμα 6.8:</b> Πειραματική διάταξη F.T.I.R. της Perkin – Elmer του εργαστηρίου Ανάλυσης Ρευστών και Πυρήνων Υπόγειων Ταμιευτήρων.....	72
<b>Σχήμα 6.9:</b> Η υπέρυθρη περιοχή στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....	73
<b>Σχήμα 6.10:</b> Σχηματική αναπαράσταση φασματοφωτόμετρου διπλής δέσμης...74	



<b>Σχήμα 6.11:</b> Συσκευή μέτρησης τύπου Quantasorb του εργαστηρίου Μηχανικής Τεμαχιδίων και Εμπλουτισμού.....	75
<b>Σχήμα 6.12:</b> Συσκευή μέτρησης pH και θερμοκρασίας, pH 210 της HANNA instruments.....	76
<b>Σχήμα 7.1:</b> Απεικόνιση πολφού μπεντονίτη έπειτα ανάδευση στις 11000 rpm.....	78
<b>Σχήμα 7.2:</b> Αναδευτήρας της Hamilton Beach, δυνατότητας 11000 rpm.....	80
<b>Σχήμα 7.3:</b> Ζυγός ακριβείας 0.01 gr για την παρασκευή των δειγμάτων.....	81
<b>Σχήμα 7.4:</b> Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων.....	89
<b>Σχήμα 7.5:</b> Απεικόνιση κεντρικού παράθυρου του προγράμματος “fitting model” .....	90
<b>Σχήμα 7.6:</b> Απεικόνιση παράθυρου αποτελεσμάτων κατόπιν υπολογιστικής επίλυσης δείγματος Μπεντονίτη 6.42%(w/v) 500 ml.....	91

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.

<b>Διάγραμμα 8.1:</b> Απεικόνιση πρότυπης καμπύλης για πολυμερές CMC.....	94
<b>Διάγραμμα 8.2:</b> Απεικόνιση του ευθύγραμμου τμήματος της πρότυπης καμπύλης και της εξίσωσης αυτής για πολυμερές CMC.....	94
<b>Διάγραμμα 8.3:</b> Πρότυπη καμπύλη για πολυμερές Carborol 980.....	96
<b>Διάγραμμα 8.4:</b> Απεικόνιση του ευθύγραμμου τμήματος της πρότυπης καμπύλης και της εξίσωσης αυτής για πολυμερές Carborol 980.....	96
<b>Διάγραμμα 8.5:</b> Γραφική παράσταση προσρόφησης πολυμερούς CMC (rpm) σε πολφό μπεντονίτη 3% (w/v) .....	99
<b>Διάγραμμα 8.6:</b> Γραφική παράσταση προσρόφησης πολυμερούς CMC (mg/m <sup>2</sup> ) σε πολφό μπεντονίτη 3% (w/v) .....	100
<b>Διάγραμμα 8.7:</b> Γραφική παράσταση προσρόφησης πολυμερούς CMC (rpm) σε πολφό μπεντονίτη 4% (w/v) .....	102
<b>Διάγραμμα 8.8:</b> Γραφική παράσταση προσρόφησης πολυμερούς CMC (mg/m <sup>2</sup> ) σε πολφό μπεντονίτη 4% (w/v) .....	103

<b>Διάγραμμα 8.9:</b> Γραφική παράσταση προσρόφησης πολυμερούς Carborol 980 (ppm) σε πολφό μπεντονίτη 3% (w/v) .....	106
<b>Διάγραμμα 8.10:</b> Γραφική παράσταση προσρόφησης πολυμερούς Carborol 980 (mg/m <sup>2</sup> ) σε πολφό μπεντονίτη 3% (w/v) .....	106
<b>Διάγραμμα 8.11:</b> Γραφική παράσταση προσρόφησης πολυμερούς Carborol 980 (ppm) σε πολφό μπεντονίτη 4% (w/v) .....	110
<b>Διάγραμμα 8.12:</b> Γραφική παράσταση προσρόφησης πολυμερούς Carborol 980 (mg/m <sup>2</sup> ) σε πολφό μπεντονίτη 4% (w/v) .....	110
<b>Διάγραμμα 8.13:</b> Μεταβολή παραμέτρων $\tau_y$ (Pa), $K$ (Pa·s <sup>n</sup> ) και $n$ (-) για πολφούς μπεντονίτη 3% (w/v) 1000 ml – CMC. ....	112
<b>Διάγραμμα 8.14:</b> Μεταβολή παραμέτρων $\tau_y$ (Pa), $K$ (Pa·s <sup>n</sup> ) και $n$ (-) για πολφούς μπεντονίτη 4% (w/v) 1000 ml – CMC.....	114
<b>Διάγραμμα 8.15:</b> Μεταβολή παραμέτρων $\tau_y$ (Pa), $K$ (Pa·s <sup>n</sup> ) και $n$ (-) για πολφούς μπεντονίτη 3% (w/v) 1000 ml – Carborol 980.....	116
<b>Διάγραμμα 8.16:</b> Μεταβολή παραμέτρων $\tau_y$ (Pa), $K$ (Pa·s <sup>n</sup> ) και $n$ (-) για πολφούς μπεντονίτη 4% (w/v) 1000 ml – Carborol 980.....	118
<b>Διάγραμμα 8.17:</b> Μεταβολή παραμέτρων $K$ (Pa·s <sup>n</sup> ) και $n$ (-)για διαλύματα CMC (500 ml) .....	120
<b>Διάγραμμα 8.18:</b> Μεταβολή παραμέτρων $\tau_y$ (Pa), $K$ (Pa·s <sup>n</sup> ) και $n$ (-) για διαλύματα Carborol 980 (500ml).....	122
<b>Διάγραμμα 8.19:</b> Επίδραση προσθήκης CMC στις ρεολογικές παραμέτρους πολφών μπεντονίτη 6.42%(w/v) 500ml (NaCl 0M).....	124
<b>Διάγραμμα 8.20:</b> Επίδραση προσθήκης NaCl 0.01M, στις ρεολογικές παραμέτρους πολφών μπεντονίτη 6.42%(w/v) – CMC (500ml)....	125
<b>Διάγραμμα 8.21:</b> Επίδραση προσθήκης NaCl 0.1M, στις ρεολογικές παραμέτρους πολφών μπεντονίτη 6.42%(w/v) – CMC (500ml).....	125
<b>Διάγραμμα 8.22:</b> Επίδραση προσθήκης NaCl και CMC στην τάση διολίσθησης, $\tau_y$ (Pa), πολφών μπεντονίτη 6.42%(w/v) 500ml.....	127
<b>Διάγραμμα 8.23:</b> Επίδραση προσθήκης NaCl και CMC στον δείκτη συνάφειας, $K$ (Pa·s <sup>n</sup> ), πολφών μπεντονίτη 6.42%(w/v) 500ml.....	127

<b>Διάγραμμα 8.24:</b> Επίδραση προσθήκης NaCl και CMC στον συντελεστή ροής, $n$ (-) , πολφών μπεντονίτη 6.42%(w/v) 500ml.....	128
<b>Διάγραμμα 8.25:</b> Μεταβολή pH σε πολφούς μπεντονίτη – Carbopol 980.....	130
<b>Διάγραμμα 8.26:</b> Διάγραμμα Φασματοφωτομετρίας αρχικού δείγματος μπεντονίτη και δείγματος με προσθήκη Carbopol 980 συγκέντρωσης 0.1% (w/v).....	131
<b>Διάγραμμα 9.1:</b> Σύγκριση προσρόφησης CMC σε πολφούς μπεντονίτη περιεκτικότητας 3 και 4 % (w/v) 1000ml.....	136
<b>Διάγραμμα 9.2:</b> Σύγκριση προσρόφησης Carbopol 980 σε πολφούς μπεντονίτη περιεκτικότητας 3 και 4 % (w/v) 1000ml.....	137
<b>Διάγραμμα 9.3:</b> Σύγκριση τάσης διολίσθησης, $\tau_y$ (Pa) σε πολφούς CMC- μπεντονίτη περιεκτικότητας 3 και 4 % (w/v) 1000ml.....	140
<b>Διάγραμμα 9.4:</b> Σύγκριση δείκτη συνάφειας, $K$ (Pa·s <sup>n</sup> ), σε πολφούς CMC- μπεντονίτη περιεκτικότητας 3 και 4 % (w/v) 1000ml.....	141
<b>Διάγραμμα 9.5:</b> Σύγκριση συντελεστή ροής, $n$ (-), σε πολφούς CMC- μπεντονίτη περιεκτικότητας 3 και 4 % (w/v) 1000ml.....	141
<b>Διάγραμμα 9.6:</b> Σύγκριση τάσης διολίσθησης, $\tau_y$ (Pa) σε πολφούς Carbopol 980 - μπεντονίτη περιεκτικότητας 3 % και 4 % (w/v) 1000ml.....	143
<b>Διάγραμμα 9.7:</b> Σύγκριση δείκτη συνάφειας, $K$ (Pa·s <sup>n</sup> ), σε πολφούς Carbopol980- μπεντονίτη περιεκτικότητας 3 και 4 % (w/v) 1000ml.....	143
<b>Διάγραμμα 9.8:</b> Σύγκριση συντελεστή ροής, $n$ (-), σε πολφούς Carbopol980- μπεντονίτη περιεκτικότητας 3 και 4 % (w/v) 1000ml.....	144
<b>Διάγραμμα 9.9:</b> Επίδραση προσθήκης Carbopol 980 στο pH πολφών μπεντονίτη 4%(w/v) 1000ml.....	146
<b>Διάγραμμα 9.10:</b> Επίδραση προσθήκης NaCl στο pH πολφών μπεντονίτη 6.42%(w/v) 500ml.....	147
<b>Διάγραμμα 9.11:</b> Επίδραση προσθήκης CMC στο pH πολφών μπεντονίτη 6.42%(w/v) 500ml.....	147

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΡΕΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.

Ρεόγραμμα 1.1: Πολφός μπεντονίτη 3%(w/v) 500ml.....	152
Ρεόγραμμα 1.2: Πολφός μπεντονίτη 3%- CMC 0.2%(w/v) 1000ml.....	152
Ρεόγραμμα 1.3: Πολφός μπεντονίτη 3%- CMC 0.4%(w/v) 1000ml.....	153
Ρεόγραμμα 1.4: Πολφός μπεντονίτη 3%- CMC 0.6%(w/v) 1000ml.....	153
Ρεόγραμμα 1.5: Πολφός μπεντονίτη 3%- CMC 0.8%(w/v) 1000ml.....	154
Ρεόγραμμα 1.6: Πολφός μπεντονίτη 3%- CMC 1%(w/v) 1000ml.....	154
Ρεόγραμμα 1.7: Πολφός μπεντονίτη 3%- CMC 1.5%(w/v) 1000ml.....	155
Ρεόγραμμα 1.8: Πολφός μπεντονίτη 4% (w/v) 500ml.....	155
Ρεόγραμμα 1.9: Πολφός μπεντονίτη 4% - CMC 0.2% (w/v) 1000ml.....	156
Ρεόγραμμα 1.10: Πολφός μπεντονίτη 4% - CMC 0.5% (w/v) 1000ml.....	156
Ρεόγραμμα 1.11: Πολφός μπεντονίτη 4% - CMC 1% (w/v) 1000ml.....	157
Ρεόγραμμα 1.12: CMC 0.4% (w/v) 500ml.....	157
Ρεόγραμμα 1.13: CMC 0.8% (w/v) 500ml.....	158
Ρεόγραμμα 1.14: CMC 1.2% (w/v) 500ml.....	158
Ρεόγραμμα 1.15: CMC 1.6% (w/v) 500ml.....	159
Ρεόγραμμα 1.16: CMC 2% (w/v) 500ml.....	159
Ρεόγραμμα 1.17: CMC 3% (w/v) 500ml.....	160
Ρεόγραμμα 2.1: Πολφός μπεντονίτη 4%(w/v) 500ml.....	160
Ρεόγραμμα 2.2: Πολφός μπεντονίτη 4%- Carbopol 980 0.02%(w/v) 1000ml....	161
Ρεόγραμμα 2.3: Πολφός μπεντονίτη 4%- Carbopol 980 0.03%(w/v) 1000ml...161	
Ρεόγραμμα 2.4: Πολφός μπεντονίτη 4%- Carbopol 980 0.05%(w/v) 1000ml...162	
Ρεόγραμμα 2.5: Πολφός μπεντονίτη 4%- Carbopol 980 0.07%(w/v) 1000ml...162	
Ρεόγραμμα 2.6: Πολφός μπεντονίτη 4%- Carbopol 980 0.08%(w/v) 1000ml....163	
Ρεόγραμμα 2.7: Πολφός μπεντονίτη 4%- Carbopol 980 0.09%(w/v) 1000ml....163	
Ρεόγραμμα 2.8: Πολφός μπεντονίτη 4%- Carbopol 980 0.15%(w/v) 1000ml...164	
Ρεόγραμμα 2.9: Πολφός μπεντονίτη 3%(w/v) 500ml.....	164
Ρεόγραμμα 2.10: Πολφός μπεντονίτη 3%- Carbopol 980 0.03%(w/v) .....	165
Ρεόγραμμα 2.11: Πολφός μπεντονίτη 3%- Carbopol 980 0.05%(w/v) .....	165
Ρεόγραμμα 2.12: Πολφός μπεντονίτη 3%- Carbopol 980 0.08%(w/v) .....	166

<b>Ρεόγραμμα 2.13:</b> Πολφός μπεντονίτη 3%- Carbopol 980 0.1%(w/v) .....	166
<b>Ρεόγραμμα 2.14:</b> Πολφός μπεντονίτη 3%- Carbopol 980 0.15%(w/v) .....	167
<b>Ρεόγραμμα 2.15:</b> Πολφός Carbopol 980 0.04%(w/v) 500ml.....	167
<b>Ρεόγραμμα 2.16:</b> Πολφός Carbopol 980 0.05%(w/v) 500ml.....	168
<b>Ρεόγραμμα 2.17:</b> Πολφός Carbopol 980 0.07%(w/v) 500ml.....	168
<b>Ρεόγραμμα 2.18:</b> Πολφός Carbopol 980 0.08%(w/v) 500ml.....	169
<b>Ρεόγραμμα 2.19:</b> Πολφός Carbopol 980 0.09%(w/v) 500ml.....	169
<b>Ρεόγραμμα 2.20:</b> Πολφός Carbopol 980 0.1%(w/v) 500ml.....	170
<b>Ρεόγραμμα 2.21:</b> Πολφός Carbopol 980 0.15%(w/v) 500ml.....	170
<b>Ρεόγραμμα 3.1:</b> Πολφός μπεντονίτη 6.42% (w/v) 500ml.....	171
<b>Ρεόγραμμα 3.2:</b> Πολφός μπεντονίτη 6.42%- CMC 0.1%(w/v) 500ml.....	171
<b>Ρεόγραμμα 3.3:</b> Πολφός μπεντονίτη 6.42%- CMC 0.2%(w/v) 500ml.....	172
<b>Ρεόγραμμα 3.4:</b> Πολφός μπεντονίτη 6.42% (w/v) – NaCl 0.01M, 500ml.....	172
<b>Ρεόγραμμα 3.5:</b> Πολφός μπεντονίτη 6.42% - CMC 0.1%(w/v) – NaCl 0.01M,.....	173
<b>Ρεόγραμμα 3.6:</b> Πολφός μπεντονίτη 6.42% - CMC 0.2%(w/v) – NaCl 0.01M, 500ml.....	173
<b>Ρεόγραμμα 3.7:</b> Πολφός μπεντονίτη 6.42%(w/v) – NaCl 0.1M, 500ml.....	174
<b>Ρεόγραμμα 3.8:</b> Πολφός μπεντονίτη 6.42% - CMC 0.1%(w/v) – NaCl 0.1M, 500ml.....	174
<b>Ρεόγραμμα 3.9:</b> Πολφός μπεντονίτη 6.42% - CMC 0.2%(w/v) – NaCl 0.1M, 500ml.....	175

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΕΣ**

### **1.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Η έννοια του μπεντονίτη χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1898 από τον Αμερικανό γεωλόγο Knight για να περιγράψει μια άργιλο που βρέθηκε στο Fort Benton της πολιτείας Wyoming των Η.Π.Α. Το βασικό του συστατικό το οποίο είναι και ο κύριος παράγοντας που ελέγχει τις ιδιότητες του μπεντονίτη είναι το ορυκτό σμεκτίτης με κύριο αντιπρόσωπο το μοντμοριλλονίτη, ο οποίος έχει πάρει το όνομα του από την ομώνυμη περιοχή της Γαλλίας. Ανάλογα με τη φύση της γένεσης τους οι μπεντονίτες περιέχουν ποικίλα σύνδρομα ορυκτά όπως χαλαζία, άστριο, οπάλιο και γύψο. Οι μπεντονίτες συνήθως σχηματίζονται από επί τόπου εξαλλοίωση ηφαιστειακής τέφρας.



**Σχήμα 1.1:** Μπεντονίτης τύπου Wyoming που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία.

Ένα κύριο χαρακτηριστικό του μπεντονίτη είναι οι κolloειδείς ιδιότητες που εμφανίζει κατά την επαφή του με το νερό δημιουργώντας ρευστό με υψηλό ιξώδες ενώ παράλληλα παρουσιάζει αύξηση του όγκου του. Ο μπεντονίτης είναι πολύτιμη πρώτη ύλη καθώς με τις ιδιότητες του εμφανίζει προσρόφηση ύδατος, ενυδάτωση και διόγκωση.

Τα κοιτάσματα μπεντονίτη εμφανίζουν διαφοροποιήσεις στη χημική σύσταση τους. Με βάση τον τρόπο γένεσης του κοιτάσματος διακρίνονται οι παρακάτω κατηγορίες:

- Ηφαιστειογενείς – Ιζηματογενείς : Είναι οι μπεντονίτες που προέρχονται από υελώδεις τόφφους που αποτέθηκαν σε θαλάσσιες λεκάνες και δημιουργούνται επί τόπου (*in situ*).
- Ηφαιστειογενείς – Υδροθερμικοί: Είναι οι μπεντονίτες εκείνοι που προκύπτουν από υδροθερμική εξαλλοίωση πυριγενών πετρωμάτων και εμφανίζουν πολύ καλή ποιότητα.
- Κοιτάσματα μπεντονίτη τα οποία προέρχονται από αποσάθρωση *in situ* και εμφανίζουν μεγάλες διακυμάνσεις στην ποιότητα.
- Μπεντονίτες που προέρχονται από έκπλυση ζωνών αποσάθρωσης και μεταφοράς, με απόθεση υλικού, που εμφανίζουν πολύ καλή ποιότητα.

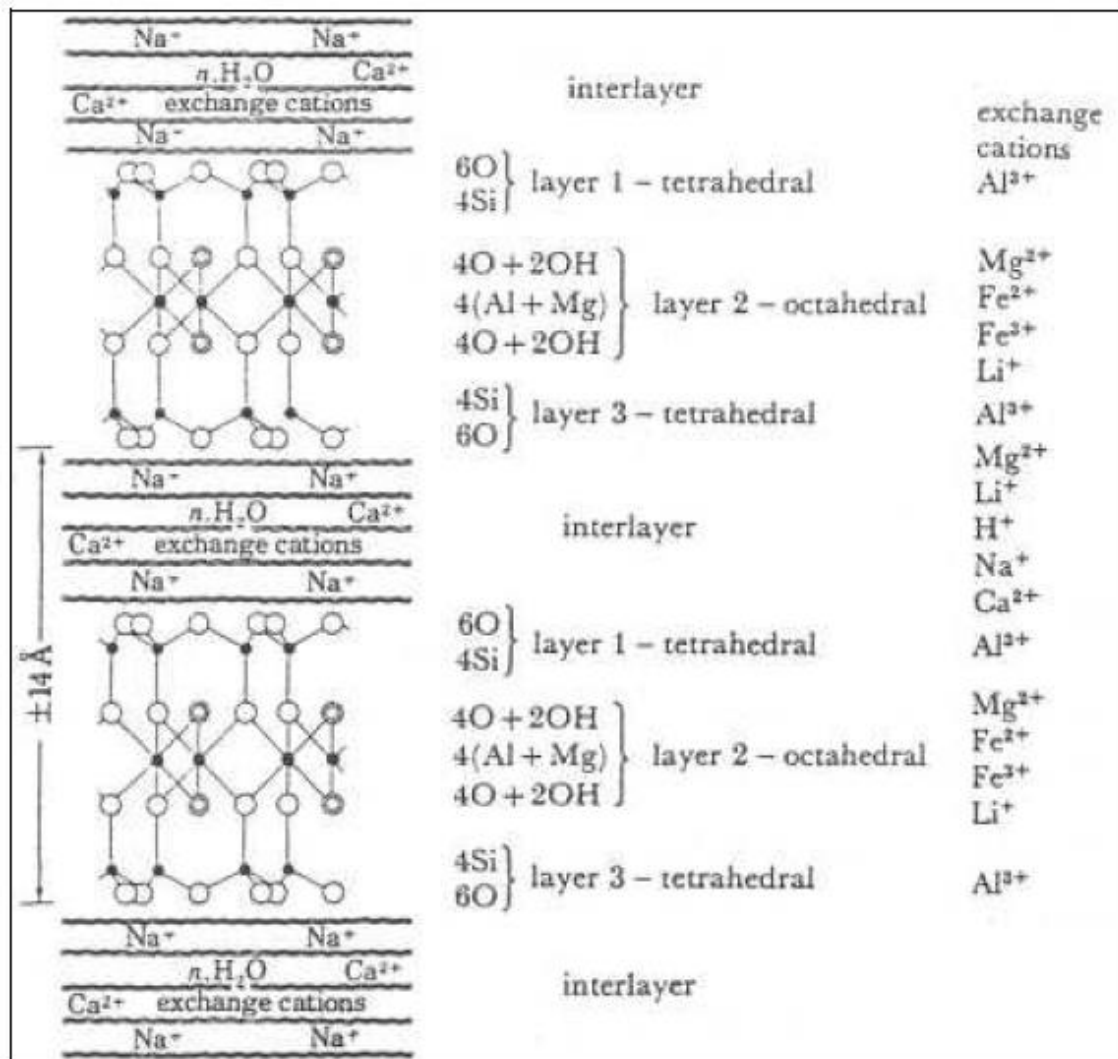
Επίσης οι μπεντονίτες διαχωρίζονται και με βάση τον βαθμό διόγκωσης σε νατριούχους οι οποίοι διογκώνονται και έχουν σαν κύριο ανταλλάξιμο ιόν το  $\text{Na}^+$  και σε ασβεστούχους οι οποίοι δεν διογκώνονται, έχουν ως κύριο ανταλλάξιμο ιόν τους το  $\text{Ca}^{++}$  και σε περίσσεια νερού καθιζάνουν γρήγορα (Κωστάκης, 2003).

## 1.2. ΔΟΜΗ ΣΜΕΚΤΙΤΩΝ

Τα κύρια ορυκτολογικά χαρακτηριστικά των μπεντονιτών είναι οι σμεκτίτες. Πρόκειται για αργιλικά ορυκτά που αποτελούνται από κρυσταλλίτες το μέγεθος των οποίων είναι μικρότερο από 2  $\mu\text{m}$  στη μεγαλύτερη διάσταση. Οι σμεκτίτες είναι φυλλοπυριτικά ορυκτά που αποτελούνται από μια οκταεδρική και δυο τετραεδρικές στιβάδες οι οποίες συγκρατούνται μεταξύ τους με ενδιάμεσα κατιόντα και μόρια νερού. Οι τετραεδρικές στιβάδες αποτελούνται από ιόντα πυριτίου, ενώ οι οκταεδρικές στιβάδες από ιόντα αργιλίου.

Παρακάτω (Σχήμα 1.2) φαίνεται η δομή των σμεκτιτών, όπου οι δομικές μονάδες συγκρατούνται μεταξύ τους με κατιόντα που εξισορροπούν το

αρνητικό φορτίο που προκύπτει από τις αντικαταστάσεις του αργιλίου και του πυριτίου από άλλα κατίοντα.



Σχήμα 1.2 : Δομή των σμεκτιτών των αργιλικών ορυκτών (Κωστάκης, 2003).



Διοκταεδρικοί	Z	X	Ψ	
(ανταλλάξιμα κατιόντα)				
Μοντμοριλλονίτης	Si <sub>8</sub>	Al <sub>3,3</sub> Mg <sub>0,7</sub>	AlMg	$\frac{1}{2} (Ca, Na)_{0,7}$
Βειδελλίτης	Si <sub>7,3</sub> Al <sub>0,7</sub>	Al <sub>4</sub>	Al	$\frac{1}{2} (Ca, Na)_{0,7}$
Νοντρονίτης	Si <sub>7,3</sub> Al <sub>0,7</sub>	Fe <sub>4</sub> <sup>+3</sup>	Fe	$\frac{1}{2} (Ca, Na)_{0,7}$
Τριοκταεδρικοί	Z	X	Ψ	
(ανταλλάξιμα κατιόντα)				
Σαπωνίτης	SiAl	Mg	Mg	$\frac{1}{2} (Ca, Na)_{0,7}$
Εκτορίτης	Si	MgLi	MgLi	$\frac{1}{2} (Ca, Na)_{0,7}$

**Σχήμα 1.3 :** Διοκταεδρικοί και τριοκταεδρικοί σμεκτίτες (Κωστάκης, 2003).

### 1.3. ΓΕΝΕΣΗ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΩΝ

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να δημιουργηθεί ένα κοίτασμα μπεντονίτη οι κυριότεροι των οποίων είναι οι εξής:

- Επί τόπου εξαλλοίωση ηφαιστειακής τέφρας η τόφφων.
- Υδροθερμική εξαλλοίωση πυριγενών πετρωμάτων.
- Δευτερογενής εξαλλοίωση πυριγενών πετρωμάτων.
- Διάφοροι άλλοι τρόποι γένεσης.

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος γένεσης ο οποίος αφορά την πλειοψηφία των κοιτασμάτων μπεντονίτη είναι η επί τόπου εξαλλοίωση ηφαιστειακής τέφρας η τόφφων. Στους μπεντονίτες αυτής της προέλευσης παρατηρούνται τεμάχια

ηφαιστειακού γυαλιού η άλλων δομών της μητρικής τέφρας, μη αργιλικά ορυκτά πυριγενούς προέλευσης και σε ορισμένες περιπτώσεις βαθμιαία μετάβαση σε γειτονικά στρώματα μη εξαλλοιωμένης τέφρας η τόφφων.

Το περιβάλλον εξαλλοίωσης ηφαιστειακού γυαλιού ποικίλει πράγμα που φαίνεται από το ευρύ φάσμα των σχετικών ιζηματογενών στρωμάτων. Η εξαλλοίωση λαμβάνει χώρα συνήθως σε ρηχό θαλάσσιο περιβάλλον ενώ συχνή εναλλαγή μπεντονίτη με γαιάνθρακες δείχνει ότι η εξαλλοίωση της τέφρας η του τόφφου μπορεί να γίνει σε περιβάλλον σχηματισμού γαιανθράκων. Οι περισσότεροι μπεντονίτες σχηματίζονται από τέφρα της οποίας η σύσταση κυμαίνεται από ρυολιθική ως δακτιτική με τους λατίτες να επικρατούν. Η σύνθεση της τέφρας είναι σημαντική στη ρύθμιση της σύστασης του σμηκτίτη που δημιουργείται.

Η διαδικασία της εξαλλοίωσης είναι ουσιαστικά αφυέλωση της τέφρας δηλαδή ενυδάτωση και κρυστάλλωση του σμηκτίτη γύρω από πολλούς πυρήνες και συνοδεύεται από απώλεια αλκαλίων δηλαδή έκχυση των συστατικών της τέφρας (Grim & Guven, 1978).

## **1.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΩΝ**

Οι μπεντονίτες περιέχουν κάποια ιδιαίτερα στοιχεία τα οποία καθορίζουν τις ιδιότητες τους. Μερικά από αυτά είναι ο ασθενής δεσμός μεταξύ των δομικών μονάδων, η κατανομή αρνητικού φορτίου και το πολύ μικρό μέγεθος των κρυστάλλων. Παρακάτω αναπτύσσονται κάποιες από τις κυριότερες ιδιότητες που αναπτύσσουν οι μπεντονίτες.

### **1.4.1. Ιοντοεναλλακτική ικανότητα.**

Είναι η πιο σημαντική ιδιότητα των σμεκτιτικών αργίλων και περιλαμβάνει την παρουσία ανταλλάξιμων ιόντων, που προσροφώνται αρχικά στις ενδοστρωματικές επιφάνειες. Τα συνηθέστερα ανταλλάξιμα ιόντα είναι το ασβέστιο και το μαγνήσιο, ενώ σπανιότερα εμφανίζονται το νάτριο το κάλιο

και το υδρογόνο. Εκτός όμως από τα κατιοντα που βρίσκονται ανάμεσα των στρώσεων, η ιοντοεναλλακτική ικανότητα μπορεί να οφείλεται και στα δεσμευμένα ιόντα που βρίσκονται στα όρια των κρυστάλλων (Κωστάκης, 2003).

Η συνολική ικανότητα ανταλλαγής ιόντων των σμεκτιτικών αργίλων οφείλεται κατά κύριο λόγο στα φορτία που προκύπτουν από υποκαταστάσεις στο πλέγμα και δευτερεύοντος στα φορτία που προέρχονται από θραυσμένους δεσμούς στα όρια των κρυστάλλων. Το νάτριο αντικαθίσταται εύκολα λόγω του σθένους του από το ασβέστιο και το μαγνήσιο, με αποτέλεσμα οι σμεκτιτικές αργίλοι να συρρικνώνονται (Weaver & Pollard, 1973).

Ο ρόλος των ανταλλάξιμων ιόντων στις βιομηχανικές εφαρμογές των σμεκτιτικών αργίλων είναι καθοριστικός. Για παράδειγμα οι σμεκτιτικοί αργίλοι που έχουν ως κυρίαρχο ανταλλάξιμο ιόν το νάτριο, ανεξάρτητα από το είδος τους, εμφανίζουν υψηλή ικανότητα διόγκωσης και ρεολογικές ιδιότητες. Αυτό συμβαίνει διότι το νάτριο οδηγεί σε ανάπτυξη πολλών προσανατολισμένων στρωμάτων νερού στις ενδοστρωματικές επιφάνειες.

Ο ρόλος της ιοντοεναλλακτικής ικανότητας στην εμπορική εκμετάλλευση σμεκτιτικών αργίλων είναι καθοριστικός, αν αναλογιστεί κανείς ότι άλλες ιδιότητες όπως η ικανότητα διόγκωσης και οι ρεολογικές, οφείλονται στην ανταλλαγή αυτή.

#### **1.4.2. Διόγκωση και ενυδάτωση.**

Οι σμεκτιτικοί αργίλοι και ιδιαίτερα οι νατριούχοι έχουν την τάση να διογκώνονται όταν βρεθούν σε υγρό περιβάλλον και ιδιαίτερα σε υδατικά διαλύματα με μικρή συγκέντρωση ηλεκτρολυτών. Ανάλογα με την ποσότητα νερού που βρίσκεται μεταξύ των στρώσεων οι κρύσταλλοι τείνουν να αποχωρίζονται μεταξύ τους με αποτέλεσμα τη διόγκωσή τους.

Οι περισσότεροι διογκούμενοι μπεντονίτες είναι οι νατριούχοι και λιγότερο οι ασβεστούχοι, ωστόσο μπορούν και εκείνοι να μετατραπούν σε διογκώσιμους μέσω της λεγόμενης αλκαλικής ενεργοποίησης, δηλαδή με αντικατάσταση του  $\text{Ca}^{++}$  από  $\text{Na}^+$ .

Σε μελέτες που έγιναν σε αποξηραμένους μπεντονίτες με ανταλλάξιμο ασβέστιο και μαγνήσιο παρατηρήθηκε αρχικά μια γρήγορη προσρόφηση του νερού μέχρι το όριο υδαρότητας. Αντίθετα σε μπεντονίτες με κυριότερα ιόντα το νάτριο και το λίθιο, το νερό συνεχίζει να προσροφάται αρκετά πέρα από το όριο υδαρότητας. Συνεπώς η ικανότητα προσρόφησης νερού από τους μπεντονίτες και ακολούθως η διόγκωση τους εξαρτάται άμεσα από την περιεκτικότητα σε νάτριο (White & Pichler, 1959).

Συμπερασματικά οι μπεντονίτες ανάλογα με το είδος τους και την περιεκτικότητά τους σε ανταλλάξιμα κατιοντα, διακρίνονται σε αργίλους με υψηλή και χαμηλή ικανότητα διόγκωσης. Ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών ενυδάτωσης πρέπει να γίνεται κατά προτεραιότητα κατά την αξιολόγηση των κοιτασμάτων μπεντονίτη, δεδομένου ότι οι βιομηχανικές ιδιότητες εξαρτώνται από την ιδιότητα αυτή.

#### **1.4.3. Συνδεδετική ικανότητα.**

Η ικανότητα του μπεντονίτη να δρα ως συνδεδετικό μέσο διαφαίνεται όταν χρησιμοποιείται σε προπλάσματα χύτευσης μετάλλων και στην σφαιροποίηση λεπτόκοκκων σιδηρομεταλλευμάτων. Οι μπεντονίτες έχουν πολύ ισχυρές συνδεδετικές ιδιότητες στις άμμους κατόπιν ξήρανσης, υψηλή αντοχή σε συμπίεση επί ξηρού και μέτριες αντοχές σε συμπίεση κατά την ενυδάτωση. Κάπως καλύτερη αντοχή σε συμπίεση κατά την ενυδάτωση έχουν οι ασβεστούχοι μπεντονίτες. Έτσι ο μπεντονίτης δημιουργεί συνοχή κατά την διεργασία της σφαιροποίησης υλικών, ενώ ταυτόχρονα προσροφά υγρασία από το υπό επεξεργασία υλικό στις ενδοστρωματικές στρώσεις (Grim, 1962).

#### **1.4.4. Υψηλό ιξώδες και θιξοτροπία.**

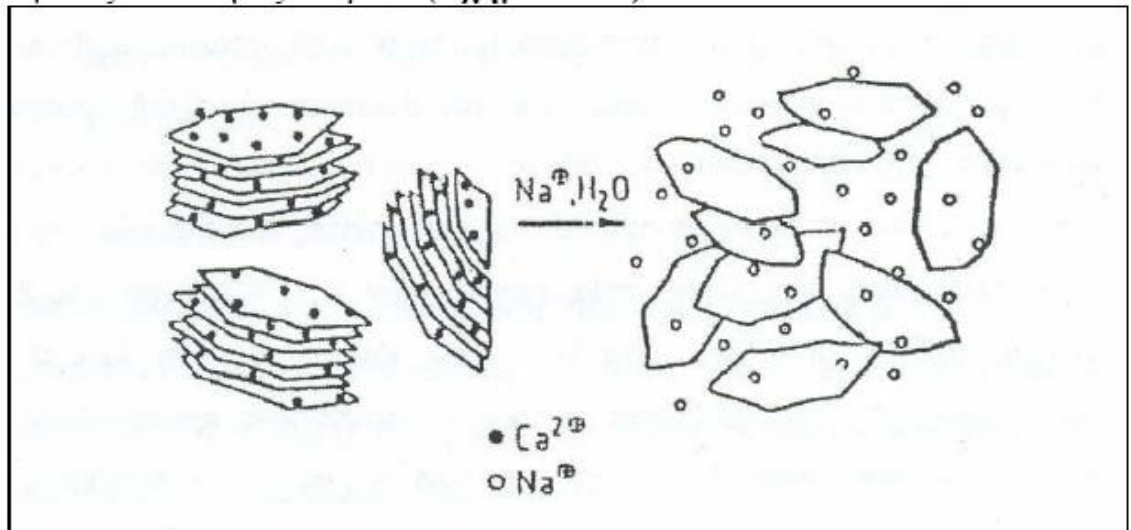
Όταν ο μπεντονίτης προστεθεί στο νερό τότε κάτω από προϋποθέσεις δημιουργεί αιώρημα υψηλού ιξώδους με εμφανή θιξοτροπική συμπεριφορά. Η θιξοτροπία είναι η ιδιότητα εκείνη που οδηγεί το μπεντονίτη να μεταπίπτει από

κατάσταση πηκτώματος σε κατάσταση αιωρήματος. Οι ιδιότητες αυτές παρατηρούνται σε νατριούχους μπεντονίτες κατά κύριο λόγο και λιγότερο σε μπεντονίτες που έχουν ενεργοποιηθεί με νάτριο. Η δημιουργία υψηλού ιξώδους και θιξοτροπίας είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την παρασκευή πολφών γεώτρησης (Christidis & Scott, 1996).

Η αύξηση του ιξώδους και της θιξοτροπίας, όταν προστίθεται μπεντονίτης στο νερό, οφείλεται στην μεταβολή του πάχους των μικκυλίων, τα οποία μεταπίπτουν σε μικρότερο βάθος. Όσο μεγαλύτερη είναι η διασπορά των σωματιδίων, τόσο μικρότερη είναι η ποσότητα του ελευθέρου νερού και τόσο μεγαλύτερη η διαθέσιμη επιφάνεια προσρόφησης. Το ιξώδες λοιπόν σχετίζεται άμεσα με την ικανότητα ενυδάτωσης του σμεκτίτη. Αρχικά παρατηρείται απότομη αύξηση του ιξώδους η οποία στην συνέχεια αυξάνει με προοδευτικά μικρότερους ρυθμούς.

#### **1.4.5. Ρεολογικές ιδιότητες.**

Η ενυδάτωση και οι χημικές ιδιότητες του μπεντονίτη προκαλούν διαχωρισμό και διασκορπισμό των κρυστάλλων. Επιπλέον η ανάπτυξη ηλεκτρικού δυναμικού έχει ως αποτέλεσμα την απόθεση και αιώρηση των κρυστάλλων δημιουργώντας έτσι ένα κολλοειδές σύστημα. Ακόμα η πρόσθεση μπεντονίτη στο νερό σε υψηλές περιεκτικότητες μπορεί να προκαλέσει αντίσταση σε ροή. Ο κύριος λόγος της αύξησης του ιξώδους και της θιξοτροπίας είναι η μεγάλη περιεκτικότητα των μπεντονιτών σε νάτριο όπως φαίνεται και παρακάτω (σχήμα 1.4).



**Σχήμα 1.4:** Δημιουργία κολλοειδών αιωρημάτων νατριούχων σμεκτιτών (Neal & Cooper, 1983).

Ειδική επιφάνεια ενός κόκκου ονομάζουμε τη σχέση της εξωτερικής επιφανείας προς το βάρος του που φαίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$S_w = S/W = (f/K \cdot \rho) \cdot 1/d \quad (1.1)$$

Όπου:

- $S_w$ : η ειδική επιφάνεια του κόκκου,
- $S$ : η εξωτερική επιφάνεια του κόκκου,
- $W$ : το βάρος του κόκκου,
- $d$ : η διάμετρος του,
- $k$ : μια σταθερά ( $\pi/6$ ),
- $\rho$ : η πυκνότητα και  $f = \pi = 3.14$ .

Όπως γίνεται κατανοητό και από τα παραπάνω, η ειδική επιφάνεια είναι αντιστρόφως ανάλογη της διαμέτρου του κόκκου. Όσο μικραίνει ο κόκκος μεγαλώνει η ειδική επιφάνεια (Σταμπολιάδης, 1994).

Στον τομέα των βιομηχανικών εφαρμογών των μπεντονιτών, εξαιτίας της συσσωμάτωσης, το πραγματικό μέγεθος και η ειδική επιφάνεια των κρυστάλλων των σμεκτιτών είναι συχνά αρκετά μικρότερα από το πραγματικό μέγεθος και

την ειδική επιφάνεια των μεμονωμένων κρυστάλλων. Αυτό συμβαίνει επειδή κατά την διάρκεια της ανάπτυξης, οι κρύσταλλοι αλληλοσυνδέονται, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να διαχωριστούν. Οι διαφορές στο πραγματικό μέγεθος των κρυστάλλων του μπετονίτη είναι πολύ σημαντικές στον προσδιορισμό των ιδιοτήτων τους, όπως η ιοντοεναλλαγή, το ιζώδες, και η απώλεια κατά την διήθηση (Neal & Cooper, 1983).

## **1.5 ΧΡΗΣΕΙΣ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΩΝ.**

Είναι γνωστό ότι ο μπεντονίτης καλείται ως η άργιλος με τις χίλιες χρήσεις, λόγω των πολλών εφαρμογών του. Η πολυχρησιμότητα που εμφανίζει σε αρκετούς τομείς της βιομηχανίας και επιστήμης οφείλεται στις ιδιότητες που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο εδάφιο του κεφαλαίου. Υπάρχουν δυο τύποι μπεντονίτη, οι διογκούμενοι ή νατριούχοι (τύπος Wyoming) και οι μη διογκούμενοι ή ασβεστιούχοι, οι οποίοι εμφανίζουν πληθώρα χρήσεων, οι κυριότερες από τις οποίες είναι οι εξής:

- Πολφοί γεωτρήσεων,
- Χυτήρια,
- Σφαιροποίηση ζωοτροφών και σιδηρού,
- Φαρμακευτικά είδη και ιατρικές εφαρμογές,
- Βιομηχανία χρωμάτων,
- Βιομηχανία χαρτιού,
- Περιβαλλοντικά θέματα,
- Γεωργία.

### **1.5.1. Πολφοί γεωτρήσεων.**

Πρόκειται για μια από τις σημαντικότερες εφαρμογές των μπεντονιτών, καθώς το σύνολο των εταιρειών γεωτρήσεων βασίζονται στην παρασκευή πολφών με μπεντονίτες σε συνδυασμό με νερό, φρέσκο ή θαλασσινό.

Η τεχνολογία των πολφών γεωτρήσεων αναπτύχθηκε κυρίως λόγω των ιδιοτήτων του μοντμοριλονίτη που είναι το κύριο συστατικό των μπεντονιτών. Η αποκλειστική ιδιότητα του μπεντονίτη είναι ο σχηματισμός λεπτών φύλλων μοντμοριλλονίτη, όταν αναμιχθεί με φρέσκο νερό, που είναι ότι καλύτερο για το ρευστό από πλευράς ελέγχου του ιξώδους, του κολλοειδούς και των απωλειών του ρευστού. Η πλειονότητα των ρευστών μπορούν να περιέχουν μπεντονίτη, οπότε αποτελούν τα χαμηλότερου κόστους (Κελεσίδης, 2001).

Ειδικότερα η προσθήκη μπεντονίτη για παρασκευή πολφού γεώτρησης μας δίνει τις εξής ιδιότητες:

- **Αύξηση της ικανότητας καθαρισμού του φρέατος.** Αποτελεί μια από τις σπουδαιότερες λειτουργίες των διατρητικών ρευστών. Η πίεση που ασκείται κατά την έξοδο του ρευστού από το κοπτικό άκρο, έχει ως αποτέλεσμα να διατηρούνται τόσο ο πυθμένας του φρέατος, όσο και τα άκρα του κοπτικού καθαρά από θραύσματα.
- **Δημιουργία λεπτού υποστρώματος στα τοιχώματα (υμένιο).** Η απώλεια ρευστού κατά την γεώτρηση είναι ένα βασικό πρόβλημα το οποίο ρυθμίζεται με το υπόστρωμα λάσπης (filter cake), που δημιουργείται από τα στερεά του ρευστού της γεώτρησης. Κατά την διάνοιξη μιας γεώτρησης η απώλεια του ρευστού προς γειτονικούς σχηματισμούς πρέπει να περιορίζεται στο ελάχιστο.
- **Αιωρούμενα σωματίδια και απελευθέρωση τους στην επιφάνεια.** Κατά την διάνοιξη μιας γεώτρησης η διάτρηση δεν είναι συνεχής. Όταν λοιπόν η λειτουργία του κοπτικού σταματήσει δημιουργείται ένα είδος πηκτώματος το οποίο εμποδίζει τα θραύσματα να καθιζάνουν. Κατά την επαναφορά της διάτρησης ο πολφός επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση για υπάρχει ισορροπία στο σύστημα.

### 1.5.2. Χυτήρια.

Μεγάλες ποσότητες μπεντονίτη, χρησιμοποιούνται ετησίως στη μεταλλουργική βιομηχανία για την παρασκευή άμμων χυτηρίων. Με βάση τον



τύπο του κράματος και του μεγέθους των χυτών, χρησιμοποιούνται διαφορετικές μέθοδοι χύτευσης των μετάλλων. Ο μπεντονίτης χρησιμοποιείται σε μίγματα προϊόντων που περιέχουν ανθρακικά υλικά και άλλα πρόσθετα στην μέθοδο της άμμου καλουπιών χυτηρίων, για την παραγωγή σιδήρου και χάλυβα.

Σκοπός της ανάμιξης είναι να αποκτήσει η άμμος συνεκτικότητα και πλαστικότητα, ώστε να είναι δυνατή η μορφοποίηση της σε καλούπια. Μετά τη χύτευση του δείγματος θα πρέπει ο μπεντονίτης να δίνει στην άμμο αρκετή σταθερότητα ώστε να διατηρεί το σχήμα πριν, κατά την διάρκεια και μετά τη χύτευση του τηγμένου μετάλλου στο καλούπι.

### **1.5.3. Σφαιροποίηση ζωοτροφών και σιδηρού.**

Ο μπεντονίτης αποτελεί κύριο συνδετικό υλικό για την κατασκευή σφαιριδίων σιδηρομεταλλευμάτων (pellets). Τα σφαιρίδια αυτά έχουν υψηλή μηχανική αντοχή αλλά και καλή συμπεριφορά σε θερμική καταπόνηση.

Σκοπός του μπεντονίτη είναι να δεσμεύει το πλεονάζον νερό, αφού ο σίδηρος μετά τον εμπλουτισμό περιέχει υγρασία. Στην περίπτωση αυτή απαιτούνται μπεντονίτες με υψηλό σημείο eslin, δηλαδή αρκετή προσρόφηση νερού από το μπεντονίτη. Το σιδηρομετάλλευμα θα πρέπει να έχει μορφή κόνεως ώστε να μπορούν να διαχωριστούν οι προσμίξεις. Το τελικό προϊόν, χρησιμοποιείται σαν υλικό τροφοδοσίας υψικαμίνων για την παραγωγή σιδήρου.

### **1.5.4. Φαρμακευτικά είδη και ιατρικές εφαρμογές.**

Τα τελευταία χρόνια επικρατεί αυξανόμενη τάση για χρήση νατριούχων μπεντονιτών στα φάρμακα τα καλλυντικά. Οι μπεντονίτες λειτουργούν ως υλικά πλήρωσης στα φαρμακευτικά είδη εξαιτίας των ιδιοτήτων προσρόφησης και απορρόφησης. Ο πολφός που σχηματίζουν βρίσκει βιομηχανική εφαρμογή σε λουσίων για εκζέματα, σε μάσκες προσώπου καθώς και σε προϊόντα

προσωπικής φροντίδας. Συγκεκριμένα εφαρμογές του μπεντονίτη στην ιατρική είναι οι παρακάτω:

- Αντίδοτο δηλητηρίασης από βαριά μέταλλα και τοξικές ουσίες,
- Βελτίωση των ιδιοτήτων των αιωρημάτων θειικού άλατος βαρίου στις ραδιολογικές εξετάσεις,
- Χρήση στον καθαρισμό των φαρμακευτικών μιγμάτων και βιταμινών (Noveli, 1979).

#### **1.5.5. Βιομηχανία χρωμάτων.**

Οι μπεντονίτες που έχουν ενεργοποιηθεί με αμίνες χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα σε μπογιές. Οι θιξοτροπικές τους ιδιότητες βοηθούν στην πυκνωση του υλικού στο οποίο προστίθεται και παρεμποδίζουν την καθίζηση των στερεών σωματιδίων. Η προσθήκη οργανόφιλου μπεντονίτη σε βαριές χρωστικές ουσίες όπως το μίνιο βελτιώνει την ευστάθεια της σύστασης τους και την ικανότητα τους να δημιουργούν επικαλύψεις.

#### **1.5.6. Βιομηχανία χαρτιού.**

Γενικά οι άργιλοι, χρησιμοποιούνται ως επικαλυπτικά και πληρωτικά υλικά στη βιομηχανία χαρτιού. Ο μπεντονίτης προστίθεται με σκοπό την βελτίωση της μετατροπής του πολτού σε χαρτί διότι αποτρέπει την συσσώρευση των λεπτών μορίων της πίσσας και του ρητινούχου υλικού που προκαλούν ατέλειες στο φύλλο. Επίσης υποστηρίζεται ότι το ποσοστό αυτό συμβάλλει στην αύξηση της συνοχής των χρωστικών ουσιών και στην ομοιομορφία της κατανομής τους στο χαρτί.

#### **1.5.8. Περιβαλλοντικές εφαρμογές.**

Ο μπεντονίτης χρησιμοποιείται στην στερεοποίηση και σταθεροποίηση επικίνδυνων αποβλήτων. Πρόκειται για μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται

στη διαχείριση των επικίνδυνων και τοξικών αποβλήτων. Το απόβλητο αναμιγνύεται με υλικά που συντελούν στη δημιουργία μιας στερεής δομής μειωμένης τοξικότητας με παράλληλο εγκλωβισμό των επικίνδυνων και τοξικών ουσιών μέσα στη δομή αυτή. Τα τελευταία χρόνια η χρήση της τεχνολογίας αυτής έχει επεκταθεί και στην επεξεργασία ρυπασμένων εδαφών με στόχο όχι την απομάκρυνση των ρύπων, αλλά την αλλαγή των χημικών και φυσικών παραμέτρων τους. Στόχος των μεθόδων σταθεροποίησης είναι:

- Η μετατροπή των ρύπων σε αδιάλυτες ενώσεις,
- Η μείωση της τοξικότητας των υφιστάμενων ρύπων,
- Η βελτίωση των φυσικών χαρακτηριστικών των ρυπασμένων εδαφών,
- Η μείωση της ελεύθερης επιφάνειας των κόκκων του εδάφους έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διαλυτοποίηση και μεταφορά των ρύπων.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΟΛΥΜΕΡΗ**

### **2.1. ΓΕΝΙΚΑ.**

Με τον όρο πολυμερή αναφερόμαστε σε χημικές ουσίες οι οποίες έχουν βάση σε φυτικά κυρίως συστατικά. Αυτές οι ουσίες συλλέγονται και κατόπιν βιομηχανικής επεξεργασίας μεταποιούνται σε ένα υλικό του οποίου οι ρεολογικές ιδιότητες επιτρέπουν την χρήση κατά κόρον σε γεωτρήσεις, σε περιπτώσεις όπου οι συμβατικοί πολφοί γεώτρησης αδυνατούσαν να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις των εκάστοτε συνθηκών.

Η χρήση αποκλειστικά πολυμερών σε τεχνικές διάτρησης, κρίνεται απαγορευτική κυρίως λόγω του υψηλού κόστους και των αυξημένων περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Για το λόγο αυτό αν και η εφαρμογή τους γίνεται σε μεγάλο ποσοστό των γεωτρήσεων ανά τον κόσμο, η χρήση στην πλειοψηφία εμφανίζεται σε συνδυασμό με τους μέχρι τώρα παραδοσιακούς πολφούς γεωτρήσεων.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα πολυμερή τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία για την μέτρηση της προσρόφησης τους σε πολφούς μπεντονίτη. Επίσης για τα συγκεκριμένα πολυμερή θα γίνει εκτεταμένη μελέτη των ρεολογικών τους χαρακτηριστικών καθώς και της επίδρασης της προσθήκης ηλεκτρολυτών στις εν λόγω ιδιότητες. Επίσης θα γίνει αναφορά στην εφαρμογή πολυμερών σε πραγματικές συνθήκες επιλύοντας σοβαρά προβλήματα τα οποία έκριναν αδύνατη την μέχρι τώρα συνέχιση της διατηρητικής διαδικασίας.

### **2.2. ΟΡΓΑΝΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΠΡΟΣΘΕΤΑ.**

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

- Την 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 γαλακτοματοποιητές.

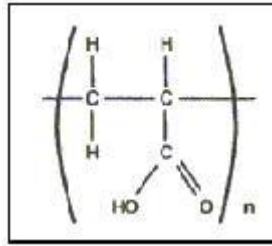
Σημαντική βελτίωση των ιδιοτήτων του ρευστού παρατηρείται από την προσθήκη ενός και μόνο τέτοιου συστατικού. Μερικά από τα πιο συνηθισμένα οργανικά πολυμερή είναι τα εξής:

- Carbopol,
- Pac,
- Sodium Carboxymethyl Cellulose (CMC).

#### **2.4.1. Carbopol 980.**

Το Carbopol περιγράφεται ως ένα μικροτζέλ, το οποίο αποτελείται από ένα σύνολο πολυμερών σωματιδίων, τα οποία ατομικά συμπεριφέρονται ως τζέλ αλλά σαν σύνολο, δρουν αποτελεσματικά σαν μια συγκεντρωμένη διασπορά. Το εξωτερικό των σωματιδίων είναι επικαλυμμένο με ελεύθερα αιωρούμενες ίνες τζέλ, οι οποίες αλληλεπιδρούν ισχυρώς με τα αντίστοιχα τους μέλη πάνω στα σωματίδια μικρό - τζέλ για να προσδώσουν υψηλή οριακή ταχύτητα σε χαμηλούς ρυθμούς διάτρησης.

Οι περισσότεροι τύποι Carbopol είναι πολυμερή μεγάλου μοριακού βάρους. Ο τύπος πολυμερούς που χρησιμοποιήθηκε κατά την πειραματική διαδικασία είναι Carbopol 980 της εταιρείας NOVEON. Σε ελεύθερη κατάσταση απαντά υπό μορφή λευκής σκόνης. Σε μορφή διαλύματος με βάση το νερό δημιουργεί ένα παχύρευστο κατά κανόνα άχρωμο και άοσμο τζέλ.



**Σχήμα 2.1:** Σχηματική αναπαράσταση δομής Carborol 980, (Web 2).

Η προσθήκη του πολυμερούς Carborol 980 σε πολφούς γεώτρησης έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή των ρεολογικών τους χαρακτηριστικών. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται αύξηση του φαινόμενου ιξώδους και της θιξοτροπίας. Για να αποκτήσει όμως το αιώρημα τις παραπάνω ιδιότητες θα πρέπει να ακολουθηθεί η διαδικασία της εξουδετέρωσης.



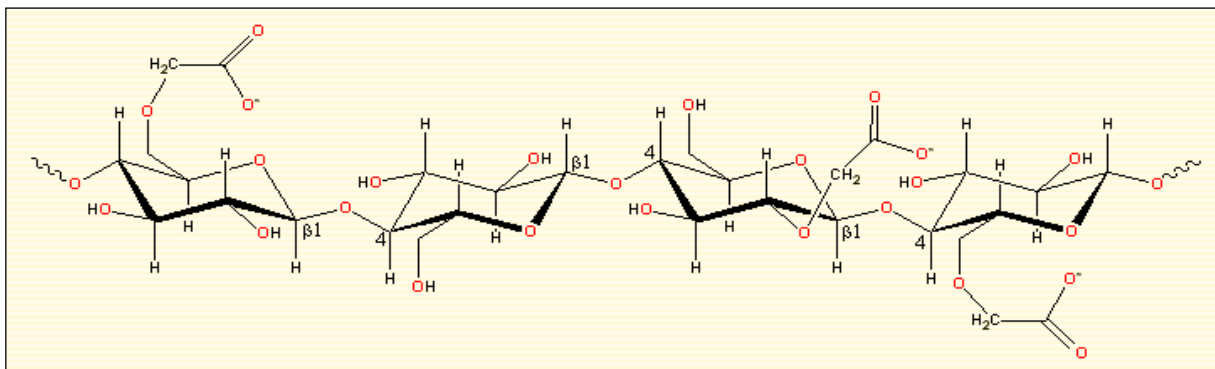
**Σχήμα 2.2:** Το Carborol 980 στη φυσική του κατάσταση, (Web 2).

Το διάλυμα Carborol 980 έπειτα της ανάδευσης βρίσκεται σε μια λεπτόρρευστη κατάσταση και πρέπει να ηρεμήσει για περίπου δυο ώρες. Έπειτα γίνεται η εξουδετέρωση του με την προσθήκη NaOH συγκέντρωσης 18%(w/v) με ταυτόχρονη ανάδευση σε χαμηλές στροφές. Η αναλογία που χρησιμοποιείται είναι 1.8 ml NaOH ανά γραμμάριο Carborol 980.

### 2.2.2. Sodium CarboxymethylCellulose (CMC).

Άλλο ένα πολυμερές που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση ρευστών γεώτρησης είναι το Sodium Carboxymethyl Cellulose (CMC). Στην πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήσαμε πολφούς γεώτρησης με βάση το νερό και συνδυασμό με μπεντονίτη τύπου Wyoming. Το CMC σε ελεύθερη κατάσταση απαντά με μορφή σκόνης, χρώματος λευκού, ενώ όταν αναδευτεί με νερό μας δίνει διαφανές διάλυμα.

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



**Σχήμα 2.3:** Σχηματική αναπαράσταση της δομής πολυμερούς CMC, (Web 3).

Από χημικής άποψης, το CMC είναι μια λευκή, άοσμη και μη τοξική σκόνη. Διαλυόμενο, μας δίνει ένα διαυγές υδατικό διάλυμα ανιονικού πολυμερούς. Η ικανότητα του αυτή καθορίζει και τις φυσικές του ιδιότητες όπως η διαλυτότητα, η ρεολογία και η προσροφητικότητα του.

Τα διαλύματα CMC είναι μη Νευτώνεια ρευστά και παρουσιάζουν αύξηση του φαινόμενου ιξώδους, όταν παραμένουν ακίνητα για κάποιο χρονικό διάστημα. Με ανάδευση του διαλύματος το φαινόμενο ιξώδες μειώνεται.

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου CMC έχει ιδιαίτερη σημασία. Οι ειδικές ιδιότητες των διαφόρων τύπων του πρέπει να παράγονται με ακρίβεια σε

αυστηρά καθορισμένες συνθήκες, που απαιτούν μεγάλη εμπειρία. Κατά την πειραματική διαδικασία στο εργαστήριο της Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής χρησιμοποιήθηκε CMC της εταιρείας AKZO NOBEL.

## **2.5. ΧΡΗΣΕΙΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΣΕ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ.**

Τα πολυμερή βρίσκουν πολλές εφαρμογές στη σύγχρονη βιομηχανία. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται συνεχώς αυξανόμενη χρήση τους από τις εταιρείες γεωτρήσεων, καθιστώντας τα αναπόσπαστο κομμάτι στον τομέα των γεωτρήσεων. Παρακάτω θα αναφερθούν κάποια χαρακτηριστικά παραδείγματα όπου τα πολυμερή αποτέλεσαν καινοτόμο λύση σε γεωτρήσεις πετρελαίου.

### **2.5.1. Αντιμετώπιση παραγωγικών προβλημάτων στο ανεπτυγμένο πεδίο του Sobhasan στην Ινδία.**

Το πεδίο του Sobhasan στην ευρύτερη περιοχή Meshana της Ινδίας, έχει συνεισφέρει αρκετά στην παραγωγή πετρελαίου για τουλάχιστον 35 χρόνια. Σαν αποτέλεσμα αυτής της μακροχρόνιας εκμετάλλευσης η πίεση του ταμιευτήρα (πολυστρωματικού τύπου σχιστόλιθων και βάθους 1415-1550m καθώς και 1560-2000m) είχε πέσει στα 0.7 με 0.8 MWE και για την συνέχιση της παραγωγής ήταν απαραίτητη η άσκηση πίεσης στους σχιστολιθικούς σχηματισμούς, κάτι όμως που δημιουργούσε προβλήματα παραγωγής τα οποία λύθηκαν με την χρησιμοποίηση πολυμερών στον πολφό γεώτρησης.

Τα συμβατικά ρευστά γεώτρησης που χρησιμοποιούνταν δημιουργούσαν προβλήματα στην ευρύτερη διάταξη όπως: εμφάνιση διαφορικού κολλήματος, δημιουργία κοιλοτήτων στα στρώματα σχιστόλιθων και άνθρακα και τάση αποχωρισμού των τριμμάτων από το συμβατικό ρευστό και καθίζησης τους στον πάτο της γεώτρησης.

Οι μελέτες έγιναν χρησιμοποιώντας πολφούς πολυμερών συγκεκριμένης αναλογίας διάφορων στοιχείων. Η μεγαλύτερη ανάκτηση κατά την γεώτρηση



πραγματοποιήθηκε με polyol ρευστό γεώτρησης (94%), ακολουθούμενο από το PHPA (89%). Ακόμα μελετήθηκε ο συνδυασμός polyol και KCl ώστε να βρεθεί η βέλτιστη αναλογία τους σύμφωνα με το βάθος χρήσης του πολφού. Το πρόβλημα του διαφορικού κολλήματος αντιμετωπίστηκε πλήρως λόγω της ιδιότητας που εμφανίζει ο συγκεκριμένος πολφός γεώτρησης στην λεγόμενη cloud point temperature (CPT) να δημιουργεί τέλειες σταγόνες. Συγκεκριμένα προκαλεί την αποσταθεροποίηση της διάταξης εισερχόμενος στο υμένιο και γεφυρώνοντας τους πόρους του με σκοπό να μειώσει την διαπερατότητα του.

Συμπερασματικά ο τελικός πολφός γεώτρησης βασισμένος στο polyol χρησιμοποιήθηκε σε δυο γεωτρήσεις στο πεδίο Sobhasan με απόλυτη επιτυχία. Οι βασικοί στόχοι που ήταν η αποτροπή της δημιουργίας κοιλοτήτων στους σχιστολιθικούς σχηματισμούς και η μη εμφάνιση του διαφορικού κολλήματος επιτεύχθηκαν πλήρως (Raza & Pratap, 2006).

### **2.3.2. Χρήση αμίνης / PHPA στην περιοχή Orito της Κολομβίας.**

Η χρησιμοποίηση ρευστών γεώτρησης με βάση το νερό σε γεωτρήσεις πετρελαίου αυξάνεται διαρκώς με σκοπό την εναρμόνιση των εταιρειών με την περιβαλλοντική νομοθεσία. Στην περίπτωση όμως του Orito έπρεπε να ξεπεραστούν κάποια προβλήματα όπως η αστάθεια φρέατος, η άσκηση ροπής και η δημιουργία τριβών τα οποία λύνονταν μόνο με την χρησιμοποίηση πολφών με βάση το πετρέλαιο κάτι όμως αδύνατο να πραγματοποιηθεί λόγω της αυστηρής περιβαλλοντικής νομοθεσίας στην ευρύτερη περιοχή. Ακόμα το κόστος αποκατάστασης της περιοχής αλλά και απόθεσης του πολφού είναι τεράστιο. Για αυτό τον λόγο για την διάνοιξη των δυο τελευταίων γεωτρήσεων χρησιμοποιήθηκε πολφός με βάση Αμίνη / PHPA.

Στην προσπάθεια εξεύρεσης ενός ρευστού που θα αντικαθιστούσε τους συμβατικούς πολφούς με βάση το πετρέλαιο χρησιμοποιήθηκε η αμίνη / PHPA για την διενέργεια δυο γεωτρήσεων. Ο κύριος μηχανισμός αποτελείται από αντίδραση αντικατάστασης κατιόντων και περιλαμβάνει την χρήση μιας οργανικής αμίνης σε συνδυασμό με PHPA υψηλού μοριακού βάρους. Οι αμίνες

έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικοί ανασταλτές της διόγκωσης των σχιστόλιθων καθώς επίσης έχουν χαμηλή τοξικότητα και είναι βιοδιασπώμενες άρα έχουν μικρή επίδραση στο περιβάλλον. Ο ρόλος του PHPA υψηλού μοριακού βάρους είναι η δημιουργία εξωτερικής απορρόφησης στην επιφάνεια των σχιστόλιθων λειτουργεί λοιπόν σαν επικαλυπτικό συμπύκνωμα.

Η περιοχή του Orito βρίσκεται Νότια της Κολομβίας και χαρακτηρίζεται ως ευαίσθητη περιβαλλοντικά περιοχή. Ο σχηματισμός ενδιαφέροντος είναι πάχους 300m και βρίσκεται σε βάθος 1600m. Εξαιτίας της υψηλής τάσης των ορυκτών για αντίδραση στους υπό διάτρηση σχηματισμούς η χρήση πολφών με βάση το νερό αντιμετώπιζε προβλήματα.

