



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**«ΧΡΗΣΗ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΛΙΓΝΙΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΩΝ ΡΕΟΛΟΓΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΔΙΗΘΗΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΠΟΛΦΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ»**

Αθανάσιος Στ. Μιχαλάκης

Εξεταστική επιτροπή:

Β. Κελεσίδης, Επίκ. Καθηγητής (Επιβλέπων)

Γ. Χρηστίδης, Επίκ. Καθηγητής

Δρ. Κ. Παπανικολάου, Γεωλόγος Ι.Γ.Μ.Ε.

Χανιά

Μάρτιος 2004

«ΧΡΗΣΗ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΛΙΓΝΙΤΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΩΝ ΡΕΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΙΗΘΗΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΠΟΛΦΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ»

Περιεχόμενα

	Σελ.
Ευχαριστίες	I
Σκοπός της εργασίας.....	II
1ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ	
1.1. Θεωρητικό υπόβαθρο.....	1 – 1
1.2. Στρωτή ροή, ρυθμός διάτμησης και διατμητική τάση.....	1 – 3
1.2.1. Στρωτή ροή.....	1 – 3
1.2.2. Διαφορική κλίση της ταχύτητας και ρυθμός διάτμησης.....	1 – 3
1.2.3. Πεδίο διατμητικών τάσεων.....	1 – 4
1.3. Ρεολογικές ιδιότητες ρευστών.....	1 – 5
1.3.1. Νευτώνεια και μη νευτώνεια ρευστά.....	1 – 5
1.3.2. Ροή που εξαρτάται από το χρόνο.....	1 – 7
1.3.3. Ιξωδοελαστικά ρευστά.....	1 – 8
1.4. Ιξώδες των ρευστών.....	1 – 8
1.4.1. Ιξώδη υγρών.....	1 – 9
1.4.2. Κινηματικό ιξώδες.....	1 – 10
1.5. Ρεολογικά μοντέλα.....	1 – 10
1.5.1. Νευτώνειο μοντέλο.....	1 – 10
1.5.2. Μη νευτώνεια μοντέλα.....	1 – 11
2ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΠΟΛΦΟΙ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ	
2.1. Εισαγωγικά στοιχεία.....	2 – 1
2.1.1. Η ιστορία της χρήσης των ρευστών γεωτρήσεων.....	2 – 1
2.1.2. Ο ρόλος των ρευστών γεωτρήσεων στο ενεργειακό ισοζύγιο.....	2 – 3
2.2. Λειτουργία των ρευστών γεωτρήσεων.....	2 – 4
2.2.1. Μεταφορά θραυσμάτων.....	2 – 4

	Σελ.
2.2.2. Αιώρηση των θραυσμάτων.....	2 – 5
2.2.3. Μετάδοση υδραυλικής ισχύος στο κοπτικό άκρο.....	2 – 6
2.2.4. Ελαχιστοποίηση της καταστροφής του σχηματισμού.	2 – 6
2.2.5. Μείωση του ρυθμού διήθησης.....	2 – 7
2.2.6. Ψύξη – λίπανση του κοπτικού άκρου και της διατρητικής στήλης.....	2 – 7
2.2.7. Υποστήριξη της διατρητικής στήλης.....	2 – 8
2.2.8. Αποφυγή διάβρωσης.....	2 – 8
2.2.9. Εργασίες διαγραφιών.....	2 – 8
2.3. Προσθετικά σε λάσπες γεωτρήσεων.....	2 – 9
2.3.1. Βάση του πολφού.....	2 – 9
2.3.2. Ρευστά γεώτρησης με βάση το νερό.....	2 – 9
2.3.3. Πρόσθετα σε λάσπες με βάση το νερό.....	2 – 11
2.3.4. Ρευστά γεώτρησης με βάση το πετρέλαιο.....	2 – 22
2.4. Γεωτρήσεις υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης (HPHT).....	2 – 25
2.4.1. Εισαγωγή.....	2 – 26
2.4.2. Χρήση του λιγνίτη σε ρευστά γεωτρήσεων HPHT.....	2 – 32

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

ΠΟΛΦΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

3.1. Ανάλυση της ιδιότητας της διήθησης.....	3 – 1
3.1.1. Καταστροφή σχηματισμού λόγω του πολφού γεώτρησης.....	3 – 1
3.1.2. Γεωλογικοί σχηματισμοί και διηθητικά χαρακτηριστικά των πολφών.....	3 – 3
3.1.3. Υλικά υποβοήθησης στη διήθηση.....	3 – 5
3.1.4. Τύποι διήθησης.....	3 – 6
3.1.5. Χαρακτηριστικά υμενίου λάσπης.....	3 – 7
3.1.6. Τρόποι ρύθμισης της διήθησης.....	3 – 10
3.2. Ανάλυση της ιδιότητας της θιξοτροπίας.....	3 – 11
3.2.1. Ιστορικό της θιξοτροπίας.....	3 – 12

	Σελ.
3.2.2. Πρόοδος της έρευνας.....	3 – 12
3.2.3. Πως είναι κατανοητή η έννοια της θιξοτροπίας.....	3 – 15
3.2.4. Περιγραφή του φαινομένου της θιξοτροπίας.....	3 – 19
3.2.5. Τυπική συμπεριφορά θιξοτροπικών υλικών.....	3 – 19
3.2.6. Ιξωδοελαστικότητα και θιξοτροπία.....	3 – 21
3.2.7. Τυπικά πειράματα θιξοτροπίας – Πειράματα υστέρησης.....	3 – 22
4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΠΟΛΦΟΥ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	
4.1. Ορισμός των μπεντονιτών.....	4 – 1
4.1.1. Ορυκτολογικά χαρακτηριστικά των μπεντονιτών.....	4 – 2
4.1.2. Δομή των σμεκτιτών.....	4 – 3
4.1.3. Γένεση των κοιτασμάτων μπεντονίτη.....	4 – 5
4.1.4. Ταξινόμηση των μπεντονιτών.....	4 – 6
4.1.5. Χαρακτηριστικές ιδιότητες του μπεντονίτη.....	4 – 9
4.1.6. Χαρακτηριστικά κοιτάσματα.....	4 – 12
4.1.7. Χρήσεις του μπεντονίτη.....	4 – 13
4.2. Γεωλογία των γαιανθράκων.....	4 – 14
4.2.1. Προέλευση των γαιανθράκων.....	4 – 14
4.2.2. Η διαδικασία της ενανθράκωσης.....	4 – 15
4.2.3. Κατηγορίες γαιανθράκων.....	4 – 16
4.2.4. Μακροσκοπική πετρογραφική σύσταση των λιγνιτών – Λιθότυποι.....	4 – 20
4.2.5. Ανόργανη ύλη.....	4 – 22
4.2.6. Χρήση των λιγνιτών στα ρευστά γεωτρήσεων.....	4 – 23
5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ	
5.1. Μετρήσεις διήθησης.....	5 – 1
5.1.1. Θεωρία στατικής διήθησης.....	5 – 1
5.2. Μετρήσεις ρεολογίας.....	5 – 5

	Σελ.
5.2.1. Ομοαξονικά ιξωδόμετρα απευθείας ένδειξης.....	5 – 5
5.2.2. Ρεολογικά μοντέλα για ομοαξονικό κυλινδρικό ιξωδόμετρο.....	5 – 6
5.2.3. Ιξωδόμετρο εργαστηρίου.....	5 – 12
5.2.4. Μετρήσεις θιξοτροπίας ρευστών.....	5 – 16
5.2.5. Επεξεργασία των μετρήσεων.....	5 – 18
5.3. Κελί γήρανσης υψηλής θερμοκρασίας.....	5 – 24
5.3.1. Διαδικασία δοκιμής γήρανσης πολφού με πίεση στο κελί.....	5 – 25
6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	
6.1. Επεξεργασία δειγμάτων λιγνίτη.....	6 – 1
6.1.1. Εισαγωγή.....	6 – 1
6.1.2. Επιλογή δειγμάτων λιγνίτη.....	6 – 1
6.1.3. Διαδικασία προετοιμασίας δειγμάτων λιγνίτη.....	6 – 3
6.1.4. Επιλογή των συστατικών του πολφού γεώτρησης....	6 – 4
6.1.5. Κωδικοποίηση των πολφών γεώτρησης.....	6 – 5
6.1.6. Ωρίμανση πολφών γεωτρήσεων.....	6 – 6
6.1.7. Προετοιμασία γεωτρητικών πολφών με λιγνίτη 0,5% και 3,0% κ.ό.....	6 – 7
6.2. Αποτελέσματα μετρήσεων.....	6 – 8
6.2.1. Μετρήσεις διηθητικών χαρακτηριστικών πολφών.....	6 – 8
6.2.2. Μετρήσεις ρεολογίας.....	6 – 12
7^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΙΗΘΗΣΗΣ	
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ	
7.1. Εισαγωγή.....	7 – 1
7.2. Πολφοί που έχουν ωριμάσει με ενυδάτωση.....	7 – 1
7.2.1. Συγκέντρωση λιγνίτη στον πολφό 0,5%.....	7 – 1
7.2.2. Συγκέντρωση λιγνίτη στον πολφό 3,0%.....	7 – 5
7.2.3. Σύγκριση των μετρήσεων διήθησης για τις δύο συγκεντρώσεις λιγνίτη στον πολφό βάσης.....	7 – 8

	Σελ.
7.3. Πολφοί που έχουν ωριμάσει με στατική γήρανση στους 177°C.....	7 – 12
7.3.1. Συγκέντρωση λιγνίτη στον πολφό 0,5%.....	7 – 12
7.3.2. Συγκέντρωση λιγνίτη στον πολφό 3,0%.....	7 – 15
7.3.3. Σύγκριση των μετρήσεων διήθησης για τις δύο συγκεντρώσεις λιγνίτη στον πολφό βάσης.....	7 – 18
7.4. Σύγκριση των μετρήσεων διήθησης για τους δύο τρόπους ωρίμανσης των πολφών.....	7 – 20
7.4.1. Πολφοί με λιγνίτη 0,5% κ.ό.....	7 – 20
7.4.2. Πολφοί με λιγνίτη 3,0% κ.ό.....	7 – 21
7.5. Πάχος υμενίου λάσπης γεώτρησης.....	7 – 22
7.6. Συγκεντρωτικά συμπεράσματα.....	7 – 23

8° ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΕΟΛΟΓΙΑΣ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ

8.1. Εισαγωγή.....	8 – 1
8.2. Μελέτη ρεολογίας σε πολφούς που ωρίμασαν με ενυδάτωση.....	8 – 2
8.2.1. Θιξοτροπία πολφών.....	8 – 2
8.2.2. Εύρεση ρεολογικών μοντέλων πολφών.....	8 – 7
8.3. Μελέτη ρεολογίας σε πολφούς που ωρίμασαν με στατική γήρανση.....	8 – 13
8.3.1. Θιξοτροπία πολφών.....	8 – 13
8.3.2. Εύρεση ρεολογικών μοντέλων πολφών.....	8 – 19
8.4. Σύγκριση των μετρήσεων ρεολογίας για τους δύο τρόπους ωρίμανσης.....	8 – 24
8.4.1. Σύγκριση της θιξοτροπίας των δειγμάτων.....	8 – 24
8.4.2. Σύγκριση των ρεολογικών παραμέτρων των δειγμάτων.....	8 – 25
8.5. Συγκεντρωτικά συμπεράσματα.....	8 – 26

9^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

9.1. Ανασκόπηση εργασίας.....	9 – 1
9.2. Συμπεράσματα εργασίας.....	9 – 2
9.3. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	9 – 3
Βιβλιογραφία.....	i
Συμβολισμοί.....	
Παράρτημα Η – Εμπορικά προϊόντα λιγνίτη.....	Η
Παράρτημα Θ – Αποτελέσματα διήθησης πολφών γεωτρήσεων...	Θ
Παράρτημα Ι – Ρεογράμματα πολφών γεωτρήσεων.....	Ι
Παράρτημα Κ – Ρεολογικές παράμετροι πολφών γεωτρήσεων.....	Κ

Ευχαριστίες

Θέλω αρχικά να ευχαριστήσω το Ι.Γ.Μ.Ε. που μέσα από το ερευνητικό πρόγραμμα με τίτλο «Μελέτη για τη χρήση ελληνικού λιγνίτη στην παραγωγή ρευστών γεωτρήσεων» παρείχε την οικονομική ενίσχυση για την υλοποίηση του έργου. Η συνεχής επικοινωνία με τους κ.κ. Θ. Κώτη, Διευθυντή ΔΙΣΕΠΥ, Κ. Παπανικολάου και Δ. Καραγεωργίου, συνέβαλε στην ομαλή διεξαγωγή της πορείας του προγράμματος και στην διεκπεραίωση αυτής της εργασίας.

Σε αυτή την προσπάθεια, είχα την αμείωτη συμπαράσταση της οικογενείας μου, του Επικ. Καθηγητή και επιβλέποντά μου Βασίλη Κελεσίδη και της πολύτιμης συνεργάτιδάς μου Παγώνας Μακρή, υπ. διδάκτορα. Είχα τη δυνατότητα χρήσης οποιουδήποτε οργάνου ή βοηθήματος από άλλα εργαστήρια καθώς και την συνδρομή των γνώσεων των καθηγητών του τμήματος. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τους κ.κ. Κ. Παπανικολάου, Γ. Χρηστίδη και Α. Φώσκολο, διδάσκοντες του Πολυτεχνείου Κρήτης, που συμμετείχαν στο πρόγραμμα και συνέβαλλαν στην κατανόηση από πλευράς μου, πολλών εννοιών, λύνοντας με διάθεση κάθε μου απορία.

Θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Σταμπολιάδη και τους συνεργάτες του, στο εργαστήριο του οποίου έγιναν οι λειοτριβήσεις των δειγμάτων λιγνίτη, τον κ. Μαρκόπουλο και τους συνεργάτες του, στο εργαστήριο του οποίου έγινε η προετοιμασία των δειγμάτων των πολφών καθώς και τους κ.κ. Δ. Μαρινάκη, Β. Γαγάνη και Στ. Σφακιωτάκη, υπ. διδάκτορες του τμήματος, που ήταν πάντοτε παρόντες, είτε με τις γνώσεις τους είτε με την φιλική τους διάθεση, να κάνουν πιο ευχάριστη την εργαστηριακή μου εργασία.

Ευχαριστίες στην εταιρεία «S & B Βιομηχανικά Ορυκτά» που μας προμήθευσαν μπεντονίτη για τους πολφούς γεωτρήσεων καθώς και την εταιρεία M – I Drilling Fluids για την προσφορά εμπορικού λιγνίτη που χρησιμοποιήθηκε για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Σκοπός της εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση της χρήσης του ελληνικού λιγνίτη ως πρόσθετου σε ρευστά γεωτρήσεων. Το βασικό πειραματικό αντικείμενο της μελέτης είναι ο έλεγχος της διηθητικής ικανότητας και των ρεολογικών χαρακτηριστικών των ρευστών γεωτρήσεων που περιέχουν λιγνίτη.

Το ερέθισμα για την υλοποίηση της εργασίας αυτής δόθηκε από την ενασχόλησή μου με ερευνητικό πρόγραμμα του ΙΓΜΕ (χρηματοδοτούμενο από το 3^ο Κοινοτικό πλαίσιο στήριξης), με τίτλο «Μελέτη για τη χρήση ελληνικού λιγνίτη στην παραγωγή ρευστών γεωτρήσεων» που υλοποιείται στο Πολυτεχνείο Κρήτης με επιστημονικό υπεύθυνο του έργου τον Επίκ. Καθηγητή Β. Κελεσίδη. Ο απώτερος στόχος του προγράμματος είναι η εκμετάλλευση μικρών λιγνιτικών κοιτασμάτων του Ελλαδικού χώρου που δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά δύναται να αξιοποιηθούν για άλλες χρήσεις και εν προκειμένω στην ανάπτυξη εμπορικών προϊόντων για τη χρήση τους σε γεωτρητικούς πολφούς.

Έχουν γίνει σημαντικές έρευνες για τη δυνατότητα χρήσης του λιγνίτη ως προσθέτου σε ρευστά γεωτρήσεων στο παρελθόν και αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία πολλές ευρεσιτεχνίες. Δεν έχει γίνει παρόμοια έρευνα για τη χρήση ελληνικών λιγνιτών και το συγκεκριμένο πρόγραμμα αποσκοπεί στο να καλύψει το κενό αυτό. Εκτιμάται ότι θετικά αποτελέσματα της έρευνας θα έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην οικονομία της χώρας καθώς οι ποσότητες λιγνίτη για τη συγκεκριμένη χρήση είναι παγκοσμίως σημαντικές.

Ο λιγνίτης είναι υλικό που χρησιμοποιείται ως πρόσθετο σε ρευστά γεωτρήσεων για εξόρυξη πετρελαίου, φυσικού αερίου και γεωθερμικών ρευστών, με στόχο τη ρύθμιση του ιξώδους και των διηθητικών χαρακτηριστικών τους.

Η διερεύνηση στη βάση δεδομένων των Διπλωμάτων Ευρεσιτεχνίας των ΗΠΑ με λέξεις κλειδιά, «lignite & drilling fluids», δίνει καταχώρηση πέραν των 200 διπλωμάτων για την περίοδο 1991 – 2001. Ως παραδείγματα

χρήσης λιγνίτη αναφέρονται τα διπλώματα των Russel et al. (1987), Firth (1993) και Patel (1995). Αναφέρονται επίσης εταιρείες παραγωγής ρευστών γεώτρησης που προμηθεύουν με εμπορικά προϊόντα λιγνίτη τις εταιρείες γεωτρήσεων (Παράρτημα Η). Υπάρχει λοιπόν διαρκής έρευνα, τόσο στον τομέα ανάπτυξης ρευστών γεώτρησης όσο και στη χρήση του λιγνίτη ως προσθέτου.

Στο πειραματικό μέρος της εργασίας, το ΙΓΜΕ μας προμήθευσε με δείγματα ελληνικού λιγνίτη από διάφορες περιοχές της ελληνικής επικράτειας, τα οποία προστέθηκαν σε πολφούς μπεντονίτη και έγινε μελέτη των διηθητικών και ρεολογικών τους χαρακτηριστικών. Επιπλέον, τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με λάσπες μπεντονίτη (κύρια λάσπη γεώτρησης) καθώς και με αντίστοιχα εμπορικά προϊόντα.

Για το λόγο αυτό, έγιναν πειράματα ρεολογίας και διήθησης σε πολφούς μπεντονίτη με λιγνίτη, δύο συγκεντρώσεων, 0,5% και 3,0% κ.ό. λιγνίτη στον πολφό. Οι πολφοί που σχηματίστηκαν μελετήθηκαν τόσο για τη θιξοτροπική τους συμπεριφορά σε ομοαξονικό ιξωδόμετρο Grace M3500, όσο και για τις διηθητικές τους ικανότητες, σε πρέσα διήθησης Χαμηλής Πίεσης – Χαμηλής Θερμοκρασίας (Low Pressure – Low Temperature, LPLT). Παράλληλα, έγιναν πειράματα σε δύο είδη πολφών, σε δείγματα που έχουν ωριμάσει σε θερμοκρασία δωματίου και σε δείγματα που έχουν ωριμάσει με στατική γήρανση σε φούρνο υψηλών θερμοκρασιών, ώστε να διαπιστωθεί αν ο πολφός με το λιγνίτη είναι θερμικά σταθερός.

Προκειμένου να ιεραρχηθεί η δουλειά αυτή, η εργασία χωρίστηκε σε εννέα κύρια κεφάλαια:

Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μια εισαγωγή στις ιδιότητες ροής των ρευστών. Εξηγούνται οι έννοιες του ρυθμού και της τάσης διάτμησης, του ιξώδους και περιγράφονται τα ρεολογικά μοντέλα των ρευστών.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναλύονται διεξοδικά οι χρήσεις των πολφών γεωτρήσεων, οι ιδιότητές τους καθώς και τα ρευστά που χρησιμοποιούνται σε γεωτρήσεις υψηλών θερμοκρασιών, όπου και είναι πολύ συχνή η χρήση του λιγνίτη.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται η ανάλυση των εξεταζόμενων ιδιοτήτων των πολφών γεωτρήσεων, ήτοι της διηθητικής τους ικανότητας και της ρεολογίας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, αναλύονται ορυκτολογικά και γεωλογικά τα συστατικά των πολφών γεωτρήσεων, δηλαδή των μπεντονιτών και των λιγνιτών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, περιγράφονται τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση των ρεολογικών και διηθητικών χαρακτηριστικών των ρευστών γεωτρήσεων.

Το έκτο κεφάλαιο περιέχει την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και την διαδικασία προετοιμασίας των δειγμάτων των πολφών όπως επίσης και την σειρά των μετρήσεων που έγιναν προκειμένου να μελετηθούν οι πολφοί με λιγνίτη.

Στο έβδομο κεφάλαιο, αναλύονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων διήθησης.

Στο όγδοο κεφάλαιο, αναλύονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων ρεολογίας των ρευστών.

Στο ένατο και τελευταίο κεφάλαιο, γίνεται η σύνθεση των αποτελεσμάτων και εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα.

Καθώς η εργασία αυτή αποτελεί μια πρότυπη προσέγγιση για τα ελληνικά δεδομένα, τα αποτελέσματα που προκύπτουν, αναμένεται να εμπλουτίσουν την διεθνή βιβλιογραφία με στοιχεία για την ποιότητα του ελληνικού λιγνίτη ως πρόσθετο σε γεωτρητικούς πολφούς καθώς και την συμπεριφορά του σε δύσκολες συνθήκες γεωτρήσεων υψηλών θερμοκρασιών.

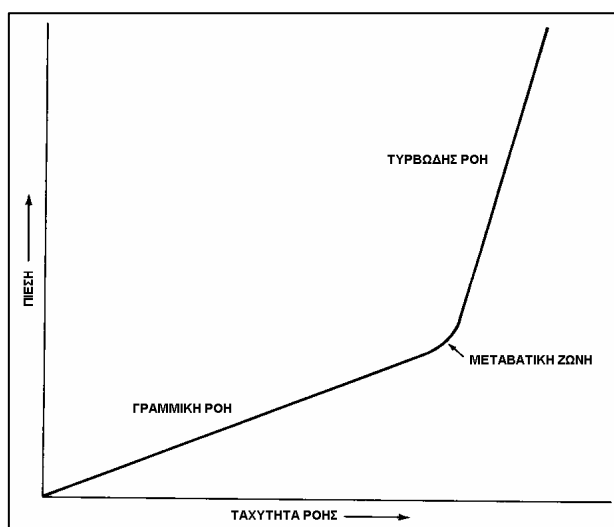
1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΓΕΝΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ

1.1. Θεωρητικό υπόβαθρο

Οι ιδιότητες ροής των ρευστών γεώτρησης παίζουν ζωτικό ρόλο στην επιτυχία της γεωτρητικής διεργασίας, είτε πρόκειται για γεωτρήσεις πετρελαίου / φυσικού αερίου ή πρόκειται για γεωτρήσεις γεωθερμίας. Οι ιδιότητες αυτές είναι πρωταρχικά υπεύθυνες για την απομάκρυνση των θραυσμάτων, αλλά επηρεάζουν την γεωτρητική πρόοδο με πολλούς άλλους τρόπους. Μη ικανοποιητική προετοιμασία της γεωτρητικής λάσπης μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρά προβλήματα όπως πλήρωση του πυθμένα του φρέατος με θραύσματα, ελάττωση διατρητικής ικανότητας, διεύρυνση του φρέατος, απώλεια κυκλοφορίας, ακόμα και βίαιη εκτόνωση.

Η επιστήμη της ρεολογίας εξετάζει τα φαινόμενα παραμόρφωσης (εξαλλοίωσης σχήματος) όλων των μορφών της ύλης, αλλά η σημαντικότερη εφαρμογή, στην οποία οφείλει και τη ραγδαία ανάπτυξή της, είναι η μελέτη της συμπεριφοράς ροής μέσω σωλήνων και καναλιών μεταφοράς ρευστών. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην σχέση μεταξύ πίεσης και ρυθμού ροής, καθώς και στις επιπτώσεις των ρεολογικών παραμέτρων του ρευστού στις παραπάνω παραμέτρους. Υπάρχουν δύο βασικές διαφορετικές συμπεριφορές:

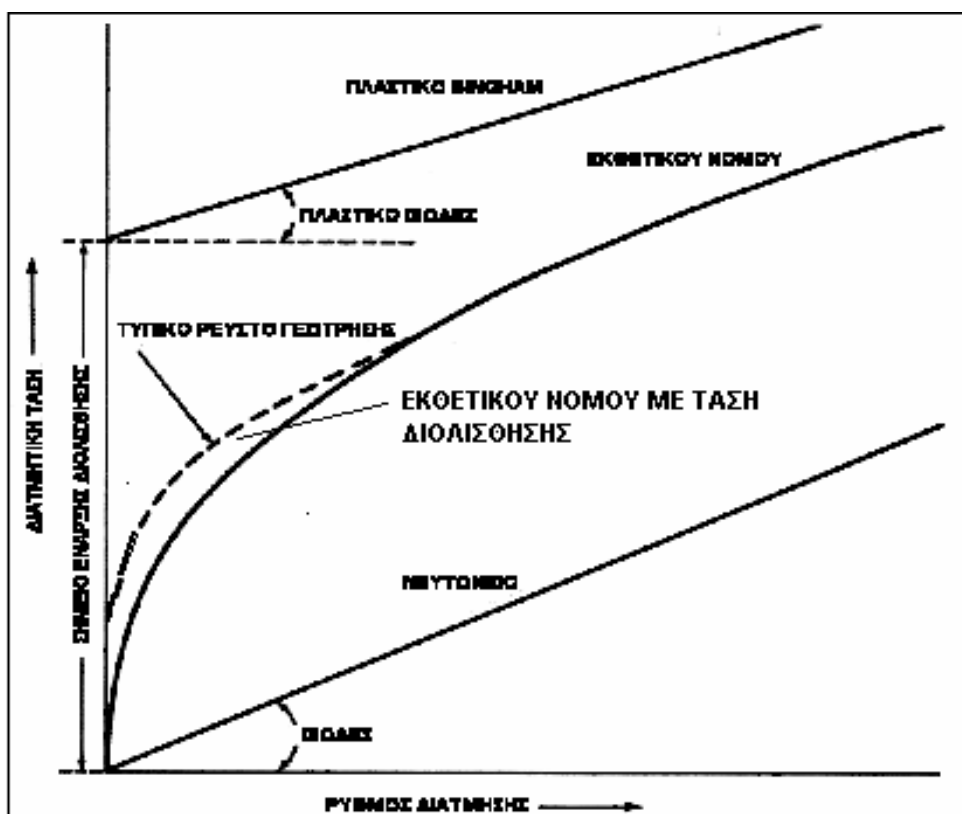
1. Το καθεστώς γραμμικής (στρωτής) ροής σε χαμηλές ταχύτητες ροής και η σχέση πίεσης – ταχύτητας ροής είναι συνάρτηση των παραμέτρων του ιξώδους ρευστού.
2. Το καθεστώς τυρβώδους ροής σε υψηλές ταχύτητες.



Η ροή είναι μη στρωτή και διέπεται βασικά από τις αδρανειακές ιδιότητες του ρευστού σε κίνηση. Οι σχέσεις πίεσης - ροής είναι μη γραμμικές και εμπειρικές.

Οι σχέσεις της γραμμικής ροής που συσχετίζουν τα χαρακτηριστικά του ρευστού με τη συμπεριφορά της ροής, βασίζονται σε συγκεκριμένα ρεολογικά μοντέλα. Τα ρεολογικά μοντέλα που ενδιαφέρουν την τεχνολογία ρευστών γεώτρησης είναι το Νευτώνειο, και τα μη νευτώνεια: τα πλαστικά Bingham, τα εκθετικού νόμου (Power – Law) και τα εκθετικού νόμου με τάση διολίσθησης (Herschel – Bulkley).

Τα μοντέλα ροής, που περιγράφονται παρακάτω, απεικονίζονται συνήθως ως καμπύλες, σε διαγράμματα πίεσης ροής – ρυθμού ροής ή βαθμίδας ταχύτητας (shear stress) – διατμητικής τάσης (shear rate), (περιστροφής ιξωδομέτρου rpm), (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1. Ιδανικές καμπύλες των ρεολογικών μοντέλων

1.2. Στρωτή ροή, ρυθμός διάτμησης και διατμητική τάση

1.2.1. Στρωτή (γραμμική) ροή

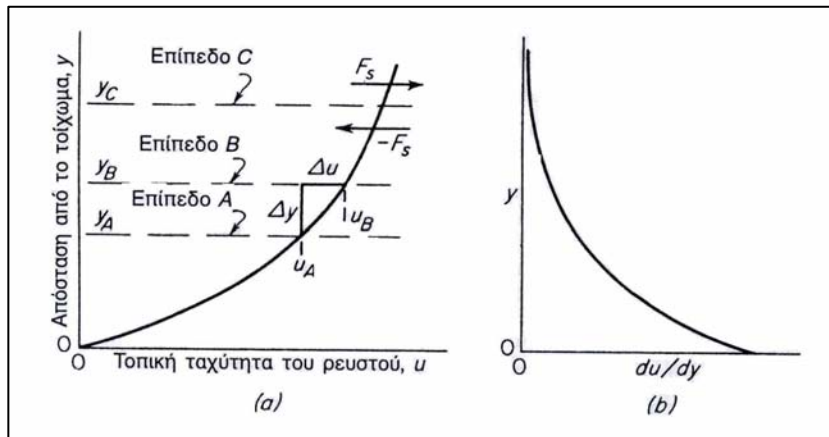
Σε χαμηλές ταχύτητες τα ρευστά έχουν την τάση να ρέουν χωρίς πλευρική ανάμιξη και τα γειτονικά στρώματα γλιστρούν το ένα πάνω από το άλλο, όπως ακριβώς τα τραπουλόχαρτα. Δεν εμφανίζονται ούτε εγκάρσια ρεύματα ούτε δίνες. Η ροή αυτή ονομάζεται στρωτή ή γραμμική ροή (laminar flow). Σε υψηλότερες ταχύτητες εμφανίζεται στροβιλισμός και σχηματίζονται δίνες, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργείται πλευρική ανάμιξη.

1.2.2. Διαφορική κλίση της ταχύτητας και ρυθμός διάτμησης

Στο Σχήμα 1.2α παρουσιάζεται το προφίλ της ταχύτητας της σταθεροποιημένης, μονοδιάστατης, στρωτής ροής ενός ασυμπίεστου ρευστού πάνω σε μια στερεή επίπεδη επιφάνεια. Η τετμημένη u αντιπροσωπεύει την ταχύτητα και η τεταγμένη y την απόσταση που μετρείται κάθετα από το τοίχωμα και σχηματίζει ορθή γωνία με τη διεύθυνση της ταχύτητας. Στο σημείο $y = 0$, η ταχύτητα u είναι ίση με την ταχύτητα της επιφάνειας, που συνήθως είναι ίση με μηδέν. Η ταχύτητα αυξάνεται με την απόσταση από το τοίχωμα όμως με ρυθμό που συνεχώς μειώνεται. Θα εξετασθούν οι ταχύτητες δύο γειτονικών επιπέδων, των επιπέδων Α και Β που απέχουν Δy το ένα από το άλλο. Οι ταχύτητες κατά μήκος των επιπέδων είναι u_A και u_B , αντίστοιχα. Έστω ότι $u_B > u_A$ και $\Delta u = u_B - u_A$. Η διαφορική κλίση της ταχύτητας στο y_A είναι:

$$\frac{du}{dy} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (1.1)$$

Η κλίση αυτή είναι το αντίστροφο της κλίσης του προφίλ της ταχύτητας του Σχήματος 1.2α. Η τοπική διαφορική κλίση της ταχύτητας ονομάζεται ρυθμός διάτμησης (shear rate) ή ρυθμός μεταβολής της διάτμησης. Η διαφορική κλίση της ταχύτητας είναι συνήθως συνάρτηση της θέσης μέσα στο ρεύμα, άρα ορίζει ένα πεδίο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2b.



Σχήμα 1.2. Προφίλ της ταχύτητας και της διαφορικής κλίσης (διαβάθμισης) της ταχύτητας στη ροή σε στρώματα:

(α) ταχύτητα, (β) διαφορική κλίση της ταχύτητας ή ρυθμός διάτμησης.

1.2.3. Πεδίο διατμητικών τάσεων

Ένα πραγματικό ρευστό αντιδρά στη διάτμηση, άρα μια διατμητική δύναμη θα πρέπει να υπάρχει όπου υπάρχει μεταβολή της διάτμησης με το χρόνο. Σε μονοδιάστατη ροή η διατμητική δύναμη ασκείται παράλληλα με το επίπεδο διάτμησης. Για παράδειγμα, σε ένα επίπεδο C σε απόσταση y_c από το τοίχωμα, η διατμητική δύναμη F_s , που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2α, δρα στην κατεύθυνση που φαίνεται στο σχήμα. Η δύναμη αυτή ασκείται από το ρευστό που βρίσκεται πάνω από το επίπεδο C στο ρευστό που βρίσκεται ανάμεσα στο επίπεδο C και το τοίχωμα. Σύμφωνα με τον τρίτο νόμο του Newton το ρευστό που βρίσκεται κάτω από το επίπεδο C θα πρέπει να ασκεί ίση και αντίθετη δύναμη $-F_s$ στο ρευστό που βρίσκεται πάνω από το επίπεδο C. Είναι πιο απλό να χρησιμοποιηθεί όχι η ολική δύναμη F_s αλλά η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας του διατμητικού επιπέδου, που ονομάζεται διατμητική τάση (shear stress) και συμβολίζεται με τ

$$\tau = \frac{F_s}{A_s} \quad (1.2.)$$

όπου A_s είναι το εμβαδόν της επιφάνειας του επιπέδου.

Επειδή το τ μεταβάλλεται με το y , η διατμητική τάση αποτελεί ένα πεδίο. Οι διατμητικές δυνάμεις αναπτύσσονται και στη στρωτή ροή και στην τυρβώδη.

1.3. Ρεολογικές ιδιότητες των ρευστών

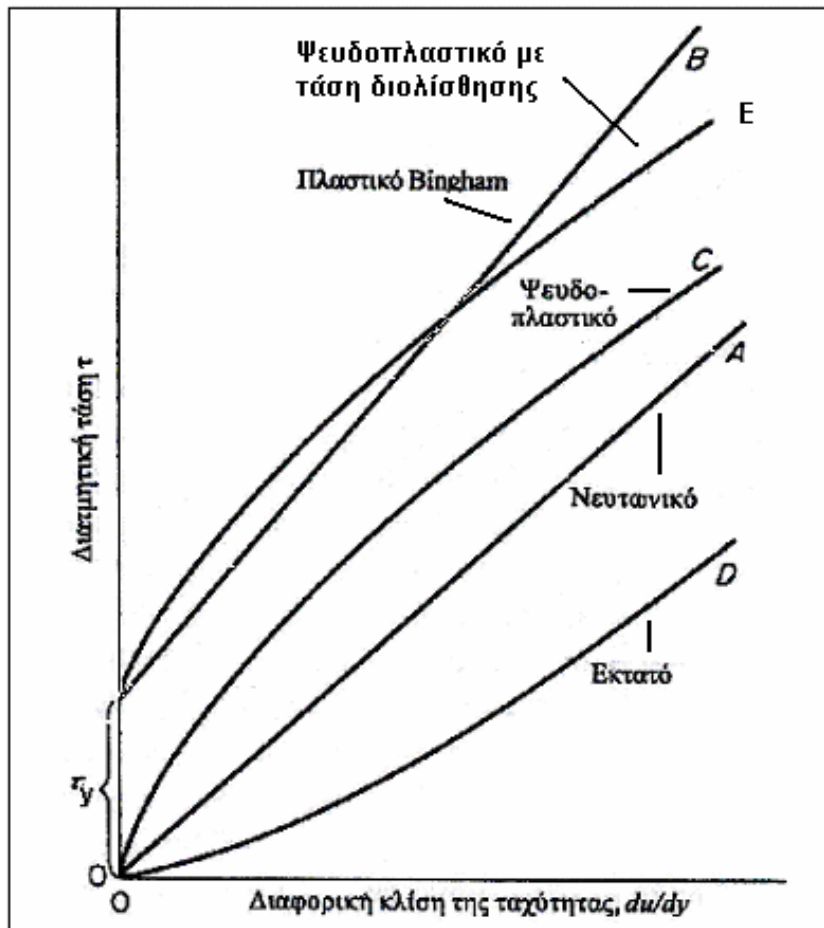
1.3.1. Νευτώνεια και μη νευτώνεια ρευστά

Οι σχέσεις που συνδέουν τη διατμητική τάση με το ρυθμό διάτμησης σε ένα πραγματικό ρευστό αποτελούν μέρος του αντικειμένου της επιστήμης της ρεολογίας. Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζονται διάφορα παραδείγματα της ρεολογικής συμπεριφοράς των ρευστών. Οι καμπύλες είναι οι γραφικές παραστάσεις της διατμητικής τάσης ως προς το ρυθμό διάτμησης και αναφέρονται σε σταθερή θερμοκρασία και πίεση. Η πιο απλή συμπεριφορά είναι αυτή που περιγράφει η γραφική παράσταση Α, που είναι μια ευθεία γραμμή που περνά από την αρχή των αξόνων. Τα ρευστά που συμπεριφέρονται με τον τρόπο που περιγράφει η ευθεία αυτή ονομάζονται νευτώνεια ρευστά. Τα αέρια και αρκετά υγρά είναι νευτώνεια ρευστά. Οι υπόλοιπες καμπύλες του Σχήματος 1.3 αντιπροσωπεύουν τη ρεολογική συμπεριφορά των μη νευτώνειων υγρών. Για τα μη νευτώνεια ρευστά, ορίζεται το φαινομενικό ιξώδες, που είναι το σημειακό ιξώδες, δηλαδή το ιξώδες που είναι κάθε φορά συνάρτηση του λόγου τάσης διάτμησης / ρυθμού διάτμησης:
$$\mu_a = f(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}.$$

Ορισμένα υγρά, π.χ. αιωρήματα στερεών, δε ρέουν καθόλου μέχρι να πάρει μια συγκεκριμένη τιμή η διατμητική τάση (που συμβολίζεται τ_y) και στη συνέχεια ρέουν γραμμικά ή σχεδόν γραμμικά σε διατμητικές τάσεις μεγαλύτερες του τ_y . Η καμπύλη Β αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της σχέσης. Τα υγρά που συμπεριφέρονται κατ' αυτόν τον τρόπο ονομάζονται πλαστικά Bingham και η αρχική τιμή τ_y καλείται τάση διολίσθησης. Στην περίπτωση αυτή, το φαινομενικό ιξώδες ελαττώνεται με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης.

Η καμπύλη C αντιπροσωπεύει ένα ψευδοπλαστικό ρευστό. Η καμπύλη περνά από την αρχή των αξόνων, είναι κοίλη προς τα κάτω σε χαμηλές διατμητικές τάσεις και γίνεται σχεδόν γραμμική σε υψηλές

διατμητικές τάσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου ρευστού είναι το ελαστικό latex. Ονομάζονται ψευδοπλαστικά διότι το φαινομενικό ιξώδες ελαττώνεται με την αύξηση της βαθμίδας ταχύτητας, όπως τα πλαστικά Bingham.



Σχήμα 1.3. Εξάρτηση της διατμητικής τάσης από τη διαφορική κλίση της ταχύτητας για νευτώνεια και μη νευτώνεια ρευστά.

Η καμπύλη D αντιπροσωπεύει ένα εκτατό ρευστό. Η καμπύλη αυτή είναι κοίλη προς τα πάνω σε χαμηλές διατμητικές τάσεις και γίνεται σχεδόν γραμμική σε υψηλές διατμητικές τάσεις. Τέτοια συμπεριφορά εμφανίζουν η κινούμενη άμμος και ορισμένα γαλακτώματα που περιέχουν άμμο.

Η καμπύλη E αντιπροσωπεύει ένα ψευδοπλαστικό ρευστό που χρειάζεται μια αρχική τάση για να μπορεί να ρέει (τάση διολίσθησης). Η καμπύλη (που δεν περνά από την αρχή των αξόνων) είναι κοίλη προς τα κάτω

σε χαμηλές διατμητικές τάσεις και γίνεται σχεδόν γραμμική σε υψηλές διατμητικές τάσεις. Τέτοια συμπεριφορά εμφανίζουν τα ρευστά γεωτρήσεων.

Τα ψευδοπλαστικά ρευστά και τα πλαστικά Bingham γίνονται πιο λεπτόρρευστα όσο αυξάνεται η διάτμηση (το φαινομενικό ιξώδες μειώνεται), ενώ τα εκτατά ρευστά γίνονται πιο παχύρρευστα όσο αυξάνεται η διάτμηση.

1.3.2. Ροή που εξαρτάται από το χρόνο

Καμία από τις καμπύλες του Σχήματος 1.3 δεν υποδηλώνει εξάρτηση από το τι έχει υποστεί το ρευστό. Ορισμένα υλικά εμφανίζουν την ίδια συμπεριφορά ανεξάρτητα από το χρονικό διάστημα κατά το οποίο εφαρμόστηκε η διατμητική τάση. Αυτό δεν ισχύει για μερικά μη νευτώνεια υγρά, των οποίων οι καμπύλες τάσης – ρυθμού διάτμησης εξαρτώνται από το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ασκήθηκε η διάτμηση. Σε αυτές τις περιπτώσεις διακρίνουμε: τα θιξοτροπικά υγρά, στα οποία το φαινομενικό ιξώδες, μ_a ελαττώνεται με τον χρόνο κατόπιν της αύξησης της βαθμίδας ταχύτητας και τα ρεοπεκτικά υγρά στα οποία το φαινομενικό ιξώδες, μ_a αυξάνεται με τον χρόνο, κατόπιν της αύξησης της βαθμίδας ταχύτητας. Τα θιξοτροπικά υγρά διασπώνται υπό την επίδραση συνεχούς διάτμησης και κατά την ανάμιξη δίνουν μικρότερες διατμητικές τάσεις για ένα δεδομένο ρυθμό διάτμησης. Οι ρεοπηκτικές ουσίες παρουσιάζουν την αντίστροφη συμπεριφορά, δηλαδή η διατμητική τάση αυξάνεται με το χρόνο. Οι αρχικές δομές και τα αρχικά φαινομενικά ιξώδη ανακτώνται όταν τα ρευστά αφεθούν να ηρεμήσουν. Στον Πίνακα 1.1 συνοψίζονται τα ρεολογικά χαρακτηριστικά διαφόρων ρευστών.

Πίνακας 1.1. Ρεολογικά χαρακτηριστικά των ρευστών.

Είδος ρευστού	Επίδραση της αύξησης του ρυθμού διάτμησης	Εξάρτηση από το χρόνο;	Παραδείγματα
Ψευδοπλαστικό	Πιο λεπτόρευστο	Όχι	Διαλύματα πολυμερών, αιωρήματα αμύλου, μαγιονέζα, χρώματα
Θιξοτροπικό	Πιο λεπτόρευστο	Ναι	Μερικά δ/τα πολυμερών, μερικά χρώματα
Νευτώνειο	Καμιά επίδραση	Όχι	Αέρια, τα πιο πολλά υγρά
Εκτατό	Πιο παχύρευστο	Όχι	Δ/τα ζάχαρης, άμυλο σε νερό
Ρεοπηκτικό	Πιο παχύρευστο	Ναι	Πολύ πυκνά αιωρήματα μπεντονίτη πηλού, αιωρήματα γύψου

1.3.3. Ιξωδοελαστικά ρευστά

Τα ιξωδοελαστικά ρευστά έχουν ιξώδεις και ελαστικές ιδιότητες. Εμφανίζουν ελαστική ανάκτηση από παραμορφώσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη ροή, όπως τα ελαστικά στερεά, όμως συνήθως ανακτάται μόνο ένα μέρος της παραμόρφωσης με την απομάκρυνση της τάσης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα ιξωδοελαστικών ρευστών είναι η ζύμη από αλεύρι, το ναπάλμ και μερικά τήγματα πολυμερών.

1.4. Ιξώδες των νευτώνειων ρευστών

Σε ένα νευτώνειο ρευστό η διατμητική τάση είναι ανάλογη του ρυθμού διάτμησης. Η σταθερά αναλογίας της σχέσης αυτής ονομάζεται ιξώδες.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.3)$$

Στο σύστημα S.I. το τ μετριέται σε N/m² και το μ σε kg/ms ή Pa·s. Στο σύστημα C.G.S. το ιξώδες μετριέται σε gr/cm·s, η μονάδα αυτή ονομάζεται

poise. Οι τιμές του ιξώδους αναφέρονται συνήθως σε mPa·s ή σε centipoises (cP = 0.01 P = 1 mPa·s), αφού τα περισσότερα ρευστά έχουν ιξώδη μικρότερα από 1 Pa·s.

Στο σύστημα F.P.S. (Foot.Pound.Second) το ιξώδες ορίζεται με τη βοήθεια του παράγοντα μετατροπής του νόμου του Newton, g_c και εκφράζεται σε lb/ft s ή lb/ft·h. Η εξίσωση ορισμού είναι η εξής:

$$\tau_y = \frac{\mu}{g_c} \frac{du}{dy} \quad (1.4)$$

Στον Πίνακα 1.2 δίνονται οι παράγοντες μετατροπής των μονάδων διάφορων συστημάτων.

Πίνακας 1.2. Συντελεστές μετατροπής του ιξώδους

Pa·s	Poise	cP	lb/ft·s	lb/ft·h
1	10	1000	0.672	2420
0.1	1	100	0.0672	242
10 ⁻³	0.01	1	6.72 · 10 ⁻⁴	2.42

1.4.1. Ιξώδη υγρών

Το ιξώδες ενός νευτώνειου ρευστού εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία και από τη μοριακή δομή και σε μικρότερο βαθμό από την πίεση, με εξαίρεση τις πολύ υψηλές πιέσεις.

Γενικά τα ιξώδη των υγρών είναι αρκετά μεγαλύτερα από τα ιξώδη των αερίων και οι τιμές τους καλύπτουν αρκετές τάξεις μεγέθους. Το ιξώδες συνήθως αυξάνεται με το μοριακό βάρος και μειώνεται σημαντικά όταν αυξάνεται η θερμοκρασία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το ιξώδες του νερού, το οποίο μειώνεται από 1.79 cP στους 0°C σε 0.28 cP στους 100°C. Το ιξώδες ενός υγρού αυξάνεται με την πίεση, όμως η επίδραση της πίεσης εξασθενεί σε τιμές μικρότερες από 40 atm.

Τα απόλυτα ιξώδη των υγρών καλύπτουν μια μεγάλη περιοχή τιμών που εκτείνεται από 0.1 cP περίπου για υγρά κοντά στο σημείο βρασμού τους σε 10⁶ P για τα τήγματα των πολυμερών. Τα περισσότερα υπερβολικά ιξώδη

υλικά είναι μη νευτώνεια και έχουν ιξώδες εξαρτώμενο του ρυθμού διάτμησης.

1.4.2. Κινηματικό ιξώδες

Ο λόγος του απόλυτου ιξώδους ενός ρευστού προς την πυκνότητά του, μ/ρ , είναι πολύ χρήσιμος στη μελέτη της συμπεριφοράς του ρευστού. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται κινηματικό ιξώδες και συμβολίζεται με το γράμμα ν . Το κινηματικό ιξώδες ενός υγρού μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία σε μικρότερη περιοχή απ' ό,τι το απόλυτο ιξώδες. Η μονάδα του κινηματικού ιξώδους στο σύστημα SI είναι το m^2/s και στο σύστημα CGS, το stoke (St) που ορίζεται ως $1 \text{ cm}^2/\text{s}$. Στο σύστημα FPS το κινηματικό ιξώδες εκφράζεται σε ft^2/s . Οι παράγοντες μετατροπής είναι οι εξής:

$$1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} = 10.7639 \text{ ft}^2/\text{s}$$

1.5. Ρεολογικά μοντέλα

1.5.1. Νευτώνειο μοντέλο

Οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται σε απλά νευτώνεια ρευστά χαρακτηρίζονται από το δυναμικό ιξώδες (ή ιξώδες) ρευστού. Παραδείγματα νευτώνειων ρευστών είναι το νερό, τα αέρια, το πετρέλαιο.

Το μοντέλο αυτό υποδηλώνει ότι η διατμητική τάση, τ , που αναπτύσσεται στο ρευστό λόγω ροής είναι απευθείας ανάλογη της βαθμίδας ή κλίσης της ταχύτητας,

$$\dot{\gamma} = du/dx \quad (1.5)$$

ως εξής :

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (1.6)$$

όπου μ είναι σταθερά αναλογίας και ονομάζεται ιξώδες του ρευστού.

Η σχέση αυτή οπωσδήποτε ισχύει για σχετικά χαμηλές ταχύτητες (και παροχές) όπου η ροή είναι στρωτή. Για μεγαλύτερες ταχύτητες η ροή γίνεται τυρβώδης και ο υπολογισμός γίνεται βάσει εμπειρικών σχέσεων.

1.5.2. Μη νευτώνεια μοντέλα

1.5.2.1. Μοντέλο Bingham Plastic

Το μοντέλο αυτό ορίζεται ως:

$$\tau = \mu_p \cdot \dot{\gamma} + \tau_y \quad (1.7)$$

με $\tau \succ \tau_y$. Ρευστό Bingham plastic δεν θα ρέει έως ότου η εφαρμοζόμενη διατμητική τάση υπερβαίνει την τάση διολίσθησης (yield point), τ_y . Μετά από αυτό το σημείο, η διατμητική τάση είναι απευθείας ανάλογη με την βαθμίδα ταχύτητας και η σταθερά αναλογίας ονομάζεται πλαστικό ιξώδες (plastic viscosity), μ_p .

Οι μονάδες μ_p είναι ίδιες με του νευτώνειου ιξώδους, cP. Η διατμητική τάση έχει μονάδες τάσης, τ_y [=] dynes/cm². Οι μονάδες oil field είναι lbf/100 ft². Οι δύο μονάδες συνδέονται με τη σχέση:

$$\frac{1 \text{ lbf}}{100 \text{ sqft}} \cdot \frac{(454 \text{ g} / \text{lbf}) \cdot (980 \text{ cm}^2 / \text{s})}{(30,38 \text{ cm} / \text{ft})^2} = 4,79 \text{ dyne} / \text{cm}^2$$

1.5.2.2. Μοντέλο Power law

Τα ρευστά γεώτρησης που περιέχουν πολυμερή και μικρό ή μηδενικό ποσοστό στερεών, σε υψηλότερες βαθμίδες ταχύτητας συμπεριφέρονται σαν να έχουν τάση διολίσθησης, αλλά στην πραγματικότητα η καμπύλη συνάφειας (Σχήμα 1.1) αποκλίνει. Η συμπεριφορά αυτών των ψευδοπλαστικών ρευστών περιγράφεται από το μοντέλο Power – Law.

Το μοντέλο αυτό ορίζεται ως:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1.8)$$

Το μοντέλο αυτό (που ισχύει μόνο για στρωτή ροή) χρειάζεται δύο παραμέτρους για να ορισθεί. Περιγράφει όμως ρευστά ψευδοπλαστικά ($n < 1$), νευτώνεια ($n = 1$) και εκτατά ρευστά ($n > 1$).

Η παράμετρος (K) ονομάζεται οδηγός συνάφειας (consistency index) και η παράμετρος (n) οδηγός συμπεριφοράς ροής (flow – behavior index) ή εκθέτης power law. Οι μονάδες του K εξαρτώνται από την τιμή του n και είναι $\text{dynes-s}^n/\text{cm}^2$, ή $\text{g}/\text{cms}^{2-n}$. Η σχέση μεταξύ των δύο μονάδων είναι:

$$\frac{1 \text{ lbf} - \text{s}^n}{\text{sqft}} \cdot \frac{(454 \text{ g} / \text{lbf}) \cdot (980 \text{ cm}^2 / \text{s})}{(30,38 \text{ cm} / \text{ft})^2} = 479 \text{ dyne} - \text{s}^n / \text{cm}^2$$

Η παράμετρος (K) είναι το μέτρο της συνάφειας. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του, τόσο το ρευστό είναι πιο ιξώδες. Η παράμετρος (n) μπορεί να θεωρηθεί ως το μέτρο της μείωσης του φαινομενικού ιξώδους με την αύξηση της βαθμίδας ταχύτητας. Όσο μικρότερη η τιμή του, τόσο μεγαλύτερη η μείωση.

1.5.2.3. Μοντέλο Herschel – Bulkley (H – B)

Το μοντέλο αυτό ορίζεται ως:

$$\tau = \tau_y + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (1.9)$$

Συνδυάζει δηλαδή τα πλαστικά Bingham και τα Power – Law ρευστά. Ρευστό H – B δεν θα ρέει έως ότου η εφαρμοζόμενη τάση διάτμησης υπερβεί την τάση διολίσθησης τ_y . Από το σημείο αυτό και έπειτα, το ρευστό συμπεριφέρεται ως Power – Law. Για τα H – B ρευστά ισχύουν οι ίδιες παράμετροι ροής με τα ρευστά εκθετικού νόμου, δηλαδή ορίζεται ο οδηγός συνάφειας και ο δείκτης ροϊκής συμπεριφοράς.

2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΠΟΛΦΟΙ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

2.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Τα ρευστά γεωτρήσεων έχουν συνήθως πολύπλοκη σύνθεση, αποτελούμενα από διάφορα χημικά συστατικά και είναι σχεδιασμένα ώστε να έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες για τις αντίστοιχες συγκεκριμένες συνθήκες γεώτρησης. Ως αποτέλεσμα, ο αριθμός των προσθετικών ουσιών είναι πολύ μεγάλος.

Η σύνθεση των ρευστών γεωτρήσεων που έχουν ως συνεχές μέσο το νερό (Water Based Muds, WBM) είναι ιδιαίτερα πολυποίκιλη, καθώς τα συστατικά που προστίθενται έχουν ως ρόλο να υπερκεράσουν τους περιορισμούς που θέτει η φύση του νερού.

Η χρήση του πετρελαίου ως βάση του πολφού (Oil Based Muds, OBM) μειώνει αρκετά από τα προβλήματα που σχετίζονται με τη χρήση του νερού (π.χ. μικρή λιπαντική ικανότητα) οπότε τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται είναι σαφώς λιγότερα, όπως επίσης αλλάζει και ο λόγος χρήσης τους.

Το 90% περίπου των προσθέτων χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια των εργασιών της διάτρησης και ένα μικρό ποσοστό χρησιμοποιείται στις διεργασίες της τσιμέντωσης. Η πλειονότητα των προσθέτων που σχηματίζουν το ρευστό γεώτρησης χρησιμεύουν στη βελτίωση της ικανότητας μεταφοράς των θραυσμάτων που παράγει το κοπτικό άκρο κατά τη διάτρηση.

2.1.1. Η ιστορία της χρήσης των ρευστών γεωτρήσεων

Κατά τα αρχικά χρόνια, το υγρό που χρησιμοποιούνταν ήταν νερό. Διέβρεχε τα πετρώματα και τα μαλάκωνε για ευκολότερη εξόρυξη. Με την χρήση των περιστρεφόμενων γεωτρύπανων και των κοπτικών άκρων άρχισαν να χρησιμοποιούνται περισσότερο σύνθετα υγρά που αποκαλούνταν «λάσπες – muds». Η χρήση τους αποσκοπούσε στη ψύξη και

λίπανση του κοπτικού άκρου, στο να φέρουν στην επιφάνεια τα θραύσματα των πετρωμάτων και να εξισορροπούν υδροστατικά τα ρευστά των πετρωμάτων.

Αρχικά οι λάσπες ήταν φυσικές, μίγματα νερού και θραυσμάτων πετρωμάτων που παράγονταν, ή από υλικά που βρίσκονταν κοντά στο σημείο της γεώτρησης. Τα προστιθέμενα υλικά ήταν αρχικά παραπροϊόντα άλλων διεργασιών και χαμηλού κόστους. Αλλά με την επέκταση σε όλο και βαθύτερα φρεάτια με υψηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις, η βιομηχανία ανέπτυξε εξειδικευμένα χημικά για συγκεκριμένες χρήσεις.

Παρ' όλα αυτά, η χρήση του νερού ως ρευστό ήταν μερικά επιτυχής στη μεταφορά των παραγόμενων θραυσμάτων και μείωνε πολύ το βάθος στο οποίο μπορούσε να φτάσει η γεώτρηση. Το 1901, έγινε στο Τέξας (ΗΠΑ) γεώτρηση με τη χρήση ρευστού γεώτρησης που περιείχε λεπτόκοκκα θραύσματα από το έδαφος μαζί με άργιλο από επιφανειακά κοιτάσματα, αναμεμιγμένα με νερό. Το ρευστό είχε τη μορφή gel, που οφειλόταν στη χρήση των αργίλων και έδειχνε ιδανικό για τη μεταφορά των θραυσμάτων, επιτρέποντας την καλύτερη και ταχύτερη μετακίνησή τους έξω από το φρέαρ, γεγονός που βοηθούσε στην αύξηση των ρυθμών διάτρησης.

Αργότερα δημιουργήθηκαν ρευστά γεώτρησης με μεγαλύτερο ειδικό βάρος, με την προσθήκη βαρίτη ή παρόμοιου υλικού, για να χρησιμοποιηθούν σε μεγαλύτερα βάθη με υψηλότερες υδροστατικές πιέσεις.

Το 1935 (HSE, 1999) ήταν η χρονιά που για πρώτη φορά γίνεται χρήση του μπεντονίτη, ως αργιλικό υλικό που κρατούσε σε αιώρηση τον βαρίτη, δημιουργώντας τις καλύτερες μέχρι τότε προϋποθέσεις για βαθύτερες γεωτρήσεις. Τότε ιδρύθηκε και η βιομηχανία των ρευστών γεώτρησης.

Μέχρι το 1960 οι πολφoί 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. Άρχισε, λοιπόν, η σταδιακή αντικατάσταση του μπεντονίτη στα ρευστά με βάση το νερό, με άλλα προσθετικά, κυρίως πολυμερή με βάση τη γλυκερίνη. Καθώς

οι τεχνικές απαιτήσεις διαρκώς μεγάλωναν, υπήρξε αρκετά διαδεδομένη η χρήση αλάτων σε ρευστά με βάση το πετρέλαιο (Oil Based Muds, OBM), που εμποδίζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των σχηματισμών (ανασταλτικά ρευστά γεωτρήσεων).

Η χρήση OBM αντί για WBM, όχι μόνο βελτίωσε τη λιπαντική ικανότητα, αλλά παράλληλα εκμηδένισε τα προβλήματα από την αλληλεπίδραση των αργιλικών πετρωμάτων. Αρχικά χρησιμοποιούνταν πετρέλαιο Diesel που αντικαταστάθηκε από χαμηλότερης τοξικότητας πετρέλαιο και σταδιακά – λόγω των περιβαλλοντικών επιπτώσεων – χρησιμοποιήθηκαν συνθετικά λάδια.

Συνεπώς, με τα χρόνια, οι προκλήσεις και οι απαιτήσεις οδήγησαν στην ανάπτυξη ρευστών γεώτρησης που αρχικά στοίχιζαν ελάχιστα αλλά τώρα έχουμε πολυσύνθετα ρευστά που στοιχίζουν 300 – 400 δολάρια ΗΠΑ ανά βαρέλι (1 βαρέλι = 42 γαλόνια = 159 λίτρα).

2.1.2. Ο ρόλος των ρευστών γεώτρησης στο ενεργειακό ισοζύγιο

Προκειμένου να καλυφθούν οι ολοένα αυξανόμενες ανάγκες σε ενέργεια, πρέπει συνεχώς να ανακαλύπτονται και να παράγονται ποσότητες πετρελαίου και φυσικού αερίου. Το άμεσο κόστος του ρευστού γεώτρησης είναι μεν μικρό αλλά γίνεται υπολογίσιμο όταν πρόκειται να συμπεριληφθεί στο συνολικό κόστος μιας γεώτρησης. Τα τελευταία χρόνια, τα κόστη των γεωτρήσεων παρουσιάζουν μια ραγδαία αύξηση. Αν και το απόλυτο κόστος των ρευστών είναι λιγότερο του 7% του συνολικού, η επίδρασή του σε άλλους τομείς εξόδων είναι πολύ μεγαλύτερη. Το κύριο κόστος μιας γεώτρησης εξαρτάται από τον παράγοντα του χρόνου (37%). Για το λόγο αυτό, έχουν αυξηθεί οι ρυθμοί διάτρησης καθώς και προβλήματα όπως το κόλλημα της στήλης, οι εκτονώσεις αερίων (kicks) και ο χρόνος κυκλοφορίας της λάσπης, έχουν μειωθεί. Το ρευστό γεώτρησης μπορεί ακόμη να δράσει διαβρωτικά στην διατρητική στήλη, στην επένδυση του φρέατος, στα κοπτικά άκρα, να μειώσει την αποτελεσματικότητα των διαγραφιών, του τσιμέντου και της τσιμέντωσης. Το κόστος των παραπάνω λειτουργιών ανέρχεται στο 26%

του συνόλου. Κατά συνέπεια, το ρευστό γεώτρησης ενδέχεται να εμπλέκεται στο 60% του συνόλου των εξόδων μιας γεώτρησης.

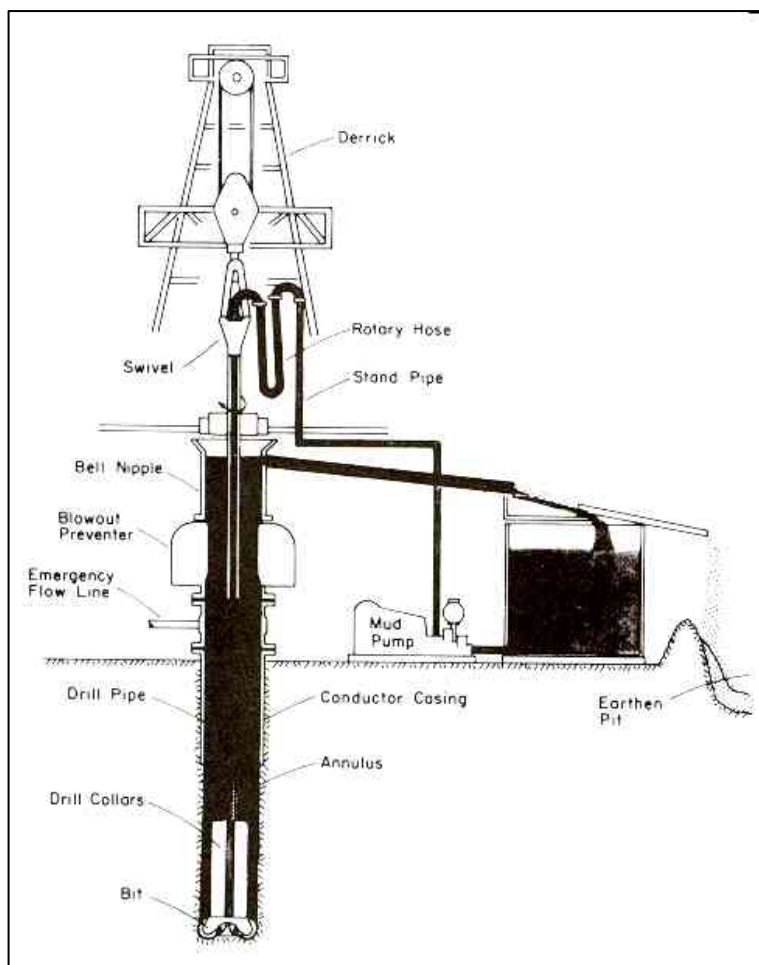
2.2. Λειτουργία των ρευστών γεωτρήσεων

Αν και οι λειτουργίες που μπορεί να έχει κάθε τύπος ρευστού γεώτρησης είναι ποικίλες, οι κύριες λειτουργίες των ρευστών γεώτρησης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως ακολούθως [Gray & Darley (1980), Caen et al., (1996), Κελεσίδης (2001)]:

2.2.1. Μεταφορά Θραυσμάτων

Ένα ρευστό γεώτρησης πρέπει να είναι ικανό να αφαιρεί τα θραύσματα που παράγει το κοπτικό άκρο από το βάθος του φρέατος και να τα μεταφέρει στην επιφάνεια. Οι επιχειρήσεις γεωτρήσεων χρησιμοποιούν ένα σύστημα κυκλοφορίας του ρευστού γεώτρησης, που δεν έχει αλλάξει πολύ από το 1930. Το ρευστό ωθείται μέσα από τη διατρητική στήλη (Σχήμα 2.1) και μέσω ακροφυσίων εξέρχεται από το κοπτικό άκρο. Πληρώνει το κενό που υπάρχει μεταξύ του φρέατος και της στήλης διάτρησης και σιγά – σιγά ανέρχεται του φρέατος στην επιφάνεια.

Τα θραύσματα που παράγονται παραμένουν σε αιώρηση μέσα στο ρευστό και παρασύρονται από τη ροή του ρευστού. Στην επιφάνεια της γεώτρησης, διαχωρίζονται από το ρευστό, το οποίο επανακυκλοφορεί στο φρέαρ. Η μεταφορά των θραυσμάτων είναι ένα ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα προς αντιμετώπιση, κυρίως σε οριζόντια και κεκλιμένα φρεάτια [Kelessidis et al., (2002), Kelessidis & Mprandelis (2003)] και απαιτεί την ύπαρξη υψηλού ιξώδους στον γεωτρητικό πολφό, σε συνδυασμό με υψηλή ταχύτητα κυκλοφορίας. Με το τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η διατήρηση της αιώρησης καθώς το ρευστό κυκλοφορεί στο φρέαρ. Οι περισσότερες WBM αποκτούν το απαιτούμενο ιξώδες είτε από τον μπεντονίτη είτε από τα φυσικά πολυμερή, τα οποία προστίθενται σε ποσοστό 5% περίπου. Οι άργιλοι προστίθενται και στις OBM ως ιξωδοποιητές (viscosifiers) αλλά σε μικρότερες ποσότητες.



Σχήμα 2.1. Σύστημα γεώτρησης και κυκλοφορίας ρευστών
[Bourgoyne et al., (1991)]

2.2.2. Αιώρηση των θραυσμάτων

Όταν η κυκλοφορία του ρευστού σταματήσει, η ισχύς πηκτώματος (η τάση που έχουν τα ρευστά να παίρνουν τη μορφή gel) πρέπει να είναι αρκετή ώστε να διατηρήσει τα θραύσματα σε αιώρηση. Καθώς τα μικρότερα ιξώδη και οι μικρότερες ισχύς πηκτώματος επιτρέπουν τους υψηλότερους ρυθμούς κυκλοφορίας και διάτρησης, το ιδανικό ρευστό γεώτρησης πρέπει να έχει ιξώδες που να μειώνεται με τη διάτμηση (shear thinning). Τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται για να αυξήσουν το ιξώδες (μπεντονίτης, πολυμερή) επιλέγονται και για τις ιδιότητές τους να κρατούν τα στερεά σε αιώρηση.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα ρευστά γεώτρησης

κυκλοφορούν μέσα σε ημι – κλειστά συστήματα κυκλοφορίας, όπου το επιστρεφόμενο ρευστό από τη γεώτρηση καθαρίζεται και επανεισέρχεται στο φρέαρ. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη η ευκολία με την οποία καθαρίζονται τα ρευστά από τα θραύσματα πριν επανακυκλοφορήσουν. Και πάλι, ο διαχωρισμός των θραυσμάτων εξαρτάται από το ιξώδες και την ισχύ πηκτώματος του πολφού, οπότε η επιλογή των πρόσθετων ουσιών είναι ιδιαίτερα προσεκτική ώστε να επιτευχθεί μια ισορροπία μεταξύ της μεταφοράς των θραυσμάτων και της αποδέσμευσής τους, καθώς πρέπει να αποτρέπουν τη διάσπαση των θραυσμάτων σε μικρότερα ώστε να μπορούν να διαχωριστούν στην επιφάνεια.

2.2.3. Μετάδοση υδραυλικής ισχύος στο κοπτικό άκρο

Μελέτες που έγιναν επέδειξαν τη συσχέτιση που υπάρχει μεταξύ του ρυθμού διάτρησης και της ταχύτητας που εξέρχεται το ρευστό γεώτρησης από τα ακροφύσια του κοπτικού άκρου. Για το λόγο αυτό, επιλέγονται πρόσθετα που διασφαλίζουν τη μέγιστη μετάδοση υδραυλικής ισχύος στο κοπτικό άκρο, ώστε να επιταχυνθεί η διάτρηση. Οι πτώσεις πίεσης που οφείλονται στο ιξώδες του ρευστού και στις τριβές από τη επαφή με τη διατρητική στήλη και το φρέαρ μειώνουν την διαθέσιμη υδραυλική ισχύ. Σε αυτές τις περιπτώσεις προστίθενται ουσίες που έχουν μεγάλη λιπαντική ικανότητα και χαμηλό ιξώδες.

2.2.4. Ελαχιστοποίηση της καταστροφής του σχηματισμού

Τα ρευστά γεώτρησης έρχονται σε επαφή με τους γεωλογικούς σχηματισμούς με διάφορους τρόπους. Κατά κύριο λόγο, η υδροστατική πίεση του ρευστού πρέπει να είναι ικανή να αποτρέψει την είσοδο ρευστών από τους σχηματισμούς μέσα στο φρέαρ και να εμποδίσει το σχηματισμό σπηλαιώσεων. Στην πλειονότητα αυτών των περιπτώσεων χρησιμοποιείται βαρίτης, ο οποίος προσδίδει την απαραίτητη ειδική πυκνότητα στη λάσπη.

Πρόβλημα μπορεί επίσης να δημιουργηθεί όταν η λάσπη αντιδρά

χημικά με τα πετρώματα του σχηματισμού. Αυτό παρατηρείται κυρίως στα WBM, επειδή το νερό είναι αυτό που αντιδρά με αλατούχους και αργιλικούς σχηματισμούς. Από την άλλη πλευρά, οι αντιδράσεις των σχηματισμών με τα OBM είναι ελάχιστες, επιτρέποντας έτσι τη δημιουργία καλύτερων ρευστών γεωτρήσεων.

2.2.5. Μείωση του ρυθμού διήθησης

Ο κίνδυνος να χαθεί σημαντικό ποσοστό του ρευστού γεώτρησης μέσα στο σχηματισμό είναι πάντοτε υπαρκτός, ειδικά σε περιπτώσεις που διατρώνται πορώδη πετρώματα. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί πρόσθετα που μειώνουν το διήθημα που χάνεται μέσα στους περατούς σχηματισμούς και που δημιουργούν ένα λεπτό υμένιο λάσπης στα τοιχώματα του φρέατος. Ιδιαίτερα επιτυχημένη είναι η χρήση πολυμερών μαζί με μπεντονίτη σε WBM. Τα OBM είναι από τη φύση τους αναστολείς του φαινομένου και δεν χρειάζονται τέτοια πρόσθετα. Τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό έχουν ως ρόλο τον περιορισμό ή την εξάλειψη του φαινομένου, καθώς εισέρχονται μέσα στους πόρους των πετρωμάτων και τους φράζουν. Υπάρχει πληθώρα τέτοιων ουσιών, από κομμάτια χαρτιού μέχρι πολυμερή, διαθέσιμα για τη μείωση του ρυθμού διήθησης. Οι ουσίες που περιέχουν αδρόκοκκα μέρη χρησιμοποιούνται για να φράξουν ή να γεμίσουν τις ρωγμές των πετρωμάτων.

2.2.6. Ψύξη – Λίπανση του κοπτικού άκρου και της διατρητικής στήλης

Η ψύξη και η λίπανση της διατρητικής στήλης και του κοπτικού άκρου είναι ιδιαίτερα σημαντικά θέματα καθώς σχετίζονται με τους ρυθμούς διάτρησης, ειδικότερα σε γεωτρήσεις μεγάλου βάθους και κλίσεων. Γαλακτώματα βαρέων υδρογονανθράκων, πολυμερή ή ακόμη και γυάλινα σφαιρίδια μπορούν να προστεθούν για να αυξήσουν τη λιπαντική ικανότητα, αν και η ικανότητα που έχουν τα OBM είναι καλύτερη από αυτή των WBM. Τόσο το νερό όσο και το πετρέλαιο είναι ικανά να ψύξουν τα

προαναφερθέντα μέρη. Τα προβλήματα εμφανίζονται όταν οι θερμοκρασίες που συναντώνται είναι μεγαλύτερες από αυτές που είναι θερμικά σταθερό το ρευστό γεώτρησης. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται πολυμερή ή άλλες ουσίες όπως ο λιγνίτης, με μεγάλη θερμική αντοχή (σε WBM). Τα OBM αντέχουν σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες.

2.2.7. Υποστήριξη της διατρητικής στήλης

Η διαδικασία της γεώτρησης γίνεται πάντα με τη διατρητική στήλη σε εφελκυσμό παρά συμπιεσμένη. Πρέπει δηλαδή η διατρητική στήλη να μην κάμπτεται. Μέρος του ρόλου του ρευστού γεώτρησης, ειδικά όταν το φρέαρ είναι αρκετά βαθύ, είναι να ελαττώνει το βάρος της στήλης λόγω της άνωσης.

2.2.8. Αποφυγή διάβρωσης

Το οξυγόνο που βρίσκεται στο ρευστό γεώτρησης είναι το κύριο αίτιο για τη διάβρωση της επένδυσης και της διατρητικής στήλης. Πρόσθετα όπως το NaOH, ουσίες που δεσμεύουν το οξυγόνο και αμμωνιακά άλατα χρησιμοποιούνται σε WBM για να αυξήσουν το pH σε τιμές 9 – 10, αναστέλλοντας τη διαβρωτική δράση του οξυγόνου.

2.2.9. Εργασίες διαγραφιών

Υπάρχει πληθώρα εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στη γεώτρηση, ώστε να επιβλέπεται η πρόοδός της. Τα ρευστά γεώτρησης πρέπει να έχουν τέτοιες ιδιότητες ώστε να επιτρέπουν στα μηχανήματα των διαγραφιών να μπορούν να λειτουργήσουν με ακρίβεια και να μετρήσουν σωστά τις σχετικές παραμέτρους του φρέατος. Αναπτύσσονται συσκευές που μπορούν να λειτουργήσουν ακόμη και σε ρευστά που περιέχουν στερεά εν αιωρήσει. Πολλές όμως είναι οι περιπτώσεις που το ρευστό πρέπει να είναι απαλλαγμένο από στερεά.

2.3. Πρόσθετα σε λάσπες γεωτρήσεων

2.3.1. Βάση του πολφού

Η βάση μιας λάσπης γεώτρησης αποτελεί τη συνεχή φάση μέσα στην οποία βρίσκονται και τα υπόλοιπα συστατικά. Κατά αυτό τον τρόπο, το ρευστό βάσης έχει μια σημαντική επιρροή στις ιδιότητες και την επίδοση της λάσπης. Οι κύριες κατηγορίες λάσπης είναι οι WBM όταν η συνεχής φάση είναι το νερό και OBM όταν η συνεχής φάση είναι το πετρέλαιο. Μέσα σε αυτές τις κατηγορίες υπάρχουν περαιτέρω διακρίσεις. Οι WBM τείνουν να ταξινομούνται σύμφωνα με τον τύπο του υλικού που προσδίδει το ιξώδες και σύμφωνα με την προσθήκη συγκεκριμένων συστατικών που ενισχύουν την απόδοση της λάσπης όπως είναι οι γλυκόλες και διάφορα άλατα (Caenn et al., 1995). Οι OBM διακρίνονται σε αυτές που χρησιμοποιούν απόσταγμα από ακατέργαστο πετρέλαιο και εκείνες που συντίθενται από χωριστά συστατικά. Λόγω των φύσεων των τύπων βάσεων των ρευστών γεωτρήσεων, η σύσταση και η απόδοση των WBM και OBM είναι πολύ διαφορετικές.

2.3.2. Ρευστά γεώτρησης με βάση το νερό (WBM)

Από οικονομικής πλευράς, το νερό είναι το συχνότερα χρησιμοποιούμενο ρευστό βάσης. Είναι φθηνό και άμεσα διαθέσιμο. Οι λάσπες γεώτρησης με βάση το θαλασσινό νερό χρησιμοποιούνται στα αρχικά στάδια της γεώτρησης, διατηρώντας το κόστος σε πολύ χαμηλά πλαίσια. Πέρα από τις αρχικές εργασίες διάτρησης, απαιτείται ένας διαρκής και αυξανόμενος έλεγχος της σύνθεσης και του χημισμού της λάσπης, που οδηγεί σε υψηλά εξειδικευμένες συνθέσεις. Πρακτικά, οι WBM χρησιμοποιούνται κατά κόρον στα ανώτερα τμήματα του φρέατος και στα κατώτερα περιορίζεται σε ένα ποσοστό του 30% (ανάλογα την εργασία). Οι WBM χρησιμοποιούνται επίσης σε μεγάλο ποσοστό στις διερευνητικές γεωτρήσεις [HSE, (1999)].

Τα άλατα και συγκεκριμένα το KCl, προστίθενται στο νερό αυξάνοντας την πυκνότητα του ρευστού και σε συνδυασμό με τα πολυμερή λειτουργούν ως «φράγμα» για τις ενεργοποιημένες αργίλους.

Οι πρώτες WBM ήταν μίγματα αλμόλοιπων, μπεντονίτη (για το ιξώδες και τα διηθητικά χαρακτηριστικά) και βαρίτη (για την αύξηση βάρους). Παρ' όλα αυτά, έχει γίνει ευρεία χρήση και άλλων ουσιών, συμπεριλαμβανομένων των λιγνοσουλφονικών (lignosulphonates) και των φυσικών και συνθετικών πολυμερών.

Παρά την πολυπλοκότητα στη δομή τους, τα πολυμερή έχουν παραπλήσιες ιδιότητες και είναι παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία τροφίμων. Η χρήση των πολυμερών στις WBM έχει αυξήσει κατά πολύ την συνολική απόδοσή τους. Πολυμερή με βάση την κυτταρίνη (π.χ. Carboxyl Methyl Cellulose, CMC), χρησιμοποιούνται ευρέως σε λάσπες μπεντονίτη και σε λάσπες KCl / πολυμερών (π.χ. Polly Anionic Cellulose, PAC) [Van Oort et al., (1997), Carminati et al., (2001)]. Επίσης συναντάται συχνά και το Xanthan Gum. Περαιτέρω βελτιώσεις στον τομέα της αποτροπής διόγκωσης των σχιστολίθων (shale inhibition) έχουν γίνει με την προσθήκη των πυριτικών αλάτων και των γλυκολών [Van Oort et al., (1997)]. Πρόκειται για λάσπες KCl / πολυμερών με 5% γλυκόλη ή 5 – 6 % πυριτικού άλατος. Η προσθήκη αυτή έχει ως συνέπεια τη δημιουργία ενός φράγματος μεταξύ της λάσπης και του σχηματισμού, που αυξάνει την ικανότητα συγκράτησης των πετρωμάτων.

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. Από οικολογικής πλευράς, είναι φιλικότερες προς το περιβάλλον, σε σχέση με τις OBM.

2.3.3. Πρόσθετα σε λάσπες με βάση το νερό (WBM)

Δεδομένου ότι οι WBM τροποποιούνται ή μεταβάλλονται ανάλογα με τις ανάγκες της γεώτρησης, συνήθως αναμιγνύονται επιτόπου. Η χρήση ενός μεγάλου φάσματος εμπορικών ονομάτων για προϊόντα όπως ο βαρίτης ή ο μπεντονίτης καθώς και πολλών προσθετικών που χρησιμοποιούνται για την απώλεια υγρού (fluid loss), οδηγεί στη σύνταξη πινάκων που δείχνουν μια μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στη σειρά των διαθέσιμων πρόσθετων ουσιών απ' ότι πρακτικά υπάρχουν. Επιπροσθέτως, συστατικά όπως ο βαρίτης και ο μπεντονίτης χρησιμοποιούνται συχνότερα, ενώ ουσίες όπως NaOH που είναι ιδιαίτερα σημαντικό, χρησιμοποιούνται σε πολύ μικρότερο βαθμό, ανάλογα πάντοτε με τις ανάγκες. Τα πρόσθετα μπορούν να ομαδοποιηθούν σύμφωνα με την λειτουργία τους, αν και η χρήση κάποιων χημικών ομάδων είναι τόσο πολυποίκιλη, που είναι προτιμότερο να ταξινομηθούν χωριστά. Οι σημαντικότερες ομάδες καλύπτονται κατωτέρω.

2.3.3.1. Συστατικά για μεταβολή του βάρους

Τα συστατικά αυτά προστίθενται στις WBM και τις OBM για να παρέχουν την απαραίτητη υδροστατική πίεση ώστε να εξισορροπήσουν την πίεση των σχηματισμών.

- Το πιο συχνά προστιθέμενο συστατικό είναι ο βαρίτης (BaSO_4). Πρόκειται για ένα αδιάλυτο στερεό, ειδικού βάρους 4.2 gr/cm^3 . Όταν είναι αρκετά λεπτόκοκκος (πούδρα), μπορεί να προστεθεί σε WBM και OBM μέχρι 1800 Kg / m^3 (650 λίβρες / βαρέλι) και να δώσει στο ρευστό πυκνότητα πάνω από την διπλάσια σε σχέση με αυτή που δίνει μόνο το νερό. Η αναλογία του βαρίτη 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.
- Το CaCO_3 (πυκνότητα: 2.65 gr/cm^3) χρησιμοποιείται μέχρι ενός ορίου και περιστασιακά προστίθεται αιματίτης.

2.3.3.2. Ανόργανα προϊόντα πηκτώματος και ιξωδοποιητές

Οι άργιλοι που προστίθενται στις WBM (κυρίως μπεντονίτης) παίζουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό του ιξώδους, της δύναμης γέλης και του ρυθμού διήθησης. Η αλληλεπίδραση μεταξύ του νερού, των κόκκων της αργίλου και των αλάτων της λάσπης είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη και έχει κυρίαρχη θέση στον προσδιορισμό των ιδιοτήτων πολφών συγκεκριμένης σύστασης.

Κατά την παρουσία των ιόντων Na, οι κόκκοι της αργίλου διασκορπίζονται στο νερό. Όταν διασκορπιστούν πλήρως, δίνουν στη λάσπη μια μικρή ισχύ γέλης, αλλά επιτρέπουν τον σχηματισμό μιας μεμβράνης, μειώνοντας κατά συνέπεια το ποσοστό διήθησης. Εάν οι κόκκοι κροκιδωθούν, η ισχύς γέλης αυξάνει αλλά η αποδοτικότητα της μεμβράνης μειώνεται. Εισάγοντας υψηλές συγκεντρώσεις ιόντων ασβεστίου στη λάσπη, οι κρύσταλλοι της αργίλου σχηματίζουν μεγαλύτερα συσσωματώματα, τα οποία δύνανται να κροκιδωθούν ή αποκροκιδωθούν για να δώσουν παρόμοιες ιδιότητες, όπως και πριν. Άλλα ιόντα, όπως Mg, K και αμμωνίου μπορούν να προστεθούν ώστε να τροποποιήσουν περαιτέρω τις ιδιότητες της αιωρούμενης αργίλου. Με τον τρόπο αυτό, οι ιδιότητες της WBM και η αλληλεπίδρασή της με τους σχηματισμούς, συγκεκριμένα με τους σχιστόλιθους, ελέγχονται.

Αν και αρχικά ο μπεντονίτης χρησιμοποιείτο ώστε να δώσει από μόνος του τις σωστές ιδιότητες του πηκτώματος, για το σκοπό αυτό προστίθεται πλέον και οργανικό πολυμερές όπως το CMC.

Για τα πρώτα βάθη μιας γεώτρησης, όπου δεν απαιτείται υψηλών προδιαγραφών πολφός, είναι αρκετά συχνή η χρήση γύψου σαν πρόσθετο πηκτώματος, μαζί με οργανικό πολυμερές.

2.3.3.3. Αλκαλικά χημικά

Οι λάσπες γεωτρήσεων βρίσκονται συνήθως σε αλκαλικό περιβάλλον (pH: 8 – 12.5) ώστε να σταθεροποιείται η αιώρηση της αργίλου, να

βελτιώνεται η διαλυτότητα των διαφόρων προσθέτων και να μειώνεται η διάβρωση της διατρητικής στήλης και της σωλήνωσης.

Σε μια τυπική WBM, η ουσία που προστίθεται και διατηρεί την βασικότητα της λάσπης είναι συνήθως το NaOH (είτε ως διάλυμα, είτε σε σκόνη ή σε φυλλάρια). Σε λάσπες με υψηλή περιεκτικότητα σε ασβέστιο, το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ χρησιμοποιείται (σε μορφή σκόνης) προκειμένου να διατηρήσει το pH αλλά και τη συγκέντρωση του ασβεστίου. Σε συγκεκριμένες λάσπες πολυμερών, όπου οι συγκεντρώσεις των ιόντων ασβεστίου και νατρίου είναι χαμηλές και το κυρίαρχο άλας είναι το KCl, προστίθεται KOH.

2.3.3.4. «Λεπτυντές» (thinners)

Οι χημικές ουσίες που προστίθενται στις WBM για να μειώσουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των μορίων και των φυλλαρίων αργίλου και κατ' επέκταση να μειώσουν το ιξώδες και τη δύναμη γέλης, περιλαμβάνουν τα lignosulphonates, τους λιγνίτες και τα πολυφωσφορικά άλατα. Από αυτούς, τα lignosulphonates και οι λιγνίτες κυριαρχούν καθώς τα πολυφωσφορικά άλατα αντιδρούν με τα ιόντα ασβεστίου και μαγνησίου σε πηχτές και αλατούχες λάσπες γεωτρήσεων.

2.3.3.5. Διασπορείς

Ο ρόλος των διασπορέων είναι να διασκορπίσουν και να διαχωρίσουν τα δομικά στοιχεία μέσα στη λάσπη. Πιο συχνά ο όρος αυτός χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις χημικές ουσίες που διασπείρουν τα φυλλάρια της αργίλου, π.χ. τα lignosulphonates καθώς και διάφορα άλατα. Χρησιμοποιούνται επίσης και ως γαλακτωματοποιητές. Χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται σε χαμηλές συγκεντρώσεις είναι το χλωριούχο νάτριο και η ταννίνη, αλλά γίνονται αναποτελεσματικά σε υψηλές συγκεντρώσεις ή σε ρευστά με υψηλή αλατότητα.

