



*Πολυτεχνείο
Κρήτης*

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΧΡΗΣΗ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΛΙΓΝΙΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΩΝ
ΡΕΟΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΠΟΛΦΩΝ
ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ»**

ΧΑΤΖΗΣΤΑΜΟΥ ΒΑΣΙΛΙΚΗ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΧΡΗΣΤΙΔΗΣ Γ. ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΚΕΛΕΣΙΔΗΣ Β. ΕΠΙΚ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ Θ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΧΑΝΙΑ

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2005

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας έγινε με τη βοήθεια και τη συμπαράσταση ορισμένων ανθρώπων, τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω.

Συγκεκριμένα, ευχαριστώ τον επιβλέποντα επίκουρο καθηγητή κ. Χρηστίδη Γεώργιο για την πολύτιμη βοήθεια, τις συμβουλές και την υπομονή του κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή κ. Βασίλειο Κελεσίδη και τον καθηγητή κ. Θεόδωρο Μαρκόπουλο που συμμετέχουν την εξεταστική επιτροπή για τις εύστοχες παρατηρήσεις τους στο κείμενο και την αποδοχή τους στην αξιολόγηση της εργασίας.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα την Παγώνα Μακρή υπ. Διδάκτορα για την πολύτιμη βοήθειά της καθ' όλη τη διάρκεια της αυτής της προσπάθειας.

Τέλος ευχαριστώ την κ. Τσαμαντάκη Χριστίνα, τον κ. Μπανδέλη Γρηγόρη και τον κ. Φώσκολο Α. που ήταν πρόθυμοι να με βοηθήσουν στην κατανόηση από πλευράς μου, πολλών εννοιών, λύνοντας με διάθεση κάθε μου απορία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Ανόργανης και Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας και στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Ρευστομηχανικής του τμήματος Μηχανικών Ορυκτών Πόρων. Επιβλέπων της εργασίας ήταν ο αναπληρωτής καθηγητής Χρηστίδης Γεώργιος.

Σκοπός της εργασίας, ήταν η διερεύνηση της χρήσης του ελληνικού λιγνίτη ως πρόσθετου σε ρευστά γεωτρήσεων. Για το λόγο αυτό, έγιναν πειράματα ρεολογίας σε πολφούς μπεντονίτη με λιγνίτη, δύο συγκεντρώσεων, 0,5% και 3,0% κ.ό. λιγνίτη στον πολφό. Κατά την διάρκεια των πειραμάτων προσδιορίστηκαν οι ρεολογικές παράμετροι και μελετήθηκε η θιξοτροπική συμπεριφορά των πολφών. Το ιξωδόμετρο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Grace M3500 του εργαστηρίου εφαρμοσμένης ρευστομηχανικής. Τα πειράματα έγιναν σε δείγματα που ωρίμασαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος αλλά και σε δείγματα που ωρίμασαν με στατική γήρανση σε υψηλή θερμοκρασία.

Τέλος μετρήθηκε η ιοντοεναλλακτική ικανότητα των δειγμάτων λιγνίτη που χρησιμοποιήθηκαν για την σύνθεση των πολφών. Για την μέτρηση της ιοντοεναλλακτικής ικανότητας χρησιμοποιήθηκε η συσκευή kjeldahl του εργαστηρίου Ανόργανης και Οργανικής Γεωχημείας και Οργανικής Πετρογραφίας

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|----------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 -ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΕΣ | 1 |
| 1.1.ΓΕΝΙΚΑ..... | 1 |
| 1.2.ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ..... | 2 |
| 1.3.ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΩΝ..... | 5 |
| 1.4.ΓΕΝΕΣΗ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΩΝ..... | 7 |
| 1.4.1 Επί τόπου εξαλλοίωση ηφαιστειακής τέφρας ή τόφφων..... | 7 |
| 1.4.2 Υδροθερμική εξαλλοίωση πυριγενών πετρωμάτων..... | 9 |
| 1.4.3 Δευτερική εξαλλοίωση πυριγενούς υλικού..... | 10 |
| 1.4.4 Ποικίλοι μηχανισμοί γένεσης..... | 11 |
| 1.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ..... | 12 |
| 1.5.1 Ελλάδα..... | 12 |
| 1.5.2 Η.Π.Α..... | 14 |
| 1.5.3 Black Hills..... | 14 |
| 1.5.4 Αγγλία..... | 16 |
| 1.6. ΧΡΗΣΕΙΣ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ..... | 18 |
| 1.6.1. Πόλφοι γεωτρήσεων..... | 19 |
| 1.6.2. Βιομηχανία χαρτιού..... | 19 |
| 1.6.3. Άμμοι υγιεινής..... | 20 |
| 1.6.4.Παραγωγή σιδήρου. | 20 |
| 1.6.5. Βιομηχανία χρωμάτων..... | 21 |
| 1.6.6.Φαρμακευτικά είδη, καλλυντικά και ιατρικές εφαρμογές..... | 21 |
| 1.6.7Έργα πολιτικού μηχανικού..... | 22 |
| 1.6.8 Χυτήρια..... | 23 |
| 1.7 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΩΝ | 23 |
| 1.7.1 Ιοντοεναλλακτική ικανότητα. | 23 |
| 1.7.2.Ικανότητα διόγκωσης..... | 24 |
| 1.7.3 Ρεολογικές ιδιότητες..... | 25 |
| 1.7.4. Μέγεθος κρυστάλλων- ειδική επιφάνεια | 26 |

| | |
|---|-----------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 –ΛΙΓΝΙΤΕΣ | 27 |
| 2.1.ΓΕΝΙΚΑ..... | 27 |
| 2.2 ΓΕΝΕΣΗ..... | 28 |
| 2.3 ΤΥΠΟΙ ΛΙΓΝΙΤΗ | 29 |
| 2.4. ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ | 31 |
| 2.5. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΙΓΝΙΤΩΝ..... | 32 |
| 2.5.1. Μακροσκοπικά χαρακτηριστικά..... | 33 |
| 2.5.2. Μικροσκοπικά χαρακτηριστικά..... | 35 |
| 2.6. ΑΠΟΘΕΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ..... | 38 |

| | |
|---|-----------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 –ΠΟΛΦΟΙ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ | 39 |
| 3.1.ΓΕΝΙΚΑ..... | 39 |
| 3.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ..... | 41 |
| 3.3.ΒΑΣΙΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΩΝ ΠΟΛΦΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ..... | 45 |
| 3.3.1Απομάκρυνση των θραυσμάτων..... | 46 |
| 3.3.2.Ψύξη και λίπανση..... | 47 |
| 3.3.3. Στεγανοποίηση των τοιχωμάτων του πηγαδιού..... | 47 |
| 3.3.4.Έλεγχος υποεπιφανειακών τάσεων..... | 48 |
| 3.3.5.Αιωρούμενα στερεά και άμμος και απελευθέρωσή τους στην επιφάνεια..... | 49 |
| 3.3.6.Έλεγχος του ρυθμού διάτρησης..... | 49 |
| 3.3.7.Υποστήριξη του βάρους της διατρητικής στήλης..... | 50 |
| 3.3.8 Προστασία των σχηματισμών..... | 50 |
| 3.3.9. Μέγιστη δυνατή διασφάλιση των πληροφοριών του πηγαδιού..... | 51 |
| 3.3.10. Μεγιστοποίηση των ρυθμών διάτρησης..... | 51 |
| 3.4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΠΟΛΦΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ..... | 53 |
| 3.4.1. Η απουσία άμμου και αποξεστικών σωματιδίων..... | 53 |
| 3.4.2. Το επαρκές περιεχόμενο κολλοειδούς..... | 53 |
| 3.4.3. Πυκνότητα..... | 57 |
| 3.4.4 Το pH του διατρητικού πολφού..... | 58 |
| 3.4.5. Το άλας και άλλοι σχετικοί ηλεκτρολύτες..... | 58 |

| | |
|---------------------------------------|-----------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΡΕΟΛΟΓΙΑ | 59 |
| 4.1 ΓΕΝΙΚΑ..... | 59 |
| 4.2 ΡΕΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ..... | 60 |
| 4.2.1.Νευτώνεια ρευστά..... | 60 |
| 4.2.2.Μη Νευτώνειο ρευστά..... | 61 |
| 4.2.2.1.Μοντέλο Bingham Plastic..... | 61 |
| 4.2.2.2.Μοντέλο Power law..... | 62 |
| 4.2.2.3 Μοντέλο Herchel- Bulkley..... | 63 |
| 4.3 ΙΞΩΔΕΣ..... | 64 |

| | |
|--|----|
| 4.4 ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟ ΙΞΩΔΕΣ..... | 64 |
| 4.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟ ΙΞΩΔΕΣ..... | 65 |
| 4.5.1 Θερμοκρασία..... | 65 |
| 4.5.2 Πίεση..... | 66 |
| 4.6.ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ- ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΑ ΡΕΥΣΤΑ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ | 67 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5- ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ 68

| | |
|--|----|
| 5.1. ΓΕΝΙΚΑ..... | 68 |
| 5.2 ΙΟΝΤΟΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ..... | 70 |
| 5.2.1 Μέτρηση ιοντοεναλλακτικής ικανότητας..... | 70 |
| 5.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΡΕΟΛΟΓΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ..... | 73 |
| 5.2.1. Ομοαξονικά ιξωδόμετρα απευθείας ένδειξης (direct - indicating viscometers)..... | 71 |
| 5.2.2 Προετοιμασία των δειγμάτων..... | 79 |
| 5.2.2.1 Ενυδάτωση..... | 79 |
| 5.2.2.2 Γήρανση..... | 80 |
| 5.2.3 Μέτρηση ιξώδους..... | 83 |
| 5.2.4 Μέτρηση θιξοτροπίας | 84 |
| 5.2.5 Μέτρηση ισχύος του πηκτώματος (gel strength)..... | 84 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΡΕΟΛΟΓΙΑΣ 85

| | |
|---|-----|
| 6.1 ΠΟΛΦΟΣ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΛΙΓΝΙΤΗΣ ΣΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ 0,5%... | 85 |
| 6.2 ΠΟΛΦΟΣ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΛΙΓΝΙΤΗΣ ΣΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ 3%..... | 96 |
| 6.3.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΡΕΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ..... | 107 |
| 6.4 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΡΕΟΛΟΓΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΤΑ ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΡΗΤΗΣ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ | 113 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΙΞΟΤΡΟΠΙΑΣ 116

| | |
|--|-----|
| 7.1 ΠΟΛΦΟΣ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΛΙΓΝΙΤΗΣ ΣΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ 0,5%... | 116 |
| 7.2 ΠΟΛΦΟΣ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΛΙΓΝΙΤΗΣ ΣΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ 3%..... | 127 |
| 7.3 ΔΕΙΚΤΗΣ ΘΙΞΟΤΡΟΠΙΑΣ..... | 138 |

| | |
|--|-----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ | 140 |
| ΙΟΝΤΟΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ | |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 141 |
| 9.1. ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 141 |
| 9.2. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ | 143 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 144 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΟΛΦΟΥ ΒΑΣΗΣ | 145 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β ΡΕΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΛΦΩΝ | 146 |
| ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ | |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

| | |
|--|----|
| Σχήμα 1.1. Δομή των σμεκτιτών των αργιλικών ορυκτών..... | 3 |
| Σχήμα 1.2. Κοιτάσματα μπεντονιτών στη Μήλο..... | 13 |
| Σχήμα 1.3. Περιοχή Μαύρων Λόφων (Black Hills)..... | 15 |
| Σχήμα 1.4. Τομή κοιτάσματος μπεντονίτη..... | 15 |
| Σχήμα 1.5. Τομή κοιτάσματος μπεντονίτη «Clay Spur»..... | 17 |
| Σχήμα 1.6. Δημιουργία κολλοειδών αιωρημάτων νατριούχων σμεκτιτών..... | 25 |
| Σχήμα 2.1. Διαδικασία ενανθράκωσης..... | 27 |
| Σχήμα 2.2. Δομή λιγνίτη..... | 32 |
| Σχήμα 2.3. Λιγνιτοφόρες λεκάνες της Ελλάδας..... | 38 |
| Σχήμα 2.4. Σχηματική αναπαράσταση των απολήψιμων αποθεμάτων... | 39 |
| Σχήμα 3.1. Σχηματική αναπαράσταση κίνησης διατρητικού ρευστού..... | 44 |
| Σχήμα 4.1. Απεικόνιση γραμμικής και τυρβώδους ροής..... | 59 |
| Σχήμα 4.2. Καμπύλες ρεολογικών μοντέλων..... | 63 |
| Σχήμα 4.3. Αναπαράσταση σχέσης ιξώδους-θερμοκρασίας..... | 65 |
| Σχήμα 4.4. Εξάρτηση πίεσης- θερμοκρασίας..... | 66 |
| Σχήμα 5.1. Συσκευή Kjeldahl..... | 71 |
| Σχήμα 5.2. Σχηματική παράσταση ομοαξονικού ιξωδομέτρου (a) πλάγια τομή, (b) κάτοψη..... | 73 |
| Σχήμα 5.3. Ιξωδόμετρο Grace Instrument M3500a..... | 74 |
| Σχήμα 5.4. Τυπική επιφάνεια εργασίας λογισμικού..... | 76 |
| Σχήμα 5.5. Τυπικό διάγραμμα κατά την πραγματοποίηση πειράματος σε πραγματικό χρόνο..... | 77 |

| | |
|--|----|
| Σχήμα 5.6. Τυπικό διαγράμματα Διατμητικής τάσης – Ρυθμού διάτμησης..... | 77 |
| Σχήμα 5.7. Τυπικό διαγράμματα Διατμητικής τάσης– Χρόνου διάτμησης | 78 |
| Σχήμα 5.8. Τυπικό διάγραμμα Ιξώδους – Θερμοκρασίας..... | 78 |
| Σχήμα 5.9. Hamilton Beach μίξερ | 79 |
| Σχήμα 5.10. Κελί γήρανσης..... | 80 |
| Σχήμα 5.11. Συναρμολόγηση κελιού γήρανσης..... | 81 |
| Σχήμα 5.12. Συνδεσμολογία κελιού και ρυθμιστή πίεσης..... | 82 |
| Σχήμα 6.1. Α: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΚΠ1, ενυδάτωση. Β: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΚΠ1, γήρανση. Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ1, ενυδάτωση/γήρανση..... | 85 |
| Σχήμα 6.2. Α: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΚΠ2, ενυδάτωση. Β: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΚΠ2, γήρανση. Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ2, ενυδάτωση/γήρανση..... | 86 |
| Σχήμα 6.3. Α: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΚΠ3, ενυδάτωση. Β: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΚΠ3, γήρανση. Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ3, ενυδάτωση/γήρανση..... | 87 |
| Σχήμα 6.4.Α: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΚΠ4, ενυδάτωση. Β: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΚΠ4, γήρανση. Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ4, ενυδάτωση/γήρανση..... | 88 |
| Σχήμα 6.5. Α: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΚΠ5, ενυδάτωση. Β: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΚΠ5, γήρανση. Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ5, ενυδάτωση/γήρανση..... | 89 |
| Σχήμα 6.6. Α: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% Ι1, ενυδάτωση. Β: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% Ι1, γήρανση. Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 0,5% Ι1, ενυδάτωση/γήρανση..... | 90 |
| Σχήμα 6.7. Α: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% Ι2, ενυδάτωση. Β: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% Ι2, γήρανση. Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 0,5% Ι2, ενυδάτωση/γήρανση..... | 90 |
| Σχήμα 6.8. Α: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΠΠ1, ενυδάτωση. Β: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΠΠ1, γήρανση. Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 0,5% ΠΠ1, ενυδάτωση/γήρανση..... | 92 |
| Σχήμα 6.9. Α: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΠΠ2, ενυδάτωση. Β: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% | |

[illegible]

| | |
|--|-----|
| γήρανση. Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 3% ΠΠ2, ενυδάτωση/γήρανση..... | |
| Σχήμα 6.21.A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% ΠΜ1, ενυδάτωση. B: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% ΠΜ1, γήρανση. Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 3% ΠΜ1, ενυδάτωση/γήρανση..... | 105 |
| Σχήμα 6.22. A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% Γ, ενυδάτωση. B: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% Γ, γήρανση. Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 3%Γ, ενυδάτωση/γήρανση..... | 106 |
| Σχήμα 6.23. Πλαστικό ιξώδες των πολφών με περιεκτικότητα λιγνίτη 0,5% που έχουν υποστεί ωρίμανση με ενυδάτωση και θερμική γήρανση.. | 108 |
| Σχήμα 6.24. Τάση διολίσθησης των πολφών με περιεκτικότητα λιγνίτη 0,5% που έχουν υποστεί ωρίμανση με ενυδάτωση και θερμική γήρανση. | 108 |
| Σχήμα 6.25. Σύγκριση ισχύος γέλης μετά από 10 sec για πολφούς με περιεκτικότητα λιγνίτη 0,5% που έχουν ωριμάσει με ενυδάτωση και θερμική γήρανση..... | 109 |
| Σχήμα 6.26. Σύγκριση ισχύος γέλης μετά από 10 min για πολφούς με περιεκτικότητα λιγνίτη 0,5% που έχουν ωριμάσει με ενυδάτωση και θερμική γήρανση..... | 109 |
| Σχήμα 6.27. Πλαστικό ιξώδες των πολφών με 3% συγκέντρωση λιγνίτη που έχουν υποστεί ωρίμανση με ενυδάτωση και θερμική γήρανση..... | 111 |
| Σχήμα 6.28. Τάση διολίσθησης των πολφών με 3% συγκέντρωση λιγνίτη που έχουν υποστεί ωρίμανση με ενυδάτωση και θερμική γήρανση..... | 111 |
| Σχήμα 6.29. Σύγκριση ισχύος γέλης μετά από 10 sec για πολφούς με περιεκτικότητα λιγνίτη 3% που έχουν ωριμάσει με ενυδάτωση και θερμική γήρανση..... | 113 |
| Σχήμα 6.30. Σύγκριση ισχύος γέλης μετά από 10 min για πολφούς με περιεκτικότητα λιγνίτη 3% που έχουν ωριμάσει με ενυδάτωση και θερμική γήρανση..... | 113 |
| Σχήμα 6.31. Εκατοστιαίο ποσοστό μεταβολής της τάσης διολίσθησης (ΥΡ) των πολφών των δειγμάτων Κρήτης-Πελοποννήσου-Ιωαννίνων: A: πολφοί που έχουν ωριμάσει με ενυδάτωση B: πολφοί που έχουν ωριμάσει με θερμική γήρανση..... | 114 |
| Σχήμα 7.1. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ1,ενυδάτωση..... | 116 |
| Σχήμα 7.2. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ2, ενυδάτωση..... | 116 |
| Σχήμα 7.3. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ3, ενυδάτωση..... | 117 |
| Σχήμα 7.4. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ4, ενυδάτωση..... | 117 |
| Σχήμα 7.5. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ5, ενυδάτωση..... | 118 |
| Σχήμα 7.6. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% Ι1, ενυδάτωση..... | 118 |
| Σχήμα 7.7. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% Ι2, ενυδάτωση..... | 119 |
| Σχήμα 7.8. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΠΠ1, ενυδάτωση..... | 119 |
| Σχήμα 7.9. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΠΠ2, | 120 |

ενυδάτωση.....

| | |
|--|-----|
| Σχήμα 7.10. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΠΜ1, ενυδάτωση..... | 120 |
| Σχήμα 7.11. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% Γ, ενυδάτωση..... | 121 |
| Σχήμα 7.12. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ1, γήρανση..... | 121 |
| Σχήμα 7.13. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ2, γήρανση..... | 122 |
| Σχήμα 7.14. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ3, γήρανση..... | 122 |
| Σχήμα 7.15. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ4, γήρανση..... | 123 |
| Σχήμα 7.16. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ5, γήρανση..... | 123 |
| Σχήμα 7.17. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% Ι1, γήρανση..... | 124 |
| Σχήμα 7.18. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% Ι2, γήρανση..... | 124 |
| Σχήμα 7.19. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΠΠ1, γήρανση..... | 125 |
| Σχήμα 7.20. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΠΠ2, γήρανση..... | 125 |
| Σχήμα 7.21. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΠΜ1, γήρανση..... | 126 |
| Σχήμα 7.22. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% Γ, γήρανση..... | 126 |
| Σχήμα 7.23. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΚΠ1, ενυδάτωση..... | 127 |
| Σχήμα 7.24. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΚΠ2, ενυδάτωση..... | 127 |
| Σχήμα 7.25. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΚΠ3, ενυδάτωση..... | 128 |
| Σχήμα 7.26. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΚΠ4, ενυδάτωση..... | 128 |
| Σχήμα 7.27. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΚΠ5, ενυδάτωση..... | 129 |
| Σχήμα 7.28. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% Ι1, ενυδάτωση..... | 129 |
| Σχήμα 7.29. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% Ι2, ενυδάτωση..... | 130 |
| Σχήμα 7.30. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΠΠ1, ενυδάτωση..... | 130 |
| Σχήμα 7.31. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΠΠ2, ενυδάτωση..... | 131 |
| Σχήμα 7.32. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΠΜ1, ενυδάτωση..... | 131 |
| Σχήμα 7.33. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% Γ, ενυδάτωση..... | 132 |
| Σχήμα 7.34. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΚΠ1, γήρανση..... | 132 |
| Σχήμα 7.35. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΚΠ2, γήρανση..... | 133 |
| Σχήμα 7.36. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΚΠ3, γήρανση..... | 133 |

| | |
|--|-----|
| Σχήμα 7.37. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΚΠ4, γήρανση..... | 134 |
| Σχήμα 7.38. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΚΠ5, γήρανση..... | 134 |
| Σχήμα 7.39. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% Ι1, γήρανση..... | 135 |
| Σχήμα 7.40. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% Ι2, γήρανση..... | 135 |
| Σχήμα 7.41. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΠΠ1, γήρανση..... | 136 |
| Σχήμα 7.42. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΠΠ2, γήρανση..... | 136 |
| Σχήμα 7.43. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΠΜ1, γήρανση..... | 137 |
| Σχήμα 7.44. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% Γ, γήρανση..... | 137 |
| Σχήμα 7.45. Σύγκριση δείκτη θιξοτροπίας σε πολφούς με προσθήκη 0,5 % για ωρίμανση με ενυδάτωση και θερμική γήρανση..... | 138 |
| Σχήμα 7.46. Σύγκριση δείκτη θιξοτροπίας σε πολφούς με προσθήκη 3 % για ωρίμανση με ενυδάτωση και θερμική γήρανση..... | 138 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|---|-----|
| Πίνακας 1.1. Διοκταεδρικοί και τριοκταεδρικοί σμεκτίτες..... | 4 |
| Πίνακας 1.2. Χρήσεις μπεντονιτών..... | 18 |
| Πίνακας 2.1. Ταξινόμηση Οργανικών Δομικών Πετρογραφικών Συστατικών (ΟΔΠΣ-macelars) σε ομάδες και υποομάδες σύμφωνα με τη Διεθνή επιτροπή Γαιάνθρακα και Οργανικής Πετρολογίας | 37 |
| Πίνακας 5.1. Δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα..... | 69 |
| Πίνακας 5.2. Χαρακτηριστικά ιξωδομέτρου..... | 75 |
| Πίνακας 5.3. Εύρος μετρήσεων οργάνου..... | 76 |
| Πίνακας 6.1. Αποτελέσματα ρεολογικών ιδιοτήτων των πολφών με 0,5% λιγνίτη, σύμφωνα με τα πρότυπα API 13B..... | 107 |
| Πίνακας 6.2. Αποτελέσματα ρεολογικών ιδιοτήτων των πολφών με 3% λιγνίτη, σύμφωνα με τα πρότυπα API 13B..... | 110 |
| Πίνακας 6.3. Α: Ποσοστό μεταβολής (%) της τάσης διολίσθησης (ΥΡ) των δειγμάτων που έχουν υποστεί ωρίμανση με ενυδάτωση. Β: Ποσοστό μεταβολής (%) της τάσης διολίσθησης (ΥΡ) των δειγμάτων που έχουν υποστεί ωρίμανση με θερμική γήρανση στους 177° C..... | 113 |
| Πίνακας 6.4. Γ: Ποσοστό μεταβολής (%) του πλαστικού ιξώδους (ΡV) των δειγμάτων που έχουν υποστεί ωρίμανση με ενυδάτωση. Δ: Ποσοστό μεταβολής(%) του πλαστικού ιξώδους (ΡV) των δειγμάτων που έχουν υποστεί ωρίμανση με θερμική γήρανση στους 177° C..... | 115 |
| Πίνακας 7.1. Δείκτης θιξοτροπίας για πολφούς με προσθήκη 0,5% λιγνίτη..... | 138 |
| Πίνακας 7.2. Δείκτης θιξοτροπίας για πολφούς με προσθήκη 3% λιγνίτη..... | 139 |
| Πίνακας 8.1. Αποτελέσματα ιοντοεναλλακτικής ικανότητας..... | 140 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΕΣ

1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Ο όρος μπεντονίτης χρησιμοποιήθηκε αρχικά περίπου το 1890, για να περιγράψει μια άργιλο σε ηφαιστειακές τέφρες ηλικίας Ανώτερου Κρητιδικού στην περιοχή Fort Benton των Η.Π.Α. Το κύριο συστατικό του, που είναι καθοριστικός παράγοντας που επηρεάζει τις ιδιότητές του, είναι ο μοντμοριλλονίτης. Αυτός με την σειρά του, αντλεί το όνομά του από την περιοχή Montmorillon της νότιας Γαλλίας.

Ο μπεντονίτης είναι μία άργιλος που παράγεται συνήθως από την εξαλλοίωση της ηφαιστειακής τέφρας και αποτελείται κυρίως από ορυκτά της ομάδας του σμεκτίτη. Ανάλογα με το μηχανισμό της γένεσής τους οι μπεντονίτες περιέχουν ποικίλα σύνδρομα ορυκτά όπως χαλαζία, άστριο οπάλιο και γύψο. Η παρουσία των σύνδρομων αυτών ορυκτών μπορεί να επηρεάσει την βιομηχανική αξία του κοιτάσματος θετικά ή αρνητικά ανάλογα με την εφαρμογή.

Κύριο χαρακτηριστικό του μπεντονίτη, είναι οι κολλοειδείς ιδιότητες και η αύξηση του όγκου του όταν έρχεται σε επαφή με το νερό, με την ταυτόχρονη δημιουργία ενός ζελατινώδους ιξώδους ρευστού. Ιδιότητες όπως η διόγκωση, η θιξοτροπία και η προσρόφηση νερού, το καθιστούν πολύτιμο υλικό για ένα ευρύ φάσμα χρήσεων.

Η εκμετάλλευση των κοιτασμάτων μπεντονίτη, γίνεται με εξόρυξη ανοικτής εκσκαφής. Πριν από την εξόρυξη, η σκιαγράφιση του κοιτάσματος πραγματοποιείται με διάτρηση και δειγματοληψία. Το κάλυμμα του μπεντονίτη πρέπει να αφαιρεθεί προσεκτικά, ώστε να μην μολυνθεί το κοίτασμα από τα υπερκείμενα στρώματα. Επίσης μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί στο αποχωρισμό του από τα στεία για να ληφθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ποσότητα.

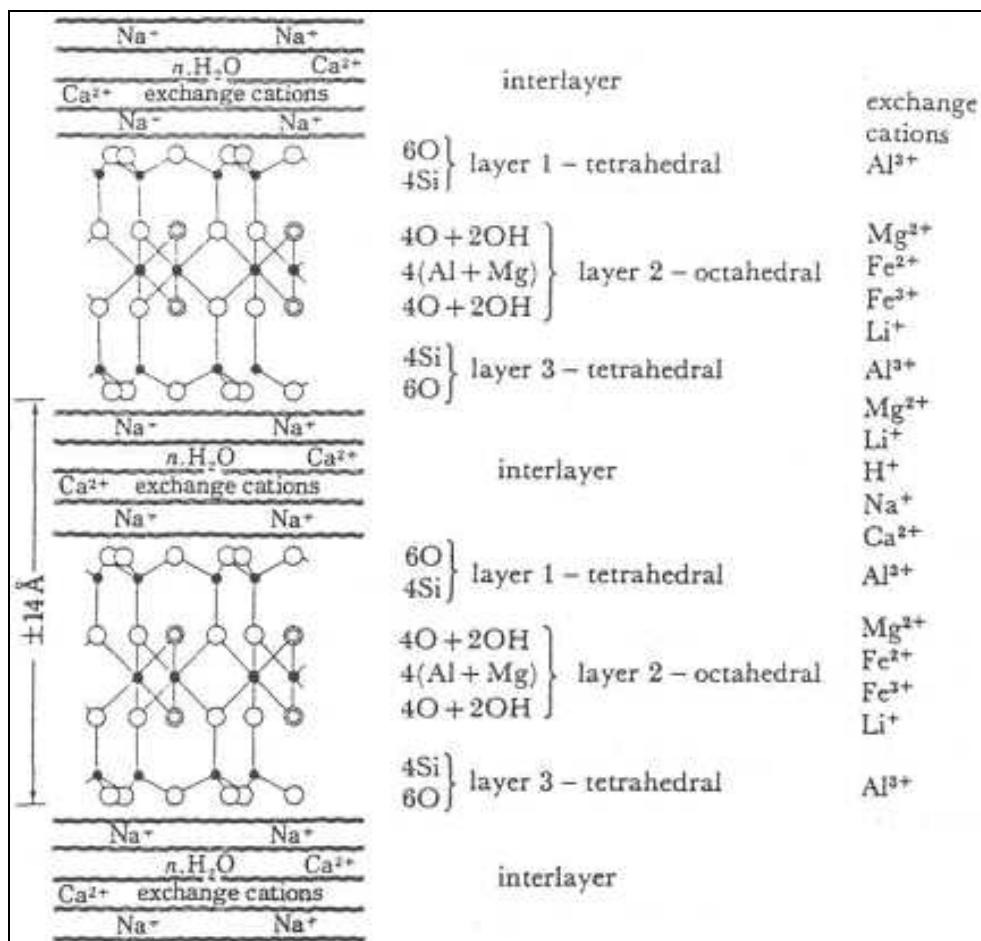
Ο εξορυγμένος μπεντονίτης έχει υγρασία που φτάνει περίπου το 30%. Μετά από την εξόρυξη το υλικό λειοτριβείται και ενεργοποιείται με την προσθήκη Na_2CO_3 . Στη συνέχεια ξηραίνεται, για να φτάσει η περιεκτικότητα σε υγρασία περίπου 15%. Ανάλογα με την τελική του εφαρμογή, ο μπεντονίτης είτε κοσκινίζεται είτε αλέθεται.

Για ειδικές εφαρμογές ο μπεντονίτης καθαρίζεται με την αφαίρεση των σύνδρομων ορυκτών ή προσβάλλεται με οξέα για να παραχθεί όξινος ενεργοποιημένος μπεντονίτης ή επεξεργάζεται με οργανικές ουσίες (αμίνες) για να παραχθούν οργανόφιλες άργιλοι.

1.2. ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ

Τα κύρια ορυκτολογικά συστατικά των μπεντονιτών είναι οι σμεκτίτες. Οι σμεκτίτες είναι αργιλικά ορυκτά που αποτελούνται από κρυσταλλίτες το μέγεθος των οποίων είναι μικρότερο από 2μm στη μεγαλύτερη διάσταση. Πρόκειται για φυλλοπυριτικά ορυκτά που αποτελούνται από μία οκταεδρική και δύο τετραεδρικές στοιβάδες, οι οποίες συγκρατούνται μεταξύ τους με ενδιάμεσα κατιόντα και μόρια νερού. Οι τετραεδρικές στοιβάδες αποτελούνται από ιόντα πυριτίου που καταλαμβάνουν το κέντρο των τετραέδρων, ενώ τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα οξυγόνου, καταλαμβάνουν τις κορυφές του. Οι οκταεδρικές στοιβάδες αποτελούνται από θετικά φορτισμένα ιόντα αργιλίου, αρνητικά ιόντα οξυγόνου και υδροξύλια.

Στο σχήμα 1.1 φαίνεται η δομή των σμεκτιτών όπου οι δομικές μονάδες συγκρατούνται μεταξύ τους με κατιόντα που είναι ικανά να εξισορροπήσουν το αρνητικό φορτίο που προκύπτει από τις αντικαταστάσεις του αργιλίου και του πυριτίου από άλλα κατιόντα.



Σχήμα 1.1. Δομή των σμεκτιτών των αργιλικών ορυκτών

Ανάλογα με το βαθμό πλήρωσης της οκταεδρικής στοιβάδας, οι σμεκτίτες διακρίνονται σε διοκταεδρικούς και τριοκταεδρικούς. Στον πίνακα 1.1 παρουσιάζονται οι κυριότεροι απ'αυτούς.

| Διοκταεδρικοί | Z | X | Ψ | |
|------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------|------------------------------------|
| (ανταλλάξιμα κατίοντα) | | | | |
| Μοντμοριλλονίτης | Si ₈ | Al _{3,3} Mg _{0,7} | AlMg | $\frac{1}{2} \text{Ca, Na)}_{0,7}$ |
| Βεϊδελλίτης | Si _{7,3} Al _{0,7} | Al ₄ | Al | $\frac{1}{2} \text{Ca, Na)}_{0,7}$ |
| Νοντρονίτης | Si _{7,3} Al _{0,7} | Fe ₄ ⁺³ | Fe | $\frac{1}{2} \text{Ca, Na)}_{0,7}$ |

| Τριοκταεδρικοί | Z | X | Ψ | |
|------------------------|------|------|------|------------------------------------|
| (ανταλλάξιμα κατίοντα) | | | | |
| Σαπωνίτης | SiAl | Mg | Mg | $\frac{1}{2} \text{Ca, Na)}_{0,7}$ |
| Εκτορίτης | Si | MgLi | MgLi | $\frac{1}{2} \text{Ca, Na)}_{0,7}$ |

Πίνακας 1.1. Διοκταεδρικοί και τριοκταεδρικοί σμεκτίτες

Οι μοντμοριλλονίτες είναι τα κύρια ορυκτά των μπεντονιτών. Ο χημικός τους τύπος είναι $M_{x+\frac{y}{n}}^{n+}(H_2O)_n \{ (Al, Mg)_2^{(6-x)+} (OH)_2 Si_{4y} Al_y O_{10} \}^{(x+y)-}$ (Κωστάκης, 2003) όπου M= ενδιάμεσο κατίον.

Τόσο στις οκταεδρικές όσο και στις τετραεδρικές στοιβάδες, είναι δυνατή η αντικατάσταση του Al⁺³ και του Si⁺⁴ αντίστοιχα. Το μεν Al⁺³ αντικαθίσταται από Mg⁺², Fe⁺² και Fe⁺³, ενώ το Si⁺⁴ των τετραεδρικών θέσεων με Al⁺³.

Όπως προαναφέρθηκε ανάμεσα στις στρώσεις των σμεκτιτών, υπάρχουν μόρια νερού. Ανάλογα με την ποσότητα των μορίων αυτών που βρίσκονται μεταξύ των πακέτων των τριών στρώσεων, η δομή του

μοντμοριλλονίτη διογκούται προς την κατεύθυνση του κρυσταλλογραφικού άξονα c. Έτσι συντελείται μια αύξηση της απόστασης μεταξύ των δύο πακέτων έως σχεδόν το διπλάσιο.

Κατά την ξήρανση, δηλαδή κατά την απομάκρυνση του νερού που βρίσκεται ανάμεσα στα δύο πακέτα, έχουμε συρρίκνωση στη διεύθυνση του άξονα c.

1.3. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΩΝ

Ο μοντμοριλλονίτης όπως προαναφέρθηκε, είναι το σημαντικότερο συστατικό των κοιτασμάτων μπεντονιτών. Οι μοντμοριλλονίτες αυτοί, διαφέρουν από θέση σε θέση του ίδιου κοιτάσματος όσον αφορά την χημική σύσταση, την κατανομή φορτίου το μέγεθος των φορτίων κ.ο.κ. Για τον λόγο αυτό, οι μπεντονίτες, χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες (Κωστάκης, 2003).

1. Ως προς την γένεσή τους υποδιαιρούνται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Μπεντονίτες που προέρχονται από επί τόπου εξαλλοίωση ηφαιστειακής τέφρας ή τόφφων
- Μπεντονίτες που προέρχονται από υδροθερμική εξαλλοίωση πυριγενών πετρωμάτων
- Μπεντονίτες που προέρχονται από δευτερική εξαλλοίωση πυριγενών πετρωμάτων
- Μπεντονίτες των οποίων οι τρόποι προέλευσης δεν έχουν διευκρινιστεί

2. Με βάση τον βαθμό διόγκωσης, οι μπεντονίτες μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες:

- Διογκούμενοι (τύπος Wyoming) ή νατριούχοι. Κύριο ανταλλάξιμο ιόν τους είναι το Na^+ . Οι μπεντονίτες αυτοί διογκώνονται κατά πολλαπλάσια του αρχικού ξηρού όγκου τους και σχηματίζουν ένα είδος πηκτώματος (gel) όταν υπάρχει περίσσεια νερού.
- Μη διογκούμενοι ή ασβεστούχοι. Κύριο ανταλλάξιμο ιόν τους είναι το Ca^+ . Οι μπεντονίτες αυτοί δεν διογκώνονται στο βαθμό των νατριούχων και σε περίσσεια νερού καθιζάνουν γρήγορα.

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).

1.4. ΓΕΝΕΣΗ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΩΝ

1.4.1. Επί τόπου εξαλλοίωση ηφαιστειακής τέφρας ή τόφφων

Αυτός ο τρόπος προέλευσης χαρακτηρίζεται από την παρουσία θραυσμάτων ηφαιστειακού γυαλιού και άλλων υπολειμματικών δομών της μητρικής τέφρας αλλά και από την παρουσία μη αργιλικών ορυκτών και κατά περιόδους από τις μεταβάσεις στα σχετικά στρώματα τέφρας.

Η διαδικασία της εξαλλοίωσης στηρίζεται στην εφυσάλωση της τέφρας, την ενυδάτωση και την κρυστάλλωση του σμεκτίτη γύρω από τους πυρήνες και συνοδεύεται από την απώλεια αλκαλίων. Η πυριτίωση ορισμένων υποκείμενων στρωμάτων του μπεντονίτη υποδηλώνει την μετανάστευση του πυριτίου προς τα κάτω. Τέλος σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχουν ενδείξεις ότι κατά την εξαλλοίωση γίνεται έκπλυση των συστατικών της τέφρας

Ενδείξεις της επί τόπου εξαλλοίωσης είναι η υψηλή συγκέντρωση αργιλικών ορυκτών, η απουσία κλαστικών ορυκτών και η ταυτόχρονη παρουσία μαγματογενών πετρογενετικών ορυκτών, η σύνδεση με τα παρακείμενα στρώματα και η μετάβαση σε ηφαιστειακή τέφρα ή τόφφο. Η εξαλλοίωση της ηφαιστειακής τέφρας ή τόφφων επί τόπου, είναι ο πιο κοινός τρόπος προέλευσης των μπεντονιτών.

Οι μπεντονίτες της Κρητιδικής περιόδου στην περιοχή του Wyoming και στην Μοντάνα των Η.Π.Α. είναι κλασσικά παραδείγματα αυτού του τρόπου προέλευσης. Στο Μισισιπή, το Τέξας, την Αριζόνα και την Καλιφόρνια οι μπεντονίτες έχουν σχηματιστεί με τον ίδιο τρόπο. Τέλος όμοια κοιτάσματα παρατηρούνται στην Αγγλία, Γερμανία, Ουγγαρία, Ιαπωνία, Σερβία, Αργεντινή και στην Ελλάδα.

Οι μπεντονίτες αυτοί παρόλο που έχουν τον ίδιο μηχανισμό γένεσης, παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές στον τύπο του σμεκτίτη από τον οποίο αποτελούνται, στην χημική σύσταση και στην αφθονία αυθιγενών μη αργιλικών ορυκτών (π.χ. ζεόλιθοι και χριστοβαλίτης), με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται διαφορές και στις φυσικές τους ιδιότητες. Επιπλέον σημαντική διαφορά μπορεί να παρουσιάζει το ποσοστό διόγκωσης αλλά και οι ρεολογικές ιδιότητες των μπεντονιτών.

Δεν έχει προταθεί ακριβής μηχανισμός για τον σχηματισμό των μπεντονιτών από ηφαιστειακή τέφρα και τόφφους. Το ευρύ φάσμα των σχετικών ιζηματογενών στρωμάτων υποδηλώνει ότι το περιβάλλον της εξαλλοίωσης μπορεί να ποικίλλει. Η εξαλλοίωση σε ρηχό θαλάσσιο περιβάλλον είναι η πιο κοινή, έτσι όπως εμφανίζεται στους σχηματισμούς στο Γουαϊόμινγκ, το Τέξας, τις Η.Π.Α. την Αγγλία, την Γερμανία και την Ελλάδα. Υπάρχει όμως περίπτωση να έχουν σχηματιστεί και σε γλυκό νερό. Τέτοιες περιπτώσεις παρουσιάζονται στον Καναδά, την Τσεχοσλοβακία τη Ρουμανία και την Νέα Ζηλανδία. Λιμνοθάλασσες και εκβολές ποταμών, αναφέρονται ως οι συχνότερες περιοχές σχηματισμού μπεντονιτών στην Αίγυπτο και το Πακιστάν. Οι εναλλαγές μπεντονίτη και άνθρακα στην Αυστραλία και τον Καναδά δείχνουν ότι η εξαλλοίωση της ηφαιστειακής τέφρας ή τόφφων μπορεί να πραγματοποιηθεί στο ίδιο περιβάλλον που σχηματίζονται οι γαιάνθρακες. Σε άλλες περιοχές όπως η Αργεντινή και ο Καναδάς οι μπεντονίτες βρίσκονται σε περιοχές που περιλαμβάνουν θαλάσσια και χερσαία ιζήματα.

Από τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι η φύση του περιβάλλοντος στο οποίο λαμβάνει χώρα η εξαλλοίωση, δεν είναι καθοριστικής σημασίας, αλλά η παρουσία νερού είναι απαραίτητη για την ενυδάτωση της ηφαιστειακής τέφρας ή τόφφων. (Grim and Guven, 1978)

Η σύσταση των πυριγενών πετρωμάτων προέλευσης κυμαίνεται από ρυολιθική ως βασαλτική. Ωστόσο τα περισσότερα κοιτάσματα έχουν σχηματιστεί από την εξαλλοίωση πετρωμάτων ρυολιθικής -δακτιτικής σύστασης, με επικρατούντες τους λατίτες (Slaughter and Early, 1965). Φαίνεται ότι η παρουσία μεγάλου ποσοστού πυριτίου (70%) δεν ευνοεί την εξαλλοίωση ενώ αντίθετα η παρουσία μαγνησίου σε ένα ποσοστό 5-10 % είναι σημαντική.

1.4.2 Υδροθερμική εξαλλοίωση πυριγενών πετρωμάτων

Η υδροθερμική εξαλλοίωση είναι ένας αρκετά συχνός τρόπος προέλευσης μπεντονιτών που διατηρούν τα χαρακτηριστικά των μητρικών πετρωμάτων και παρουσιάζουν ευρείες παραλλαγές. Χαρακτηριστικά κοιτάσματα βρίσκονται στην Αλγερία, την Ισπανία και την Ελλάδα. Ο σμεκτίτης είναι συνήθως το μοναδικό προϊόν εξαλλοίωσης . Σε μερικές περιπτώσεις, συναντώνται σε μικρές ποσότητες και άλλα αργιλικά ορυκτά, όπως ο αλλοϋσίτης στα κοιτάσματα της Αλγερίας και αλλοϋσίτης με αλλοφανή στους μπεντονίτες της Ιαπωνίας.

Σε ορισμένες περιπτώσεις η διαδικασία της εξαλλοίωσης είναι μια απλή χημική αντίδραση, όπου πυριτικά άλατα, λίθιο και φθόριο αντιδρούν με ανθρακικά άλατα και σχηματίζονται αργιλικά ορυκτά. Σε άλλες περιπτώσεις τα υδροθερμικά διαλύματα έχουν διαρρεύσει μέσω του μητρικού πετρώματος μετασχηματίζοντάς το με πολύπλοκες διαδικασίες, σε σμεκτίτη, διατηρώντας όμως τα χαρακτηριστικά του μητρικού πετρώματος. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα, την ενυδάτωση και τον εμπλουτισμό του πετρώματος με μαγνήσιο.

Το βάθος της εξαλλοίωσης, η απουσία κατακόρυφων μεταβολών και η έλλειψη οποιασδήποτε εδαφοτομής, είναι σημαντικά στοιχεία που αποδεικνύουν ότι οι επιφανειακές μεταβολές , δεν παίζουν σημαντικό ρόλο στον σχηματισμό των μπεντονιτών που προέρχονται από υδροθερμικές διαδικασίες.

1.4.3 Δευτερική εξαλλοίωση πυριγενούς υλικού

Ο όρος δευτερική εξαλλοίωση χρησιμοποιείται για να περιγράψει μεταβολές που πραγματοποιούνται σε πυριγενή πετρώματα, αμέσως μετά από την τοποθέτησή τους, εξαιτίας της αντίδρασης των αερίων και των ατμών που βρίσκονται στην μάζα του. Γενικά δεν υπάρχει ακριβής οριοθέτηση της δευτερικής εξαλλοίωσης και της υδροθερμικής εξαλλοίωσης ή της αφυέλωσης. Υπάρχουν όμως ορισμένοι μπεντονίτες για τους οποίους η δευτερική εξαλλοίωση φαίνεται να είναι ο μοναδικός τρόπος γένεσης.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα δευτερικής εξαλλοίωσης, συναντάται σε μια υαλώδη περλιτική ρυολιθική λάβα, σε μια ηφαιστειακή ακολουθία στην Νότια Αφρική, όπου η εξαλλοίωση του περλίτη σε σμεκτίτη, είναι εξαιρετικά πολύπλοκη. Σε μερικές περιοχές, η εξαλλοίωση είναι πλήρης και έχουν δημιουργηθεί τεράστιες μάζες μπεντονίτη με πάχος πολλών μέτρων. Σε άλλες περιοχές, ο σμεκτίτης είναι διεσπαρμένος στο γυαλί ή ο περλίτης είναι υγιής. Το γεγονός ότι δεν έχει παρατηρηθεί σχέση μεταξύ των ρωγμών και την διείσδυση υδροθερμικών ρευστών από μια εξωτερική πηγή, επιβεβαιώνει το γεγονός ότι η δευτερική εξαλλοίωση είναι αποτέλεσμα των αερίων και των ατμών που προϋπήρχαν στο πέτρωμα. Η εξαλλοίωση είναι εντονότερη στα σημεία όπου η συγκέντρωση των αερίων είναι μεγαλύτερη.

1.4.4 Ποικίλοι μηχανισμοί γένεσης

Η απουσία ηφαιστειακής δραστηριότητας ή πυριγενούς υλικού και η απουσία δομών που σχετίζονται με την ύπαρξη τέφρας, τόφφων ή άλλων υλικών πυριγενούς προέλευσης αποδεικνύει ότι υπάρχει προέλευση μπεντονιτών που είναι ανεξάρτητη από τους προαναφερθέντες τρόπους γένεσης. Ωστόσο τέτοιοι τρόποι γένεσης δεν έχουν μεγάλη βάση. Για παράδειγμα ένας τρόπος γένεσης που έχει προταθεί είναι εκείνος της αποσάθρωσης (Belyankin, 1950; Heflik, 1959), αν και υπάρχουν λίγα παραδείγματα μπεντονιτών στα οποία φαίνεται ότι η αποσάθρωση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην γένεσή τους. Χαρακτηριστικό κοίτασμα

είναι αυτό της Αργεντινής. Στο κοίτασμα αυτό που αποτελείται από εναλλαγή τέφρας και μπεντονίτη, παρατηρείται εξαλλοίωση της τέφρας του ανώτερου τμήματος του κοιτάσματος σε σμεκτίτη.

Ένα άλλο παράδειγμα είναι τα κοιτάσματα του μπεντονίτη Τριτογενούς ηλικίας στην Ινδία , που δεν συνδέονται με εξαλλοίωση ηφαιστειακού υλικού λόγω της έλλειψης ηφαιστειακών πετρωμάτων. Πιθανή προέλευσή τους είναι η αποσάθρωση Προκάμβριων πυριγενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων σε υγρό κλίμα και πρόσφατη μεταφορά και απόθεση στην περιοχή.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η απόθεση μπεντονίτη στην περιοχή Marchagee της Δυτικής Αυστραλίας. Αποτελείται από δύο στρώματα από μπεντονίτη με πάχος περίπου 30cm το καθένα , που διαχωρίζονται από αργίλους που περιέχουν γύψο που σχηματίστηκαν σε λιμναίες αποθέσεις στη έρημο. Παρόμοιο σχηματισμό έχουμε και στην Αίγυπτο. Σε καμία από τις παραπάνω περιπτώσεις δεν παρατηρείται ηφαιστειακή δραστηριότητα και ο τρόπος προέλευσης είναι ασαφής.

Σύμφωνα με τους Grim και Guven (1978), ο Parke (1969) συμπέρανε ότι ορισμένοι από τους μπεντονίτες στη Νεβάδα σχηματίστηκαν από μερική εκχύλιση και την εξαλλοίωση των υαλωδών ρυολιθικών πετρωμάτων από εδαφικά νερά. Το νερό παίζει σημαντικό ρόλο στην παροχή του απαιτούμενου μαγνησίου, για τον σχηματισμό μπεντονιτών.