Στην προσπάθεια να προσδιοριστούν οι κατάλληλες συγκεντρώσεις αμίνης /PHPA διενεργήθηκε το Capillary Suction Test (CST) καθώς και μετρήσεις για τον προσδιορισμό ρεολογικών ιδιοτήτων και περιορισμού των τριβών. Η περιεκτικότητα σε αμίνη αυξανόταν έως ότου επιτευχθεί η βέλτιστη απόδοση CST. Στην συνέχεια διενεργήθηκε δοκιμή διασποράς της αμίνης /PHPA κατά την οποία η ανάκτηση είναι αρκετά υψηλή και είναι ελαφρώς καλύτερη από αυτήν του συστήματος potassium/PHPA. Για την διατήρηση του pH χρησιμοποιήθηκε καυστική ποτάσα. Διαπιστώθηκε ότι η πυκνότητα αυξήθηκε σημαντικά, τα τρίμματα ήταν σε φυσιολογικό επίπεδο, δεν παρατηρήθηκαν προβλήματα ροπής και τριβών ενώ δεν υπήρξε αστάθεια του σχηματισμού. Το συνολικό κόστος της διάταξης ήταν μειωμένο και τα παραγόμενα τρίμματα μεταφέρονταν στην θέση απόθεσης, ξηραίνονταν και αφομοιώνονταν στο φυσικό έδαφος.

Συμπερασματικά, με την χρησιμοποίηση του συγκεκριμένου τύπου πολφού επιτεύχθηκε σταθεροποίηση του φρέατος και γενικά καλή επιχειρησιακή απόδοση. Το όλο σύνολο αποδείχτηκε φιλικό προς το περιβάλλον, χωρίς προβλήματα απόθεσης. Οι ρεολογικές ιδιότητες του συστήματος ήταν καλά ελεγχόμενες και η όλη επιτυχία του εγχειρήματος οφείλεται στην καλή ερευνητική και πειραματική διαδικασία (Guerrero & Warren, 2006).

#### **2.4. ΑΣΦΑΛΗ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΟΛΦΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΝΕΡΟ.**

Πρόσφατα έχει αναπτυχθεί το ενδιαφέρον για την δημιουργία πολφών γεώτρησης φιλικών προς το περιβάλλον, για γεωτρήσεις πετρελαίου με βάση το νερό. Για αυτό τον λόγο μελετάται η χρησιμοποίηση πολυμερών λιγότερο τοξικών, βιοδιασπάσιμων και οικονομικότερων.

Για την παραγωγή τέτοιου ρευστού γεώτρησης με βάση το νερό χρησιμοποιήθηκε μπεντονίτης Ινδίας και πολυμερή tamarind gum, tragacanth gum και polyanionic cellulose (PAC). Το tamarind gum είναι ένα φυσικό πολυσακχαρίδιο, το οποίο αποτελεί έναν φτηνό τροποποιητή ιξώδους καθώς έχει παρόμοιες τιμές με αυτές του guar gum, με τη διαφορά ότι το κόστος του είναι επτά φορές μικρότερο.

Το tragacanth gum είναι ένα φυσικό προϊόν, ανάμικτων πολυσακχαριδίων που περιέχει ασβέστιο και μαγνήσιο, με γαλακτώδη υφή και χρώμα άσπρο προς καφέ. Είναι 2-3 φορές φτηνότερο από το guar gum και σε χαμηλή περιεκτικότητα εμφανίζει υψηλό ιξώδες.

Το polyanionic cellulose (PAC) είναι ένας μειωτής απώλειας ρευστού, φιλικός προς το περιβάλλον, δεν υπόκειται σε βακτηριακή διάσπαση και η θερμοκρασία ισορροπίας του είναι 149°C. Τα πολυμερή προστίθενται καθώς δεν μπορούμε να προσθέσουμε πολύ μπεντονίτη λόγω της τάσης για διαφορεικό κόλλημα που εμφανίζει σε υψηλές περιεκτικότητες.

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν δείγματα μπεντονίτη τα οποία αρχικά ξηράθηκαν στον ήλιο, λειοτριβήθηκαν και εν συνεχεία ξηράθηκαν σε φούρνο υπό θερμοκρασία 100°C. Για τα συγκεκριμένα δείγματα μετρήθηκε η δυνατότητα ανταλλαγής κατιόντων, η απόδοση της αργίλου, το φαινόμενο και πλαστικό ιξώδες. Στην συνέχεια έγινε επιλογή συνδυαστικών δειγμάτων μπεντονίτη-PAC-tamarind gum & tragacanth gum και πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις του φαινομένου ιξώδους, του πλαστικού ιξώδους και του σημείου ολίσθησης (YP) σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Τέλος μετρήθηκε το pH, η διαπερατότητα σε αποσταγμένο νερό και η διαπερατότητα σε λάσπη.

Συμπερασματικά, από την παραπάνω επεξεργασία προέκυψε ότι οι πολφοί γεωτρήσεων με βάση tamarind και tragacanth gum είναι οικονομικότεροι από τα συμβατικά ρευστά γεώτρησης. Όλοι οι παραπάνω συνδυασμοί εμφάνισαν αποδεκτές ρεολογικές ιδιότητες ενώ τα δείγματα είχαν λιγότερη επίδραση στην καταστροφή σχηματισμού σε σχέση με τους συμβατικούς πολφούς γεώτρησης (Sharma and Mahto, 2006).

## **2.5. ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΜΕ ΣΤΟΧΟ ΤΗ ΠΟΛΥΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΠΟΛΦΟΥΣ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΒΑΣΗ ΤΟ ΝΕΡΟ.**

Το καθένα από τα συνήθη πολυμερή μπορεί να ικανοποιεί περιορισμένο αριθμό απαιτήσεων κάθε φορά. Είναι ακριβά, δεν παρέχουν την απαιτούμενη σταθερότητα και δεν είναι οικολογικά συμβατά. Έτσι δημιουργήθηκε η ανάγκη παρασκευής εξελιγμένων πολυλειτουργικών πολυμερών τα οποία θα προέρχονται από απλής τάξης οργανικά μείγματα και θα είναι ικανά να λύνουν τα παραπάνω προβλήματα.

Τα πολυμερή που χρησιμοποιούνται είναι δύο τύπων, AB και ABA. Τα πολυμερή AB σχηματίζουν δομές που έχουν αστεροειδή μορφή, ενώ τα πολυμερή ABA σχηματίζουν δομές που έχουν μορφή λουλουδιού. Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, το ιζώδες μειώνεται και το σύστημα παρουσιάζει ψευδοπλαστική συμπεριφορά. Σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία το ρευστό γίνεται Νευτώνειο ή παρουσιάζει υπερβολικά χαμηλή ψευδοπλαστική συμπεριφορά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται η κινητική ενέργεια των μέσων και παρατηρούνται αποτελέσματα διάχυσης.

Ένα υδάτινο σύστημα με πολυμερές AB παρουσιάζει ψευδοπλαστική συμπεριφορά όταν η υδροφιλική δομή μειώνεται και η υδροφοβική αυξάνεται. Τα υδρόφιλα πολυμερή δεν θα παρουσιάσουν ψευδοπλαστική συμπεριφορά ακόμη και αν έχουν μεγαλύτερη μάζα από τα υδροφοβικά. Το αντίθετο συμβαίνει για τα πολυμερή ABA τα οποία αποκτούν τη μορφή πηκτώματος (gel).

Τα πολυλειτουργικά πολυμερή είναι συστήματα που περιέχουν σε συνδυασμό τα πολυμερή AB (10%κ.β) και ABA (1%κ.β). Το σύστημα αυτό παρουσιάζει αυξημένη ψευδοπλαστική συμπεριφορά. Σε χαμηλές συγκεντρώσεις τα πολυμερή ABA δεν μπορούν να σχηματίσουν πλέγματα κολλοειδών μόνο με το δικό τους είδος αλλά σχηματίζουν γέφυρες με τις κολλοειδείς δομές των πολυμερών AB. Έτσι κατασκευάζεται ένα δίκτυο από κολλοειδείς δομές και δημιουργείται ένα gel.

Οι πολφοί που περιέχουν πολυλειτουργικά πολυμερή επιδέχονται κάποιες δοκιμές και συγκρίνεται η αποτελεσματικότητά τους σε σχέση με τα συνήθη πολυμερή στην εκάστοτε δοκιμή. Αρχικά μετρήθηκε το ιξώδες του πολφού και παρατηρήθηκε ότι ο πολφός με τα πολυλειτουργικά πολυμερή παρουσιάζει υψηλότερο φαινομενικό και πλαστικό ιξώδες από τους τυποποιημένους πολφούς. Στην συνέχεια ο πολφός αναδεύτηκε με τεμαχίδια σχιστόλιθου συγκεκριμένης κοκκομετρίας για και μετρώνται οι ανακτώμενες μάζες. Οι πολφοί με τα πολυλειτουργικά πολυμερή έχουν μεγαλύτερο βαθμό ανακτώμενης μάζας.

Μια ακόμη δοκιμή είναι η δοκιμή διήθησης όπου χρησιμοποιείται φιλτρόπρεσσα. Οι εξελιγμένοι πολφοί έχουν χαμηλότερη διηθητική ικανότητα λόγω ενός προστατευτικού υδροφοβικού φιλμ. Τέλος, για την δοκιμή λίπανσης χρησιμοποιήθηκε δοκιμαστής λίπανσης και παρατηρήθηκε ότι οι εξελιγμένοι πολφοί μειώνουν πιο αποτελεσματικά τον συντελεστή τριβής.

Συμπερασματικά, τα υδροφοβικά πολυμερή τύπου AB λειτουργούν ως καλοί ρεολογικοί τροποποιητές για πολφούς που έχουν βάση το νερό, και τα πολυμερή τύπου ABA λειτουργούν σαν συγκολλητικά των δομών των κολλοειδών που έχουν την μορφή λουλουδιού του τύπου AB, εμπλουτίζοντας την ψευδοπλαστική συμπεριφορά στο σύστημα (Rodrigues and Lachter, 2006).

## 2.6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΣΤΙΣ ΡΕΟΛΟΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΓΕΩΤΡΗΤΙΚΩΝ ΠΟΛΦΩΝ ΤΥΠΟΥ KCl/POLYMER.

Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκε η επίδραση δύο πολυμερών, *xathan gum* (φυσικά υδατοδιαλυτά πολυσακχαρίδια) και πολυανική κυτταρίνη, σε γεωτρητικούς πολφούς τύπου KCl/Polymer. Τα μη Νευτώνεια ρευστά χαρακτηρίζονται από τα ρεολογικά μοντέλα Bingham Plastic, Power Law, Casson, Herchel-Bulkley και Robertson-Stiff. Τα πολυμερή που προστέθηκαν στο σύστημα επηρεάζουν το ρεολογικό μοντέλο και προκαλούν διαφοροποιήσεις στον οδηγό συνάφειας και στον οδηγό συμπεριφοράς ροής.

Ο οδηγός συνάφειας αυξάνεται όσο αυξάνεται η συγκέντρωση του πολυμερούς, προσφέροντας μεγαλύτερη διατμητική τάση. Ο οδηγός συμπεριφοράς ροής ελαττώνεται εξαιτίας της απόκλισης του πολυμερούς από την Νευτώνεια συμπεριφορά.

Η αρχή περιλάμβανε μετρήσεις διατμητικής τάσης και βαθμίδας ταχύτητας κάνοντας εφικτή την μαθηματική περιγραφή της ροής των γεωτρητικών ρευστών. Τα περισσότερα γεωτρητικά ρευστά δεν συμμορφώνονται ακριβώς με τα προτεινόμενα μοντέλα, αλλά η συμπεριφορά ροής τους μπορεί να αποδοθεί με ικανοποιητική ακρίβεια με κάποια από αυτά.

Στα δείγματα προστέθηκε KCl, NaCl, CaCO<sub>3</sub>, KOH, τροποποιημένο άμυλο, PAC ( πολυανική κυτταρίνη) και XC (*xathan gum*). Παρασκευάστηκαν πενήντα πέντε (55) δείγματα διαφορετικής συγκέντρωσης πρόσθετων. Προσδιορίστηκε το ιξώδες και οι σταθερές του οργάνου ρυθμίστηκαν έτσι ώστε το πλαστικό ιξώδες και η τάση διολίσθησης να συνδέονται μεταξύ τους.

Παρατηρήθηκε ότι ο οδηγός συνάφειας αυξάνεται με αύξηση της συγκέντρωσης της *xathan gum* και PAC. Αντιθέτως ο οδηγός συμπεριφοράς ροής παρουσιάζει μείωση με αύξηση της συγκέντρωσης των πολυμερών αυτών. Όσον αφορά τη δύναμη γέλης, παρουσιάζει ελαφρά αύξηση με την προσθήκη PAC και εντονότερη με την προσθήκη *xathan gum* (Versan and Alikaya, 2003).

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΟΛΦΟΙ ΓΕΩΤΡΗΣΩΝ.**

### **3.1.ΓΕΝΙΚΑ.**

Οι γεωτρητικοί πολφοί διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- Πολφοί με βάση το νερό (WBM)
- Πολφοί με βάση το πετρέλαιο (OBMs)
- Συνθετικοί πολφοί (SBMs)

Οι πολφοί με βάση το νερό είναι αιωρήματα, που περιέχουν βαρύτη, μπεντονίτη και άλλα πρόσθετα και έχουν ως βάση γλυκό ή θαλασσινό νερό. Υπάρχουν πολλοί περιορισμοί κατά την χρήση τους όπως η μέγιστη γωνία διοχέτευσης, το μέγιστο βάθος της γεώτρησης η υψηλή θερμοκρασία και η ύπαρξη υδρόφιλων αργίλων. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε πηγάδια που έχουν μικρό βάθος ή στα ανώτερα τμήματα πηγαδιών μεγάλου βάθους. Σύμφωνα με έρευνα που εκπονήθηκε στις Η.Π.Α, προέκυψε ότι σε όλα τα ρηχά πηγάδια (βάθους μικρότερου των 300m) καθώς και σε 85% των πηγαδιών μεγάλου βάθους χρησιμοποιούνται πολφοί με βάση το νερό (Kendahl, 1996). Οι WBM χρησιμοποιούνται τέλος σε μεγάλο ποσοστό στις διερευνητικές γεωτρήσεις.

Παρά τις βελτιώσεις που έχουν γίνει στις WBM και που επιτρέπουν τη χρήση τους σε αρκετές περιπτώσεις αντί των OBM, εντούτοις υστερούν στην λιπαντική ικανότητα και τη θερμική σταθερότητα των OBM. Η θερμική σταθερότητα των WBM αυξήθηκε με τη χρήση πολυμερών υψηλής θερμοκρασίας και άλλων προσθέτων όπως για παράδειγμα λιγνίτη, ενώ μελέτες έχουν γίνει για την χρήση ελληνικού λιγνίτη. Από οικολογικής πλευράς, είναι φιλικότερες προς το περιβάλλον, σε σχέση με τις OBM.

Οι πολφοί με βάση το πετρέλαιο διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: Αυτούς που δημιουργούν γαλακτώματα (στους οποίους το νερό είναι διεσπαρμένο στο πετρέλαιο) και στους πολφούς αποκλειστικά πετρελαϊκής βάσης. Οι πολφοί αυτοί αποτελούνται από ορυκτέλαια και όχι από πετρέλαιο DIESEL που έχει απαγορευτεί για περιβαλλοντικούς λόγους. Οι πολφοί με βάση το πετρέλαιο

χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις όπου η χρήση των πολφών με βάση το νερό είναι τεχνικά αδύνατη και απαιτείται υψηλή απόδοση

Τέλος οι πολφοί συνθετικής βάσης, αποτελούνται από εστέρες ή διαιθέρες ενώ αυτοί που προέκυψαν αργότερα αποτελούνται από ισομερείς ολεφίνες. Αν και τα τεχνικά και περιβαλλοντικά τους πλεονεκτήματα είναι πολλά, πολλές φορές, το κόστος ανά βαρέλι πετρελαίου, δεν μπορεί να αντισταθμιστεί. (Πεταβρατζή, 2000)



**Σχήμα 3.2:** Γεώτρηση πετρελαίου στην περιοχή του κόλπου του Μεξικού. (web4)

### **3.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ.**

Η πρώτη επιτυχής χρήση πολφού στη βιομηχανία πετρελαίου πραγματοποιήθηκε το 1901, παρόλο που τα διατρητικά ρευστά είχαν χρησιμοποιηθεί νωρίτερα. Η βιβλιογραφία αναφέρει από το 1887 τη χρησιμότητα της προσθήκης πλαστικών στερεών στα διατρητικά νερά.



Το νερό ήταν το πρώτο περιστροφικό διατρητικό ρευστό, χωρίς να δίνεται σημασία στα υλικά που είχαν διατρηθεί και ήταν αιωρούμενα στη μάζα του. Ίσως μάλιστα, οι πρώτοι γεωτρυπανιστές να τα θεωρούσαν ως παράγοντα ρύπανσης. Το νερό διέβρεχε τα πετρώματα και τα μαλάκωνε για ευκολότερη εξόρυξη. Γρήγορα όμως έγινε κοινά αντιληπτό, πως η προσθήκη λάσπης στο νερό το έκανε αποδοτικότερο στη γεώτρηση. Έγινε επίσης κατανοητό, πως κάποιοι σχηματισμοί παρήγαγαν καλύτερη λάσπη από ότι άλλοι. Αρχικά οι λάσπες ήταν φυσικές. Ήταν μίγματα νερού και θραυσμάτων πετρωμάτων που παράγονταν, ή προέρχονταν από υλικά που βρίσκονταν κοντά στο σημείο της γεώτρησης. Τα προστιθέμενα υλικά ήταν αρχικά παραπροϊόντα άλλων διεργασιών και χαμηλού κόστους.

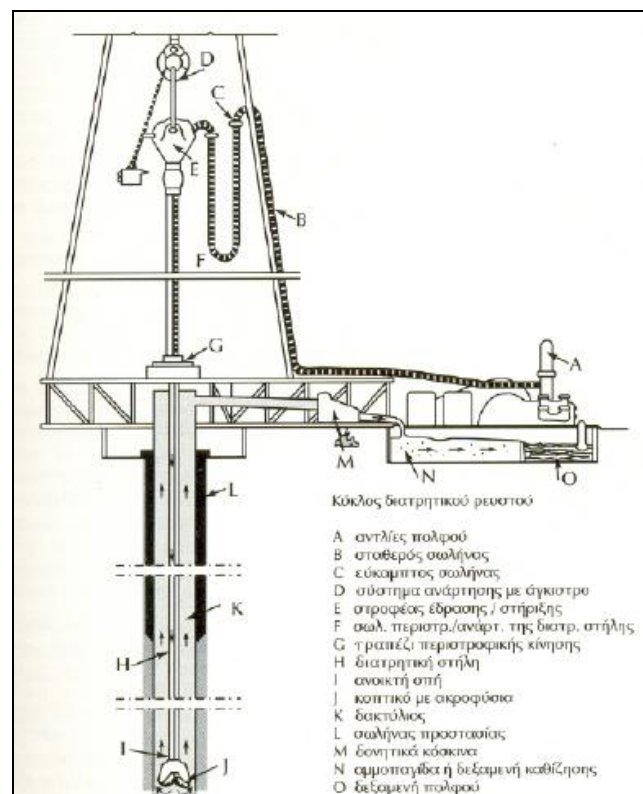
Επίσης, έγινε κατανοητό, πως κάποιοι σχηματισμοί παρήγαγαν καλύτερη λάσπη από ότι άλλοι. Οι χειριστές άρχισαν να προσθέτουν στο διατρητικό ρευστό αργιλώδη και μη αμμώδη χώματα, που ανακάλυψαν ότι φτιάχνουν καλύτερο πολφό. Έτσι άρχισε ο πρώτος έλεγχος του πολφού. Μέχρι το 1960 οι πολφοί μπεντονίτη (Water Based Muds, WBM) ήταν κυρίαρχοι στις γεωτρήσεις. Με την αύξηση όμως του βάθους διάτρησης παρουσιάστηκαν τα πρώτα προβλήματα, που οφείλονταν στην αστάθεια των πολφών στις υψηλές θερμοκρασίες καθώς και στην μικρή λιπαντική ικανότητα που προσέφεραν, ειδικά σε κεκλιμένες γεωτρήσεις. Με την επέκταση όμως σε όλο και βαθύτερα φρεάτια με υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις, η βιομηχανία ανέπτυξε εξειδικευμένα χημικά για συγκεκριμένες χρήσεις.

Οι αιφνίδιες και βίαιες διαφυγές των ρευστών του σχηματισμού από τα τοιχώματα, ήταν κάτι που συνέβαινε συχνά στα πρώτα βήματα της περιστροφικής διάτρησης. Η εισαγωγή του πολφού που περιείχε υλικά πρόσθεσης βάρους, στις αρχές της δεκαετίας του '20, ήταν από τους πιο σημαντικούς σταθμούς στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των περιστροφικών διατρήσεων. Η σωστή χρήση των στερεών πρόσθεσης βάρους, έκανε εφικτή την ασφαλή διάτρηση σε ζώνες υψηλής, μέσης και κανονικής πίεσης.

Όσο μεγαλύτερη γινόταν η βεβαιότητα της συμβολής του πολφού στην ασφαλέστερη, γρηγορότερη και πιο οικονομική διάτρηση, τόσο πιο μεθοδική

ήταν η έρευνα στη σύνθεση των διατρητικών ρευστών. Αποτέλεσμα των ερευνών αυτών ήταν η σημαντική ανακάλυψη, πως το κολλοειδές περιεχόμενο των πολφών ήταν πρωταρχικής σημασίας για τον καθορισμό της ποιότητας του. Στη δεκαετία που ακολούθησε μετά την εισαγωγή των υλικών αύξησης βάρους, αναπτύχθηκε η χρήση εμπλουτισμένων κολλοειδών πρόσθετων μέσα στον πολφό, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για περαιτέρω βελτίωση της ποιότητας και της απόδοσης του.

Στην περιστροφική διάνοιξη, η κυκλοφορία του διατρητικού ρευστού φαίνεται στο σχήμα 3.1. Το κοπτικό άκρο έρχεται σε επαφή με το σχηματισμό που περιστρέφεται μέσω της διατρητικής στήλης (drillpipe). Το διατρητικό ρευστό φτάνει μέσω της διατρητικής στήλης στο κοπτικό άκρο και ξαναγυρίζει στην επιφάνεια μέσω του δακτυλίου που δημιουργείται μεταξύ των τοιχωμάτων του ανοίγματος και της διατρητικής στήλης.



**Σχήμα 3.1.** Σχηματική αναπαράσταση κίνησης διατρητικού ρευστού  
( Παπαδοπούλου, 2000).

Τα θραύσματα μεταφέρονται στην επιφάνεια και διαχωρίζονται από το διατρητικό ρευστό. Το διατρητικό ρευστό περνά από ένα κόσκινο από όπου γίνεται ο διαχωρισμός από τα θραύσματα και στη συνέχεια οδηγείται σε μια δεξαμενή. Τέλος με τη βοήθεια μιας αντλίας το ρευστό επανακυκλοφορεί στη διατρητική στήλη και επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία.

Σήμερα ανάμεσα στους κύριους στόχους που θέτουν οι μηχανικοί των διατρητικών ρευστών (mud engineers), είναι η αύξηση και ο έλεγχος του περιεχομένου των κολλοειδών και του βαθμού διασποράς τους στον πολφό. Η επιτυχία σ' αυτόν τον τομέα φαίνεται ξεκάθαρα με σύγκριση των γεωτρήσεων που γίνονταν πριν από δέκα, δεκαπέντε και είκοσι χρόνια με αυτές που γίνονται σήμερα, όσον αφορά κύρια στο βάθος του πηγαδιού και στη διάμετρο της οπής του (Παπαδοπούλου, 2000).

### **3.4. ΒΑΣΙΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΩΝ ΠΟΛΦΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ.**

Οι βασικές λειτουργίες των πολφών γεωτρήσεων είναι οι εξής (Παπαδοπούλου, 2000):

1. Απομάκρυνση των θραυσμάτων από τον πυθμένα του πηγαδιού στην επιφάνεια.
2. Ψύξη και λίπανση του κοπτικού άκρου και της διατρητικής στήλης.
3. Επίστρωση των τοιχωμάτων του πηγαδιού με ένα στεγανοποιητικό στρώμα για μείωση απώλειας ρευστού στα πετρώματα.
4. Έλεγχος των υποεπιφανειακών πιέσεων.
5. Κατακράτηση των αιωρούμενων θραυσμάτων και των υλικών πρόσθεσης βάρους όταν διακόπτεται η κυκλοφορία και διευκόλυνση στην αφαίρεση των θραυσμάτων και της άμμου στην επιφάνεια.
6. Ελάττωση του ρυθμού διάβρωσης.
7. Στήριξη ενός μέρους του βάρους του διατρητικού σωλήνα και του σωλήνα προστασίας.

8. Μείωση στο ελάχιστο οποιωνδήποτε δυσμενών επιδράσεων πάνω στον σχηματισμό που πρόσκειται στο πηγάδι.
9. Διασφάλιση της μέγιστης πληροφόρησης για τους διατηρηθέντες σχηματισμούς.
10. Μεγιστοποίηση των ρυθμών διάτρησης.

#### **3.4.1. Απομάκρυνση των θραυσμάτων.**

Αποτελεί μία από τις σπουδαιότερες λειτουργίες των διατρητικών ρευστών. Κατά την έξοδο του ρευστού από τα ακροφύσια του κοπτικού ασκείται κρουστική δράση από το ρευστό, που διατηρεί τον πυθμένα και τα άκρα του κοπτικού καθαρά από τα θραύσματα. Έτσι εξασφαλίζεται μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του κοπτικού άκρου και καλύτερη απόδοση της διάτρησης.

Το ρευστό που ανέρχεται από τον πυθμένα του πηγαδιού, μεταφέρει τα θραύσματα στην επιφάνεια. Το βάρος των θραυσμάτων τα ωθεί να βυθιστούν στο ρευστό. Με τη βοήθεια όμως επαρκούς όγκου ρευστού, με ικανή ταχύτητα ξεπερνάται αυτό το ενδεχόμενο και τα θραύσματα ανέρχονται στην επιφάνεια. Σημαντικό ρόλο όπως είναι φυσικό παίζουν η ταχύτητα ροής του ρευστού στο δακτύλιο, το ιξώδες και η πυκνότητά του.

Η ταχύτητα του πολφού στο δακτύλιο εξαρτάται από την ταχύτητα του εισπιεζόμενου ρευστού μέσα στη διατρητική στήλη (με ανάλογη σχέση) και από το μέγεθος της διατομής του δακτυλίου (με αντιστρόφως ανάλογη σχέση). Η ταχύτητα του δακτυλίου, κυμαίνεται από 100 ως 200 ft/min. Αν η διατομή της διατρητικής στήλης είναι σταθερή, αύξηση της δακτυλιοειδούς διατομής, δηλαδή αύξηση της διαμέτρου του πηγαδιού πρέπει να συνοδεύεται με αύξηση του εισπιεζόμενου ρευστού στη διατρητική στήλη.

Το ιξώδες εξαρτάται από τη συγκέντρωση, την ποιότητα και τη διασπορά των αιωρούμενων στερεών, οπότε ρυθμίζεται έτσι ώστε η ταχύτητα μεταφοράς των θραυσμάτων να αυξάνεται. Μια άλλη ρύθμιση που μπορεί να γίνει στα χαρακτηριστικά του ιξώδους, είναι η αύξηση του καθώς ελαττώνεται ο βαθμός διάτμησης. Η ιδιότητα αυτή είναι γνωστή ως θιξοτροπία.

Τέλος η πυκνότητα, μπορεί να ασκήσει μια δύναμη άνωσης στα θραύσματα, ιδιαίτερα αν υπερβαίνει τα  $1,5\text{g/cm}^3$ . Αύξηση της πυκνότητας, σημαίνει αύξηση της ικανότητας μεταφοράς που έχει το ρευστό μέσω της άνωσης.

Είναι φανερό ότι η απομάκρυνση των θραυσμάτων είναι σημαντική. Συσώρευσή τους μπορεί να φράξει το δακτύλιο με καταστροφικές συνέπειες ή να αυξήσει την πυκνότητα του ρευστού, πράγμα μη επιθυμητό γιατί δεν είναι ελεγχόμενο.

### **3.4.2. Ψύξη και λίπανση.**

Είναι πολύ απλή αλλά εξίσου σημαντική λειτουργία του πολφού σε σχέση με τις υπόλοιπες. Σχεδόν κάθε ρευστό που μπορεί να αντληθεί μπορεί να επιτύχει ψύξη του κοπτικού ώστε να αποτραπεί η υπερθέρμανση.

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της διάτρησης αναπτύσσεται θερμότητα λόγω της περιστροφής του κοπτικού, με αποτέλεσμα να μειώνεται η διάρκεια ζωής του. Προσθετικά λειτουργεί και η θερμοκρασία των σχηματισμών που αυξάνεται με το βάθος. Από έρευνες και μελέτες έχει διαπιστωθεί ότι η γηγενής θερμότητα δεν είναι σταθερή για το ίδιο βάθος σε όλη τη γη. Έτσι, ως αναλογικό μέτρο καθορίστηκε η γεωθερμική βαθμίδα. Έχει διαπιστωθεί ότι η γεωθερμική βαθμίδα σε μέσο όρο είναι  $1^\circ\text{C}$  κάθε 33m.

Επιπλέον, ο πολφός λειτουργεί και ως λιπαντικό για όλο το σύστημα διάτρησης, είτε με την υγρή του μορφή είτε με τα στερεά που εναποτίθενται στα τοιχώματα ως filter cake. Αν η ροπή στρέψης είναι μεγάλη, η παρουσία λιπαντικών πρόσθετων είναι απαραίτητη. Πολφοί συμβατικών γαλακτωμάτων ελαίου βελτιώνουν την ικανότητα λίπανσης.

### **3.4.3. Στεγανοποίηση των τοιχωμάτων του πηγαδιού.**

Δύο σημαντικές λειτουργίες του διατρητικού ρευστού είναι η συντήρηση των πετρωμάτων και η ελαχιστοποίηση των αντιδράσεων με το σχηματισμό.

Αν οι πόροι του πετρώματος έχουν μεγαλύτερο μέγεθος από αυτό των στερεών στον πολφό τότε αυτός θα εισχωρήσει στο σχηματισμό. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την προσθήκη υλικών απώλειας κυκλοφορίας, που είναι συνήθως ινώδη (ίνες ξύλου ή υάλου), φυλλόμορφα ορυκτά (μαρμαρυγίες), κοκκώδη (πλαστικά) ή μείγματα των παραπάνω.

Ένα διατρητικό ρευστό με καλές ιδιότητες, θα πρέπει να επιστρώνει στα τοιχώματα του πηγαδιού ένα στρώμα χαμηλής διαπερατότητας (filter cake). Αυτό παράγεται από τα στερεά του πολφού ειδικότερα τον μπεντονίτη και από ειδικά πρόσθετα. Είναι ικανό να σταθεροποιεί το σχηματισμό και να επιβραδύνει την εισχώρηση του ρευστού μέσα σε αυτόν. Η ιδιότητα αυτή βελτιώνεται με αύξηση του κολλοειδούς τμήματός του με την προσθήκη του κατάλληλου υλικού (μπεντονίτη) και με χημική επεξεργασία του πολφού που έχει ως στόχο τη διασπορά των σωματιδίων του.

Η σταθερότητα των τοιχωμάτων του πηγαδιού, αυξάνεται όταν το ρευστό έχει χαρακτηριστικά χαμηλής διηθητικότητας.

#### **3.3.4. Έλεγχος υποεπιφανειακών τάσεων.**

Κατά τη διάτρηση των σχηματισμών υπάρχουν θραύσματα μεταλλικά ή κρύσταλλοι ποικίλου μεγέθους που βρίσκονται υπό την πίεση υπερκείμενων πετρωμάτων. Επίσης υπάρχουν χώροι μεταξύ των σωματιδίων που γεμίζουν με αέριο ή υγρό που βρίσκεται επίσης υπό πίεση.

Η ενέργεια που περικλείεται στους σχηματισμούς λόγω αυτής της πίεσης μπορεί να δημιουργήσει δύο προβλήματα.

- Τρυπώντας το συμπιεσμένο πέτρωμα υπό πίεση δημιουργούνται ακτινικές τάσεις. Οι τάσεις αυτές μπορεί να αντισταθμιστούν από την πίεση που ασκεί η στήλη του διατρητικού ρευστού (υδροστατική) πάνω στα τοιχώματα. Η πίεση αυτή είναι ανάλογη της πυκνότητας του ρευστού και του ύψους της στήλης του. Αν η πίεση της στήλης του ρευστού δεν είναι αρκετή να κρατήσει τις τάσεις του πετρώματος του πηγαδιού ώστε αυτό να παραμένει σταθερό, τότε θα συμβεί κατάρρευση των τοιχωμάτων.

- Αν η πίεση που ασκείται από το διατρητικό ρευστό είναι μικρότερη από αυτήν των ρευστών του σχηματισμού τότε αυτά παρεισδύουν στο πηγάδι εκτοπίζοντας τον πολφό (kick). Συνεχείς εκτοπίσεις μπορούν να οδηγήσουν σε διαφυγή (blow out). Έτσι μπορεί να προκληθεί καταστροφή εξαρτημάτων, ζημιές στον περιβάλλοντα χώρο και εγκατάλειψη του πηγαδιού.

Η πίεση που ασκείται από τη στήλη του ρευστού ρυθμίζεται από τον έλεγχο πυκνότητας του διατρητικού ρευστού.

### **3.3.5. Αιωρούμενα στερεά και άμμος και απελευθέρωσή τους στην επιφάνεια.**

Όταν η κυκλοφορία του ρευστού έχει σταματήσει τότε πρέπει να υπάρχει δυνατότητα δημιουργίας πηκτώματος, έτσι ώστε τα στερεά και η άμμος να παραμείνουν αιωρούμενα. Επειδή όμως το ιξώδες και η πηκτικότητα εξαρτάται από το χρόνο, η τιμή τους δεν πρέπει να δυσχεραίνει την επανακυκλοφορία του ρευστού. Έτσι ο πολφός πρέπει να επιστρέφει στη ρευστή κατάσταση και τα στερεά μεταφέρονται στην επιφάνεια.

### **3.3.6. Έλεγχος του ρυθμού διάτρησης.**

Τα στοιχεία που απαρτίζουν τη διατρητική στήλη, βρίσκονται κάτω από υψηλές τάσεις, ώστε να ανταποκριθούν στο ρόλο τους. Η διάβρωση που υφίστανται μπορεί να δημιουργήσει αστοχία. Ένα διαβρωτικό ρευστό με επαρκές ποσοστό κολλοειδών τείνει να ελέγχει τη διάβρωση. Συνήθως επιδιώκεται διατήρηση αλκαλικού pH (9 έως 11) στο διατρητικό ρευστό. Σε πολύ διαβρωτικές συνθήκες μπορεί να χρησιμοποιηθούν χημικά ανασταλτικά της διάβρωσης όπως χημικά πρόσθετα που σχηματίζουν προστατευτικό φιλμ ή χρωμικά άλατα νατρίου ή χημικά καθαριστικά που απορροφούν τα διαβρωτικά άλατα. Σταθεροί πολφοί γαλακτωμάτων ελαίου, παρουσιάζουν εξαιρετικές ιδιότητες αναστολής της διάτρησης.

**3.3.7. Υποστήριξη του βάρους της διατρητικής στήλης.**

Η άνωση του διατρητικού ρευστού βοηθά στη στήριξη μέρους του βάρους της διατρητικής στήλης. Η άνωση είναι ανάλογη της πυκνότητας του ρευστού. Η ιδιότητα αυτή γίνεται σημαντικότερη όσο τα βάθη των γεωτρήσεων αυξάνονται, οπότε αυξάνουν και τα βάρη που στηρίζονται από τα όργανα της επιφάνειας. Αύξηση της πυκνότητας του πολφού σημαίνει αύξηση της άνωσης άρα και σημαντική μείωση του τελικού βάρους που στηρίζουν τα όργανα αυτά.

**3.3.8 Προστασία των σχηματισμών.**

Κατά τη διαδικασία της διάτρησης το πέτρωμα εκτίθεται στο διατρητικό ρευστό. Το διατρητικό ρευστό πρέπει να σχεδιαστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτού και του πετρώματος να μην είναι ισχυρές ώστε να προκαλέσουν καθιζήσεις των τοιχωμάτων του πηγαδιού. Η ευαισθησία των πετρωμάτων στο νερό μπορεί να αντιμετωπιστεί με αλλαγές στη σύσταση του διατρητικού ρευστού. Προκειμένου να υπάρξει μέγιστη προστασία του σχηματισμού πρέπει να συνυπάρχουν οι βέλτιστες τιμές των ιδιοτήτων του διατρητικού ρευστού. Σε ορισμένες όμως περιπτώσεις οι τιμές αυτές μετριαζονται για να εξυπηρετηθούν άλλες βασικές ανάγκες.

**3.3.9. Μέγιστη δυνατή διασφάλιση των πληροφοριών του πηγαδιού.**

Κατά τη διάτρηση, διεξάγονται συνεχείς αναλύσεις για τη διασφάλιση του μέγιστου όγκου πληροφοριών για το σχηματισμό. Το διατρητικό ρευστό κατά την επιστροφή του ελέγχεται για τη διαπίστωση εισχώρησης αερίων ή υδρογονανθράκων. Τα θραύσματα πρέπει να μεταφέρονται αναλλοίωτα στην επιφάνεια ώστε να εξασφαλίζεται η αντιπροσωπευτικότητα των δειγμάτων σε σχέση με τους σχηματισμούς από τους οποίους προέρχονται.



**3.3.10. Μεγιστοποίηση των ρυθμών διάτρησης.**

Το διατρητικό ρευστό έχει στενή επαφή με το διατρηθέν πέτρωμα και οι ιδιότητες του έχουν σημαντική επίδραση στο ρυθμό διάτρησης. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζει το ρυθμό διάτρησης είναι η διαφορά της πίεσης μεταξύ της υδροστατικής που ασκεί η στήλη του υδροστατικού ρευστού και της πίεσης των υγρών και αερίων που υπάρχουν στους πόρους του πετρώματος. Μεγάλη πυκνότητα του διατρητικού ρευστού σημαίνει μεγάλη σταθερότητα στα τοιχώματα του πηγαδιού αλλά και αργός ρυθμός διάτρησης.

Κατά τη διάτρηση επίσης ο πολφός διεισδύει στις ρωγμές που προκαλούνται στο πέτρωμα από τα δόντια των κεφαλών του κοπτικού. Αυτό είναι αναγκαίο επειδή το θραύσμα μπορεί να ελευθερωθεί όταν η πίεση του ρευστού γύρω από το θραύσμα είναι ίδια με αυτή του πηγαδιού.

Η διείσδυση του πολφού στις τριχοειδείς ρωγμές επαυξάνεται από τα εξής χαρακτηριστικά του ρευστού :

- χαμηλό ιξώδες
- χαμηλό περιεχόμενο σε στερεά
- υψηλότερες απώλειες ρευστού.

Η σπουδαιότητα της χαμηλής περιεκτικότητας σε στερεά στο διατρητικό ρευστό αυξάνεται, καθώς τα στερεά επιδρούν αρνητικά στο ρυθμό διάτρησης. Έτσι, αρκετά διαλύματα πολυμερών έχουν χρησιμοποιηθεί για να εκπληρώσουν μερικές από τις λειτουργίες που πραγματοποιούν οι αντίστοιχοι άργιλοι, όπως ο μπεντονίτης. Οι μετατροπές αυτές στη σύσταση του διατρητικού ρευστού αυξάνουν το κόστος των ρευστών. Αυτό αντισταθμίζεται από τους μικρότερους χρόνους διάτρησης και από το μικρότερο αριθμό χρησιμοποιούμενων κοπτικών.

Η σταθερότητα των τοιχωμάτων του πηγαδιού εξαρτάται άμεσα από το χρόνο, καθώς τα συνθλιμμένα πετρώματα χρειάζονται συγκεκριμένο χρόνο να ανταποκριθούν φυσιολογικά σε μια αλλαγή καθεστώτος πιέσεων. Ο χρονικός

αυτός παράγοντας είναι συχνά κρίσιμος, γιατί αυτό που απαιτείται τελικά είναι στέρεα τοιχώματα που θα επιτρέψουν να τοποθετηθεί η σωλήνωση και να τοιμεντωθεί.

Το διατρητικό ρευστό είναι το μέσο που μεταβιβάζει τη διατιθέμενη υδραυλική ισχύ πάνω στην επιφάνεια του κοπτικού. Σε γενικές γραμμές ο υδραυλικός σχεδιασμός πρέπει να προβλέπει τέτοιους ρυθμούς κυκλοφορίας ρευστού, ώστε μια βέλτιστη υδραυλική ισχύς να χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό του μετώπου του πηγαδιού μπροστά στο κοπτικό. Οι ρεολογικές ιδιότητες του ρευστού, πλαστικό ιξώδες και το σημείο έναρξης ολίσθησης, ασκούν σημαντική επιρροή πάνω στα υδραυλικά αποτελέσματα και θα πρέπει να ελέγχονται.

### **3.4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΠΟΛΦΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ.**

#### **3.4.1. Η απουσία άμμου και αποξεστικών σωματιδίων.**

Όταν υπάρχουν επιβλαβείς προσμίξεις σωματιδίων που έχουν αποξεθεί από τα τοιχώματα σε ικανή ποσότητα μέσα στη μάζα του πολφού, τότε οι περισσότερες λειτουργίες του πολφού αναστέλλονται. Με την παρουσία τους, μειώνεται το κολλοειδές περιεχόμενο του πολφού, οπότε δε βελτιώνεται το ιξώδες του και αυξάνεται ο όγκος του διηθήματος που περνά στο σχηματισμό, όπως και το πάχος του filter cake στα τοιχώματα, με τα οποία δημιουργεί υπερβολική τριβή. Επίσης σχηματίζεται μέσα του ένα ανεπιθύμητο φορτίο, που θα πρέπει να αντικατασταθεί από επιθυμητό κολλοειδές υλικό ή από επιθυμητό υλικό πρόσθεσης βάρους.

#### **3.4.2. Το επαρκές περιεχόμενο κολλοειδούς.**

Τα κολλοειδή είναι ουσίες που αποτελούνται από εξαιρετικά μικρά σωματίδια, των οποίων οι διαστάσεις συνήθως κυμαίνονται από 0.0005 έως 0.5  $\mu\text{m}$ . Τα περισσότερα από τα κολλοειδή μέσα στους πολφούς είναι διασπορές.

Δηλαδή, αποτελούνται από σωματίδια με κολλοειδείς διαστάσεις, τα οποία είναι διασπαρμένα σε μια συνεχή υγρή φάση. Θα πρέπει όμως να γίνει διάκριση μεταξύ των αιωρούμενων μικρών σωματιδίων, όπως της ιλύος, αλλά και των μοριακών διασπορών, όπως των πραγματικών διαλυμάτων (π.χ. άλας μέσα στο νερό). Αν και πολλά υλικά μπορεί να κονιοποιηθούν μέχρι να αποκτήσουν κολλοειδείς διαστάσεις, μερικές μόνο, όπως η άργιλος, μπορεί σωστά να χαρακτηρισθούν κολλοειδείς ουσίες, ακόμα και με απουσία κάθε διασπαρτικού μέσου. Αυτό αποδίδεται στην ύπαρξη σωματιδίων κολλοειδούς μεγέθους ακόμα και σε συμπαγή πετρώματα.

Η άργιλος με πολύ έντονα κολλοειδή χαρακτηριστικά (όπως ο μπεντονίτης), έχει την ικανότητα να ενυδατώνεται απορροφώντας βάρος νερού πολλές φορές μεγαλύτερο από το βάρος της, σχηματίζοντας ένα αιώρημα που έχει όγκο πολλές φορές μεγαλύτερο από τον όγκο του αρχικού στερεού. Μερικά κολλοειδή αιωρήματα αργίλου έχουν την ιδιότητα να σχηματίζουν πηκτώνοντας μια γέλη ή ένα ημι-ελαστικό στερεό, όταν τους επιτραπεί να σταθούν σε ηρεμία για μικρή χρονική περίοδο. Με ανάδευση καταστρέφεται η γέλη και το σύστημα επανέρχεται σε υγρή κατάσταση. Αυτή η ιδιότητα είναι αναστρέψιμη και είναι γνωστή με τον όρο θιξοτροπία. Ο βαθμός και ρυθμός πήκτωσης μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά με την προσθήκη επιλεγμένων χημικών ενώσεων.

Η παρουσία εμπλουτισμένου κολλοειδούς είναι θεμελιώδους σημασίας για την επιτυχία του διατρητικού πολφού ως προς τα εξής:

- **Σχέση ιξώδους και ποσοστού στερεών.**

Κολλοειδή υλικά όπως ο μπεντονίτης παράγουν μεγάλο όγκο πολφού συγκεκριμένου ιξώδους για ένα συγκριτικά μικρό ποσοστό στερεών. Η σχέση ιξώδους - ποσοστού στερεών μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά με τη χρήση χημικών διασπαρτικών ή αραιωτικών, καθώς και με την παρουσία επιβλαβών ηλεκτρολυτών. Αντίθετα με τους μπεντονίτες, οι άργιλοι υψηλής περιεκτικότητας σε άμμο και σε αδρανή-κολλοειδή στερεά, θα έχουν συγκριτικά χαμηλή απόδοση σε όγκο πολφού μετρούμενη σε βαρέλια πολφού

συγκεκριμένου ιξώδους ανά τόνο ξηρής αργίλου. Αυτές οι άργιλοι αποδεικνύεται συνήθως ότι δεν είναι οικονομικοί, εφόσον το κόστος τους υπολογίζεται ανάλογα με το κόστος ενός βαρελιού πολφού.

- **Ιδιότητες διήθησης.**

Τα διατρητικά ρευστά που είναι πλούσια σε κολλοειδή μπεντονιτικού ή οργανικού τύπου, έχουν καλές ιδιότητες διήθησης. Δηλαδή θα αποθέτουν ένα λεπτού πάχους και χαμηλής διαπερατότητας filter cake στα τοιχώματα του πηγαδιού, επιτρέποντας μόνο σε ένα μικρό σχετικά ποσό διηθήματος να περάσει μέσα στο σχηματισμό. Επιτυγχάνεται έτσι αποφυγή της μόλυνσης των σχηματισμών και έτσι δεν υπάρχει πρόβλημα στην παραγωγή.

- **Ικανότητα μεταφοράς ή φόρτισης.**

Λαμβανομένου υπόψη ότι το ιξώδες ενός πολφού αυξάνει με την παρουσία λειοτριβημένων στερεών και άλλων αδρανών κολλοειδών υλικών, εκτιμάται ότι το φορτίο που μπορεί να μεταφέρει ένας δεδομένης σύνθεσης πολφός, καθορίζεται από το άνω όριο του ιξώδους του που μπορεί να γίνει αποδεκτό. Ένας πολφός φτιαγμένος από εμπλουτισμένα κολλοειδή υλικά, μπορεί να δεχθεί περισσότερα λεπτά θραύσματα και άλλα αδρανή υλικά πριν φθάσει στο οριακό του ιξώδες από έναν που περιέχει μεγάλο ποσοστό λεπτών αλλά μη κολλοειδών στερεών. Επιπρόσθετα, πολφός με υψηλό ποσοστό αδρανών στερεών είναι δύσκολο να αραιωθεί ώστε να αποκτήσει εκ νέου χαμηλότερο ιξώδες, χωρίς να υπάρξουν μεγάλες απώλειες σε ιδιότητες κολλοειδούς, αφού το νερό που θα προστεθεί για την αραιώση θα μειώσει το ποσοστό της περιεκτικότητας των στερεών. Ένας μάλιστα πολφός με περιεκτικότητα κοντά στα όρια της ικανότητας μεταφοράς του, θα επιβραδύνει το ρυθμό διεύδυσης.

- **Θιξοτροπικές Ιδιότητες.**

Ο διατρητικός πολφός πρέπει να περιέχει επαρκές ποσοστό κολλοειδούς υλικού που να μπορεί να σχηματίσει gel. Όταν διακοπεί η κυκλοφορία, ο

πολφός πηκτώνει (δηλαδή αυξάνεται η αντοχή του σε διάτμηση) και αποτρέπει την καθίζηση των θραυσμάτων και τη συγκέντρωση τους γύρω από το κοιπτικό και τη διατρητική στήλη και την ενδεχόμενη επικόλληση σ' αυτά. Ο ρυθμός διάτμησης, η διάμετρος και το βάθος του πηγαδιού, το βάρος του πολφού και το ιξώδες του, μπορεί να απαιτούν μεταβολή της αντοχής του gel σε διάτμηση. Υπό ορισμένες συνθήκες, αυτές οι αντοχές σε διάτμηση μπορεί να πλησιάσουν το μηδέν, μετρούμενες με ιξωδόμετρο. Τότε πάλι, είναι δυνατό να ελεγχθούν διαμέσου της χρήσης κατάλληλων αραιωτικών.

- **Επιδεκτικότητα στην προσθήκη υλικών αύξησης βάρους.**

Μερικοί πολφοί πρέπει να έχουν ικανοποιητικές ιδιότητες, ώστε να μπορούν να κρατήσουν αιωρούμενο ένα βαρύ φορτίο υλικών πρόσθετου βάρους.

- **Σταθεροποίηση χαλαρών σχηματισμών (αμμώδεις, χαλικώδεις και κρυσταλλικοί μη σταθεροί σχηματισμοί).**

Ο πολφός, που περιέχει επαρκή ποσότητα κολλοειδούς υλικού ικανού να σχηματίσει gel, θα περιβάλλει και θα συγκρατήσει τα σωματίδια μερικών τύπων σχηματισμών υπό καθίζηση.

- **Επιδεκτικότητα σε χημική επεξεργασία.**

Το ιξώδες που αρχικά επιτυγχάνεται με την παρουσία του μπεντονίτη, μειώνεται εύκολα με τη χημική επεξεργασία. Ωστόσο, οι χημικοί αραιωτές έχουν μικρή επίδραση στα αδρανή στερεά. Αυτό είναι σημαντικό, ειδικότερα για τον έλεγχο των πολφών υψηλού ειδικού βάρους, οι οποίοι είναι επιθυμητό να έχουν υψηλό ιξώδες και χαμηλή περιεκτικότητα σε gel.

- **Καλές λιπαντικές ιδιότητες του πολφού.**

Εξαρτώνται από το περιεχόμενο του σε κολλοειδή υλικά. Το έλαιο που υπάρχει μέσα σε έναν πολφό γαλακτώματος, θεωρείται ότι βρίσκεται σε κολλοειδή κατάσταση διασποράς και παρέχει καλές λιπαντικές ιδιότητες, τόσο στον πολφό όσο και στο αποτιθέμενο filter cake.

- **Απόδοση σε θερμοκρασία.**

Οι εργαστηριακές έρευνες που έγιναν σε όλα τα είδη των πολφών απέδειξαν ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται παράλληλα και το πάχος του filter cake, καθώς και ο όγκος του διηθήματος που εισχωρεί στο σχηματισμό. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την προσθήκη κολλοειδών σε πολφούς φτωχούς σε κολλοειδή μέσω κατάλληλης χημικής επεξεργασίας.

### **3.4.3. Πυκνότητα.**

Το υδροστατικό ύψος μιας στήλης διατρητικού πολφού εξαρτάται από το βάρος ή την πυκνότητα του πολφού. Η διαφορά μεταξύ των υδροστατικών πιέσεων που ασκούνται από τον πολφό και των πιέσεων του σχηματισμού, δίνουν το συντελεστή ασφαλείας. Ο συντελεστής ασφαλείας μπορεί να αυξάνεται με την αύξηση του βάρους του πολφού. Όπως ακόμη έχει προαναφερθεί, πολφοί μεγάλης πυκνότητας μπορούν να αποτρέπουν την καθίζηση σε πολλούς σχηματισμούς.

Ως υλικό πρόσθεσης βάρους, ορίζεται κάθε υλικό που προστίθεται στον πολφό για να αυξήσει την πυκνότητά του, πάνω από αυτήν που επιτυγχάνεται με ισοδύναμη προσθήκη αργίλου. Τα υλικά πρόσθεσης βάρους θα πρέπει να έχουν μεγάλο ειδικό βάρος, ώστε ο κύριος όγκος τους να μην αυξάνει άσκοπα το ιξώδες του πολφού. Επίσης, δεν θα πρέπει γενικά να είναι διαβρωτικά και χημικώς ενεργά. Θα πρέπει να είναι απαλλαγμένα από διαλυτά στη μάζα τους στοιχεία, τα οποία όταν προστίθενται στον πολφό μπορεί να επιφέρουν δυσμενές αποτέλεσμα στο ιξώδες ή σε άλλες ιδιότητες.

Το πιο συχνά προστιθέμενο συστατικό είναι ο βαρύτης ( $\text{BaSO}_4$ ). Πρόκειται για ένα αδιάλυτο ορυκτό, ειδικού βάρους  $4.2 \text{ gr/cm}^3$ . Όταν είναι αρκετά λεπτόκοκκος (σκόνη), μπορεί να προστεθεί σε WBM και OBM μέχρι  $1800 \text{ Kg / m}^3$  (650 λίβρες / βαρέλι) και να δώσει στο ρευστό πυκνότητα πάνω από την διπλάσια σε σχέση με αυτή που δίνει μόνο του το νερό. Η αναλογία του βαρύτη στη λάσπη παρακολουθείται διαρκώς ώστε να διασφαλίζεται ότι η υδροστατική πίεση είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την πίεση των σχηματισμών, αλλά χαμηλότερη από αυτή που απαιτείται για να αστοχήσει ο σχηματισμός.

#### **3.4.4 Το pH του διατηρητικού πολφού.**

Το pH καθορίζει το βαθμό αλκαλικότητας ή οξύτητας ενός διαλύματος. Η μέτρηση του pH ενός πολφού συχνά βοηθά στη διάγνωση και στον καθορισμό της σωστής μεθόδου επεξεργασίας του. Πολλοί πολφοί είναι σχεδιασμένοι για να αποδίδουν καλύτερα κάτω από ορισμένο pH. Με τέτοιους πολφούς η επεξεργασία απαιτεί μετρήσεις του pH. Στους πολφούς γεωτρήσεων το pH που προτιμάται είναι αλκαλικό.

#### **3.4.5. Το άλας και άλλοι σχετικοί ηλεκτρολύτες.**

Η παρουσία αλάτων και άλλων σχετικών ηλεκτρολυτών έχει αρνητική επίδραση στα διατηρητικά ρευστά διότι κροκιδώνουν την κολλοειδή άργιλο. Έτσι είναι επιθυμητό το περιεχόμενό τους να διατηρείται όσο το δυνατόν χαμηλότερο. Αυτό γίνεται με την αποφυγή της χρήσης πολύ σκληρών νερών κατά τη μίξη, και με την προσπάθεια να ελεγχθούν έγκαιρα οι εισροές αλατούχου νερού. Αν η παρουσία αλάτων στον πολφό είναι αναπόφευκτη, τότε ο συνδυασμός εκτεταμένης χημικής επεξεργασίας και ενός οργανικού κολλοειδούς διάσπαρτου στο αλατούχο νερό, μπορεί να δώσει ένα διατηρητικό ρευστό, με ικανοποιητικές ιδιότητες.



**Σχήμα 3.3:** Εργασία πρόσθεσης στελεχών διατρητικής στήλης κατά την γεώτρηση πετρελαίου. (web 5)



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ.**

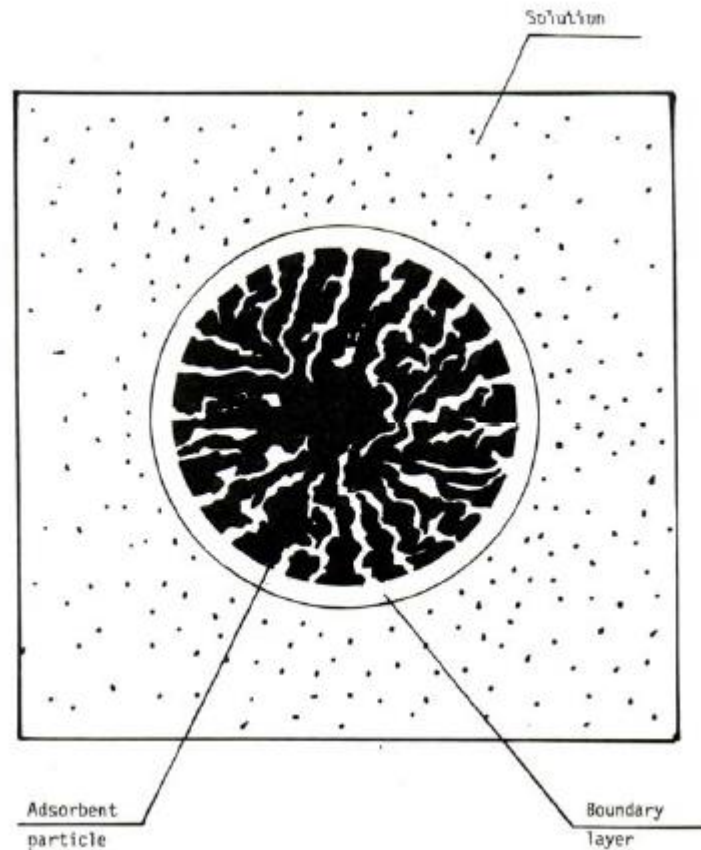
### **4.1 ΓΕΝΙΚΑ.**

Η προσρόφηση είναι η διαδικασία συσσώρευσης και διαχωρισμού ουσιών, οι οποίες βρίσκονται σε ένα διαλύτη, πάνω σε κατάλληλη επιφάνεια. Η φάση που προσροφά την ξένη ουσία ονομάζεται προσροφητικό μέσο, ενώ η φάση που προσροφάται, λέγεται προσροφούμενη ουσία.

Οι διεργασίες της προσρόφησης είναι δυνατόν να προκαλούνται είτε από το προσροφητικό υλικό είτε από την προσροφούμενη ουσία. Παράδειγμα της πρώτης περίπτωσης, αποτελεί η προσρόφηση ιδιαίτερα πολωμένων ή ιονισμένων ρύπων σε αργιλώδη εδάφη, ενώ στη δεύτερη περίπτωση ανήκει η προσρόφηση υδρόφοβων ουσιών σε εδαφικά σωματίδια (Γιδαράκος, 2005).

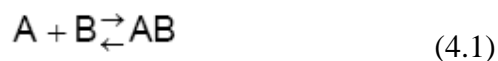
Κατά την προσρόφηση διαλυμένων ουσιών σε μία επιφάνεια η συγκέντρωση της προσροφημένης ουσίας πάνω στην επιφάνεια, αυξάνει μέχρι μιας τιμής. Περαιτέρω προσρόφηση μορίων, συνεπάγεται αποδέσμευση των ήδη προσροφημένων μορίων (Λέκκας, 1996). Είναι ευνόητο ότι όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια του προσροφητή, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ποσότητα της προσροφημένης ουσίας που μπορεί να προσροφηθεί σε κατάσταση κορεσμού της επιφάνειας (χωρητικότητα προσροφητή) (Mackay, 1996).

Η ρόφηση, είναι, συνήθως, φαινόμενο εκλεκτικό. Αυτό σημαίνει, ότι οι στερεές επιφάνειες, δείχνουν προτίμηση στην προσρόφηση κάποιων ουσιών σε σχέση με κάποιες άλλες. Με άλλα λόγια, η ένταση με την οποία προσροφούν τις διάφορες ουσίες, και ως εκ τούτου η έκταση της προσρόφησης διαφορετικών ενώσεων, είναι διαφορετική (Γεντεκάκης, 2001).



**Σχήμα 4.1:** Σχηματική αναπαράσταση προσρόφησης.

Το φαινόμενο της προσρόφησης περιγράφεται από μία χημική αντίδραση της μορφής:



Όπου :

- **A** : Προσροφημένη ουσία
- **B** : Προσροφητής
- **AB**: Ένωση προσρόφησης.

Η προσρόφηση λαμβάνει χώρα με διάφορους μηχανισμούς, οι κυριότεροι των οποίων είναι οι εξής (Γιδαράκος 2005):

- Ανταλλαγή ιόντων.
- Η αλληλεπίδραση μεταξύ ιόντων και διπλής ηλεκτρικής στοιβάδας στην επιφάνεια φυσικών στερεών που βρίσκονται σε υδατικά διαλύματα.
- Η αλληλεπίδραση ιόντος διπόλου για την περίπτωση ιονισμένης στερεής επιφάνειας με μη ιονισμένη προσροφούμενη ουσία.
- Ο δεσμός υδρογόνου

## 4.2. ΕΙΔΗ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ.

Η προσρόφηση διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες:

- Στην προσρόφηση ανταλλαγής,
- Στην χημική προσρόφηση
- Στη φυσική προσρόφηση.

Στην προσρόφηση ανταλλαγής η συσσώρευση της χημικής ουσίας οφείλεται στην επίδραση μεταξύ αυτής και του προσροφητικού υλικού. Στη φυσική προσρόφηση, η συσσώρευση οφείλεται σε δυνάμεις Van Der Waals. Κατά το είδος αυτή της προσρόφησης, τα προσροφούμενα μόρια κινούνται ελεύθερα στην επιφάνεια προσρόφησης και δεν έχουν συγκεκριμένο σημείο συγκράτησης. Στη χημική προσρόφηση τα προσροφημένα μόρια συγκρατούνται πάνω στην επιφάνεια του στερεού με χημικό δεσμό, δηλαδή υπάρχει μια συνεισφορά ηλεκτρονίων μεταξύ προσροφημένων μορίων και επιφάνειας (Atkins, 1986). Στον πίνακα που ακολουθεί γίνεται σύγκριση της φυσικής και της χημικής προσρόφησης αερίων:

α/α	Παράμετρος	Φυσική ρόφηση	Χημική ρόφηση
1	Είδος στερεού	Όλα	Μερικά
2	Είδος ροφημένου	Όλα τα αέρια κάτω από την $T_c$	Μερικά χημικώς ενεργά αέρια
3	Θερμοκρασία	Χαμηλή	Συνήθως υψηλή
4	Ενθαλπία ρόφησης	$<5\text{Kcal/mol}$	$10\text{-}100\text{Kcal/mol}$
5	Ρυθμός ρόφησης & ενέργεια ενεργοποίησης	Μεγάλος Συνήθως μηδαμινή	Ποικίλλει ανάλογα με την ενέργεια ενεργοποίησης
6	Κάλυψη επιφάνειας	Πολυστοιβαδική	Μονοστοιβαδική
7	Αντιστρεπτότητα	Πάντα αντιστρεπτή	Συχνά αντιστρεπτή

**Πίνακας 4.1:** Σύγκριση Φυσικής- Χημικής ρόφησης αερίων από επιφάνεια στερεών (Γιδαράκος, 2005).

Το φαινόμενο της προσρόφησης, συνοδεύεται από έκλυση θερμότητας (εξώθερμη διεργασία), που ονομάζεται θερμότητα προσρόφησης (Γιδαράκος, 2005). Η φυσική προσρόφηση παρατηρείται περισσότερο σε χαμηλές θερμοκρασίες και χαρακτηρίζεται από χαμηλή ενέργεια προσρόφησης, σε αντίθεση με την χημική που παρατηρείται σε υψηλές θερμοκρασίες και χαρακτηρίζεται από υψηλές ενέργειες προσρόφησης (Λέκκας, 1996).

### **4.3 ΙΣΟΘΕΡΜΕΣ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ.**

#### **4.3.1. Γενικά.**

Από τη στιγμή που η διαδικασία της προσρόφησης ξεκινάει συνεχίζεται έως ότου επέλθει θερμοδυναμική ισορροπία, η γνώση της οποίας επιτρέπει την ποσοτικοποίηση και την μαθηματική μοντελοποίηση του φαινομένου. Η ισορροπία αυτή η οποία δηλώνει και το τέλος της διαδικασίας προσρόφησης εκφράζεται μαθηματικά μέσω των ισόθερμων καμπύλων (Mackay, 1996). Υπάρχουν δύο μοντέλα που περιγράφουν την προσρόφηση:

- Τα εμπειρικά μοντέλα που περιγράφουν μαθηματικά την προσρόφηση με προσομοίωση των πειραματικών σημείων σε μία μαθηματική σχέση
- Τα μοντέλα επιφανειακής συμπλοκοποίησης.

#### **4.3.2. Μοντέλα σταθερού pH.**

Αρχικά για την περιγραφή του φαινομένου προτάθηκε η παρακάτω σχέση από τους Jaeger και Erdos (1956)

$$q_s = \frac{KC_s}{A + B_s^D} \quad (4.2)$$

Όπου:

- C<sub>s</sub>**: η συγκέντρωση της προσροφούμενης ουσίας στο διάλυμα σε συνθήκες ισορροπίας σε σταθερή θερμοκρασία [M/L<sup>3</sup>],
- q<sub>s</sub>**: η συγκέντρωση της ουσίας που έχει προσροφηθεί σε συνθήκες ισορροπίας σε σταθερή θερμοκρασία [M/M] και **K**, **A**, **D** και **B** σταθερές.