2.3.3.6. Λιγνοσουλφονικά σύμπλοκα (Lignosulphonates)

Τα λιγνοσουλφονικά και τα τροποποιημένα λιγνοσουλφονικά σύμπλοκα χρησιμοποιούνταν ευρέως ως διασπορείς σε WBM τις δεκαετίες του 70 και του 80. Παράγονται από την λιγνίνη, ένα πολύπλοκο πολυμερές που υπάρχει μέσα στο ξύλο καθώς και ως παραπροϊόντα του θειώδους άλατος κατά την παραγωγή χαρτιού. Η ακριβής φύση των lignosulphonates εξαρτάται από την πηγή του πολτού του ξύλου και της επακόλουθης διαδικασίας των αρχικών sulphonates. Τα διαλυτά sulphonates δεσμεύονται από τον ασβέστη και σχηματίζουν τα sulphonates ασβεστίου τα οποία είναι αρκετά ευδιάλυτα ώστε να χρησιμοποιηθούν απευθείας στα ρευστά γεωτρήσεων. Περαιτέρω επεξεργασία δίνει lignosulphonates σιδήρου, χρωμίου, νατρίου, καλίου και αργιλικών (συμπολυμερή χαμηλού μοριακού βάρους) που χρησιμοποιούνται για να αυξηθεί η διαλυτοποίηση και να ενισχυθούν συγκεκριμένες ιδιότητες της λάσπης.

Τα λιγνοσουλφονικά δρουν ως λεπτυντές, καθώς βοηθούν στην αποκροκίδωση των μορίων της αργίλου, εξουδετερώνοντας τα φορτία στην επιφάνεια των φυλλαρίων αργίλου. Ο δεσμός που προκύπτει μεταξύ του lignosulphonate και του αργιλικού φυλλαρίου είναι αρκετά ισχυρός ώστε να οδηγήσει σε μια σταθερή ένωση [Patel (1995), Rabaioli et al., (1993), Zhang & Yin (2002)]. Τα χρώμιο – lignosulphonates χρησιμοποιήθηκαν ευρέως στο παρελθόν σε WBM, αλλά έχουν εκτοπιστεί κατά ένα μεγάλο μέρος από τα lignosulphonates χωρίς χρώμιο, λόγω της τοξικότητας του χρωμίου.

2.3.3.7. Χημικές ουσίες με βάση τον λιγνίτη

Ο λιγνίτης αντιπροσωπεύει ένα σταθερό κολλοειδές σύστημα με μορφολογία που εξαρτάται από τον βαθμό ενανθράκωσης. Οι ιδιότητές του απορρέουν από την αρχική φυτική μάζα και τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των φάσεων σχηματισμού του. Αυτά είναι και τα χαρακτηριστικά που καθορίζουν την περιεκτικότητα σε οξυγόνο, χουμικά και φουλβικά οξέα, που πιστεύεται ότι είναι και τα κύρια συστατικά που

επιδρούν στην ικανότητα του λιγνίτη να δρα ως λεπτυντής (thinner) και να ρυθμίζει την διηθητική ικανότητα του πολφού [Gavriloff et al., (1999)]. Έχει βρεθεί ότι συγκεκριμένος τύπος λιγνίτη, ο λεοναρδίτης, όταν προστεθεί σε ρευστά γεωτρήσεων, είναι πολύ αποτελεσματικός λεπτυντής και μπορεί να ρυθμίζει την απώλεια του διηθήματος της λάσπης γεώτρησης, λόγω της υψηλής θερμικής του αντοχής [Patel (1995), Russel & Patel, (1987)].

Ο λεοναρδίτης, οξειδώνεται με την επαφή με τον αέρα (οξυγόνο) που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του νερού, για να διαμορφώσει τα χουμικά οξέα (σύνθετες οργανικές ενώσεις που περιέχουν φαινόλες και όξινες καρβοξυλικές ομάδες). Τα χουμικά οξέα έχουν μικρό βαθμό διαλυτότητας στο νερό και βοηθούν να μειωθεί η απώλεια υγρού. Το δεσμευμένο χουμικό οξύ στην επιφάνεια των φυλλαρίων αργίλου φαίνεται να προσδίδει υψηλή σταθερότητα και να διατηρεί την κολλοειδή κατάσταση του αιωρήματος του μπεντονίτη [Goldberg & Foster (1990), Kretzschmar et al., (1998), Heil & Sposito (1993)], ενώ η απουσία του ενισχύει την πιθανότητα για κροκίδωση [Frenkel et al., (1992), Kretzschmar et al., (1997)].

Όταν ο λιγνίτης αντιδράσει με μια βάση όπως το NaOH, προκύπτει υδατοδιαλυτό άλας. Η διαλυτότητα μπορεί να αυξηθεί με τον σχηματισμό sulphonates ή sulphometholates. Και στις δύο περιπτώσεις αυτά τα ευδιάλυτα πρόσθετα χρησιμοποιούνται πρώτα ως διασπορείς, για να ελέγξουν την φύση της ικανότητας των αργίλων να μεταβάλλουν το ιξώδες και την γέλη. Οι ποσότητες λιγνίτη που προστίθενται στα ρευστά γεωτρήσεων είναι συνήθως 2,8 – 28 gr / lt [Gray & Darley (1980), Russel & Patel (1987), Firth (1993), Baroid].

2.3.3.8. Χημικές ουσίες αλατότητας

Τα ανόργανα άλατα προστίθενται στις WBM για να σχηματίσουν αλμόλοιπα τα οποία και ελέγχουν τις ιδιότητες της αιωρούμενης αργίλου και των αργιλικών σχηματισμών και εμποδίζουν την αποσύνθεση των αλατούχων σχηματισμών. Σε λάσπες μπεντονίτη χρησιμοποιείται συνήθως NaCl.

Σε λάσπες με θαλασσινό νερό, η πλειονότητα των αλμολοίπων προέρχονται από KCl. Συγκεκριμένα, οι λάσπες πολυμερών σχηματίζονται με τη χρήση αλμόλοιπου KCl. Το KCl που προστίθεται σε μια λάσπη KCl / πολυμερών είναι γύρω στα 85 – 100 Kg/m³ (30 – 35 λίβρες / βαρέλι). Σε περιοχές όπου η αλατότητα του σχηματισμού είναι μεγάλη, τα κορεσμένα αλμόλοιπα χρησιμεύουν στο να εμποδίζουν τη διαρροή ρευστού και απώλεια υγρού προς τους σχηματισμούς και στην σταθεροποίηση των σχηματισμών λόγω μη αντίδρασης με τα αλμόλοιπα των πετρωμάτων.

2.3.3.9. Υλικά για την απώλεια κυκλοφορίας

Όταν χάνονται μεγάλα ποσά λάσπης στους σχηματισμούς, είτε μέσα από τους πόρους είτε μέσα από κενά (ρήγματα, διακλάσεις) είτε μέσω των προξενούμενων ρωγματώσεων, λαμβάνονται μέτρα για τη μείωση του ρυθμού απώλειας. Σε πολλές περιπτώσεις, προστίθενται στερεά στις λάσπες τα οποία και θα καλύπτουν τα κενά στους σχηματισμούς όπου χάνεται λάσπη. Χρησιμοποιείται ποικιλία στερεών προσθετικών, συμπεριλαμβανομένων των κομματιών σελοφάν, κόκκων ασβεστίτη και Γη διατόμων. Τα περισσότερα από αυτά είναι σε μορφή στερεή, αδρόκοκκη ή λεπτόκοκκη σκόνη ή αδρόκοκκες ίνες.

2.3.3.10. Ανασταλτικά αφρών

Ο αφρός στα ρευστά γεωτρήσεων είναι από ενοχλητικός (κατά την ανάμιξη) έως εξαιρετικά επικίνδυνος όταν πρόκειται να εμποδιστεί η είσοδος αερίου από τους σχηματισμούς στο φρέαρ. Όταν η ισχύς γέλης μειώνεται τότε μειώνεται και η ύπαρξη του αφρού, αλλά παράλληλα και η ικανότητα του ρευστού γεώτρησης να μεταφέρει τα θραύσματα. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος γίνεται προσθήκη ανασταλτικών αφρού όπως φωσφορικό αλκάλιο. Τα ανασταλτικά με βάση το πυρίτιο και τις πολυαλκοόλες προστίθενται επίσης, κυρίως κατά τη διάρκεια της παραγωγής. Οι συγκεντρώσεις που χρησιμοποιούνται είναι μεταξύ 0.03 – 3 Kg / m³.

2.3.3.11. Βιοκτόνα

Τα βιοκτόνα δύναται να συνδυαστούν με τα πολυμερή που έχουν ως βάση το άμυλο και την κυτταρίνη, ώστε να αποτρέψουν την βιο-οικοδόμηση, δηλαδή να αποτρέψουν την ανάπτυξη των θειοβακτηριδίων (ειδικά στη λάσπη που απομένει πίσω από την επένδυση κατά την διάρκεια της τσιμέντωσης και στους παραγωγικούς σχηματισμούς). Κατά το παρελθόν, το κυρίαρχο προσθετικό βιοκτόνο ήταν η γλουταραλδεϋδη. Λόγω όμως της τοξικότητάς της έχει αντικατασταθεί από άλλα πιο ασφαλή πρόσθετα και γενικά τα επίπεδα βιοκτόνων κατά την διάρκεια των εργασιών της γεώτρησης παραμένουν χαμηλά. Τα βιοκτόνα προστίθενται στα ρευστά γεωτρήσεων μόνον όταν είναι απαραίτητα, π.χ. όταν μέρος του ρευστού θα παραμείνει σταθερό για κάποιο χρονικό διάστημα.

2.3.3.12. Ανασταλτικά διάβρωσης

Η διάβρωση της διατρητικής στήλης και της επένδυσης, κατά τη χρήση WBM, οφείλεται στην παρουσία διαλελυμένου οξυγόνου. Σε πολλές περιπτώσεις, το πρόβλημα αυτό λύνεται με την διατήρηση του pH της λάσπης γύρω στο 9 – 10 προσθέτοντας ασβέστη, NaOH ή KOH. Για τον παραπάνω σκοπό χρησιμοποιούνται και συλλέκτες οξυγόνου, οι οποίοι αφαιρούν το διαλελυμένο οξυγόνο. Όλα τα θειικά άλατα, αντιδρούν με το διαλελυμένο οξυγόνο (π.χ. διθειικό αμμώνιο). Η χρήση τους δεν είναι ιδιαίτερα ευρεία, βέβαια προστίθενται μιας και το οξυγόνο εισέρχεται στη λάσπη κάθε φορά που αυτή εκτελεί διάφορες διαδρομές στην επιφάνεια, πριν επαναισαχθεί στο φρέαρ.

Ένα δεύτερο αίτιο διάβρωσης είναι το υδρόθειο, το οποίο προκύπτει ως παραπροϊόν της αποσύνθεσης της λάσπης ή από τα θειοβακτήρια. Διατηρώντας το ρευστό γεώτρησης σε βασικό περιβάλλον, το μεγαλύτερο μέρος του σουλφιδίου βρίσκεται υπό τη μορφή ιόντων διαλυτού δισουλφιδίου. Παρ' όλα αυτά, μια μείωση της αλκαλικότητας θα οδηγήσει σε απελευθέρωση υδροθείου. Σε τούτη την περίπτωση, χρησιμοποιούνται

συλλέκτες σουλφιδίων όπως το οξειδίο του σιδήρου, ο ανθρακικός ψευδάργυρος και το οξειδίο του ψευδαργύρου για να αφαιρέσουν το αέριο και το δισουλφίδιο από τη λάσπη. Τα προϊόντα της παραπάνω αντίδρασης είναι αδιάλυτα σουλφίδια μετάλλων, τα οποία όμως θα απελευθερώσουν υδρόθειο όταν έρθουν σε επαφή με ένα ισχυρό οξύ.

2.3.3.13. Ανασταλτικά επικαθήσεως

Τα πρόσθετα αυτά χρησιμοποιούνται περιστασιακά στις WBM για να αποτρέψουν την επικάθιση των ανθρακικών αλάτων στο σύστημα κυκλοφορίας. Για το σκοπό αυτό προστίθενται εστέρες φωσφορικού άλατος και μια σειρά συνθετικών πολυμερών σε χαμηλές συγκεντρώσεις, για να εμπλακούν στην κρυσταλλική δομή των επικαθίσεων, εμποδίζοντας κατά συνέπεια την αύξησή τους.

2.3.3.14. Λιπαντικά γεωτρήσεων

Υπάρχει ποικιλία άλλων βαρέων γαλακτωμάτων υδρογονανθράκων που προστίθενται στις WBM προκειμένου να μειωθεί η τριβή. Στο μεγαλύτερο μέρος εξ' αυτών έχουν αφαιρεθεί οι αρωματικές και ναφθενικές ενώσεις. Τα λιπαρά οξέα, τα άλατα λιπαρού οξέος και τα τριγλυκερίδια χρησιμοποιούνται επίσης για να βελτιώσουν την λιπαντική ικανότητα. Μικροσφαιρίδα οργανικών πολυμερών ή γυαλιού αποτελούν εναλλακτικές λύσεις για την μείωση της τριβής στο μέτωπο διάτρησης.

2.3.3.15. Πρόσθετα απελευθέρωσης της διατρητικής στήλης

Το κόλλημα της στήλης συμβαίνει όταν υπάρξει θετική διαφορική πίεση μεταξύ του ρευστού και του σχηματισμού, γεγονός που θα οδηγήσει στην ακινητοποίηση της διατρητικής στήλης η οποία θα κολλήσει πάνω στα τοιχώματα του φρέατος. Τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται για τη λύση αυτού του προβλήματος είναι άλατα λιπαρών οξέων, σουλφονικά σύμπλοκα

και τροποποιημένες άσφαλτοι.

Τοποθετούνται κατευθείαν στο σημείο που κόλλησε η στήλη και διεισδύουν ανάμεσα σε αυτή και τον σχηματισμό, διαλύουν το στρώμα του φίλτρου και λιπαίνουν την διεπιφάνεια, οπότε και επιτρέπουν τη στήλη να απελευθερωθεί. Το προσθετικό αυτό περιέχει πάντοτε ένα ανάστροφο γαλάκτωμα για να δίνει την απαιτούμενη λίπανση. Εμπεριέχει και μεγάλο ποσό απορρυπαντικού το οποίο θα διεισδύσει και θα αποδομήσει το στρώμα του φίλτρου.

2.3.3.16. Γαλακτωματοποιητές

Οι γαλακτωματοποιητές είναι βασικά συστατικά σε WBM και προστίθενται για να διασκορπίσουν το πετρέλαιο που εισχωρεί στο φρέαρ από τους σχηματισμούς ή το πετρέλαιο που προστίθεται στη λάσπη για την αύξηση της λιπαντικής της ικανότητας. Οι γαλακτωματοποιητές των WBM είναι υδατοδιαλυτοί και περιλαμβάνουν λιπαρά οξέα, sulphonates και polyoxylates.

Τα λιγνοσουλφονικά σύμπλοκα (lignosulphonates) χρησιμοποιούνται ως γαλακτωματοποιητές, καθώς σχηματίζουν μια ημι – περατή μεμβράνη γύρω από τα σταγονίδια του πετρελαίου. Το γαλάκτωμα που σχηματίζεται δεν σπάει εύκολα και μπορεί να αυξήσει το ιξώδες και να μειώσει την απώλεια υγρού.

2.3.3.17. Ανασταλτικά σχιστολίθων / έγκλειστα

Τα πολυακρυλικά πολυμερή, τα συμπολυμερή και κάποια προϊόντα ασφάλτου χρησιμοποιούνται για να ελέγχουν και να εμποδίζουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σχιστόλιθων και του ρευστού γεώτρησης. Συνήθως προστίθεται KCl.

2.3.3.18. Πολυμερή

Στις λάσπες γεωτρήσεων χρησιμοποιούνται αρκετά φυσικά και συνθετικά πολυμερή. Πολυσακχαρίδια όπως το άμυλο, το guar gum και το xanthan gum χρησιμοποιούνται ως ιξωδοποιητές. Το άμυλο και το guar gum, που προέρχονται από τα φυτά, παρουσιάζουν θερμική και βιολογική αποδόμηση όταν συνδυαστούν με βιοκτόνα και για το λόγο αυτό δεν χρησιμοποιούνται στα πρώτα βάθη προχώρησης. Το xanthan gum είναι προϊόν βακτηριδιακής δράσης πάνω σε υδατάνθρακες και δρα ως ένας ισχυρός ιξωδοποιητής σε χαμηλές συγκεντρώσεις.

Η Na – Καρβοξυλομεθυλο – κυτταρίνη (Sodium Carboxyl Methyl Cellulose, CMC) αποτελεί το πλέον ευρείας χρήσεως οργανικό πολυμερές. Πρόκειται για ημισυνθετικό υλικό που παρασκευάζεται από χημική επεξεργασία της κυτταρίνης που περιέχεται στα φυτά. Είναι μια λευκή, άοσμη και μη τοξική σκόνη. Διαλυόμενη δίνει ένα διαυγές διάλυμα ανιονικού πολυμερούς που προσροφάται στις αργίλους. Η διήθηση μειώνεται ραγδαία σε ρευστό με χαμηλή περιεκτικότητα σε CMC και ειδικότερα από προϊόντα υψηλού μοριακού βάρους (υψηλού ιξώδους).

Το CMC χαμηλού βαθμού ιξώδους (low viscosity grade) χρησιμοποιείται για την ελάττωση της διήθησης σε ρευστά υψηλής περιεκτικότητας σε στερεά ενώ το CMC μέσου βαθμού ιξώδους χρησιμεύει στην μεταφορά θραυσμάτων.

Τα αιωρήματα CMC παρουσιάζουν υψηλό φαινομενικό ιξώδες σε χαμηλούς ρυθμούς διάτμησης. Το φαινομενικό ιξώδες μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης η αποτελεσματικότητα του CMC στη μείωση της διήθησης και στην αύξηση του ιξώδους, ελαττώνεται με την αύξηση της αλατότητας.

Το CMC αποτελεί πολύπλευρο πληρωτικό υλικό, διαθέσιμο σε διάφορους τύπους για ποικίλες εφαρμογές. Το εύρος της περιεκτικότητας ρευστού σε CMC κυμαίνεται από 0.6 – 14 kg/m³ (0,2 – 5 λίβρες / βαρέλι).

Η χρήση των πολυμερών στη θέση των αργίλων ώστε να βελτιωθεί η ισχύς γέλης της λάσπης άρχισε στα τέλη του 1970. Οι πρώτες λάσπες

χρησιμοποιούσαν xanthan gum ή PHPA (Partially Hydrolised PolyAcrylamide) με αλμόλοιπο KCl. Ο σύγχρονες λάσπες KCl / πολυμερών χρησιμοποιούν Πολυανιονική κυτταρίνη (PolyAnionic Cellulose, PAC) εφόσον θέλουν να παρέχουν μόνο δύναμη γέλης χωρίς να μεταβάλλουν το ιξώδες.

2.3.3.19. Τυπικός WBM πολφός μπεντονίτη

Μια τυπική λάσπη μπεντονίτη φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα (HSE, 1999):

Συστατικό	Ποσότητα	Βάρος (Kg)	% Βάρος	% Όγκος
Νερό	1 bbl	159,00	65,33	84,92
Μπεντονίτης	20 λίβρες / βαρέλι	9,10	3,73	4,85
Καυστική σόδα	0,5 λίβρες / βαρέλι	0,23	0,09	0,12
CMC υψηλού ιξώδους	1,5 λίβρες / βαρέλι	0,68	0,28	0,25
CMC χαμηλού ιξώδους	3,5 λίβρες / βαρέλι	1,59	0,65	0,58
Βαρίτης	160 λίβρες / βαρέλι	72,58	29,82	9,23

(bbl = barrel, λίβρες / βαρέλι = rounds per barrel, 1 λίβρα / βαρέλι = 2,85 Kg/m³).

- Μια τυπική λάσπη KCl / πολυμερών αποτελείται από:
 - 85 – 100 Kg/m³ (30 – 35 λίβρες / βαρέλι) KCl και από
 - ένα πολυμερές όπως το PAC, το οποίο αντικαθιστά τον μπεντονίτη και το CMC
- Οι λάσπες γλυκόλης / πυριτικών αλάτων είναι παρόμοιες με τις λάσπες πολυμερών με 5 – 6% γλυκόλη ή πυριτικό άλας.
- Σε λάσπες θαλασσινού νερού ενδέχεται να υπάρχουν γύψος και CMC ως συστατικά γέλης, για τα πρώτα στάδια της γεώτρησης.

2.3.4. Ρευστά γεώτρησης με βάση το πετρέλαιο (OBM)

Καθώς τα OBM είναι φυσικοί αναστολείς, το εύρος των χημικών προσθέτων που δύναται να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές ιδιότητες, είναι σαφώς περιορισμένο.

Μια τυπική λάσπη OBM συνίσταται από:

- Πετρέλαιο (βάση πολφού)
- Άλατα (σε περιεκτικότητα 30 – 40 % κ.ό.)
- Πρωτογενείς και δευτερογενείς γαλακτωματοποιητές
- Ιξωδοποιητή
- Ρυθμιστή απώλειας διήθησης
- Ελεγκτή του ιξώδους

2.3.4.1. Βάση πολφού - Πετρέλαιο

Πρόκειται πλέον για χαμηλής τοξικότητας συνθετικό λάδι που μπορεί να περιέχει εστέρες, αιθέρες, πολυαρωματικές ολεφίνες και ακετάλες.

2.3.4.2. Άλατα

Το ποσοστό των αλάτων στα OBM κυμαίνεται από 10% - 50% κ.ό. Η χρήση των αλάτων μειώνει την αλληλεπίδραση μεταξύ της λάσπης γεώτρησης και των αργιλικών πετρωμάτων, αυξάνοντας συγχρόνως την πυκνότητα του πολφού. Το μίγμα έχει επίσης μεγαλύτερο ιξώδες, βελτιώνοντας τη μεταφορά των θραυσμάτων. Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται KCl.

2.3.4.3. Συστατικά για ρύθμιση της πυκνότητας

Τα πρόσθετα αυτά είναι τα ίδια με αυτά που χρησιμοποιούνται στις WBM, με κύριο υλικό το βαρίτη. Όπως και στις WBM, η ποσότητα που

προστίθεται μπορεί να φτάσει τα 1800 Kg/m³ (630 λίβρες / βαρέλι) προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή πυκνότητα.

2.3.4.4. Συστατικά για την απώλεια της κυκλοφορίας του ρευστού

Είναι τα ίδια με αυτά των WBM.

2.3.4.5. Ανόργανα προϊόντα gel

Ο μπεντονίτης αποτελείται από μοντοριλλονίτη και χρησιμοποιείται στις OBM. Πρέπει όμως πρώτα να αντιδράσει με οργανικές αμίνες για να γίνουν οργανοφιλικός.

2.3.4.6. Πρόσθετα για ρύθμιση της αλκαλικότητας

Ο ασβεστίτης προστίθεται σε OBM για αύξηση του pH, μείωση της διάβρωσης αλλά και την μετατροπή κάποιων ουσιών σε ουσίες διαλυτές στο πετρέλαιο. Προτιμάται η χρήση του ασβεστίτη από αυτή του NaOH, λόγω της μεγάλης του περιεκτικότητας σε ασβέστιο.

2.3.4.7. Λιγνίτες

Χημικά πρόσθετα με βάση το λιγνίτη είναι ιδιαίτερα χρήσιμα, για τον έλεγχο του ρυθμού διήθησης. Τα υλικά αυτά, σε βοηθητικό ρόλο, σταθεροποιούν τα γαλακτώματα.

2.3.4.8. Γαλακτωματοποιητές

Πολλές συνθέσεις OBM περιέχουν σύστημα δύο γαλακτωματοποιητών για να διασφαλίζουν ένα σταθερό και ομοιογενές γάλακτωμα, καθώς η περιεκτικότητα των θραυσμάτων στη λάσπη αυξάνει. Οι πρωτογενείς γαλακτωματοποιητές περιέχουν λιπαρά οξέα και ρητίνες. Οι

δευτερογενείς γαλακτωματοποιητές λειτουργούν επικουρικά, για τη σταθεροποίηση του γαλακτώματος σε υψηλές θερμοκρασίες. Βοηθούν στον εμποτισμό των θραυσμάτων με πετρέλαιο και οπότε βελτιώνουν την αιώρηση και τη μεταφορική ικανότητα της λάσπης γεώτρησης.

2.3.4.9. Τυπικός πολφός OBM

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνεται η σύσταση μιας τυπικής λάσπης με βάση το πετρέλαιο (OBM) (Πηγή: HSE, 1999). Η σύνθεσή της βέβαια αλλάζει ανάλογα με τις συνθήκες. Οι κύριες ομάδες προσθετικών ουσιών στις λάσπες αυτές είναι:

Συστατικό	Ποσότητα	Βάρος (Kg)	% Βάρος	% Όγκος
Βάση πολφού (ντίζελ)	0,52 bbl	63,64	30,37	52,40
Ιξωδοποιητής (άλατα)	5,0 λίβρες / βαρέλι	2,26	1,08	0,88
Γαλακτωματοποιητής 1	0,8 grb	2,89	1,38	1,90
Γαλακτωματοποιητής 2	0,4 grb	1,49	0,71	0,95
Ασβέστιο	5,0 λίβρες / βαρέλι	2,26	1,08	0,63
Νερό	0,3 λίβρες / βαρέλι	47,15	22,50	29,70
CaCl ₂	30,2 λίβρες / βαρέλι	13,70	6,54	2,11
Βαρίτης	167,9 λίβρες / βαρέλι	76,15	36,34	11,42

(bbl = barrel, λίβρες / βαρέλι = rounds per barrel)

2.4. Γεωτρήσεις υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης (High Pressure High Temperature, HPHT)

Οι γεωτρήσεις υψηλών θερμοκρασιών (πετρελαίου/ φυσικού αερίου ή γεωθερμικές) απαιτούν πολύ καλό σχεδιασμό των εργασιών, ιδιαίτερα στον τομέα της χρήσης των κατάλληλων ρευστών γεωτρήσεων. Οι λάσπες WBM που έχουν ως κύριο συστατικό τον μπεντονίτη για την ρύθμιση του ιξώδους και της διήθησης, προκαλούν σημαντικά προβλήματα λόγω της τάσης που έχει ο μπεντονίτης να πηκτώνει σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών. Η τάση για γελοποίηση πιθανόν να συμβαίνει λόγω των δεσμών που αναπτύσσονται μεταξύ των πλευρών και των επιπέδων (προσώπου) των φυλλαρίων των αργιλικών σωματιδίων, είτε σε όξινο είτε σε βασικό pH. Αν και η έρευνα για την κατανόηση των ενώσεων των φυλλαρίων αργίλου και των αλληλεπιδράσεων με τα λοιπά χημικά πρόσθετα είναι μακρόχρονη, εντούτοις δεν έχουν δοθεί ακόμη πλήρεις απαντήσεις.

Τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται σε λάσπες μπεντονίτη έχουν την ιδιότητα να ελέγχουν τις ρεολογικές και διηθητικές ιδιότητες, τόσο σε χαμηλές όσο και σε υψηλές θερμοκρασίες, εμποδίζοντας την δημιουργία των ανεπιθύμητων δεσμών μεταξύ των φυλλαρίων των αργίλων και διατηρώντας έτσι τα μόρια μπεντονίτη σε διασπορά. Ο λιγνίτης, είτε καυστικοποιημένος είτε συνδυαζόμενος με μέταλλα, έχει αποδειχθεί ότι είναι αποτελεσματικός όταν προστεθεί σε πολφούς, ειδικά σε γεωτρήσεις υψηλών θερμοκρασιών, λόγω της θερμικής του σταθερότητας. Το συστατικό που φαίνεται να επιδρά θετικά είναι το χουμικό οξύ, το οποίο είναι αρνητικά φορτισμένο, κυρίως λόγω των καρβοξυλικών ομάδων. Μια πιθανή εξήγηση της ικανότητας του λιγνίτη στην αποτροπή πηκτωμάτων είναι η ένωση των χουμικών οξέων στις άκρες των φυλλαρίων μπεντονίτη, προσδίδοντας μεγαλύτερη ηλεκτραρνητικότητα και αυξάνοντας τις απωστικές δυνάμεις μεταξύ των αργίλων, κρατώντας τους σε διασπορά (Kelessidis, 2004).

2.4.1. Εισαγωγή

Τα ρευστά γεωτρήσεων είναι πολύ σημαντικά για τις διεργασίες μιας γεώτρησης. Καθώς οι τεχνικές εξελίσσονται και τα φρέατα που ανοίγονται είναι ακόμη βαθύτερα, τα ρευστά γεωτρήσεων χρησιμοποιούνται για μια πληθώρα λειτουργιών, ώστε οι γεωτρήσεις να γίνονται με ασφάλεια, οικονομία και επιτυχία.

Μεταξύ των ιδιοτήτων που πρέπει να ελέγχουν τα ρευστά γεωτρήσεων είναι να προσδίδουν το απαιτούμενο ιξώδες και να ελέγχουν την ικανότητα διήθησης. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο υλικό για την επίτευξη των παραπάνω ιδιοτήτων σε λάσπες WBM είναι ο μπεντονίτης. Αρκετά ακόμη πρόσθετα χρησιμοποιούνται ώστε να δοθούν οι απαραίτητες ιδιότητες στους γεωτρητικούς πολφούς. Κύριο όμως παραμένει το ζήτημα της χρήσης υλικών που προσδίδουν στα ρευστά τις επιθυμητές ιδιότητες, τόσο σε χαμηλές όσο και σε υψηλές θερμοκρασίες. Η πλειοψηφία των χημικών ουσιών που προστίθενται στο ρευστό γεώτρησης και προέρχονται από φυσικά προϊόντα αρχίζουν να αποδομούνται σε θερμοκρασίες μεταξύ 120 – 135°C (250 και 275°F) [Gray & Darley (1980), Bleler (1990), Elward-Berry & Darby (1992)]. Εντούτοις, τα περισσότερα συστήματα ρευστών που σχεδιάζονται για HPHT γεωτρήσεις βασίζονται στην άργιλο και περιέχουν lignosulphonates και λιγνίτες, ουσίες που ανεβάζουν την σταθερότητα της λάσπης θερμοκρασίας μέχρι τους 177°C (350°F). Βέβαια, ο έλεγχος της λάσπης επάνω από 150°C, μπορεί να είναι δύσκολος και δαπανηρός.

Οι Saito et al., (1998) και Saito & Sakuma (2000), περιγράφουν την πολύ πετυχημένη χρήση μιας λεπτόρρευστης λάσπης, που εμποδίζει την πήκτωση του πολφού σε φρέατα υψηλών θερμοκρασιών, έως τους 500°C αν και δεν είχε την ικανότητα μεταφοράς θραυσμάτων που θα έπρεπε. Η σύνθεση της λάσπης περιελάμβανε μπεντονίτη, διασπορέα για υψηλή θερμοκρασία, καυστική σόδα και λιπαντικό και η τάση διολίσθησης ήταν $\tau_y = 1 - 1,5 \text{ Pa}$ και το πλαστικό ιξώδες $PV = 4 \text{ cP}$.

Για να είναι δυνατή η κατανόηση της επίδρασης του λιγνίτη στη ρεολογία και την διηθητική ικανότητα των πολφών μπεντονίτη, πρέπει πρώτα

να γίνει αναφορά στα ζητήματα που αφορούν στη ρεολογία των υδατικών αιωρημάτων των αργιλικών ορυκτών. Αν και δεν είναι θέμα της παρούσας εργασίας, μπορούν να αναλυθούν θέματα όπως το ιξώδες, η τάση διολίσθησης και η πήκτωση, παράμετροι που συναντώνται στους πολφούς μπεντονίτη, έτσι ώστε να κατανοηθεί η επίδραση και ο μηχανισμός δράσης των διαφόρων προσθέτων.

2.4.1.1. Ρεολογία των μπεντονιτών

Οι άργιλοι και ειδικά οι σμεκτίτες, όταν προστίθενται σε νερό, διογκώνονται και προσδίδουν ιξώδες στο μίγμα, δημιουργώντας ένα μη νευτώνειο αιώρημα, που περιγράφεται συνήθως από το ρεολογικό μοντέλο των πλαστικών Bingham.

Κάτω από ορισμένες συνθήκες, οι πολφού μπεντονίτη έχουν την ικανότητα να δημιουργούν πηκτώματα, όταν μένουν σε ηρεμία, ιδιότητα που κάνει τον μπεντονίτη απαραίτητο συστατικό στις λάσπες γεωτρήσεων, καθώς με τον τρόπο αυτό μπορούν να κρατούν σε αιώρηση και να μεταφέρουν τα θραύσματα που παράγει το κοπτικό άκρο, από τον πυθμένα στην επιφάνεια του φρέατος.

Αν και οι άργιλοι έχουν μελετηθεί επί σειρά ετών, εντούτοις, δεν έχουν γίνει πλήρως γνωστοί οι μηχανισμοί της δημιουργίας του ιξώδους και της τάσης για πήκτωση.

Οι ρεολογικές και διηθητικές ιδιότητες της λάσπης μπεντονίτη εξαρτώνται από την περιεκτικότητά του στο νερό, το pH του πολφού, την παρουσία ηλεκτρολυτών και τη θερμοκρασία. Οι μπεντονίτες που χρησιμοποιούνται στα ρευστά γεωτρήσεων είναι Na – ούχοι.

Η δομή του Na – μπεντονίτη συνίσταται από φυλλάρια αργίλων, ηλεκτρικά φορτισμένα, ενώ διακρίνεται η επίπεδη επιφάνεια του φυλλαρίου και οι πολύ λεπτές πλευρές του. Τα φορτία της επιφάνειας (Al^{+3} και Si^{+4}) δεν είναι ομοιογενώς κατανομημένα, αλλά όλη η επιφάνεια είναι αρνητικά φορτισμένη. Οι πλευρές του φυλλαρίου είναι άλλοτε θετικά και άλλοτε αρνητικά φορτισμένα, ανάλογα με το pH [Van Olphen (1977), Gray & Darley

(1980), Adachi et al., (1998), Duran (2000), Lagaly & Ziesmer (2003)]. Αυτή η εναλλαγή στα φορτία είναι που καθορίζει την αλληλεπίδραση του μπεντονίτη με άλλες ενώσεις σε υδατικά διαλύματα. Η κρυσταλλική δομή των πλευρών του φυλλαρίου αλληλεπιδρά με τα ιόντα του αιωρήματος, μέσω φυσικών και χημικών αντιδράσεων. Η παρουσία ηλεκτρικών φορτίων έχει ως συνέπεια τη δημιουργία ενός διφασικού διπλού στρώματος γύρω από το φυλλάριο, δημιουργώντας αντίσταση στην κίνησή του. Όταν τα ηλεκτρικά φορτία συνδυαστούν με το φυσικό ιξώδες του ρευστού, τότε προκύπτει μια ηλεκτρο – ιξώδης αντίσταση των φυλλαρίων στην κίνηση.

Δοκιμές με καολίνη έδειξαν την θετική φόρτιση της περιμέτρου όταν προστίθεται HCl και την αρνητική φόρτιση όταν προστίθεται NaOH [Gray & Darley (198)]. Η συμπεριφορά αυτή ερμηνεύεται μέσω της αντίδρασης των ιόντων Al^{+3} και του HCl που σχηματίζουν $AlCl_3$, άλας που διασπάται σε Al^{+3} και $3Cl^-$, φορτίζοντας την περίμετρο θετικά. Από την άλλη πλευρά, τα Al^{+3} αντιδρούν με το NaOH και δίνουν ένα αδιάλυτο άλας το $Al(OH)_3$, οπότε και εξουδετερώνονται τα θετικά φορτία. Παρόμοιος φαίνεται να είναι ο μηχανισμός και στον μπεντονίτη.

Συμπερασματικά, σε υδατικά διαλύματα μπεντονίτη, συγκέντρωσης 3% – 7% κ.ό., τα αργιλικά σωματίδια κροκιδώνονται με την συνένωση των σωματιδίων μεταξύ τους. Η δημιουργία γέλης (η ιδιότητα που ρυθμίζεται με τους λεπτυντές και φυσικά με τον λιγνίτη) προκαλείται από την συνένωση άκρων – επιφανείας, άκρων – άκρων ή επιφάνειας – επιφάνειας των φυλλαρίων μοντοριλλονίτη.

Το πλέγμα που δημιουργείται από τις συνενώσεις αυτές, δεν προκύπτει μόνο από ηλεκτροστατική έλξη μεταξύ των αντιθέτως φορτισμένων επιφανειών, όπως πρόσωπα (-) με άκρα (+) αλλά και από την ευθυγράμμιση ομοίως φορτισμένων επιφανειών, όπως για παράδειγμα, άκρα (-) με άκρα (-), άκρα (-) με πρόσωπα (+) και πρόσωπα (+) με πρόσωπα (+). Στις συγκεντρώσεις μπεντονίτη που αναφέρθηκαν και χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία γεωτρήσεων, ο αριθμός των φυλλαρίων είναι σημαντικός και κατά συνέπεια υπάρχει ηλεκτροστατική άπωση μεταξύ ομοίως φορτισμένων σωματιδίων που δημιουργεί τέτοιες ευθυγραμμίσεις και έτσι δημιουργούνται

πακέτα φυλλαρίων που εγκλωβίζουν νερό ανάμεσά τους, προκαλώντας τη δημιουργία δομών γέλης (Kelessidis, 2004).

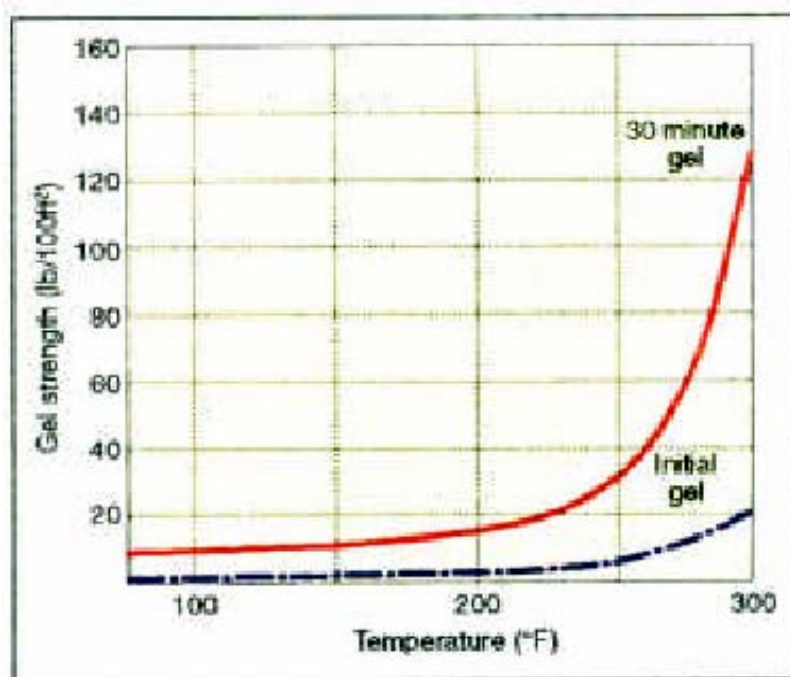
2.4.1.2. Θερμική υποβάθμιση του μπεντονίτη

Αρκετές μελέτες έχουν γίνει για να διερευνήσουν την επίδραση της θερμοκρασίας (και της πίεσης) στις ρεολογικές ιδιότητες του μπεντονίτη. Λόγω των πολυάριθμων παραγόντων που εμπλέκονται, η συμπεριφορά των ρευστών γεωτρήσεων σε υψηλές θερμοκρασίες είναι απρόβλεπτη και δεν έχει πλήρως κατανοηθεί. Κάποιες μελέτες έχουν δείξει ότι η επίδραση της πίεσης στις WBM είναι ελάχιστη [Hiller et al., (1988), Briscoe et al., (1994)].

Οι ρεολογικές ιδιότητες των ρευστών γεώτρησης επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την θερμοκρασία που συναντάται σε φρέατα γεωτρήσεων [Gray & Darley (1980)]. Πρώτον, με φυσικό τρόπο, καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει το ιξώδες της υγρής φάσης και δεύτερον με χημικό τρόπο, καθώς όλα τα υδροξείδια αντιδρούν με τα αργιλικά ορυκτά σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 94^οC (200^οF). Σε λάσπες χαμηλής βασικότητας, όπως αυτές που περιέχουν καυστικές ταννίνες ή λιγνοσουλφονικά, η επίδραση στις ρεολογικές ιδιότητες είναι μικρή, αλλά σε λάσπες υψηλής βασικότητας (υψηλά pH), η επίδραση της θερμοκρασίας είναι μεγάλη. Τέλος, οι υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να επηρεάσουν τόσο τις ρεολογικές ιδιότητες όσο την διηθητική ικανότητα των ρευστών, με ηλεκτροχημικό τρόπο. Η αύξηση στη θερμοκρασία προκαλεί αύξηση της κινητικότητας των ιόντων των ηλεκτρολυτών και της διαλυτότητας των μερικώς διαλελυμένων αλάτων που πιθανόν να είναι παρόντα. Οι προκαλούμενες αλλαγές στην ισορροπία αυτή έχουν ως αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση των εσωτερικών δυνάμεων έλξης και άπωσης, επηρεάζοντας σε μεγάλο βαθμό την κροκίδωση ή την διασπορά. Οι αλλαγές αυτές δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από τις αλλαγές του pH. Πρέπει βέβαια να γίνει διάκριση μεταξύ των αποκροκιδωμένων και κροκιδωμένων αιωρημάτων. Για τα αποκροκιδωμένα αιωρήματα (αυτά στα οποία έχει προστεθεί λεπτυντής), υπάρχει μείωση του πλαστικού ιξώδους και της τάσης διολίσθησης για

θερμοκρασίες μέχρι τους 177^οC (350^οF). Αντιθέτως, για κροκιδωμένα αιωρήματα (χωρίς λεπτυντές) παρατηρείται μικρή μείωση του πλαστικού ιξώδους αλλά ραγδαία αύξηση της τάσης διολίσθησης, για θερμοκρασίες μέχρι 100^οC (212^οF) [Gray & Darley (1980)].

Το Σχήμα 2.2 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας στην δύναμη γέλης μιας λάσπης μπεντονίτη 50 Kg/m³ (18 λίβρες / βαρέλι). Φαίνεται ότι ο υπερβολικός σχηματισμός πηκτώματος μπορεί να εμφανιστεί στους 120^οC (250^οF). Στην πράξη, η πραγματική θερμοκρασία που προκαλεί τη θερμική κροκίδωση εξαρτάται από τη σύνθεση του ρευστού. Ο τύπος μπεντονίτη, ο τύπος και η συγκέντρωση των θραυσμάτων, ο τύπος και η συγκέντρωση των αναστολέων κροκίδωσης και το είδος των ιόντων της υγρής φάσης, έχουν μια επίδραση στη διαδικασία της κροκίδωσης.



Σχήμα 2.2. Επίδραση θερμοκρασίας στη δύναμη γέλης πολφού μπεντονίτη.

(Πηγή: Kingdom Drilling)

Η αντίδραση των ιόντων ασβεστίου με τους κολλοειδείς αργίλους σε ένα περιβάλλον υψηλής αλκαλικότητας μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό πυριτικών αλάτων αργιλίου – ασβεστίου. Σε αυτές τις καταστάσεις τα εξαιρετικά υψηλά πηκτώματα μπορούν να αναπτυχθούν και, στις χειρότερες περιπτώσεις, η λάσπη μπορεί να στερεοποιηθεί.

2.4.1.3. Όρια θερμοκρασίας

Οι Πίνακες 2.1 και 2.2 δίνει τις κατά προσέγγιση θερμοκρασίες αποσύνθεσης, ή τα πρακτικά θερμικά όρια εφαρμογής, για ρευστά με βάση το νερό και τα συστήματα λάσπης που χρησιμοποιούνται.

Πίνακας 2.1. Πρόσθετα σε λάσπες WBM

Γενικός τύπος	Όρια θερμοκρασίας (°C)
Guar gum	107
Άμυλο (Starch)	120
Βιοπολυμερή	120 – 135
Άμυλο υψηλής θερμοκρασίας	135
CMC & PAC	135
Λιγνοσουλφονικά	120 – 160
Λιγνίτης	150 – 175
Τροποποιημένος λιγνίτης	175 – 230
Συνθετικά πολυμερή	205 – 260

(Πηγή: Kingdom Drilling)

Πίνακας 2.2. Συστήματα ρευστών WBM

Γενικός τύπος	Όρια θερμοκρασίας (°C)
Μη διασπαρμένα πολυμερή (NDP)	135
NDP Υψηλής θερμοκρασίας	175
Μπεντονίτης / FCL (Fe,Cr- λιγνοσουλφονικό)	150
Μπεντονίτης / FCL / Λιγνίτης	175
Μπεντονίτης / τροποποιημένος λιγνίτης, πολυμερή	205
Συνθετικά πολυμερή	205 – 260

(Πηγή: Kingdom Drilling)

Για να αυξηθεί η θερμική σταθερότητα των προϊόντων και των συστημάτων λάσπης είναι απαραίτητο να παρεμποδιστούν οι μηχανισμοί που προκαλούν την αποτυχία της λειτουργίας των συστατικών προϊόντων. Η ζωή των πολυμερών μπορεί να επεκταθεί με την ελαχιστοποίηση των αντιδράσεων που προκαλούν το χωρισμό των πολυμερικών αλυσίδων. Πρώτιστα αυτές οι αντιδράσεις είναι η υδρόλυση και η οξείδωση. Όπως αναφέρθηκε, οι δύο διαδικασίες μπορούν να ελεγχθούν, μέχρι ενός ορισμένου βαθμού, με τη διατήρηση του pH σε τιμές 9,5 - 10,5 και με την χρήση ουσιών που δεσμεύουν το οξυγόνο. Η δράση αυτή μπορεί να αυξήσει τη αντοχή των συστατικών κατά 3°C. Μερικά βαριά μέταλλα θεωρούνται ότι καταλύουν τις αντιδράσεις διακοπής των αλυσίδων των πολυμερών και κατά συνέπεια αυξάνουν την θερμική αντοχή των ουσιών.

Οι λεπτυντές όπως ο λιγνίτης, παρέχουν τα ανιόντα που δεσμεύονται στη δομή του μπεντονίτη. Η μηχανισμός δέσμευσης είναι χημικός, καθώς όλοι οι λεπτυντές δημιουργούν αδιάλυτα άλατα ή σύμπλοκα με τα μέταλλα του αργιλικού ορυκτού. Τα ανιόντα δεσμεύονται στην περίμετρο του φυλλαρίου λόγω ηλεκτροστατικής έλξης και αυξάνουν την ηλεκτραρνητικότητά του, ενισχύοντας τις απωστικές δυνάμεις μεταξύ της επιφάνειας και της περιμέτρου των φυλλαρίων [Rabaioli et al., (1993)] διατηρώντας έτσι το αιώρημα σε διασπορά. Επιπλέον, λόγω της θερμικής του σταθερότητας, προσφέρεται για χρήση σε γεωτρήσεις υψηλών θερμοκρασιών.

2.4.2. Χρήση του λιγνίτη σε ρευστά γεωτρήσεων HPHT

Η χρήση του λιγνίτη σε πολφούς γεωτρήσεων είναι αρκετά διαδεδομένη. Και αυτό γιατί, όσο τα βάθη των φρεάτων αυξάνονταν και οι θερμοκρασίες ήταν ιδιαίτερα μεγάλες, παρατηρούνταν τάση για πήκτωση των πολφών με βάση το νερό. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ιξώδους και την μείωση της διηθητικής ικανότητας της λάσπης. Επομένως, έπρεπε να βρεθούν νέα υλικά που θα προσδίδουν θερμική σταθερότητα, θα κρατούν τη λάσπη γεώτρησης σε διασπορά και θα μπορούν να ελέγχουν τον

ρυθμό διήθησης.

Βιβλιογραφική έρευνα για τη χρήση του λιγνίτη που κάλυψε τα τελευταία τριάντα χρόνια, έδωσε αρκετά άρθρα τα οποία αναφέρουν την προσθήκη του λιγνίτη σε ρευστά γεωτρήσεων, ειδικά στις περιπτώσεις που συναντώνται υψηλές θερμοκρασίες.

Ο Mondshine (1973) αναφέρει ότι η προσθήκη καυστικοποιημένου λιγνίτη σε λάσπες μπεντονίτη λειτουργεί δραστικά στον έλεγχο της διηθητικής ικανότητας και μπορεί να κρατά το αιώρημα μπεντονίτη σε διασπορά. Σε πολφό με συστατικά μπεντονίτη για ιξωδοποιητή, Κ - λιγνίτη (Κάλιο) για διασπορέα, και βαρίτη για την αύξηση της πυκνότητας της λάσπης, έδειξε ότι η χρήση Κ - λιγνίτη λειτουργεί ως πηγή ιόντων Κ τα οποία εμποδίζουν το νερό να εισχωρήσει στον γεωλογικό σχηματισμό, μειώνοντας το διήθημα. Αυξημένες συγκεντρώσεις Κ - λιγνίτη στον πολφό γεώτρησης βελτιώνουν ακόμη περισσότερο την σταθερότητα του σχηματισμού και ενισχύουν την ελαχιστοποίηση του διηθήματος. Θέλοντας να αποδείξει τη σπουδαιότητα του λιγνίτη, ο Mondshine έκανε πειράματα σε διάφορα πετρώματα, τα οποία έδειξαν μειωμένη υγρασία όταν εκτέθηκαν σε πολφούς με λιγνίτη. Καθώς η ποσότητα του λιγνίτη αυξάνει, το ποσοστό νερού που εισέρχεται στον σχηματισμό μειώνεται.

Η χρήση του λιγνίτη είναι ιδιαίτερα συχνή και σε γεωτρήσεις γεωθερμικών ταμιευτήρων. Σε γεωτρήσεις που έγιναν χρησιμοποιήθηκαν ρευστά με βάση το νερό που περιείχαν ένα θερμικά σταθερό αντικροκιδωτικό και λιγνίτη για τον έλεγχο της διήθησης. Οι πολφού δοκιμάστηκαν σε θερμοκρασίες μέχρι 230⁰C [Hilcher and Clement, (1982)] και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι παρείχαν σταθερές ρεολογικές ιδιότητες και καλό έλεγχο της ικανότητας διήθησης.

Οι υψηλές θερμοκρασίες δρουν αρνητικά για τις λάσπες με βάση το νερό, ειδικά όταν περιέχεται τσιμέντο, όπως στις γεωτρήσεις γεωθερμίας. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται σε γεωθερμικούς ταμιευτήρες είναι ιδιαίτερα ρωγματωμένοι γι' αυτό και η ανάγκη για τσιμέντωση είναι διαρκής. Από την άλλη πλευρά, οι άργιλοι κροκιδώνονται και προκαλούν την πήκτωση της λάσπης. Ο λιγνίτης που προστίθεται είναι ιδιαίτερα αποδοτικός και

βελτιώνει τις ιδιότητες της λάσπης μέχρι τους 230^οC.

Άλλες δοκιμές που έγιναν σε γεωθερμικά πεδία, καταδεικνύουν την θετική δράση του λιγνίτη. Λάσπες γεωτρήσεων με μπεντονίτη και λιγνίτη που μελετήθηκαν σε θερμοκρασίες έως 260^οC έδωσαν πολύ καλά αποτελέσματα στη ρεολογία και τη διήθηση [Zilch et al., (1991)]. Οι πολφοί που περιείχαν λιγνίτη σε χαμηλή συγκέντρωση στον πολφό, 8,5 Kg/m³ (3 λίβρες / βαρέλι), παρείχαν καλύτερη ποιότητα στο υμένιο της λάσπης και αυξημένη ικανότητα ελέγχου του ρυθμού διήθησης (12 – 14 ml), χωρίς να παρατηρηθεί κροκίδωση ($\tau_y = 2 - 4$ Pa). Οι συγκεκριμένοι ερευνητές αναφέρουν ότι από το 1980 και μετά, η σύνθεση με λιγνίτη χρησιμοποιείται ευρέως, διατηρώντας τη ρεολογία και την διηθητική ικανότητα του ρευστού και παρουσιάζοντας υψηλή αντοχή στο τσιμέντο και τα άλατα.

Σε θερμοκρασίες έως 220^οC, αναφέρονται λάσπες γεωτρήσεων με σύνθεση: μπεντονίτη 8,5 – 28,5 Kg/m³ (3 – 10 λίβρες / βαρέλι), λιγνίτη 5,7 – 11 Kg/m³ (2 – 6 λίβρες / βαρέλι) και βασικό pH [Elward – Berry et al., (1992)]. Το διήθημα που παρήγαγε η λάσπη δεν ξεπερνά τα 11 ml και η τάση διολίσθησης περιορίζεται στα 6 – 8 Pa.

Πρέπει επίσης να τονιστεί η ποικιλία ευρεσιτεχνιών που υπάρχει στην βάση δεδομένων Ευρεσιτεχνιών των ΗΠΑ, για προσθήκη λιγνίτη σε ρευστά γεωτρήσεων. Ως παραδείγματα χρήσης λιγνίτη αναφέρονται τα διπλώματα των Russel & Patel (1987), Firth (1993) & Patel (1995).

Μεγάλη και η πληθώρα εμπορικών προϊόντων λιγνιτών που διατίθενται ως πρόσθετα γεωτρήσεων. Ανατρέχοντας σε καταλόγους εταιρειών που παρασκευάζουν διασπορείς για ρευστά γεωτρήσεων, επισημαίνεται ο ρόλος του λιγνίτη για τη βελτίωση των διηθητικών και ρεολογικών χαρακτηριστικών των πολφών γεωτρήσεων (Παράρτημα Η).

Βάσει λοιπόν των βιβλιογραφικών αναφορών και της θετικής επίπτωσης που έχει ο λιγνίτης στα ρευστά γεωτρήσεων και ειδικά στις περιπτώσεις όπου οι θερμοκρασίες είναι υψηλές, στην παρούσα εργασία μελετώνται οι ιδιότητες των πολφών που περιέχουν ελληνικούς λιγνίτες.

3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΑΝΑΛΥΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΠΟΛΦΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Εισαγωγή

Τα πειράματα που έγιναν με πολφούς γεωτρήσεων αφορούσαν στη διερεύνηση των ρεολογικών και διηθητικών χαρακτηριστικών των πολφών και συγκεκριμένα της διηθητικής ικανότητάς τους καθώς και της θιξοτροπικής τους συμπεριφοράς. Για το λόγο αυτό, είναι σημαντικό να γίνει πρώτα η θεωρητική ανάλυση των παραπάνω εννοιών – ιδιοτήτων προκειμένου να γίνουν κατανοητά τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το πειραματικό μέρος της εργασίας.

3.1. Ανάλυση της ιδιότητας της διήθησης

3.1.1. Καταστροφή σχηματισμού λόγω του πολφού γεώτρησης

Από τη στιγμή που το κοπτικό άκρο εισέλθει στο φρέαρ και έως ότου η γεώτρηση κριθεί ως παραγωγική, ο γεωλογικός σχηματισμός είναι εκτεθειμένος σε μια σειρά από μηχανικές διεργασίες και στα ρευστά γεώτρησης, παράγοντες που ενδέχεται να επηρεάσουν την παραγωγικότητά του. Αυτή η μείωση στην παραγωγικότητα καλείται «καταστροφή σχηματισμού» (formation damage).

Το ρευστό γεώτρησης είναι το πρώτο ρευστό που εισέρχεται στη ζώνη του ταμιευτήρα. Η επιλογή του κατάλληλου ρευστού είναι επομένως ιδιαίτερα σημαντική.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των πολφών γεώτρησης είναι η ρύθμιση της απώλειας υγρού από τον πολφό στον σχηματισμό. Η πίεση της στήλης του ρευστού γεώτρησης είναι συνήθως μεγαλύτερη από την πίεση των πόρων του σχηματισμού (στην πραγματικότητα, των ρευστών των πόρων) ώστε να εμποδίζεται η εισροή ρευστών στο φρέαρ. Λόγω της διαφοράς πίεσης (ΔP), η λάσπη γεώτρησης θα εισχωρούσε συνεχώς μέσω των τοιχωμάτων του φρέατος στους σχηματισμούς αν δεν υπήρχε το υμένιο

ή φιλμ ή κέικ. Η δημιουργία του υμενίου στην επιφάνεια των τοιχωμάτων αποτρέπει την απώλεια αυτή και έτσι δεν καταστρέφεται ο γεωλογικός σχηματισμός.

Η ικανότητα της λάσπης γεώτρησης να φράζει τους περατούς σχηματισμούς με ένα μικρό και χαμηλής διαπερατότητας υμένιο (filter cake) είναι πολύ σημαντική για την ολοκλήρωση της γεώτρησης.

Τέσσερις είναι οι βασικοί παράγοντες καταστροφής σχηματισμού που σχετίζονται με τα ρευστά γεώτρησης:

1. Η καταστροφή που δημιουργείται στα πετρώματα του σχηματισμού λόγω ασυμβατότητας με τα ρευστά γεωτρήσεων.
2. Η ζημιά που προκύπτει από την ασυμβατότητα των ρευστών γεωτρήσεων με τα ρευστά των σχηματισμών.
3. Η ζημιά που προκαλείται από την απουσία του υμενίου της λάσπης.
4. Η ζημιά που δημιουργείται λόγω εισροής στερεών στους πόρους της λάσπης γεώτρησης.

Οι δύο κύριοι παράγοντες που σχετίζονται με την σπουδαιότητα της παραγωγικότητας του σχηματισμού και κατά συνέπεια μειώνουν την ικανότητά του, οφείλονται στα ρευστά γεωτρήσεων και είναι:

1. Το βάθος της εισροής του διηθήματος στους πόρους του ταμιευτήρα.
2. Το ποσοστό της καταστροφής που αυτό προκαλεί (μείωση διαπερατότητας).

Επομένως, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι ζημιές κατά την γεώτρηση, πρέπει να μειωθεί το βάθος της εισροής του διηθήματος, όπως επίσης και η ζημιογόνος φύση του ίδιου του διηθήματος. Βασιζόμενοι στα παραπάνω κριτήρια, παίρνουμε συγκεκριμένα μέτρα αντιμετώπισης των καταστροφών του σχηματισμού.

3.1.2. Γεωλογικοί σχηματισμοί και διηθητικά χαρακτηριστικά των πολφών

Τα απαιτούμενα διηθητικά χαρακτηριστικά των πολφών για την επιτυχή ολοκλήρωση της γεώτρησης, εξαρτώνται κατά μεγάλο μέρος από την φύση των σχηματισμών που πρόκειται να διατρηθούν. Οι σχηματισμοί μικρής διαπερατότητας όπως τα ανθρακικά πετρώματα και οι σχιστόλιθοι μπορούν εύκολα να διατρηθούν με μικρό ή ελάχιστο έλεγχο των διηθητικών χαρακτηριστικών των πολφών. Αρκετοί όμως σχιστόλιθοι είναι ευαίσθητοι στο νερό, π.χ. όταν έρχονται σε επαφή με το νερό αναπτύσσουν αρνητικές πιέσεις (εισπιέσεις) που προκαλούν σπηλαιώσεις και διεύρυνση της διατομής του φρέατος. Το σφράγισμα των νέο – διαρρηγμένων σχηματισμών από το υμένιο βοηθά να ελεγχθούν οι σπηλαιώσεις, όμως ο τύπος της χρησιμοποιούμενης λάσπης και η χημική σύνθεση του διηθήματός της είναι πιο σημαντικοί παράγοντες.

Σε περατούς σχηματισμούς, οι ιδιότητες της διήθησης πρέπει οπωσδήποτε να ρυθμίζονται ώστε να αποφευχθεί η πάχυνση του υμενίου μέσα στο φρέαρ. Περαιτέρω, τα παχιά υμένια μπορούν να προκαλέσουν «κόλλημα» της διατρητικής στήλης, λόγω ενός μηχανισμού που είναι γνωστός ως «διαφορικό κόλλημα» (differential sticking). Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει όταν μέρος της διατρητικής στήλης ακουμπήσει στα τοιχώματα του φρέατος και αποξύσει το υμένιο της λάσπης. Όταν σταματήσει η περιστροφή της στήλης, το μέρος της που εφάπτεται με το υμένιο, απομονώνεται από την πίεση της στήλης του ρευστού γεώτρησης και υπόκειται μόνο στην πίεση των πόρων του υμενίου. Η διαφορική πίεση που δημιουργείται με τον τρόπο αυτό μπορεί να είναι τόσο μεγάλη ώστε να εμποδίζει το ξεκόλλημα της στήλης. Το ρίσκο του κολλήματος της στήλης μπορεί να μειωθεί με τη χρήση ρευστού που δημιουργεί ένα λεπτό και ανθεκτικό υμένιο, διατηρώντας τη μικρότερη δυνατή πυκνότητα λάσπης, ώστε να μειώνεται η διαφορική πίεση και με την προσθήκη ενός λιπαντικού στη σύνθεση του ρευστού γεώτρησης, να μειώνεται η τριβή λόγω της επαφής της στήλης με το υμένιο. Το κόλλημα της

διατρητικής στήλης εμφανίζεται σπάνια όταν χρησιμοποιούνται OBM γιατί παρέχουν λεπτά υμένα και εξαιρετικές λιπαντικές ιδιότητες.

Οι καλές διηθητικές ιδιότητες του ρευστού γεώτρησης είναι απαραίτητες όταν γίνεται γεώτρηση σε μη συνεκτικούς ψαμμίτες, οι οποίοι συνεχώς αποκολλώνται λόγω διάβρωσης και εισέρχονται στο φρέαρ, εκτός κι αν δημιουργηθεί γρήγορα το υμένιο της λάσπης.

Τόσο ο ρυθμός διήθησης όσο και η «εκτίναξη λάσπης» (η αιώρηση των μικρών σωματιδίων που μπαίνουν στον σχηματισμό, όσο το υμένιο ακόμη σχηματίζεται είναι γνωστή ως mud spurt) πρέπει να ελαχιστοποιούνται σε πιθανούς παραγωγικούς σχηματισμούς, διότι η παραγωγή ενδέχεται να μειωθεί με κάποιον από τους τέσσερις ακόλουθους μηχανισμούς:

1. Η διαπερατότητα του πετρώματος του ταμιευτήρα που περιέχει αργίλους μπορεί να μειωθεί λόγω της διόγκωσής τους, όταν αυτοί έρθουν σε επαφή με το διήθημα ή λόγω διασποράς και μεταφοράς τους. Τα τεμαχίδια των στερεών που μετακινούνται με αυτό τον τρόπο συνήθως παγιδεύονται στα στόμια των καναλιών ροής και έτσι μειώνουν την διαπερατότητα του πετρώματος.
2. Η πίεση σε κάποιους ταμιευτήρες δεν είναι τόσο μεγάλη ώστε να οδηγήσει όλο το διήθημα έξω από τους πόρους του πετρώματος, όταν η γεώτρηση αρχίσει να παράγει. Το διήθημα που παραμένει στους πόρους μειώνει τον διαθέσιμο χώρο που θα ρέει το αέριο ή πετρέλαιο, οπότε προκαλεί αυτό που λέγεται φραγή (waterblock).
3. Τα μικρά τεμάχια της λάσπης, που μεταφέρονται κατά τη διάρκεια του mud spurt μπορεί να φράξουν τα κανάλια ροής.
4. Μπορεί να συμβεί ταυτόχρονη καθίζηση μεταξύ των μη αδιάλυτων αλάτων του διηθήματος και αυτών που περιέχονται στο νερό των ρωγμών του πετρώματος.

3.1.3. Υλικά υποβοήθησης στη διήθηση

Για τη ρύθμιση του ρυθμού διήθησης και την ανάπτυξη του υμενίου, προστίθενται στον πολφό διάφορα υλικά. Τα υλικά αυτά είναι ενώσεις που περιορίζουν την διαφυγή υγρού από το ρευστό της γεώτρησης στα διαπερατά πετρώματα. Τα υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι μπεντονίτης, συνθετικά πολυμερή, αμυλούχες ουσίες, λεπτυντές (thinners), αντι-συσσωρευτικά (deflocculants). Η ρύθμιση επιτυγχάνεται με τρεις τρόπους:

1. Εναποτίθεται στα τοιχώματα του φρεατίου ένα υπόστρωμα από αντι-συσσωρευτικά υλικά και δημιουργείται ένα λεπτό, λιγότερο διαπερατό στρώμα, άρα υλικά που δρουν ως αντι-συσσωρευτικά υποβοηθούν.
2. Ο ρυθμός διήθησης ελαττώνεται εάν το ιξώδες του διηθήματος είναι υψηλό, συνεπώς υλικά που αυξάνουν το ιξώδες του ρευστού (της συνεχούς φάσης) υποβοηθούν. Τέτοια υλικά είναι τα πολυμερή σχετικά υψηλού Μοριακού Βάρους.
3. Με την δημιουργία συμπιεστού υποστρώματος που συμπιέζεται, παραμορφώνεται, εισχωρεί και κλείνει τους πόρους των πετρωμάτων. Κολλοειδή όπως ο μπετονίτης και μερικά ασφαλικά παράγωγα υποβοηθούν προς αυτή την κατεύθυνση.

Προκειμένου να σχηματιστεί το υμένιο, η λάσπη γεώτρησης θα πρέπει να περιέχει στερεά σε μέγεθος ελαφρά μικρότερο από αυτό των πόρων του σχηματισμού. Τα στερεά αυτά, λεγόμενα και «γέφυρες» (bridging particles) παγιδεύονται στην επιφάνεια των πόρων ενώ τα μικρότερα από αυτά εισέρχονται βαθύτερα στον σχηματισμό. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται μια ζώνη στην επιφάνεια των πόρων που αρχίζει να παγιδεύει μικρότερα στερεά και σε λίγο χρόνο μόνο υγρό επιτρέπεται να εισέλθει στο περιβάλλον πέτρωμα. Το υγρό που εισέρχεται σταδιακά στον σχηματισμό καλείται διήθημα.

Τα ρευστά γεώτρησης πρέπει να είναι τέτοια ώστε η διαπερατότητα του υμενίου να είναι όσο το δυνατό μικρότερη, οπότε να διασφαλίζεται η σταθερότητα του φρέατος και να ελαχιστοποιείται η είσοδος ρευστών από πιθανούς παραγωγικούς σχηματισμούς. Επιπλέον, οι μεγάλες διαπερατότητες των υμενίων έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία υμενίων μεγάλου πάχους που αποφέρουν μείωση στην ενεργή διάμετρο του φρέατος και προκαλεί πληθώρα προβλημάτων, όπως υψηλές τιμές ροπής κατά την περιστροφή της στήλης, δυσκολία στην άνοδο της στήλης καθώς και απαιτήσεις για υψηλές τιμές πίεσης για τον καθαρισμό του φρέατος.

3.1.4. Τύποι διήθησης

Δύο τύποι διήθησης εμπλέκονται στις γεωτρήσεις:

1. **Στατική διήθηση:** που συμβαίνει όταν η λάσπη δεν κυκλοφορεί και το πάχος του υμενίου της λάσπης αυξάνει συνεχώς με τον χρόνο.
2. **Δυναμική διήθηση:** όταν η λάσπη κυκλοφορεί και το πάχος του υμενίου διατηρείται σταθερό λόγω της διαβρωτικής δράσης του ρέοντος ρευστού.

Οι ρυθμοί δυναμικής διήθησης είναι πολύ μεγαλύτεροι από αυτούς της στατικής και το μεγαλύτερο ποσοστό ρευστού που διηθείται στους σχηματισμούς προέρχεται από τη διήθηση σε δυναμικές συνθήκες.

Τα διηθητικά χαρακτηριστικά των ρευστών γεώτρησης μελετώνται με τις δοκιμές διήθησης κατά API (American Petroleum Institute) που είναι στατικές, διότι είναι σχετικά εύκολες και δεν απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός. Είναι όμως λιγότερο αντιπροσωπευτικές για τις συνθήκες του φρέατος, εκτός και αν οι διαφορές μεταξύ στατικής και δυναμικής διήθησης είναι συγκρίσιμες και τα αποτελέσματα ερμηνεύονται σωστά. Οι δοκιμές διήθησης δίνουν την δυνατότητα σύγκρισης διαφορετικών πολφών, συγκρίνοντας τον όγκο του διηθήματος σε σχέση με τον χρόνο.

Όταν η λάσπη γεώτρησης δεν κυκλοφορεί στο φρέαρ (στατικές συνθήκες), ο όγκος του διηθήματος και του πάχους του υμενίου αυξάνουν

ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου (δηλ. κατά μειούμενο ρυθμό). Κάτω από δυναμικές συνθήκες, το υμένιο διαβρώνεται με σταθερό ρυθμό και όταν ο ρυθμός αύξησης του πάχους του γίνει ίσος με τον ρυθμό διάβρωσης, τότε το πάχος του υμενίου καθώς και ο ρυθμός διήθησης παραμένουν σταθερά.

Η διαπερατότητα του υμενίου – το οποίο μετράται σε στατικές συνθήκες – αποτελεί καλύτερο κριτήριο από τον όγκο του διηθήματος, διότι είναι ο βασικότερος παράγοντας που ελέγχει τη στατική και τη δυναμική διήθηση αλλά είναι πολύ δυσκολότερο να μετρηθεί. Η διαπερατότητα του υμενίου εξαρτάται από την κοκκομετρία των στερεών στο ρευστό και από τις ηλεκτροχημικές συνθήκες. Το επιθυμητό είναι ένα υμένιο με πολύ χαμηλή διαπερατότητα.

Γενικά, όσο περισσότερα τα στερεά που το μέγεθός τους είναι στο εύρος των κολλοειδών, τόσο μικρότερη η διαπερατότητα του υμενίου. Η παρουσία διαλελυμένων αλάτων σε αργιλικές λάσπες γεώτρησης αυξάνει έντονα την διαπερατότητα του υμενίου λόγω της προκαλούμενης κροκίδωσης, ενώ συγκεκριμένα οργανικά κολλοειδή ενισχύουν την δημιουργία υμενίων χαμηλής διαπερατότητας, ακόμη και σε αλατούχα διαλύματα.

Οι λεπτυντές (thinners) συνήθως μειώνουν την διαπερατότητα διότι διασπείρουν τα αργιλικά συσσωματώματα σε μικρότερα μεγέθη.

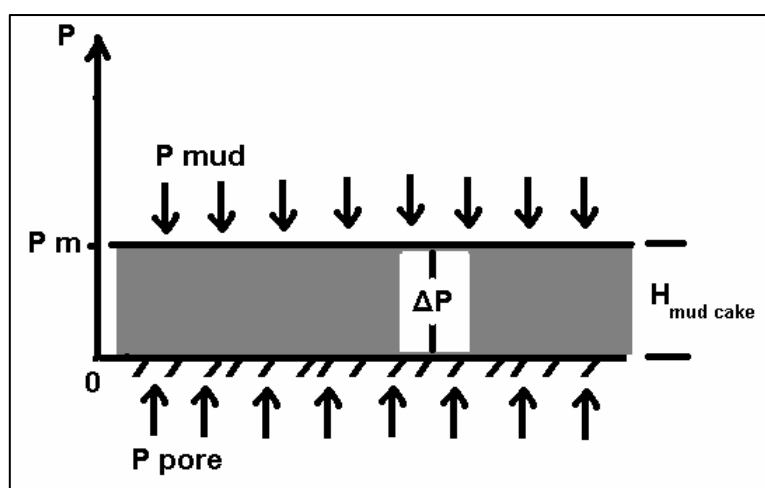
3.1.5. Χαρακτηριστικά υμενίου λάσπης

3.1.5.1. Πάχος υμενίου γεωτρητικής λάσπης

Αν και το πάχος του υμενίου είναι ζωτικός παράγοντας σε προβλήματα, αναφορικά με την ροπή της στήλης, το «κόλλημά» της και την διάμετρο του φρέατος, μικρή είναι η αναφορά που γίνεται στην βιβλιογραφία. Το πάχος σχετίζεται με την απώλεια διήθησης (απώλεια υγρού) και η σχέση αυτή ποικίλει από λάσπη σε λάσπη, καθώς εξαρτάται από την συγκέντρωση και το είδος των στερεών και από το ποσοστό του νερού στο υμένιο. Το

ποσοστό του νερού στο υμένιο λασπών διαφόρων αργίλων εξαρτάται από την ικανότητα διόγκωσης των αργιλικών ορυκτών. Ο μπεντονίτης π.χ. διογκώνεται έντονα και τα υμένια τέτοιων ρευστών γεωτρήσεων έχουν συγκριτικά μεγάλο ποσοστό νερού προς στερεά. Τονίζεται ότι το ποσοστό του νερού στο υμένιο είναι ελαφρά λιγότερο από αυτό που απορροφάται στους διογκωμένους αργίλους και είναι ανεξάρτητο από το ποσοστό των αιωρούμενων στερεών. Γενικά, το ποσοστό του νερού στο υμένιο είναι ένας καλός δείκτης για την μέτρηση της ικανότητας διόγκωσης του αργίλου. Σε μικρότερο βαθμό, το πάχος του υμενίου καθορίζεται από το μέγεθος των στερεών και την κοκκομετρία τους. Οι παράμετροι αυτές ελέγχουν το πορώδες του υμενίου και κατά συνέπεια τον όγκο της μάζας του σε σχέση με τον όγκο των στερεών.

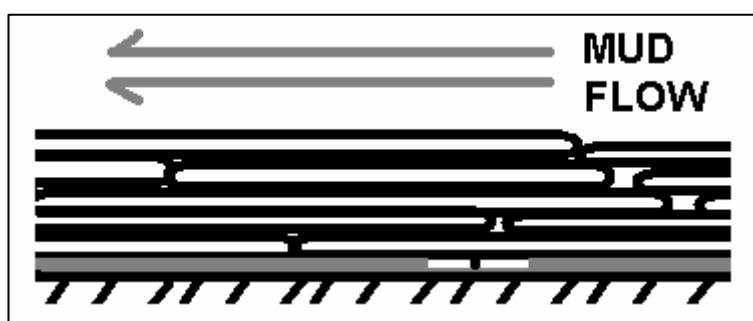
Το πάχος του υμενίου είναι δύσκολο να μετρηθεί με ακρίβεια κυρίως διότι δεν είναι καθορισμένο το όριο μεταξύ της επιφάνειας του ρευστού και της επιφάνειας του υμενίου (διεπιφάνεια). Το πρόβλημα εντείνεται όταν το υμένιο συμπιέζεται λόγω της υδραυλικής έλξης που προκαλεί το διήθημα που ρέει μέσω των πόρων του. Η υδραυλική έλξη μεγαλώνει με το βάθος κάτω από την επιφάνεια του υμενίου και η πίεση σε μεμονωμένο πόρο ελαττώνεται, από τις τιμές της πίεσης της λάσπης γεώτρησης στην επιφάνεια του υμενίου μέχρι που μηδενίζεται στον πυθμένα του (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1. Παράσταση μεταβολής πίεσης στο υμένιο.

3.1.5.2. Διαπερατότητα του υμενίου

Η διαπερατότητα του υμενίου επηρεάζεται από το είδος των κολλοειδών καθώς και από το ποσοστό και το μέγεθος των στερεών. Για παράδειγμα, τα υμένια με αιωρήματα μπεντονίτη σε νερό έχουν ιδιαίτερα χαμηλές διαπερατότητες λόγω των επιπέδων των φυλλαρίων της αργίλου, που επιτρέπει να δομούνται ομοιόμορφα και πυκνά προς την κατεύθυνση της ροής (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2. Αναπαράσταση φυλλαρίων μπεντονίτη

Τα οργανικά μακρομόρια, όπως το άμυλο, οφείλουν την αποτελεσματικότητά τους τόσο στην ικανότητα παραμόρφωσης των υδρολυτικών κυττάρων του όσο και στο μικρό του μέγεθος. Οι πολυ – ηλεκτρολύτες όπως το CMC (Carboxyl Methyl Cellulose), απορροφούνται μερικώς από τα αργιλικά στερεά και παγιδεύονται μερικώς στους πόρους και εμποδίζουν την ροή του διηθήματος.

Η κροκίδωση των αργιλικών ορυκτών προκαλεί στα στερεά να δημιουργούν ένα χαλαρό, ανοικτό δίκτυο. Αυτή η δομή συντηρείται (μέχρι ενός ορίου) στην επιφάνεια των υμενίων, προκαλώντας σημαντική αύξηση στην διαπερατότητα. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά πίεσης στη διήθηση, τόσο αυτή η δομή γίνεται πιο επίπεδη οπότε το πορώδες και η διαπερατότητα μειώνονται. Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός κροκίδωσης, τόσο αυξάνουν οι δυνάμεις έλξης μεταξύ των μορίων των στερεών και κατ' επέκταση τόσο ισχυρότερη η δομή και μεγαλύτερη η αντίστασή της στην

πίεση. Η δομή γίνεται ακόμη ισχυρότερη αν η κροκίδωση συνοδεύεται από συσσωμάτωση, γιατί έτσι δομούνται πυκνότερα στρώματα αργιλικών φυλλαρίων.

Αντίθετα, οι αποκροκίδωση της λάσπης γεώτρησης, με την προσθήκη ενός λεπτυντή (thinner) μειώνει την διαπερατότητα. Επιπλέον οι περισσότεροι thinners είναι άλατα Na και τα ιόντα Na⁺ μπορούν να αντικαταστήσουν τα πολυσθενή κατιόντα της βάσης του αργίλου και να διασπείρουν τα αργιλικά συσσωματώματα, μειώνοντας έτσι την διαπερατότητα του υμενίου.

Οι ηλεκτροχημικές συνθήκες που ενεργούν στο ρευστό γεώτρησης είναι σημαντικές για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας του υμενίου. Γενικά, μπορεί να λεχθεί ότι η διαπερατότητα των υμενίων κροκιδωμένων ρευστών γεωτρήσεων με βάση το νερό είναι της τάξης των $10^{-2} - 10^{-3}$ md και αυτών που περιέχουν thinners, στα 10^{-4} md.

3.1.6. Τρόποι ρύθμισης της διήθησης

- **Περιορισμός του χρόνου έκθεσης του φρέατος**

Το διήθημα της λάσπης αυξάνει με τον χρόνο. Για το λόγο αυτό, ο ρυθμός διάτρησης πρέπει να είναι ο μέγιστος δυνατός, χωρίς να αντιβαίνει στον καθαρισμό του φρέατος. Οι χρόνοι εισαγωγής – εξαγωγής της διατρητικής στήλης πρέπει να είναι μικροί, χωρίς να προκαλούν απότομες αυξήσεις στις πιέσεις.

- **Έλεγχος της απώλειας υγρού του ρευστού**

Το ποσοστό του διηθήματος που χάνεται είναι συνάρτηση των διηθητικών χαρακτηριστικών του ρευστού. Δύο είναι οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη: πρώτον, να μην επιτρέπεται η απότομη απώλεια υγρού και δεύτερον, να εξασφαλίζεται ότι το υμένιο της λάσπης παραμένει λεπτό (οπότε και λιγότερο διαβλητό στη φθορά). Η προσθήκη συγκεκριμένης κοκκομετρίας στερεών (γέφυρες στερεών) είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί προκειμένου η απώλεια υγρού να μειωθεί σε αποδεκτά επίπεδα.

- **Έλεγχος της υδραυλικής του ρευστού**

Οι υψηλοί ρυθμοί κυκλοφορίας θα φθείρουν το υμένιο της λάσπης, οπότε θα αυξήσουν και τον ρυθμό της απώλειας του διηθήματος. Σε αυτή την περίπτωση, δεν συνιστάται μέγιστος ρυθμός άντλησης του ρευστού, αλλά να διατηρείται μια ισορροπία ώστε να γίνεται καλός καθαρισμός της στήλης.

- **Χρήση συμβατού ρευστού γεώτρησης**

Κατά την δημιουργία του ρευστού γεώτρησης, φροντίζουμε να μην υπάρχουν ανεπιθύμητες αντιδράσεις μεταξύ του διηθήματος και των ρευστών των γεωλογικών σχηματισμών. Γίνεται εκτίμηση της πιθανότητας το διήθημα να είναι επιβλαβές και αποτιμάται η ασυμβατότητά του με τα ρευστά και τα πετρώματα των σχηματισμών. Στην περίπτωση λάθους, το ρευστό γεώτρησης πρέπει να επανασχεδιαστεί. Αποφεύγεται η χρήση WBM (λάσπη με βάση το νερό, Water Based Mud) όταν υπάρχει άργιλος στο μητρικό πέτρωμα του ταμιευτήρα ή γίνεται χρήση κατάλληλων προσθέτων. Το διήθημα του WBM θα προκαλούσε την μετακίνηση και διόγκωση των αργίλων με συνέπεια το φράξιμο των πόρων. Ιόντα K^+ είναι ιδιαίτερα αποδοτικά για την ρύθμιση αυτού του προβλήματος.

3.2. Ανάλυση της ιδιότητας της θιξοτροπίας

Η αυξανόμενη χρήση των αργιλικών υλικών μαζί με την αυξανόμενη παρουσία κροκιδωτικών μέσων στα οικιακά και βιομηχανικά προϊόντα, έχει συμβάλλει στην συνεχή έρευνα για την κατανόηση της έννοιας θιξοτροπίας. Προβλήματα προκύπτουν από την ανάμιξη και χρήση τέτοιων υλικών γιατί οι θιξοτροπικές δομές αποδομούνται σταδιακά με την διάτμηση και αναδομούνται όταν ηρεμούν. Ο χρόνος αυτός ποικίλλει από κάποια λεπτά στην αποδόμηση μέχρι μερικές ώρες στην αναδόμηση.

Η θιξοτροπία υπάρχει στα υλικά, ώστε αυτά να γίνονται εύχρηστα από μη ειδικευμένους χρήστες, με καλύτερο το παράδειγμα της μπογιάς. Παρ' όλα αυτά, η εισαγωγή της έννοιας της θιξοτροπίας είναι συνήθως ανεπιθύμητη

και πολλές φορές αγνοείται λόγω της μικρού βαθμού κατανόησης και της μη επιστημονικής αντιμετώπισης του φαινομένου. Πρέπει όμως το φαινόμενο να γίνει κατανοητό, για το λόγο αυτό γίνεται μια αναδρομή (Barnes, 1997).

3.2.1. Ιστορικό της Θιξοτροπίας

Το 1923 οι Schalek & Szegvari [Barnes (1997)], ανακάλυψαν ότι τα διαλύματα FeO_2 , που είναι σε μορφή πηκτώματος (gel) έχουν την ικανότητα να γίνονται τελείως υγρά αν αναδευτούν, σε τέτοιο ποσοστό που είναι δύσκολο να διακριθεί το υδροποιημένο gel από την αρχική κολλοειδή του κατάσταση. Τα κολλοειδή συστήματα ρευστοποιούνται με ανάδευση και πήζουν (δημιουργούν γέλη) ξανά μετά από παρέλευση χρόνου. Η διαδικασία αυτή μπορεί να επαναληφθεί αρκετές φορές χωρίς κάποια οπτική αλλαγή στο σύστημα.

Ο όρος «θιξοτροπία» χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά από τον Peterfi το 1929, στο πρώτο του άρθρο που περιέγραφε σωστά το φαινόμενο. Η λέξη θιξοτροπία προέρχεται από τις ελληνικές «θίξις» (ανάδευση) και «τρέπω» (αλλαγή). Το 1935 ο Freundlich εξέδωσε βιβλίο με τίτλο «Thixotropie» αφιερωμένο σε αυτό το θέμα, όντας ο πρώτος που ασχολήθηκε με την έννοια αυτή μελετώντας αιωρήματα Al_2O_3 . Μαζί με τους συνεργάτες του, ανακάλυψαν τις επιπτώσεις της θιξοτροπίας σε πλήθος συστημάτων (κολλοειδή V_2O_5), χυλούς αμύλου, πηκτώματα ζελατίνης κ.ά. Η θιξοτροπία αναφερόταν στις αντιστρεπτές μεταβολές από ένα ρέον ρευστό σε ένα στερεού τύπου ελαστικό gel. Προηγούμενα, οι μεταβολές αυτές είχαν παρατηρηθεί με την αλλαγή της θερμοκρασίας, όπου τέτοια gel λιώνουν με την θέρμανση και στερεοποιούνται με την ψύξη.

3.2.2. Πρόοδος της έρευνας

Σύμφωνα με τον Barnes (1997), ο McMillen (1932) δημοσίευσε τις διδακτορικές του μελέτες για την θιξοτροπία μεγάλου αριθμού κροκιδωμένων μπογιών. Έδειξε ότι η ρευστότητα (αντίστροφο του ιξώδους) ως δείκτης του

χρόνου ηρεμίας, μειώνεται σε κάποιες περιπτώσεις, με τέσσερις κανόνες σπουδαιότητας, δείχνοντας σχεδόν μια τετραγωνική εξάρτηση από τον χρόνο ηρεμίας.

Από το 1942 έως το 1949 ο Scott – Blair [Barnes (1997)] εξέδωσε σειρά άρθρων για θιξοτροπικά υλικά όπως οι άργιλοι και τα αιωρήματα εδαφών, οι κρέμες, τα ρευστά γεώτρησης, οι μπογιές, τα αιωρήματα γαιανθράκων και οι πολφοί αμύλων. Επίσης, κάνει εισαγωγή στα θιξοτρόμετρα, συσκευές που μπορούν να χαρακτηρίσουν το φαινόμενο. Με το έργο του έθεσε σημαντικά ερωτήματα, ένα εκ των οποίων είναι αν η θιξοτροπία πρέπει να μελετάται σε σταθερό ρυθμό διάτμησης ή σε σταθερή διατμητική τάση. Αυτό το ερώτημα παραμένει ακόμη αναπάντητο.