Έρευνες έδειξαν ότι ποικίλα αργιλικά ορυκτά , μπορεί να παρασκευαστούν κάτω από ορισμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας από μίγματα των οξειδίων και υδροξειδίων τους.

Τέλος όπως αναφέρουν οι Grim και Guven (1978), ο Millot (1970) επισήμανε ότι ο σμεκτίτης μπορεί να σχηματιστεί άμεσα σε ιζηματογενή περιβάλλοντα (νεοσχηματισμός). Οι Chamley και Millot περιέγραψαν το φαινόμενο του νεοσχηματισμού μοντοριλλονίτη, ιλίτη και χλωρίτη στην Σαντορίνη. Τα διάτομα παρέχουν το πυρίτιο και το αργίλιο που προέρχονται από την υδρόλυση της κίσηρης κάτω από θαλάσσιες συνθήκες.

1.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ

1.5.1 Ελλάδα

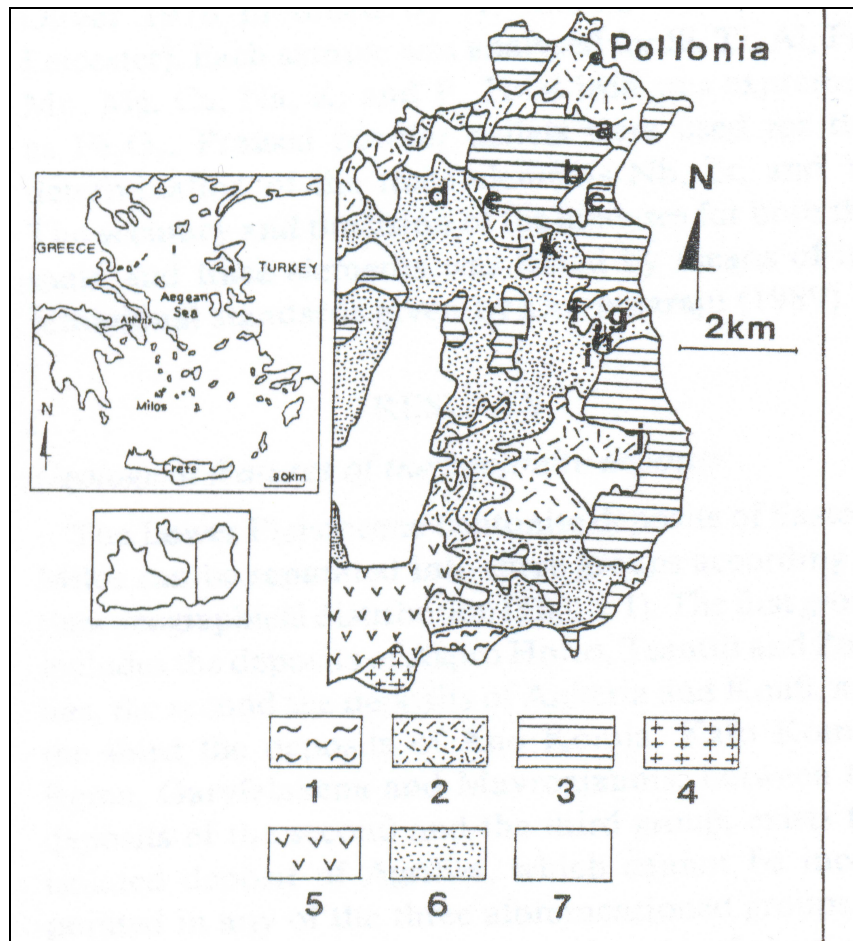
Η Ελλάδα είναι μία από τις κυριότερες παραγωγούς μπεντονίτη στον κόσμο. Συγκεκριμένα καταλαμβάνει τη δεύτερη θέση μετά από τις Η.Π.Α. Η παραγωγή, φτάνει περίπου τα 1,4εκατ. τόνους /έτος.

Τα μεγαλύτερα κοιτάσματα, εμφανίζονται στη Μήλο, την Κίμωλο και τη Χίο. Αν και τα κοιτάσματα αυτά είναι σημαντικά και έχουν μεγάλη οικονομική αξία, η προέλευσή τους δεν έχει διευκρινιστεί ακόμα. Η πιο επικρατούσα άπιψη, είναι εκείνη του σχηματισμού διαγενετικά από εξαλλοίωση πυροκλαστικών υλικών σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Στη Μήλο (Σχήμα 1.2), τα κοιτάσματα μπεντονιτών εμφανίζονται στην ανατολική πλευρά του νησιού. Τα κοιτάσματα είναι στρωματοειδή, το πάχος τους ξεπερνά τα 40 μέτρα και ανάλογα με τη γεωγραφική τους θέση χωρίζονται σε τρεις ομάδες:

1. Άσπρο χωριό, Τσαντίλι, Ζουλιάς
2. Αγκεριά, Κουφή
3. Άνω Κομιά, Κάτω Κομιά, Ρέμα, Γαρυφαλάκαινα και Μαυρογιάννης

Κύριο ορυκτολογικό συστατικό τους, είναι ο σμεκτίτης που σε ορισμένες περιπτώσεις φτάνει και το 95%. Η μεταγενέστερη υδροθερμική εξαλλοίωση έχει μετατρέψει το σμεκτίτη σε καολινίτη και αλλοϋσίτη επηρεάζοντας έτσι δυσμενώς τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των κοιτασμάτων.



1=μεταμορφικό υπόβαθρο

2=πυροκλαστικά Κατώτερου Πλειστόκαινου

3=δομοί λάβας Κατώτερου Πλειστόκαινου

4=δομός λάβας της Χαλέπα

5=ρυολιθικό σύμπλεγμα της Φυρίπλακας

6=προϊόντα φρεατικής δραστηριότητας Τεταρτογενούς ηλικίας

7=ιζήματα τεταρτογενούς ηλικίας

α= Ζούλιας

δ= Αγκερία

γ= Κάτω Κώμια

ι= Ρέμα

β= Άσπρο χωριό

ε= Κουρή

η= Γαρυφαλλάκια

κ=Αγριλιές

ς= Τσαντίλης

φ= Κώμια

ι= Ρούσος

Σχήμα 1.2. Κοιτάσματα μπεντονιτών στη Μήλο (Christidis / Scott / Marcopoulos 1995)

Η Κίμωλος είναι ένα ηφαιστειακό νησί γνωστό για τα κοιτάσματα μπεντονίτη. Τα δύο σημαντικότερα κοιτάσματα είναι των Πράσων και των Λουτρών που βρίσκονται στο βορειοανατολικό τμήμα του νησιού (Christidis / Scott / Marcopoulos 1995) καθώς και εκείνο της Φανάρας, που βρίσκεται στη νότια πλευρά του νησιού.

Το κοιτάσμα των Πράσων, είναι εκείνο που υφίσταται εκμετάλλευση. Πρόκειται για κοιτάσμα λευκού μπεντονίτη, υλικού υψηλής ποιότητας με πολλές εξειδικευμένες εφαρμογές.

1.5.2 Η.Π.Α

Οι μπεντονίτες στις Ηνωμένες Πολιτείες συναντώνται σε σχηματισμούς της Ανώτερης Κρητιδικής και Τριτογενούς ηλικίας.

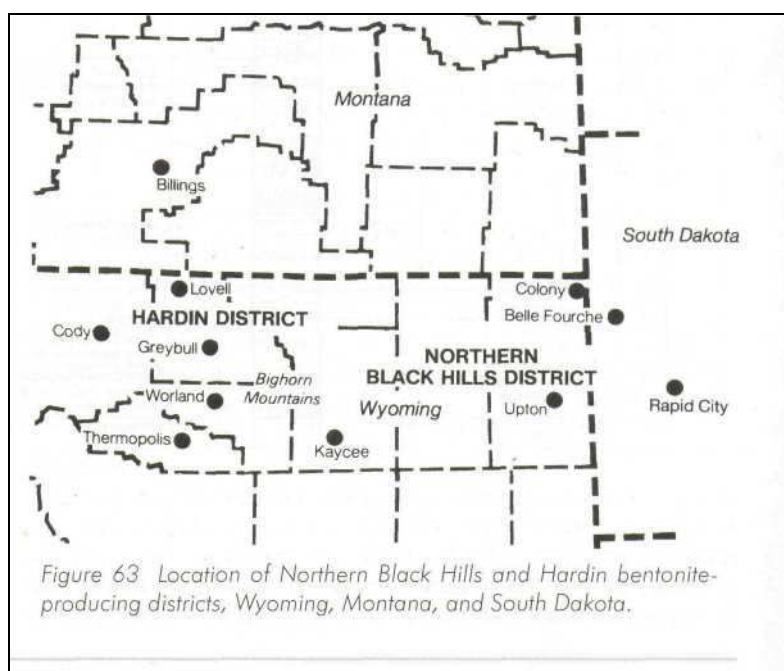
Οι σημαντικότερες αποθέσεις βρίσκονται στην περιοχή των Μαύρων Λόφων (Black Hills) της Νότιας Ντακότα μεταξύ Γουαϊόμινγκ και Μοντάνα, όπου ανακαλύφθηκαν τα πρώτα κοιτάσματα μπεντονίτη και προσδιορίστηκαν οι ιδιότητες τους στις οποίες οφείλεται η πληθώρα των χρήσεων τους.

Άλλες περιοχές που παρουσιάζουν ενδιαφέρον είναι οι πολιτείες Τέξας και Μισισισιπή. Τέλος κοιτάσματα μπεντονιτών βρίσκονται στα Βραχώδη Όρη με πιο γνωστά εκείνα του Cheto της Αριζόνα και της κοιλάδας Amargosa της Νεβάδα

1.5.2.1. Black Hills

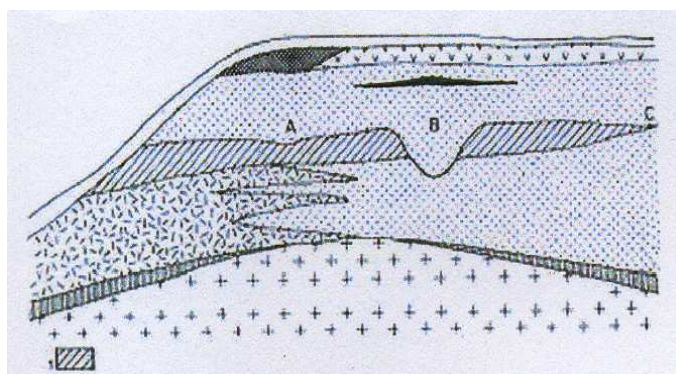
Η περιοχή αυτή βρίσκεται στην πολιτεία Wyoming. Συνορεύει νότια με την περιοχή Upton και ανατολικά με την περιοχή Belle Fourche της νότιας Ντακότα.

Πρόκειται για την πρώτη περιοχή που ξεκίνησε η εκμετάλλευση των μπεντονιτών.



Σχήμα 1.3. Περιοχή Black Hills

Τα πολυάριθμα στρώματα μπεντονίτη, εμφανίζονται σε μία έκταση περίπου 1400 τετραγωνικών μέτρων μαζί με ιζηματογενή πετρώματα, που περιλαμβάνουν αργιλικούς σχιστόλιθους μάργες και αργιλικούς ψαμμίτες. Σε μία τομή μπορούν να εμφανιστούν ακόμα και 20 διαφορετικά στρώματα, το πάχος των οποίων ποικίλλει από 2.5cm ως και 3m ή περισσότερο.



Σχήμα 1.4. Τομή κοιτάσματος μπεντονίτη

Στο σχήμα 1.4 παρουσιάζεται μια τυπική τομή του κοιτάσματος. Το στρώμα Α είναι το παλαιότερο και αποτελεί μέρος του ανώτερου ψαμμίτη του Newcastle, από τον οποίο έχει πάρει το όνομά του. Έχει πάχος περίπου 1 ως 2m με τοπικούς φακούς, οι οποίοι φτάνουν τα 10m. Το οικονομικό κομμάτι βρίσκεται στην ανατολική πλευρά. Το στρώμα Β βρίσκεται ανάμεσα στον σχιστόλιθο Mowry. Πρόκειται για πολύ λεπτό στρώμα και δεν παρουσιάζει μεγάλο οικονομικό ενδιαφέρον. Περίπου 10 με 12m πιο πάνω, βρίσκεται το τρίτο στρώμα. Πρόκειται για τον γνωστό ορίζοντα Clay Spur. Το πάχος του στρώματος, υπολογίζεται κατά μέσο όρο 1 με 1.5m. Από το κοίτασμα αυτό έχει εξορυχθεί νατριούχος μπεντονίτης με σημαντικές κολλοειδείς ιδιότητες. Το κοίτασμα αυτό βρίσκεται στην κορυφή του σχιστόλιθου Mowry.

Το χρώμα των μπεντονιτών είναι έντονο κίτρινο ή πράσινο και γίνεται μπλε μακριά από το μέτωπο της εμφάνισης. Οι μεταβολές του χρώματος οφείλονται στον διαφορετικό βαθμό οξείδωσης του σιδήρου.

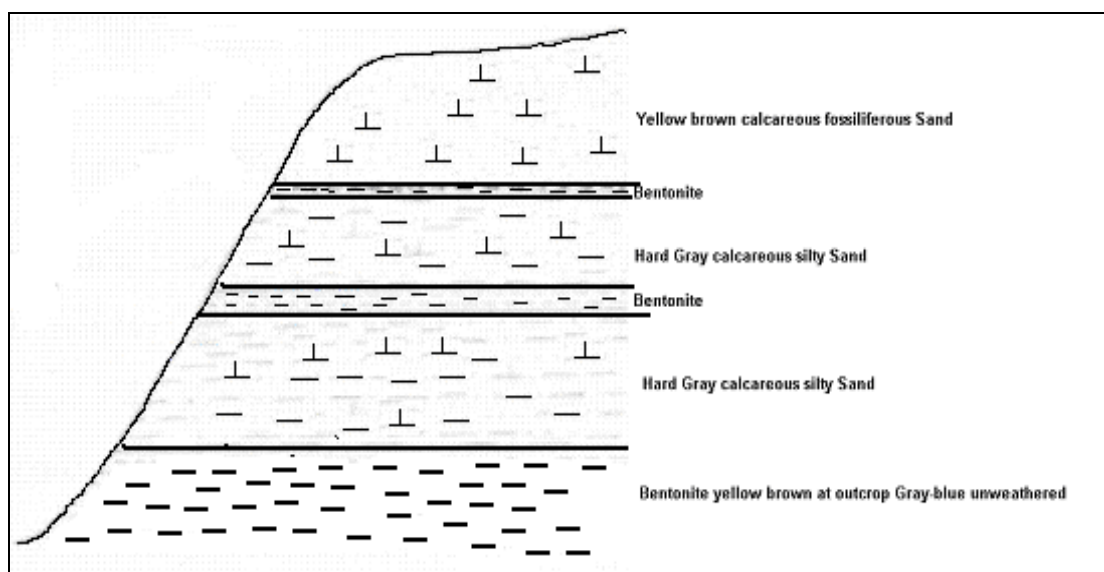
Οι μπεντονίτες της περιοχής αυτής έχουν σχηματιστεί κατά το στάδιο της διαγένεσης, της ηφαιστειακής τέφρας, ρυολιθικής σύστασης. Τα οικονομικά εκμεταλλεύσιμα κοιτάσματα περιέχουν σμεκτίτη σε ποσοστό περίπου 90% ενώ τεμάχια τέφρας που δεν έχουν εξαλλοιωθεί περιέχουν χαλαζία, αστρίους και βιοτίτη σε ποσοστό λιγότερο από 10%.

1.5.4 ΑΓΓΛΙΑ

Οι άργιλοι οι οποίοι αποτελούνται σχεδόν εξ' ολοκλήρου από σμεκτίτη και περιέχουν ασβέστιο ως ανταλλάξιμο κατίον, ονομάζονται fuller's earth στην αγγλική βιβλιογραφία. Οι στρωματοειδείς αυτοί σχηματισμοί, έχουν Άνω Κρητιδική ή Ιουρασική ηλικία και βρίσκονται στο Λονδίνο και στο Somerset.

Μπεντονίτες της Άνω Κρητιδικής ηλικίας, εξορύσσονται κυρίως στις περιοχές Nutfield και Surrey και χρησιμοποιούνται σε μια πληθώρα εμπορικών χρήσεων όπως άμμοι χυτηρίων, παραγωγή γεωτρητικών πολφών κ.α. Συνήθως τα κοιτάσματα αυτά περιέχουν και ζεόλιθους. Το πάχος τους

κυμαίνεται από μερικά εκατοστά έως αρκετά μέτρα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5. βρίσκονται σε ένα ορίζοντα ασβεστούχων άμμων στο σχηματισμό Sandgate των Κατώτερων γλαυκονιτικών άμμων. Η υφή των κοιτασμάτων είναι κηρώδης, ενώ το χρώμα τους είναι μπλε και μετατρέπεται σε κίτρινο στις αποσαθρωμένες περιοχές. Ο μπλε μπεντονίτης περιέχει κονδύλους σιδηροπυρίτη και άλλα σουλφίδια.



Σχήμα 1.5. Τομή κοιτάσματος μπεντονίτη «Clay Spur»

Οι μπεντονίτες είναι προϊόντα εξαλλοίωσης της ηφαιστειακής τέφρας που μεταφέρθηκε από ποτάμια και αποτέθηκε στη θάλασσα. Η απουσία όμως ηφαιστειακής δραστηριότητας κατά την κρητιδική περίοδο στην ευρύτερη περιοχή, έχει δημιουργήσει ερωτηματικά στους Άγγλους γεωλόγους για την προέλευση του αρχικού υλικού.

1.6. ΧΡΗΣΕΙΣ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΗ

Οι μπεντονίτες χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Η εμπορική αξία του μπεντονίτη, προκύπτει από τις ορυκτολογικές του ιδιότητες, από την ιοντοεναλλακτική του ικανότητα αλλά και από τις προσροφητικές του ιδιότητες. Κατά την αξιολόγηση του αρχικού υλικού, γίνονται έλεγχοι σύμφωνα με την προσδοκώμενη τελική χρήση.

Η πληθώρα των χρήσεων του ασβεστούχου μπεντονίτη, φαίνεται στον πίνακα 1.2, ενώ γενικά οι κυριότερες χρήσεις του είναι:

- Πολφοί γεωτρήσεων
- Πληρωτικά υλικά στη βιομηχανία χαρτιού
- Άμμοι υγιεινής
- Παραγωγή σιδήρου
- Βιομηχανία χρωμάτων
- Φαρμακευτικά είδη, καλλυντικά, ιατρικές εφαρμογές
- Έργα πολιτικού μηχανικού
- Χυτήρια

| Na-ούχοι μπεντονίτες | Ca-ούχοι μπεντονίτες | Μπεντονίτες Ενεργοποιημένοι |
|---|--|--|
| συνδετικό μέσο άμμων χυτηρίων | συνδετικό μέσο άμμων χύτευσης χαμηλών θερμοκρασιών | αποχρωματισμός, εξευγενισμός και καθαρισμός των φυτικών, ζωικών ελαίων και ορυκτέλαιων . |
| σφαιροποίηση σιδηρομεταλλευμάτων | πληρωτικό σε πλαστικά και ελαστικά κ.α. | αποκαθαρισμός, διύλιση κρασιών, μπύρας κ.τ.λ |
| γεωτρητικοί πολφοί | φορέας μικροβιοκτόνων | |
| προστασία περιβάλλοντος | φορέας καταλυτών | |
| περιορισμός αποβλήτων | | |
| κεραμικά και πυρίμαχα | | |
| παχυντές και γαλακτώματα | | |
| παραγωγή χαρτιού | | |
| σαπούνια και απορρυπαντικά | | |
| άμμος υγιεινής ,βιομηχανικά απορροφητικά μέσα | | |
| ζωοτροφές | | |
| σταθεροποιητές εδαφών | | |
| κατεργασία νερού και λυμάτων | | |
| καλλυντικά και φαρμακευτικά προϊόντα | | |

Πίνακας 1.2 Χρήσεις μπεντονιτών

1.6.1. Πολφoί γεωτρήσεων

Τα υδατικά αιωρήματα που περιέχουν μπεντονίτη, χρησιμοποιούνται στους πολφούς γεωτρήσεων πετρελαίου και νερού. Ανήκουν στους πολφούς με βάση το νερό. Η χρήση αυτή του μπεντονίτη, αναπτύχθηκε λόγω των καλών ρεολογικών ιδιοτήτων του αργιλικού ορυκτού μοντμοριλλονίτης. Η κυριότερη ιδιότητα του ορυκτού αυτού, είναι ότι σε πλήρη διασπορά σχηματίζει λεπτά στρώματα πάχους 10–100 Å και επιφάνειας περίπου 100–1000 Å² όταν αναμειχθεί με νερό. Το αιώρημα που δημιουργείται με την προσθήκη του μπεντονίτη στο νερό επιδρά θετικά στον πολφό από πλευράς ελέγχου του ιξώδους του κολλοειδούς συστήματος. Έτσι κατά κύριο λόγο ο μπεντονίτης δρα ως λειαντικό στα γεωτρήματα και στεγανοποιεί τα τοιχώματα της γεώτρησης. Επίσης, λόγω της θixοτροπίας του, χρησιμοποιείται στον καθαρισμό των τοιχωμάτων αυτών. (η χρήση αυτή του μπεντονίτη περιγράφεται αναλυτικά στο τρίτο κεφάλαιο).

1.6.2. Βιομηχανία χαρτιού

Άργιλοι που αποτελούνται από καολινίτη αλλά και μπεντονίτη, χρησιμοποιούνται ως πληρωτικά αλλά και επικαλυπτικά υλικά. Υποστηρίζεται ότι προσθήκη 1% μπεντονίτη στον χαρτοπολτό τείνει να αποτρέψει την συσσώρευση λεπτών μορίων της πίσσας και του ρητινούχου υλικού που προκαλούν ατέλειες στο φύλλο του χαρτιού. Επίσης υποστηρίζεται ότι το ποσοστό αυτό του μπεντονίτη, ενισχύει την ομοιομορφία της διανομής της χρωστικής ουσίας σε όλη την έκταση του χαρτιού. Σε συνδυασμό με τα πολυμερή μπορεί να συμβάλλει στη βελτίωση της συνοχής των συστατικών του πολφού και στον καθαρισμό του κυκλώματος του νερού. Ο μπεντονίτης θα μπορούσε με την κατάλληλη επεξεργασία να βελτιώσει την ποιότητα του χαρτιού και να μειώσει το κόστος στην παραγωγή του χαρτιού.

1.6.3. Άμμοι υγιεινής

Κόκκοι αργίλων μεγέθους 10-30 mesh χρησιμοποιούνται ως άμμοι υγιεινής, για οικόσιτα ζώα. Η άργιλος χρησιμοποιείται ως προσροφητής και ως αφαιρετικό της οσμής οπότε πρέπει να έχει αρκετά μεγάλη ικανότητα προσρόφησης. Οι άργιλοι θερμαίνονται σε θερμοκρασίες πάνω από 100°C και κάτω από 1000°C για να αναπτύξουν προσροφητικές ικανότητες και για να παραχθεί ένα υλικό, το οποίο δε διασπάται σε μικρότερα κομμάτια είτε χρησιμοποιείται ξηρό είτε ενυδατωμένο. Πολλοί μπεντονίτες έχουν βρεθεί ικανοποιητικοί γι' αυτήν την χρήση. Μάλιστα τα τελευταία χρόνια ο μπεντονίτης χάρη στις εξαιρετικές του ιδιότητες καταλαμβάνει όλο και μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς, αντικαθιστώντας προσροφητικά υλικά όπως ο σεπιόλιθος. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι άμμοι είναι οι scoorable και clumping από τους οποίους οι δεύτεροι χρησιμοποιούνται περισσότερο λόγω της ιδιότητας των να διαμορφώνουν συμπαγείς άμμους. Τέλος διάφορα χημικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στους ξηρούς κόκκους της αργίλου ώστε να ρυθμιστεί ο έλεγχος της οσμής και να εξασφαλιστούν οι απολυμαντικές και εντομοαπωθητικές ιδιότητες.

1.6.4. Παραγωγή σιδήρου.

Ο μπεντονίτης αποτελεί κύριο συνδετικό υλικό για την κατασκευή σφαιριδίων σιδηρομεταλλευμάτων (pellets). Οι φυσικοί νατριούχοι μπεντονίτες, αλλά και εκείνοι με ανταλλάξιμο ιόν το νάτριο, είναι αποτελεσματικοί στην παραγωγή σφαιριδίων, με υψηλή μηχανική αντοχή αλλά και καλή συμπεριφορά σε θερμική καταπόνηση.

Επειδή το λεπτοδιαμερισμένο μέταλλευμα του σιδήρου μετά από τον εμπλουτισμό έχει υγρασία, ο μπεντονίτης δεσμεύει το πλεονάζον νερό. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται μπεντονίτες με υψηλές τιμές Eslin (μέτρο για την απορρόφηση του νερού από τον μπεντονίτη) (Κωστάκης, 2003).

Το σιδηρομετάλλευμα κατά την σφαιροποίηση θα πρέπει να είναι σε μορφή κόνεως ώστε να μπορούν να διαχωριστούν οι προσμίξεις από τον

σίδηρο. Το τελικό προϊόν είναι κατάλληλο υλικό τροφοδοσίας υψικαμίνων για την παραγωγή ράβδων σιδήρου.

1.6.5. Βιομηχανία χρωμάτων

Μπεντονίτες που έχουν ενεργοποιηθεί με οργανικές ενώσεις, χρησιμοποιούνται ως προσθετικά σε μπογιές. Λόγω των θιξοτροπικών τους ιδιοτήτων οι μπεντονίτες και γενικότερα οι άργιλοι χρησιμοποιούνται για την πύκνωση του υλικού στο οποίο προστίθενται και εμποδίζουν το κατακάθισμα. Αυτό συμβαίνει γιατί όταν οι οργανόφιλοι μπεντονίτες έρχονται σε επαφή με οργανικά διαλύματα διογκώνονται με αποτέλεσμα να αυξάνεται το ιξώδες και η θιξοτροπία τους. Η προσθήκη 0,5 -2% οργανόφιλου μπεντονίτη βελτιώνει την ευστάθεια της σύστασης και την ικανότητα υλικών όπως το μίνιο ή η σκόνη ψευδαργύρου που είναι βαριές χρωστικές ουσίες, να δημιουργούν επαλείψεις.

1.6.6. Φαρμακευτικά είδη, καλλυντικά και ιατρικές εφαρμογές.

Ο μπεντονίτης χρησιμοποιείται ως υλικό πλήρωσης στα φαρμακευτικά είδη και λόγω των ιδιοτήτων προσρόφησης-απορρόφησης, επιτρέπει τον σχηματισμό πολφών. Ο μπεντονίτης λοιπόν βρίσκει βιομηχανική εφαρμογή σε προστατευτικές κρέμες, λοσιόν και αντιδιεγερτικά για εκζέματα. Επίσης, προϊόντα προσωπικής φροντίδας όπως κρέμες και μάσκες προσώπου μπορεί να περιέχουν μπεντονίτη. (www.ima-na.org)

Σύμφωνα με τους Grim και Guven (1978), ο Noveli επισήμανε ότι ο μπεντονίτης στην ιατρική, μπορεί να δράσει σαν αντίδοτο δηλητηρίασης από βαριά μέταλλα και ουσίες όπως η μορφίνη και κοκαΐνη. Τέλος συμβάλει στην βελτίωση των ιδιοτήτων των αιωρημάτων θειικού άλατος βαρίου που χρησιμοποιείται σε ραδιολογικές εξετάσεις.

1.6.7. Έργα πολιτικού μηχανικού

Ο μπεντονίτης χρησιμοποιείται σε έργα πολιτικού μηχανικού, ως θιξοτροπικό πρόσθετο, υποστηρικτικό και λιπαντικό μέσο σε διαφραγματικά τοιχώματα και θεμελιώσεις, σε σήραγγες, σε γεωτρήσεις οριζόντιας κατεύθυνσης και σε διάνοιξη μικροσηράγγων με τη μέθοδο προώθησης σωλήνων.

Επίσης, συνιστάται ως υλικό στεγανοποίησης στην κατασκευή και αποκατάσταση των χώρων ταφής απορριμμάτων, διασφαλίζοντας μακροχρόνια προστασία των υπόγειων υδάτων από ρυπαίνουσες ουσίες. Ο μπεντονίτης χρησιμοποιείται ως υλικό χαμηλής διαπερατότητας για τη στεγανοποίηση της βάσης και της επικάλυψης των χωματερών, καθώς επίσης και για την κατασκευή περιφερειακών, καθέτων τοιχωμάτων που λειτουργούν ως διαφράγματα (www.ima-na.org). Επιπλέον λόγω της απορροφητικής - προσροφητικής του ικανότητας χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό του νερού από απόβλητα. Τέλος ο μπεντονίτης λόγω της πλαστικότητάς του, χρησιμοποιείται σαν πρόσθετο σε ποσοστό περίπου 3% σαν πρόσθετο στο σκυρόδεμα.

1.6.8 Χυτήρια

Στα χυτήρια χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι χύτευσης των μετάλλων βάσει του τύπου του κράματος και του μεγέθους των χυτών. Ο μπεντονίτης χρησιμοποιείται σε μείγματα προϊόντων που περιέχουν ανθρακικά υλικά και άλλα πρόσθετα στη μέθοδο της άμμου καλουπιών χυτηρίων. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται ως συνδετικό υλικό της άμμου για την κατασκευή των καλουπιών.

Τα περισσότερα προϊόντα των χυτηρίων προορίζονται για τον κλάδο της αυτοκινητοβιομηχανίας, καθώς επίσης και για την παραγωγή βιομηχανικών και γεωργικών μηχανημάτων.

1.7 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΠΕΝΤΟΝΙΤΩΝ

1.7.1 Ιοντοεναλλακτική ικανότητα.

Το ηλεκτροστατικό φορτίο που υπάρχει στις στρώσεις της κρυσταλλικής δομής του μοντμοριλλονίτη ενισχύει την ανταλλαξιμότητα των κατιόντων που βρίσκονται στις ενδοστρωματικές θέσεις έναντι άλλων ανόργανων και οργανικών κατιόντων. Τα συνηθέστερα ανταλλάξιμα ιόντα είναι το ασβέστιο και το μαγνήσιο, ενώ σπανιότερα εμφανίζονται το νάτριο και το υδρογόνο.

Εκτός όμως από τα κατιόντα που βρίσκονται μεταξύ των στρώσεων, η ιοντοεναλλακτική ικανότητα, μπορεί να οφείλεται στα δεσμευμένα κατιόντα που βρίσκονται στα όρια των σωματιδίων. Το ποσοστό αυτών των σωματιδίων εξαρτάται από το pH. Αύξηση του pH έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αρνητικού φορτίου στα όρια των σωματιδίων των φυλλοπυριτικών ορυκτών που είναι ικανά να δεσμεύσουν κατιόντα. Το συνολικό ποσοστό της ιοντοεναλλακτικής ικανότητας που οφείλεται στα κατιόντα μεταξύ των στρώσεων είναι 80% ενώ το ποσοστό που αναλογεί στην ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων μεταξύ των ορίων των κόκκων είναι 20%. (Κωστάκης, 2003)

Ο ρόλος των ανταλλάξιμων ιόντων είναι καθοριστικός αν αναλογιστεί κανείς ότι άλλες ιδιότητες των μπεντονιτών όπως η ικανότητα διόγκωσης καθώς και οι ρεολογικές ιδιότητες οφείλονται στην ανταλλαγή αυτή.

1.7.2.Ικανότητα διόγκωσης.

Η ενυδάτωση και η διόγκωση των ενδοστρωματικών επιφανειών των σμεκτιτικών ορυκτών, είναι σημαντικές για τις διάφορες εφαρμογές των μπεντονιτών

Ο βαθμός ενυδάτωσης εξαρτάται από:

- Το είδος του ανταλλάξιμου ιόντος
- Το μέγεθος και το φορτίο των κατιόντων
- Την κατανομή και το μέγεθος του φορτίου κρυσταλλικής δομής των παρακείμενων πυριτικών φύλλων

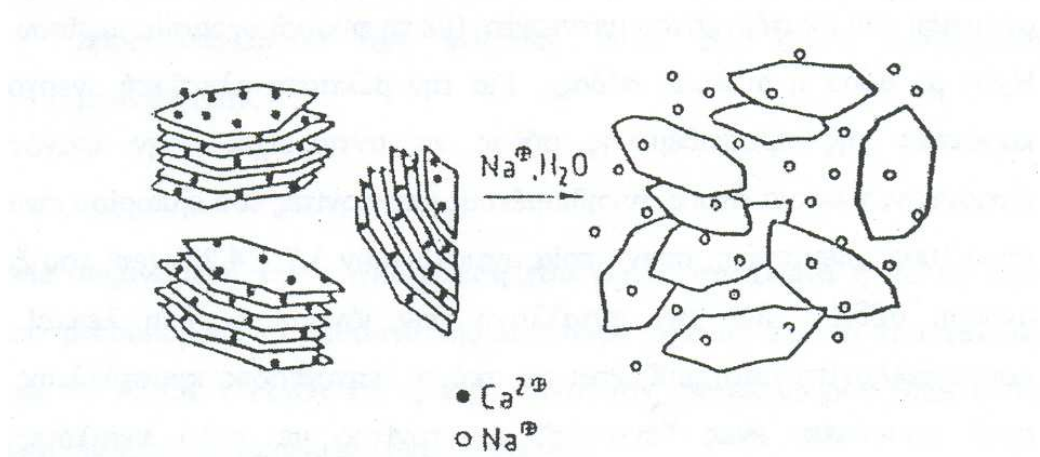
Ιδιαίτερα οι νατριούχοι μπεντονίτες, όταν βρεθούν σε υγρό περιβάλλον, έχουν την τάση να διογκώνονται. Ανάλογα με την ποσότητα του νερού που βρίσκεται μεταξύ των στρώσεων του σμεκτίτη, οι κρύσταλλοι αποχωρίζονται προς την κατεύθυνση του άξονα *c* ώστε να αυξηθεί η απόσταση δύο δομικών μονάδων 2:1.

Οι σμεκτίτες λοιπόν με ιόντα νατρίου διογκώνονται μεταξύ των στρώσεων σε διαλύματα φτωχά σε ηλεκτρολύτες μέχρι τέτοια έκταση, ώστε η διόγκωση να φτάνει ακόμα και σε αποχωρισμό των φυλλαρίων. Για τον λόγο αυτό δημιουργούνται πηκτώματα ογκωδέστερα σε σχέση με τους ασβεστούχους, διότι η διόγκωση τους είναι μεγαλύτερη και το πάχος των μικυλίων γίνεται πολύ μικρότερο απ'ότι στον αρχικό ασβεστούχο.

Αντίθετα η ξήρανση, δηλαδή η απομάκρυνση των μορίων νερού προκαλεί συρρίκνωση στην διεύθυνση του άξονα *c* (Κωστάκης, 2003).

1.7.3 Ρεολογικές ιδιότητες

Η ενυδάτωση των σμεκτιτικών κρυστάλλων έχει ως αποτέλεσμα το διαχωρισμό και το διασκορπισμό των κρυστάλλων. Η ανάπτυξη του ηλεκτροστατικού δυναμικού έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κολλοειδούς συστήματος όπως φαίνεται στο σχήμα 1.6



Σχήμα 1.6. Δημιουργία κολλοειδών αιωρημάτων νατριούχων σμεκτιτών.

Η προσθήκη σμεκτιτικών αργίλων σε νερό σε μεγάλες συγκεντρώσεις, έχει ως αποτέλεσμα την αντίσταση στην ροή. Οι ιδιότητες αυτές, παρατηρούνται στους νατριούχους μπεντονίτες καθώς και σε μπεντονίτες που έχουν ενεργοποιηθεί με νάτριο.

1.7.4. Μέγεθος κρυστάλλων- ειδική επιφάνεια

Το μέγεθος των κρυστάλλων των σμεκτιτών κυμαίνεται από 0.01μm έως 2 μm, ενώ το σχήμα τους μπορεί να κυμαίνεται από εξαγωνικό ως ακανόνιστο.

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και την διευθέτηση των μεμονωμένων κρυσταλλιτών τα κρυσταλλικά συσσωματώματα χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Σφαιροειδή συσσωματώματα, όπου η διάταξη των σφαιριδίων είναι τυχαία.
- Συσσωματώματα στα οποία οι μεμονωμένοι κρύσταλλοι μοιάζουν με ίνες
- Ελασματοειδή συσσωματώματα

Η μορφή των κρυστάλλων παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στις ρεολογικές ιδιότητες των σμεκτιτών

Ανάλογα με το μέγεθος των μυκηλίων και την περιεκτικότητα σε μοντμοριλλονίτη, η εξωτερική επιφάνεια των μπεντονιτών κυμαίνεται από 30-100 m²/gr, ενώ η εσωτερική επιφάνεια κυμαίνεται μεταξύ 400- 700 m²/gr (Κωστάκης, 2003). Η ειδική επιφάνεια δίνεται από τον τύπο

$$S_w = \frac{S}{W} = \frac{f}{k \cdot \rho} \cdot \frac{1}{d}$$

όπου S_w =ειδική επιφάνεια του κόκκου

W =βάρος του κόκκου

d =διάμετρος κόκκου

$f=\pi=3,14$, ρ =πυκνότητα

k = σταθερά

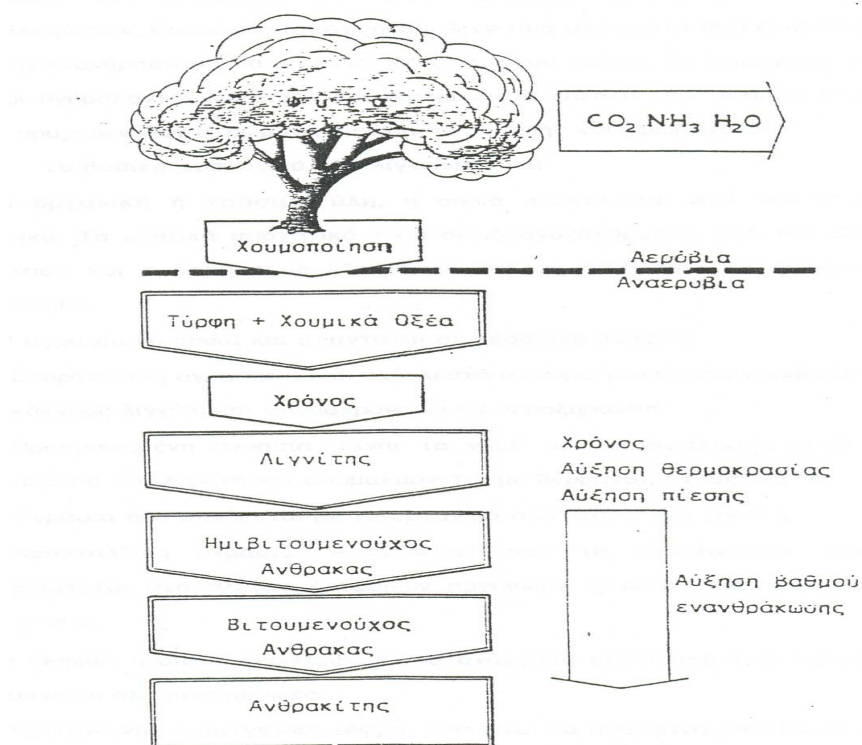
Η αύξηση της ειδικής επιφάνειας, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της ικανότητας προσρόφησης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ- 2 ΛΙΓΝΙΤΕΣ

2.1. ΓΕΝΙΚΑ

Πρόκειται για προϊόντα εξανθράκωσης φυτικών λειψάνων, που έχουν εγκλεισθεί σε ιζήματα. Τα λείψανα αυτά μετά από το θάνατο των φυτών καλύπτονται εξαιτίας της ιζηματογένεσης, μέσα σε κοιλώματα (λεκάνες) της λιθόσφαιρας στα οποία συμβαίνει και βραδεία συνίξησή τους. Έτσι συντελείται με την πάροδο του γεωλογικού χρόνου οξείδωσή τους με περιορισμένη κυκλοφορία αέρα, απομάκρυνση των υπόλοιπων συστατικών (N_2 , H_2 , O_2 , S) και εμπλουτισμός τους σε άνθρακα (Δάβη, 1991).

Η διαδικασία μετατροπής φυτικών προϊόντων σε άνθρακα και οι φάσεις της ενανθράκωσης παρουσιάζονται στο σχήμα στο οποίο φαίνεται ότι οι λιγνίτες σχηματίστηκαν στα πρώτα στάδια της ενανθράκωσης αμέσως μετά την τύρφη (Παπανικολάου, 2004).



Σχήμα 2.1. Διαδικασία ενανθράκωσης

Ο βαθμός ενανθράκωσης εξαρτάται από το χρόνο κατά τον οποίο έχει επιδράσει η γηγενής θερμότητα στα φυτικά λείψανα. Επομένως, όσο

παλαιότερα γεωλογικώς έχουν εγκλειστεί τα φυτικά λείψανα στα στρώματα της γης, τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός ενανθράκωσης. Ανάλογα με το βαθμό ενανθράκωσης, οι ορυκτοί άνθρακες διακρίνονται σε τύρφη, λιγνίτη, λιθάνθρακα, ανθρακίτη και γραφίτη (Δάβη, 1991)

2.2 ΓΕΝΕΣΗ

Για το σχηματισμό του λιγνίτη, χρειάζεται μεγάλο χρονικό διάστημα κατά το οποίο συντελούνται σημαντικές μεταβολές στην σύνθεση της χλωρίδας από την οποία προκύπτουν τα φυτικά υπολείμματα όσο και στις συνθήκες απόθεσης. Επομένως δημιουργήθηκαν λιγνίτες οι οποίοι έχουν τον ίδιο βαθμό ενανθράκωσης, αλλά είναι διαφορετικού τύπου. Οι διαφορετικοί αυτοί τύποι ονομάζονται λιθότυποι και στα μέτωπα εκσκαφής των ορυχείων φαίνονται σαν στρώματα διαφορετικής υφής και χρώματος.

Στην Ελλάδα, κατάλληλες συνθήκες για τον σχηματισμό λιγνίτη υπήρξαν από τις αρχές του Καινοζωικού αιώνα ως και την Τεταρτογενή γεωλογική περίοδο.

Κατά την διάρκεια του Καινοζωικού αιώνα στον Ελλαδικό χώρο δημιουργήθηκαν δύο ειδών λεκάνες: οι παράκτιες και οι ηπειρωτικές.

- Οι παράκτιες περιλαμβάνουν αβαθή έλη τα οποία δημιουργήθηκαν από την απόσυρση της θάλασσας. Εκεί αναπτύχθηκε η βλάστηση λόγω ευνοϊκών κλιματολογικών συνθηκών και σε περιοχές όπου οι παλαιογεωγραφικές συνθήκες το επέτρεπαν αναπτύχθηκε η λιγνιτοφορία.
- Οι ηπειρωτικές λεκάνες βρίσκονται στο εσωτερικό της χώρας. Δημιουργήθηκαν ως τεκτονικές τάφροι οι οποίες πληρώθηκαν με ιζήματα. Εξαιτίας διαφόρων τεκτονικών παραγόντων, μεγάλο μέρος του αρχικού υποβάθρου έμεινε κάτω από το νερό και δημιουργήθηκαν αβαθείς λεκάνες, που αργότερα γέμισαν με ιζήματα. Οι λίμνες αυτές

μετατράπηκαν σε έλη, όπου οι συνθήκες ήταν τέτοιες που επέτρεψαν την ανάπτυξη της λιγνιτοφορίας

Ο σχηματισμός των λιγνιτών, χαρακτηρίζεται από την αποσύνθεση της κυτταρίνης και της λιγνίνης, που αποτελούν τις κύριες ομάδες κατά τον σχηματισμό των φυτών. Έτσι σχηματίζονται χουμικά οξέα στα οποία οφείλονται οι χημικές ιδιότητες των λιγνιτών, ενώ η κυτταρίνη και η λιγνίνη παραμένουν σε καθαρή μορφή. Η διαδικασία του μετασχηματισμού της κυτταρίνης και της λιγνίνης σε χουμικό οξύ ονομάζεται χουμοποίηση και αποτελεί το πρώτο στάδιο της ενανθράκωσης (Βάμβουκα, 2002).

2.3 ΤΥΠΟΙ ΛΙΓΝΙΤΗ

Οι μακροσκοπικές λιθοτυπικές ιδιότητες των λιγνιτών αντικατοπτρίζουν φυσικοχημικές διαφορές, αλλά και διαφορά στη συνεκτικότητά τους (Παπανικολάου, 2004).

Ανάλογα με τις μακροσκοπικές λιθοτυπικές διαφορές οι λιγνίτες διακρίνονται σε:

- Μαλακούς, γαιώδεις λιγνίτες

Στην φυσική τους κατάσταση, έχουν χρώμα σκούρο καστανό ως καστανόμαυρο. Είναι μαλακοί και αποσαθρώνονται εύκολα στον αέρα. Είναι λεπτοστρωματώδεις, φυλλώδεις και σπάνια συμπαγείς. Συνήθως

στις επιφάνειες τους παρατηρούνται φυτικά λείψανα αλλά και ανόργανη ύλη όπως λεπτόκοκκοι άμμοι και φυλλάρια μαρμαρυγία

- Σκληρούς λιγνίτες, συμπαγείς, αλαμπείς ή στιλπνούς.
Έχουν καφέ ως μαύρο χρώμα. Στον τύπο αυτό του λιγνίτη, σπάνια διακρίνονται φυτικά υπολείμματα και ορισμένες φορές παρατηρείται κάποια ασθενής στρώση.

Σημαντικός τύπος λιγνίτη για την Ελλάδα, λόγω της ποσότητας αλλά και της ποιότητας των αποθεμάτων, αποτελεί ο ξυλίτης. Ο ξυλίτης συνίσταται από συστατικά δέντρων, είτε πρωτογενή σκληρά (κορμοί, κλαδιά) είτε πρωτογενή μαλακά (φύλλα, μίσχοι). Το ποσοστό των ξυλιτικών συστατικών ποικίλει μεταξύ διαφορετικών λιγνιτικών κοιτασμάτων αλλά και από θέση σε θέση στο ίδιο κοίτασμα.

Ο ξυλίτης είναι σκληρός και ινώδης. Ο ιστός και η υφή των φυλλωδών συστατικών είναι συχνά λιγότερο διατηρημένα, ενώ το χρώμα τους είναι καστανό ως μαύρο. Περισσότερη ανόργανη ύλη, συνυπάρχει με το εύθρυπτο υλικό τμήμα των φυλλωδών συστατικών αλλά υπάρχει περίπτωση συγκεντρώσεις ανόργανης ύλης να παρατηρούνται και μέσα στα ξυλιτικά συστατικά (Παπανικολάου, 2004).

2.4. ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ

Τα βασικά συστατικά του λιγνίτη είναι:

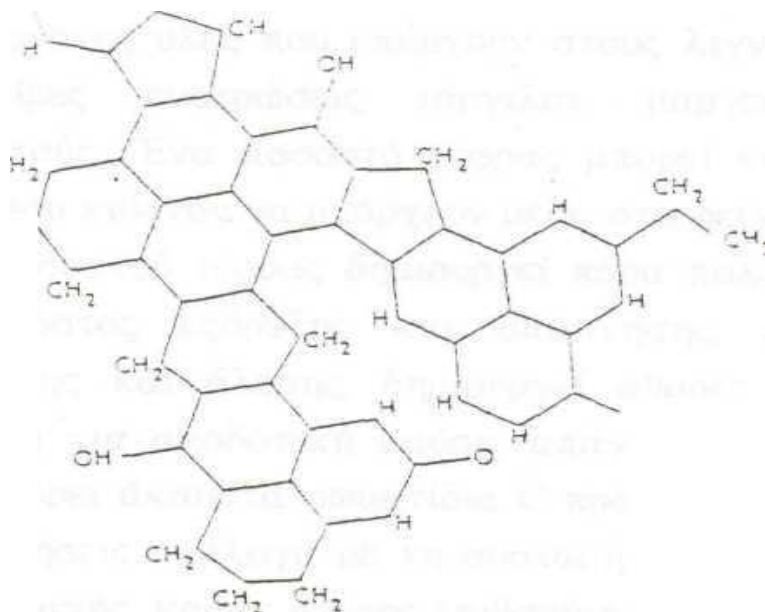
- Η Οργανική καύσιμη ύλη: Αποτελείται από τα πτητικά συστατικά και το μόνιμο άνθρακα. Η σύσταση και η δομή της εξαρτώνται από τη σύσταση των φυτόκλαστων (Macerals).