#### 4.3.2.1 Ισόθερμη Langmuir.

Ο τύπος αυτής της ισόθερμης προτάθηκε από τον Langmuir το 1914 και χρησιμοποιείται για ομογενή προσρόφηση. Η μαθηματική σχέση που περιγράφει την ισόθερμη αυτή είναι η εξής:

$$q_e = \frac{q_{\max} b C_e}{1 + b C_e} \quad (4.3)$$

Όπου:

- **q<sub>e</sub>**: Η ποσότητα που έχει προσροφηθεί [M/M]
- **q<sub>max</sub>**: Σταθερά που είναι η μέγιστη τιμή του q<sub>e</sub> όταν αυξάνεται το C<sub>e</sub>
- **C<sub>e</sub>**: Η συγκέντρωση της προσροφούμενης ουσίας στο διάλυμα σε συνθήκες ισορροπίας σε σταθερή θερμοκρασία. [M/L<sup>3</sup>]
- **b**: σταθερά που σχετίζεται με την ενέργεια προσρόφησης και αυξάνεται με την αύξηση ισχύος του δεσμού προσρόφησης. Οι τιμές q<sub>max</sub> και b υπολογίζονται αν προβληθεί το 1/q<sub>e</sub> έναντι του 1/C<sub>e</sub> από την γραμμική μορφή της (4.3):

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{\max} b C_e} + \frac{1}{q_{\max}} \quad (4.4)$$

Η εξίσωση Langmuir βασίζεται στις εξής προϋποθέσεις (Moore,1986):

- Η μέγιστη προσρόφηση, αντιστοιχεί σε ένα κορεσμένο στρώμα μορίων της διαλυμένης ουσίας στην επιφάνεια του προσροφητή
- Η ενέργεια προσρόφησης είναι σταθερή
- Δεν υπάρχει μετακίνηση του προσροφήματος στην έκταση της διεπιφάνειας.

#### 4.3.2.2 Ισόθερμη Freundlich.

Η προσρόφηση από διαλύματα, είναι περισσότερο διαδεδομένη, στα κολλοειδή συστήματα, στην υδρόσφαιρα και τη λιθόσφαιρα. Περιλαμβάνει τις

αντιδράσεις μεταξύ οργανικών συστατικών και ανόργανων ορυκτών και πιο συγκεκριμένα αργίλων. Η προσρόφηση σε διαλύματα, σε αντίθεση με την ρόφηση αερίων και ατμών από αέριες φάσεις, δεν εξαρτάται από την θερμοκρασία ή την πίεση. Περιλαμβάνει κυρίως χημικές αντιδράσεις, που χρειάζονται μεγάλη ενέργεια ρόφησης. Η ισόθερμη που περιγράφει το φαινόμενο αυτό είναι η ισόθερμη Freundlich. Πρόκειται για εμπειρική σχέση, που περιγράφεται από τον τύπο:

$$q_e = K \cdot C_e^{1/n} \quad (4.5)$$

Όπου:

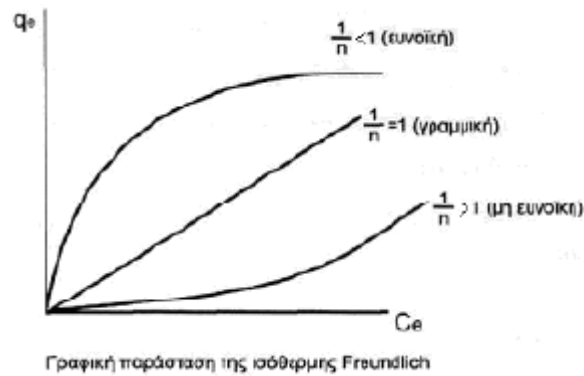
- $q_e$ : Η ποσότητα της ουσίας που έχει προσροφηθεί σε συνθήκες ισορροπίας σε σταθερή θερμοκρασία [M/M]
- $C_e$ : Η συγκέντρωση της προσροφούμενης ουσίας στο διάλυμα σε συνθήκες ισορροπίας και σταθερής θερμοκρασίας [M/L<sup>3</sup>]
- $K$ : Ο συντελεστής κατανομής της ισόθερμης Freundlich.

$1/n$ = η αδιάστατη παράμετρος της ισόθερμης Freundlich που αποτελεί ένδειξη της ενέργειας προσρόφησης. Ανάλογα με την τιμή του  $1/n$  διακρίνονται οι παρακάτω περιπτώσεις:

- $1/n \approx 0$ , η συγκέντρωση  $q_e$  δεν εξαρτάται από την συγκέντρωση  $C_e$ . Τότε η ισόθερμη γίνεται οριζόντια καμπύλη και η προσρόφηση, είναι μη αντιστρεπτή.
- $1/n = 1$ , η ισόθερμη είναι γραμμική.
- $1/n < 1$ , η ισόθερμη είναι ευνοϊκή.
- $1/n > 1$ , η ισόθερμη είναι μη ευνοϊκή.

Συνήθως, χρησιμοποιείται η γραμματικοποιημένη μορφή της εξίσωσης (4.5) που δίνεται από την σχέση (Γιδαράκος, 2005):

$$\log q_e = \log k + \frac{1}{n} \log C_e \quad (4.6)$$



Σχήμα 4.2: Ισόθερμη Freundlich.

#### 4.3.2.3 Γραμμική ισόθερμη.

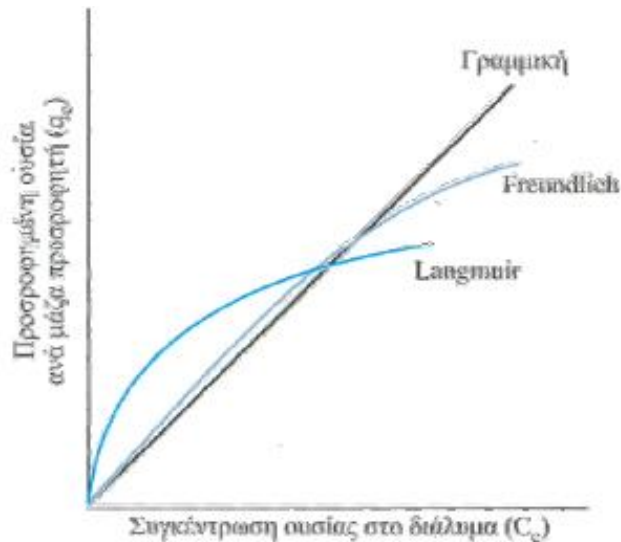
Ο μαθηματικός τύπος που περιγράφει τη γραμμική ισόθερμη είναι ο εξής:

$$q_e = K_d \cdot C_e \quad (4.7)$$

Όπου:

- $q_e$ : η ποσότητα της ουσίας που έχει προσροφηθεί σε συνθήκες ισορροπίας σε σταθερή θερμοκρασία [M/M]
- $K_d$ : συντελεστής γραμμικής προσρόφησης που προσδιορίζεται πειραματικά ή μέσω βιβλιογραφικών πηγών. Ο συντελεστής γραμμικής προσρόφησης αντιστοιχεί στην κλίση της ευθείας που παριστά την γραμμική ισόθερμη. Γραμμική ισόθερμη λοιπόν με μεγάλη κλίση παρουσιάζει μεγάλη τάση προσρόφησης και μεγάλο  $K_d$  [ $L^3/M$ ]
- $C_e$ : Η συγκέντρωση της προσροφούμενης ουσίας στο διάλυμα σε συνθήκες ισορροπίας και σταθερής θερμοκρασίας [ $M/L^3$ ]

Στο σχήμα 4.3 γίνεται σύγκριση των ισόθερμων της γραμμικής ισόθερμης, της ισόθερμης Freundlich και της ισόθερμης Langmuir.



Σχήμα 4.3: Σύγκριση μοντέλων προσρόφησης.

#### 4.3.2.4 Ισόθερμη Redlich-Peterson.

Είναι πιο γενική σε σχέση με τις ισόθερμες Freundlich και Langmuir. Η ισόθερμη αυτή περιγράφει την ετερογενή προσρόφηση. Ο μαθηματικός της τύπος, δίνεται θέτοντας  $A=1$  στην εξίσωση (4.2):

$$q_s = \frac{K_j C_s}{1 + b_j C_s^B} \quad (4.8)$$

Παρατηρούμε ότι στην εξίσωση αυτή, υπάρχουν τρεις σταθερές οι οποίες πρέπει να υπολογιστούν ( $K_j$ ,  $b_j$  και  $B$ ) και γι ' αυτό τον λόγο την καθιστά λιγότερο εύχρηστη σε σχέση με τις άλλες δύο (Γιδαράκος, 2005).

#### 4.3.2.5 Ισόθερμη B.E.T.

Οι Brunauer, Emmett και Teller (1938), επέκτειναν την κινητική θεωρία του Langmuir σε πολυστρωματική προσρόφηση και κατέληξαν στην παρακάτω εξίσωση, η οποία είναι γνωστή ως εξίσωση BET:

$$\frac{P}{V(P-P_0)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{C-1}{V_m C} \cdot \frac{P}{P_0} \quad (4.9)$$



Όπου:

- **V**: ο όγκος του αερίου που προσροφάται σε πίεση  $P$
- **$P_0$** : η τάση των ατμών της ροφούμενης ουσίας που έχει προσροφηθεί σε πίεση  $P$
- **$V_m$** : ο μέγιστος όγκος της ροφούμενης ουσίας που δύναται να ροφηθεί σε μια μονοστοιβάδα.

Η εξίσωση αυτή περιγράφει την φυσική ρόφηση. Γραφική παράσταση των δεδομένων στο επίπεδο  $P/V(P_0-P)$  συναρτήσει  $P/P_0$  δίνει ευθεία με κλίση:  $C-1/V_m C$  και τεταγμένη ίση με  $1/V_m C$ . Έτσι προκύπτει ότι  $V_m = 1/(1 + \text{κλίση})$ . Δηλαδή μπορούμε να προβλέψουμε τον όγκο των μορίων που σχηματίζουν μια μονοστοιβάδα και εξ' αυτών την επιφάνεια του στερεού, ανεξάρτητα του γεγονότος ότι σχηματίζονται πολλαπλές στοιβάδες (Brunauer et al, 1938). Η ισόθερμη BET χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ειδικής επιφάνειας στερεών με προσρόφηση αερίων.

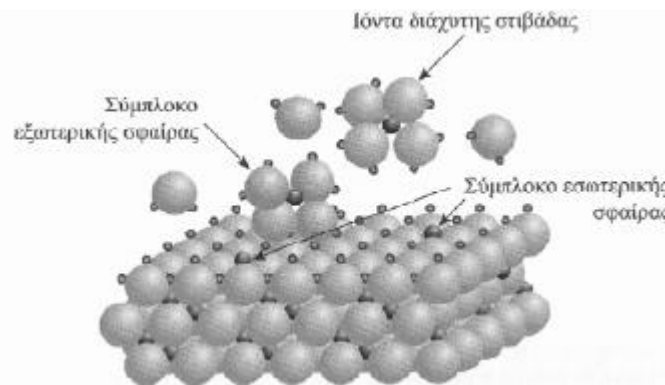
#### 4.3.3. Μοντέλα σε μεταβλητό pH.

Τα μοντέλα επιφανειακής συμπλοκοποίησης, χρησιμοποιούνται κυρίως στην προσρόφηση ανόργανων ενώσεων στα οξείδια των μετάλλων αλλά και στα αργιλικά ορυκτά αφού οι επιφάνειες των άκρων τους έχουν φορτίο που εξαρτάται από το pH. Όταν η επιφάνεια έρχεται σε επαφή με το νερό, τα μόρια του νερού συντάσσονται έτσι ώστε να εξουδετερώνουν το φορτίο του μετάλλου. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα η επιφάνεια των οξειδίων (SOH) του μετάλλου, όταν έρθει σε επαφή με το νερό, να καλύπτεται από υδροξύλια. Συγκεκριμένα, οι επιφανειακές ομάδες που έχουν χάσει ένα υδρογόνο (SO-) συμπεριφέρονται σαν βάσεις ενώ τα SOH συμπεριφέρονται σαν οξέα και ανταλλάσσουν το υδροξύλιο ή το υδρογόνο τους με ανάλογους υποκαταστάτες (Stumm, 1992).

Η διάστασή τους, γίνεται βάσει της αντίδρασης  $\equiv \text{SOH} \rightarrow \text{SO}^- + \text{H}^+$  με συνέπεια την δημιουργία μίας αρνητικά φορτισμένης επιφάνειας. Ομοίως, η πρόσληψη υδρογόνων γίνεται με την αντίδραση  $\equiv \text{SOH} + \text{H}^+ \rightarrow \text{SOH}_2^+$  με συνέπεια την δημιουργία μίας θετικά φορτισμένης επιφάνειας. Επομένως

ανάλογα με τη διαδικασία η οποία λαμβάνει χώρα, το φορτίο των οξειδίων των μετάλλων μεταβάλλεται. Πιο συγκεκριμένα, σε χαμηλό pH, αυξάνεται η συγκέντρωση των κατιόντων υδρογόνου, οπότε η επιφάνεια των οξειδίων φορτίζεται θετικά, ενώ σε υψηλό pH η συγκέντρωση των κατιόντων υδρογόνου μειώνεται, οπότε η επιφάνεια φορτίζεται αρνητικά. Η επιφανειακή φόρτιση η οποία δημιουργείται με τους παραπάνω τρόπους, παρέχει την δυνατότητα συμπλοκοποίησης κατιόντων και ανιόντων με αποτέλεσμα την δημιουργία επιφανειακών συμπλόκων (Drever, 1997).

Στην επιφανειακή συμπλοκοποίηση δημιουργούνται στιβάδες γύρω από την επιφάνεια. Έτσι σχηματίζονται τα σύμπλοκα της εσωτερικής σφαίρας, της εξωτερικής σφαίρας και της διάχυτης στιβάδας. Τα σύμπλοκα της εσωτερικής σφαίρας έχουν άμεση επαφή με την επιφάνεια, ενώ στα σύμπλοκα της εξωτερικής σφαίρας παρεμβάλλονται μεταξύ της επιφάνειας και του υποκαταστάτη ένα ή περισσότερα μόρια νερού. Τέλος, ιόντα μπορούν να συγκρατηθούν στην διάχυτη στιβάδα (diffuse layer) από ηλεκτροστατικές δυνάμεις (Νικολαΐδης 2005).



**Σχήμα 4.4:** Σχηματική αναπαράσταση επιφανειακής συμπλοκοποίησης Ιόντων (Drever, 1997).

#### 4.3.3.1 Μοντέλο σταθερής χωρητικότητας CCM.

Το μοντέλο αυτό θεωρεί ότι η διεπιφάνεια στερεού και υγρού αποτελείται από μία στοιβάδα. Η σχέση που συνδέει το φορτίο και το δυναμικό της επιφάνειας δίνεται από τον τύπο  $\sigma_0 = C\Psi_0$  όπου  $C$  σταθερά ηλεκτρικής χωρητικότητας σε  $F/m^2$ . Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για διαλύματα με

υψηλή ιοντική ισχύ όπου η διπλή στοιβάδα έχει συμπιεστεί κοντά στην επιφάνεια. Επίσης χρησιμοποιείται για πολύ αραιά διαλύματα (Drever, 1997).

#### 4.3.3.2 Μοντέλο διάχυτης στοιβάδας (DDLМ).

Το μοντέλο αυτό θεωρεί ότι η διεπιφάνεια στερεού και υγρού αποτελείται από δύο στιβάδες την επιφανειακή και τη διάχυτη στιβάδα. Τα ιόντα που προσροφώνται σε συγκεκριμένα σημεία της επιφάνειας της προσδίδουν ένα επιφανειακό φορτίο  $\sigma_0$ . Το δυναμικό στην επιφανειακή στοιβάδα είναι σταθερό ενώ μειώνεται εκθετικά με την απόσταση στη διάχυτη στοιβάδα. Ο τύπος που το περιγράφει είναι:

$$\Psi(x) = \Psi_0 e^{-kx} \quad (4.10)$$

Όπου  $k$  το μήκος Debye ( $1/m$ ) που υπολογίζεται από τον τύπο:

$$k = \sqrt{\frac{2F^2 I 10^{-3}}{\varepsilon \varepsilon_0 R T}} \quad (4.11)$$

Όπου:

- F**: η σταθερά του Faraday ( $96485 \text{ C/mol}$ ).
- I**: η ιοντική ισχύς του διαλύματος ( $\text{mol/l}$ ).
- E**: η διηλεκτρική σταθερά του νερού.
- **$\varepsilon_0$** : είναι η διηλεκτρική σταθερά του κενού ( $8.854 \cdot 10^{-12} \text{ C/V/m}$ ).
- R**: είναι η σταθερά αερίων ( $8.134 \text{ J/mol/K}$ ).
- T**: η απόλυτη θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{K}$ ).

Από τον παραπάνω τύπο φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ιοντική ισχύς τόσο μικρότερο το μήκος της στοιβάδας. Ο τύπος που συσχετίζει το φορτίο της επιφάνειας με το δυναμικό της επιφάνειας  $\Psi$  δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma = (8RT\varepsilon\varepsilon_0 I 10^{-3})^{0.5} \sinh\left(\frac{Z\Psi_0 F}{2RT}\right) \quad (4.12)$$

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για διαλύματα με μικρή ιοντική ισχύ και για διαλύματα με χαμηλές συγκεντρώσεις προσροφούμενων ιόντων (Drever, 1997).

#### 4.3.4. Κινητική της προσρόφησης.

Η κινητική της προσρόφησης περιγράφει το ρυθμό προσρόφησης του διαλυτού συστατικού και ταυτόχρονα αποτελεί σημαντικό δείκτη για την αποτελεσματικότητα της προσρόφησης. Τα στάδια τα οποία περιγράφουν την προσρόφηση είναι τα εξής :

- Μεταφορά των προσροφημένων μορίων από το διάλυμα στην επιφάνεια του προσροφητή.
- Μεταφορά των προσροφημένων μορίων μέσω ενός λεπτού στρώματος του υγρού, το οποίο περιβάλλει την επιφάνεια του προσροφητή.
- Διάχυση δια μέσου των πόρων εφόσον το προσροφητικό υλικό είναι πορώδες. Το στάδιο αυτό εξαρτάται από το μέγεθος των πόρων, αλλά και από το μέγεθος των μορίων.
- Προσρόφηση των μορίων στην ενεργή επιφάνεια του προσροφητή και δημιουργία του δεσμού προσρόφησης

Το πρώτο και το τελευταίο στάδιο είναι πολύ γρήγορα, ενώ το δεύτερο και το τρίτο είναι εκείνα που ορίζουν τον ρυθμό της ρόφησης (Λέκκας, 1996).

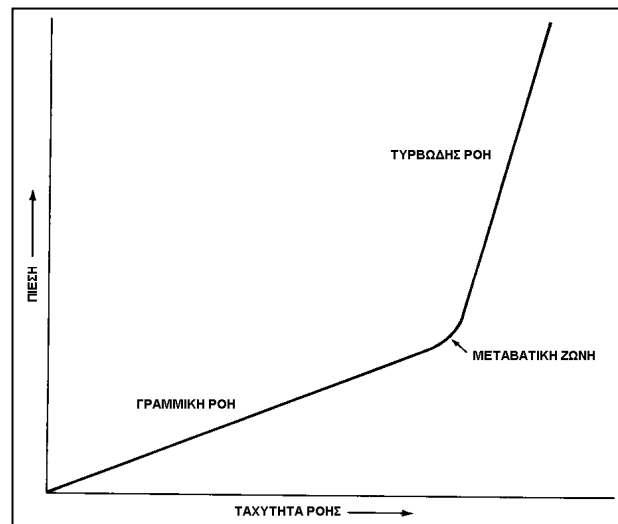
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΡΕΟΛΟΓΙΑ.

### 5.1 ΓΕΝΙΚΑ.

Η επιστήμη που ασχολείται με τη μελέτη της παραμόρφωσης και τη ροή των σωμάτων ονομάζεται ρεολογία. Ροομετρία είναι η μέτρηση του ποσοστού και του βαθμού παραμόρφωσης ή ροής ενός ρευστού κάτω από εφαρμοζόμενη δύναμη.

Μελετώντας την σχέση της πίεσης και του ρυθμού ροής διαπιστώνουμε ότι υπάρχουν δύο βασικές διαφορετικές συμπεριφορές.

- Γραμμική ροή σε χαμηλές ταχύτητες ροής. Η ροή είναι στρωτή και η πίεση σε σχέση με την ταχύτητα ροής εξαρτάται από το ιξώδες του ρευστού.
- Τυρβώδης ροή σε υψηλές ταχύτητες. Στην περίπτωση αυτή η ροή δεν είναι στρωτή και εξαρτάται από τις ιδιότητες αδράνειας του ρευστού σε κίνηση (Κελεσίδης, 2002).



**Σχήμα 5.1.** Απεικόνιση γραμμικής και τυρβώδους ροής.

## 5.2 ΡΕΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.

Οι σχέσεις της γραμμικής ροής που συσχετίζουν τα χαρακτηριστικά του ρευστού με τη συμπεριφορά της ροής, βασίζονται σε συγκεκριμένα ρεολογικά μοντέλα. Τα ρεολογικά μοντέλα διαχωρίζονται σε Νευτώνεια και μη Νευτώνεια.

### 5.2.3 Νευτώνεια ρευστά.

Μία από τις πρώτες προσπάθειες για την περιγραφή της ροής των ρευστών έγινε από τον Ισαάκ Νεύτωνα. Στα Νευτώνεια ρευστά η διατμητική τάση ( $\tau$ ) είναι ανάλογη του ρυθμού διάτμησης ( $\dot{\gamma}$ ):  $\tau = (\text{σταθερά}) \cdot \dot{\gamma}$ . Ο Νεύτωνας προσδιόρισε αυτή τη σταθερά ως το ιξώδες.

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (5.1)$$

Η ισότητα αυτή περιγράφει το Νευτώνειο ρευστό και ισχύει για σχετικά χαμηλές ταχύτητες όπου η ροή είναι στρωτή. Για μεγαλύτερες ταχύτητες η ροή γίνεται τυρβώδης και ο υπολογισμός γίνεται βάσει εμπειρικών σχέσεων.

Γραφικά η συμπεριφορά των Νευτώνειων ρευστών παρουσιάζεται σε διάγραμμα ρυθμού διάτμησης – διατμητικής τάσης, με μια ευθεία γραμμή που περνά από την αρχή των αξόνων. Η κλίση της γραφικής αυτής παράστασης, δίνει το ιξώδες  $\mu$ . Τυπική γραφική παράσταση ενός παχύρρευστου (B) και ενός λεπτόρρευστου υγρού (A) φαίνεται στο σχήμα 5.2. Τα αέρια και αρκετά υγρά (π.χ. νερό, μελάνι, μέλι) είναι Νευτώνεια ρευστά.

### 5.2.4 Μη Νευτώνεια ρευστά.

Ο λόγος του ρυθμού διάτμησης και της διατμητικής τάσης ενός μη Νευτώνειου ρευστού δεν είναι σταθερός, πράγμα που ισχύει για τα περισσότερα διατμητικά ρευστά. Στο σχήμα 5.2, οι γραμμές A και B παρουσιάζουν Νευτώνεια ρευστά μικρού και μεγάλου ιξώδους αντίστοιχα ενώ οι γραμμές C,D

και Ε παρουσιάζουν μη Νευτώνεια διατρητικά ρευστά. Τα δύο πιο γνωστά μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν τα μη Νευτώνεια διατρητικά ρευστά είναι το πλαστικό Bingham και το μοντέλο εκθετικού νομού (power law, PL).

#### 5.2.4.1 Μοντέλο πλαστικό Bingham.

Το μοντέλο πλαστικό Bingham χρησιμοποιείται επιτυχώς για να περιγράψει τη ρεολογική συμπεριφορά διατρητικών ρευστών. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.2, το Νευτώνειο μοντέλο μοιάζει με το πλαστικό Bingham αφού και τα δύο εκφράζονται από μια ευθεία γραμμή. Το πλαστικό μοντέλο Bingham όμως τέμνει τον άξονα της διατμητικής τάσης σε ένα σημείο που ονομάζεται τάση διολίσθησης ( $\tau_y$ ). Η κλίση της γραφικής παράστασης διατμητικής τάσης – ρυθμού διάτμησης δίνει το πλαστικό ιξώδες ( $\mu_p$ ).

Ο μαθηματικός τύπος που περιγράφει το μοντέλο αυτό είναι:

$$\tau = \tau_y + \mu_p \cdot \dot{\gamma} \quad (5.2)$$

Οι μονάδες  $\mu_p$  είναι ίδιες με του νευτώνειου ιξώδους, cP. Η διατμητική τάση έχει μονάδες τάσης,  $\tau_y$  [=] dynes/cm<sup>2</sup>.

Από τον τύπο αυτό γίνεται αντιληπτό ότι το ρευστό ρέει εφόσον η εφαρμοζόμενη διατμητική τάση υπερβαίνει την τάση διολίσθησης. Το κυριότερο πλεονέκτημα του μοντέλου είναι η ευκολία του υπολογισμού του πλαστικού ιξώδους και της τάσης διολίσθησης. Η γενική ιδέα της μέτρησης του πλαστικού ιξώδους και της τάσης διολίσθησης των διατρητικών ρευστών παρουσιάστηκε από τους Melrose και Lilienthal το 1951 και αργότερα το 1954 από τους Savins και Roper (Κελεσίδης, 2002).

#### 5.2.4.2 Μοντέλο Power law.

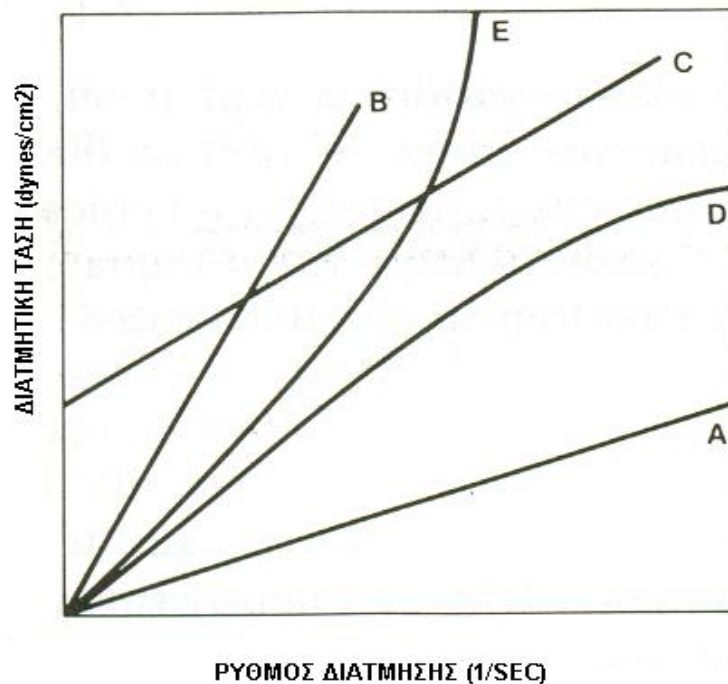
Το μοντέλο εκθετικού νόμου (PL) περιγράφει με μεγαλύτερη ακρίβεια τα διατρητικά ρευστά. Τα ρευστά γεώτρησης που περιέχουν πολυμερή και μικρό ή μηδενικό ποσοστό στερεών, σε υψηλότερες βαθμίδες ταχύτητας

συμπεριφέρονται σα να έχουν τάση διολίσθησης, αλλά στην πραγματικότητα η καμπύλη συνάφειας αποκλίνει. Το μοντέλο αυτό περιγράφεται από τη σχέση:

$$\tau = K \cdot \gamma^n \quad (5.3)$$

Η παράμετρος (K) ονομάζεται δείκτης συνάφειας (consistency index) και η παράμετρος (n) δείκτης συμπεριφοράς ροής (flow – behavior index) ή εκθέτης power law.

Στην ειδική περίπτωση όπου  $n=1$  το μοντέλο είναι Νευτώνειο . Αν (n) μικρότερο της μονάδας τότε η γραφική παράσταση είναι η D και το ρευστό ονομάζεται ψευδοπλαστικό. Η γραφική παράσταση E παριστάνει την περίπτωση όπου το n είναι μεγαλύτερο της μονάδας και το ρευστό ονομάζεται εκτατό (dilatant). Τα ρευστά γεώτρησης μερικές φορές προσομοιάζουν στο D (Κελεσιδης, 2002)



A= Νευτώνειο λεπτόρρευστο

B= Νευτώνειο παχύρρευστο

C= Πλαστικό Bingham

D= Ψευδοπλαστικό

E= Εκτατό

Σχήμα 5.2 Καμπύλες ρεολογικών μοντέλων.



#### 5.2.4.3 Μοντέλο Herchel- Bulkley.

Πρόκειται για ρεολογικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για να περιγράψει με μεγάλη ακρίβεια διατρητικά ρευστά.

Περιγράφεται από τον τύπο :

$$\tau = \tau_y + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (5.4)$$

Το αιώρημα παρουσιάζει αρχική τάση διολίσθησης. Το μοντέλο Herchel-Bulkley όπως φαίνεται από τον τύπο συνδυάζει τις εξισώσεις που περιγράφουν τα πλαστικά Bingham και τα Power – Law ρευστά, οπότε για να περιγραφεί, θα πρέπει να οριστεί ο δείκτης συνάφειας (K) και ο δείκτης συμπεριφοράς ροής (n). (Luckham , 2003)

### 5.3 ΙΞΩΔΕΣ.

Ως ιξώδες ορίζεται η αντίσταση ενός ρευστού στη ροή. Η αντίσταση αυτή δημιουργείται κατά της μεταφορά της ορμής ενός στρώματος ή κατά την κίνηση του ρευστού σε γειτονικό στρώμα.

Ο τύπος που περιγράφει το ιξώδες είναι:

$$\mu = n \frac{\text{δύναμη} / \text{επιφάνεια}}{\text{ρυθμός ταχύτητας}} \quad (5.5)$$

Οι μονάδες στο σύστημα SI είναι: Pa · s.

## 5.4 ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟ ΙΣΩΔΕΣ.

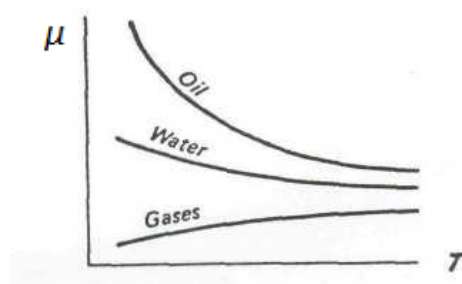
Ο λόγος του απόλυτου ισώδους ενός ρευστού προς την πυκνότητά του,  $\mu/\rho$ , χρησιμεύει στη μελέτη της συμπεριφοράς του ρευστού. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται κινηματικό ισώδες και συμβολίζεται με το γράμμα  $\nu$ . Το κινηματικό ισώδες ενός υγρού μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία σε μικρότερη περιοχή απ' ό,τι το απόλυτο ισώδες. Η μονάδα του κινηματικού ισώδους στο σύστημα SI είναι το  $\text{m}^2/\text{s}$ .

## 5.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟ ΙΣΩΔΕΣ.

### 5.5.1 Θερμοκρασία.

Το ισώδες στα υγρά και τα αέρια εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Τα αέρια έχουν θετικό και πολύ μικρό συντελεστή ισώδους/θερμοκρασίας που ισούται περίπου με  $0.3\%/^{\circ}\text{K}$ . Τα υγρά έχουν, με πολύ λίγες εξαιρέσεις, ένα αρνητικό συντελεστή, ισώδους/θερμοκρασίας που μπορεί να έχει μεγάλο εύρος. Για παράδειγμα το νερό παρουσιάζει συντελεστή ίσο με  $0.8\%/^{\circ}\text{K}$  σε αντίθεση με έλαια που παρουσιάζουν συντελεστή ίσο με  $10\%/^{\circ}\text{K}$ .

Φυσικά αυτός ο συντελεστής θερμοκρασίας του ισώδους μπορεί να μεταβάλλεται πολύ με την απόλυτη θερμοκρασία.



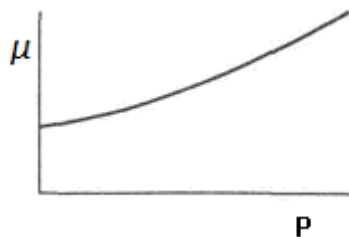
Σχήμα 5.3. Αναπαράσταση σχέσης ισώδους-θερμοκρασίας.

Ο λόγος αυτής της μείωσης του ιξώδους με την αύξηση της θερμοκρασίας οφείλεται στο ότι οι δυνάμεις συνοχής εξουδετερώνονται από την κινητική ενέργεια των μορίων (Morgan, 2004 ).

Πολλές σχέσεις έχουν προταθεί για να χαρακτηρίσουν τη συμπεριφορά θερμοκρασίας ιξώδους, αλλά καμία δεν την περιγράφει απολύτως, αν και μπορούν να ανταποκριθούν σε ένα ορισμένο βαθμό σε ορισμένα υλικά. Αυτή η εξάρτηση του ιξώδους από τη θερμοκρασία δημιουργεί την ανάγκη για ακριβή έλεγχο της τελευταίας όταν πρόκειται να πραγματοποιηθούν ακριβείς μετρήσεις ιξώδους. Για μια ουσία με έναν συντελεστή θερμοκρασίας,  $10\%/^{\circ}\text{K}$  διαφορά στη θερμοκρασία  $0.1^{\circ}\text{K}$  δίνει διαφορά στο ιξώδες περίπου  $1\%$ .

#### 5.5.2 Πίεση.

Το ιξώδες των ρευστών επηρεάζεται επίσης και από την πίεση. Στα έλαια για παράδειγμα η αύξηση του ιξώδους είναι εκθετική με αύξηση της πίεσης. Κατά συνέπεια στις υψηλές πιέσεις το ιξώδες αυξάνεται αισθητά. Αυτό λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό των ρουλεμάν μηχανών, παραδείγματος χάριν, όπου μπορούν να αναπτυχθούν πολύ υψηλές τοπικές πιέσεις (Morgan 2004).



**Σχήμα 5.4.** Εξάρτηση πίεσης- θερμοκρασίας.

## **5.6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ - ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΑ ΡΕΥΣΤΑ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ.**

Οι ρεολογικές ιδιότητες ενός ρευστού γεώτρησης σε μεγάλα βάθη μπορεί να διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό σε σχέση με αυτές που μετρώνται στην επιφάνεια. Σε μεγάλα βάθη, η πίεση μπορεί να φτάνει τα 1400 kgr/cm<sup>2</sup>, ενώ η θερμοκρασία μπορεί να φτάνει τους 260 °C. Η θερμοκρασία αυτή μπορεί να έχει αρνητική επίδραση στις ρεολογικές ιδιότητες των ρευστών γεωτρήσεων (Gray & Darley, 1980).

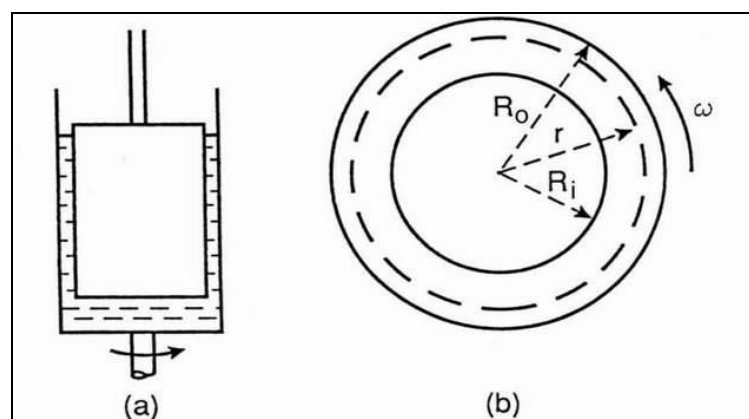
Ο λιγνίτης ως πρόσθετο έχει την ιδιότητα να ρευστοποιεί το πηκτώμα και να μειώνει το ιξώδες. Διαφέρει από τους άλλους συνήθεις αραιωτές στο γεγονός ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, χωρίς επιβλαβείς συνέπειες.

Ο ρόλος του λιγνίτη, σε συνδυασμό με τον μπεντονίτη, στη ρύθμιση των διηθητικών χαρακτηριστικών είναι ιδιαίτερα σημαντικός καθώς δημιουργεί ένα λεπτό και συμπαγές υμένιο λάσπης στα τοιχώματα του φρέατος και εμποδίζει την εισβολή του διηθήματος (ρευστών της γεωτρητικής λάσπης) στους περιβάλλοντες σχηματισμούς. Το γεγονός αυτό έχει μεγάλη σημασία γιατί το διήθημα που εισέρχεται στους πόρους του σχηματισμού είναι δυνατό να τους φράξει, με συνέπεια τη μείωση της αποδοτικότητας της γεώτρησης (Μιχαλάκης, 2004).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ.

### 6.1 ΟΜΟΑΞΟΝΙΚΟ ΙΣΩΔΟΜΕΤΡΟ.

Τα ιξωδόμετρα αυτά είναι όργανα περιστροφικού τύπου. Το δείγμα καταλαμβάνει το δακτυλιοειδή χώρο μεταξύ δύο ομόκεντρων κυλίνδρων. Ο εξωτερικός κύλινδρος ή περιστρεφόμενο κάλυμμα (rotor sleeve), κινείται με σταθερή περιστροφική ταχύτητα. Το κάλυμμα, καθώς κινείται περιστροφικά, όταν ο δακτύλιος περιέχει λάσπη, ασκεί ροπή στον εσωτερικό κύλινδρο, ο οποίος καλείται «Bob». Ένα ελατήριο στρέψης αντιστέκεται στην δύναμη που τείνει να περιστρέψει το Bob (σχήμα 6.1.). Το όργανο μετράει τη γωνία περιστροφής του εσωτερικού κυλίνδρου. Για τα όργανα μέτρησης ιξώδους σε ρευστά γεωτρήσεων, οι σταθερές του οργάνου (διαστάσεις και σταθερά ελατηρίου) έχουν ρυθμιστεί έτσι ώστε το πλαστικό ιξώδες και η τάση διολίσθησης να συνδέονται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων στους συγκεκριμένους ρυθμούς περιστροφής 300 και 600 στροφών το λεπτό (rpm). Το φαινόμενο ιξώδες προκύπτει από τη ένδειξη των 600 rpm, διαιρούμενη με 2 ( $\theta_{600}/2$ ) (Κελεσιδης, 2002).



**Σχήμα 6.1 :** Σχηματική παράσταση ομοαξονικού ιξωδομέτρου

(a) πλάγια τομή, (b) κάτοψη.

Για τις μετρήσεις των ρεολογικών χαρακτηριστικών του πολφού μπεντονίτη, χρησιμοποιήθηκε το ιξωδόμετρο Grace Instrument M3500a, του

εργαστηρίου ρευστομηχανικής του Πολυτεχνείου Κρήτης (σχήμα 6.2). Πρόκειται για ένα κλασσικό ομοαξονικό κυλινδρικό περιστροφικό ιξωδόμετρο τύπου Couette.



**Σχήμα 6.2 :**Ιξωδόμετρο Grace Instrument M3500a.

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά του ιξωδομέτρου αυτού είναι τα εξής:

- 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 (Σχήμα 6.3) που επιτρέπει τη ρύθμιση των παραμέτρων του πειράματος μέσω Η/Υ, καθώς και τη δυνατότητα

εκτέλεσης πειράματος σε πραγματικό χρόνο. Τα δεδομένα συλλέγονται σε ψηφιακή μορφή και καταγράφονται σε βάση δεδομένων στον Η/Υ , για περαιτέρω επεξεργασία.

Τα χαρακτηριστικά του ιξωδομέτρου παρουσιάζονται στους πίνακες 6.1 και 6.2.

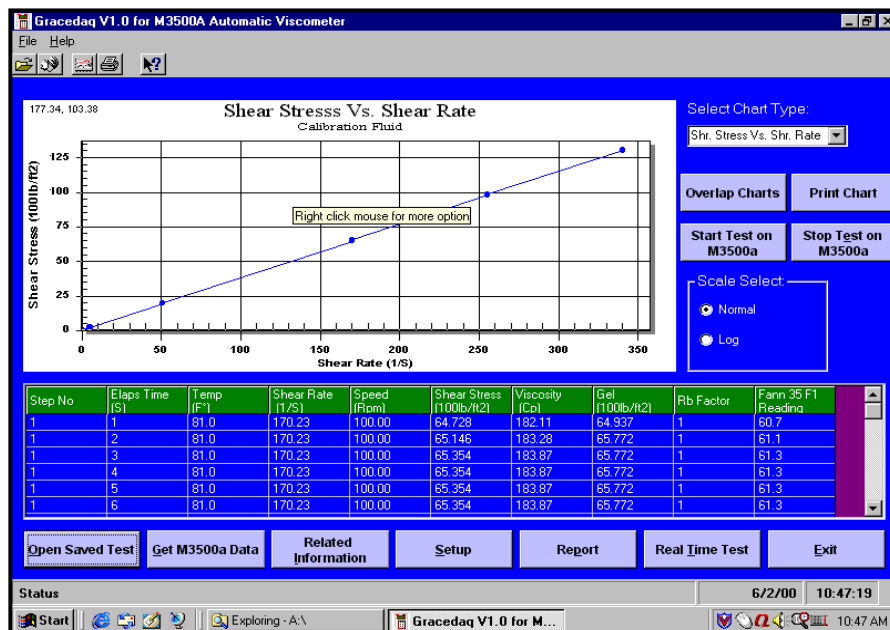
<b>ΙΞΩΔΟΜΕΤΡΟ</b>	
<b>Περιστρεφόμενο κάλυμμα (rotor sleeve)</b>	
Εσωτερική διάμετρος	1,450 in (36,83 mm)
Συνολικό μήκος	3,425 in (70 mm)
Χαρακτηριστική χαραγή	2,30 in (58,4 mm) από τη βάση
Δύο σειρές από τρύπες 1/8 in (3,18 mm) σε απόσταση 120 deg (2,09 rad) μεταξύ τους, στην περιφέρεια του κυκλικού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

**Πίνακας 6.1.** Τεχνικά χαρακτηριστικά του ιξωδομέτρου Grace Instrument M3500a.

Ταχύτητα περιστροφής	0,02 – 600 rpm (συνεχόμενα)
Ρυθμός διάτμησης	0,0027 – 3254 sec <sup>-1</sup>
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 <sup>2</sup>
Ακρίβεια	± 0,5 % του συνολικού εύρους

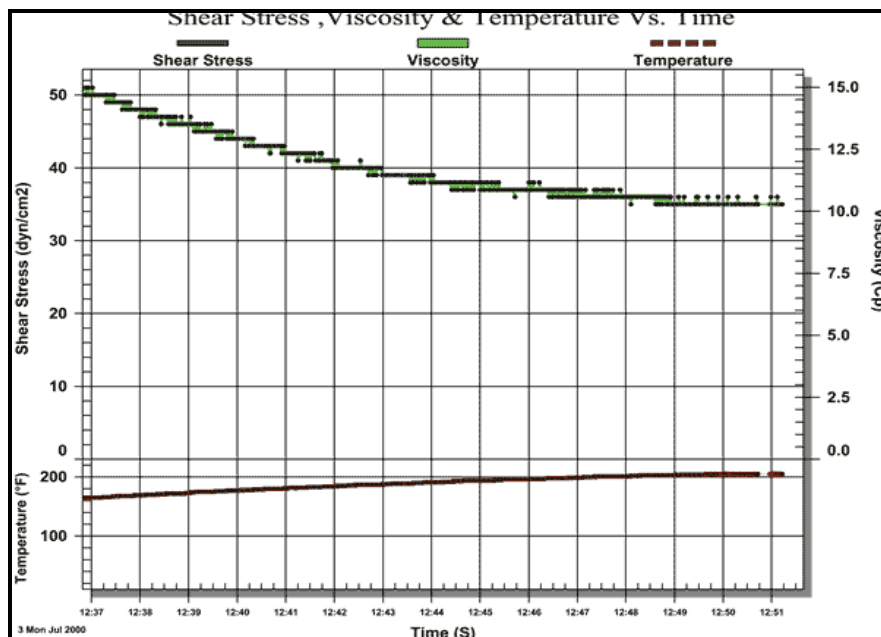
**Πίνακας 6.2.** Εύρος μετρήσεων ιξωδόμετρου.

Η λήψη των πειραματικών δεδομένων γίνεται σε ψηφιακή μορφή από την οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το ιξωδόμετρο. Τα δεδομένα παρουσιάζονται με τη μορφή των διαγραμμάτων που ακολουθούν

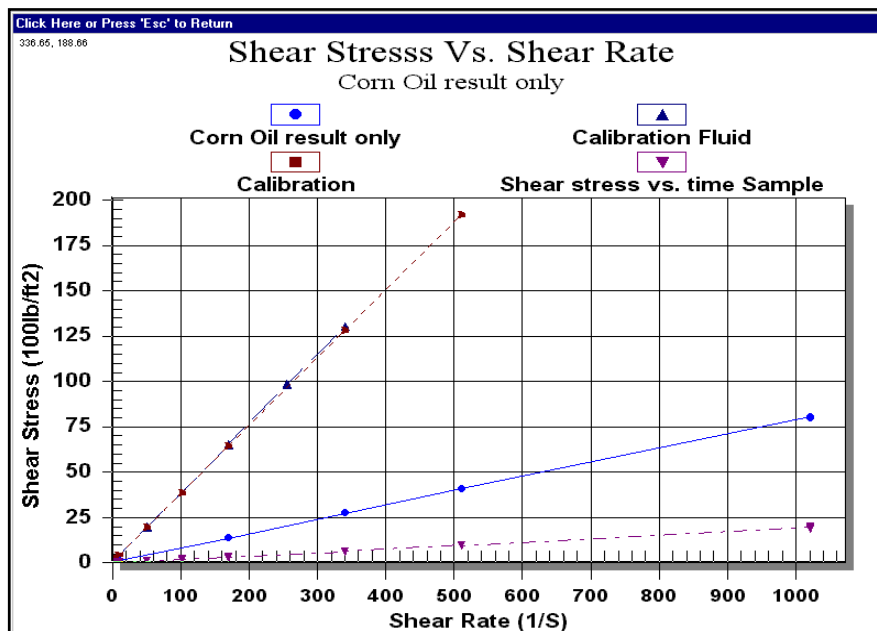


**Σχήμα 6.3.** Τυπική επιφάνεια εργασίας λογισμικού.





Σχήμα 6.4. Τυπικό διάγραμμα κατά την πραγματοποίηση πειράματος σε πραγματικό χρόνο.



Σχήμα 6.5. Τυπικά διαγράμματα Διατμητικής τάσης - Ρυθμού διάτμησης.

## 6.2. ΦΑΣΜΑΤΟΦΩΤΟΜΕΤΡΙΑ ΥΠΕΡΙΩΔΟΥΣ - ΟΡΑΤΟΥ (SPECTROPHOTOMETER DR / 4000 U).

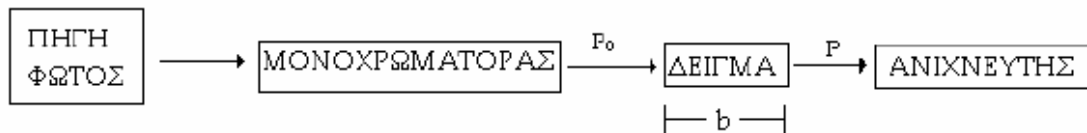
Το φασματοφωτόμετρο που χρησιμοποιήθηκε για να προσδιοριστεί η προσρόφηση των οργανικών πολυμερών σε πολφούς μπεντονίτη είναι το Spectrophotometer DR / 4000U, του εργαστηρίου Ανόργανης Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας.



**Σχήμα 6.6:** Το φασματοφωτόμετρο που χρησιμοποιήθηκε για την διεξαγωγή των μετρήσεων DR/4000U.

Η φασματοφωτομετρία υπεριώδους - ορατού (~180 - 800 nm) χρησιμοποιείται κυρίως για τον ποσοτικό προσδιορισμό ουσιών, με συσχέτιση του ποσοστού απορρόφησης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας προς την συγκέντρωση της ουσίας που είναι υπεύθυνη για την απορρόφηση.

Όταν μονοχρωματική ακτινοβολία διέρχεται από διάλυμα, που περιέχει την ουσία X, η ισχύς της ακτινοβολίας ελαττώνεται προσθετικά κατά μήκος της διαδρομής, λόγω της απορροφήσεώς της από την ουσία X. Η ελάττωση της ισχύος εξαρτάται από την συγκέντρωση της ουσίας X και από την απόσταση b που διένυσε η δέσμη στο διάλυμα.



**Σχήμα 6.7:** Σχηματικό διάγραμμα ποσοτικής φασματοφωτομετρίας.

Οι σχέσεις αυτές περιγράφονται από το νόμο Beer-Lambert που διατυπώνεται με την μορφή:

$$A = \log \frac{P_0}{P} = -\log T = \log \left( \frac{100}{\%T} \right) = abc_{g/L} = ebc_{mol/L} \quad (6.1)$$

Όπου:

- A: απορρόφηση,
- P<sub>0</sub>: ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας,
- P: ένταση της εξερχομένης ακτινοβολίας,
- T: διαπερατότητα,
- a: σταθερά αναλογίας,
- b: απόσταση που διανύει η δέσμη ακτινοβολίας μέσα στο διάλυμα,
- e: μοριακή απορροφητικότητα,
- c: συγκέντρωση της ουσίας (Χατζηγιάννου, 2002).

Ο νόμος του Beer δεν είναι απευθείας εφαρμόσιμος στη χημική ανάλυση, γιατί είναι πρακτικά αδύνατη η μέτρηση των P και P<sub>0</sub>, επειδή το διάλυμα είναι μέσα σε κυψελίδα, τα τοιχώματα της οποίας προκαλούν ελάττωση της ισχύος της ακτινοβολίας λόγω ανάκλασης και απορρόφησης. Για αυτό στη πράξη συγκρίνεται η ισχύς της διερχομένης ακτινοβολίας σε σχέση με την ισχύ της διερχόμενης ακτινοβολίας από ένα τυφλό διάλυμα.

Στην πράξη επομένως δεν υπολογίζεται η συγκέντρωση κατευθείαν από το νόμο του Beer, αλλά χρησιμοποιείται καμπύλη αναφοράς (Περδικάτης, 2003). Αυτό γιατί λαμβάνονται διάφορες τιμές για το ε από το φασματοφωτόμετρο επειδή ποικίλει ο βαθμός μονοχρωματικότητας της χρησιμοποιούμενης δέσμης σ αυτά αλλά και επειδή για το ίδιο φασματοφωτόμετρο και για το ίδιο μήκος

κύματος, οι τιμές του  $\epsilon$  που λαμβάνονται, είναι δυνατόν να εξαρτώνται από το εύρος της σχισμής.

Για να εφαρμοστεί ο νόμος του Beer πρέπει να τηρούνται κάποιες βασικές προϋποθέσεις, όπως ότι τα διαλύματα δεν είναι πυκνά, η ακτινοβολία που πέφτει στο δείγμα να είναι μονοχρωματική και το δείγμα να είναι σε κυψελίδα με ομοιόμορφη διατομή.

### 6.3. ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ (F.T.I.R.).

Η φασματομετρία υπερύθρου διεξήχθη με απώτερο σκοπό την διερεύνηση του είδους του δεσμού που αναπτύσσει ο μπεντονίτης όταν ανιχνεύεται με τα πολυμερή που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.

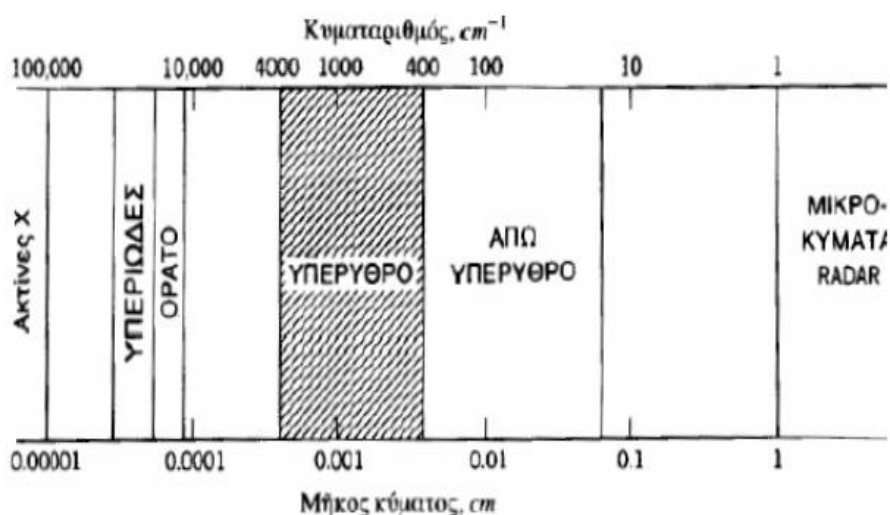
Κατά την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ο εργαστηριακός εξοπλισμός του εργαστηρίου Ανάλυσης Ρευστών και Πυρήνων Υπόγειων Ταμιευτήρων.



**Σχήμα 6.8:** Πειραματική διάταξη F.T.I.R. της Perkin – Elmer του εργαστηρίου Ανάλυσης Ρευστών και Πυρήνων Υπόγειων Ταμιευτήρων.

Η φασματοφωτομετρία υπέρυθρου είναι μια από τις καλύτερες τεχνικές για τη διερεύνηση της μοριακής συντάξεως και ταυτοποίησης οργανικών ενώσεων.

Σε αυτόν τον τύπο φασματοσκοπίας μετράται η ένταση της απορρόφησης υπέρυθρης ακτινοβολίας συναρτήσει του μήκους κύματος. Η απορρόφηση ακτινοβολίας στην περιοχή του υπέρυθρου προκαλεί διεγέρσεις μεταξύ των ενεργειακών σταθμών δόνησεως και περιστροφών του μορίου, το οποίο παραμένει στη θεμελιώδη ηλεκτρονιακή κατάσταση. Τα λαμβανόμενα φάσματα υπέρυθρου χαρακτηρίζονται από ταινίες απορρόφησης μικρού εύρους. Η περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας εκτείνεται από το ορατό μέχρι τα μικροκύματα όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 6.9:** Η υπέρυθρη περιοχή στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

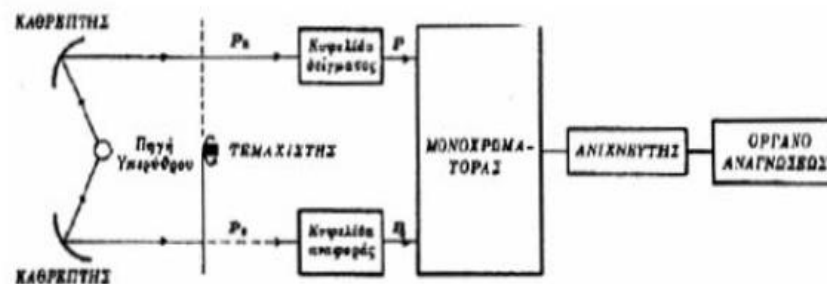
Ένα μόριο απορροφά υπέρυθρη ακτινοβολία μόνο αν η διπολική ροπή του μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της δόνησης, διαφορετικά η δόνηση θεωρείται ανενεργή στο υπέρυθρο. Όσο μεγαλύτερη είναι η μεταβολή της διπολικής ροπής, τόσο ισχυρότερη είναι η απορρόφηση.

Τα φασματοφωτόμετρα υπέρυθρου αποτελούνται από τις ίδιες μονάδες που αποτελούνται τα φασματοφωτόμετρα υπεριώδους ορατού. Μόνη διαφορά παραμένει ότι στα τελευταία το δείγμα τοποθετείται μετά τον μονοχρωμάτορα

για να αποφευχθεί η αποσύνθεση ορισμένων οργανικών ενώσεων κατά την έκθεση του δείγματος στην υπεριώδη ακτινοβολία.

Πιο συγκεκριμένα το φασματοφωτόμετρο υπερύθρου ακτινοβολίας αποτελείται από τις εξής μονάδες:

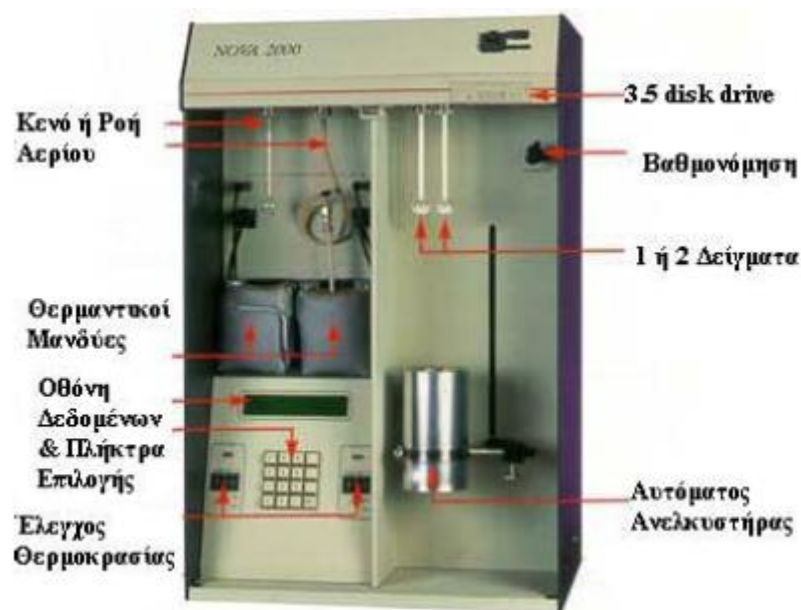
- Πηγές ακτινοβολίας. Οι πιο συνηθισμένες είναι λυχνίες βολφραμίου και οι λυχνίες πυρακτώσεως Nerst.
- Ανιχνευτές. Ως ανιχνευτές χρησιμοποιούνται θερμοζεύγη, φωτοαγωγικά κύτταρα και αερικά κύτταρα Golay.
- Μονοχρωμάτορες. Είναι κατασκευασμένοι από υλικά περατά στην υπέρυθη ακτινοβολία όπως NaCl ή CsBr.
- Σύστημα υπολογιστή ο οποίος με το κατάλληλο λογισμικό καταγράφει τα δεδομένα.



Σχήμα 6.10: Σχηματική αναπαράσταση φασματοφωτόμετρου διπλής δέσμης.

#### 6.4. ΜΕΤΡΗΣΗ ΕΙΔΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.

Ως ειδική επιφάνεια ενός κόκκου ορίζεται ο λόγος της εξωτερικής του επιφάνειας προς το βάρος του. Η ειδική επιφάνεια είναι αντιστρόφως ανάλογη της διαμέτρου του κόκκου, δηλαδή όσο μικραίνει ο κόκκος, τόσο αυξάνεται η ειδική του επιφάνεια. Πρόκειται για μια από τις σημαντικότερες φυσικές ιδιότητες των υλικών διότι επηρεάζει τις προσφαιτικές τους ιδιότητες. Γενικεύοντας σε ένα σύνολο κόκκων η ειδική επιφάνεια δίνεται από την σχέση  $S = \Sigma \Delta S / \Sigma \Delta W$  (6.2), δηλαδή η συνολική επιφάνεια προς το συνολικό βάρος των επιμέρους κλασμάτων.



**Σχήμα 6.11:** Συσκευή μέτρησης τύπου Quantasorb του εργαστηρίου Μηχανικής Τεμαχιδίων και Εμπλουτισμού.

Η γνώση της ειδικής επιφάνειας δίνει πληροφορίες για την λεπτότητα του υλικού και όχι για την κατανομή μεγέθους των κόκκων. Ο υπολογισμός της ειδικής επιφάνειας έγινε μέσω της προσρόφησης στο υλικό κάποιου αερίου (μέθοδος BET). Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου Quantasorb, της εταιρίας Quantachrome με μίγμα αερίων  $N_2$ -He. Η συσκευή δίνει γρήγορες και ακριβείς μετρήσεις ρόφησης αερίων σε δυο στερεά δείγματα χρησιμοποιώντας κατάλληλο ψυκτικό μέσο.

## 6.5. ΜΕΤΡΗΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ - pH.

Η θερμοκρασία καθώς και το pH αποτελούν παραμέτρους πολύ σημαντικές για τα πειραματικά δεδομένα. Πρόκειται για φυσικά μεγέθη τα οποία επηρεάζουν κατά πολύ τις ρεολογικές ιδιότητες των υπό μελέτη διαλυμάτων. Για αυτό το λόγο κατά την πειραματική διαδικασία συλλέχτηκαν μετρήσεις των δυο αυτών πολύ σημαντικών παραμέτρων για όλα τα παρασκευασθέντα δείγματα με σκοπό την συγκριτική αποτίμηση των αποτελεσμάτων.

Για να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις θερμοκρασίας και pH, χρησιμοποιήθηκε το pH μέτρο - θερμόμετρο pH 210 της HANNA instruments, του εργαστηρίου Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής. Το παραπάνω όργανο έχει δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης σε πραγματικό χρόνο, της θερμοκρασίας και pH μέσω δυο ηλεκτροδίων που διαθέτει.



**Σχήμα 6.12:** Συσκευή μέτρησης pH και θερμοκρασίας, pH 210 της HANNA instruments, του εργαστηρίου Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής.



**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ-ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.****7.1 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.**

Το συγκεκριμένο κομμάτι της εργασίας αναφέρεται στην προετοιμασία που έλαβε χώρα για την παρασκευή των απαιτούμενων δειγμάτων, ώστε να μελετηθεί η προσρόφηση που εμφανίζει ο μπεντονίτης στα πολυμερή, καθώς και η επίδραση της προσθήκης των πολυμερών σε πολφούς γεωτρήσεων.

**7.1.1. Προετοιμασία δειγμάτων πολφού μπεντονίτη τύπου Wyoming.**

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

- Αρχικά ογκομετρώνται 500 ml απιονισμένου νερού.
- Ζυγίζεται η κατάλληλη ποσότητα μπεντονίτη ανάλογα με το διάλυμα που πρέπει να παρασκευαστεί.
- Το νερό τοποθετείται στο κατάλληλο δοχείο του αναδευτήρα και ξεκινάει η ανάδευση.
- Προστίθεται ο μπεντονίτης με αργούς ρυθμούς έτσι ώστε να αποφεύγεται η συσσωμάτωση.
- Αναδεύουμε το δείγμα στον αναδευτήρα (της εταιρείας Hamilton Beach) στις 11000 rpm .
- Μετά την ολοκλήρωση της προσθήκης του μπεντονίτη αναδεύουμε για 5 λεπτά ώστε να επιτύχουμε πλήρη διασπορά της αργίλου.
- Κατεβάζουμε το δοχείο με το μείγμα του πολφού, καθαρίζουμε τα τοιχώματα και αναδεύουμε για 15 λεπτά ακόμα (συνολικός χρόνος ανάδευσης 20 λεπτά).

- Μετά το πέρας των 20 λεπτών το διάλυμα τοποθετείται σε κλειστό δοχείο και αφήνεται για τουλάχιστον 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 ένα διάστημα 5 min στον αναδευτήρα με ταχύτητα περιστροφής 11000 rpm.



**Σχήμα 7.1:** Απεικόνιση πολφού μπεντονίτη έπειτα ανάδευση στις 11000 rpm.

Στην συνέχεια μπορούν να μετρηθούν οι ρεολογικές ιδιότητες των δειγμάτων στο ομοαξονικό ιξωδόμετρο M3500a σε ταχύτητες περιστροφής 600, 300, 200, 100, 60, 6 και 3 rpm. Συγκεκριμένα παρασκευάστηκαν δείγματα μπεντονίτη περιεκτικότητας 3%, 4%, 5% και 6.42%.

#### **7.2.2. Παρασκευή δειγμάτων με προσθήκη NaCl σε πολφούς μπεντονίτη-CMC.**

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, νερό με περιεκτικότητα σε NaCl 0M, 0.1M, 0.01M για πολφούς μπεντονίτη περιεκτικότητας 6.42% w/v σε συνδυασμό με προσθήκη πολυμερούς CMC περιεκτικότητας 0, 0.1%, 0.2%, 0.5% w/v. Επίσης μελετήθηκε η μεταβολή του pH που προέκυψε από την προσθήκη τόσο του χλωριούχου νατρίου, όσο και από την προσθήκη του πολυμερούς (Rossi & Luckham, 1997).

Η διαδικασία παρασκευής του πολφού είναι η ίδια που αναφέρθηκε παραπάνω, API (API 13A, 1993), με βασικές διαφορές ότι η βάση μας ήταν νερό με NaCl και είχε προηγηθεί ανάμιξη του μπεντονίτη και του CMC επί ξηρού πριν τεθούν προς ανάδευση (Σχήμα 7.2). Συγκεκριμένα τα δείγματα τα οποία παρασκευάστηκαν βρίσκονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Αριθμός δείγματος	Ταυτότητα δείγματος		
	Μπεντονίτης (%w/v)	CMC (%w/v)	NaCl (M, v/v)
1	6.42	0.0	0
2	6.42	0.1	0
3	6.42	0.2	0
4	6.42	0.5	0
5	6.42	0.0	0.01
6	6.42	0.1	0.01
7	6.42	0.2	0.01
8	6.42	0.5	0.01
9	6.42	0.0	0.1
10	6.42	0.1	0.1
11	6.42	0.2	0.1
12	6.42	0.5	0.1

**Πίνακας 7.1:** Πειραματικές συνθήκες της μελέτης της επίδρασης NaCl στη ρεολογία και το pH πολφών μπεντονίτη-CMC.

Ο σκοπός αυτής της μελέτης είναι να μπορέσουμε να εξαγάγουμε συμπεράσματα για την επίδραση του pH και NaCl στα ρεολογικά χαρακτηριστικά ( $\tau_y$ ,  $K$ ,  $\eta$ ,  $\mu_r$ ) των πολφών μπεντονίτη.