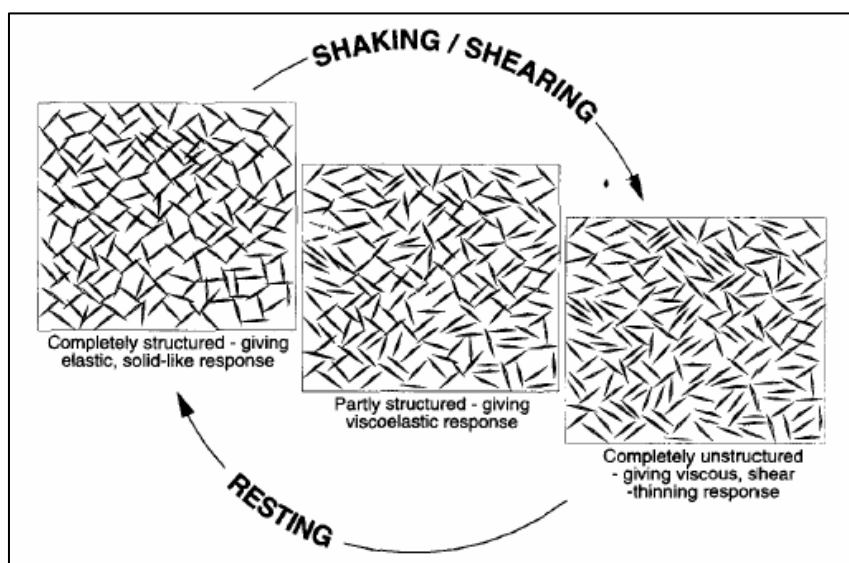
Ο Scott – Blair επαναλαμβάνει την εξήγηση που δίνει ο Hamaker για την θιξοτροπία: «τα στερεά μπορούν να δημιουργήσουν μια χαλαρή σχέση μεταξύ τους, η οποία μπορεί εύκολα να διαλυθεί με ανακίνηση και να επανασυσταθεί κατά την ηρεμία». Αυτή είναι και η επικρατούσα άποψη.

Με τη σημερινή γνώση που έχουμε για τις μεταβολές που συμβαίνουν στις μικροδομές των υλικών, είναι μάλλον ασφαλές να πούμε ότι όλα τα ρευστά στα οποία το ιξώδες μειώνεται με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης (shear – thinning) είναι και θιξοτροπικά, οπότε χρειάζονται ένα πεπερασμένο χρόνο ώστε να προκληθούν οι απαιτούμενες διαδικασίες στην μικροδομή τους, οι οποίες θα οδηγήσουν στην shear – thinning συμπεριφορά.

Όπως διαπίστωσε ο Scott – Blair, αν ο χρόνος αυτός είναι μικρός, το φαινόμενο που παρατηρείται χαρακτηρίζεται ως «θεμελιώδες» ιξώδες. Αν ο χρόνος αυτός είναι μεγάλος, τότε μιλάμε για θιξοτροπία. Αρκετές φορές, βέβαια, και ο ίδιος μπέρδευε τη θιξοτροπία με την shear – thinning συμπεριφορά καθώς σε παράδειγμά του για την σπουδαιότητα της θιξοτροπίας στα ρευστά γεώτρησης τα οποία πρέπει να ρέουν εύκολα για να λιπαίνουν το κοπτικό άκρο, αναφέρει ότι παράλληλα πρέπει να φέρουν υψηλή αντίσταση κατά την ηρεμία ώστε να αποφεύγεται η καθίζηση των στερεών.

Ο Pryce – Jones (Barnes, 1997) μελέτησε 250 μπογιές, όλες σε κατάσταση ελαφριάς κροκίδωσης, χρησιμοποιώντας το δικό του

θιξοτρόμετρο. Παρατήρησε ότι η θιξοτροπία εμφανίζεται πιο έντονα σε συστήματα ρευστών που περιέχουν μη σφαιρικά στερεά σωματίδια. Αυτό είναι λογικό μιας και τα στερεά τείνουν να οργανωθούν (σε τρισδιάστατη μορφή) με ανάδευση και διάτμηση, από ένα στερεό gel σε ένα ελεύθερης ροής ρευστό λόγω της αποδόμησης της μικροδομής τους και επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση με ηρεμία (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3. Διαδικασία αποδόμησης – αναδόμησης μιας τρισδιάστατης θιξοτροπικής δομής (Barnes, 1997).

Η θιξοτροπία είναι ένας από τους γνήσιους τεχνικούς όρους που χρησιμοποιήθηκαν προπολεμικά, σε αντίθεση με τον όρο «θεμελιώδεις» ιδιότητες (που τώρα είναι γνωστό ως shear – thinning) και του όρου «ψευδοσώμα» (false body, που είναι το ακραίο shear – thinning μαζί με θιξοτροπία), οι οποίοι έχουν παραμεριστεί.

Ο Roscoe το 1953 αναφέρθηκε στο «ψευδοσώμα» ως κάτι διαφορετικό από την θιξοτροπία. Το «ψευδοσώμα» έχει μια φαινομενική τάση διολίσθησης (τάση σε πολύ χαμηλό ρυθμό διάτμησης που ακολουθείται από διατμητική τάση σε υψηλό ρυθμό διάτμησης) που επανέρχεται γρήγορα, ενώ τα θιξοτροπικά υλικά υστερούν χρονικά να έρθουν σε κατάσταση γρήγορης

επαναφοράς. Σήμερα είναι αποδεκτό ότι και τα δύο είναι εκφάνσεις της θιξοτροπίας.

Οι Jobling & Roberts (1957) αναφέρουν ότι η θιξοτροπία έχει πλέον διακριτή ερμηνεία. Ηλεκτρονικές μέθοδοι μέτρησης έδειξαν ότι ο χρόνος που απαιτείται ώστε να επανακτηθεί η αρχική δομή μπορεί να είναι πολύ μικρός και γίνεται πλέον δύσκολο να διακριθεί ένα θιξοτροπικό σύστημα με μεγάλο χρόνο επαναδόμησης από ένα σύστημα του οποίου το ιξώδες μειώνεται με την αύξηση του ρυθμού διάτμησης και εξαρτάται μόνο από τον στιγμιαίο ρυθμό διάτμησης. Το τελευταίο καλείται συχνά ως «θεμελιώδες» ιξώδες.

Η πληρέστερη ανάλυση της θιξοτροπίας έγινε από τους Bauer & Collins το 1967: «Όταν συμβαίνει μείωση του μεγέθους των ρεολογικών ιδιοτήτων ενός συστήματος, όπως η ελαστική συμπεριφορά, η τάση διολίσθησης, το ιξώδες, η μείωση αυτή συμβαίνει αντίστροφα και ισοθερμικά μέσα σε διακριτό χρόνο, που εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη διατμητική τάση και τότε το σύστημα καλείται θιξοτροπικό». Μεταγενέστερα, οι δύο ερευνητές θεώρησαν ότι η θιξοτροπία είναι μια ασυνήθιστη ιδιότητα συγκεκριμένων υλικών, συστημάτων sol – gel όπως υδατικά διαλύματα FeO. Παράλληλα με την αποδόμηση στη δομή του συστήματος, υπάρχουν αλλαγές και σε μη ρεολογικές ιδιότητες όπως η αγωγιμότητα και η διηλεκτρική σταθερά.

3.2.3. Πως είναι κατανοητή η έννοια της θιξοτροπίας

Ο Barnes (1997) αναφέρει ότι μια από τις πρώτες ερμηνείες της θιξοτροπίας δόθηκε από τους Freundlich & Rawitzer (1935), οι οποίοι δήλωσαν ότι: «Η θιξοτροπία ερμηνεύεται ως το φαινόμενο των συστημάτων sol – gel, τα οποία στερεοποιούνται σε gel και μπορούν πάλι να μετατραπούν σε ρευστά. Η επαναστερεοποίηση συμβαίνει συνεχώς σε συνθήκες σταθερής θερμοκρασίας και με σταθερή ταχύτητα» (η ερμηνεία αυτή απέχει πολύ από την σημερινή).

Παρ' όλα αυτά, με νεότερη μελέτη του ο Pryce – Jones (1945) μίλησε για την πραγματική έννοια της θιξοτροπίας, η οποία είναι: «Η αύξηση του

ιξώδους σε κατάσταση ηρεμίας και η μείωσή του όταν στο σύστημα εφαρμόζεται σταθερή διατμητική τάση».

Αυτές είναι οι δύο επικρατέστερες ερμηνείες της θιξοτροπίας, που έχουν δημιουργήσει δύο διαφορετικές «σχολές». Όταν οι σημερινοί ερευνητές αναφέρονται στη θιξοτροπία, εννοούν δύο πράγματα (Barnes, 1997):

1. Αυτοί που δέχονται την ερμηνεία του Pryce – Jones, όπου οι υποστηρικτές της καταλαβαίνουν την χρονική επίδραση στη μικροδομή του συστήματος, ως αποτέλεσμα της διάτμησης ή της ηρεμίας καθώς και των συνεπειών που ακολουθούν στις ρεολογικές του ιδιότητες. Στην συγκεκριμένη άποψη, η έννοια της θιξοτροπίας έχει στενά όρια στις αλλαγές του ιξώδους, χωρίς αναφορές στην αντιστρεπτή μετάβαση από τη φάση gel στην υγρή φάση.
2. Η δεύτερη ερμηνεία – υποστηρίζεται στην βιομηχανία κυρίως – όπου η θιξοτροπία έχει την έννοια που έδωσαν οι Freundlich & Rawitzer, όπου οι ιδιότητες της φάσης gel εξαφανίζονται με την ανάδευση και την μετάβαση στην υγρή φάση και εμφανίζονται πάλι όταν το σύστημα ηρεμεί. Η συγκεκριμένη λοιπόν ιδιότητα έχει πρακτική εφαρμογή σε υλικά όπως οι μπογιές, οι κόλλες, τα σιρόπια.

Λόγω αυτής της ιδιότροπης κατανόησης της θιξοτροπίας, υπάρχει αρκετή δυσκολία στην εύρεση κοινής γλώσσας συνεννόησης στην παγκόσμια βιβλιογραφία. Για το λόγο αυτό υπάρχουν μάλιστα και ποικίλες ερμηνείες στα επιστημονικά λεξικά και τις εγκυκλοπαίδειες, που αντικατοπτρίζουν ακριβώς τις δύο αυτές απόψεις:

- *Oxford Encyclopedic Dictionary of Physics (1962)*:
Θιξοτροπία: κάποια υλικά συμπεριφέρονται ως στερεά κάτω από πολύ μικρές εφαρμοζόμενες τάσεις αλλά στην εφαρμογή μεγάλων τάσεων συμπεριφέρονται ως υγρά. Όταν οι τάσεις παύουν, τότε το υλικό επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση. Η ιδιότητα αυτή συναντάται κυρίως σε κολλοειδή συστήματα τα οποία σχηματίζουν gel όταν είναι σε

ηρεμία και γίνονται διαλύματα αιωρημάτων (sol) όταν ανακινηθούν ή αναδευτούν, λόγω της αναδιανομής της στερεάς φάσης.

- *Chamber Dictionary of Science and Technology (1971):*

Οι ρεολογικές ιδιότητες των ρευστών και των πλαστικών στερεών που χαρακτηρίζονται από υψηλό ιξώδες σε χαμηλή διατμητική τάση, αλλά μικρό ιξώδες όταν η τάση αυτή αυξάνει. Μια χρήσιμη ιδιότητα των μπογιών.

- *McGraw – Hill Dictionary and Technical Terms (1989):*

Ιδιότητα κάποιων gel που υδροποιούνται όταν υπόκεινται σε δονούμενες δυνάμεις, όπως υπέρηχους ή όταν αναδεύονται και μετά στερεοποιούνται ξανά όταν αφήνονται να ηρεμήσουν. Θιξοτροπική άργιλος: άργιλος που ασθενεί όταν διαταράσσεται και πηκτώνει όταν ακινητοποιείται.

- *Van Nostrand' s Scientific Encyclopedia (1976):*

Ένα θιξοτροπικό ρευστό είναι αυτό του οποίου το ιξώδες είναι παράγοντας εξαρτώμενος τόσο από την διατμητική τάση όσο και από το πρότερο ιστορικό της κίνησής του. Το ιξώδες συνήθως μειώνεται όσο ο χρόνος που το ρευστό κινείται αυξάνει. Τέτοια είναι συστήματα αιωρημάτων, ουσιών με μεγάλο Μοριακό Βάρος ή κολλοειδή αιωρήματα.

- *Chambers 20th Century Dictionary(1993):*

Θιξοτροπία: η ιδιότητα των gel όπου εμφανίζεται προσωρινή μείωση του ιξώδους κατά την ανάδευση ή ανακίνηση.

Υπάρχουν και ορισμοί που δίνονται σε ειδικευμένα λεξικά και τονίζουν τον χρονικό παράγοντα, όπως:

- *Polymer Technology Dictionary (1994):*

Θιξοτροπία: όρος που χρησιμοποιείται στη ρεολογία και σημαίνει τη μείωση του ιξώδους ενός υλικού σε σχέση με τον χρόνο διάτμησης και την αύξησή του όταν η τάση απομακρύνεται.

- *Polymer Science Dictionary (1990):*

Συμπεριφορά του ρευστού που είναι χρονικά εξαρτώμενη, όπου το φαινόμενο ιξώδες μειώνεται με τον χρόνο διάτμησης και επανέρχεται στην αρχική του ρεολογία όταν η τάση παύει να εφαρμόζεται. Η επαναφορά ενδέχεται να διαρκέσει μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό συμβαίνει στα πολυμερή, όπου ο μοριακός διαχωρισμός αυξάνει με τον χρόνο διάτμησης.

Ο ορισμός της θιξοτροπίας έχει αλλάξει μέσα στα χρόνια. Ενώ οι περισσότεροι ερευνητές δέχονται μια γενική ερμηνεία της θιξοτροπίας που περιλαμβάνει όλες της επιπτώσεις που προκαλούνται από τις αλλαγές στη μικροδομή, εντούτοις η παλιότερη ιδέα του sol – gel συστήματος κατά την διαδικασία ανάδευση – ηρεμία, παραμένει ελκυστική. Αν θέλουμε να είμαστε ακριβείς, η θιξοτροπία σε τούτη την περίπτωση ορίζεται ως ακραίο shear – thinning (extreme shear – thinning) ώστε να μπορεί να αποδώσει ιδιότητες του στερεού στην ηρεμία και ροής κατά την διάτμηση, όπως για παράδειγμα, την προσθήκη των αποκαλούμενων θιξοτρόπων ουσιών στις μπογιές.

Από τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι χρειάζεται ένας καλύτερος και πιο ακριβής ορισμός της θιξοτροπίας, που θα περιέχει τόσο την έννοια της έντονης shear – thinning συμπεριφοράς όσο και των χρονικών αλλαγών που εμφανίζονται όταν στη δομική του μορφή το θιξοτροπικό υλικό ενδέχεται να είναι ιξωδοελαστικό σε σχέση με τον χρόνο.

3.2.4. Περιγραφή του φαινομένου της θιξοτροπίας

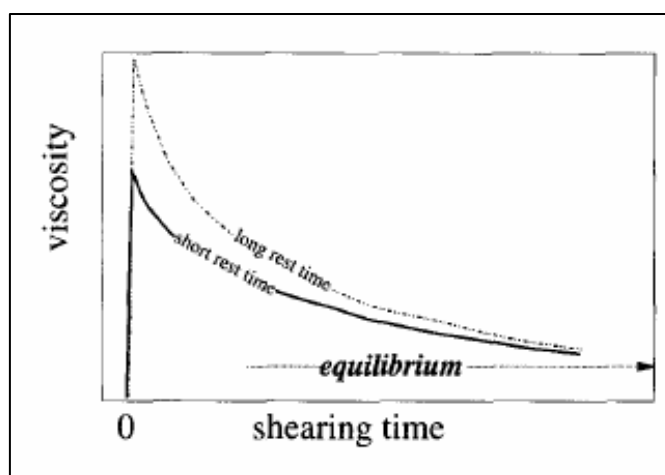
Όλα τα υγρά με μικροδομή μπορούν να εμφανίσουν θιξοτροπία διότι η θιξοτροπία αντικατοπτρίζει τον χρόνο που χρειάζεται ώστε η δομή να αλλάξει φάση από μια αρχική σε μια τελική και ξανά πίσω, ανεξάρτητα αν αυτό γίνεται σε διαφορετικά είδη κίνησης ή από ή προς την ηρεμία. Η δύναμη που καθοδηγεί τις αλλαγές στη δομή του συστήματος είναι αποτέλεσμα της αποδόμησης λόγω των διατμητικών τάσεων και της αντίθετης δόμησης που συμβαίνει λόγω των εσωτερικών συγκρούσεων των μορίων λόγω της ροής καθώς και της κίνησης Brown. Η κίνηση Brown είναι η τυχαία ανάδευση (εν θερμώ) των ατόμων και των μορίων που έχει ως συνέπεια τα στοιχεία της μικροδομής να δείχνουν βομβαρδισμένα και που προκαλεί την τυχαία κίνησή τους και την ένωσή τους με άλλα μόρια της δομής.

Ο όρος μικροδομή συνήθως χρησιμοποιείται για να περιγράψει συστήματα με κροκιδωμένα σωματίδια, μπορεί όμως να περιγράψει και ινώδεις ευθυγραμμισμένες δομές (μοριακές δομές σε διαλύματα πολυμερών). Με τον τρόπο αυτό καθορίζονται τα επίπεδα του ιξώδους και της ελαστικότητας και οι μεταβολές αυτές θέλουν χρόνο για να μεταβούν από μια κατάσταση σε μια άλλη, κάτω από την δράση της διάτμησης ή/και της κίνησης Brown. Σε αυτές τις περιπτώσεις η μέγιστη μικροδομή εμφανίζεται όταν η ευθυγράμμιση και η μερική κατανομή είναι τυχαία φαινόμενα και η πυκνότητα γίνεται μέγιστη.

3.2.5. Τυπική συμπεριφορά θιξοτροπικών υλικών

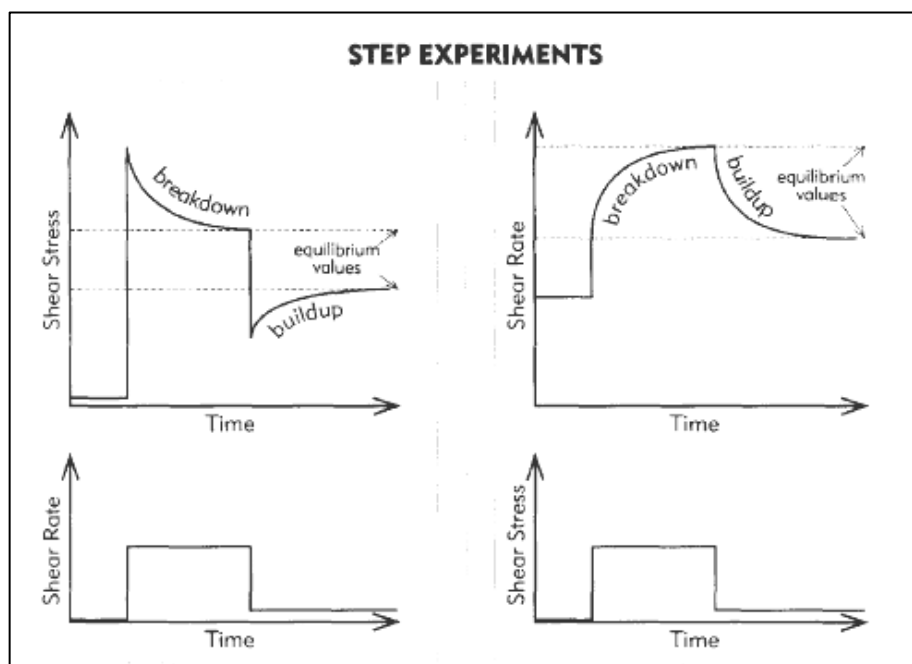
Αν τοποθετήσουμε ένα θιξοτροπικό υλικό σε ένα ιξωδόμετρο και εφαρμόσουμε σταθερό ρυθμό διάτμησης, το μετρούμενο ιξώδες θα μειωθεί με τον χρόνο, μέχρι να σταθεροποιηθεί σε μια τιμή (Σχήμα 3.4). Αν τώρα αφήσουμε το υλικό να ηρεμήσει για αρκετό χρονικό διάστημα και μετά το υποβάλλουμε σε διάτμηση ξανά, το μετρούμενο ιξώδες θα είναι αρχικά υψηλότερο αλλά σταδιακά θα πέσει στην τιμή που σταθεροποιήθηκε στο πρώτο πείραμα. Βέβαια, η αρχική τιμή δεν θα είναι απαραίτητα η ίδια, γιατί

κάτι τέτοιο εξαρτάται από το πόσο προσεκτικά τοποθετήθηκε το ρευστό στο ιξωδόμετρο και για πόσο χρόνο αφέθηκε να ηρεμήσει. Αν επαναλάβουμε το πρώτο πείραμα και το υλικό φτάσει στην τελική τιμή του ιξώδους, το όργανο θα μετρήσει την ίδια τιμή με αυτή του πρώτου πειράματος. Αν μετά την σταθεροποίηση του ιξώδους αρχίζουμε να μειώνουμε σταθερά το ρυθμό διάτμησης, η διατμητική τάση μειώνεται συνεχώς αλλά από ένα σημείο και μετά θα αρχίσει να ανεβαίνει λόγω της σταθεροποίησης του ιξώδους σε μια διαφορετική τιμή.



Σχήμα 3.4. Δοκιμή διάτμησης θιξοτροπικού υλικού με μικρό και μεγάλο χρόνο ηρεμίας (Barnes, 1997).

Στην περίπτωση που αντί του σταθερού ρυθμού διάτμησης εφαρμόζαμε σταθερή διατμητική τάση, θα είχαμε τα αντίθετα αποτελέσματα. Ο ρυθμός διάτμησης θα ανεβαίνει καθώς η δομή του ρευστού «καταρρέει» και η μετάβαση σε μικρότερη διατμητική τάση θα είχε σαν αποτέλεσμα σε μια ξαφνική και συνεχή πτώση του ρυθμού διάτμησης (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.5. Πειράματα αύξησης τάσης διάτμησης και ρυθμού διάτμησης σε βήματα (Barnes, 1997).

3.2.6. Ιξωδοελαστικότητα και θιξοτροπία

Όταν ιξωδοελαστικά υλικά υπόκεινται σε διάτμηση στη γραμμική περιοχή, δείχνουν εξάρτηση από τον χρόνο, γιατί η μικροδομή θέλει χρόνο για να αποκριθεί στη νέα κατάσταση ροής/τάσης. Σε μικρούς χρόνους οι δομές δεν μπορούν να ανταποκριθούν γρήγορα και δείχνουν ελαστική συμπεριφορά, ενώ σε μεγάλους χρόνους, το σύστημα μπορεί συνεχώς να προσαρμόζεται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες, π.χ. μπορεί να ρέει, δείχνοντας τις επιπτώσεις του ιξώδους. Για το λόγο αυτό, όποτε παρατηρείται το φαινόμενο – ανεξάρτητα από τη διάρκεια του χρόνου – το σύστημα είναι ιξωδοελαστικό. Για μη γραμμικά ιξωδοελαστικά υλικά - ή απλά ανελαστικά αλλά με shear – thinning συμπεριφορά – η δομή αργεί να ανταποκριθεί στη ροή, ενώ παράλληλα αλλάζει και η ίδια η δομή και αυτή η αλλαγή απαιτεί κάποιο χρονικό διάστημα. Αυτή είναι και η ουσιαστική διαφορά μεταξύ της γραμμικής ιξωδοελαστικότητας και της θιξοτροπίας. Ενώ και οι δύο ιδιότητες είναι εξαρτώμενες από τον χρόνο, η πρώτη είναι μόνο στη γραμμική περιοχή,

όπου η δομή του υλικού αποκρίνεται στην μετάβαση χωρίς να μεταβάλλεται η ίδια. Η δεύτερη ιδιότητα παρατηρείται σε μη γραμμικές περιοχές όπου η δομή «καταρρέει» καθώς προσπαθεί να προσαρμοστεί στην νέα κατάσταση.

Η συμπεριφορά shear – thinning μπορεί να υπάρχει λόγω:

1. Της ευθυγράμμισης των πεπλατυσμένων σωματιδίων, προς την κατεύθυνση της ροής,
2. Της απώλειας των δεσμών στα αιωρήματα πολυμερών,
3. Της αναδιανομής της μικροδομής σε συνθήκες αιώρησης και
4. Της καταστροφής των κροκιδωτικών μαζών

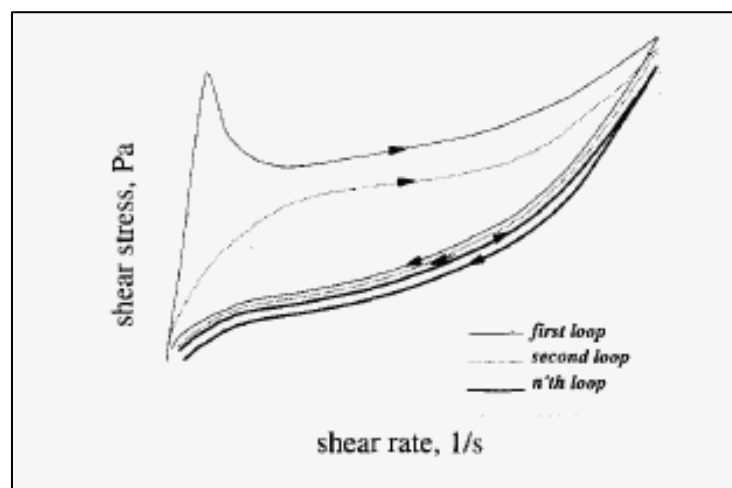
Μιας και απαιτείται αρκετός χρόνος για να επέλθει κάποια από αυτές τις αλλαγές, η θιξοτροπία είναι πάντοτε αναμενόμενο να προκύψει από κάθε μηχανισμό που εμφανίζει συμπεριφορά shear – thinning. Η θιξοτροπία γίνεται ακόμη πιο έντονη όταν η κλίμακα του χρόνου μέσα στον οποίο εμφανίζεται το φαινόμενο μεγαλώσει τόσο ώστε να υπερκεράσει το χρόνο που χρειάζονται τα μετρητικά όργανα (ιξωδόμετρα) για να μετρήσουν την αλλαγή στη ρεολογία ή γίνει μεγαλύτερος από τον χρόνο ροής σε μια διαδικασία, π.χ. ο μέσος χρόνος που χρειάζεται ένα υγρό να διέλθει μέσω σωλήνα.

Οι θιξοτροπικές χρονικές κλίμακες μπορεί να είναι μεγαλύτερες από τις ιξωδοελαστικές και είναι ιδιαίτερα σημαντικές όταν χρειάζονται μόνο λίγα λεπτά για να επέλθει η αποδόμηση της δομής του υλικού. Αυτό σημαίνει, βέβαια, ότι θα χρειαστούν έως και μερικές ώρες προκειμένου να μπορέσει η δομή να επανέλθει στην αρχική της κατάσταση.

3.2.7. Τυπικά πειράματα θιξοτροπίας – Πειράματα υστέρησης

Μια από τις κύριες μεθόδους ανίχνευσης της θιξοτροπίας είναι η εκτέλεση κυκλικής δοκιμής: γραμμική αύξηση του ρυθμού διάτμησης από το μηδέν σε μια μέγιστη επιλεγόμενη τιμή και επαναφορά του ρυθμού διάτμησης

στην μηδενική τιμή. Το τεστ αυτό μπορεί να επαναλαμβάνεται μέχρι να παραχθεί ένα σταθερό διάγραμμα συμπεριφοράς (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6. Τυπικό πείραμα υστέρησης (Barnes, 1997)

Η περιοχή μεταξύ της άνω και κάτω καμπύλης του Σχήματος 3.6 μετράται και το αποτέλεσμα αντικατοπτρίζει την θιξοτροπία του υλικού.

Κάθε πείραμα που ξεκινά από ηρεμία θεωρείται ως ένα διαφορετικό πείραμα. Η τυπική συμπεριφορά ενός θιξοτροπικού υλικού φαίνεται στο Σχήμα 3.6. Αν όχι όλα, πάντως τα περισσότερα θιξοτροπικά υλικά που έχουν βρεθεί σε κατάσταση ηρεμίας, παρουσιάζουν ιξωδοελαστική συμπεριφορά, οπότε η πρώτη παρατήρηση σε τέτοια πειράματα είναι η ελαστικότητα και κατόπιν – αναλόγως των συνθηκών – η θιξοτροπία. Αυτό συνήθως συμβαίνει όταν η τάση διάτμησης ξεπεράσει μια οριακή τιμή. Αυτή όμως η αρχική ελαστική συμπεριφορά που συνοδεύεται από θιξοτροπική συμπεριφορά είναι που κάνει τα πράγματα ιδιαίτερα πολύπλοκα.

Η μεγαλύτερη δυσκολία στην κατανόηση και μοντελοποίηση των θιξοτροπικών υλικών οφείλεται στην έλλειψη γνώσης του ιστορικού αποδόμησης των εν λόγω υλικών. Το υλικό δηλαδή έχει «μνήμη» για τις πρότερες καταπονήσεις του, είτε αυτές είναι αποτέλεσμα ανάμιξης ή άντλησης, ή απλά τοποθέτησης στο ιξωδόμετρο.

Έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα στις αρχικές συνθήκες:

- Ηρεμία του ρευστού μετά την ανάδευση,
- Προ – διάτμηση σε δεδομένο ρυθμό και για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα που θα ακολουθείται από ηρεμία του υλικού,
- Προ – διάτμηση σε χαμηλό ρυθμό που προηγείται του πειράματος σε υψηλό διατμητικό ρυθμό κ.ά.

Οι παραπάνω τρόποι μπορούν να μειώσουν το πρόβλημα του χαρακτηρισμού αλλά δεν είναι δυνατό να το εκμηδενίσουν στην πράξη, καθώς οι επιπτώσεις από το ιστορικό καταπόνησης σε προηγούμενο μη δοκιμασμένο υλικό είναι πάντοτε άγνωστο.

Όσον αφορά, λοιπόν, τις πειραματικές μετρήσεις, μπορεί να λεχθεί ότι η θιξοτροπία είναι μια από τις πιο περίπλοκες έννοιες των μη νευτώνειων ρευστών και τα περισσότερα δεδομένα δεν είναι ολοκληρωμένα.

4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΠΟΛΦΟΥ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

Εισαγωγή

Το ρευστό γεώτρησης που μελετάται έχει δύο συστατικά στερεής φάσης:

1. Μπεντονίτης
2. Λιγνίτης

Στις σελίδες που ακολουθούν γίνεται η ορυκτολογική, χημική και κοιτασματολογική ανάλυση των παραπάνω συστατικών (μπεντονιτών και γαιανθράκων).

4.1. Ορισμός των μπεντονιτών

Ο όρος μπεντονίτης χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά το 1898 από τον Knight, με σκοπό να περιγράψει μια άργιλο, η οποία εντοπίσθηκε στην περιοχή Fort Benton των Η.Π.Α. Από τις αρχές του εικοστού αιώνα έγινε δεκτό ότι οι μπεντονίτες απαντούν κυρίως με την μορφή στρωμάτων μέσα σε πετρώματα, τα οποία δημιουργήθηκαν την εποχή του Κρητιδικού και Τριτογενούς από εξαλλοίωση ηφαιστειακού υλικού. Αυτή ήταν μια πρώτη προσέγγιση του όρου μπεντονίτη. Στην συνέχεια ακολούθησαν κάποιοι άλλοι ορισμοί του υλικού με βάση τον τρόπο γένεσής του, την ορυκτολογία αλλά και τις βιομηχανικές του χρήσεις.

Συγκεκριμένα ο Ross και ο Shannon το 1926 [Lefond, (1983)], όρισαν ως μπεντονίτη ένα πέτρωμα, το οποίο αποτελείται κατά κύριο λόγο από ένα αργιλικό ορυκτό, το σμεκτίτη, το οποίο προέρχεται από αφυέλωση (διαδικασία κατά την οποία η ηφαιστειακή ύαλος αναπτύσσει λεπτομερή κρυσταλλική ή κρυπτοκρυσταλλική υφή) ενός υαλώδους ηφαιστειακού υλικού, συνήθως τόφφου ή ηφαιστειακής τέφρας. Το υλικό περιέχει κρυστάλλους διάφορων μεγεθών μέσα στο ηφαιστειακό γυαλί, όπως άστριοι (κυρίως ορθόκλαστο και ολιγόκλαστο), βιοτίτη, χαλαζία, πυρόξενους και ζιρκόνιο.

Ο πιο πλήρης ορισμός του μπεντονίτη, ως βιομηχανικό πέτρωμα, δόθηκε από τον R.E.Grim στο παγκόσμιο συνέδριο αργίλων στην Μαδρίτη της Ισπανίας, στις 27 Ιουνίου του 1972. Σύμφωνα με αυτόν, μπεντονίτης είναι μια άργιλος, η οποία αποτελείται κατά μεγάλο μέρος από ορυκτά της ομάδας του σμεκτίτη, με κύριο αντιπρόσωπο τον μοντμοριλλονίτη, τα οποία επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητές του (υψηλή πλαστικότητα, ικανότητα προσρόφησης μεγάλης ποσότητας νερού, ικανότητα διόγκωσης με την προσθήκη νερού ή άλλων οργανικών υγρών, μεγάλη ειδική επιφάνεια).

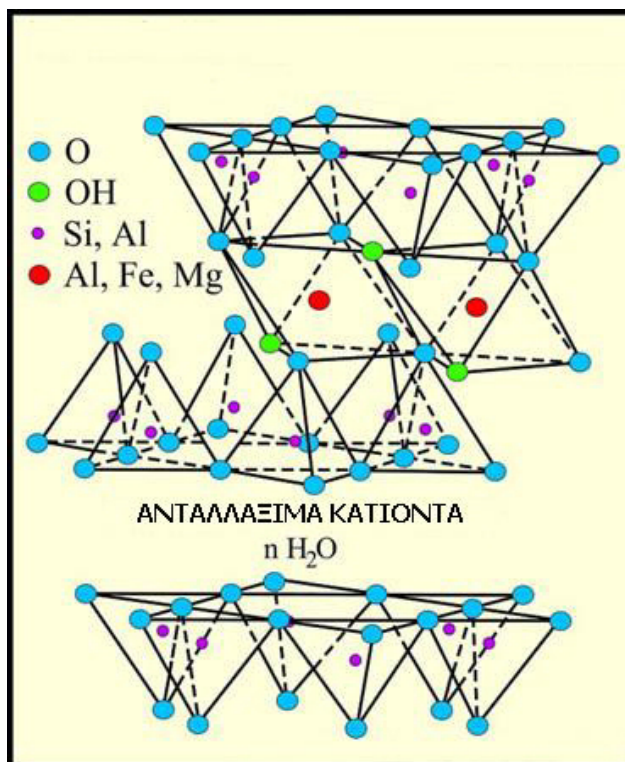
4.1.1. Ορυκτολογικά χαρακτηριστικά του μπεντονιτών

Οι σμεκτίτες είναι τα κύρια ορυκτολογικά συστατικά των μπεντονιτών. Ο πιο συνηθισμένος σμεκτίτης είναι ο μοντμοριλλονίτης αν και πολλές φορές συνυπάρχει μοντμοριλλονίτης και βειδελλίτης, όπως έχει παρατηρηθεί στα ελληνικά κοιτάσματα. Ο νατριούχος και ο ασβεστούχος μοντμοριλλονίτης είναι τα πιο διαδεδομένα μέλη της ομάδας των σμεκτιτών, τα οποία εμφανίζονται στους μπεντονίτες. Εν τούτοις και ο σαπωνίτης, ο μαγνησιούχος σμεκτίτης και ο εκτορίτης είναι κύρια ορυκτά μερικών μπεντονιτών.

Όλοι οι μπεντονίτες περιέχουν και μικρά ποσοστά άλλων αργιλικών ορυκτών, εκτός αυτών της ομάδας των σμεκτιτών, τα οποία ποικίλουν ως προς τον τύπο τους και την περιεκτικότητά τους. Τέτοια ορυκτά είναι ο ιλλίτης και ο καολινίτης. Υπάρχουν όμως και μπεντονίτες που περιέχουν μη αργιλικά ορυκτά, τα οποία προέρχονται από εξαλλοίωση ηφαιστειακών τόφφων ή τέφρας. Ένα από αυτά είναι και η γύψος. Επίσης τα ορυκτά της ομάδας των ζεόλιθων, ο οπάλιος και ο χριστοβαλίτης είναι συνήθη μη αργιλικά ορυκτά που συνυπάρχουν με τους σμεκτίτες και προέρχονται από αφυέλωση ηφαιστειακής υέλου.

4.1.2. Δομή των σμεκτιτών

Τα ορυκτά της ομάδας του σμεκτίτη δομικά ανήκουν στα φυλλοπυριτικά ορυκτά με δομή 2:1. Χαρακτηρίζονται επομένως από την ύπαρξη μιας οκταεδρικής στοιβάδας μεταξύ δύο τετραεδρικών στοιβάδων. Η οκταεδρική στοιβάδα είναι τύπου γκιψίτη $[Al(OH)_6]$, δηλαδή αποτελείται από θετικά φορτισμένα ιόντα αργιλίου (Al^{3+}), αρνητικά ιόντα οξυγόνου (O^{2-}) και υδροξύλια (OH^-). Τα αρνητικά ιόντα διευθετούνται με τέτοιο τρόπο γύρω από το κατίον του αργιλίου ώστε να σχηματίζονται οκτάεδρα. Οι τετραεδρικές στοιβάδες αποτελούνται από τετράεδρα πυριτίου τα οποία καταλαμβάνουν το κέντρο του τετραέδρου, ενώ αρνητικά φορτισμένα ιόντα οξυγόνου καταλαμβάνουν τις κορυφές του τετραέδρου. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα σχηματικό διάγραμμα της δομής των σμεκτιτών (Σχήμα 4.1), στο οποίο οι δομικές μονάδες συγκρατούνται μεταξύ τους με κατίοντα, τα οποία είναι ικανά να εξισορροπήσουν το αρνητικό φορτίο που προκύπτει από τις αντικαταστάσεις του αργιλίου και του πυριτίου από άλλα κατίοντα και με μόρια νερού.



Σχήμα 4.1. Δομή του σμεκτίτη (Grim & Guven, 1978).

Οι σμεκτίτες διακρίνονται σε διοκταεδρικούς και τριοκταεδρικούς ανάλογα με το βαθμό πλήρωσης της οκταεδρικής στοιβάδας.

Οι κυριότεροι διοκταεδρικοί σμεκτίτες είναι οι εξής:

	Z	Y	X (ανταλλάξιμα κατιόντα)
Μοντμοριλλονίτης	Si ₈	Al _{3.3} Mg _{0.7}	$(\frac{1}{2} \text{Ca, Na})_{0.7}$
Βεϊδελλίτης	Si _{7.3} Al _{0.7}	Al ₄	$(\frac{1}{2} \text{Ca, Na})_{0.7}$
Νοντρονίτης	Si _{7.3} Al _{0.7}	Fe ₄ ⁺³	$(\frac{1}{2} \text{Ca, Na})_{0.7}$

ενώ οι σημαντικότεροι τριοκταεδρικοί σμεκτίτες είναι οι:

	Z	Y	X (ανταλλάξιμα κατιόντα)
Σαπωνίτης	Si _{7.2} Al _{0.8}	Mg ₆	$(\frac{1}{2} \text{Ca, Na})_{0.7}$
Εκτορίτης	Si ₈	Mg _{5.3} Li _{0.7}	$(\frac{1}{2} \text{Ca, Na})_{0.7}$

Η δομή των διοκταεδρικών σμεκτιτών είναι ανάλογη με αυτή του πυροφυλλίτη, με τη διαφορά ότι το οκταεδρικό Al³⁺ μπορεί να αντικατασταθεί από ορισμένα κατιόντα όπως το κατιόν του Mg²⁺, Fe²⁺ και Fe³⁺, ενώ το τετραεδρικό κατιόν του Si⁴⁺ από Al³⁺. Για τους πυροφυλλίτες οι αποστάσεις μεταξύ των στρωμάτων d₀₀₁ είναι 8.9 Å⁰. Στους σμεκτίτες η βασική απόσταση μπορεί να ποικίλει σε ένα ευρύ πεδίο τιμών, αλλά είναι συνήθως 9.6 Å⁰. Τέλος η δομή των τριοκταεδρικών σμεκτιτών είναι ανάλογη με αυτήν του τάλκη, με τη διαφορά το κατιόν του Mg²⁺ μπορεί να αντικατασταθεί από το μονοσθενές κατιόν του Li⁺ και τον Fe²⁺ (Κωστάκης, 1994).

4.1.3. Γένεση των κοιτασμάτων μπεντονίτη

Οι μπεντονίτες προέρχονται από την «in situ» αργιλική εξαλλοίωση πυροκλαστικών κατά κανόνα πετρωμάτων, η σύσταση των οποίων κυμαίνεται από δακίτη έως ρυόλιθο, καθώς επίσης και σιδηρομαγνησιούχων ορυκτών που απαντούν σε διάφορα πετρώματα όπως ο βιοτίτης. Οι ενδείξεις για την ύπαρξη ηφαιστειακού μητρικού πετρώματος για τους μπεντονίτες περιλαμβάνουν:

1. ύπαρξη ιδιόμορφων κρυστάλλων χαρακτηριστικών ορυκτών ηφαιστειακής προέλευσης,
2. παρόμοια χημική σύσταση (κύρια στοιχεία και ιχνοστοιχεία) μεταξύ μπεντονιτών και γειτονικών πετρωμάτων,
3. φαινόμενα ψευδόμορφης αντικατάστασης θραυσμάτων ηφαιστειακής υέλου από σμεκτίτη.

Ο σχηματισμός και η διατήρηση ενός κοιτάσματος καθαρού μοντμοριλλονίτη εξαρτώνται από τον τύπο του μητρικού πετρώματος, το περιβάλλον εξαλλοίωσης και την γεωλογική ιστορία. Γενικά, οι προϋποθέσεις για την δημιουργία ενός κοιτάσματος μπεντονίτη, περιλαμβάνουν ύπαρξη ενός στρώματος ηφαιστειακού γυαλιού με υψηλή διαπερατότητα, παρουσία μαγνησίου (Mg) είτε στο μητρικό πέτρωμα είτε στη ρευστή φάση και τέλος μικρής έκτασης εξαλλοίωση σε αλκαλικό περιβάλλον εξαιτίας της διάλυσης της ύαλου.

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι κύριες διεργασίες γένεσης των κοιτασμάτων μπεντονίτη, που είναι:

1. Μέσα σε αλκαλικά θαλάσσια ή λιμναία περιβάλλοντα, αμέσως μετά την απόθεση ηφαιστειακής τέφρας, προκαλείται εξαλλοίωση δια μέσου της θέρμανσης του νερού που βρίσκεται σε αβαθείς λεκάνες.

2. Από μακρόχρονη δράση του υπόγειου νερού σε στρώματα ηφαιστειακών τόφφων που έχουν ενταφιαστεί σε μεγάλα βάθη, με ταυτόχρονη απελευθέρωση διοξειδίου του πυριτίου και δημιουργία μιας πυριτικής ζώνης κάτω από το στρώμα του μπεντονίτη.
3. Από την επιφανειακή αποσάθρωση των τόφφων. Η ηφαιστειακή προέλευση του μητρικού πετρώματος, συχνά μπορεί να υποτεθεί από την ύπαρξη γωνιωδών μη αργιλικών ορυκτών και από θραύσματα προερχόμενα από ηφαιστειακή ύαλο.
4. Από την εκ νέου επεξεργασία του μπεντονίτη σε αλκαλικό περιβάλλον με ταυτόχρονη δημιουργία μοντμοριλλονιτικών αργίλων, οι οποίες συχνά δεν μπορούν να διαχωριστούν από τον αρχικό μπεντονίτη.
5. Υδροθερμικά, είτε σε κάποιο βάθος είτε σε αλκαλικό λιμναίο περιβάλλον όπου οι θερμές πηγές βρίσκονται στον πυθμένα της λίμνης και τα θερμά ρευστά εμπλουτισμένα με διάφορα ιόντα κυκλοφορούν μέσα στο πέτρωμα. Με τέτοιο τρόπο έχουν σχηματιστεί τα κοιτάσματα εκτορίτη στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α.

4.1.4. Ταξινόμηση των μπεντονιτών

Τα διάφορα στρωματοειδή κοιτάσματα μπεντονιτών διαφέρουν μεταξύ τους, γιατί το κύριο συστατικό τους, ο μοντμοριλλονίτης παρουσιάζει σημαντικές διαφορές από κοίτασμα σε κοίτασμα. Συχνά μάλιστα διαφέρει και από θέση σε θέση του ίδιου κοιτάσματος, όσον αφορά την κατανομή του φορτίου κρυσταλλικής δομής, την ιοντοανταλλακτική ικανότητα, τον βαθμό κρυσταλλικότητας, την χημική σύσταση, την μορφολογία και το μέγεθος των κρυστάλλων.

Παρ' όλα αυτά, οι μπεντονίτες μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους. Οι πιο γνωστοί τρόποι αναφέρονται στη γένεση και στην ικανότητα διόγκωσης των μπεντονιτών όταν είναι ενυδατωμένοι ή όταν προστίθεται σε αυτούς νερό.

– Ως προς την **γένεσή** τους, διακρίνονται σε (Κωστάκης, 1994):

- Ηφαιστειογενείς – Ιζηματογενείς: Οι μπεντονίτες αυτοί προέρχονται από υελώδεις τόφφους που αποτέθηκαν σε λιμναίες λεκάνες.
- Ηφαιστειογενείς – υδροθερμικοί: Στην περίπτωση αυτή τα κοιτάσματα μπεντονίτη δημιουργούνται από υδροθερμική εξαλλοίωση πυριγενών πετρωμάτων. Τα κοιτάσματα αυτά έχουν μικρή έκταση αλλά είναι πολύ καλής ποιότητας.
- Μπεντονίτες που δημιουργήθηκαν από έκπλυση ζωνών αποσάθρωσης και μεταφοράς και απόθεση του υλικού σε μεγάλης έκτασης κοιτάσματα. Οι μπεντονίτες που δημιουργούνται με αυτό τον τρόπο είναι πολύ καλής ποιότητας.
- Τέλος υπάρχουν και μπεντονίτες που προέρχονται από αποσάθρωση *in situ*. Η ποιότητα αυτών των μικρών κοιτασμάτων έχει πολλές διακυμάνσεις.

– Οι μπεντονίτες μπορούν να ταξινομηθούν, όπως προαναφέρθηκε και με βάση την **ικανότητα διόγκωσης**, σε:

- Διογκούμενους (τύπος Wyoming) ή νατριούχους μπεντονίτες. Οι μπεντονίτες αυτοί περιέχουν Na^+ ως επικρατέστερο ανταλλάξιμο ιόν. Τυπικά, αυτοί έχουν πολύ υψηλή ικανότητα διόγκωσης και σχηματίζουν ένα είδος πηκτώματος (Gel) όταν υπάρχει περίσσεια νερού.
- Μη διογκούμενους ή ασβεστούχους μπεντονίτες. Σε αυτήν την περίπτωση το ανταλλάξιμο ιόν είναι το Ca^{2+} ή το Mg^{2+} . Οι μπεντονίτες αυτοί έχουν πολύ μικρότερη ικανότητα διόγκωσης σε σχέση με τους νατριούχους μπεντονίτες. Μερικοί ασβεστούχοι τύποι διογκώνονται λίγο περισσότερο από ότι διογκώνεται μια κοινή άργιλος. Σε περίσσεια νερού έχουν την τάση να καθιζάνουν με μεγάλη ταχύτητα (Κωστάκης, 1994).

– Στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, γίνεται ταξινόμηση των μπεντονιτών με βάση την **γεωγραφική θέση** των κοιτασμάτων **και τις χρήσεις** για τις οποίες προορίζεται ο μπεντονίτης, σε:

- Μπεντονίτες Νοτίων Πολιτειών (Southern). Οι μπεντονίτες αυτοί είναι μη διογκούμενοι ή ασβεστούχοι και εντοπίζονται στην περιοχή του κόλπου του Μεξικού.
- Μπεντονίτες Δυτικών Πολιτειών (Western) ή Wyoming. Τα κοιτάσματα αυτά περιέχουν νατριούχους μπεντονίτες, οι οποίοι έχουν πολύ υψηλή ικανότητα διόγκωσης. Οι μεγαλύτερες ποσότητες παράγονται στην πολιτεία Wyoming των Η.Π.Α και σε γειτονικές περιοχές (Lefond, 1983).

Η ορολογία που χρησιμοποιείται για περιγραφή πρώτων υλών πλούσιων σε σμεκτίτη παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1. Ορολογία που χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό υλικών πλούσιων σε σμεκτίτη (Χρηστίδης, 1999).

	Συνώνυμοι Όροι	Τοπική Ορολογία
Νατριούχος σμεκτίτης	Συνθετικός μπεντονίτης Νατριούχος μπεντονίτης Διογκούμενος μπεντονίτης Ενεργοποιημένος με νάτριο μπεντονίτης Μπεντονίτης με ανταλλάξιμο Na	Μπεντονίτης του Wyoming (Η.Π.Α) Μπεντονίτης Δυτικών Πολιτειών (Η.Π.Α) Μπεντονίτης (Μεγ. Βρετανίας)
Ασβεστούχος σμεκτίτης	Ασβεστούχος μπεντονίτης Υπο-μπεντονίτης Μη διογκούμενος μπεντονίτης	Μπεντονίτης Νότιων Πολιτειών (Η.Π.Α) Μπεντονίτες του Τέξας (Η.Π.Α) Fuller's Earth (Μεγ. Βρετανία)

Μαγνησιούχος σμεκτίτης	Σαπωνίτης Αρμαγκοζίτης	
Καλιούχος σμεκτίτης	Μετα-μπεντονίτης Κ-μπεντονίτης	
Λιθιούχος- Μαγνησιούχος σμεκτίτης	Εκτορίτης	

4.1.5. Χαρακτηριστικές ιδιότητες του μπεντονίτη

Ο μπεντονίτης έχει ένα ευρύ πεδίο χρήσεων εξαιτίας κάποιων πολύ σημαντικών ιδιοτήτων του, οι οποίες καθορίζονται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του μοντμοριλλονίτη, όπως το πολύ μικρό μέγεθος των κρυστάλλων, η περίσσεια αρνητικών φορτίων και ο ασθενής δεσμός μεταξύ της οκταεδρικής και των τετραεδρικών στοιβάδων. Οι ιδιότητες αυτές είναι:

- Η μεγάλη συνδετική ικανότητα
- Η ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων
- Η μεγάλη ικανότητα διόγκωσης
- Η υψηλή διασπαρτότητα και η ικανότητα αιώρησης
- Η μεγάλη ειδική και ενεργός επιφάνεια
- Το υψηλό ιξώδες και η θιξοτροπία

4.1.5.1. Συνδετική ικανότητα

Ο μπεντονίτης χρησιμοποιείται ως συνδετικό υλικό σε μεγάλες ποσότητες στην βιομηχανία χύτευσης μετάλλων για την κατασκευή καλουπιών και γενικά στην παρασκευή σφαιροποιημένων προϊόντων. Οι νατριούχοι μοντμοριλλονίτες έχουν μεγάλη αντοχή σε συμπίεση κατά τη διάρκεια της ενυδάτωσης του υλικού ενώ έχουν μικρή αντοχή κατά την ξήρανση. Αντίθετα οι ασβεστούχοι μοντμοριλλονίτες έχουν μέτριες αντοχές σε συμπίεση κατά την ενυδάτωση και πολύ υψηλή αντοχή σε συμπίεση κατά την ξήρανση.

4.1.5.2. Ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων

Η εναλλακτική ικανότητα των κolloειδών της αργίλου έχει μεγάλη σημασία γιατί επηρεάζει την φυσικοχημική συμπεριφορά τους ανάλογα με το είδος των προσροφημένων κατιόντων, το είδος των ορυκτών και το είδος και την συγκέντρωση των διαφόρων ηλεκτρολυτών στο διάλυμα (Φώσκολος, 1994).

Η ιοντοεναλλακτική ικανότητα των αργιλικών ορυκτών προκύπτει από αντικατάσταση των ιόντων πυριτίου από αργίλιο στη τετραεδρική στοιβάδα και των τρισθενών ιόντων (Al^{3+} , Fe^{3+}) από δισθενή (Mg^{2+} , Fe^{2+}) ή των δισθενών ιόντων Mg^{2+} από μονοσθενή ιόντα Li^{+} με αποτέλεσμα τη δημιουργία αρνητικού φορτίου στον κρύσταλλο του σμεκτίτη. Για την εξισορρόπηση του φορτίου προσροφώνται κάποια ανταλλάξιμα κατιόντα όπως Na^{+} , K^{+} , Mg^{2+} και Ca^{2+} μεταξύ των πακέτων του σμεκτίτη. Σε αυτές τις ανταλλάξιμες θέσεις λαμβάνει χώρα το 80% της συνολικής ανταλλαγής κατιόντων.

Ανταλλαγή κατιόντων πραγματοποιείται και σε θραυσμένους δεσμούς στα όρια των κρυστάλλων του σμεκτίτη. Το ποσοστό αυτών των κατιόντων εξαρτάται από το pH. Αύξηση του pH συνεπάγεται αύξηση του ποσοστού των αρνητικών φορτίων, τα οποία είναι ικανά να δεσμεύσουν κατιόντα. Η ιοντοεναλλακτική ικανότητα που οφείλεται στους θραυσμένους δεσμούς στα όρια των κόκκων κυμαίνεται γύρω στο 20% της συνολικής.

4.1.5.3. Ικανότητα διόγκωσης

Οι φυσικοί σμεκτίτες ποικίλουν από διογκούμενοι έως μη διογκούμενοι. Αυτό εξαρτάται από τον τύπο του σμεκτίτη, το είδος της αργίλου και το ποσοστό του ανταλλάξιμου κατιόντος Ca^{2+} και του Mg^{2+} . Τα Ca^{2+} και Mg^{2+} επικρατούν στους μη διογκούμενους σμεκτίτες, οι οποίοι μπορούν να μετατραπούν σε διογκώσιμους με τη λεγόμενη αλκαλική ενεργοποίηση, δηλαδή με αντικατάσταση του Ca ή του Mg από Na.

Αντίθετα οι νατριούχοι και οι λιθιούχοι μπεντονίτες είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στο να διογκώνονται όταν βρεθούν σε υγρό περιβάλλον και ιδιαίτερα σε υδατικά διαλύματα με μικρή συγκέντρωση ηλεκτρολυτών. Οι κρύσταλλοι του σμεκτίτη έχουν τη τάση να διογκώνονται προς την διεύθυνση του κρυσταλλογραφικού άξονα c ανάλογα με τη ποσότητα του νερού που βρίσκεται μεταξύ των 2:1 στρώσεων, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των δύο δομικών μονάδων 2:1 (Κωστάκης, 1994).

4.1.5.4. Ικανότητα αιώρησης

Οι μπεντονίτες έχουν την ικανότητα διασποράς μέσα σε ρευστά καθώς και την ικανότητα δημιουργίας αιωρημάτων και γαλακτωμάτων. Οι ιδιότητες αυτές σχετίζονται με τη κολλοειδή συμπεριφορά τους, η οποία οφείλεται στο μικρό μέγεθος των τεμαχιδίων. Το μέγεθος των διασπαρμένων τεμαχιδίων τα οποία είναι γνωστά ως μικκύλια κυμαίνεται από 10^{-7} έως 10^{-4} cm. Αυτά τα τεμαχίδια δεν καταβυθίζονται αλλά αιωρούνται στο μέσο διασποράς, γιατί έχουν ομώνυμα ηλεκτρικά φορτία με αποτέλεσμα να απωθούνται και να μην δημιουργούνται μεγαλύτερα τεμαχίδια.

4.1.5.5. Ειδική επιφάνεια

Ειδική επιφάνεια ενός σφαιρικού κόκκου είναι το πηλίκο της εξωτερικής επιφάνειας προς το βάρος του. Δηλαδή:

$$S_w = \frac{S}{W} = \frac{f}{K \cdot \rho \cdot d} = \frac{6}{\rho \cdot d} \quad (4.1)$$

Όπου S_w = ειδική επιφάνεια του κόκκου

S = εξωτερική επιφάνεια του κόκκου

W = το βάρος του κόκκου

f = π (= 3.14)

K = σταθερά ($K = \pi/6$)

ρ = πυκνότητα

d = διάμετρος του κόκκου

Από την Εξ. 4.1 συμπεραίνουμε ότι η ειδική επιφάνεια είναι αντιστρόφως ανάλογη της διαμέτρου του κόκκου, δηλαδή αυξάνεται καθώς μειώνεται η διάμετρος του κόκκου. Η μέτρηση της ειδικής επιφάνειας μπορεί να γίνει με τους εξής τρόπους (Σταμπολιάδης, 1994):

- Με προσρόφηση αερίων,
- Από την κατανομή κατά μέγεθος,
- Με μέτρηση της διαπερατότητας.

4.1.5.6. 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 κάποιων υλικών, όπως ο μπεντονίτης να μεταπίπτει από κατάσταση πηκτώματος (gel) σε κατάσταση αιωρήματος (sol) (Barnes, 1997). Οι ιδιότητες αυτές, δηλαδή το υψηλό ιξώδες και η θιξοτροπία παρατηρούνται στους φυσικούς νατριούχους μπεντονίτες, καθώς και σε μπεντονίτες που έχουν ενεργοποιηθεί με νάτριο.

Συγκεκριμένα, οι φυσικοί νατριούχοι μπεντονίτες και οι μπεντονίτες που έχουν ενεργοποιηθεί με νάτριο, έχουν υψηλή θιξοτροπία και ιξώδες. Αυτές είναι απαραίτητες προϋποθέσεις για τους μπεντονίτες που χρησιμοποιούνται σε πολφούς γεωτρήσεων και σε έργα κατασκευών.

4.1.6. Χαρακτηριστικά κοιτάσματα

Κοιτάσματα μπεντονίτη υπάρχουν στην Ελλάδα, την Κύπρο, Τουρκία, Αγγλία, στις Η.Π.Α.

4.1.6.1. Ελλάδα

Η Ελλάδα είναι δεύτερη παραγωγός χώρα στο κόσμο σε μπεντονίτη μετά τις Η.Π.Α, με παραγωγή γύρω στα 1,4 εκατομμύρια τόνους ανά έτος. Τα μεγαλύτερα κοιτάσματα μπεντονίτη βρίσκονται στη Μήλο, στο βόρειο και ανατολικό τμήμα του νησιού. Τα κοιτάσματα αυτά είναι στρωματοειδή και γεωγραφικά διακρίνονται σε τρεις ομάδες:

- 1) Άσπρο Χωριό, Τσαντίλι, Ζουλιάς
- 2) Αγκεριά και Κουφή, όπου είναι και η πιο σημαντική ομάδα
- 3) Άνω Κόμια, Κάτω Κόμια, Ρέμα, Γαρυφαλάκαινα και Μαυρογιάννης.

Η Κίμωλος είναι ένα άλλο ηφαιστειακό νησί με πλούσια κοιτάσματα μπεντονίτη. Τα σπουδαιότερα κοιτάσματα είναι των Λουτρών και των Πράσων (Χρηστίδης, 1999) που βρίσκονται στη βορειοανατολική πλευρά του νησιού και το κοιτάσμα της Φανάρας που βρίσκεται στο νότιο τμήμα του νησιού. Μόνο το κοιτάσμα των Πράσων, το οποίο είναι κοιτάσμα λευκού μπεντονίτη πολύ υψηλής ποιότητας, υφίσταται σήμερα εκμετάλλευση.

4.1.7. Χρήσεις του μπεντονίτη

Οι μπεντονίτες έχουν ευρύ πεδίο εφαρμογών λόγω των ιδιοτήτων τους. Οι κυριότερες χρήσεις των μπεντονιτών είναι:

- Πολφοί γεωτρήσεων (η ανάλυση έχει γίνει στο 2^ο Κεφάλαιο)
- Σφαιροποίηση μετάλλων και ζωοτροφών
- Παραγωγή χαρτιού και χρωμάτων
- Αποχρωματισμός ελαίων
- Παραγωγή καλλυντικών, φαρμάκων
- Πληρωτικό υλικό
- Βιομηχανία χύτευσης μετάλλων

4.2. Γεωλογία των γαιανθράκων

Η ηλικία των ελληνικών γαιανθράκων σχετίζεται με τη γεωλογική ιστορία και την παλαιογεωγραφική εξέλιξη της Ελλάδας. Κατά τη διάρκεια περιόδων παγκόσμιας ανάπτυξης χερσαίων μαζών, δεν υπήρχαν οι συνθήκες σχηματισμού των γαιανθράκων, καθώς η Ελλάδα καλύπτονταν από τη θάλασσα. Στη διάρκεια του Καινοζωικού αιώνα και ειδικότερα κατά το τέλος της Νεογενούς περιόδου (Μειόκαινο-Πλειόκαινο), όπως επίσης και στην έναρξη της Τεταρτογενούς, οι επικρατούσες συνθήκες ήταν ευνοϊκές για την ανάπτυξη των γαιανθράκων. Τα πιο σημαντικά λιγνιτικά κοιτάσματα σχηματίστηκαν σε ενδοηπειρωτικές λεκάνες, όπως αυτές της Πτολεμαΐδας, της Δράμας και της Μεγαλόπολης, ενώ μικρά τελματοδελταϊκά λιγνιτικά κοιτάσματα δημιουργήθηκαν στην Ορεστιάδα, στον Πλακιά, στην Πρέβεζα, στον Πύργο και στην Ολυμπία (Παπανικολάου, 2003).

4.2.1. Προέλευση των γαιανθράκων

Οι γαιάνθρακες ή ορυκτοί άνθρακες είναι ιζηματογενή πετρώματα φυτικής προέλευσης όπου η γένεσή τους διέπεται από τους βασικούς κανόνες της ιζηματολογίας. Οι ιζηματογενείς αυτοί σχηματισμοί δημιουργήθηκαν από τη συσσώρευση και απόθεση της φυτικής ύλης σε κατάλληλο περιβάλλον(έλη, εκβολές ποταμών, λιμνοθάλασσες), όπου με την επίδραση διαφόρων βιοχημικών και γεωχημικών διεργασιών, η αρχική φυτική ύλη μετατρέπονταν σταδιακά σε γαιάνθρακα. Η μετατροπή της αρχικής φυτικής ύλης και ο εμπλουτισμός της σε άνθρακα ονομάζεται ενανθράκωση. Οι γαιάνθρακες διακρίνονται σε χουμικούς, που σχηματίζονται σε ηπειρωτικό περιβάλλον και σε σαπροπηλικούς, που σχηματίζονται σε θαλάσσιο κυρίως περιβάλλον.

Οι χουμικοί γαιάνθρακες περνούν από ένα στάδιο τυρφοποίησης, δηλαδή διεργασιών χουμοποίησης μετά από συσσώρευση των φυτών στους χώρους όπου αυτά αναπτύχθηκαν. Το κύριο οργανικό συστατικό των περισσότερων χουμικών γαιανθράκων είναι ένα στιλπνό υλικό χρώματος

σκούρου καφέ έως μαύρου, ορατού με γυμνό μάτι, το οποίο προέρχεται από τη χουμποποίηση των ξυλωδών ιστών. Οι χουμικοί γαιάνθρακες συνήθως είναι στρωσιγενείς. Όταν στους χουμικούς γαιάνθρακες το ανόργανο υλικό υπερέχει του οργανικού έχουμε τους ανθρακούχους σχιστόλιθους.

Από την άλλη πλευρά οι σαπροπηλικοί γαιάνθρακες δεν είναι στρωσιγενείς και σχηματίζονται από σχετικά λεπτόκοκκη οργανική ύλη σε ήσυχο περιβάλλον ρηχού ύδατος ελλείψει οξυγόνου (θαλάσσιο περιβάλλον πλησίον των ακτών, κλειστές λίμνες, λιμνοθάλασσες ή μικρά έλη). Συνήθως δεν περνούν από το στάδιο της τυρφοποίησης, αλλά ακολουθούν τις ίδιες διαγενετικές μεταβολές των πλούσιων σε οργανική ύλη ιζημάτων που αποτίθενται κάτω από αναγωγικές συνθήκες. Οι σαπροπηλικοί γαιάνθρακες είναι σχετικά σπάνιοι.

4.2.2. Η διαδικασία της ενανθράκωσης

Ο όρος ενανθράκωση (Coalification) περιλαμβάνει το σύνολο των χημικών και φυσικών αλλαγών, οι οποίες, μετά το τέλος των διεργασιών σχηματισμού της τύρφης, θα οδηγήσουν στους γαιάνθρακες διαφόρων βαθμών. Η θερμοκρασία, η πίεση και ο χρόνος είναι οι παράμετροι που έχουν πλέον τον πρώτο λόγο. Η ενανθράκωση είναι μια διεργασία συνεχής που ακολουθεί την τυρφοποίηση και οι παράγοντες που ελέγχουν τη μετατροπή της τύρφης σε λιγνίτη, κατόπιν σε βιτουμενιούχο σκληρό λιθάνθρακα και τέλος σε ανθρακίτη, είναι πάντοτε οι ίδιοι. Το σύνολο των διεργασιών αυτών αποτελεί ένα γεωχημικό στάδιο, σε αντίθεση με την τυρφοποίηση που είναι ένα στάδιο καθαρά χημικό. Οι πιο σημαντικές αλλαγές που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια της ενανθράκωσης είναι η μείωση της περιεκτικότητας σε νερό, η αύξηση της πυκνότητας, η ελάττωση του πορώδους και η αύξηση του δείκτη διάθλασης (στα τελικά κυρίως στάδια). Οι κυριότερες χημικές μεταβολές είναι η συμπίκνωση, ο πολυμερισμός, η αρωματοποίηση και η απώλεια δραστικών ομάδων που περιέχουν O, S και N και που συνδέονται με τη μοριακή δομή των ανθράκων. Το καθαρό αποτέλεσμα όλων των παραπάνω μεταβολών είναι ένας συνεχής

εμπλουτισμός των γαιανθράκων σε άνθρακα με την αύξηση του βαθμού ενανθράκωσης.

4.2.3. Κατηγορίες των γαιανθράκων

Ανάλογα με την πρόοδο των διαφόρων διεργασιών της ενανθράκωσης, δηλ. με το βαθμό της ενανθράκωσης (rank), οι γαιάνθρακες διακρίνονται σε τέσσερις (4) κύριες κατηγορίες:

- | | |
|-----------------|----------------|
| (Α) Τύρφη | (Γ) Λιγνίτης |
| (Β) Λιθάνθρακας | (Δ) Ανθρακίτης |

4.2.3.1. Τύρφη

Η τύρφη είναι ο νεώτερος σε ηλικία και κατά συνέπεια ο με χαμηλότερο βαθμό ενανθράκωσης γαιάνθρακας που απαντάται στη φύση. Τοποθετείται στο Τεταρτογενές και ο σχηματισμός της μπορεί να είναι και σχετικά πρόσφατος. Η τύρφη είναι προϊόν της αποσύνθεσης των φυτών και συναντάται γενικά σε τοποθεσίες όπου το κλίμα είναι ευνοϊκό για την ανάπτυξη της βλάστησης και όπου κυρίως είναι εύκολο στα λιμνάζοντα νερά να προστατεύουν τη φυτική ύλη από την επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Η φυτική δομή και η σύσταση των φυτικών υπολοίπων είναι εμφανής, κυρίως στις επιφανειακές και σχετικά πρόσφατου σχηματισμού τύρφες, σε αντίθεση με αυτές που συναντώνται σε κάποιο βάθος από την επιφάνεια και είναι παλαιότερες σε ηλικία. Η τύρφη, λόγω του μεγάλου αριθμού πόρων, έχει υψηλό ποσοστό υγρασίας που υπερβαίνει το 80 – 90%.

Ανάλογα με τη γεωγραφική θέση σχηματισμού της τύρφης, οι τυρφώνες διακρίνονται σε κατηγορίες όπως:

- . Τυρφώνες παραλίμνιες ή έλους ή βάλτου
- . Τυρφώνες παράκτιοι

- . Τυρφώνες δέλτα ποταμών
- . Τυρφώνες λιμνοθάλασσας ή κλειστών θαλασσίων κόλπων κ.ά.

Στον Ελλαδικό χώρο απαντούν κατά κανόνα παραλίμνιες τύρφες. Οι τυρφώνες στην Ελλάδα αναπτύσσονται κυρίως σε ενδοηπειρωτικές λεκάνες και σπανιότερα σε παράκτιες ή δελταϊκές. Από τις έρευνες που έχουν γίνει και γίνονται στον Ελλαδικό χώρο, κυρίως από το Ι.Γ.Μ.Ε., έχουν εντοπισθεί σημαντικά κοιτάσματα τύρφης σε περιοχές όπως στους Φιλίππους Καβάλας, στον Άγρα Εδέσσης, στην Κορώνη Πρεβέζης, στη λίμνη Χειμαδίτιδας Πτολεμαΐδας, στην Αγουλινίτσα Πύργου κ.ά.

4.2.3.2. Λιγνίτης

Ο λιγνίτης είναι γαιάνθρακας μικρού σχετικά βαθμού ενανθράκωσης, δηλ. σχηματίζεται στα πρώτα στάδια της ενανθράκωσης. Για την Ελλάδα, ο όρος λιγνίτης καλύπτει ένα ευρύ φάσμα που κυμαίνεται μεταξύ των γαιανθράκων προχωρημένης ενανθράκωσης σε σχέση με την τύρφη και κατά συνέπεια ανάλογων ποιοτικών και φυσικών ιδιοτήτων και χαμηλότερου βαθμού ενανθράκωσης, σε σχέση με τους λιθάνθρακες. Οι λιγνίτες, ανάλογα με τις μακροσκοπικές λιθοτυπικές διαφορές που αντικατοπτρίζουν και φυσικοχημικές διαφορές, αλλά και την συνεκτικότητά τους, διακρίνονται σε:

- **Μαλακούς, γαιώδεις λιγνίτες:** Οι μαλακοί ή γαιώδεις λιγνίτες, στη φυσική τους κατάσταση, είναι χρώματος σκούρου καστανού έως καστανόμαυρου. Είναι μαλακοί και αποσαθρώνονται εύκολα στον αέρα. Είναι επίσης συχνά λεπτοστρωματώδεις, φυλλώδεις και σπάνια συμπαγείς. Στις επιφάνειες των στρωματιδίων των λεπτοστρωματωδών λιγνιτών παρατηρούνται συνήθως φυτικά λείψανα (υπολείμματα φύλλων, σπόροι κ.λ.π.), καθώς επίσης πολύ συχνά ανόργανη ύλη όπως λεπτόκοκκοι άμμοι, φυλλάρια μαρμαρυγία και όχι σπάνια, κελύφη απολιθωμάτων.

- **Σκληρούς λιγνίτες, συμπαγείς, αλαμπείς ή στιλπνούς:** Αυτοί έχουν χρώμα καφέ μέχρι μαύρο. Σπάνια διακρίνονται φυτικά υπολείμματα και σε μερικές περιπτώσεις παρατηρείται κάποια ασθενής στρώση. Ένας άλλος τύπος λιγνίτη, για την Ελλάδα πολύ σημαντικός και λόγω της ποιότητας, αλλά και της ποσότητας των αποθεμάτων, είναι ο "ξυλώδης τύπος" ή "ξυλίτης". Ο τύπος αυτός (ξυλίτης) συνίσταται σχεδόν αποκλειστικά από συστατικά "δένδρων (τμήματα φυτών ανώτερης βλάστησης), είτε πρωτογενή σκληρά (ξυλιτικά συστατικά) όπως κορμοί, κλάδοι και ρίζες, είτε πρωτογενή μαλακά (φυλλώδη συστατικά) όπως φύλλα, μίσχοι κ.λ.π. Το ποσοστό της συμμετοχής των ξυλιτικών συστατικών ποικίλλει στην κύρια μάζα του λιγνίτη μεταξύ διαφορετικών λιγνιτικών κοιτασμάτων "ξυλίτη" , αλλά και από θέση σε θέση στο ίδιο κοίτασμα (περίπτωση "ξυλιτικών" κοιτασμάτων ανατολικών περιθωρίων λεκάνης Φλώρινας - κοιτάσματα Βεύης, Αχλάδας, Βεγόρας - και κοιτάσματος περιοχής Κομνηνών Πτολεμαίδας).

Πάντως ανεξάρτητα από το ποσοστό των περιεχομένων ξυλιτικών συστατικών, ο λιγνίτης "ξυλώδους τύπου" (ξυλίτης) είναι σκληρός, συχνά ινώδης και για την κοπή του απαιτείται η χρήση πριονιού. Τα απανθρακωμένα ξυλιτικά συστατικά διατηρούν τον ιστό και την υφή του ξύλου και παρουσιάζουν χροιά καστανή. Ο ιστός και η υφή των φυλλωδών συστατικών είναι συχνά λιγότερο διατηρημένα, ενώ το χρώμα τους είναι από καστανό έως μαύρο. Περισσότερη ανόργανη ύλη (άμμοι, άργιλοι κ.λ.π.) συνυπάρχει, όπως είναι προφανές, με το εύθρυπτο οργανικό τμήμα των φυλλωδών συστατικών.

Ποιοτικά, οι λιγνίτες διαφέρουν πολύ από κοίτασμα σε κοίτασμα και αυτό είναι επόμενο, αφού ποιοτικές αποκλίσεις είναι πολύ συνηθισμένες μέσα σ' ένα και το αυτό κοίτασμα.

4.2.3.3. Λιθάνθρακας

Οι λιθάνθρακες είναι γαιάνθρακες υψηλού βαθμού ενανθράκωσης και αποτελούν τη σημαντικότερη κατηγορία γαιανθράκων, σε παγκόσμια κλίμακα και λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα και της μεγάλης θερμαντικής ικανότητάς τους και λόγω του όγκου των αποθεμάτων που υπολογίζονται σε πολλά δισεκατομμύρια τόνους. Οι λιθάνθρακες συναντώνται σε μεγάλες ποσότητες στα στρώματα του Λιθανθρακοφόρου και του Περμίου. Για την Ελλάδα οι προοπτικές για εντοπισμό μεγάλων κοιτασμάτων λιθάνθρακα είναι περιορισμένες και αυτό γιατί κατά την περίοδο του Λιθανθρακοπέρμιου, ο Ελληνικός χώρος «θαλάσσειε» με αποτέλεσμα την απόθεση θαλάσσιων ιζημάτων, που σημαίνει δυσμενείς συνθήκες σχηματισμού γαιανθράκων.

Ποιοτικά, ο λιθάνθρακας χαρακτηρίζεται από το υψηλό ποσοστό ολικού άνθρακα C που περιέχει (75 – 90% επί ξηρού), το χαμηλό ποσοστό υγρασίας (2 – 7%) και τη μεγάλη θερμαντική ικανότητά του (Α.Θ.Ι. 6000-8000 Kcal/Kgr).

4.2.3.4. Ανθρακίτης

Ο ανθρακίτης είναι ο γαιάνθρακας με το μεγαλύτερο βαθμό ενανθράκωσης (περιεκτικότητα σε C 90 – 95%) και είναι επομένως η πλουσιότερη μορφή άνθρακα, μετά το γραφίτη και το διαμάντι. Μακροσκοπικά, παρουσιάζει ομοιότητες με το λιθάνθρακα και είναι δύσκολος ο διαχωρισμός του. Τα πτητικά συστατικά του ανθρακίτη κυμαίνονται από 4 – 8%, ενώ το ποσοστό της υγρασίας δεν υπερβαίνει το 2%. Η θερμαντική του ικανότητα υπερβαίνει τις 8000 Kcal/Kgr και φτάνει μέχρι τις 9000 Kcal/Kgr.

Πίνακας 4.3. Χαρακτηριστικές φυσικοχημικές παράμετροι των τεσσάρων κατηγοριών των γαιανθράκων (Γαπανικολάου, 2003).

Κατηγορία	Πυκνότητα	Ολικός C (επί ξηρού)	Υγρασία	A.Θ.Ι. Kcal/Kgr (επί ξηρού)
Τύρφη	1	55 – 65	65 – 90	3000 – 5000
Λιγνίτης	1,1 – 1,3	65 – 75	10 – 50	4000 – 6000
Λιθάνθρακας	1,2 – 1,5	75 – 90	2 – 7	6000 – 8000
Ανθρακίτης	1,4 – 1,7	90 – 95	1 – 2	> 8000

4.2.4. Μακροσκοπική πετρογραφική σύσταση των λιγνιτών – Λιθότυποι

Παρατηρώντας μακροσκοπικά ένα γαιανθρακοφόρο στρώμα διαπιστώνεται ότι σπάνια είναι ομοιόμορφο, ενώ συνήθως διακρίνονται ταινίες, πάχους 5mm ή περισσότερο, που λέγονται λιθότυποι. Αυτές οι ταινίες υποδιαιρούνται με βάση τη στιλπνότητα και φωτεινότητα, το χρώμα, τον τύπο θραυσμού και τα εγκλείσματα (φύλλα, ρητίνη, ορυκτά κ.λ.π.).

Με βάση τους λιθότυπους, οι λιγνίτες διακρίνονται σε τέσσερις λιθοτυπικές ομάδες:

- **Θεμελιώδης λιγνίτης (matrix coal).** Αποτελείται κυρίως από λεπτοκλαστική χουμώδη μάζα, είναι ομοιογενής στην εμφάνιση και έχει χρώμα κίτρινο/καφέ σκούρο. Στην κύρια μάζα απαντώνται και μεγαλύτερα φυτικά θραύσματα και υπολείμματα. Τα ξυλιτικά μέρη και τα απανθρακωμένα θραύσματα δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 10% του συνόλου των συστατικών. Συνιστά τον πιο αξιόλογο λιθότυπο για πλινθοποίηση, οπτανθράκωση και υγροποίηση. Στις μεταποιητικές διεργασίες δίνει ικανοποιητική ανθρακόπισσα και βιτουμενιούχα εκχυλίσματα και αποτελεί επομένως σημαντική πρώτη ύλη για τη χημική βιομηχανία. Μπορεί να δώσει πλίνθους (briquettes) με μεγάλη αντοχή, αν είναι ελάχιστα ζελατινοποιημένος και όχι πολύ πλούσιος σε βιτουμένια.

Για αυτό το λόγο είναι ιδιαίτερα υπολογίσιμος για την παραγωγή κωκ. Οι ζελατινοποιημένες ποικιλίες λιθοτύπων αυτής της ομάδας μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν 'γαιάνθρακες λέβητα'.

- **Ξυλιτικός λιγνίτης (xylitic coal).** Περιλαμβάνει ανοιχτόχρωμους μέχρι σκούρους καστανούς γαιάνθρακες, στους οποίους ο ξυλίτης συμμετέχει με ποσοστό μεγαλύτερο του 10%. Η θεμελιώδης μάζα τους είναι κλαστική και ανάλογα με το ποσό των ιστών (δηλ. θραύσματα φύλλων, βελόνες κ.λ.π.) μπορεί να είναι στρωσιγενής ή μη. Άλλα εγκλείσματα που περιλαμβάνονται στους λιθότυπους αυτούς είναι κόκκοι ρητίνης ή απανθρακωμένα θραύσματα, που όμως συμμετέχουν με ποσοστό μικρότερο του 10% του συνόλου, όπως επίσης ζελατινοποιημένοι ρόζοι. Οι βιομηχανικές ιδιότητες των ξυλιτικών γαιανθράκων εξαρτώνται κυρίως από τη φύση και το ποσοστό των ξυλιτών, επειδή οι ξυλίτες παρεμβαίνουν αρνητικά κατά τις διαδικασίες θραύσης. Ξυλιτικοί γαιάνθρακες, που δεν έχουν υπερβολικά μεγάλο ποσοστό ξυλίτη, χρησιμοποιούνται σαν καύσιμο στους λέβητες.
- **Φουζιτικός λιγνίτης (fusitic coal).** Περιλαμβάνει λιγνίτες που συνίστανται από σημαντική ποσότητα (μεγαλύτερη του 10%) απανθρακωμένων ιστών (=Φουζαίην). Η κύρια μάζα μπορεί να ποικίλλει σε σύσταση (άμορφη, κλαστική ή και πλούσια σε ιστούς). Εγκλείσματα, όπως ξυλικά μέρη, κόκκοι ρητίνης ή ζελατινοποιημένοι ρόζοι μπορεί να υπάρχουν σε μικρές ποσότητες. Σε μέτωπα λιγνιτωρυχείων, όπου η επιφανειακή αποβολή υγρασίας είναι εύκολη, ο λιθότυπος αυτός μοιάζει με το κωκ. Ως προς τις τεχνολογικές ιδιότητες οι αμιγείς φουζιτικοί γαιάνθρακες συμπεριφέρονται αδρανώς ή αρνητικά κατά την πλινθοποίηση και την παραγωγή κωκ. Εάν η συμμετοχή του λιθότυπου αυτού στο σύνολο του γαιάνθρακα προς αξιοποίηση είναι μικρή, τότε δεν επηρεάζονται οι τεχνολογικές διεργασίες.

- **Πλούσιος σε ανόργανα λιγνίτης (mineral coal).** Τα ανόργανα συστατικά θα πρέπει εμφανώς να αναγνωρίζονται σε δείγμα χειρός ή στο μέτωπο του ορυχείου. Η αναγνώριση βασίζεται σε ιδιότητες, όπως λάμψη, χρώμα, πυκνότητα, αλμυρή γεύση, δοκιμές με HCl για τα ανθρακικά, δοκιμές Geiger κ.ά. Περιλαμβάνει όλα τα είδη των ορυκτών που αναπτύχθηκαν στις διάφορες φάσεις λιγνιτογένεσης. Από την τεχνολογική σκοπιά η ανόργανη ύλη μειώνει την ποιότητα των γαιανθράκων και είναι επομένως ανεπιθύμητη σχεδόν σε όλες τις διαδικασίες αξιοποίησης και εξευγενισμού.

4.2.5. Ανόργανη ύλη

Τα ορυκτά στους γαιάνθρακες είναι διαφόρων τύπων και ποικίλλουν σε φυσικές ιδιότητες και χημική σύσταση. Οι μορφές με τις οποίες τα ορυκτά απαντώνται στους γαιάνθρακες εμπίπτουν σε δύο κύριες κατηγορίες:

- Η πρώτη περιλαμβάνει την πραγματική "ενδογενή" ανόργανη ύλη που ήταν παρούσα στον αρχικό ιστό του ζώντος φυτού. Αυτή αιχμαλωτίστηκε στη συνέχεια εντός του γαιάνθρακα με τη μορφή υπομικροσκοπικών ανόργανων κόκκων και οργανομεταλλικών συμπλόκων που σχηματίζουν διακριτά, αδρόκοκκα ορυκτά.
- Η δεύτερη κατηγορία περιέχει τις "εξωγενείς" μορφές της ορυκτής ύλης του τυρφώνα. Αυτή μπορεί να είναι είτε πρωτογενής συγγενετική, δηλ. προέρχεται από τα ανόργανα συστατικά που περιέχονται στα νερά τροφοδοσίας του τυρφώνα και συναποτίθενται με τη φυτική ύλη, είτε δευτερογενής ή επιγενετική προερχόμενη από νερά που φιλτράρονται σε σχισμές, έγκοιλα και πόρους αρκετό χρόνο μετά την απόθεση της φυτικής μάζας (τύρφη) .

Σε ορισμένες περιπτώσεις σύστασης και τρόπου σύνδεσης των ανόργανων με την οργανική ύλη, τα ορυκτά μπορούν εύκολα να ξεχωρίσουν με άλεση και να απομακρυνθούν με διαδικασίες εμπλουτισμού.

4.2.5.1. Είδος της ανόργανης ύλης

Από την ανόργανη ύλη που συναντάται στους γαιάνθρακες το μεγαλύτερο μέρος της ανήκει στις εξής ομάδες ορυκτών:

- Τα **αργιλικά** ορυκτά είναι τα πιο άφθονα ανόργανα υλικά που απαντώνται στους γαιάνθρακες. Βρίσκονται είτε με μορφή λεπτών κόκκων (1 – 2μm) είτε σε μικρούς φακούς ή σε ορατές μικροσκοπικά στρώσεις, ενώ συχνά αντικαθιστούν κυτταρικές δομές.
- Ο **χαλαζίας** είναι συνήθης στους περισσότερους γαιάνθρακες, αλλά περιέχεται σε μικρές γενικά περιεκτικότητες και με μορφή μικρών κλαστικών μεμονωμένων κόκκων.
- Οι **ανθρακικές ενώσεις** απαντούν συχνά σαν σφαιρίδια σιδηρίτη ή σαν φλέβες και πληρώσεις εγκοίλων ασβεστίτη, δολομίτη και αγκερίτη.
- Τα **σουλφίδια του σιδήρου**, ο σιδηροπυρίτης και ο μασίτης, απαντούν συνήθως σε μικρές ποσότητες. Όταν ο σιδηροπυρίτης είναι άφθονος, απαντά με τη μορφή συσσωματωμάτων (framboids), κόκκων διάσπαρτων ή σε μορφές κυτταρικών ιστών από αντικατάσταση. Στη μικροσκοπική παρατήρηση είναι εξαιρετικά λαμπερός κίτρινος.

4.2.6. Χρήση των λιγνιτών στα ρευστά γεωτρήσεων

Όπως έχει αναφερθεί και στο 2^ο Κεφάλαιο, ο ρόλος του λιγνίτη στους γεωτρητικούς πολφούς είναι διπλός:

➤ **Ρύθμιση Ρεολογίας**

Ο ρόλος του λιγνίτη ως πρόσθετο σε πολφούς αφορά στον έλεγχο των ρεολογικών ιδιοτήτων των πολφών, ιδιαίτερα σε βαθιές γεωτρήσεις. Συγκεκριμένα σε μεγάλα βάθη, η θερμοκρασία των ρευστών μπορεί να ξεπερνά τους 150 °C ενώ για τις γεωθερμικές γεωτρήσεις φτάνει σε ορισμένα πεδία τους 360 °C. Σε αυτές τις θερμοκρασίες, οι πολφοί γεωτρήσεων με βάση το νερό και κύριο συστατικό τον μπεντονίτη

σχηματίζουν πηκτώματα (gel). Οι λιγνίτες χρησιμοποιούνται ως πρόσθετα τα οποία ρευστοποιούν τα πηκτώματα, μειώνουν το ιξώδες μέσα σε επιθυμητά όρια και προτιμούνται σε υψηλές θερμοκρασίες διότι έχουν καλύτερη θερμική σταθερότητα από άλλα υλικά ρύθμισης της ρεολογίας.

➤ **Ρύθμιση διήθησης**

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.

5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΜΕΤΡΗΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των διηθητικών και ρεολογικών χαρακτηριστικών των πολφών γεωτρήσεων.