- Η υγρασία : Πρόκειται για βασικό συστατικό των λιγνιτών και γενικά όλων των γαιανθράκων χαμηλού βαθμού ενανθράκωσης. Η υγρασία απαντάται σε τέσσερις μορφές:
 - Επιφανειακή υγρασία
 - Προσροφημένη εργασία
 - Υγρασία που συνδέεται με τα οργανικά συστατικά του λιγνίτη
 - Κρυσταλλική υγρασία
- Η τέφρα: Σε αυτή περιέχονται όλα τα ανόργανα συστατικά των φυτικών υπολειμμάτων (πρωτογενής ή συγενετική τέφρα) καθώς και τα ανόργανα που προήλθαν από εξωτερικούς παράγοντες και εναποτέθηκαν μαζί με τα φυτικά υπολείμματα ή εισχώρησαν σε αυτά διαμέσω κάποιων ρηγμάτων (δευτερογενής ή επιγενετική τέφρα)

Τα κύρια συστατικά από τα οποία αποτελείται ο λιγνίτης είναι ο άνθρακας, το υδρογόνο και το οξυγόνο (Σχήμα 2.2), ενώ τα δευτερεύοντα είναι: θείο, άζωτο, πυρίτιο, αργίλιο, σίδηρος, κάλιο, νάτριο, μαγνήσιο, χαλκός, ασβέστιο, τιτάνιο. Η σύνδεση των χημικών στοιχείων γίνεται με ποικίλους τρόπους, σχηματίζοντας οργανικές και ανόργανες ενώσεις. Το οργανικό τμήμα αποτελείται από πολυμερή των C, H, O με μικρά ποσά S και N. Το ανόργανο τμήμα αποτελείται από ενώσεις των υπόλοιπων στοιχείων, είτε μεταξύ τους, είτε με τον C και το O.

Οι οργανικές ομάδες που κύρια επικρατούν, είναι αυτές που περιέχουν οξυγόνο. Ειδικότερα περιέχονται φαινόλες, αλκοόλες, αιθέρες, καρβοξυλικά οξέα και καρβονύλια.

Τα συχνότερα παρατηρούμενα ανόργανα στοιχεία στους λιγνίτες είναι το πυρίτιο, αργίλιο, ασβέστιο, σίδηρος, μαγνήσιο, νάτριο, κάλιο, τιτάνιο και θείο, με τις μορφές του ιλλίτη, καολινίτη, σιδηροπυρίτη, δολομίτη, ασβεστόλιθου, και χαλαζία (Παπανικολάου, 2004).



Σχημα 2.2. Δομή λιγνίτη

2.5. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΙΓΝΙΤΩΝ

2.5.1. Μακροσκοπικά χαρακτηριστικά

Οι λιγνίτες γενικά είναι θαμπά, γαιώδη υλικά, χρώματος καφέ έως μαύρου. Εμφανίζονται κυρίως σαν "ταινιοειδείς" και σπανιότερα ως "μη ταινιοειδείς".

Τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά των λιγνιτών αναφέρονται:

(α) Στη σύνθεση. Οι λιγνίτες αποτελούνται από : (α) την κύρια μάζα όπου η διαδικασία της αποσύνθεσης έχει ολοκληρωθεί και δε διακρίνεται πλέον κυτταρική δομή και (β) προσμίξεις.

(β) Στο χρώμα και υφή επιφάνειας. Στο αποσαθρωμένο πρανές διακρίνονται χρώματα σκοτεινά, μέτρια σκοτεινά, μέτρια φωτεινά και

φωτεινά, ενώ όσον αφορά στην υφή, οι λιθότυποι παρουσιάζουν ρωγμές αδρές λεπτές, κάθετες ή παράλληλες στη στρώση.

(γ) Στη συμπεριφορά κατά τη θραύση.

Οι κατηγορίες στις οποίες διαχωρίζονται μακροσκοπικά οι λιγνίτες είναι:

(α) θεμελιώδεις

(β) ξυλιτικοί

(γ) φουζιτικοί

(δ) πλούσιοι σε ανόργανα συστατικά

- Θεμελιώδης λιγνίτης (matrix coal).

Αποτελείται από λεπτοκλαστική χουμώδη μάζα, είναι ομοιογενής και έχει χρώμα κίτρινο / καφέ σκούρο. Στην κύρια μάζα απαντώνται και μεγαλύτερα φυτικά θραύσματα και υπολείμματα.

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 ως '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 ως 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 ξυλιτικά 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 (Παπανικολάου, 2004).

Τα μακροσκοπικά λιγνιτικά χαρακτηριστικά, όπως είναι φυσικό, στη μορφή που εντοπίζονται στα πρηνή των ορυχείων, δε μας επιτρέπουν να βγάλουμε σίγουρα συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των λιγνιτών στις διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Για αυτό συμπληρώνονται από εργαστηριακές έρευνες και παρατηρήσεις.

2.5.2. Μικροσκοπικά χαρακτηριστικά

Τα λιγνιτικά φυτόκλαστα διακρίνονται με το μικροσκόπιο λόγω της μορφολογίας τους και των οπτικών ιδιοτήτων τους. Εμφανίζουν διαφορές στη σκληρότητα, στα χημικά χαρακτηριστικά καθώς και στην τεχνολογική τους συμπεριφορά κατά τη χρήση του λιγνίτη.

Από το 1920, προέκυψαν πολλά συστήματα πετρογραφικής ονοματολογίας για τα Οργανικά Δομικά Πετρογραφικά Συστατικά του λιγνίτη (ΟΔΠΣ). Το 1951, η Διεθνής επιτροπή Γαιάνθρακα και Οργανικής Πετρολογίας δημιούργησε ένα διεθνές σύστημα ονοματολογίας όπου τα ΟΔΠΣ κατανέμονται σε τρεις ομάδες βιτρινίτη/χουμινίτη, λειπτινίτη και ινερτινίτη

(α) Ομάδα Χουμινίτη

Τα δομικά συστατικά της κατηγορίας αυτής που αποτελούν την κύρια μάζα των μαλακών λιγνιτών, εμφανίζουν έντονες φυσικοχημικές διαφοροποιήσεις οι οποίες προσδιορίζουν κατά ένα μεγάλο βαθμό την τεχνολογική συμπεριφορά του λιγνίτη. Προέρχονται από ξύλα και τα λείψανά τους. Μέχρι το στάδιο των λιγνιτών τα φυτικά λείψανα υφίστανται περιορισμένη διαγενετική μεταβολή και πίεση, με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η διάκριση πολλών λεπτομερειών.

(β) Ομάδα Λειπτινίτη

Τα φυτόκλαστα αυτά προέρχονται από τον εξωτερικό φλοιό των σπόρων, από γύρη και από ουσίες που παράγονται από τα θαλάσσια φύκη, ρητίνες αιθέρια έλαια και λίπη φυτικής προέλευσης.

(γ) Ομάδα Ινερτινίτη

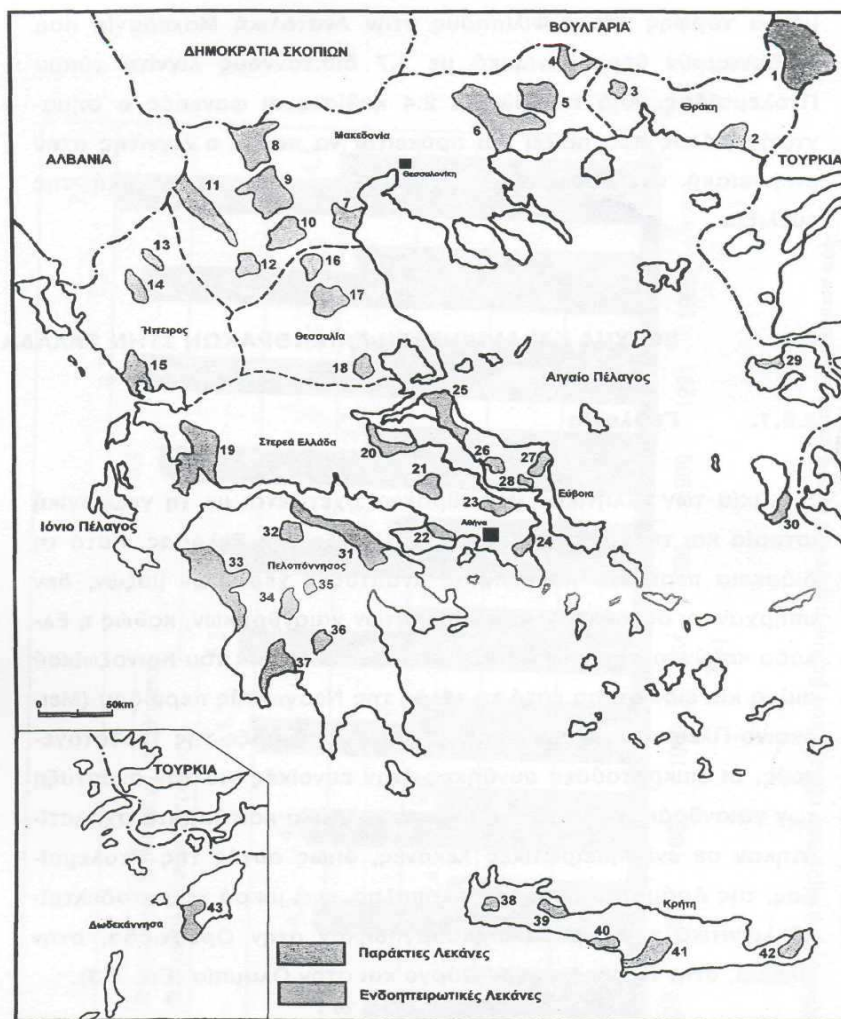
Τα φυτόκλαστα αυτά εμφανίζουν σχετική αδράνεια στις τεχνολογικές επεξεργασίες. Είναι αδιαφανή σε λεπτή τομή και άσπρα ή ανοικτό γκρι σε στιλβωμένη. Προέρχονται από φυτικά υλικά που έχουν υποστεί ισχυρή εξαλλοίωση σε οξειδωτικές συνθήκες στο στάδιο σχηματισμού της τύρφης. Έχουν δηλαδή τα ίδια υλικά προέλευσης με την ομάδα του χουμινίτη αλλά έχουν υποστεί αερόβια ή υπο-αερόβια ασθενή οξείδωση με αποτέλεσμα να απανθρακωθούν μέσω της διαδικασίας που ονομάζεται φουζινιτίωση. (Παπανικολάου, 2004).

| Ομάδα ΟΔΠΣ | Υποομάδα ΟΔΠΣ | ΟΔΠΣ (maceral) | Τύπος ΟΔΠΣ |
|---------------|---|---|--|
| ΒΙΤΡΙΝΙΤΗΣ | ΤΕΛΟΒΙΤΡΙΝΙΤΗ ΧΟΥΜΟΤΕΛΙΝΙΤΗΣ* | ΤΕΛΙΝΙΤΗΣ ΤΕΞΤΙΝΙΤΗΣ* ΚΟΛΛΟΤΕΛΙΝΙΤΗΣ | ΤΕΞΤ-ΟΥΛΜΙΝΙΤΗΣ* ΕΥΟΥΛΜΙΝΙΤΗΣ* |
| | ΝΤΕΤΡΟΒΙΤΡΙΝΙΤΗΣ ΧΟΥΜΟΝΤΕΤΡΙΝΙΤΗΣ* | ΒΙΤΡΟΝΤΕΤΡΙΝΙΤΗΣ ΑΤΤΡΙΝΙΤΗΣ ΝΤΕΝΖΙΝΙΤΗΣ ΚΟΛΛΟΝΤΕΤΡΙΝΙΤΗΣ | |
| | ΓΕΛΟΒΙΤΡΙΝΙΤΗΣ ΧΟΥΜΟΚΟΛΛΙΝΙΤΗΣ* | ΓΕΛΙΝΙΤΗΣ ΚΟΡΠΟΤΕΛΙΝΙΤΗΣ ΚΟΡΠΟΧΟΥΜΙΝΙΤΗΣ* | ΕΥΓΕΛΙΝΙΤΗΣ ΠΟΡΙΓΕΛΙΝΙΤΗΣ* ΦΛΟΜΠΑΦΙΝΙΤΗΣ |
| ΛΕΙΠΤΙΝΙΤΗΣ | | ΣΠΟΡΙΝΙΤΗΣ ΚΟΥΤΙΝΙΤΗΣ ΡΕΖΙΝΙΤΗΣ ΣΟΥΜΠΕΡΙΝΙΤΗΣ ΑΛΓΙΝΙΤΗΣ ΕΞΟΥΔΑΤΙΝΙΤΗΣ ΦΘΟΡΙΝΙΤΗΣ ΒΙΤΟΥΜΕΝΙΤΗΣ ΛΕΙΠΤΟΝΤΕΤΡΙΝΙΤΗΣ | |
| ΙΝΕΡΤΙΝΙΤΗΣ | ΤΕΛΟ- ΙΝΕΡΤΙΝΙΤΗΣ ΓΕΛΟ – ΙΝΕΡΤΙΝΙΤΗΣ ΝΤΕΤΡΟ – ΙΝΕΡΤΙΝΙΤΗΣ | ΦΟΥΖΙΝΙΤΗΣ ΗΜΙΦΟΥΖΙΝΙΤΗΣ ΜΑΚΡΙΝΙΤΗΣ ΣΚΛΗΡΟΤΙΝΙΤΗΣ ΙΝΕΡΤΟΝΤΕΤΡΙΝΙΤΗΣ | |

Πίνακας 2.1: Ταξινόμηση Οργανικών Δομικών Πετρογραφικών Συστατικών (ΟΔΠΣ-macerals) σε ομάδες και υποομάδες σύμφωνα με τη Διεθνή επιτροπή Γαιάνθρακα και Οργανικής Πετρολογίας.
(Παπανικολάου, Παρασκευόπουλος, 2001).

2.6. ΑΠΟΘΕΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ

Η ετήσια παραγωγή του λιγνίτη στη χώρα μας, είναι 57.4 εκ. τόνοι. Σχεδόν όλος ο λιγνίτης καταναλώνεται εγχώρια από την Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού (Δ.Ε.Η). Στον χάρτη φαίνονται οι κυριότερες λιγνιτοφόρες λεκάνες της Ελλάδας.



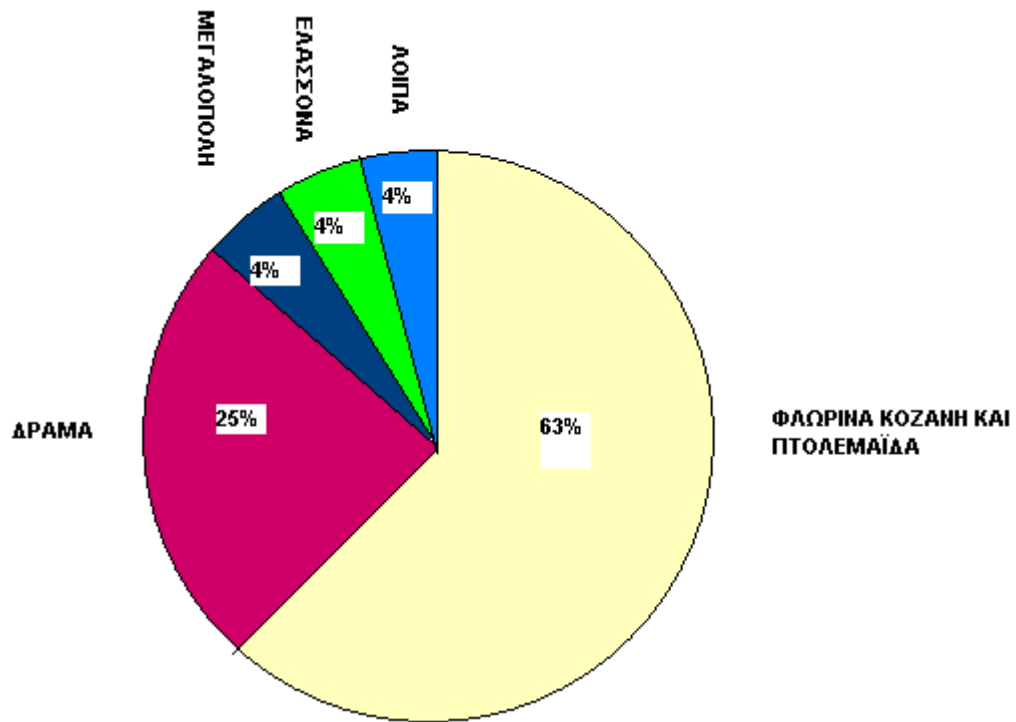
Εικόνα 6. Χάρτης της Ελλάδας όπου παρουσιάζονται οι θέσεις των λιγνιτοφόρων λεκανών

1.Ορεστιάδα, 2.Αλεξανδρούπολη, 3.Κοτύλη, 4.Παρανέστι, 5.Δράμα, 6.Σέρρες, 7.Μοσχοπόταμος, 8.Φλώρινα, 9.Πτολεμαΐδα, 10.Κοζάνη, 11.Μεσοελληνική Μολάσση, 12.Γρεβενά 13.Φλύσχης Ιονίου, 14.Ιωάννινα, 15.Πρέβεζα, 16.Ελασσόνα, 17.Λάρισα, 18.Αλμυρός, 19.Αιτωλοακαρνανία, 20.Λοκρίδα, 21.Κωπαΐδα, 22.Μέγαρα, 23. Ορωπός, 24.Ραφήνα, 25.Ισπαιά, 26.Παλιούρα, 27.Κύμη, 28.Αλιβέρι, 29.Λέσβος, 30.Χίος, 31.Κόρινθος, 32.Καλάβρυτα, 33.Πύργος-Ολυμπία, 34.Μεγαλόπολη, 35.Ασέα, 36.Πέλανα, 37.Μεσσηνία, 38.Κάνδανος, 39.Χανιά, 40.Πλακιάς, 41.Ηράκλειο, 42.Λασιθήι, 43.Ρόδος

Σχήμα 2.3. Λιγνιτοφόρες λεκάνες της Ελλάδας

(Παπανικολάου, Παρασκευόπουλος,2001).

Τα συνολικά απολήψιμα λιγνιτικά αποθέματα των σημαντικότερων περιοχών της Ελλάδας όπως φαίνεται στο σχήμα ανέρχονται σε 3842 εκ. τόνους. Η εκμετάλλευση λαμβάνει χώρα κυρίως σε μια εκτεταμένη περιοχή στην Πτολεμαΐδα και το Αμύνταιο στη Δυτική Μακεδονία και στη Μεγαλόπολη στην Πελοπόννησο (Παπανικολάου, Παρασκευόπουλος, 2001).



Σχήμα 2.4. Σχηματική αναπαράσταση των απολήψιμων αποθεμάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΠΟΛΦΟΙ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

3.1.ΓΕΝΙΚΑ

Οι γεωτρητικοί πολφοί μπορούν να διακριθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες:

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

Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα ρευστά γεώτρησης είναι αυτά με βάση το νερό (water based muds- WBM). Τα ρευστά με βάση το πετρέλαιο (oil based muds - OBM) είναι γενικά περισσότερο ακριβά και απαιτούνται εξειδικευμένοι τρόποι αντιμετώπισης κατά την γεώτρηση και μετά την γεώτρηση για περιβαλλοντικούς λόγους. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε φρέατα με υψηλές θερμοκρασίες και όπου τα πετρώματα των φρεάτων παρουσιάζουν προβλήματα με WBM. Η χρήση αερίων ως ρευστών γίνεται όταν αντιμετωπίζονται πετρώματα που είναι συμβατά με αέρια και μη διαπερατά. Μίγματα αερίων - υγρών ως ρευστά γεώτρησης χρησιμοποιούνται όταν αντιμετωπίζονται κοιτάσματα που παράγουν αρκετή ποσότητα νερού.

Τα ρευστά γεωτρήσεων με βάση το νερό αποτελούνται από ένα μίγμα στερεών, υγρών και χημικών, με το νερό να είναι η συνεχής φάση. Μερικά από τα στερεά αντιδρούν με το νερό και τα χημικά και γι' αυτό αναφέρονται ως ενεργά στερεά. Τα περισσότερα είναι υδρόφιλοι άργιλοι. Τα χημικά που προστίθενται ρυθμίζουν την δράση αυτών των στερεών ώστε να επιτυγχάνονται ιδιότητες μέσα σε συγκεκριμένα όρια. Τα υπόλοιπα στερεά δεν αντιδρούν σε μεγάλο βαθμό με το νερό και τα χημικά και γι' αυτό καλούνται ανενεργά στερεά. Το ειδικό τους βάρος ποικίλλει και αυτό δημιουργεί προβλήματα και στην ανάλυση περιεκτικότητας αλλά και στη ρύθμιση των στερεών αυτών. Το πετρέλαιο που προστίθεται σε WBM γαλακτωματοποιείται

στην συνεχή φάση του νερού και διατηρείται ως μικρές ασυνεχείς σταγόνες. Ένα τέτοιο μίγμα αναφέρεται συχνά ως γαλάκτωμα πετρελαίου - νερού (oil-in-water emulsion).

Τα OBM έχουν παρόμοια σύσταση με τα WBM με την διαφορά ότι η συνεχή φάση είναι το ντίζελ και το νερό λειτουργεί ως γαλάκτωμα υπό μορφή σταγόνων στην συνεχή φάση. Τέτοια μίγματα αναφέρονται ως γαλάκτωμα νερού σε πετρέλαιο (water-in-oil-emulsion). Μία ακόμη μεγάλη διαφορά είναι ότι όλα τα στερεά θεωρούνται ως ανενεργά διότι δεν αντιδρούν με το πετρέλαιο (Κελεσίδης, 2001).

Τέλος οι πολφοί συνθετικής βάσης, αποτελούνται από εστέρες ή διαιθέρες ενώ αυτοί που προέκυψαν αργότερα αποτελούνται από ισομερείς ολεφίνες. Αν και τα τεχνικά και περιβαλλοντικά τους πλεονεκτήματα είναι πολλά, έχουν πολύ μεγάλο κόστος (Πεταβρατζή, 2000).

3.2. ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

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

Το νερό ήταν το πρώτο ρευστό γεώτρησης. Ρόλος του ήταν να διαβρέχει τα πετρώματα και να τα μαλακώνει ώστε να γίνεται πιο εύκολα η εξόρυξη. Γρήγορα όμως έγινε κοινά αντιληπτό, πως η προσθήκη λάσπης στο νερό το έκανε αποδοτικότερο στη γεώτρηση. Έγινε επίσης κατανοητό, πως κάποιοι σχηματισμοί παρήγαγαν καλύτερη λάσπη από ότι άλλοι. Αρχικά οι λάσπες ήταν φυσικές. Ήταν μίγματα νερού και θραυσμάτων πετρωμάτων που παράγονταν, ή προέρχονταν από υλικά που βρίσκονταν κοντά στο σημείο της γεώτρησης. Τα προστιθέμενα υλικά ήταν αρχικά παραπροϊόντα άλλων διεργασιών και χαμηλού κόστους.

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

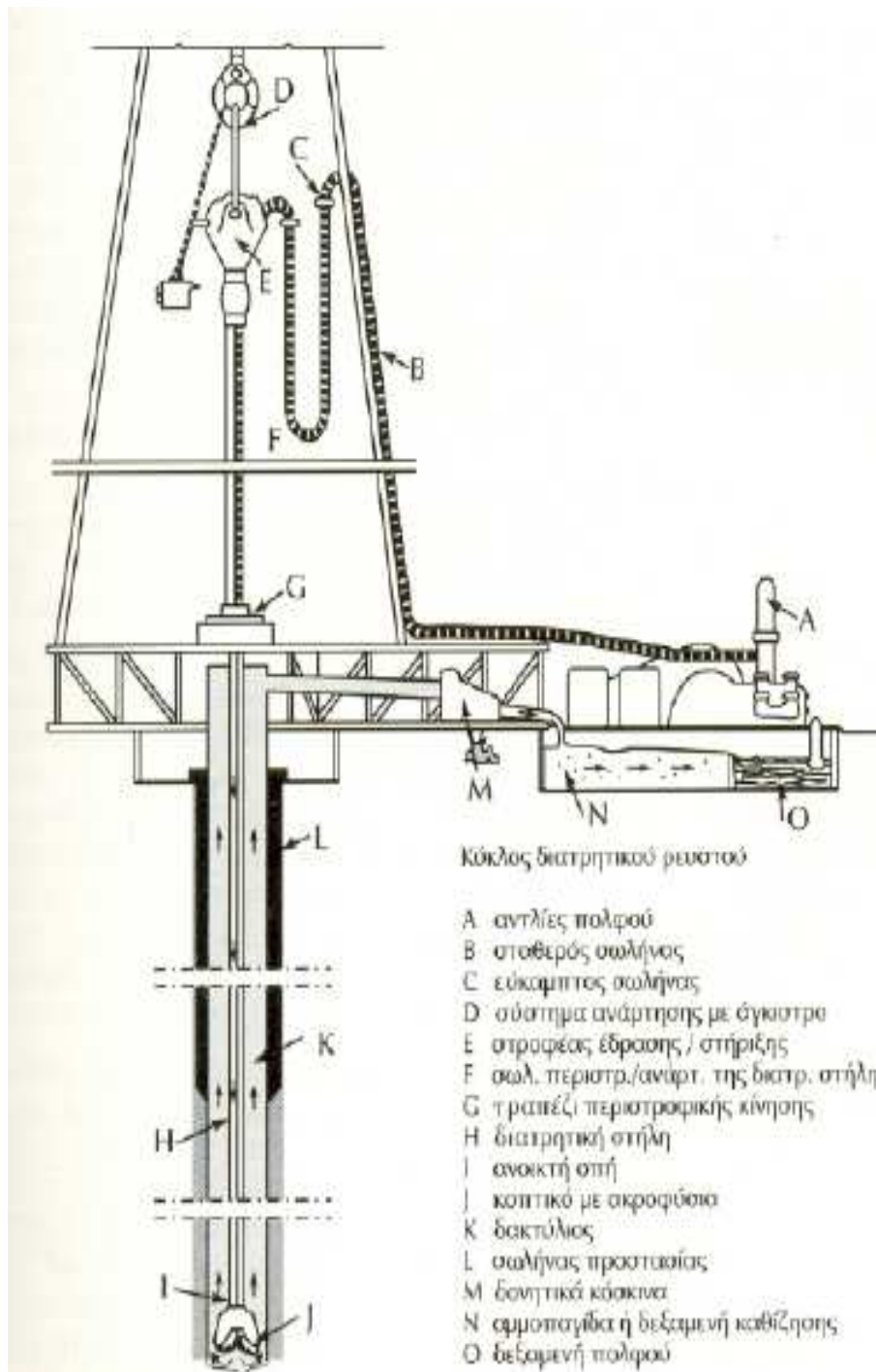
Οι αιφνίδιες και βίαιες διαφυγές των ρευστών του σχηματισμού από τα τοιχώματα, ήταν κάτι που συνέβαινε συχνά στα πρώτα βήματα της περιστροφικής διάτρησης. Η εισαγωγή του πολφού που περιείχε υλικά πρόσθεσης βάρους, στις αρχές της δεκαετίας του '20, ήταν από τους πιο σημαντικούς σταθμούς στην ανάπτυξη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

Όσο μεγαλύτερη γινόταν η βεβαιότητα της συμβολής του πολφού στην ασφαλέστερη, γρηγορότερη και πιο οικονομική διάτρηση, τόσο πιο μεθοδική ήταν η έρευνα στη σύνθεση των διατρητικών ρευστών. Αποτέλεσμα των ερευνών αυτών ήταν η σημαντική ανακάλυψη, πως το κολλοειδές περιεχόμενο των πολφών ήταν πρωταρχικής σημασίας για τον καθορισμό της ποιότητας του. Στη δεκαετία που ακολούθησε μετά την εισαγωγή των υλικών αύξησης βάρους, αναπτύχθηκε η χρήση εμπλουτισμένων κολλοειδών πρόσθετων μέσα στον πολφό, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για περαιτέρω βελτίωση της ποιότητας και της απόδοσης του.

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

στην επιφάνεια μέσω του δακτυλίου που δημιουργείται μεταξύ των τοιχωμάτων του ανοίγματος και της διατρητικής στήλης.

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



Σχήμα 3.1. Σχηματική αναπαράσταση κίνησης διατρητικού ρευστού

Σήμερα ανάμεσα στους κύριους στόχους που θέτουν οι μηχανικοί των διατρητικών ρευστών, είναι η αύξηση και ο έλεγχος του περιεχομένου των κολλοειδών και του βαθμού διασποράς τους στον πολφό. Η επιτυχία σ' αυτόν τον τομέα φαίνεται ξεκάθαρα με σύγκριση των γεωτρήσεων που γίνονταν πριν

από δέκα, δεκαπέντε και είκοσι χρόνια με αυτές που γίνονται σήμερα, όσον αφορά κύρια στο βάθος του πηγαδιού και στη διάμετρο της οπής του.
(Παπαδοπούλου, 20000).

3.3. ΒΑΣΙΚΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ ΤΩΝ ΠΟΛΦΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

Οι βασικές λειτουργίες των πολφών γεωτρήσεων είναι οι εξής:

1. Απομάκρυνση των θραυσμάτων από τον πυθμένα του πηγαδιού στην επιφάνεια
2. Ψύξη και λίπανση του κοπτικού άκρου και της διατρητικής στήλης
3. Επίστρωση των τοιχωμάτων του πηγαδιού με ένα στεγανοποιητικό στρώμα
4. Έλεγχος των υποεπιφανειακών πιέσεων
5. Κατακράτηση των αιωρούμενων θραυσμάτων και των υλικών πρόσθεσης βάρους όταν διακόπτεται η κυκλοφορία και η διευκόλυνση στην αφαίρεση των θραυσμάτων και της άμμου στην επιφάνεια
6. Ελάττωση του ρυθμού διάβρωσης
7. Στήριξη ενός μέρους του βάρους του διατρητικού σωλήνα και του σωλήνα προστασίας
8. Μείωση στο ελάχιστο οποιωνδήποτε δυσμενών επιδράσεων πάνω στον σχηματισμό που πρόσκειται στο πηγάδι
9. Διασφάλιση της μέγιστης πληροφόρησης για τους διατρηθέντες σχηματισμούς
- 10.Μεγιστοποίηση των ρυθμών διάτρησης (Παπαδοπούλου,2000).

3.3.1. Απομάκρυνση των θραυσμάτων

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

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

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

Το ιξώδες εξαρτάται από τη συγκέντρωση την ποιότητα και τη διασπορά των αιωρούμενων στερεών, οπότε ρυθμίζεται έτσι ώστε η ικανότητα μεταφοράς των θραύσματα να αυξάνεται.

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

Είναι φανερό ότι η απομάκρυνση των θραυσμάτων είναι σημαντική. Συσσώρευσή τους μπορεί να φράξει το δακτύλιο ή να αυξήσει την πυκνότητα του ρευστού.

3.3.2. Ψύξη και λίπανση

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

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της διάτρησης, αναπτύσσεται ένα σημαντικό ποσό θερμότητας, λόγω της τριβής μεταξύ του μετάλλου και του πετρώματος με αποτέλεσμα να μειώνεται η διάρκεια ζωής του κοπτικού άκρου. Προσθετικά λειτουργεί και η θερμοκρασία της γης που αυξάνεται με το βάθος. Από έρευνες και μελέτες έχει διαπιστωθεί ότι η γηγενής θερμότητα δεν είναι σταθερή για το ίδιο βάθος σε όλη τη γη. Έτσι, ως αναλογικό μέτρο καθορίστηκε η γεωθερμική βαθμίδα ή γεωθερμίδα. Έχει διαπιστωθεί ότι η γεωθερμίδα σε μέσο όρο είναι 1°C κάθε 33m.

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

3.3.3. Στεγανοποίηση των τοιχωμάτων του πηγαδιού.

Κατά την γεώτρηση, υπάρχει κίνδυνος να χαθεί ρευστό μέσα στο σχηματισμό. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο όταν διατρώνται πορώδη πετρώματα. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με την επίστρωση ενός στρώματος χαμηλής διαπερατότητας (filter cake). Τα υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι μπεντονίτης, συνθετικά πολυμερή, αμυλούχες ουσίες, διαλυτικά (thinners), αντι-συσσωρευτικά (deflocculants). Η ρύθμιση επιτυγχάνεται με τους εξής τρόπους:

- Εναποτίθεται στα τοιχώματα του φρέατος ένα υπόστρωμα από αντι-συσσωρευτικά υλικά και δημιουργείται ένα λεπτό, λιγότερο διαπερατό στρώμα.

- Ο ρυθμός διήθησης ελαττώνεται εάν το ιξώδες του διηθήματος είναι υψηλό, συνεπώς υλικά που αυξάνουν το ιξώδες του ρευστού υποβοηθούν.
- Με τη δημιουργία συμπιεστού υποστρώματος που συμπιέζεται, παραμορφώνεται, εισχωρεί και κλείνει τους πόρους των πετρωμάτων.

3.3.4. Έλεγχος υποεπιφανειακών τάσεων

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

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

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

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

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

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

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

3.3.6.Έλεγχος του ρυθμού διάβρωσης

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

3.3.7.Υποστήριξη του βάρους της διατρητικής στήλης

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

3.3.8 Προστασία των σχηματισμών

Κατά τη διαδικασία της διάτρησης το πέτρωμα εκτίθεται στο διατρητικό ρευστό. Το διατρητικό ρευστό πρέπει να σχεδιαστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε οι αντιδράσεις μεταξύ αυτού και του πετρώματος να μην είναι ισχυρές και προκαλέσουν καθιζήσεις των τοιχωμάτων του πηγαδιού.

Η ευαισθησία των πετρωμάτων στο νερό μπορεί να αντιμετωπιστεί με αλλαγές στη σύσταση του διατρητικού ρευστού. Προκειμένου να υπάρξει μέγιστη προστασία του σχηματισμού πρέπει να συνυπάρχουν οι βέλτιστες τιμές των ιδιοτήτων του διατρητικού ρευστού. Σε ορισμένες όμως περιπτώσεις οι τιμές αυτές μετριάζονται για να εξυπηρετηθούν άλλες βασικές ανάγκες.

3.3.9. Μέγιστη δυνατή διασφάλιση των πληροφοριών του πηγαδιού

Η συνεχής ανάλυση των θραυσμάτων πετρωμάτων και των ρευστών πετρωμάτων που βρίσκονται στην λάσπη γεώτρησης μπορούν να παρέχουν πληροφορίες για τα πετρώματα του υπεδάφους.

Οι πληροφορίες που συλλέγονται με την παρακολούθηση της λάσπης αποτυπώνονται γραφικά στην Διαγραφή λάσπης παρουσιάζοντας πληροφορίες σχετικά με τη λιθολογία των στρωμάτων που διανοίγονται και με τα ρευστά των πετρωμάτων που ανιχνεύονται στη λάσπη. Η γνώση της σύστασης και συγκέντρωσης των ρευστών πετρωμάτων που ανιχνεύονται στη λάσπη βοηθά στην ανίχνευση κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου καθώς και στην ανίχνευση ανώμαλων πιέσεων (Κελεσίδης, 2001).

3.3.10. Μεγιστοποίηση των ρυθμών διάτρησης

Το διατρητικό ρευστό έχει στενή επαφή με το διατρηθέν πέτρωμα και οι ιδιότητες του έχουν σημαντική επίδραση στο ρυθμό διάτρησης.

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζει το ρυθμό διάτρησης είναι η διαφορά της πίεσης μεταξύ της υδροστατικής που ασκεί η στήλη του υδροστατικού ρευστού και της πίεσης των υγρών και αερίων που υπάρχουν στο πέτρωμα. Μεγάλη πυκνότητα του διατρητικού ρευστού σημαίνει μεγάλη σταθερότητα στα τοιχώματα του πηγαδιού αλλά και αργός ρυθμός διάτρησης.

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

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

- χαμηλό ιξώδες
- χαμηλό περιεχόμενο σε στερεά

Η σπουδαιότητα της χαμηλής περιεκτικότητας σε στερεά στο διατρητικό ρευστό αυξάνεται, καθώς τα στερεά επιδρούν αρνητικά στο ρυθμό διάτρησης. Έτσι, αρκετά διαλύματα πολυμερών έχουν χρησιμοποιηθεί για να εκπληρώσουν μερικές από τις λειτουργίες που πραγματοποιούν οι αντίστοιχοι άργιλοι, όπως ο μπεντονίτης. Οι μετατροπές αυτές στη σύσταση

του διατρητικού ρευστού αυξάνουν το κόστος των ρευστών. Αυτό αντισταθμίζεται από τους μικρότερους χρόνους διάτρησης και από το μικρότερο αριθμό χρησιμοποιούμενων κοπτικών.

Η σταθερότητα των τοιχωμάτων του πηγαδιού εξαρτάται άμεσα από το χρόνο, καθώς τα συνθλιβόμενα πετρώματα χρειάζονται συγκεκριμένο χρόνο να ανταποκριθούν φυσιολογικά σε μια αλλαγή καθεστώτος πιέσεων. Ο χρονικός αυτός παράγοντας είναι συχνά κρίσιμος, γιατί αυτό που απαιτείται τελικά είναι στέρεα τοιχώματα που θα επιτρέψουν να τοποθετηθεί το σωλήνωση και να τσιμεντωθεί.

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

3.4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΠΟΛΦΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

3.4.1. Η απουσία άμμου και αποξεστικών σωματιδίων

Όταν υπάρχουν επιβλαβείς προσμίξεις σωματιδίων που έχουν αποξεθεί από τα τοιχώματα σε ικανή ποσότητα μέσα στη μάζα του πολφού, τότε οι περισσότερες λειτουργίες του πολφού αναστέλλονται. Με την παρουσία τους, μειώνεται το κολλοειδές περιεχόμενο του πολφού, οπότε δεν

βελτιώνεται το ιξώδες του και αυξάνεται ο όγκος του διηθήματος που περνά στο σχηματισμό, όπως και το πάχος του filter cake στα τοιχώματα, με τα οποία δημιουργεί μια υπερβολική τριβή. Επίσης σχηματίζεται μέσα του ένα ανεπιθύμητο φορτίο, που θα πρέπει να αντικατασταθεί από επιθυμητό κολλοειδές υλικό ή από επιθυμητό υλικό πρόσθεσης βάρους.

3.4.2. Το επαρκές περιεχόμενο κολλοειδούς

Τα κολλοειδή είναι ουσίες που αποτελούνται από εξαιρετικά μικρά σωματίδια, των οποίων οι διαστάσεις συνήθως κυμαίνονται από 0.0005 έως 0.5 μm . Τα περισσότερα από τα κολλοειδή μέσα στους πολφούς είναι διασπορές. Δηλαδή, αποτελούνται από σωματίδια με κολλοειδείς διαστάσεις, τα οποία είναι διασπαρμένα σε μια συνεχή υγρή φάση. Θα πρέπει όμως να γίνει διάκριση μεταξύ των αιωρούμενων μικρών σωματιδίων, όπως της ιλύος, αλλά και των μοριακών διασπορών, όπως των πραγματικών διαλυμάτων (π.χ. άλας μέσα στο νερό). Αν και πολλά υλικά μπορεί να κονιοποιηθούν μέχρι να αποκτήσουν κολλοειδείς διαστάσεις, μερικές μόνον όπως η άργιλος, μπορεί σωστά να χαρακτηρισθούν κολλοειδείς ουσίες, ακόμα και με απουσία κάθε διασπαρτικού μέσου. Αυτό αποδίδεται στην ύπαρξη σωματιδίων τους κολλοειδούς μεγέθους ακόμα και σε συμπαγή πετρώματα.

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

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

- **Σχέση ιξώδους και ποσοστού στερεών.**

Κολλοειδή υλικά όπως ο μπεντονίτης παράγουν μεγάλο όγκο πολφού συγκεκριμένου ιξώδους για ένα συγκριτικά μικρό ποσοστό στερεών. Η σχέση ιξώδους - ποσοστού στερεών μπορεί να μεταβληθεί σημαντικά με τη χρήση χημικών διασπαρτικών ή αραιωτικών, καθώς και με την παρουσία επιβλαβών ηλεκτρολυτών. Αντίθετα με τους μπεντονίτες, οι άργιλοι υψηλής περιεκτικότητας σε άμμο και σε αδρανή-κολλοειδή στερεά, θα έχουν μια συγκριτικά χαμηλή απόδοση σε όγκο πολφού μετρούμενη σε βαρέλια πολφού συγκεκριμένου ιξώδους ανά τόνο ξηρής αργίλου. Αυτοί οι άργιλοι αποδεικνύεται συνήθως ότι δεν είναι οικονομικοί, εφόσον το κόστος τους υπολογίζεται ανάλογα με το κόστος ενός βαρελιού πολφού.

- **Ιδιότητες διήθησης.**

Τα διατρητικά ρευστά που είναι πλούσια σε κολλοειδή μπεντονιτικού ή οργανικού τύπου, έχουν καλές ιδιότητες διήθησης. Δηλαδή θα αποθέτουν ένα λεπτού πάχους και χαμηλής διαπερατότητας filter cake στα τοιχώματα του πηγαδιού, επιτρέποντας μόνο σε ένα μικρό σχετικά ποσό διηθήματος να περάσει μέσα στο σχηματισμό.

- **Ικανότητα μεταφοράς ή φόρτισης.**

Λαμβανομένου υπόψη ότι το ιξώδες ενός πολφού αυξάνει με την παρουσία λειοτριβημένων στερεών και άλλων αδρανών κολλοειδών υλικών, εκτιμάται ότι το φορτίο που μπορεί να μεταφέρει ένας δεδομένης σύνθεσης πολφός, καθορίζεται από το άνω όριο του ιξώδους του που μπορεί να γίνει

αποδεκτό. Ένας πολφός φτιαγμένος από εμπλουτισμένα κολλοειδή υλικά, μπορεί να δεχθεί περισσότερα λεπτά θραύσματα και άλλα αδρανή υλικά πριν φθάσει στο οριακό του ιξώδες από έναν που περιέχει μεγάλο ποσοστό λεπτών αλλά μη κολλοειδών στερεών. Επιπρόσθετα, πολφός με υψηλό ποσοστό αδρανών στερεών είναι δύσκολο να αραιωθεί ώστε να αποκτήσει εκ νέου χαμηλότερο ιξώδες, χωρίς να υπάρξουν μεγάλες απώλειες σε ιδιότητες κολλοειδούς, αφού το νερό που θα προστεθεί για την αρραίωση θα μειώσει το ποσοστό της περιεκτικότητας των στερεών. Ένας μάλιστα πολφός με περιεκτικότητα κοντά στα όρια της ικανότητας μεταφοράς του, θα επιβραδύνει το ρυθμό διείδυσης.

- **Θιξοτροπικές Ιδιότητες.**

Ο διατρητικός πολφός πρέπει να περιέχει επαρκές ποσοστό κολλοειδούς υλικού που να μπορεί να σχηματίσει gel. Έτσι όταν διακοπεί η κυκλοφορία, ο πολφός πηκτώνει (δηλαδή αυξάνεται η αντοχή του σε διάτμηση) και αποτρέπει την καθίζηση των θραυσμάτων και τη συγκέντρωση τους γύρω από το κοπτικό και τη διατρητική στήλη και την ενδεχόμενη επικόλληση σ' αυτά.

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

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

- **Σταθεροποίηση χαλαρών σχηματισμών (αμμώδεις, χαλκώδεις και κρυσταλλικά μη σταθεροί σχηματισμοί)**

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

- **Επιδεκτικότητα σε χημική επεξεργασία.**

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

- **Καλές λιπαντικές ιδιότητες του πολφού**

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

- **Απόδοση σε θερμοκρασία.**

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

3.4.3. Πυκνότητα

Το υδροστατικό ύψος μιας στήλης διατρητικού πολφού εξαρτάται από το ειδικό βάρος ή την πυκνότητα του πολφού.. Η διαφορά μεταξύ των υδροστατικών πιέσεων που ασκούνται από τον πολφό και των πιέσεων του σχηματισμού, δίνουν το συντελεστή ασφαλείας. Ο συντελεστής ασφαλείας μπορεί να αυξάνεται με την αύξηση του βάρους του πολφού. Όπως ακόμη

έχει προαναφερθεί, πολφοί μεγάλης πυκνότητας μπορούν να αποτρέπουν την καθίζηση σε πολλούς σχηματισμούς.

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

Το πιο συχνά προστιθέμενο συστατικό είναι ο βαρίτης (BaSO_4). Πρόκειται για ένα αδιάλυτο στερεό, πυκνότητας 4.2 gr/cm^3 . Όταν είναι αρκετά λεπτόκοκκος (σκόνη), 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 του 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.

3.4.4 Το pH του διατρητικού πολφού

Το pH καθορίζει το βαθμό αλκαλικότητας ή οξύτητας ενός διαλύματος. Η μέτρηση του pH ενός πολφού συχνά βοηθά στη διάγνωση και στον καθορισμό της σωστής μεθόδου επεξεργασίας του. Πολλοί πολφοί είναι σχεδιασμένοι για να αποδίδουν καλύτερα κάτω από ορισμένο pH. Με τέτοιους πολφούς η επεξεργασία απαιτεί μετρήσεις του pH. Στους πολφούς γεωτρήσεων το pH που προτιμάται κυμαίνεται από 8.5 ως 12.5 έτσι ώστε να αποφεύγεται η διάβρωση της διατρητικής στήλης και της σωλήνωσης.

3.4.5. Το άλας και άλλοι σχετικοί ηλεκτρολύτες

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

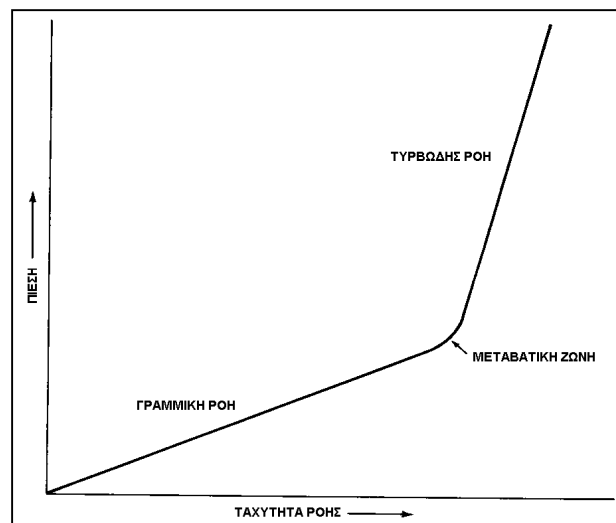
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΡΕΟΛΟΓΙΑ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το τμήμα της φυσικής που ασχολείται με τη μελέτη της παραμόρφωσης και τη ροή των σωμάτων ονομάζεται ρεολογία. Ροομετρία είναι η μέτρηση του ποσοστού και του βαθμού παραμόρφωσης ή ροής κάτω από εφαρμοζόμενη δύναμη.

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

- Γραμμική ροή σε χαμηλές ταχύτητες ροής. Η ροή είναι στρωτή και η πίεση σε σχέση με την ταχύτητα ροής εξαρτάται από το ιξώδες του ρευστού.
- Τυρβώδης ροή σε υψηλές ταχύτητες. Στην περίπτωση αυτή η ροή δεν είναι στρωτή και εξαρτάται από τις ιδιότητες αδράνειας του ρευστού σε κίνηση (Κελεσίδης, 2004).



Σχήμα 4.1. Απεικόνιση γραμμικής και τυρβώδους ροής

4.2 ΡΕΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

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

4.2.1. Νευτώνεια ρευστά

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

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$$

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

Γραφικά η συμπεριφορά των Νευτώνειων ρευστών παρουσιάζεται σε διάγραμμα ρυθμού διάτμησης – διατμητικής τάσης, με μια ευθεία γραμμή που περνά από την αρχή των αξόνων. Η κλίση της γραφικής αυτής παράστασης, δίνει το ιξώδες μ . Τυπική γραφική παράσταση ενός παχύρρευστου (B) και ενός λεπτόρρευστου υγρού (A) φαίνεται στο σχήμα 4.2. Τα αέρια και αρκετά υγρά (π.χ. νερό, μελάνι, μέλι) είναι Νευτώνεια ρευστά

4.2.2. Μη Νευτώνειο ρευστά

Ο λόγος του ρυθμού διάτμησης και της διατμητικής τάσης ενός μη Νευτώνειου ρευστού δεν είναι σταθερός, πράγμα που ισχύει για τα περισσότερα διατμητικά ρευστά. Στο σχήμα 4.2. οι γραμμές A και B παρουσιάζουν ένα Νευτώνειο ρευστό μικρού και μεγάλου ιξώδους αντίστοιχα ενώ οι γραμμές C,D και E παρουσιάζουν ένα μη Νευτώνειο διατμητικό

ρευστό. Τα δύο πιο γνωστά μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν τα μη Νευτώνεια διατρητικά ρευστά είναι το πλαστικό Bingham και το Power Law

4.2.2.1. Μοντέλο πλαστικό Bingham

Το μοντέλο πλαστικό Bingham χρησιμοποιείται επιτυχώς για να περιγράψει τα διατρητικά ρευστά. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2. το Νευτώνειο μοντέλο μοιάζει με το πλαστικό Bingham αφού και τα δύο εκφράζονται από μια ευθεία γραμμή. Το μοντέλο Bingham Plastic όμως τέμνει τον άξονα της διατμητικής τάσης σε ένα σημείο που ονομάζεται τάση διολίσθησης (τ_y). Η κλίση της γραφικής παράστασης διατμητικής τάσης – ρυθμού διάτμησης δίνει το πλαστικό ιξώδες (μ_p).

Ο μαθηματικός τύπος που περιγράφει το μοντέλο αυτό είναι

$$\tau = \tau_y + \mu_p \cdot \dot{\gamma}$$

Οι μονάδες μ_p είναι ίδιες με του νευτώνειου ιξώδους, cP. Η διατμητική τάση έχει μονάδες τάσης, τ_y [=] dynes/cm².