### 7.2.3. Προετοιμασία δειγμάτων πολφού Carborol 980.

Στην περίπτωση αυτή ακολουθείται η διαδικασία παρασκευής πολφών μπεντονίτη που αναφέρθηκε παραπάνω, API (API 13A, 1993), με την μόνη διαφορά ότι μετά το τέλος της ανάδευσης και αφού αφήσουμε το δείγμα να ηρεμήσει για περίπου μια ώρα, ώστε να φύγει ο αφρός που έχει σχηματιστεί, εξουδετερώνουμε το δείγμα με NaOH συγκέντρωσης 18 % w/v. Η αναλογία του NaOH για την εξουδετέρωση του Carborol 980, που πρέπει να τηρηθεί είναι 1.8 ml για κάθε 1 g Carborol 980 στο δείγμα. Συγκεκριμένα παρασκευάστηκαν δείγματα περιεκτικότητας 0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1, 0.15 % w/v (Curran & Hayes, 2002).



**Σχήμα 7.2:** Αναδευτήρας της Hamilton Beach, δυνατότητας ανάδευσης 11000 rpm.

### 7.2.4. Προετοιμασία δειγμάτων πολφού CMC (Carboxymethylcellulose).

Για την παρασκευή πολφού που έχει ως πρόσθετο το πολυμερές CMC ακολουθείται η διαδικασία που περιγράφηκε για την παρασκευή πολφού

μπεντονίτη με την διαφορά ότι δεν χρειάζεται να περιμένουμε 24 ώρες για την ιξωδομέτρηση, αλλά μπορούμε να προχωρήσουμε την πειραματική διαδικασία απευθείας. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα που έχει το CMC μιας που αποκτά άμεσα τις ρεολογικές του ικανότητες χωρίς ανάγκη χρονικού διαστήματος για ενυδάτωση. Συγκεκριμένα παρασκευάστηκαν δείγματα περιεκτικότητας, 0.2, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 και 1.5 % (w/v).

#### **7.1.5. Προετοιμασία δειγμάτων πολφού μπεντονίτη σε συνδυασμό με πολυμερές.**

Στο πλαίσιο της μελέτης επίδρασης των πολυμερών στα ρεολογικά χαρακτηριστικά πολφών μπεντονίτη, παρασκευάστηκαν συνδυαστικοί πολφοί μπεντονίτη-πολυμερών. Τα πολυμερή που χρησιμοποιήθηκαν είναι το CMC και το Carborol 980, και οι αντίστοιχοι πολφοί ήταν μπεντονίτης-CMC και μπεντονίτης- Carborol 980. Και στις δυο περιπτώσεις παρασκευάστηκε ο πολφός μπεντονίτη με βάση την διαδικασία που προαναφέρθηκε και αφέθηκε να ενυδατωθεί για 24 ώρες. Ταυτόχρονα παρασκευάστηκαν διαλύματα με το χρησιμοποιούμενο πολυμερές (ανά περίπτωση), τηρώντας την πρότυπη διαδικασία παρασκευής. Μετά την πλήρη ενυδάτωση του πολφού μπεντονίτη, αναμίχθηκαν τα δυο διαλύματα σε mixer στις 11000 rpm για 10 λεπτά, ώστε ο πολφός να αποκτήσει πλήρεις ρεολογικές ιδιότητες.



**Σχήμα 7.3:** Ζυγός ακριβείας 0.01 g για την παρασκευή των δειγμάτων.

### **7.3. ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΣΕ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ.**

Ένας από τους βασικούς στόχους της εργασίας είναι ο προσδιορισμός της προσρόφησης των πολυμερών σε πολφούς μπεντονίτη. Συγκεκριμένα μελετήθηκε η προσρόφηση σε μπεντονίτη των παρακάτω τύπων πολυμερών:

- CMC (Carboxymethylcellulose).
- Carbopol 980.

Η φασματοφωτομετρία υπεριώδους - ορατού (~180 - 800 nm) χρησιμοποιείται κυρίως για τον ποσοτικό προσδιορισμό ουσιών, με συσχέτιση του ποσοστού απορρόφησης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας προς την συγκέντρωση της ουσίας που είναι υπεύθυνη για την απορρόφηση.

#### **7.2.2. Πρότυπη καμπύλη αναφοράς.**

Προτού ξεκινήσουμε την επεξεργασία των δεδομένων και τον υπολογισμό της προσροφημένης ποσότητας (ppm) του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς, πρέπει να γίνει ο προσδιορισμός της πρότυπης καμπύλης. Επίσης είναι αναγκαίο να προσδιοριστεί το καλύτερο δυνατό μήκος κύματος στο οποίο θα ρυθμιστεί το φασματοφωτόμετρο για να πραγματοποιηθούν οι παραπάνω μετρήσεις. Συγκεκριμένα μετράται το πιο πυκνό διάλυμα πολυμερούς έτσι ώστε να λαμβάνονται οι μεγαλύτερες πειραματικές μετρήσεις.

Στην συνέχεια ακολουθεί η δημιουργία των απαραίτητων γραφημάτων για να προσδιοριστεί η καμπύλη αναφοράς. Γνωρίζουμε πως το επιθυμητό αποτέλεσμα πρέπει να είναι γραμμική καμπύλη αναφοράς η οποία περνά από την αρχή των αξόνων.

Στην πραγματικότητα ο χρησιμοποιούμενος τύπος φασματοφωτόμετρου έχει κάποια μετρητικά όρια πέρα των οποίων η ακρίβεια του οργάνου ελαττώνεται. Συγκεκριμένα όταν ξεπεραστεί το εν λόγω όριο τότε οι μετρήσεις παρουσιάζουν μια μη αναλογική αύξηση σε σχέση με την περιεκτικότητα του

χρησιμοποιούμενου πολυμερούς, οι μετρήσεις εμφανίζουν μια καμπή και η καμπύλη αναφοράς δεν είναι ευθεία. Επειδή για την επεξεργασία των μετρήσεων της προσρόφησης χρειαζόμαστε γράφημα με ευθύγραμμο τμήμα, ώστε να γίνεται η αντιστοιχία των μετρήσεων, λαμβάνουμε υπόψη μόνο τις μετρήσεις που αντιστοιχούν στην περιοχή όπου η ακρίβεια του μετρητικού οργάνου είναι η επιθυμητή.

### **7.2.2. Προετοιμασία δειγμάτων για την μέτρηση προσρόφησης.**

Για να γίνει όμως η μελέτη της προσρόφησης πρέπει να τηρηθεί μια τυποποιημένη διαδικασία, ώστε να διασφαλιστεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Αυτή η διαδικασία παραμένει ίδια και για τους δυο τύπους πολυμερών και είναι η εξής:

- Παρασκευή δειγμάτων. Πρόκειται για μια τυποποιημένη διαδικασία η οποία αναφέρθηκε εκτενώς στο προηγούμενη ενότητα (7.1.), και αποτέλεσμα αυτής είναι η τελική δημιουργία πολφών μπεντονίτη σε συνδυασμό με πολυμερές CMC και Carborol 980 αντιστοιχα.
- Ανακίνηση δειγμάτων. Ακολουθεί η ανακίνηση των δειγμάτων σε περιοδικά ταλαντωμένη τράπεζα για 24 ώρες. Το παραπάνω διασφαλίζει την πλήρη ομογενοποίηση του διαλύματος, καθώς δεν υπάρχει πλέον περίπτωση συνύπαρξης σε διαφορετικά τμήματα του πολφού του μπεντονίτη και του πολυμερούς. Ακόμα δίνεται η δυνατότητα στα σωματίδια που δεν αφομοιώθηκαν κατά τη διαδικασία της ανάδευσης να καθιζάνουν και να μη συμμετέχουν στην πειραματική διαδικασία αλλοιώνοντας τα δεδομένα.
- Φυγοκέντρωση. Στην συνέχεια λαμβάνουμε με την βοήθεια προχοίδας 10 ml από κάθε δείγμα και τα τοποθετούμε σε δοκιμαστικούς σωλήνες για φυγοκέντρωση. Η φυγόκεντρος ρυθμίζεται για 35 λεπτά στις 11400 rpm. Στην συνέχεια το καθαρό αιώρημα τοποθετείται εκ νέου σε καθαρούς σωλήνες και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για ίδιο χρόνο και

ταχύτητα περιστροφής. Η διαδικασία λαμβάνει μέρος στη φυγόκεντρο του εργαστηρίου Οργανικής Γεωχημείας και Πετρογραφίας.

- Μέτρηση. Τέλος αφού έχουμε παραλάβει το καθαρό αιώρημα απαλλαγμένο από τα στερεά σωματίδια λαμβάνουμε την τελική μέτρηση στο φασματοφωτόμετρο υπεριώδους ορατού (Spectrophotometer DR/4000U). Η διαδικασία είναι απλή μιας που το μόνο που χρειάζεται είναι η τοποθέτηση του διαλύματος, ποσότητας 1-2 ml, σε χαλαζιακή κυψελίδα και λήψη της μέτρησης απευθείας από το φασματοφωτόμετρο (Rossi & Al, 2002).

#### **7.4.3. Επεξεργασία των αποτελεσμάτων.**

Γνωρίζουμε ότι η αρχή λειτουργίας του φασματοφωτόμετρου στηρίζεται στο ότι η μέτρηση θα γίνει σε διάλυμα απαλλαγμένο από στερεά σωματίδια. Επειδή η φυγόκεντρος δεν απομακρύνει τα στερεά σωματίδια στο σύνολο τους, μετράμε στο φασματοφωτόμετρο και ένα πρότυπο αιώρημα το οποίο περιέχει μόνο μπεντονίτη για να διαπιστώσουμε το κατά πόσο τα σωματίδια τα οποία δεν καθιζάνουν, επηρεάζουν τα αποτελέσματά μας. Συγκεκριμένα η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

- Αρχικά λαμβάνουμε την ένδειξη από το φασματοφωτόμετρο για το πρότυπο αιώρημα μπεντονίτη.
- Στην συνέχεια καταγράφουμε τις ενδείξεις για όλα τα υπό μελέτη δείγματα πολφών μπεντονίτη – πολυμερούς και αφαιρούμε από τις τιμές εκείνη του πρότυπου αιωρήματος. Με αυτό τον τρόπο διασφαλίζεται η ακρίβεια των αποτελεσμάτων μας.
- Λόγω του ότι η καταγραφή που έχουμε κάνει μέχρι στιγμής είναι μια απλή ένδειξη, υπάρχει ανάγκη μετατροπής της σε ποσοτικά μεγέθη. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος κατασκευής της πρότυπης καμπύλης αναφοράς του εκάστοτε πολυμερούς. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση της



μορφής,  $y = ax$ , της πρότυπης καμπύλης μετατρέπουμε την ένδειξη σε μονάδες συγκέντρωσης (ppm).

- Γνωρίζοντας ότι κατά την διάρκεια της φυγοκέντρωσης το στερεό τμήμα που καθιζάνει είναι και αυτό το οποίο περιλαμβάνει τον μπεντονίτη και συνεπώς το προσροφημένο σε αυτόν πολυμερές. Συνεπώς η ένδειξη που καταγράφεται αφορά στη συγκέντρωση του πολυμερούς που έχουν παραμείνει στο διάλυμα μετά το τέλος της προσρόφησης. Η προσροφημένη συγκέντρωση του πολυμερούς προκύπτει από αφαίρεση της συγκέντρωσης που έχει παραμείνει στο διάλυμα (ppm) μετά το πέρας της προσρόφησης, από την αρχική συγκέντρωση.
- Τέλος γίνεται η αναγωγή της προσροφημένης συγκέντρωσης (ppm) του πολυμερούς σε mg ανά τετραγωνικό μέτρο μπεντονίτη, το οποίο προκύπτει από τη μέτρηση της ειδικής του επιφάνειας. Με τα παραπάνω δεδομένα είναι πλέον δυνατή η κατασκευή της καμπύλης προσρόφησης που είναι και το ζητούμενο της μελέτης.

Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται τα δείγματα που παρασκευάστηκαν για την μελέτη της προσρόφησης των πολυμερών σε πολφούς μπεντονίτη. Συγκεκριμένα έχουμε τα εξής:

Μπεντονίτης Wyoming (%, w/v)	CMC (%, w/v)	CMC (ppm)
3	0.0	0
3	0.2	2000
3	0.4	4000
3	0.6	6000
3	0.8	8000
3	1.0	10000
3	1.5	15000
4	0.0	0
4	0.2	2000

4	0.5	5000
4	1.0	10000

**Πίνακας 7.2:** Δείγματα πολφών μπεντονίτη-CMC για μελέτη προσρόφησης.

<b>Μπεντονίτης Wyoming (%, w/v)</b>	<b>Carbopol 980 (%, w/v)</b>	<b>Carbopol 980 (ppm)</b>
3	0.00	0
3	0.02	200
3	0.03	300
3	0.05	500
3	0.08	800
3	0.10	1000
3	0.15	1500
4	0.00	0
4	0.02	200
4	0.03	300
4	0.05	500
4	0.07	700
4	0.08	800
4	0.09	900
4	0.10	1000

**Πίνακας 7.3:** Δείγματα πολφών μπεντονίτη-Carbopol 980 για μελέτη προσρόφησης.

#### **7.4. ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΦΑΣΜΑΤΟΦΩΤΟΜΕΤΡΙΑ (FT- IR).**

Η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για την λήψη φασμάτων υπέρυθρης ακτινοβολίας από στερεά ήταν η παρασκευή δισκίων (pellet) από τα δείγματα. Συνοπτικά η διαδικασία προετοιμασίας των δισκίων για την ανάλυση FTIR έχει ως ακολούθως. Με χρήση αχάτη λειοτριβείται μικρή ποσότητα δείγματος (15 mg) σε μέγεθος κόκκων μικρότερο από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Ποσότητα ίση με 1.5 mg μεταφέρεται από το λειοτριβημένο δείγμα σε καθαρό αχάτη όπου αναμιγνύεται με ποσότητα βρωμιούχου καλίου, ώστε η συγκέντρωση του δείγματος να είναι 1/100 περίπου στο δείγμα. Μετά από συστηματική ανάμιξη των δυο φάσεων, ποσότητα ίση με 150 mg συμπιέζεται σε κατάλληλη πρέσα και σε πίεση 6 tn για 3 min και έτσι δημιουργείται το δισκίο. Για τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε φασματοόμετρο υπέρυθρου Perkin-Elmer 1000. Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα Spectrum 1000.

#### **7.5. ΜΕΛΕΤΗ ΡΕΟΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΠΟΛΦΩΝ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ - ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.**

Μετά τη διαδικασία παρασκευής των δειγμάτων και την ιξωδομέτρηση, ακολουθεί η επεξεργασία των μετρήσεων. Πρόκειται για επίλυση των δεδομένων μέσω μιας βέλτιστης λύσης με την βοήθεια ενός υποπρογράμματος σε περιβάλλον Matlab και συγκεκριμένα το fitting model που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο τεχνικής γεωτρήσεων και ρευστομηχανικής.

##### **7.4.1. Γενικά.**

Το πρόγραμμα Fitting model είναι σχεδιασμένο ώστε να προσδιορίζει τη βέλτιστη προσέγγιση των γνωστών ρεολογικών μοντέλων σε πειραματικά

δεδομένα διατμητικής τάσης  $\tau$  (Pa) σε συνάρτηση με το ρυθμό διάτρησης ( $s^{-1}$ ). Η εφαρμογή έχει κατασκευαστεί σε περιβάλλον Matlab, ενώ για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των ελάχιστων τετραγώνων. Ειδικότερα χρησιμοποιήθηκε η εντολή `fmincon` από την εργαλειοθήκη βελτιστοποίησης (optimization toolbox) του Matlab για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος.

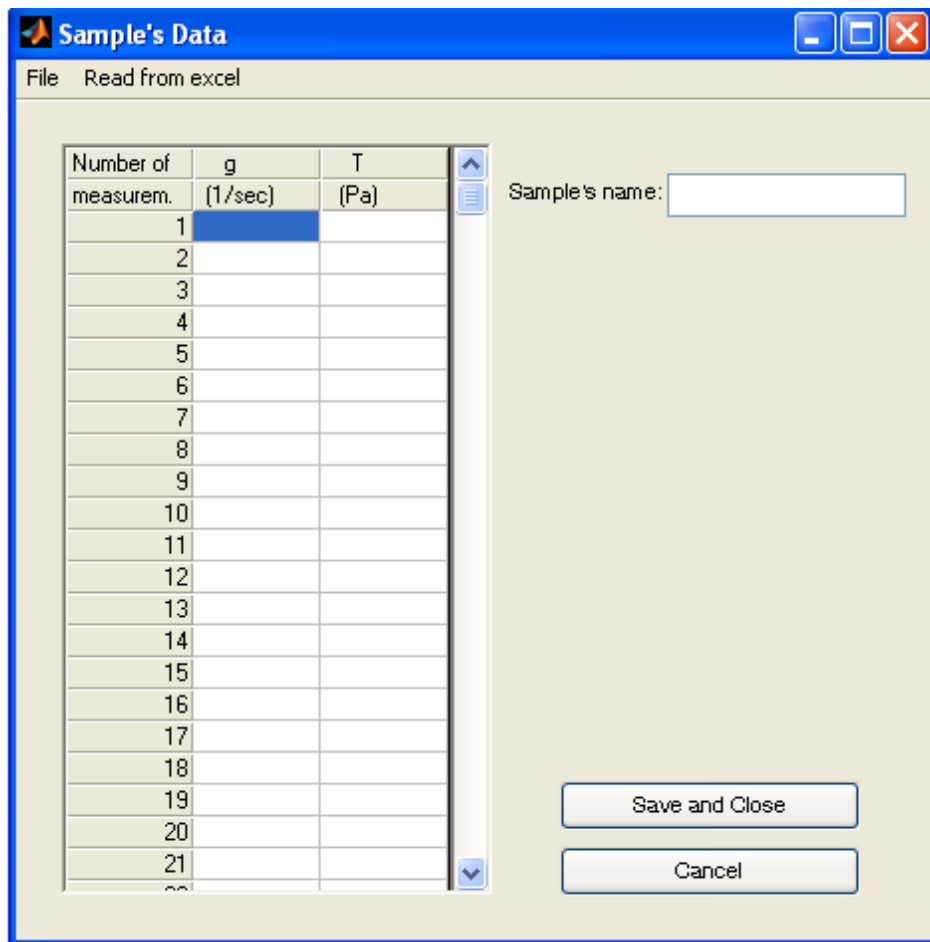
Για την εγκατάσταση του προγράμματος απαιτείται κατ' αρχήν να ορίσουμε το φάκελο του προγράμματος ως τον τρέχον φάκελο του Matlab. Στην συνέχεια η εγκατάσταση του προγράμματος γίνεται με την εντολή `“setup_best_fitting”` στο παράθυρο εντολών (command window) του Matlab. Κατόπιν, για την εκτέλεση του προγράμματος δίνεται η εντολή `“my_run”`. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το κεντρικό παράθυρο του προγράμματος (Σχήμα 7.4). Η χρήση του προγράμματος περιλαμβάνει τέσσερα διακριτά βήματα:

- Εισαγωγή δεδομένων.
- Επιλογή ρεολογικών μοντέλων.
- Εκτέλεση υπολογισμών – επίλυση.
- Ανάγνωση αποτελεσμάτων.

#### **7.4.2. Εισαγωγή δεδομένων.**

Για την εισαγωγή των πειραματικών δεδομένων επιλέγεται η εντολή `“Insert Data or File”` και το πρόγραμμα εμφανίζει το παράθυρο εισαγωγής δεδομένων όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.4. Το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα να εισαχθούν τα δεδομένα με τρεις διαφορετικούς τρόπους.

Ο τρόπος εισαγωγής που χρησιμοποιήθηκε είναι εκείνος της επιλογής μέσω ενός αρχείου excel. Αρχικά αφού υπολογιστούν οι μέσες τιμές Shear stress, τοποθετούνται με τις τιμές Share Rate σε ένα αρχείο excel. Στην συνέχεια επιλέγεται η εντολή `“Read from excel”` και το πρόγραμμα ανοίγει ένα νέο παράθυρο διαλόγου για να γίνει η επιλογή των δεδομένων που θέλουμε να επεξεργαστούμε. Στη συνέχεια επιλέγουμε την εντολή OK.



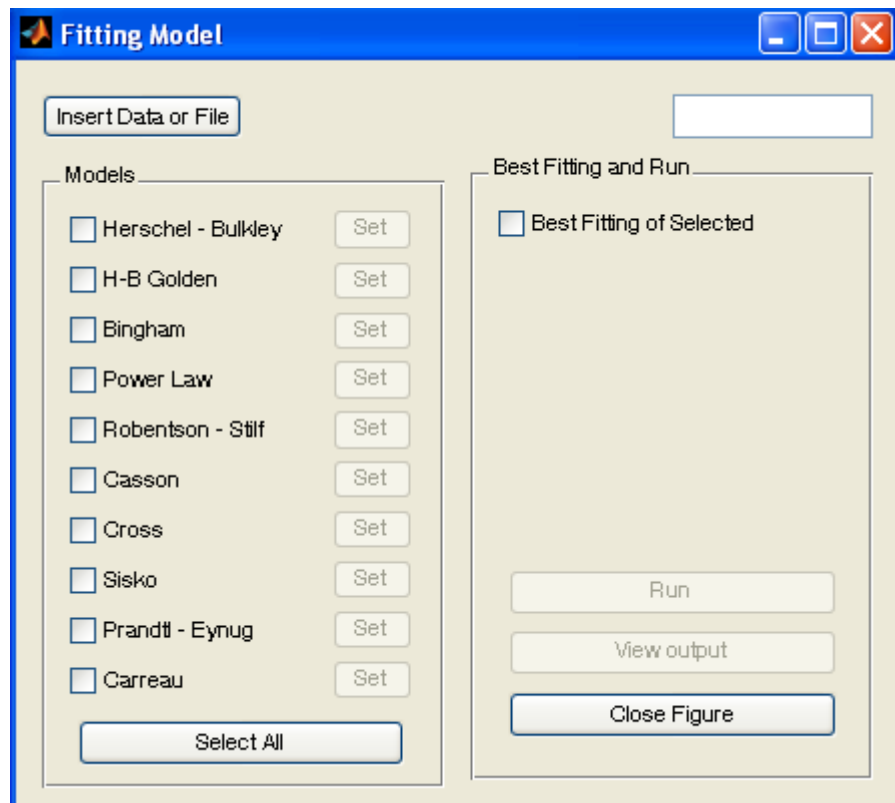
**Σχήμα 7.4:** Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων.

Μόλις επιλεγούν τα δεδομένα και εκτελεστεί η εντολή επιστρέφουμε στο αρχικό παράθυρο του Matlab. Τέλος θα πρέπει να δώσουμε ένα όνομα αρχείου στο πεδίο "Sample's name".

#### 7.4.5. Επιλογή μοντέλων ροής.

Μετά την επιλογή των πειραματικών δεδομένων απαιτείται η επιλογή των ρεολογικών μοντέλων προς επίλυση. Αυτό γίνεται σημειώνοντας το αντίστοιχο τετραγωνάκι δίπλα από το κάθε μοντέλο ροής. Με την εντολή "set" εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο διαλόγου για κάθε μοντέλο ροής. Στο παράθυρο αυτό αναγράφεται το άνομα του μοντέλου ροής καθώς και η εξίσωση που

χρησιμοποιείται για την προσέγγιση. Στον πίνακα στο κάτω μέρος του παραθύρου βρίσκονται οι αρχικές τιμές των παραμέτρων της εξίσωσης καθώς και το άνω και κάτω όριο μέσα στα οποία αυτές μεταβάλλονται.



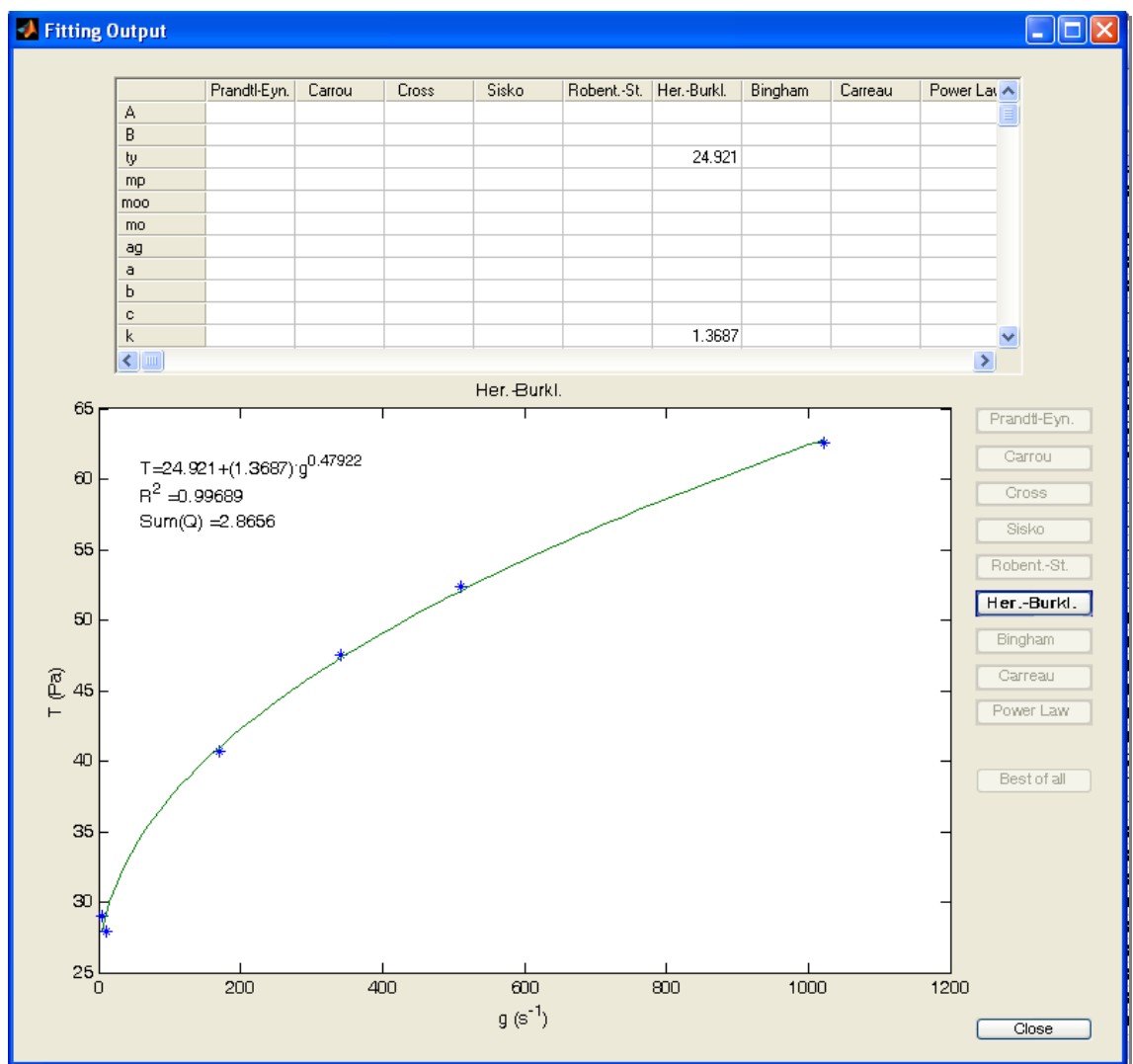
**Σχήμα 7.5:** Απεικόνιση του κεντρικού παράθυρου του προγράμματος “fitting model”.

#### 7.4.6. Ανάγνωση των αποτελεσμάτων.

Έχοντας πραγματοποιήσει την επεξεργασία των δεδομένων και των παραμέτρων που έχουμε ορίσει επιλέγοντας την εντολή “run” από το βασικό παράθυρο διαλόγου, ακολουθεί η ανάγνωση των αποτελεσμάτων. Αυτό γίνεται επιλέγοντας την εντολή “View Output” από το βασικό παράθυρο διαλόγου του προγράμματος. Εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο στο πάνω μέρος του οποίου φαίνονται τα αποτελέσματα σε μορφή πίνακα για καθένα από τα ρεολογικά

μοντέλα. Στο κάτω μέρος εμφανίζεται η γραφική απεικόνιση της προσέγγισης που περιέχει τα πειραματικά δεδομένα και την καμπύλη προσέγγισης.

Δεξιά της γραφικής παράστασης εμφανίζεται με έντονους χαρακτήρες το επιλεγμένο 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 που προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα.



**Σχήμα 7.6:** Απεικόνιση παράθυρου αποτελεσμάτων κατόπιν υπολογιστικής επίλυσης δείγματος Μπεντονίτη 6.42%(w/v).

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.**

### **8.1 ΓΕΝΙΚΑ.**

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα των μετρήσεων της πειραματικής διαδικασίας. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο που προηγήθηκε.

Συγκεκριμένα η παρουσίαση των αποτελεσμάτων και της επεξεργασίας αυτών περιλαμβάνει πειράματα που αναφέρονται στην προσρόφηση διαφόρων πολυμερών σε μπεντονίτη τύπου Wyoming, την ρεολογία των εν λόγω αιωρημάτων καθώς επίσης και την μελέτη διαφόρων φυσικών μεγεθών όπως της θερμοκρασίας, του pH και της αλατότητας. Επίσης μελετάται η επίδραση που έχουν οι μεταβολές των εν λόγω μεγεθών στα παραπάνω αιωρήματα.

### **8.2 ΠΡΟΤΥΠΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.**

#### **8.2.1. Πρότυπη καμπύλη πολυμερούς CMC.**

Πριν από την επεξεργασία των δεδομένων και τον υπολογισμό των προσροφημένων ppm του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς CMC, προσδιορίστηκε η πρότυπη καμπύλη. Επίσης είναι αναγκαίο να προσδιοριστεί το βέλτιστο μήκος κύματος στο οποίο θα ρυθμιστεί το φασματοφωτόμετρο για να πραγματοποιηθούν οι παραπάνω μετρήσεις, καθώς και οι μετρήσεις για τον προσδιορισμό της προσρόφησης. Συγκεκριμένα μετρήθηκε το πιο πυκνό δείγμα CMC έτσι ώστε να μας δίνονται οι μεγαλύτερες και συνεπώς καλύτερες πειραματικές μετρήσεις. Ακολουθεί πίνακας μετρήσεων για τον υπολογισμό της πρότυπης καμπύλης.



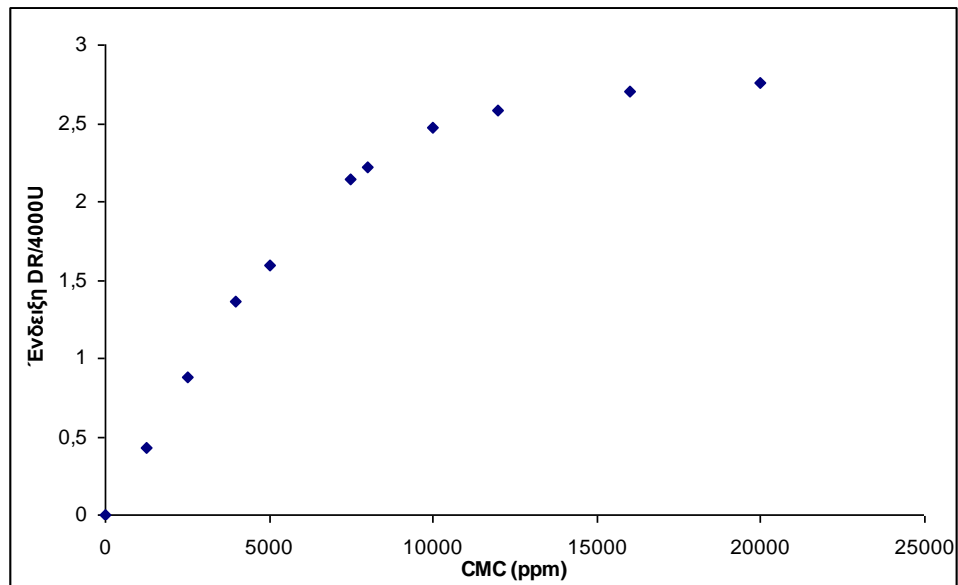
Τύπος φασματοφωτόμετρου : DR / 4000 U		Δείγμα : CMC 1%	
Θερμοκρασία περιβάλλοντος : 22.4 °C			
Μήκος κύματος (nm)	Ένδειξη οργάνου	CMC (ppm)	Ένδειξη οργάνου (nm =210)
190	1.825	0	0
200	2.460	1250	0.433
210	2.533	2500	0.880
220	1.300	4000	1.359
250	0.194	5000	1.588
280	0.138	7500	2.140
		8000	2.224
		10000	2.478
		12000	2.585
		16000	2.698
		20000	2.757

**Πίνακας 8.1.** Αποτελέσματα φασματοφωτόμετρου για πρότυπη καμπύλη προσρόφησης του πολυμερούς CMC 1%.

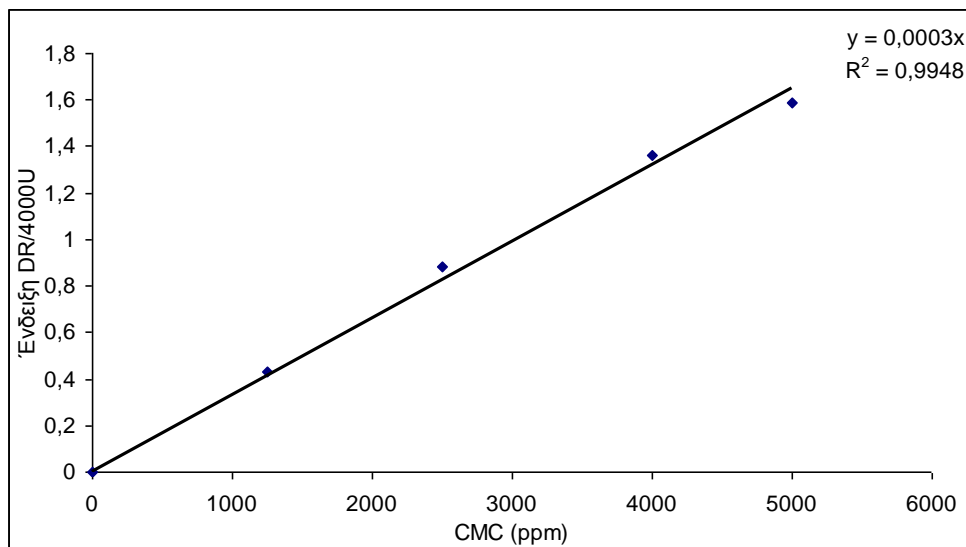
Ακολουθεί η δημιουργία των απαραίτητων γραφημάτων για να προσδιοριστεί η καμπύλη αναφοράς, η οποία πρέπει να είναι ευθύγραμμη και να διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Ο χρησιμοποιούμενος τύπος φασματοφωτόμετρου έχει κάποιο όριο πέρα του οποίου η ακρίβεια του οργάνου ελαττώνεται και οι μετρήσεις που λαμβάνουμε δεν είναι ακριβείς. Όταν ξεπεραστεί το εν λόγω όριο τότε οι μετρήσεις δεν παρουσιάζουν αναλογική αύξηση σε σχέση με την περιεκτικότητα του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς, οι μετρήσεις εμφανίζουν καμπή και η καμπύλη αναφοράς δεν είναι ευθύγραμμη.

Επειδή όμως για την επεξεργασία των μετρήσεων της προσρόφησης χρειαζόμαστε γράφημα με ευθύγραμμο τμήμα, ώστε να γίνεται η αντιστοιχία των μετρήσεων, τότε λαμβάνουμε υπόψη μόνο τις μετρήσεις που αντιστοιχούν

στη γραμμική περιοχή της καμπύλης αναφοράς. Ακολούθως παρατίθενται τα γραφήματα της πρότυπης καμπύλης, πριν και μετά την επιλογή των κατάλληλων μετρήσεων.



**Διάγραμμα 8.1.** Απεικόνιση πρότυπης καμπύλης για πολυμερές CMC.



**Διάγραμμα 8.2.** Απεικόνιση του ευθύγραμμου τμήματος της πρότυπης καμπύλης και της εξίσωσης αυτής για πολυμερές CMC.

### 8.2.2. Πρότυπη καμπύλη πολυμερούς Carborol 980.

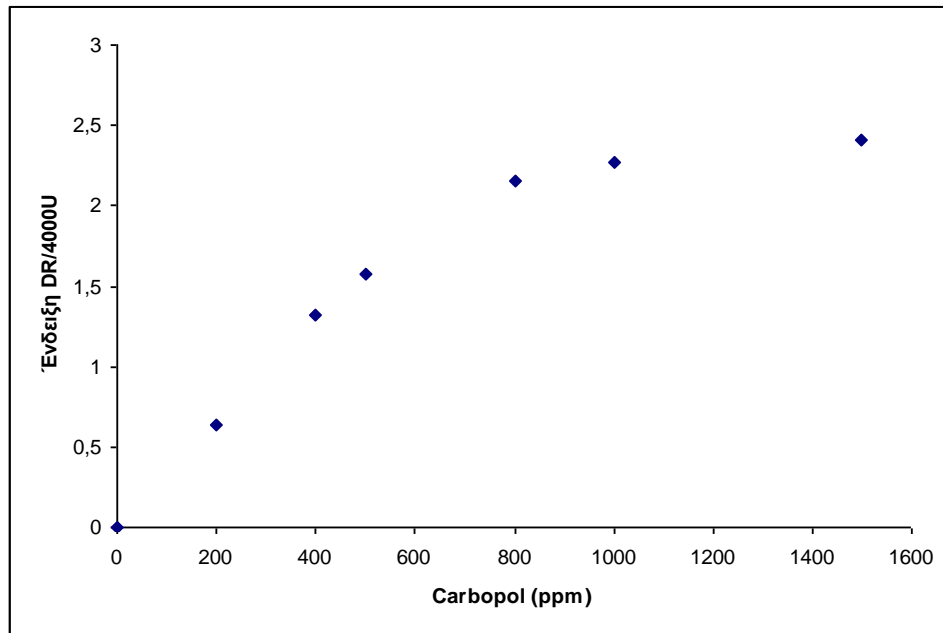
Όπως και προηγουμένως, πριν την επεξεργασία των δεδομένων και τον υπολογισμό του προσροφημένου πολυμερούς Carborol 980 (ppm) πρέπει να κατασκευαστεί η πρότυπη καμπύλη αναφοράς. Είναι αναγκαίο να προσδιοριστεί το καλύτερο δυνατό μήκος κύματος στο οποίο θα ρυθμιστεί το φασματοφωτόμετρο για να πραγματοποιηθούν οι παραπάνω μετρήσεις και για αυτό το σκοπό μετρήθηκε το πιο πυκνό δείγμα Carborol 980. Ακολουθεί πίνακας μετρήσεων για τον υπολογισμό της πρότυπης καμπύλης.

Τύπος φασματοφωτόμετρου : DR / 4000 U		Δείγμα : Carbopol 980 0.09%	
Θερμοκρασία περιβάλλοντος : 22.6 °C			
Μήκος κύματος (nm)	Ένδειξη οργάνου	Carbopol 980 (ppm)	Ένδειξη οργάνου (nm =200)
400	0.032	0	0
300	0.048	200	0.641
210	1.744	400	1.319
205	2.150	500	1.575
200	2.290	800	2.155
195	2.130	1000	2.265
190	1.720	1500	2.410

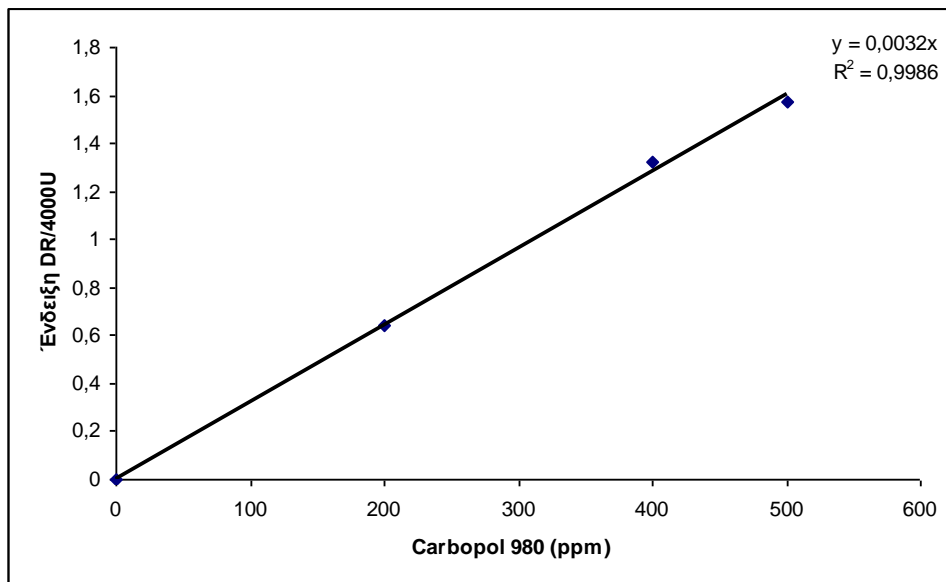
**Πίνακας 8.2.** Αποτελέσματα φασματοφωτόμετρου για πρότυπη καμπύλη προσρόφησης του πολυμερούς Carborol 980.

Ακολούθησε η κατασκευή των απαραίτητων γραφημάτων για να προσδιοριστεί η καμπύλη αναφοράς. Γνωρίζουμε όπως και προηγουμένως, πως επιθυμητή είναι η γραμμική καμπύλη αναφοράς που διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Ελήφθησαν υπόψη μόνο οι μετρήσεις που αντιστοιχούν στην περιοχή, όπου η ακρίβεια του μετρητικού οργάνου είναι η επιθυμητή.

Ακολουθώς παρατίθενται τα γραφήματα της πρότυπης καμπύλης, πριν και μετά την επιλογή των κατάλληλων μετρήσεων.



**Διάγραμμα 8.3.** Πρότυπη καμπύλη για πολυμερές Carborol 980.



**Διάγραμμα 8.4.** Απεικόνιση του γραμμικού τμήματος της πρότυπης καμπύλης και της εξίσωσής της για πολυμερές Carborol 980.

### 8.3 ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗ.

#### 8.3.1 Προσρόφηση CMC σε μπεντονίτη 3% (w/v).

Στο συγκεκριμένο κομμάτι της εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης προσρόφησης πολυμερούς CMC σε πολφούς μπεντονίτη τύπου Wyoming. Στον πίνακα 8.3 παρατίθενται τα δείγματα που παρασκευάστηκαν.

Δείγμα : Μπεντονίτης Wyoming - Carboxymethylcellulose (CMC)				
Θερμοκρασία περιβάλλοντος : 21.3 °C				
Bentonite (%)	Bentonite (g)	CMC (%)	CMC (g)	CMC (ppm)
3	30	0	0	0
3	30	0.2	2	2000
3	30	0.4	4	4000
3	30	0.6	6	6000
3	30	0.8	8	8000
3	30	1.0	10	10000
3	30	1.5	15	15000

**Πίνακας 8.3:** Δείγματα για τη μελέτη προσρόφησης του πολυμερούς CMC σε πολφό μπεντονίτη 3%(w/v) 500ml.

Ακολούθησε η διαδικασία μέτρησης στο φασματοφωτόμετρο Spectrophotometer DR /4000 U του εργαστηρίου Οργανικής Γεωχημείας και Πετρογραφίας. Τ' αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.4.

Όργανο : Φασματοφωτόμετρου DR / 4000 U		Δείγμα : Μπεντονίτης Wyoming (3%) - CMC	
Θερμοκρασία περιβάλλοντος : 22.6 °C		Ειδική επιφάνεια μπεντονίτη : 27.25 m <sup>2</sup> /gr	
CMC (%)	CMC (ppm)	Ένδειξη οργάνου (nm = 210)	Ένδειξη οργάνου - A1
0	0	1.260 =A1	0.000
0.2	2000	1.278	0.018
0.4	4000	1.305	0.045
0.6	6000	1.511	0.251
0.8	8000	1.817	0.557
1.0	10000	2.299	1.039
1.5	15000	- (*)	-

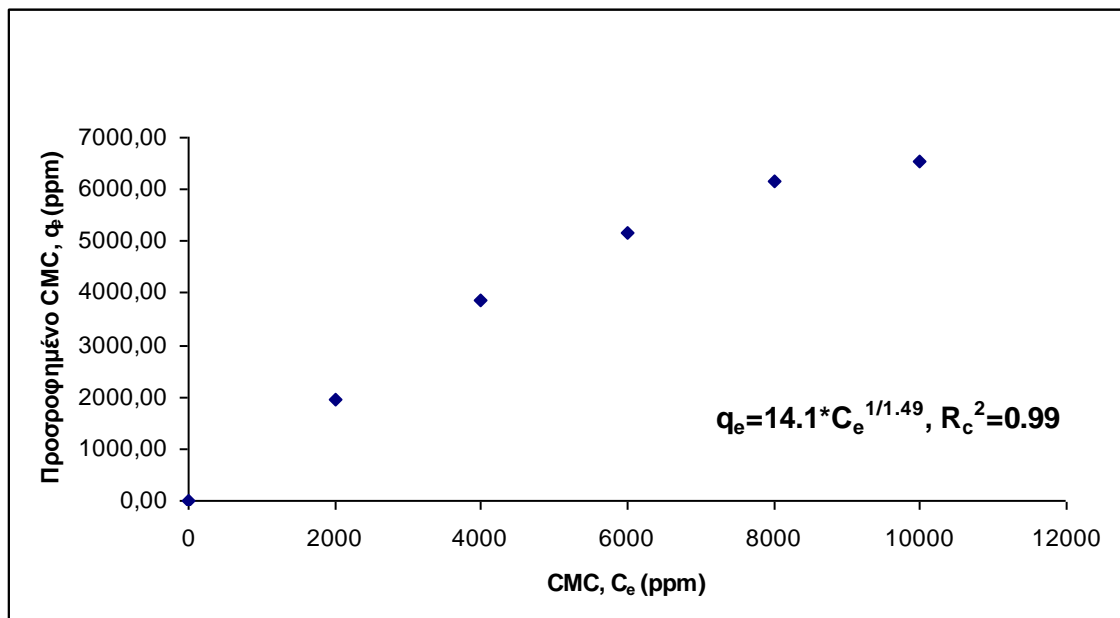
**Πίνακας 8.4:** Αποτελέσματα μετρήσεων φασματοφωτόμετρου DR/4000U για προσρόφηση CMC σε πολφό μπεντονίτη 3%(w/v).

Εν συνέχεια ακολούθησε η επεξεργασία των δεδομένων σε πρόγραμμα excel με βάση την μεθοδολογία που έχει αναφερθεί εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επίσης προσδιορίστηκε η ειδική επιφάνεια του μπεντονίτη με σκοπό να γίνει αναγωγή των μετρήσεων για την κατασκευή των ισόθερμων προσρόφησης. Τα επεξεργασμένα δεδομένα παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 8.5.

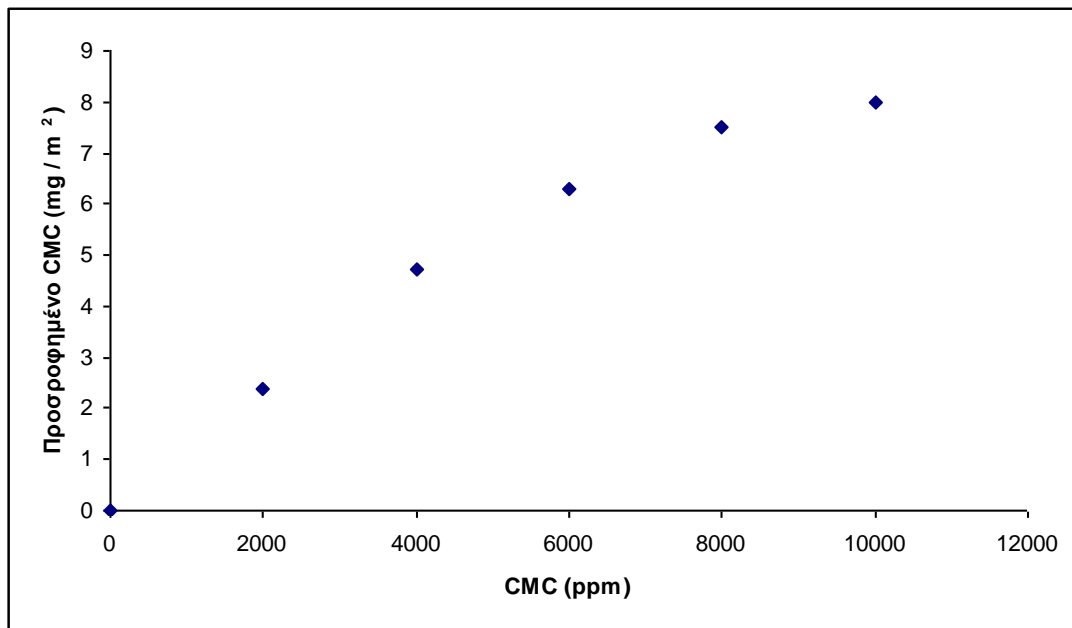
Με την ολοκλήρωση της επεξεργασίας και την βοήθεια του καταλλήλου υπολογιστικού προγράμματος κατασκευάστηκαν ισόθερμες προσρόφησης πολυμερούς CMC σε πολφό μπεντονίτη 3% (w/v), οι οποίες παρουσιάζονται στα διαγράμματα 8.5 και 8.6. Η εξίσωση της ισόθερμης προσρόφησης υπολογίστηκε με βάση το μοντέλο Freundlich (4.3.2.2).

Όργανο : Φασματοφωτόμετρο DR / 4000 U			Δείγμα : Μπεντονίτης Wyoming (3%) - CMC	
Θερμοκρασία περιβάλλοντος : 22.6 °C			Ειδική επιφάνεια μπεντονίτη : 27.25 m <sup>2</sup> /gr	
CMC (ppm)	Όχι προσρ. (ppm)	Προσροφημένο (ppm)	Προσροφημένο (mg/g μπεντ.)	Προσροφημένο (mg /m <sup>2</sup> )
0	0.00	0.00	0.00	0.00
2000	60.00	1940.00	64.67	2.37
4000	150.00	3850.00	128.33	4.71
6000	836.67	5163.33	172.11	6.32
8000	1856.67	6143.33	204.78	7.51
10000	3463.33	6536.67	217.89	8.00
15000	- (*)	-	-	-

**Πίνακας 8.5:** Επεξεργασία αποτελεσμάτων προσρόφησης CMC σε πολφό μπεντονίτη 3% (w/v).



**Διάγραμμα 8.5:** Γραφική παράσταση προσρόφησης πολυμερούς CMC (ppm) σε πολφό μπεντονίτη 3% (w/v) .



**Διάγραμμα 8.6:** Γραφική παράσταση προσρόφησης πολυμερούς CMC (mg/m<sup>2</sup>) σε πολφό μπεντονίτη 3% (w/v) .

### 8.3.2 Προσρόφηση CMC σε μπεντονίτη 4% (w/v).

Αρχικά γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της μελέτης προσρόφησης πολυμερούς CMC σε πολφούς μπεντονίτη τύπου Wyoming. Παρακάτω, παρατίθεται τα δείγματα τα οποία παρασκευάστηκαν (πίνακας 8.6).

Δείγμα : Μπεντονίτης Wyoming - Carboxymethylcellulose (CMC)				
Θερμοκρασία περιβάλλοντος : 20.5 °C				
Bentonite (%)	Bentonite (g)	CMC (%)	CMC (g)	CMC (ppm)
4	40	0	0	0
4	40	0.2	2	2000
4	40	0.5	5	5000
4	40	1.0	10	10000

**Πίνακας 8.6:** Δείγματα για την μελέτη προσρόφησης του πολυμερούς CMC σε πολφό μπεντονίτη 4%(w/v).



Ακολούθησε η διαδικασία μέτρησης στο φασματοφωτόμετρο. Στον παρακάτω πίνακα (8.7) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Όργανο : Φασματοφωτόμετρο DR / 4000 U		Δείγμα : Μπεντονίτης Wyoming (4%) - CMC	
Θερμοκρασία περιβάλλοντος : 21.2 °C		Ειδική επιφάνεια μπεντονίτη : 27.25 m <sup>2</sup> /gr	
CMC (%)	CMC (ppm)	Ένδειξη οργάνου (nm = 210)	Ένδειξη οργάνου - A1
0.0	0	0.101 = A1	0
0.2	2000	0.139	0.038
0.5	5000	0.374	0.273
1.0	10000	1.397	1.296

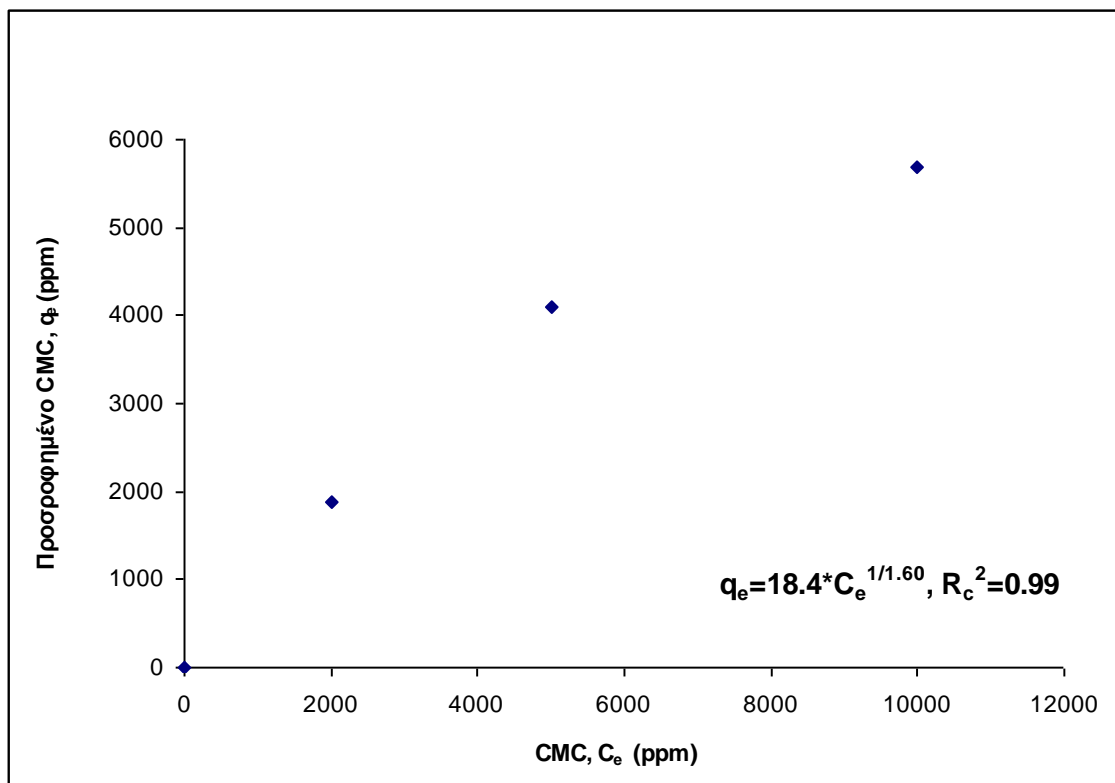
**Πίνακας 8.7:** Αποτελέσματα μετρήσεων φασματοφωτόμετρου DR/4000U για προσρόφηση CMC σε πολφό μπεντονίτη 4%(w/v).

Ακολούθησε η επεξεργασία των δεδομένων στο πρόγραμμα excel με βάση την μεθοδολογία που έχει αναφερθεί εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επίσης για τις ανάγκες της επεξεργασίας έχει μετρηθεί η ειδική επιφάνεια του μπεντονίτη με σκοπό να γίνει η αναγωγή των μετρήσεων σε ειδική κλίμακα για την κατασκευή των καμπύλων προσρόφησης. Τα επεξεργασμένα δεδομένα παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 8.8.

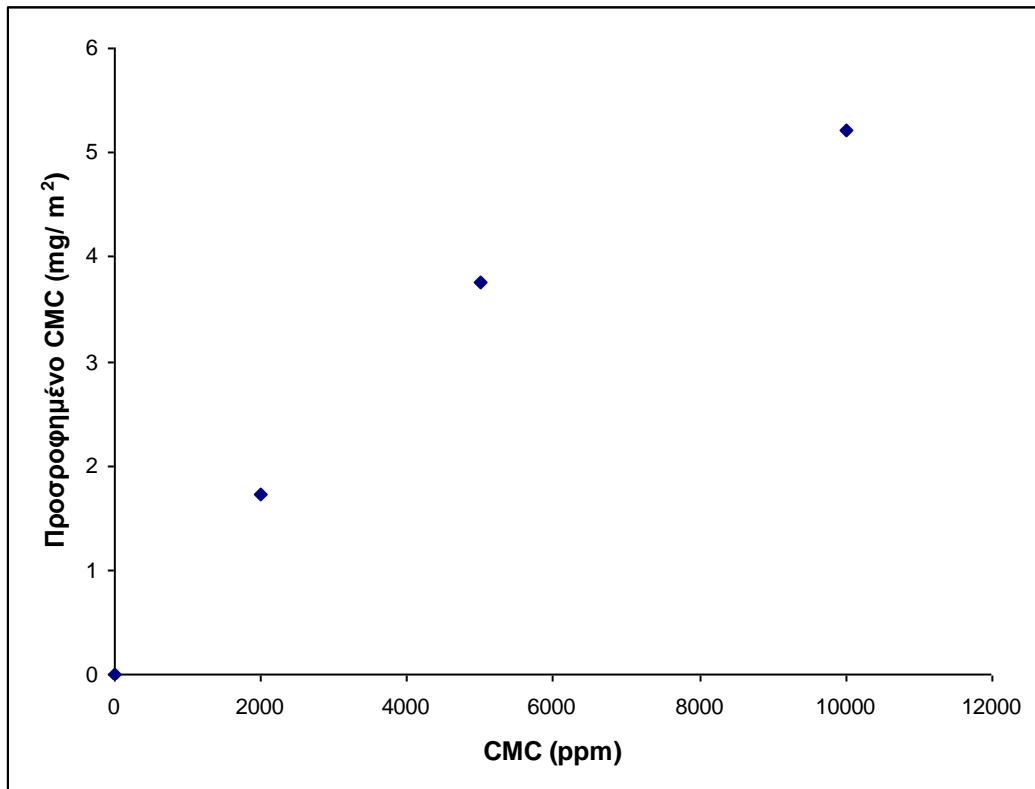
Με την ολοκλήρωση της επεξεργασίας και την βοήθεια του κατάλληλου υπολογιστικού προγράμματος γίνεται η κατασκευή των ισόθερμων προσρόφησης του πολυμερούς CMC σε πολφό μπεντονίτη 4% (w/v), οι οποίες παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα (8.7 και 8.8). Η εξίσωση της ισόθερμης προσρόφησης υπολογίστηκε με βάση το μοντέλο Freundlich (4.3.2.2).

Όργανο : Φασματοφωτόμετρο DR / 4000 U			Δείγμα : Μπεντονίτης Wyoming (4%) - CMC	
Θερμοκρασία περιβάλλοντος : 22.2 °C			Ειδική επιφάνεια μπεντονίτη : 27.25 m <sup>2</sup> /gr	
CMC (ppm)	Όχι προσρ. (ppm)	Προσροφημένο (ppm)	Προσροφημένο (mg/g μπεντ.)	Προσροφημένο (mg / m <sup>2</sup> )
0	0.00	0.00	0	0
2000	126.7	1873.3	46.8	1.72
5000	910	4090	102.3	3.75
10000	4320	5680	142.0	5.21

**Πίνακας 8.8:** Επεξεργασία αποτελεσμάτων προσρόφησης CMC σε πολφό μπεντονίτη 4% (w/v).



**Διάγραμμα 8.7:** Γραφική παράσταση προσρόφησης πολυμερούς CMC (ppm) σε πολφό μπεντονίτη 4% (w/v) .



**Διάγραμμα 8.8:** Γραφική παράσταση προσρόφησης πολυμερούς CMC (mg/m<sup>2</sup>) σε πολφό μπεντονίτη 4% (w/v) .

### 8.3.3 Προσρόφηση πολυμερούς Carborol 980 σε πολφό μπεντονίτη 3% (w/v).

Στο συγκεκριμένο τμήμα της εργασίας πραγματοποιήθηκε μελέτη προσρόφησης του πολυμερούς Carborol 980 σε πολφό μπεντονίτη 3% (w/v). Τα δείγματα παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωτρήσεων και Ρευστομηχανικής και η λήψη των μετρήσεων έγινε με φασματοφωτόμετρο Spectrophotometer DR/4000U. Στους παρακάτω πίνακες παρατίθεται αναλυτικά τα δείγματα τα οποία παρασκευάστηκαν για το σκοπό αυτό (8.9) και τα αποτελέσματα των μετρήσεων κατά την φασματοφωτομετρία (8.10).

Δείγμα : Μπεντονίτης Wyoming - Carbopol (980)				Θερμοκρασία: 22.7 °C		
Bentonite (%)	Bentonite (g)	Carbopol 980 (%)	Carbopol 980 (g)	Carbopol 980 (ppm)	NaOH (ml)	pH
3	30	0.00	0.0	0	0.00	8.90
3	30	0.02	0.2	200	0.17	8.55
3	30	0.03	0.3	300	0.25	8.31
3	30	0.05	0.5	500	0.80	8.22
3	30	0.08	0.8	800	1.20	8.18
3	30	0.10	1.0	1000	1.80	8.05
3	30	0.15	1.5	1500	2.40	7.91

**Πίνακας 8.9:** Δείγματα για την μελέτη προσρόφησης του πολυμερούς Carbopol 980 σε πολφό μπεντονίτη 3%(w/v).

Όργανο: Φασματοφωτόμετρο DR/4000 U		Δείγμα: Μπεντονίτης Wyoming 3%(w/v) - Carbopol 980	
Θερμοκρασία: 22.6 °C		Ειδική επιφάνεια μπεντονίτη: 27.25m <sup>2</sup> /gr	
Carbopol 980 (%)	Carbopol 980 (ppm)	Ένδειξη οργάνου (nm = 200)	Ένδειξη οργάνου - A1
0	0	1.455=A1	0.000
0.02	200	1.480	0.025
0.03	300	1.515	0.060
0.05	500	1.750	0.295
0.08	800	2.230	0.775
0,10	1000	2.610	1.155
0,15	1500	3.650	2.195

**Πίνακας 8.10:** Αποτελέσματα μετρήσεων φασματοφωτόμετρου DR/4000U για προσρόφηση Carbopol 980 σε πολφό μπεντονίτη 3%(w/v).

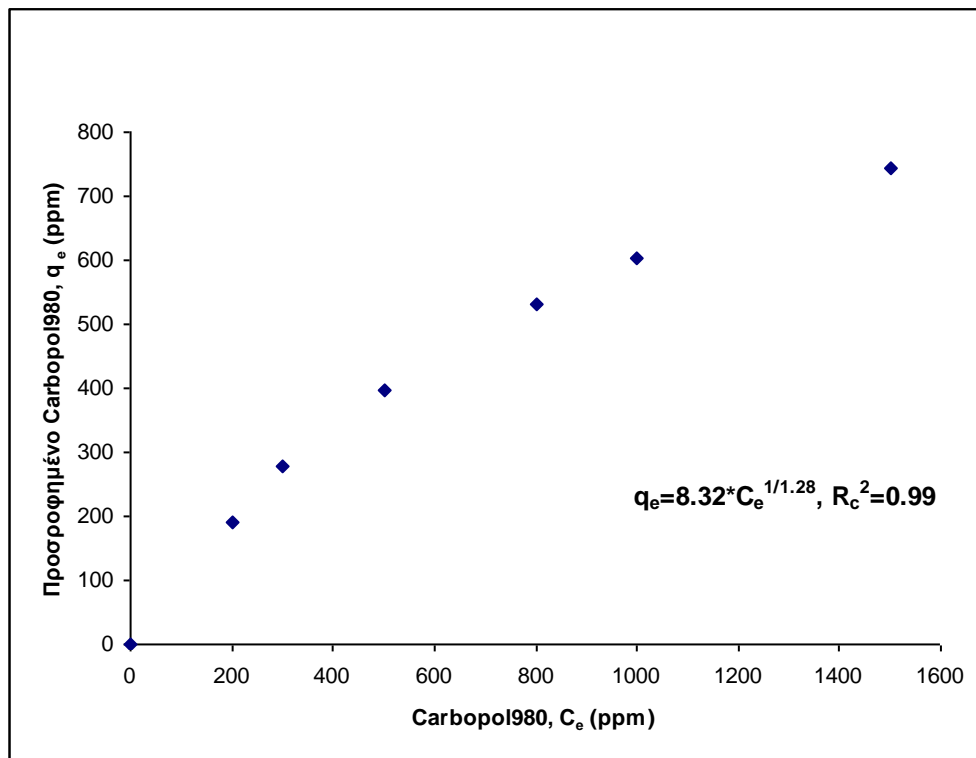
Αμέσως μετά την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων ακολουθεί η επεξεργασία τους με τη διαδικασία που περιγράφεται αναλυτικά στο 7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

Από την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψε η ποσότητα του πολυμερούς Carborol 980 που προσροφήθηκε στον πολφό μπεντονίτη. Τα αποτελέσματα μετατράπηκαν από ppm σε mg/m<sup>2</sup> με αναγωγή ενός γραμμαρίου μπεντονίτη έχοντας μετρήσει την ειδική του επιφάνεια στο εργαστήριο Μηχανικής των τεμαχιδίων και Εμπλουτισμού.