- Τα διηθητικά χαρακτηριστικά των πολφών εξετάστηκαν με την βοήθεια της πρέσας διήθησης Χαμηλής Πίεσης – Χαμηλής Θερμοκρασίας (Low Pressure – Low Temperature, LPLT).
- Οι ρεολογικές ιδιότητες των πολφών γεωτρήσεων διερευνήθηκαν με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού ομοαξονικού ιξωδομέτρου Grace M3500.
- Τέλος, για την δημιουργία πληρέστερης εικόνας της συμπεριφοράς ενός ρευστού γεώτρησης σε υψηλές θερμοκρασίες, χρησιμοποιήθηκαν κελιά γήρανσης υψηλών θερμοκρασιών.

5.1. Μετρήσεις διήθησης

5.1.1. Θεωρία στατικής διήθησης

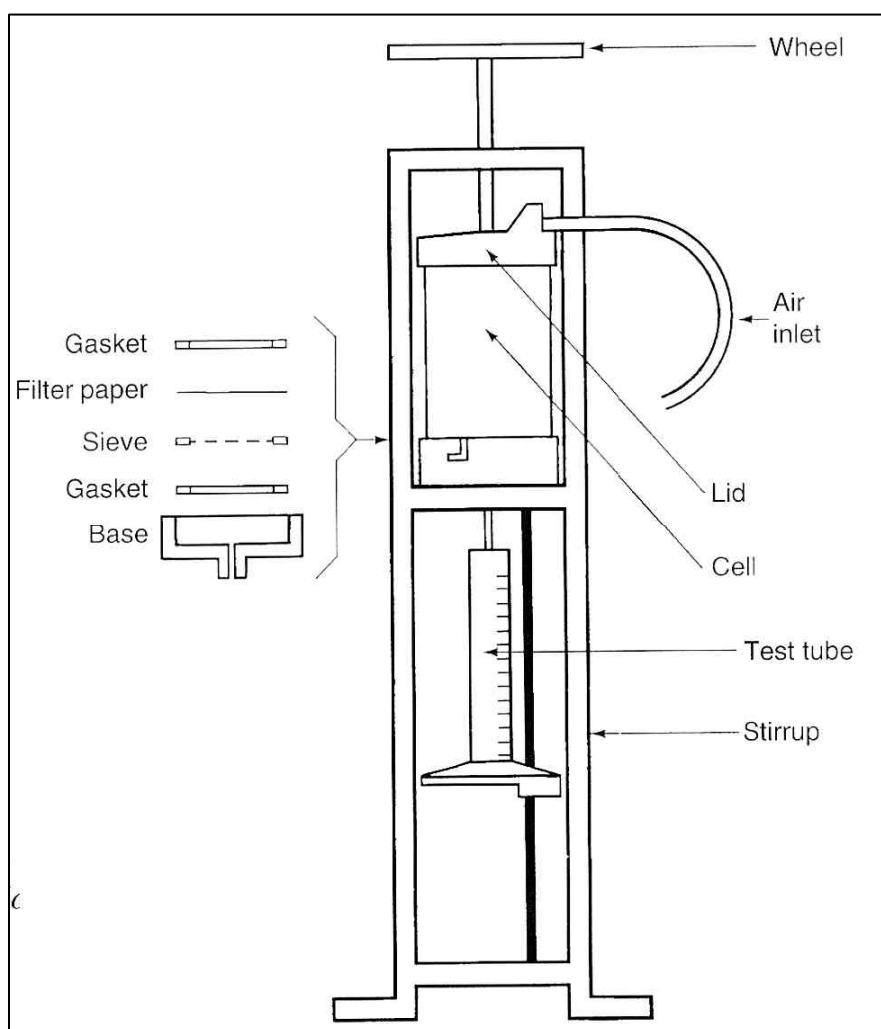
Η φιλτρόπρεσσα API (Σχήμα 5.1) χρησιμοποιείται για να προσδιορισθούν σε πολφούς γεωτρήσεων:

- 1) ο ρυθμός διήθησης δια μέσου κανονικού χαρτιού διήθησης
- 2) ο ρυθμός αύξησης του πάχους του υμενίου λάσπης στο χαρτί διήθησης κάτω από κανονικές συνθήκες

Η πρέσα LPLT αποτελείται από ένα κυλινδρικό κελί, κατασκευασμένο από υλικά ανθεκτικά σε ισχυρά αλκαλικά διαλύματα και φέρει κατάλληλη υποδοχή ώστε να προσαρμόζεται ένα μέσο πίεσης στην κορυφή. Η όλη κατασκευή είναι τέτοια που ένα διηθητικό χαρτί 9 cm να μπορεί να τοποθετηθεί στο κατώτατο σημείο του κελιού, ακριβώς επάνω σε κατάλληλη

υποδοχή. Ο όγκος του πολφού στο κελί διήθησης είναι περίπου 380 ml. Κάτω από την υποδοχή του χαρτιού βρίσκεται σωλήνας απορροής του διηθήματος που το οδηγεί σε έναν βαθμονομημένο κύλινδρο. Η στεγανοποίηση της πρέσας επιτυγχάνεται με διάφορες φλάντζες. Η όλη σύνδεση των εξαρτημάτων στηρίζεται σε μια βάση.

Η πίεση μπορεί να εφαρμοστεί με οποιοδήποτε μη επικίνδυνο ρευστό μέσο, είτε αέριο είτε υγρό. Οι πρέσες είναι εξοπλισμένες με ρυθμιστές πίεσης πάνω στους οποίους μπορούν να προσαρμοστούν μικρές κάψουλες, φορητές κεφαλές πίεσης και γενικότερα εξαρτήματα που μπορούν να ασκήσουν υδραυλική πίεση.



Σχήμα 5.1. API Φιλτρόπρεσσα

Η ροή του διηθήματος δια μέσου του υμενίου δίδεται από το νόμο Darcy,

$$\frac{dV_f}{dt} = \frac{kA\Delta p}{\mu h_{mc}} \quad (5.1)$$

όπου,

dV_f / dt = ο ρυθμός διήθησης, cm^3 / s , $[\text{L}^3 / \text{T}]$

V_f = όγκος του ρευστού που διηθήθηκε, όγκος διηθήματος, cm^3 $[\text{L}^3]$

k = η διαπερατότητα του υμενίου, darcies ($= 10^{-10} \text{ cm}^2$) $[\text{L}^2]$

A = η επιφάνεια του χαρτιού διήθησης, cm^2 , $[\text{L}^2]$

Δp = η πτώση πίεσης δια μέσου του υμενίου, dynes/cm^2 $[\text{M} / \text{L} \cdot \text{T}^2]$

μ = το ιξώδες του διηθήματος, poise ($\text{g/cm} \cdot \text{s}$) $[\text{M} / \text{L} \cdot \text{T}]$

h_{mc} = το πάχος του υμενίου, cm . $[\text{L}]$

Ανά πάσα χρονική στιγμή ο όγκος των στερεών στο ρευστό που έχει υποστεί διήθηση είναι ίσος με τον όγκο των στερεών που ευρίσκεται στο υμένιο

$$f_{sm} \cdot V_m = f_{sc} \cdot h_{mc} \cdot A \quad (5.2)$$

όπου f_{sm} είναι το ποσοστό στερεών στο ρευστό, f_{sc} είναι το ποσοστό στερεών στο υμένιο, V_m ο συνολικός όγκος του ρευστού και V_{mf} είναι ο όγκος ρευστού που έχει διηθηθεί. Επειδή

$$V_{mf} = V_f + A \cdot h_{mc}, \quad (5.3)$$

τότε

$$h_{mc} = \frac{f_{sm} V_f}{A(f_{sc} - f_{sm})} = \frac{V_f}{A \left(\frac{f_{sc}}{f_{sm}} - 1 \right)} \quad (5.4)$$

Οι (5.1) & (5.4) με ολοκλήρωση δίνουν

$$\int_0^{V_f} dV_f = \int_0^t \frac{kA\Delta p}{\mu} A \left(\frac{f_{sc}}{f_{sm}} - 1 \right) dt$$

και τελικά

$$V_f = \sqrt{2k\Delta p \left(\frac{f_{sc}}{f_{sm}} - 1 \right)} (A) \left(\frac{\sqrt{t}}{\sqrt{\mu}} \right) \quad (5.5)$$

Επομένως η Εξ. 5.5 δίνει τον όγκο του διηθήματος ως ανάλογο της ρίζας του χρόνου διήθησης και είναι η βασική καμπύλη που χρησιμοποιείται στις δοκιμές API.

Η κανονική φιλτρόπρεσσα API έχει επιφάνεια 45 cm² και λειτουργεί με πτώση πίεσης ίση με 6,8 atm (100 psi). Το διήθημα που συλλέγεται σε 30 min αναφέρεται ως κανονική απώλεια νερού (standard water loss) και μετρώνται ο όγκος του διηθήματος και το πάχος του υμενίου. Επιπρόσθετα με την φιλτρόπρεσσα API χρησιμοποιείται και μία μικρότερη που λειτουργεί σε υψηλότερη πίεση και θερμοκρασία.

Ο ρυθμός διήθησης αυξάνει με την θερμοκρασία λόγω της μείωσης του ιξώδους. Η πίεση συνήθως δεν επηρεάζει την διήθηση διότι αύξηση πίεσης μειώνει την διαπερατότητα του υμενίου, και συνεπώς ο όρος $\sqrt{k\Delta p}$ παραμένει σταθερός. Αλλά απαιτείται υψηλή πίεση λειτουργίας εάν η θερμοκρασία λειτουργίας είναι μεγαλύτερη των 100^οC για την αποφυγή βρασμού του νερού.

Και οι δύο τύποι πρέσας λειτουργούν κάτω από στατικές συνθήκες. Έχουν αναπτυχθεί πρέσες που προσομοιώνουν δυναμική διήθηση, όπου το ρευστό γεώτρησης ρέει πάνω από το υμένιο ενώ γίνεται η διήθηση. Πειράματα έχουν δείξει ότι σε τέτοια περίπτωση το πάχος του υμενίου παραμένει σταθερό, δηλαδή όσο υμένιο εναποτίθεται άλλο τόσο αποκολλάται από την διερχόμενη λάσπη. Εάν το πάχος είναι σταθερό, η ολοκλήρωση της εξίσωσης (5.1) δίνει:

$$V_f = \frac{kA\Delta p t}{\mu h_{mc}} \quad (5.6)$$

Δεν υπάρχει τυπικό τεστ δυναμικής διήθησης.

Η διαδικασία του πειράματος με την πρέσα διήθησης LPLT περιγράφεται αναλυτικά στις εργαστηριακές σημειώσεις του μαθήματος Τεχνικής Γεωτρήσεων.

5.2. Μετρήσεις ρεολογίας

5.2.1. Ομοαξονικά ιξωδόμετρα απευθείας ένδειξης (direct - indicating viscometers)

Τα ιξωδόμετρα αυτά είναι όργανα περιστροφικού τύπου. Το δείγμα καταλαμβάνει τον δακτυλιοειδή χώρο μεταξύ δύο ομόκεντρων κυλίνδρων. Ο εξωτερικός κύλινδρος ή περιστρεφόμενο κάλυμμα (rotor sleeve), κινείται με σταθερή περιστροφική ταχύτητα. Η περιστρεφόμενη κίνηση του καλύμματος, 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. Το όργανο μετράει την μετατόπιση του Bob (γωνία στροφής). 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) (τα πρώτα όργανα του τύπου αυτού κατασκευάζονταν – και κατασκευάζονται ακόμη – από την εταιρεία Fann Instruments). Το φαινόμενο ιξώδες προκύπτει από τη ένδειξη των 600 rpm, διαιρούμενη με 2 ($\theta_{600}/2$).

Ακολουθούν δύο τύποι ιξωδομέτρου απευθείας ένδειξης που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο ρευστών γεώτρησης.

- a. Το ηλεκτρικά κινούμενο 12 – Volt όργανο (Σχήμα 5.2), με ταχύτητες περιστροφής 300 και 600 rpm. Ένας αυτόματος διακόπτης απελευθέρωσης επιτρέπει την δημιουργία μεγάλης έντασης δύναμης συνάφειας, ακριβώς πριν τη μέτρηση. Χειροκίνητος οδοντωτός τροχός χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ισχύος της γέλης (gel strength).
- b. Το ηλεκτρικά κινούμενο 220 – Volt όργανο (Σχήμα 5.3), λειτουργεί σε ένα εύρος ρυθμών περιστροφής από 3 έως 600 rpm. Τυπικά στάδια μέτρησης μιας διαδικασίας είναι 3, 6, 100, 200, 300 και 600 rpm [κατά API 13^A, (1993)]. Ο ρυθμός περιστροφής των 3 rpm χρησιμεύει στον προσδιορισμό της ισχύος της γέλης.



Σχήμα 5.2.



Σχήμα 5.3.

5.2.2. Ρεολογικά μοντέλα για ομοαξονικό κυλινδρικό ιξωδόμετρο

5.2.2.1. Ιξωδόμετρο και εξίσωση ροής

Η γεωμετρία του βασίζεται στα πρότυπα που έχουν οριστεί από το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου [API 13B – 1, (2003)] για την αξιολόγηση όλων των ρευστών της βιομηχανίας πετρελαίου. Τα μέρη από το οποία απαρτίζεται το ιξωδόμετρο αυτού του τύπου απεικονίζονται στο Σχήμα 5.4. Το ρευστό περιέχεται σε ειδικό δοχείο (cup). Ένα εξωτερικό κάλυμμα (rotor sleeve) περιστρέφεται ομόκεντρα γύρω από έναν εσωτερικό συμπαγή κύλινδρο (bob), ο οποίος εξαρτάται από περιστροφικό ελατήριο (torsional spring). Το κενό μεταξύ των δύο κυλίνδρων (rotor – bob) είναι μικρό, περίπου 1mm. Ένας μετρητής, προσαρμοσμένος στο ελατήριο, καταγράφει την γωνία περιστροφής (απόκλισης) κατά τη λειτουργία του οργάνου.

Η δοκιμή του ρευστού γίνεται μεταξύ των δύο ομόκεντρων κυλίνδρων (rotor – bob), ακτίνων R_0 και R_i , εκ των οποίων ο εξωτερικός περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω (Σχήμα 5.5). Ας υποθέσουμε ότι η κίνηση του ρευστού λαμβάνει χώρα κατά επίπεδα ομόκεντρων κύκλων γύρω από τον κοινό άξονα. Καθώς ο εξωτερικός κύλινδρος περιστρέφεται, προκαλεί

διατμητική τάση μεταξύ των επιπέδων του ρευστού, από το εξωτερικό (R_o) προς το εσωτερικό (R_i). Αποτέλεσμα αυτού είναι να αναπτύσσεται ροπή στον εσωτερικό κύλινδρο.

Η εξίσωση ροής για οποιοδήποτε ρευστό σε συνθήκες μόνιμης ροής σε πολικές συντεταγμένες :

$$0 = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{d}{dr} (r^2 \tau_{r\theta})$$

από την οποία προκύπτει:

$$\frac{d}{dr} (r^2 \tau_{r\theta}) = 0 \Rightarrow r^2 \tau_{r\theta} = C_1 \Rightarrow \tau_{r\theta} = \frac{C_1}{r^2}$$

Η ροπή στον εσωτερικό κύλινδρο (bob) είναι:

$$T = \tau_{r\theta} \Big|_{r=R_i} \cdot 2\pi R_i L \cdot R_i ,$$

άρα:

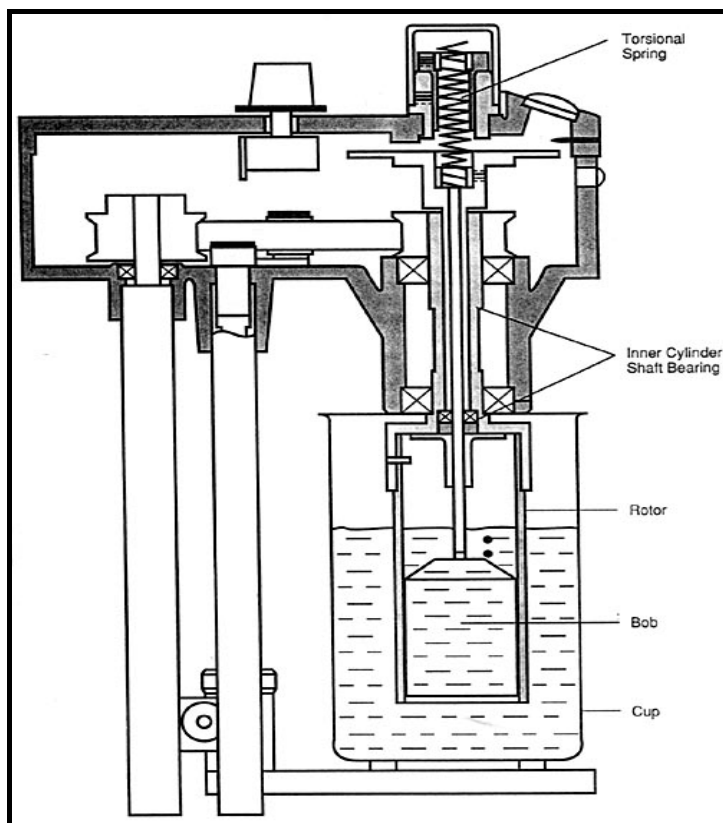
$$T = \frac{C_1}{R_i^2} 2\pi L R_i^2 \Rightarrow C_1 = \frac{T}{2\pi L}$$

οπότε:

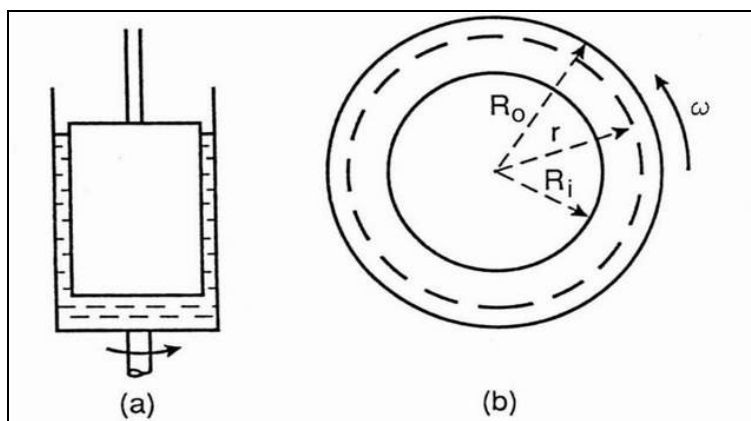
$$\boxed{\tau_{r\theta} = \frac{T}{2\pi L r^2}} \quad (5.7)$$

όπου L το ύψος του bob.

Η διατμητική τάση είναι ανάλογη του ρυθμού διάτμησης. Κατά την ιξωδομέτρηση, μετράται η ροπή T που αναπτύσσεται στον εσωτερικό κύλινδρο και ανάλογα με το ρεολογικό μοντέλο προκύπτει η τιμή του $\tau_{r\theta}$.



Σχήμα 5.4. Σχηματικό διάγραμμα
ομοαξονικού κυλινδρικού ιξωδομέτρου, τύπου Couette

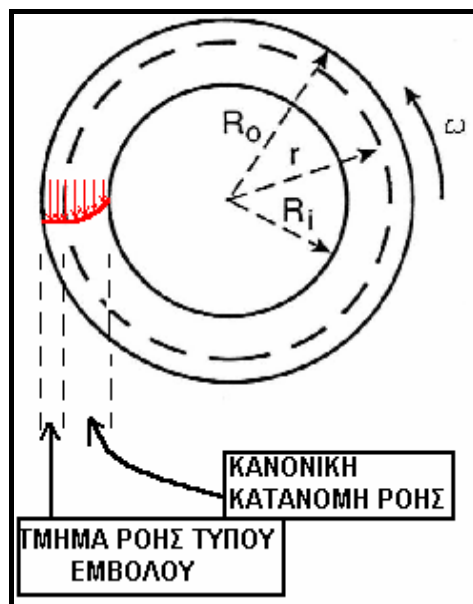


Σχήμα 5.5. Σχηματική παράσταση ομοαξονικού ιξωδομέτρου
(a) πλάγια τομή, (b) κάτοψη

5.2.2.2. Μοντέλο BINGHAM PLASTIC για ομοαξονικό ιξωδόμετρο

Κατωτέρω, αναφέρονται οι εξισώσεις για τα τρία είδη ρευστών, Bingham plastic, Power law και νευτώνεια, που συσχετίζουν τις ρεολογικές παραμέτρους, μ , $\tau_o - \mu_p$, $K - n$ αντίστοιχα με τις μετρούμενες παραμέτρους του περιστρεφόμενου ιξωδομέτρου, $T - \omega$. Οι σχέσεις αυτές χρησιμοποιούνται, ακολούθως, για τον προσδιορισμό των ρεολογικών παραμέτρων των ρευστών. Οι εξισώσεις αναλύονται στις εργαστηριακές σημειώσεις του μαθήματος Τεχνικής Γεωτρήσεων, 2001.

Το ιξωδόμετρο αυτού του τύπου είναι κατάλληλο για τον προσδιορισμό του πλαστικού ιξώδους και της τάσης διολίσθησης για το συγκεκριμένο μοντέλο ροής. Το αξιοσημείωτο πλεονέκτημά του είναι ότι σε συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής, η ροή τύπου εμβόλου – plug flow – (χαρακτηριστική για τα Bingham Plastic) εξουδετερώνεται και οι καμπύλες συνάφειας γίνονται γραμμικές. Πιο συγκεκριμένα όπως φαίνεται στο παρακάτω προφίλ ταχύτητας υπάρχει ένα τμήμα ροής τύπου εμβόλου το οποίο εξουδετερώνεται σταδιακά σε κανονική κατανομή ροής (Σχήμα 5.6).



Σχήμα 5.6. Κατανομή ροής στο εσωτερικό του ιξωδομέτρου

Για σταθερό ιξώδες ($\tau_o = ct$ και $\mu = \mu_p = ct$), η εξίσωση ροής για την κυλινδρική γεωμετρία δίνεται από τη σχέση :

$$\tau_{r\theta} = \tau_o + \mu r \frac{d}{dr} \left(\frac{u_\theta}{r} \right) \quad (5.8)$$

αφού

$$u_z = 0, u_r = 0, u_\theta \neq 0$$

και αντικαθιστώντας την τάση $\tau_{r\theta}$ από τη γενική εξίσωση ροής (5.7) έχουμε:

$$\frac{T}{2\pi L r^2} = \tau_o + \mu r \frac{d}{dr} \left(\frac{u_\theta}{r} \right) \Rightarrow \frac{d}{dr} \left(\frac{u_\theta}{r} \right) = \frac{T}{\mu 2\pi L r^3} - \frac{\tau_o}{\mu r}$$

Από όπου τελικά προκύπτει:

$$\frac{u_\theta}{r} = \omega + \frac{T}{4\pi L \mu} \left(\frac{1}{R_o^2} - \frac{1}{r^2} \right) + \frac{\tau_o}{\mu} \cdot \ln \left(\frac{R_o}{r} \right) \quad (5.9)$$

και

$$\frac{T}{2\pi L R_i^2} = \frac{2 S^2}{S^2 - 1} [\mu \omega + \tau_o \ln(S)] \quad (5.10)$$

και για τον ρυθμό διάτμησης, γ_i , έχουμε:

$$\gamma_i = \frac{2 S^2}{\mu_p (S^2 - 1)} [\mu_p \cdot \omega_i + \tau_o \ln(S)] - \frac{\tau_o}{\mu_p} \quad (5.11)$$

5.2.2.3. Μοντέλο POWER LAW για ομοαξονικό ιξωδόμετρο (σταθερό ιξώδες)

Ισχύει η σχέση:

$$\frac{T}{2 \pi L R_i^2} = K \left[\frac{2 S^{\frac{2}{n}} \omega}{n \left(S^{\frac{2}{n}} - 1 \right)} \right]^n \quad (5.12)$$

και για ρυθμό διάτμησης, γ_i , έχουμε:

$$\gamma_i = \frac{2 \cdot S^{\frac{2}{n}} \cdot \omega_i}{n \left(S^{\frac{2}{n}} - 1 \right)} \quad (5.13)$$

5.2.2.4. Μοντέλο HERSCHEL – BULKLEY (H – B) για ομοαξονικό ιξωδόμετρο (σταθερό ιξώδες)

Ισχύει η σχέση:

$$\tau_{r\theta} = \tau_0 + K \left[r \frac{d}{dr} \left(\frac{u_\theta}{r} \right) \right]^n \quad (5.14)$$

από όπου τελικά προκύπτει ότι:

$$\frac{T}{2 \pi L R_i^2} = \frac{2 S^2}{S^2 - 1} \tau_0 \ln (S) + K \left[\frac{2 S^{\frac{2}{n}} \omega}{n \left(S^{\frac{2}{n}} - 1 \right)} \right]^n \quad (5.15)$$

και για τον ρυθμό διάτμησης, γ_i , έχουμε:

$$\gamma_i = \frac{2 \cdot S^{\frac{2}{n}} \cdot \omega_i}{n \left(S^{\frac{2}{n}} - 1 \right)} \quad (5.16)$$

5.2.2.5. ΝΕΥΤΩΝΕΙΟ μοντέλο για ιξωδόμετρο

Σε αυτή τη περίπτωση ισχύουν οι εξισώσεις για πλαστικό Bingham με $\tau_0 = 0$, διότι:

$$\tau_{r\theta} = \mu r \frac{d}{dr} \left(\frac{u_\theta}{r} \right).$$

Οπότε, απευθείας από την σχέση για Bingham plastic, δηλαδή την Εξ. (5.10), προκύπτει:

$$\boxed{\frac{T}{2\pi L R_i^2} = \frac{2\mu S^2 \omega}{S^2 - 1}} \quad (5.17)$$

και για τον ρυθμό διάτμησης, γ_i , έχουμε:

$$\boxed{\gamma_i = \frac{2 \cdot S^2 \cdot \omega_i}{S^2 - 1}} \quad (5.18)$$

5.2.3. Ιξωδόμετρο εργαστηρίου

Πρόκειται για ένα ψηφιακό αυτόματο όργανο της Grace Instruments. Το συγκεκριμένο μοντέλο είναι το M3500a (Σχήμα 5.7) και είναι ένα κλασσικό ομοαξονικό κυλινδρικό περιστροφικό ιξωδόμετρο τύπου Couette.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου ιξωδομέτρου είναι:

- ~ Έχει εύρος στροφών από 0,02 – 600 rpm συνεχόμενα (χωρίς ενδιάμεση παύση) και όχι μεμονωμένες τιμές (π.χ. 3, 6, 100, 200, 300, 600 rpm)
- ~ Φέρει θερμαινόμενο δοχείο για μετρήσεις σε διαφορετικές θερμοκρασίες (σε ατμοσφαιρική πίεση).



Σχήμα 5.7. Ιξωδόμετρο Grace Instrument M3500a

~ Διαθέτει λογισμικό (Σχήμα 5.8) 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. Στους Πίνακες 5.1 & 5.2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του ιξωδομέτρου.

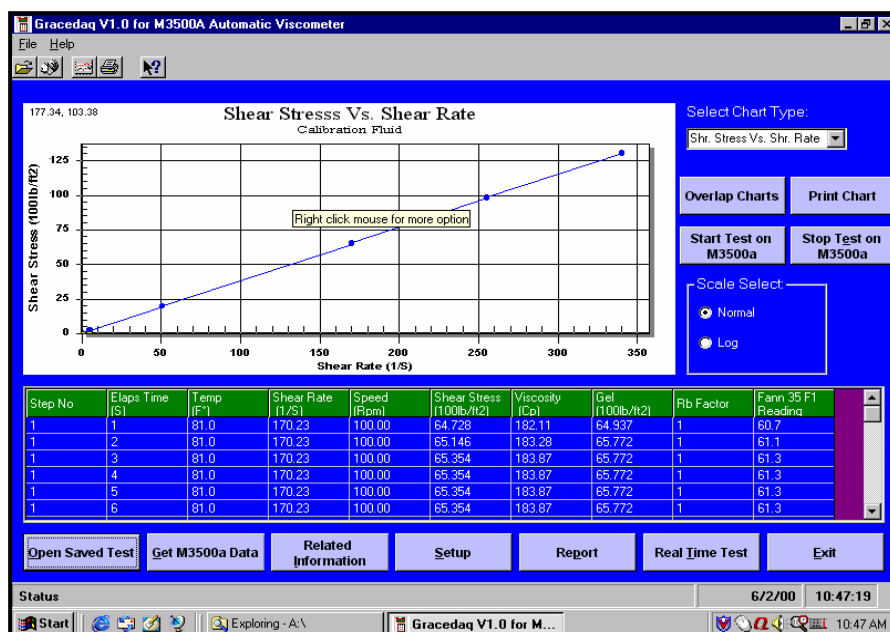
Πίνακας 5.1. Εύρος μετρήσεων οργάνου

Ταχύτητα περιστροφής	0,02 – 600 rpm (συνεχόμενα)
Ρυθμός διάτμησης	0,0027 – 3254 sec ⁻¹
Θερμοκρασία	10 °F - 212 °F, (-12 °C - 100 °C)
Πίεση	Ατμοσφαιρική
Ιξώδες	0,5 – 5.000.000 cp
Ροπή	0 – 1 oz-in ή 0 – 5 oz-in
Διατμητική τάση	1 – 37.000 dyn/cm ²
Ακρίβεια	± 0,5 % του συνολικού εύρους

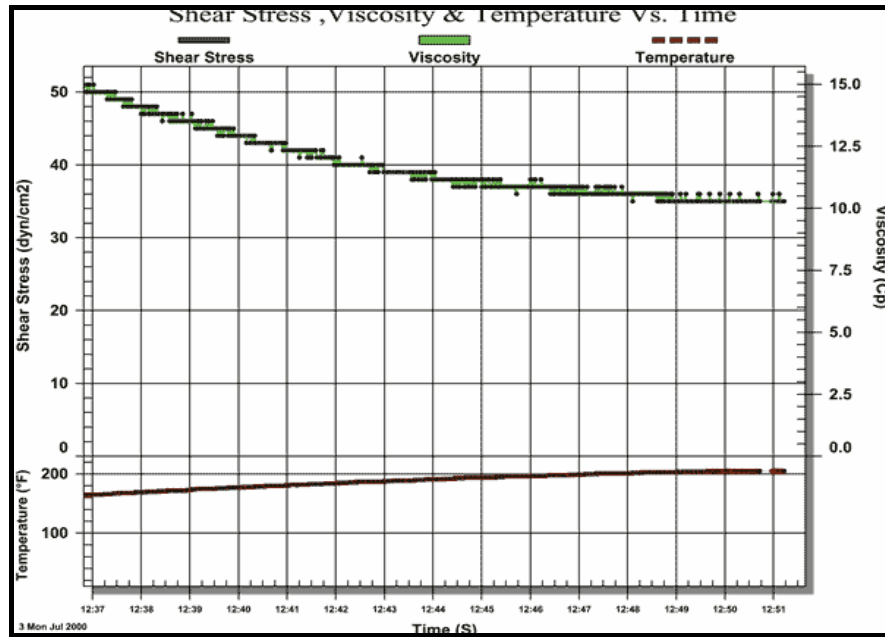
Πίνακας 5.2. Χαρακτηριστικά ιξωδομέτρου

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

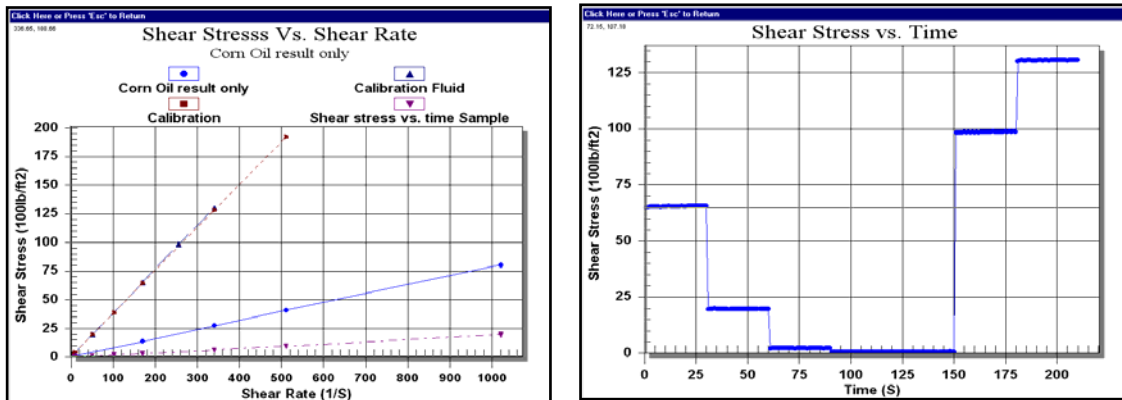
Στα Σχήματα 5.9 έως 5.11 φαίνονται τα διάφορα διαγράμματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις.



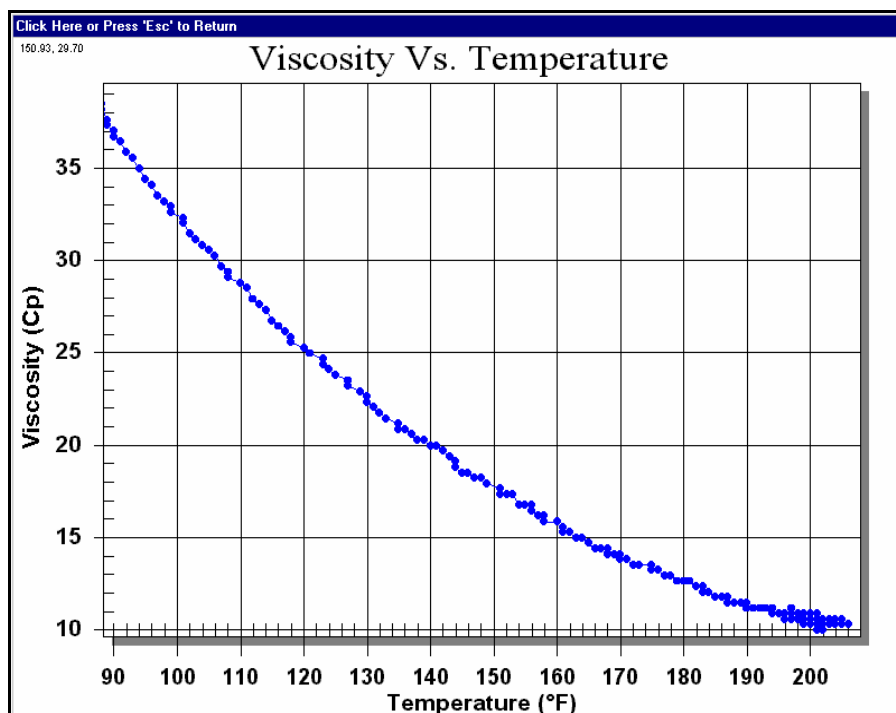
Σχήμα 5.8. Τυπική επιφάνεια εργασίας λογισμικού



Σχήμα 5.9. Τυπικό διάγραμμα κατά την πραγματοποίηση πειράματος σε πραγματικό χρόνο



Σχήμα 5.10. Τυπικά διαγράμματα Διατμητικής τάσης – Ρυθμού διάτμησης και Διατμητικής τάσης – Χρόνου διάτμησης



Σχήμα 5.11. Τυπικό διάγραμμα Ιξώδους – Θερμοκρασίας

5.2.4. Μετρήσεις θιξοτροπίας ρευστών

Για τη μελέτη της θιξοτροπίας, γίνεται αρχικά επιλογή των ρυθμών διάτμησης και της θερμοκρασίας δοκιμής. Όπως αναφέρθηκε στο 3^ο Κεφάλαιο (§ 3.2.7) για τη μελέτη της θιξοτροπίας ενός υλικού εκτελούμε κυκλική δοκιμή: γραμμική αύξηση του ρυθμού διάτμησης από το μηδέν σε μια μέγιστη επιλεγόμενη τιμή και επαναφορά του ρυθμού διάτμησης στην μηδενική τιμή. Για τις μετρήσεις θιξοτροπίας επιλέχθηκαν οι ακόλουθοι ρυθμοί διάτμησης (κυκλική διαδρομή):

Βήμα αύξησης	Χρόνος μέτρησης	Στροφές ω (rpm)	Βήμα μείωσης	Χρόνος μέτρησης	Στροφές ω (rpm)
1.	1min.	3	12.	1min.	500
2.	1min.	6	11.	1min.	400
3.	1min.	10	10.	1min.	300
4.	1min.	20	9.	1min.	200
5.	1min.	30	8.	1min.	100
6.	1min.	60	7.	1min.	80
7.	1min.	80	6.	1min.	60
8.	1min.	100	5.	1min.	30
9.	1min.	200	4.	1min.	20
10.	1min.	300	3.	1min.	10
11.	1min.	400	2.	1min.	6
12.	1min.	500	1.	1min.	3
13.	1min.	600		1min.	

5.2.4.1. Διαδικασία μέτρησης θιξοτροπίας

Η διαδικασία μέτρησης περιλαμβάνει τη προετοιμασία του ιξωδομέτρου (Σημειώσεις εργαστηρίου Τεχνικής Γεωτρήσεων) και την ρύθμιση των βημάτων μέτρησης από το λογισμικό του οργάνου. Αφού προετοιμαστεί το όργανο, κάνουμε τις κατάλληλες ρυθμίσεις στο λογισμικό:

1. Καθορίζουμε τα βήματα μέτρησης, δηλαδή τους ρυθμούς διάτμησης όπως προαναφέρθηκε.
2. Επιλέγουμε το χρόνο του κάθε βήματος, δηλαδή πόση ώρα θα υπόκειται σε διάτμηση το δείγμα ανά ρυθμό διάτμησης. Ο χρόνος κάθε βήματος επιλέγεται να είναι ένα λεπτό.
3. Επιλέγουμε τη θερμοκρασία δοκιμής και η μέτρηση ξεκινά.
4. Μετά το τέλος του πειράματος, τα δεδομένα που προκύπτουν αποθηκεύονται σε ψηφιακή μορφή (αρχεία excel). Στο αρχείο της δοκιμής αποτυπώνονται στήλες με το χρόνο κάθε βήματος, τη θερμοκρασία δοκιμής, το ρυθμό διάτμησης και τη διατμητική. Από τη σχέση ρυθμού διάτμησης – διατμητικής τάσης προκύπτουν οι θιξοτροπικές καμπύλες. Το όργανο δίνει έξι μετρήσεις διατμητικής

τάσης για κάθε ρυθμό διάτμησης (μία κάθε 10 sec). Από αυτές τις μετρήσεις βγαίνει ο μέσος όρος για κάθε βήμα (μέσος όρος διατμητικών τάσεων για εκάστοτε ρυθμό διάτμησης) και έτσι προκύπτει η σχέση ρυθμού – τάσης διάτμησης.

5.2.5. Επεξεργασία των μετρήσεων

Γενικά τα δεδομένα που προκύπτουν από κάθε ιξωδομέτρηση είναι της μορφής (ω_i, T_i) . Σκοπός της επεξεργασίας τους είναι να διαπιστωθεί το ρεολογικό μοντέλο στο οποίο ταιριάζουν. Για να διαπιστώσουμε από ποιο μοντέλο περιγράφεται ένα συγκεκριμένο ρευστό πρέπει να ελέγξουμε την προσαρμογή των δεδομένων σε κάθε μοντέλο και να επιλέξουμε τη βέλτιστη.

5.2.5.1. Νευτώνειο μοντέλο

Η επεξεργασία των δεδομένων (ω_i, T_i) , γίνεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για την προσαρμογή γραμμικής καμπύλης που να ξεκινάει από το σημείο (0,0). Έτσι η εξίσωση πρέπει να είναι της μορφής:

$$y = b \cdot x, \text{ με } \omega_i = x_i \text{ και } T_i = y_i$$

Σύμφωνα με τη μέθοδο ο συντελεστής b δίνεται από τη σχέση:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (5.19)$$

και ο συντελεστής προσαρμογής της καμπύλης:

$$R_c^2 = \frac{b \sum x_i y_i - \frac{1}{n} (\sum y_i)^2}{\sum y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum y_i)^2} \quad (5.20)$$

Σύμφωνα με τις σχέσεις για το Νευτώνειο ρεολογικό μοντέλο του ιξωδομέτρου (5.17) προκύπτει ότι:

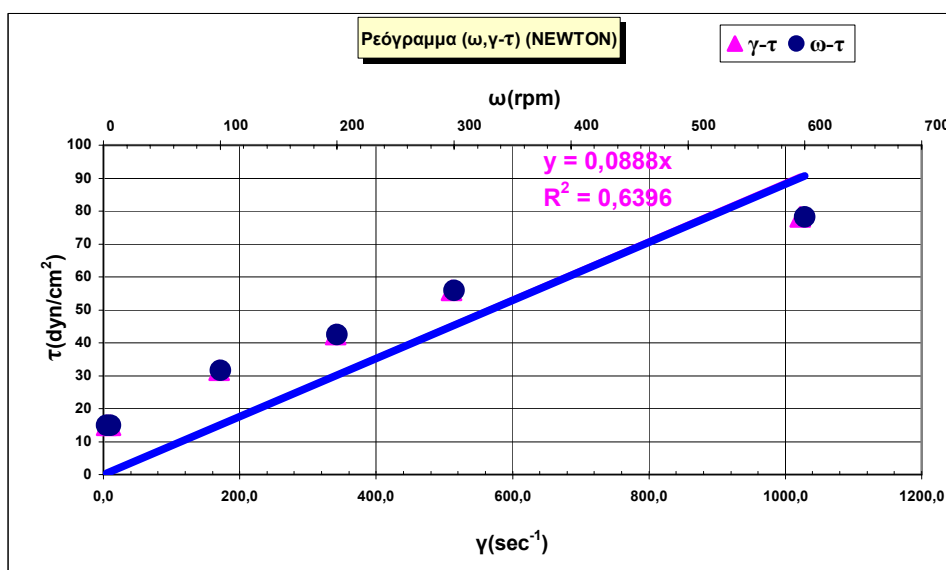
$$\mu = \frac{b}{2c_0}$$

(5.21)

Οι μονάδες των μεγεθών που εμφανίζονται στις παραπάνω σχέσεις είναι οι εξής:

Μέγεθος	Μονάδες	Μέγεθος	Μονάδες
ω_i	sec^{-1}	L	cm
T	$\text{dynes}\cdot\text{cm}$	c_0	cm^3
S	Αδιάστατο	b	$\text{dynes}\cdot\text{cm}\cdot\text{sec}$
R_i	cm	μ	poise

Τα ρεογράμματα που προκύπτουν για το Νευτώνειο μοντέλο είναι της παρακάτω μορφής, με τον ρυθμό διάτμησης, γ , να υπολογίζεται από την Εξ. 5.18.



5.2.5.2. Μοντέλο BINGHAM PLASTIC

Για το μοντέλο αυτό, η μέθοδος επεξεργασίας των δεδομένων είναι η ίδια με τη διαφορά ότι η ευθεία που προκύπτει από τα σημεία του ρεογράμματος

τέμνει τον άξονα τ σε χαρακτηριστικό σημείο (σημείο έναρξης διολίσθησης). Έτσι η εξίσωση της είναι της μορφής:

$$y = b \cdot x + a, \quad \omega_i = x_i \quad \text{και} \quad T_i = y_i$$

Σύμφωνα με τη μέθοδο οι συντελεστές α,β δίνονται από τις σχέσεις:

$$a = \frac{\sum y_i - b \sum x_i}{n} \quad (5.22)$$

και

$$b = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum y_i)(\sum x_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (5.23)$$

και ο συντελεστής προσαρμογής της καμπύλης:

$$R_c^2 = \frac{a \sum y_i + b \sum x_i y_i - \frac{1}{n} (\sum y_i)^2}{\sum y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum y_i)^2} \quad (5.24)$$

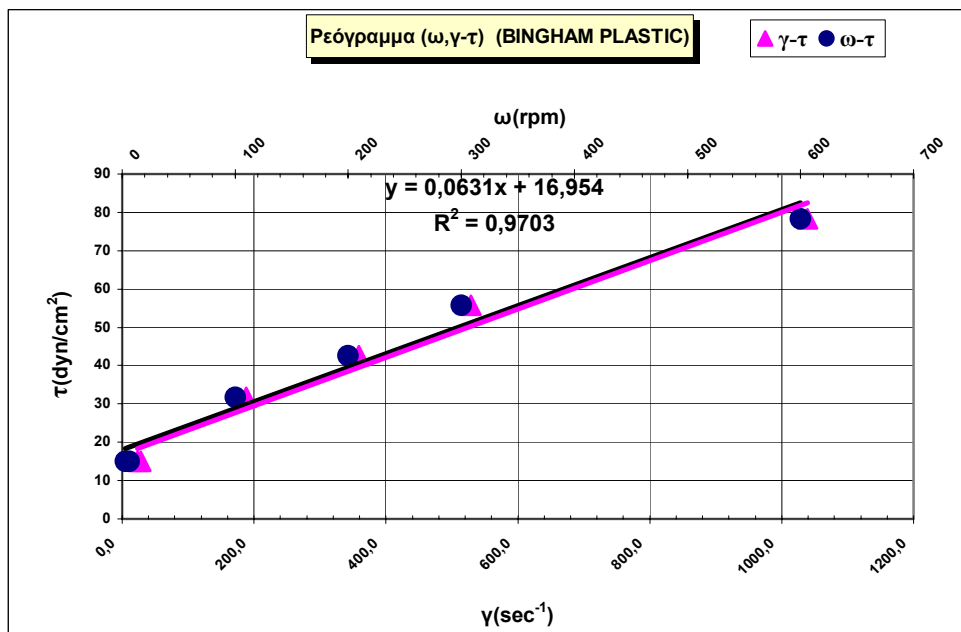
Σύμφωνα με τις σχέσεις για το ρεολογικό μοντέλο Bingham Plastic του ιξωδομέτρου προκύπτει η σχέση:

$$\tau_y = \frac{(S^2 - 1)a}{4\pi L R_i^2 S^2 \cdot \ln(S)} \quad (5.25)$$

και

$$\mu_p = \frac{(S^2 - 1)b}{4\pi L R_i^2 S^2} \quad (5.26)$$

Τα ρεογράμματα που προκύπτουν για το μοντέλο Bingham Plastic είναι της παρακάτω μορφής, με τον ρυθμό διάτμησης, γ, να υπολογίζεται από την Εξ. 5.11.



5.2.5.3. Μοντέλο POWER – LAW

Το μοντέλο αυτό βασίζεται στη μη γραμμική εξάρτηση των ζεύγων (ω_i, T_i) . Η μορφή της καμπύλης που περιγράφει το συγκεκριμένο μοντέλο είναι λογαριθμικής μορφής και λέγεται power. Έτσι η εξίσωση της είναι της μορφής:

$$T = A \cdot \omega^n$$

και πιο αναλυτικά:

$$T = 2\pi L R_i^2 K \left[\frac{2S^{\frac{2}{n}}}{n(S^{\frac{2}{n}} - 1)} \right]^n \cdot \omega^n \quad (5.27)$$

δηλαδή

$$A = 2\pi L R_i^2 K \left[\frac{2S^{\frac{2}{n}}}{n(S^{\frac{2}{n}} - 1)} \right]^n \quad (5.28)$$

λογαριθμώντας την παραπάνω σχέση έχουμε:

$$\ln(T_i) = \ln(A) + n \cdot \ln(\omega_i)$$

οπότε η εξίσωση αυτή μπορεί να βρεθεί με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων ως:

$$y_i = a + bx_i, \text{ όπου } y_i = \ln(T_i) \text{ και } x_i = \ln(\omega_i)$$

Σύμφωνα με τη μέθοδο οι συντελεστές a, b δίνονται από τις σχέσεις:

$$a = \frac{\sum y_i - b \sum x_i}{n} \quad (5.29)$$

και

$$b = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum y_i)(\sum x_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (5.30)$$

και η προσαρμογή της καμπύλης:

$$R_c^2 = \frac{a \sum y_i + b \sum x_i y_i - \frac{1}{n} (\sum y_i)^2}{\sum y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum y_i)^2} \quad (5.31)$$

Άρα με την παραπάνω θεώρηση έχουμε ότι:

$$K = \frac{e^a}{2\pi L R_i^2} \cdot \left[\frac{n(S^{2/n} - 1)}{2S^{2/n}} \right]^n \quad (5.32)$$

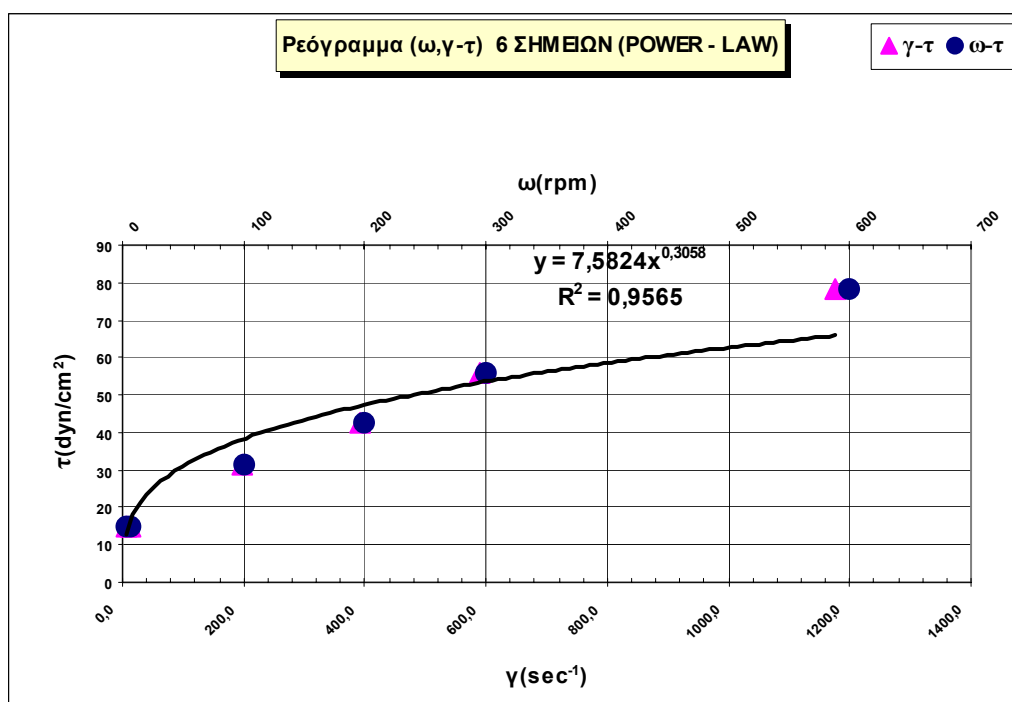
και

$$n = b \quad (5.33)$$

Πρέπει να ακολουθείται το ίδιο σύστημα μονάδων για όλα τα μοντέλα και ιδιαίτερα για το Power – Law επειδή γίνεται χρήση λογαρίθμων. Οι μονάδες των μεγεθών που εμφανίζονται στις παραπάνω σχέσεις είναι οι εξής:

Μέγεθος	Μονάδες
ω_i	sec^{-1}
T	$\text{dynes}\cdot\text{cm}$
n	Αδιάστατο
A	$\text{dynes}\cdot\text{cm}/\text{sec}^n$
K	$\text{dynes}/\text{cm}^2\cdot\text{sec}^n$

Τα ρεογράμματα που προκύπτουν για το μοντέλο Power – Law είναι της παρακάτω μορφής, με τον ρυθμό διάτμησης, $\dot{\gamma}$, να υπολογίζεται από την Εξ. 5.13.



5.2.5.4 Μοντέλο HERSCHEL – BULKLEY (H – B)

Ισχύουν οι εξισώσεις 5.25 για τα πλαστικά Bingham:

$$\tau_y = \frac{(S^2 - 1)a}{4\pi LR_i^2 S^2 \cdot \ln(S)}$$

και 5.32 & 5.33 από τα ρευστά εκθετικού νόμου:

$$K = \frac{e^a}{2\pi LR_i^2} \cdot \left[\frac{n(S^{\frac{2}{n}} - 1)}{2S^{\frac{2}{n}}} \right]^n$$

και

$$n = b$$

Τα ρεογράμματα που προκύπτουν για το μοντέλο H – B είναι της ίδιας μορφής με αυτά του εκθετικού νόμου, με τον ρυθμό διάτμησης, γ, να υπολογίζεται από την Εξ. 5.16.

5.3. Κελί γήρανσης υψηλής θερμοκρασίας (aging cell)

Ορισμένα ρευστά γεωτρήσεων και ειδικά αυτά που περιέχουν αργιλικά ορυκτά, τείνουν να πηξουν (thicken) και σε αρκετές περιπτώσεις να στερεοποιούνται όταν παραμένουν κάτω από στατικές συνθήκες στον πυθμένα του φρέατος [Van Oort et al., (1997), Zilch et al., (1991)]. Η πάχυνση αυτή επιδρά αρνητικά και δύναται να εμποδίζει τις διαδικασίες γεώτρησης και ολοκλήρωσης, όπως οι διαγραφίες, η διάτρηση κ.ά. Τα κελιά γήρανσης υψηλής θερμοκρασίας έχουν αναπτυχθεί προκειμένου να προσομοιώνουν τη συμπεριφορά του ρευστού γεώτρησης, όταν αυτό βρίσκεται σε στατικές συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας.

Μελέτες σε ρευστά γεωτρήσεων κατέδειξαν την ανάγκη για την άσκηση πίεσης πριν την θέρμανση των δειγμάτων, ώστε η θερμοκρασία τους να ανέλθει στην επιθυμητή θερμοκρασία των δοκιμών γήρανσης. Για το σκοπό αυτό έχουν κατασκευασθεί κατάλληλα δοχεία (κελιά) γήρανσης που μπορούν να αντέξουν σε υψηλές πιέσεις και στα οποία διοχετεύονται είτε NO₂ είτε CO₂ στην απαιτούμενη πίεση ώστε να αποφευχθεί ο βρασμός και η εξάτμιση του ρευστού γεώτρησης στην θερμοκρασία δοκιμής.

Για θερμοκρασίες μέχρι τους 350 °F (177 °C), τα ρευστά γεώτρησης μπορούν να μετρηθούν σε κελιά κατασκευασμένα από κράμα αλουμινίου – ορειχάλκου, εξοπλισμένα με κατάλληλη βαλβίδα άσκηση πίεσης. Για θερμοκρασίες μέχρι 500 °F (260 °C) και πιέσεις που μπορούν να φτάσουν μέχρι τα 1000 psi (6895 kPa), τα κελιά που φέρουν το προς δοκιμή ρευστό είναι κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα και έχουν χωρητικότητα 260 ή 500 ml (Σχήμα 5.12). Για να μπορέσει το ρευστό να διογκωθεί, το κελί πληρώνεται με ρευστό όγκου 350 – 400 ml.



Σχήμα 5.12. Κελιά γήρανσης πολφών.

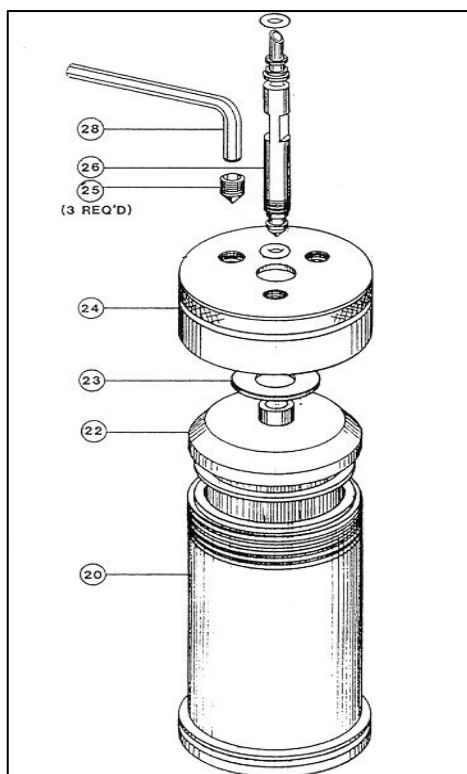
5.3.1. Διαδικασία δοκιμής γήρανσης πολφού με πίεση στο κελί

Η διαδικασία γήρανσης με πίεση στο κελί ακολουθεί τα παρακάτω βήματα (Fann Instruments):

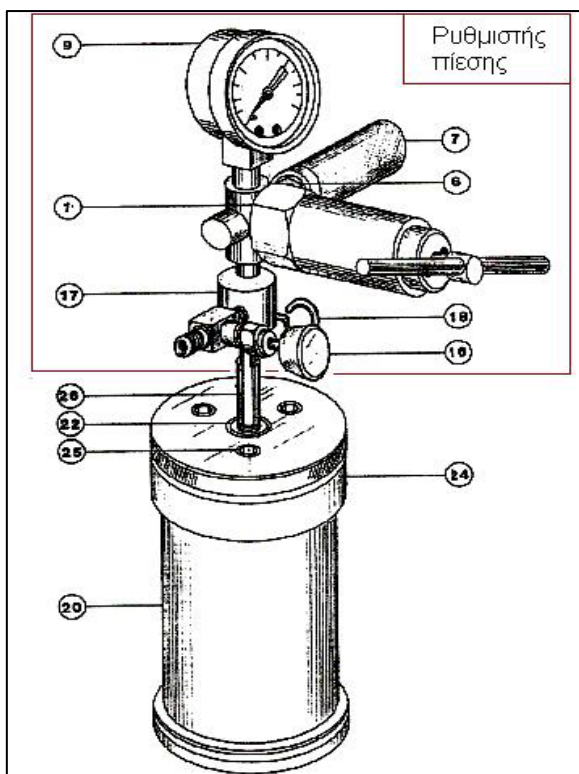
1. Καθορίζουμε την θερμοκρασία και την πίεση που πρόκειται να γίνει η δοκιμή από τον Πίνακα 5.3. Το κελί είναι αποσυναρμολογημένο όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.13.

2. Τοποθετούμε το δείγμα του ρευστού στο κελί γήρανσης και προσέχουμε ώστε να μην ξεχειλίσουμε το κελί. Αφήνουμε καθορισμένο χώρο για την διόγκωση του ρευστού (Πίνακας 5.3).
3. Τοποθετούμε το καπάκι ασφαλείας (22) και την μεταλλική ροδέλα (23).
4. Βιδώνουμε το εξωτερικό καπάκι του κελιού (24) και μετά βιδώνουμε τις 3 βίδες (25) με κλειδί Allen.
5. Τελευταία βιδώνουμε στο εξωτερικό καπάκι (24) την βαλβίδα του κελιού (26) σφιχτά, ώστε να μην διαφύγει ρευστό.
6. Πάνω στην βαλβίδα του κελιού τοποθετούμε τον ρυθμιστή πίεσης που έχουμε δανειστεί από την πρέσα Υψηλής Πίεσης – Υψηλής Θερμοκρασίας (HPHT) όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.14.
7. Συνδέουμε τον ρυθμιστή πίεσης με την πηγή πίεσης (φιάλη CO₂). Προσέχουμε ώστε ο ρυθμιστής να είναι κλειστός (η βάνα του τελείως ξεβιδωμένη).
8. Ξεβιδώνουμε ½ στροφή την βαλβίδα του κελιού (26), ώστε να επιτραπεί η είσοδος του αερίου πίεσης.
9. Ανοίγουμε την φιάλη CO₂ και αρχίζουμε να βιδώνουμε την βάνα του ρυθμιστή, μέχρι να δείξει την επιθυμητή πίεση.
10. Αφού το δοχείο αποκτήσει την πίεση που θέλουμε, κλείνουμε πάλι σφιχτά την βαλβίδα του κελιού (26) και το δοχείο είναι υπό πίεση.
11. Κλείνουμε την φιάλη CO₂ και ανοίγουμε την βαλβίδα εκτόνωσης αερίου (16) που βρίσκεται πάνω στον ρυθμιστή πίεσης. Το σύστημα έχει πλέον εκτονωθεί. Αφαιρούμε τον ρυθμιστή από το κελί γήρανσης.
12. Τοποθετούμε το κελί γήρανσης στο φούρνο και στην επιθυμητή θερμοκρασία.
13. Μετά το πέρας του χρόνου γήρανσης, αφήνουμε το κελί να ψυχθεί και περιμένουμε ώστε η θερμοκρασία του να μειωθεί κάτω από τους 130 °F (55 °C), ειδάλλως, υπάρχει φόβος για εγκαύματα.
14. Αφού το κελί είναι σε ασφαλή θερμοκρασία, ανοίγουμε την βαλβίδα εκτόνωσης (26) ώστε να διαφύγει το αέριο και μπορούμε πλέον να το αποσυναρμολογήσουμε.

15. Αρχικά ξεβιδώνουμε την βαλβίδα του κελιού (26) και τις 3 βίδες (25) με κλειδί Allen. Το εξωτερικό καπάκι μπορεί τώρα εύκολα να βγει.
16. Κάνουμε μια πρώτη εκτίμηση της κατάστασης του ρευστού και αναφέρουμε αν είναι πηκτό, πλαστικό, ρευστό ή σκληρό.



Σχήμα 5.13. Συναρμολόγηση κελιού γήρανσης



Σχήμα 5.14. Συνδεσμολογία κελιού και ρυθμιστή πίεσης

Πίνακας 5.3. Προτεινόμενοι όγκοι ρευστών και πιέσεις κελιών για γήρανση (Fann Instruments).

Aging Temperature		Water Vapor Pressure		Coefficient of Expansion for Water	Suggested Applied Pressure		Drilling Fluids Volume, Cell	
°F	°C	psi	kPa		psi	kPa	260 ml	500 ml
212	100	14.7	101	—	25	172	225	—
250	121	30	207	—	50	345	225	—
300	149	67	462	—	100	689	200	—
350	177	135	931	—	150	1034	200	—
400	205	247	1703	1.16	250	1724	—	350
450	232	423	2917	1.20	300	2068	—	350
500	260	680	4689	1.27	375	2586	—	350

6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται οι διαδικασίες επιλογής και επεξεργασίας των δειγμάτων λιγνίτη, η επιλογή του γεωτρητικού πολφού και τα πειράματα ρεολογίας και διήθησης.

6.1. Επεξεργασία δειγμάτων λιγνίτη

6.1.1. Εισαγωγή

Προκειμένου να μελετηθεί η ικανότητα βελτίωσης των γεωτρητικών πολφών με την προσθήκη λιγνίτη, από τις προδιαγραφές του ερευνητικού προγράμματος και σύμφωνα με την βιβλιογραφική έρευνα, επιλέχθηκαν δύο διαφορετικές συγκεντρώσεις λιγνίτη στον πολφό: 0,5% κ.ό. και 3,0 % κ.ό., καθώς ο λιγνίτης που χρησιμοποιείται σε ρευστά γεώτρησης είναι συνήθως 2,8 – 28 gr / lt [Gray & Darley (1980), Russel & Patel (1987), Firth (1993), Baroid].

6.1.2. Επιλογή των δειγμάτων λιγνίτη

Τα δείγματα λιγνίτη προέρχονται από τη Θεσσαλία και τη ευρύτερη περιοχή της Μακεδονίας – Θράκης. Από κάθε περιοχή συλλέχθηκαν οκτώ (8) δείγματα λιγνίτη διαφορετικών λιθοτύπων. Για την ευκολότερη χρήση των δειγμάτων χρησιμοποιούνται κωδικές ονομασίες. Έτσι τα δείγματα της Θεσσαλίας χαρακτηρίστηκαν με τον κωδικό TH_i ενώ για τη Μακεδονία – Θράκη, με τον MT_i. Στον Πίνακα 6.1 (α,β) παρουσιάζονται τα δείγματα, η ακριβής περιοχή προέλευσής τους καθώς και οι λιθοτύποι.

Πίνακας 6.1α. Δείγματα λιγνίτη από Θεσσαλία (Ι.Γ.Μ.Ε., 2003)

ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ	ΛΙΘΟΤΥΠΟΣ
(ΘΕΣΣΑΛΙΑ)		ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ
ΤΗ 1	ΞΥΝΙΑΔΑ (ΑΝΩ ΣΤΟΙΒΑΔΑ)	ΤΥΡΦΟ ΛΙΓΝΙΤΗΣ MATRIX, ΜΑΛΑΚΟΣ, ΑΡΓΙΛΟΥΧΟΣ
ΤΗ 2	ΞΥΝΙΑΔΑ (ΑΝΩ ΣΤΟΙΒΑΔΑ)	ΤΥΡΦΟ ΛΙΓΝΙΤΗΣ MATRIX, ΜΑΛΑΚΟΣ, ΑΡΓΙΛΟΥΧΟΣ
ΤΗ 3	ΞΥΝΙΑΔΑ	ΤΥΡΦΟ ΛΙΓΝΙΤΗΣ MATRIX, ΜΑΛΑΚΟΣ, ΑΡΓΙΛΟΥΧΟΣ
ΤΗ 4	ΑΛΜΥΡΟΣ	ΛΙΓΝΙΤΗΣ MATRIX ΜΑΥΡΟΣ & ΛΙΓΝΙΤΗΣ MATRIX ΜΕ ΦΥΤΙΚΑ ΥΠΟΛΛΕΙΜΑΤΑ, ΚΑΦΕ - ΜΑΥΡΟΣ
ΤΗ 5	ΑΜΟΥΡΙ - ΕΛΑΣΣΟΝΑ ΑΝΩ ΤΜΗΜΑ ΛΙΓΝ/ΡΙΑΣ	ΛΙΓΝΙΤΗΣ MATRIX, ΣΤΡΩΣΙΓΕΝΗΣ
ΤΗ 6	ΑΜΟΥΡΙ - ΕΛΑΣΣΟΝΑ ΚΑΤΩ ΤΜΗΜΑ ΛΙΓΝ/ΡΙΑΣ	ΛΙΓΝΙΤΗΣ MATRIX, ΣΤΡΩΣΙΓΕΝΗΣ
ΤΗ 7	ΔΟΜΕΝΙΚΟ - ΕΛΑΣΣΟΝΑ ΑΝΩ ΤΜΗΜΑ ΛΙΓΝ/ΡΙΑΣ	ΛΙΓΝΙΤΗΣ ΞΥΛΙΤΙΚΟΣ, ΧΡΩΜΑΤΟΣ ΚΑΦΕ
ΤΗ 8	ΔΟΜΕΝΙΚΟ - ΕΛΑΣΣΟΝΑ ΚΑΤΩ ΤΜΗΜΑ ΛΙΓΝ/ΡΙΑΣ	ΛΙΓΝΙΤΗΣ ΞΥΛΙΤΙΚΟΣ, ΜΕ ΦΥΤΙΚΑ ΥΠΟΛΛΕΙΜΑΤΑ

Πίνακας 6.1β. Δείγματα λιγνίτη από Μακεδονία - Θράκη (Ι.Γ.Μ.Ε., 2003)

ΔΕΙΓΜΑ	ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ	ΛΙΘΟΤΥΠΟΣ
ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ - ΘΡΑΚΗ		ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ
MT 1	ΔΡΑΜΑ ΑΝΩ ΤΜΗΜΑ ΛΙΓΝ/ΡΙΑΣ	ΤΥΡΦΗ, ΑΡΓΙΛΟΥΧΟΣ, ΜΑΥΡΟ ΧΡΩΜΑ
MT 2	ΔΡΑΜΑ ΜΕΣΑΙΟ ΤΜΗΜΑ ΛΙΓΝ/ΡΙΑΣ	ΤΥΡΦΗ, ΑΡΓΙΛΟΥΧΟΣ, ΜΑΥΡΟ ΧΡΩΜΑ. ΛΙΓΗ ΤΥΡΦΗ ΜΕ ΦΥΤΙΚΑ ΥΠΟΛΛΕΙΜΑΤΑ, ΚΑΦΕ ΧΡΩΜΑ
MT 3	ΔΡΑΜΑ	ΤΥΡΦΗ, ΑΡΓΙΛΟΥΧΟΣ, ΜΑΥΡΟ ΧΡΩΜΑ
MT 4	ΣΑΠΠΕΣ	ΛΙΓΝΙΤΗΣ MATRIX, ΣΤΡΩΣΙΓΕΝΗΣ, ΕΥΘΡΥΠΤΟΣ ΑΡΓΙΛΟΥΧΟΣ, ΜΑΥΡΟ ΧΡΩΜΑ
MT 5	ΣΑΠΠΕΣ	ΛΙΓΝΙΤΗΣ MATRIX, ΣΤΡΩΣΙΓΕΝΗΣ, ΑΡΓΙΛΟΥΧΟΣ. ΛΙΓΕΣ mm ΣΤΙΛΠΝΕΣ ΤΑΙΝΙΕΣ. ΛΙΓΑ ΞΥΛΙΤΙΚΑ ΘΡΑΥΣΜΑΤΑ
MT 6	ΣΑΠΠΕΣ	ΛΙΓΝΙΤΗΣ MATRIX, ΣΤΡΩΣΙΓΕΝΗΣ, ΛΙΓΟΤΕΡΟ ΑΡΓΙΛΟΥΧΟΣ ΑΠΟ MT 4 & MT 5. ΛΙΓΕΣ mm ΣΤΙΛΠΝΕΣ ΤΑΙΝΙΕΣ. ΛΙΓΑ ΞΥΛΙΤΙΚΑ ΘΡΑΥΣΜΑΤΑ
MT 7	ΚΥΠΡΙΝΟΣ - ΟΡΕΣΤΙΑΔΑ ΑΝΩ ΤΜΗΜΑ ΛΙΓΝ/ΡΙΑΣ	ΛΙΓΝΙΤΗΣ MATRIX, ΣΤΡΩΣΙΓΕΝΗΣ, ΕΥΘΡΥΠΤΟΣ ΚΑΤΑ ΘΕΣΕΙΣ. ΣΚΛΗΡΟΣ, ΑΡΓΙΛΟΥΧΟΣ, ΜΑΡΜΑΡΥΓΙΑΣ. ΜΑΥΡΟ ΧΡΩΜΑ
MT 8	ΚΥΠΡΙΝΟΣ - ΟΡΕΣΤΙΑΔΑ ΚΑΤΩ ΤΜΗΜΑ ΛΙΓΝ/ΡΙΑΣ	ΛΙΓΝΙΤΗΣ MATRIX, ΣΤΡΩΣΙΓΕΝΗΣ, ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΣ ΚΑΤΑ ΘΕΣΕΙΣ. ΜΑΡΜΑΡΥΓΙΑΣ. ΜΑΥΡΟ ΧΡΩΜΑ

6.1.3. Διαδικασία προετοιμασίας δειγμάτων λιγνίτη

Τα αρχικά δείγματα λιγνίτη ήταν αδρόκοκκα, με μέγιστο μέγεθος τα 2 cm. Προκειμένου να χρησιμοποιηθούν σε πολφούς γεωτρήσεων, τα δείγματα προετοιμάζονται στο εργαστήριο. Η προετοιμασία περιλαμβάνει καθαρισμό, ξήρανση, λειοτρίβηση, επεξεργασία με διάλυμα NaOH 1M [Patel (1995), Russel & Patel (1987), Firth (1993), Baroid], εκ νέου ξήρανση και λειοτρίβηση.

Η καυστικοποίηση του λιγνίτη έχει διπλό ρόλο. Αφενός αυξάνει την αλκαλικότητα του πολφού σε τιμές $9 \leq \text{pH} \leq 12$ και αφετέρου αυξάνει την διαλυτότητα του λιγνίτη. Η καυστικοποίηση του λιγνίτη γίνεται με NaOH 1M, σε αναλογία υγρού/στερεού = 5/1.

Τα στάδια επεξεργασίας των δειγμάτων έχουν ως εξής:

1. Καθαρισμός των αρχικών δειγμάτων λιγνίτη.
2. Ξήρανση στους 105 °C.
3. Θραύση αρχικών δειγμάτων σε σφαιρόμυλο για μείωση μεγέθους κόκκων κάτω του 1 mm.
4. Λειοτρίβηση κάθε δείγματος σε πλανητάριο (σφαιρόμυλο) σε μέγεθος μικρότερο των 75μm για να διευκολυνθεί η καυστικοποίηση.
5. Επεξεργασία του λιγνίτη με υδατικό διάλυμα καυστικού νατρίου 1M (καυστικοποίηση του λιγνίτη).
6. Ξήρανση των δειγμάτων λιγνίτη στους 70 °C.
7. Λειοτρίβηση του καυστικοποιημένου λιγνίτη σε πλανητάριο σε μέγεθος μικρότερο των 75μm, όπως περιγράφεται από διεθνή πρότυπα (S&B Industrial, API 13A, 1995).

Η θραύση και η λειοτρίβηση των δειγμάτων λιγνίτη έγιναν στο εργαστήριο Εμπλουτισμού Μεταλλευμάτων, του τμήματος Μηχ.Ο.Π.

6.1.4. Επιλογή των συστατικών του πολφού γεώτρησης

Η επιλογή των συστατικών του πολφού γεώτρησης ήταν μια ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία. Βάσει της βιβλιογραφικής έρευνας, για τα συστατικά των ρευστών γεώτρησης και με δεδομένη τη χρήση ρευστών με βάση το νερό (Water Based Muds, 2^ο & 3^ο Κεφάλαιο) λόγω της ευκολίας χρήσης αλλά και του χαμηλότερου κόστους παρασκευής και γνωρίζοντας την τοξικότητα των ρευστών OBM, επιλέχθηκαν τα βασικά συστατικά ενός πολφού μπεντονίτη (fresh water mud), που είναι:

1. Νερό (απιονισμένο)
2. Μπεντονίτης 6,42 % κ.ό. (API 13A)
3. Διάλυμα NaOH 1M για ρύθμιση του pH, καθώς τα ρευστά γεώτρησης είναι αλκαλικά με pH 9 – 12.
4. Καυστικοποιημένος λιγνίτης

6.1.5. Κωδικοποίηση των πολφών γεώτρησης

Τα συστατικά του πολφού κωδικοποιούνται ώστε να υπάρχει ταύτιση με τις ονομασίες των δειγμάτων λιγνίτη και για ευκολότερη κατανόηση και σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Διακρίνονται δύο βασικά μέρη:

1. Ο πολφός βάσης, που θα ονομάζεται με το γράμμα **A**, αποτελείται από:

Νερό,
Μπεντονίτη 6,42% (API) } **A**

2. Προσθήκη καυστικοποιημένου λιγνίτη από κάθε δείγμα σε αναλογίες 0,5% και 3% κ.ό, ονομάζεται με το γράμμα **i** (όπου **i** = αριθμός των δειγμάτων, TH1,2...).

Ο πολφός θα είναι το άθροισμα των επιμέρους συστατικών **A + i**. Για παράδειγμα, ο λιγνίτης με κωδικό TH3 και ο πολφός βάσης **A** συνιστούν τον πολφό με κωδικό **A + TH3**.

6.1.5.1. Πρότυποι πολφοί γεωτρήσεων

Προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τους πολφούς με την προσθήκη ελληνικού λιγνίτη, έγιναν αρχικά μετρήσεις στη ρεολογία και την διήθηση σε πολφό μπεντονίτη 6,42% κ.β. καθώς και σε πολφό μπεντονίτη με προσθήκη εμπορικού προϊόντος λιγνίτη της εταιρείας M

– I Drilling, με εμπορική ονομασία Caustilig® (κωδικός Γ) στις συγκεντρώσεις λιγνίτη που αναφέρθηκαν παραπάνω.

6.1.6. Ωρίμανση πολφών γεωτρήσεων

Δύο είναι οι κύριοι τρόποι ωρίμανσης των πολφών γεωτρήσεων:

1. Ο συνήθης τρόπος **ενυδάτωσης** [API 13A (1993)] των πολφών γεωτρήσεων γίνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, με την πάροδο 16 ωρών μετά την παρασκευή τους.
2. Ένας δεύτερος τρόπος είναι η **στατική γήρανση** των πολφών σε ειδικά δοχεία (κελιά γήρανσης) όπου ο πολφός ωριμάζει στατικά σε θερμοκρασία 177 °C μέσα σε φούρνο για διάστημα 16 ωρών, μετά την παρασκευή του. Οι μετρήσεις που γίνονται σε πολφούς που έχουν υποστεί στατική γήρανση προσομοιώνουν τη συμπεριφορά των πολφών με λιγνίτη που παραμένουν στατικοί στις θερμοκρασίες που επικρατούν σε βαθιές γεωτρήσεις.
3. Υπάρχει και ένας τρίτος τρόπος ωρίμανσης που είναι η **δυναμική γήρανση**, όπου ο πολφός ωριμάζει σε φούρνο για διάστημα 16 ωρών σε θερμοκρασία 177 °C, σε κελί γήρανσης που αναδεύεται ελαφρά (Hot rolling).

Η σύγκριση των πολφών του ίδιου δείγματος αλλά διαφορετικού τρόπου ωρίμανσης βοηθά στην κατανόηση της συμπεριφοράς του πολφού με λιγνίτη σε ατμοσφαιρικές θερμοκρασίες (25 °C) καθώς και της συμπεριφοράς του όταν παραμένει στο βάθος του φρέατος σε υψηλότερες θερμοκρασίες (177 °C). Η μελέτη αυτή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη καθώς τα ρευστά γεώτρησης παραμένουν για ένα χρονικό διάστημα ακίνητα μέσα στο φρέαρ, όταν εκτελούνται εργασίες εισαγωγής – εξαγωγής της διατρητικής στήλης. Θεωρώντας μια κανονική γεωθερμική βαθμίδα (33 °C ανά 1000 m), η θερμοκρασία των 177 °C αντιστοιχεί σε βάθος 5000 m, εκτός και αν πρόκειται για γεωθερμικό ταμιευτήρα, όπου, τέτοιες θερμοκρασίες

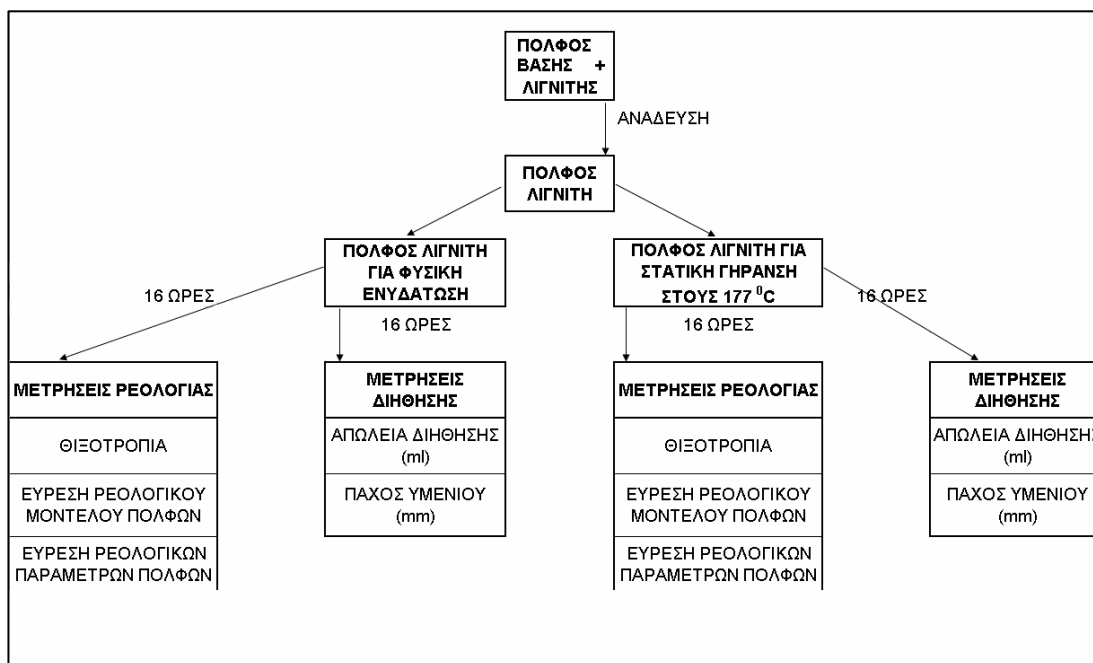
συναντώνται σε μικρότερα βάθη, 1000m (Karitsas et al., 2003). Και στις δύο περιπτώσεις, είναι σημαντική η μελέτη των ρευστών σε αυτές τις θερμοκρασίες.

6.1.7. Προετοιμασία γεωτρητικών πολφών με λιγνίτη 0.5% και 3% κ.ό.

1. Σε 1000ml απιονισμένου νερού προστίθενται 64,2gr μπεντονίτη κοκκομετρίας 75μm ώστε να δημιουργηθεί ο πολφός βάσης (A). (Η αναλογία μπεντονίτη στον πολφό καθώς και η διαδικασία ανάμιξης και ωρίμανσης των πολφών γίνεται σύμφωνα με την διαδικασία που προτείνει το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Πετρελαίου (American Petroleum Institute, API) API 13A).
2. Στην βάση του πολφού προστίθενται 5 gr (0,5%) ή 30 gr καυστικοποιημένου λιγνίτη (3,0 %) (B_i).
3. Το μίγμα αναδεύεται σε αναδευτήρα 11000 στροφών / λεπτό (rpm) για 5 λεπτά.
4. Η ανάδευση σταματά και καθαρίζονται τα τοιχώματα του δοχείου.
5. Η ανάδευση συνεχίζεται για 15 ακόμη λεπτά.
6. Ο πολφός αφήνεται για ωρίμανση, είτε για πλήρη ενυδάτωση σε θερμοκρασία δωματίου για 16 ώρες σε κλειστά δοχεία είτε για στατική γήρανση στους 177 °C μέσα σε φούρνο για διάστημα 16 ωρών σε κελιά γήρανσης, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.
7. Μετά την ωρίμανση, ο πολφός αναδεύεται για 5 λεπτά και είναι έτοιμος για μετρήσεις ρεολογίας και διήθησης:
 - 7.α. Ο πολφός που ωρίμασε με ενυδάτωση, μεταφέρεται στο ιξωδόμετρο και στη πρέσα διήθησης, σημειώνεται η θερμοκρασία δοκιμής και μετρώνται τα ρεολογικά και διηθητικά του χαρακτηριστικά.
 - 7.β. Ο πολφός που υπέστη στατική γήρανση πρέπει πρώτα να επανέλθει σε θερμοκρασία δωματίου προτού αναδευτεί και μετρηθούν οι ρεολογικές και διηθητικές του ιδιότητες.

8. Γίνεται η μέτρηση του pH των δειγμάτων των πολφών (το pH είναι στα όρια 8 – 11) με τη βοήθεια μετρητή pH της εταιρείας Inolab.
9. Γίνεται μέτρηση διηθητικών χαρακτηριστικών
10. Γίνεται μέτρηση ρεολογικών χαρακτηριστικών

Στο ακόλουθο σχεδιάγραμμα (Σχήμα 6.1) παρίσταται η διαδικασία προετοιμασίας των πολφών και οι μετρήσεις που ακολουθούν.



Σχήμα 6.1. Διαδικασία προετοιμασίας γεωτρητικών πολφών και είδος μετρήσεων.

6.2. Αποτελέσματα μετρήσεων

6.2.1. Μετρήσεις διηθητικών χαρακτηριστικών πολφών

Η μέτρηση των διηθητικών χαρακτηριστικών των πολφών γεωτρήσεων έγινε με την πρέσα διήθησης Χαμηλής Πίεσης – Χαμηλής Θερμοκρασίας (LPLT, 5^ο Κεφάλαιο, § 5.1.2). Δημιουργήθηκαν πολφοί γεώτρησης δύο συγκεντρώσεων λιγνίτη στον πολφό, από κάθε περιοχή

εξόρυξης του λιγνίτη: 0,5% και 3,0% κ.ό. Οι πολφοί αυτοί ωρίμασαν σε θερμοκρασία δωματίου για 16 ώρες (ενυδάτωση) και σε φούρνο στους 177 °C (στατική γήρανση) επίσης για 16 ώρες. Η ίδια διαδικασία ωρίμανσης ακολουθήθηκε για τον πολφό βάσης (νερό + μπεντονίτης + 0% λιγνίτης) που αποτελεί τον πολφό σύγκρισης – ο οποίος μετρήθηκε δύο φορές για την επιβεβαίωση των μετρήσεων – καθώς και τον πολφό που περιέχει εμπορικό λιγνίτη. Στο Σχήμα 6.2. παρουσιάζονται τα πειράματα για τη μελέτη των διηθητικών χαρακτηριστικών, κατηγοριοποιημένα ανά περιοχή δείγματος και συγκέντρωση λιγνίτη στον πολφό, για τους πολφούς που έχουν ενυδατωθεί. Στο Σχήμα 6.3. γίνεται η αντίστοιχη παρουσίαση των δειγμάτων που έχουν ωριμάσει με στατική γήρανση. Επειδή η μέτρηση των πολφών που ωρίμασαν με στατική γήρανση έγινε μετά την μέτρηση των πολφών που είχαν ωριμάσει με ενυδάτωση, τα πειράματα των πολφών είναι μικρότερο καθώς ο γνώμονας ήταν να εξεταστούν πολφοί που έδωσαν πολύ θετικά αποτελέσματα όταν ενυδατώθηκαν, διαφορετικών λιθότυπων και διαφορετικής περιοχής προέλευσης. Σύμφωνα λοιπόν με το Σχήμα 6.3. μελετήθηκαν:

- **Από την περιοχή της Θεσσαλίας:** από τη Ξυνιάδα (δείγματα TH1, TH2, TH3), όπου λαμβάνεται τυρφολιγνίτης, επιλέχθηκε ως αντιπροσωπευτικό το δείγμα TH3. Από τον Αλμυρό (δείγμα TH4), επιλέχθηκε αναπόφευκτα το δείγμα TH4 καθώς μοναδικό. Από το Αμούρι (TH5, TH6) εξετάστηκαν και τα δύο δείγματα. Από το Δομένικο (δείγματα TH7, TH8), όπου λαμβάνεται ξυλίτης, εξετάστηκαν επίσης και τα δύο δείγματα.
- **Από την περιοχή της Μακεδονίας – Θράκης:** από τη Δράμα (δείγματα MT1, MT2, MT3), όπου λαμβάνεται τύρφη, εξετάστηκαν όλα τα δείγματα. Από τις Σάππες (δείγματα MT4, MT5, MT6), όπου λαμβάνεται λιγνίτης, επιλέχθηκαν τα δείγματα MT4 και MT6. Τέλος από τον Κυπρίνο (δείγματα MT7 και MT8), όπου λαμβάνεται λιγνίτης, επιλέχθηκε ως αντιπροσωπευτικό το MT7.

Με την πρέσα διήθησης μετρήθηκε η απώλεια υγρού που περνά μέσα από διηθητικό χαρτί και το πάχος του υμενίου της λάσπης στο χαρτί διήθησης.