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

4.2.2.2. Μοντέλο Power law

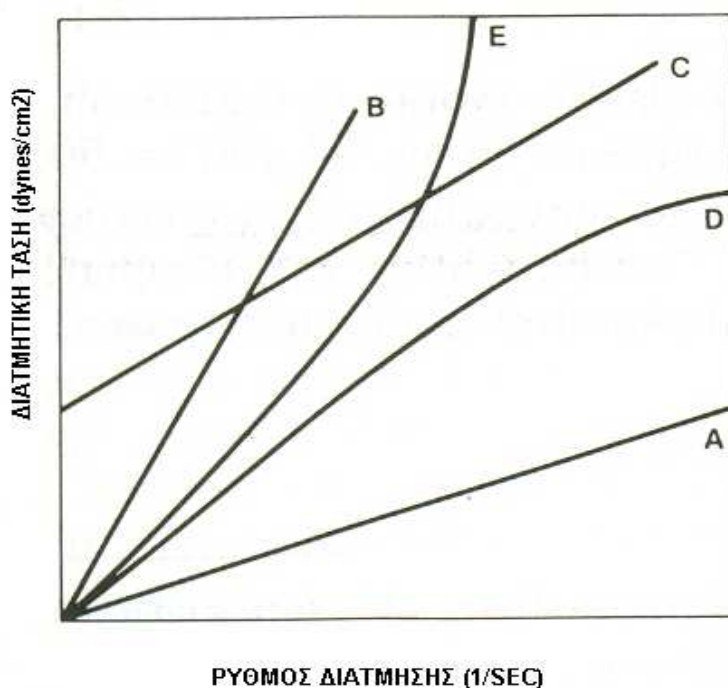
Το μοντέλο Power Law περιγράφει με μεγαλύτερη ακρίβεια τα διατρητικά ρευστά. Τα ρευστά γεώτρησης που περιέχουν πολυμερή και μικρό ή μηδενικό ποσοστό στερεών, σε υψηλότερες βαθμίδες ταχύτητας

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

$$\tau = K \cdot \gamma^n$$

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

Στην ειδική περίπτωση όπου $n=1$ το μοντέλο είναι Νευτώνειο . Αν n μικρότερο της μονάδας τότε η γραφική παράσταση είναι η D και το ρευστό ονομάζεται ψευδοπλαστικό. Η γραφική παράσταση E παριστάνει την περίπτωση όπου το n είναι μεγαλύτερο της μονάδας και το ρευστό ονομάζεται εκτατό.



A= Νευτώνειο παχύρρευστο

B= Νευτώνειο λεπτόρρευστο

C= Πλαστικό Bingham

D= Ψευδοπλαστικό

E= Εκτατό

Σχήμα 4.2 Καμπύλες ρεολογικών μοντέλων

4.2.2.3. Μοντέλο Herchel- Bulkley

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

Περιγράφεται από τον τύπο :

$$\tau = \tau_y + k \cdot \dot{\gamma}^n$$

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

4.3 Ιξώδες

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

Ο τύπος που περιγράφει το ιξώδες είναι: $\eta = \frac{\text{δύναμη} / \text{επιφάνεια}}{\text{ρυθμός ταχύτητας}}$

Οι μονάδες στο σύστημα SI είναι: $N \cdot s \cdot m^{-2}$ ή $Pa \cdot s$

4.4 Κινηματικό ιξώδες

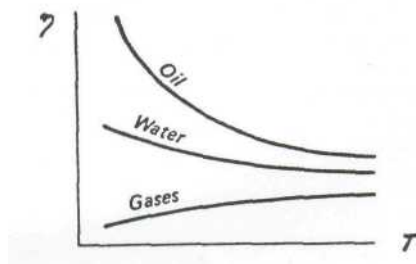
Ο λόγος του απόλυτου ιξώδους ενός ρευστού προς την πυκνότητά του, μ/ρ , χρησιμεύει στη μελέτη της συμπεριφοράς του ρευστού. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται κινηματικό ιξώδες και συμβολίζεται με το γράμμα ν . Το κινηματικό ιξώδες ενός υγρού μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία σε μικρότερη περιοχή απ' ότι το απόλυτο ιξώδες. Η μονάδα του κινηματικού ιξώδους στο σύστημα SI είναι το m^2/s .

4.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟ ΙΞΩΔΕΣ

4.5.1 θερμοκρασία

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

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



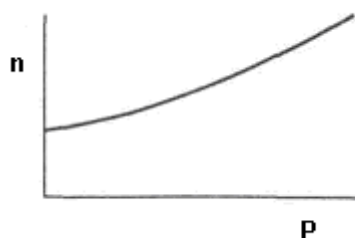
Σχήμα 4.3. Αναπαράσταση σχέσης ιξώδους-θερμοκρασίας

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

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

4.5.2 Πίεση

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



Σχήμα 4.4. Εξάρτηση πίεσης- θερμοκρασίας

4.6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ- ΠΙΕΣΗΣ ΣΤΑ ΡΕΥΣΤΑ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

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

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

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

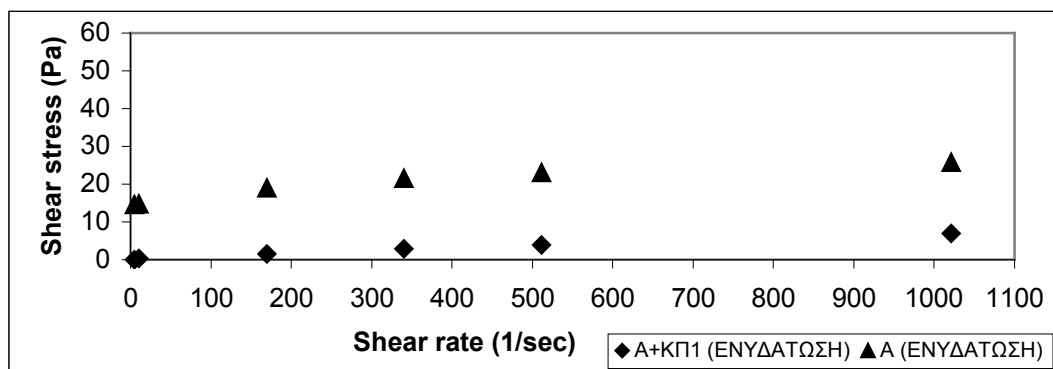
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΡΕΟΛΟΓΙΑΣ

6.1 ΠΟΛΦΟΣ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΛΙΓΝΙΤΗΣ ΣΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ 0,5%

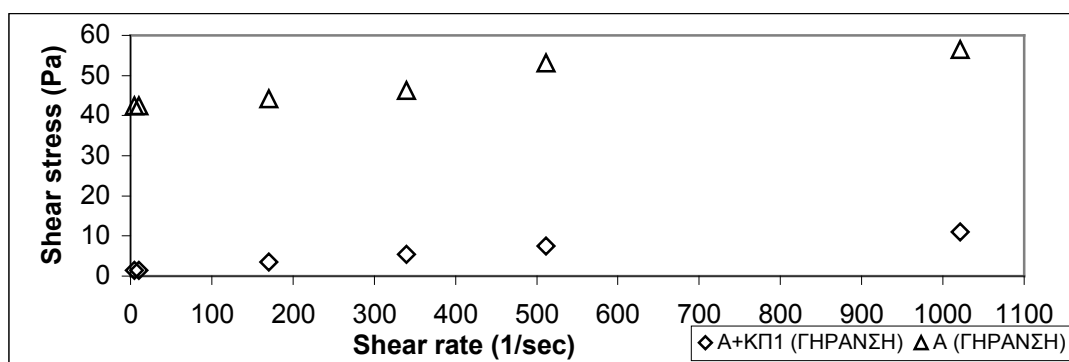
Παρακάτω, παρουσιάζονται τα ρεογράμματα για πολφό βάσης στον οποίο έχει προστεθεί 0,5% λιγνίτης.

6.1.1 Πολφός βάσης και 0,5% κπ1

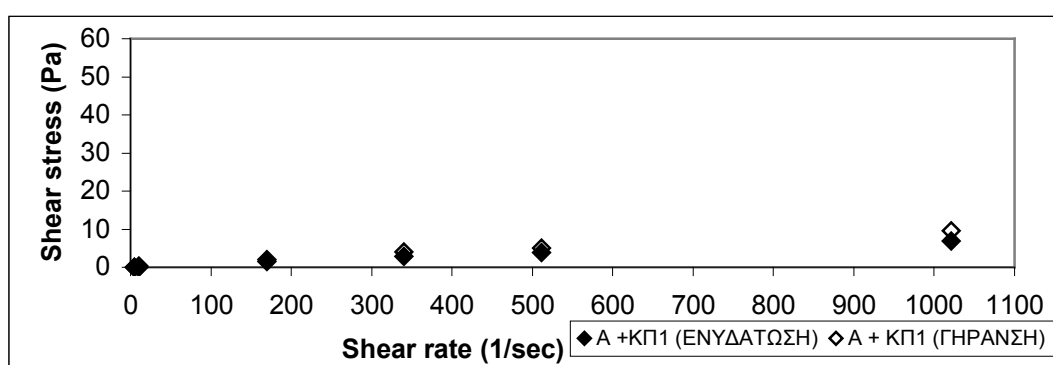
A



B



Γ



Σχήμα 6.1:

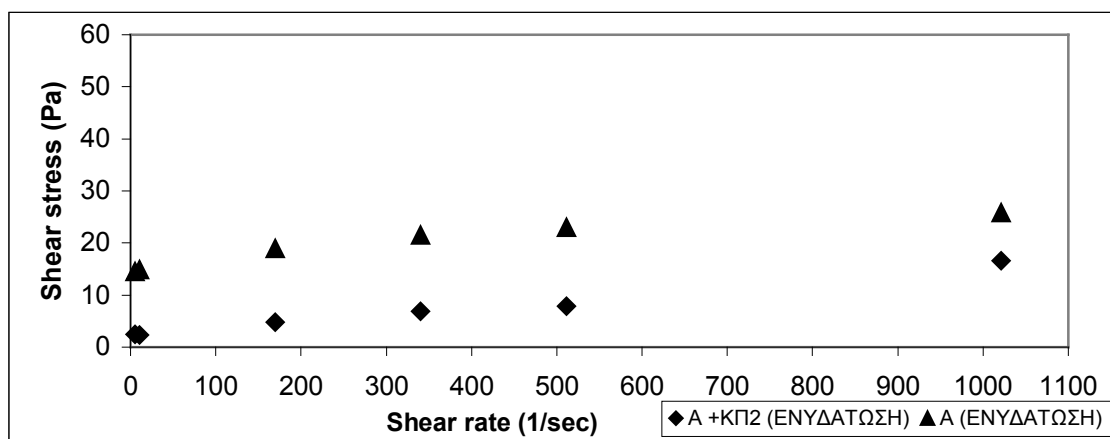
A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΚΠ1, ενυδάτωση.

B: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΚΠ1, γήρανση.

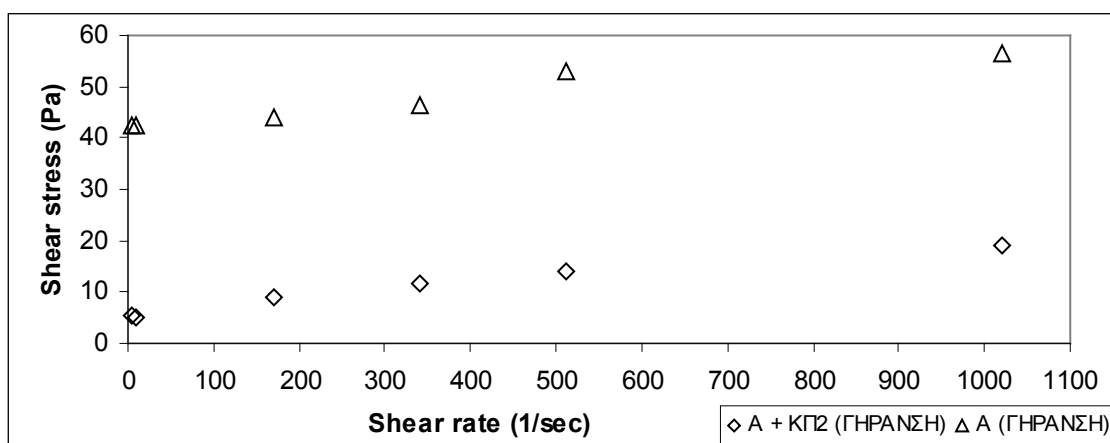
Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ1, ενυδάτωση / γήρανση.

6.1.2 Πολφός βάσης και 0,5% ΚΠ2

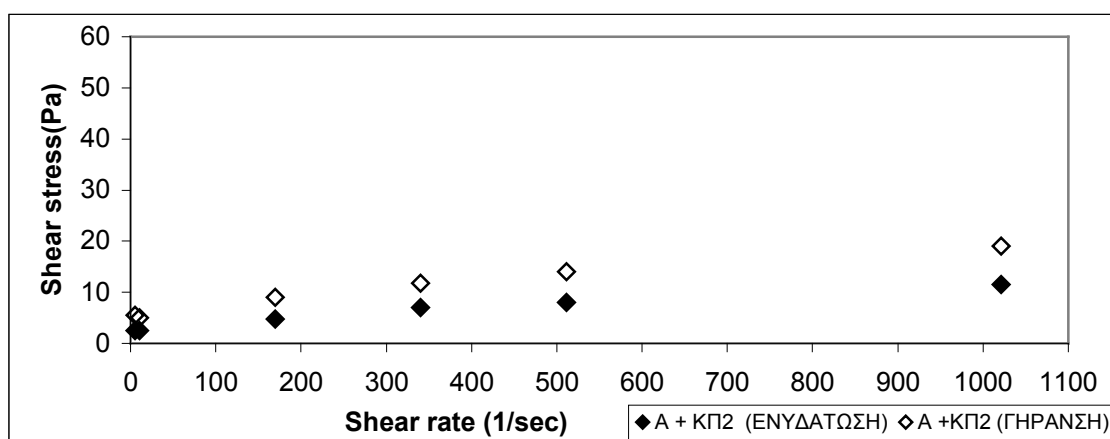
A



B



Γ



Σχήμα 6.2

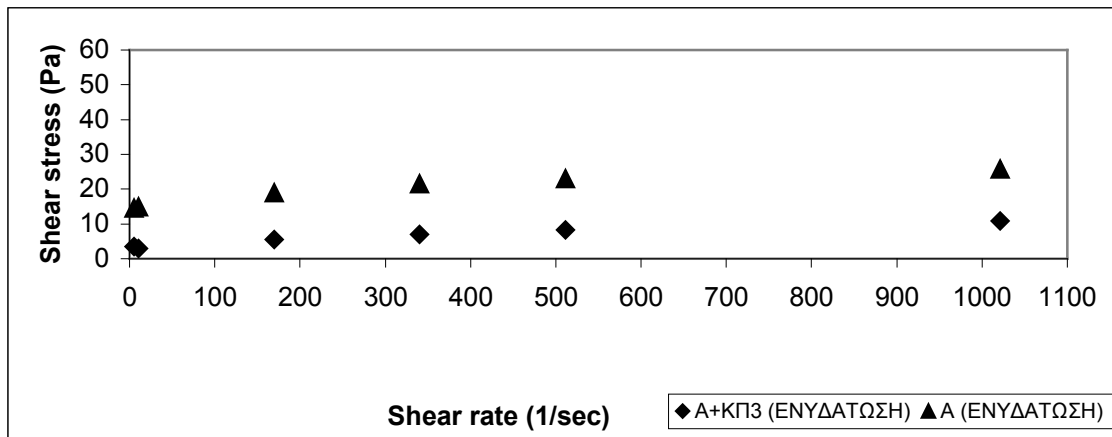
A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΚΠ2, ενυδάτωση.

B: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΚΠ2, γήρανση.

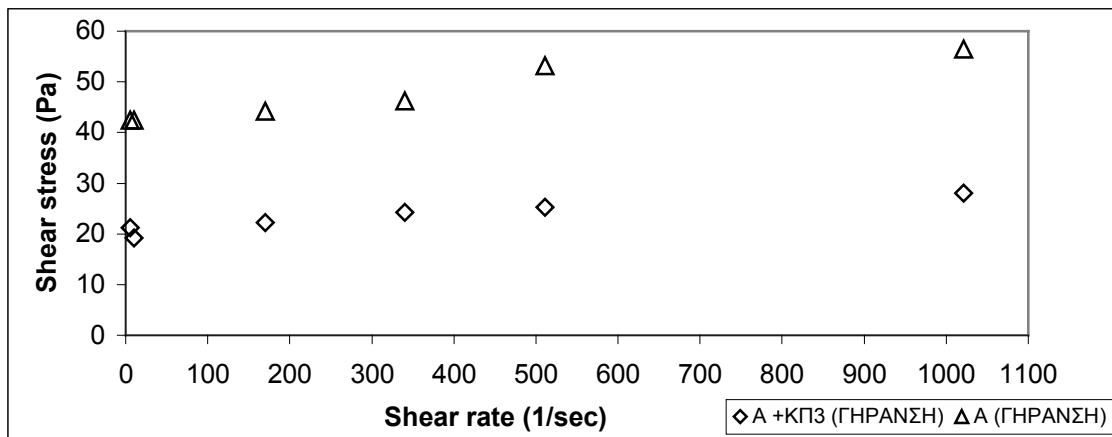
Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ2, ενυδάτωση / γήρανση.

6.1.3 Πολφός βάσης και 0,5% κπ3

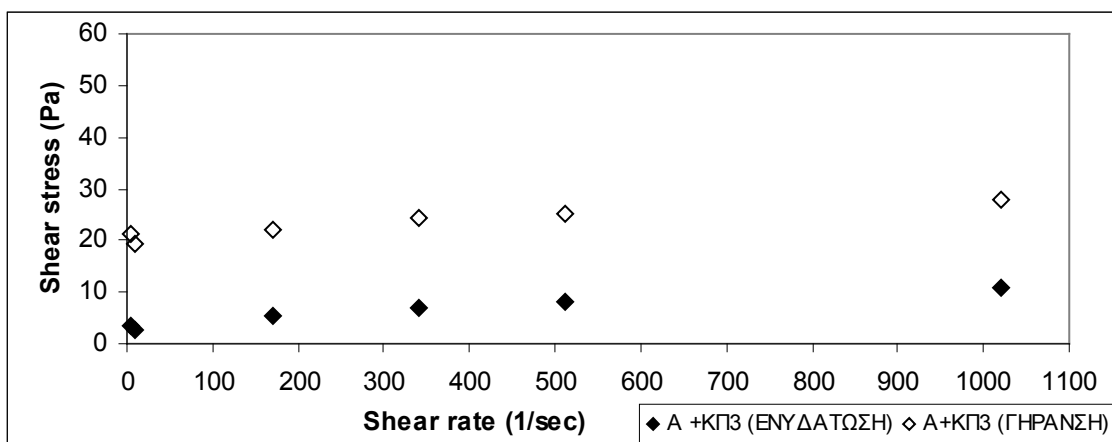
A



B



Γ



Σχήμα 6.3:

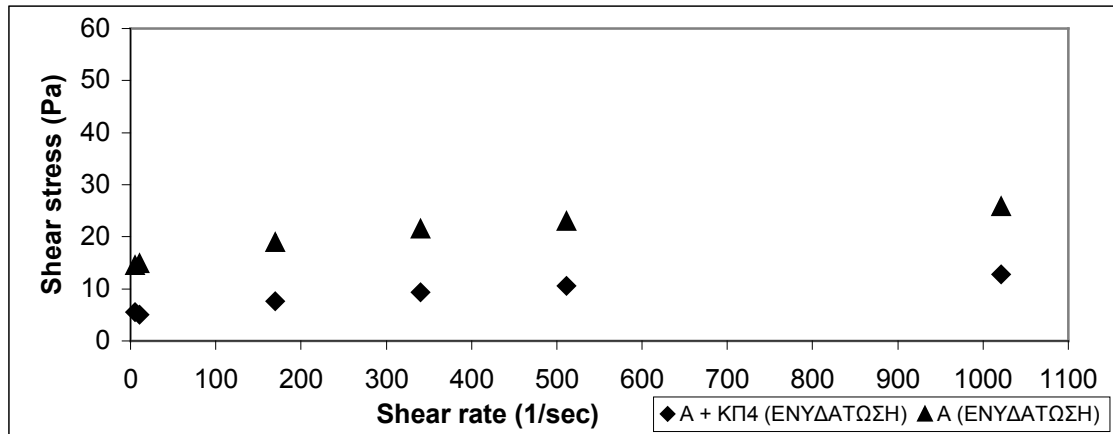
A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΚΠ3, ενυδάτωση.

Β: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΚΠ3, γήρανση.

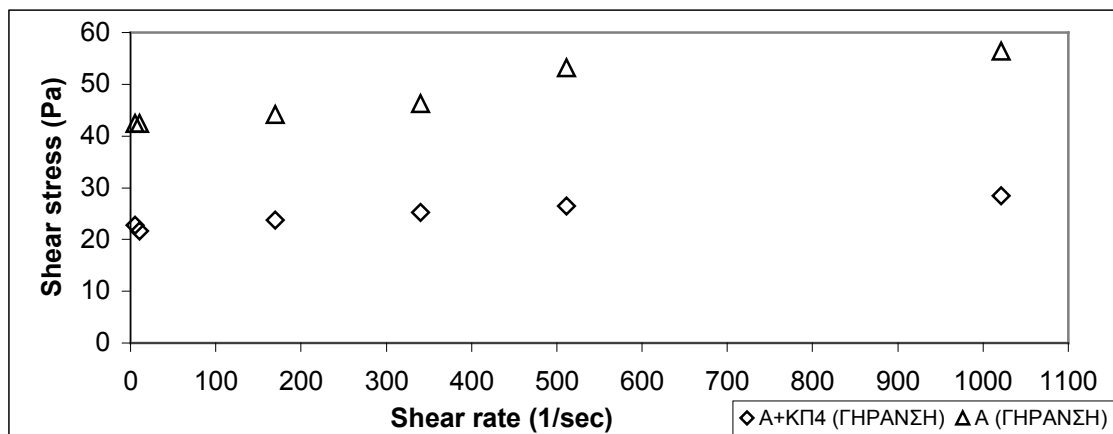
Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ3, ενυδάτωση / γήρανση.

6.1.4 Πολφός βάσης και 0,5% κπ4

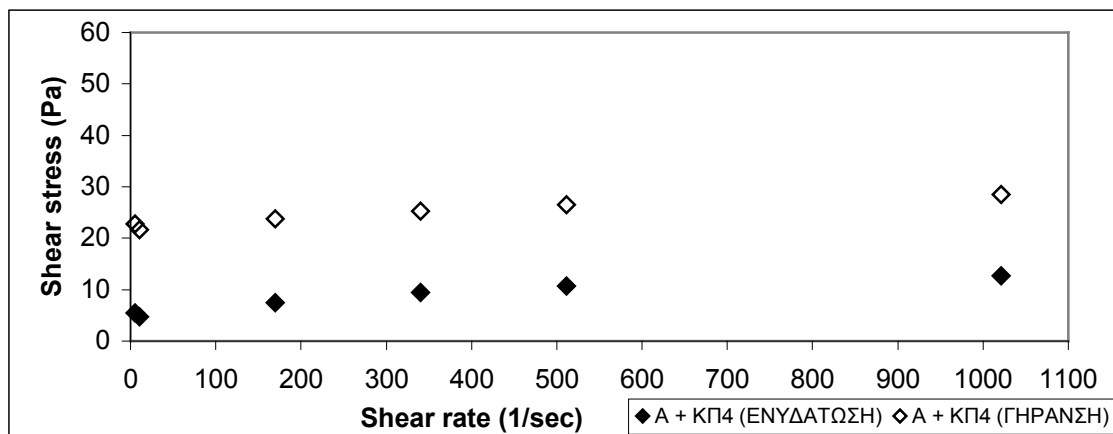
Α



Β



Γ



Σχήμα 6.4:

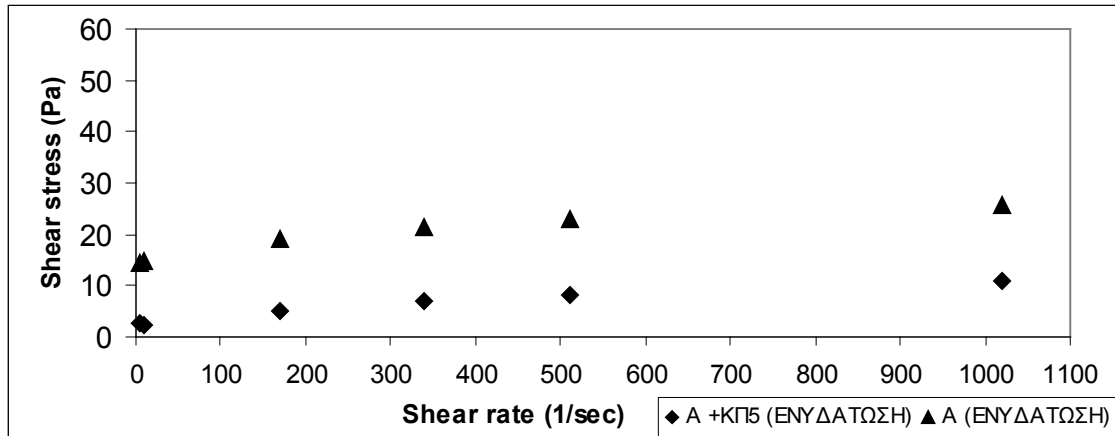
A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΚΠ4, ενυδάτωση.

B: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΚΠ4, γήρανση.

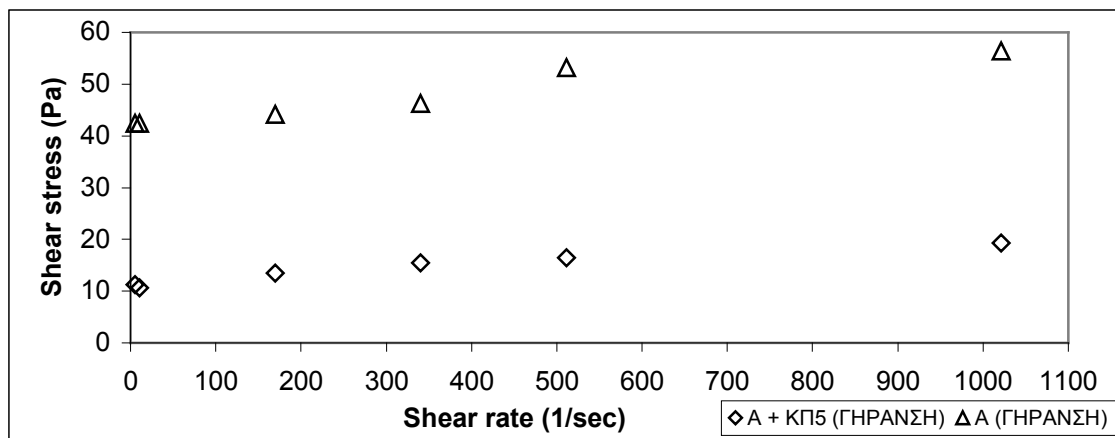
Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ4, ενυδάτωση / γήρανση.

6.1.5 Πολφός βάσης και 0,5% κπ5

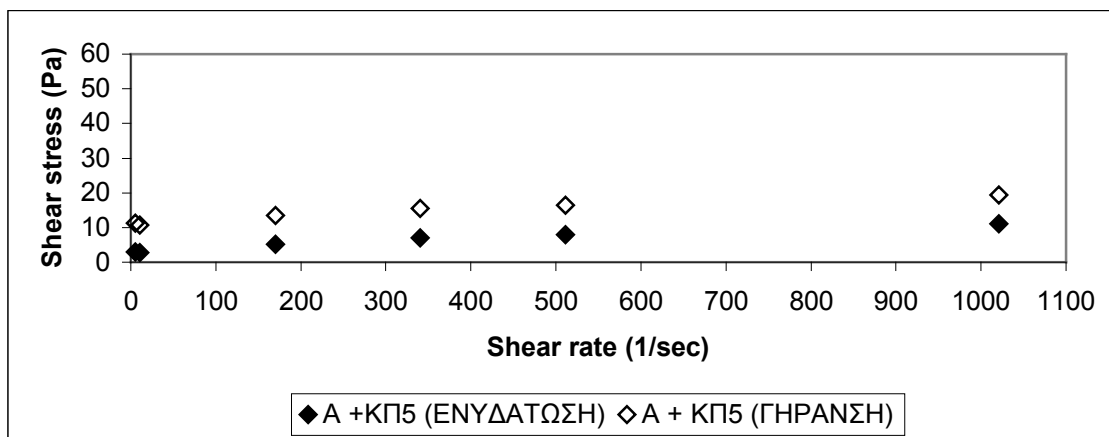
A



B



Γ



Σχήμα 6.5:

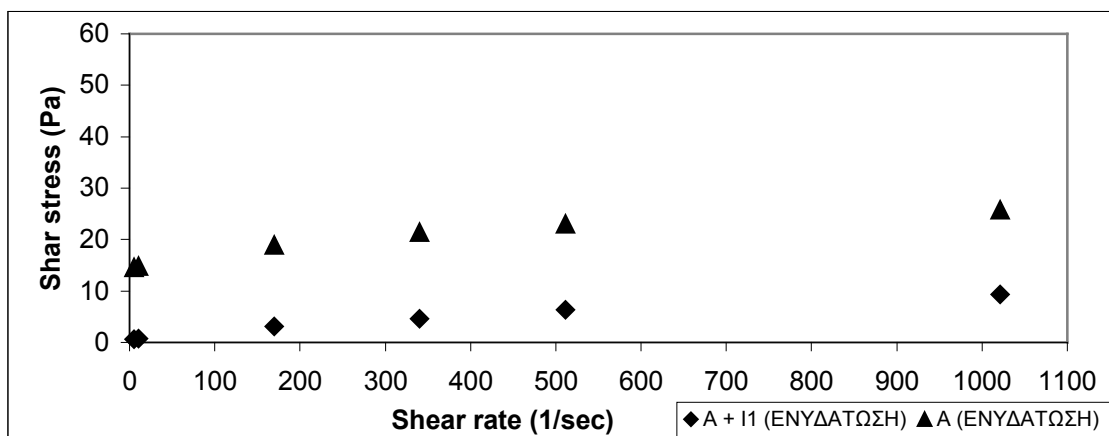
A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΚΠ5, ενυδάτωση.

B: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΚΠ5, γήρανση.

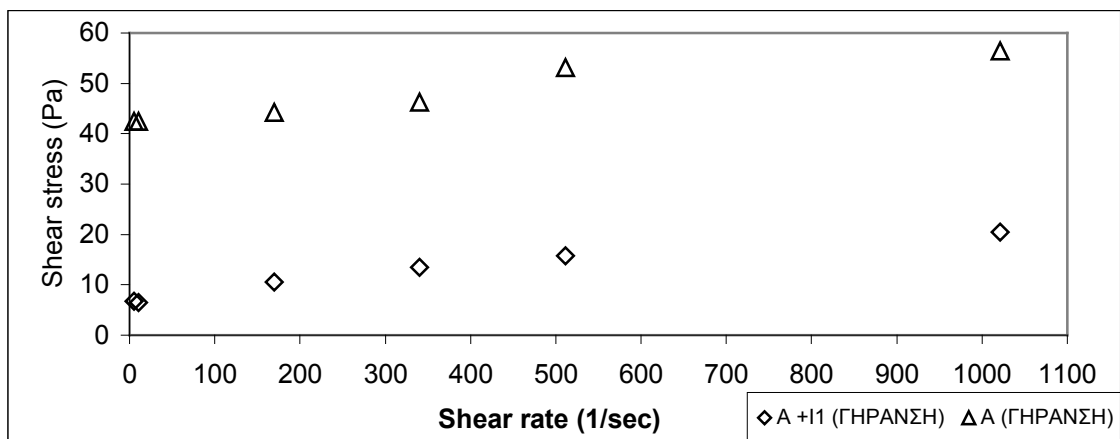
Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ5, ενυδάτωση/γήρανση.

6.1.6 Πολφός βάσης και 0,5% i1

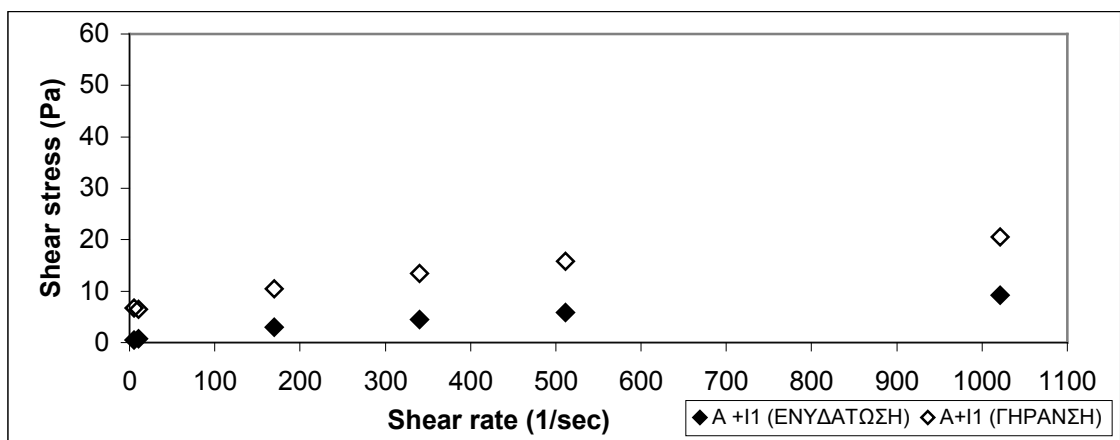
A



B



Γ



Σχήμα 6.6:

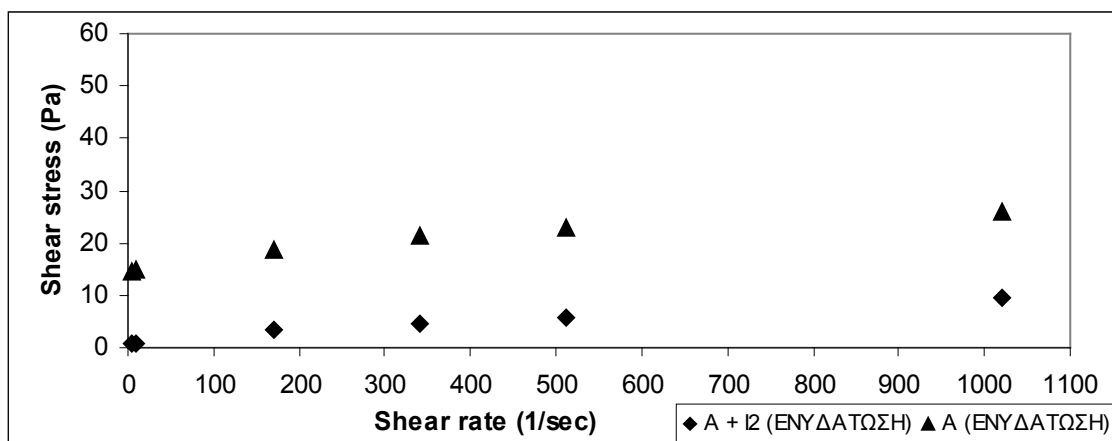
A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% I1, ενυδάτωση.

B: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% I1, γήρανση.

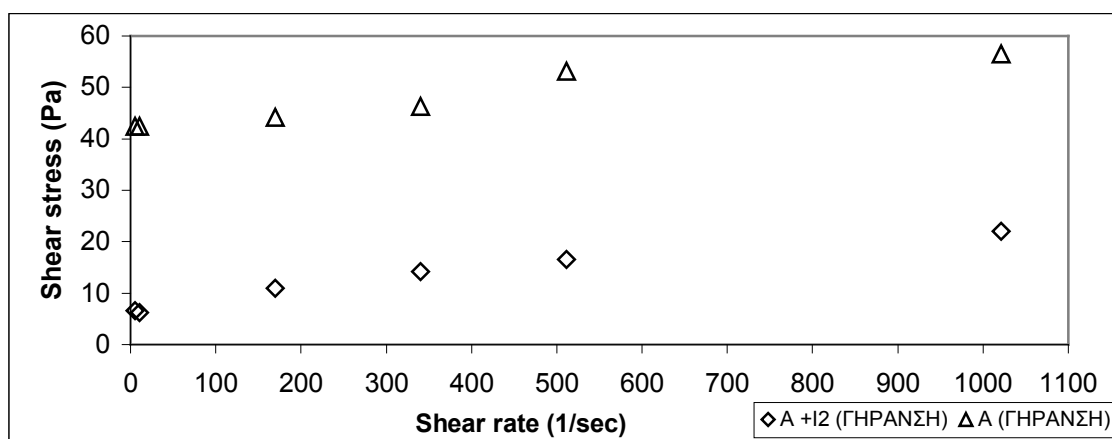
Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 0,5% I1, ενυδάτωση / γήρανση.

6.1.7 Πολφός βάσης και 0,5% i2

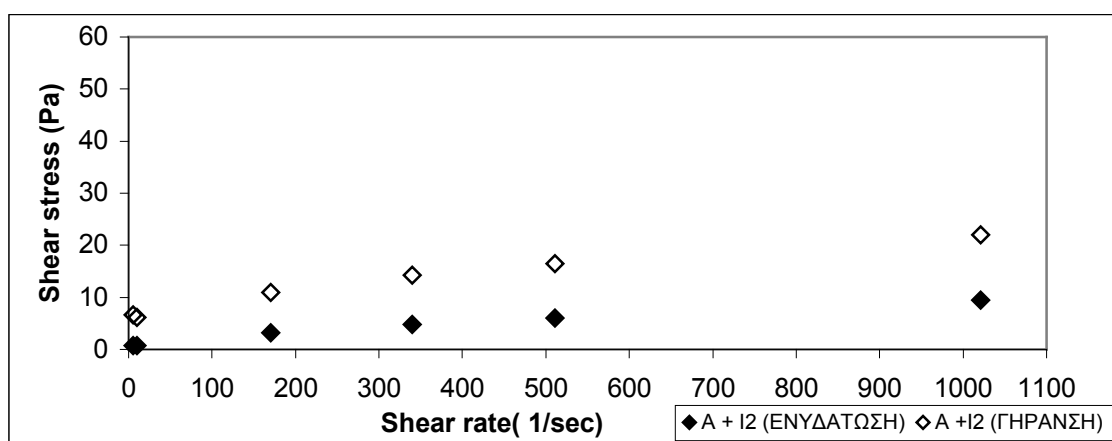
A



B



Γ



Σχήμα 6.7:

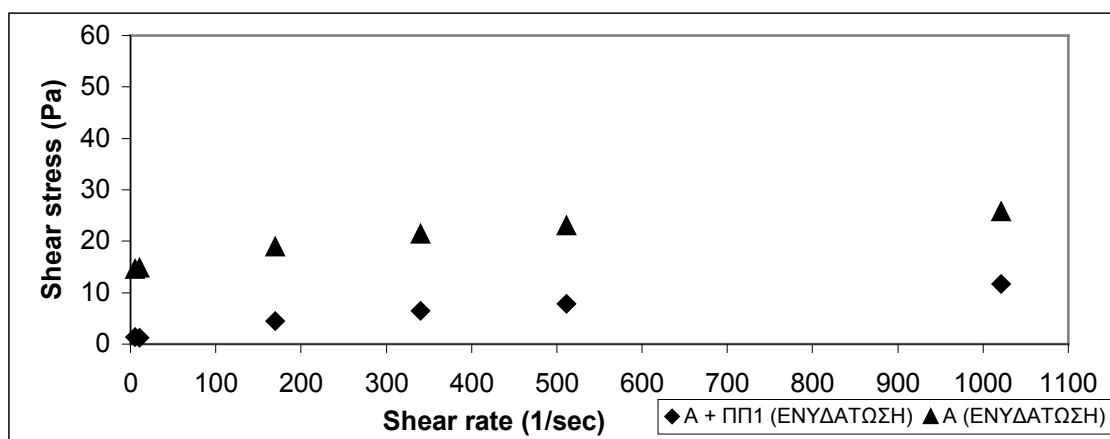
A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% I₂, ενυδάτωση.

B: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% I₂, γήρανση.

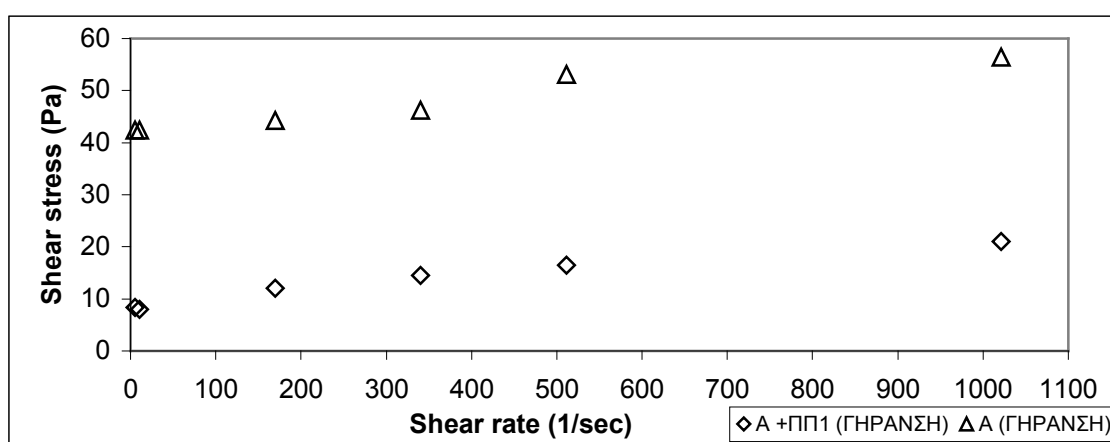
Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 0,5% I₂, ενυδάτωση / γήρανση.

6.1.8 Πολφός βάσης και 0,5% ΠΠ1

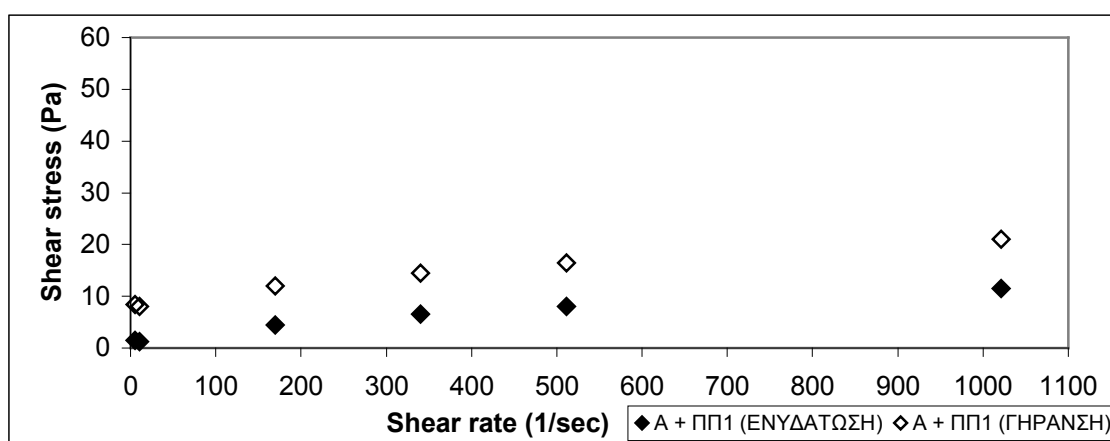
A



B



Γ



Σχήμα 6.8:

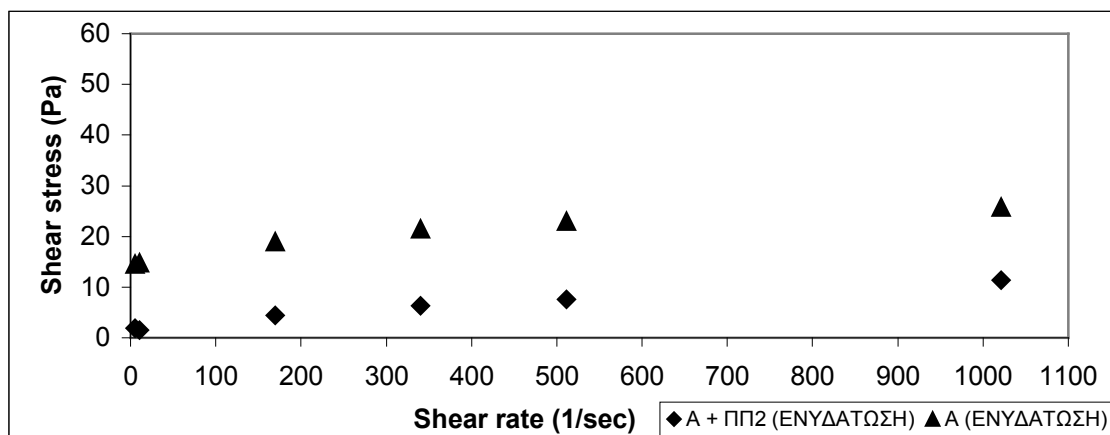
A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΠΠ1, ενυδάτωση.

B: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΠΠ1, γήρανση.

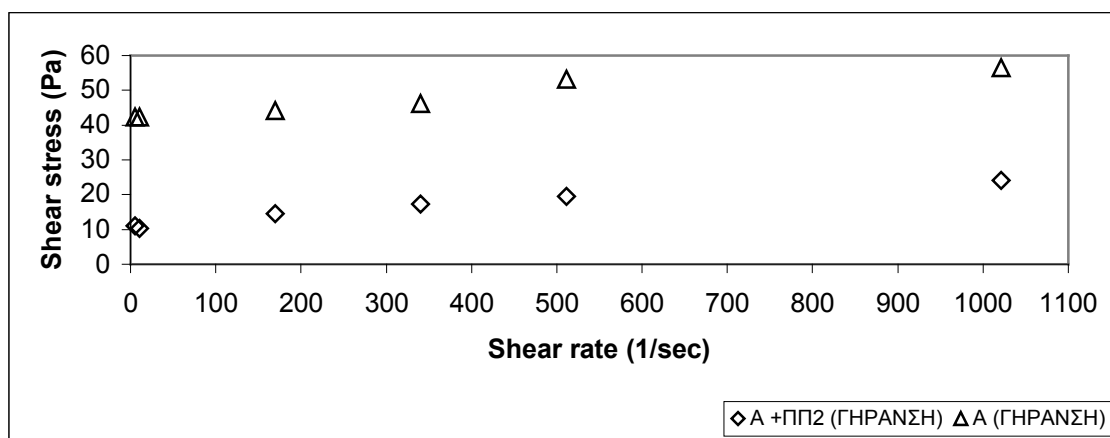
Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 0,5% ΠΠ1, ενυδάτωση / γήρανση.

6.1.9 Πολφός βάσης και 0,5% ΠΠ2

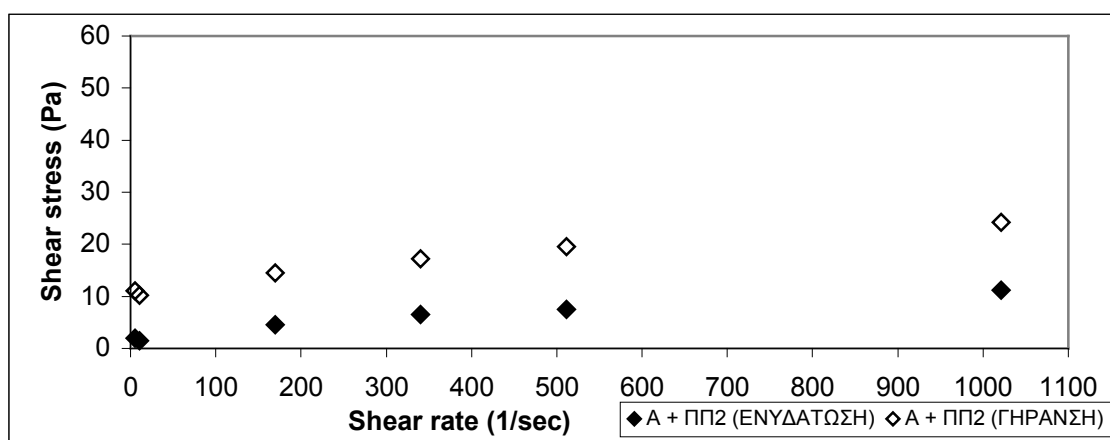
A



B



Γ



Σχήμα 6.9:

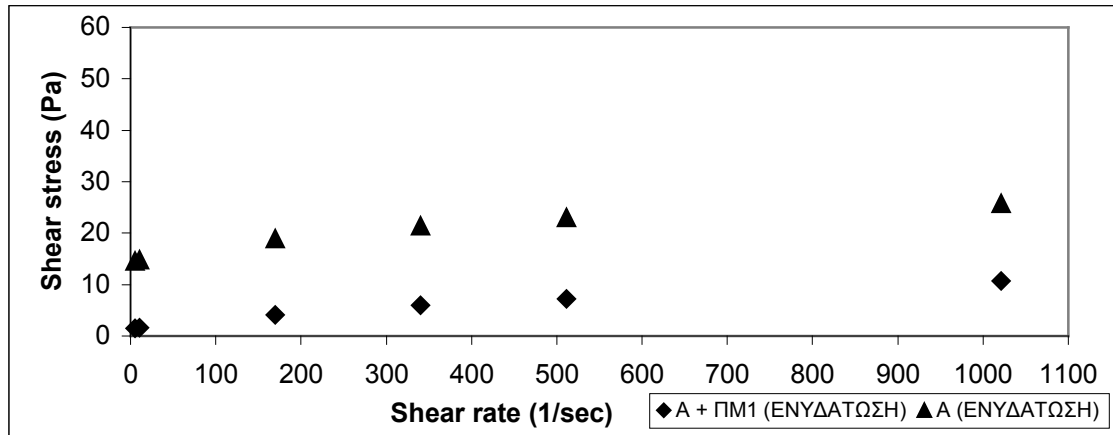
A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΠΠ2, ενυδάτωση.