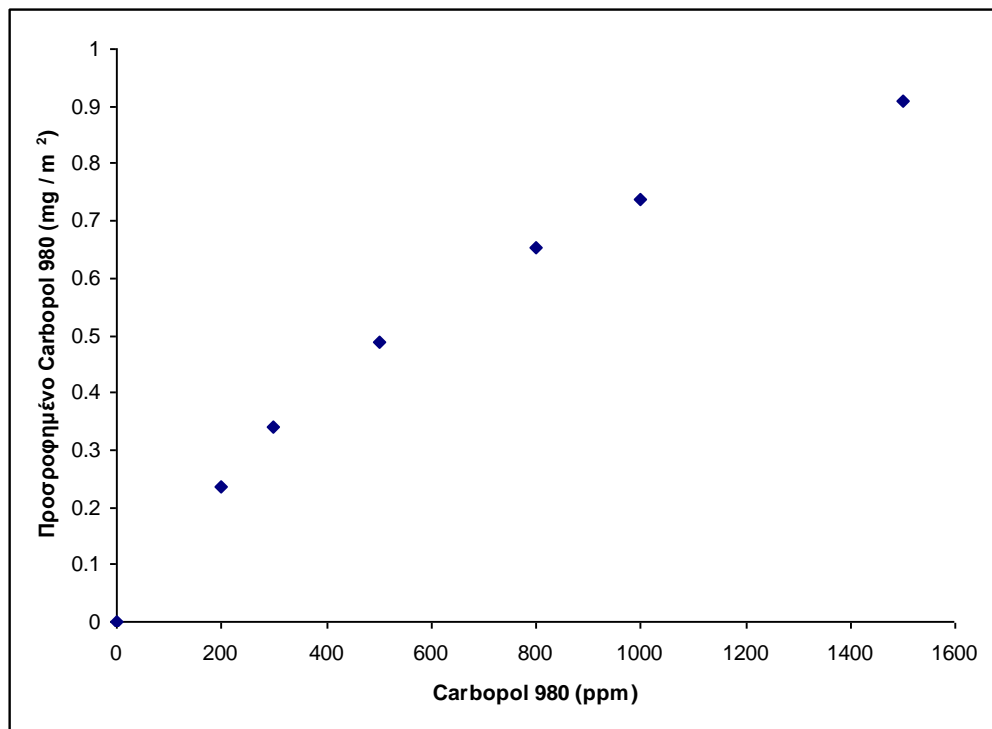
Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν οι ισόθερμες προσρόφησης του Carborol 980 σε πολφό μπεντονίτη. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της φασματοφωτομετρίας (πίνακας 8.11), και οι καμπύλες προσρόφησης, (διαγράμματα 8.9, 8.10). Η εξίσωση της ισόθερμης προσρόφησης υπολογίστηκε με βάση το μοντέλο Freundlich (4.3.2.2).

Όργανο : Φασματοφωτόμετρο DR / 4000 U			Δείγμα : Μπεντονίτης Wyoming - Carborol 980	
Θερμοκρασία: 22.6 °C			Ειδική επιφάνεια μπεντονίτη: 27.25 m <sup>2</sup> /gr	
Carborol (ppm)	Όχι προσρ. (ppm)	Προσροφη μένο(ppm)	Προσροφημένο (mg/g μπεντ.)	Προσροφημένο (mg /m <sup>2</sup> )
0	0	0	0	0
200	8.62	191.37	6.37	0.23
300	20.68	279.31	9.31	0.34
500	101.72	398.27	13.27	0.48
800	267.24	532.75	17.75	0.65
1000	398.27	601.72	20.05	0.73
1500	756.89	743.10	24.77	0.91

**Πίνακας 8.11:** Επεξεργασία αποτελεσμάτων προσρόφησης Carborol 980 σε πολφό μπεντονίτη 3% (w/v).



**Διάγραμμα 8.9:** Γραφική παράσταση προσρόφησης πολυμερούς Carborol 980 (ppm) σε πολφό μπεντονίτη 3% (w/v) .



**Διάγραμμα 8.10:** Γραφική παράσταση προσρόφησης πολυμερούς Carborol 980 (mg/m<sup>2</sup>) σε πολφό μπεντονίτη 3% (w/v) .

### 8.3.4 Προσρόφηση πολυμερούς Carbopol 980 σε πολφό μπεντονίτη 4%(w/v).

Πραγματοποιήθηκε μελέτη προσρόφησης του πολυμερούς Carbopol 980 σε πολφό μπεντονίτη 4% (w/v).. Στους παρακάτω πίνακες παρατίθεται αναλυτικά τα δείγματα τα οποία παρασκευάστηκαν για το σκοπό αυτό (8.12) και τα αποτελέσματα των μετρήσεων με φασματοφωτόμετρο Spectrophotometer DR/4000U (8.13).

Δείγμα : Μπεντονίτης Wyoming - Carbopol (980)						
Θερμοκρασία περιβάλλοντος : 23.5 °C						
Bentonite (%)	Bentonite (g)	Carbopol 980 (%)	Carbopol 980 (g)	Carbopol 980 (ppm)	NaOH (ml)	pH
4	40	0.00	0.0	0	0	8.94
4	40	0.02	0.2	200	0.17	8.63
4	40	0.03	0.3	300	0.25	8.51
4	40	0.05	0.5	500	0.80	8.47
4	40	0.07	0.7	700	1.05	8.32
4	40	0.08	0.8	800	1.20	8.24
4	40	0.09	0.9	900	1.50	8.08
4	40	0.10	1.0	1000	1.80	7.95
4	40	0.15	1.5	1500	2.40	7.88

**Πίνακας 8.12:** Παρασκευασθέντα δείγματα για την μελέτη προσρόφησης του πολυμερούς Carbopol 980 σε πολφό μπεντονίτη 4%(w/v).

Όργανο : Φασματοφωτόμετρο DR / 4000 U		Δείγμα : Μπεντονίτης Wyoming (4%) - Carbopol 980	
Θερμοκρασία περιβάλλοντος : 22.8 °C		Ειδική επιφάνεια μπεντονίτη : 27.25 m <sup>2</sup> /gr	
Carbopol 980 (%)	Carbopol 980 (ppm)	Ένδειξη οργάνου (nm = 200)	Ένδειξη οργάνου - A1
0.00	0	2.03=A1	0
0.02	200	2.09	0.06
0.03	300	2.10	0.07
0.05	500	2.15	0.12
0.07	700	2.33	0.30
0.08	800	2.49	0.46
0.09	900	2.63	0.60
0.10	1000	2.85	0.82

**Πίνακας 8.13:** Αποτελέσματα μετρήσεων φασματοφωτόμετρου DR/4000U για προσρόφηση Carbopol 980 σε πολφό μπεντονίτη 4%(w/v).

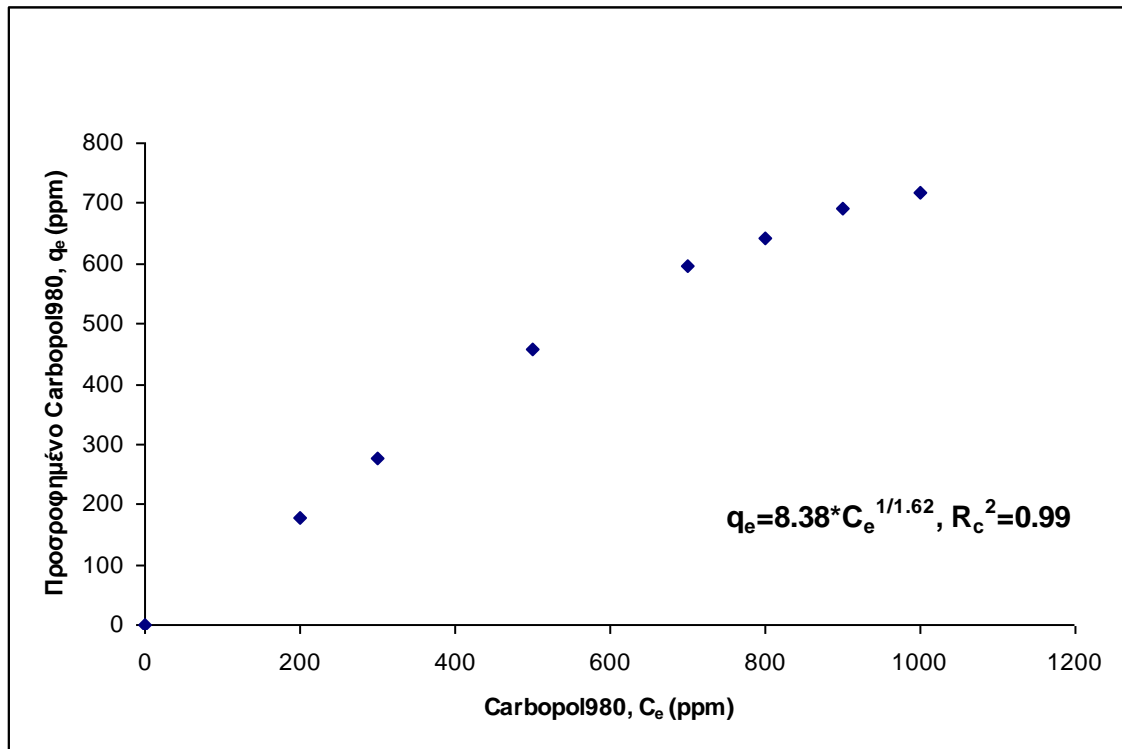
Αμέσως μετά την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων ακολουθεί η επεξεργασία τους με τυποποιημένη διαδικασία η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο 7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Προσδιορίστηκε η ποσότητα του πολυμερούς Carbopol 980 που προσροφήθηκε στον πολφό μπεντονίτη. Τέλος, πραγματοποιήθηκε κατάλληλη μετατροπή των αποτελεσμάτων από ppm σε mg/m<sup>2</sup> ενός γραμμαρίου μπεντονίτη έχοντας μετρήσει την ειδική επιφάνεια στο εργαστήριο Μηχανικής των Τεμαχιδίων και Εμπλουτισμού.

Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν ισόθερμες προσρόφησης του Carbopol 980 σε πολφό μπεντονίτη. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της φασματοφωτομετρίας (πίνακας 8.14), και οι καμπύλες προσρόφησης, (διαγράμματα 8.11 και 8.12). Η εξίσωση της ισόθερμης προσρόφησης υπολογίστηκε με βάση το μοντέλο Freundlich (4.3.2.2).

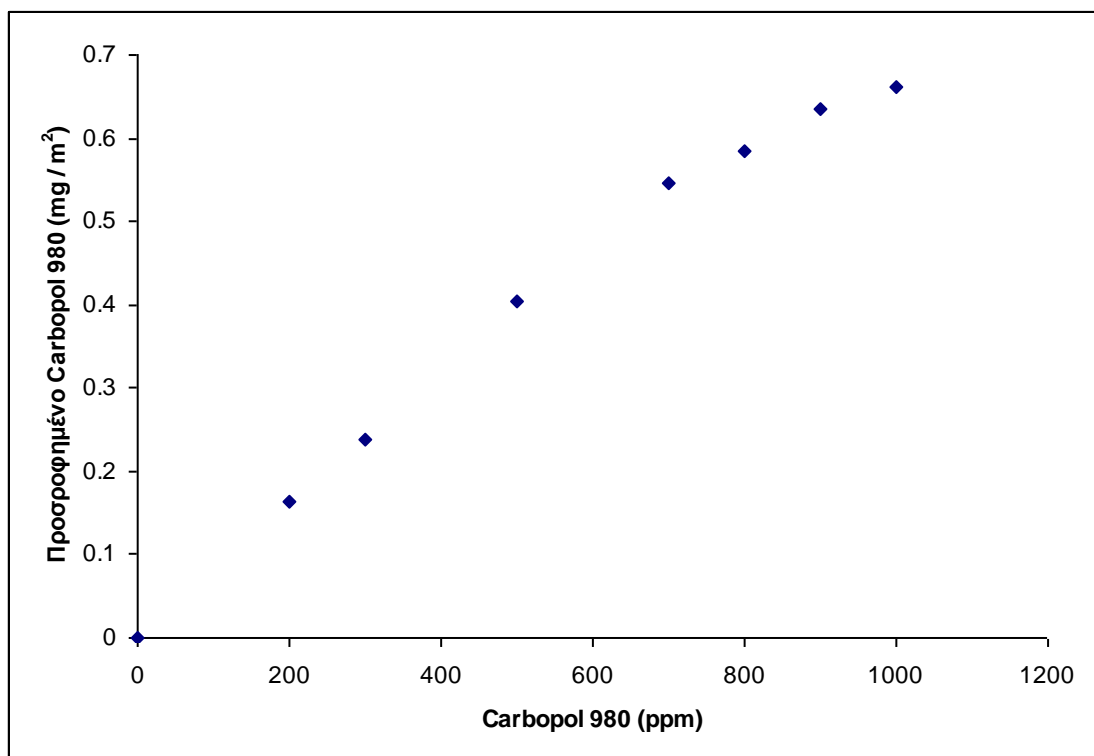


Όργανο : Φασματοφωτόμετρο DR / 4000 U			Δείγμα : Μπεντονίτης Wyoming (4%) - Carbopol 980	
Θερμοκρασία περιβάλλοντος : 23.4 °C			Ειδική επιφάνεια μπεντονίτη : 27.25 m <sup>2</sup> /gr	
Carbopol (ppm)	Όχι προσρ. (ppm)	Προσροφημένο (ppm)	Προσροφημένο (mg/g μπεντ.)	Προσροφημένο (mg / m <sup>2</sup> )
0	0	0	0	0
200	21.03	178.97	4.47	0.16
300	24.14	275.86	6.90	0.25
500	41.38	458.62	11.47	0.42
700	104.14	595.86	14.90	0.55
800	158.62	641.38	16.03	0.59
900	208.62	691.38	17.28	0.63
1000	282.76	701.14	17.93	0.66

**Πίνακας 8.14:** Επεξεργασία αποτελεσμάτων προσρόφησης Carbopol 980 σε πολφό μπεντονίτη 4% (w/v).



**Διάγραμμα 8.11:** Γραφική παράσταση προσρόφησης πολυμερούς Carborol 980 (ppm) σε πολφό μπεντονίτη 4% (w/v) .



**Διάγραμμα 8.12:** Γραφική παράσταση προσρόφησης πολυμερούς Carborol 980 (mg/ m<sup>2</sup>) σε πολφό μπεντονίτη 4% (w/v) .

### 8.3.5. Ισόθερμες καμπύλες προσρόφησης.

Την επεξεργασία των αποτελεσμάτων για κάθε σειρά πειραμάτων ακολούθησε ο υπολογισμός των εξισώσεων των καμπύλων προσρόφησης. Η προσέγγιση πραγματοποιήθηκε με χρήση της εφαρμογής "cftool" σε περιβάλλον "matlab". Ακολούθησε η σύγκριση των αποτελεσμάτων και επιλέχτηκε η ισόθερμη Freundlich ως βέλτιστο μοντέλο προσρόφησης. Η εξίσωση περιλαμβάνει τον συντελεστή κατανομής,  $K$  και την αδιάστατη παράμετρο που αποτελεί ένδειξη της ενέργειας προσρόφησης,  $1/n$ . Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα.

Ισόθερμη προσρόφησης : $q_e = K \cdot C_e^{1/n}$				
Δείγμα	$K$	$n$	$R_c^2$	Sum(Q)
CMC+bentonite 3%	14.10	1.49	0.99	0.12
CMC+ bentonite 4%	18.40	1.60	0.99	0.25
Carbopol+ bentonite 3%	8.32	1.28	0.99	0.18
Carbopol+ bentonite 4%	8.38	1.62	0.99	0.32

**Πίνακας 8.24:** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των παραμέτρων προσρόφησης σύμφωνα με την ισόθερμη Freundlich.

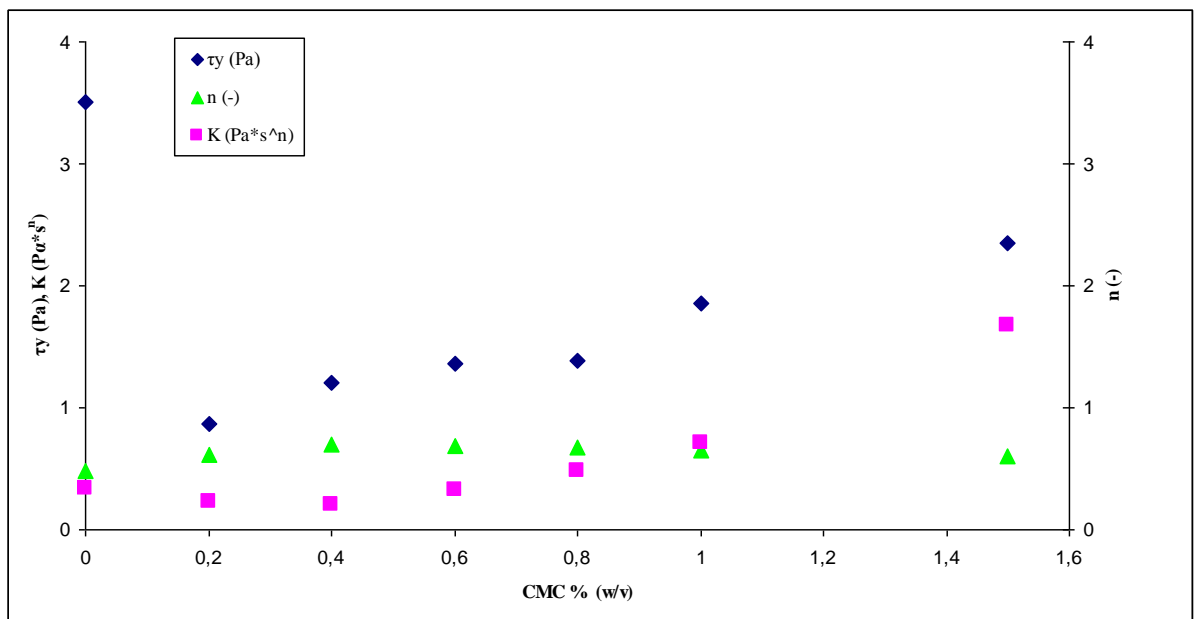
Παρατηρούμε από τα παραπάνω ότι εμφανίζεται αύξηση του συντελεστή κατανομής και της ενέργειας προσρόφησης για αλλαγή συγκέντρωσης μπεντονίτη από 3% σε 4%. Αυτή η αύξηση εμφανίζεται τόσο στην προσρόφηση του Carbopol 980 όσο και σε αυτή του CMC. Ακόμα σε όλες τις περιπτώσεις, καθώς ο λόγος  $1/n$  είναι μεγαλύτερος της μονάδας, η ισόθερμη είναι ευνοϊκή.

## 8.5 ΡΕΟΛΟΓΙΑ.

Η ρεολογικές ιδιότητες των πολφών είναι πολύ σημαντικές παράμετροι κατά την διάρκεια μιας γεώτρησης και επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των τεχνικών διάτρησης. Στο συγκεκριμένο τμήμα της εργασίας μελετήθηκαν οι ρεολογικές ιδιότητες των δειγμάτων που παρασκευάστηκαν κατά την πειραματική διαδικασία.

### 8.4.1. Ρεολογία πολφών μπεντονίτη 3% (w/v) σε συνδυασμό με CMC.

Στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι η κατανόηση της επίδρασης που έχει η προσθήκη πολυμερούς CMC, στην ρεολογία πολφών μπεντονίτη με περιεκτικότητα 3% (w/v). Παρασκευάστηκε σειρά διαλυμάτων με διαφορετικές περιεκτικότητες CMC. Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων και της επεξεργασίας τους φαίνεται στον Πίνακα 8.15 και στο διάγραμμα μεταβολής των ρεολογικών παραμέτρων συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης CMC (Διάγραμμα 8.13).



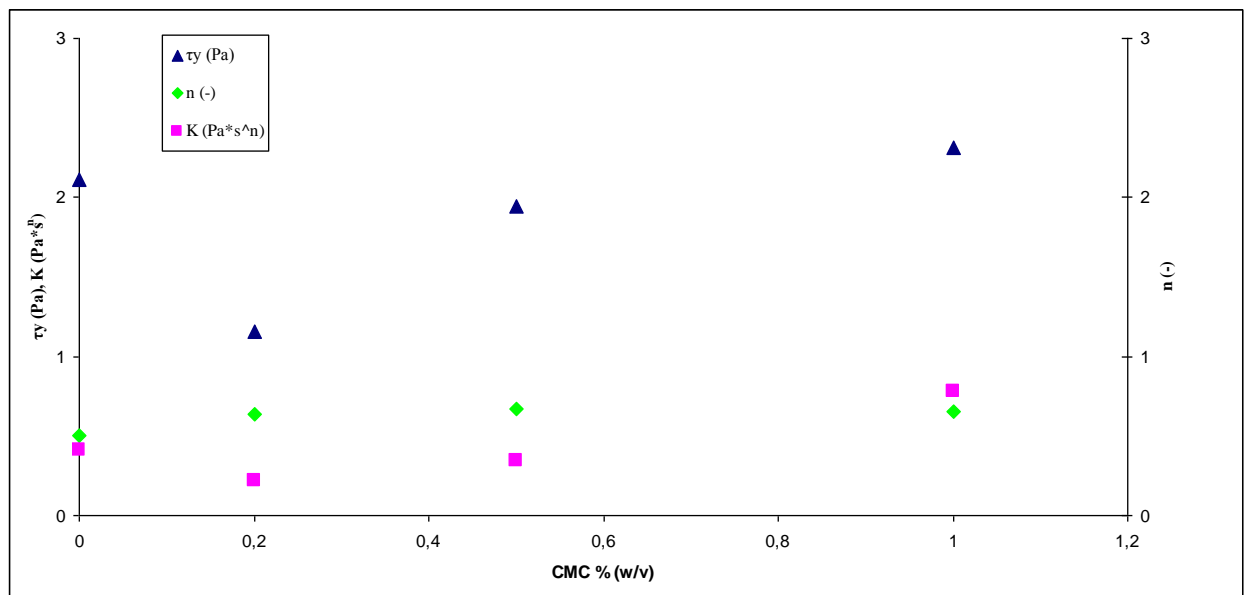
**Διάγραμμα 8.13:** Μεταβολή παραμέτρων  $\tau_y$  (Pa),  $K$  (Pa·s<sup>n</sup>) και  $n$  (-) για πολφούς μπεντονίτη 3% (w/v) 1000 ml νερό- CMC.

Τύπος οργάνου: Grace Instruments M3500a								Θερμοκρασία Περιβάλλοντος (°C): 22.5							Θερμοκρασία (°C)
Ταυτότητα δείγματος: Μπεντονίτης Wyoming 3% (w/v)								Shear Rate (sec <sup>-1</sup> )							
Ποσότητα δείγματος (ml): 1000				Πολυμερές: CMC											
CMC (ppm)	CMC % (w/v)	τ <sub>y</sub> (Pa)	K (Pa·s <sup>n</sup> )	n (-)	R <sub>c</sub> <sup>2</sup> (-)	Sum(Q) (Pa <sup>2</sup> )	Είδος ρευστού		1021.38	510.69	340.46	170.23	10.21	5.10	
0	0	2.11	0.41	0.50	0.99	0.32	Herschel-Bulkley	Shear Stress (Pa)	13.49	10.99	9.49	7.49	4.49	4.41	23.8
2000	0.2	0.87	0.23	0.61	0.99	0.16	Herschel-Bulkley		17.24	11.74	9.41	6.16	1.66	1.74	23.3
4000	0.4	1.21	0.20	0.70	0.99	0.16	Herschel-Bulkley		25.57	17.57	13.57	8.49	2.08	2.07	23.3
6000	0.6	1.36	0.32	0.69	0.99	0.29	Herschel-Bulkley		39.98	25.65	19.57	12.24	2.83	2.58	23.4
8000	0.8	1.39	0.48	0.67	0.99	0.33	Herschel-Bulkley		52.81	34.07	26.07	16.41	3.66	2.99	23.4
10000	1.0	1.85	0.71	0.65	0.99	0.84	Herschel-Bulkley		66.73	43.65	33.49	21.16	4.41	3.74	23.3
15000	1.5	2.35	1.68	0.60	0.99	0.91	Herschel-Bulkley		108.22	72.73	56.48	36.07	6.49	5.33	23.4

**Πίνακας 8.15:** Ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων μπεντονίτη 3% (w/v) 1000 ml – CMC.

#### 8.4.2. Ρεολογία πολφών μπεντονίτη 4% (w/v) σε συνδυασμό με CMC.

Στη συνέχεια μελετήθηκε η επίδραση της προσθήκης πολυμερούς CMC, στην ρεολογία πολφών μπεντονίτη με περιεκτικότητα 4% (w/v). Παρασκευάστηκε σειρά διαλυμάτων με διαφορετικές περιεκτικότητες CMC. Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων και της επεξεργασίας αυτών παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.16 και στο διάγραμμα μεταβολής των ρεολογικών παραμέτρων συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης CMC (Διάγραμμα 8.14).



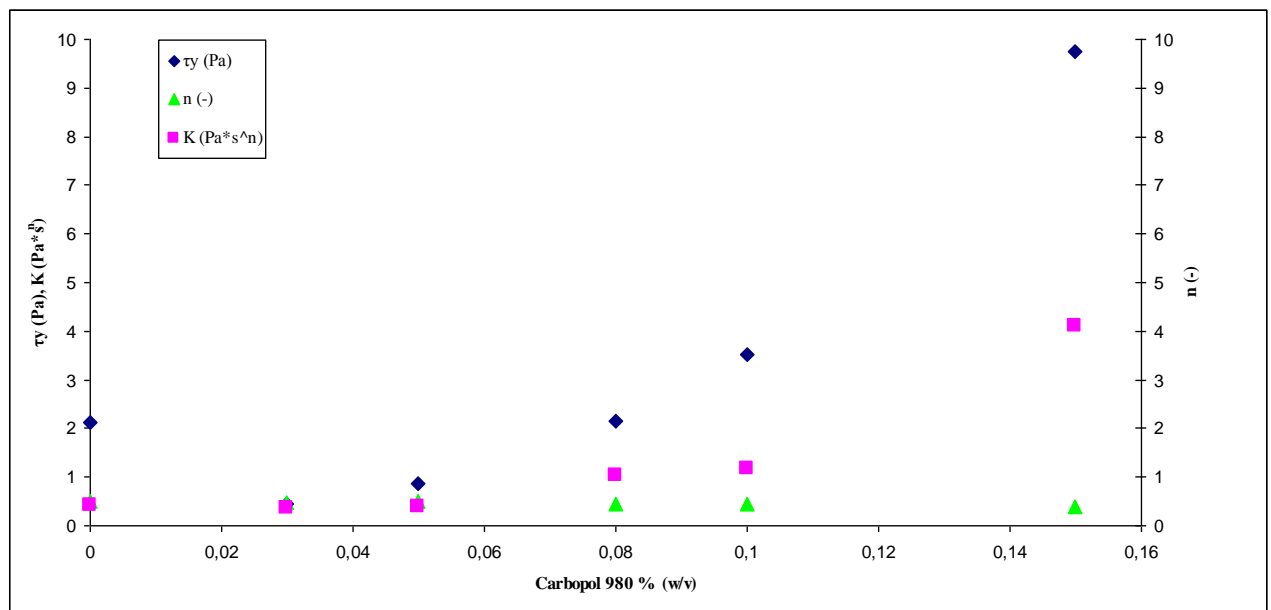
**Διάγραμμα 8.14:** Μεταβολή παραμέτρων  $\tau_y$  (Pa),  $K$  (Pa·s<sup>n</sup>) και  $n$  (-) για πολφούς μπεντονίτη 4% (w/v) 1000 ml νερό – CMC.

Τύπος οργάνου: Grace Instruments M3500a								Θερμοκρασία Περιβάλλοντος (°C): 23.2							Θερμοκρασία (°C)
Ταυτότητα δείγματος: Μπεντονίτης Wyoming 4% (w/v)								Shear Rate (sec <sup>-1</sup> )							
Ποσότητα δείγματος (ml): 1000				Πολυμερές: CMC											
CMC (ppm)	CMC % (w/v)	τ <sub>y</sub> (Pa)	K (Pa·s <sup>n</sup> )	n (-)	R <sub>c</sub> <sup>2</sup> (-)	Sum(Q) (Pa <sup>2</sup> )	Είδος ρευστού		1021.38	510.69	340.46	170.23	10.21	5.10	
0	0	3.51	0.34	0.48	0.99	0.17	Herschel-Bulkley	Shear Stress (Pa)	13.49	10.99	9.49	7.49	4.49	4.41	23.8
2000	0.2	1.16	0.22	0.64	0.99	0.02	Herschel-Bulkley		21.24	13.91	11.08	7.49	2.08	1.91	23.8
5000	0.5	1.94	0.34	0.67	0.99	0.19	Herschel-Bulkley		39.40	25.65	19.91	12.82	3.49	3.16	23.9
10000	1.0	2.31	0.78	0.65	0.99	0.99	Herschel-Bulkley		75.97	49.73	38.48	24.49	5.66	4.99	23.9

**Πίνακας 8.16 :** Ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων μπεντονίτη 4% w/v 1000 ml νερό- CMC.

#### 8.4.3. Ρεολογία πολφών μπεντονίτη 3% (w/v) σε συνδυασμό με Carbopol 980.

Επίσης μελετήθηκε η επίδραση της προσθήκης πολυμερούς Carbopol 980, στην ρεολογία πολφών μπεντονίτη με περιεκτικότητα 3% (w/v). Παρασκευάστηκε σειρά διαλυμάτων με διάφορες περιεκτικότητες Carbopol 980. Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων και της επεξεργασίας τους δίνεται στον Πίνακα 8.17, και στο διάγραμμα μεταβολής των ρεολογικών παραμέτρων συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης Carbopol 980 (Διάγραμμα 8.15).



**Διάγραμμα 8.15:** Μεταβολή παραμέτρων  $\tau_y$  (Pa),  $K$  (Pa·s<sup>n</sup>) και  $n$  (-) για πολφούς μπεντονίτη 3% (w/v) 1000 ml νερό – Carbopol 980.

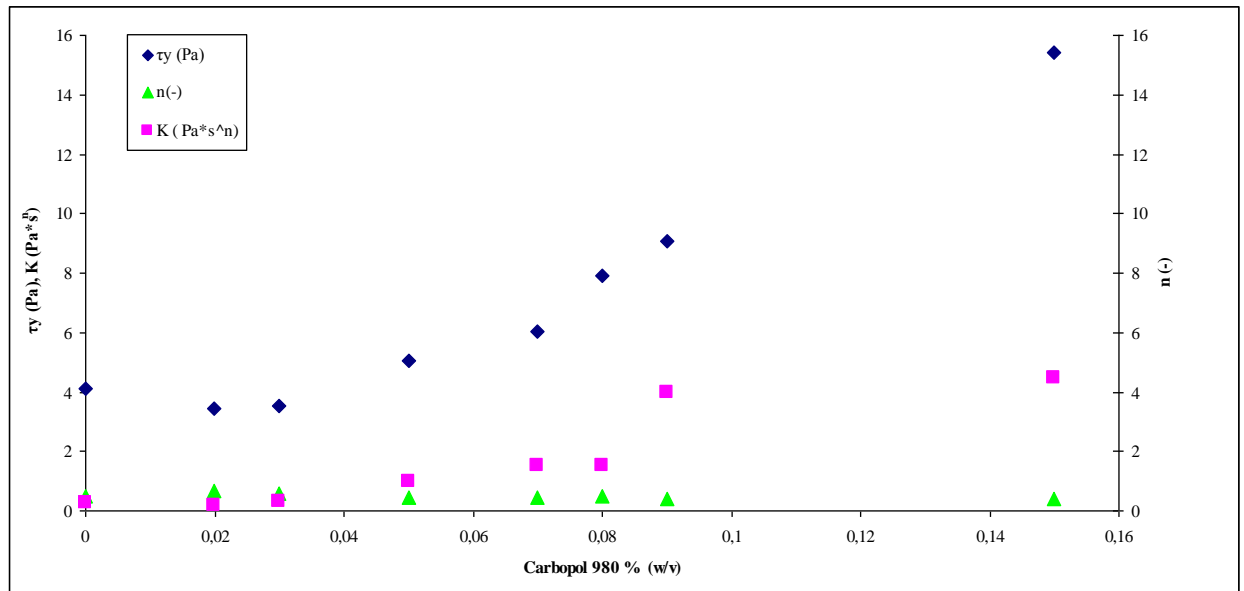


Τύπος οργάνου: Grace Instruments M3500a								Θερμοκρασία Περιβάλλοντος (°C): 19.2							Θερμοκρασία (°C)
Ταυτότητα δείγματος: Μπεντονίτης Wyoming 3% (w/v)								Shear Rate (sec <sup>-1</sup> )							
Ποσότητα δείγματος (ml): 1000				Πολυμερές: Carbopol 980											
Carbopol (ppm)	Carbopol % (w/v)	τ <sub>y</sub> (Pa)	K (Pa·s <sup>n</sup> )	n (-)	R <sub>c</sub> <sup>2</sup> (-)	Sum(Q) (Pa <sup>2</sup> )	Είδος ρευστού		1021.38	510.69	340.46	170.23	10.21	5.10	
0	0	2.11	0.41	0.50	0.99	0.32	Herschel-Bulkley	Shear Stress (Pa)	15.49	11.83	9.91	7.49	3.08	4.41	18.3
300	0.03	0.46	0.35	0.48	0.99	0.07	Herschel-Bulkley		10.33	7.74	6.41	4.49	1.49	1.33	20.5
500	0.05	0.87	0.38	0.51	0.99	0.13	Herschel-Bulkley		14.49	15.58	8.66	6.24	1.91	1.99	20.7
800	0.08	2.15	1.03	0.45	0.99	0.09	Herschel-Bulkley		25.90	19.49	16.74	12.66	4.91	4.49	20.5
1000	0.10	3.52	1.16	0.46	0.99	0.24	Herschel-Bulkley		33.07	25.07	21.41	16.24	6.66	6.33	21.1
1500	0.15	9.75	4.10	0.38	0.99	0.54	Herschel-Bulkley		70.89	57.23	49.73	40.23	19.82	17.91	20.5

**Πίνακας 8.17 :** Ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων μπεντονίτη 3% w/v 1000 ml – Carbopol 980.

#### 8.4.4. Ρεολογία πολφών μπεντονίτη 4% (w/v) σε συνδυασμό με Carbopol 980.

Κατόπιν μελετήθηκε η επίδραση της προσθήκης πολυμερούς Carbopol 980, στην ρεολογία πολφών μπεντονίτη με περιεκτικότητα 4% (w/v). Παρασκευάστηκε σειρά διαλυμάτων με διάφορες περιεκτικότητες Carbopol 980. Η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων και της επεξεργασίας αυτών γίνεται στον Πίνακα 8.18 και στο διάγραμμα μεταβολής των ρεολογικών παραμέτρων συναρτήσει της μεταβολής της συγκέντρωσης Carbopol 980 (διάγραμμα 8.16).



**Διάγραμμα 8.16:** Μεταβολή παραμέτρων  $\tau_y$  (Pa),  $K$  (Pa·s<sup>n</sup>) και  $n$  (-) για πολφούς μπεντονίτη 4% (w/v) 1000 ml – Carbopol 980.

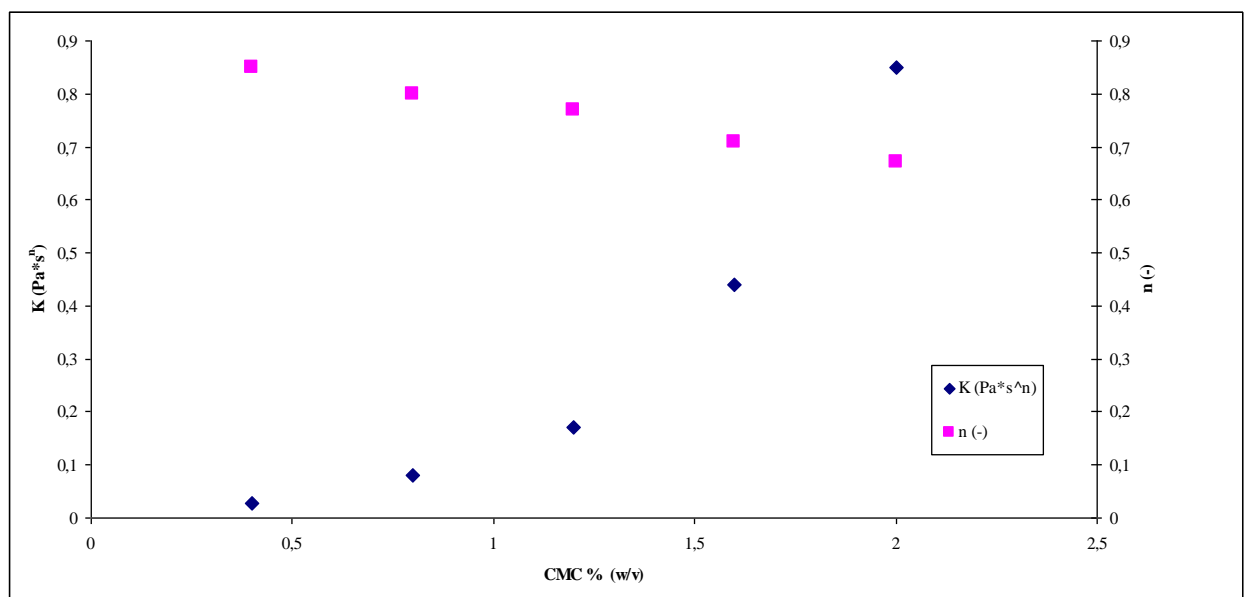
Τύπος οργάνου: Grace Instruments M3500a								Θερμοκρασία Περιβάλλοντος (°C): 23.2							Θερμοκρασία (°C)
Ταυτότητα δείγματος: Μπεντονίτης Wyoming 4% (w/v)								Shear Rate (sec <sup>-1</sup> )							
Ποσότητα δείγματος (ml): 1000				Πολυμερές: Carbopol 980											
Carbopol (ppm)	Carbopol % (w/v)	τ <sub>y</sub> (Pa)	K (Pa·s <sup>n</sup> )	n (-)	R <sub>c</sub> <sup>2</sup> (-)	Sum(Q) (Pa <sup>2</sup> )	Είδος ρευστού		1021.38	510.69	340.46	170.23	10.21	5.10	
0	0	4.12	0.29	0.51	0.99	0.07	Herschel-Bulkley	Shear Stress (Pa)	14.32	11.49	9.99	8.08	4.99	4.91	23.3
200	0.02	3.42	0.17	0.65	0.99	0.93	Herschel-Bulkley		26.74	20.99	18.32	15.16	10.33	11.33	22.0
300	0.03	3.55	0.31	0.58	0.98	3.04	Herschel-Bulkley		31.32	24.74	21.82	17.66	8.24	10.24	22.1
500	0.05	5.05	0.98	0.46	0.98	4.01	Herschel-Bulkley		32.24	26.65	23.91	20.49	14.24	16.24	22.1
700	0.07	6.05	1.54	0.43	0.99	1.28	Herschel-Bulkley		32.57	28.26	25.80	24.48	19.56	18.20	23.8
800	0.08	7.93	1.54	0.48	0.99	2.16	Herschel-Bulkley		38.40	32.20	29.45	26.47	21.08	15.30	24.2
900	0.09	9.07	3.99	0.38	0.99	1.13	Herschel-Bulkley		51.65	40.48	34.65	26.74	11.08	9.99	23.9
1500	0.15	15.4	4.46	0.41	0.99	1.15	Herschel-Bulkley		96.22	76.89	66.24	53.40	26.90	24.74	22.2

**Πίνακας 8.18:** Ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων μπεντονίτη 4% w/v 1000 ml νερό – Carbopol 980.

#### 8.4.5. Ρεολογικά χαρακτηριστικά διαλυμάτων CMC.

Κατόπιν μελετηθήκαν τα ρεολογικά χαρακτηριστικά διαλυμάτων CMC χωρίς την παρουσία μπεντονίτη. Σκοπός είναι η κατανόηση των ρεολογικών παραμέτρων του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς για να γίνει ο κατάλληλος συσχετισμός με τα δείγματα τα οποία έχουν μετρηθεί μέχρι τώρα.

Για την παρασκευή των διαλυμάτων χρησιμοποιήθηκε απιονισμένο νερό, ενώ η επεξεργασία των αποτελεσμάτων έγινε με εφαρμογή του ρεολογικού μοντέλου Power Law, το οποίο εκφράζει πιο αξιόπιστα τη ρεολογική συμπεριφορά του συγκεκριμένου πολυμερούς. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των ρεολογικών παραμέτρων, (Πίνακας 8.19) και γίνεται γραφική αναπαράσταση των κυριότερων δεδομένων (Διάγραμμα 8.17) για τα δείγματα τα οποία μελετηθήκαν.



**Διάγραμμα 8.17:** Μεταβολή παραμέτρων  $K$  (Pa·s<sup>n</sup>) και  $n$  (-) για διαλύματα CMC (500 ml νερό).

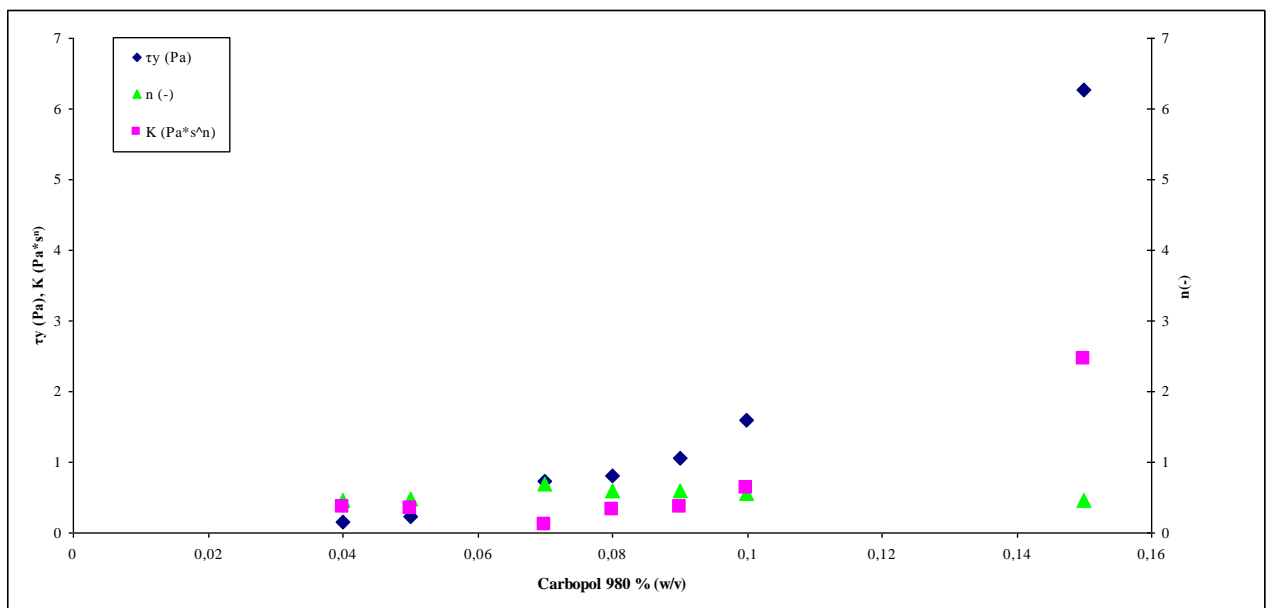
Τύπος οργάνου: Grace Instruments M3500a								Θερμοκρασία Περιβάλλοντος (°C): 21.8							Θερμοκρασία (°C)
Ταυτότητα δειγματος: Carboxymethylcellulose (CMC)								Shear Rate (sec <sup>-1</sup> )							
Ποσότητα δειγματος (ml): 500															
CMC (ppm)	CMC %(w/v)	τ <sub>y</sub> (Pa)	K (Pa·s <sup>n</sup> )	n (-)	R <sub>c</sub> <sup>2</sup> (-)	Sum(Q) ( Pa <sup>2</sup> )	Είδος ρευστού:		1021.38	510.69	340.46	170.23	10.21	5.10	
4000	0.4	-	0.027	0.85	0.99	0.33	Power Law	Shear Stress (Pa)	10.49	5.99	4.08	1.99	0.49	0.41	23.8
8000	0.8	-	0.081	0.80	0.99	0.15	Power Law		22.32	12.99	9.24	4.99	0.49	0.42	23.9
12000	1.2	-	0.17	0.77	0.99	0.72	Power Law		38.40	22.99	16.57	9.08	0.66	0.49	23.5
16000	1.6	-	0.44	0.71	0.99	3.13	Power Law		61.81	38.98	28.99	16.49	1.49	0.99	23.3
20000	2	-	0.85	0.67	0.99	8.24	Power Law		89.47	57.98	43.98	26.07	2.41	1.41	23.3
30000	3	-	3.06	0.59	0.99	95.57	Power Law		190.86	132.21	103.47	65.23	6.33	3.33	23.2

Πίνακας 8.19: Ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων CMC (500 ml νερό).

#### 8.4.6. Ρεολογικά χαρακτηριστικά διαλυμάτων Carborol 980.

Επίσης μελετηθήκαν τα ρεολογικά χαρακτηριστικά διαλυμάτων Carborol 980 χωρίς την παρουσία μπεντονίτη. Σκοπός είναι η κατανόηση των ρεολογικών παραμέτρων του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς για να γίνει ο κατάλληλος συσχετισμός με τα δείγματα τα οποία έχουν μετρηθεί μέχρι τώρα.

Τα δείγματα τα οποία μελετηθήκαν είχαν παρασκευαστεί για τον προσδιορισμό των πρότυπων καμπύλων προσρόφησης. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των ρεολογικών παραμέτρων, (Πίνακας 8.20) και γίνεται γραφική αναπαράσταση των κυριότερων δεδομένων (Διάγραμμα 8.18) για τα δείγματα τα οποία μελετήθηκαν.



**Διάγραμμα 8.18:** Μεταβολή παραμέτρων  $\tau_y$  (Pa),  $K$  (Pa·s<sup>n</sup>) και  $n$  (-) για διαλύματα Carborol 980 (500ml).

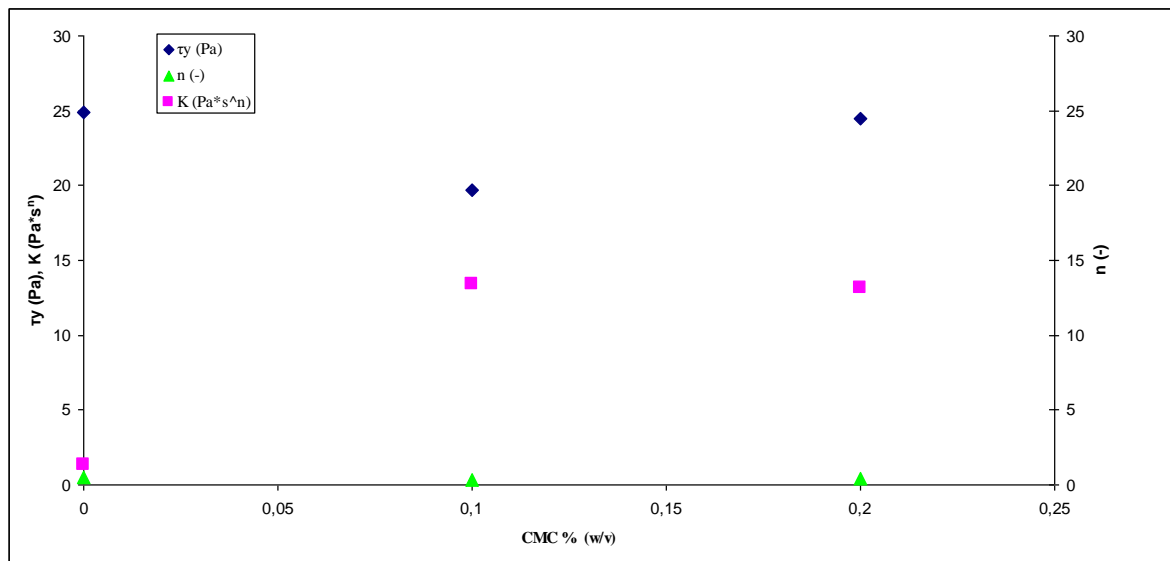
Τύπος οργάνου: Grace Instruments M3500a								Θερμοκρασία Περιβάλλοντος (°C): 22.5							Θερμοκρασία (°C)
Ταυτότητα δείγματος: Carbopol 980								Shear Rate (sec <sup>-1</sup> )							
Ποσότητα δείγματος (ml): 500															
Carbopol (ppm)	Carbopol % (w/v)	τ <sub>y</sub> (Pa)	K (Pa·s <sup>n</sup> )	n (-)	R <sub>c</sub> <sup>2</sup> (-)	Sum(Q) (Pa <sup>2</sup> )	Είδος ρευστού		1021.38	510.69	340.46	170.23	10.21	5.10	
400	0.04	0.15	0.36	0.47	0.99	0.08	Herschel-Bulkley	Shear Stress (Pa)	10.01	7.44	6.11	4.19	1.19	1.03	22.7
500	0.05	0.24	0.35	0.48	0.99	0.07	Herschel-Bulkley		10.10	7.50	6.18	4.25	1.27	1.09	18.9
700	0.07	0.73	0.11	0.70	0.99	0.01	Herschel-Bulkley		15.74	9.99	7.58	4.99	1.24	1.16	18.9
800	0.08	0.81	0.32	0.59	0.99	0.10	Herschel-Bulkley		21.24	14.49	11.24	7.48	1.74	1.49	22.8
900	0.09	1.05	0.36	0.60	0.99	0.08	Herschel-Bulkley		24.82	16.57	12.99	8.58	1.74	1.58	18.9
1000	0.1	1.59	0.64	0.55	0.99	0.04	Herschel-Bulkley		31.90	22.41	17.99	12.74	3.99	3.16	19.0
1500	0.15	6.27	2.46	0.47	0.99	0.11	Herschel-Bulkley		70.81	53.15	44.98	33.90	13.66	11.58	22.8

**Πίνακας 8.20:** Ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων Carbopol 980 (500 ml).

#### 8.4.7. Επίδραση προσθήκης NaCl στις ρεολογικές ιδιότητες πολφών μπεντονίτη - CMC.

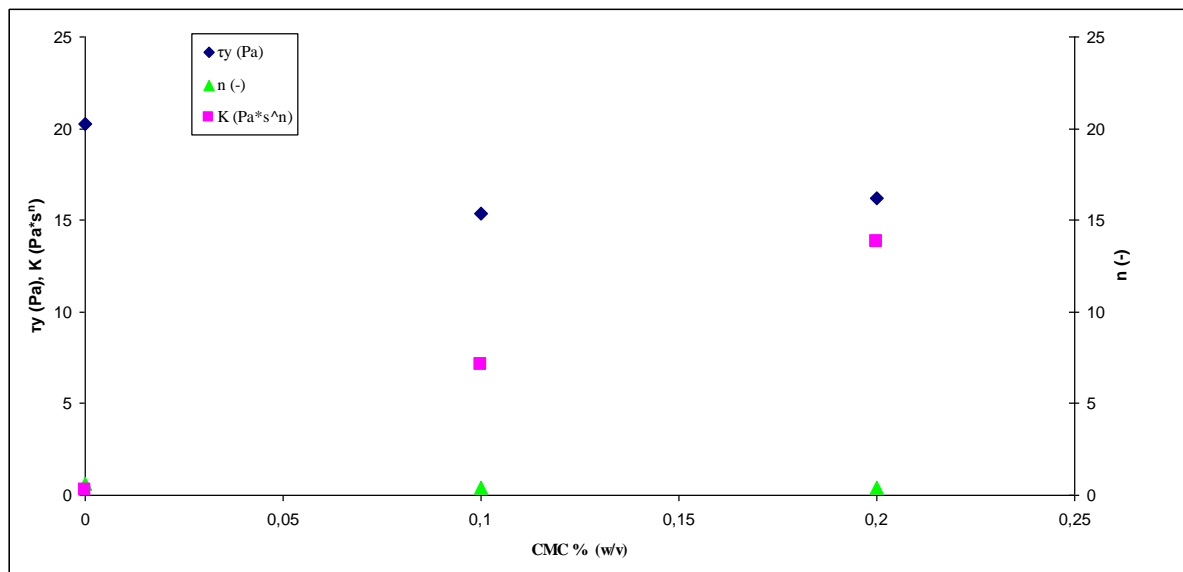
Σε πολλές περιπτώσεις στις γεωτρήσεις πετρελαίου κρίνεται αναγκαία η χρήση θαλασσινού νερού ως βάση για την δημιουργία πολφών γεώτρησης. Ως εκ τούτου, πραγματοποιήθηκαν πειράματα με χρήση νερού με περιεκτικότητα σε NaCl 0.01 και 0.1, με σκοπό να μελετηθούν οι επιδράσεις που έχει στις ρεολογικές ιδιότητες πολφών μπεντονίτη σε συνδυασμό με το πολυμερές CMC.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν με μπεντονίτη 6.42% (Πίνακας 8.21) και τα αντίστοιχα διαγράμματα των κυριότερων ρεολογικών παραμέτρων (Διαγράμματα 8.19, 8.20 και 8.21).

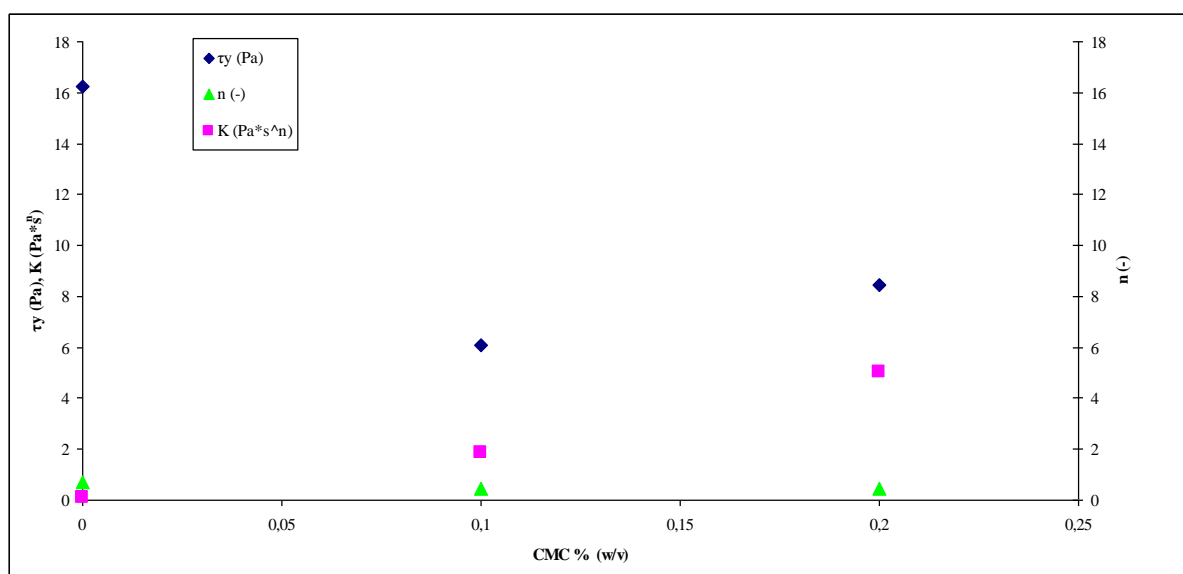


**Διάγραμμα 8.19:** Επίδραση προσθήκης CMC στις ρεολογικές παραμέτρους πολφών μπεντονίτη 6.42% (w/v) (NaCl 0M).





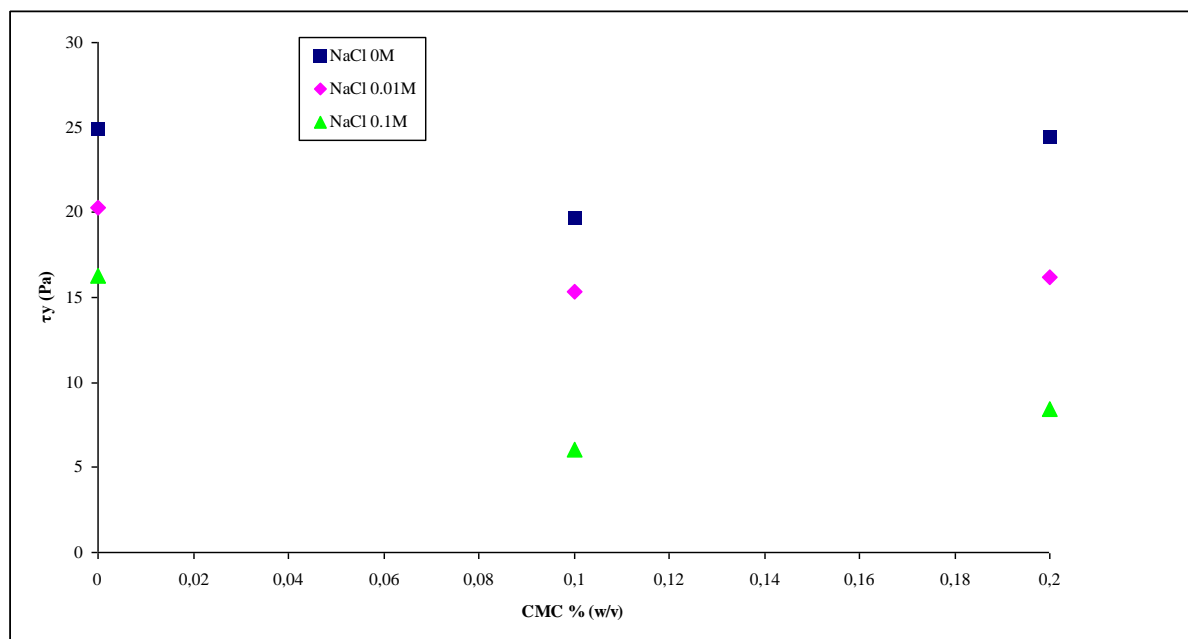
**Διάγραμμα 8.20:** Επίδραση προσθήκης NaCl 0.01M, στις ρεολογικές παραμέτρους πολφών μπεντονίτη 6.42%(w/v) - CMC.



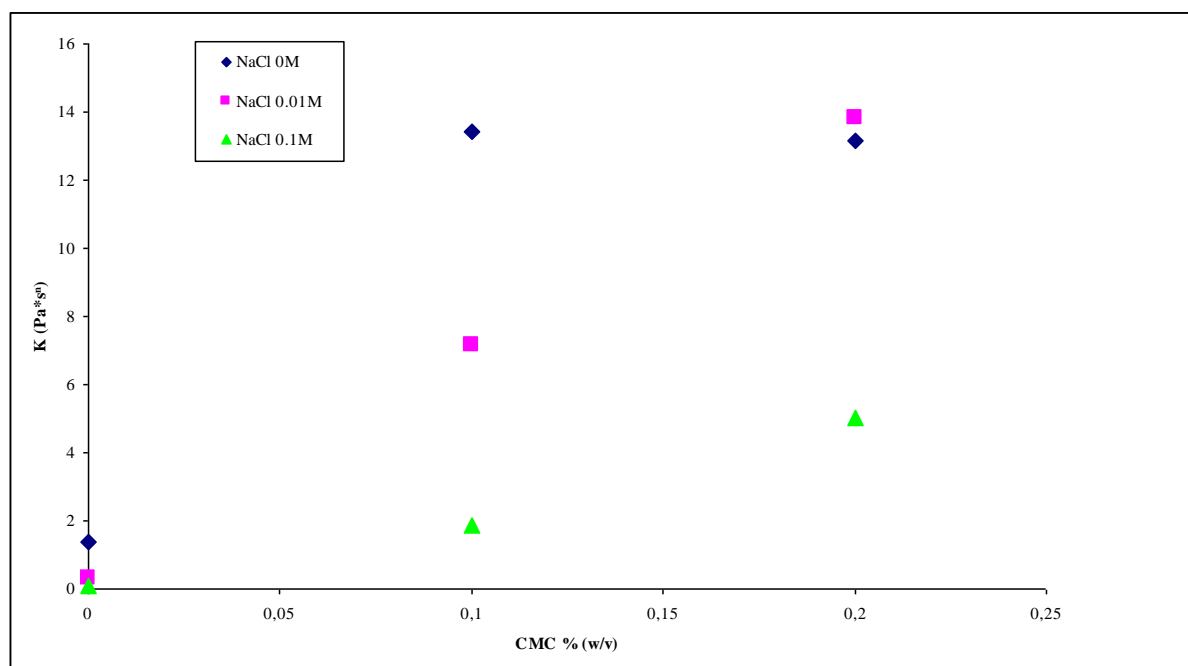
**Διάγραμμα 8.21:** Επίδραση προσθήκης NaCl 0.1M, στις ρεολογικές παραμέτρους πολφών μπεντονίτη 6.42%(w/v) - CMC.

Τύπος οργάνου: Grace Instruments M3500a								Θερμοκρασία Περιβάλλοντος (°C): 23.9							Θερμοκρασία (°C)
Ταυτότητα δείγματος: Μπεντονίτης Wyoming 6.42% (w/v)								Shear Rate (sec <sup>-1</sup> )							
Ποσότητα δείγματος (ml): 500															
NaCl (M )	CMC %(w/v)	τ <sub>y</sub> (Pa)	K (Pa·s <sup>n</sup> )	n (-)	R <sub>c</sub> <sup>2</sup> (-)	Sum(Q) ( Pa²)	Είδος ρευστού		1021.38	510.69	340.46	170.23	10.21	5.10	
0	0	24.92	1.36	0.47	0.99	2.86	Herschel-Bulkley	Shear Stress (Pa)	62.60	52.40	47.60	40.90	27.90	29.00	25.0
0	0.1	19.67	13.42	0.33	0.98	163.34	Herschel-Bulkley		162.50	128.50	110.60	86.60	50.60	49.10	25.6
0	0.2	24.48	13.15	0.41	0.99	83.72	Herschel-Bulkley		258.00	200.90	169.90	127.60	57.60	54.60	25.1
0.01	0	20.28	0.31	0.64	0.99	3.42	Herschel-Bulkley		45.61	37.45	33.65	28.68	20.31	22.41	25.6
0.01	0.1	15.37	7.14	0.40	0.98	97.12	Herschel-Bulkley		148.55	112.41	96.74	75.60	43.45	41.74	25.6
0.01	0.2	16.22	13.82	0.39	0.99	188.6	Herschel-Bulkley		238.54	179.63	151.51	113.32	50.81	48.41	25.7
0.1	0	16.25	0.08	0.68	0.99	0.36	Herschel-Bulkley		26.32	22.45	21.17	19.47	16.22	16.90	25.6
0.1	0.1	6.094	1.88	0.46	0.99	2.71	Herschel-Bulkley		54.23	41.28	35.55	26.78	10.61	11.22	25.6
0.1	0.2	8.43	5.04	0.47	0.99	13.04	Herschel-Bulkley		147.00	110.32	91.78	65.74	22.36	21.19	25.8

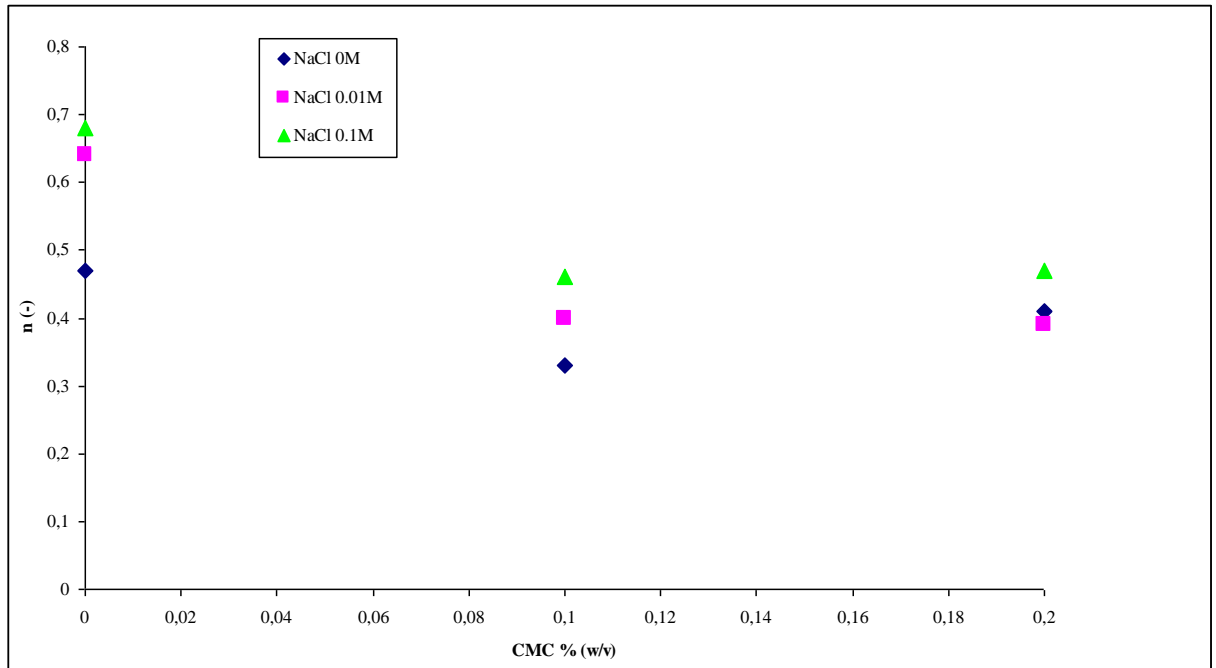
**Πίνακας 8.20:** Ρεολογικά χαρακτηριστικά δειγμάτων μπεντονίτη 6.42% (w/v 500 ml) – CMC – NaCl.