ΔΙΗΘΗΣΗ ΣΕ ΠΡΕΣΑ LPLT					
			ΠΟΛΦΟΣ ΒΑΣΗΣ (Α)	Χ	
			ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΛΙΓΝΙΤΗ ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ		
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΛΙΓΝΙΤΗ	ΠΟΛΦΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ		0,5 % κ.ό.	3,0 % κ.ό.
			A + Γ (ΕΜΠΟΡΙΚΟΣ ΛΙΓΝΙΤΗΣ)	Χ	Χ
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΛΙΓΝΙΤΗ ΑΠΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑ	ΤΗ 1	ΤΥΡΦΗ	A + ΤΗ 1	Χ	Χ
	ΤΗ 2	ΤΥΡΦΗ	A + ΤΗ 2	Χ	Χ
	ΤΗ 3	ΤΥΡΦΗ	A + ΤΗ 3	Χ	Χ
	ΤΗ 4	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	A + ΤΗ 4	Χ	Χ
	ΤΗ 5	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	A + ΤΗ 5	Χ	Χ
	ΤΗ 6	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	A + ΤΗ 6	Χ	Χ
	ΤΗ 7	ΕΥΛΙΤΗΣ	A + ΤΗ 7	Χ	Χ
	ΤΗ 8	ΕΥΛΙΤΗΣ	A + ΤΗ 8	Χ	Χ
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΛΙΓΝΙΤΗ ΑΠΟ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ - ΘΡΑΚΗ	ΜΤ 1	ΤΥΡΦΗ	A + ΜΤ 1	Χ	Χ
	ΜΤ 2	ΤΥΡΦΗ	A + ΜΤ 2	Χ	Χ
	ΜΤ 3	ΤΥΡΦΗ	A + ΜΤ 3	Χ	Χ
	ΜΤ 4	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	A + ΜΤ 4	Χ	Χ
	ΜΤ 5	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	A + ΜΤ 5	Χ	Χ
	ΜΤ 6	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	A + ΜΤ 6	Χ	Χ
	ΜΤ 7	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	A + ΜΤ 7	Χ	Χ
	ΜΤ 8	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	A + ΜΤ 8	Χ	Χ

Σχήμα 6.2. Πειράματα διήθησης για πολφούς που έχουν ωριμάσει με την διαδικασία της ενυδάτωσης.

Ο στόχος της μελέτης των διηθητικών χαρακτηριστικών των πολφών είναι διπλός: αφενός να συγκριθούν τα αποτελέσματα των πολφών που περιέχουν λιγνίτη, με τον πολφό βάσης και με τον εμπορικό λιγνίτη και αφετέρου να συγκριθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τους πολφούς με λιγνίτη και να συσχετιστούν με τον λιθότυπο και την περιοχή εξόρυξής τους.

ΔΙΗΘΗΣΗ ΣΕ ΠΡΕΣΑ LPLT					
			ΠΟΛΦΟΣ ΒΑΣΗΣ (Α)	Χ	
			ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΛΙΓΝΙΤΗ ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ		
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΛΙΓΝΙΤΗ	ΠΟΛΦΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	0,5 % κ.ό.	3,0 % κ.ό.	
		Α + Γ (ΕΜΠΟΡΙΚΟΣ ΛΙΓΝΙΤΗΣ)	Χ	Χ	
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΛΙΓΝΙΤΗ ΑΠΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑ	ΤΗ 3	ΤΥΡΦΗ	Α + ΤΗ 3	Χ	Χ
	ΤΗ 4	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	Α + ΤΗ 4	Χ	Χ
	ΤΗ 5	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	Α + ΤΗ 5	Χ	Χ
	ΤΗ 6	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	Α + ΤΗ 6	Χ	Χ
	ΤΗ 7	ΕΥΛΙΤΗΣ	Α + ΤΗ 7	Χ	Χ
	ΤΗ 8	ΕΥΛΙΤΗΣ	Α + ΤΗ 8	Χ	Χ
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΛΙΓΝΙΤΗ ΑΠΟ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ - ΘΡΑΚΗ	ΜΤ 1	ΤΥΡΦΗ	Α + ΜΤ 1	Χ	Χ
	ΜΤ 2	ΤΥΡΦΗ	Α + ΜΤ 2	Χ	Χ
	ΜΤ 3	ΤΥΡΦΗ	Α + ΜΤ 3	Χ	Χ
	ΜΤ 4	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	Α + ΜΤ 4	Χ	Χ
	ΜΤ 6	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	Α + ΜΤ 6	Χ	Χ
	ΜΤ 7	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	Α + ΜΤ 7	Χ	Χ

Σχήμα 6.3. Πειραμάτα διήθησης για πολφούς που έχουν ωριμάσει με την διαδικασία της στατικής γήρανσης.

Δημιουργήθηκαν διαγράμματα με διάκριση το τρόπο της ωρίμανσης των πολφών. Έτσι, για κάθε τρόπο ωρίμανσης διακρίνονται οι ακόλουθες συσχετίσεις:

1. Γίνεται αρχικά, σύγκριση της απώλειας διήθησης για κάθε συγκέντρωση λιγνίτη στον πολφό (0,5%, 3,0%) ξεχωριστά. Προκύπτουν δύο διαγράμματα (ένα για κάθε συγκέντρωση) όπου συγκρίνεται το ποσοστό βελτίωσης της διήθησης που οφείλεται στην ποσότητα προσθήκης του λιγνίτη, σε σχέση με τον πολφό βάσης.

2. Γίνεται σύγκριση της απώλειας διήθησης μεταξύ των δύο συγκεντρώσεων λιγνίτη στον πολφό (0,5% και 3,0%). Στο διάγραμμα που προκύπτει συγκρίνεται το ποσοστό βελτίωσης της διήθησης που οφείλεται στην διαφορετική ποσότητα προσθήκης του λιγνίτη.

Αφού ερμηνευθούν τα αποτελέσματα για κάθε τρόπο ωρίμανσης ξεχωριστά, γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν και από τους δύο τρόπους ωρίμανσης, συγκεντρωτικά. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων και η ερμηνεία τους ακολουθούν στο 7^ο Κεφάλαιο.

6.2.2. Μετρήσεις ρεολογίας

Ο στόχος της μελέτης των ρεολογικών χαρακτηριστικών των πολφών είναι διπλός: αφενός να μελετηθεί η θιξοτροπική συμπεριφορά των διαφόρων πολφών και αφετέρου να βρεθούν τα κατάλληλα ρεολογικά μοντέλα και οι ρεολογικές παράμετροι που καθορίζουν τη συμπεριφορά των πολφών γεωτρήσεων.

6.2.2.1. Βαθμονόμηση του ιξωδομέτρου

Η σωστή λειτουργία του ιξωδομέτρου, βασίζεται στη διατήρηση της σωστής τάσης του ελατηρίου (δηλαδή των ιδιοτήτων του) και τη σωστή ταχύτητα του ρότορα. Οι διαδικασίες ελέγχου ελατηρίου και ταχύτητας δίνονται από τον εκάστοτε κατασκευαστή. Ο έλεγχος της αξιοπιστίας του οργάνου γίνεται με τη μέτρηση νευτώνειου ρευστού γνωστού ιξώδους (π.χ. υγρά σιλικόνης, διαλύματα ζάχαρης, έλαια ή πετρέλαια γνωστού ιξώδους σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες).

Για την διαβεβαίωση της σωστής λειτουργίας του οργάνου και προτού ξεκινήσουν τα πειράματα, έγινε εκ νέου βαθμονόμηση (calibration) του ιξωδομέτρου, χρησιμοποιώντας 2 ρευστά προτύπου ιξώδους της εταιρείας Brookfield. Τα ρευστά προτύπου ιξώδους είναι νευτώνεια με ιξώδη 95 cP και 493 cP αντίστοιχα σε θερμοκρασία 25^οC. Στα ρευστά αυτά ακολουθήθηκε η

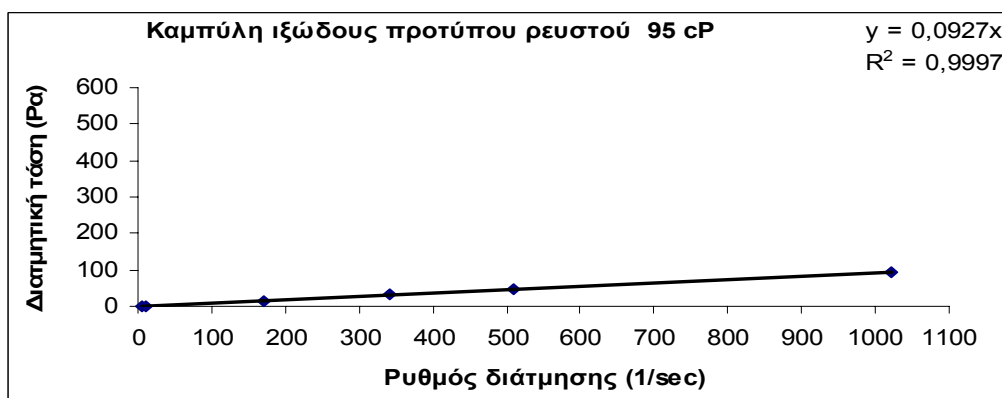
καθιερωμένη διαδικασία (API 13B, 2003) μέτρησης νευτώνειων ρευστών. Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.4 και 6.5. Από τα διαγράμματα προκύπτει ότι το μετρούμενο ιξώδες είναι:

Πρότυπη τιμή	Μετρούμενη τιμή	Σφάλμα %
95 cP	92.69 cP	2.43
493 cP	481.63 cP	2.30

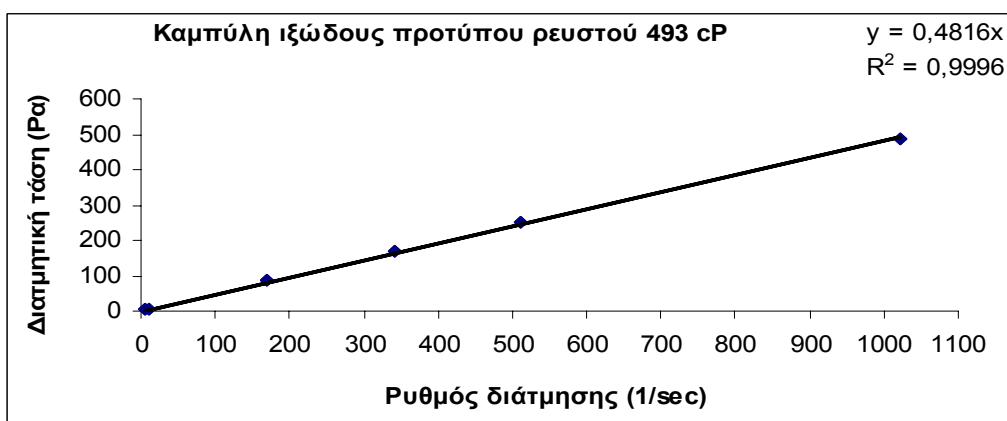
Το σφάλμα προκύπτει από τον λόγο:

$$\frac{\text{Πρότυπη τιμή} - \text{Μετρούμενη τιμή}}{\text{Πρότυπη τιμή}}$$

Το ποσοστό του σφάλματος είναι σε ανεκτά όρια για πολύ μεγάλο εύρος τιμών του ιξώδους.



Σχήμα 6.4. Καμπύλη ιξώδους ρευστού 95 cP.



Σχήμα 6.5. Καμπύλη ιξώδους ρευστού 493 cP.

6.2.2.2. Μετρήσεις ρεολογικών χαρακτηριστικών πολφών

Η μελέτη της θιξοτροπικής συμπεριφοράς των δειγμάτων έγινε σε δύο θερμοκρασίες, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ήτοι 25 °C (77 °F) και σε θερμοκρασία 65 °C (150 °F). Η σύγκριση στις δύο θερμοκρασίες στοχεύει στην διερεύνηση της συμπεριφοράς των ρεολογικών παραμέτρων των πολφών, καθώς είναι γνωστό ότι μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία. Στο Σχήμα 6.6. παρουσιάζονται τα στοιχεία των πειραμάτων για τη μελέτη της ρεολογίας, κατηγοριοποιημένα ανά περιοχή δείγματος, συγκέντρωση λιγνίτη στον πολφό και θερμοκρασία δοκιμής, για τους πολφούς που έχουν ενυδατωθεί. Στο Σχήμα 6.7. γίνεται η αντίστοιχη παρουσίαση των δειγμάτων που έχουν υποστεί στατική γήρανση.

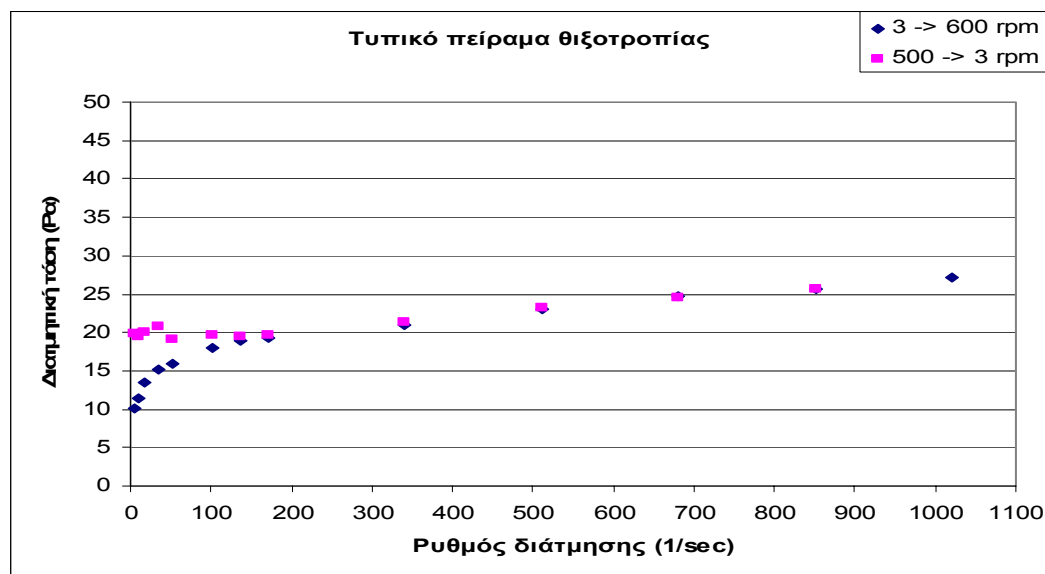
				ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΛΙΓΝΙΤΗ ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ			
				0,5 % κ.ό.		3,0 % κ.ό.	
				ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ		ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ	
				25 °C	65 °C	25 °C	65 °C
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ		ΤΥΠΟΣ ΛΙΓΝΙΤΗ	ΠΟΛΦΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ				
			ΠΟΛΦΟΣ ΒΑΣΗΣ (A)	X	X	X	X
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΛΙΓΝΙΤΗ ΑΠΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑ	TH 1	ΤΥΡΦΗ	A + TH 1	X	X	X	X
	TH 2	ΤΥΡΦΗ	A + TH 2	X	X	X	X
	TH 3	ΤΥΡΦΗ	A + TH 3	X	X	X	X
	TH 4	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	A + TH 4	X	X	X	X
	TH 5	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	A + TH 5	X	X	X	X
	TH 6	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	A + TH 6	X	X	X	X
	TH 7	ΕΥΛΙΤΗΣ	A + TH 7	X	X	X	X
	TH 8	ΕΥΛΙΤΗΣ	A + TH 8	X	X	X	X
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΛΙΓΝΙΤΗ ΑΠΟ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ - ΘΡΑΚΗ	MT 1	ΤΥΡΦΗ	A + MT 1	X	X	X	X
	MT 2	ΤΥΡΦΗ	A + MT 2	X	X	X	X
	MT 3	ΤΥΡΦΗ	A + MT 3	X	X	X	X
	MT 4	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	A + MT 4	X	X	X	X
	MT 5	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	A + MT 5	X	X	X	X
	MT 6	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	A + MT 6	X	X	X	X
	MT 7	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	A + MT 7	X	X	X	X
	MT 8	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	A + MT 8	X	X	X	X

Σχήμα 6.6. Συνοπτικός πίνακας πειραμάτων θιξοτροπίας για πολφούς που έχουν ωριμάσει με την διαδικασία της ενυδάτωσης.

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΛΙΓΝΙΤΗ ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ					
				3,0 % κ.δ.	
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΛΙΓΝΙΤΗ	ΠΟΛΦΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ		
			25 °C	65 °C	
ΠΟΛΦΟΣ ΒΑΣΗΣ (Α)			Χ	Χ	
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ	ΤΗ 3	ΤΥΡΦΗ	Α + ΤΗ 3	Χ	Χ
	ΤΗ 4	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	Α + ΤΗ 4	Χ	Χ
	ΤΗ 7	ΞΥΛΙΤΗΣ	Α + ΤΗ 7	Χ	Χ
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ - ΘΡΑΚΗΣ	ΜΤ 2	ΤΥΡΦΗ	Α + ΜΤ 2	Χ	Χ
	ΜΤ 4	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	Α + ΜΤ 4	Χ	Χ
	ΜΤ 7	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	Α + ΜΤ 7	Χ	Χ

Σχήμα 6.7. Συνοπτικός πίνακας πειραμάτων θιξοτροπίας για πολφούς με λιγνίτη 3,0% που έχουν ωριμάσει με την διαδικασία της στατικής γήρανσης.

Σύμφωνα με την θεωρία (3^ο Κεφάλαιο, § 3.2.7 και 5^ο Κεφάλαιο, § 5.2.6) στα πειράματα θιξοτροπίας εκτελείται κυκλική δοκιμή: γραμμική αύξηση του ρυθμού διάτμησης από το μηδέν σε μια μέγιστη επιλεγόμενη τιμή και επαναφορά του ρυθμού διάτμησης στην μηδενική τιμή. Το διάγραμμα που προκύπτει είναι όπως του Σχήματος 6.8.



Σχήμα 6.8. Τυπικό διάγραμμα πειράματος θιξοτροπίας

Διακρίνονται οι μετρήσεις που λαμβάνονται κατά την άνοδο του ρυθμού διάτμησης (0 → 600 rpm) με μαύρο χρώμα και οι μετρήσεις κατά την κάθοδο (500 → 3 rpm) με γκρι χρώμα. Στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται ότι στους υψηλούς ρυθμούς διάτμησης το υλικό δεν εμφανίζει θιξοτροπική συμπεριφορά (τα σημεία μέτρησης ανόδου και καθόδου συμπίπτουν), όμως σε ρυθμούς διάτμησης μικρότερους των 150 sec⁻¹ το υλικό εμφανίζει θιξοτροπία και μάλιστα αρνητική κατά την κάθοδο.

Για να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων θιξοτροπίας που έγιναν για τους πολφούς γεωτρήσεων, βρέθηκε ένας δείκτης που περιγράφει ποσοτικά την θιξοτροπική συμπεριφορά του κάθε πολφού. Ο δείκτης αυτός, που στο εξής θα καλείται και δείκτης θιξοτροπίας, προκύπτει από το εμβαδόν που εσωκλείεται μεταξύ των δύο καμπυλών και έχει διαστάσεις Pa / sec. Κάνοντας μια ανάλυση των μονάδων προκύπτει:

$$Pa \cdot sec^{-1} = \frac{Nt}{m^2 \cdot sec} = \frac{Nt \cdot m}{m^3 \cdot sec} = \left(\frac{Nt \cdot m}{sec} \right) \cdot \left(\frac{1}{m^3} \right) = \frac{Watt}{m^3} \quad (6.1)$$

δηλαδή ο δείκτης θιξοτροπίας είναι ένας δείκτης ισχύος ανά μονάδα όγκου και αποτελεί ένα μέτρο της ισχύος που δαπανάται για την μεταβολή του ιξώδους του ρευστού με την μεταβολή του ρυθμού διάτμησης. Όσο πιο μεγάλη η τιμή του, τόσο πιο θιξοτροπικό είναι ένα υλικό και άρα τόσο πιο δύσκολα μειώνεται το ιξώδες του με τον ρυθμό διάτμησης.

Για την μελέτη της θιξοτροπίας, δημιουργήθηκαν διαγράμματα με αρχική διάκριση τον τρόπο ωρίμανσης των πολφών. Ακολούθως γίνεται η διάκριση με το ποσοστό λιγνίτη στους πολφούς και τέλος ανάλογα με την θερμοκρασία δοκιμής. Έτσι, διακρίνονται οι ακόλουθες συσχετίσεις:

1. Γίνεται αρχικά σύγκριση της θιξοτροπίας για κάθε συγκέντρωση λιγνίτη στον πολφό (0,5%, 3,0%) ξεχωριστά. Προκύπτουν δύο διαγράμματα (ένα για κάθε συγκέντρωση) όπου συγκρίνεται η θιξοτροπία των πολφών με τις δύο θερμοκρασίες δοκιμής.

2. Γίνεται σύγκριση της θιξοτροπίας για κάθε θερμοκρασία δοκιμής ξεχωριστά. Προκύπτουν δύο διαγράμματα (ένα για κάθε θερμοκρασία) όπου συγκρίνεται η θιξοτροπία των δύο συγκεντρώσεων λιγνίτη στους πολφούς.

Για τους πολφούς που έχουν ωριμάσει με γήρανση, γίνεται σύγκριση της θιξοτροπίας στις δύο θερμοκρασίες δοκιμής, για πολφούς με συγκέντρωση λιγνίτη 3% κ.ό.

Για την εύρεση των κατάλληλων ρεολογικών μοντέλων των πολφών, γίνεται ανάλυση των δεδομένων που προκύπτουν από τα πειράματα ρεολογίας και εύρεση των ρεολογικών παραμέτρων των πολφών. Τα δεδομένα που προκύπτουν από κάθε ιξωδομέτρηση είναι της μορφής (ω_i, T_i). Σκοπός της επεξεργασίας τους είναι η διαπίστωση σε ποιο ρεολογικό μοντέλο ταιριάζουν. Για να διαπιστώσουμε ποιο μοντέλο περιγράφει ένα συγκεκριμένο ρευστό πρέπει να ελέγξουμε την προσαρμογή των δεδομένων σε κάθε μοντέλο και να επιλέξουμε τη βέλτιστη.

Η μελέτη των ρεολογικών παραμέτρων των πολφών έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού Statistica, στο οποίο εισάγονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και γίνεται γραμμική – μη γραμμική παλινδρόμηση προκειμένου να βρεθεί το μοντέλο που προσαρμόζει βέλτιστα και καλύπτει όλα τα πειραματικά αποτελέσματα. Στις μετρήσεις που έγιναν διαπιστώθηκε ότι το ρεολογικό μοντέλο που περιγράφει με τον βέλτιστο τρόπο τα χαρακτηριστικά των πολφών είναι μη – νευτώνειο και μάλιστα ο συνδυασμός των Bingham – Plastic & Power Law. Το μοντέλο αυτό ονομάζεται Herschel – Buckley και η καμπύλη προσαρμογής είναι εκθετικού τύπου που τέμνει τον άξονα $\dot{\gamma}\dot{\gamma}'$ σε ένα σημείο και η ρεολογική εξίσωση είναι:

$$\tau = \tau_y + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (6.2)$$

όπου:

τ_y = τάση διολίσθησης (Pa)

K = οδηγός συνάφειας (Pa.sⁿ)

n = οδηγός ροϊκής συμπεριφοράς

Το μοντέλο αυτό είναι το γενικευμένο μη – νευτώνειο μοντέλο, από το οποίο προκύπτουν τα υπόλοιπα, είτε είναι πλαστικά Bingham είτε είναι Power Law είτε νευτώνεια:

- Για $n = 1$, η Εξ. 6.1 γίνεται $\tau = \tau_y + \mu_p \cdot \gamma$ (πλαστικό Bingham)
- Για $\tau_y = 0$, η Εξ. 6.1 γίνεται $\tau = K \cdot \gamma^n$ (Power Law)
- Για $\tau_y = 0$ και $n = 0$, η Εξ. 6.1. γίνεται $\tau = \mu \cdot \gamma$ (Νευτώνειο)

Αφού ερμηνευθούν τα αποτελέσματα για κάθε τρόπο ωρίμανσης ξεχωριστά, θα γίνει μια σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν και από τους δύο τρόπους ωρίμανσης, συγκεντρωτικά. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων και η ερμηνεία τους ακολουθούν στο 8^ο Κεφάλαιο.

7^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΔΙΗΘΗΣΗΣ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ

7.1. Εισαγωγή

Προτού γίνει η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της διήθησης, είναι αναγκαία η επισήμανση κάποιων στοιχείων. Όπως έχει αναφερθεί και στο 3^ο Κεφάλαιο (§ 3.1.1), η ρύθμιση της διήθησης είναι μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος για την επιτυχή διεξαγωγή μιας γεώτρησης. Για το λόγο αυτό, η ποσότητα του διηθήματος που διέρχεται στον γεωλογικό σχηματισμό πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερη. Ποια είναι όμως η «αποδεκτή» ποσότητα διηθήματος; Στο κύριο αυτό ερώτημα απαντά το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Πετρελαίου (API), στο εγχειρίδιο 13A (API, 13A, 1993), στο οποίο επισημαίνεται ότι η μέγιστη επιτρεπτή απώλεια διηθήματος σε δοκιμή διήθησης με πρέσα LPLT για τον πολφό βάσης (μπεντονίτης 6,42% κ.ό. + νερό) είναι **15 ml**.

Σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο 6^ο Κεφάλαιο (§ 6.3.1), η παρουσίαση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων θα ακολουθήσουν την συγκεκριμένη πορεία. Έτσι τα πειράματα διακρίνονται ανάλογα με το είδος της ωρίμανσης των πολφών:

1. Πολφοί που έχουν ωριμάσει με ενυδάτωση
2. Πολφοί που έχουν ωριμάσει με στατική γήρανση

7.2. Πολφοί που έχουν ωριμάσει με ενυδάτωση

7.2.1. Συγκέντρωση λιγνίτη στον πολφό 0,5%

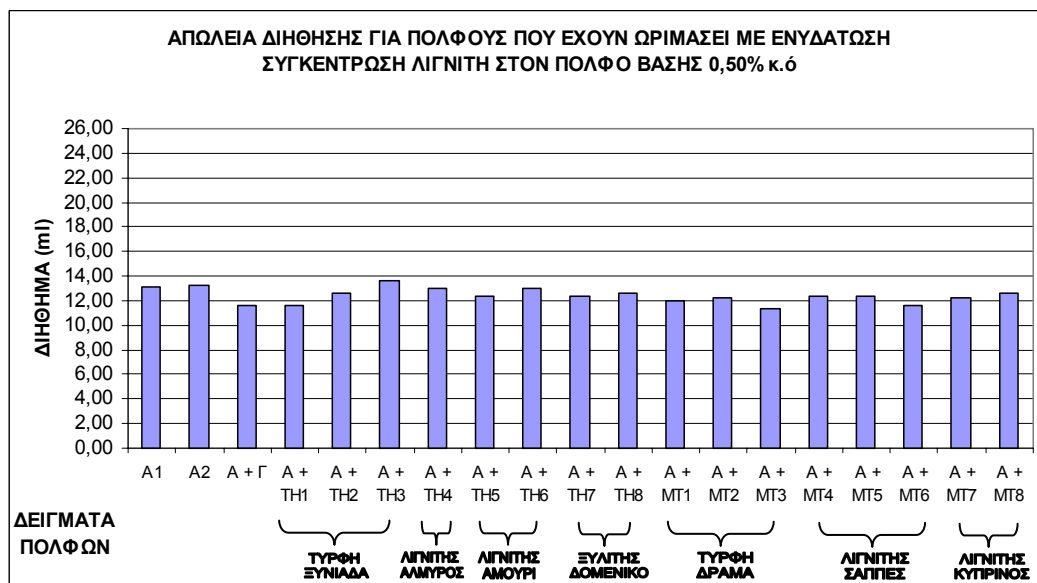
Στον Πίνακα 7.1. παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της απώλειας διήθησης σε πολφούς με λιγνίτη 0,5% κ.ό.

Πίνακας 7.1. Απώλεια διήθησης πολφών με λιγνίτη 0,5% κ.ό.

ΤΥΠΟΣ ΠΟΛΦΟΥ	ΔΙΗΘΗΜΑ (ml)
A ₁ (πολφός βάσης)	13,10
A ₂ (πολφός βάσης)	13,20
A + Γ	11,60
A + TH1	11,60
A + TH2	12,60
A + TH3	13,60
A + TH4	13,00
A + TH5	12,40
A + TH6	13,00
A + TH7	12,40
A + TH8	12,60
A + MT1	12,00
A + MT2	12,20
A + MT3	11,40
A + MT4	12,40
A + MT5	12,40
A + MT6	11,60
A + MT7	12,30
A + MT8	12,60

Ο πολφός βάσης μετρήθηκε δύο φορές και ο μέσος όρος είναι 13,15 ml. Η απόκλιση των δύο μετρήσεων είναι $\pm 0,7\%$, πράγμα που δείχνει την αξιοπιστία των μετρήσεων.

Προκειμένου να γίνει καλύτερα κατανοητή η σύγκριση, δημιουργείται διάγραμμα (Σχήμα 7.1) της απώλειας διήθησης συναρτήσει των δειγμάτων των πολφών. Από τα αποτελέσματα του σχήματος φαίνεται ότι όλα τα δείγματα που μετρήθηκαν έχουν παραπλήσια απώλεια διήθησης είτε πρόκειται για σύγκριση του πολφού βάσης (A) με τους πολφούς με λιγνίτη, είτε πρόκειται για σύγκριση των μετρήσεων μεταξύ των πολφών με λιγνίτη.



Σχήμα 7.1. Διάγραμμα απώλειας διήθησης πολφών με λιγνίτη 0,5% κ.ό. στον πολφό βάσης.

Πάντως, όλα τα δείγματα δίνουν τιμές κάτω από τη μέγιστη «αποδεκτή». Παρ' όλα αυτά, κάποια δείγματα παρουσιάζουν βελτίωση. Η βελτίωση αυτή φαίνεται καλύτερα στο Σχήμα 7.2 όπου παρουσιάζεται το ποσοστό βελτίωσης των πολφών. Το ποσοστό βελτίωσης προκύπτει από τον λόγο:

$$\frac{\text{Πολφός Βάσης}(A2) - \text{Πολφός Λιγνίτη}}{\text{Πολφός Βάσης}(A2)} \times 100$$



Σχήμα 7.2. Ποσοστό βελτίωσης πολφών με λιγνίτη 0,5% κ.ό.

Από το Σχήμα 7.2 φαίνεται καθαρά το ποσοστό της βελτίωσης της διήθησης για τους πολφούς κάθε περιοχής. Συγκεκριμένα και για κάθε περιοχή:

1. Από τις τύρφες της Ξυνιάδας, καλύτερος είναι ο πολφός A + TH1 που βελτιώνει την απώλεια του διηθήματος έως 12%. Μικρή είναι η βελτίωση που προκαλεί ο TH2 (4%) ενώ ο TH3 δεν βελτιώνει τα χαρακτηριστικά του πολφού.
2. Ο λιγνίτης του Αλμυρού δεν βελτιώνει ουσιαστικά την διήθηση.
3. Από τους λιγνίτες του Αμουρίου, ο πολφός με λιγνίτη A + TH5 βελτιώνει τη διήθηση σε ποσοστό 6% ενώ ο A + TH6 δεν δείχνει βελτίωση.
4. Οι ξυλίτες του Δομένικου δείχνουν μια μικρή βελτίωση της τάξης του 3 – 6%.
5. Οι τύρφες της Δράμας παρουσιάζουν την καλύτερη συγκριτικά βελτίωση με κύριο δείγμα το MT3. Το ποσοστό βελτίωσης κυμαίνεται από 8 – 12% σε σχέση με τον πολφό βάσης.
6. Οι λιγνίτες από τις Σάππες δείχνουν βελτίωση σε ποσοστό 5 – 11% με τον λιγνίτη MT6 να παρουσιάζει την μέγιστη τιμή.
7. Από τους λιγνίτες του Κυπρίνου, ο πολφός A + MT7 βελτιώνει έως 6% τη διήθηση ενώ ο A + MT8 δείχνει πολύ μικρή βελτίωση.
8. Ο εμπορικός λιγνίτης (A + Γ) παρουσιάζει πολύ καλή βελτίωση συγκρίσιμη με αυτή των καλύτερων πολφών με λιγνίτες, 12%.

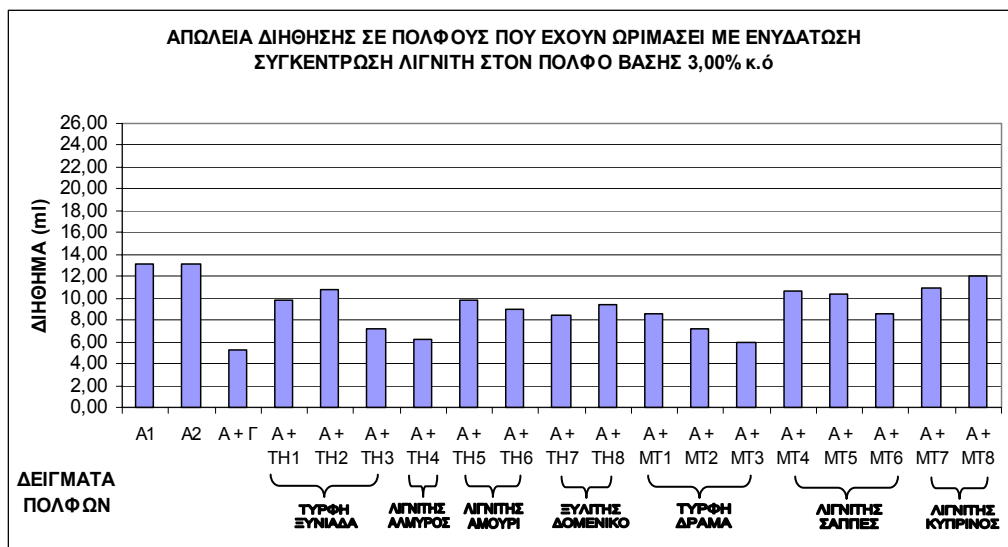
Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι οι πολφοί με λιγνίτη TH1, MT3 και MT6 σε συγκεντρώσεις 0,5% κ.ό. παρουσιάζουν τη μέγιστη βελτίωση της ικανότητας διήθησης, αφού ξεπερνούν το 10% της τιμής του πολφού βάσης ενώ παραπλήσια του μεγίστου είναι και η συμπεριφορά του εμπορικού λιγνίτη και έχουν έως και την διπλάσια περίπου ικανότητα βελτίωσης σε σχέση με τους υπόλοιπους πολφούς που δείχνουν μια μικρή βελτίωση.

7.2.2. Συγκέντρωση λιγνίτη στον πολφό 3,0%

Στον Πίνακα 7.2. παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της απώλειας διήθησης σε πολφούς με λιγνίτη 3,0% κ.ό. Προκειμένου να γίνει καλύτερα κατανοητή η σύγκριση, δημιουργείται διάγραμμα (Σχήμα 7.3) της απώλειας διηθήματος συναρτήσει των δειγμάτων των πολφών για τη συγκεκριμένη συγκέντρωση λιγνίτη στον πολφό.

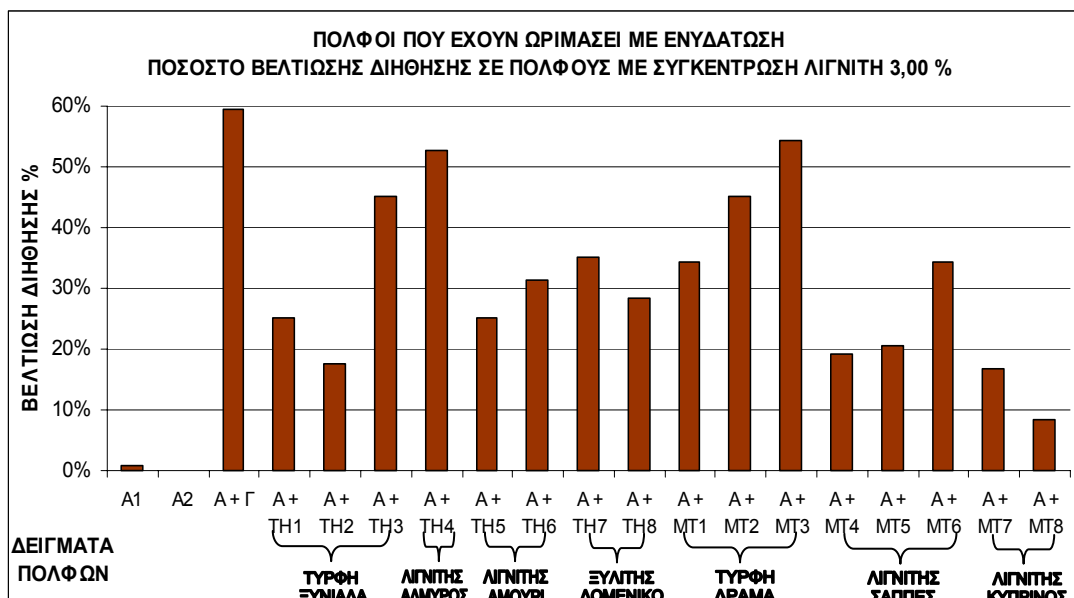
Πίνακας 7.2. Απώλεια διήθησης πολφών με λιγνίτη 3,0% κ.ό.

ΤΥΠΟΣ ΠΟΛΦΟΥ	ΔΙΗΘΗΜΑ (ml)
A ₁	13,10
A ₂	13,20
A + Γ	5,30
A + TH1	9,80
A + TH2	10,80
A + TH3	7,20
A + TH4	6,20
A + TH5	9,80
A + TH6	9,00
A + TH7	8,50
A + TH8	9,40
A + MT1	8,60
A + MT2	7,20
A + MT3	6,00
A + MT4	10,60
A + MT5	10,40
A + MT6	8,60
A + MT7	10,90
A + MT8	12,00



Σχήμα 7.3. Διάγραμμα απώλειας διήθησης πολφών με λιγνίτη 3,0% κ.ό. στον πολφό βάσης.

Όλα τα δείγματα που μετρήθηκαν έχουν απώλεια διήθησης μικρότερη της αποδεκτής τιμής των 15 ml. Όλοι επίσης οι πολφοί με λιγνίτη έχουν βελτιώσει την διηθητική ικανότητα, συγκρινόμενοι με τον πολφό βάσης (A). Επιπρόσθετα, φαίνεται ότι κάποιοι πολφοί έχουν πολύ καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με άλλους. Η βελτίωση της ικανότητας διήθησης φαίνεται στο Σχήμα 7.4 όπου παρουσιάζεται το ποσοστό βελτίωσης των πολφών σε σχέση με τον πολφό βάσης.



Σχήμα 7.4. Ποσοστό βελτίωσης πολφών με λιγνίτη 3,0% κ.ό.

Τα δείγματα που περιέχουν λιγνίτη, παρουσιάζουν σημαντική βελτίωση της διήθησης, που φτάνει έως το 60% σε σχέση με τον πολφό βάσης. Συγκεκριμένα:

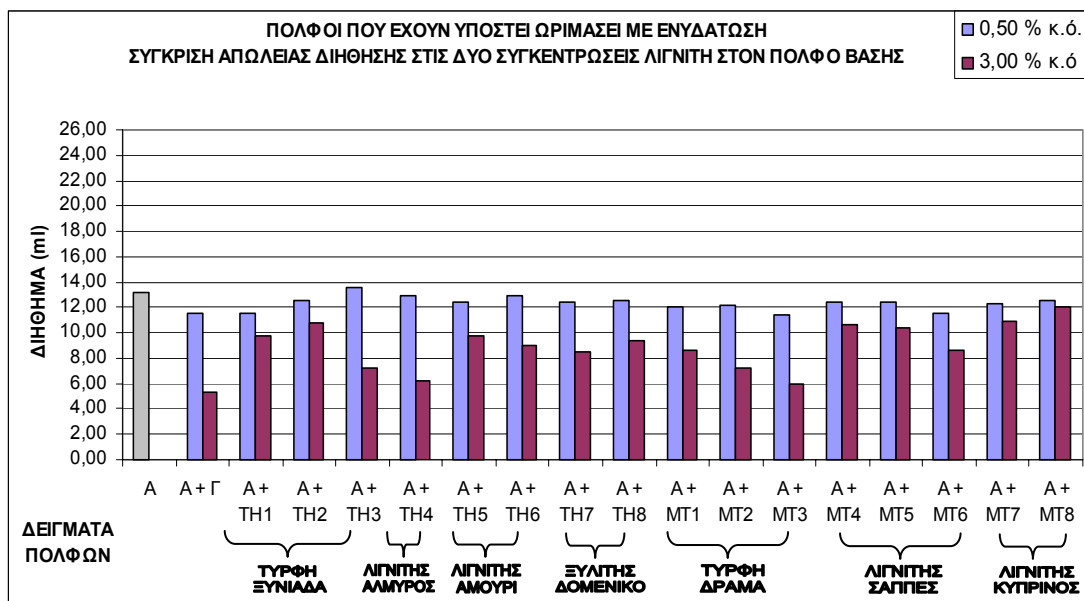
1. Ο πολφός που περιέχει εμπορικό λιγνίτη βελτιώνει κατά 60% την ικανότητα διήθησης.
2. Από τις τύρφες της Ξυνιάδας, ξεχωρίζει ο πολφός A + TH3, όπου η βελτίωση ανέρχεται σε 45%. Έπεται ο πολφός A + TH1 (25%) ενώ μικρή σχετικά είναι η βελτίωση που προσφέρει ο πολφός A + TH2.
3. Ο λιγνίτης του Αλμυρού δίνει εντυπωσιακά αποτελέσματα, καθώς η βελτίωση της διηθητικής ικανότητας ξεπερνά το 50%.
4. Οι λιγνίτες του Αμουρίου βελτιώνουν τη διήθηση σε ποσοστό 25 – 32%.
5. Οι ξυλίτες του Δομένικου βελτιώνουν τη διήθηση σε ποσοστό 28 – 35%.
6. Οι τύρφες της Δράμας δίνουν ιδιαίτερα σημαντικά αποτελέσματα καθώς φαίνεται ότι το ποσοστό βελτίωσης σε αυτούς τους πολφούς ξεκινά από το 35% (A + MT1) και αυξάνει μέχρι το 55% στον πολφό A + MT3.

7. Από τους λιγνίτες των Σαππών ξεχωρίζει ο πολφός A + MT6 που βελτιώνει τη διήθηση κατά 35%, ενώ οι άλλοι δύο πολφοί παρουσιάζουν βελτίωση έως 20%.
8. Οι λιγνίτες του Κυπρίνου συμπεριφέρονται θετικά αλλά σε μικρότερα ποσοστά βελτίωσης. Ο πολφός A + MT7 φτάνει στο 18% ενώ ο A + MT8 κυμαίνεται χαμηλότερα του 10%.

Στους πολφούς με λιγνίτη συγκέντρωσης 3,0% κ.ό. βλέπουμε μεγάλη αύξηση του ποσοστού βελτίωσης της διηθητικής ικανότητας. Θέτοντας ως όριο το 30%, μπορεί να ειπωθεί ότι αρκετοί τύποι λιγνιτών βοηθούν σημαντικά στην βελτίωση των διηθητικών χαρακτηριστικών των πολφών. Ξεχωρίζουν οι πολφοί με TH3 (τύρφη Ξυνιάδας), TH4 (λιγνίτης Αλμυρού) και MT2 και MT3 (τύρφες Δράμας), αφού το ποσοστό βελτίωσης στα δείγματα αυτά ξεπερνά το 45% και φτάνει έως το 55%. Σε χαμηλότερα επίπεδα, βρίσκονται οι πολφοί με λιγνίτες TH6, TH7, TH8, MT2 και MT6. Η σημαντικότερη βελτίωση δίνεται από τον εμπορικό λιγνίτη, αλλά και τα εργαστηριακά επεξεργασμένα δείγματα TH3, TH4, MT2 και MT3 προσεγγίζουν αυτή την επίδοση.

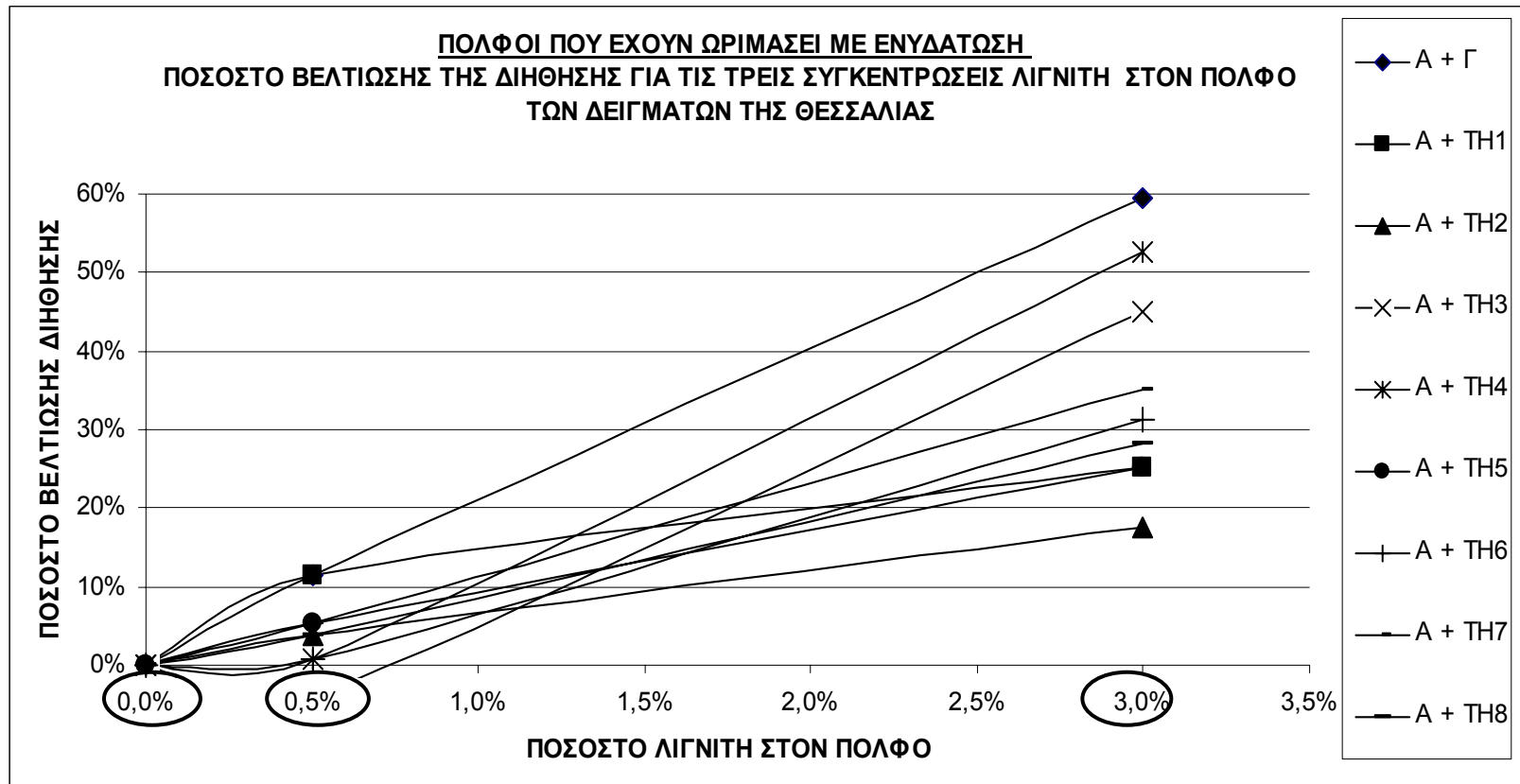
7.2.3. Σύγκριση των μετρήσεων διήθησης για τις δύο συγκεντρώσεις λιγνίτη στον πολφό βάσης

Προκειμένου να δοθεί απάντηση στο ερώτημα που ανακύπτει όσον αφορά στην ποσότητα χρήσης λιγνίτη στους πολφούς για την βέλτιστη λειτουργία, είναι απαραίτητη η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ του πολφού βάσης και των δύο συγκεντρώσεων λιγνίτη (0%, 0,5% και 3,0%). Στο Σχήμα 7.5 παρουσιάζεται το συγκριτικό διάγραμμα της απώλειας διήθησης για τα δείγματα των πολφών όλων των συγκεντρώσεων. Από το ακόλουθο διάγραμμα γίνεται εύκολα η σύγκριση μεταξύ των πολφών γεωτρήσεων. Η προσθήκη 0,5% κ.ό. λιγνίτη ελάχιστα μεταβάλλει την ικανότητα διήθησης, ενώ η προσθήκη 3,0% λιγνίτη στον πολφό βάσης δίνει πολύ θετικά αποτελέσματα, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω.

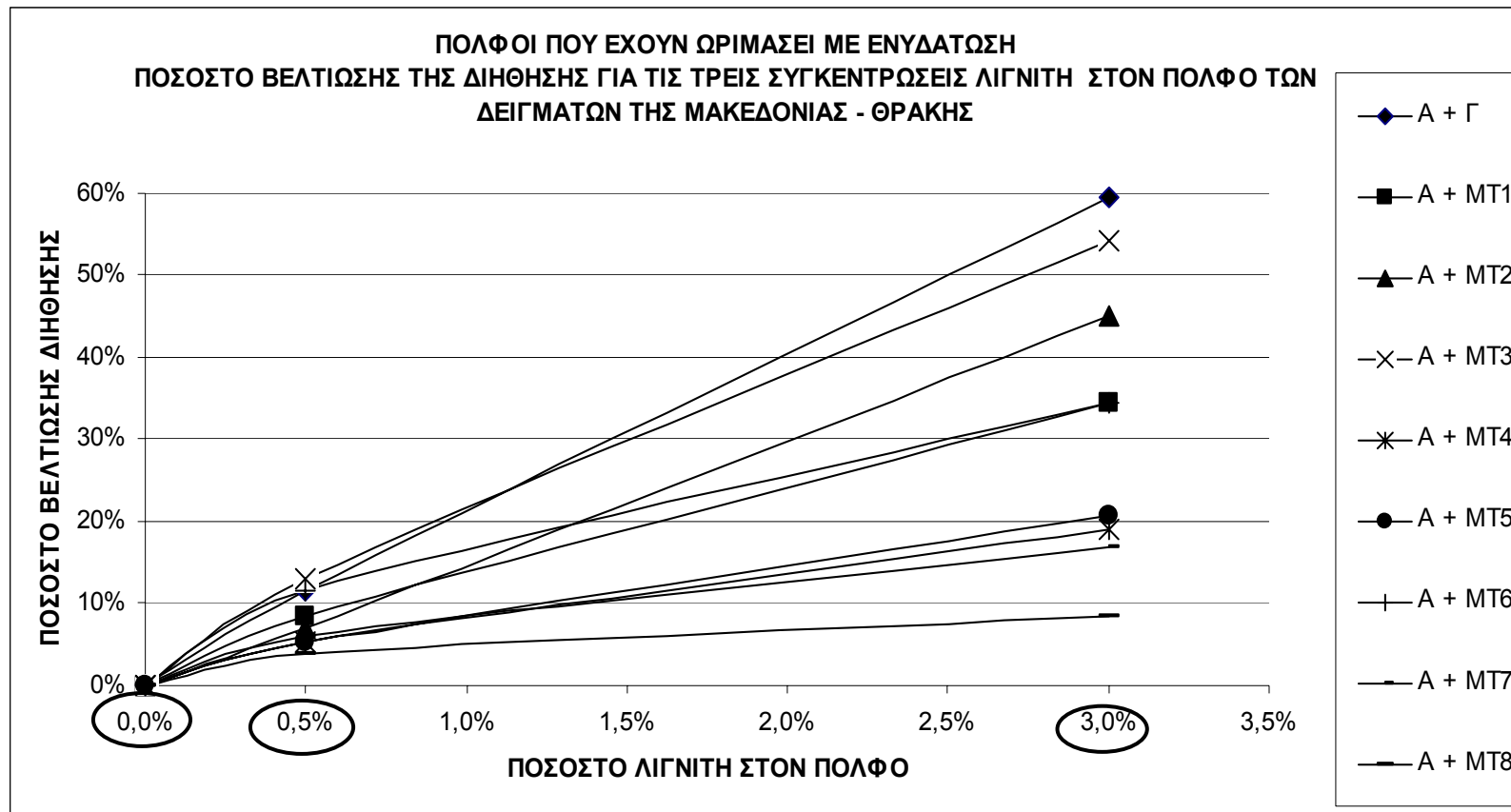


Σχήμα 7.5. Σύγκριση της απώλειας διήθησης για όλες τις συγκεντρώσεις λιγνίτη στον πολφό.

Η γενική εικόνα της βελτίωσης της διήθησης για τις διάφορες συγκεντρώσεις λιγνίτη φαίνεται καθαρά στο Σχήμα 7.6 (α & β), όπου παρουσιάζεται συνολικά η συμπεριφορά των πολφών με λιγνίτη σε σχέση με τον πολφό βάσης, ξεκινώντας από τον πολφό βάσης και καταλήγοντας στο 3%, για την κάθε γεωγραφική περιοχή δειγματοληψίας. Το TH3 είναι το μόνο δείγμα που έδωσε διήθημα λίγο μεγαλύτερο από τον πολφό βάσης (Πίνακας 7.1).



Σχήμα 7.6α. Ποσοστό βελτίωσης της διηθητικής ικανότητας για τα δείγματα πολφών με λιγνίτη από την Θεσσαλία.



Σχήμα 7.6β. Ποσοστό βελτίωσης της διηθητικής ικανότητας για τα δείγματα πολφών με λιγνίτη από την Μακεδονία – Θράκη.

Τα παραπάνω διαγράμματα δίνουν τη συνολική εικόνα της βελτίωσης της διήθησης που πετυχαίνουν οι πολφοί με λιγνίτη. Σε ποσοστό 0,5% λιγνίτη στον πολφό, η βελτίωση είναι της τάξης του 10% περίπου ενώ σε ποσοστό 3,0% η βελτίωση που παρατηρείται είναι για όλα σχεδόν τα δείγματα άνω του 20%, τα περισσότερα εκ των οποίων βελτιώνουν κατά 30 – 40% την διήθηση και η βελτίωση φτάνει μέχρι το εντυπωσιακό 55%. Είναι επίσης άξια σχολιασμού η ψευδογραμμικότητα που εμφανίζουν οι πολφοί, ανάλογα με την συγκέντρωση και το είδος του λιγνίτη στον πολφό. Άλλοτε είναι έντονη (δείγματα MT και ορισμένα TH) και άλλοτε όχι. Πάντως, ίσως να δείχνουν μια γραμμική συσχέτιση της βελτίωσης της απώλειας του διηθήματος για όλο το εύρος των συγκεντρώσεων από 0,5% έως 3,0% κ.ό.

7.3. Πολφοί που έχουν ωριμάσει με στατική γήρανση στους 177 °C

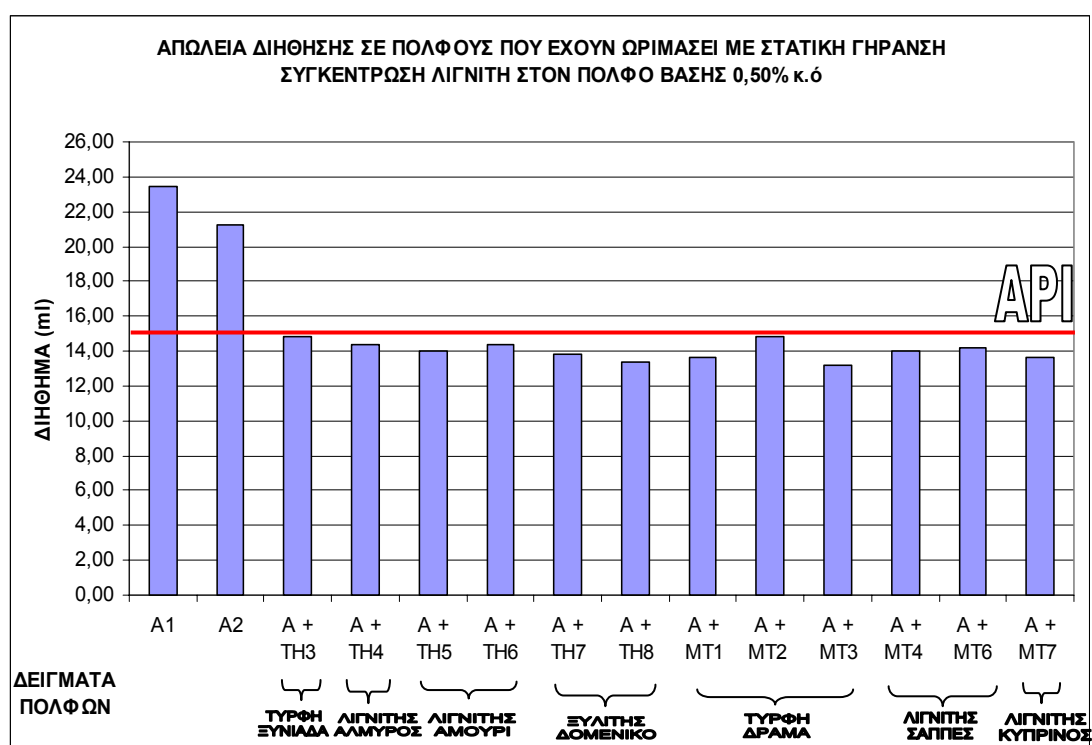
7.3.1. Συγκέντρωση λιγνίτη στον πολφό 0,5%

Στον Πίνακα 7.3. παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της απώλειας διήθησης σε πολφούς με λιγνίτη 0,5% κ.ό. Για να γίνει καλύτερα κατανοητή η σύγκριση, δημιουργείται διάγραμμα (Σχήμα 7.7) της απώλειας διήθησης συναρτήσει των δειγμάτων των πολφών για τη συγκεκριμένη συγκέντρωση λιγνίτη στον πολφό.

Ο πολφός βάσης μετρήθηκε δύο φορές και ο μέσος όρος είναι 22,30 ml. Η απόκλιση των δύο μετρήσεων είναι $\pm 0,6\%$, πράγμα που δείχνει την αξιοπιστία των μετρήσεων.

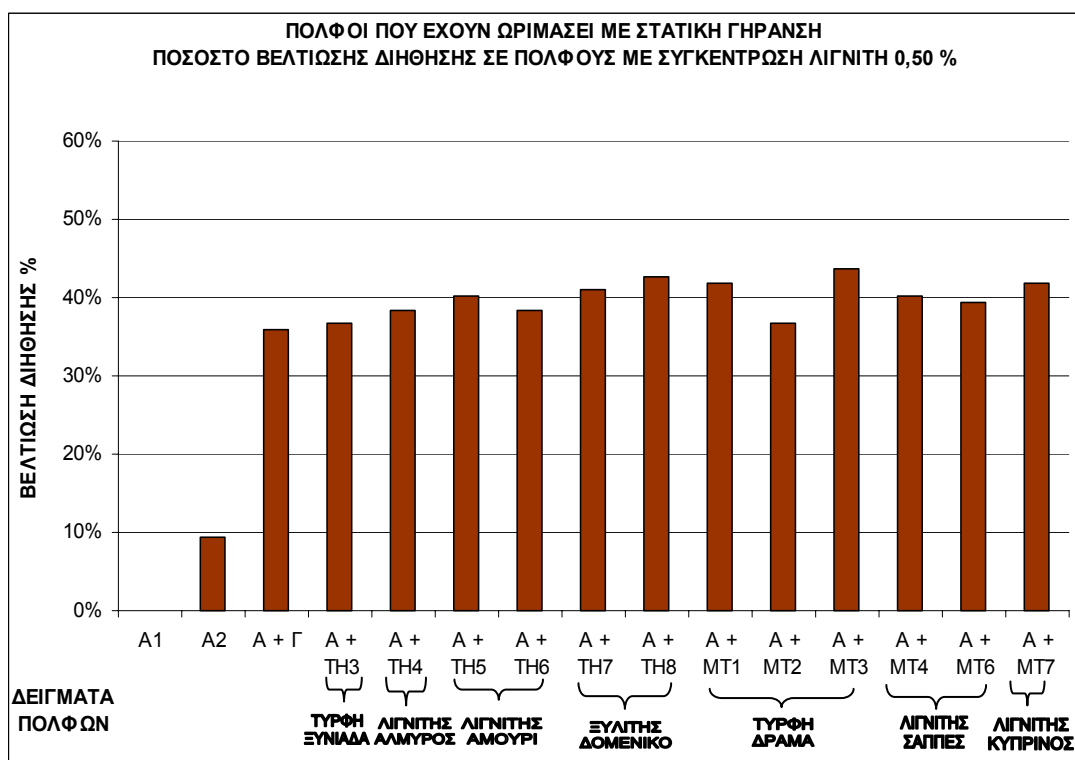
Πίνακας 7.3. Απώλεια διήθησης σε πολφούς με λιγνίτη 0,5% κ.ό.

ΤΥΠΟΣ ΠΟΛΦΟΥ	ΔΙΗΘΗΜΑ (ml)
A ₁	23,40
A ₂	21,20
A + Γ	15,00
A + TH3	14,80
A + TH4	14,40
A + TH5	14,00
A + TH6	14,40
A + TH7	13,80
A + TH8	13,40
A + MT1	13,60
A + MT2	14,80
A + MT3	13,20
A + MT4	14,00
A + MT6	14,20
A + MT7	13,60



Σχήμα 7.7. Διάγραμμα απώλειας διήθησης πολφών με λιγνίτη 0,5% κ.ό. στον πολφό βάσης.

Από το Σχήμα 7.7 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Πρώτον, φαίνεται καθαρά ότι ο πολφός βάσης έχει ξεπεράσει κατά πολύ την «αποδεκτή» τιμή, αφού δίνει διήθημα άνω των 20 ml. Αυτό συμβαίνει διότι ο μπεντονίτης όταν θερμανθεί σε υψηλές θερμοκρασίες κροκιδώνεται, αποδομείται και χάνει την διηθητική του ικανότητα [Gray & Darley (1988), Bleler (1990)]. Δεύτερο και κυριότερο, όλοι οι πολφοί λιγνίτη που έχουν «υποστεί» γήρανση συμπεριφέρονται ικανοποιητικά και δίνουν διήθημα κοντά στη μέγιστη αποδεκτή τιμή των 15 ml. Προκειμένου όμως να συγκριθεί η βελτίωση της διήθησης που παρατηρείται στους πολφούς με λιγνίτη, δημιουργείται το διάγραμμα του Σχήματος 7.8 (η σύγκριση γίνεται με την τιμή του A1 πολφού που έδωσε και το μέγιστο διήθημα).



Σχήμα 7.8. Ποσοστό βελτίωσης πολφών με λιγνίτη 0,5% κ.ό.

Από τα στοιχεία του Σχήματος 7.8. φαίνεται καθαρά η βελτίωση που προσφέρει ο λιγνίτης σε περιεκτικότητα 0,5%, στην διηθητική ικανότητα των πολφών. Όλοι οι πολφοί παρουσιάζουν βελτίωση από 35% – 45% σε σχέση με τον πολφό βάσης ενώ οι διαφορές είναι αμελητέες για να

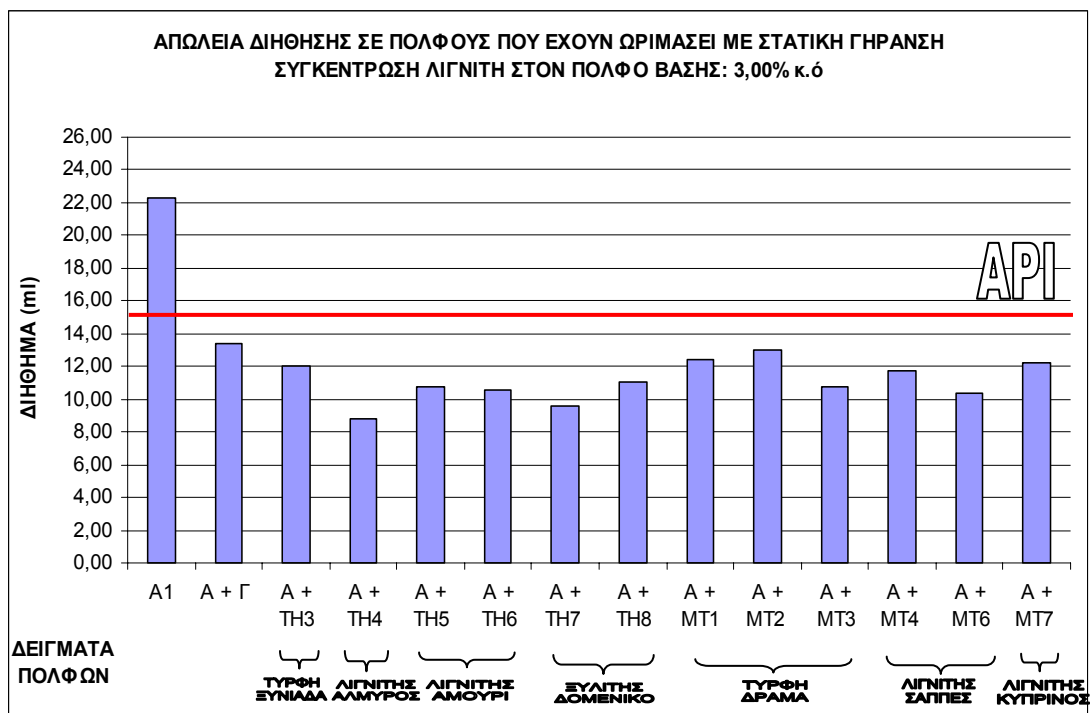
σχολιαστούν περαιτέρω. Ο εμπορικός λιγνίτης βελτιώνει μεν τη διηθητική ικανότητα αλλά σε μικρό συγκριτικά ποσοστό, σε σχέση με τους υπόλοιπους λιγνίτες.

7.3.2. Συγκέντρωση λιγνίτη στον πολφό 3,0%

Στον Πίνακα 7.4. παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της απώλειας διήθησης σε πολφούς με λιγνίτη 3,0% κ.ό. Για να γίνει καλύτερα κατανοητή η σύγκριση, δημιουργείται διάγραμμα (Σχήμα 7.9) της απώλειας διήθησης συναρτήσει των δειγμάτων των πολφών για τη συγκεκριμένη συγκέντρωση λιγνίτη στον πολφό.

Πίνακας 7.4. Απώλεια διήθησης σε πολφούς με λιγνίτη 3,0% κ.ό.

ΤΥΠΟΣ ΠΟΛΦΟΥ	ΔΙΗΘΗΜΑ [ml]
A ₁	23,40
A ₂	21,20
A + Γ	13,40
A + TH3	12,00
A + TH4	8,80
A + TH5	10,80
A + TH6	10,60
A + TH7	9,60
A + TH8	11,00
A + MT1	12,40
A + MT2	13,00
A + MT3	10,80
A + MT4	11,70
A + MT6	10,40
A + MT7	12,20

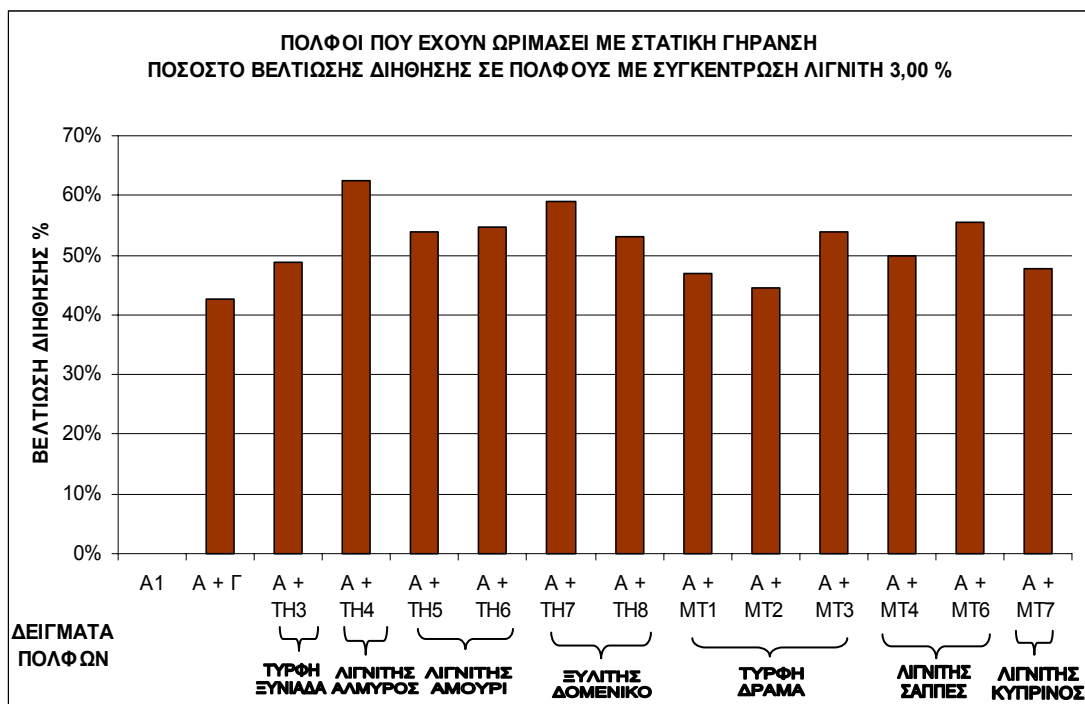


Σχήμα 7.9. Διάγραμμα απώλειας διήθησης πολφών με λιγνίτη 3,0% κ.ό. στον πολφό βάσης.

Όλοι οι πολφοί λιγνίτη που έχουν «υποστεί» γήρανση δίνουν διήθημα κάτω από την ανώτερη κατά API τιμή των 15 ml ενώ οι μεταξύ τους διαφορές είναι σημαντικές.

Ο πολφός βάσης, όπως σχολιάστηκε και παραπάνω έχει ξεπεράσει κατά πολύ αυτή τη τιμή. Από όλους τους πολφούς ξεχωρίζει αυτός που περιέχει λιγνίτη από τον Αλμυρό (A + TH4) και αυτός που περιέχει ξυλίτη από το Δομένικο (A + TH7). Στις δύο αυτές περιπτώσεις η απώλεια διήθησης κυμαίνεται στα 8 – 10 ml. Έπονται τα δείγματα από το Αμούρι, ο ξυλίτης TH8, η τύρφη MT3 από τη Δράμα και οι λιγνίτες των Σαππών, που δίνουν διηθήματα μεταξύ 10 – 12 ml ενώ τα υπόλοιπα δείγματα δίνουν διήθημα 12 – 14 ml.

Η βελτίωση της ικανότητας διήθησης φαίνεται εύκολα στο Σχήμα 7.10 όπου παρουσιάζεται το ποσοστό βελτίωσης της διηθητικής ικανότητας των πολφών.



Σχήμα 7.10. Ποσοστό βελτίωσης πολφών με λιγνίτη 3,0% κ.ό.

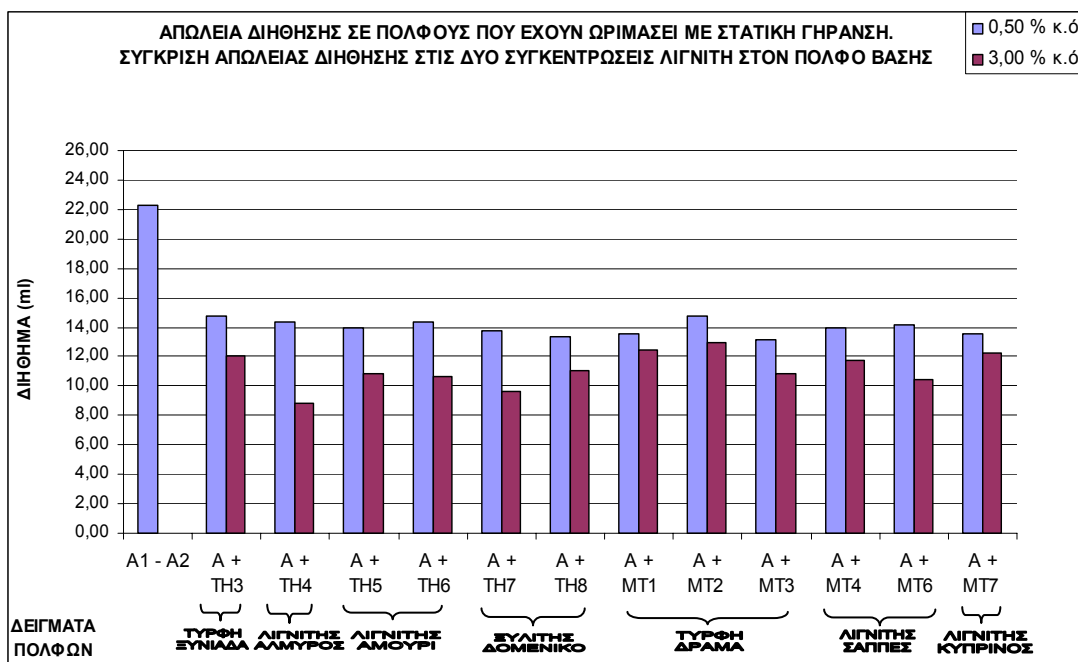
Το ανωτέρω διάγραμμα δίνει την ποσοτική εικόνα της βελτίωσης της διήθησης των πολφών. Φαίνεται πλέον καθαρά ότι οι πολφοί με λιγνίτη έχουν βοηθήσει έντονα την διηθητική ικανότητα των πολφών και δίνουν πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Κάνοντας μια πρώτη σύγκριση με τον πολφό που περιέχει εμπορικό λιγνίτη, ο οποίος βελτιώνει κατά 40% τη διήθηση, όλοι οι υπόλοιποι πολφοί με τους προς εξέταση ελληνικούς λιγνίτες είναι αρκετά καλύτεροι του εμπορικού προϊόντος. Είναι επίσης σημαντικό να παρατηρηθεί ότι σχεδόν όλοι οι πολφοί εμφανίζουν βελτίωση άνω του 45%. Συγκεκριμένα:

1. Η τύρφη της ξυνιάδας (A + TH3) βελτιώνει τη διήθηση κατά 50%.
2. Τα καλύτερα αποτελέσματα δίνουν ο λιγνίτης του Αλμυρού (TH4) και ο ξυλίτης του Δομένικου (TH7), καθώς δείχνουν αύξηση της ικανότητας διήθησης σε ποσοστό 60%.
3. Οι λιγνίτες του Αμουρίου, ο ξυλίτης του Δομένικου TH8, η τύρφη της Δράμας MT3 και οι λιγνίτες των Σαππών βελτιώνουν την διηθητική ικανότητα των πολφών σε ποσοστό μεγαλύτερο του 50%.
4. Μόνο η τύρφη της Δράμας MT2 έχει τη μικρότερη βελτίωση, 45%.

5. Τέλος, ο λιγνίτης του Κυπρίνου βελτιώνει μέχρι και 50% την διηθητική ικανότητα των πολφών.

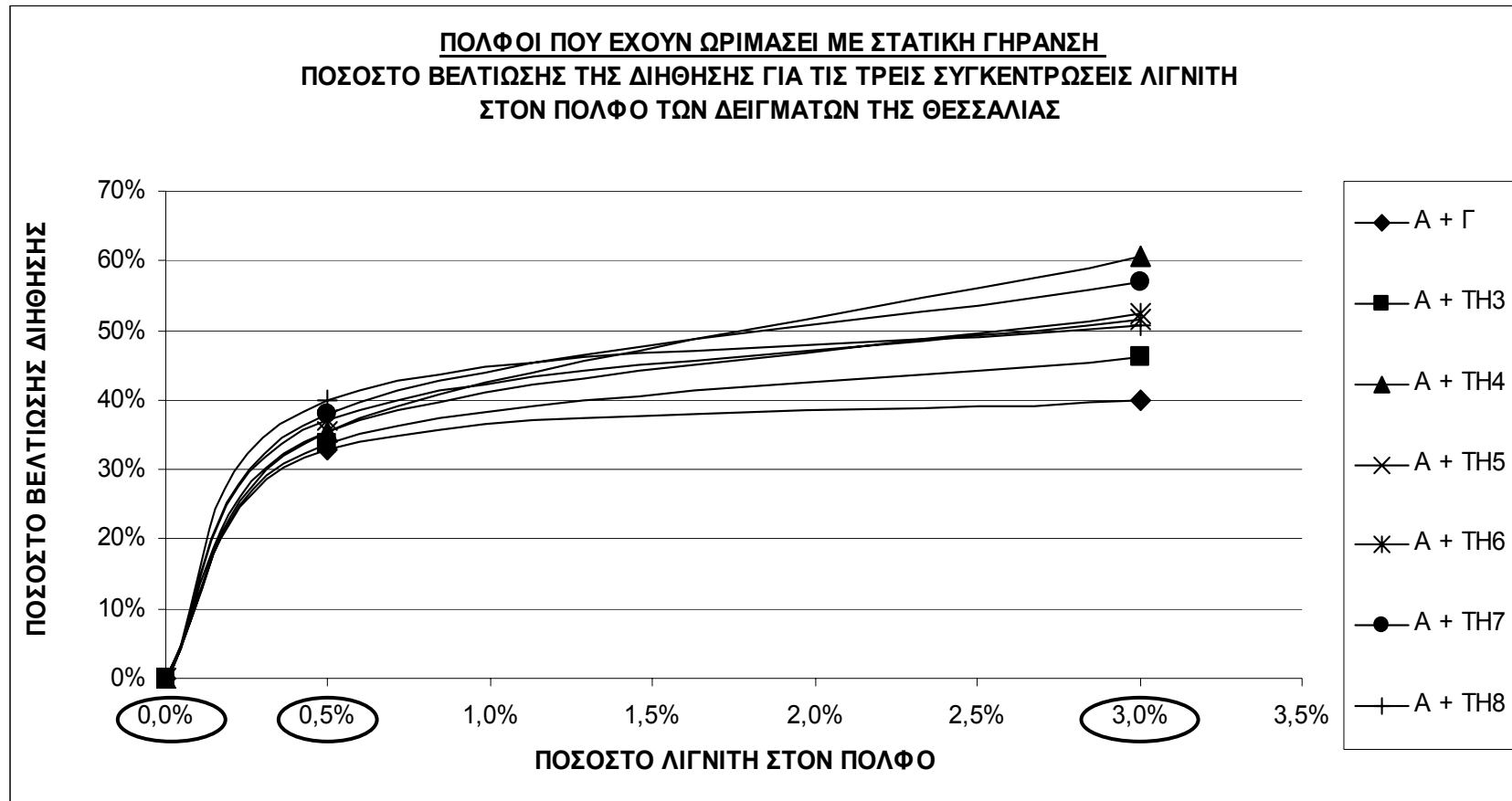
7.3.3. Σύγκριση των μετρήσεων διήθησης για τις δύο συγκεντρώσεις λιγνίτη στον πολφό βάσης

Όπως και στην περίπτωση των πολφών που έχουν ωριμάσει με ενυδάτωση, έτσι και στους πολφούς που ωρίμασαν με στατική γήρανση σε φούρνο στους 177 °C ανακύπτει το ερώτημα της προσθήκης της σωστής ποσότητας λιγνίτη στον πολφό. Στο Σχήμα 7.11 παρουσιάζεται το συγκριτικό διάγραμμα της απώλειας διήθησης για τα δείγματα των πολφών όλων των συγκεντρώσεων. Από το ακόλουθο διάγραμμα γίνεται εύκολα η σύγκριση μεταξύ των πολφών γεωτρήσεων. Η προσθήκη 0,5% κ.ό. λιγνίτη στον πολφό μεταβάλλει την ικανότητα διήθησης αλλά όχι ικανοποιητικά (σε σχέση με την αποδεκτή τιμή), ενώ η προσθήκη 3,0% λιγνίτη στον πολφό βάσης δίνει πολύ θετικά αποτελέσματα, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω.

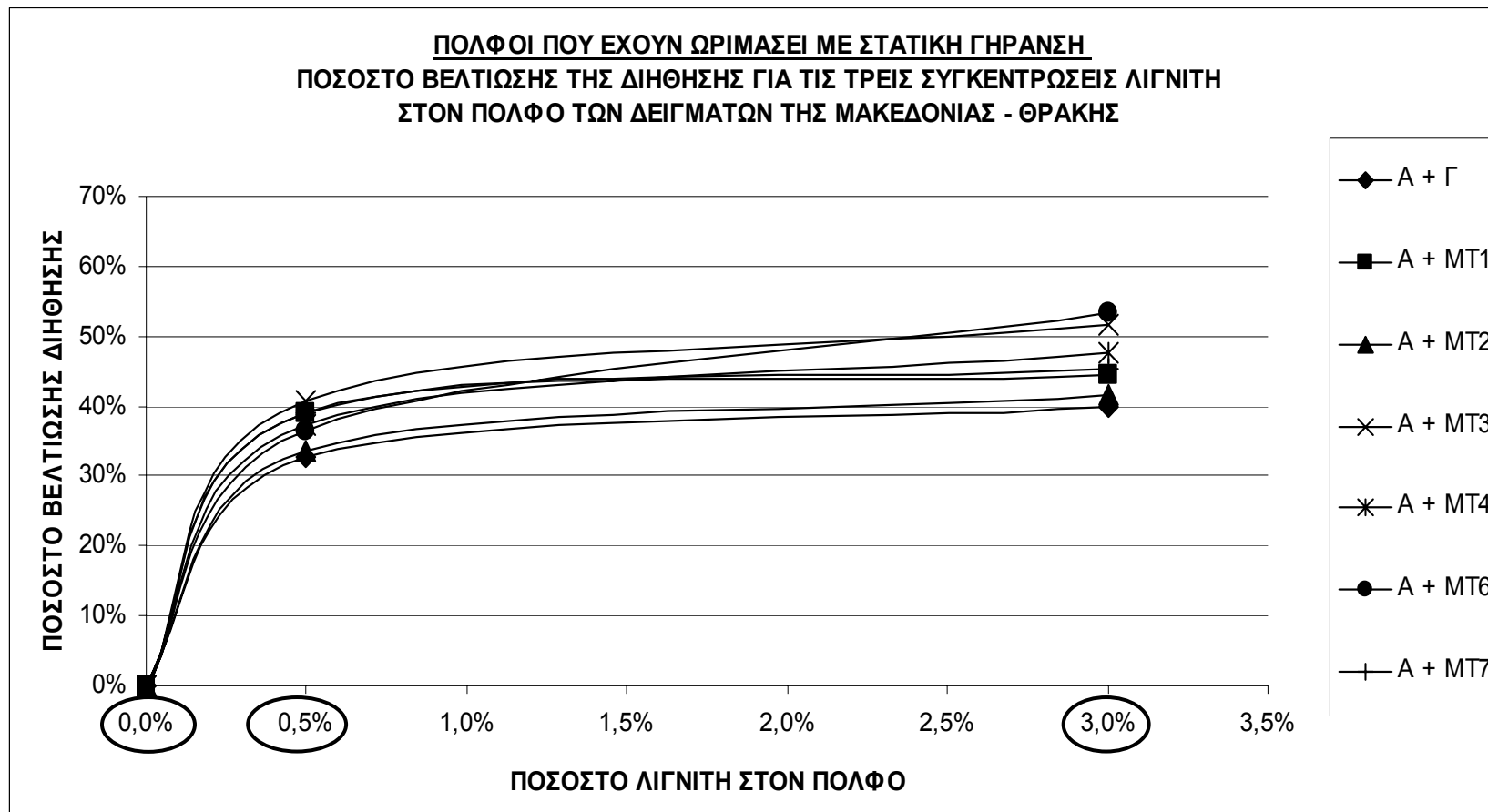


Σχήμα 7.11. Σύγκριση της απώλειας διήθησης για όλες τις συγκεντρώσεις λιγνίτη στον πολφό.

Η γενική εικόνα της βελτίωσης της διήθησης για τις διάφορες συγκεντρώσεις λιγνίτη φαίνεται καθαρά στο Σχήμα 7.12 (α & β), όπου παρουσιάζεται συνολικά η συμπεριφορά των πολφών με λιγνίτη σε σχέση με τον πολφό βάσης, ξεκινώντας από ποσοστό 0% λιγνίτη στον πολφό και καταλήγοντας στο 3%, για την κάθε γεωγραφική περιοχή δειγματοληψίας.



Σχήμα 7.12α. Ποσοστό βελτίωσης της διηθητικής ικανότητας για τα δείγματα πολφών με λιγνίτη από τη Θεσσαλία.



Σχήμα 7.12β. Ποσοστό βελτίωσης της διηθητικής ικανότητας για τα δείγματα πολφών με λιγνίτη από τη Μακεδονία - Θράκη.

Τα παραπάνω διαγράμματα δίνουν τη συνολική εικόνα της βελτίωσης της διήθησης που πετυχαίνουν οι πολφοί με λιγνίτη. Σε ποσοστό 0,5% λιγνίτη στον πολφό, η βελτίωση είναι της τάξης του 30% - 40% ενώ σε ποσοστό 3,0% η βελτίωση που παρατηρείται για όλα τα δείγματα είναι της τάξης του 40 - 60%.

Ένα πολύ σημαντικό γεγονός που απορρέει από τις παραπάνω καμπύλες είναι ότι η απόδοση του εμπορικού λιγνίτη είναι πλέον η μικρότερη, σε σχέση με τους ελληνικούς λιγνίτες (στην ενυδάτωση είχε την καλύτερη βελτίωση).