Β: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΠΠ2, γήρανση.

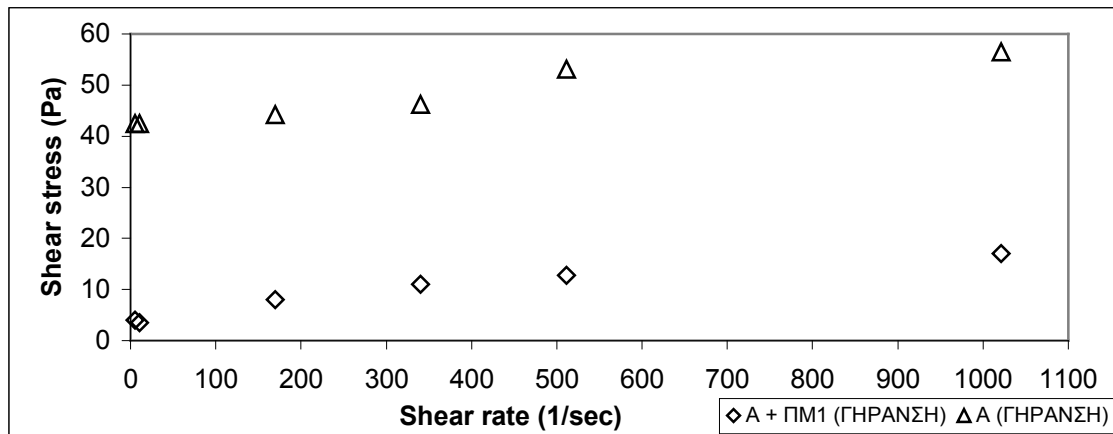
Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 0,5% ΠΠ2, ενυδάτωση/γήρανση.

6.1.10 Πολφός βάσης και 0,5% Πm1

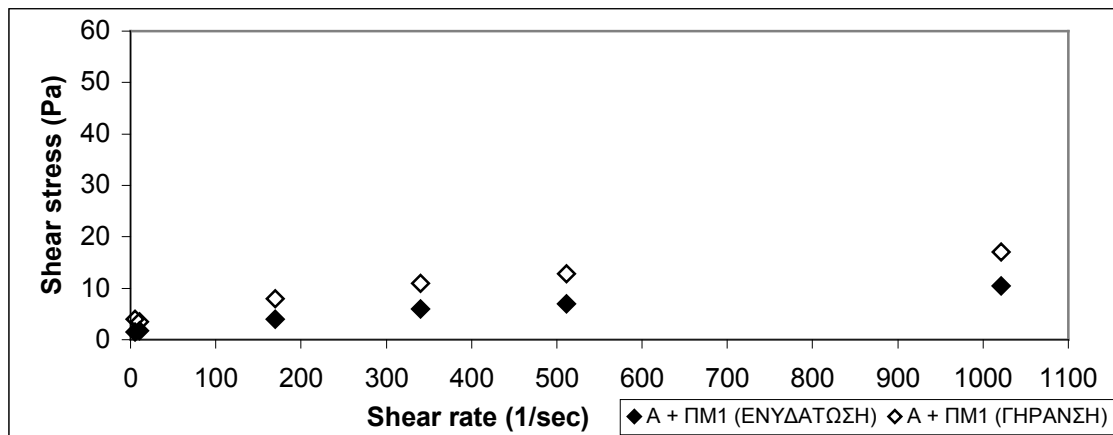
A



B



Γ



Σχήμα 6.10:

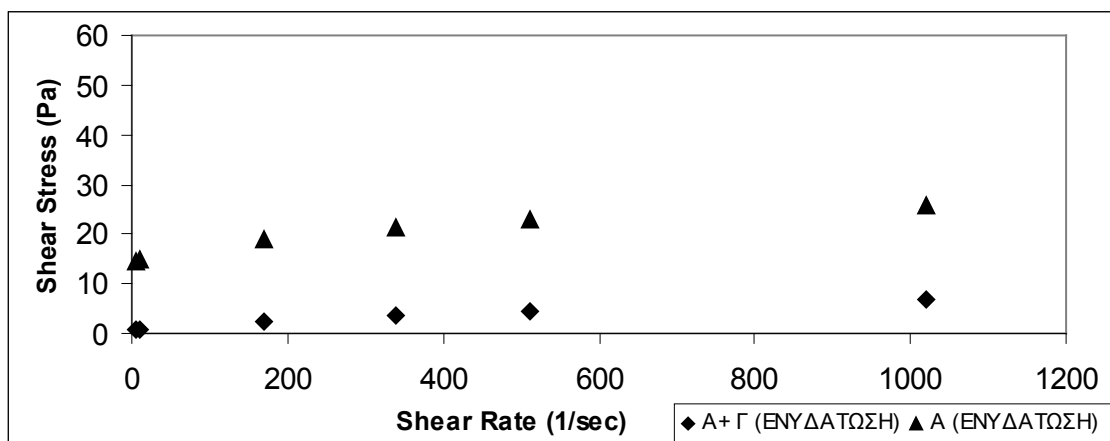
A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΠΜ1, ενυδάτωση.

B: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% ΠΜ1, γήρανση.

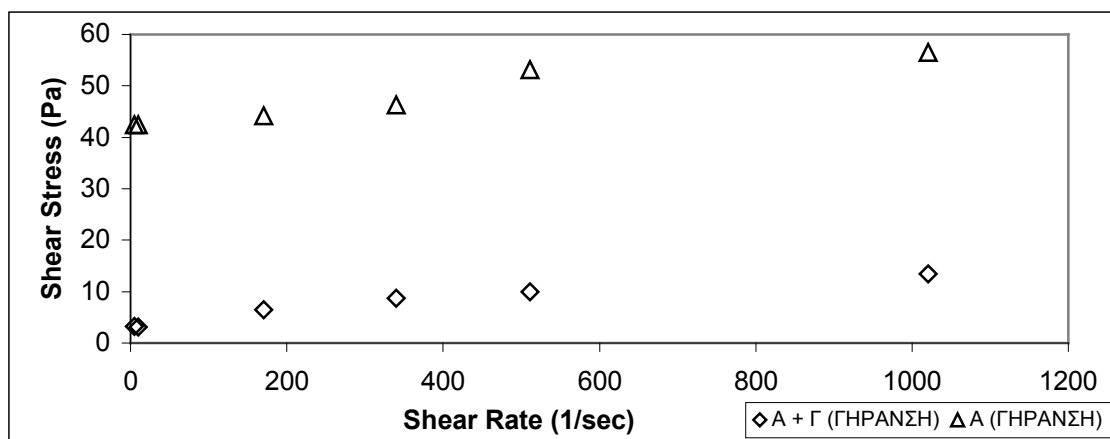
Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 0,5% ΠΜ1, ενυδάτωση / γήρανση.

6.1.11 ΠΟΛΦΟΣ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ 0,5% Γ

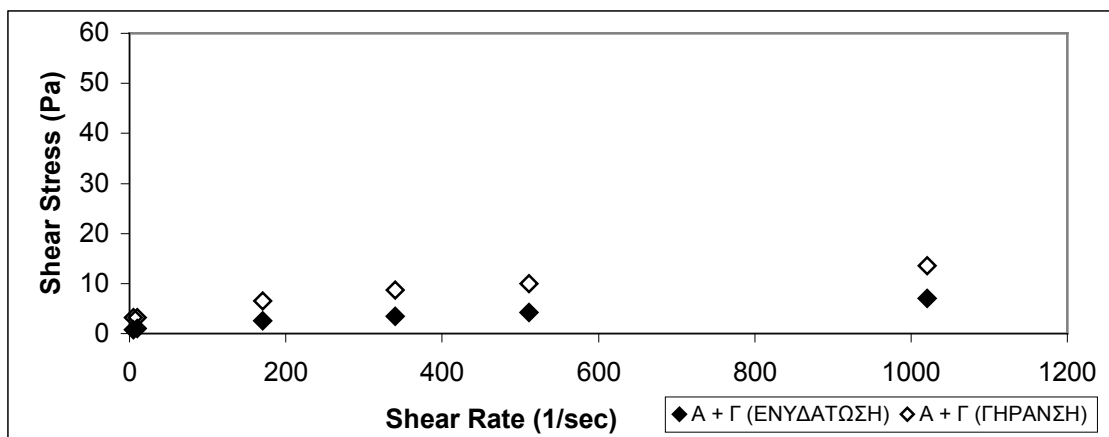
A



B



Γ



Σχήμα 6.11:

A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% Γ, ενυδάτωση.

B: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 0,5% Γ, γήρανση.

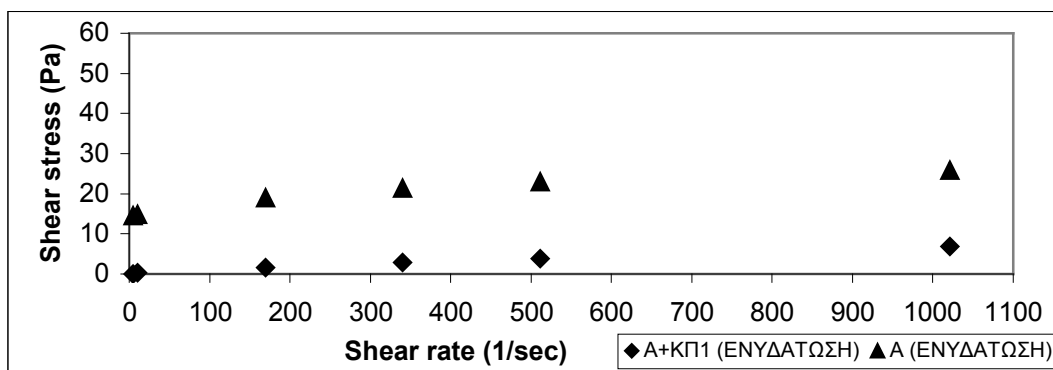
Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 0,5% Γ, ενυδάτωση / γήρανση.

6.2 ΠΟΛΦΟΣ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΛΙΓΝΙΤΗΣ ΣΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ 3%

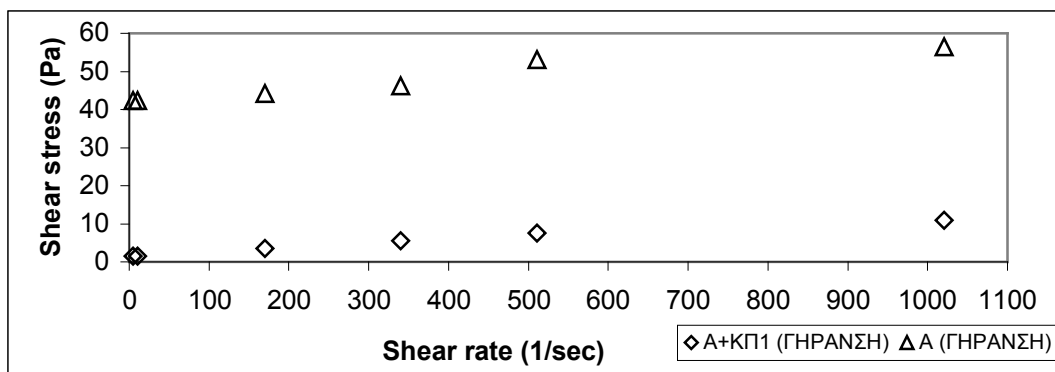
Παρακάτω, παρουσιάζονται τα ρεογράμματα για πολφό βάσης στον οποίο έχει προστεθεί 3% λιγνίτης

6.2.1 Πολφός βάσης και 3% ΚΠ1

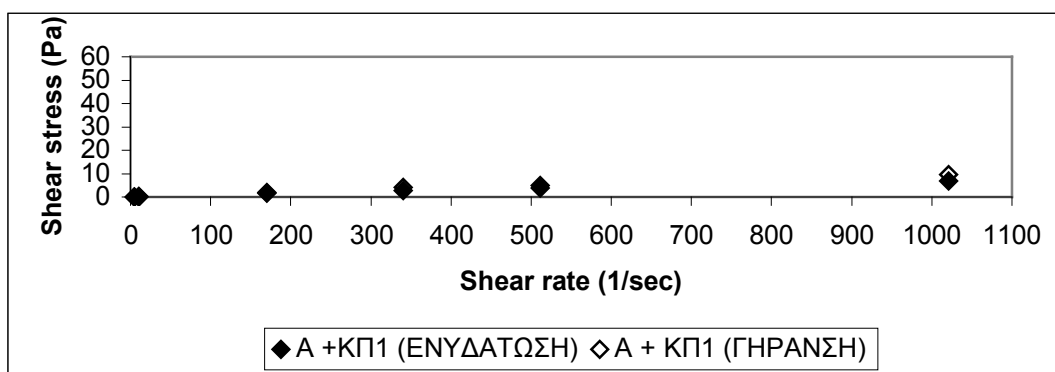
A



B



Γ



Σχήμα 6.12:

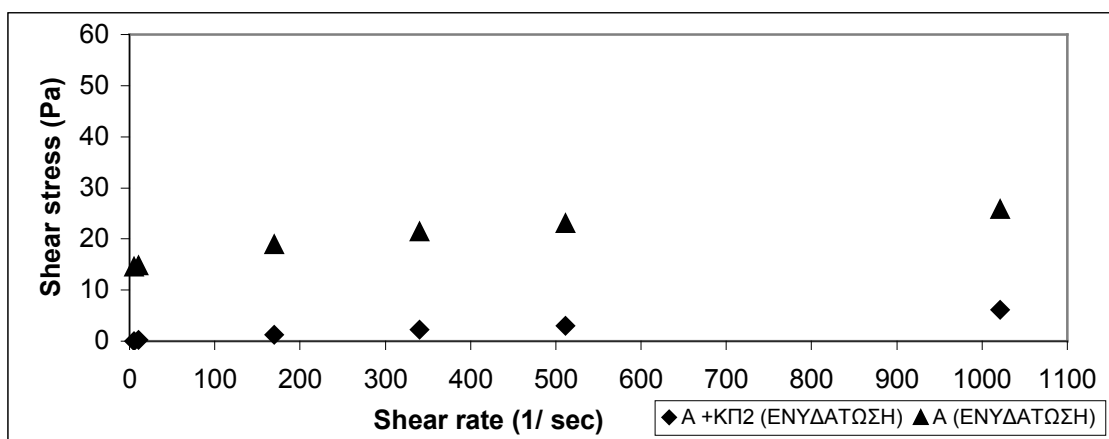
Α: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% ΚΠ1, ενυδάτωση.

Β: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% ΚΠ1, γήρανση.

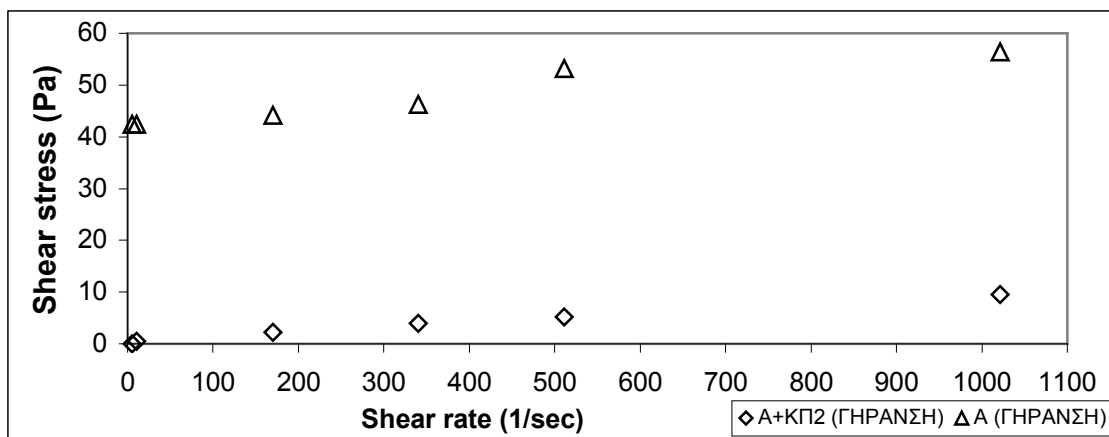
Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 3% ΚΠ1, ενυδάτωση / γήρανση.

6.2.2 Πολφός βάσης και 3% ΚΠ2

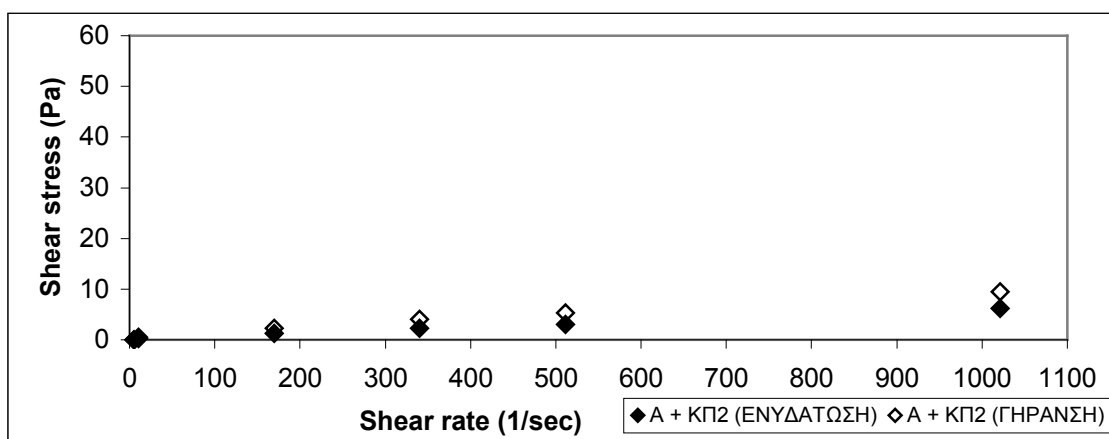
Α



Β



Γ



Σχήμα 6.13:

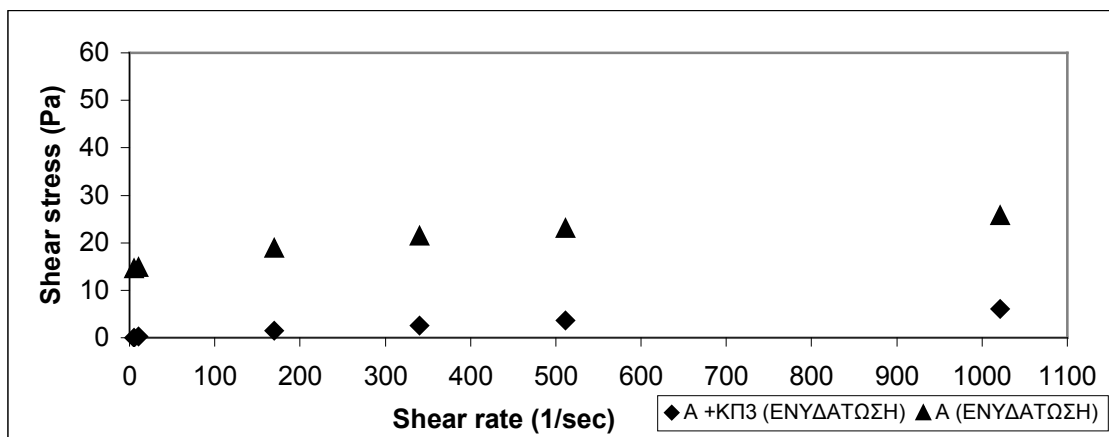
A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% ΚΠ2, ενυδάτωση.

B: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% ΚΠ2, γήρανση.

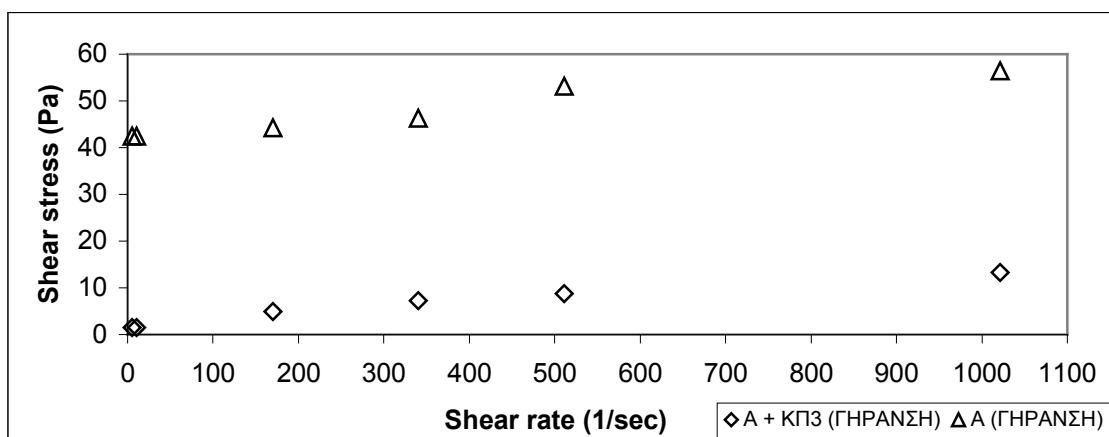
Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 3% ΚΠ2, ενυδάτωση / γήρανση.

6.2.3 Πολφός βάσης και 3% ΚΠ3

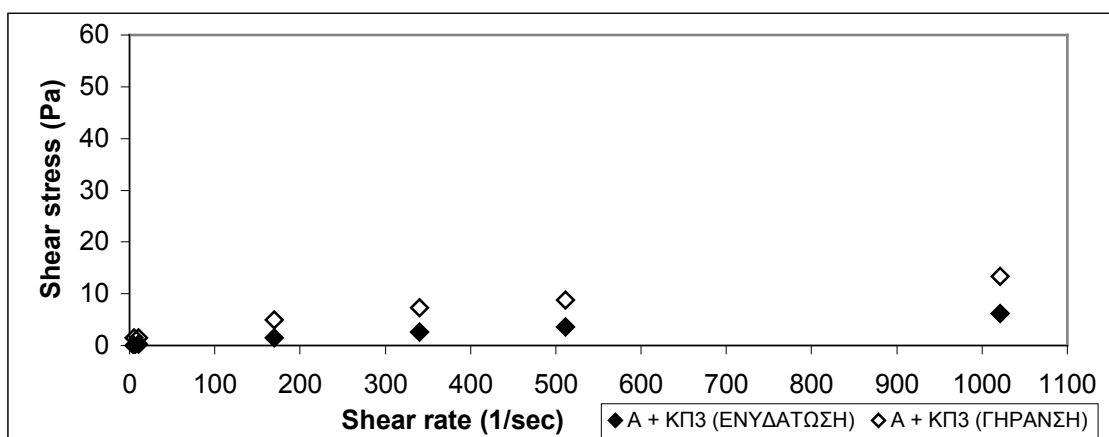
A



B



Γ



Σχήμα 6.14:

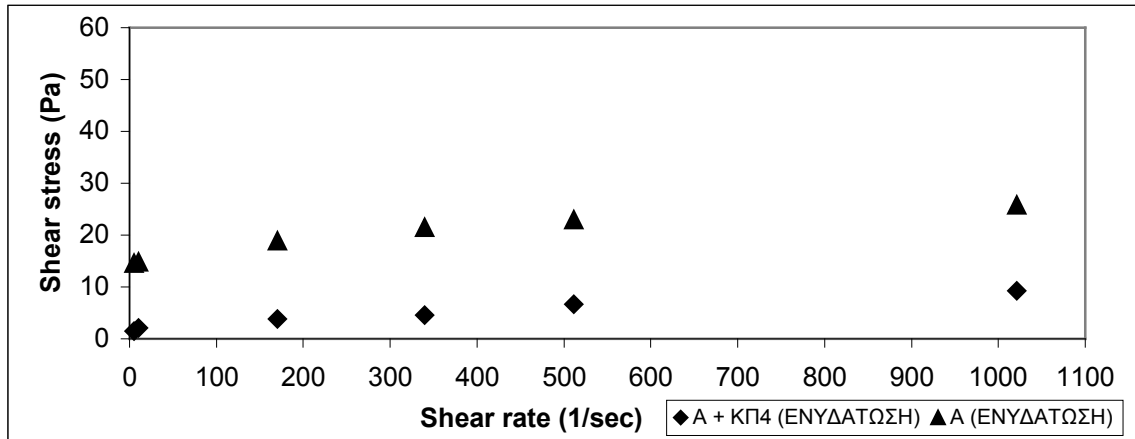
A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% ΚΠ3, ενυδάτωση.

B: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% ΚΠ3, γήρανση.

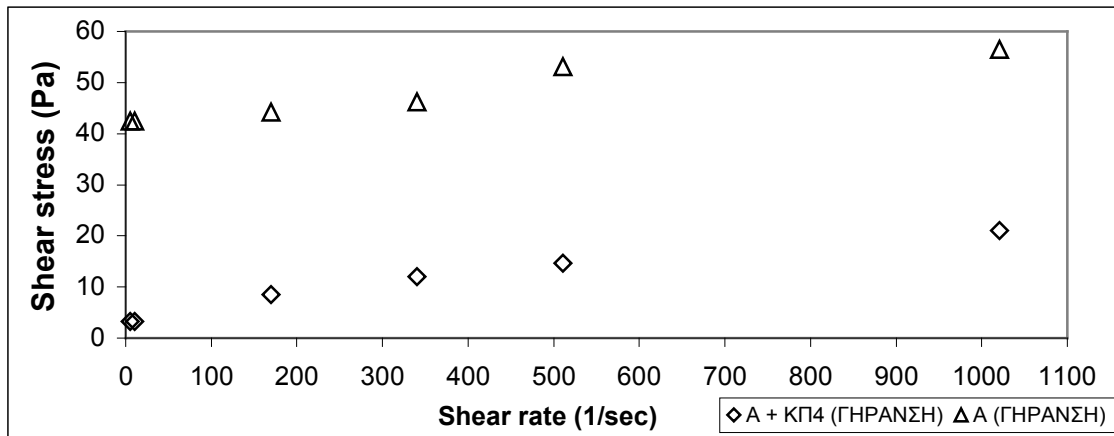
Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 3% ΚΠ3, ενυδάτωση / γήρανση.

6.2.4 Πολφός βάσης και 3% ΚΠ4

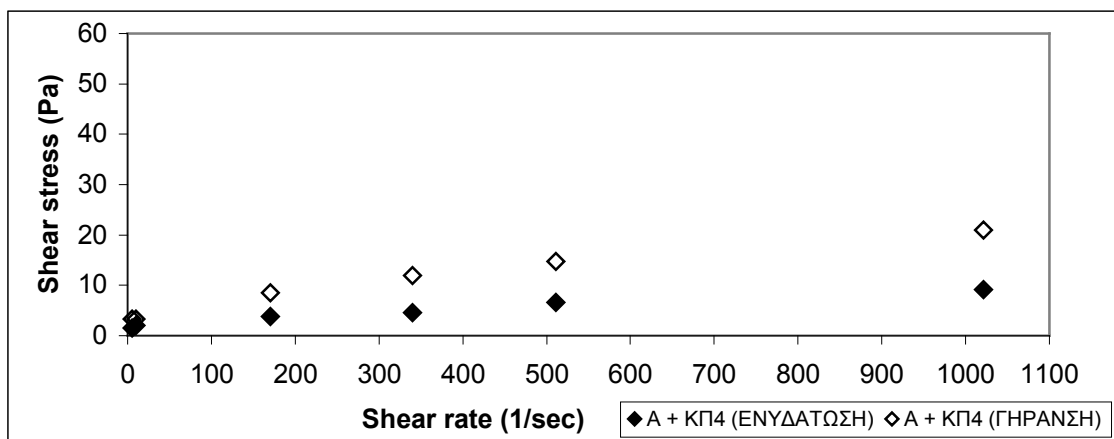
A



B



Γ



Σχήμα 6.15:

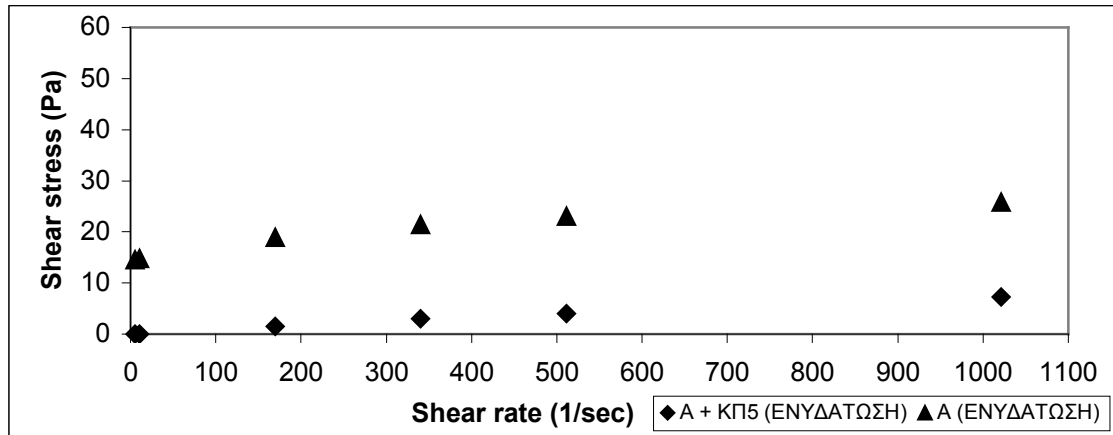
A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% ΚΠ4, ενυδάτωση.

Β: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% ΚΠ4, γήρανση.

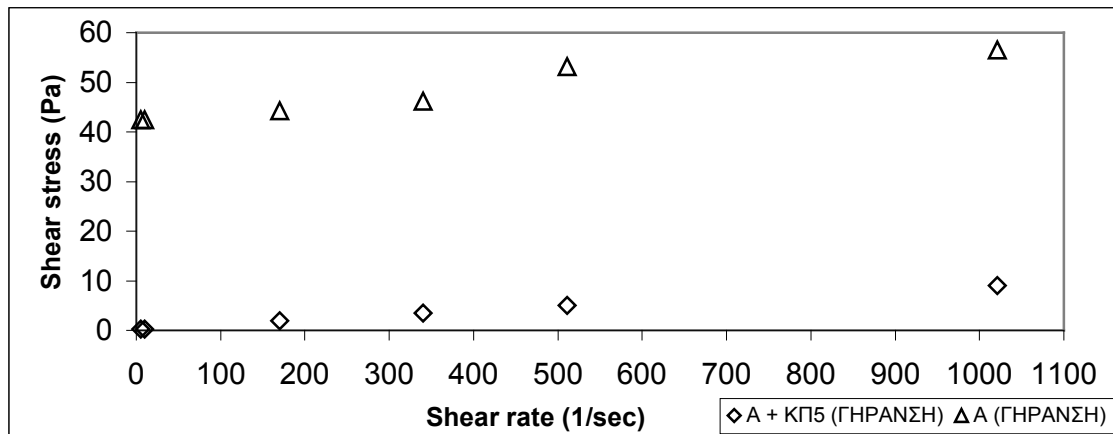
Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 3% ΚΠ4, ενυδάτωση/γήρανση.

6.2.5 Πολφός βάσης και 3% ΚΠ5

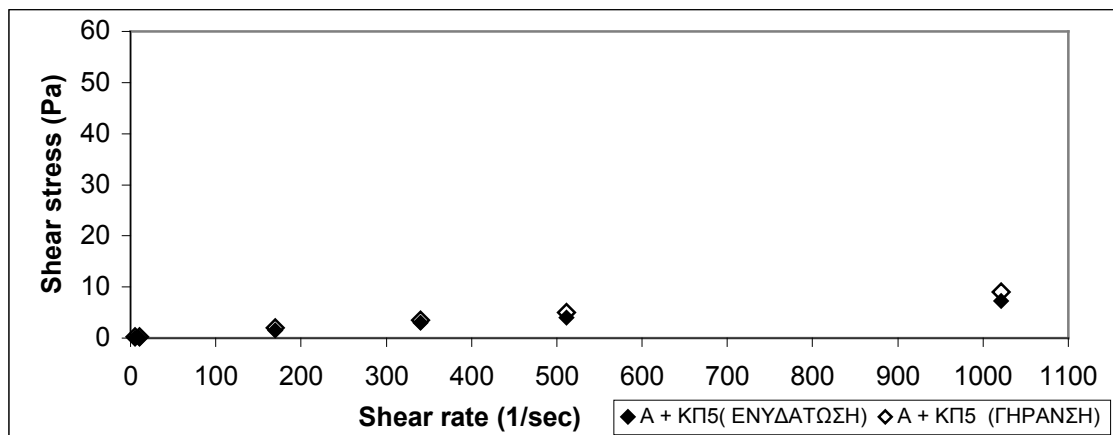
Α



Β



Γ



Σχήμα 6.16:

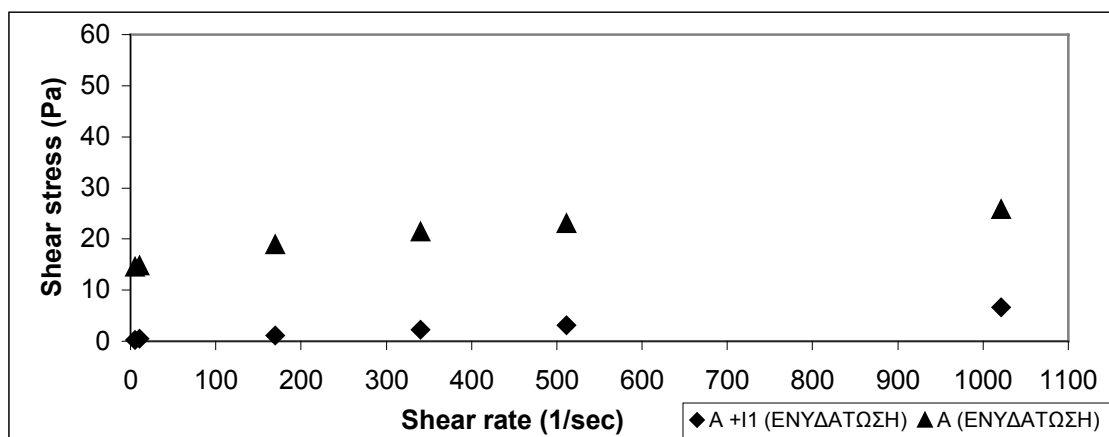
A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% ΚΠ5, ενυδάτωση.

B: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% ΚΠ5, γήρανση.

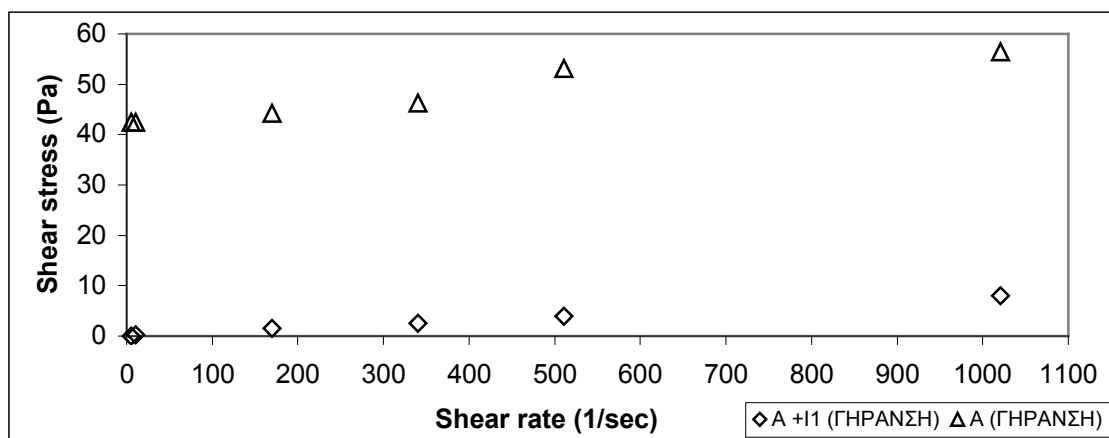
Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 3% ΚΠ5, ενυδάτωση / γήρανση.

6.2.6 Πολφός βάσης και 3% I1

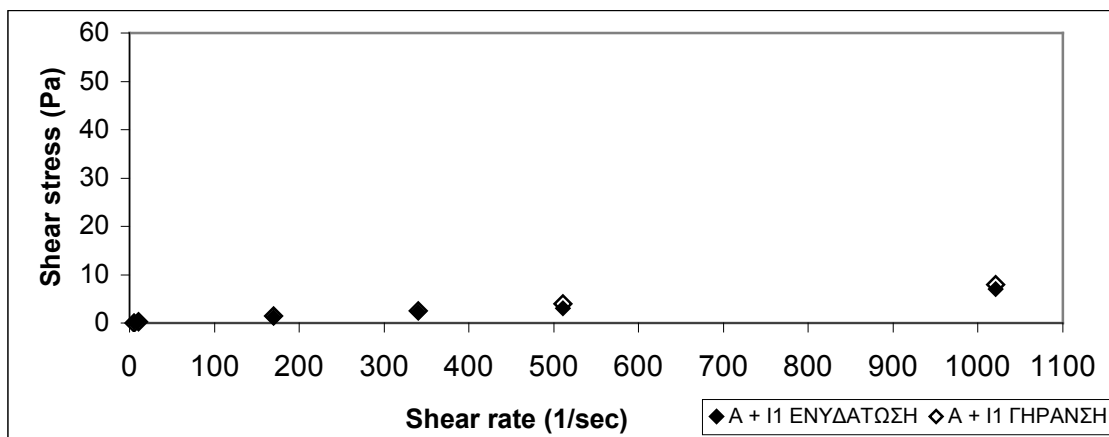
A



B



Γ



Σχήμα 6.17:

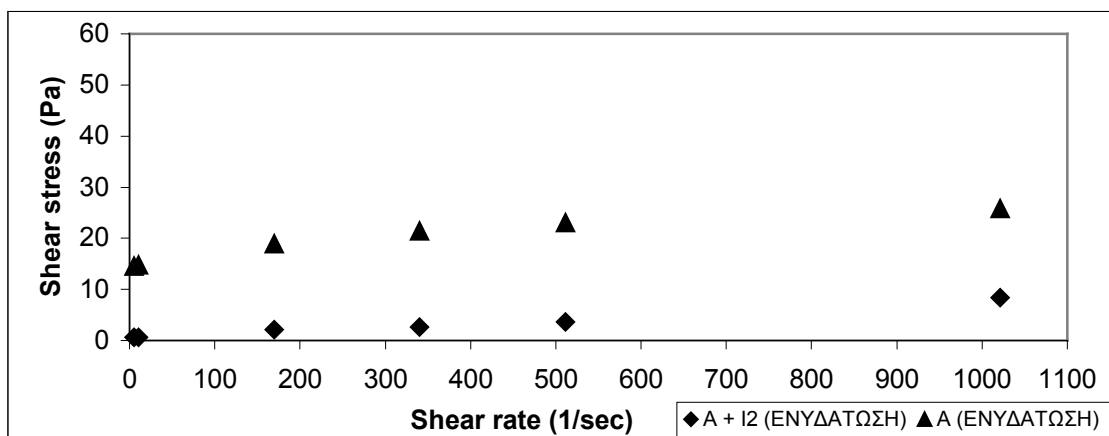
A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% I1, ενυδάτωση.

B: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% I1, γήρανση.

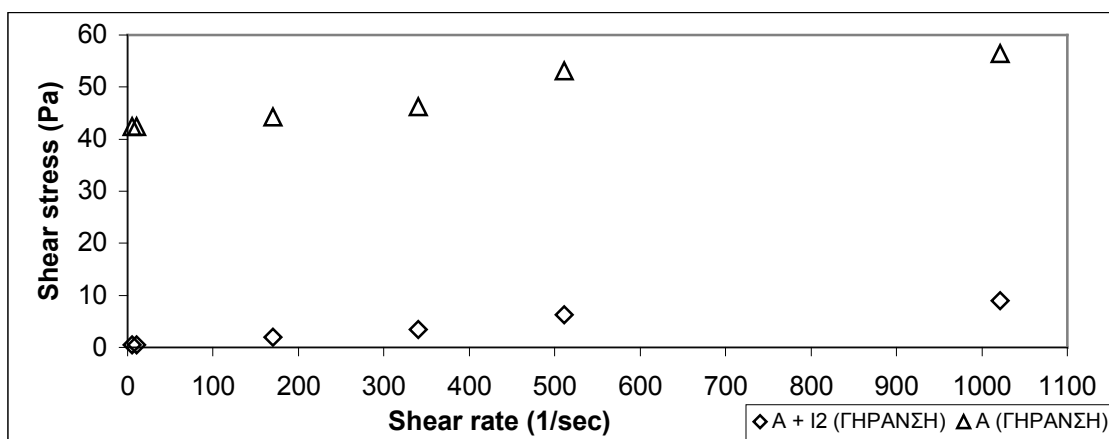
Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 3% I1, ενυδάτωση/γήρανση.

6.2.7 Πολφός βάσης και 3% I2

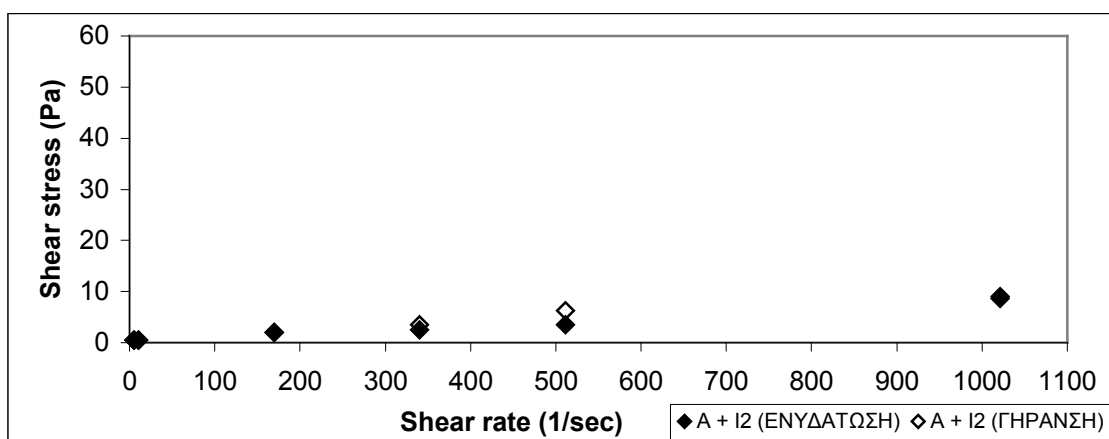
A



B



Γ



Σχήμα 6.18:

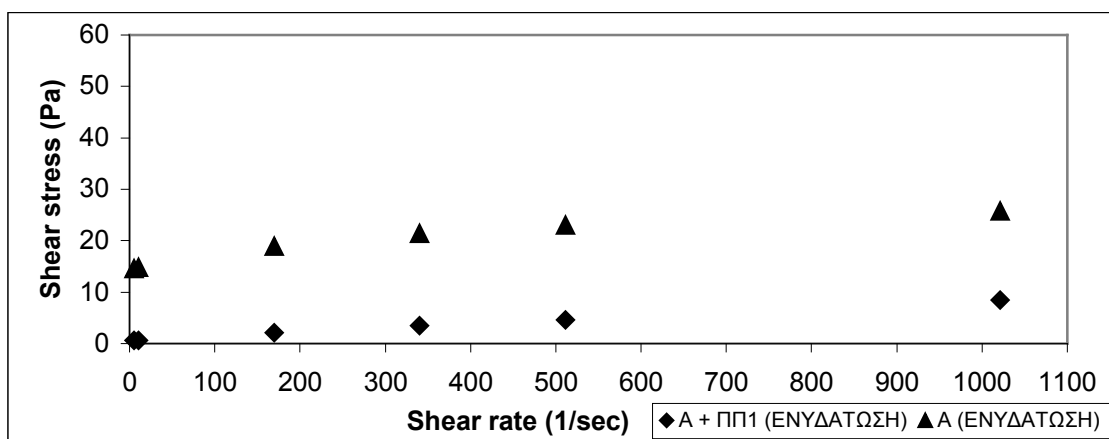
A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% I2, ενυδάτωση.

B: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% I2, γήρανση.

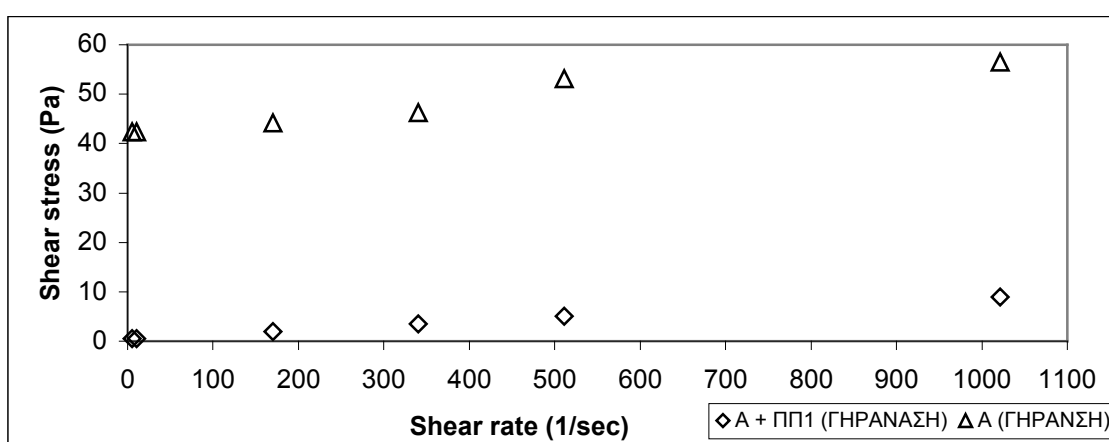
Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 3%I2, ενυδάτωση / γήρανση.

6.2.8 Πολφός βάσης και 3% ππ1

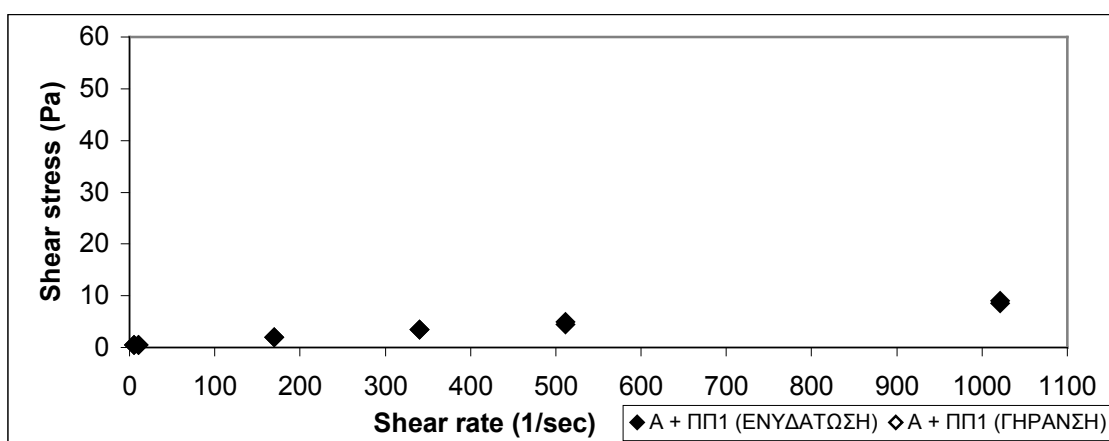
A



B



Γ



Σχήμα 6.19:

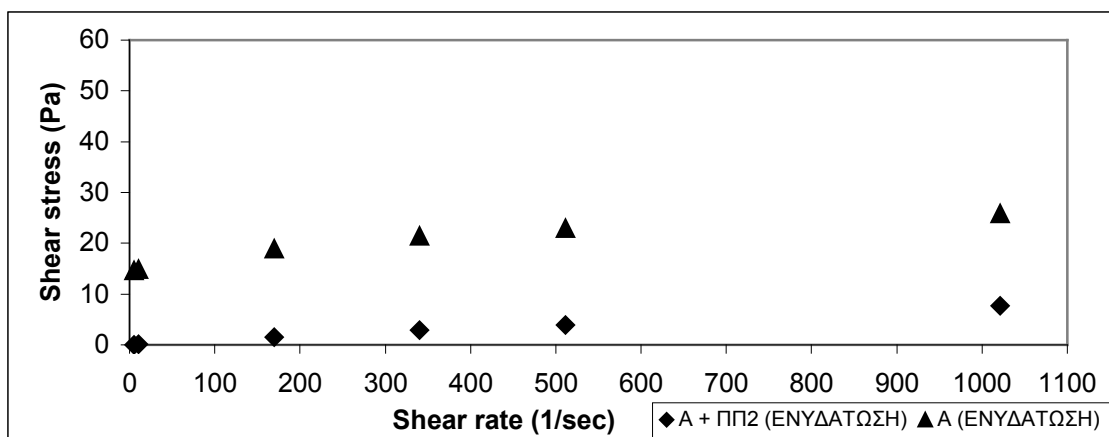
A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% ΠΠ1, ενυδάτωση.

B: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% ΠΠ1, γήρανση.