**Διάγραμμα 8.22:** Επίδραση προσθήκης NaCl και CMC στην τάση διολίσθησης,  $\tau_y$  (Pa), πολφών μπεντονίτη 6.42% (w/v).



**Διάγραμμα 8.23:** Επίδραση προσθήκης NaCl και CMC στον δείκτη συνάφειας,  $K$  (Pa·s<sup>n</sup>), πολφών μπεντονίτη 6.42% (w/v).



**Διάγραμμα 8.24:** Επίδραση προσθήκης NaCl και CMC στον συντελεστή ροής,  $n$  (-), πολφών μπεντονίτη 6.42% (w/v).

### 8.5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΣΤΟ pH ΠΟΛΦΩΝ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ.

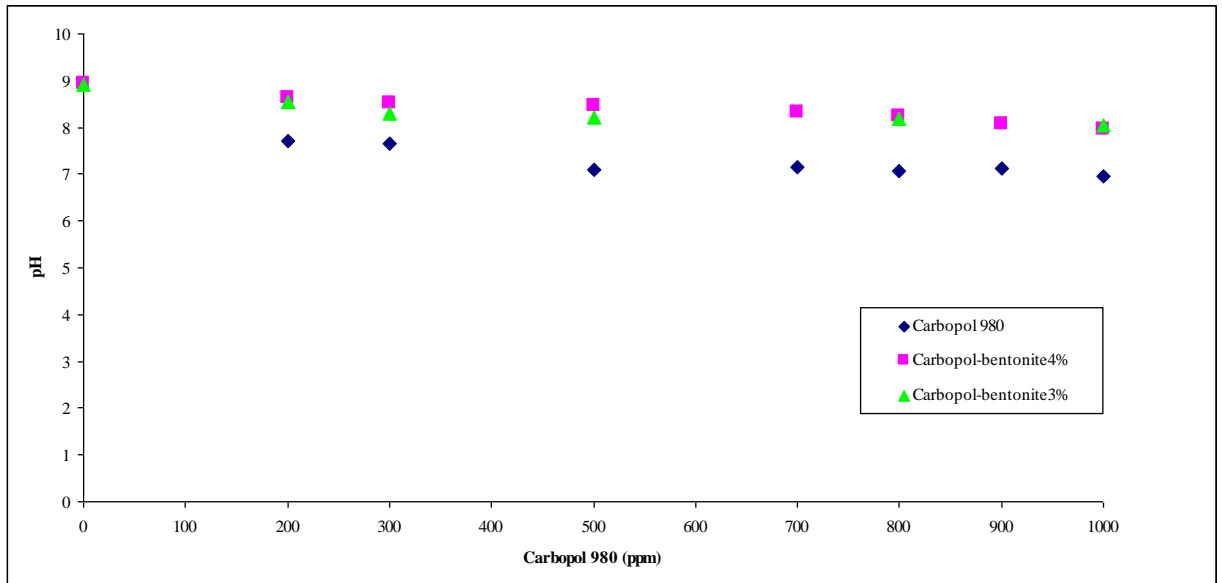
Καθ' όλη την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας μετρήθηκε το pH των διαλυμάτων που παρασκευάστηκαν, καθώς και η μεταβολή του μετά από την προσθήκη του κάθε πολυμερούς. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων με τις μεταβολές του pH για κάθε διαφορετική περιεκτικότητα πολυμερούς.

Ταυτότητα δείγματος: Μπεντονίτης Wyoming 4% (w/v)		Θερμοκρασία : 24.4 °C	
Carbopol 980 (%, w/v)	NaOH (ml)	pH (Πριν την ανάμιξη)	pH (Μετά την ανάμιξη)
0	0	-	8.94
0.02	0.17	7.72	8.63
0.03	0.25	7.65	8.51
0.05	0.80	7.10	8.47
0.07	1.05	7.15	8.32
0.08	1.20	7.08	8.24
0.09	1.50	7.12	8.08
0.10	1.80	6.95	7.95

**Πίνακας 8.22:** Επίδραση προσθήκης Carbopol 980 στο pH πολφών μπεντονίτη περιεκτικότητας 4% (w/v) 1000ml νερό.

Ταυτότητα δείγματος: Μπεντονίτης Wyoming 3% (w/v)		Θερμοκρασία : 23.4 °C	
Carbopol 980 (%, w/v)	NaOH (ml)	pH (Πριν την ανάμιξη)	pH (Μετά την ανάμιξη)
0	0	-	8.90
0.02	0.17	7.75	8.55
0.03	0.25	7.58	8.31
0.05	0.8	7.32	8.22
0.08	1.2	7.15	8.18
0.1	1.8	7.09	8.05

**Πίνακας 8.23:** Επίδραση προσθήκης Carbopol 980 στο pH πολφών μπεντονίτη περιεκτικότητας 3% (w/v) 1000 ml νερό.



**Διάγραμμα 8.25:** Μεταβολή pH σε πολφούς μπεντονίτη – Carbopol 980.

Ταυτότητα δείγματος: Μπεντονίτης Wyoming 6.42% (w/v)		Θερμοκρασία : 22.5 °C
CMC % (w/v)	NaCl (M)	Μέτρηση pH
0.0	0	8.61
0.1	0	8.52
0.2	0	8.38
0.5	0	8.32
0.0	0.01	8.52
0.1	0.01	8.22
0.2	0.01	8.68
0.5	0.01	8.52
0.0	0.1	8.32
0.1	0.1	8.45
0.2	0.1	8.28
0.5	0.1	8.44

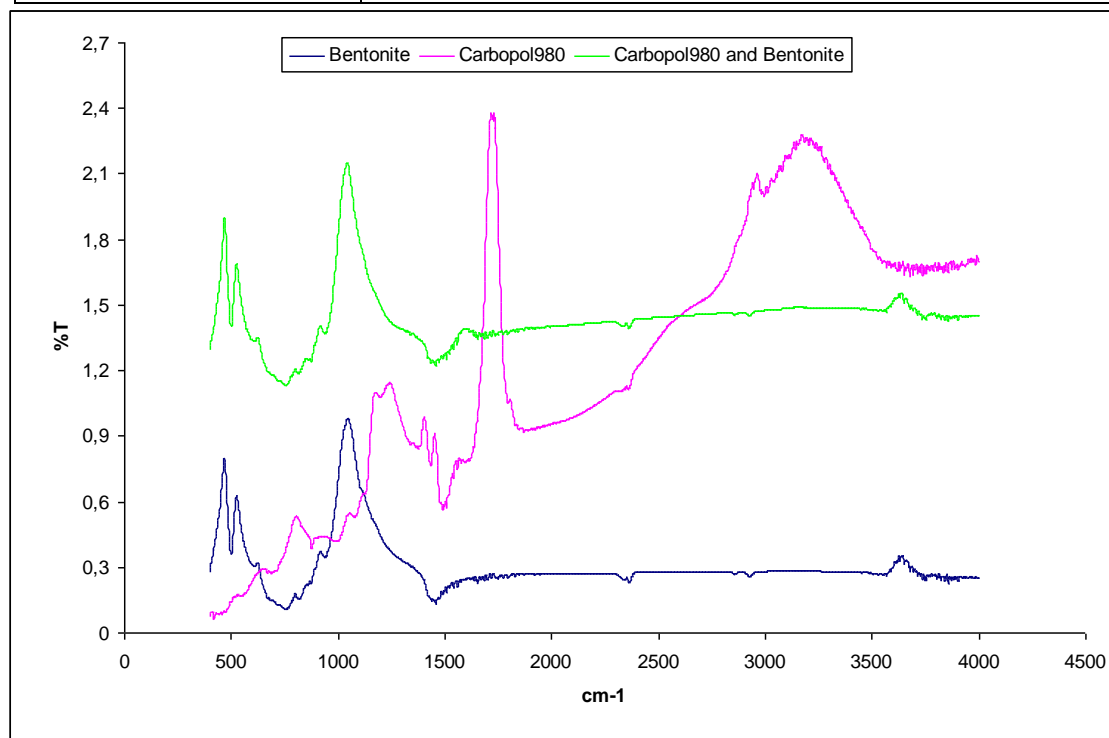
**Πίνακας 8.21:** Επίδραση προσθήκης CMC και NaCl στο pH πολφών μπεντονίτη περιεκτικότητας 6.42% (w/v) 500ml νερό.

## 8.6. ΥΠΕΡΥΘΡΗ ΦΑΣΜΑΤΟΦΩΤΟΜΕΤΡΙΑ (FT-IR)

Για τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε φασματοφωτόμετρο υπερύθρου Fourier Transform της Perkin - Elmer model 1000 και τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα Spectrum 1000. Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν παρουσιάζονται παρακάτω.

**Πίνακας 8.25:** Ανάλυση ταινιών απορρόφησης του δείγματος μπεντονίτη.

3620	Έκταση ΟΗ σε αργιλιούχο σμεκτίτη
1035	Έκταση Si-O
925	Παραμόρφωση AlAlOH
832	Παραμόρφωση AlMgOH
786	Παραμόρφωση AlMgOH
635	Al- σμεκτίτης
518	Al-O-Si
459	Si-O-Si



**Διάγραμμα 8.26:** Διάγραμμα Φασματοφωτομετρίας αρχικού δείγματος μπεντονίτη και δείγματος με προσθήκη Carbopol 980 συγκέντρωσης 0.1% (w/v).

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι σε όλα τα δείγματα εμφανίζεται παρόμοια συμπεριφορά . Συγκρίνοντας και τα δύο δείγματα με και χωρίς την προσθήκη Carborol 980, συμπεραίνουμε ότι δεν υπάρχει κάποια περιοχή απορρόφησης η οποία να τα διαφοροποιεί. Από το γεγονός αυτό, καταλαβαίνουμε, ότι δεν υπάρχουν χημικοί δεσμοί μεταξύ Carborol 980 και μπεντονίτη.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9      ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.**

### **9.1. ΓΕΝΙΚΑ.**

Στο παρόν κεφάλαιο της εργασίας θα γίνει αναλυτική ερμηνεία των αποτελεσμάτων της προσρόφησης πολυμερών σε πολφούς μπεντονίτη, τα οποία προέκυψαν κατά την πειραματική διαδικασία. Τα χρησιμοποιηθέντα πολυμερή είναι το CMC και το Carbopol 980, ενώ ο μπεντονίτης που διαλέχτηκε για να αποτελέσει την βάση του πολφού είναι τύπου Wyoming.

Στη συνέχεια θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν για πολφούς μπεντονίτη - CMC και μπεντονίτη - Carbopol 980 από την επεξεργασία των ρεολογικών μετρήσεων. Έπισης θα σχολιαστούν αποτελέσματα που αφορούν τα ρεολογικά χαρακτηριστικά διαλυμάτων πολυμερών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.

Επιπλέον, γίνεται αναφορά στην επίδραση που έχει στις ρεολογικές ιδιότητες η προσθήκη διαλυμάτων NaCl σε πολφούς μπεντονίτη - CMC. Ακόμα αναφέρονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν για τις μεταβολές του pH λόγω της προσθήκης πολυμερών και διαλυμάτων NaCl. Τέλος, παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις για την πειραματική διαδικασία, αλλά και μια επέκταση των πειραμάτων με στόχο την καλύτερη κατανόηση της ιδιότητας της προσρόφησης πολυμερών σε πολφούς μπεντονίτη.

### **9.2. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΡΟΦΗΣΗΣ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΣΕ ΠΟΛΦΟΥΣ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ.**

#### **9.2.1. Πρότυπη καμπύλη αναφοράς.**

Προτού ξεκινήσουμε την επεξεργασία των δεδομένων και τον υπολογισμό των προσροφημένων ppm του χρησιμοποιούμενου πολυμερούς, έπρεπε να

γίνει ο προσδιορισμός της πρότυπης καμπύλης. Το φασματοφωτόμετρο είναι ένα όργανο πολύ εύκολο στον χειρισμό καθώς το μόνο που απαιτεί είναι η τοποθέτηση του διαλύματος στον υποδοχέα, δίνοντας άμεση ένδειξη. Η πρότυπη καμπύλη εμφάνιζε μια κύρτωση. Συνεπώς για τις ανάγκες της επεξεργασίας χρησιμοποιήθηκε μόνο το ευθύγραμμο τμήμα της καμπύλης.

### **9.2.2. Προσρόφηση CMC σε πολφούς μπεντονίτη.**

Από τα κύρια τμήματα της εργασίας είναι η μελέτη της προσρόφησης του πολυμερούς CMC σε πολφούς μπεντονίτη. Αρχικά να σημειωθεί ότι η ανάμιξη του πολυμερούς έγινε σε προενυδατωμένο μπεντονίτη για να διασφαλιστεί η μέγιστη προσρόφηση.

Όσο αφορά το πειραματικό τμήμα παρατηρήθηκε ότι με τον υπάρχοντα εργαστηριακό εξοπλισμό δεν είναι δυνατή η μελέτη προσρόφησης CMC περιεκτικότητας 15000 ppm και άνω. Αυτό συμβαίνει λόγω αδυναμίας της φυγοκέντρου να απομακρύνει το σύνολο των στερεών από το διάλυμα, επηρεάζοντας την μέτρηση η οποία τελικώς απορρίφθηκε.

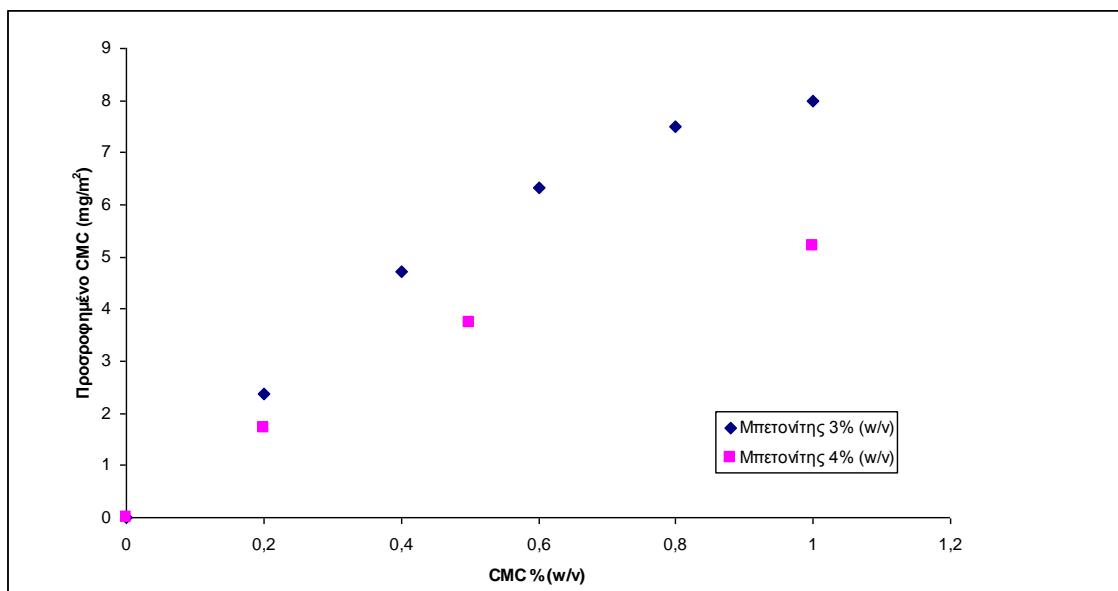
Όσο αφορά την προσρόφηση παρατηρήθηκε ότι σε μικρές περιεκτικότητες CMC εμφανίζεται αυξημένο ποσοστό προσρόφησης στο μπεντονίτη. Για τον λόγο αυτό το αρχικό τμήμα της καμπύλης προσρόφησης είναι σχεδόν γραμμικό. Τα προσροφημένα ppm του CMC αυξάνουν αναλογικά με την αύξηση της προστιθέμενης ποσότητας πολυμερούς. Στην συνέχεια όμως η προσρόφηση παρουσιάζει μια καμπή, κάτι που είναι απόλυτα φυσιολογικό. Οι εξισώσεις των ισόθερμων προσρόφησης υπολογίστηκαν με βάση το μοντέλο Freundlich (4.3.2.2).

Οι προσροφητικές ιδιότητες του μπεντονίτη έχουν κάποιο ανώτερο όριο, στο οποίο οποιαδήποτε προσθήκη επιπλέον ποσότητας πολυμερούς δεν προκαλεί αύξηση της προσρόφησης (η ισόθερμη προσρόφηση παίρνει την μορφή μιας οριζοντίου γραμμής), το οποίο όμως δεν προσδιορίστηκε στην πειραματική διαδικασία. Ο μη προσδιορισμός της μέγιστης δυνατότητας

προσρόφησης οφείλεται στους πειραματικούς περιορισμούς που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Ακόμα μελετήθηκε η δυνατότητα προσρόφησης του πολυμερούς CMC σε διαφορετικές περιεκτικότητες μπεντονίτη. Συγκεκριμένα στις δυο σειρές δειγμάτων που παρασκευάστηκαν με μπεντονίτη περιεκτικότητας 3 % και 4 % (w/v). Παρατηρήθηκε ότι η προσρόφηση ανά μονάδα μάζας μπεντονίτη είναι μεγαλύτερη στα δείγματα με περιεκτικότητα 3 % (w/v) από εκείνα με περιεκτικότητα 4 % (w/v). Αυτό συμβαίνει για τον απλό λόγο ότι αυξάνοντας την περιεκτικότητα μπεντονίτη σε κάθε δείγμα διατηρήθηκαν σταθερές οι συγκεντρώσεις του CMC. Επειδή η περιοχή μελέτης μας αντιστοιχεί σε περιεκτικότητες CMC για τις οποίες ο μπεντονίτης δεν είναι κορεσμένος, είναι φυσιολογικό η προσρόφηση ανά μονάδα μάζας μπεντονίτη να είναι μειωμένη.

Να σημειωθεί ότι για τις τιμές προσρόφησης που επιτεύχθηκαν χρησιμοποιήθηκε περίπου δεκαπλάσια ποσότητα CMC από εκείνη που χρησιμοποιήθηκε με πολυμερές Carborol 980 για επίτευξη αντιστοιχών τιμών. Παρακάτω παρουσιάζεται σχετικό διάγραμμα (9.1) με την σύγκριση της προσρόφησης για διαφορετικές περιεκτικότητες μπεντονίτη.



**Διάγραμμα 9.1:** Σύγκριση προσρόφησης CMC σε πολφούς μπεντονίτη περιεκτικότητων 3 και 4 % (w/v) 1000ml νερό.

### 9.2.3. Προσρόφηση Carborol 980 σε πολφούς μπεντονίτη.

Στο επόμενο τμήμα της εργασίας έγινε η μελέτη της προσρόφησης του πολυμερούς Carborol 980 σε πολφούς μπεντονίτη, χρησιμοποιώντας την ίδια διαδικασία με την μελέτη προσρόφησης του CMC. .

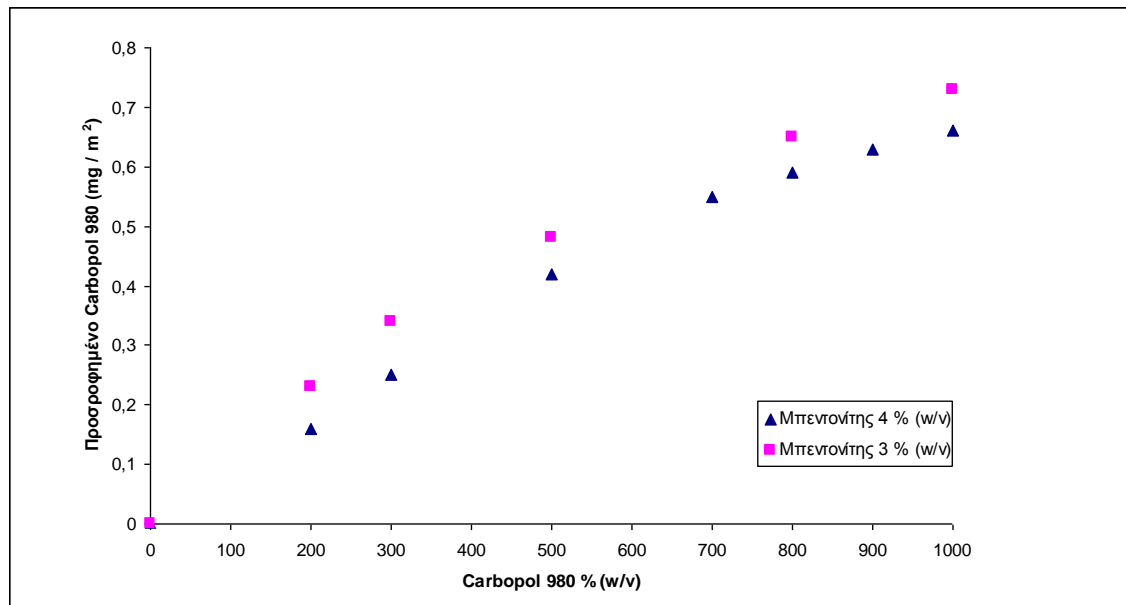
Παρατηρήθηκε ότι δεν είναι δυνατή η μελέτη προσρόφησης Carborol 980 περιεκτικότητας 1500 ppm και άνω για μπεντονίτη 4% (w/v). Αυτό συμβαίνει λόγω αδυναμίας της φυγοκέντρου να απομακρύνει το σύνολο των στερεών από το διάλυμα, επηρεάζοντας την μέτρηση, η οποία τελικώς απορρίφθηκε.

Για την προσρόφηση παρατηρήθηκε ότι οι μικρότερες περιεκτικότητες Carborol 980 εμφανίζουν αυξημένο ποσοστό προσρόφησης στο μπεντονίτη. Τα προσροφημένα ppm του Carborol 980 παρουσιάζουν αναλογική αύξηση με την προστιθέμενη ποσότητα πολυμερούς. Το αρχικό τμήμα της καμπύλης προσρόφησης και σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζει μια γραμμικότητα. Στην συνέχεια όμως η προσρόφηση παρουσιάζει και εδώ μια καμπή, κάτι που είναι απόλυτα φυσιολογικό για τους λόγους που αναφέραμε παραπάνω. Περαιτέρω αύξηση της περιεκτικότητας του Carborol 980 δεν προκαλεί αντίστοιχη αύξηση της προσρόφησης. Οι εξισώσεις των ισόθερμων προσρόφησης υπολογίστηκαν με βάση το μοντέλο Freundlich (4.3.2.2).

Η προσρόφηση του πολυμερούς Carborol 980 σε διαφορετικές περιεκτικότητες μπεντονίτη (3 και 4 % w/v), μας έδειξε και σε αυτή την περίπτωση ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι η προσρόφηση στην μονάδα μάζας μπεντονίτη είναι μεγαλύτερη στα δείγματα με περιεκτικότητα 3 %(w/v) από εκείνα με περιεκτικότητα 4 %(w/v).Επειδή η περιοχή μελέτης μας αντιστοιχεί σε περιεκτικότητες Carborol 980 για τις οποίες ο μπεντονίτης ο δεν είναι κορεσμένος είναι φυσιολογικό η προσρόφηση ανά μονάδα μάζας μπεντονίτη να είναι μειωμένη.

Να σημειωθεί ότι στα πειράματα προσρόφησης χρησιμοποιήθηκε πολύ λιγότερη ποσότητα Carborol 980 από εκείνη που χρησιμοποιήθηκε με πολυμερές CMC για επίτευξη της ίδιας περίπου προσρόφησης. Παρακάτω

παρουσιάζεται σχετικό διάγραμμα (9.2) με την σύγκριση της προσρόφησης για διαφορετικές περιεκτικότητες μπεντονίτη.



**Διάγραμμα 9.2:** Σύγκριση προσρόφησης Carborpol 980 σε πολφούς μπεντονίτη περιεκτικότητας 3 και 4 % (w/v) 1000ml.

#### 9.2.3.1. Σύγκριση των αποτελεσμάτων προσρόφησης με υπάρχουσες μελέτες.

Σύμφωνα με παρόμοια μελέτη των P.F. Luckham και S. Rossi τα αποτελέσματα των ισόθερμων προσρόφησης εμφανίζουν μεγάλες ομοιότητες με αυτά που παρουσιάζονται στην παρούσα μελέτη. Συγκεκριμένα στην αναφερόμενη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δείγματα μπεντονίτη συγκέντρωσης 1% (w/v) σε συνδυασμό με πολυμερή τύπου, PE και PEO. Η πειραματική διαδικασία είναι η ίδια που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία.

Στα αποτελέσματα η προσρόφηση αυξάνει ανάλογα με τη συγκέντρωση του πολυμερούς στο διάλυμα, ενώ και στις δυο περιπτώσεις η ισόθερμη καμπύλη είναι ευνοϊκή. Ακόμα εμφανίζεται ραγδαία αύξηση της προσρόφησης για όλους τους τύπους πολυμερών για τις χαμηλές συγκεντρώσεις δειγμάτων, όπως ακριβώς εμφανίζεται και για τα πολυμερή Carborpol980 και CMC.

### 9.3. ΡΕΟΛΟΓΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

#### 9.3.1. Συμπεράσματα για πολφούς CMC.

Από τα ρευστά που εξετάστηκαν, εξήχθησαν πολλά συμπεράσματα όσον αφορά αυτά που περιείχαν CMC. Το κυριότερο συμπέρασμα είναι ότι η παρασκευή ρευστού με την προσθήκη CMC, έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ρευστού Power Law, τουλάχιστον για τις συγκεντρώσεις που μελετήθηκαν. Το ρεολογικό μοντέλο Power Law δε χαρακτηρίζεται από τάση διολίσθησης,  $\tau_y$  (Pa). Παρόλα αυτά έγιναν σημαντικές παρατηρήσεις που αφορούν την μεταβολή των άλλων ρεολογικών παραμέτρων.

Συγκεκριμένα ο δείκτης συμπεριφοράς ροής η παρουσιάζει μια χαμηλού ρυθμού μείωση με αύξηση της περιεκτικότητας του CMC στον παραγόμενο πολφό. Ακόμα ο δείκτης συνάφειας,  $K$  ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ) εμφανίζει αύξηση με εκθετικούς ρυθμούς σε συνάρτηση με την αύξηση της περιεκτικότητας του CMC, κάτι που φαίνεται αναλυτικά στο διάγραμμα 8.17.

#### 9.3.2. Συμπεράσματα για πολφούς Carbopol 980

Από τα ρευστά που εξετάστηκαν, προέκυψαν πολλά συμπεράσματα για τα ρευστά Carbopol 980. Ένα από τα κυριότερα είναι πως διάλυμα με πολυμερές Carbopol 980 λειτουργεί ως ρευστό Herschel-Bulkley για τις συγκεντρώσεις τις οποίες παρασκευάστηκαν.

Όσο αφορά τις ρεολογικές παραμέτρους με βάση τα ρευστά τα οποία παρασκευάστηκαν οδηγούμαστε σε κάποια βασικά συμπεράσματα (Διάγραμμα 8.18). Τα κυριότερα είναι ότι η τάση διολίσθησης,  $\tau_y$  (Pa) όπως και ο δείκτης συνάφειας,  $K$  ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ) παρουσιάζουν εκθετική αύξηση με αύξηση της συγκέντρωσης του Carbopol 980 σε αντίθεση με τον δείκτη συμπεριφοράς ροής, ο οποίος παρουσιάζει αργή αλλά σταθερού ρυθμού μείωση συναρτήσει της αύξησης της συγκέντρωσης του Carbopol 980.

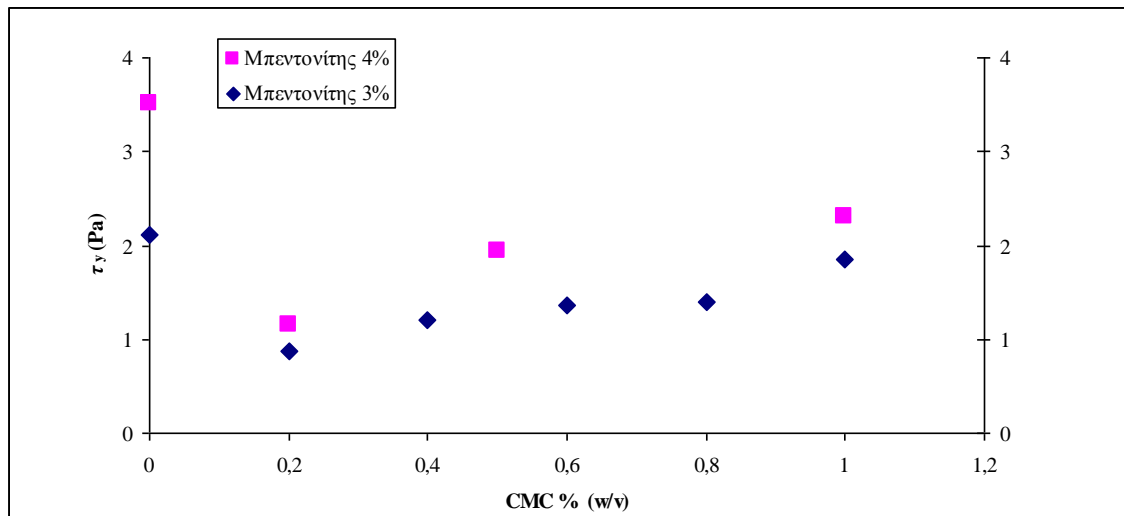
### 9.3.3. Συμπεράσματα για πολφούς μπεντονίτη – CMC.

Μια από τις πιο ουσιώδεις απαιτήσεις από τα ρευστά γεώτρησης είναι η εμφάνιση από το ρευστό τάσης διολίσθησης ικανής να απομακρύνει τα θραύσματα από τον δακτύλιο της γεώτρησης, αλλά και να τα αποτρέπει από το να καθιζάνουν σε περίπτωση διακοπής της διατρητικής διαδικασίας.

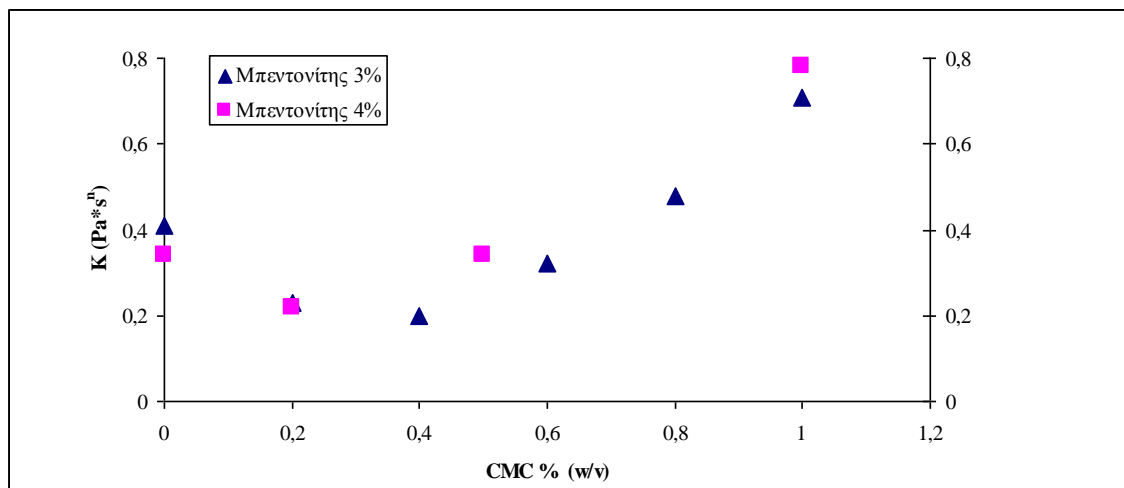
Στη συγκεκριμένη περίπτωση μελετήθηκε ο συνδυασμός πολφών μπεντονίτη – CMC με σκοπό την επίλυση τέτοιων προβλημάτων. Με βάση τα δεδομένα από τις μετρήσεις των ρεολογικών ιδιοτήτων των ρευστών, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι ρεολογικές ιδιότητες των ρευστών που μελετήθηκαν μεταβάλλονται ανάλογα με τις συγκεντρώσεις του μπεντονίτη και του CMC.
- Η αύξηση της συγκέντρωσης μπεντονίτη προκαλεί αύξηση της τάσης διολίσθησης,  $\tau_y$  στα ρευστά.
- Η προσθήκη CMC στα ρευστά μπεντονίτη προκαλεί αρχικά μείωση της τάσης διολίσθησης,  $\tau_y$  επειδή από μόνο του το CMC λειτουργεί ως ρευστό Power Law.
- Η περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης CMC προκαλεί αύξηση της τάσης διολίσθησης στο ρευστό.
- Ο δείκτης συνάφειας,  $K$  των ρευστών που παρήχθησαν αυξάνει αναλογικά με αύξηση της συγκέντρωσης του CMC.
- Ο δείκτης συμπεριφοράς ροής,  $n$  σε γενικές γραμμές παραμένει σταθερός και ανεπηρέαστος από τις μεταβολές στις συγκεντρώσεις μπεντονίτη – CMC.
- Τα τελικά δείγματα που παρασκευάστηκαν συμπεριφέρονται ως ρευστά Herschel-Bulkley.
- Τα συγκεκριμένα ρευστά είναι εύκολα ως προς την παρασκευή τους.
- Μπορούν να θεωρηθούν οικονομικά ρευστά διάτρησης αφού τα συστατικά παρασκευής είναι οικονομικά.

Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα μεταβολής ρεολογικών παραμέτρων για διάφορες συγκεντρώσεις CMC.

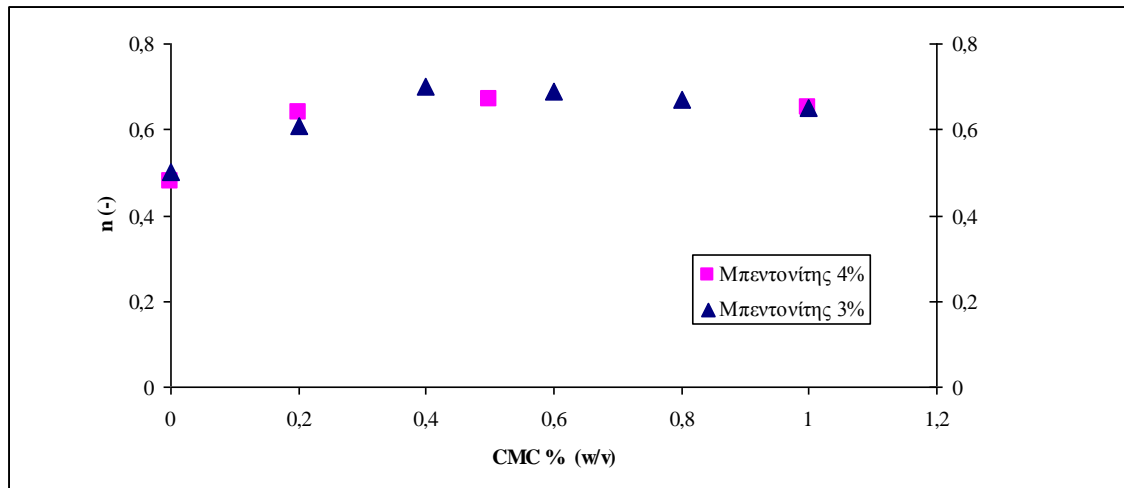


**Διάγραμμα 9.3:** Σύγκριση τάσης διολίσθησης,  $\tau_y$  (Pa) σε πολφούς CMC-μπεντονίτη περιεκτικότητας 3 και 4 % (w/v) 1000ml νερό.



**Διάγραμμα 9.4:** Σύγκριση δείκτη συνάφειας,  $K$  (Pa·s<sup>n</sup>), σε πολφούς CMC-μπεντονίτη περιεκτικότητας 3 και 4 % (w/v) 1000ml νερό.





**Διάγραμμα 9.5:** Σύγκριση συντελεστή ροής,  $n$  (-), σε πολφούς CMC- μπεντονίτη περιεκτικότητας 3 και 4 % (w/v) 1000ml νερό.

#### 9.3.4. Συμπεράσματα για πολφούς μπεντονίτη - Carborol 980.

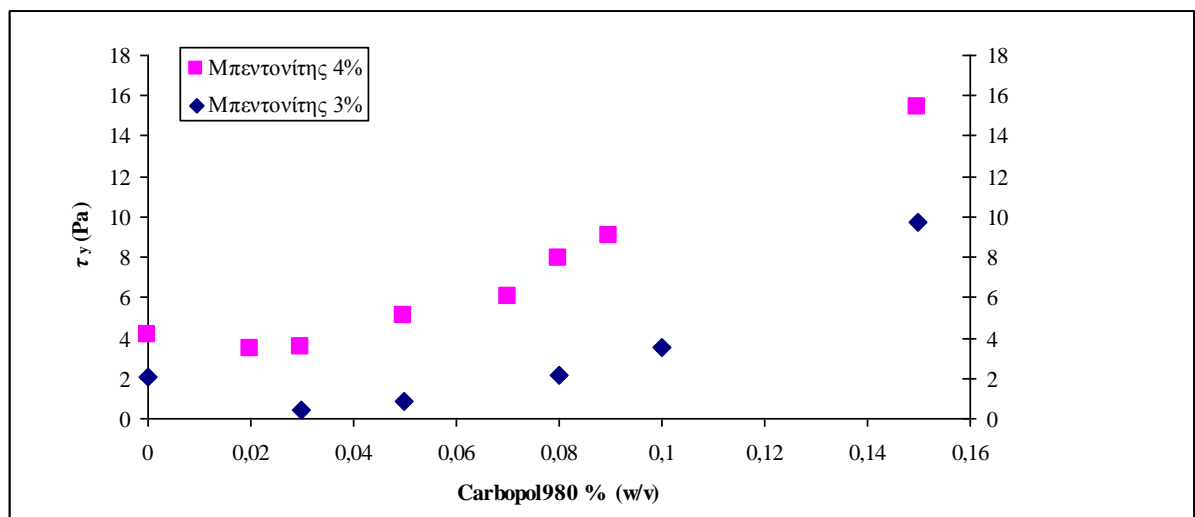
Και στη συγκεκριμένη περίπτωση η μελέτη μας επικεντρώνεται στην εμφάνιση από το ρευστό, τάσης διολίσθησης ικανής για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ρευστό γεώτρησης για τους λόγους που αναφερθήκαν και προηγουμένως.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση μελετήθηκε ο συνδυασμός πολφών μπεντονίτη - Carborol 980 με σκοπό την διερεύνηση της καταλληλότητας των ρευστών αυτών ως διατρητικούς πολφούς. Από τα δεδομένα των μετρήσεων των ρεολογικών ιδιοτήτων των ρευστών, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

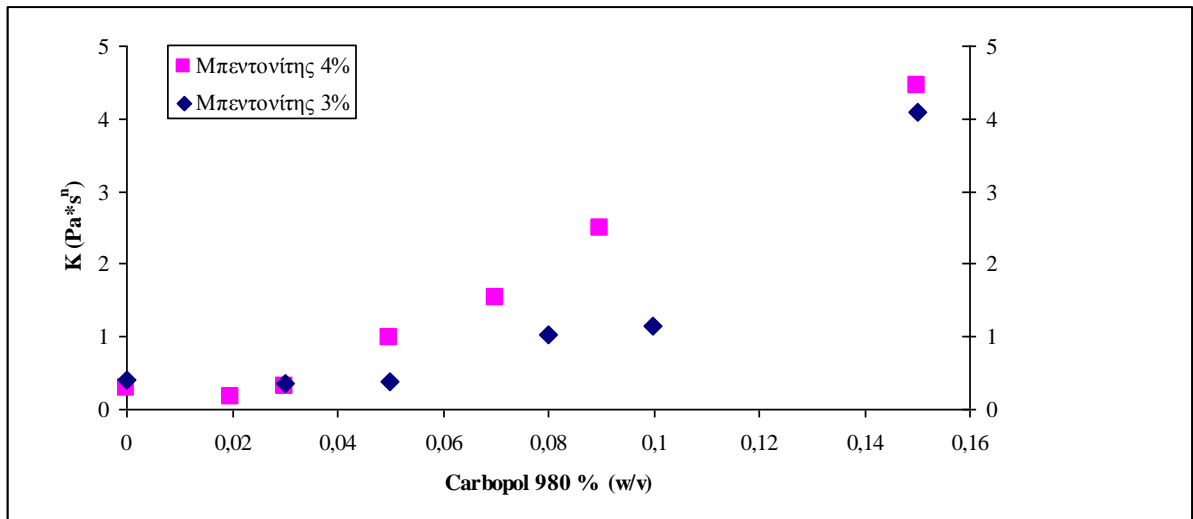
- Οι ρεολογικές ιδιότητες των ρευστών που μελετήθηκαν μεταβάλλονται ανάλογα με τις συγκεντρώσεις του μπεντονίτη και του Carborol 980.
- Η αύξηση της συγκέντρωσης μπεντονίτη προκαλεί αύξηση της τάσης διολίσθησης,  $\tau_y$  (Pa), στα ρευστά.
- Τα δείγματα που παρασκευάστηκαν συμπεριφέρονται ως ρευστά Herschel-Bulkley.
- Η προσθήκη Carborol 980 στα αιωρήματα μπεντονίτη προκαλεί αρχικά μείωση της τάσης διολίσθησης λόγω του ότι τα διαλύματα Carborol 980 ήταν πολύ μικρών συγκεντρώσεων.

- Η αύξηση της συγκέντρωσης Carborol 980 προκαλεί εκθετική αύξηση της τάσης διολίσθησης των ρευστών.
- Ο δείκτης συνάφειας,  $K$  ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ), των ρευστών που παρήχθησαν αυξάνει γραμμικά και σε μερικές περιπτώσεις εκθετικά συναρτήσει της αύξησης συγκέντρωσης του Carborol 980.
- Ο δείκτης συμπεριφοράς ροής,  $n$  σε γενικές γραμμές παραμένει σταθερός και στις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Carborol 980 παρουσιάζει μια μικρή μείωση.
- Τα συγκεκριμένα ρευστά εμφανίζουν μεγαλύτερο βαθμό δυσκολίας παρασκευής σε σχέση με τα ρευστά CMC.
- Μπορούν να θεωρηθούν οικονομικά ρευστά διατήρησης αφού επιτεύχθηκαν ικανοποιητικές ρεολογικές ιδιότητες με πολύ μικρές συγκεντρώσεις πολυμερών.

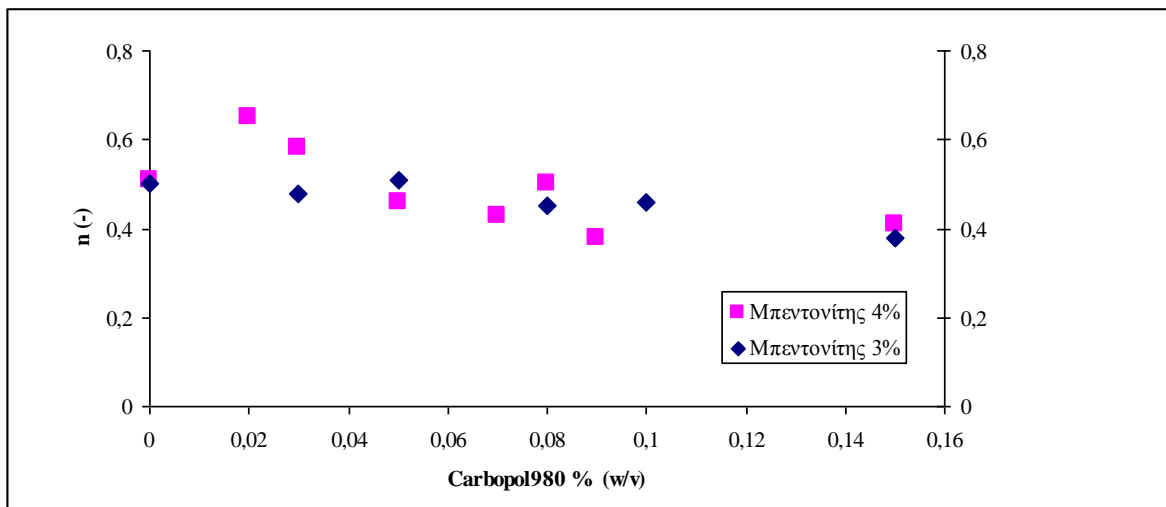
Παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα μεταβολής ρεολογικών παραμέτρων για διάφορες συγκεντρώσεις Carborol 980.



**Διάγραμμα 9.6:** Σύγκριση τάσης διολίσθησης,  $\tau_y$  (Pa) σε πολφούς Carborol 980 - μπεντονίτη περιεκτικότητας 3 % και 4 % (w/v).



**Διάγραμμα 9.7:** Σύγκριση δείκτη συνάφειας,  $K$  ( $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$ ), σε πολφούς Carbopol980-μπεντονίτη περιεκτικότητων 3 και 4 % (w/v).



**Διάγραμμα 9.8:** Σύγκριση συντελεστή ροής,  $n$  (-), σε πολφούς Carbopol980-μπεντονίτη περιεκτικότητων 3 και 4 % (w/v).

#### 9.3.4.1. Σύγκριση των ρεολογικών αποτελεσμάτων με υπάρχουσες μελέτες.

Οι ρεολογικές ιδιότητες των ρευστών της παρούσας μελέτης εμφανίζουν μεγάλες ομοιότητες με αντίστοιχη μελέτη των Luckham & Rossi (1997) Οι

συγκεκριμένοι ερευνητές χρησιμοποίησαν δείγματα μπεντονίτη συγκεντρώσεων 4-5% (w/v) σε συνδυασμό με πολυμερή NPE, PE και PEO. Η παρασκευή των δειγμάτων και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων είναι η ίδια με αυτή της παρούσας εργασίας.

Οι δύο μελέτες εμφανίζουν πανομοιότυπα αποτελέσματα στην τάση διολίσθησης,  $\tau_y$  (Pa). Πιο συγκεκριμένα, στην εργασία των & Rossi (1997) η προσθήκη των πολυμερών στα ρευστά μπεντονίτη οδήγησε αρχικά σε μείωση της  $\tau_y$ , επειδή οι συγκεντρώσεις των διαλυμάτων των πολυμερών ήταν πολύ μικρές, και αύξηση στη συνέχεια γραμμικά με τη συγκέντρωση μπεντονίτη στο διάλυμα και με τη συγκέντρωση των πολυμερών. Η ίδια ακριβώς συμπεριφορά εμφανίστηκε και για τα πολυμερή Carborol980 και CMC.

#### **9.4.5. Επίδραση προσθήκης NaCl στις ρεολογικές ιδιότητες πολφών μπεντονίτη - CMC.**

Η προσθήκη θαλασσινού νερού σε πολφούς γεωτρήσεων είναι σε πολλές περιπτώσεις είναι ιδιαίτερα οικονομική μέθοδος σε περιπτώσεις όπου η διάτρηση πραγματοποιείται σε θαλάσσια περιοχή.

Στην συγκεκριμένη μελέτη παρασκευάστηκαν δείγματα μπεντονίτη - CMC στα οποία χρησιμοποιήθηκε νερό με συγκεντρώσεις NaCl, 0M, 0.01M και 0.1M. Τα εξαγόμενα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την πειραματική διαδικασία είναι τα εξής:

- Τα ρεολογικά χαρακτηριστικά των ρευστών μεταβάλλονται ανάλογα με τις συγκεντρώσεις του CMC και του NaCl.
- Η αύξηση της συγκέντρωσης CMC προκαλεί αύξηση της τάσης διολίσθησης στα ρευστά.
- Η αύξηση της συγκέντρωσης NaCl προκαλεί μείωση της τάσης διολίσθησης στα ρευστά.
- Τα ρευστά που παρασκευάστηκαν συμπεριφέρονται ως ρευστά Herschel-Bulkley.

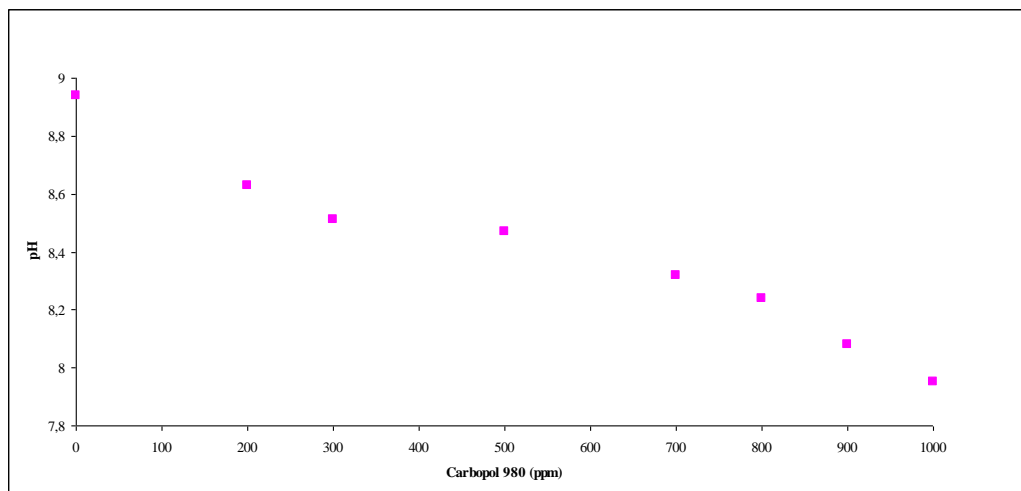
- Η αύξηση της συγκέντρωσης Carborol 980 προκαλεί εκθετική αύξηση της τάσης διολίσθησης,  $\tau_y$  (Pa), στο ρευστό.
- Ο δείκτης συνάφειας,  $K$  ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ), των ρευστών που παρήχθησαν αυξάνει συναρτήσει της αύξησης της συγκέντρωσης του CMC.
- Ο δείκτης συμπεριφοράς ροής,  $n$  σε γενικές γραμμές παραμένει σταθερός.
- Ο δείκτης συνάφειας,  $K$  ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ), των ρευστών που παρήχθησαν ελαττώνεται όσο αυξάνεται η συγκέντρωση του NaCl.

## **9.5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ pH ΣΕ ΠΟΛΦΟΥΣ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ.**

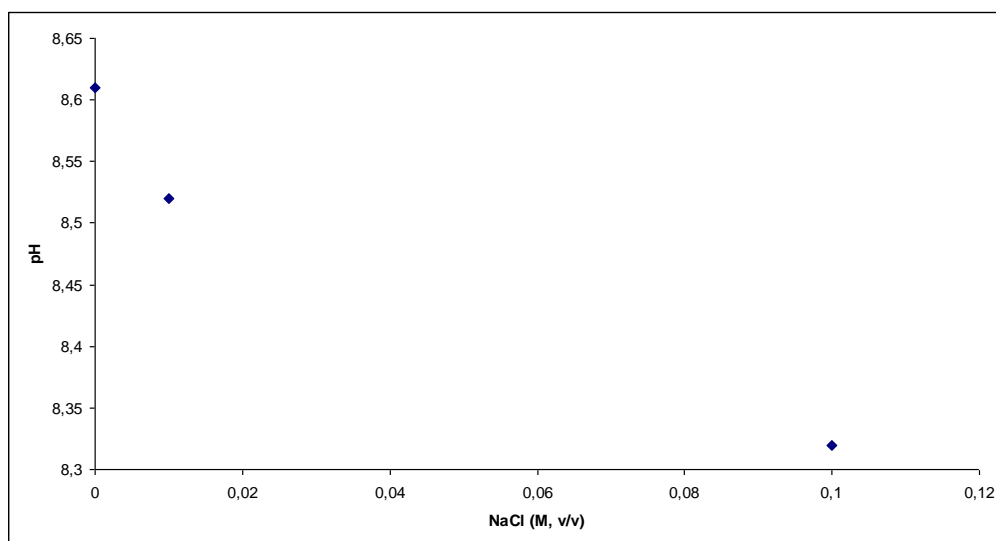
Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση που έχει στο pH των αιωρημάτων μπεντονίτη η προσθήκη πολυμερών και NaCl. Τα συμπεράσματα τα οποία εξήχθησαν είναι τα παρακάτω:

- Η αύξηση της συγκέντρωσης του CMC προκαλεί μείωση στο pH του πολφού μπεντονίτη.
- Η αύξηση της συγκέντρωσης του NaCl προκαλεί ελάττωση στο pH πολφών μπεντονίτη.
- Η αύξηση της συγκέντρωσης Carborol 980 προκαλεί σταθερή μείωση στο pH πολφού μπεντονίτη.

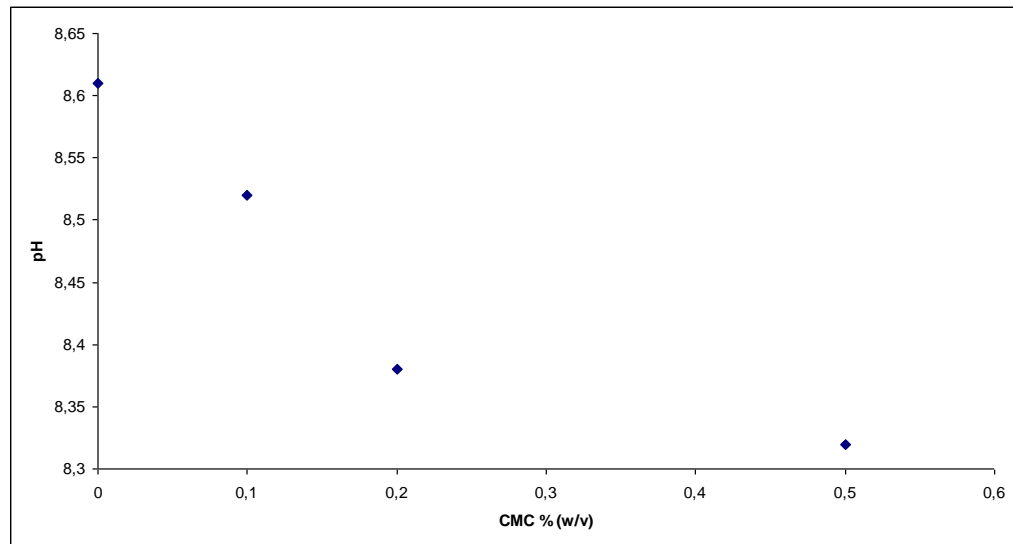
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μέτρησης pH σε πολφούς μπεντονίτη.



**Διάγραμμα 9.9:** Επίδραση προσθήκης Carborol 980 στο pH πολφών μπεντονίτη 4%(w/v).



**Διάγραμμα 9.10:** Επίδραση προσθήκης NaCl στο pH πολφών μπεντονίτη 6.42%(w/v).



**Διάγραμμα 9.11:** Επίδραση προσθήκης CMC στο pH πολφών μπεντονίτη 6.42% (w/v).

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.**

### **ΔΙΕΘΝΗΣ:**

American Petroleum Institute (1993), *Recommended practice for field testing water based drilling fluids*, API Spec 13B-1, Houston.

Gray, H.C.H., Darley, G.R. (1980), *Composition and properties of oil-well drilling fluids*, Gulf Publishing Company, Texas.

Kelessidis, V.C., Christidis, G.E., Makri, P., Hadjistamou, V., Tsamantaki, C., Michalakis, A., Papanicolaou, C. and Foscolos, A. (2007), *Gelation of water-bentonite suspensions at high temperatures and rheological control with lignite addition*, J. Applied Clay Science 36, pp. 221-231.

Kelessidis, V.C., Tsamantaki, C., Michalakis, A., Christidis, G.E., Makri, P., Papanicolaou, C. and Foscolos, A. (2007), *Greek lignites as additives for controlling filtration properties of water-bentonite suspensions at high temperatures*, J. Fuel 86, pp. 1112-1121.

Rossi, S., Luckham, P.F., Ju, S., Briscoe B. J. (1999), "High pressure high temperature rheology of Na<sup>+</sup>-montmorillonite clay suspensions," *SPE international symposium of oil-field chemistry*, Houston, TX, 16-19 Feb.

Mahto, V. and Sharma, V.P. (2004), *Rheological study of water based oil well drilling fluids*, Journal of Petroleum Science Engineering 45, pp. 123-128.

Dolz, M., Jiménez, J., Hernández, M. J., Delegido J., Casanovas A. (2007), *Flow and thixotropy of noncontaminating oil drilling fluids formulated with bentonite and sodium carboxymethyl cellulose*, Journal of Petroleum Science and Engineering 57, pp. 294-302.

Benchabane, A. and Bekkour, K. (2006), *Effects of anionic additives on the rheological behavior of aqueous calcium montmorillonite suspensions*, J. Rheological Acta 45, pp. 425-434.

Iskan, A.G. and Kok, M.V. (2007), *Effects of Polymers and CMC Concentration on Rheological and Fluid Loss Parameters of Water-Based Drilling Fluids*, J. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 29, pp. 939 - 949.



Hoogendam, G.W., Keizer A., Stuart M.A., Bijsterbosch B.H. (1998), *Adsorption Mechanisms of Carboxymethyl Cellulose on Mineral Surfaces*, 13, pp. 3825-3839.

Edali, M., Esmail, M.N. and Vatistas, G.H. (2001), *Rheological Properties of High Concentrations of Carboxymethyl Cellulose Solutions*, *Journal of Applied Polymer Science* 79, pp. 1787-1801.

Pilizota, V., Subaric, D., and Lovric, T. (1996), *Rheological properties of CMC dispersions at low temperatures*, *J. Food Technology and Biotechnology* 34, pp. 87-90.

Gómez-Díaz, D. and Navaza, J.M. (2002), *Rheological characterization of aqueous solutions of the food additive carboximethyl cellulose*, *Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry* 1, pp.12-22.

Rossi, S., Luckham, P.F., Zhu, S., Briscoe, B.J. and Tadros, T.F. (1997), *Influence of low molecular weight polymers on the rheology of bentonite suspensions*, *J. Oil & Gas Science and Technology-Rev- IFP* 52, pp. 199-206.

Rossi, S., Luckham, P.F. and Tadros, T.F. (2003), *Influence of non-ionic polymers on the rheological behaviour of Na<sup>+</sup>-montmorillonite clay suspensions. Part II. Homopolymer ethyleneoxide and polypropylene oxide-polyethylene oxide ABA copolymers*, *J. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 215, pp. 1-10.

Valenza, D.C., Merle, L., Mocanu, G., Picton L. and Müller G. (2005), *Rheological properties of hydrophobically modified carboxymethylcelluloses*, *Carbohydrate Polymers* 60, G. pp. 87-94.

**ΕΛΛΗΝΙΚΗ:**

Γεντεκάκης, Ι. (2001). *Εργαστηριακές ασκήσεις φυσικοχημείας*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Γιδαράκος, Ε. (2005). *Τεχνολογίες αποκατάστασης εδαφών και υπογείων υδάτων από επικίνδυνους ρύπους*, Εκδοτικός όμιλος Ιών, Αθήνα.

Κελεσιδης, Β. (2002). *Τεχνική Γεωτρήσεων, Σημειώσεις εργαστηρίου ρευστομηχανικής*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Κελεσιδης, Β. (2001). *Τεχνική Γεωτρήσεων, Σημειώσεις παραδόσεων*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Κωστάκης, Γ. (2003). *Εισαγωγή στην αξιοποίηση βιομηχανικών ορυκτών*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Λέκκας, Θ. (1996). *Περιβαλλοντική Μηχανική διαχείριση Υδάτινων Πόρων*, Εκδοτικός Όμιλος, Αθήνα.

Μιχαλάκης, Α. (2004). *Χρήση ελληνικού Λιγνίτη για την ρύθμιση των ρεολογικών και διηθητικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων των πολφών γεωτρήσεων*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Νικολαΐδης, Π. (2005). *Υδατική χημεία θεωρία μοντέλα και περιβαλλοντικές εφαρμογές*, Εκδόσεις Ζήτη, Αθήνα.

Παπαδοπούλου, Μ. (2000). *Όργανα ρύθμισης και ελέγχου γεωτρήσεων*, Εκδοτικός Όμιλος Ιών, Αθήνα.

Περδικάτης, Β. (2003). *Εργαστηριακές ασκήσεις Γεωχημείας*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Σταμπολιάδης, Η. (1994). *Εμπλουτισμός Μεταλλευμάτων*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Χατζηϊωάννου, Θ. & Κουπάρης, Μ. (2002). *Ενόργανη ανάλυση*, Εκδόσεις Μαυρομάτη, Αθήνα.