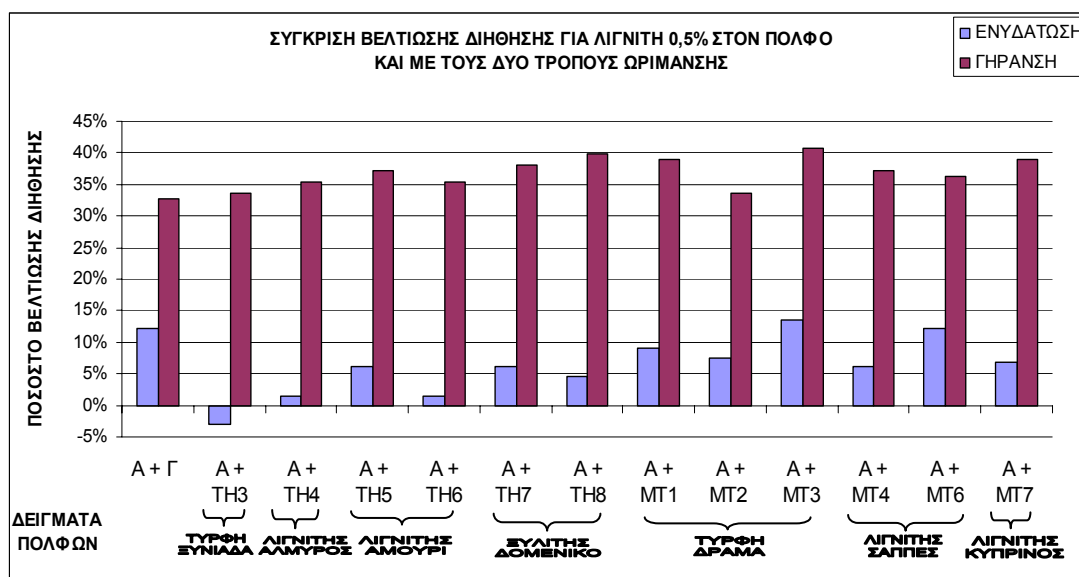
Πρέπει σε αυτή την περίπτωση να επισημανθεί η μη γραμμική σχέση που πιθανώς να εμφανίζεται στη βελτίωση της διηθητικής ικανότητας των πολφών, ανάλογα με την συγκέντρωση και το είδος του λιγνίτη, σε σχέση με τα δείγματα που ενυδατώθηκαν και στα οποία η σχέση βελτίωσης είναι περίπου γραμμική. Η βελτίωση από 0,5% σε 3,0% λιγνίτη στον πολφό βάσης είναι από 30 - 40% σε 40 - 50%, δηλαδή 30% συνολική αύξηση, σε αντίθεση με τα δείγματα που ενυδατώθηκαν, στα οποία η αντίστοιχη βελτίωση είναι έως και 6 φορές, αλλά με μεγαλύτερες διακυμάνσεις.

Καταληκτικά, μπορεί να ειπωθεί ότι οι πολφοί με προσθήκη λιγνίτη 3,0% κ.ό. βελτιώνουν πολύ την διηθητική ικανότητα της λάσπης γεώτρησης, ιδιαίτερα στους πολφούς με λιγνίτες από τον Αλμυρό (A + TH4), το Δομένικο (A + TH7) (Σχήμα 7.12α) καθώς και οι λιγνίτες από τη Δράμα (A + MT3) και τις Σάππες (A + MT6) (Σχήμα 7.12β).

7.4. Σύγκριση των μετρήσεων διήθησης για τους δύο τρόπους ωρίμανσης των πολφών

7.4.1. Πολφοί με λιγνίτη 0,5% κ.ό.

Στο Σχήμα 7.13 γίνεται η σύγκριση της βελτίωσης διήθησης που πετυχαίνει ο λιγνίτης, όταν προστεθεί στον πολφό βάσης σε συγκέντρωση 0,5% κ.ό.



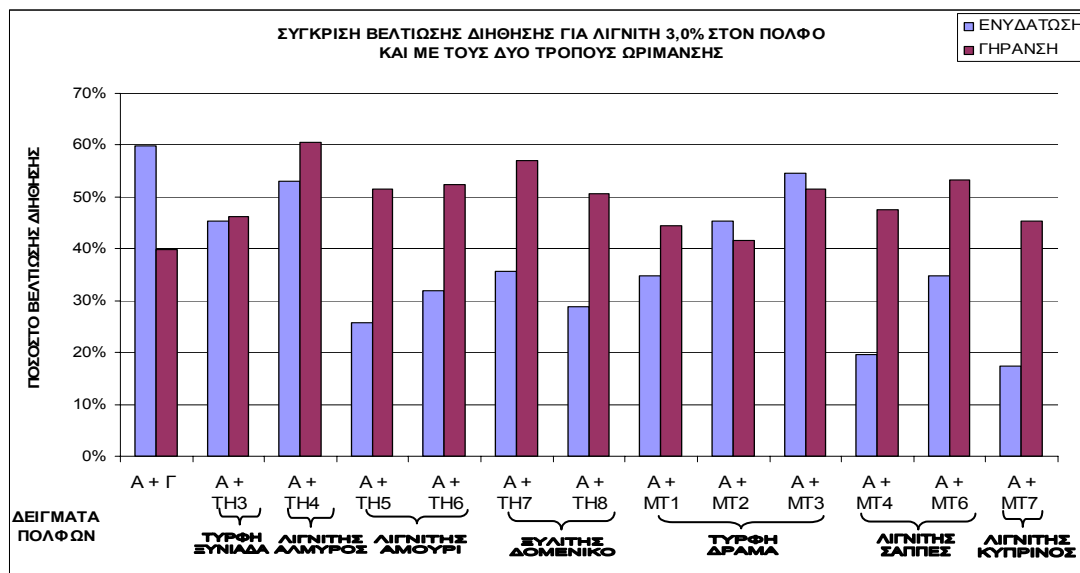
Σχήμα 7.13. Βελτίωση διήθησης σε πολφούς με λιγνίτη 0,5% κ.ό.

Από το παραπάνω σχήμα επαληθεύεται η σημαντική βελτίωση που προσφέρει ο λιγνίτης, επιπλέον όμως γίνεται και η σύγκριση του ποσοστού βελτίωσης για τους δύο τρόπους ωρίμανσης. Έτσι, ενώ στα δείγματα που ωρίμασαν με ενυδάτωση, το ποσοστό της βελτίωσης φτάνει το 15%, στα δείγματα πολφών που έχουν ωριμάσει με στατική γήρανση, η βελτίωση είναι της τάξης του 30% - 40%. Τα στοιχεία αυτά δείχνουν την θετική επίδραση που έχει ο λιγνίτης (ακόμη και σε μικρή ποσότητα) στους πολφούς μπεντονίτη, ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες.

7.4.2. Πολφοί με λιγνίτη 3,0% κ.ό.

Στο Σχήμα 7.14 γίνεται η σύγκριση της βελτίωσης της ικανότητας διήθησης που πετυχαίνει ο λιγνίτης, όταν προστεθεί στον πολφό βάσης σε συγκέντρωση 3,0% κ.ό. Στο σχήμα αυτό τα ποσοστά βελτίωσης αγγίζουν το 60%. Επιπλέον, φαίνεται καθαρά ποιοι πολφοί φέρουν την καλύτερη βελτίωση και στους δύο τρόπους ωρίμανσης. Έτσι, η τύρφη της Ξυνιάδας TH3, ο λιγνίτης του Αλμυρού TH4 και οι τύρφες της Δράμας MT2 και MT3, προσφέρουν την καλύτερη διηθητική ικανότητα, είτε πρόκειται για την ενυδάτωση είτε πρόκειται για την στατική γήρανση. Στα δείγματα αυτά το

ποσοστό βελτίωσης ξεπερνά το 40% και φτάνει μέχρι το 50%, σε σχέση με την απόδοση του πολφού βάσης.



Σχήμα 7.14. Βελτίωση διήθησης σε πολφούς με λιγνίτη 3,0% κ.ό.

7.5. Πάχος υμενίου λάσπης γεώτρησης

Γενικά, τα πάχη των υμενίων των πολφών που περιέχουν λιγνίτη, ανεξάρτητα από τον τρόπο ωρίμανσής τους, κυμαίνονται στα 1 – 2 mm. Ο πολφός βάσης που έχει ωριμάσει με ενυδάτωση έχει πάχος υμενίου 2 mm και με στατική γήρανση 3,5 – 4 mm και το υμένιο της λάσπης που παράγεται είναι πλαστικό (εύθραυστο) (Σχήμα 7.15). Από την άλλη πλευρά, όλοι οι πολφοί που περιέχουν λιγνίτη δημιουργούν ελαστικά υμένια λάσπης (Σχήμα 7.16). Ο εμπορικός λιγνίτης δίνει πάχος 1,5 mm όταν ενυδατωθεί και 1,2 mm όταν έχει ωριμάσει με στατική γήρανση. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρατίθενται στο Παράρτημα Θ.



Σχήμα 7.15. Υμένιο λάσπης
μπεντονίτη



Σχήμα 7.16. Υμένιου πολφού
με λιγνίτη

7.6. Συγκεντρωτικά συμπεράσματα

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων διήθησης, είναι πλέον δυνατή η συγκέντρωση και η τελική επεξεργασία των μετρήσεων. Γενικά, φαίνεται ότι η προσθήκη λιγνίτη σε μικρές συγκεντρώσεις σε πολφούς λειτουργεί θετικά. Όλα τα αποτελέσματα, ανεξαρτήτως της περιεκτικότητας λιγνίτη και του τρόπου ωρίμανσης των πολφών, δείχνουν την αποτελεσματικότητα της χρήσης του συγκεκριμένου υλικού. Η απώλεια διήθησης διατηρείται πάντοτε στα επιθυμητά επίπεδα και σε μερικές περιπτώσεις τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά.

Βέβαια, τα αποτελέσματα δίνουν επιπρόσθετες και πολύ χρήσιμες πληροφορίες. Επειδή ο λιγνίτης χρησιμοποιείται σε γεωτρήσεις υψηλών θερμοκρασιών, φάνηκε η αποτελεσματικότητά του σε αυτές τις συνθήκες. Αν λοιπόν, η βελτίωση που ζητείται είναι μέχρι το 40%, τότε ποσότητα λιγνίτη 0,5% κ.ό. είναι αρκετή (Σχήμα 7.12α). Στην περίπτωση που οι απαιτήσεις είναι μεγαλύτερες, τότε ποσότητα 1,5% - 3% κ.ό. λιγνίτη στον πολφό βάσης (Σχήμα 7.12β) δύναται να ικανοποιήσει τις επιθυμητές ανάγκες. Πολύ ικανοποιητικό κρίνεται λοιπόν το αποτέλεσμα της σύγκρισης των εργαστηριακά παρασκευασμένων δειγμάτων ελληνικού λιγνίτη με το εμπορικό προϊόν, που είναι συνήθως λεοναρδίτης.

8^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΕΟΛΟΓΙΑΣ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ

8.1.Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε στο 6^ο Κεφάλαιο, τα πειράματα ρεολογίας έχουν διπλό στόχο:

1. Την εύρεση της θixοτροπικής συμπεριφοράς των ρευστών γεωτρήσεων και
2. Την εύρεση του κατάλληλου ρεολογικού μοντέλου των πολφών αυτών

Τα πειράματα ρεολογίας έρχονται να συμπληρώσουν τα πειράματα διήθησης, ώστε να είναι δυνατή η όποια συσχέτιση των καλύτερων αποτελεσμάτων. Το πλήθος των πειραμάτων ρεολογίας είναι σε απόλυτη ταύτιση με την σχετική αναφορά που έγινε στο 6^ο Κεφάλαιο (§ 6.3.2.2). Έχουν παραχθεί και αναλυθεί όλες οι θixοτροπικές καμπύλες των πολφών (Παράρτημα Ι) και έχουν υπολογισθεί τα ρεολογικά μοντέλα και οι παράμετροι για όλους τους πολφούς που αναφέρονται (Παράρτημα Κ). Προκειμένου όμως να συνδεθούν (με όποιο δυνατό τρόπο) τα αποτελέσματα διήθησης των πολφών με αυτά της ρεολογίας, η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων θα γίνει για τους πολφούς που πέτυχαν την καλύτερη βελτίωση της ικανότητας διήθησης και βέβαια για την συγκέντρωση λιγνίτη 3,0% κ.ό. στον πολφό βάσης. Αναφορικά, τα δείγματα πολφών που θα μελετηθούν είναι:

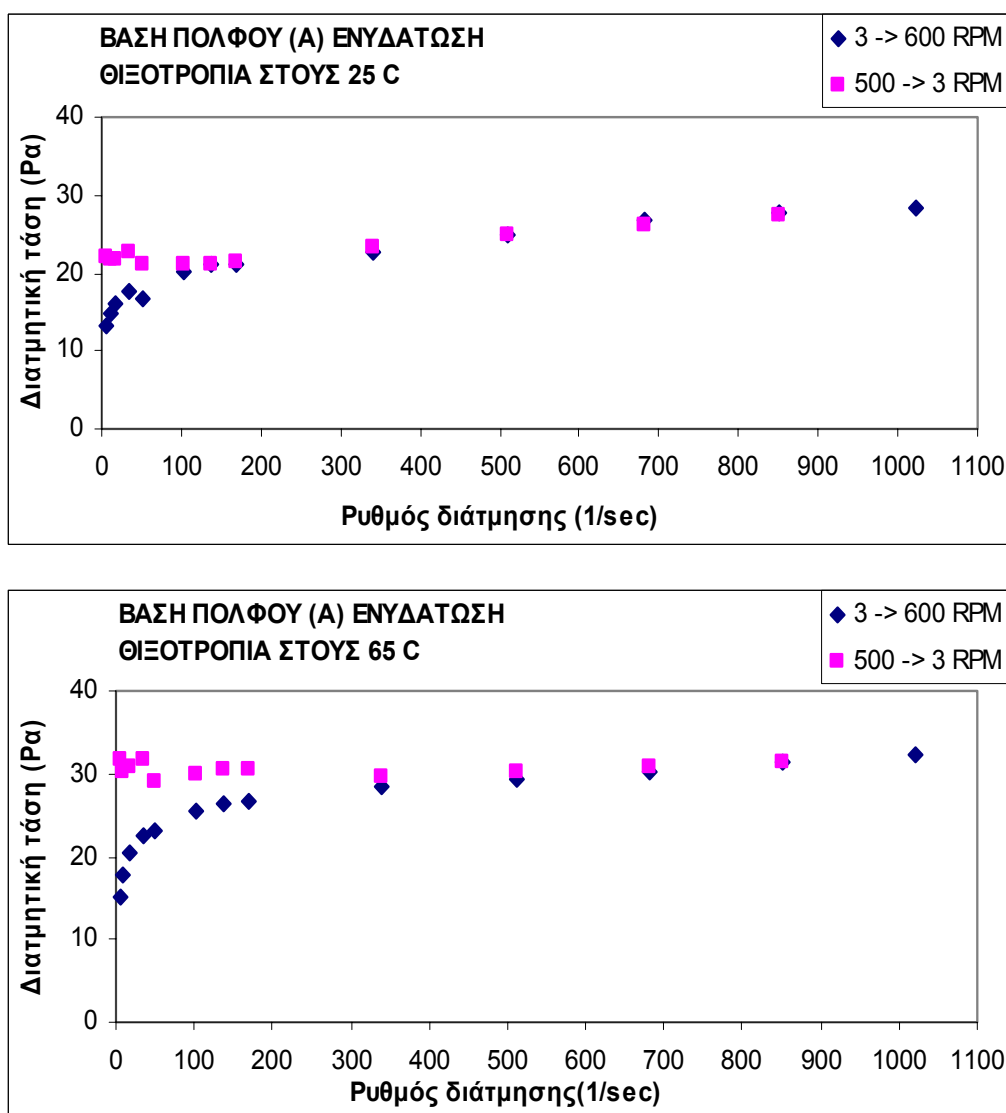
	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΛΙΓΝΙΤΗ	ΠΟΛΦΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΛΙΓΝΙΤΗ ΑΠΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑ	ΤΗ 3	ΤΥΡΦΗ	A + ΤΗ 3
	ΤΗ 4	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	A + ΤΗ 4
	ΤΗ 7	ΞΥΛΙΤΗΣ	A + ΤΗ 7
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΛΙΓΝΙΤΗ ΑΠΟ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ - ΘΡΑΚΗ	ΜΤ 2	ΤΥΡΦΗ	A + ΜΤ 2
	ΜΤ 4	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	A + ΜΤ 4
	ΜΤ 7	ΛΙΓΝΙΤΗΣ	A + ΜΤ 7

8.2. Μελέτη ρεολογίας σε πολφούς που ωρίμασαν με ενυδάτωση

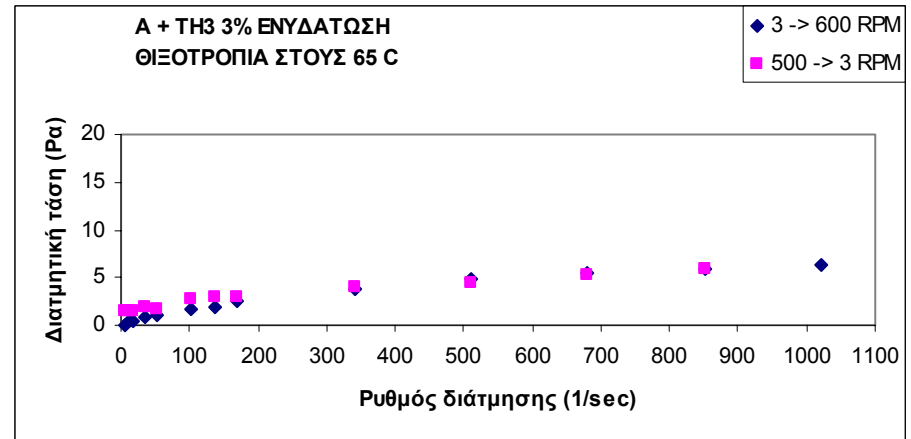
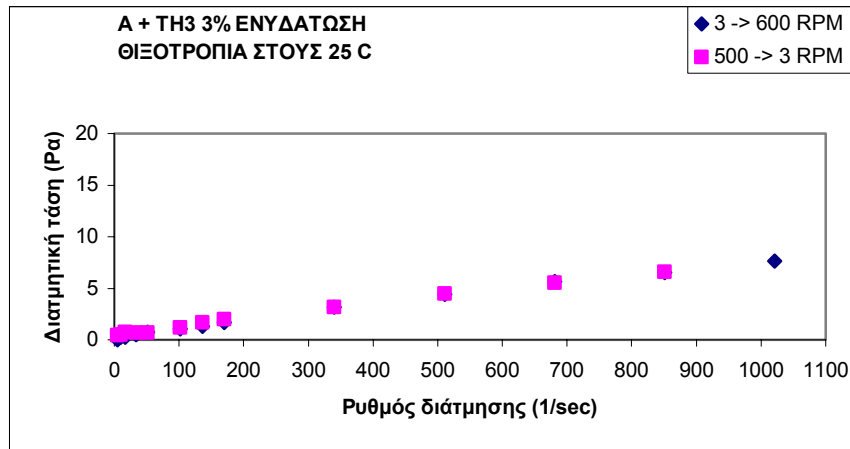
8.2.1. Θιξοτροπία πολφών

Η μελέτη της θιξοτροπίας έγινε σε δύο θερμοκρασίες, 25 °C που θα καλείται «χαμηλή» θερμοκρασία (LOW T) και 65 °C που θα καλείται «υψηλή» θερμοκρασία (HIGH T). Για κάθε δείγμα λοιπόν, προκύπτει ένας δείκτης θιξοτροπίας ανά θερμοκρασία.

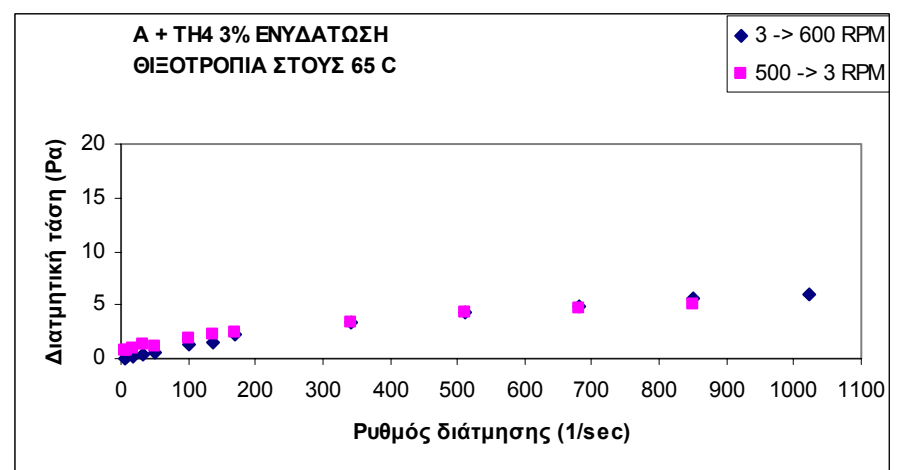
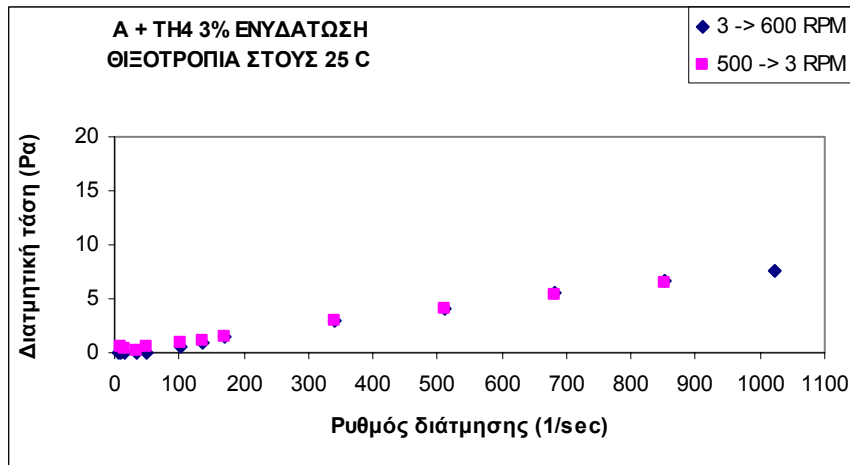
Στα Σχήματα 8.1 – 8.7 παρουσιάζονται τα διαγράμματα θιξοτροπίας για τους πολφούς γεώτρησης.



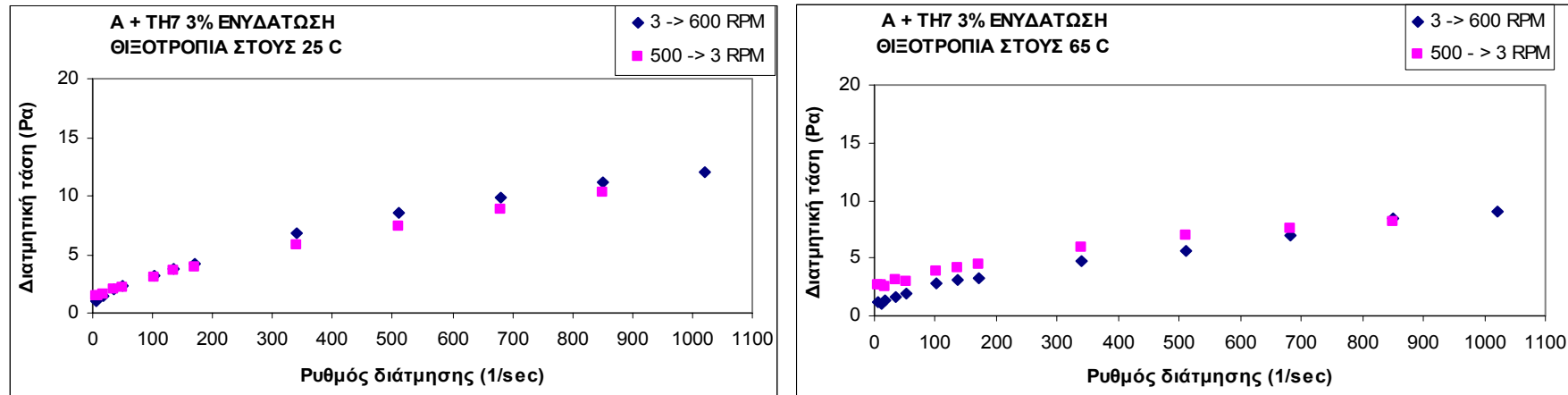
Σχήμα 8.2. Θιξοτροπία πολφού βάσης σε χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία.



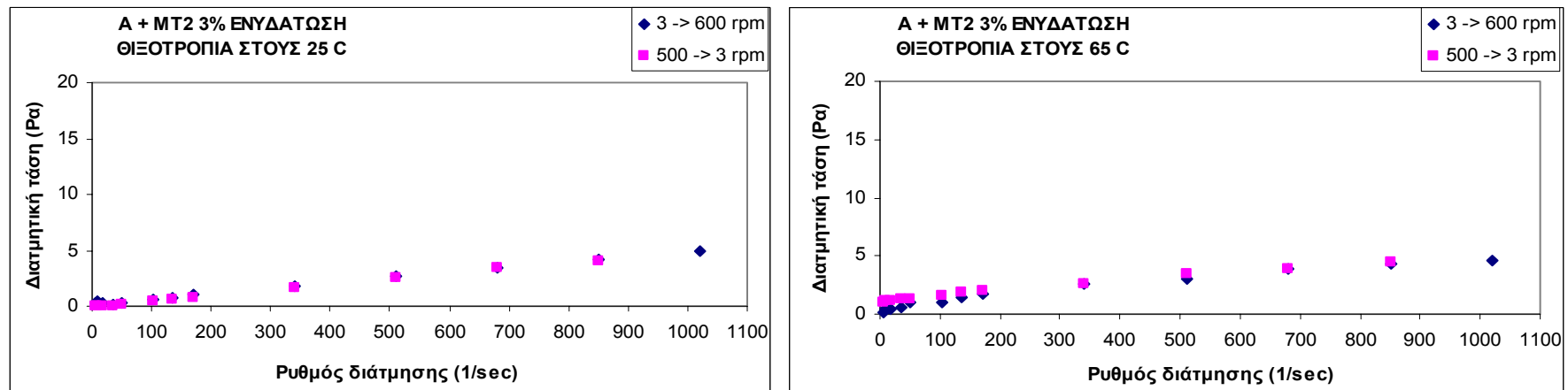
Σχήμα 8.2. Θιξοτροπία πολφού A + TH3 σε χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία.



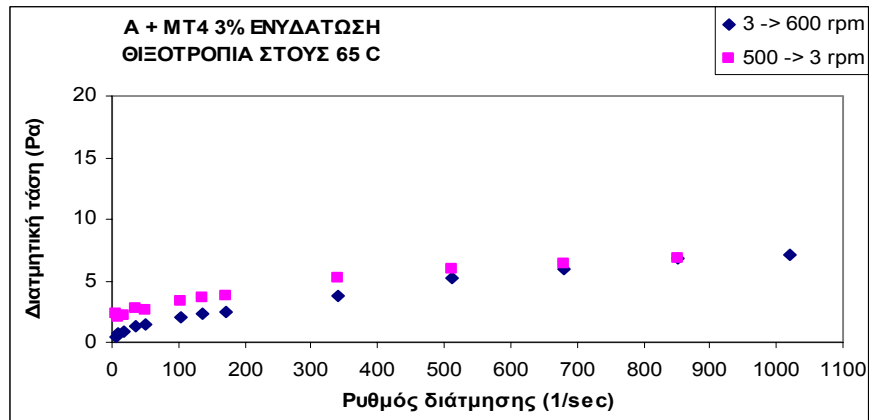
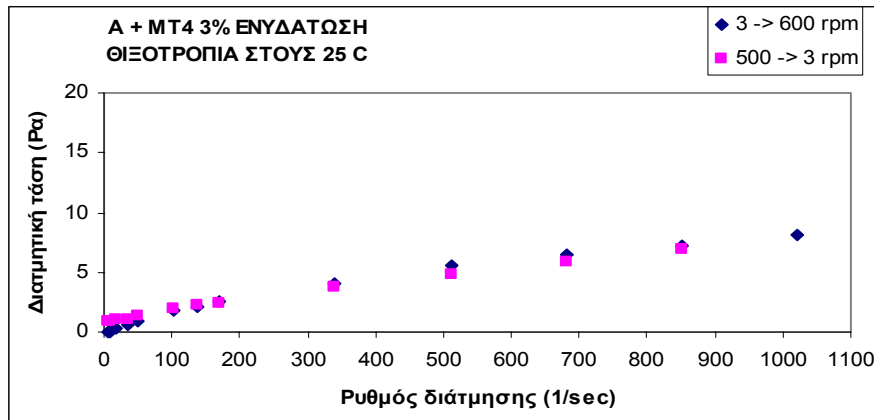
Σχήμα 8.3. Θιξοτροπία πολφού A + TH4 σε χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία.



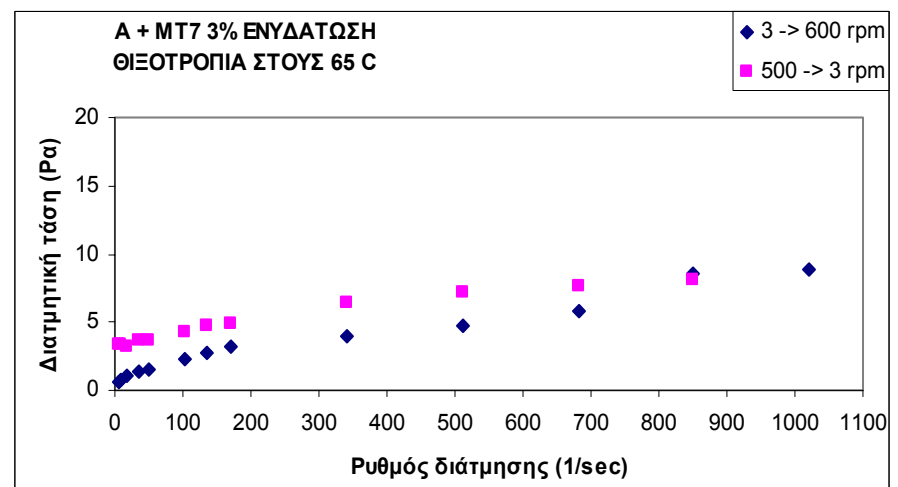
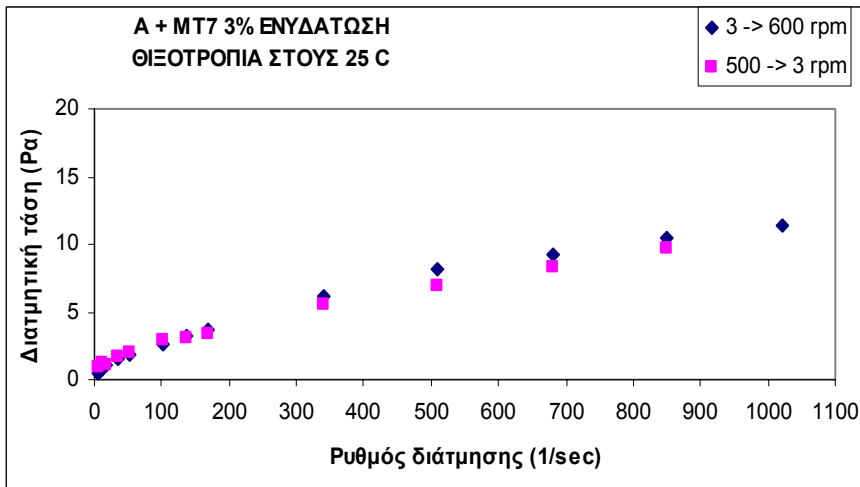
Σχήμα 8.4. Θιξοτροπία πολφού A + TH7 σε χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία.



Σχήμα 8.5. Θιξοτροπία πολφού A + MT2 σε χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία.



Σχήμα 8.6. Θιξοτροπία πολφού A + MT4 σε χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία.

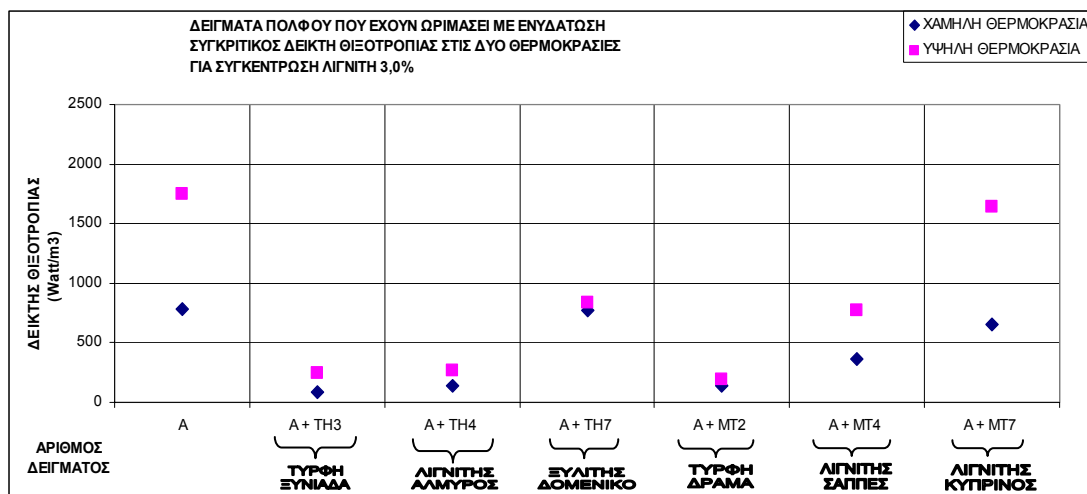


Σχήμα 8.7. Θιξοτροπία πολφού A + MT7 σε χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία.

Στον Πίνακα 8.1. παρουσιάζονται οι δείκτες θιξοτροπίας των πολφών γεωτρήσεων για κάθε θερμοκρασία όπως αναφέρθηκε πως υπολογίσθηκαν (6^ο Κεφάλαιο, § 6.3.2.2) ενώ στο Σχήμα 8.8 γίνεται η σύγκριση των δεικτών για τα διάφορα δείγματα και στις δύο θερμοκρασίες.

Πίνακας 8.1. Δείκτες θιξοτροπίας πολφών γεωτρήσεων που ωρίμασαν με ενυδάτωση.

	ΔΕΙΚΤΗΣ LOW T	ΔΕΙΚΤΗΣ HIGH T
ΤΥΠΟΣ ΠΟΛΦΟΥ	Watt/m ³	Watt/m ³
A (πολφός βάσης)	781	1748
A + TH3	86	246
A + TH4	138	263
A + TH7	776	838
A + MT2	140	193
A + MT4	364	769
A + MT7	650	1639



Σχήμα 8.8. Συγκριτικό διάγραμμα δεικτών θιξοτροπίας στις δύο θερμοκρασίες δοκιμής.

Συνδυάζοντας τις καμπύλες των ρεογραμμάτων και τα αριθμητικά δεδομένα του Πίνακα 8.1 και του Σχήματος 8.8 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα για την θιξοτροπία:

1. Όλα τα δείγματα παρουσιάζουν χαμηλό δείκτη θιξοτροπίας και ότι η θιξοτροπία τους αυξάνει όταν μελετώνται σε υψηλή θερμοκρασία. Ο πολφός βάσης παρουσιάζει το μεγαλύτερο δείκτη θιξοτροπίας και έπεται ο πολφός A + MT7.
2. Ο πολφός βάσης (Σχήμα 8.1) εμφανίζει θιξοτροπία σε χαμηλούς ρυθμούς διάτμησης και παρουσιάζει μεγάλη τάση διολίσθησης άρα εμφανίζει τάση για δημιουργία γέλης. Τα φαινόμενα αυτά εντείνονται όταν η θιξοτροπία μελετάται σε υψηλή θερμοκρασία.
3. Το μόνο δείγμα που εμφανίζει θιξοτροπία και συγκρίνεται με τον πολφό βάσης είναι αυτό που περιέχει λιγνίτη από τον Κυπρίνο (A + MT7). Από τον Πίνακα 8.1. φαίνεται ότι οι δείκτες θιξοτροπίας είναι ποσοτικά παραπλήσιοι με αυτούς του πολφού βάσης, με τη διαφορά ότι η τιμές αυτές προέρχονται από όλο το εύρος των ρυθμών διάτμησης (ισοκατανομή) ενώ ο πολφός βάσης είναι θιξοτροπικός σε χαμηλούς ρυθμούς διάτμησης ($< 200 \text{ sec}^{-1}$).
4. Ο πολφός με τύρφη από την Ξυνιάδα (A + TH3) έχει τη μικρότερη θιξοτροπία από όλα τα υπόλοιπα δείγματα. Η ίδια παρατήρηση γίνεται για τον λιγνίτη του Αλμυρού (A + TH4) και την τύρφη της Δράμας (A + MT2).
5. Στους υπόλοιπους τρεις πολφούς με λιγνίτες από το Δομένικο (A + TH7), τις Σάππες (A + MT4) και τον Κυπρίνο (A + MT7), η θιξοτροπία είναι σχετικά μεγαλύτερη αλλά η «κατανομή» της παραμένει γραμμική σε όλους του ρυθμούς διάτμησης.

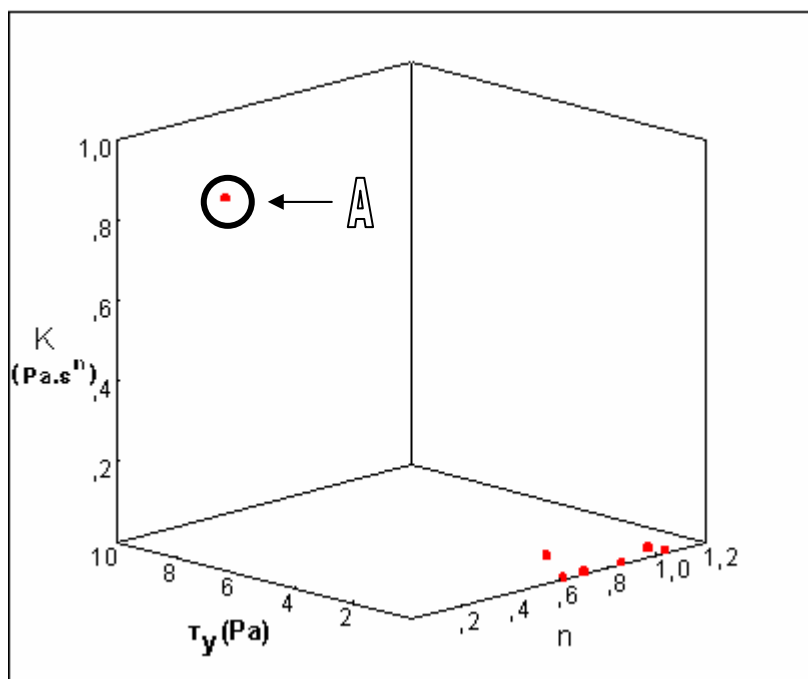
8.2.2. Εύρεση ρεολογικών μοντέλων πολφών

Λόγω του γεγονότος ότι σε κάθε πείραμα θιξοτροπίας εκτελείται κυκλική διαδρομή (άνοδος και κάθοδος του ρυθμού διάτμησης), προκύπτουν δύο ρεογράμματα για κάθε πολφό. Επιπρόσθετα, επειδή η ρεολογία μελετάται σε δύο θερμοκρασίες, προκύπτουν άλλα δύο ρεογράμματα. Έτσι, για κάθε πολφό γεώτρησης, οι ρεολογικές παράμετροι που προκύπτουν είναι διπλές – είναι αυτές που μετρώνται κατά την άνοδο και αυτές που μετρώνται κατά την

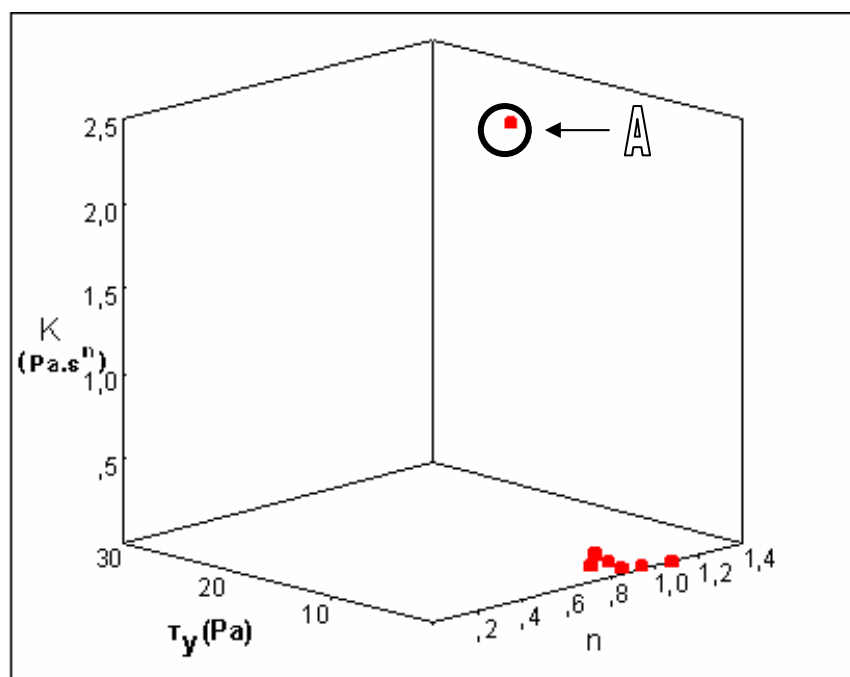
κάθοδο του ρυθμού διάτμησης – για κάθε θερμοκρασία δοκιμής. Στον Πίνακα 8.2. παρουσιάζονται οι ρεολογικές παράμετροι που υπολογίσθηκαν (6^ο Κεφάλαιο, §6.3.2.2) για τη χαμηλή θερμοκρασία δοκιμής. Στον Πίνακα 8.3. παρουσιάζονται οι ρεολογικές παράμετροι που υπολογίσθηκαν για την υψηλή θερμοκρασία δοκιμής, αντίστοιχα. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθούν και να συσχετισθούν οι παραπάνω μετρήσεις, δημιουργούνται τα ακόλουθα διαγράμματα (Σχήματα 8.9 έως 8.12) που δείχνουν την τρισδιάστατη απεικόνιση των ρεολογικών παραμέτρων σε σχέση με τον πολφό βάσης.

Πίνακας 8.2. Παράμετροι ρεολογίας σε ιξωδομέτρηση σε T = 25 °C.

ΑΥΞΗΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (0 → 600 rpm)				
ΠΟΛΦΟΙ	ΤΑΣΗ ΔΙΟΛΙΣΘΗΣΗΣ τ_y (Pa)	ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (K) (Pa.sⁿ)	ΟΔΗΓΟΣ ΡΟΪΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (n)	R²
A	8,439	0,844	0,255	0,994
A + TH3	0,010	0,001	0,856	0,999
A + TH4	0,010	0,001	1,036	0,996
A + TH7	0,487	0,049	0,611	0,998
A + MT2	0,150	0,015	0,984	0,997
A + MT4	0,010	0,001	0,704	0,996
A + MT7	0,010	0,001	0,618	0,998
ΜΕΙΩΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (600 → 0 rpm)				
ΠΟΛΦΟΙ	ΤΑΣΗ ΔΙΟΛΙΣΘΗΣΗΣ τ_y (Pa)	ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (K) (Pa.sⁿ)	ΟΔΗΓΟΣ ΡΟΪΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (n)	R²
A	21,498	2,150	1,354	0,976
A + TH3	0,326	0,033	0,861	0,999
A + TH4	0,174	0,017	0,951	0,998
A + TH7	1,243	0,124	0,786	0,999
A + MT2	0,010	0,001	1,080	0,996
A + MT4	0,760	0,076	0,824	0,999
A + MT7	0,812	0,081	0,746	0,999



Σχήμα 8.9. Τρισδιάστατη απεικόνιση ρεολογικών παραμέτρων σε δείγματα που ωρίμασαν με ενυδάτωση. Αύξηση ρυθμού διάτμησης σε $T = 25^\circ\text{C}$.

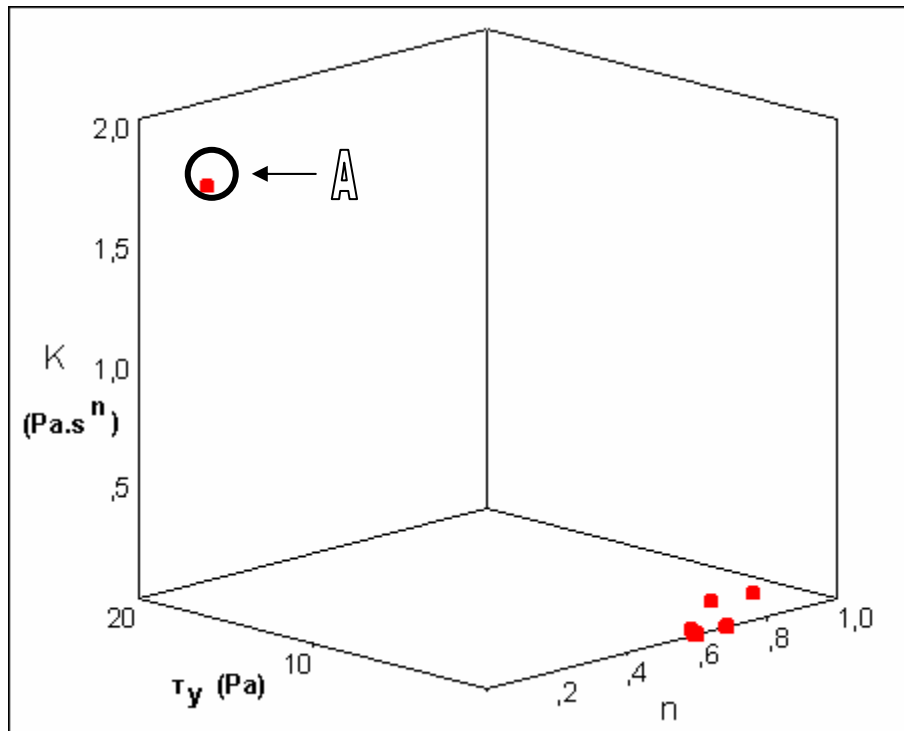


Σχήμα 8.10. Τρισδιάστατη απεικόνιση ρεολογικών παραμέτρων σε δείγματα που ωρίμασαν με ενυδάτωση. Μείωση ρυθμού διάτμησης σε $T = 25^\circ\text{C}$.

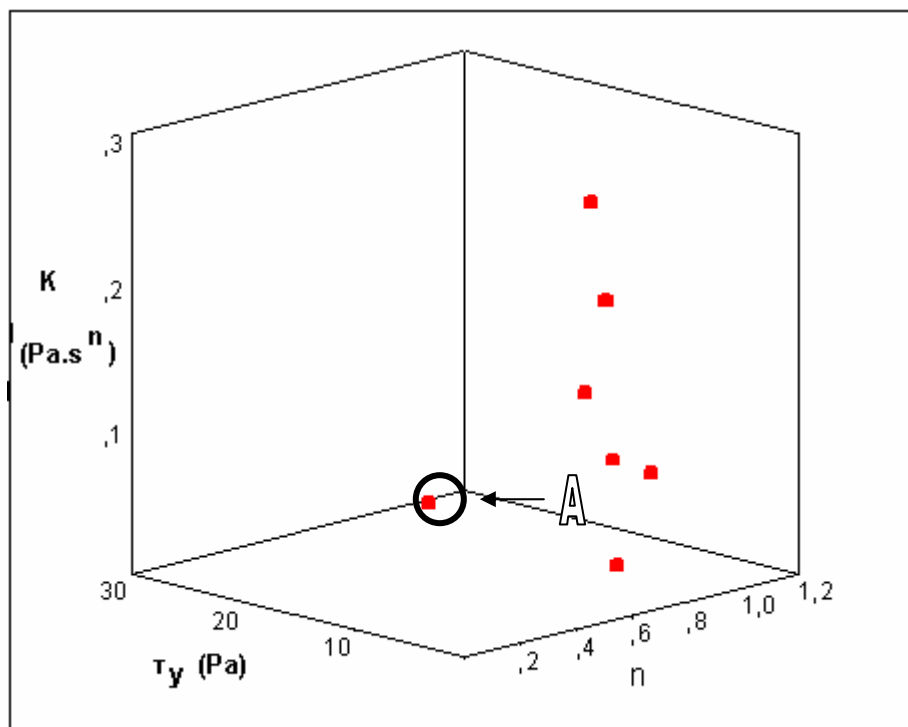
Πίνακας 8.3. Παράμετροι ρεολογίας σε ιξωδομέτρηση σε T = 65 °C.

ΑΥΞΗΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (0 → 600 rpm)				
ΠΟΛΦΟΣ	ΤΑΣΗ ΔΙΟΛΙΣΘΗΣΗΣ τ_y (Pa)	ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (K) (Pa.sⁿ)	ΟΔΗΓΟΣ ΡΟΪΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (n)	R²
A	17,434	0,001	0,076	0,838
A + TH3	0,010	0,001	0,597	0,995
A + TH4	0,010	0,001	0,686	0,992
A + TH7	0,900	0,090	0,690	0,998
A + MT2	0,058	0,006	0,598	0,997
A + MT4	0,199	0,020	0,597	0,997
A + MT7	0,792	0,079	0,800	0,988
ΜΕΙΩΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (600 → 0 rpm)				
ΠΟΛΦΟΣ	ΤΑΣΗ ΔΙΟΛΙΣΘΗΣΗΣ τ_y (Pa)	ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (K) (Pa.sⁿ)	ΟΔΗΓΟΣ ΡΟΪΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (n)	R²
A **	28,400	$\mu_p = 0,004$	1,000	0,991
A + TH3	1,051	0,105	0,573	0,996
A + TH4	0,364	0,036	0,561	0,998
A + TH7	2,110	0,211	0,590	0,997
A + MT2	0,902	0,090	0,706	0,997
A + MT4	1,530	0,153	0,493	0,994
A + MT7	2,776	0,278	0,563	0,996

** Στη περίπτωση του πολφού βάσης, κατά τη μείωση του ρυθμού διάτμησης, το ρεολογικό μοντέλο που περιγράφει καλύτερα τον πολφό είναι το πλαστικό Bingham, με παραμέτρους την τάση διολίσθησης και το πλαστικό ιξώδες (μ_p). Για το λόγο αυτό δεν μπορεί να γίνει συσχέτιση των ρεολογικών παραμέτρων.



Σχήμα 8.11. Τρισδιάσταση απεικόνιση ρεολογικών παραμέτρων σε δείγματα που ωρίμασαν με ενυδάτωση. Αύξηση ρυθμού διάτμησης σε $T = 65^{\circ}\text{C}$.



Σχήμα 8.12. Τρισδιάσταση απεικόνιση ρεολογικών παραμέτρων σε δείγματα που ωρίμασαν με ενυδάτωση. Μείωση ρυθμού διάτμησης σε $T = 65^{\circ}\text{C}$.

Από τα δεδομένα των Πινάκων 8.2, 8.3 και με παρατήρηση των Σχημάτων 8.9 έως και 8.12 φαίνεται και ποσοτικά η βελτίωση στην τάση διολίσθησης που πετυχαίνει η προσθήκη λιγνίτη στον πολφό βάσης. Επιπλέον, ο οδηγός συνάφειας είναι ο μεγαλύτερος στον πολφό βάσης, ενώ ελαχιστοποιείται στους υπόλοιπους πολφούς. Οι λιγνίτες λοιπόν επαληθεύουν την ιδιότητά τους ως λεππυντές (thinners) καθώς οι πολφοί που τους περιέχουν είναι λιγότερο ιξώδεις.

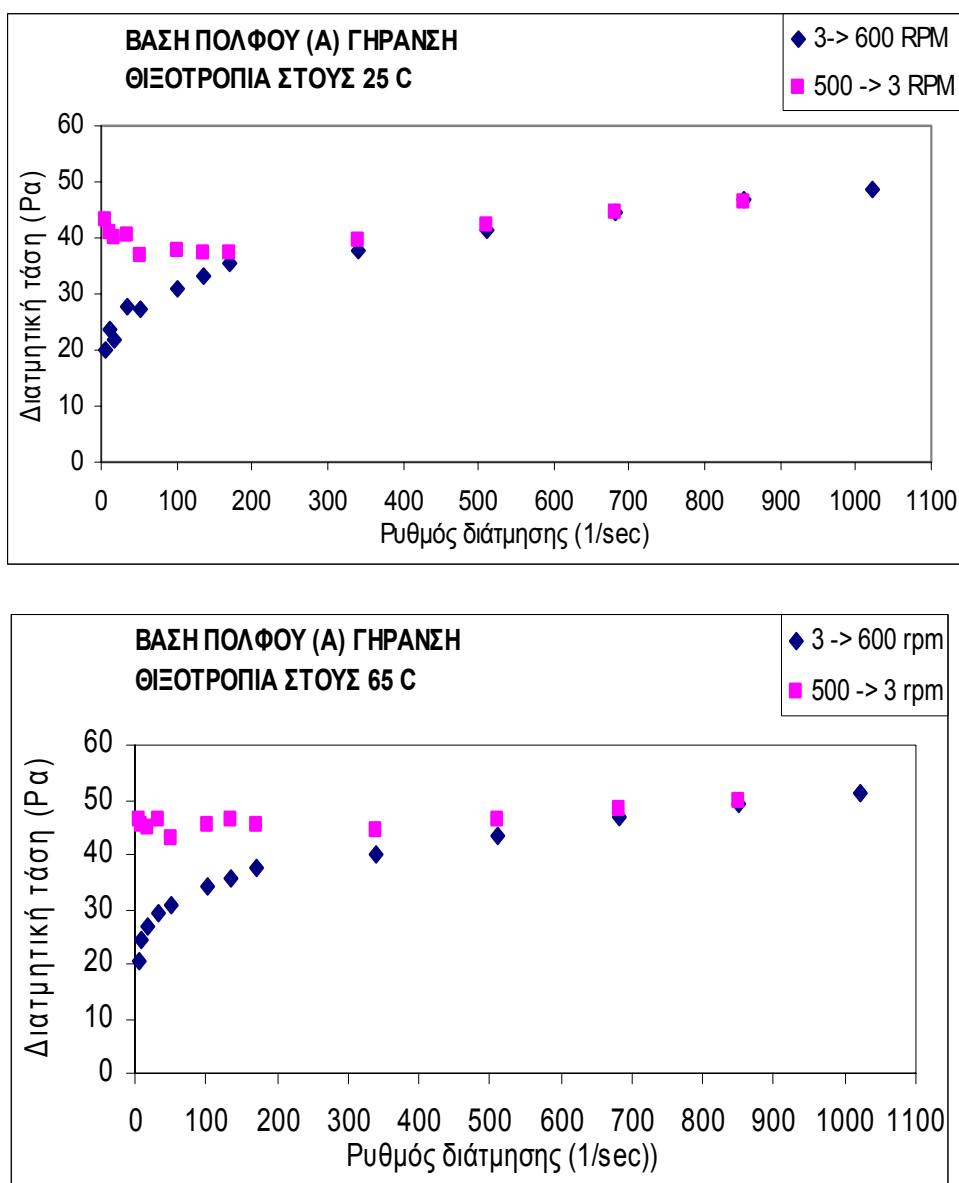
Πιο αναλυτικά, εξάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Ο συντελεστής προσαρμογής R^2 στις περισσότερες περιπτώσεις είναι σχεδόν 1. Εκτός του πολφού βάσης για $T = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$, αύξηση ρυθμού διάτμησης που είναι 0,838, σε όλα τα υπόλοιπα δείγματα είναι 0,98 – 0,99, άρα το ρεολογικό μοντέλο Herschel – Bulkley είναι το καλύτερο δυνατό ρεολογικό μοντέλο για τους πολφούς που αναλύθηκαν.
2. Σε θερμοκρασία $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, κατά την αύξηση του ρυθμού διάτμησης, ο συντελεστής συμπεριφοράς του πολφού βάσης, n , είναι 0,255 (πολύ χαμηλός) ενώ στην αύξηση του ρυθμού διάτμησης είναι 1,354, δηλαδή το ρευστό γίνεται ρεοπεκτικό.
3. Σε θερμοκρασία $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, για τους πολφούς με λιγνίτη, ο συντελεστής συμπεριφοράς είναι 0,6 – 1, ανεξαρτήτως αύξησης ή μείωσης ρυθμού διάτμησης.
4. Η ίδια παρατήρηση γίνεται για θερμοκρασία δοκιμής $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, όπου οι πολφοί με λιγνίτες έχουν n : 0,5 – 0,8 δηλαδή είναι μη νευτώνεια ρευστά.
5. Και στις δύο θερμοκρασίες δοκιμής, οι τιμές των τ_y και K των πολφών με λιγνίτες είναι μικρότερες κατά την αύξηση του ρυθμού διάτμησης απ' ότι στην μείωση του ρυθμού διάτμησης, ενώ το n είναι περίπου σταθερό.

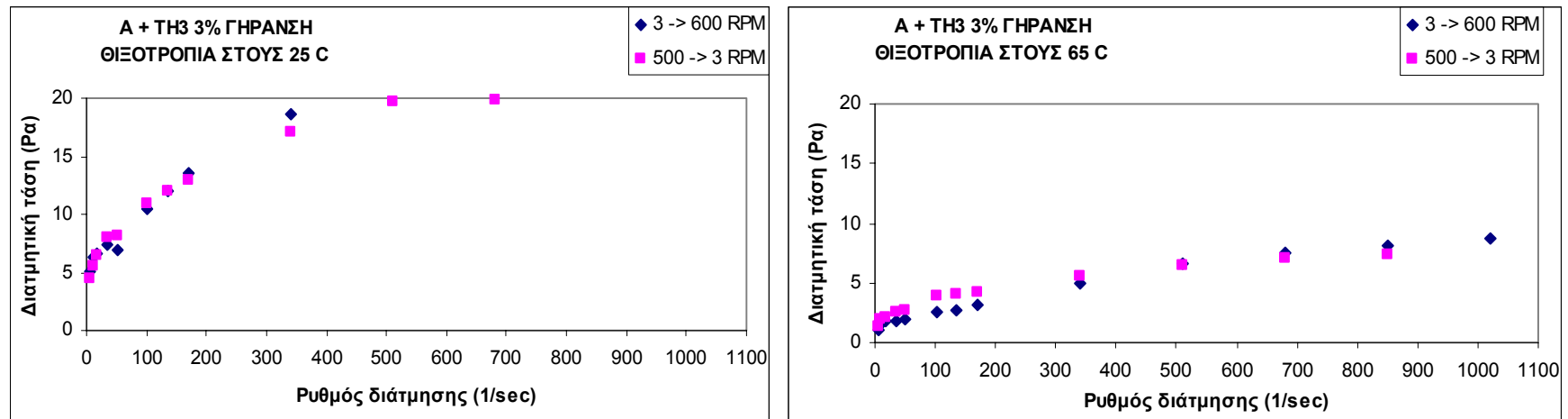
8.3. Μελέτη ρεολογίας σε πολφούς που ωρίμασαν με στατική γήρανση

8.3.1. Θιξοτροπία πολφών

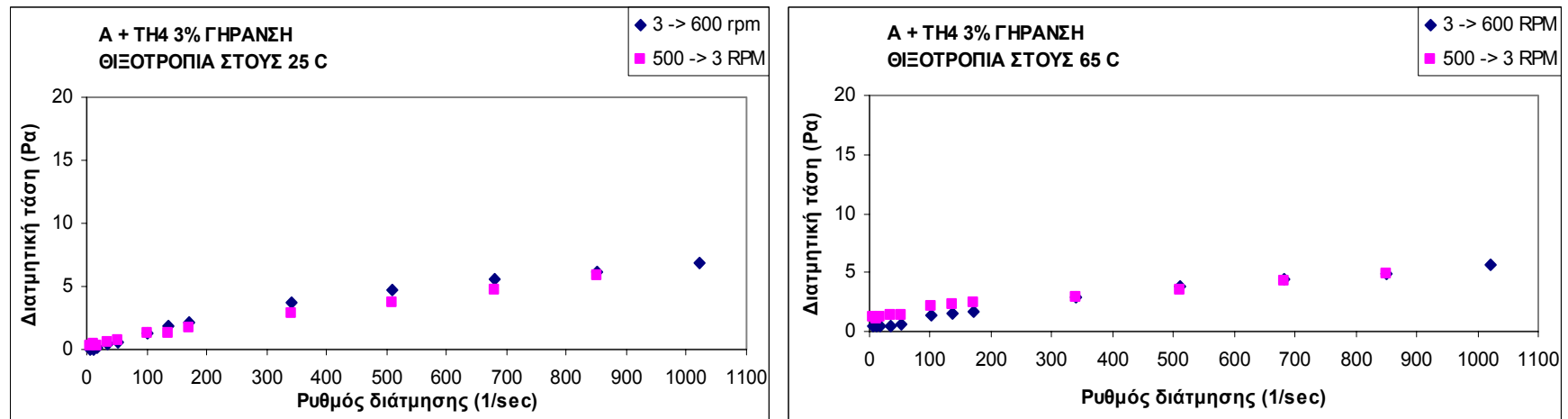
Στα Σχήματα 8.13 – 8.19 παρουσιάζονται τα διαγράμματα θιξοτροπίας για τους πολφούς γεώτρησης που έχουν ωριμάσει με στατική γήρανση σε φούρνο στους 177 °C.



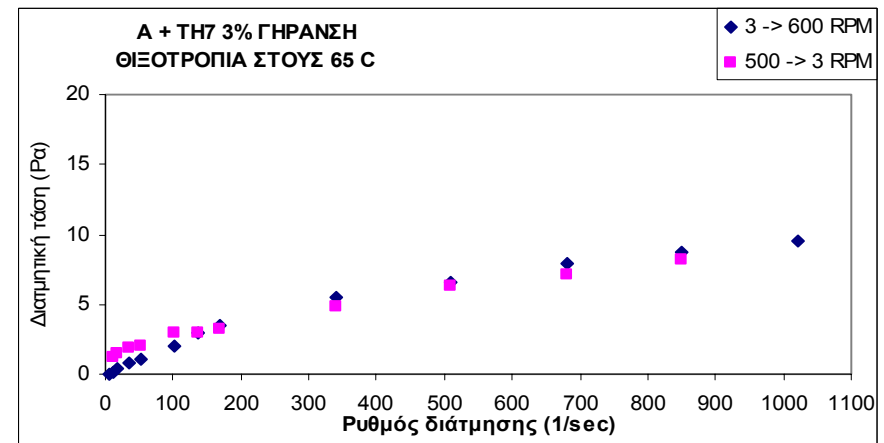
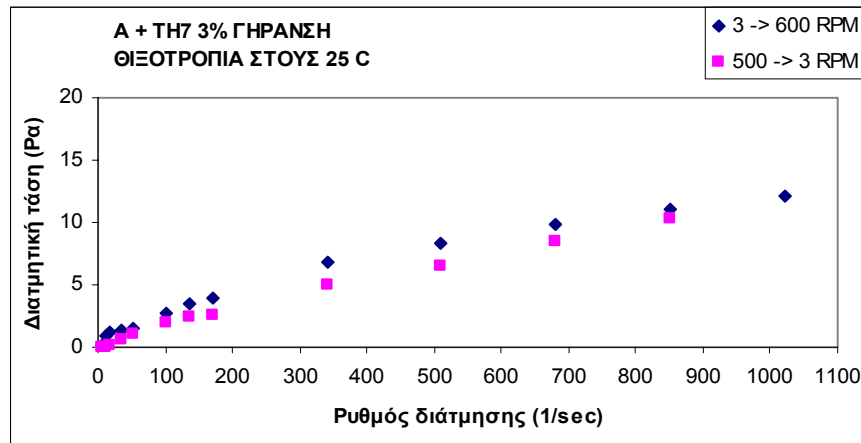
Σχήμα 8.13. Θιξοτροπία πολφού βάσης σε χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία.



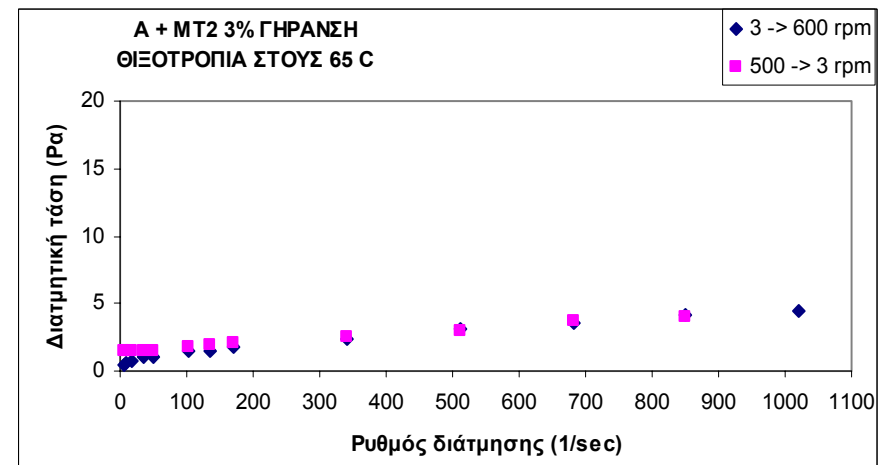
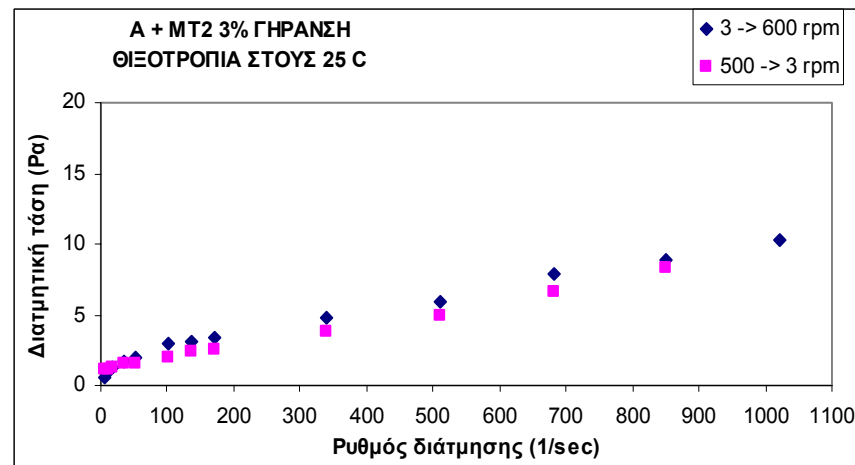
Σχήμα 8.14. Θιξοτροπία πολφού Α + TH3 σε χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία.



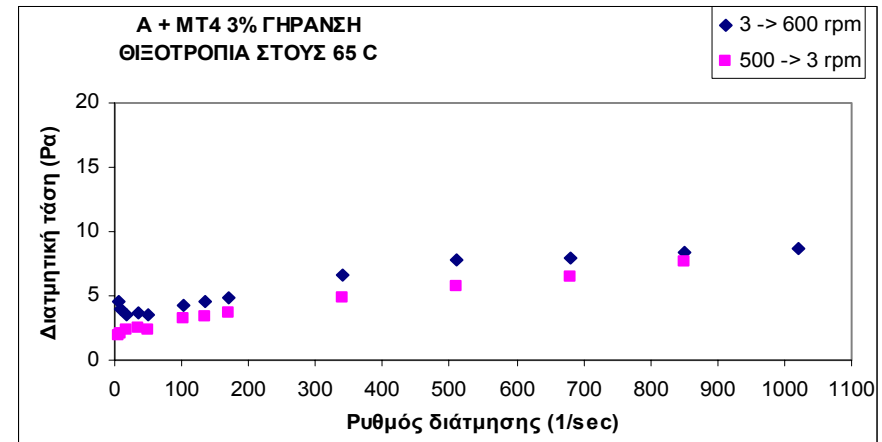
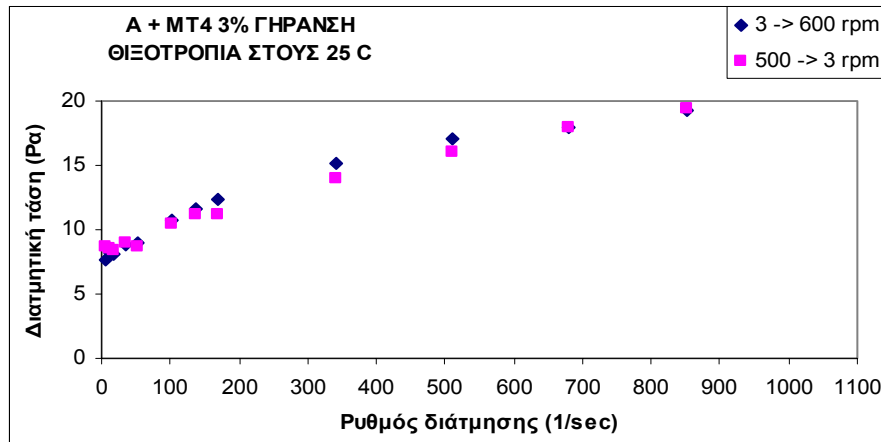
Σχήμα 8.15. Θιξοτροπία πολφού Α + TH4 σε χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία.



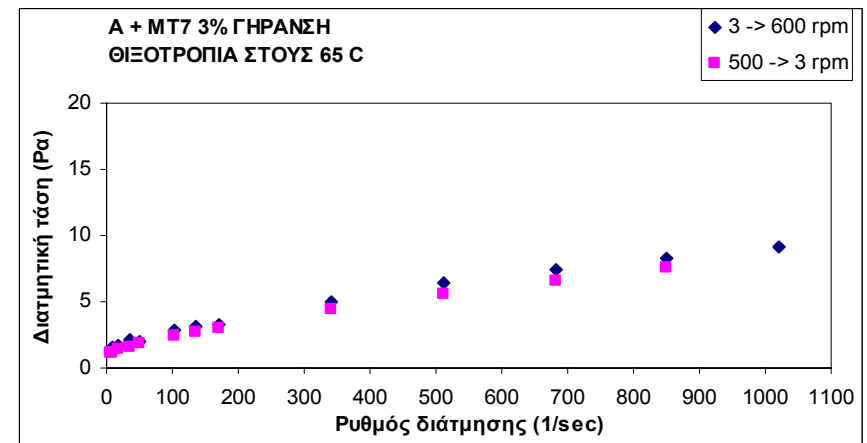
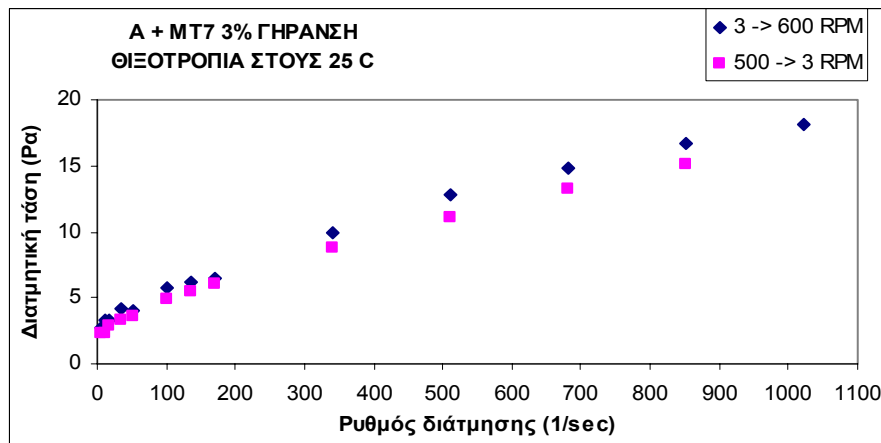
Σχήμα 8.16. Θιξοτροπία πολφού A + TH7 σε χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία.



Σχήμα 8.17. Θιξοτροπία πολφού A + MT2 σε χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία.



Σχήμα 8.18. Θιξοτροπία πολφού A + MT4 σε χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία.

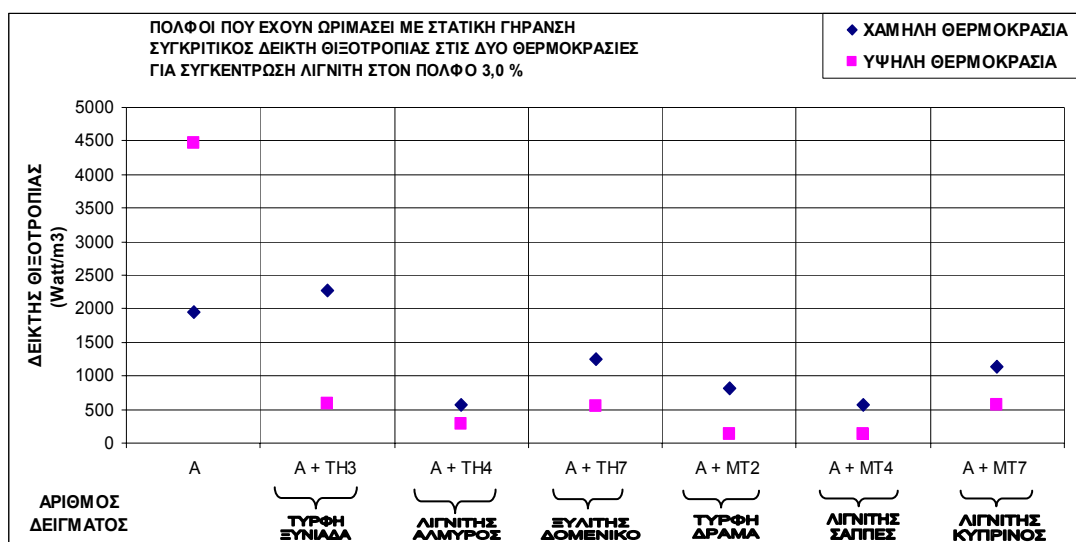


Σχήμα 8.19. Θιξοτροπία πολφού A + MT4 σε χαμηλή και υψηλή θερμοκρασία.

Στον Πίνακα 8.4. παρουσιάζονται οι δείκτες θιξοτροπίας των πολφών γεωτρήσεων για κάθε θερμοκρασία ενώ στο Σχήμα 8.20 γίνεται η σύγκριση των δεικτών σε σχέση με τις θερμοκρασίες δοκιμής.

Πίνακας 8.4. Δείκτες θιξοτροπίας πολφών γεωτρήσεων που ωρίμασαν με στατική γήρανση.

	ΔΕΙΚΤΗΣ LOW T	ΔΕΙΚΤΗΣ HIGH T
ΤΥΠΟΣ ΠΟΛΦΟΥ	Watt/m ³	Watt/m ³
A (πολφός βάσης)	1960	4470
A + TH3	2275	580
A + TH4	577	283
A + TH7	1245	544
A + MT2	810	133
A + MT4	577	134
A + MT7	1130	565



Σχήμα 8.20. Συγκριτικό διάγραμμα δεικτών θιξοτροπίας στις δύο θερμοκρασίες δοκιμής.

Συνδυάζοντας τις καμπύλες των ρεογραμμάτων και τα αριθμητικά δεδομένα του Πίνακα 8.4 και του Σχήματος 8.20 προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα για την θιξοτροπία:

1. Οι τιμές των δεικτών θιξοτροπίας είναι ελαφρά υψηλότερες σε σχέση με αυτά που έδωσαν οι πολφοί που ωρίμασαν με ενυδάτωση. Στην συγκεκριμένη όμως περίπτωση, παρατηρείται ότι η θιξοτροπία των πολφών με λιγνίτη μειώνεται όταν αυτοί μελετώνται σε υψηλή θερμοκρασία.
2. Ο πολφός βάσης (Σχήμα 8.13) εμφανίζει θιξοτροπία σε χαμηλούς ρυθμούς διάτμησης και παρουσιάζει μεγάλη τάση διολίσθησης άρα εμφανίζει τάση για δημιουργία γέλης. Τα φαινόμενα αυτά εντείνονται όταν ο πολφός μελετάται σε υψηλή θερμοκρασία. Η θιξοτροπία του υλικού πολλαπλασιάζεται ($\times 2,5$ φορές) και μάλιστα εμφανίζει τη μέγιστη τιμή σε σχέση με όλα τα μελετούμενα δείγματα. Φαίνεται ότι ο ήδη «καταπονημένος» πολφός μπεντονίτη (λόγω της στατικής γήρανσης) δεν μπορεί να συνεχίσει να δουλεύει σε υψηλές θερμοκρασίες. Αντιθέτως δείχνει να στερεοποιείται.
3. Μεγαλύτεροι είναι οι δείκτες θιξοτροπίας χαμηλής θερμοκρασίας για τους πολφούς A + TH3, A + TH7 και A + MT7. Και εδώ όμως υπάρχει ίση κατανομή της ποσότητας της θιξοτροπίας. Το σημαντικότερο όμως είναι ότι οι δείκτες θιξοτροπίας μειώνονται πολύ όταν τα δείγματα αυτά εξετάζονται σε υψηλή θερμοκρασία. Ο δείκτης θιξοτροπίας είναι χαμηλός, πράγμα που δείχνει ότι οι πολφοί αυτοί, αν και έχουν ήδη ωριμάσει σε υψηλή θερμοκρασία, εντούτοις, μπορούν και δουλεύουν πολύ καλά, τουλάχιστον για την θερμοκρασία δοκιμής.
4. Στους υπόλοιπους τρεις πολφούς με λιγνίτες από τον Αλμυρό (A + TH4), τη Δράμα (A + MT2) και τις Σάππες (A + MT4), η θιξοτροπία είναι μικρή σε χαμηλή θερμοκρασία και ακόμη μικρότερη στην υψηλή θερμοκρασία δοκιμής.

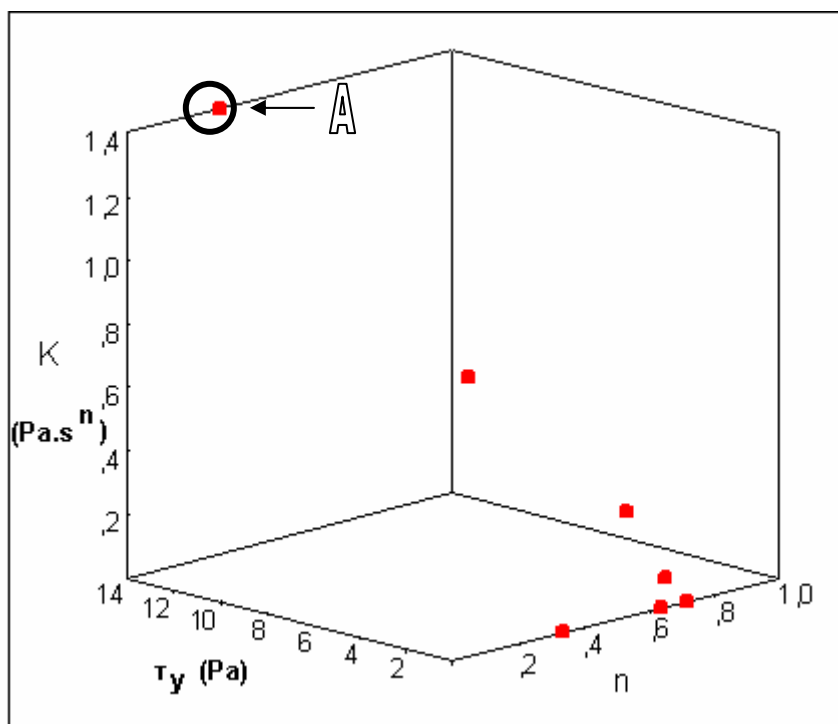
Γίνεται πλέον εμφανές ότι ο πολφός με μπεντονίτη είναι ιδιαίτερα ευπαθής στις υψηλές θερμοκρασίες, ενώ οι πολφοί με λιγνίτες λειτουργούν πολύ ικανοποιητικά και μάλιστα δείχνουν τη βέλτιστη συμπεριφορά όταν συνεχίζουν να καταπονούνται θερμικά.

8.3.2. Εύρεση ρεολογικών μοντέλων πολφών

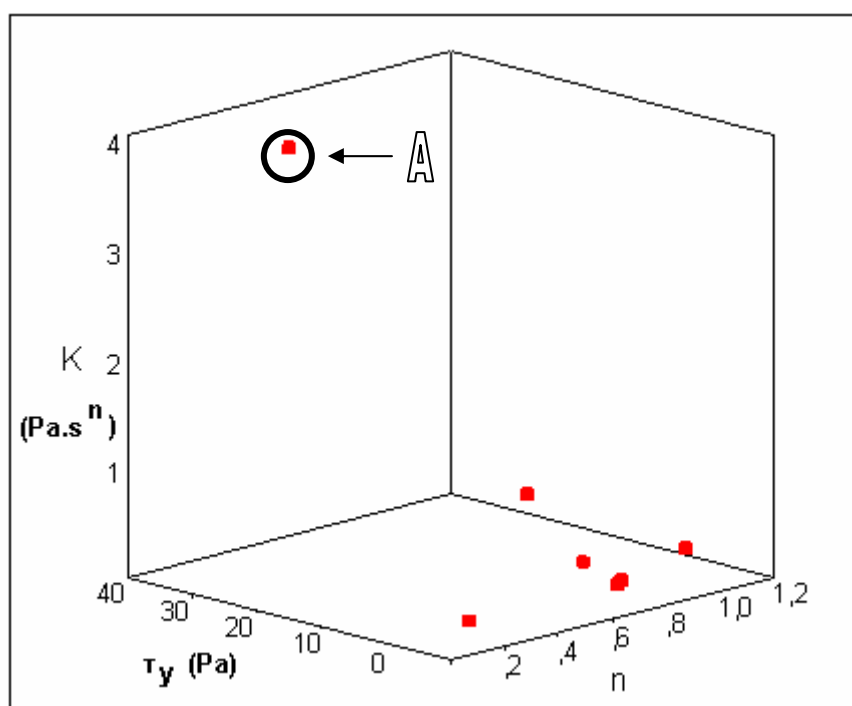
Στον Πίνακα 8.5. παρουσιάζονται οι ρεολογικές παράμετροι που υπολογίσθηκαν βάσει του ρεολογικού μοντέλου Herschel – Bulkley (6^ο Κεφάλαιο) για τη χαμηλή θερμοκρασία δοκιμής και στον Πίνακα 8.6. παρουσιάζονται οι ρεολογικές παράμετροι που υπολογίσθηκαν για την υψηλή θερμοκρασία δοκιμής. Προκειμένου να ποσοτικοποιηθούν και να συσχετισθούν οι παραπάνω μετρήσεις, έγιναν τρισδιάστατες απεικονίσεις των ρεολογικών παραμέτρων (Σχήματα 8.21 - 8.24) που συγκρίνουν τις ρεολογικές παραμέτρους σε σχέση με τον πολφό βάσης.

Πίνακας 8.5. Παράμετροι ρεολογίας σε ιξωδομέτρηση δειγμάτων μετά από στατική γήρανση (177 ^οC), σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (25 ^οC).

ΑΥΞΗΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (0 → 600 rpm)				
ΠΟΛΦΟΙ	ΤΑΣΗ ΔΙΟΛΙΣΘΗΣΗΣ τ_y (Pa)	ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (K) (Pa.sⁿ)	ΟΔΗΓΟΣ ΡΟΪΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (n)	R²
A	13,974	1,397	0,285	0,994
A + TH3	0,069	0,007	0,340	0,966
A + TH4	0,010	0,001	0,716	0,994
A + TH7	0,010	0,001	0,633	0,997
A + MT2	0,676	0,068	0,700	0,997
A + MT4	6,394	0,639	0,500	0,997
A + MT7	2,409	0,241	0,701	0,998
ΜΕΙΩΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (600 → 0 rpm)				
ΠΟΛΦΟΙ	ΤΑΣΗ ΔΙΟΛΙΣΘΗΣΗΣ τ_y (Pa)	ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (K) (Pa.sⁿ)	ΟΔΗΓΟΣ ΡΟΪΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (n)	R²
A	36,219	3,622	0,509	0,984
A + TH3	0,010	0,001	0,309	0,995
A + TH4	0,270	0,027	0,880	0,999
A + TH7	0,010	0,001	0,859	0,999
A + MT2	1,259	0,126	1,145	0,998
A + MT4	7,866	0,787	0,710	0,998
A + MT7	2,127	0,213	0,779	0,999



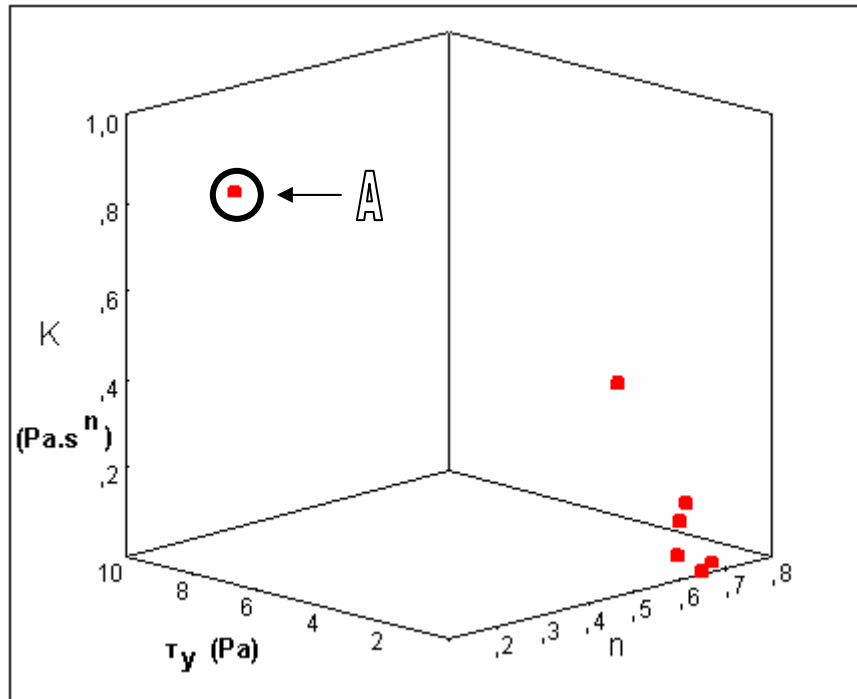
Σχήμα 8.21. Τρισδιάστατη απεικόνιση ρεολογικών παραμέτρων σε δείγματα που ωρίμασαν με στατική γήρανση. Αύξηση ρυθμού διάτμησης σε $T = 25^{\circ}\text{C}$.