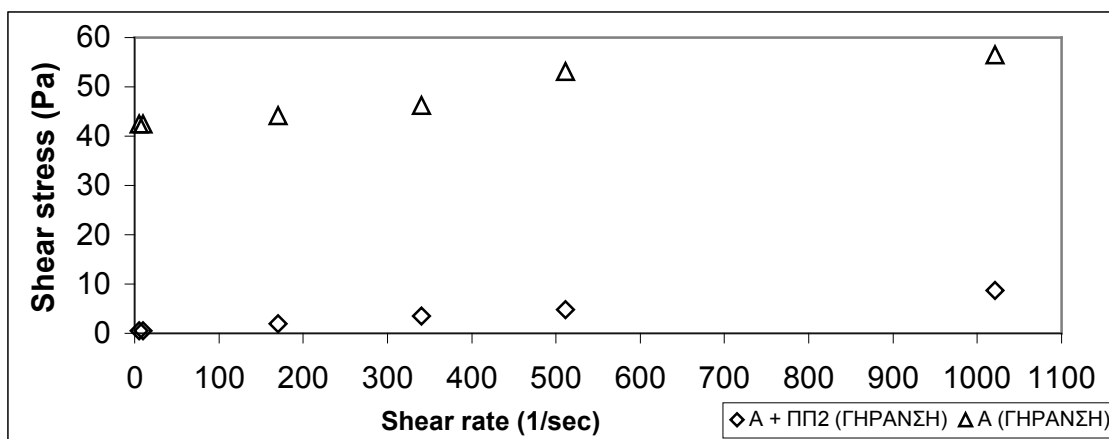
Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 3% ΠΠ1, ενυδάτωση / γήρανση.

6.2.9 Πολφός βάσης και 3% ππ2

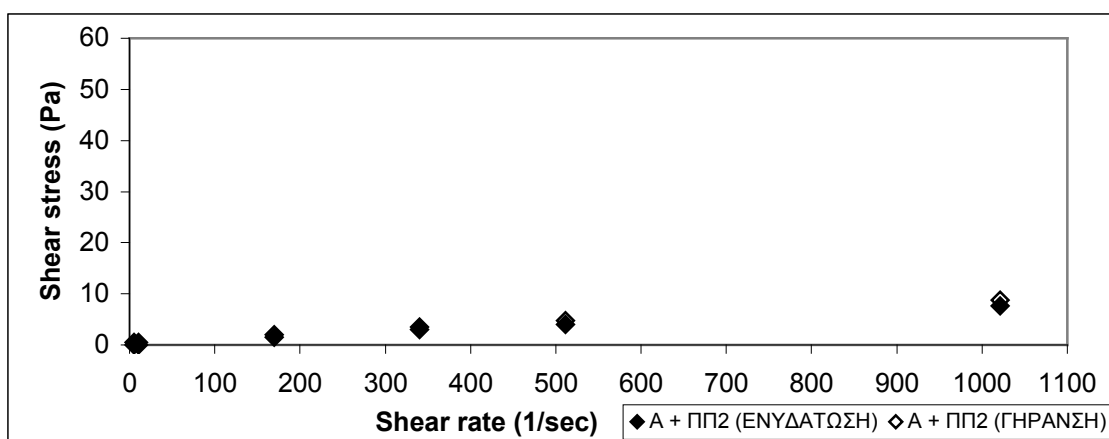
A



B



Γ



Σχήμα 6.20:

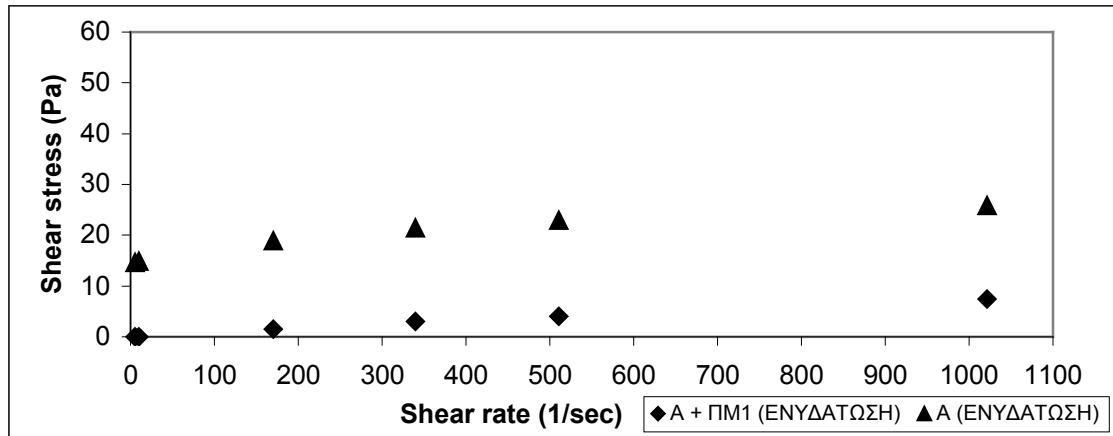
A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% ΠΠ2, ενυδάτωση.

Β: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% ΠΠ2, γήρανση.

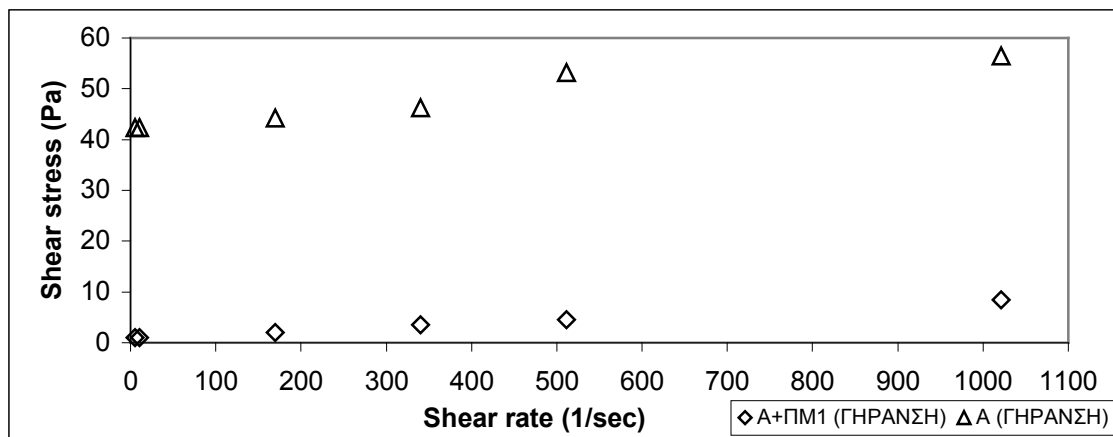
Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 3% ΠΠ2, ενυδάτωση/γήρανση.

6.2.10 Πολφός βάσης και 3% πΜ1

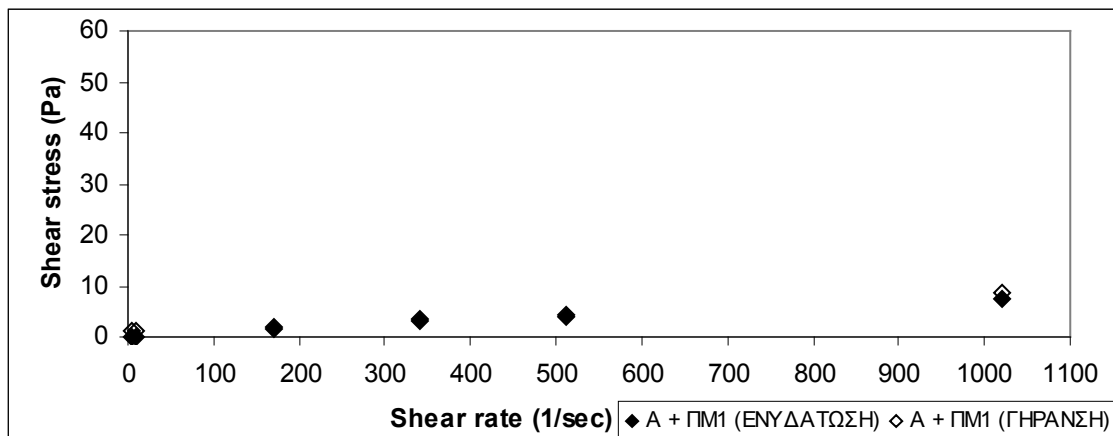
A



B



Γ



Σχήμα 6.21:

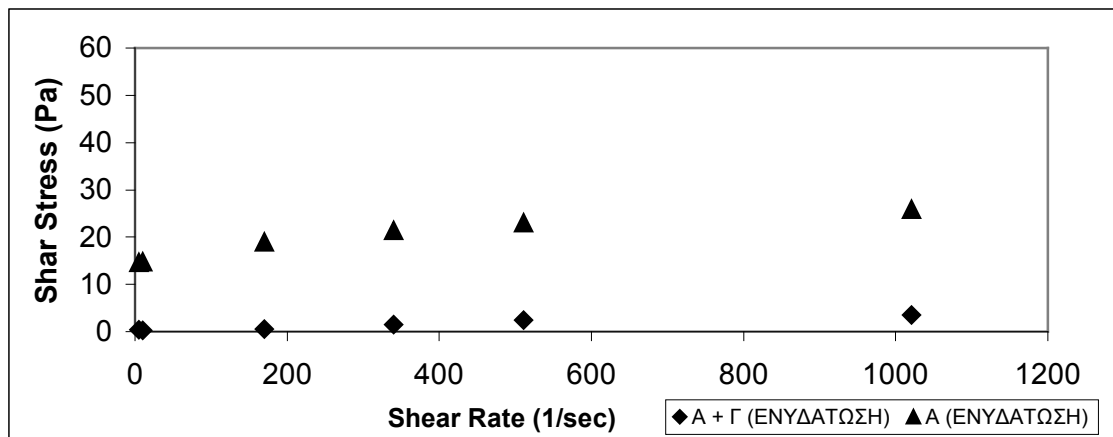
A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% ΠΜ1, ενυδάτωση.

B: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% ΠΜ1, γήρανση.

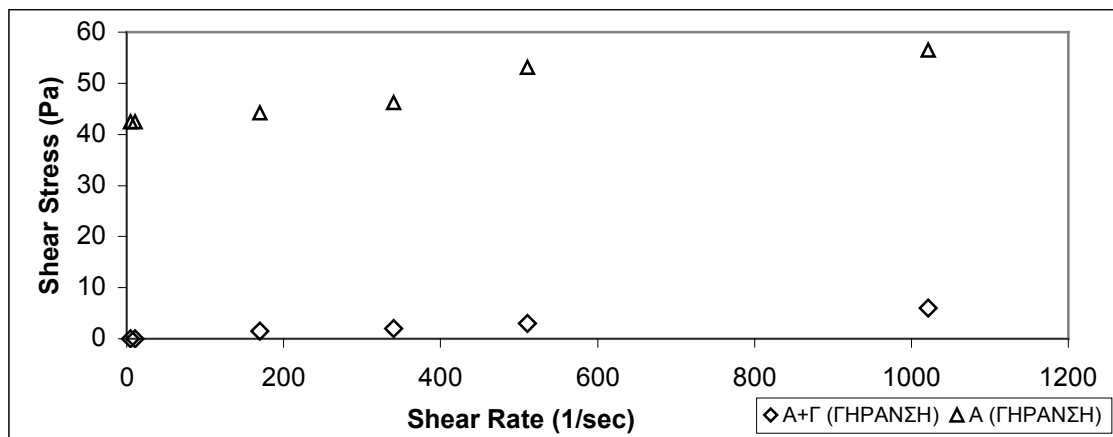
Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 3% ΠΜ1, ενυδάτωση/γήρανση.

6.2.11 Πολφός βάσης και 3% γ

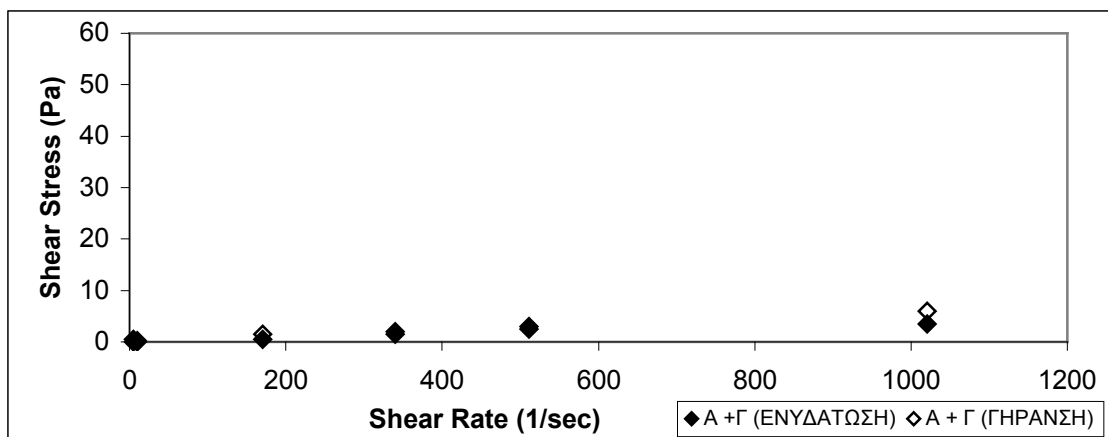
A



B



Γ



Σχήμα 6.22:

A: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% Γ, ενυδάτωση.

B: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης σε πολφό βάσης / πολφό βάσης και 3% Γ, γήρανση.

Γ: Σύγκριση ρυθμού διάτμησης – τάσης διάτμησης πολφού βάσης και 3%Γ, ενυδάτωση/γήρανση.

6.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΡΕΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

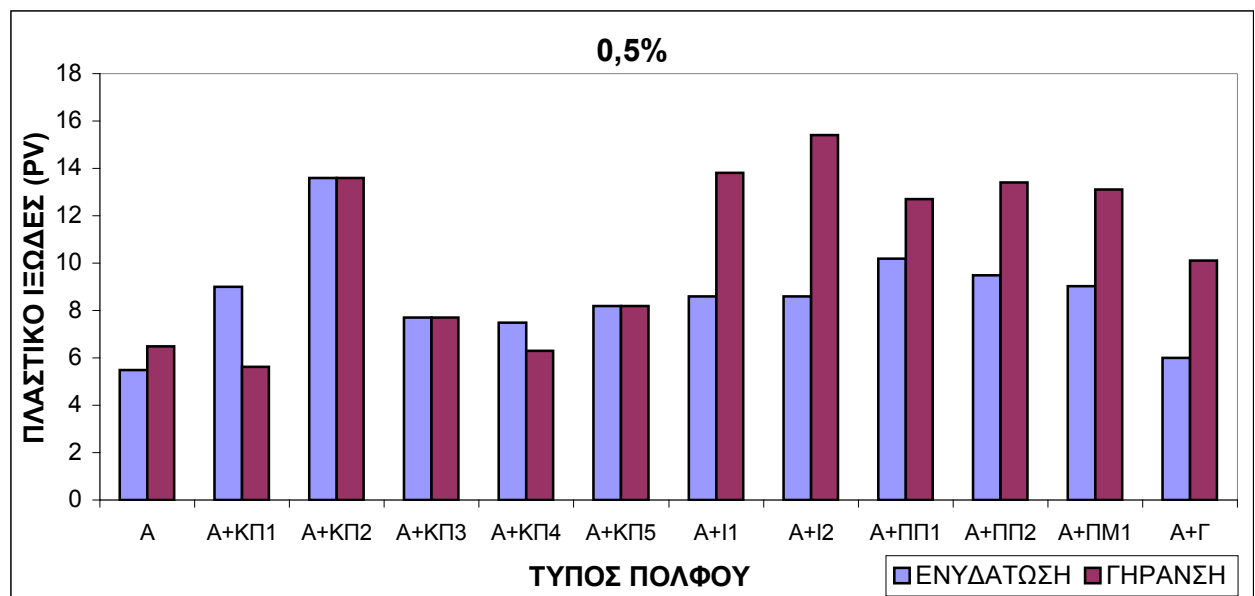
Στους πίνακες 6.1 συνοψίζονται τα αποτελέσματα που ελήφθησαν (πλαστικό ιξώδες, τάση διολίσθησης και δύναμη γέλης) από τα δείγματα πολφών.

Πίνακας 6.1. Αποτελέσματα ρεολογικών ιδιοτήτων των πολφών με 0,5% λιγνίτη, σύμφωνα με τα πρότυπα API 13B.

| A/A | ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΕΟΛΟΓΙΑΣ | | | | |
|----------------------|---------------------|--------------------------------|--|---|---|
| | pH | ΠΛΑΣΤΙΚΟ ΙΞΩΔΕΣ, PV (cP) | ΣΗΜΕΙΟ ΕΝΑΡΞΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ (yield point) (lbs/100ft ²) | ΣΗΜΕΙΟ ΕΝΑΡΞΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ (yield point) (Pa) | ΙΣΧΥΣ ΓΕΛΗΣ (gel strength) 10sec -- 10 min (lbs/100ft ²) |
| ΠΟΣΟΣΤΟ ΛΙΓΝΙΤΗ 0,5% | | | | | |
| A +ΚΠ1(ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 9,58 | 9 | 7,49 | 3,59 | 3,5 -- 13,0 |
| A + ΚΠ1 (ΓΗΡΑΝΣΗ) | 8,28 | 5,62 | 33 | 15,8 | 5,5 -- 17,5 |
| A +ΚΠ2(ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 9,75 | 13,6 | 4,52 | 2,16 | 3,0 -- 12,5 |
| A + ΚΠ2 (ΓΗΡΑΝΣΗ) | 8,06 | 13,6 | 12,60 | 6,03 | 6,0 -- 17,5 |
| A +ΚΠ3(ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 9,87 | 7,7 | 7,74 | 3,70 | 4,0 -- 14,5 |
| A + ΚΠ3 (ΓΗΡΑΝΣΗ) | 7,56 | 7,7 | 43,28 | 20,73 | 17,6 -- 35,5 |
| A +ΚΠ4(ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 9,99 | 7,5 | 11,31 | 5,41 | 7,5 -- 20,5 |
| A + ΚΠ4 (ΓΗΡΑΝΣΗ) | 8,03 | 6,3 | 47,11 | 22,56 | 21,0 -- 38,5 |
| A + ΚΠ5(ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 9,75 | 8,2 | 6,81 | 3,26 | 4,0 -- 14 |
| A + ΚΠ5 (ΓΗΡΑΝΣΗ) | 8,23 | 8,2 | 24,32 | 11,65 | 12,0 -- 20,0 |

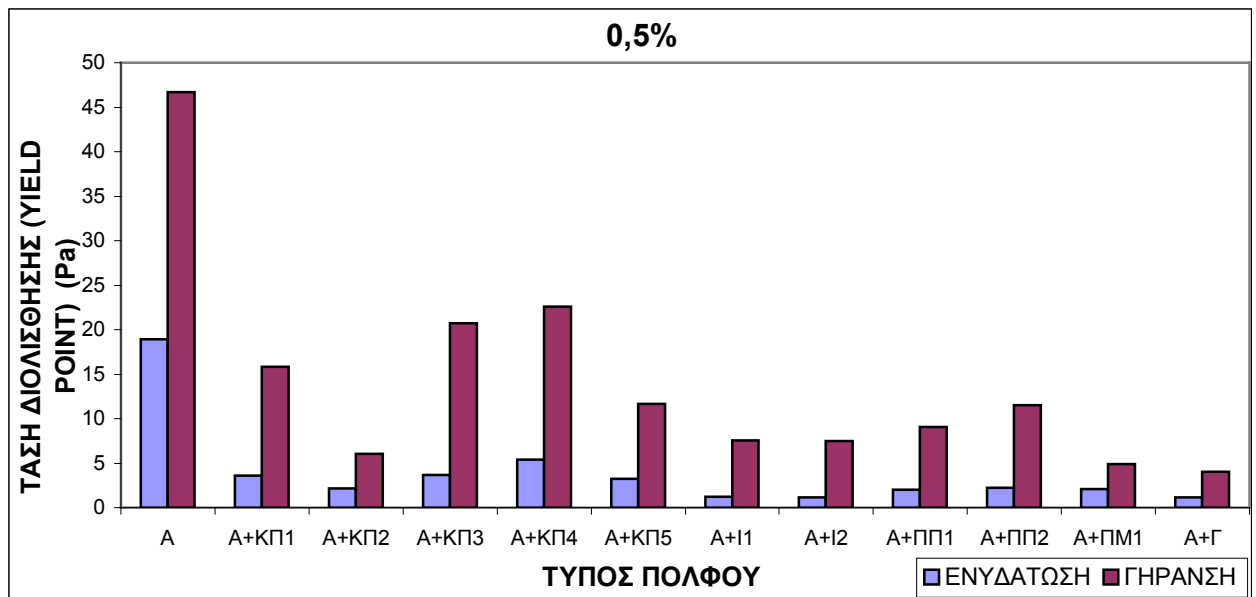
| | | | | | | | |
|--------------------|------|------|-------|-------|------|----|------|
| A + I1(ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 9,69 | 8,6 | 2,56 | 1,22 | 1,0 | -- | 7,5 |
| A + I1 (ΓΗΡΑΝΣΗ) | 8,26 | 13,8 | 15,70 | 7,52 | 7,0 | -- | 23,0 |
| A + I2(ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 9,7 | 8,6 | 2,42 | 1,16 | 0,5 | -- | 7,5 |
| A + I2(ΓΗΡΑΝΣΗ) | 8,54 | 15,4 | 15,60 | 7,47 | 6,0 | -- | 22,0 |
| A + ΠΠ1(ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 9,71 | 10,2 | 4,22 | 2,02 | 2,0 | -- | 10,5 |
| A + ΠΠ1 (ΓΗΡΑΝΣΗ) | 8,13 | 12,7 | 18,92 | 9,06 | 9,0 | -- | 25,5 |
| A+ΠΠ2(ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 9,53 | 9,5 | 4,71 | 2,25 | 2,0 | -- | 11,5 |
| A + ΠΠ2 (ΓΗΡΑΝΣΗ) | 8,28 | 13,4 | 24,07 | 11,53 | 11,5 | -- | 27,0 |
| A+ΠΜ1(ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 9,45 | 9,02 | 4,39 | 2,10 | 1,5 | -- | 9,5 |
| A + ΠΜ1 (ΓΗΡΑΝΣΗ) | 8,24 | 13,1 | 10,20 | 4,88 | 4,5 | -- | 15,0 |
| A+Γ (ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 9,01 | 6 | 2,51 | 1,12 | 0,5 | -- | 4,0 |
| A + Γ (ΓΗΡΑΝΣΗ) | 8,28 | 10,1 | 8,46 | 4,05 | 4,5 | -- | 12,5 |

Στη συνέχεια παρουσιάζονται γραφικά τα παραπάνω αποτελέσματα



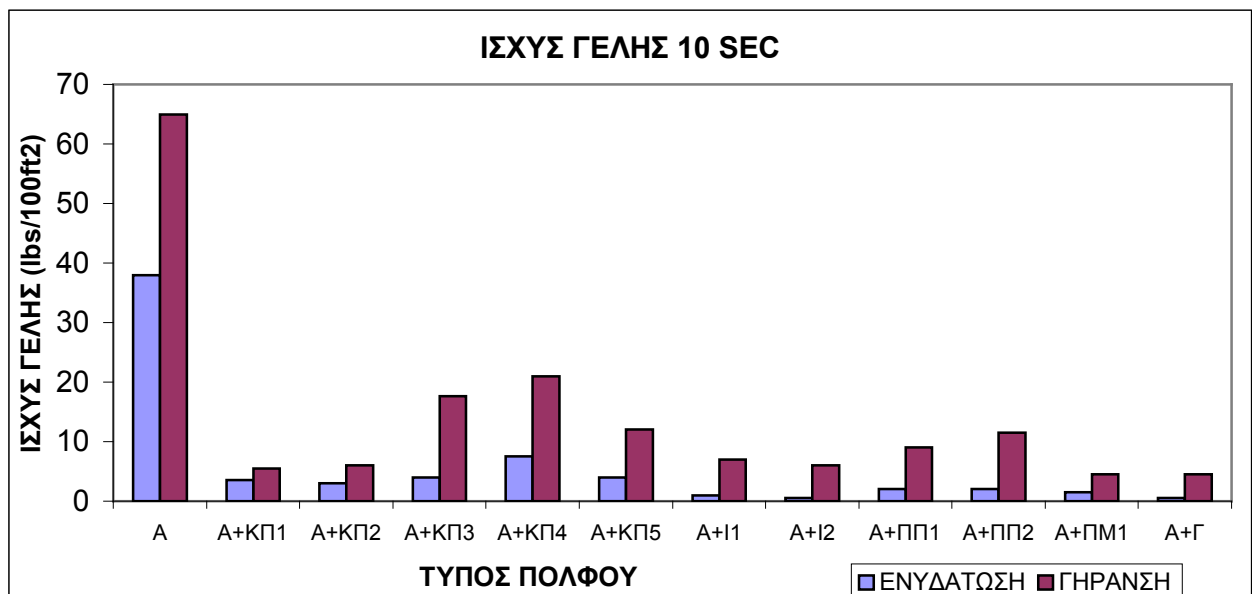
Σχήμα 6.23: Πλαστικό ιξώδες των πολφών με περιεκτικότητα λιγνίτη 0,5% που έχουν υποστεί ωρίμανση με ενυδάτωση και θερμική γήρανση. (A= πολφός βάσης)

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι το πλαστικό ιξώδες των πολφών με 0,5% συγκέντρωση λιγνίτη που έχουν υποστεί ωρίμανση με ενυδάτωση και στατική γήρανση αυξάνεται σε σχέση με αυτό του πολφού βάσης.

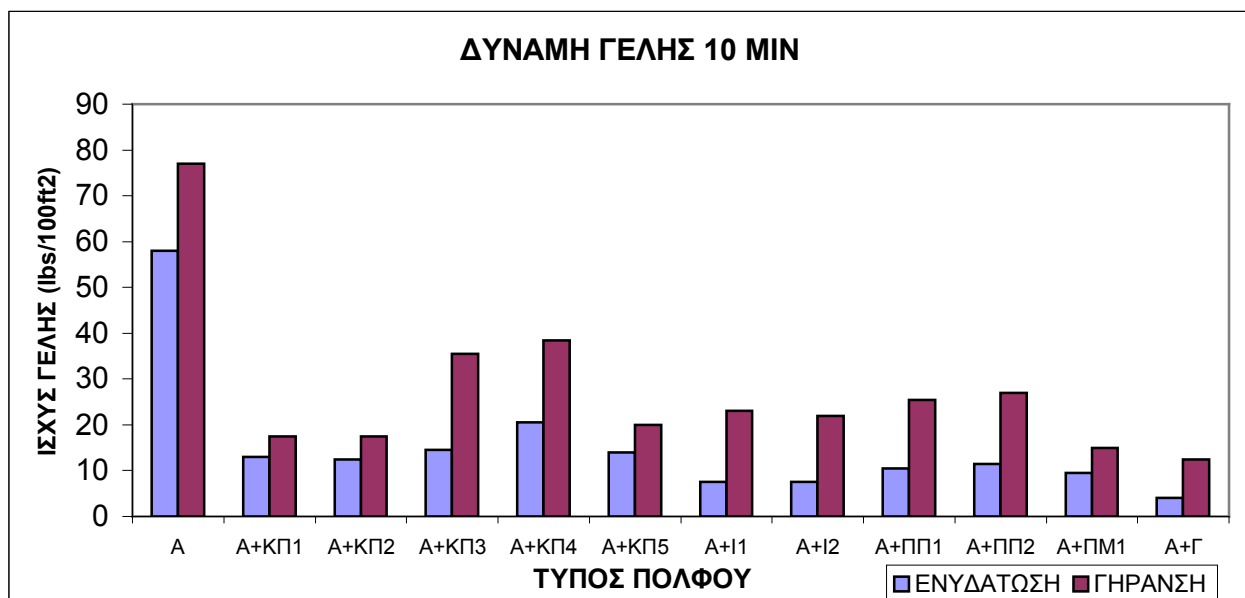


Σχήμα 6.24: Τάση διολίσθησης των πολφών με περιεκτικότητα λιγνίτη 0,5% που έχουν υποστεί ωρίμανση με ενυδάτωση και θερμική γήρανση. (A= πολφός βάσης)

Από το σχήμα 6.24 φαίνεται ότι η τάση διολίσθησης των πολφών με 0,5% συγκέντρωση λιγνίτη που έχουν υποστεί ωρίμανση με ενυδάτωση και στατική γήρανση μειώνεται σε σχέση με αυτή του πολφού βάσης.



Σχήμα 6.25: Σύγκριση ισχύος γέλης μετά από 10 sec για πολφούς με περιεκτικότητα λιγνίτη 0,5% που έχουν ωριμάσει με ενυδάτωση και θερμική γήρανση. (A= πολφός βάσης)



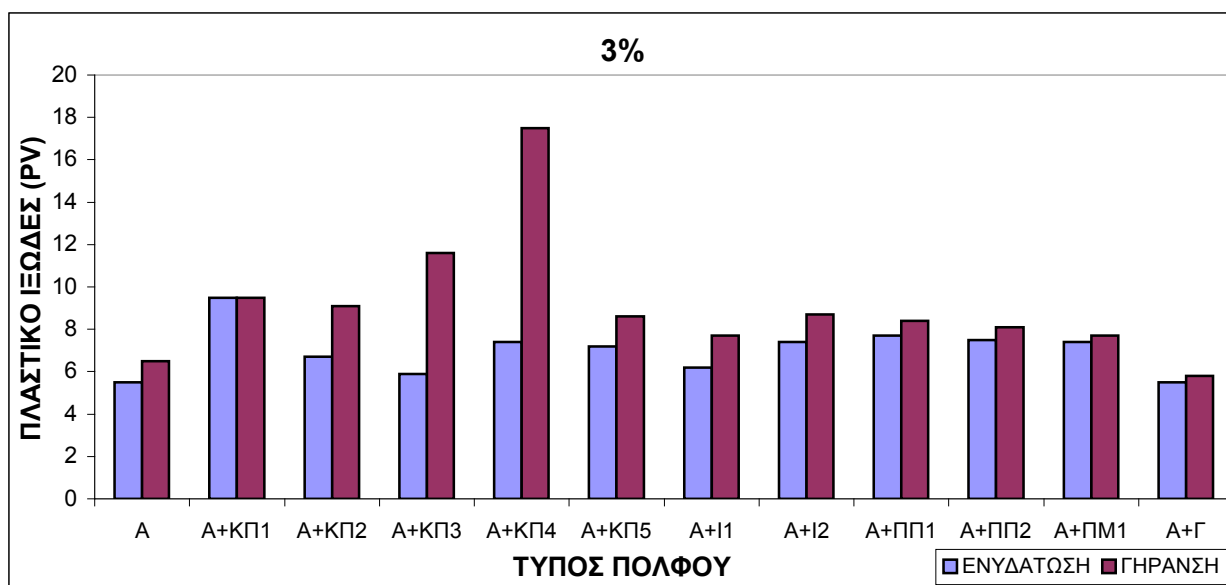
Σχήμα 6.26: Σύγκριση ισχύος γέλης μετά από 10 min για πολφούς με περιεκτικότητα λιγνίτη 0,5% που έχουν ωριμάσει με ενυδάτωση και θερμική γήρανση. (A= πολφός βάσης)

Από τα σχήματα 6.25, 6.26 παρατηρούμε ότι η τάση διολίσθησης των πολφών που έχουν υποστεί ενυδάτωση και στατική γήρανση με περιεκτικότητα λιγνίτη 0,5% μειώνεται σε σχέση με αυτήν του πολφού βάσης

Πίνακας 6.2. Αποτελέσματα ρεολογικών ιδιοτήτων των πολφών με 3% λιγνίτη, σύμφωνα με τα πρότυπα API 13B.

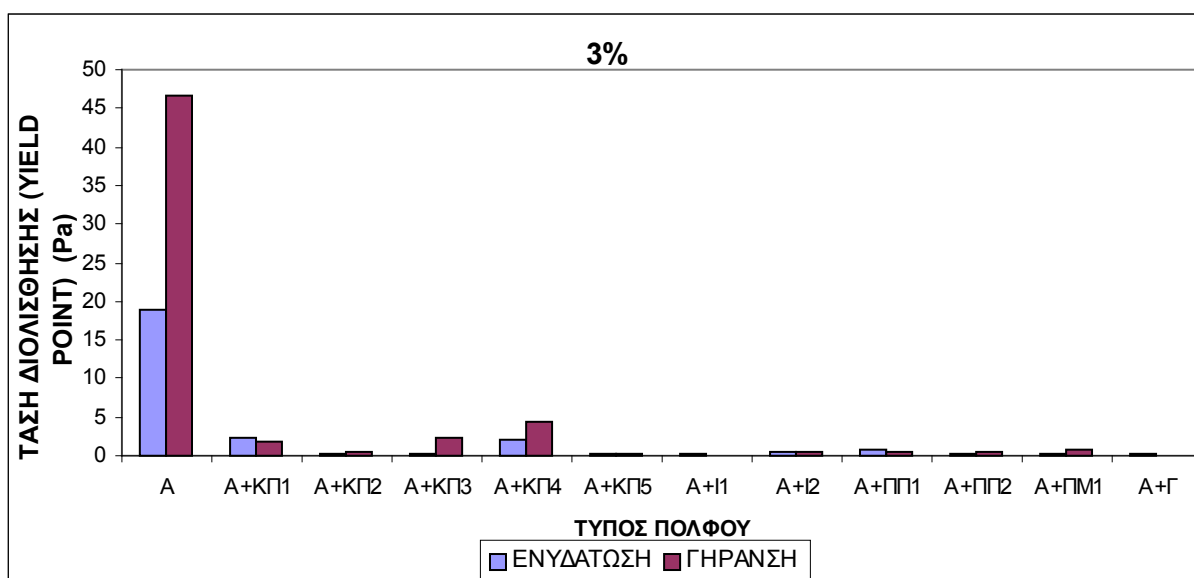
| A/A | | ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΕΟΛΟΓΙΑΣ | | | |
|--------------------|-------|--------------------------------|--|---|--|
| | pH | ΠΛΑΣΤΙΚΟ ΙΞΩΔΕΣ, PV (cP) | ΣΗΜΕΙΟ ΕΝΑΡΞΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ (yield point) (lbs/100ft^2) | ΣΗΜΕΙΟ ΕΝΑΡΞΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ (yield point) (Pa) | ΔΥΝΑΜΗ ΓΕΛΗΣ (gel strength) 10sec -- 10 min (lbs/100ft^2) |
| | | | | | |
| 3% | | | | | |
| A +ΚΠ1(ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 9,61 | 9,5 | 4,71 | 2,25 | 1,0 -- 1,0 |
| A + ΚΠ1 (ΓΗΡΑΝΣΗ) | 8,36 | 9,5 | 3,78 | 1,81 | 1,0 -- 0,5 |
| A +ΚΠ2(ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 9,94 | 6,7 | 0,55 | 0,26 | 1,0 -- 1,0 |
| A + ΚΠ2 (ΓΗΡΑΝΣΗ) | 8,31 | 9,1 | 0,97 | 0,46 | 1,0 -- 1,0 |
| A +ΚΠ3(ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 10,22 | 5,9 | 0,65 | 0,31 | 0,5 -- 1,0 |
| A + ΚΠ3 (ΓΗΡΑΝΣΗ) | 8,81 | 11,6 | 4,70 | 2,25 | 1,0 -- 13,5 |
| A +ΚΠ4(ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 10,74 | 7,4 | 4,41 | 2,11 | 2,0 -- 11,5 |
| A + ΚΠ4 (ΓΗΡΑΝΣΗ) | 8,34 | 17,5 | 9,26 | 4,44 | 3,0 -- 17 |
| A + ΚΠ5(ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 9,74 | 7,2 | 0,35 | 0,17 | 1,0 -- 0,5 |
| A + ΚΠ5 (ΓΗΡΑΝΣΗ) | 8,47 | 8,6 | 0,76 | 0,36 | 0,5 -- 0,5 |
| A + Ι1(ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 10,76 | 6,2 | 0,43 | 0,20 | 1,0 -- 1,0 |
| A + Ι1 (ΓΗΡΑΝΣΗ) | 8,36 | 7,7 | 0,11 | 0,05 | 0,5 -- 0,5 |
| A +Ι2(ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 10,8 | 7,4 | 0,98 | 0,47 | 1,0 -- 1,0 |
| A + Ι2(ΓΗΡΑΝΣΗ) | 8,45 | 8,7 | 1,34 | 0,64 | 0,5 -- 0,5 |
| A +ΠΠ1(ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 10,24 | 7,7 | 1,38 | 0,66 | 0,5 -- 0,5 |
| A + ΠΠ1 (ΓΗΡΑΝΣΗ) | 8,41 | 8,4 | 1,11 | 0,53 | 0,5 -- 0,5 |
| A+ΠΠ2(ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 10,42 | 7,5 | 0,29 | 0,14 | 1,0 -- 0,5 |
| A + ΠΠ2 (ΓΗΡΑΝΣΗ) | 8,37 | 8,1 | 1,14 | 0,54 | 0,5 -- 0,5 |
| A+ΠΜ1(ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 10,19 | 7,4 | 0,28 | 0,13 | 1,0 -- 1,0 |
| A + ΠΜ1 (ΓΗΡΑΝΣΗ) | 8,39 | 7,4 | 1,84 | 0,88 | 0,5 -- 0,5 |
| A+Γ(ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ) | 8.42 | 3.3 | 0.66 | 0.318 | 1 -- 1 |
| A + Γ (ΓΗΡΑΝΣΗ) | 8.24 | 5.8 | 0.20 | 0.0947 | 1.5 -- 1 |

Στη συνέχεια παρουσιάζονται γραφικά τα παραπάνω αποτελέσματα.



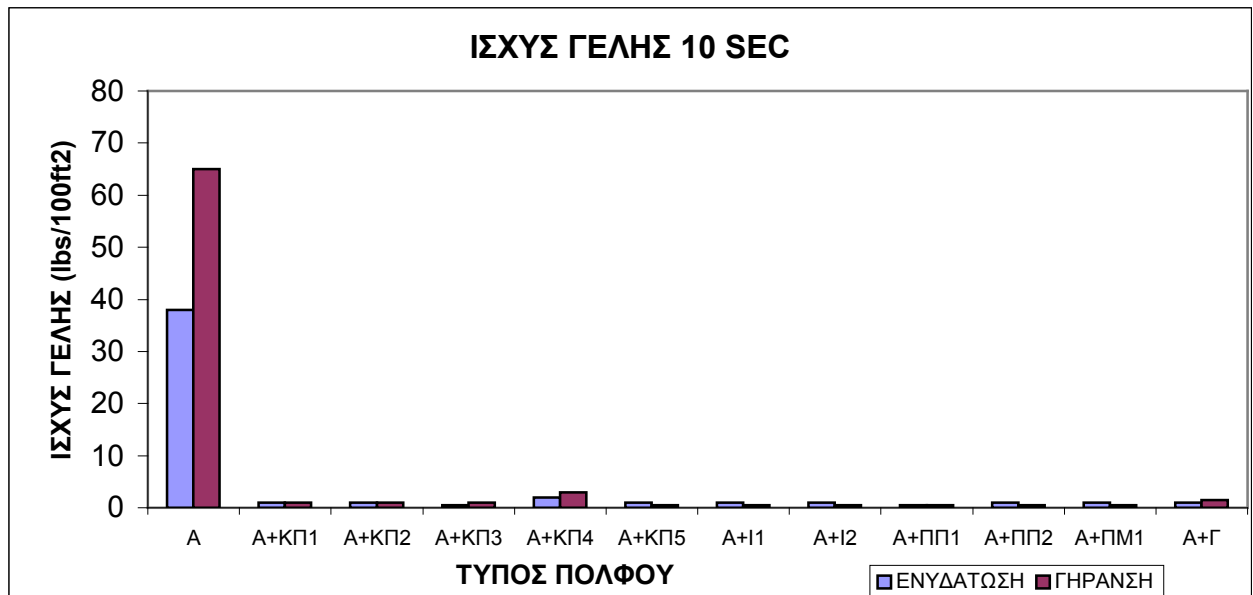
Σχήμα 6.27: Πλαστικό ιξώδες των πολφών με 3% συγκέντρωση λιγνίτη που έχουν υποστεί ωρίμανση με ενυδάτωση και θερμική γήρανση. (A= πολφός βάσης)

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι το πλαστικό ιξώδες των πολφών με 3% συγκέντρωση λιγνίτη που έχουν υποστεί ωρίμανση με ενυδάτωση και στατική γήρανση αυξάνεται ή παραμένει σταθερό σε σχέση με αυτό του πολφού βάσης.

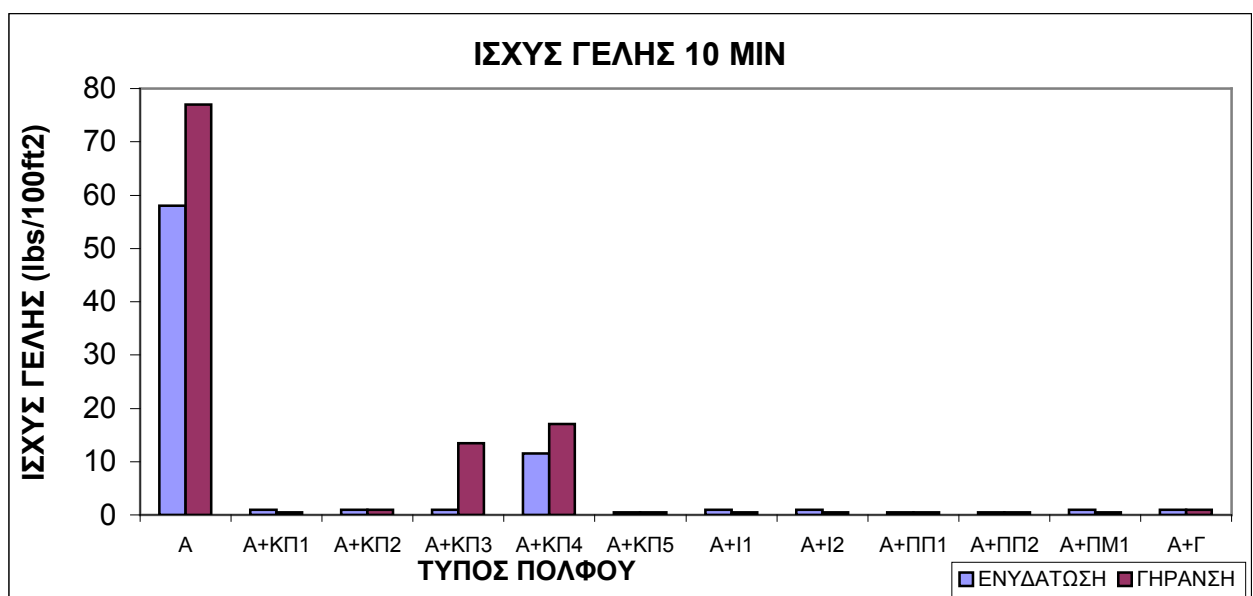


Σχήμα 6.28: Τάση διολίσθησης των πολφών με 3% συγκέντρωση λιγνίτη που έχουν υποστεί ωρίμανση με ενυδάτωση και θερμική γήρανση. (A= πολφός βάσης)

Από το σχήμα 6.28 φαίνεται ότι η τάση διολίσθησης των πολφών με 3% συγκέντρωση λιγνίτη που έχουν υποστεί ωρίμανση με ενυδάτωση και στατική γήρανση μειώνεται αρκετά σε σχέση με αυτή του πολφού βάσης.



Σχήμα 6.29: Σύγκριση ισχύος γέλης μετά από 10 sec για πολφούς με περιεκτικότητα λιγνίτη 3% που έχουν ωριμάσει με ενυδάτωση και θερμική γήρανση. (A= πολφός βάσης)



Σχήμα 6.30: Σύγκριση ισχύος γέλης μετά από 10 min για πολφούς με περιεκτικότητα λιγνίτη 3% που έχουν ωριμάσει με ενυδάτωση και θερμική γήρανση. (A= πολφός βάσης)

Από τα σχήματα 6.29 και 6.30 φαίνεται ότι η δύναμη γέλης των πολφών με 3% συγκέντρωση λιγνίτη που έχουν υποστεί ωρίμανση με ενυδάτωση και στατική γήρανση μειώνεται σημαντικά σε σχέση με αυτή του πολφού βάσης.

6.4 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΡΕΟΛΟΓΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΤΑ ΔΕΙΓΜΑΤΑ κρητης, πελοποννησου, ιωαννινων

➤ ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΩΝ ΡΕΟΛΟΓΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΠΟΛΦΩΝ

Το ποσοστό μεταβολής των ρεολογικών ιδιοτήτων των πολφών προκύπτει από το λόγο:

$$\frac{\text{ιδιότητα πολφού βάσης(A)} - \text{ιδιότητα πολφού με λιγνίτη}}{\text{ιδιότητα πολφού βάσης(A)}}$$

Με βάση την παραπάνω σχέση, στον πίνακα 6.3 παρουσιάζεται το εκατοστιαίο ποσοστό μεταβολής της τάσης διολίσθησης και του πλαστικού ιξώδους, των πολφών που έχουν ωριμάσει με ενυδάτωση και στατική γήρανση.

A.

| ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ | | | |
|-----------|-------|---------|-------|
| 0,50% | | 3% | |
| A + ΚΠ1 | 81,02 | A + ΚΠ1 | 88,1 |
| A + ΚΠ2 | 88,58 | A + ΚΠ2 | 98,63 |
| A + ΚΠ3 | 80,43 | A + ΚΠ3 | 98,36 |
| A + ΚΠ4 | 71,39 | A + ΚΠ4 | 88,84 |
| A + ΚΠ5 | 82,76 | A + ΚΠ5 | 99,1 |
| A + Ι1 | 93,55 | A + Ι1 | 98,94 |
| A + Ι2 | 93,87 | A + Ι2 | 97,51 |
| A + ΠΠ1 | 89,32 | A + ΠΠ1 | 96,51 |
| A + ΠΠ2 | 88,1 | A + ΠΠ2 | 99,26 |
| A+ΠΜ1 | 88,89 | A+ΠΜ1 | 99,31 |
| Γ | 94,08 | Γ | 98,31 |

B.

| ΓΗΡΑΝΣΗ | | | |
|---------|-------|---------|-------|
| 0,50% | | 3% | |
| A + ΚΠ1 | 66,15 | A + ΚΠ1 | 96,12 |
| A + ΚΠ2 | 87,08 | A + ΚΠ2 | 99,01 |
| A + ΚΠ3 | 55,59 | A + ΚΠ3 | 95,18 |
| A + ΚΠ4 | 51,67 | A + ΚΠ4 | 90,49 |
| A + ΚΠ5 | 75,04 | A + ΚΠ5 | 99,23 |
| A + Ι1 | 83,89 | A + Ι1 | 99,89 |
| A + Ι2 | 84 | A + Ι2 | 98,63 |
| A + ΠΠ1 | 80,59 | A + ΠΠ1 | 98,86 |
| A + ΠΠ2 | 75,3 | A + ΠΠ2 | 98,84 |
| A+ΠΜ1 | 89,55 | A+ΠΜ1 | 98,11 |
| Γ | 91,32 | Γ | 99,81 |

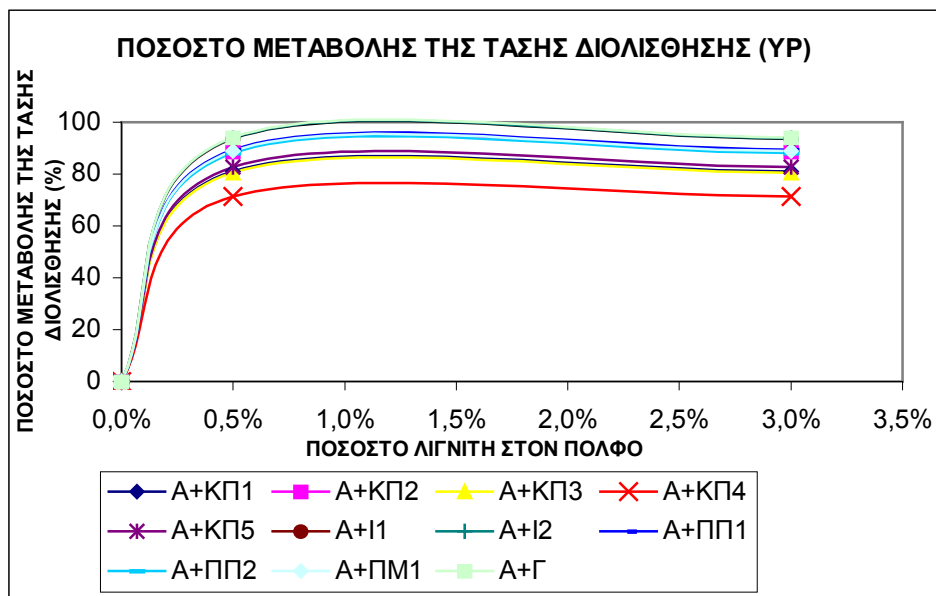
ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3:

A: Ποσοστό μεταβολής (%) της τάσης διολίσθησης (YP) των δειγμάτων που έχουν υποστεί ωρίμανση με ενυδάτωση.