**ΠΗΓΕΣ INTERNET:**

Web 1: [www.ima-na.org](http://www.ima-na.org)

Web 2: [www.pharmainfo.net](http://www.pharmainfo.net)

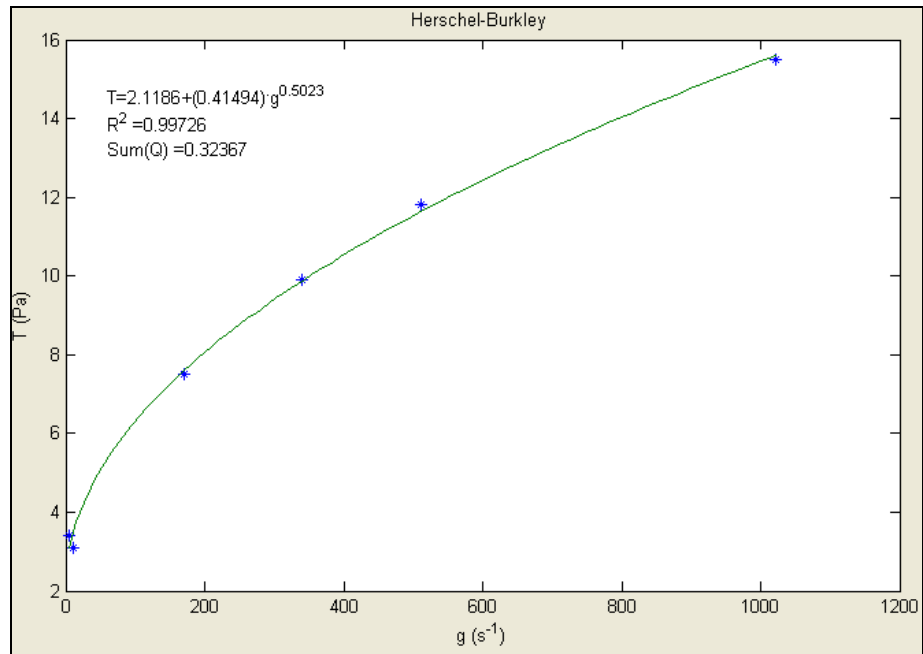
Web 3: [www.lsbu.ac.uk](http://www.lsbu.ac.uk)

Web 4: [www.eslpod.com](http://www.eslpod.com)

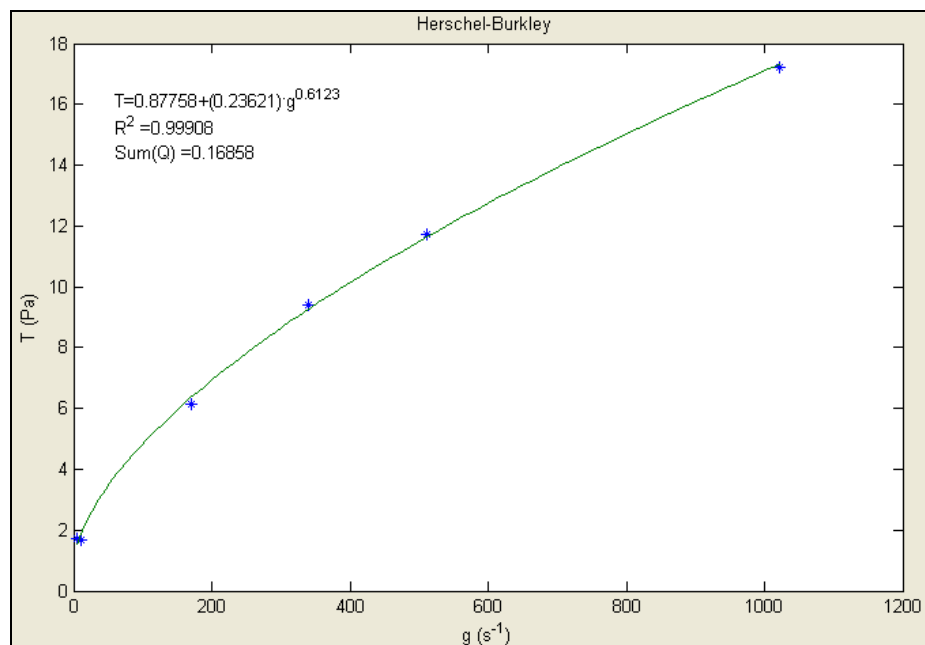
Web 5: [www.crudeoildirect.com](http://www.crudeoildirect.com)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

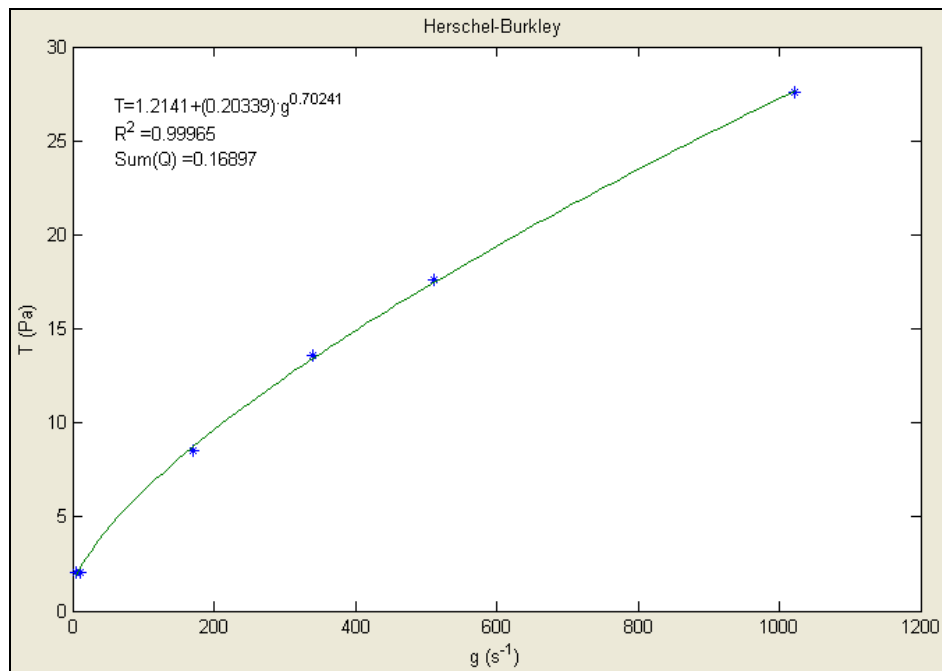
### ΡΕΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΟΛΦΩΝ ΜΠΕΤΟΝΙΤΗ - CMC.



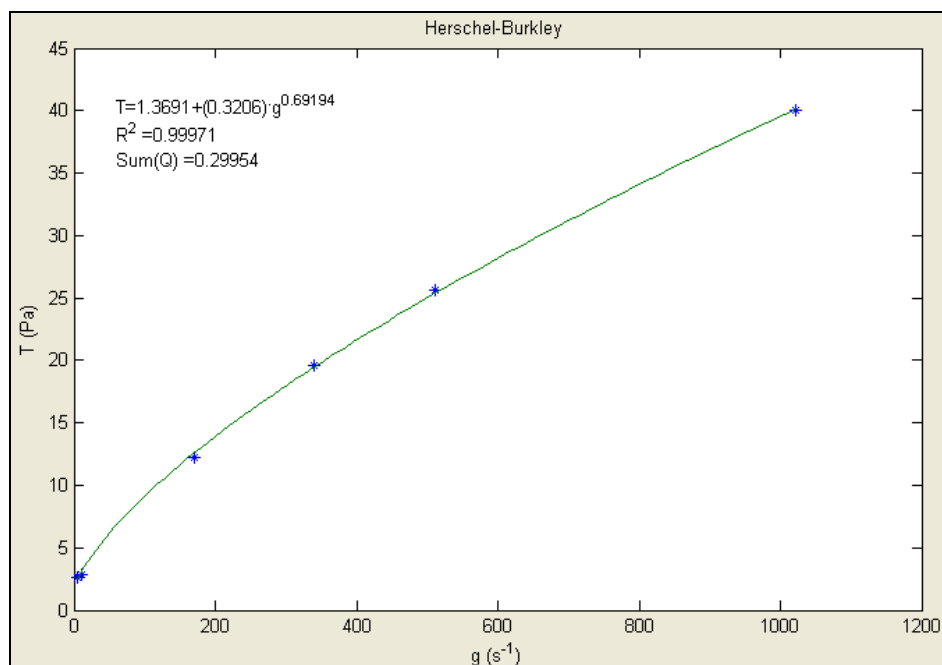
**Ρεόγραμμα 1.1:** Πολφός μπετονίτη 3%(w/v) 500ml.



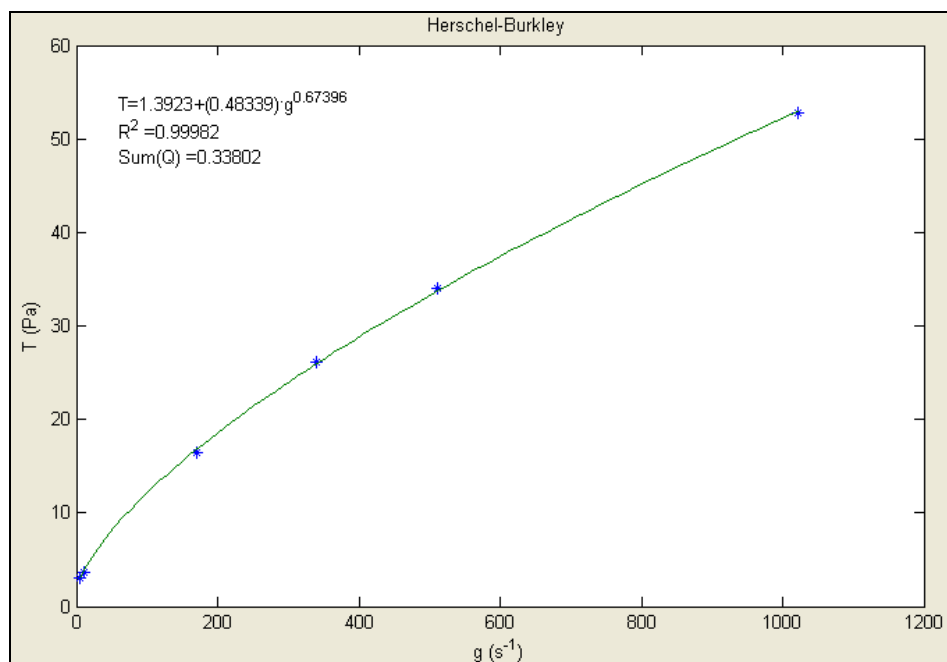
**Ρεόγραμμα 1.2:** Πολφός μπετονίτη 3%- CMC 0.2%(w/v) 1000ml.



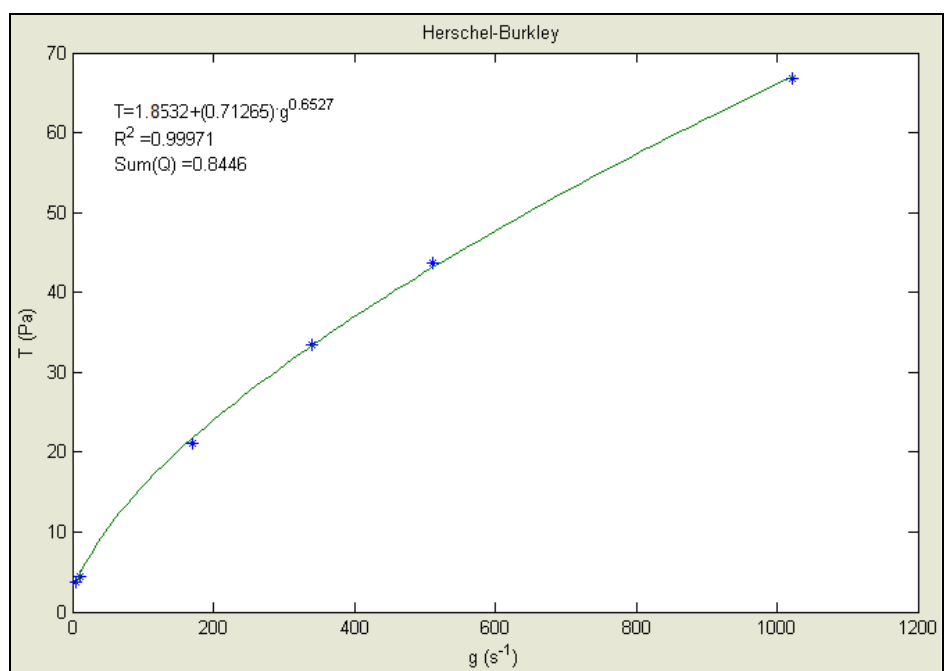
**Ρεόγραμμα 1.3:** Πολφός μπιετονίτη 3%- CMC 0.4%(w/v) 1000ml.



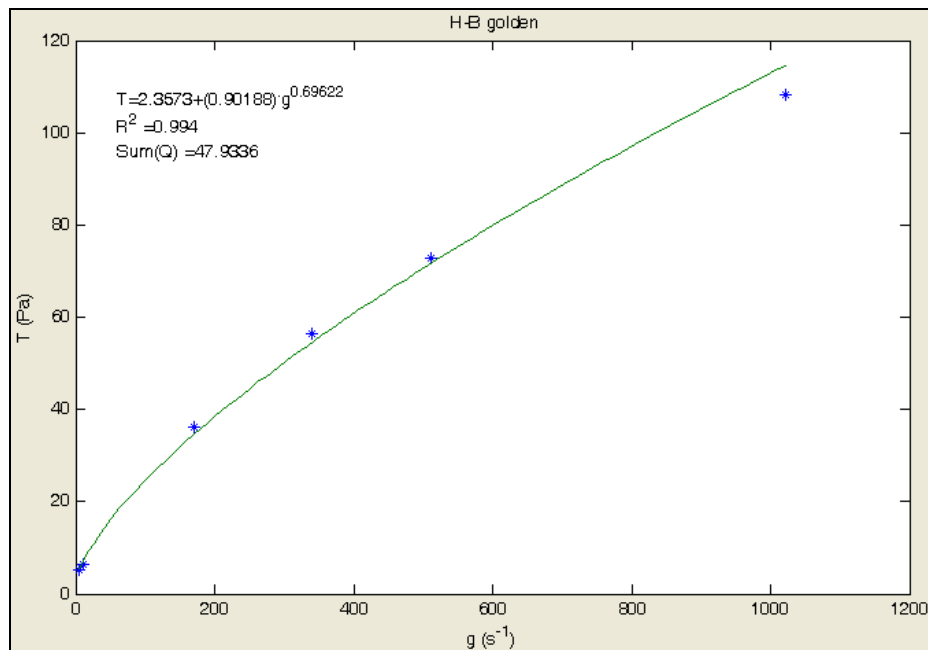
**Ρεόγραμμα 1.4:** Πολφός μπιετονίτη 3%- CMC 0.6%(w/v) 1000ml.



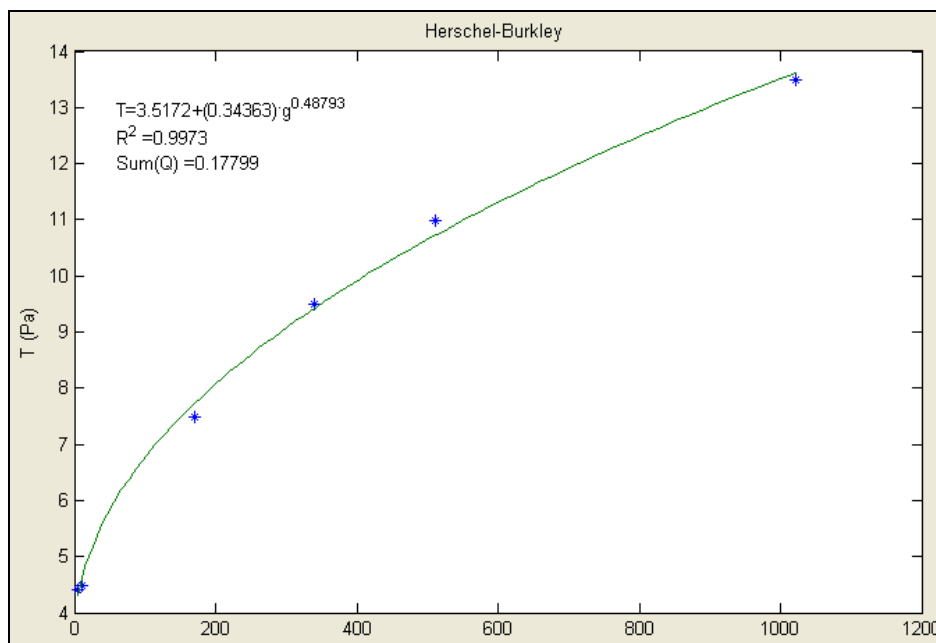
**Ρεόγραμμα 1.5:** Πολφός μπετονίτη 3%- CMC 0.8%(w/v) 1000ml.



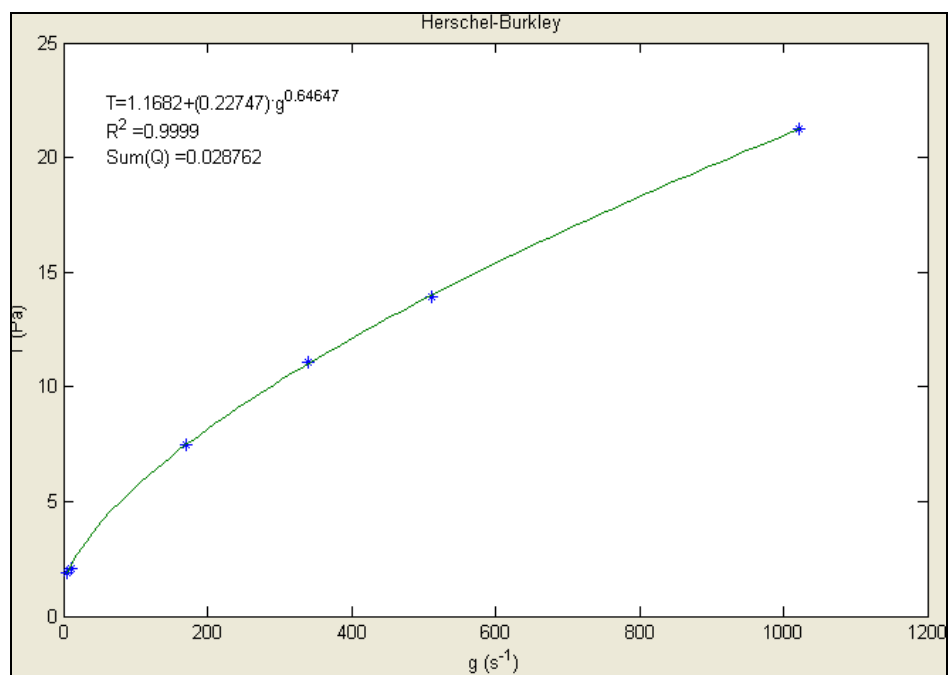
**Ρεόγραμμα 1.6:** Πολφός μπετονίτη 3%- CMC 1%(w/v) 1000ml.



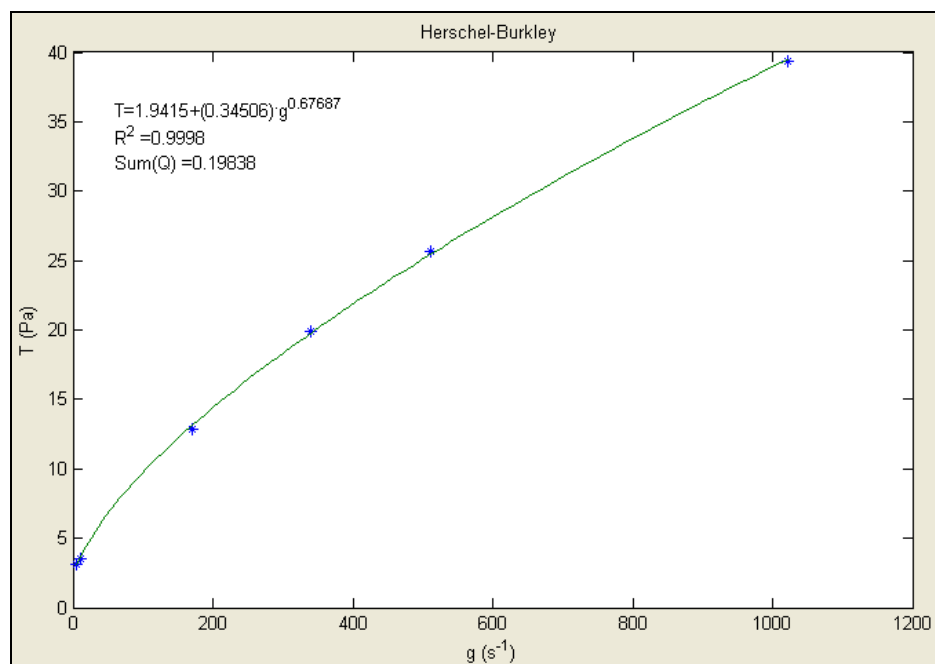
**Ρεόγραμμα 1.7:** Πολφός μπετονίτη 3%- CMC 1.5%(w/v) 1000ml.



**Ρεόγραμμα 1.8:** Πολφός μπετονίτη 4% (w/v) 500ml.

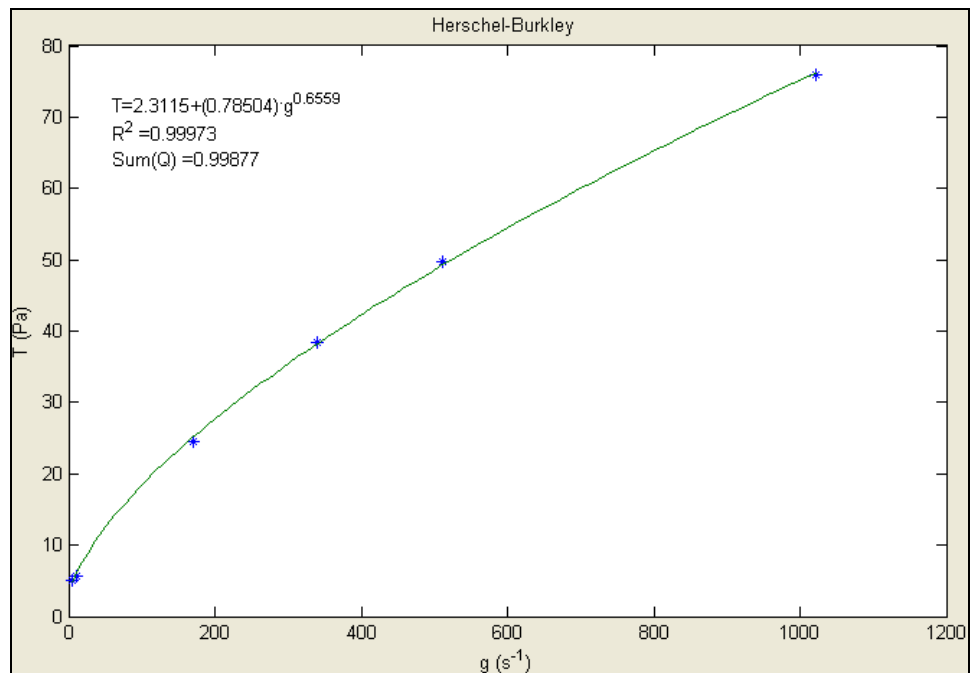


**Ρεόγραμμα 1.9:** Πολφός μπετονίτη 4% - CMC 0.2% (w/v) 1000ml.

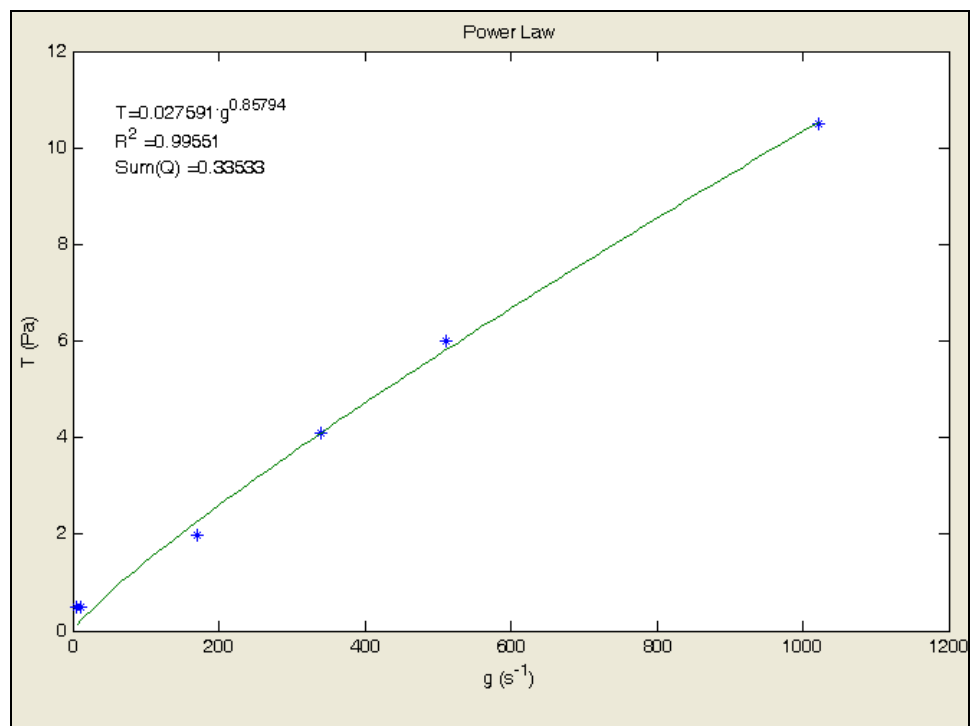


**Ρεόγραμμα 1.10:** Πολφός μπετονίτη 4% - CMC 0.5% (w/v) 1000ml.

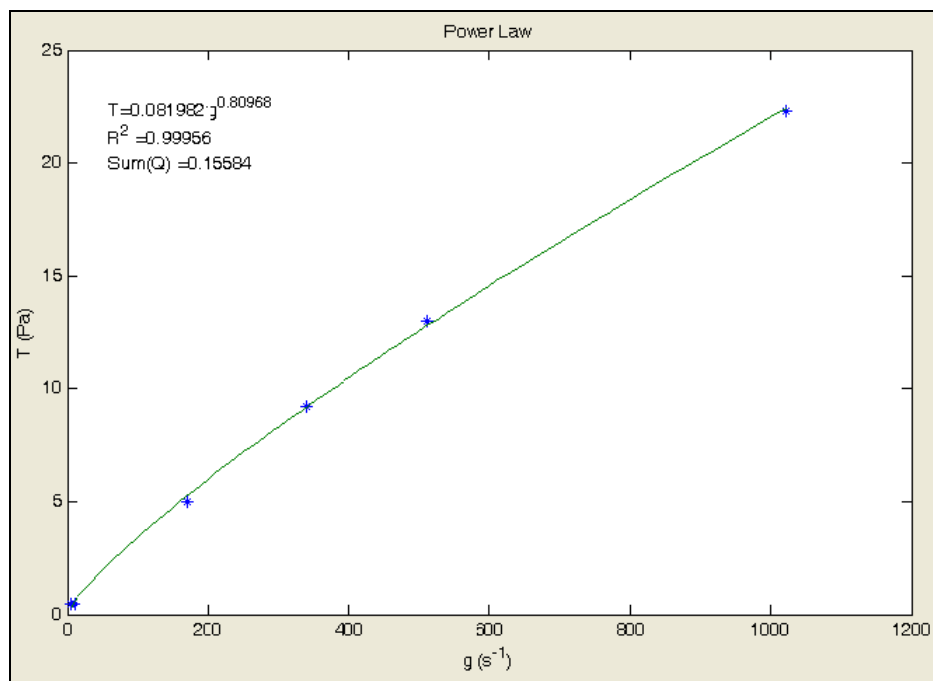




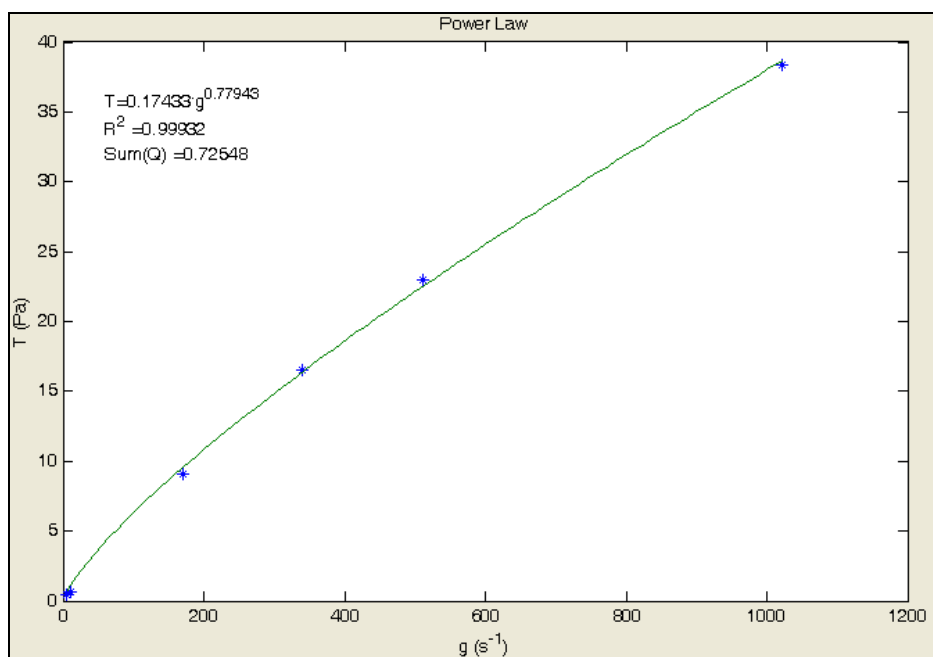
**Ρεόγραμμα 1.11:** Πολυφός μπετονίτη 4% - CMC 1% (w/v) 1000ml.



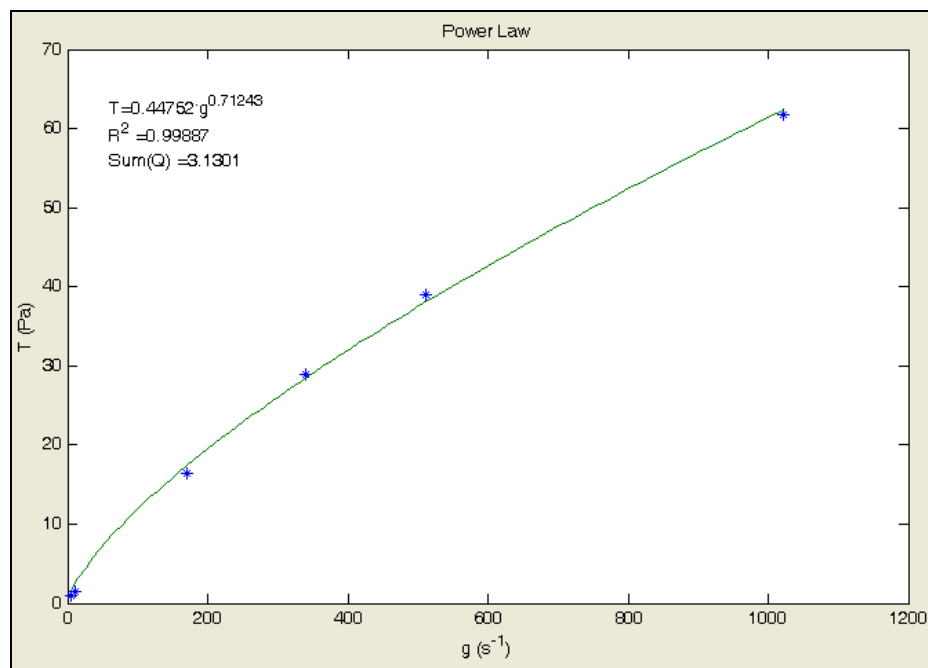
**Ρεόγραμμα 1.12:** CMC 0.4% (w/v) 500ml.



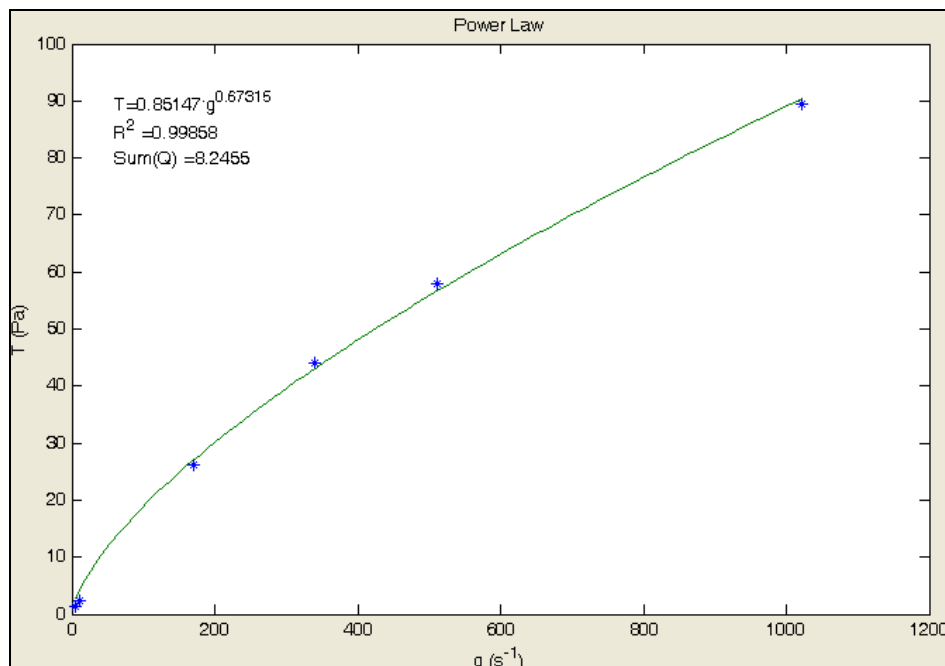
**Ρεόγραμμα 1.13:** CMC 0.8% (w/v) 500ml.



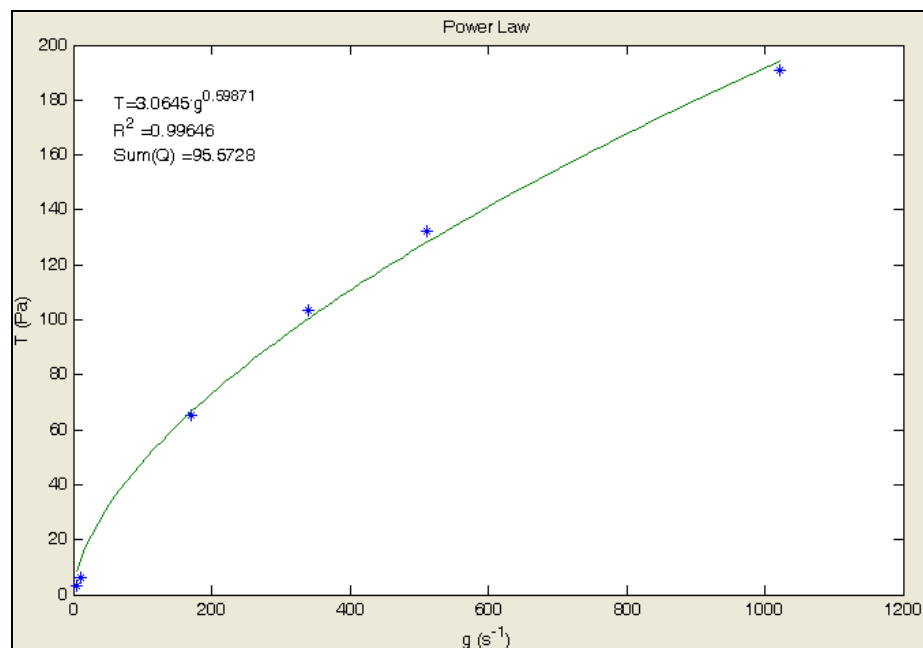
**Ρεόγραμμα 1.14:** CMC 1.2% (w/v) 500ml.



**Ρεόγραμμα 1.15:** CMC 1.6% (w/v) 500ml.



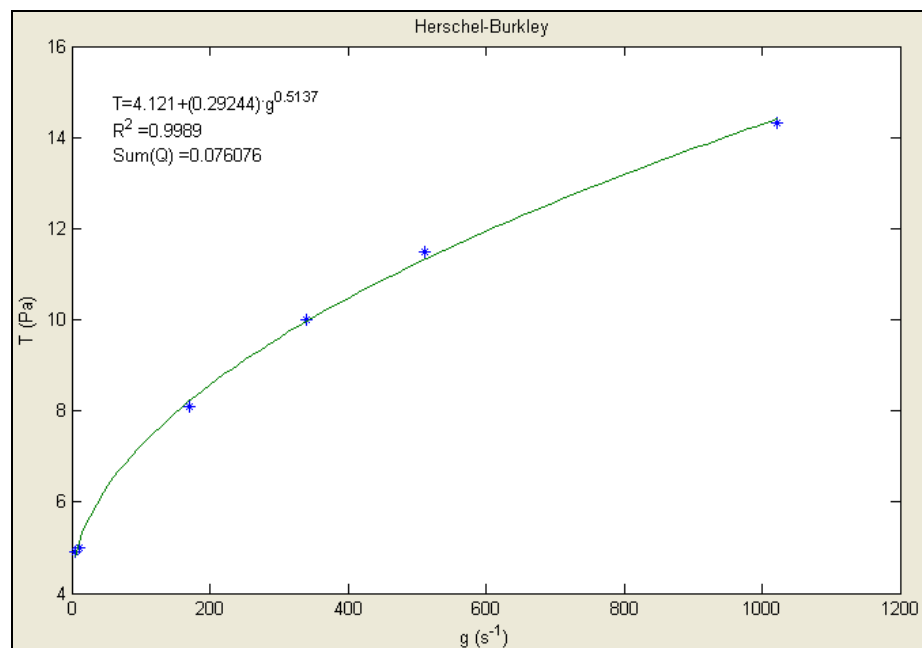
**Ρεόγραμμα 1.16:** CMC 2% (w/v) 500ml.



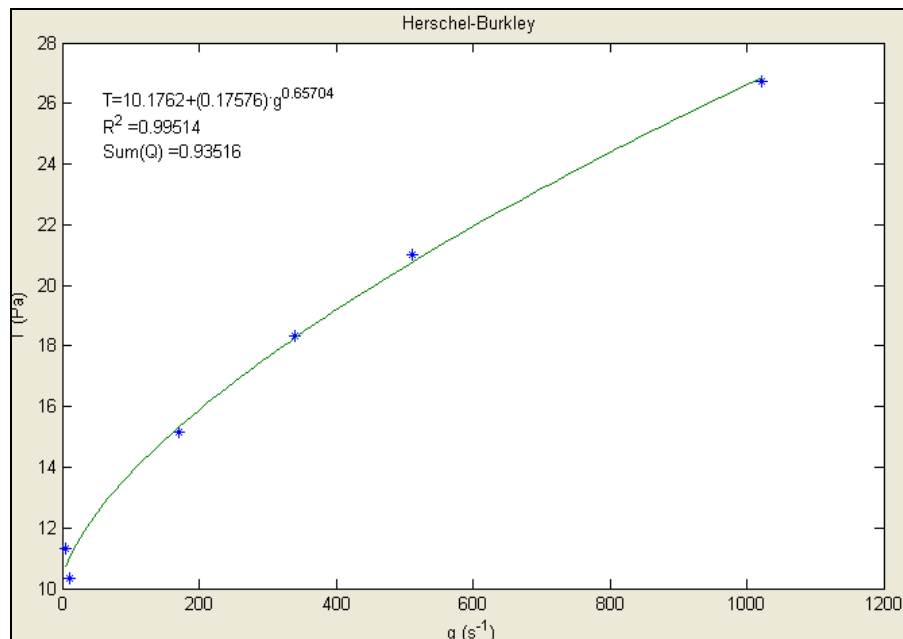
**Ρεόγραμμα 1.17:** CMC 3% (w/v) 500ml.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

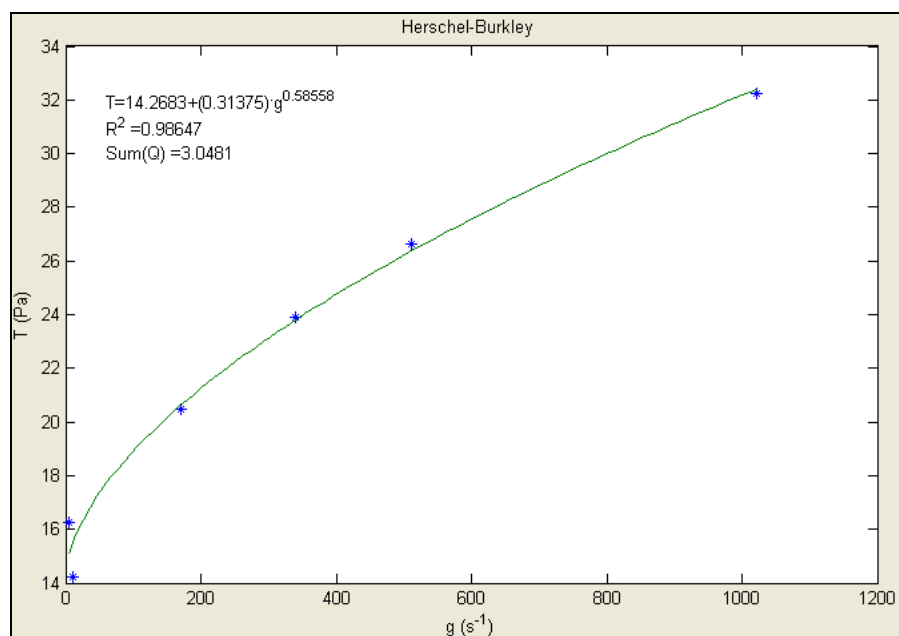
### ΡΕΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΟΛΦΩΝ ΜΠΕΤΟΝΙΤΗ - CARBOPOL 980.



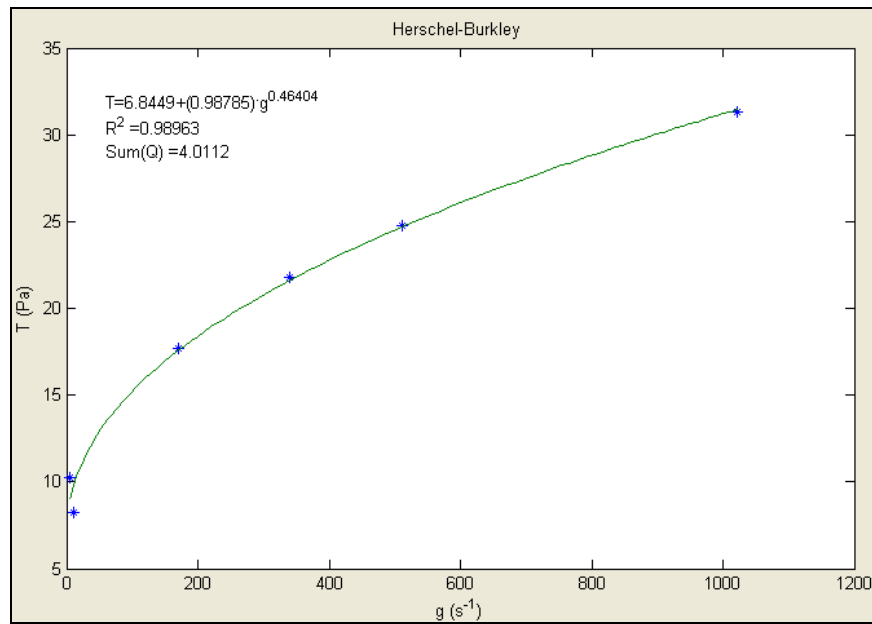
**Ρεόγραμμα 2.1:** Πολφός μπετονίτη 4%(w/v) 500ml.



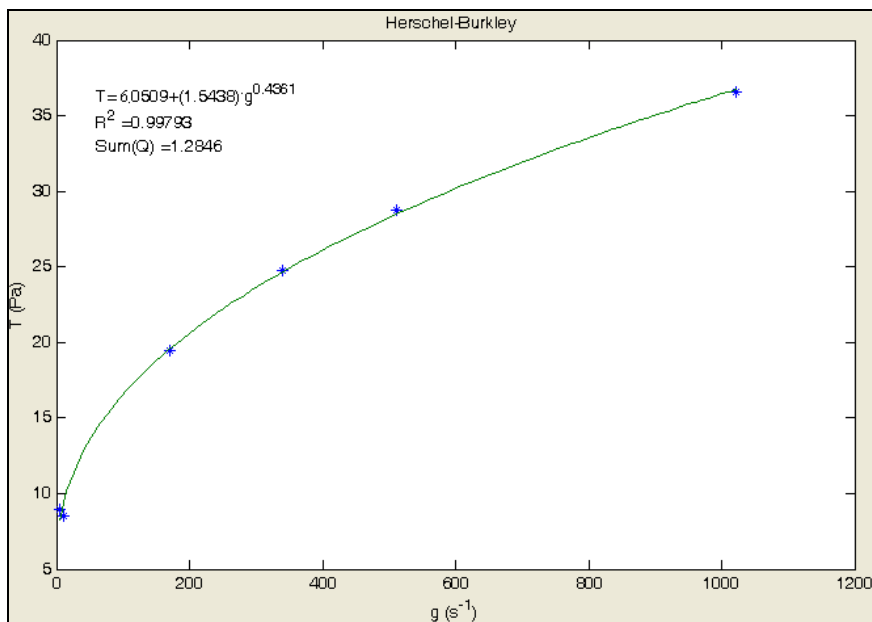
**Ρεόγραμμα 2.2:** Πολφός μετονίτη 4%- Carbopol 980 0.02%(w/v) 1000ml.



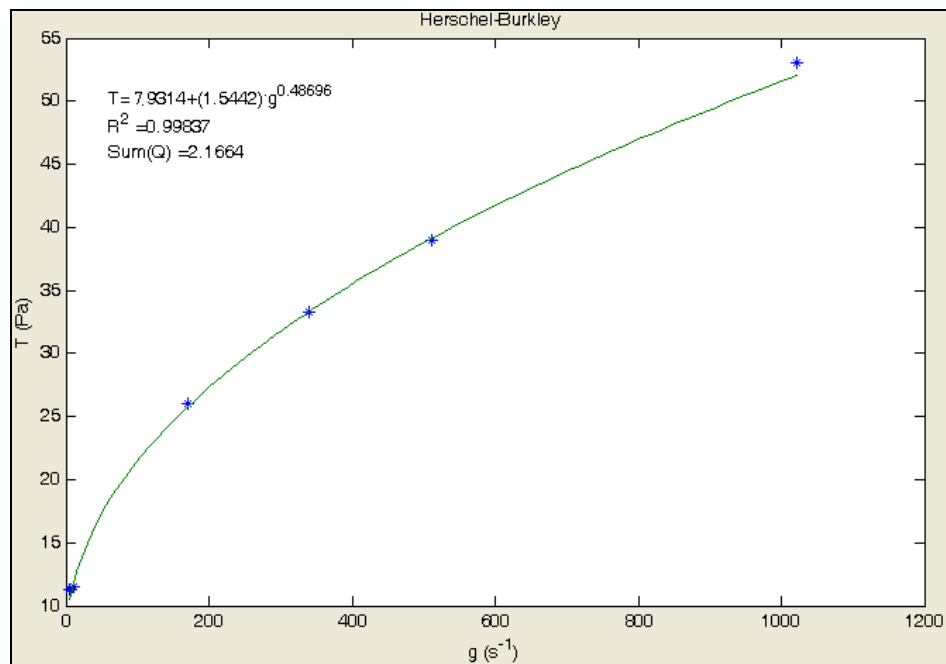
**Ρεόγραμμα 2.3:** Πολφός μετονίτη 4%- Carbopol 980 0.03%(w/v) 1000ml.



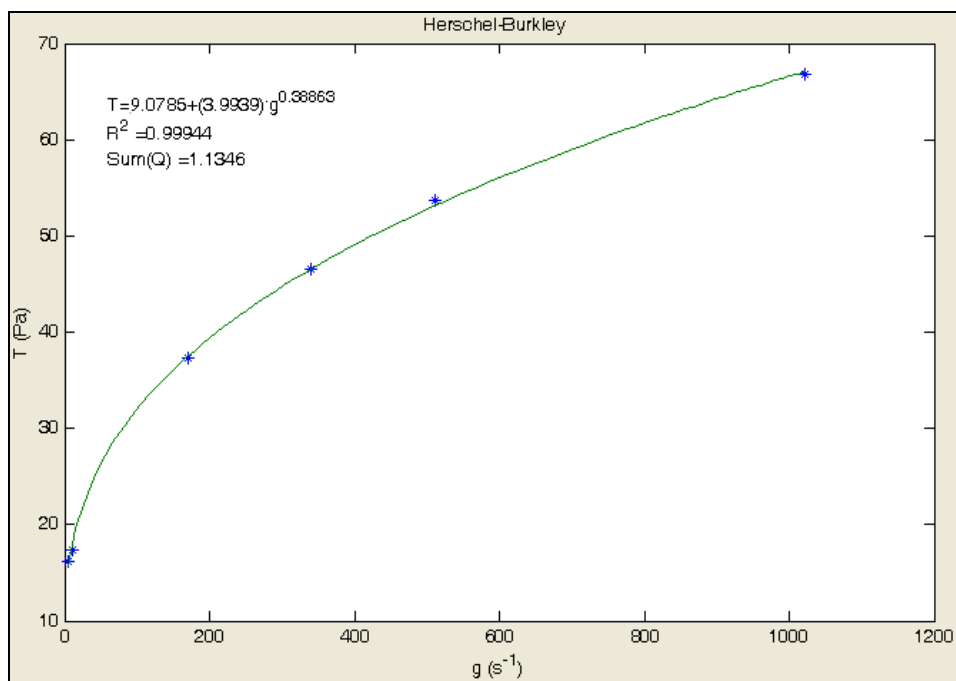
**Ρεόγραμμα 2.4:** Πολφός μεπτονίτη 4%- Carbopol 980 0.05%(w/v) 1000ml.



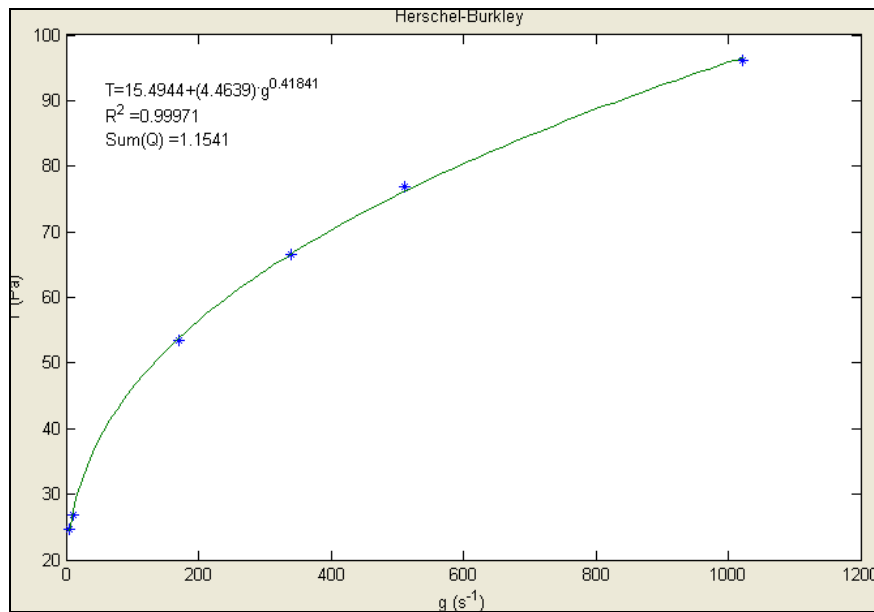
**Ρεόγραμμα 2.5:** Πολφός μεπτονίτη 4%- Carbopol 980 0.07%(w/v) 1000ml.



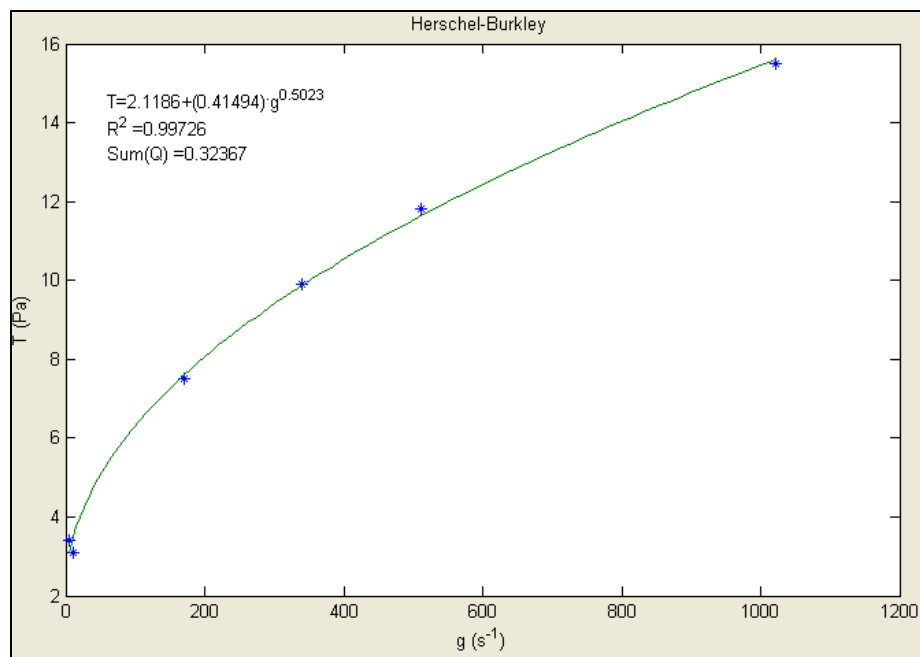
**Ρεόγραμμα 2.6:** Πολφός μπετονίτη 4%- Carbopol 980 0.08%(w/v) 1000ml.



**Ρεόγραμμα 2.7:** Πολφός μπετονίτη 4%- Carbopol 980 0.09%(w/v) 1000ml.

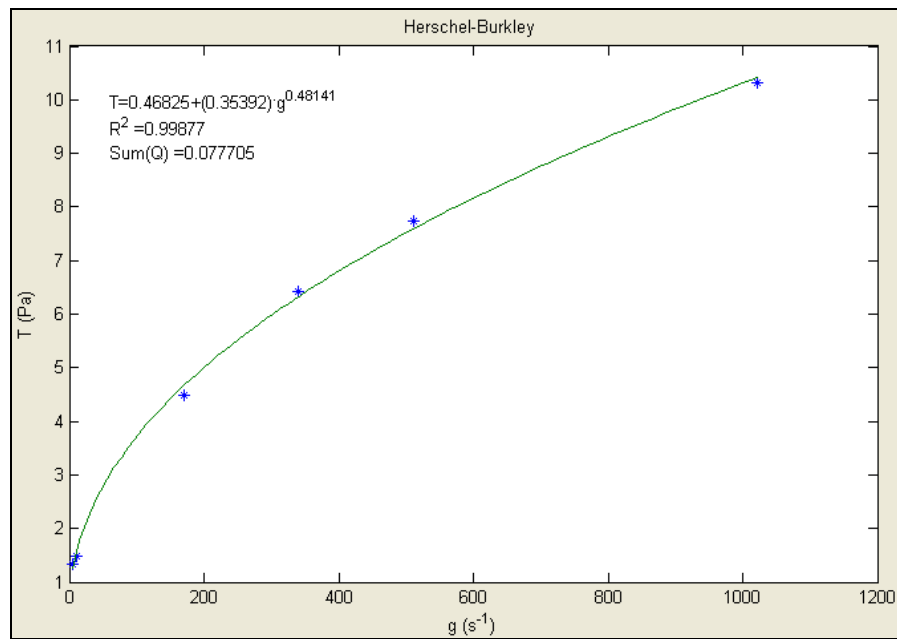


**Ρεόγραμμα 2.8:** Πολφός μπετονίτη 4%- Carbopol 980 0.15%(w/v) 1000ml.

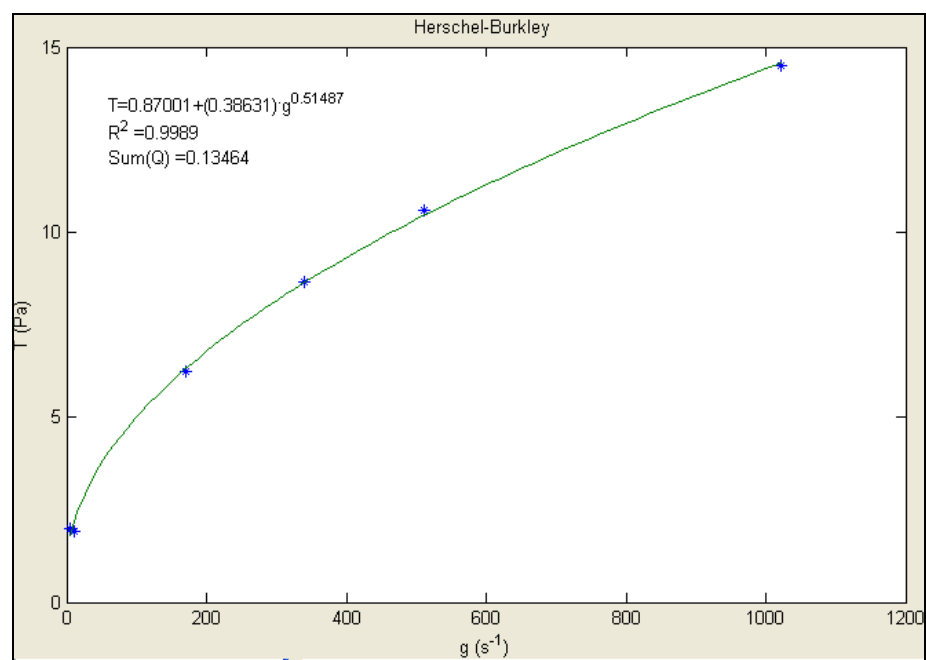


**Ρεόγραμμα 2.9:** Πολφός μπετονίτη 3%(w/v) 500ml.

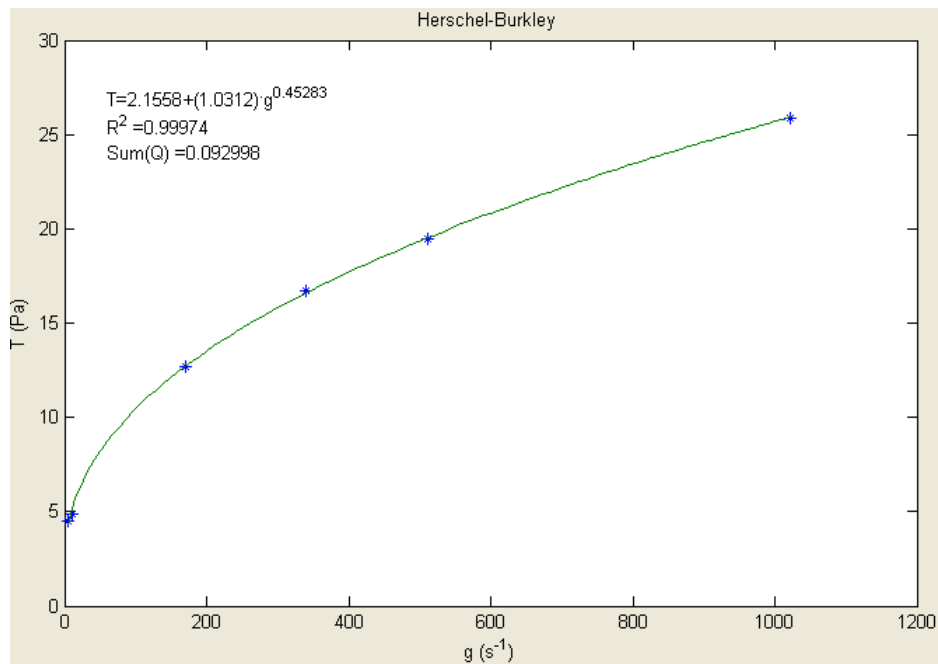




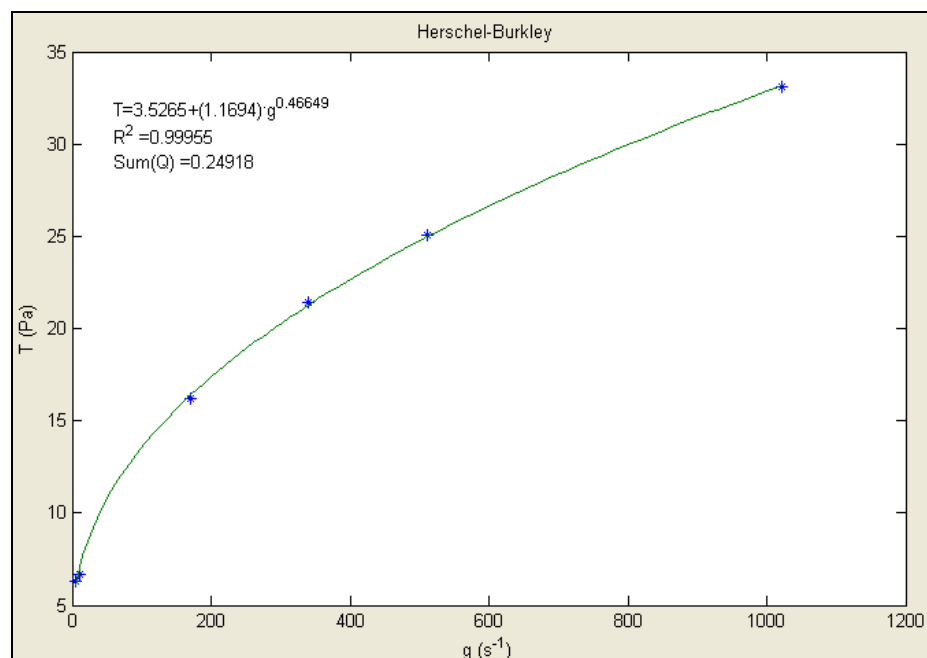
**Ρεόγραμμα 2.10:** Πολφός μπετονίτη 3%- Carbopol 980 0.03%(w/v) 1000ml.



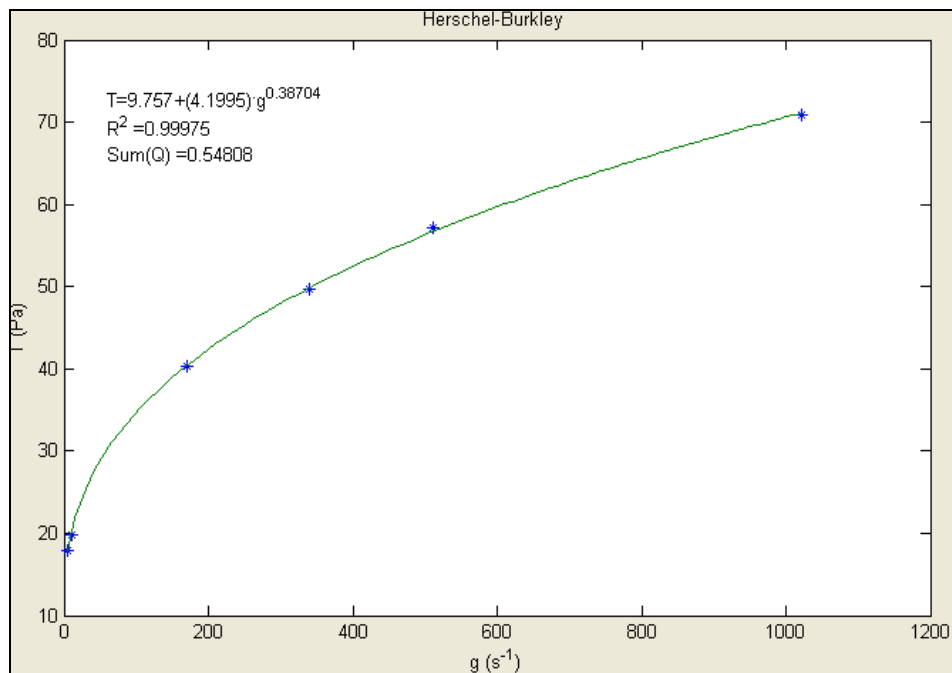
**Ρεόγραμμα 2.11:** Πολφός μπετονίτη 3%- Carbopol 980 0.05%(w/v) 1000ml.



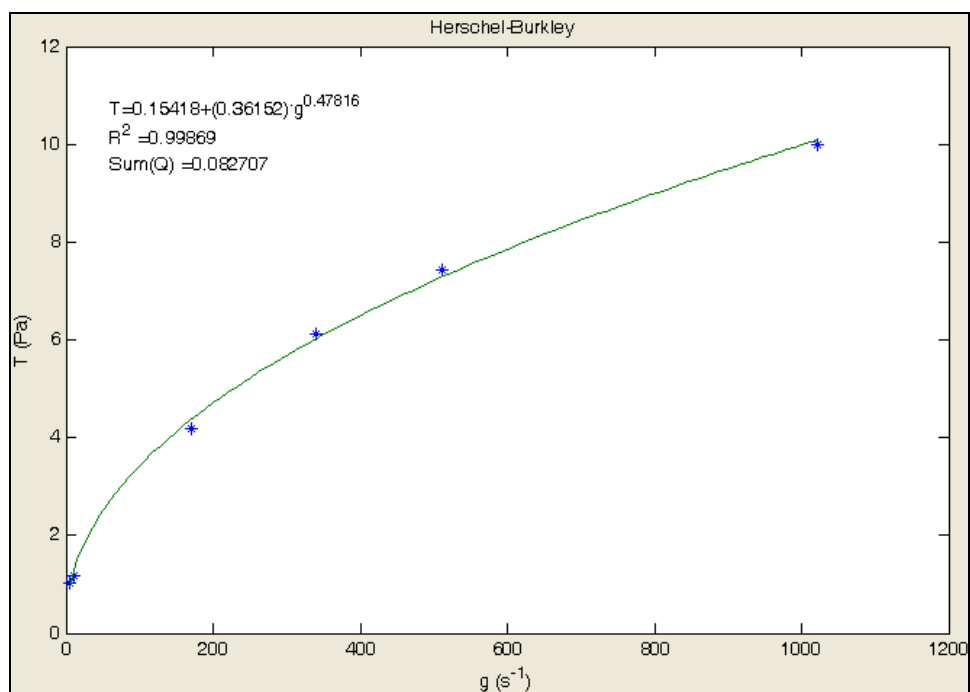
**Ρεόγραμμα 2.12:** Πολφός μπετονίτη 3%- Carbopol 980 0.08%(w/v) 1000ml.



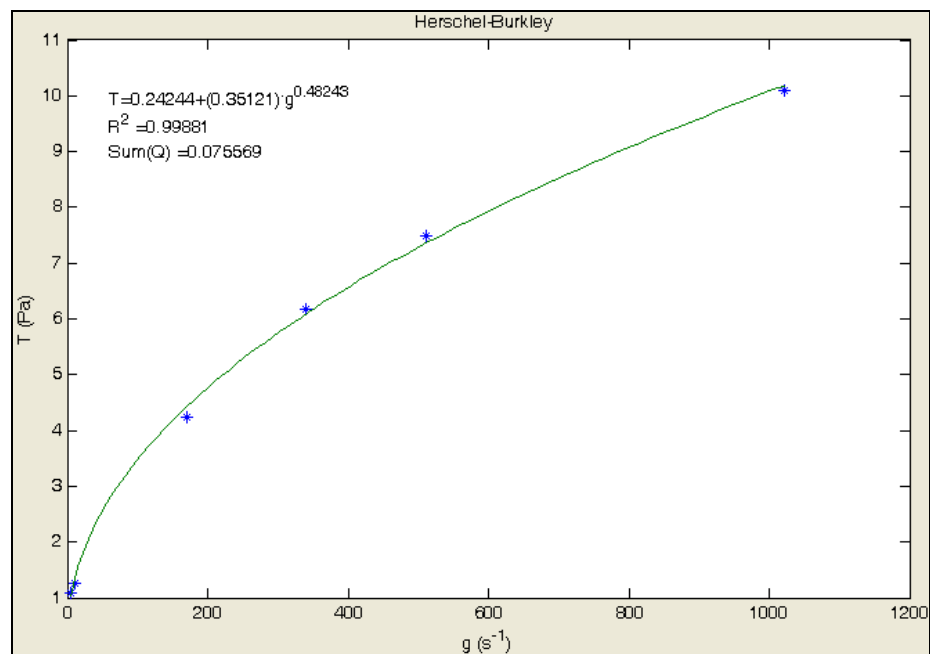
**Ρεόγραμμα 2.13:** Πολφός μπετονίτη 3%- Carbopol 980 0.1%(w/v) 1000ml.