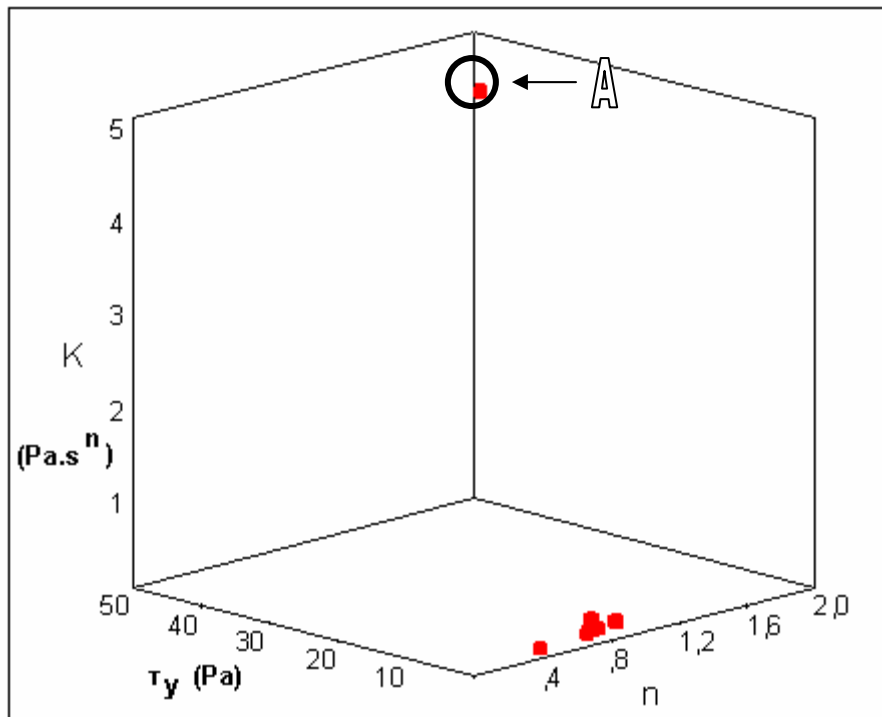
Σχήμα 8.22. Τρισδιάστατη απεικόνιση ρεολογικών παραμέτρων σε δείγματα που ωρίμασαν με στατική γήρανση. Μείωση ρυθμού διάτμησης σε $T = 25^{\circ}\text{C}$.

Πίνακας 8.6. Παράμετροι ρεολογίας σε ιξωδομέτρηση δειγμάτων μετά από στατική γήρανση (177 °C), σε υψηλή θερμοκρασία (65 °C).

ΑΥΞΗΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (0 → 600 rpm)				
ΠΟΛΦΟΙ	ΤΑΣΗ ΔΙΟΛΙΣΘΗΣΗΣ τ_y (Pa)	ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (K) (Pa.s ⁿ)	ΟΔΗΓΟΣ ΡΟΪΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (n)	R ²
A	8,281	0,828	0,213	0,993
A + TH3	0,954	0,095	0,668	0,994
A + TH4	0,138	0,014	0,680	0,997
A + TH7	0,010	0,001	0,650	0,994
A + MT2	0,380	0,038	0,619	0,999
A + MT4	3,494	0,349	0,710	0,970
A + MT7	1,205	0,120	0,701	0,998
ΜΕΙΩΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (600 → 0 rpm)				
ΠΟΛΦΟΙ	ΤΑΣΗ ΔΙΟΛΙΣΘΗΣΗΣ τ_y (Pa)	ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (K) (Pa.s ⁿ)	ΟΔΗΓΟΣ ΡΟΪΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (n)	R ²
A	45,197	4,520	1,839	0,884
A + TH3	0,721	0,072	0,413	0,997
A + TH4	1,062	0,106	0,727	0,994
A + TH7	0,977	0,098	0,695	0,998
A + MT2	1,375	0,138	0,886	0,997
A + MT4	1,938	0,194	0,766	0,997
A + MT7	1,063	0,106	0,779	0,999



Σχήμα 8.23. Τρισδιάστατη απεικόνιση ρεολογικών παραμέτρων σε δείγματα που ωρίμασαν με στατική γήρανση. Αύξηση ρυθμού διάτμησης σε $T = 65^\circ\text{C}$.



Σχήμα 8.24. Ποσοστό βελτίωσης ρεολογικών παραμέτρων σε δείγματα που ωρίμασαν με στατική γήρανση. Μείωση ρυθμού διάτμησης σε $T = 65^\circ\text{C}$.

Από τα δεδομένα των Πινάκων 8.5 και 8.6 και τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται και ποσοτικά η πτώση της τάσης διολίσθησης που πετυχαίνει η προσθήκη λιγνίτη στον πολφό βάσης. Στα δείγματα που έχουν ωριμάσει με στατική γήρανση παρατηρούνται κάποιες μικρές διαφοροποιήσεις ως προς την τάση διολίσθησης. Κάποια δείγματα πολφών εμφανίζουν ελαφρά αυξημένες τιμές (σε σχέση με αυτά που ωρίμασαν με ενυδάτωση) (λιγνίτης MT4) αλλά πάντοτε πολύ χαμηλότερες από τις τιμές που δίνει ο πολφός βάσης. Επιπλέον, ο οδηγός συνάφειας είναι ο μεγαλύτερος στον πολφό βάσης, ενώ ελαχιστοποιείται στους υπόλοιπους πολφούς. Και μάλιστα αυξάνει στην υψηλή θερμοκρασία δοκιμής για τον πολφό βάσης ενώ στους πολφούς με λιγνίτες δεν παρουσιάζονται αξιοσημείωτες αλλαγές. Και πάλι πρέπει να σημειωθεί η σημαντική συνεισφορά των λιγνιτών στους πολφούς λόγω της ανθεκτικής τους συμπεριφοράς απέναντι στην θερμική καταπόνηση κατά την ωρίμανση καθώς και κατά την λειτουργία τους σε υψηλές θερμοκρασίες.

Πιο αναλυτικά, εξάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα:

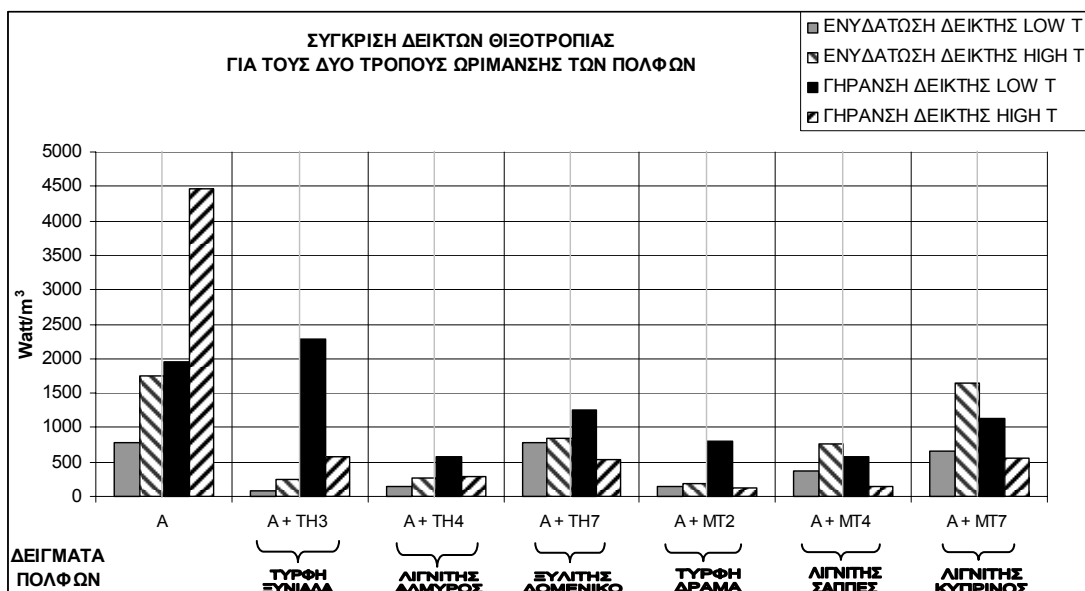
1. Ο συντελεστής προσαρμογής R^2 στις περισσότερες περιπτώσεις είναι σχεδόν 1. Εκτός του πολφού βάσης για $T = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$, μείωση ρυθμού διάτμησης που είναι 0,884, σε όλα τα υπόλοιπα δείγματα είναι 0,97 – 0,99, άρα το ρεολογικό μοντέλο Herschel – Bulkley είναι το καλύτερο δυνατό ρεολογικό μοντέλο για τους πολφούς που αναλύθηκαν.
2. Σε θερμοκρασία $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, κατά την αύξηση του ρυθμού διάτμησης, ο συντελεστής συμπεριφοράς του πολφού βάσης, n , είναι 0,255 (πολύ χαμηλός) ενώ στη μείωση του ρυθμού διάτμησης είναι 1,839, δηλαδή το ρευστό γίνεται ρεοπεκτικό.
3. Σε θερμοκρασία $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, για τους πολφούς με λιγνίτης, ο συντελεστής συμπεριφοράς είναι 0,3 – 0,8, ανεξαρτήτως αύξησης ή μείωσης ρυθμού διάτμησης. Εξαιρείται μόνο ο πολφός A + MT2 με $n = 1,145$ (ρεοπεκτικό) κατά τη μείωση του ρυθμού διάτμησης.
4. Η ίδια παρατήρηση γίνεται για θερμοκρασία δοκιμής $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, όπου οι πολφοί με λιγνίτες έχουν n : 0,4 – 0,9.

5. Και στις δύο θερμοκρασίες δοκιμής, οι τιμές των τ_y και K των πολφών με λιγνίτες είναι μικρότερες κατά τη μείωση του ρυθμού διάτμησης απ' ότι στην αύξηση του ρυθμού διάτμησης, ενώ το n είναι περίπου σταθερό.

8.4. Σύγκριση των μετρήσεων ρεολογίας για τους δύο τρόπους ωρίμανσης των πολφών

8.4.1. Σύγκριση της θιξοτροπίας των δειγμάτων

Στο Σχήμα 8.25 γίνεται η σύγκριση των δεικτών θιξοτροπίας των γεωτρητικών πολφών που ωρίμασαν και με τους δύο τρόπους ωρίμανσης. Ο πολφός βάσης εμφανίζει την μεγαλύτερη θιξοτροπία από όλα τα υπόλοιπα δείγματα, ιδιαίτερα στην περίπτωση που ο πολφός έχει υποστεί γήρανση και μελετάται σε θερμοκρασία 65⁰C (υψηλή). Αντιθέτως όλοι οι πολφοί με λιγνίτη έχουν πολύ μικρότερη θιξοτροπία, η οποία μάλιστα γίνεται ελάχιστη στην αντίστοιχη περίπτωση που συζητήθηκε για τον πολφό βάσης (γήρανση – υψηλή θερμοκρασία).

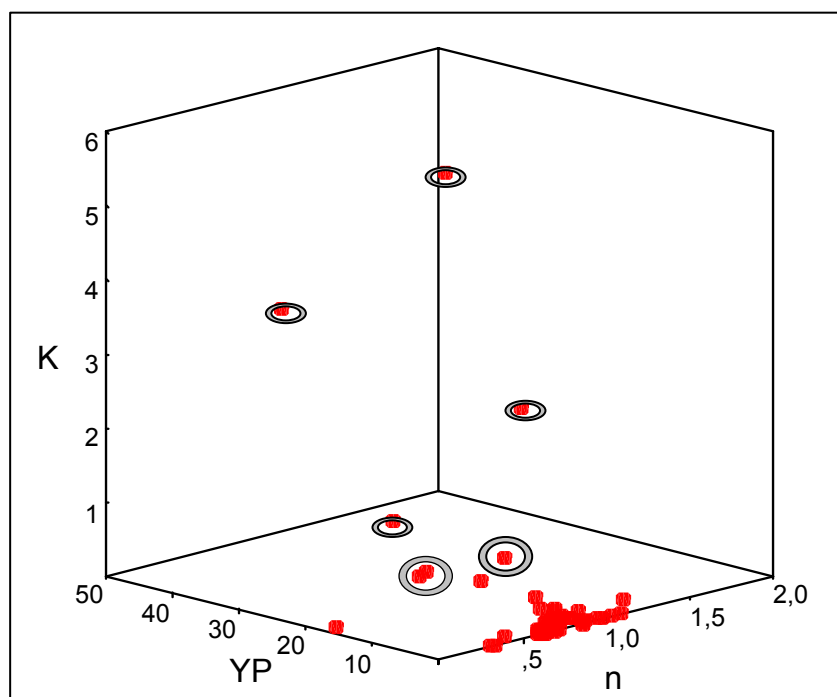


Σχήμα 8.25. Συγκριτικό διάγραμμα των δεικτών θιξοτροπίας των πολφών και για τους δύο τρόπους ωρίμανσης.

Γενικότερα όμως, πρέπει να ειπωθεί ότι η θιξοτροπία των πολφών είναι μικρή, συμπέρασμα που προκύπτει από τα ρεογράμματα. Έτσι, και ο δείκτης θιξοτροπίας του πολφού βάσης που είναι και ο μεγαλύτερος (4000...) δείχνει ότι ακόμη και στον πολφό βάσης η θιξοτροπία είναι μικρή, πόσο μάλλον στους πολφούς με λιγνίτες που οι δείκτες έχουν ακόμη μικρότερες τιμές.

8.4.2. Σύγκριση των ρεολογικών παραμέτρων των δειγμάτων

Στο Σχήμα 8.26 φαίνεται σε τρισδιάστατη απεικόνιση η σύγκριση των ρεολογικών παραμέτρων των γεωτρητικών πολφών που ωρίμασαν και με τους δύο τρόπους ωρίμανσης. Φαίνεται και πάλι ότι ο πολφός βάσης (κυκλωμένος σε γκρι πλαίσιο) εμφανίζει την μεγαλύτερη τάση διολίσθησης από όλα τα υπόλοιπα δείγματα. Αντιθέτως όλοι οι πολφοί με λιγνίτη έχουν πολύ μικρότερη τιμή τάσης διολίσθησης άρα και μικρότερη τάση για γελοποίηση σε σχέση με τον πολφό βάσης. Επιπλέον ο οδηγός συνάφειας είναι μικρότερος στα δείγματα με λιγνίτη, πράγμα που δείχνει και την τάση για μείωση του ιξώδους των πολφών.



Σχήμα 8.26. Τρισδιάστατη απεικόνιση ρεολογικών παραμέτρων πολφών και για τους δύο τρόπους ωρίμανσης.

8.5. Συγκεντρωτικά συμπεράσματα

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων ρεολογίας, είναι πλέον δυνατή η συγκέντρωση και η τελική επεξεργασία των μετρήσεων.

Στους πολφούς γεωτρήσεων που μελετήθηκαν, παρατηρείται ότι η προσθήκη λιγνίτη βοηθά στην βελτίωση των ρεολογικών ιδιοτήτων των ρευστών. Οι πολφοί είναι λιγότεροι θιξοτροπικοί και έχουν μικρές τιμές τάσης διολίσθησης, άρα δεν εμφανίζουν τάση για δημιουργία γέλης (gelation). Οι ιδιότητες αυτές είναι ιδιαίτερα χρήσιμες όταν γίνονται εργασίες γεωτρήσεων. Οι χαμηλοί δείκτες θιξοτροπίας δείχνουν ότι οι πολφοί μπορούν να κυκλοφορούν στο φρέαρ με μικρή κατανάλωση ισχύος. Επιπρόσθετα, οι μικρές τιμές τάσης διολίσθησης δείχνουν ότι οι πολφοί, όταν μείνουν ακίνητοι κατά τις εργασίες εισαγωγής – εξαγωγής της διατρητικής στήλης, δεν δημιουργούν πηκτώματα και επομένως μπορούν πιο εύκολα να επανακυκλοφορήσουν στο φρέαρ.

Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στους πολφούς που έχουν ωριμάσει με στατική γήρανση στους 177⁰C, όπου οι ρεολογικές ιδιότητες διατηρούνται και μάλιστα ενισχύονται όταν οι πολφοί αυτοί κυκλοφορούν σε βαθιές γεωτρήσεις υψηλών θερμοκρασιών. Το τελευταίο συμπέρασμα είναι που κάνει το λιγνίτη να θεωρείται ως ένα από τα πλέον θερμικά σταθερά πρόσθετα στις γεωτρήσεις.

9^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

9.1. Ανασκόπηση εργασίας

Κάνοντας μια ανασκόπηση, είναι σημαντικό να επισημανθούν κάποια σημεία της όλης εργασίας.

Προκειμένου να μελετηθούν οι ελληνικοί λιγνίτες ως πρόσθετα σε ρευστά γεωτρήσεων, έγινε μια εργαστηριακή επεξεργασία των δειγμάτων. Αναπτύχθηκε και ακολουθήθηκε συγκεκριμένη διαδικασία καυστικοποίησης των λιγνιτών που προέκυψε μετά από βιβλιογραφική έρευνα. Από τα εξαγόμενα θετικά αποτελέσματα φαίνεται ότι η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ικανοποιητική.

Οργανώθηκε το σύστημα μέτρησης της διηθητικής ικανότητας των πολφών καθώς και η διαδικασία στατικής γήρανσης πολφών. Πέρα από τις μετρήσεις που έγιναν για την εργασία αυτή, ο εν λόγω εξοπλισμός χρησιμοποιείται και για τις εργαστηριακές ασκήσεις του μαθήματος Τεχνικής Γεωτρήσεων.

Οι δοκιμές που έγιναν τόσο σε δείγματα που ενυδατώθηκαν όσο και σε δείγματα που ωρίμασαν με στατική γήρανση, έδειξαν την θετική επίδραση του λιγνίτη στα ρευστά γεωτρήσεων. Ιδιαίτερη πρέπει να είναι η αναφορά στα δείγματα που ωρίμασαν με στατική γήρανση, καθώς με τη διαδικασία αυτή προσομοιώνεται η συμπεριφορά των πολφών σε στατικές συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών.

Στα αποτελέσματα των μετρήσεων διήθησης, η προσθήκη 0,5% κ.ό. λιγνίτη στον πολφό βάσης, φέρει μικρή έως μέτρια βελτίωση, σε όλους τους τρόπους ωρίμανσης. Σε ποσοστό 3,0% κ.ό. η βελτίωση είναι πολύ μεγαλύτερη. Σύγκριση γίνεται και με τα αποτελέσματα που δίνει ο πολφός με εμπορικό λιγνίτη. Τα ρευστά με ελληνικούς λιγνίτες δείχνουν παρόμοια συμπεριφορά και σε ποσοστό 3% καλύτερη συμπεριφορά από τον εμπορικό λιγνίτη. Σημειωτέον ότι ο εμπορικός λιγνίτης είναι λεοναρδίτης, δηλαδή ο καλύτερος λιγνίτης για το σκοπό αυτό.

Στα αποτελέσματα των μετρήσεων ρεολογίας, φαίνεται ότι οι πολφοί με λιγνίτη δεν εμφανίζουν θιξοτροπία, ενώ οι ρεολογικές παράμετροι είναι βελτιωμένες σε σχέση με τον πολφό βάσης. Το ρεολογικό μοντέλο με την βέλτιστη προσαρμογή για όλα τα δείγματα πολφών είναι το Herschel – Bulkley ($R^2 = 0.99$). Οι χαμηλές τιμές τάσης διολίσθησης δείχνουν την ιδιότητα του λιγνίτη να δρα ως λεπτυντής, οπότε και οι πολφοί δεν εμφανίζουν τάση για πήκτωση. Στα δείγματα που ωρίμασαν με στατική γήρανση στους 177^οC, οι πολφοί με λιγνίτη είναι ακόμη λιγότερο θιξοτροπικοί και οι ρεολογικές παράμετροι εξίσου βελτιωμένοι. Άρα οι λιγνίτες προσδίδουν θερμική σταθερότητα στους πολφούς γεωτρήσεων.

9.2. Συμπεράσματα εργασίας

Οι πολφοί που περιέχουν λιγνίτες βελτιώνουν τις εξεταζόμενες παραμέτρους, άλλοτε λιγότερο και άλλοτε περισσότερο. Η βέλτιστη περιεκτικότητα λιγνίτη στον πολφό είναι 3% κ.ό. Αυτό δεν σημαίνει ότι η μικρότερη ποσότητα δεν δίνει ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Επειδή όμως είναι αναγκαίο να βγει ένα ολοκληρωμένο συμπέρασμα, γι' αυτό και το πόρισμα καταλήγει να προτείνει τη μεγαλύτερη από τις δύο εξεταζόμενες συγκεντρώσεις λιγνίτη. Το ολοκληρωμένο συμπέρασμα εμπεριέχει τις βελτιώσεις στη διήθηση και αυτές που γίνονται στη ρεολογία των πολφών.

Όποιος αναγνώστης ανατρέξει στα παραρτήματα, θα βρει όλες τις πληροφορίες, τόσο για τις μετρήσεις των διηθητικών όσο και αυτές των ρεολογικών χαρακτηριστικών των πολφών. Το γεγονός ότι δεν αναλύονται οι ρεολογικές παράμετροι των πολφών με λιγνίτη 0,5% δεν σημαίνει ότι σε αυτές τις περιπτώσεις τα αποτελέσματα δεν είναι εξίσου ικανοποιητικά. Τουναντίον, όπως παρουσιάζονται οι μετρήσεις στο Παράρτημα Κ, οι πολφοί με μικρή ποσότητα λιγνίτη βελτιώνουν πολύ τις ρεολογικές ιδιότητες των πολφών. Δεν δίνουν όμως τα ίδια θετικά αποτελέσματα στις μετρήσεις διήθησης (§ 7.2.3).

Από την άλλη πλευρά, όταν ο λιγνίτης προστεθεί σε συγκέντρωση 3,0% στον πολφό βάσης, βελτιώνει και τις δύο εξεταζόμενες ιδιότητες.

Κάποια δείγματα δείχνουν ιδιαίτερη βελτίωση, όπως έχει ήδη επισημανθεί, και ειδικά στις περιπτώσεις που έχουν ωριμάσει με στατική γήρανση. Η τύρφη της Ξυνιάδας TH3, ο λιγνίτης του Αλμυρού TH4 και οι τύρφες της Δράμας MT2 και MT3, προσφέρουν την καλύτερη διηθητική ικανότητα, είτε πρόκειται για την ενυδάτωση είτε πρόκειται για την στατική γήρανση. Στα δείγματα αυτά το ποσοστό βελτίωσης ξεπερνά το 40% και φτάνει μέχρι το 50%, σε σχέση με την απόδοση του πολφού βάσης. Το ίδιο συμπέρασμα εξάγεται και από την μελέτη των ρεολογικών ιδιοτήτων αυτών των πολφών. Παρουσιάζουν χαμηλούς δείκτες θιξοτροπίας, έχουν πολύ μικρή τάση για πήκτωση και διατηρούν το ιξώδες του πολφού σε χαμηλές τιμές (§ 8.4.1 & 8.4.2).

Αναμφισβήτητα, λοιπόν, τα δείγματα των λιγνιτών που εξετάστηκαν ικανοποιούν όλες τις αρχικές προϋποθέσεις: να μειώνουν την απώλεια διήθησης, να αποτρέπουν την τάση για γελοποίηση του πολφού και βέβαια να παραμένουν θερμικά σταθερά.

9.3. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Τα πρώτα αυτά ενθαρρυντικά αποτελέσματα λειτουργούν ως οδηγός για περαιτέρω έρευνα και ανάλυση των ιδιοτήτων των λιγνιτών ως προσθετικά στα ρευστά γεωτρήσεων. Από τις παρούσες μετρήσεις φαίνεται ότι και άλλα δείγματα μπορούν να δώσουν αποτελέσματα με πρόσθετη εργαστηριακή δουλειά.

Στους πολφούς που εξετάστηκαν και στις δύο συνθήκες ωρίμανσης και βελτίωσαν πολύ τις διηθητικές και ρεολογικές ιδιότητες, προτείνεται περαιτέρω εργαστηριακή διερεύνηση. Συγκεκριμένα:

- Οι λιγνίτες του Αλμυρού, του Αμουρίου και οι ξυλίτες του Δομένικου, που έδωσαν την καλύτερη βελτίωση στη διήθηση, προτείνεται να εξεταστούν σε πρέσα Υψηλής Πίεσης και Θερμοκρασίας ώστε να πιστοποιηθεί η θετική τους επίδραση στους πολφούς γεωτρήσεων.

- Η ίδια διαδικασία πρέπει να ακολουθηθεί για την τύρφη της Δράμας MT3 και τους λιγνίτες των Σαππών.

Πρόκειται για λιγνίτες προστιθέμενους σε πολφούς βάσης που έδειξαν σημαντική βελτίωση στη διήθηση όταν ωρίμασαν με ενυδάτωση και μπορούν να μελετηθούν και στις αντίστοιχες συνθήκες στατικής γήρανσης.

- Επιπρόσθετα, μελέτη της ρεολογίας των παραπάνω λιγνιτών σε συγκέντρωση 0,5% κ.ό. στον πολφό σε συνθήκες στατικής γήρανσης θα δώσει χρήσιμα συμπεράσματα για τη ρεολογία τους.

Σε συνδυασμό με τις υπάρχουσες μετρήσεις διήθησης, θα γίνει δυνατή η ολοκληρωμένη σύγκριση των δύο συγκεντρώσεων λιγνίτη στον πολφό βάσης, ώστε να προκύψει το τελικό συμπέρασμα που θα χρησιμοποιηθεί ως οδηγός για την επιλογή της κατάλληλης ποιότητας του λιγνίτη (περιοχή προέλευσης) και της σωστής ποσότητας προσθήκης σε πολφούς γεωτρήσεων.

Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν δύναται να δώσουν νέα στοιχεία που, μαζί με την χημική και ορυκτολογική ανάλυση των δειγμάτων και την διερεύνηση του τρόπου δράσης των λιγνιτών σε αιωρήματα μπεντονιτών σε νερό, θα βοηθήσουν στην έρευνα για την απάντηση του θεμελιώδους ερωτήματος:

Ναι μεν «δουλεύει» αλλά γιατί....

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Adachi Y., Nakaishi, K., Tamaki, M., 1998, Viscosity of dilute suspension of sodium montmorillonite in an electrostatically stable condition, *J. Colloid Inter. Sci.*, **198**, 100 -105.

Alderman, N. J., Gavignet, A. A., Guillot, D. and Maitland, G. C., 1988, High temperature, high pressure rheology of oil based muds, SPE 18035 paper presented at the 63rd Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, TX, October 2 - 5.

Alderman, N. J., Meeten, G. H. and Sherwood, J. O., 1991, Vane rheometry of bentonite gels, *J. NonNewtonian Fluid Mech.*, **39**, 291 - 310.

American Petroleum Institute Specifications 13A, 1993, Specification for drilling fluid materials.

American Petroleum Institute Specifications 13I, 2000, Recommended practice standard procedure for laboratory testing drilling fluids.

American Petroleum Institute, 2003, API Spec 13B-1 - Recommended practice for field testing water based drilling fluids.

Barnes, H.A., 1997, Thixotropy a review, *J. of Non-Newtonian Fluid Mech.*, **70**, 1 – 33.

Barnes, H.A., 1999, The yield stress—a review or ‘πάντα ρει’—everything flows?, *J. of Non-Newtonian Fluid Mech.*, **81**, 133 – 178.

Bleler, R., 1990, Selecting a drilling fluid, *J. Petr. Techn.*, **42** (7), 832 - 834.

Bourgoyne A.T. Jr. et al., 1991, Applied Drilling Engineering, SPE Textbook Series, Vol. 2.

Burrafato, G., Miano, F., Carminati, S. and Lockhart, T. P., 1995, New chemistry for chromium free bentonite drilling fluids stable at high temperatures, SPE 28962 paper presented at the SPE Intern. Symposium on Oilfield Chemistry, San Antonio, TX, USA, 14 - 17 Feb.

Caenn, R. and Chillingar, G. v., 1996, Drilling fluids: State of the art, *J. Petr. Sci. and Engr.*, **14**, 221 - 230.

Duran, J. D. G., Ramos- Tejada, M. M., Arroyo, F. J. and Gonzalez Caballero, F., 2000, Rheological and electrokinetic properties of sodium montmorillonite suspensions, *J. Colloidal and Interf. Sci*, 229, 197 - 117.

Elward-Berry, J., and Darby, J.B., 1992, Rheologically Stable, Nontoxic, High-Temperature Water-Base Drilling Fluid, SPE 24589 Paper presented at the 67th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers, Washington, October 4-7.

Fann Instrument Company, 1995, Series 300 API Filter Press® Instruction Manual, Houston, TX, U.S.A.

Fann Instrument Company, 1995, High Temperature-High Pressure Filter Press, Houston, TX, U.S.A.

Fann Instrument Company, 1995, High Temperature Aging Cell, Houston, TX, U.S.A.

Firth, Jr., W. C., 1993, Chrome humates as drilling mud additives, US Patent 5.191.100.

Gavrilof, B. et al., 1999, Use of Russian lignites in production of drilling fluids, Khimiya Tverdovo Topliva, Mar - Apr., 75 - 79 (In Russian).

Gray, H. C. H. and Darley, G. R., 1980, Composition and properties of oil - well drilling fluids, Gulf Publishing Co., 6th Edition, Houston, USA.

Grim, R.E. and Guven, N. (1978), Bentonites, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

Hilscher, I. W. and Clements, R., 1982, High temperature drilling fluid for geothermal and deep sensitive formations, SPE 10737 paper presented at the California Regional Meeting of the SPE, San Francisco, CA, March 24 -26.

HSE, 1999, Offshore technology report.

Karytsas, C., Mendrinou, D., Goldbrunner, J., 2003. Low Enthalpy geothermal Energy Utilisation Schemes for Greenhouse and District heating at Traianoupolis Evros, Greece. *Geothermics*, **32**, 69-78.

Kelessidis, V.C., 2004, Rheological and fluid loss properties of bentonite suspensions and their control with lignite at high temperatures: A review (submitted for publication).

Kelessidis, V. C., Mpandelis, G., 2003 , Flow Patterns and Minimum Suspension Velocity for Efficient Cuttings Transport in Horizontal and Deviated Wells in Coiled-Tubing Drilling, SPE 84746 paper presented at the SPE/ICoTA Coiled Tubing Conference, Houston, Texas, U.S.A., April 8 – 9.

Kelessidis, V. C., Mpandelis, G., Koutroulis, A., and Michalakis, T., 2002, Significant parameters affecting efficient cuttings transport in horizontal and deviated wellbores in coiled tubing drilling: A critical review, paper presented at the 1st International Symposium of the Faculty of Mines (ITU) on Earth Sciences and Engineering, 16-18 May, Maslak, Istanbul, Turkey.

Kretzschmar, R., Hesterberg, D. and Sticher, H., 1997, Effects of adsorbed humic acid on surface charge and flocculation of kaolinite, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **61**, 101 -108.

Kretzschmar, R., Holthoff, H. and Sticher, H., 1998, Influence of pH and humic acid on coagulation kinetics of kaolinite: A dynamic light scattering study, *J. o, Colloidal and Interf. Sci.*, 202, 95 - 103.

Lagaly, G., and Ziesmer, S., 2003, Colloid chemistry of clay minerals: the coagulation of montmorillonite dispersions, *Advances in Colloid and interface Science* , **100-102** , 105-128

Lefond, S.J. (1983), Industrial Minerals and Rocks, Volume 1, Fifth Edition, New York.

Miano, F. and Rabaioli, M. R., 1993, Rheological scaling of montmorillonite suspensions: the effect of electrolytes and polyelectrolytes, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical/ and Engineering Aspects*, **84** (2-3), 229-237.

Murray, H., Bundy W. and Harvey C. (1993), Kaolin Genesis and Utilization, Clay Minerals Society, August, pp. 12 –14 and 242 – 247.

Nyland, T., Azar, J. J., Becker, T. E. and Lummus, J. I., 1988, Additive Effectiveness and Contaminant Influence Control on Fluid Loss control of Water-Based Muds, *SPE Drill. Engr.*, , 195 - 203.

Oort, E, Bland, R. G., Howard, S. K., Wiersma, R. J., Roberson, I., 1997, Improving HPHT stability of water based drilling fluids, SPE 37605 paper presented at the SPE / IADC Drilling Conference, Amsterdam, NI, 4 - 6 March.

Patel, B., B., 1995, Blended drilling fluid thinner, US Patent 5.399.548.

Rabaioli, M, R Miano, F., Lockhart, T. P., and Burrafato, G., 1993, Physical / Chemical Studies on the Surface Interactions of Bentonite With Polymeric Dispersing Agents, SPE 25179 paper presented at the SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, New Orleans, LA, U.S.A, March 2-6.

Russell, J. A and Patel, B. B., 1987, Drilling fluid, US patent 4.704.214

Saito, S. and Sakura, S., 2000, Frontier geothermal drilling operations succeed at 500⁰C BHST, *SPE Dril. & Completion*, **15** (3),152 -161.

Tombacz, E., Gilde, M. and Szando, F., 1984, The effects of Na-salicylate and Na-humate on the stability and rheological properties of Na-montmorillonite suspensions, *Acta Physica et Chem. Sz.*, 30,165 -174.

Tombacz, E., Filipcseia, G., Szekeres, M. and Gingl, Z., 1999, Particle aggregation in complex aquatic systems, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical/ and Engineering Aspects*, **151** (1-2),233-244.

Van Olphen, H., 1977, Introduction to clay colloidal chemistry, 2nd edt., Wiley, N.Y.

Zhang, I-M, Yin, O-Y., 2002, Preparation of a new lignosulfonate - based thinner: introduction of ferrous ions, *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Engr. Aspects*, 210,13 - 21.

Zilch, H. E, Otto, M. J., and Pye, O. S., 1991, The evolution of geothermal drilling fluid in the imperial valley, SPE paper 21876 presented at the Western Regional Meeting, Long Beach, CA, March 20 - 22.

Κελεσίδης, Β., 2001, Τεχνική γεωτρήσεων, *Σημειώσεις παραδόσεων*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Κωστάκης, Γ., 1994, Εισαγωγή στην αξιολόγηση των βιομηχανικών ορυκτών, *Σημειώσεις παραδόσεων*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Μακρή, Π., 2001, Προσδιορισμός πάχους κρυστάλλων βιομηχανικών αργίλων με περιθλασιμετρία ακτινών – Χ, *Διπλωματική εργασία*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Παπανικολάου, Κ., 2003, Κοιτασματολογία ενεργειακών πόρων, *Σημειώσεις παραδόσεων*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

Πολυτεχνείο Κρήτης, 2003, 1^η Έκθεση προόδου προς Ι.Γ.Μ.Ε.

Χρηστίδης, Γ., 1999, Κοιτασματολογία II (Βιομηχανικά ορυκτά και πετρώματα, *Σημειώσεις παραδόσεων*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

www.google.com.gr, smectite structure image.

www.kingdomdrilling.co.uk, Reservoir mud's & formation damage.

www.kingdomdrilling.co.uk, Mud contaminants.

www.kingdomdrilling.co.uk, HPHT Drilling Fluids.

Συμβολισμοί

<u>Τύπος</u>	<u>Ορισμός</u>	<u>Μονάδες</u>
$\gamma = \frac{du}{dy} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta y}$: Ρυθμός διάτμησης	Pascal (Pa)
$\tau = \frac{F_s}{A_s}$: Διατμητική τάση	1/sec
$\tau = \mu \frac{du}{dy}$: Ιξώδες	centipoise (cP)
$\mu_a = f(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$: Φαινομενικό ιξώδες	centipoise (cP)
μ_p	: Πλαστικό ιξώδες	centipoise (cP)
τ_y	: Τάση διολίσθησης	Pascal (Pa)
K	: Οδηγός συνάφειας	$Pa \cdot s^n$
n	: Οδηγός συμπεριφοράς ροής	Αδιάστατο

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Η

ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΛΙΓΝΙΤΗ

1. Προϊόντα της Baroid




CARBONOX®

Filtration Control Agent

Description	CARBONOX, powdered leonardite, can be used to aid in filtration control and control viscosity and gel strengths of water-based drilling fluids. CARBONOX can also be used to emulsify oil into water-based fluids.	
Applications/Functions	<ul style="list-style-type: none">■ Reduce the viscosity and gel strengths of drilling fluids to maintain desirable flow properties■ Reduce high-temperature/high-pressure filtration rates■ Minimize the effects of contaminants on drilling fluid properties■ Emulsify oil into water	
Advantages	<ul style="list-style-type: none">■ Maintains continued thinning efficiency and filtration control even at high bottomhole temperatures■ Is thermally stable at temperatures above 400°F (205°C)■ Retards solidification at high pH levels■ Is versatile and economical■ Forms a thin, tough filter cake	
Typical Properties	■ Appearance	Black powder
	■ Specific gravity	1.7
Recommended Treatment	Add 2-12 lb/bbl (5.7-34.2 kg/m ³) of CARBONOX. <i>Note:</i> Presolubilize CARBONOX with caustic soda (5:1) for best results.	
Packaging	CARBONOX is packaged in 50-lb (22.7-kg) sacks.	

CARBONOX is a registered trademark of Baroid Technology, Inc. © Copyright 1997, 1998, Baroid, a Division of Dresser Industries, Inc. 01/98 01MD 041

Because the conditions of use of this product are beyond the seller's control, the product is sold without warranty of either express or implied and upon condition that purchaser make its own test to determine the suitability for purchaser's application. Purchaser assumes all risk of use and handling of this product. This product will be replaced if defective in manufacture or packaging or if damaged. Except for such replacement, seller is not liable for any damages caused by this product or its use. The statements and recommendations made herein are believed to be accurate. No guarantee of their accuracy is made, however.

Baroid The  Fluids Company □ P.O. Box 1675 □ Houston TX 77251 □ (281) 871-5067




DURATONE® E

Filtration Control Agent

Description	DURATONE E, organophilic lignite, is used to control filtration rates in ester and olefin based drilling muds. DURATONE E is stable at high temperatures and it can be used to control filtration rates in deep, hot wells. It can also be used to improve emulsification of water in oil-based muds and to promote fluid stability. DURATONE E meets environmental requirements for Norway.	
Applications/Functions	<ul style="list-style-type: none">☐ Reduce HTHP filtration rate☐ Promote stability of invert emulsion fluids	
Advantages	<ul style="list-style-type: none">☐ Increases thermal stability of drilling fluids at temperatures beyond 500°F (260°C)☐ Effective in all ester/olefin systems as well as inverts	
Typical Properties	<ul style="list-style-type: none">☐ Appearance☐ Bulk density lb/ft³☐ Specific Gravity	<ul style="list-style-type: none">Gray to black powderCompacted 44 Uncompacted 311.8
Recommended Treatment	Add 2-20 lb/bbl (5.7-57 kg/m ³) of DURATONE E. Concentration will depend on the degree of filtration control desired.	
Packaging	DURATONE E is packaged in 50 lb (22.7 kg) sacks.	

DURATONE is a registered trademark of Baroid Technology, Inc. © Copyright 1993, 1998, Baroid, a Division of Dresser Industries, Inc. 11/98 DMD 139

Because the conditions of use of this product are beyond the seller's control, the product is sold without warranty either express or implied and upon a condition that purchaser make it own test to determine the suitability for purchaser's application. Purchaser assumes all risk of use and handling of this product. This product will be replaced if defective in manufacture or packaging or if damaged. Except for such replacement, seller is not liable for any damages caused by this product or its use. The statements and recommendations made herein are believed to be accurate. No guarantee of their accuracy is made, however.

Baroid The  Fluids Company □ P.O. Box 1675 □ Houston TX 77251 □ (281) 871-5067

2. Προϊόντα της M – I Drilling Co.

- **CAUSTILIG** causticized lignite controls rheology and reduces fluid loss, extends temperature limits, emulsifies oil, reduces flocculation and stabilizes water-base drilling fluids. In solution, it has an alkaline pH, therefore it does not require large caustic additions to maintain a stable pH. CAUSTILIG is a partially soluble additive that provides thin, low-permeability filter cakes accompanied by low fluid loss. It is especially effective in high-temperature applications and in dispersed systems as a synergistic additive with lignosulfonates. It can be used in virtually any water-base fluid. Packaging: 50-lb (22.7-kg) multi-wall, paper sacks.

- **K-17** potassium causticized lignite is designed for use in potassium systems to control rheology and reduce fluid loss plus provide potassium for shale inhibition. K-17 is an integral component in the inhibitive K-MAG potassium system. The product is compatible with all water-base systems. Packaging: 50-lb (22.7-kg) multi-wall, paper sacks.

- **RESINEX** resinated lignite is designed to provide filtration control and rheological stability over a wide range of temperatures and in the presence of contaminants. RESINEX is a temperature-stable, synthetically formulated resin and lignite complex which has proven to be one of the most

effective high-temperature filtration-control additives available.
Packaging: 50-lb (22.7-kg) multi-wall, paper sacks.

- **SPERSENE** chrome lignosulfonate is a multi-purpose deflocculant and gel-strength reducer, temperature stabilizer, inhibitor and filtration-control additive for use in all water-base systems. Packaging: 50-lb (22.7-kg) multi-wall, paper sacks.
- **SPERSENE CF** chrome-free lignosulfonate is specially formulated to act as a deflocculant in all water-base mud systems. It reduces and stabilizes viscosity which assists in reducing fluid loss. SPERSENE CF is a high-quality, highly effective additive -- the result of significant developments in lignin chemistry that have led to a chrome-free product displaying superlative performance. Packaging: 50-lb (22.7-kg) multi-wall, paper sacks.
- **TANNATHIN** oxidized lignite is a naturally-occurring material used to reduce fluid loss and deflocculate water-base muds. TANNATHIN is a partially soluble additive which provides thin, low-permeability filter cakes. It is an excellent emulsifier for oil-in-water emulsions as well as a secondary deflocculant and is especially effective in high-temperature applications. It performs exceptionally well in dispersed systems as a synergistic additive with lignosulfonates. It can be used in virtually any water-base fluid. Packaging: 50-lb (22.7-kg) multi-wall, paper sacks.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Θ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΗΘΗΣΗΣ ΠΟΛΦΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

ΠΟΛΦΟΙ ΜΕ ΛΙΓΝΙΤΗ 0,5% κ.ό.			
ΠΟΛΦΟΙ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΩΡΙΜΑΣΕΙ ΜΕ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ			
ΠΟΛΦΟΣ	ΔΙΗΘΗΜΑ (ml)	ΠΑΧΟΣ ΥΜΕΝΙΟΥ (mm)	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΥΜΕΝΙΟΥ
A + TH1	11,60	1,2	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + TH2	12,60	1,2	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + TH3	13,60	1,2	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + TH4	13,00	1,5	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + TH5	12,40	1,2	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + TH6	13,00	1,2	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + TH7	12,40	1,2	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + TH8	12,60	1,2	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + MT1	12,00	1,1	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + MT2	12,20	1,1	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + MT3	11,40	1,1	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + MT4	12,40	1,3	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + MT5	12,40	1,0	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + MT6	11,60	1,2	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + MT7	12,30	2,0	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + MT8	12,60	2,0	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
ΠΟΛΦΟΙ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΩΡΙΜΑΣΕΙ ΜΕ ΣΤΑΤΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ			
ΠΟΛΦΟΣ	ΔΙΗΘΗΜΑ (ml)	ΠΑΧΟΣ ΥΜΕΝΙΟΥ (mm)	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΥΜΕΝΙΟΥ
TH3	14,80	2,0	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
TH4	14,40	2,0	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
TH5	14,00	1,5	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
TH6	14,40	1,5	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
TH7	13,80	1,5	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
TH8	13,40	1,5	ΕΛΑΣΤΙΚΟ

MT1	13,60	2,0	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
MT2	14,80	2,0	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
MT3	13,20	1,5	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
MT4	14,00	1,5	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
MT6	14,20	1,5	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
MT7	13,60	2,0	ΕΛΑΣΤΙΚΟ

ΠΟΛΦΟΙ ΜΕ ΛΙΓΝΙΤΗ 3,0% κ.ό.			
ΠΟΛΦΟΙ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΩΡΙΜΑΣΕΙ ΜΕ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ			
ΠΟΛΦΟΣ	ΔΙΗΘΗΜΑ (ml)	ΠΑΧΟΣ ΥΜΕΝΙΟΥ (mm)	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΥΜΕΝΙΟΥ
A + TH1	9,80	2,0	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + TH2	10,80	1,5	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + TH3	7,20	1,2	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + TH4	6,20	1,2	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + TH5	9,80	1,2	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + TH6	9,00	1,1	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + TH7	8,50	2,0	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + TH8	9,40	1,2	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + MT1	8,60	1,1	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + MT2	7,20	1,0	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + MT3	6,00	1,0	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + MT4	10,60	1,2	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + MT5	10,40	1,0	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + MT6	8,60	1,0	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + MT7	10,90	2,0	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A + MT8	12,00	2,0	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
A1	13,10	2,0	ΠΛΑΣΤΙΚΟ
A2	13,20	2,0	ΠΛΑΣΤΙΚΟ
A + Γ	5,30	1,5	ΕΛΑΣΤΙΚΟ

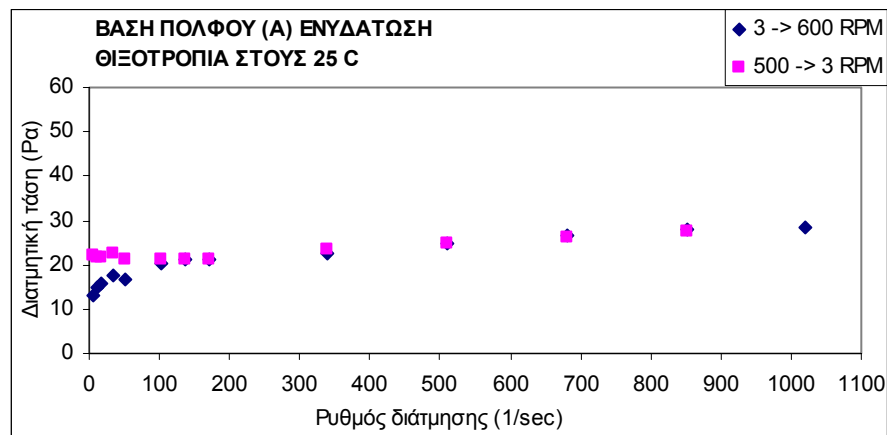
ΠΟΛΦΟΙ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΩΡΙΜΑΣΕΙ ΜΕ ΣΤΑΤΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ			
ΠΟΛΦΟΣ	ΔΙΗΘΗΜΑ (ml)	ΠΑΧΟΣ ΥΜΕΝΙΟΥ (mm)	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΥΜΕΝΙΟΥ
ΤΗ3	12,00	1,5	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
ΤΗ4	8,80	1,2	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
ΤΗ5	10,80	1,2	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
ΤΗ6	10,60	1,2	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
ΤΗ7	9,60	1,2	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
ΤΗ8	11,00	1,2	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
ΜΤ1	12,40	1,5	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
ΜΤ2	13,00	2,0	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
ΜΤ3	10,80	1,5	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
ΜΤ4	11,70	2,1	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
ΜΤ6	10,40	1,2	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
ΜΤ7	12,20	2,5	ΕΛΑΣΤΙΚΟ
Α1	23,40	4,0	ΠΛΑΣΤΙΚΟ
Α2	21,20	3,5	ΠΛΑΣΤΙΚΟ
Α + Γ	13,40	1,2	ΕΛΑΣΤΙΚΟ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

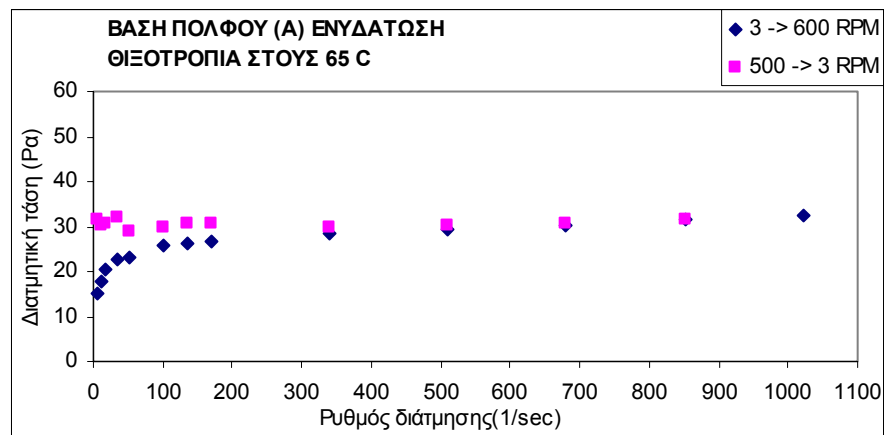
ΡΕΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΟΛΦΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

I.1. Βάση πολφού. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από ενυδάτωση και γήρανση

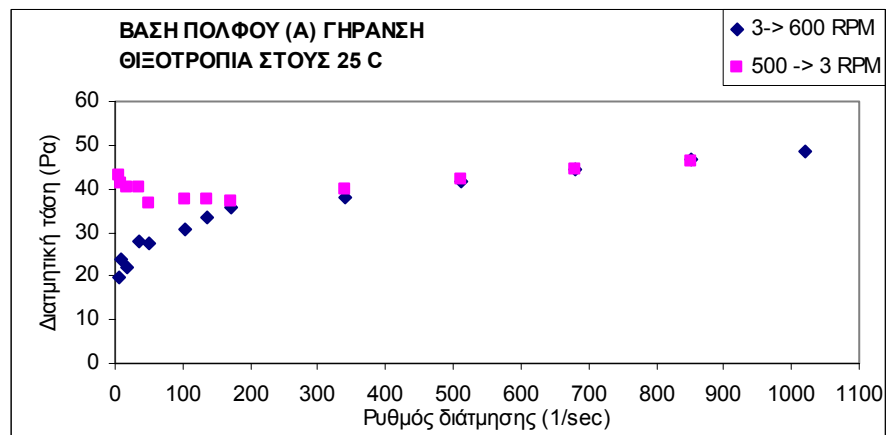
A1



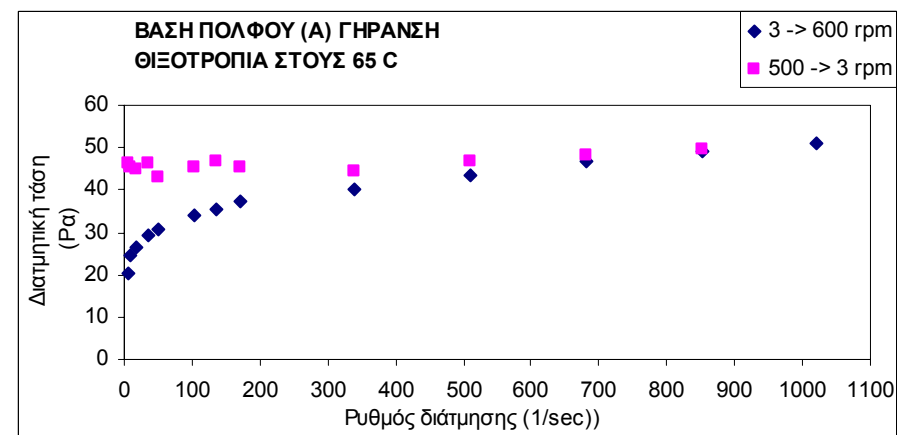
A2



B1



B2

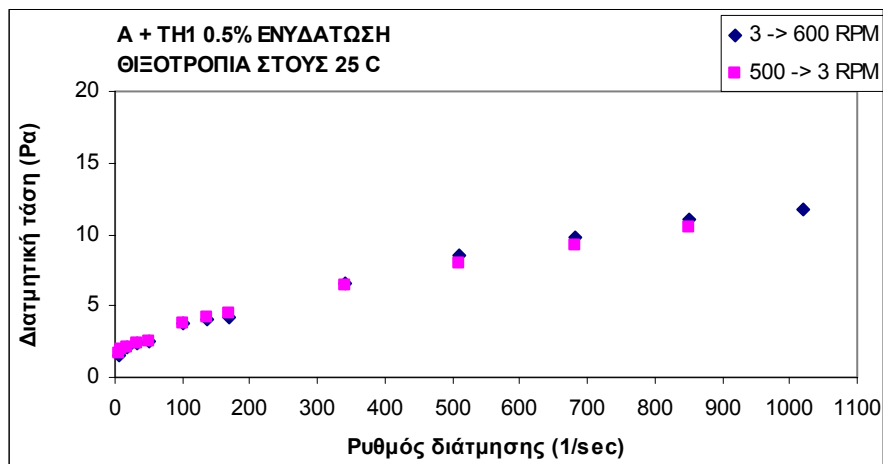


A1 – A2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε **πολφό βάσης (Α)** που έχει ενυδατωθεί.

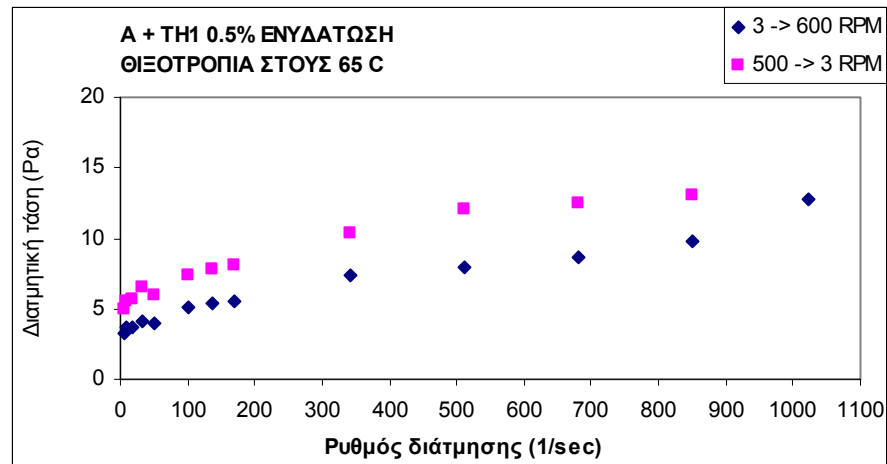
B1 – B2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε **πολφό βάσης (Α)** που έχει υποστεί στατική γήρανση σε φούρνο, στους 177 °C.

Ι.2.1. Βάση πολφού και TH1. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από ενυδάτωση

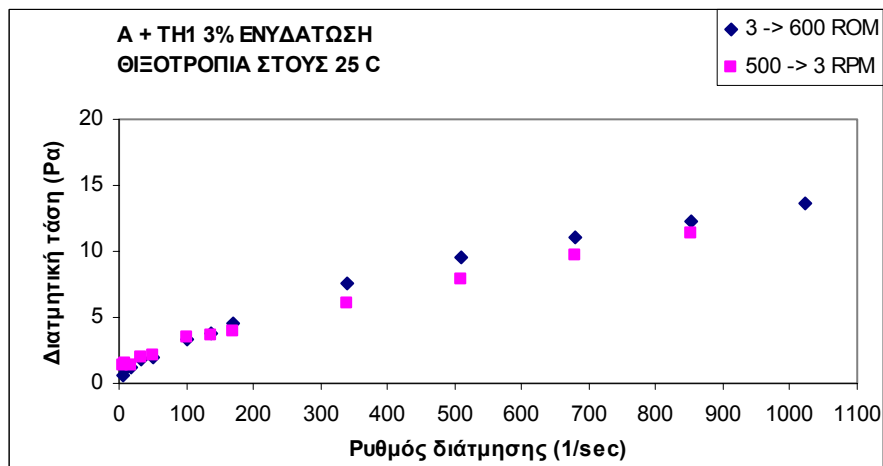
A1



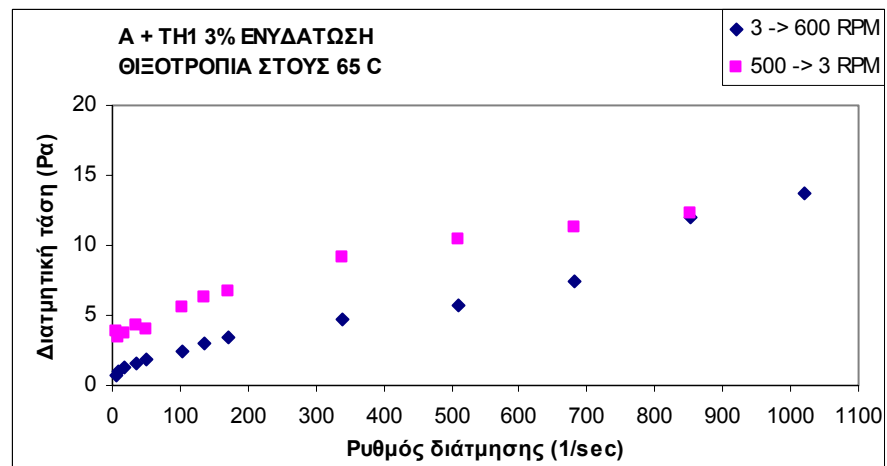
A2



B1



B2

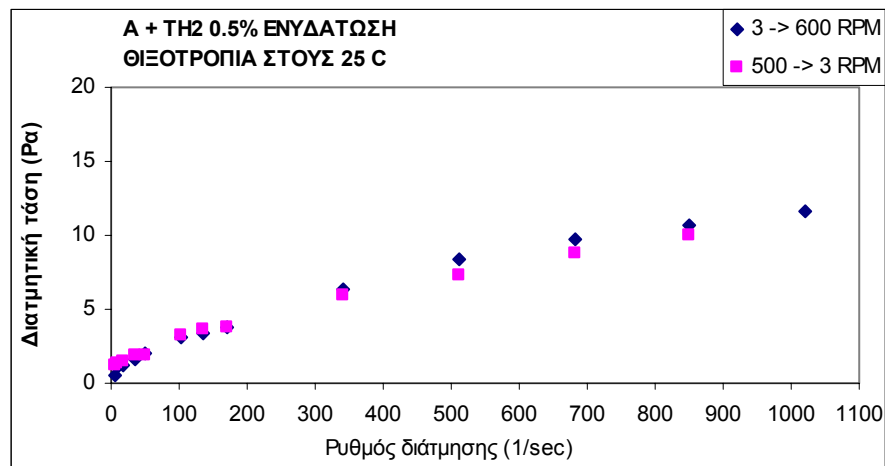


A1 – A2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + TH1 0,5%** που έχει ενυδατωθεί.

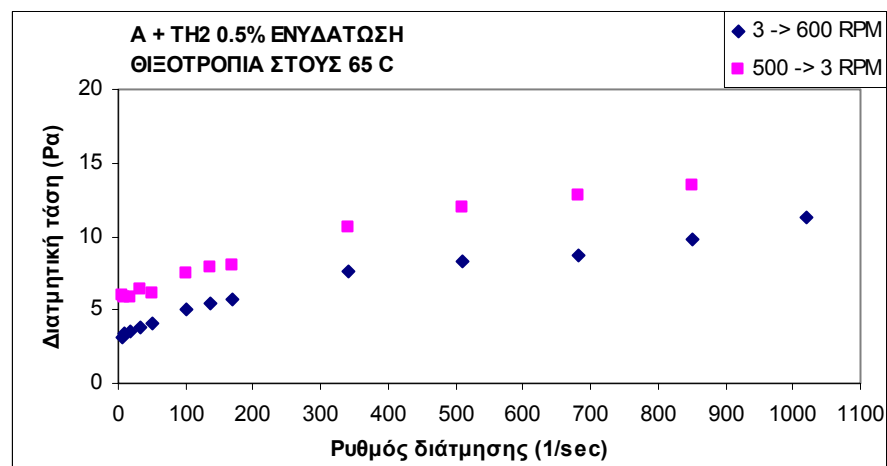
B1 – B2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + TH1 3,0%** που έχει ενυδατωθεί.

Ι.3.1. Βάση πολφού και ΤΗ2. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από ενυδάτωση

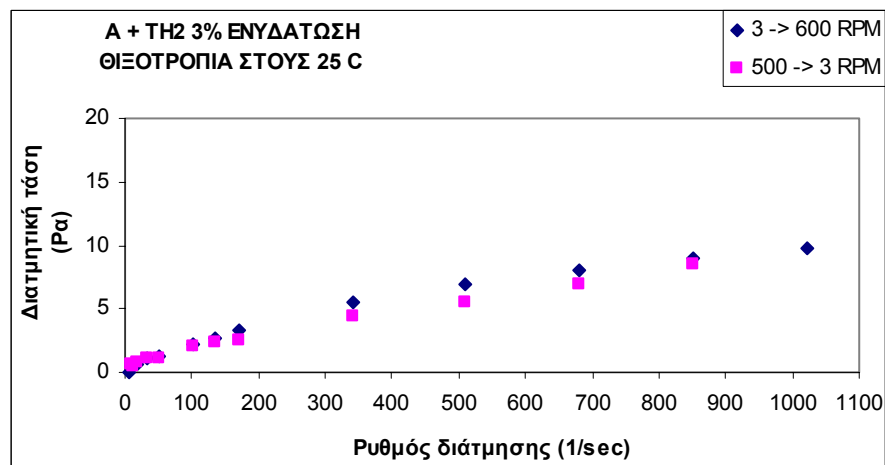
A1



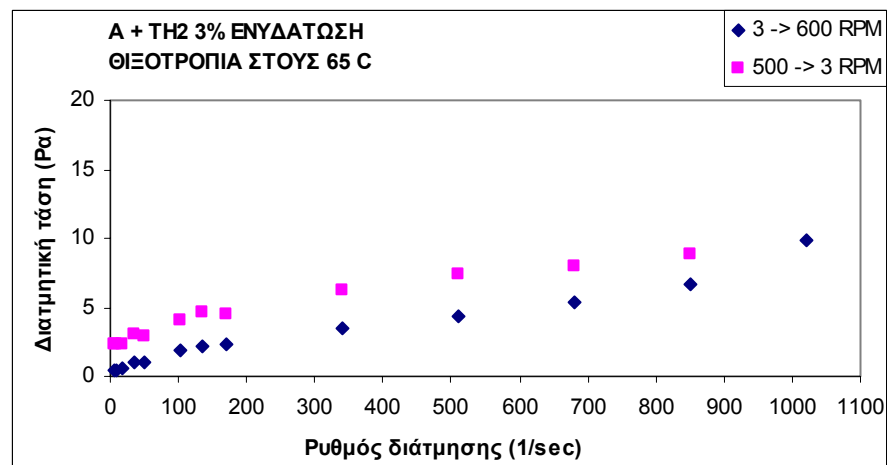
A2



B1



B2

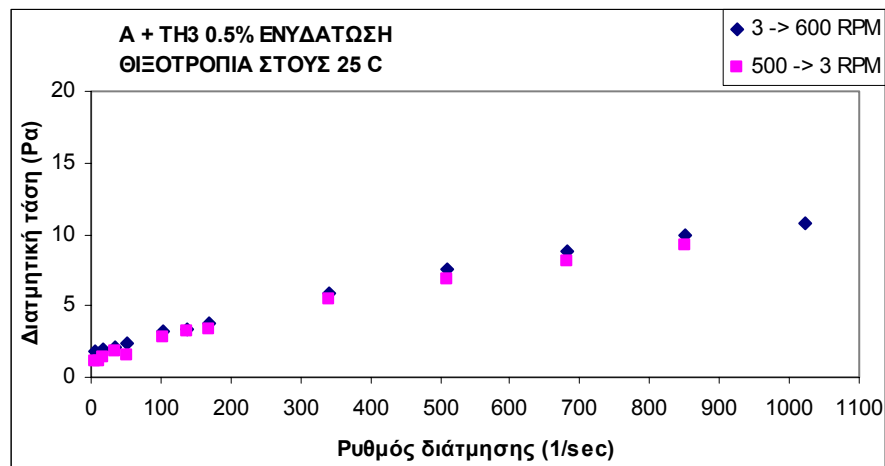


A1 – A2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + TH2 0,5%** που έχει ενυδατωθεί.

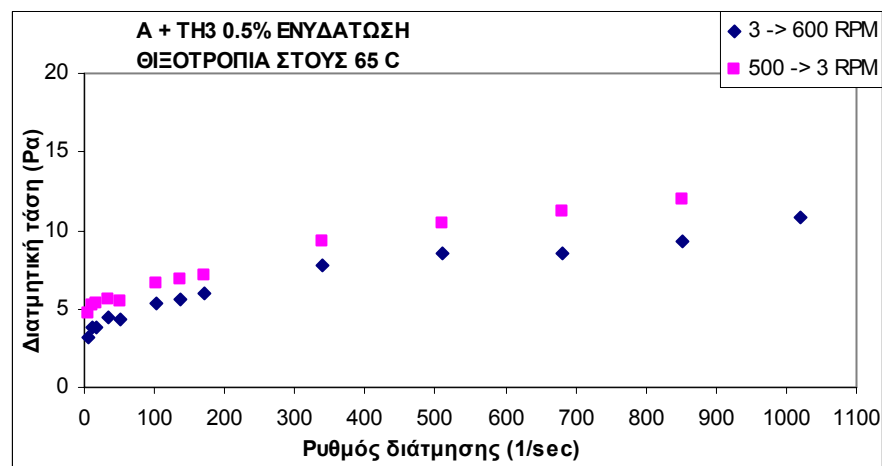
B1 – B2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + TH2 3,0%** που έχει ενυδατωθεί.

Ι.4.1. Βάση πολφού και ΤΗ3. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από ενυδάτωση

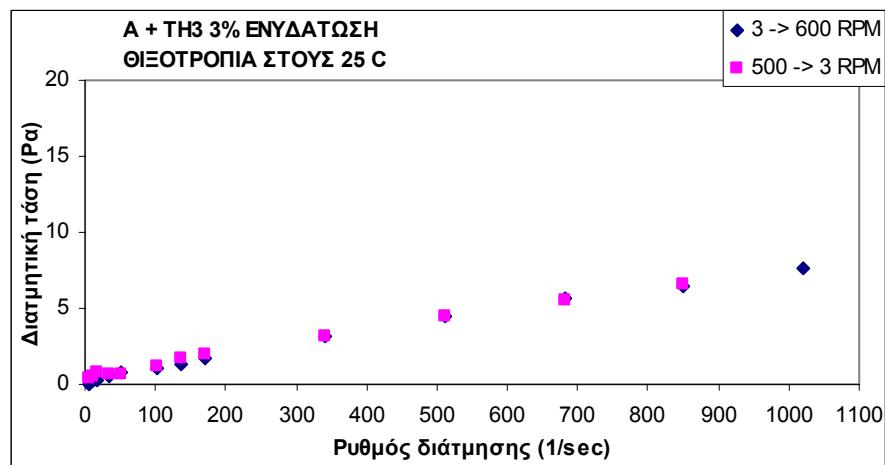
A1



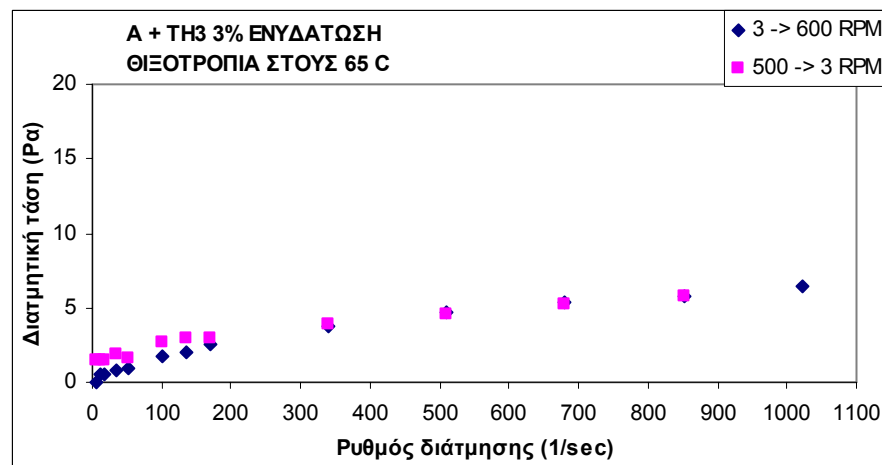
A2



B1



B2

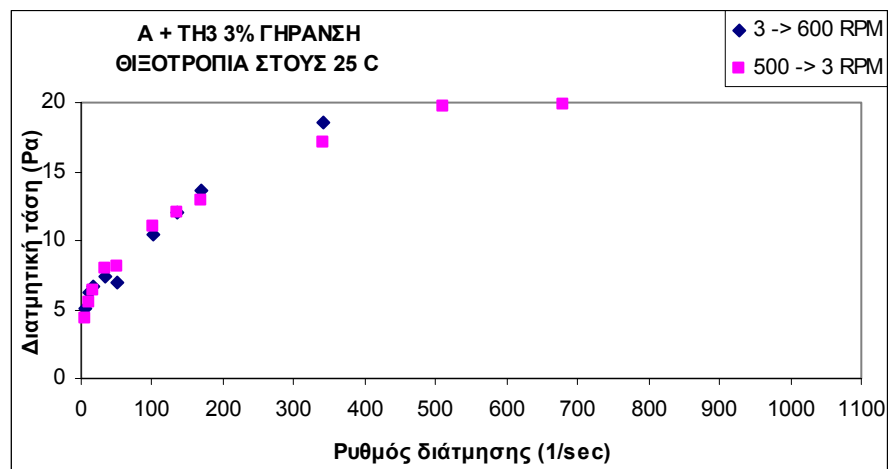


A1 – A2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + TH3 0,5%** που έχει ενυδατωθεί.

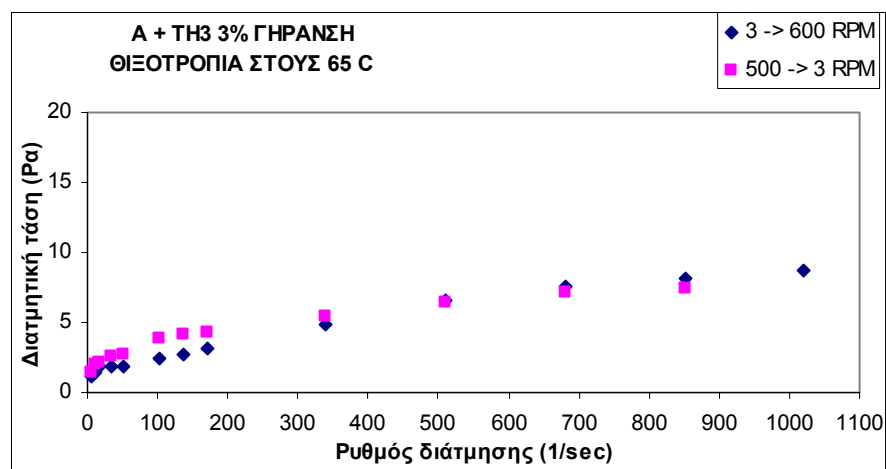
B1 – B2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + TH3 3,0%** που έχει ενυδατωθεί.

Ι.4.2. Βάση πολφού και ΤΗ3. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από γήρανση

Γ1



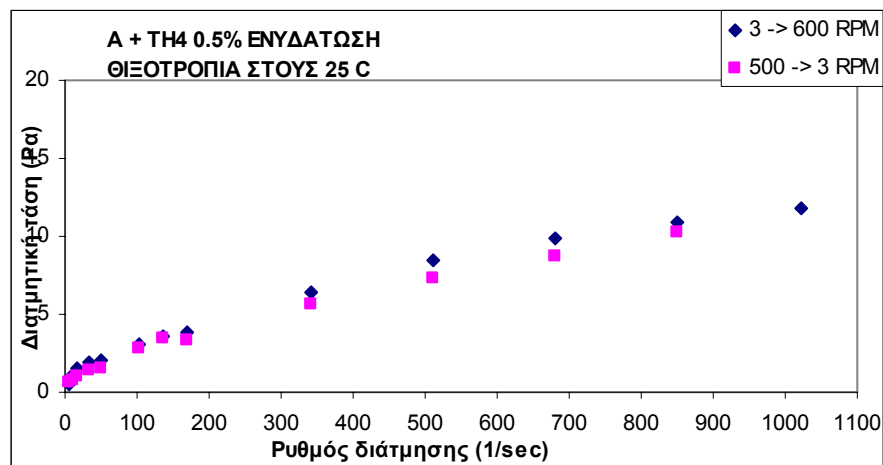
Γ2



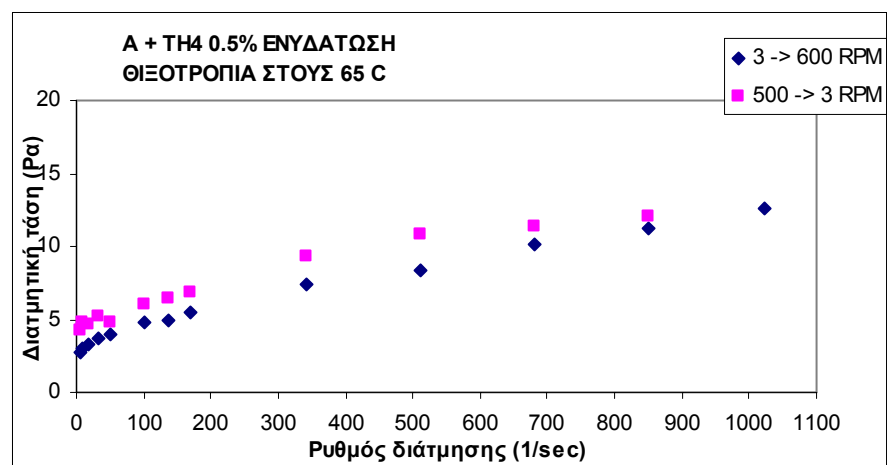
Γ1 – Γ2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + TH3 0,5%** που έχει υποστεί στατική γήρανση σε φούρνο, στους 177 °C.

Ι.5.1. Βάση πολφού και ΤΗ4. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από ενυδάτωση

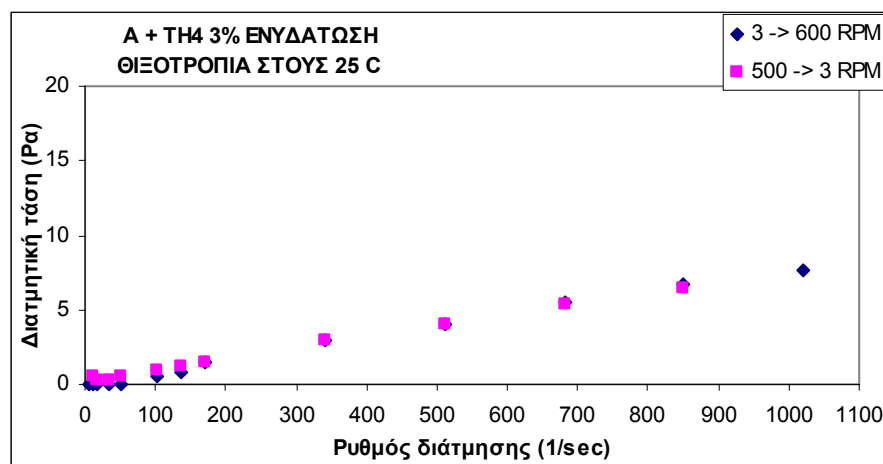
A1



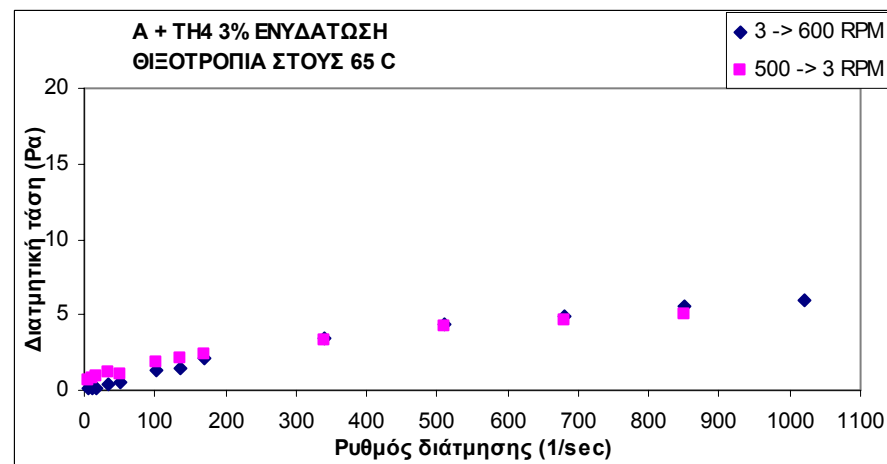
A2



B1



B2

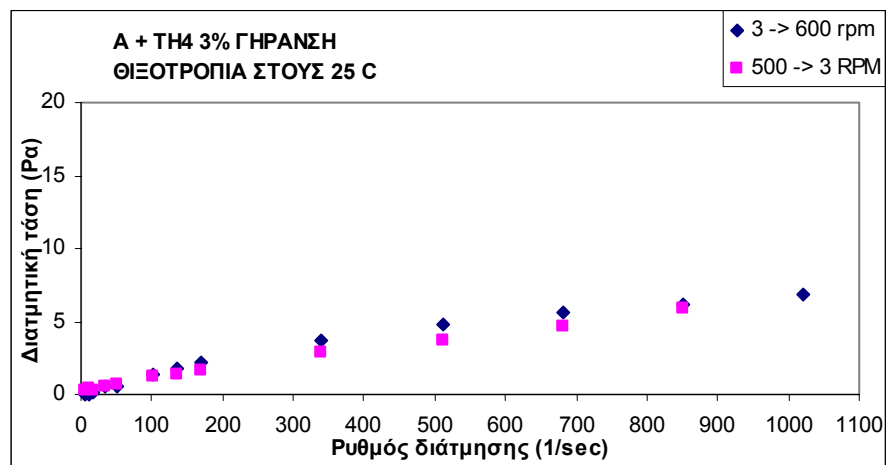


A1 – A2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + TH4 0,5%** που έχει ενυδατωθεί.

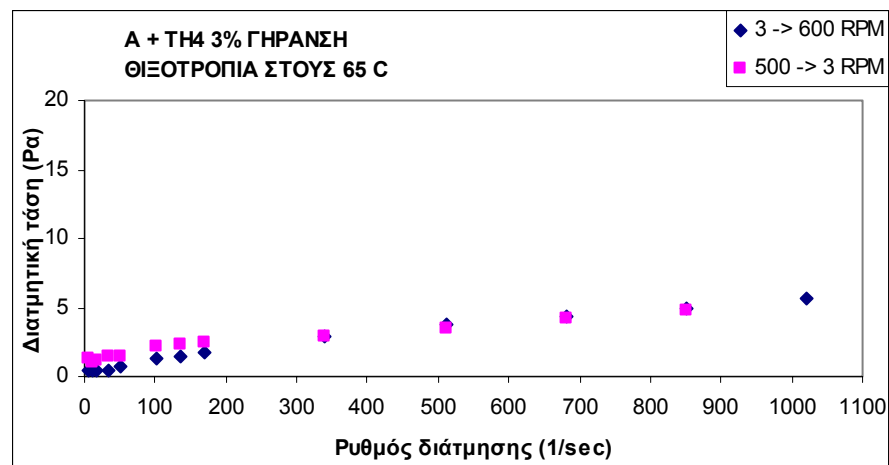
B1 – B2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + TH4 3,0%** που έχει ενυδατωθεί.

Ι.5.2. Βάση πολφού και ΤΗ4. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από γήρανση

Γ1



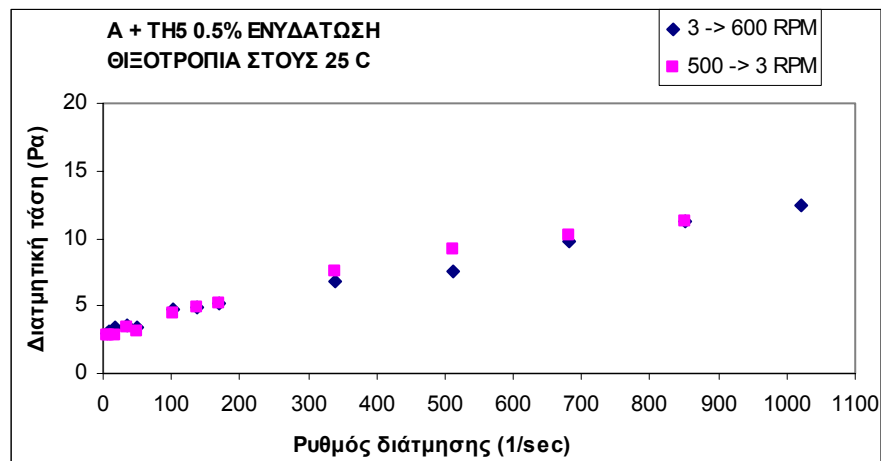
Γ2



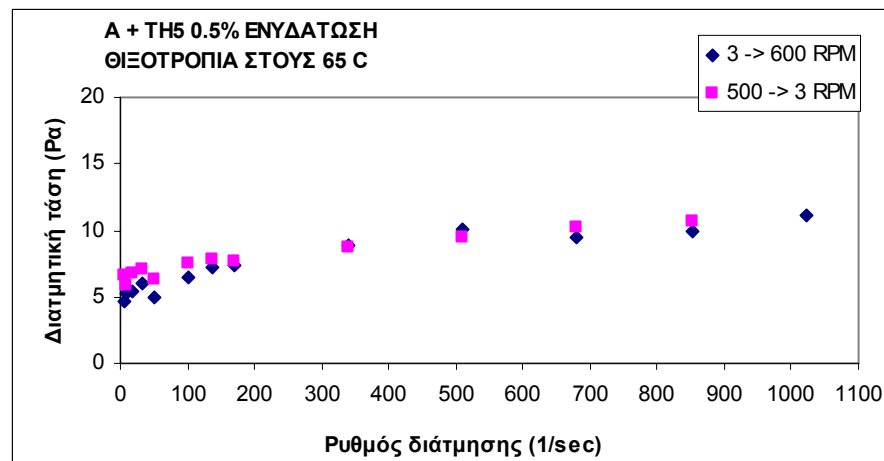
Γ1 – Γ2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + ΤΗ4 0,5%** που έχει υποστεί στατική γήρανση σε φούρνο, στους 177 °C.

Ι.6.1. Βάση πολφού και TH5. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από ενυδάτωση

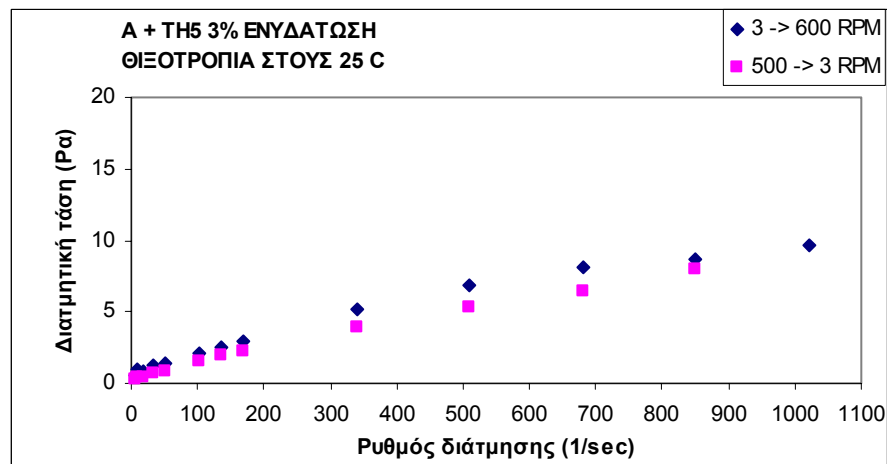
A1



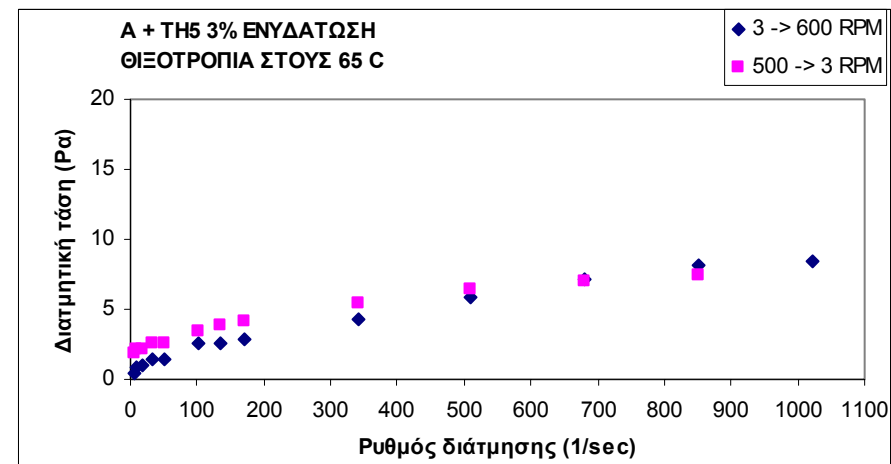
A2



B1



B2

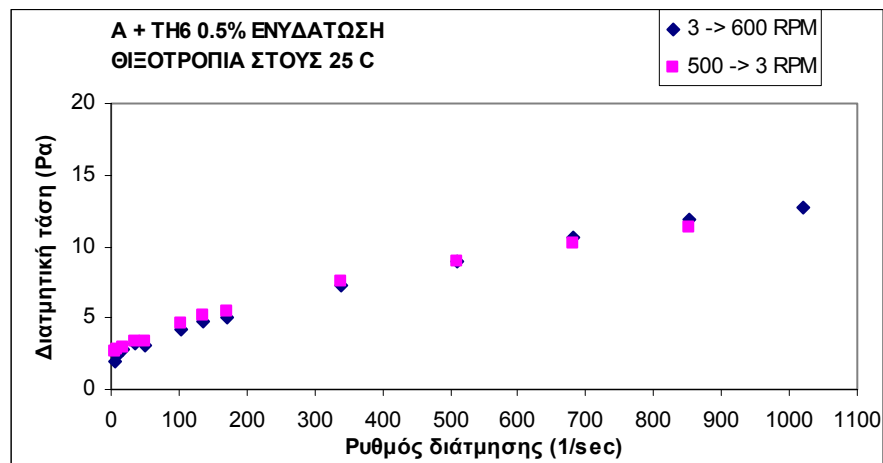


A1 – A2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + TH5 0,5%** που έχει ενυδατωθεί.

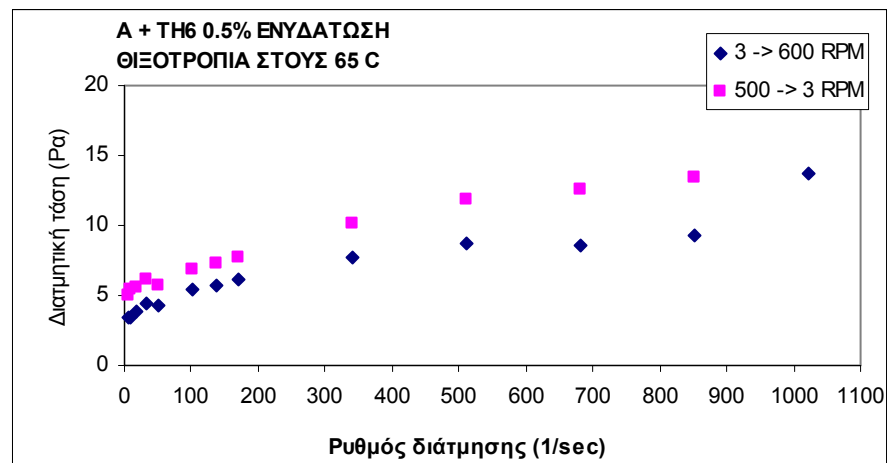
B1 – B2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + TH5 3,0%** που έχει ενυδατωθεί.