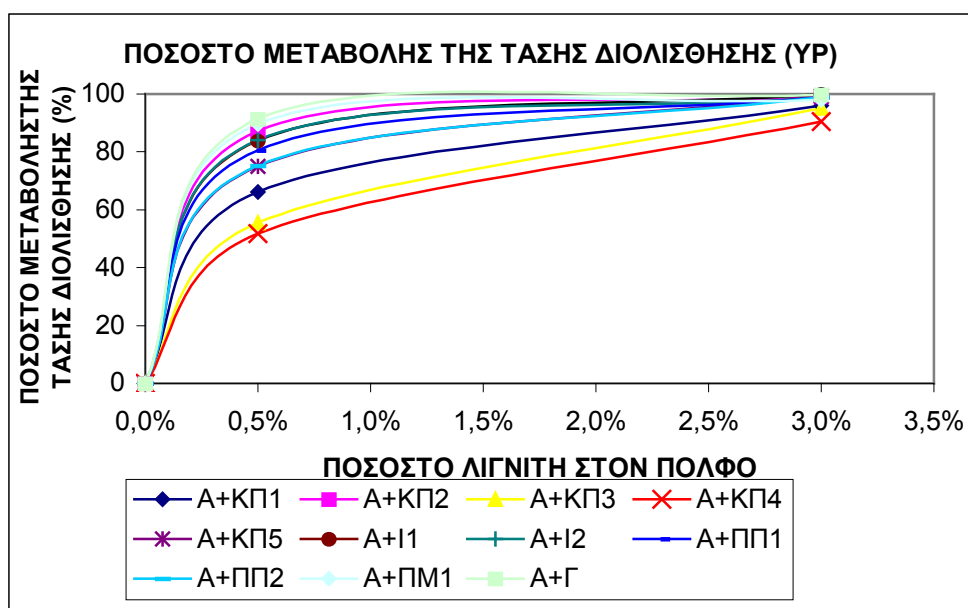
Σημείο αναφοράς: YP πολφού βάσης = 18,91 Pa

Β: Ποσοστό μεταβολής (%) της τάσης διολίσθησης (ΥΡ) των δειγμάτων που έχουν υποστεί ωρίμανση με θερμική γήρανση στους 177° C.
Σημείο αναφοράς: ΥΡ πολφού βάσης = 46,68 Pa

A



B



Σχήμα 6.31: Εκατοστιαίο ποσοστό μεταβολής της τάσης διολίσθησης (ΥΡ) των πολφών των δειγμάτων Κρήτης-Πελοποννήσου-Ιωαννίνων: **A:** πολφοί που έχουν ωριμάσει με ενυδάτωση **B:** πολφοί που έχουν ωριμάσει με θερμική γήρανση.

Τέλος, φαίνεται καθαρά ότι όλοι οι πολφοί έχουν βελτιώσει την τάση διολίσθησης συγκρινόμενοι με τον πολφό βάσης, ενώ κάποιοι πολφοί έχουν πολύ καλύτερη συμπεριφορά από άλλους. Γενικότερα, η προσθήκη 3% κ.ό. λιγνίτη φαίνεται ότι βελτιώνει σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά των γεωτρητικών πολφών που έχουν υποστεί ωρίμανση με στατική γήρανση ενώ βελτίωση παρατηρείται και στους πολφούς που έχουν υποστεί ωρίμανση με ενυδάτωση.

Γ .

Δ .

| ΩΡΙΜΑΝΣΗ | | | |
|----------|--------|---------|-------|
| 0,50% | | 3% | |
| A + ΚΠ1 | -63,6 | A + ΚΠ1 | -72,7 |
| A + ΚΠ2 | -147,3 | A + ΚΠ2 | -21,8 |
| A + ΚΠ3 | -40,0 | A + ΚΠ3 | -7,3 |
| A + ΚΠ4 | -36,4 | A + ΚΠ4 | -34,5 |
| A + ΚΠ5 | -49,1 | A + ΚΠ5 | -30,9 |
| A + Ι1 | -56,4 | A + Ι1 | -12,7 |
| A + Ι2 | -56,4 | A + Ι2 | -34,5 |
| A + ΠΠ1 | -85,5 | A + ΠΠ1 | -40,0 |
| A + ΠΠ2 | -72,7 | A + ΠΠ2 | -36,4 |
| A + ΠΜ1 | -64,0 | A + ΠΜ1 | -34,5 |
| A+Γ | -9,1 | A+Γ | 0 |

| ΓΗΡΑΝΣΗ | | | |
|---------|----------|---------|--------|
| 0,50% | | 3% | |
| A + ΚΠ1 | 13,5385 | A + ΚΠ1 | -46,2 |
| A + ΚΠ2 | -109,231 | A + ΚΠ2 | -40,0 |
| A + ΚΠ3 | -18,4615 | A + ΚΠ3 | -78,5 |
| A + ΚΠ4 | 3,076923 | A + ΚΠ4 | -169,2 |
| A + ΚΠ5 | -26,1538 | A + ΚΠ5 | -32,3 |
| A + Ι1 | -112,308 | A + Ι1 | -18,5 |
| A + Ι2 | -136,923 | A + Ι2 | -33,8 |
| A + ΠΠ1 | -95,3846 | A + ΠΠ1 | -29,2 |
| A + ΠΠ2 | -106,154 | A + ΠΠ2 | -24,6 |
| A + ΠΜ1 | -101,538 | A + ΠΜ1 | -18,5 |
| A+Γ | -55,3846 | A+Γ | 10,8 |

Πίνακας 6.4

Γ: Ποσοστό μεταβολής (%) του πλαστικού ιξώδους (PV) των δειγμάτων που έχουν υποστεί ωρίμανση με ενυδάτωση.

Σημείο αναφοράς: PV πολφός βάσης = 5.5 cP

Δ: Ποσοστό μεταβολής(%) του πλαστικού ιξώδους (PV) των δειγμάτων που έχουν υποστεί ωρίμανση με θερμική γήρανση στους 177° C.

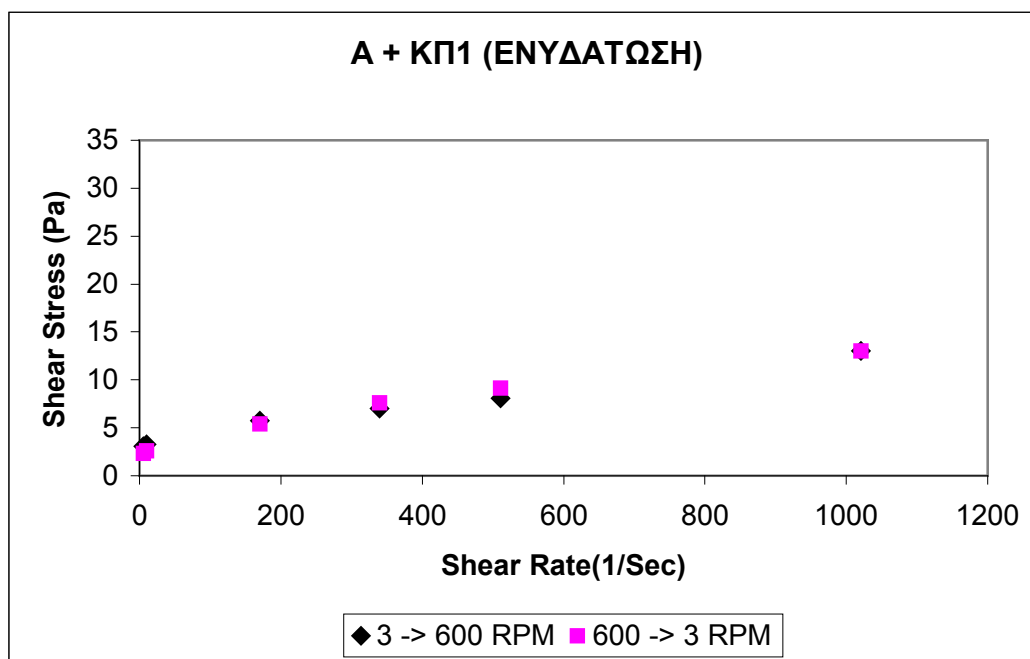
Σημείο αναφοράς: PV πολφός βάσης = 6.5 cP

Οι αρνητικές τιμές της μεταβολής στα παραπάνω διαγράμματα τόσο στην ωρίμανση όσο και στην ενυδάτωση σημαίνει ότι οι πολφοί παρουσίασαν αύξηση του πλαστικού ιξώδους. Η αύξηση αυτή, δεν είναι επιθυμητή αλλά δεν είναι και καταστρεπτική.

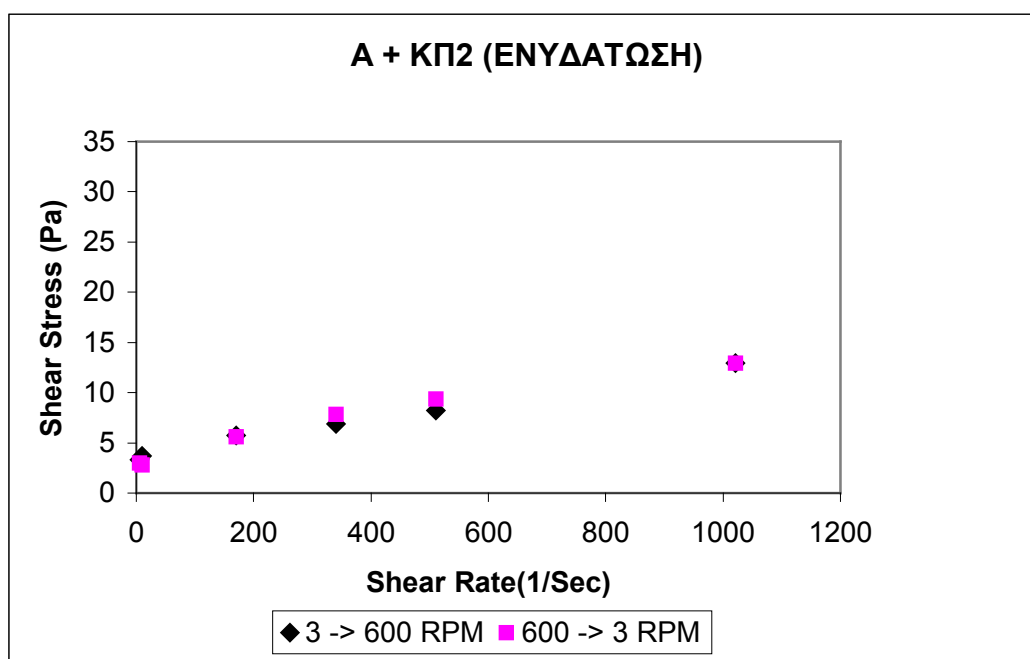
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΘΙΞΟΤΡΟΠΙΑΣ

7.1 ΠΟΛΦΟΣ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΛΙΓΝΙΤΗΣ ΣΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ 0,5%

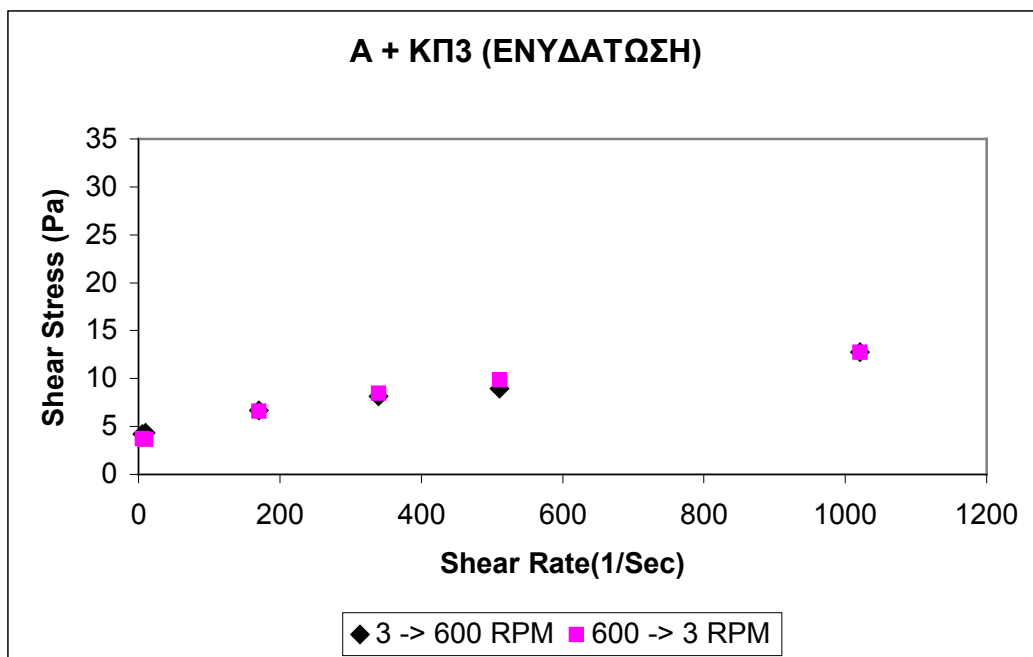
Παρακάτω, παρουσιάζονται τα διαγράμματα θιξοτροπίας για πολφό βάσης που ωρίμασε με ενυδάτωση στον οποίο έχει προστεθεί 0,5% λιγνίτης.



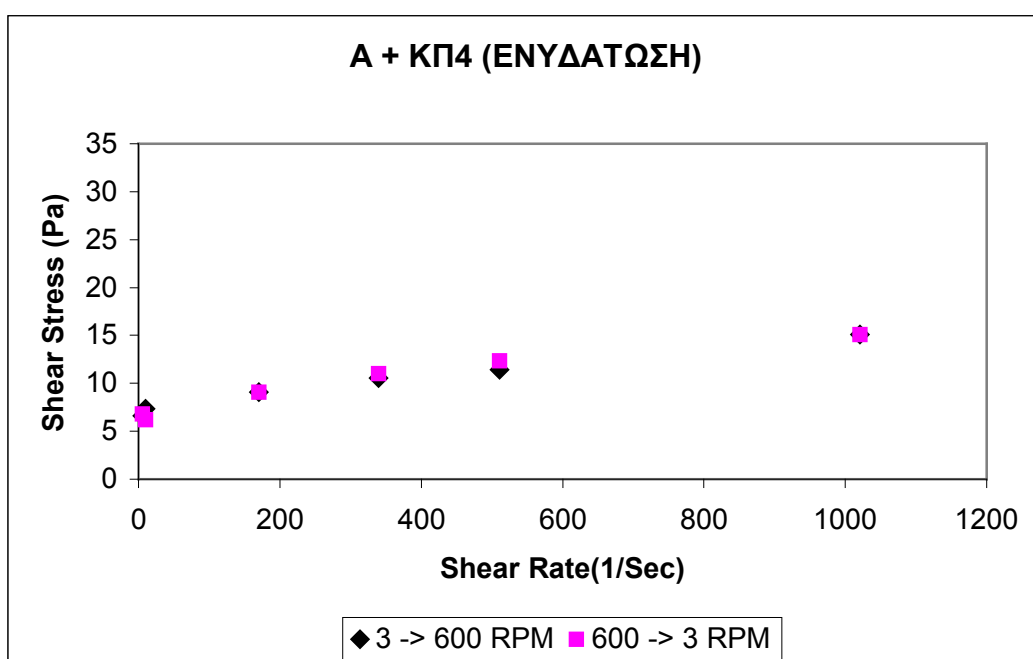
Σχήμα 7.1. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ1,ενυδάτωση



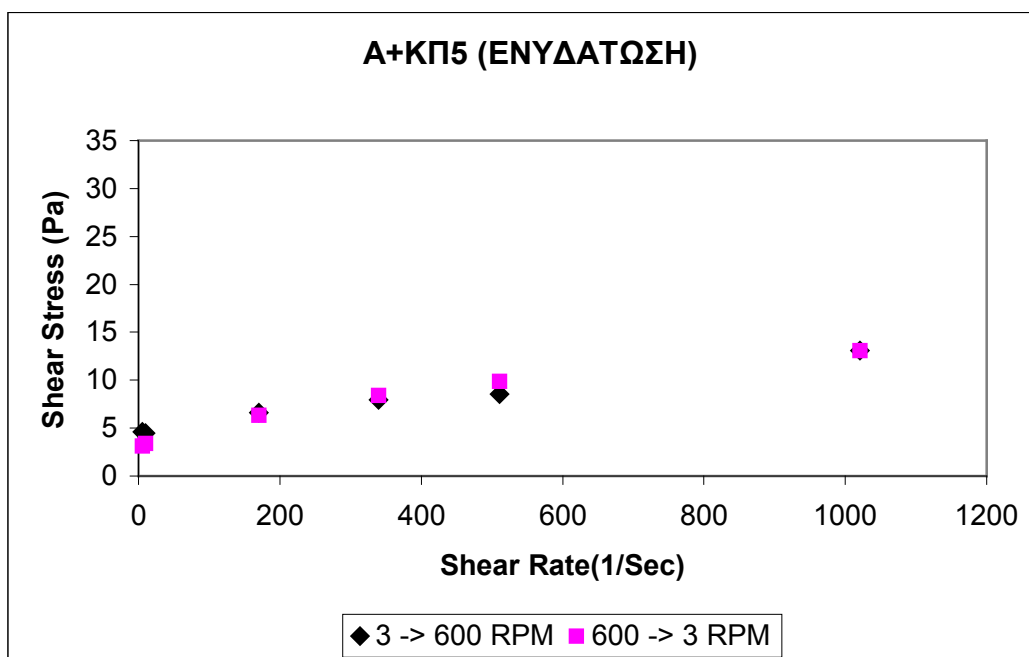
Σχήμα 7.2. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ2, ενυδάτωση



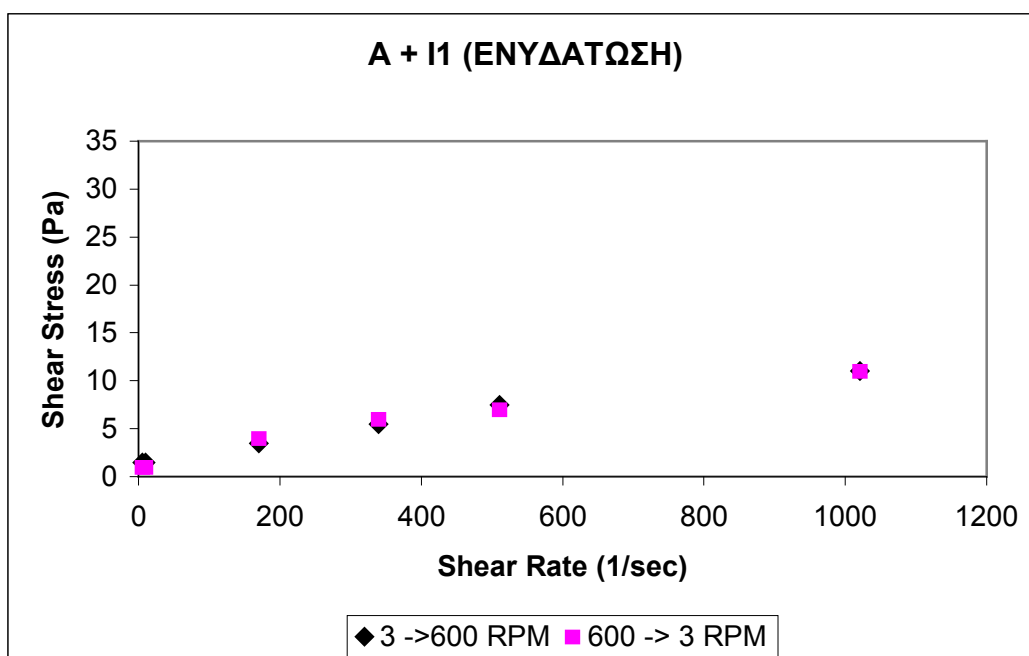
Σχήμα 7.3. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ3, ενυδάτωση



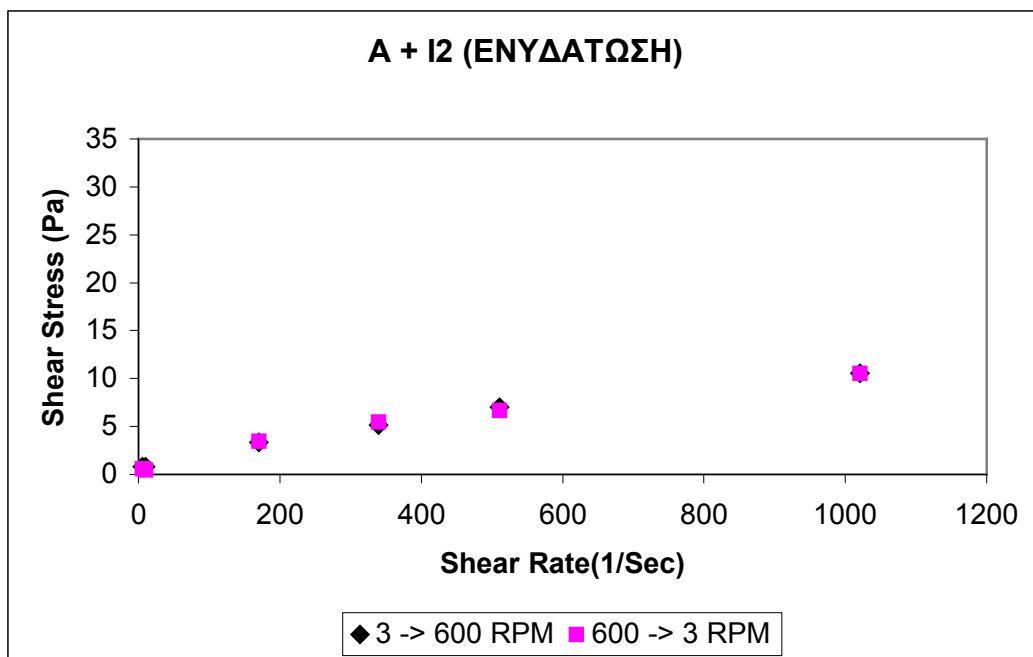
Σχήμα 7.4. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ4, ενυδάτωση



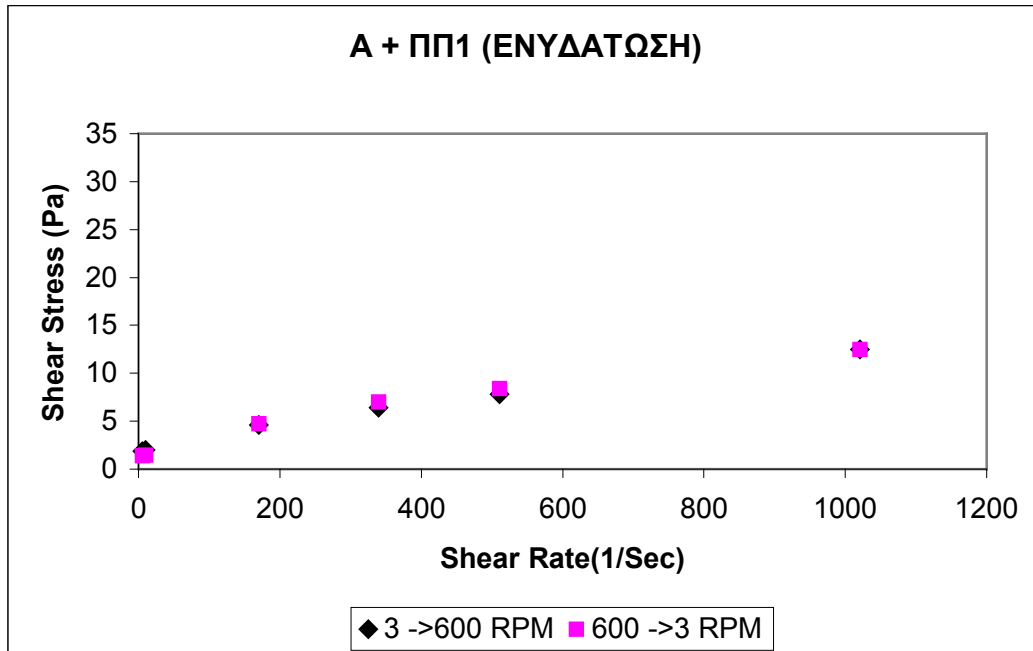
Σχήμα 7.5. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ5, ενυδάτωση



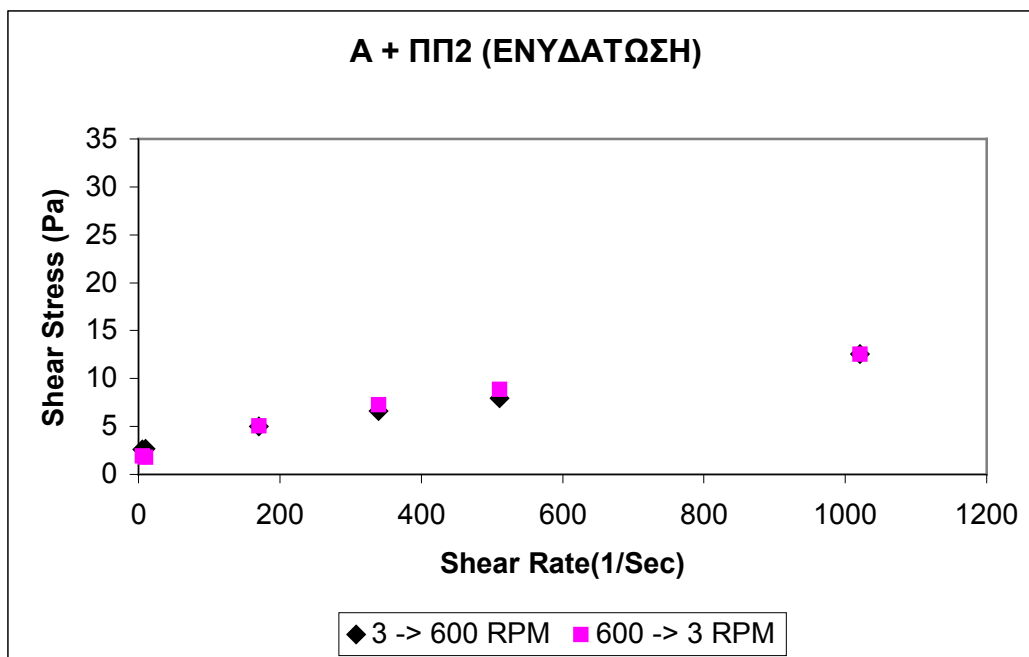
Σχήμα 7.6. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% I1, ενυδάτωση



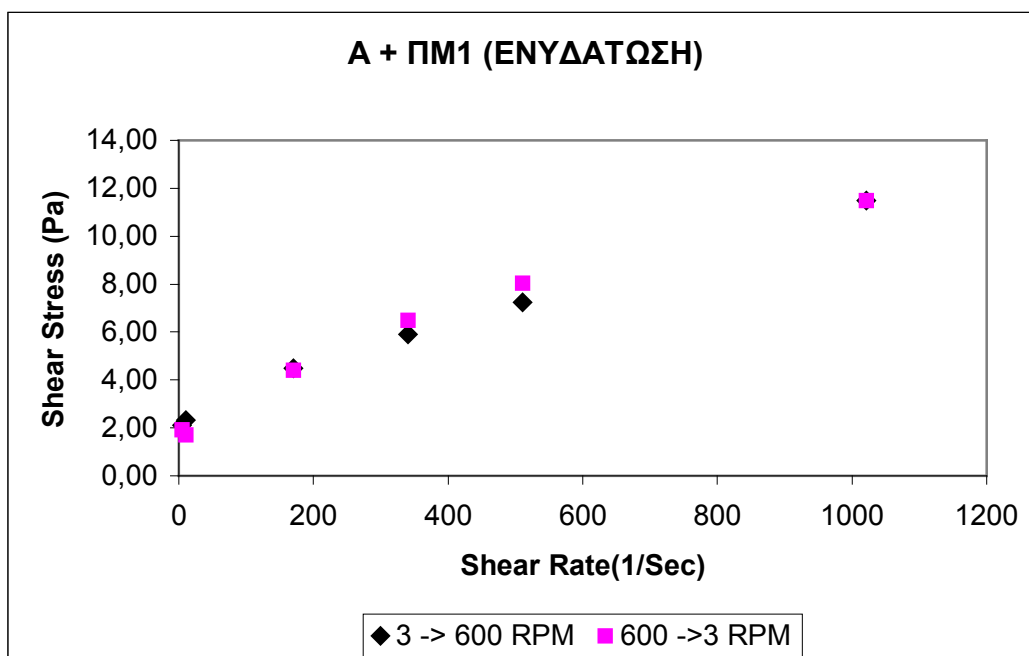
Σχήμα 7.7. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% I2 ,ενυδάτωση



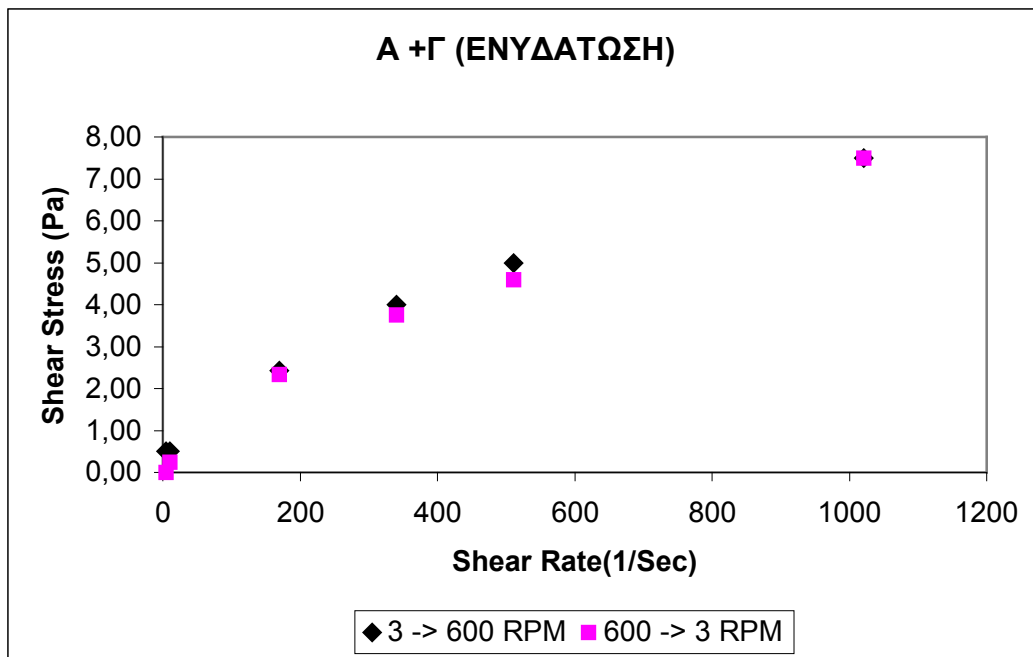
Σχήμα 7.8. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΠΠ1, ενυδάτωση



Σχήμα 7.9. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΠΠ2, ενυδάτωση

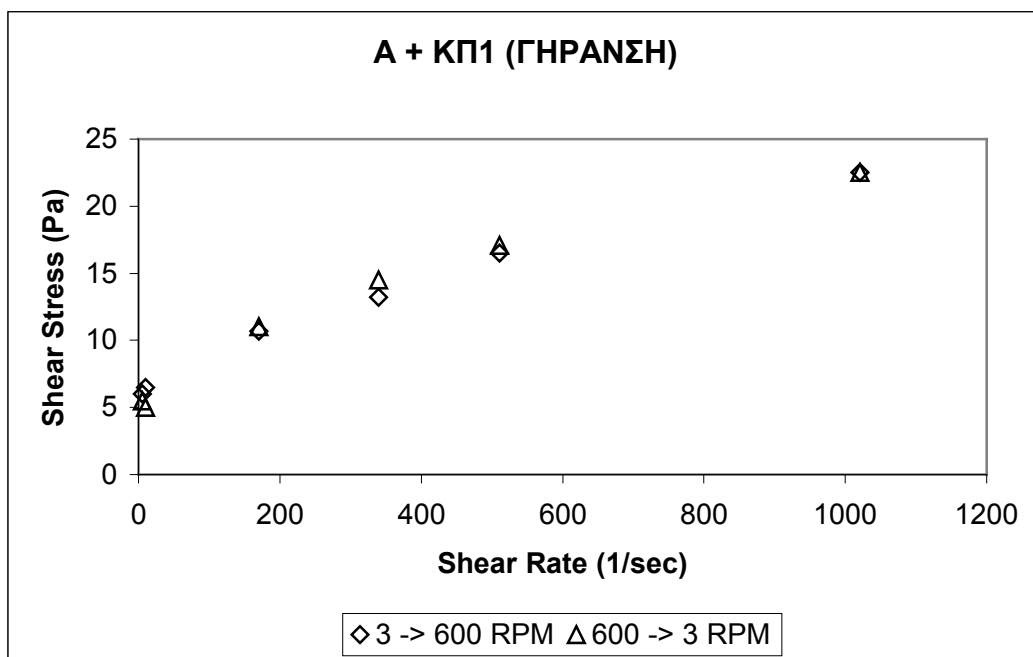


Σχήμα 7.10. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΠΜ1, ενυδάτωση

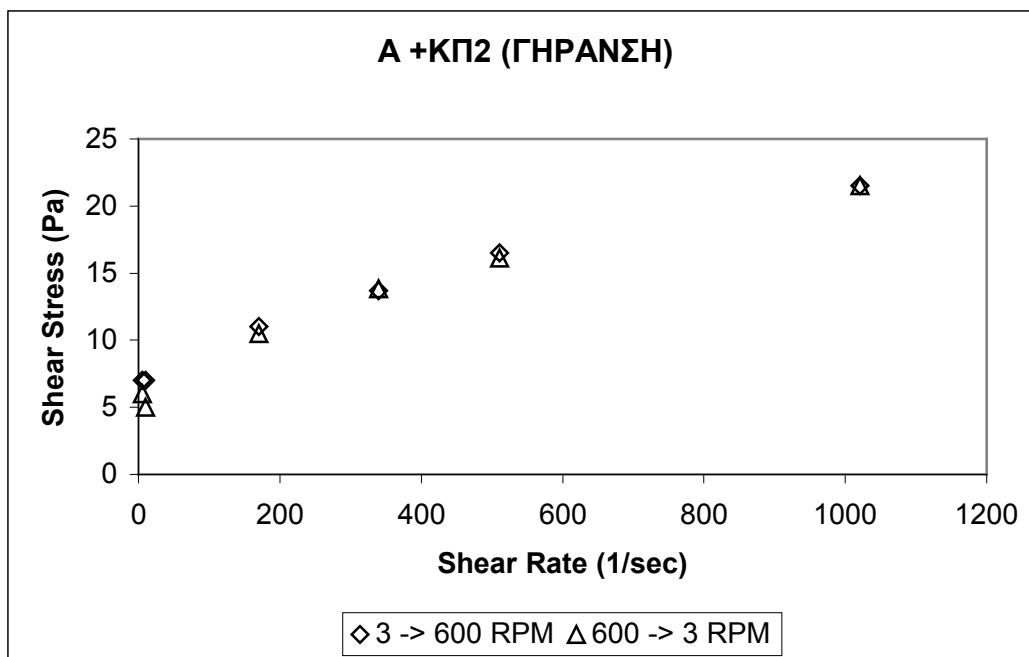


Σχήμα 7.11. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% Γ, ενυδάτωση

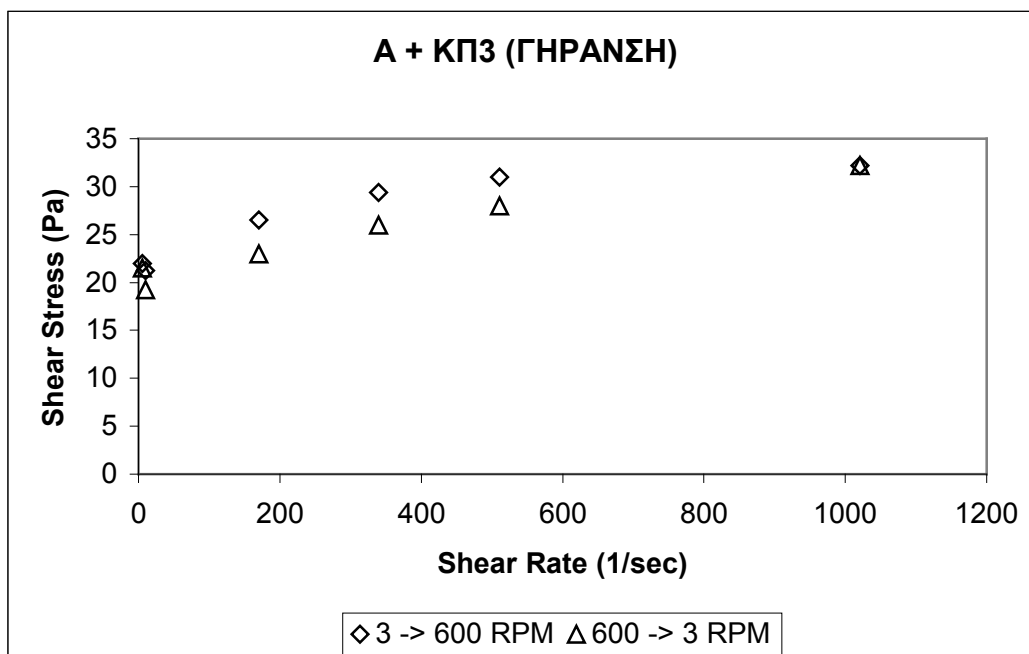
Ακολουθούν τα διαγράμματα για πολφό βάσης που ωρίμασε με θερμική γήρανση στον οποίο έχει προστεθεί 0,5% λιγνίτης.



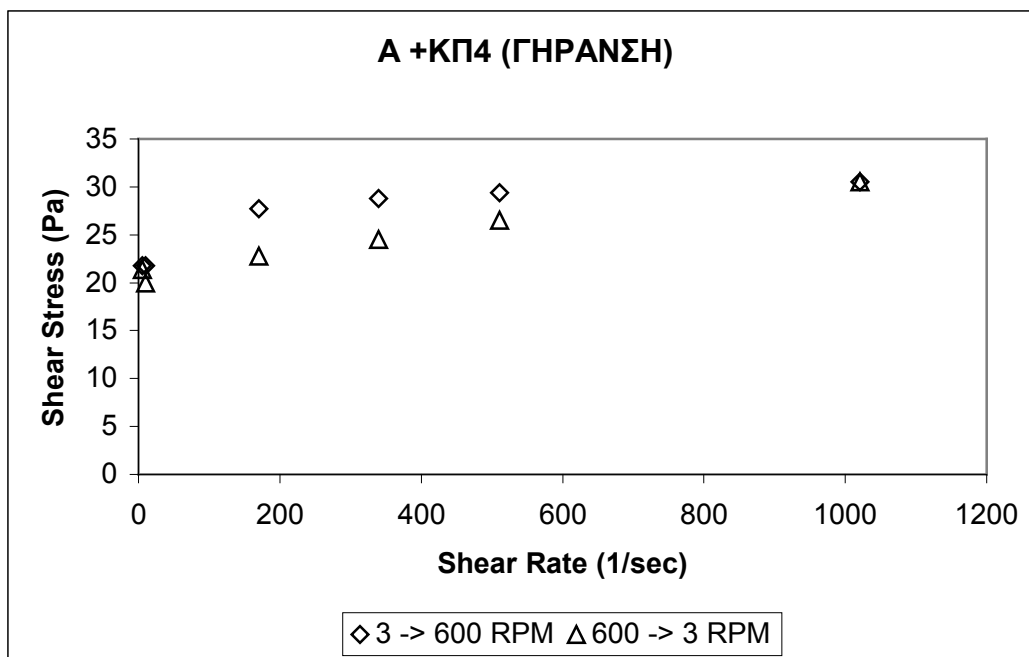
Σχήμα 7.12. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ1, γήρανση



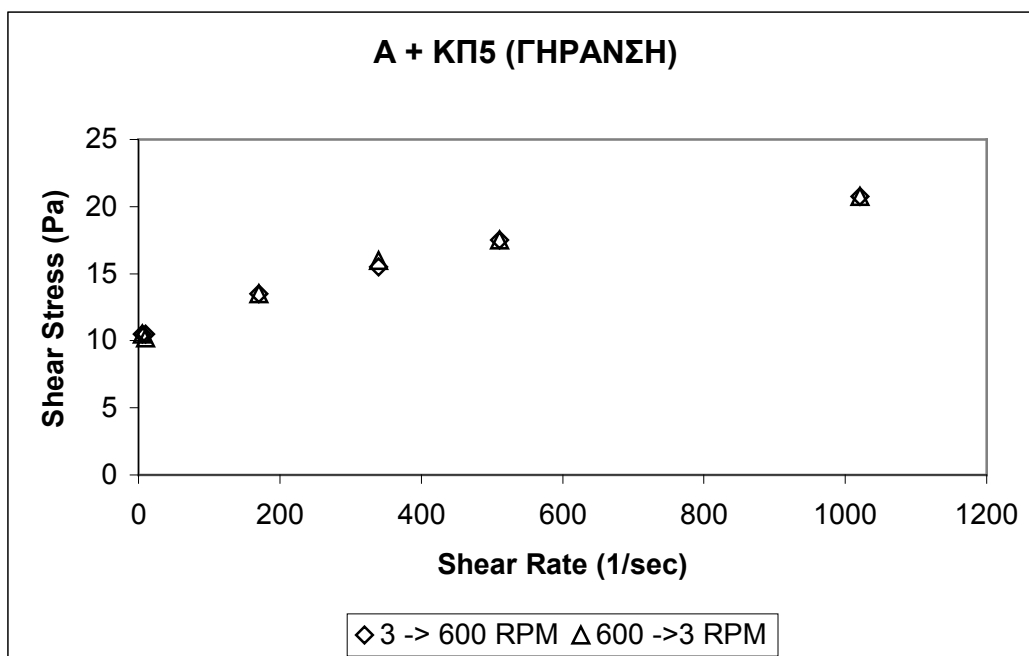
Σχήμα 7.13. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ2, γήρανση



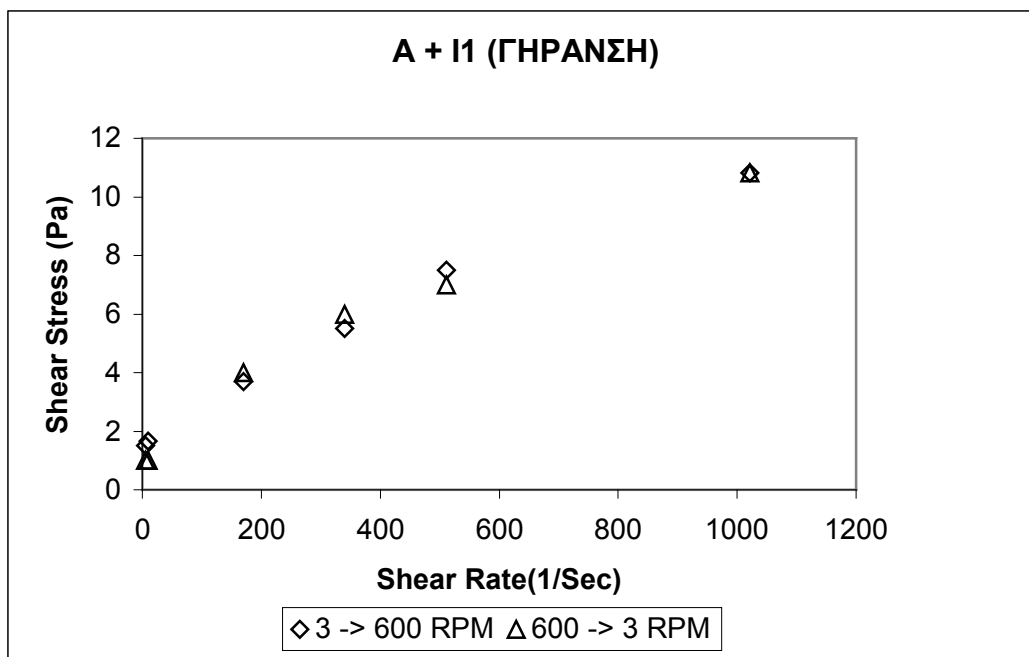
Σχήμα 7.14. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ3, γήρανση



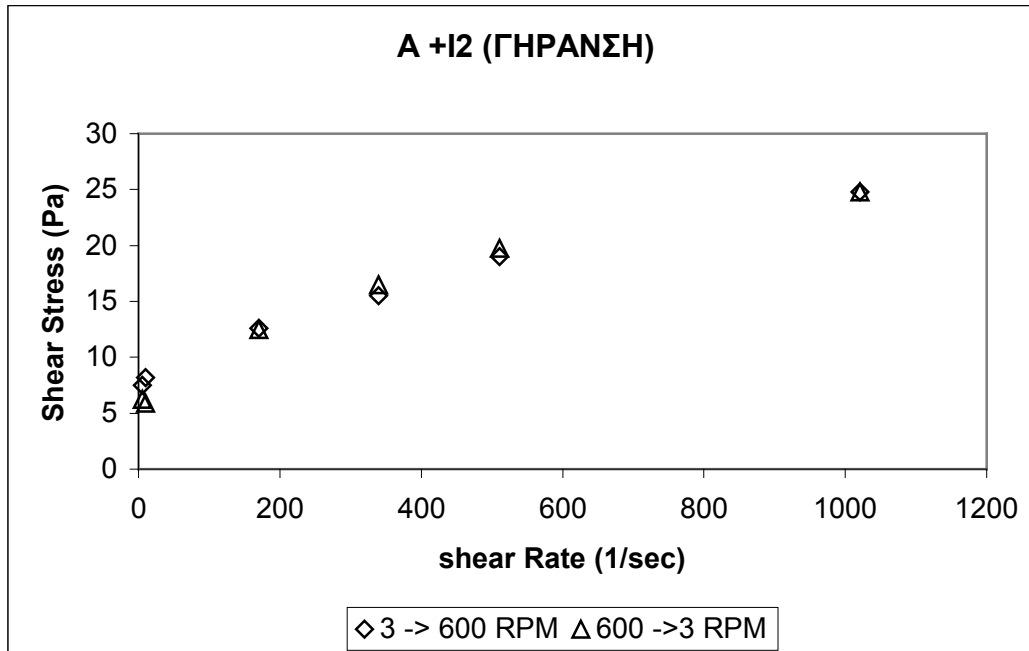
Σχήμα 7.15. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ4, γήρανση



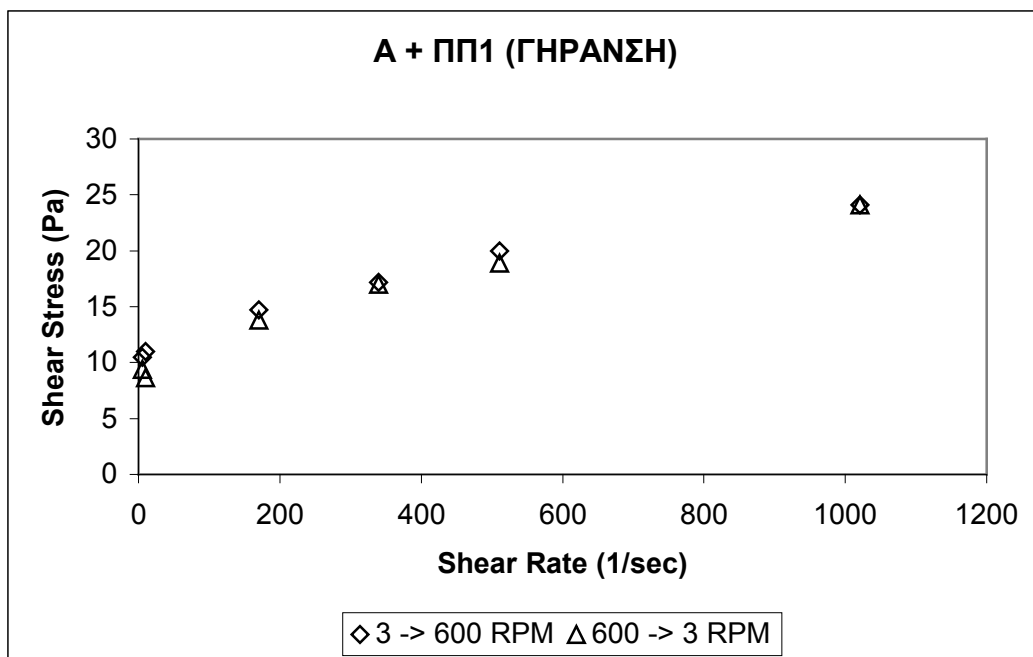
Σχήμα 7.16. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΚΠ5, γήρανση



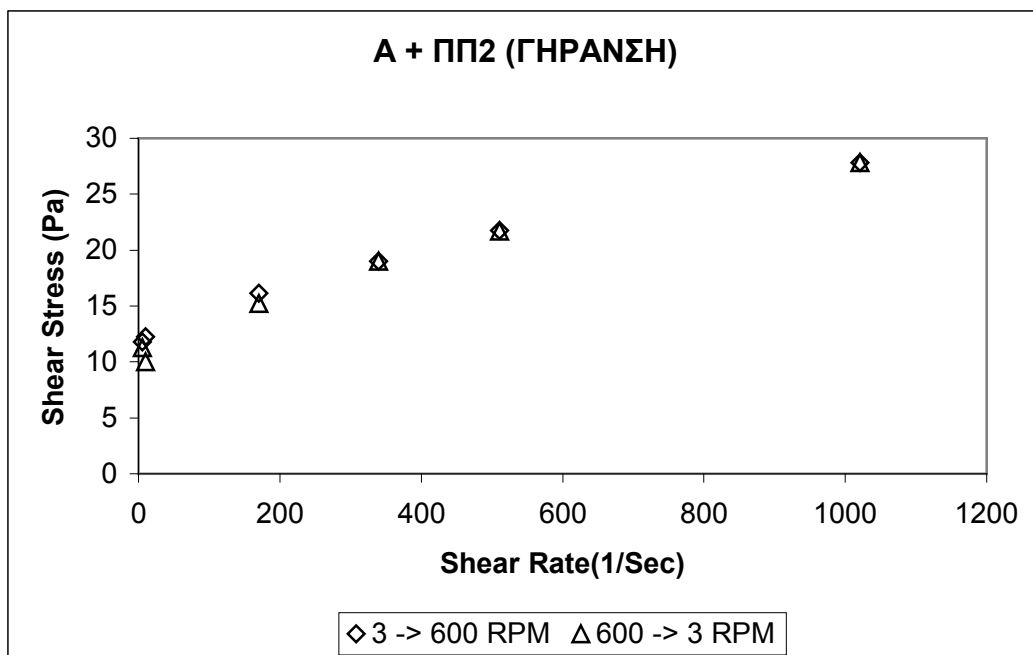
Σχήμα 7.17. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% I1, γήρανση