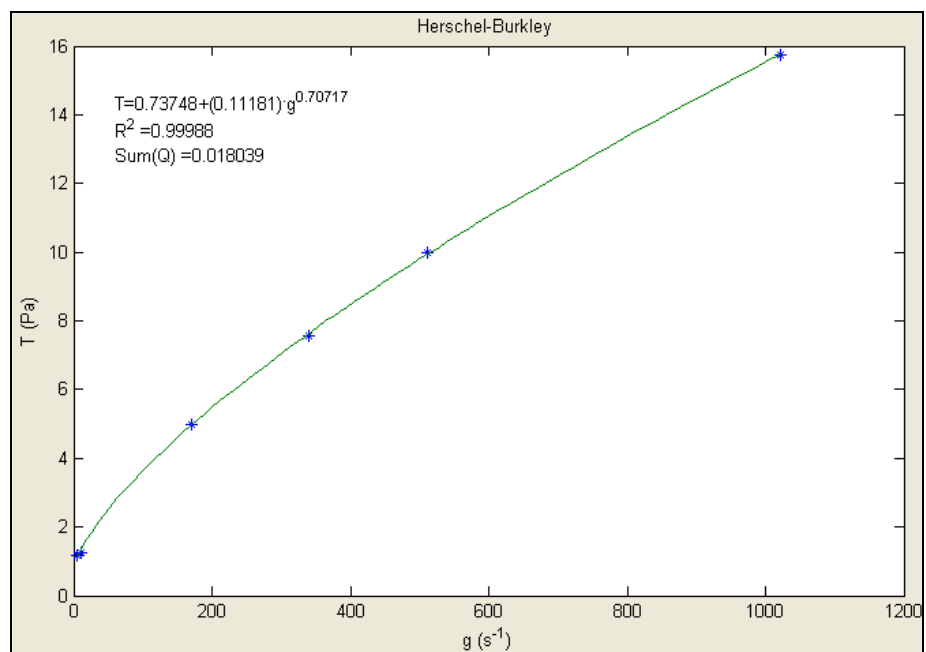
**Ρεόγραμμα 2.14:** Πολφός μπετονίτη 3%- Carbopol 980 0.15%(w/v) 1000ml.



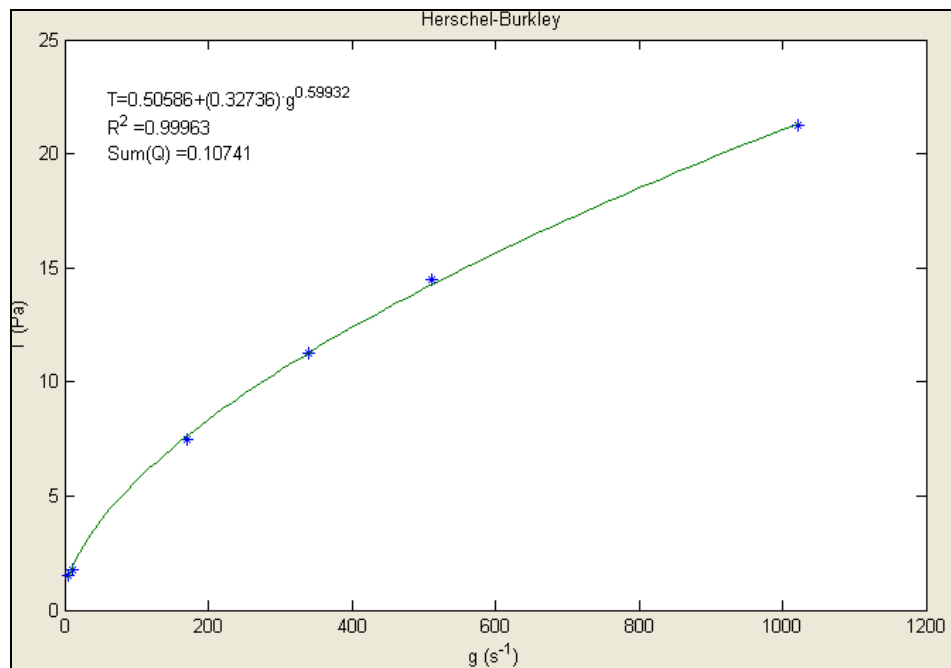
**Ρεόγραμμα 2.15:** Πολφός Carbopol 980 0.04%(w/v) 500ml.



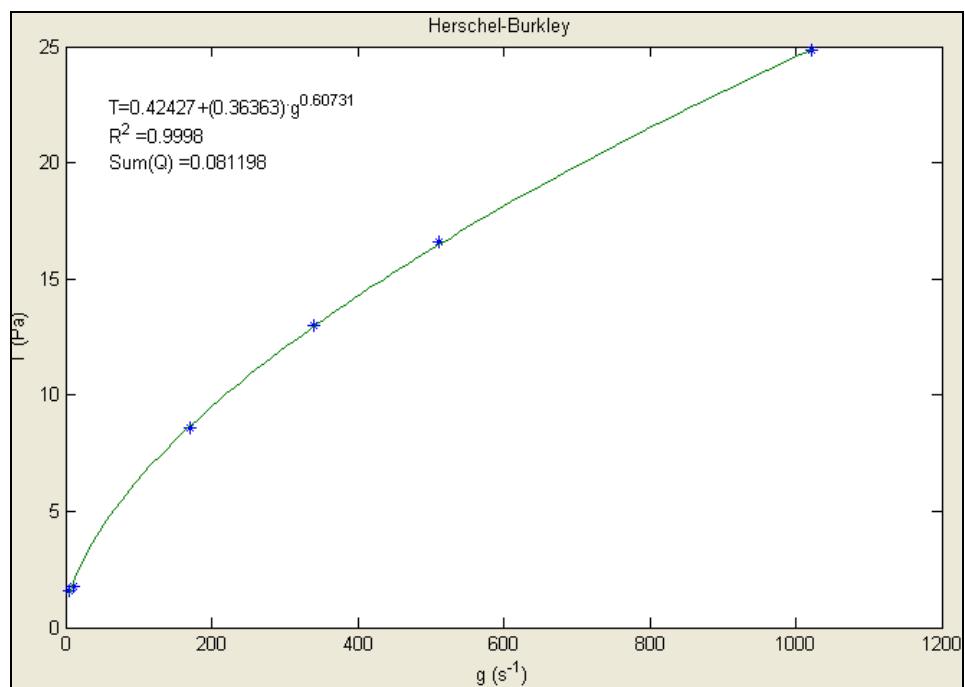
**Ρεόγραμμα 2.16:** Πολφός Carbopol 980 0.05%(w/v) 500ml.



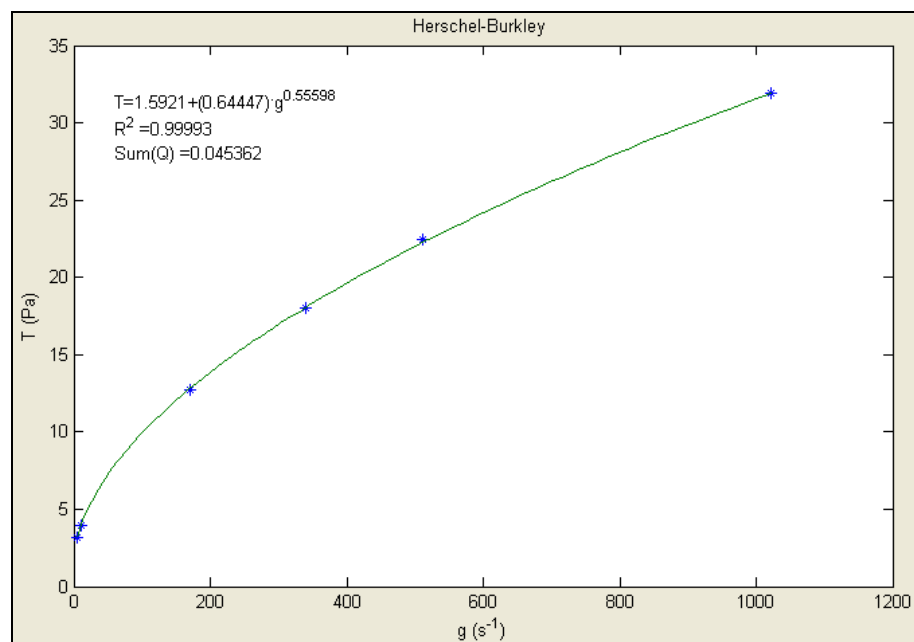
**Ρεόγραμμα 2.17:** Πολφός Carbopol 980 0.07%(w/v) 500ml.



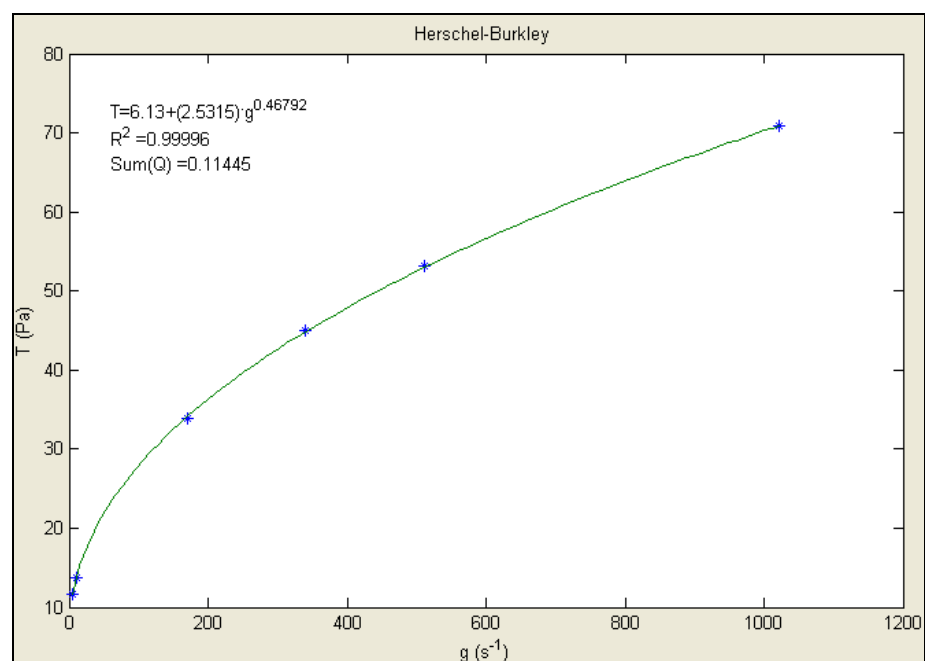
**Ρεόγραμμα 2.18:** Πολφός Carbopol 980 0.08%(w/v) 500ml.



**Ρεόγραμμα 2.19:** Πολφός Carbopol 980 0.09%(w/v) 500ml.



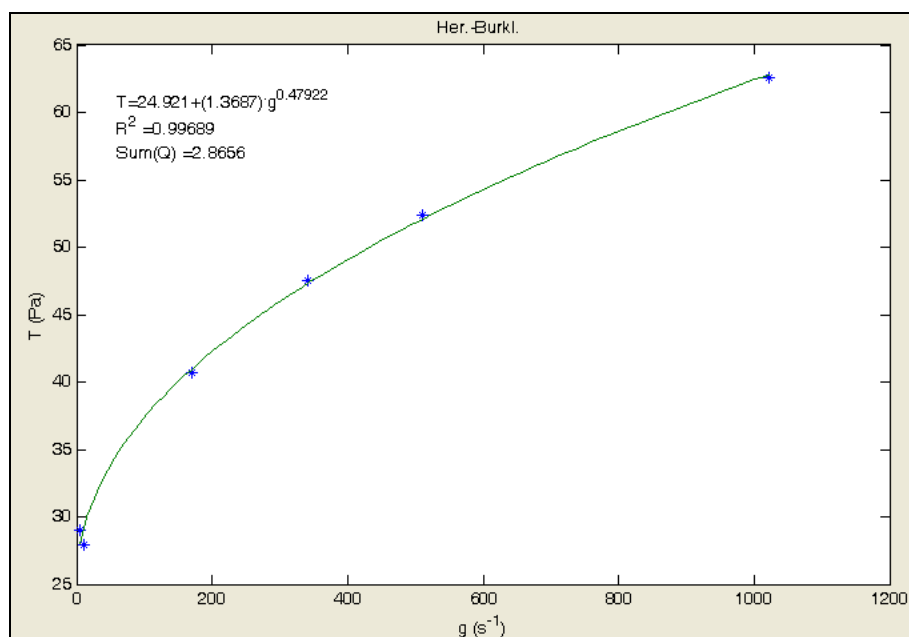
**Ρεόγραμμα 2.20:** Πολφός Carbopol 980 0.1%(w/v) 500ml.



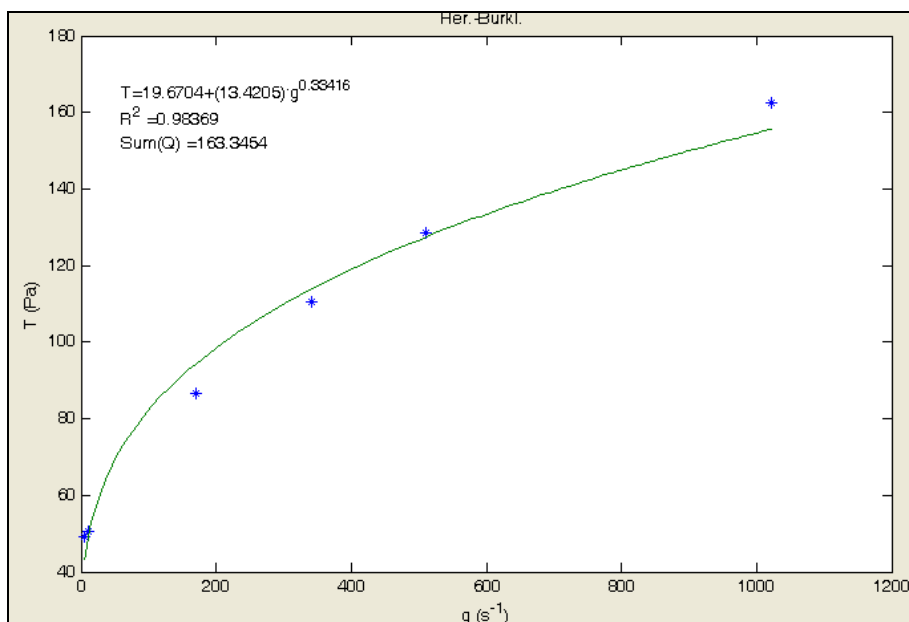
**Ρεόγραμμα 2.21:** Πολφός Carbopol 980 0.15%(w/v) 500ml.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

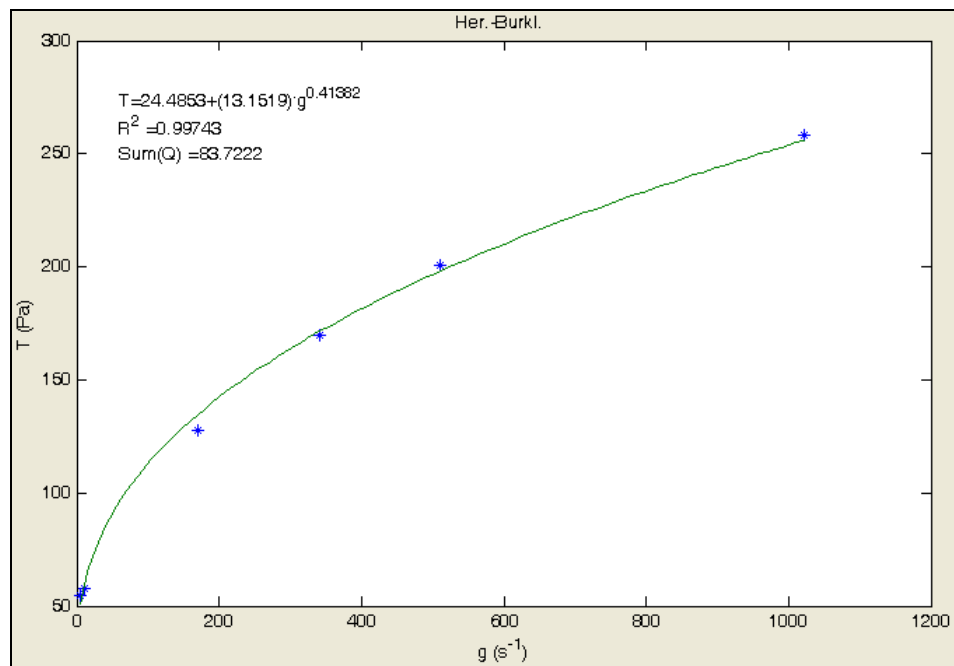
### ΡΕΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΟΛΦΩΝ ΜΠΕΤΟΝΙΤΗ - CMC - NaCl.



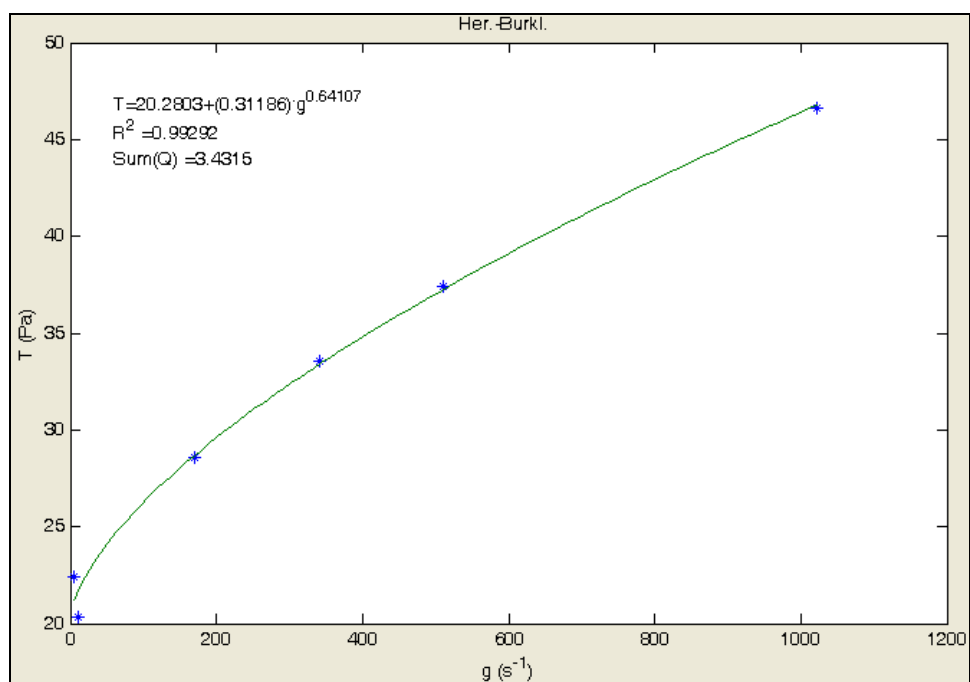
**Ρεόγραμμα 3.1:** Πολφός μπετονίτη 6.42% (w/v) 500ml.



**Ρεόγραμμα 3.2:** Πολφός μπετονίτη 6.42%- CMC 0.1%(w/v) 500ml.

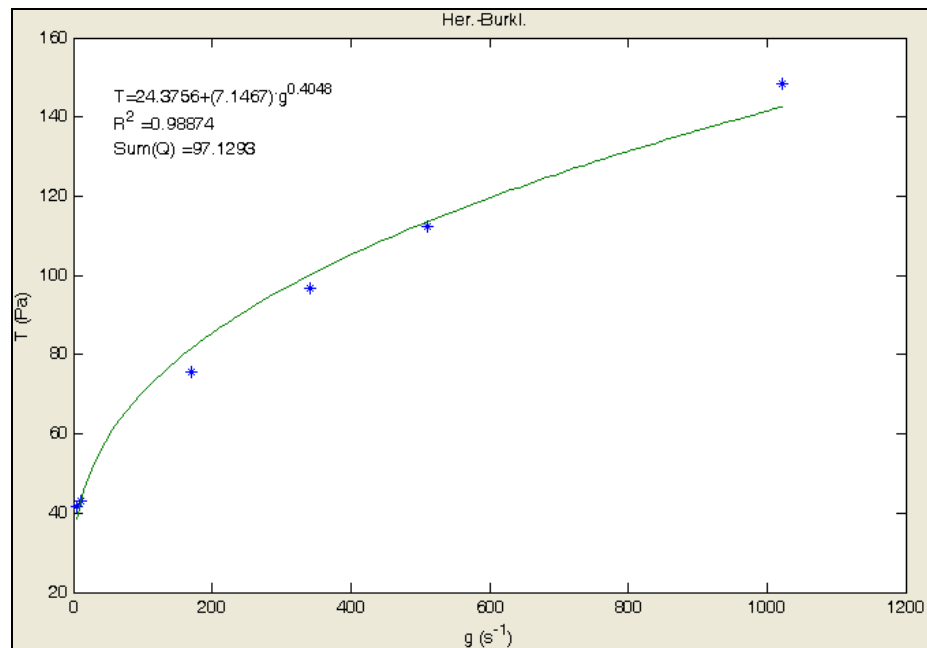


**Ρεόγραμμα 3.3:** Πολφός μετεονίτη 6.42%- CMC 0.2%(w/v) 500ml.

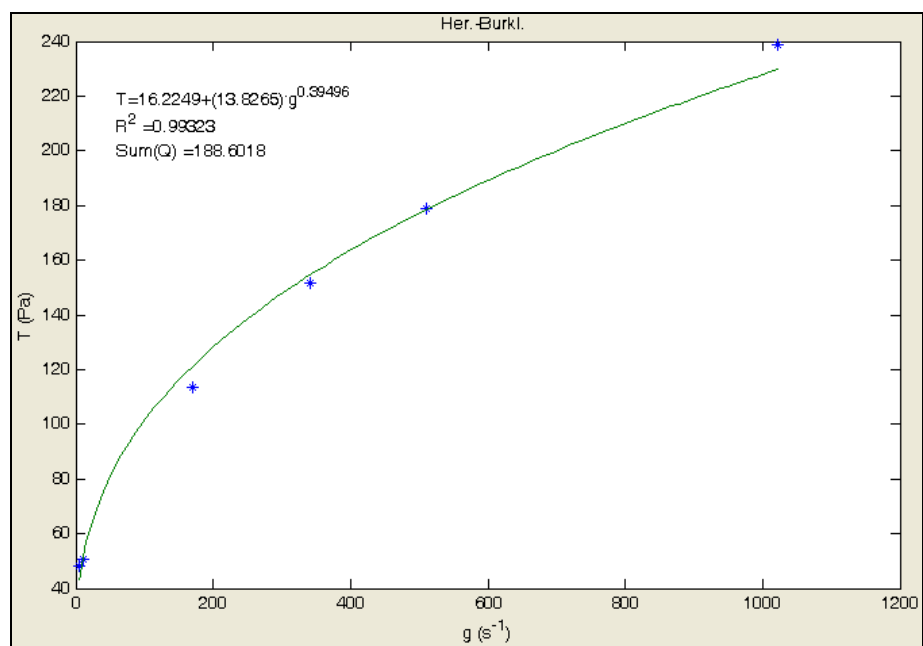


**Ρεόγραμμα 3.4:** Πολφός μετεονίτη 6.42% (w/v) – NaCl 0.01M, 500ml.

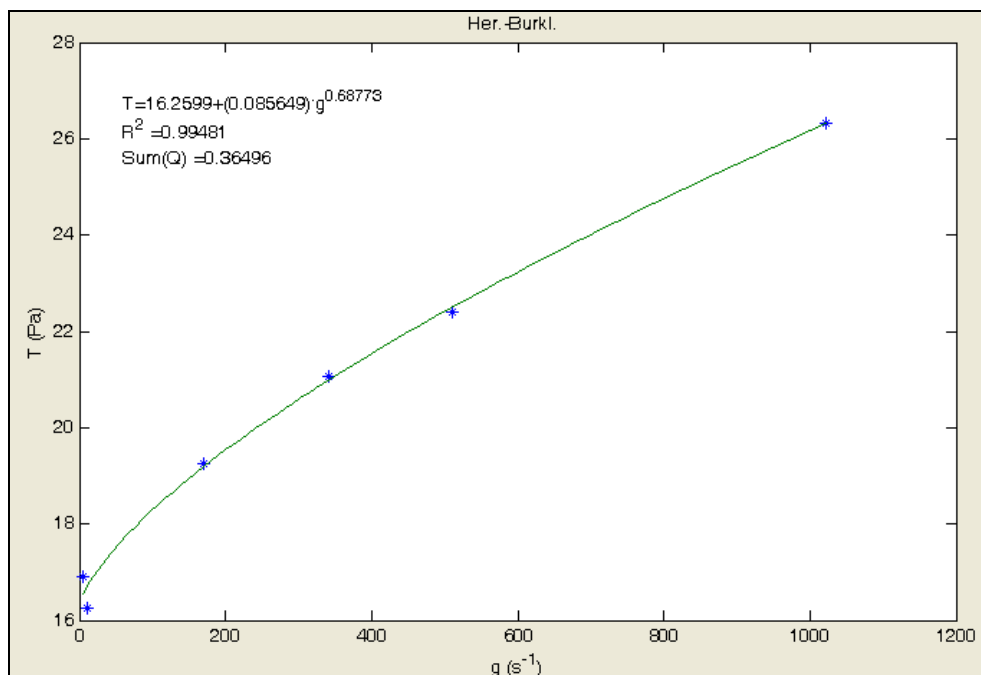




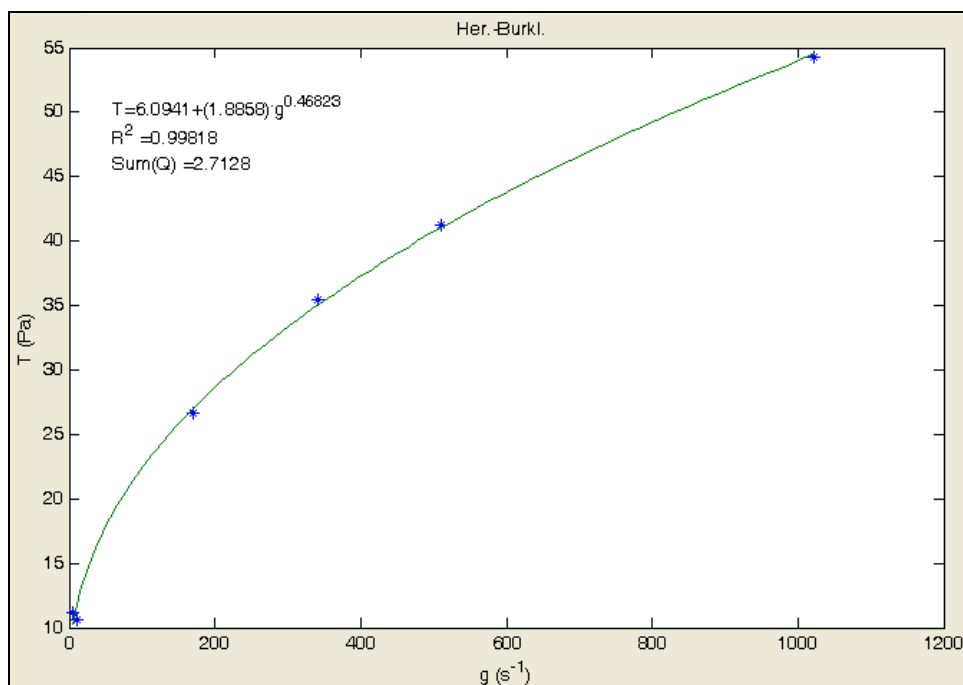
**Ρεόγραμμα 3.5:** Πολφός μπετονίτη 6.42% - CMC 0.1%(w/v) – NaCl 0.01M, 500ml.



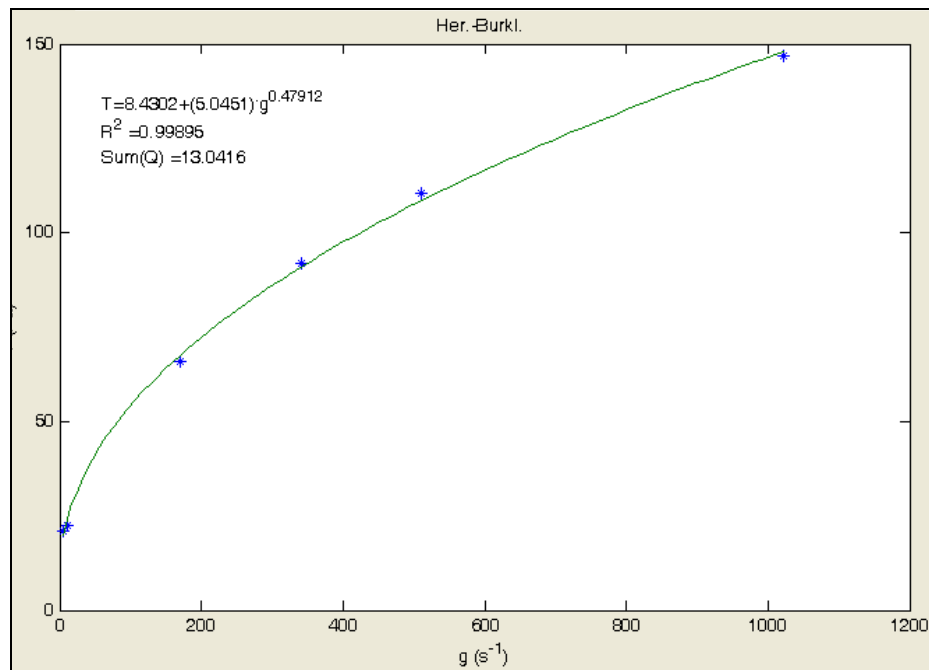
**Ρεόγραμμα 3.6:** Πολφός μπετονίτη 6.42% - CMC 0.2%(w/v) – NaCl 0.01M, 500ml.



**Ρεόγραμμα 3.7:** Πολφός μπετονίτη 6.42%(w/v) – NaCl 0.1M, 500ml.



**Ρεόγραμμα 3.8:** Πολφός μπετονίτη 6.42% - CMC 0.1%(w/v) – NaCl 0.1M, 500ml.



**Ρεόγραμμα 3.9:** Πολφός μπετονίτη 6.42% - CMC 0.2%(w/v) – NaCl 0.1M, 500ml.

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ : ΠΙΝΑΚΕΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΙΞΩΔΟΜΕΤΡΗΣΗΣ**

Δείγμα:			Bentonite 3% CMC 0%		Bentonite 3% CMC 0.2%		Bentonite 3% CMC 0.4%		Bentonite 3% CMC 0.6%	
Step (-)	Speed (rpm)	Shear rate (1/s)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)
1	600	1021,38	12,99	12,72	16,50	16,15	27,99	27,41	40,49	39,65
1	600	1021,38	13,49	13,21	17,00	16,64	26,99	26,43	39,49	38,67
1	600	1021,38	13,49	13,27	17,50	17,13	27,49	26,92	39,99	39,16
1	600	1021,38	13,49	13,21	17,50	17,13	27,49	26,92	39,99	39,16
1	600	1021,38	13,49	13,21	17,50	17,13	27,49	26,92	39,99	39,16
1	600	1021,38	13,99	13,70	17,50	17,13	27,99	27,41	39,99	39,16
2	300	510,69	10,99	21,53	11,50	22,52	17,50	34,27	25,49	49,93
2	300	510,69	10,99	21,53	11,50	22,52	17,50	34,27	25,49	49,93
2	300	510,69	10,99	21,53	11,50	22,52	17,50	34,27	25,49	49,93
2	300	510,69	10,97	21,53	12,00	23,50	17,50	34,27	25,49	49,93
2	300	510,69	10,99	21,53	12,00	23,50	17,50	34,27	25,99	50,91
2	300	510,69	10,99	21,53	12,00	23,50	18,00	35,25	25,99	50,91
3	200	340,46	9,49	27,90	9,00	26,43	13,50	39,65	19,49	57,28
3	200	340,46	9,49	27,90	9,50	27,90	13,50	39,65	19,49	57,28
3	200	340,46	9,49	27,90	9,50	27,90	13,50	39,65	19,49	57,28
3	200	340,46	9,49	27,90	9,50	27,90	13,50	39,65	19,49	57,28
3	200	340,46	9,49	27,90	9,50	27,90	13,50	39,65	19,99	58,74
3	200	340,46	9,49	27,90	9,50	27,90	14,00	41,12	19,49	57,28
4	100	170,23	7,48	44,05	6,00	35,25	8,50	49,93	12,00	70,49
4	100	170,23	7,49	44,08	6,50	38,18	8,50	49,93	12,00	70,49
4	100	170,23	7,49	44,05	6,50	38,18	8,50	49,93	12,00	70,49
4	100	170,23	7,49	44,05	6,00	35,25	8,50	49,93	12,50	73,43
4	100	170,23	7,49	44,05	6,00	35,25	8,50	49,93	12,50	73,43
4	100	170,23	7,48	44,08	6,00	35,25	8,50	49,93	12,50	73,43
5	6	10,21	3,99	391,62	1,50	146,86	1,50	146,86	2,00	195,81
5	6	10,21	4,49	440,58	1,50	146,86	2,00	195,81	3,00	293,72
5	6	10,21	4,99	489,53	2,00	195,81	2,00	195,81	2,50	244,77
5	6	10,21	4,49	440,58	1,50	146,86	2,50	244,77	3,00	293,72
5	6	10,21	4,49	440,58	2,00	195,81	2,50	244,77	3,00	293,72
5	6	10,21	4,49	440,58	1,50	146,86	2,00	195,81	3,50	342,67
6	3	5,10	4,49	881,16	1,50	293,72	2,00	391,63	2,50	489,53
6	3	5,10	4,49	881,10	1,50	293,72	2,00	391,63	2,50	489,53
6	3	5,10	4,49	881,10	1,50	293,72	2,00	391,63	2,50	489,53
6	3	5,10	4,49	881,16	2,00	391,63	2,00	391,63	2,50	489,53
6	3	5,10	3,99	783,25	2,00	391,63	2,50	489,53	2,50	489,53
6	3	5,10	4,49	881,16	2,00	391,63	2,00	391,63	3,00	587,44

Δείγμα:			Bentonite 3% CMC 0.8%		Bentonite 3% CMC 1%		Bentonite 3% CMC 1.5%		Bentonite 4% CMC 0%	
Step (-)	Speed (rpm)	Shear rate (1/s)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)
1	600	1021,38	52,49	51,40	67,48	66,09	108,47	106,23	15,00	14,69
1	600	1021,38	52,49	51,40	66,48	65,11	108,47	106,23	15,00	14,69
1	600	1021,38	52,99	51,89	66,48	65,11	108,47	106,23	15,50	15,18
1	600	1021,38	52,99	51,89	66,48	65,11	107,97	105,74	15,50	15,18
1	600	1021,38	52,99	51,89	66,48	65,11	107,97	105,74	16,00	15,67
1	600	1021,38	52,99	51,89	66,98	65,60	107,97	105,74	16,00	15,67
2	300	510,69	33,99	66,58	43,49	85,18	72,48	141,96	11,50	22,52
2	300	510,69	33,99	66,58	43,49	85,18	72,48	141,96	11,50	22,52
2	300	510,69	33,99	66,58	43,49	85,18	72,48	141,96	12,00	23,50
2	300	510,69	33,99	66,58	43,99	86,16	72,98	142,94	12,00	23,50
2	300	510,69	33,99	66,58	43,49	85,18	72,98	142,94	12,00	23,50
2	300	510,69	34,49	67,56	43,99	86,16	72,98	142,94	12,00	23,50
3	200	340,46	25,99	76,37	33,49	98,40	56,48	165,95	9,50	27,90
3	200	340,46	25,99	76,37	33,49	98,40	56,48	165,95	10,00	29,37
3	200	340,46	25,99	76,37	33,49	98,40	56,48	165,95	10,00	29,37
3	200	340,46	25,99	76,37	33,49	98,40	56,48	165,95	10,00	29,37
3	200	340,46	25,99	76,37	33,49	98,40	56,48	165,95	10,00	29,37
3	200	340,46	26,49	77,84	33,49	98,40	56,48	165,95	10,00	29,37
4	100	170,23	16,50	96,93	20,99	123,36	35,99	211,48	7,50	44,06
4	100	170,23	16,00	93,99	21,49	126,30	36,49	214,42	7,50	44,06
4	100	170,23	16,50	96,93	20,99	123,36	35,99	211,48	7,50	44,06
4	100	170,23	16,50	96,93	20,99	123,36	35,99	211,48	7,50	44,06
4	100	170,23	16,50	96,93	20,99	123,36	35,99	211,48	7,50	44,06
4	100	170,23	16,50	96,93	21,49	126,30	35,99	211,48	7,50	44,06
5	6	10,21	3,00	293,72	4,00	391,63	6,00	587,44	2,00	195,81
5	6	10,21	3,50	342,67	4,00	391,63	6,50	636,39	3,00	293,72
5	6	10,21	3,50	342,67	4,50	440,58	7,00	685,35	3,50	342,67
5	6	10,21	4,00	391,63	4,50	440,58	6,50	636,39	3,00	293,72
5	6	10,21	4,00	391,63	4,50	440,58	6,50	636,39	3,50	342,67
5	6	10,21	4,00	391,63	5,00	489,53	6,50	636,39	3,50	342,67
6	3	5,10	3,00	587,44	3,50	685,35	5,50	1076,97	3,50	685,35
6	3	5,10	3,00	587,44	3,50	685,35	5,00	979,07	3,50	685,35
6	3	5,10	3,00	587,44	3,50	685,35	5,00	979,07	3,00	587,44
6	3	5,10	3,00	587,44	4,00	783,25	5,50	1076,97	3,50	685,35
6	3	5,10	3,00	587,44	4,00	783,25	5,50	1076,97	3,50	685,35
6	3	5,10	3,00	587,44	4,00	783,25	5,50	1076,97	3,50	685,35

Δείγμα:			Bentonite 4% CMC 0.2%		Bentonite 4% CMC 0.5%		Bentonite 4% CMC 1%		Bentonite 3% Carbopol 0%	
Step (-)	Speed (rpm)	Shear rate (1/s)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)
1	600	1021,38	21,49	21,05	38,99	38,18	74,48	72,94	14,00	13,71
1	600	1021,38	20,99	20,56	39,49	38,67	75,98	74,41	14,00	13,71
1	600	1021,38	20,99	20,56	39,49	38,67	75,98	74,41	14,00	13,71
1	600	1021,38	20,99	20,56	39,49	38,67	76,48	74,90	14,50	14,20
1	600	1021,38	21,49	21,05	39,49	38,67	76,48	74,90	15,00	14,69
1	600	1021,38	21,49	21,05	39,49	38,67	76,48	74,90	14,50	14,20
2	300	510,69	13,50	26,43	25,49	49,93	49,49	96,93	11,50	22,52
2	300	510,69	14,00	27,41	25,49	49,93	49,49	96,93	11,50	22,52
2	300	510,69	14,00	27,41	25,49	49,93	49,49	96,93	11,50	22,52
2	300	510,69	14,00	27,41	25,49	49,93	49,99	97,91	11,50	22,52
2	300	510,69	14,00	27,41	25,99	50,91	49,99	97,91	11,50	22,52
2	300	510,69	14,00	27,41	25,99	50,91	49,99	97,91	11,50	22,52
3	200	340,46	11,00	32,31	19,99	58,74	38,49	113,08	10,00	29,37
3	200	340,46	11,00	32,31	19,49	57,28	38,49	113,08	10,00	29,37
3	200	340,46	11,00	32,31	19,99	58,74	38,49	113,08	10,00	29,37
3	200	340,46	11,00	32,31	19,99	58,74	38,49	113,08	10,00	29,37
3	200	340,46	11,00	32,31	19,99	58,74	38,49	113,08	10,00	29,37
3	200	340,46	11,50	33,78	19,99	58,74	38,49	113,08	10,00	29,37
4	100	170,23	7,50	44,06	13,00	76,37	24,49	143,92	8,00	47,00
4	100	170,23	7,50	44,06	13,00	76,37	24,49	143,92	8,00	47,00
4	100	170,23	7,50	44,06	12,50	73,43	24,49	143,92	8,00	47,00
4	100	170,23	7,50	44,06	13,00	76,37	24,49	143,92	8,50	49,93
4	100	170,23	7,50	44,06	13,00	76,37	24,49	143,92	8,00	47,00
4	100	170,23	7,50	44,06	12,50	73,43	24,49	143,92	8,00	47,00
5	6	10,21	2,00	195,81	3,00	293,72	5,50	538,49	4,50	440,58
5	6	10,21	2,50	244,77	3,50	342,67	6,00	587,44	5,00	489,53
5	6	10,21	2,00	195,81	4,00	391,63	5,50	538,49	5,00	489,53
5	6	10,21	2,00	195,81	3,50	342,67	6,00	587,44	5,00	489,53
5	6	10,21	2,00	195,81	3,50	342,67	5,50	538,49	5,00	489,53
5	6	10,21	2,00	195,81	3,50	342,67	5,50	538,49	5,50	538,49
6	3	5,10	2,00	391,63	3,00	587,44	5,00	979,07	5,00	979,07
6	3	5,10	2,00	391,63	3,00	587,44	5,00	979,07	5,00	979,07
6	3	5,10	1,50	293,72	3,50	685,35	5,00	979,07	5,00	979,07
6	3	5,10	2,00	391,63	3,00	587,44	5,00	979,07	5,00	979,07
6	3	5,10	2,00	391,63	3,00	587,44	5,00	979,07	5,00	979,07
6	3	5,10	2,00	391,63	3,50	685,35	5,00	979,07	4,50	881,16

Δείγμα:			Bentonite 3% Carbopol 0.02%		Bentonite 3% Carbopol 0.03%		Bentonite 3% Carbopol 0.05%		Bentonite 3% Carbopol 0.08%	
Step (-)	Speed (rpm)	Shear rate (1/s)	Shear stress (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stress (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stress (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stress (Pa)	Viscosity (cP)
1	600	1021,38	9,00	8,81	9,50	9,30	14,00	13,71	24,99	24,48
1	600	1021,38	8,50	8,32	10,00	9,79	14,00	13,71	25,49	24,97
1	600	1021,38	9,00	8,81	10,00	9,79	14,50	14,20	25,99	25,46
1	600	1021,38	9,00	8,81	11,00	10,77	14,50	14,20	25,99	25,46
1	600	1021,38	9,50	9,30	10,50	10,28	15,00	14,69	26,49	25,95
1	600	1021,38	9,50	9,30	11,00	10,77	15,00	14,69	26,49	25,95
2	300	510,69	6,50	12,73	7,50	14,69	10,50	20,56	18,99	37,20
2	300	510,69	6,50	12,73	7,50	14,69	10,50	20,56	19,49	38,18
2	300	510,69	6,50	12,73	7,50	14,69	10,50	20,56	19,49	38,18
2	300	510,69	7,00	13,71	8,00	15,67	10,50	20,56	19,49	38,18
2	300	510,69	7,00	13,71	8,00	15,67	10,50	20,56	19,49	38,18
2	300	510,69	7,00	13,71	8,00	15,67	11,00	21,54	19,99	39,16
3	200	340,46	5,50	16,15	6,00	17,62	8,50	24,97	16,50	48,46
3	200	340,46	6,00	17,62	6,50	19,09	8,50	24,97	17,00	49,93
3	200	340,46	6,00	17,62	6,50	19,09	8,50	24,97	16,50	48,46
3	200	340,46	6,00	17,62	6,50	19,09	9,00	26,43	16,50	48,46
3	200	340,46	6,00	17,62	6,50	19,09	8,50	24,97	17,00	49,93
3	200	340,46	6,00	17,62	6,50	19,09	9,00	26,43	17,00	49,93
4	100	170,23	4,00	23,50	4,50	26,43	6,00	35,25	12,50	73,43
4	100	170,23	4,50	26,43	4,50	26,43	6,50	38,18	12,50	73,43
4	100	170,23	4,50	26,43	4,50	26,43	6,50	38,18	12,50	73,43
4	100	170,23	4,50	26,43	4,50	26,43	6,00	35,25	12,50	73,43
4	100	170,23	4,50	26,43	4,50	26,43	6,00	35,25	13,00	76,37
4	100	170,23	4,50	26,43	4,50	26,43	6,50	38,18	13,00	76,37
5	6	10,21	1,00	97,91	1,00	97,91	1,50	146,86	4,50	440,58
5	6	10,21	1,50	146,86	1,50	146,86	2,00	195,81	5,00	489,53
5	6	10,21	1,50	146,86	1,50	146,86	1,50	146,86	5,00	489,53
5	6	10,21	1,50	146,86	1,50	146,86	2,00	195,81	5,00	489,53
5	6	10,21	1,50	146,86	1,50	146,86	2,00	195,81	5,00	489,53
5	6	10,21	2,00	195,81	2,00	195,81	2,50	244,77	5,00	489,53
6	3	5,10	1,50	293,72	1,00	195,81	2,00	391,63	4,50	881,16
6	3	5,10	1,50	293,72	1,00	195,81	2,00	391,63	4,50	881,16
6	3	5,10	1,50	293,72	1,50	293,72	2,00	391,63	4,50	881,16
6	3	5,10	1,50	293,72	1,50	293,72	2,00	391,63	4,50	881,16
6	3	5,10	1,50	293,72	1,50	293,72	2,00	391,63	4,50	881,16
6	3	5,10	1,50	293,72	1,50	293,72	2,00	391,63	4,50	881,16

Δείγμα:			Bentonite 3% Carbopol 0.1%		Bentonite 3% Carbopol 0.15%		Bentonite 4% Carbopol 0%		Bentonite 4% Carbopol 0.02%	
Step (-)	Speed (rpm)	Shear rate (1/s)	Shear stress (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stress (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stress (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stress (Pa)	Viscosity (cP)
1	600	1021,38	33,49	32,80	69,98	68,53	36,49	35,74	27,99	27,41
1	600	1021,38	32,99	32,31	71,48	70,00	34,99	34,27	25,99	25,46
1	600	1021,38	32,99	32,31	70,98	69,51	35,99	35,25	26,49	25,95
1	600	1021,38	32,99	32,31	70,98	69,51	35,99	35,25	26,49	25,95
1	600	1021,38	32,99	32,31	70,98	69,51	35,99	35,25	26,49	25,95
1	600	1021,38	32,99	32,31	70,98	69,51	35,99	35,25	26,99	26,43
2	300	510,69	24,99	48,95	56,98	111,61	29,99	58,74	20,99	41,12
2	300	510,69	24,99	48,95	57,48	112,59	30,49	59,72	20,99	41,12
2	300	510,69	24,99	48,95	57,48	112,59	29,99	58,74	20,99	41,12
2	300	510,69	25,49	49,93	56,98	111,61	30,49	59,72	20,99	41,12
2	300	510,69	24,99	48,95	57,48	112,59	30,49	59,72	20,99	41,12
2	300	510,69	24,99	48,95	56,98	111,61	30,49	59,72	20,99	41,12
3	200	340,46	21,49	63,15	49,99	146,86	27,49	80,77	18,00	52,87
3	200	340,46	20,99	61,68	49,99	146,86	27,49	80,77	18,50	54,34
3	200	340,46	21,49	63,15	49,99	146,86	27,49	80,77	18,00	52,87
3	200	340,46	21,49	63,15	49,49	145,39	27,49	80,77	18,50	54,34
3	200	340,46	21,49	63,15	49,99	146,86	27,49	80,77	18,50	54,34
3	200	340,46	21,49	63,15	48,99	143,92	27,49	80,77	18,50	54,34
4	100	170,23	16,00	93,99	40,49	237,91	23,49	138,05	15,00	88,12
4	100	170,23	16,00	93,99	39,99	234,98	23,49	138,05	15,00	88,12
4	100	170,23	16,50	96,93	40,49	237,91	23,49	138,05	15,00	88,12
4	100	170,23	16,50	96,93	40,49	237,91	23,99	140,99	15,50	91,05
4	100	170,23	16,00	93,99	39,99	234,98	23,99	140,99	15,00	88,12
4	100	170,23	16,50	96,93	39,99	234,98	23,99	140,99	15,50	91,05
5	6	10,21	6,00	587,44	18,50	1811,27	15,50	1517,55	9,00	881,16
5	6	10,21	6,50	636,39	19,49	1909,18	16,50	1615,46	10,00	979,07
5	6	10,21	6,50	636,39	19,99	1958,13	16,50	1615,46	10,50	1028,02
5	6	10,21	7,00	685,35	19,99	1958,13	17,50	1713,37	10,50	1028,02
5	6	10,21	7,00	685,35	20,49	2007,09	17,00	1664,41	11,00	1076,97
5	6	10,21	7,00	685,35	20,49	2007,09	17,50	1713,37	11,00	1076,97
6	3	5,10	6,00	1174,88	17,50	3426,74	17,50	3426,74	11,50	2251,85
6	3	5,10	6,00	1174,88	17,50	3426,74	17,00	3328,83	10,50	2056,04
6	3	5,10	6,50	1272,79	18,00	3524,64	18,00	3524,64	11,50	2251,85
6	3	5,10	6,50	1272,79	18,00	3524,64	17,50	3426,74	11,50	2251,85
6	3	5,10	6,50	1272,79	18,00	3524,64	17,50	3426,74	11,50	2251,85
6	3	5,10	6,50	1272,79	18,50	3622,55	17,50	3426,74	11,50	2251,85



Δείγμα:			Bentonite 4% Carbopol 0.03%		Bentonite 4% Carbopol 0.05%		Bentonite 4% Carbopol 0.07%		Bentonite 4% Carbopol 0.08%	
Step (-)	Speed (rpm)	Shear rate (1/s)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)
1	600	1021,38	30,99	30,35	30,99	30,35	34,99	34,27	60,48	59,23
1	600	1021,38	31,49	30,84	30,49	29,86	35,99	35,25	51,99	50,91
1	600	1021,38	31,99	31,33	30,99	30,35	36,99	36,23	51,49	50,42
1	600	1021,38	32,49	31,82	30,99	30,35	36,99	36,23	51,49	50,42
1	600	1021,38	32,99	32,31	31,99	31,33	36,99	36,23	51,49	50,42
1	600	1021,38	33,49	32,80	32,49	31,82	37,49	36,72	51,49	50,42
2	300	510,69	26,49	51,89	23,99	47,00	28,49	55,81	38,99	76,37
2	300	510,69	26,49	51,89	24,49	47,97	28,49	55,81	38,99	76,37
2	300	510,69	26,49	51,89	24,49	47,97	28,49	55,81	38,99	76,37
2	300	510,69	26,49	51,89	24,99	48,95	28,99	56,79	38,99	76,37
2	300	510,69	26,99	52,87	24,99	48,95	28,99	56,79	38,99	76,37
2	300	510,69	26,99	52,87	25,49	49,93	28,99	56,79	38,99	76,37
3	200	340,46	23,99	70,49	21,49	63,15	24,49	71,96	32,99	96,93
3	200	340,46	23,49	69,02	21,49	63,15	24,49	71,96	32,99	96,93
3	200	340,46	23,99	70,49	21,99	64,62	24,99	73,43	33,49	98,40
3	200	340,46	23,99	70,49	21,99	64,62	24,49	71,96	33,49	98,40
3	200	340,46	23,99	70,49	21,99	64,62	24,99	73,43	33,49	98,40
3	200	340,46	23,99	70,49	21,99	64,62	24,99	73,43	33,49	98,40
4	100	170,23	19,99	117,49	17,00	99,86	18,99	111,61	25,49	149,80
4	100	170,23	20,49	120,43	17,50	102,80	19,49	114,55	25,99	152,73
4	100	170,23	20,49	120,43	17,50	102,80	19,49	114,55	26,49	155,67
4	100	170,23	20,49	120,43	18,00	105,74	19,49	114,55	25,99	152,73
4	100	170,23	20,49	120,43	18,00	105,74	19,99	117,49	25,99	152,73
4	100	170,23	20,99	123,36	18,00	105,74	19,49	114,55	25,99	152,73
5	6	10,21	12,00	1174,88	6,50	636,39	7,50	734,30	10,00	979,07
5	6	10,21	14,00	1370,69	8,00	783,25	8,00	783,25	11,00	1076,97
5	6	10,21	14,00	1370,69	8,50	832,21	8,50	832,21	11,50	1125,93
5	6	10,21	15,00	1468,60	9,00	881,16	9,00	881,16	12,00	1174,88
5	6	10,21	15,00	1468,60	9,50	930,11	9,00	881,16	12,50	1223,83
5	6	10,21	15,50	1517,55	9,50	930,11	9,00	881,16	12,00	1174,88
6	3	5,10	15,50	3035,11	9,50	1860,23	8,50	1664,41	11,00	2153,95
6	3	5,10	15,50	3035,11	10,00	1958,13	8,50	1664,41	11,00	2153,95
6	3	5,10	16,00	3133,02	10,00	1958,13	9,00	1762,32	11,50	2251,85
6	3	5,10	16,50	3230,92	10,50	2056,04	9,00	1762,32	11,50	2251,85
6	3	5,10	17,00	3328,83	10,50	2056,04	9,00	1762,32	11,50	2251,85
6	3	5,10	17,00	3328,83	11,00	2153,95	9,50	1860,23	11,50	2251,85

Δείγμα:			Bentonite 4% Carbopol 0.09%		Bentonite 4% Carbopol 0.15%		Bentonite 6.42% CMC 0%		Bentonite 6.42% CMC 0.1%	
Step (-)	Speed (rpm)	Shear rate (1/s)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)
1	600	1021,38	63,48	62,17	90,98	89,10	58,48	57,28	132,96	130,22
1	600	1021,38	67,48	66,09	97,97	95,95	61,98	60,70	167,46	163,99
1	600	1021,38	67,48	66,09	97,47	95,46	62,98	61,68	168,96	165,46
1	600	1021,38	67,48	66,09	97,47	95,46	63,48	62,17	168,46	164,97
1	600	1021,38	67,48	66,09	96,97	94,97	63,98	62,66	168,46	164,97
1	600	1021,38	67,48	66,09	96,47	94,48	64,48	63,15	168,96	165,46
2	300	510,69	53,49	104,76	77,48	151,76	51,99	101,82	126,97	248,68
2	300	510,69	53,49	104,76	76,98	150,78	52,49	102,80	127,97	250,64
2	300	510,69	53,49	104,76	76,98	150,78	52,49	102,80	128,47	251,62
2	300	510,69	53,99	105,74	76,98	150,78	52,49	102,80	128,97	252,60
2	300	510,69	53,99	105,74	76,48	149,80	52,49	102,80	128,97	252,60
2	300	510,69	53,99	105,74	76,48	149,80	52,49	102,80	129,47	253,58
3	200	340,46	46,49	136,58	66,98	196,79	47,49	139,52	109,97	323,09
3	200	340,46	46,49	136,58	66,98	196,79	47,49	139,52	110,47	324,56
3	200	340,46	46,49	136,58	66,48	195,32	47,49	139,52	110,47	324,56
3	200	340,46	46,49	136,58	66,98	196,79	47,49	139,52	110,47	324,56
3	200	340,46	46,49	136,58	66,48	195,32	47,49	139,52	110,97	326,03
3	200	340,46	46,49	136,58	65,98	193,86	47,99	140,99	110,97	326,03
4	100	170,23	37,49	220,29	53,49	314,28	40,49	237,91	85,98	505,20
4	100	170,23	37,49	220,29	53,49	314,28	40,49	237,91	86,48	508,14
4	100	170,23	36,99	217,35	53,49	314,28	40,49	237,91	86,48	508,14
4	100	170,23	37,49	220,29	53,49	314,28	40,99	240,85	86,48	508,14
4	100	170,23	37,49	220,29	53,49	314,28	40,99	240,85	86,98	511,07
4	100	170,23	36,99	217,35	52,99	311,34	40,99	240,85	86,98	511,07
5	6	10,21	16,00	1566,51	25,49	2496,62	25,99	2545,58	51,49	5042,20
5	6	10,21	17,50	1713,37	25,99	2545,58	27,99	2741,39	50,99	4993,24
5	6	10,21	17,50	1713,37	26,99	2643,48	27,99	2741,39	50,49	4944,29
5	6	10,21	17,50	1713,37	26,99	2643,48	28,49	2790,34	50,49	4944,29
5	6	10,21	17,50	1713,37	27,99	2741,39	28,49	2790,34	49,49	4846,38
5	6	10,21	18,00	1762,32	27,99	2741,39	28,49	2790,34	50,99	4993,24
6	3	5,10	15,50	3035,11	23,99	4699,52	29,49	5776,50	50,99	9986,49
6	3	5,10	16,00	3133,02	24,49	4797,43	28,49	5580,68	48,49	9496,95
6	3	5,10	16,00	3133,02	24,49	4797,43	28,99	5678,59	49,49	9692,77
6	3	5,10	16,50	3230,92	25,49	4993,24	28,49	5580,68	48,99	9594,86
6	3	5,10	16,50	3230,92	24,99	4895,34	28,99	5678,59	48,99	9594,86
6	3	5,10	16,50	3230,92	24,99	4895,34	29,49	5776,50	47,49	9301,14

Δείγμα:			Bentonite 6.42% CMC 0.2%		Bentonite 6.42% CMC 0% NaCl 0.01M		Bentonite 6.42% CMC 0.1% NaCl 0.01M		Bentonite 6.42% CMC 0.2% NaCl 0.01M	
Step (-)	Speed (rpm)	Shear rate (1/s)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)
1	600	1021,38	199,45	195,32	44,49	43,57	107,47	105,25	153,46	150,29
1	600	1021,38	266,93	261,41	44,99	44,06	146,46	143,43	237,94	233,02
1	600	1021,38	270,43	264,84	45,49	44,55	148,46	145,39	238,94	234,00
1	600	1021,38	270,93	265,33	45,99	45,04	148,96	145,88	238,94	234,00
1	600	1021,38	270,43	264,84	46,49	45,53	148,96	145,88	238,44	233,51
1	600	1021,38	269,93	264,35	46,49	45,53	149,46	146,37	238,44	233,51
2	300	510,69	198,45	388,69	36,99	72,45	110,97	217,35	176,45	345,61
2	300	510,69	199,95	391,63	37,49	73,43	111,97	219,31	178,45	349,53
2	300	510,69	200,45	392,61	37,49	73,43	111,97	219,31	179,45	351,49
2	300	510,69	201,95	395,54	37,49	73,43	112,97	221,27	179,45	351,49
2	300	510,69	201,95	395,54	37,49	73,43	112,97	221,27	179,95	352,46
2	300	510,69	202,45	396,52	37,49	73,43	113,47	222,25	180,45	353,44
3	200	340,46	169,45	497,86	33,49	98,40	95,97	281,97	150,46	442,05
3	200	340,46	169,45	497,86	33,49	98,40	96,47	283,44	151,46	444,99
3	200	340,46	169,95	499,32	33,49	98,40	96,47	283,44	151,46	444,99
3	200	340,46	169,95	499,32	33,99	99,86	96,97	284,91	151,46	444,99
3	200	340,46	170,45	500,79	33,49	98,40	96,97	284,91	151,96	446,45
3	200	340,46	170,45	500,79	33,49	98,40	97,47	286,38	151,96	446,45
4	100	170,23	126,97	746,05	28,49	167,42	74,98	440,58	112,47	660,87
4	100	170,23	126,97	746,05	28,49	167,42	75,48	443,52	112,47	660,87
4	100	170,23	127,47	748,99	28,49	167,42	75,48	443,52	113,47	666,74
4	100	170,23	127,97	751,92	28,49	167,42	75,48	443,52	113,47	666,74
4	100	170,23	127,97	751,92	28,49	167,42	75,98	446,45	113,97	669,68
4	100	170,23	128,47	754,86	28,99	170,36	75,98	446,45	113,97	669,68
5	6	10,21	57,98	5678,59	18,99	1860,23	43,49	4258,94	50,99	4993,24
5	6	10,21	58,48	5727,54	20,49	2007,09	42,49	4161,04	50,99	4993,24
5	6	10,21	56,48	5531,73	19,99	1958,13	42,99	4209,99	49,49	4846,38
5	6	10,21	57,98	5678,59	20,49	2007,09	43,49	4258,94	51,49	5042,20
5	6	10,21	56,98	5580,68	20,49	2007,09	43,49	4258,94	49,99	4895,34
5	6	10,21	57,98	5678,59	21,49	2104,99	42,49	4161,04	51,99	5091,15
6	3	5,10	57,98	11357,18	22,99	4503,71	43,99	8615,79	50,49	9888,58
6	3	5,10	55,49	10867,65	21,99	4307,90	40,99	8028,35	47,49	9301,14
6	3	5,10	54,49	10671,83	21,99	4307,90	40,99	8028,35	48,49	9496,95
6	3	5,10	52,99	10378,11	22,49	4405,80	42,49	8322,07	48,99	9594,86
6	3	5,10	53,49	10476,02	21,99	4307,90	40,99	8028,35	47,49	9301,14
6	3	5,10	52,99	10378,11	22,99	4503,71	40,99	8028,35	47,49	9301,14

Δείγμα:			Bentonite 6.42% CMC 0% NaCl 0.1M		Bentonite 6.42% CMC 0.1% NaCl 0.1M		Bentonite 6.42% CMC 0.2% NaCl 0.1M	
Step (-)	Speed (rpm)	Shear rate (1/s)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)	Shear stres (Pa)	Viscosity (cP)
1	600	1021,38	25,99	25,46	51,99	50,91	130,97	128,26
1	600	1021,38	25,99	25,46	52,49	51,40	147,96	144,90
1	600	1021,38	26,49	25,95	53,99	52,87	148,96	145,88
1	600	1021,38	26,49	25,95	54,99	53,85	150,46	147,35
1	600	1021,38	26,49	25,95	55,49	54,34	151,46	148,33
1	600	1021,38	26,49	25,95	56,48	55,32	151,96	148,82
2	300	510,69	22,49	44,06	39,99	78,33	108,97	213,44
2	300	510,69	22,49	44,06	40,99	80,28	109,97	215,39
2	300	510,69	21,99	43,08	40,99	80,28	110,47	216,37
2	300	510,69	22,49	44,06	41,49	81,26	110,47	216,37
2	300	510,69	22,49	44,06	41,99	82,24	110,97	217,35
2	300	510,69	22,49	44,06	41,99	82,24	110,97	217,35
3	200	340,46	20,99	61,68	34,99	102,80	90,48	265,82
3	200	340,46	20,99	61,68	34,99	102,80	90,98	267,29
3	200	340,46	20,99	61,68	35,49	104,27	91,98	270,22
3	200	340,46	21,49	63,15	35,99	105,74	91,98	270,22
3	200	340,46	20,99	61,68	35,49	104,27	92,48	271,69
3	200	340,46	20,99	61,68	35,99	105,74	92,48	271,69
4	100	170,23	18,99	111,61	25,99	152,73	64,98	381,84
4	100	170,23	19,49	114,55	25,99	152,73	65,48	384,77
4	100	170,23	19,49	114,55	26,99	158,61	65,48	384,77
4	100	170,23	19,49	114,55	26,99	158,61	65,98	387,71
4	100	170,23	19,49	114,55	26,99	158,61	65,98	387,71
4	100	170,23	19,49	114,55	26,99	158,61	66,48	390,65
5	6	10,21	15,50	1517,55	9,00	881,16	21,49	2104,99
5	6	10,21	16,50	1615,46	10,50	1028,02	21,99	2153,95
5	6	10,21	16,00	1566,51	10,50	1028,02	21,99	2153,95
5	6	10,21	16,50	1615,46	11,00	1076,97	22,49	2202,90
5	6	10,21	16,00	1566,51	11,00	1076,97	22,49	2202,90
5	6	10,21	17,00	1664,41	11,50	1125,93	23,49	2300,81
6	3	5,10	17,50	3426,74	11,00	2153,95	20,99	4112,08
6	3	5,10	16,50	3230,92	11,00	2153,95	20,99	4112,08
6	3	5,10	16,50	3230,92	11,00	2153,95	21,49	4209,99
6	3	5,10	17,00	3328,83	11,00	2153,95	21,49	4209,99
6	3	5,10	17,00	3328,83	11,50	2251,85	20,99	4112,08
6	3	5,10	17,00	3328,83	11,50	2251,85	20,49	4014,18