Ι.7.1. Βάση πολφού και ΤΗ6. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από ενυδάτωση

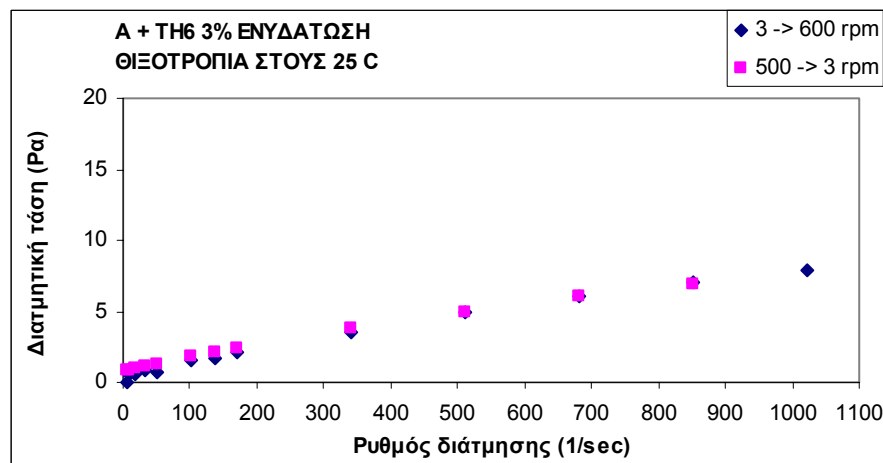
A1



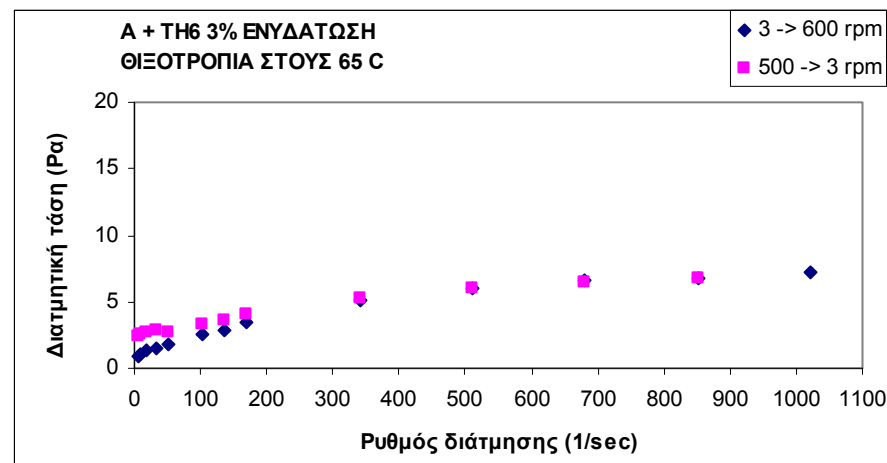
A2



B1



B2

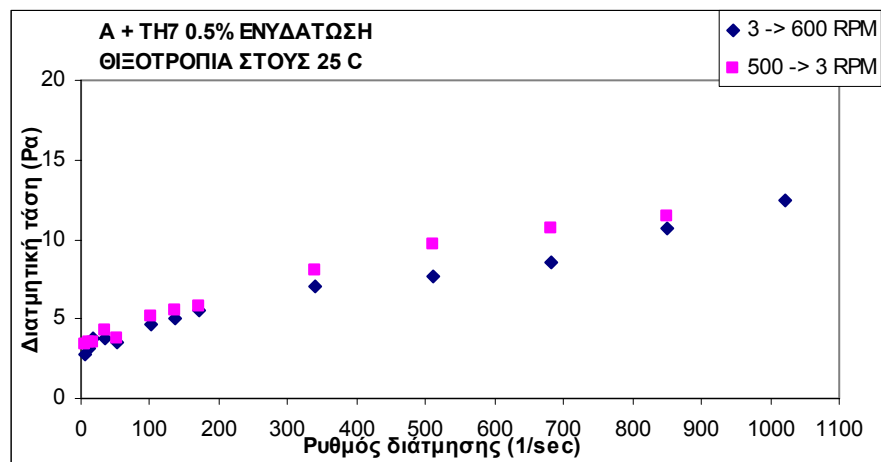


A1 – A2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + ΤΗ6 0,5%** που έχει ενυδατωθεί.

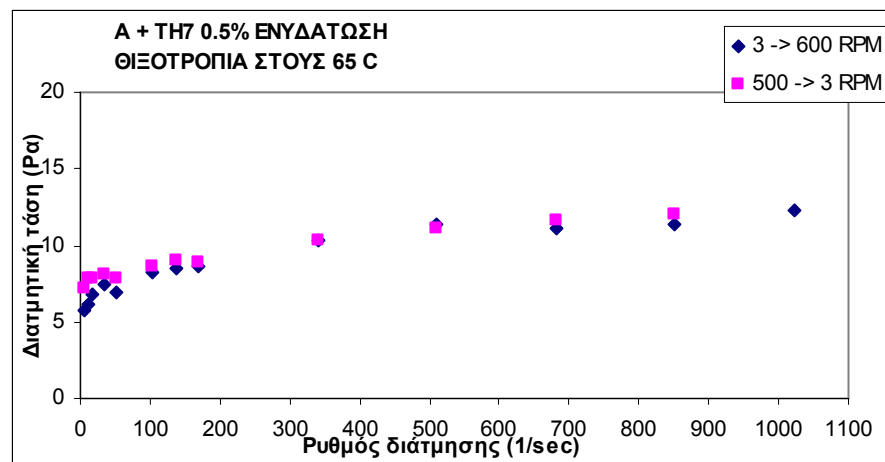
B1 – B2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + ΤΗ6 3,0%** που έχει ενυδατωθεί.

Ι.8.1. Βάση πολφού και ΤΗ7. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από ενυδάτωση

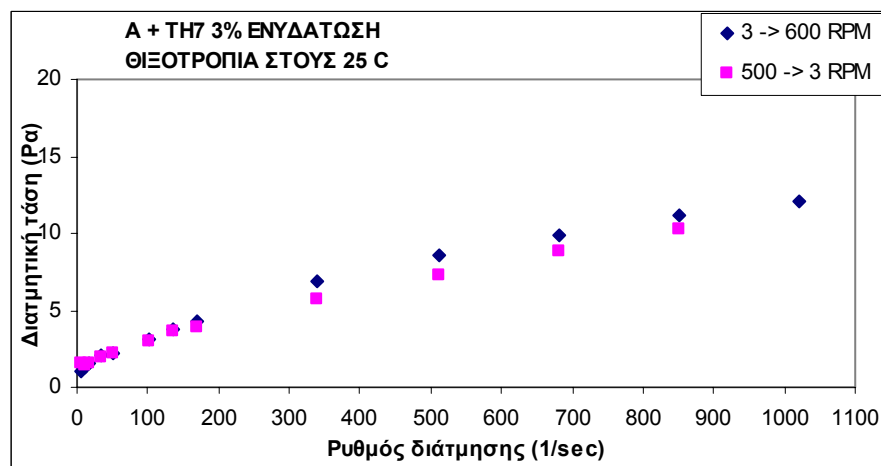
A1



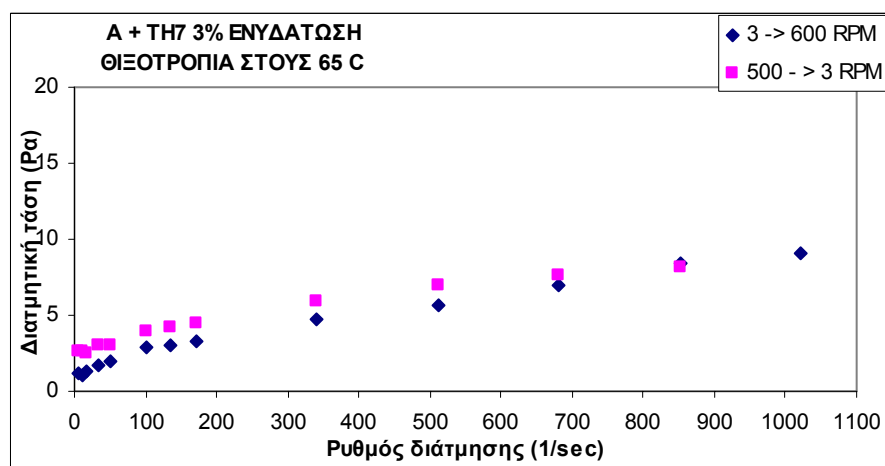
A2



B1



B2

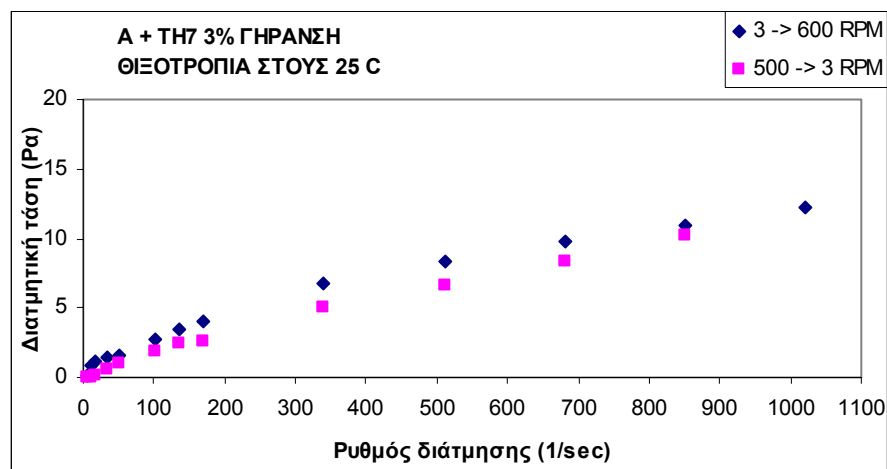


A1 – A2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + ΤΗ7 0,5%** που έχει ενυδατωθεί.

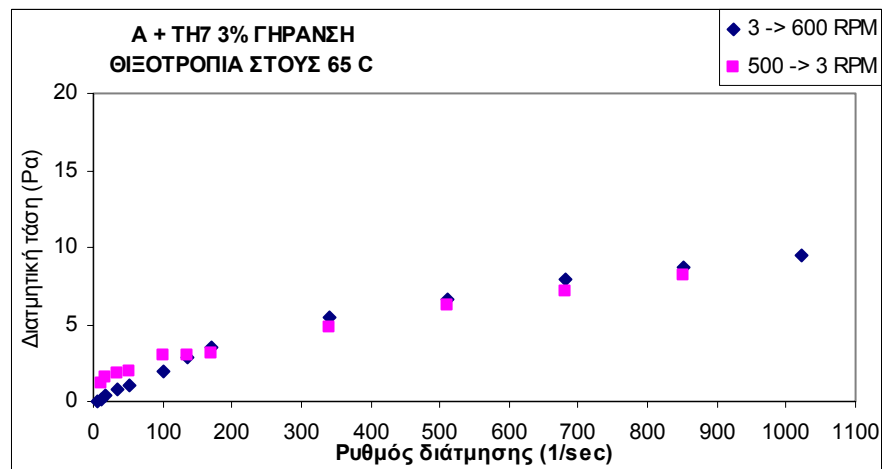
B1 – B2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + ΤΗ7 3,0%** που έχει ενυδατωθεί.

Ι.8.2. Βάση πολφού και ΤΗ7. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από γήρανση

Γ1



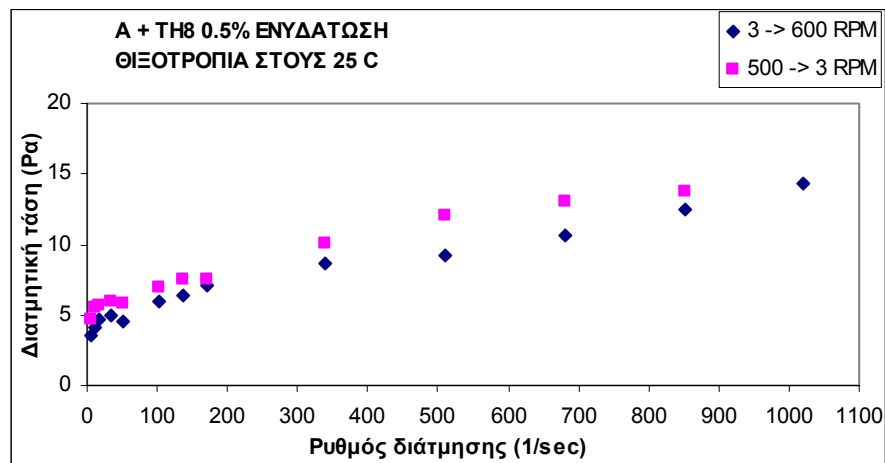
Γ2



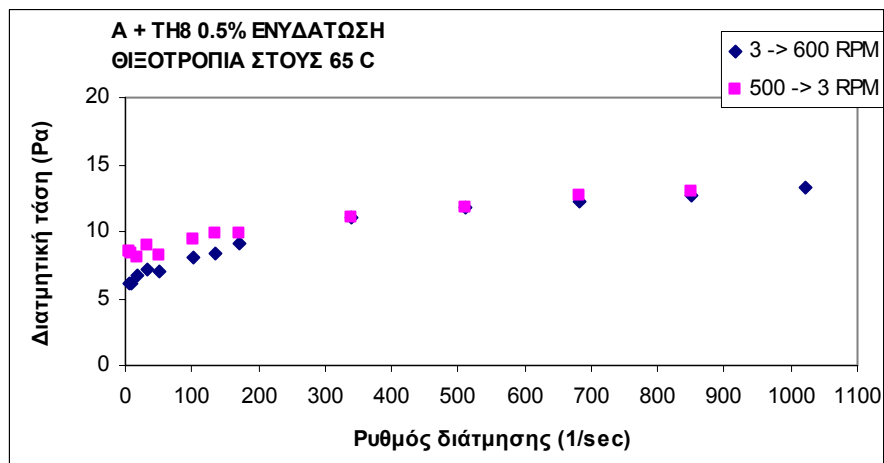
Γ1 – Γ2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + ΤΗ7 0,5%** που έχει υποστεί στατική γήρανση σε φούρνο, στους 177 °C.

Ι.9.1. Βάση πολφού και TH8. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από ενυδάτωση

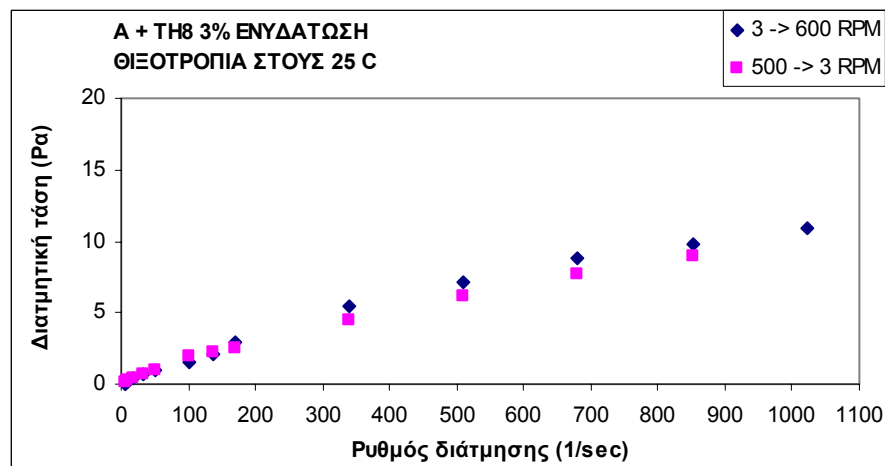
A1



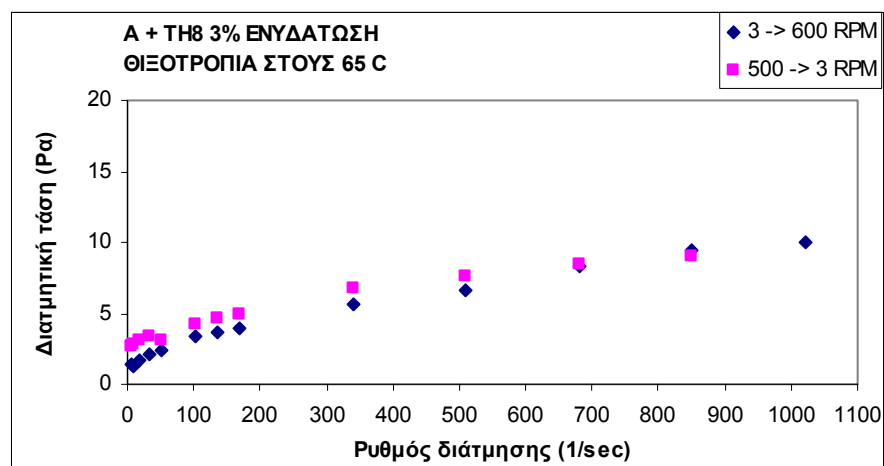
A2



B1



B2

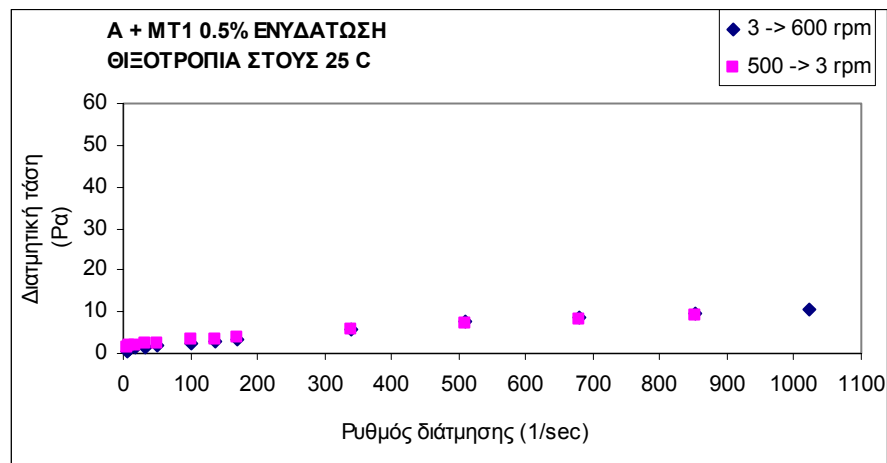


A1 – A2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + TH8 0,5%** που έχει ενυδατωθεί.

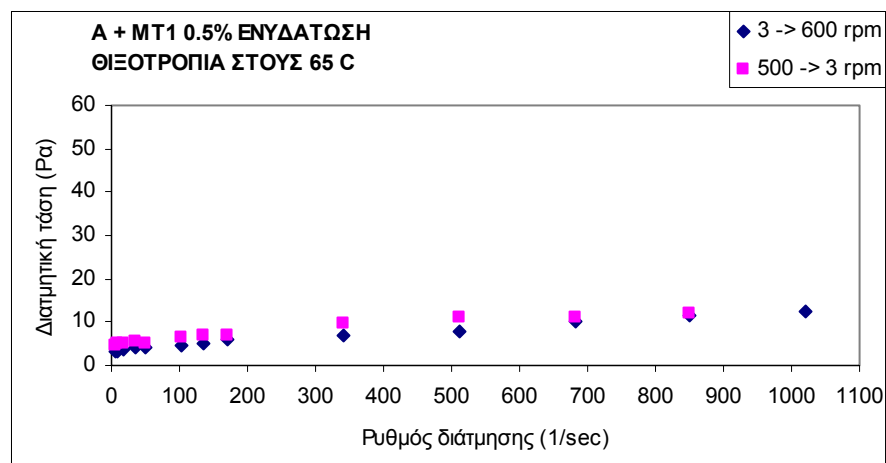
B1 – B2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + TH8 3,0%** που έχει ενυδατωθεί.

Ι.10.1. Βάση πολφού και MT1. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από ενυδάτωση

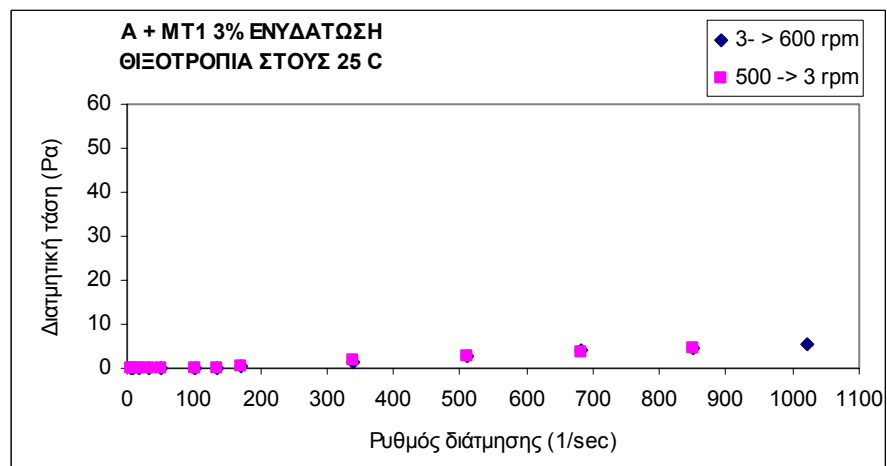
A1



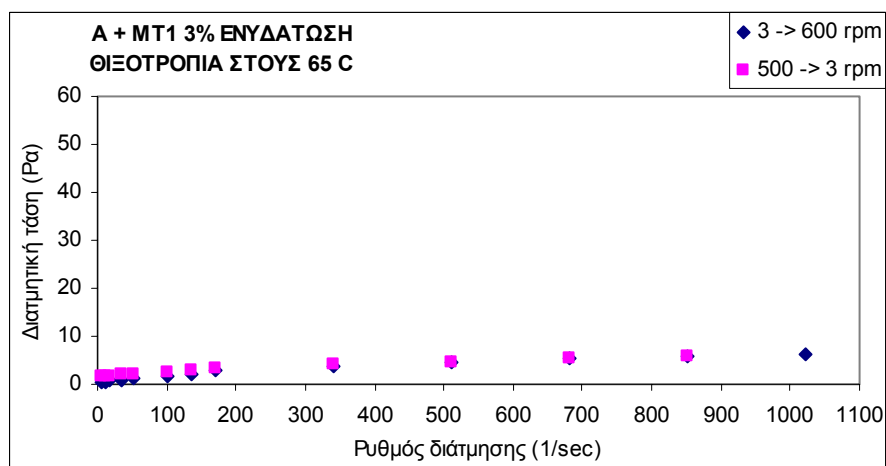
A2



B1



B2

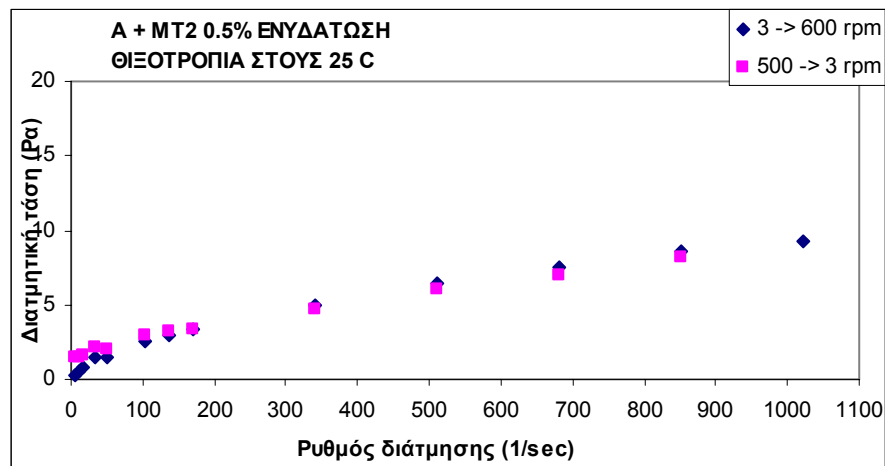


A1 – A2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + MT1 0,5%** που έχει ενυδατωθεί.

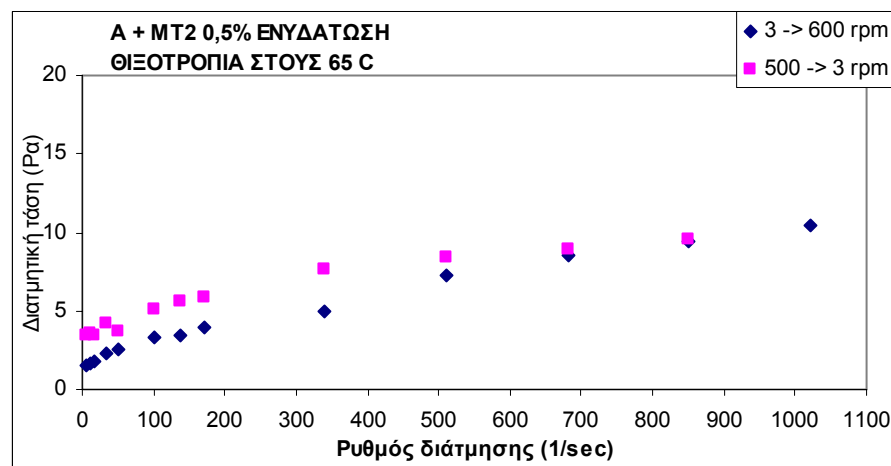
B1 – B2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + MT1 3,0%** που έχει ενυδατωθεί.

I.11.1. Βάση πολφού και MT2. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από ενυδάτωση

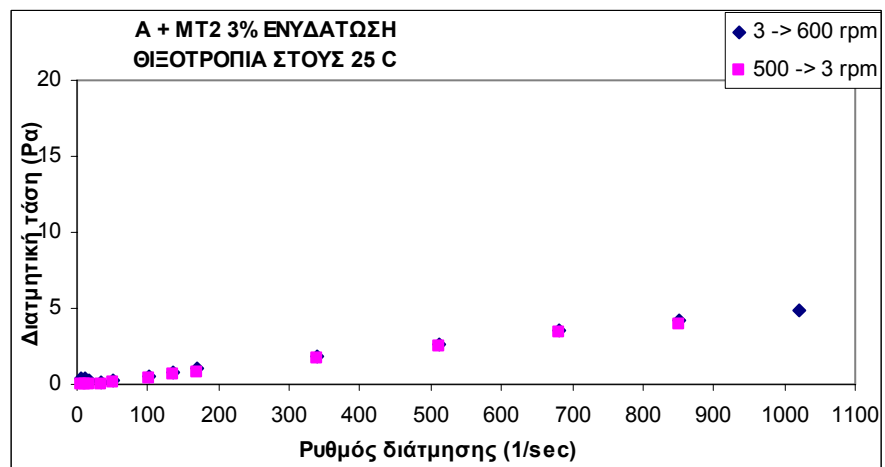
A1



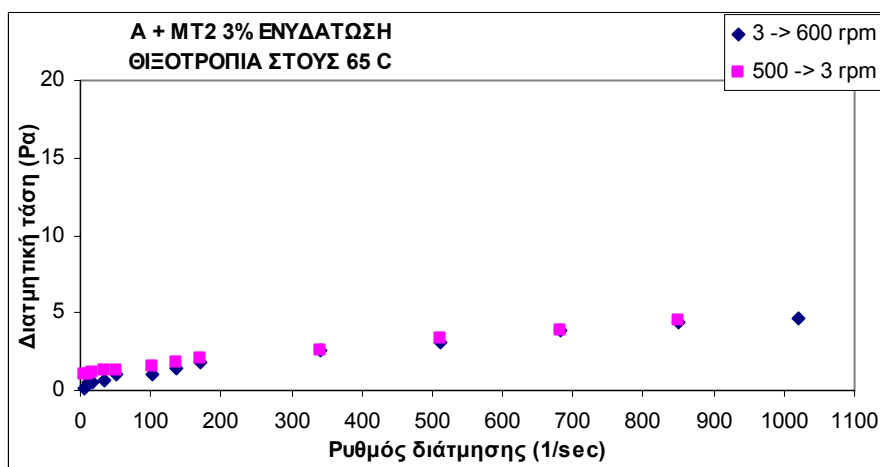
A2



B1



B2

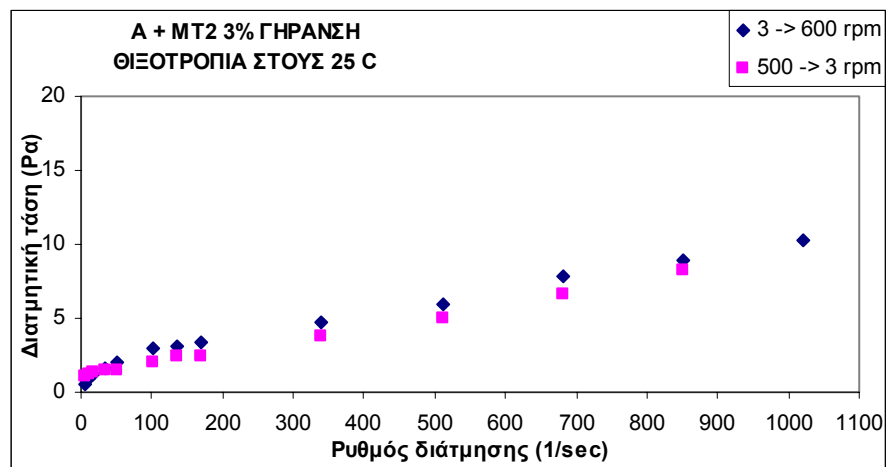


A1 – A2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + MT2 0,5%** που έχει ενυδατωθεί.

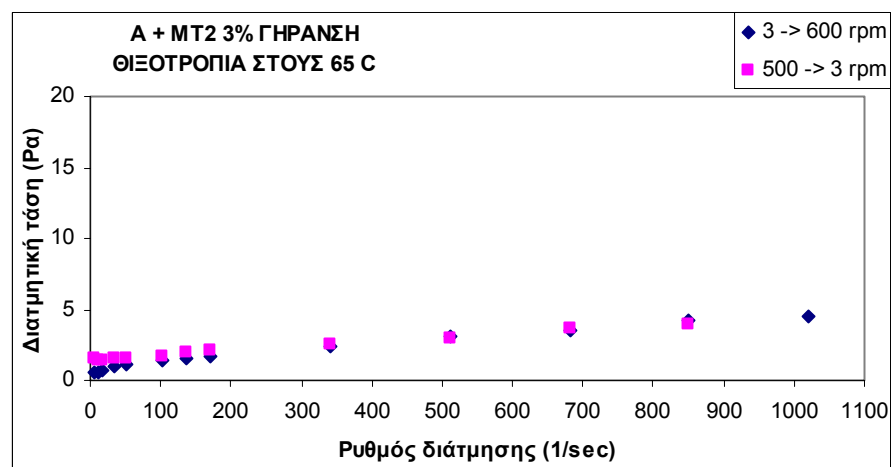
B1 – B2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + MT2 3,0%** που έχει ενυδατωθεί.

Ι.11.2. Βάση πολφού και MT2. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από γήρανση

Γ1



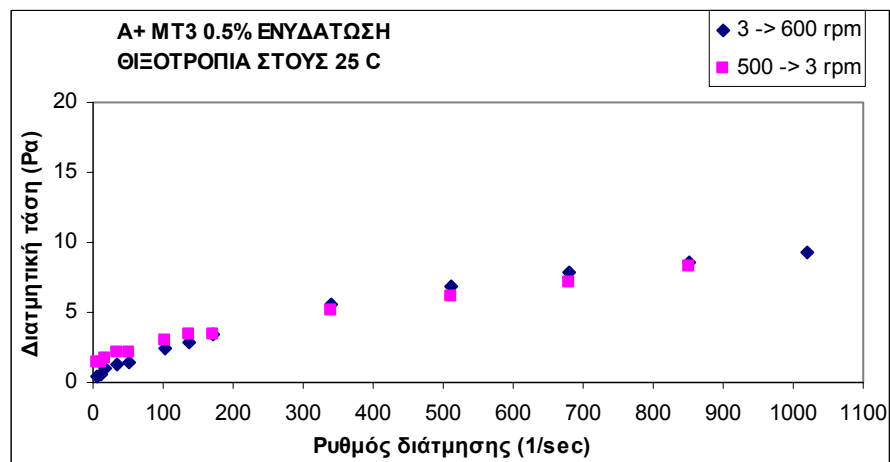
Γ2



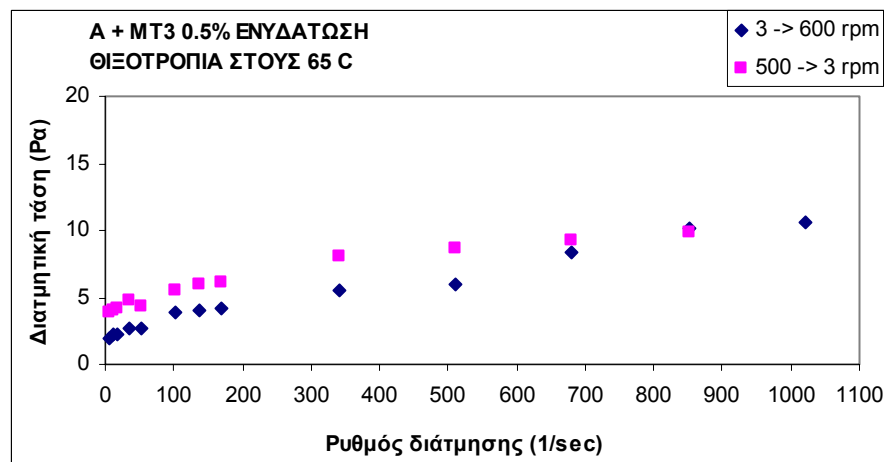
Γ1 – Γ2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + MT2 0,5%** που έχει υποστεί στατική γήρανση σε φούρνο, στους 177 °C.

I.12.1. Βάση πολφού και MT3. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από ενυδάτωση

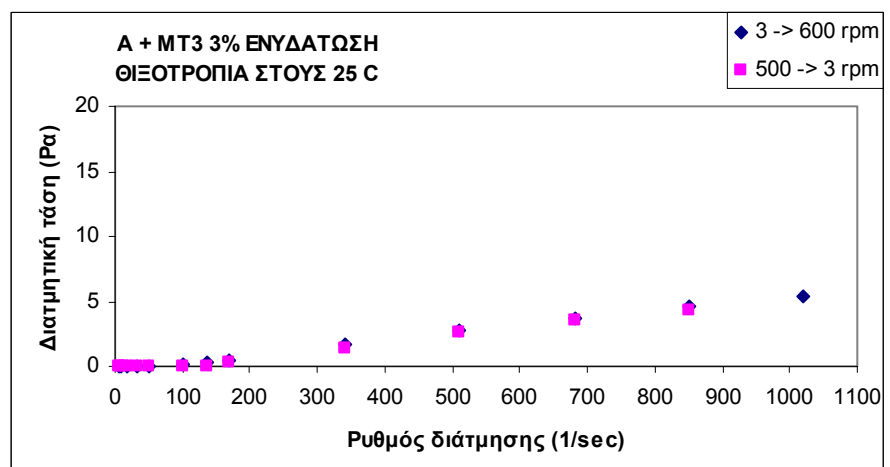
A1



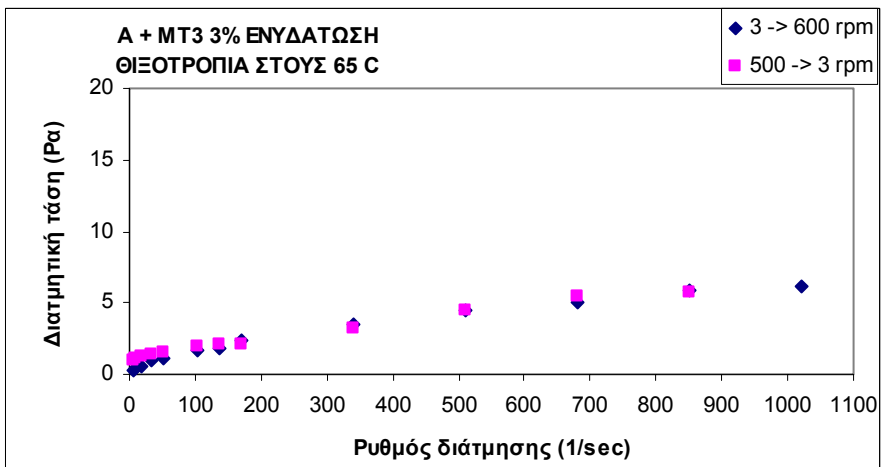
A2



B1



B2

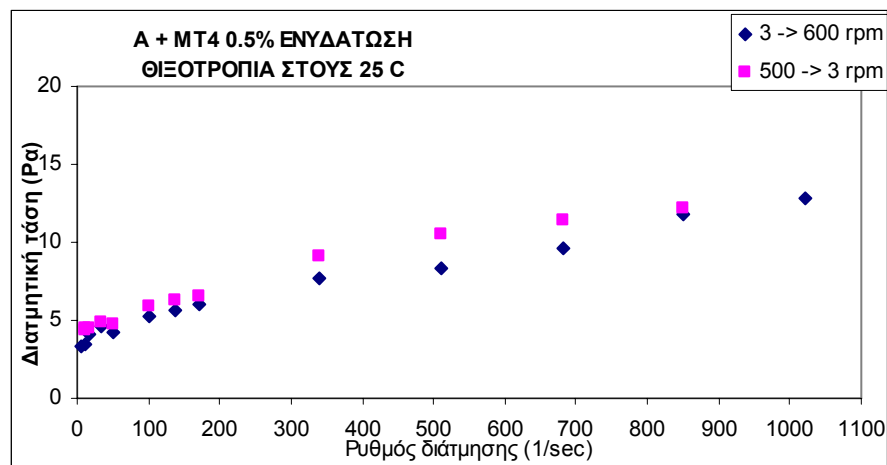


A1 – A2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + MT3 0,5%** που έχει ενυδατωθεί.

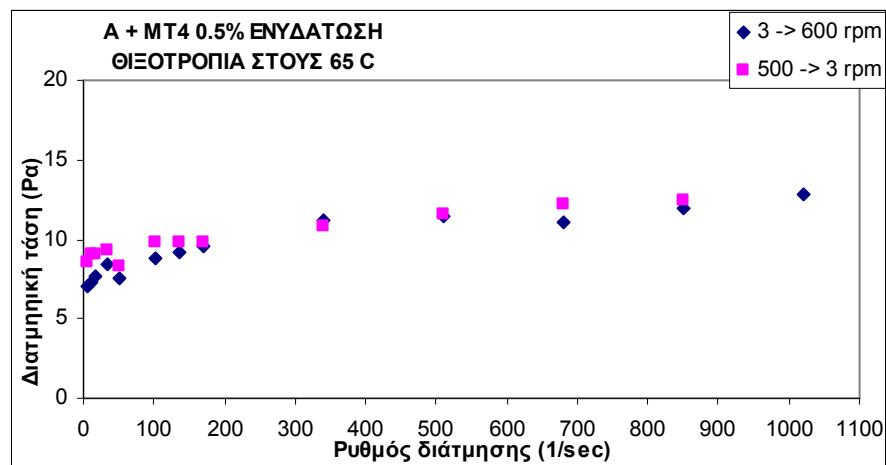
B1 – B2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + MT3 3,0%** που έχει ενυδατωθεί.

I.13.1. Βάση πολφού και MT4. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από ενυδάτωση

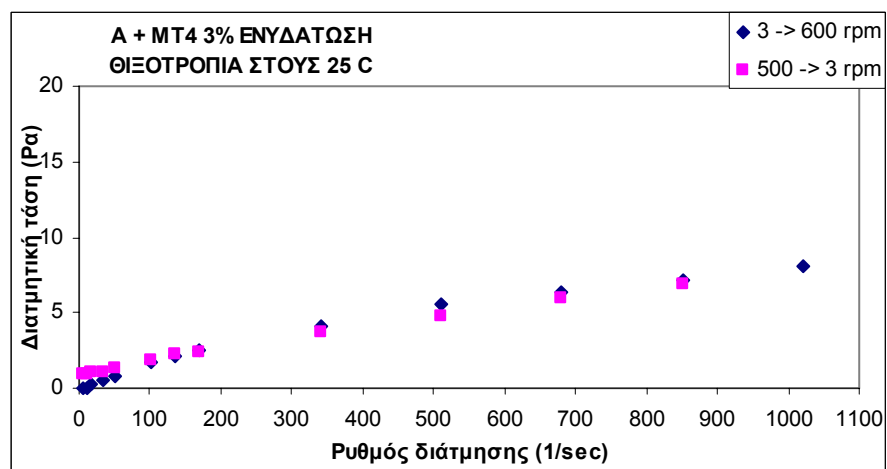
A1



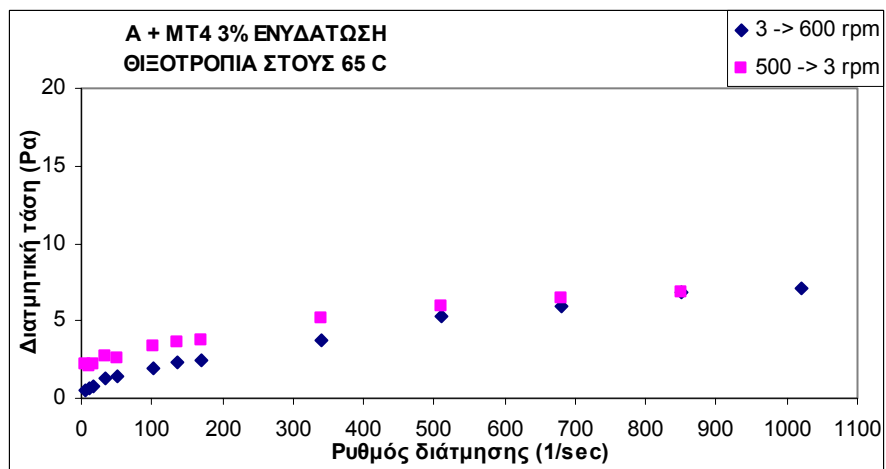
A2



B1



B2

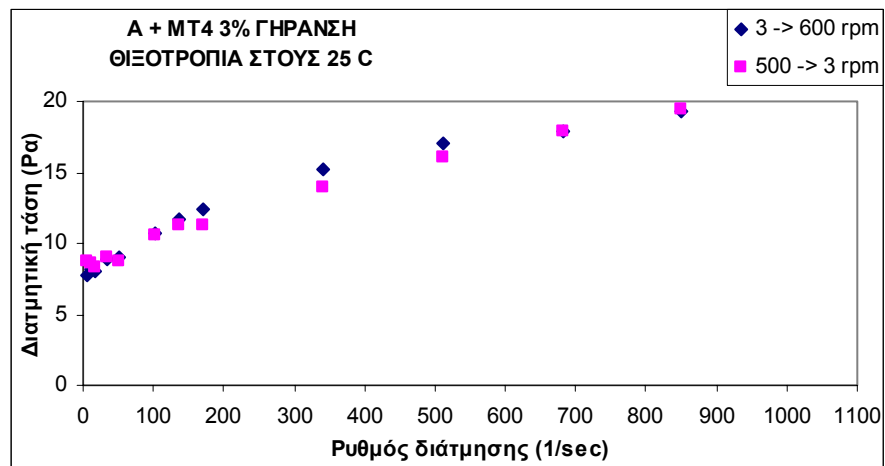


A1 – A2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + MT4 0,5%** που έχει ενυδατωθεί.

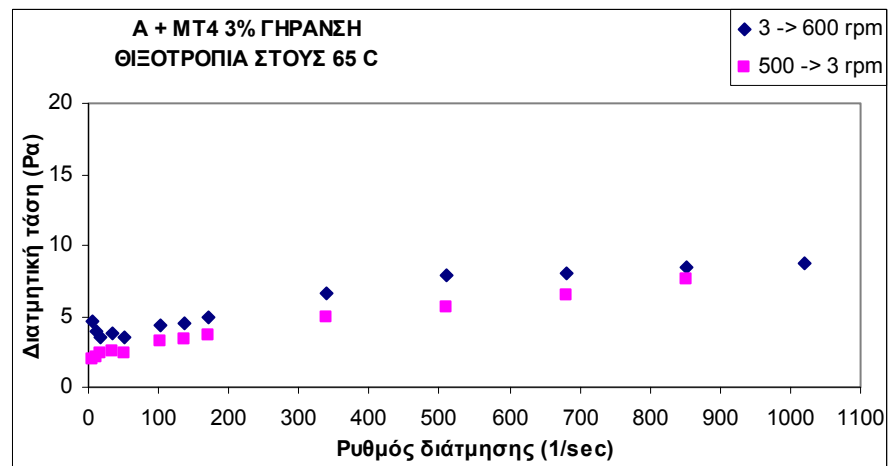
B1 – B2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + MT4 3,0%** που έχει ενυδατωθεί.

Ι.13.2. Βάση πολφού και ΜΤ4. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από γήρανση

Γ1



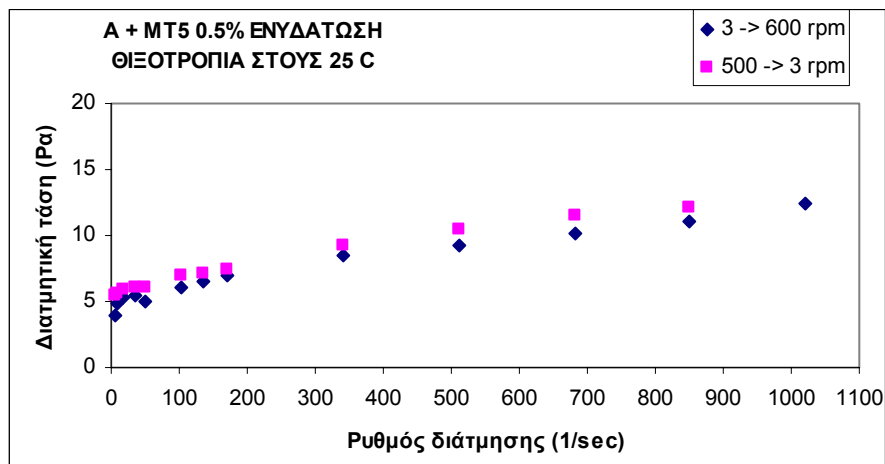
Γ2



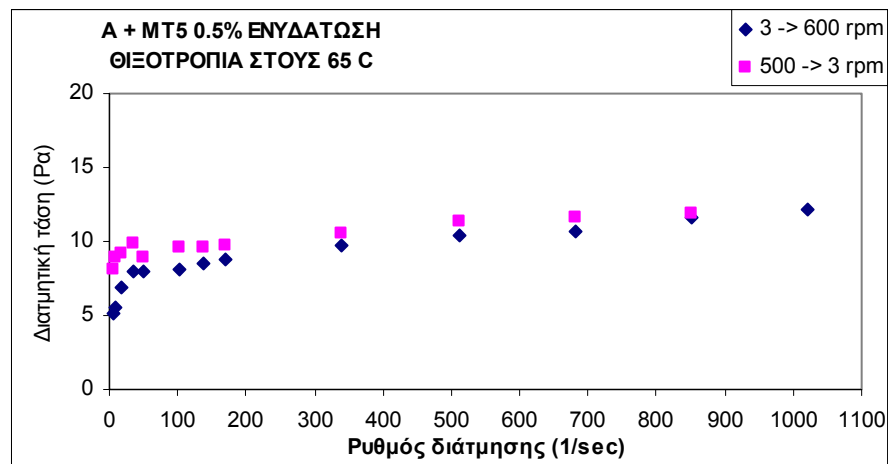
Γ1 – Γ2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + ΜΤ4 0,5%** που έχει υποστεί στατική γήρανση σε φούρνο, στους 177 °C.

Ι.14.1. Βάση πολφού και MT5. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από ενυδάτωση

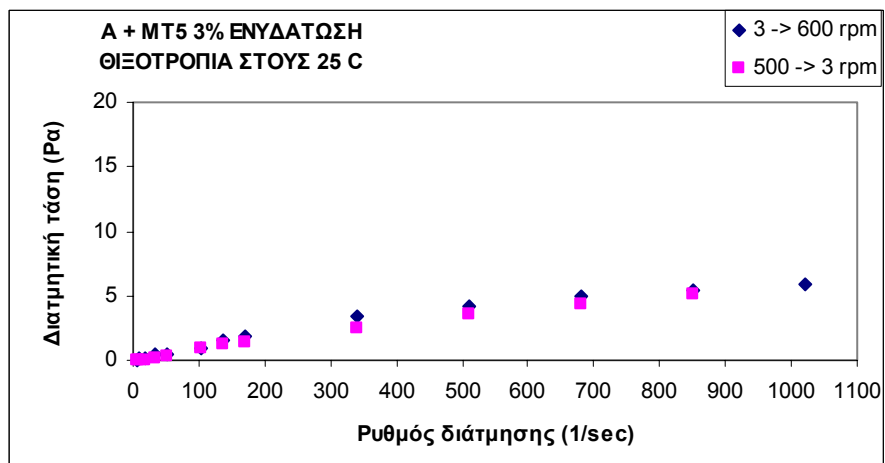
A1



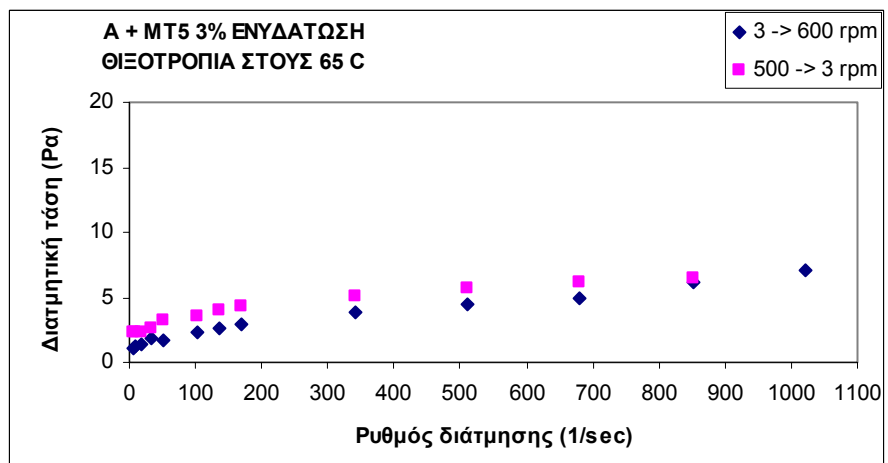
A2



B1



B2

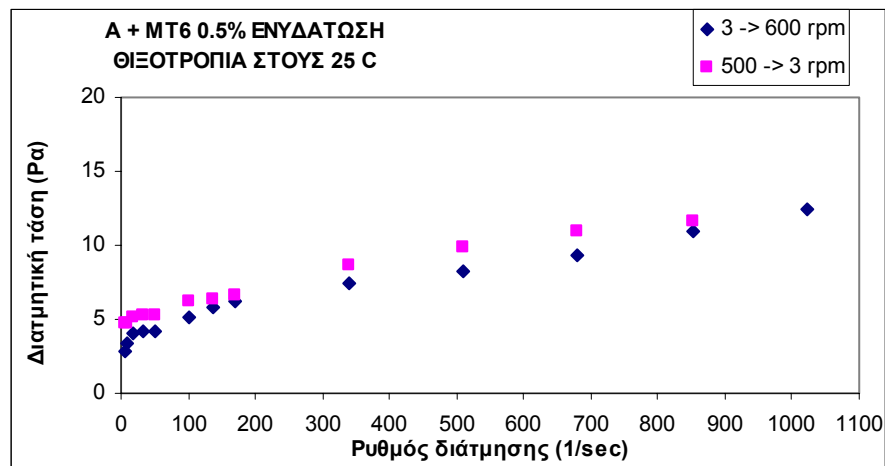


A1 – A2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + MT5 0,5%** που έχει ενυδατωθεί.

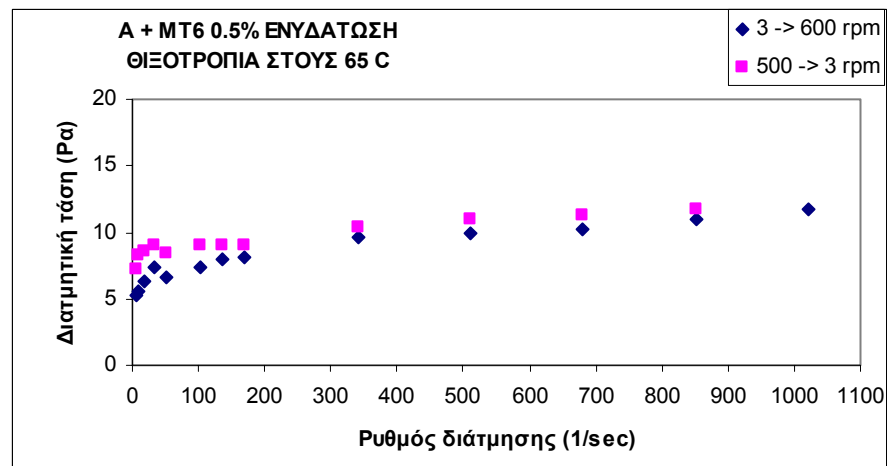
B1 – B2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + MT5 3,0%** που έχει ενυδατωθεί.

Ι.15.1. Βάση πολφού και MT6. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από ενυδάτωση

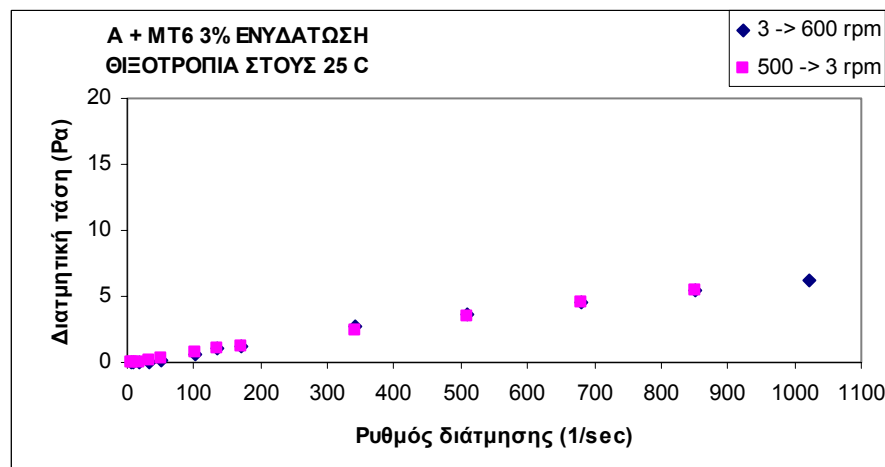
A1



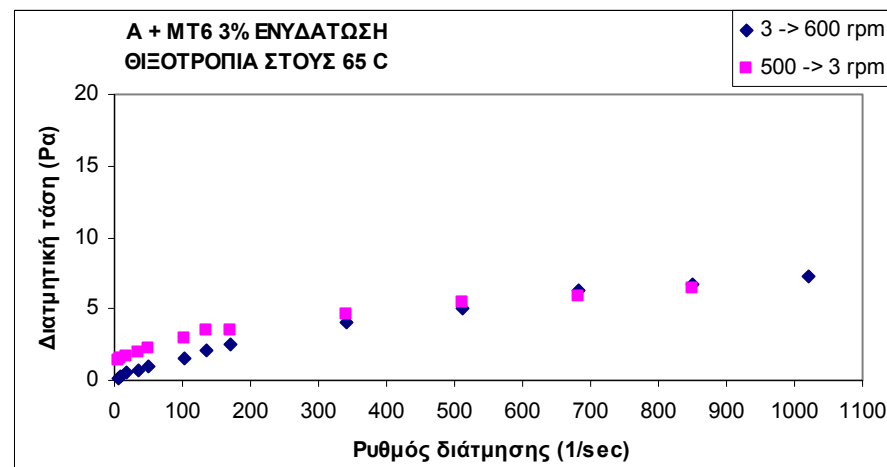
A2



B1



B2

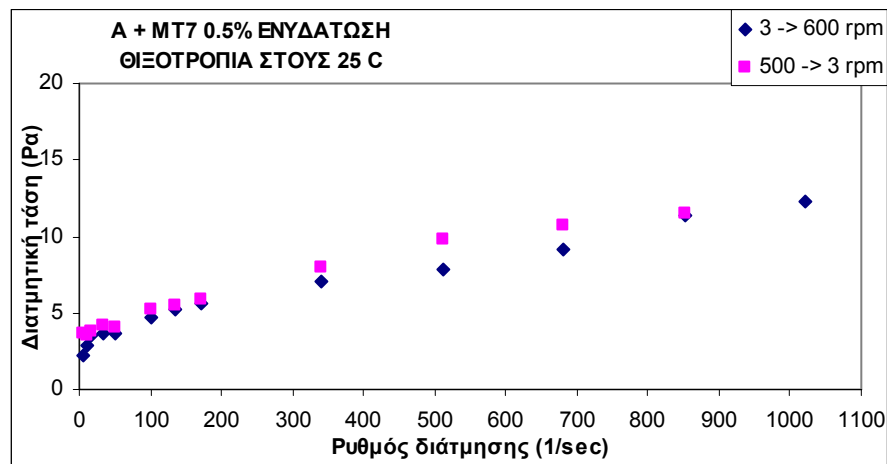


A1 – A2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + MT6 0,5%** που έχει ενυδατωθεί.

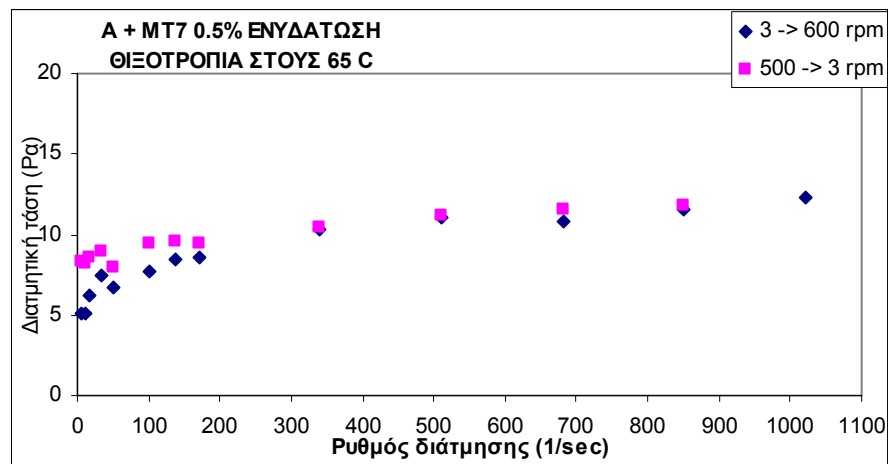
B1 – B2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + MT6 3,0%** που έχει ενυδατωθεί.

I.16.1. Βάση πολφού και MT7. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από ενυδάτωση

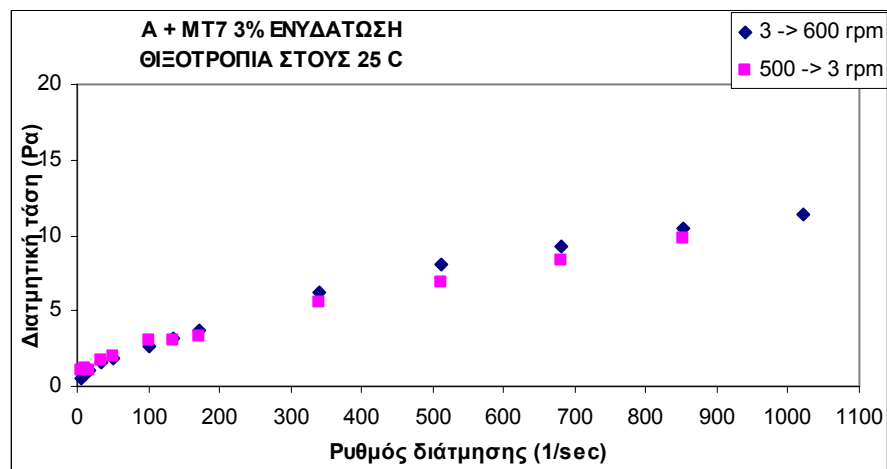
A1



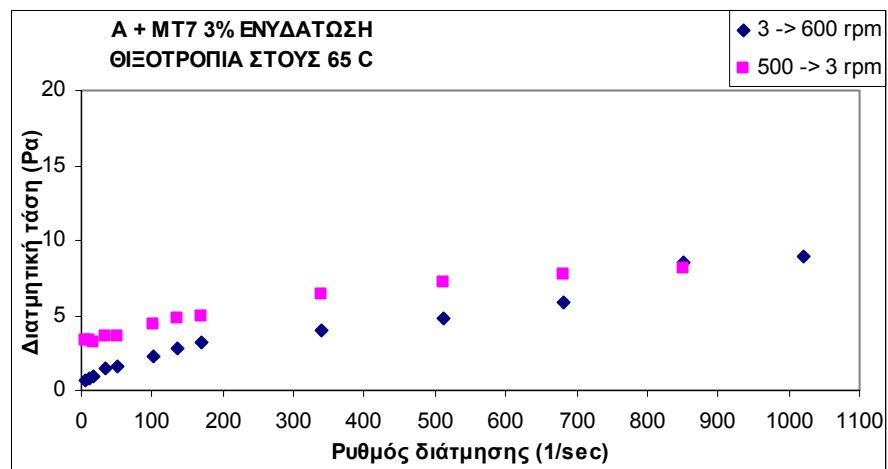
A2



B1



B2

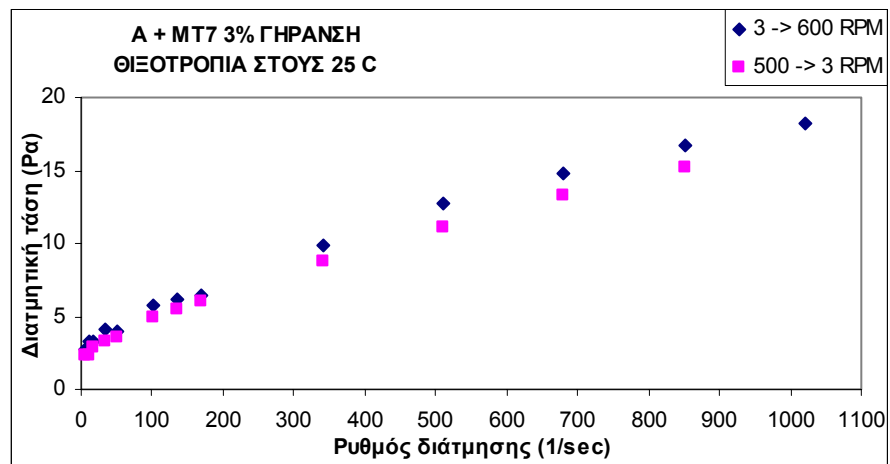


A1 – A2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + MT7 0,5%** που έχει ενυδατωθεί.

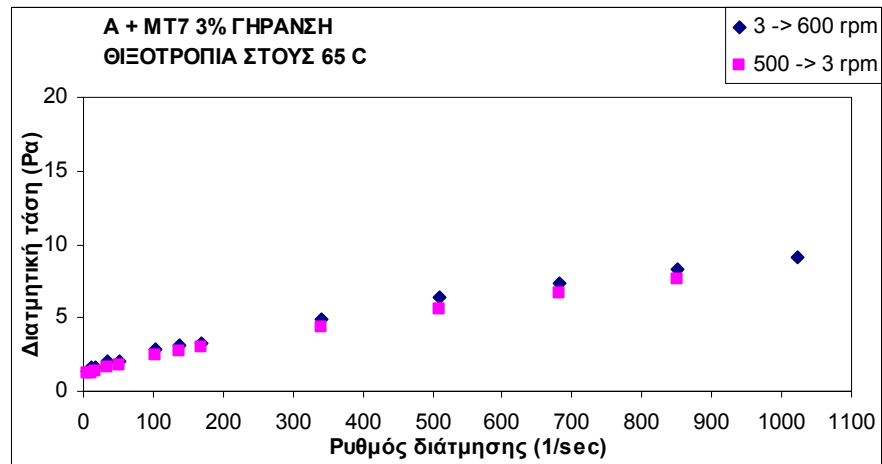
B1 – B2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + MT7 3,0%** που έχει ενυδατωθεί.

Ι.16.2. Βάση πολφού και MT7. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από γήρανση

Γ1



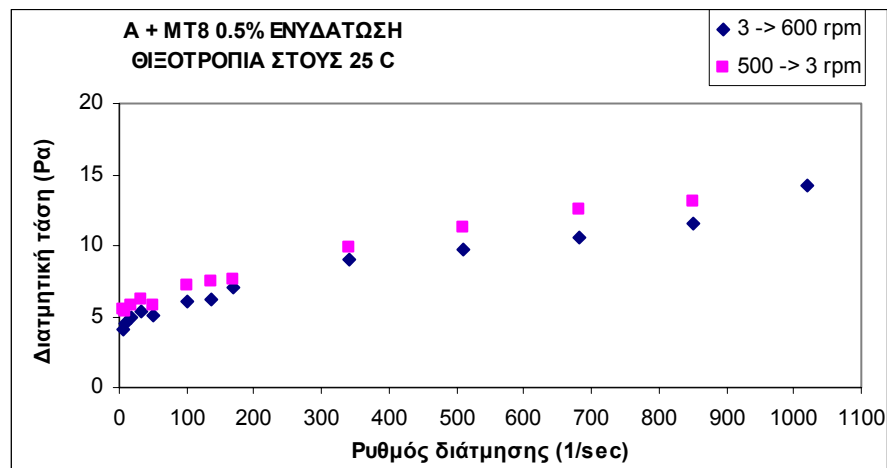
Γ2



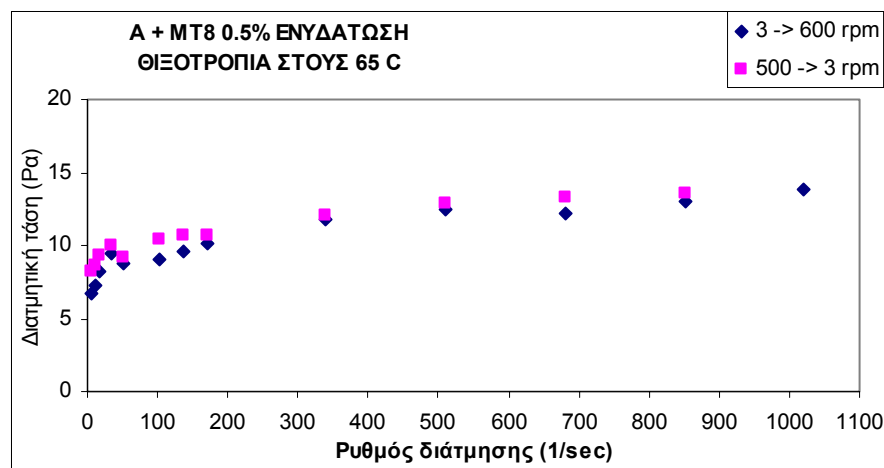
Γ1 – Γ2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + MT7 0,5%** που έχει υποστεί στατική γήρανση σε φούρνο, στους 177 °C.

I.17.1. Βάση πολφού και MT8. Πολφοί που έχουν μελετηθεί μετά από ενυδάτωση

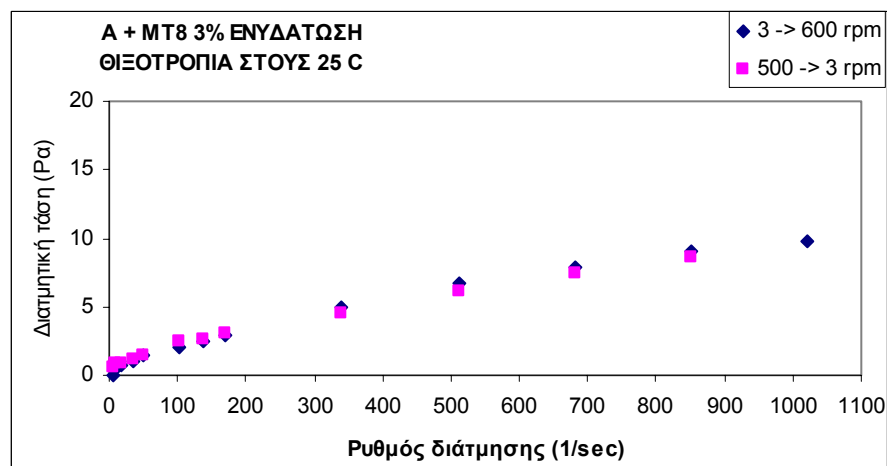
A1



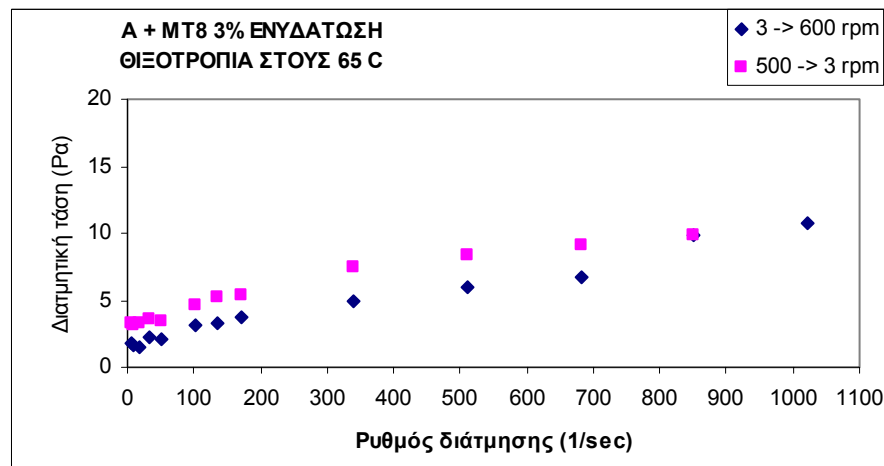
A2



B1



B2



A1 – A2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + MT8 0,5%** που έχει ενυδατωθεί.

B1 – B2: Πείραμα θιξοτροπίας σε χαμηλή – υψηλή θερμοκρασία. Συσχέτιση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό **A + MT8 3,0%** που έχει ενυδατωθεί.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Κ

ΡΕΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΛΦΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΛΙΓΝΙΤΗ	ΑΥΞΗΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (0 → 600 rpm)			
ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ: 0,50 % κ.ό.				
	ΧΑΜΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (25 °C)			
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΜΕΛΕΤΗΘΕΙ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ	ΤΑΣΗ ΔΙΟΛΙΣΘΗΣΗΣ τ_y (Pa)	ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (K) (Pa.s ⁿ)	ΟΔΗΓΟΣ ΡΟΪΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (n)	R ²
A	8,439	0,844	0,255	0,994
A + TH1	1,184	0,118	0,643	0,996
A + TH2	0,079	0,008	0,592	0,998
A + TH3	1,335	0,133	0,713	0,998
A + TH4	0,213	0,021	0,602	0,998
A + TH5	3,008	0,301	0,857	0,996
A + TH6	1,777	0,178	0,657	0,998
A + TH7	3,097	0,310	0,815	0,990
A + TH8	3,796	0,380	0,701	0,992
A + MT1	0,131	0,013	0,603	0,998
A + MT2	0,010	0,001	0,596	0,999
A + MT3	0,010	0,001	0,583	0,997
A + MT4	3,458	0,346	0,745	0,994
A + MT5	4,107	0,411	0,593	0,993
A + MT6	3,010	0,301	0,636	0,993
A + MT7	2,601	0,260	0,697	0,993
A + MT8	4,173	0,417	0,687	0,989

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΛΙΓΝΙΤΗ	ΜΕΙΩΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (600 → 0 rpm)			
ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ: 0,50 % κ.ό.				
	ΧΑΜΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (25 °C)			
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΜΕΛΕΤΗΘΕΙ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ	ΤΑΣΗ ΔΙΟΛΙΣΘΗΣΗΣ τ_y (Pa)	ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (K) (Pa.s ⁿ)	ΟΔΗΓΟΣ ΡΟΪΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (n)	R ²
A	21,498	2,150	1,354	0,976
A + TH1	1,357	0,136	0,657	0,999
A + TH2	0,887	0,089	0,687	0,999
A + TH3	0,841	0,084	0,723	0,998
A + TH4	0,332	0,033	0,694	0,999
A + TH5	2,206	0,221	0,659	0,997
A + TH6	2,174	0,217	0,638	0,999
A + TH7	2,776	0,278	0,518	0,993
A + TH8	4,348	0,435	0,572	0,994
A + MT1	1,399	0,140	0,724	0,999
A + MT2	1,318	0,132	0,734	0,999
A + MT3	1,185	0,118	0,668	0,999
A + MT4	3,661	0,366	0,602	0,995
A + MT5	5,130	0,513	0,629	0,996
A + MT6	4,355	0,435	0,660	0,998
A + MT7	3,036	0,304	0,639	0,996
A + MT8	4,983	0,498	0,643	0,996

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΛΙΓΝΙΤΗ	ΑΥΞΗΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (0 → 600 rpm)			
ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ: 0,50 % κ.ό.				
	ΥΨΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (65 °C)			
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΜΕΛΕΤΗΘΕΙ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ	ΤΑΣΗ ΔΙΟΛΙΣΘΗΣΗΣ τ_y (Pa)	ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (K) (Pa.s ⁿ)	ΟΔΗΓΟΣ ΡΟΪΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (n)	R ²
A	0,000	14,126	0,120	0,986
A + TH1	3,470	0,347	0,804	0,983
A + TH2	2,657	0,266	0,544	0,995
A + TH3	2,625	0,262	0,450	0,991
A + TH4	2,700	0,270	0,696	0,998
A + TH5	3,893	0,389	0,397	0,976
A + TH6	3,440	0,344	0,702	0,962
A + TH7	4,031	0,403	0,287	0,988
A + TH8	4,941	0,494	0,409	0,994
A + MT1	3,173	0,317	0,778	0,996
A + MT2	1,415	0,141	0,731	0,997
A + MT3	2,038	0,204	0,802	0,991
A + MT4	1,415	0,141	0,731	0,997
A + MT5	0,010	0,001	0,146	0,981
A + MT6	3,841	0,384	0,297	0,987
A + MT7	1,471	0,147	0,207	0,988
A + MT8	4,722	0,472	0,255	0,980

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΛΙΓΝΙΤΗ	ΜΕΙΩΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (600 → 0 rpm)			
ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ: 0,50 % κ.ό.				
	ΥΨΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (65 °C)			
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΜΕΛΕΤΗΘΕΙ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ	ΤΑΣΗ ΔΙΟΛΙΣΘΗΣΗΣ τ_y (Pa)	ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (K) (Pa.s ⁿ)	ΟΔΗΓΟΣ ΡΟΪΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (n)	R ²
A	0,010	0,001	0,015	0,575
A + TH1	3,765	0,376	0,410	0,988
A + TH2	4,382	0,438	0,421	0,957
A + TH3	3,774	0,377	0,437	0,979
A + TH4	3,587	0,359	0,543	0,992
A + TH5	6,143	0,614	0,613	0,985
A + TH6	4,434	0,443	0,558	0,992
A + TH7	7,045	0,705	0,510	0,992
A + TH8	7,793	0,779	0,560	0,987
A + MT1	3,864	0,386	0,520	0,992
A + MT2	2,655	0,266	0,498	0,994
A + MT3	3,177	0,318	0,486	0,995
A + MT4	2,655	0,266	0,498	0,994
A + MT5	8,398	0,840	0,501	0,961
A + MT6	7,244	0,724	0,403	0,972
A + MT7	7,935	0,793	0,534	0,977
A + MT8	7,004	0,700	0,308	0,988

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΛΙΓΝΙΤΗ	ΑΥΞΗΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (0 → 600 rpm)			
ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ: 3,00 % κ.ό.				
	ΧΑΜΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (25 °C)			
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΜΕΛΕΤΗΘΕΙ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ	ΤΑΣΗ ΔΙΟΛΙΣΘΗΣΗΣ τ_y (Pa)	ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (Κ) (Pa.s ⁿ)	ΟΔΗΓΟΣ ΡΟΪΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (n)	R ²
A	8,439	0,844	0,255	0,994
A + TH1	0,010	0,001	0,645	0,997
A + TH2	0,483	0,048	0,808	0,998
A + TH3	0,010	0,001	0,856	0,999
A + TH4	0,010	0,001	1,036	0,996
A + TH5	0,087	0,009	0,633	0,996
A + TH6	0,045	0,005	0,744	0,999
A + TH7	0,487	0,049	0,611	0,998
A + TH8	0,010	0,001	0,771	0,996
A + MT1	0,010	0,001	1,244	0,991
A + MT2	0,150	0,015	0,984	0,997
A + MT3	0,010	0,001	1,202	0,993
A + MT4	0,010	0,001	0,704	0,996
A + MT5	0,010	0,001	0,719	0,996
A + MT6	0,010	0,001	0,943	0,994
A + MT7	0,010	0,001	0,618	0,998
A + MT8	0,010	0,001	0,686	0,998

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΛΙΓΝΙΤΗ	ΜΕΙΩΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (600 → 0 rpm)			
ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ: 3,00 % κ.ό.				
	ΧΑΜΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (25 °C)			
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΜΕΛΕΤΗΘΕΙ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ	ΤΑΣΗ ΔΙΟΛΙΣΘΗΣΗΣ τ_y (Pa)	ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (Κ) (Pa.s ⁿ)	ΟΔΗΓΟΣ ΡΟΪΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (n)	R ²
A	21,498	2,150	1,354	0,976
A + TH1	1,242	0,124	0,836	0,998
A + TH2	0,481	0,048	0,828	0,999
A + TH3	0,326	0,033	0,861	0,999
A + TH4	0,174	0,017	0,951	0,998
A + TH5	0,180	0,018	0,852	0,999
A + TH6	0,613	0,061	0,776	0,999
A + TH7	1,243	0,124	0,786	0,999
A + TH8	0,006	0,001	0,788	0,999
A + MT1	0,010	0,001	1,233	0,993
A + MT2	0,010	0,001	1,080	0,996
A + MT3	0,010	0,001	1,365	0,992
A + MT4	0,760	0,076	0,824	0,999
A + MT5	0,010	0,001	0,871	0,996
A + MT6	0,010	0,001	0,952	0,997
A + MT7	0,812	0,081	0,746	0,999
A + MT8	0,445	0,045	0,721	0,999

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΛΙΓΝΙΤΗ	ΑΥΞΗΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (0 → 600 rpm)			
ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ: 3,00 % κ.ό.				
	ΥΨΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (65 °C)			
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΜΕΛΕΤΗΘΕΙ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ	ΤΑΣΗ ΔΙΟΛΙΣΘΗΣΗΣ τ_y (Pa)	ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (K) (Pa.s ⁿ)	ΟΔΗΓΟΣ ΡΟΪΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (n)	R ²
A	17,434	0,001	0,076	0,838
A + TH1	1,437	0,144	1,285	0,987
A + TH2	0,781	0,078	1,102	0,985
A + TH3	0,010	0,001	0,597	0,995
A + TH4	0,010	0,001	0,686	0,992
A + TH5	0,328	0,033	0,633	0,997
A + TH6	0,010	0,001	0,452	0,992
A + TH7	0,900	0,090	0,690	0,998
A + TH8	0,968	0,097	0,619	0,998
A + MT1	0,010	0,001	0,562	0,995
A + MT2	0,058	0,006	0,598	0,997
A + MT3	0,010	0,001	0,596	0,998
A + MT4	0,199	0,020	0,597	0,997
A + MT5	1,027	0,103	0,658	0,995
A + MT6	0,010	0,001	0,657	0,996
A + MT7	0,792	0,079	0,800	0,988
A + MT8	1,699	0,170	0,952	0,989

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΛΙΓΝΙΤΗ	ΜΕΙΩΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (600 → 0 rpm)			
ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ: 3,00 % κ.ό.				
	ΥΨΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (65 °C)			
ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΜΕΛΕΤΗΘΕΙ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ	ΤΑΣΗ ΔΙΟΛΙΣΘΗΣΗΣ τ_y (Pa)	ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (K) (Pa.s ⁿ)	ΟΔΗΓΟΣ ΡΟΪΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (n)	R ²
A	28,400	$m_p = 0,004$	1,000	0,991
A + TH1	2,737	0,274	0,564	0,995
A + TH2	1,573	0,157	0,532	0,997
A + TH3	1,051	0,105	0,573	0,996
A + TH4	0,364	0,036	0,561	0,998
A + TH5	1,351	0,135	0,517	0,997
A + TH6	1,907	0,191	0,518	0,993
A + TH7	2,110	0,211	0,590	0,997
A + TH8	2,186	0,219	0,568	0,996
A + MT1	1,314	0,131	0,542	0,999
A + MT2	0,902	0,090	0,706	0,997
A + MT3	0,863	0,086	0,709	0,996
A + MT4	1,530	0,153	0,493	0,994
A + MT5	1,485	0,149	0,407	0,997
A + MT6	0,686	0,069	0,449	0,998
A + MT7	2,776	0,278	0,563	0,996
A + MT8	2,505	0,250	0,575	0,996

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΛΙΓΝΙΤΗ	ΑΥΞΗΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (0 → 600 rpm)			
ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ: 3,00 % κ.ό.				
	ΧΑΜΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (25 °C)			
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΜΕΛΕΤΗΘΕΙ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ & ΓΗΡΑΝΣΗ	ΤΑΣΗ ΔΙΟΛΙΣΘΗΣΗΣ τ_y (Pa)	ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (K) (Pa.s ⁿ)	ΟΔΗΓΟΣ ΡΟΪΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (n)	R ²
A (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	8,439	0,844	0,255	0,994
A (ΓΗΡΑΝΣΗ)	13,974	1,397	0,285	0,994
A + TH3 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	0,010	0,001	0,856	0,999
A + TH3 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	0,069	0,007	0,340	0,966
A + TH4 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	0,010	0,001	1,036	0,996
A + TH4 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	0,010	0,001	0,716	0,994
A + TH7 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	0,487	0,049	0,611	0,998
A + TH7 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	0,010	0,001	0,633	0,997
A + MT2 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	0,150	0,015	0,984	0,997
A + MT2 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	0,676	0,068	0,700	0,997
A + MT4 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	0,010	0,001	0,704	0,996
A + MT4 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	6,394	0,639	0,500	0,997
A + MT7 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	0,010	0,001	0,618	0,998
A + MT7 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	2,409	0,241	0,701	0,998

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΛΙΓΝΙΤΗ	ΜΕΙΩΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (600 → 0 rpm)			
ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ: 3,00 % κ.ό.				
	ΧΑΜΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (25 °C)			
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΜΕΛΕΤΗΘΕΙ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ & ΓΗΡΑΝΣΗ	ΤΑΣΗ ΔΙΟΛΙΣΘΗΣΗΣ τ_y (Pa)	ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (K) (Pa.s ⁿ)	ΟΔΗΓΟΣ ΡΟΪΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (n)	R ²
A (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	21,498	2,150	1,354	0,976
A (ΓΗΡΑΝΣΗ)	36,219	3,622	0,509	0,984
A + TH3 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	0,326	0,033	0,861	0,999
A + TH3 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	0,010	0,001	0,309	0,995
A + TH4 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	0,174	0,017	0,951	0,998
A + TH4 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	0,270	0,027	0,880	0,999
A + TH7 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	1,243	0,124	0,786	0,999
A + TH7 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	0,010	0,001	0,859	0,999
A + MT2 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	0,010	0,001	1,080	0,996
A + MT2 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	1,259	0,126	1,145	0,998
A + MT4 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	0,760	0,076	0,824	0,999
A + MT4 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	7,866	0,787	0,710	0,998
A + MT7 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	0,812	0,081	0,746	0,999
A + MT7 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	2,127	0,213	0,779	0,999

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΛΙΓΝΙΤΗ	ΑΥΞΗΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (0 → 600 rpm)			
ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ: 3,00 % κ.ό.				
	ΥΨΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (65 °C)			
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΜΕΛΕΤΗΘΕΙ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ & ΓΗΡΑΝΣΗ	ΤΑΣΗ ΔΙΟΛΙΣΘΗΣΗΣ τ_y (Pa)	ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (K) (Pa.s ⁿ)	ΟΔΗΓΟΣ ΡΟΪΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (n)	R ²
A (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	0,000	17,434	0,076	0,838
A (ΓΗΡΑΝΣΗ)	8,281	0,828	0,213	0,993
A + TH3 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	0,010	0,001	0,597	0,995
A + TH3 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	0,954	0,095	0,668	0,994
A + TH4 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	0,010	0,001	0,686	0,992
A + TH4 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	0,138	0,014	0,680	0,997
A + TH7 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	0,900	0,090	0,690	0,998
A + TH7 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	0,010	0,001	0,650	0,994
A + MT2 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	0,058	0,006	0,598	0,997
A + MT2 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	0,380	0,038	0,619	0,999
A + MT4 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	0,199	0,020	0,597	0,997
A + MT4 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	3,494	0,349	0,710	0,970
A + MT7 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	0,792	0,079	0,800	0,988
A + MT7 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	1,205	0,120	0,701	0,998

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΛΙΓΝΙΤΗ	ΜΕΙΩΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (600 → 0 rpm)			
ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ: 3,00 % κ.ό.				
	ΥΨΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (65 °C)			
ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΕΧΟΥΝ ΜΕΛΕΤΗΘΕΙ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ & ΓΗΡΑΝΣΗ	ΤΑΣΗ ΔΙΟΛΙΣΘΗΣΗΣ τ_y (Pa)	ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (K) (Pa.s ⁿ)	ΟΔΗΓΟΣ ΡΟΪΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (n)	R ²
A (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	0,010	0,001	0,015	0,575
A (ΓΗΡΑΝΣΗ)	45,197	4,520	1,839	0,884
A + TH3 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	1,051	0,105	0,573	0,996
A + TH3 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	0,721	0,072	0,413	0,997
A + TH4 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	0,364	0,036	0,561	0,998
A + TH4 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	1,062	0,106	0,727	0,994
A + TH7 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	2,110	0,211	0,590	0,997
A + TH7 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	0,977	0,098	0,695	0,998
A + MT2 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	0,902	0,090	0,706	0,997
A + MT2 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	1,375	0,138	0,886	0,997
A + MT4 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	1,530	0,153	0,493	0,994
A + MT4 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	1,938	0,194	0,766	0,997
A + MT7 3% (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ)	2,776	0,278	0,563	0,996
A + MT7 3% (ΓΗΡΑΝΣΗ)	1,063	0,106	0,779	0,999