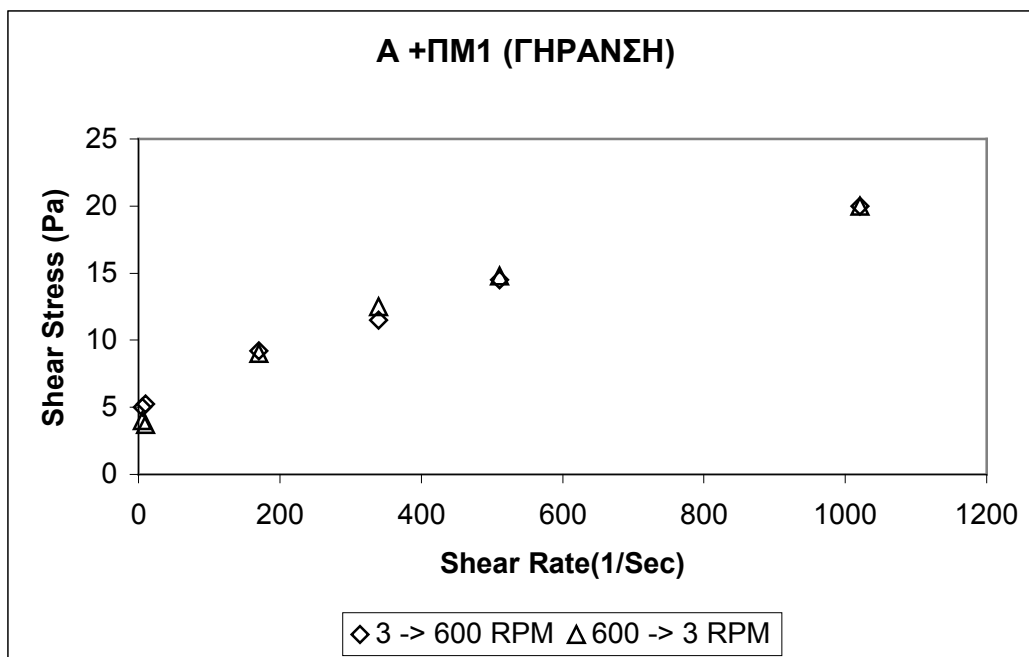
Σχήμα 7.18. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% I2, γήρανση



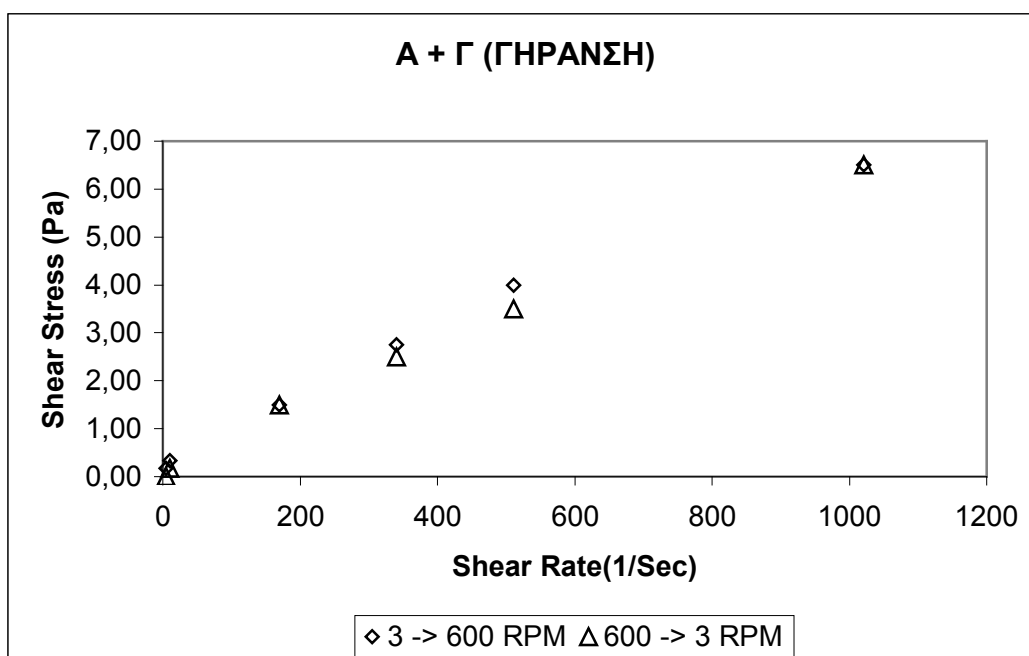
Σχήμα 7.19. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΠΠ1, γήρανση



Σχήμα 7.20. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΠΠ2, γήρανση



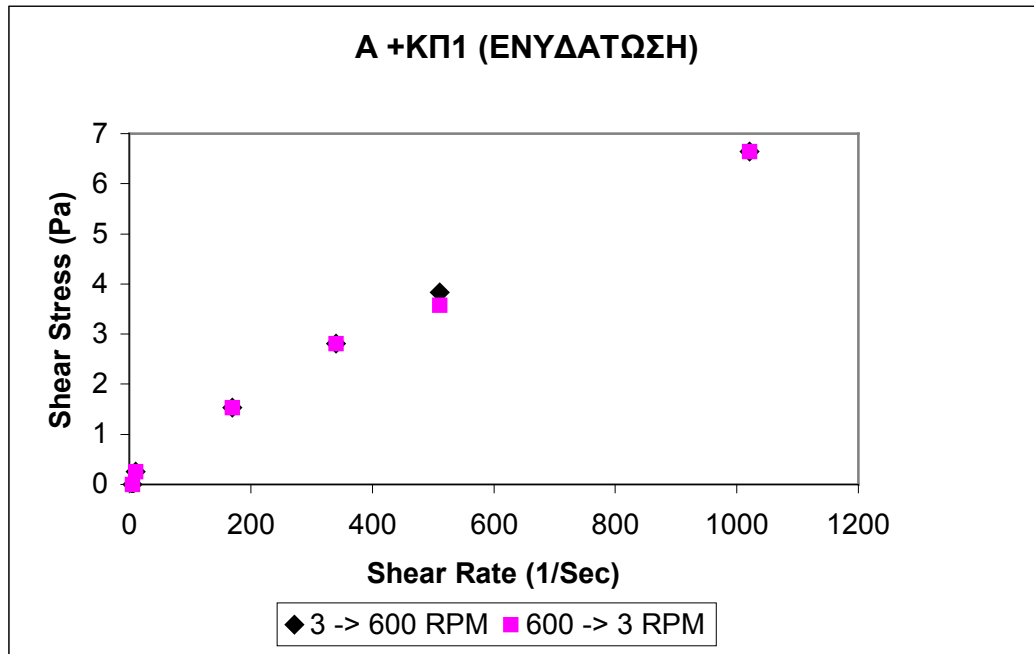
Σχήμα 7.21. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% ΠΜ1, γήρανση



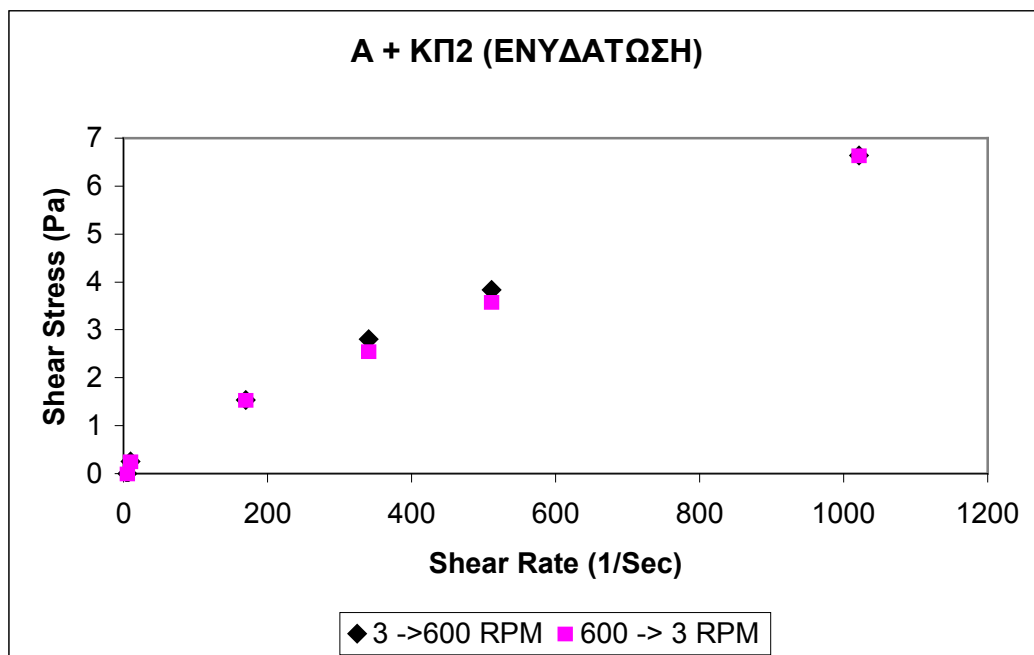
Σχήμα 7.22. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 0,5% Γ, γήρανση

7.2 ΠΟΛΦΟΣ ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΛΙΓΝΙΤΗΣ ΣΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ 3%

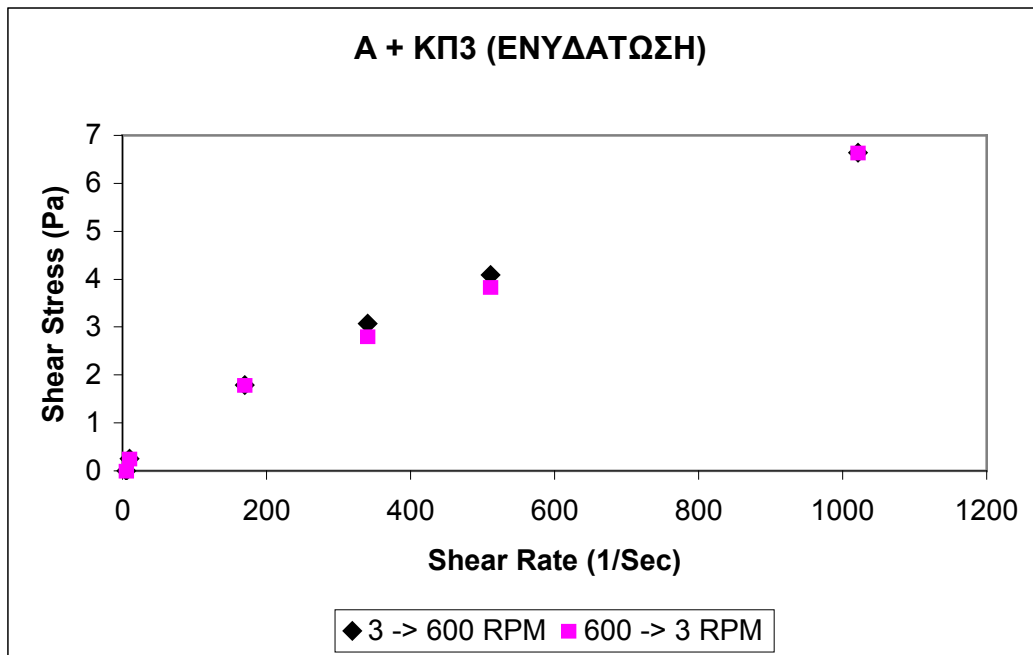
Παρακάτω, παρουσιάζονται τα διαγράμματα θιξοτροπίας για πολφό βάσης που ωρίμασε με ενυδάτωση στον οποίο έχει προστεθεί 3% λιγνίτης



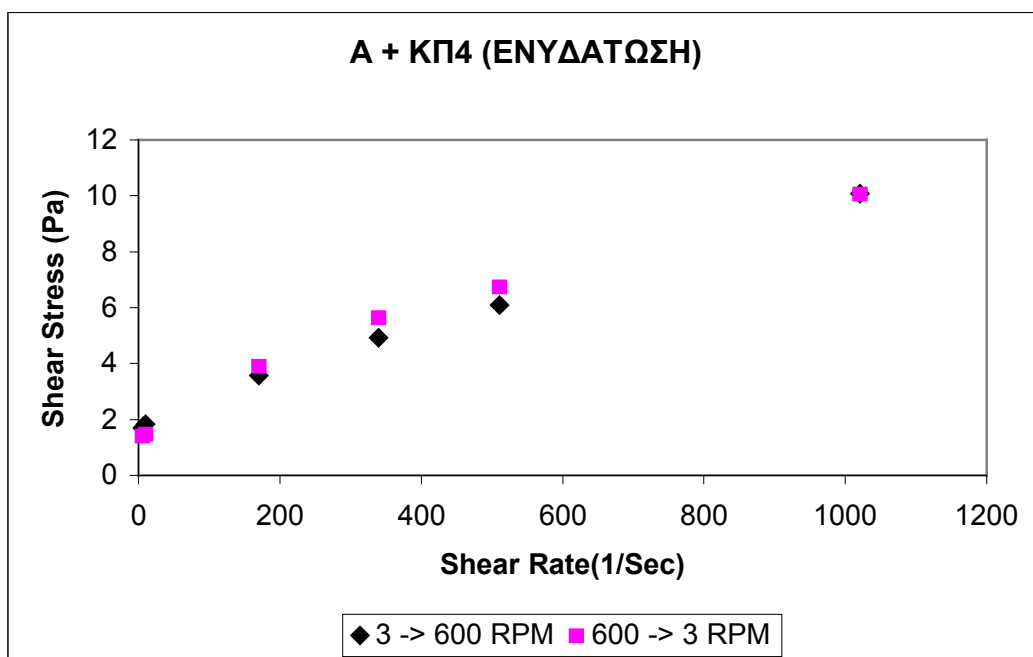
Σχήμα 7.23. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΚΠ1, ενυδάτωση



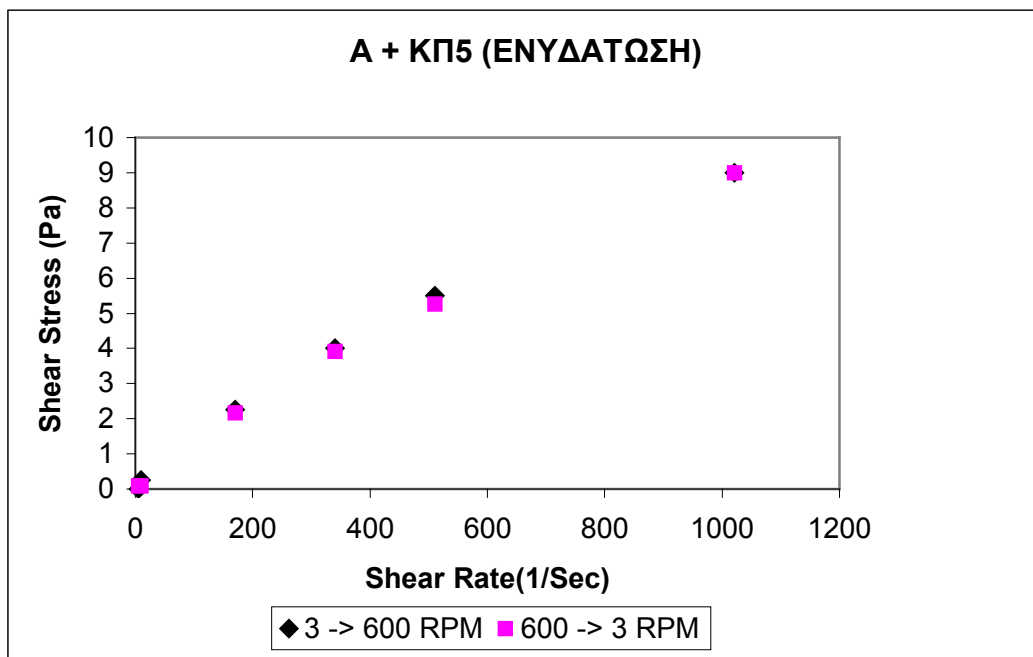
Σχήμα 7.24. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΚΠ2 ,ενυδάτωση



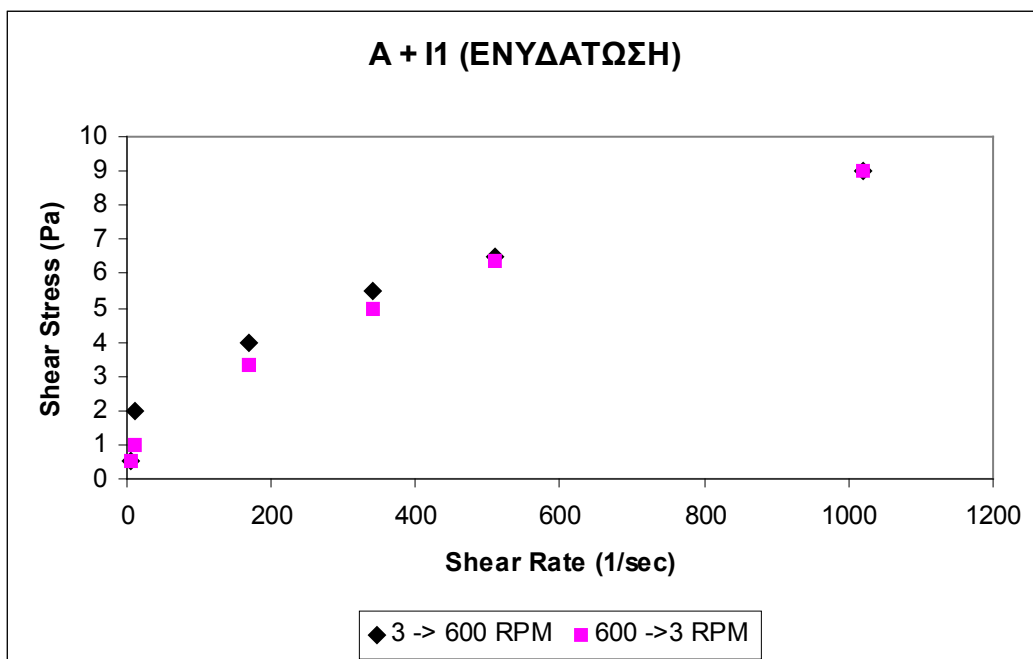
Σχήμα 7.25. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΚΠ3 , ενυδάτωση



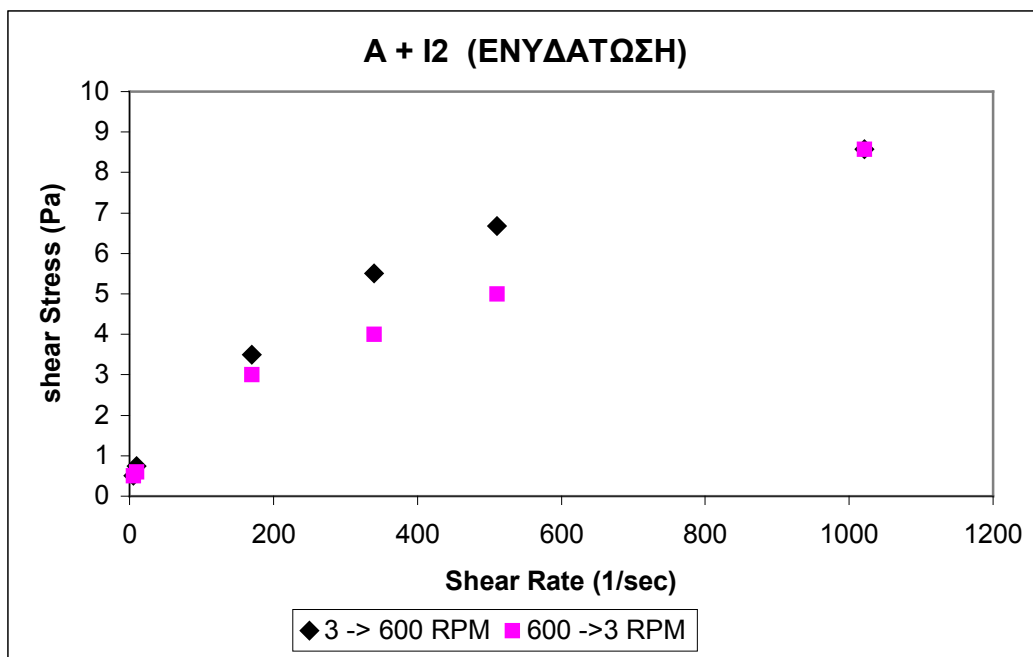
Σχήμα 7.26. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΚΠ4 ,ενυδάτωση



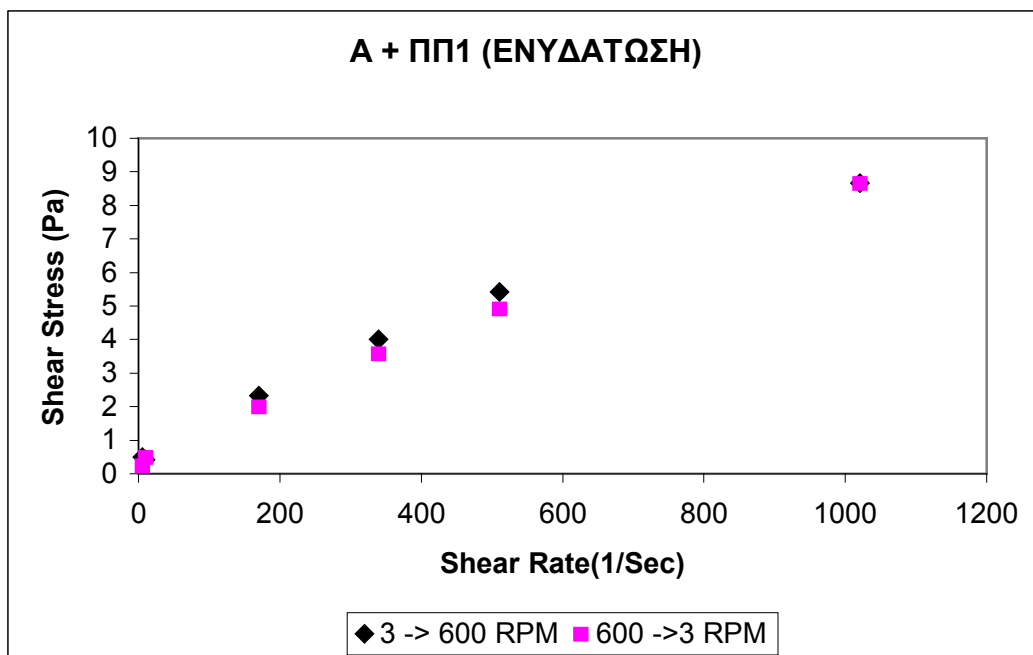
Σχήμα 7.27. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΚΠ5,ενυδάτωση



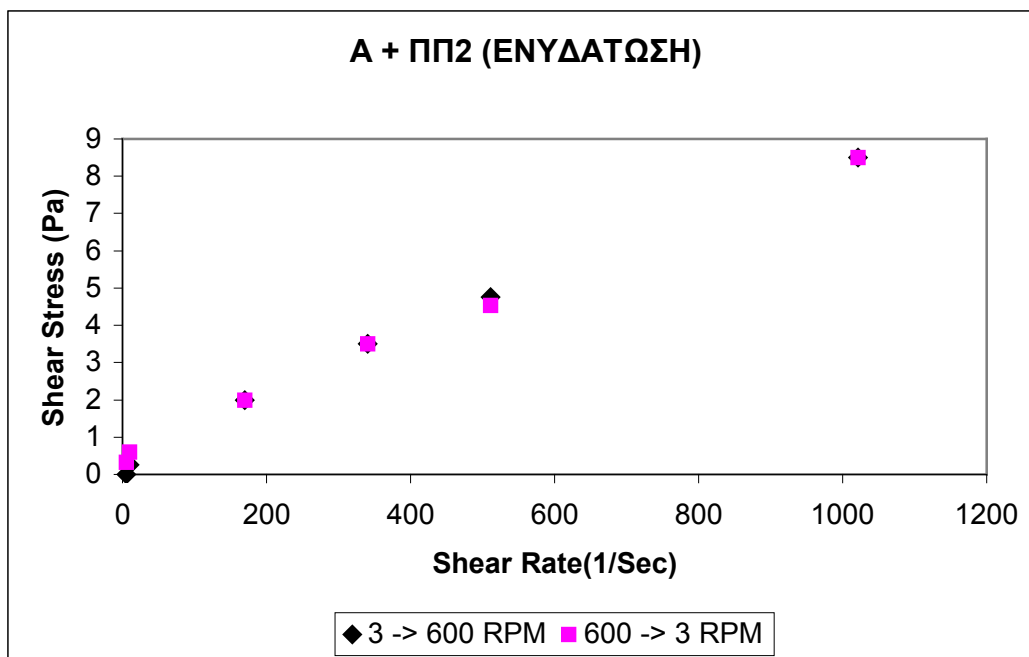
Σχήμα 7.28. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% Ι1 ,ενυδάτωση



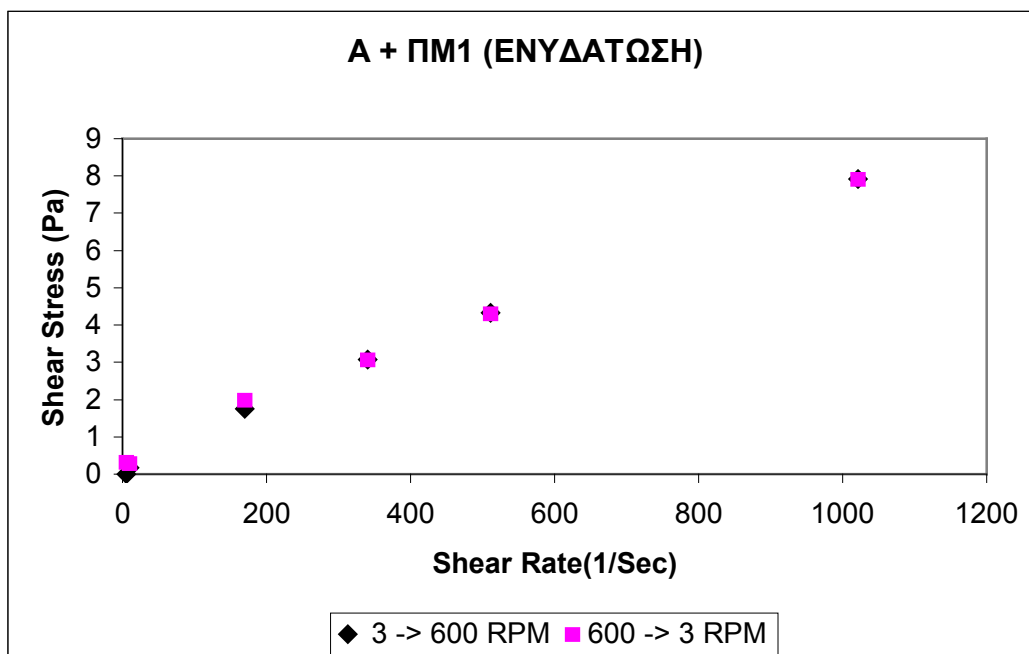
Σχήμα 7.29. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% I2 ,ενυδάτωση



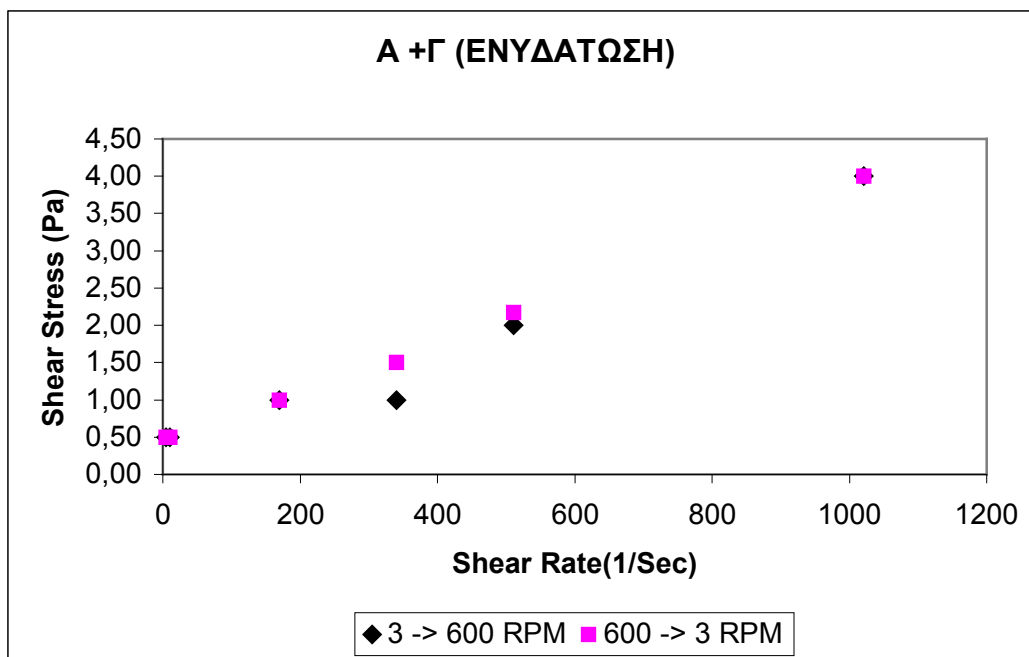
Σχήμα 7.30. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΠΠ1 ,ενυδάτωση



Σχήμα 7.31. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΠΠ2 ,ενυδάτωση

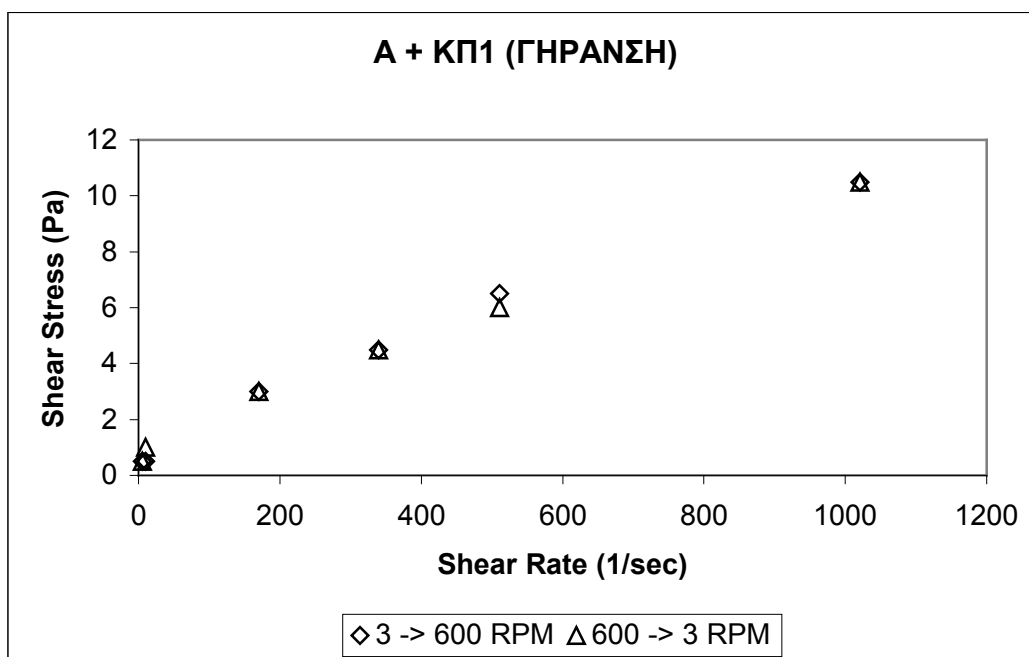


Σχήμα 7.32. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΠΜ1, ενυδάτωση

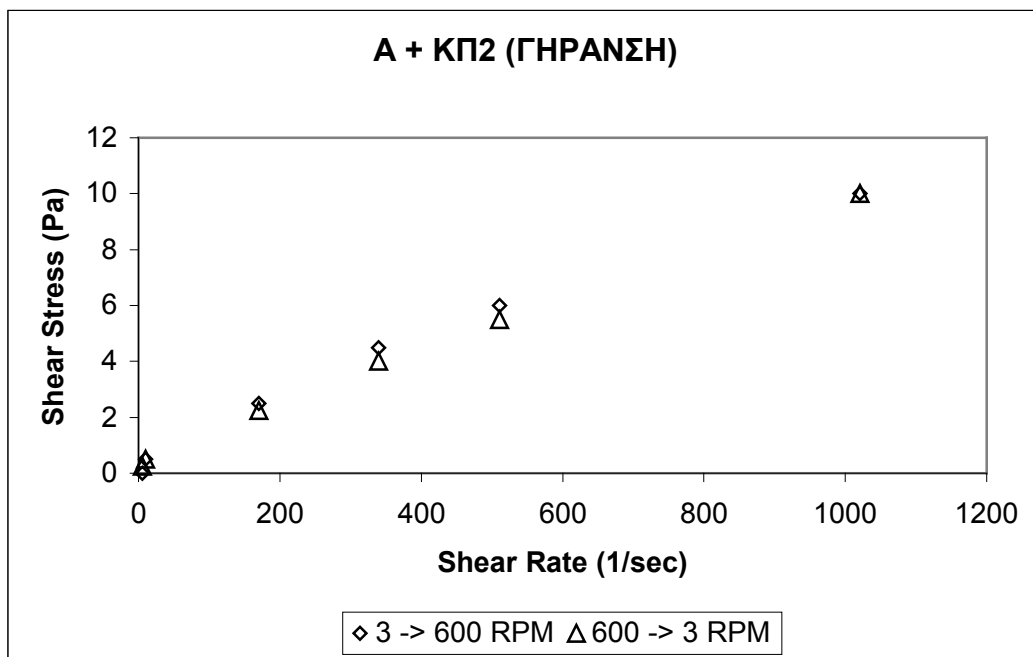


Σχήμα 7.33. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% Γ, ενυδάτωση

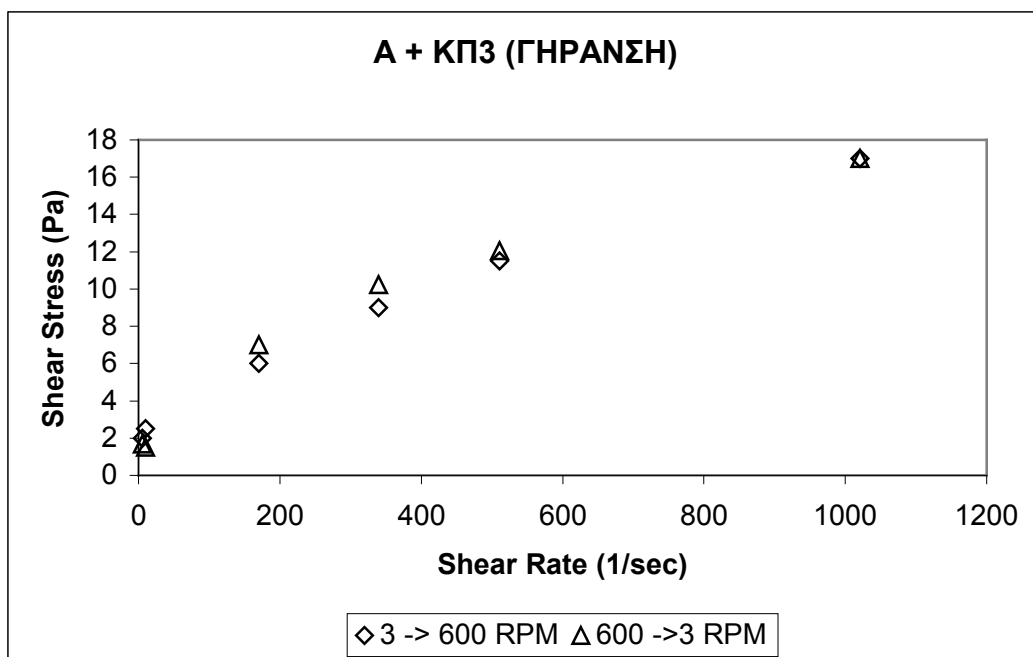
Ακολουθούν τα διαγράμματα για πολφό βάσης που ωρίμασε με θερμική γήρανση στον οποίο έχει προστεθεί 3% λιγνίτης.



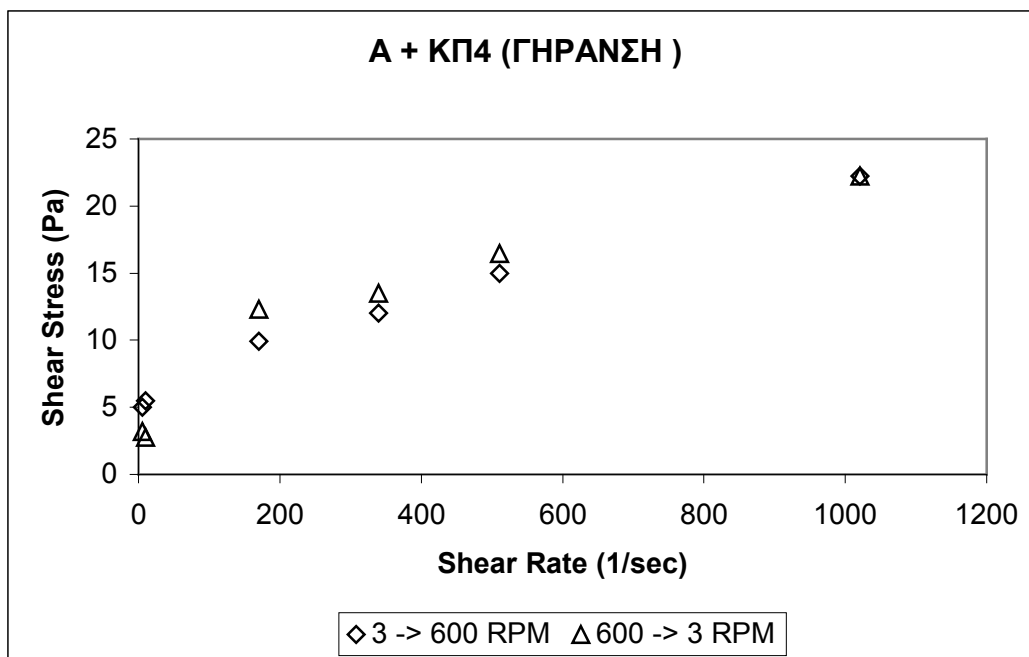
Σχήμα 7.34. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΚΠ1, γήρανση



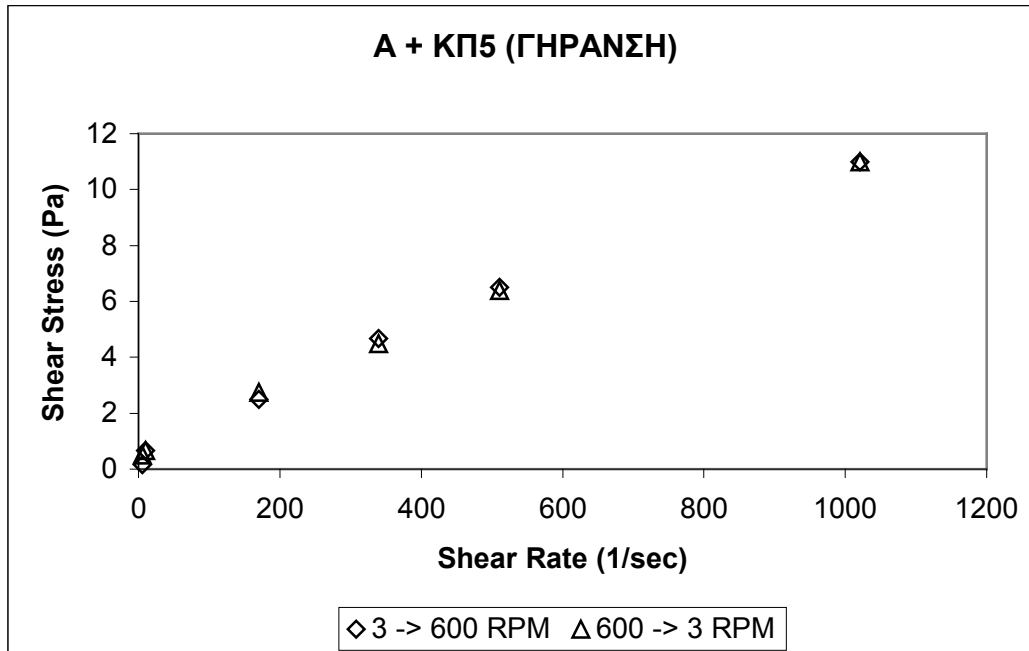
Σχήμα 7.35. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΚΠ2 , γήρανση



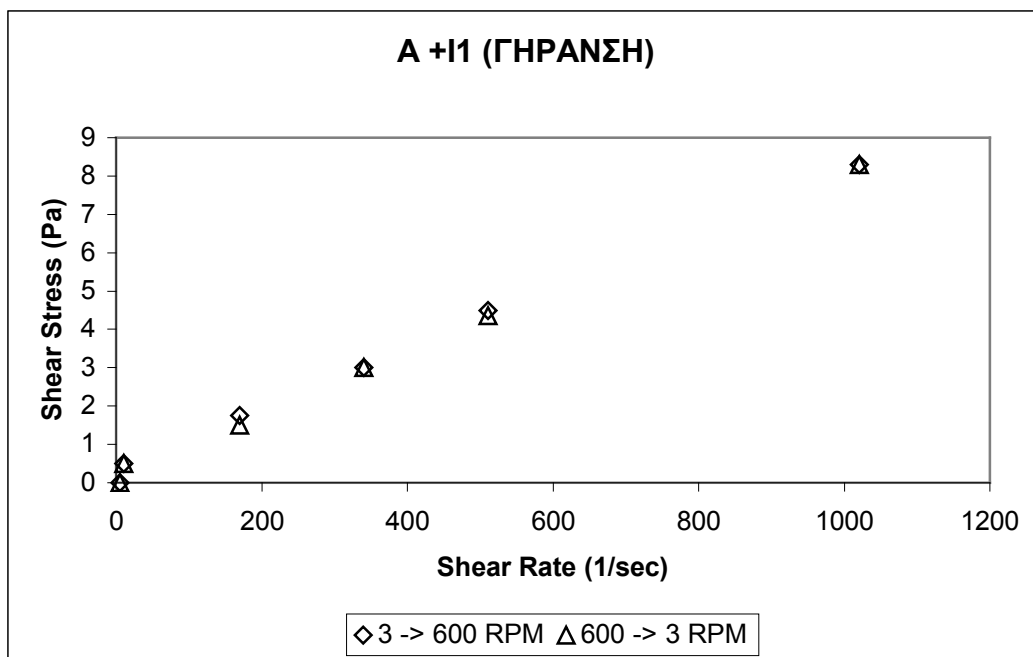
Σχήμα 7.36. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΚΠ3 , γήρανση



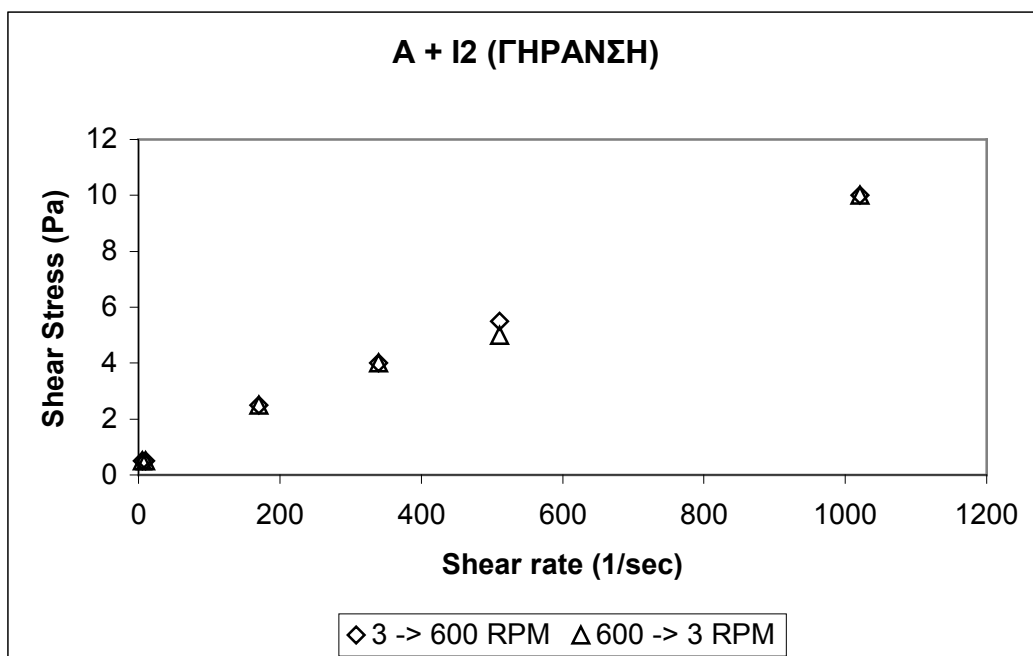
Σχήμα 7.37. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΚΠ4, γήρανση



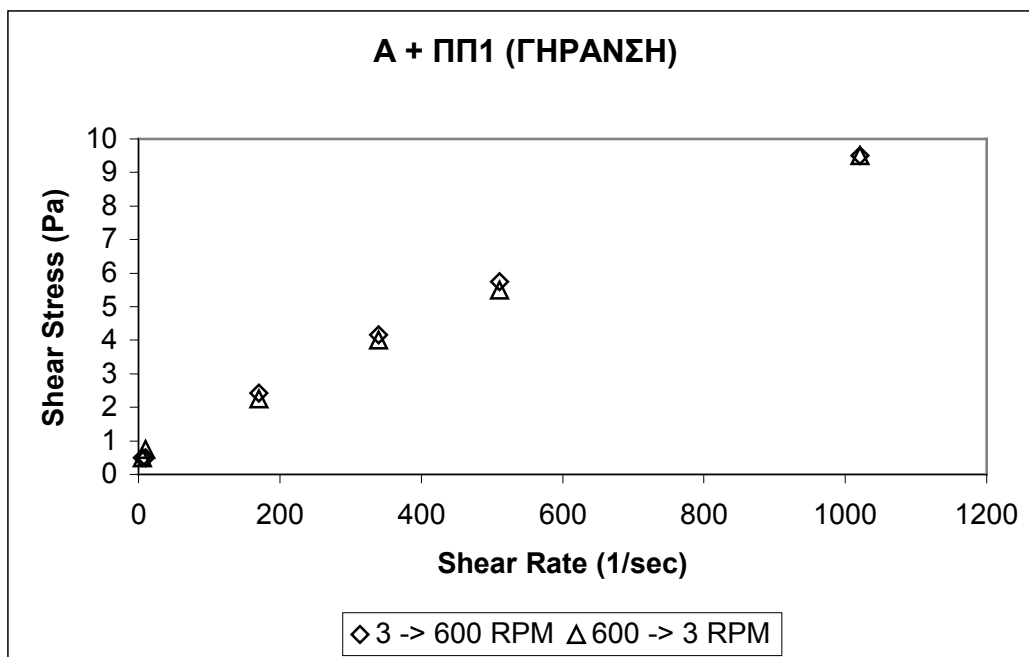
Σχήμα 7.38. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΚΠ5 , γήρανση



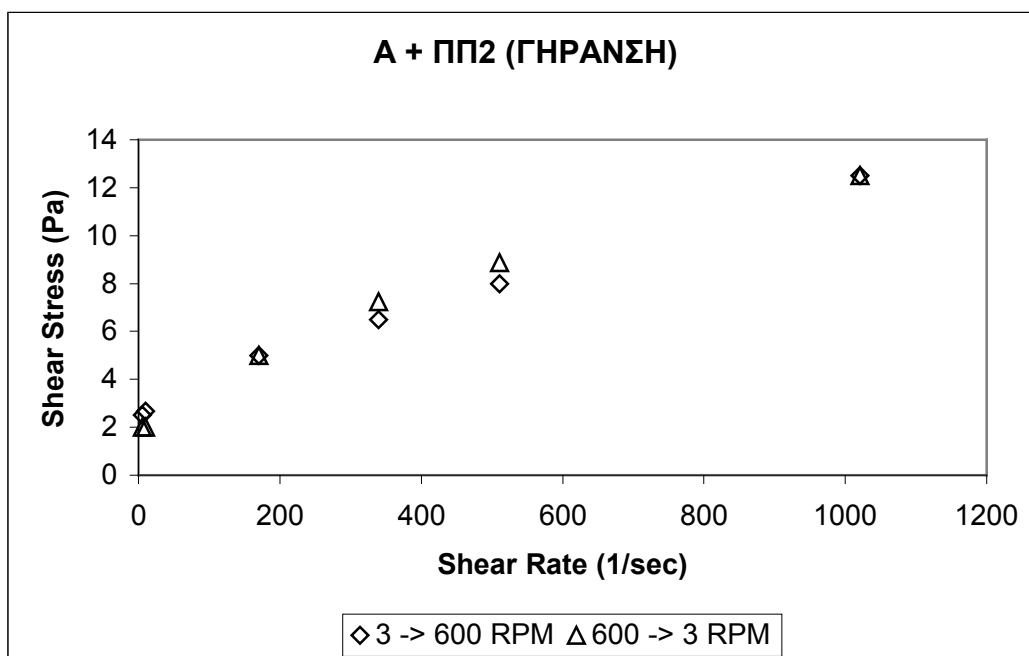
Σχήμα 7.39. Θιζοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% I1, γήρανση



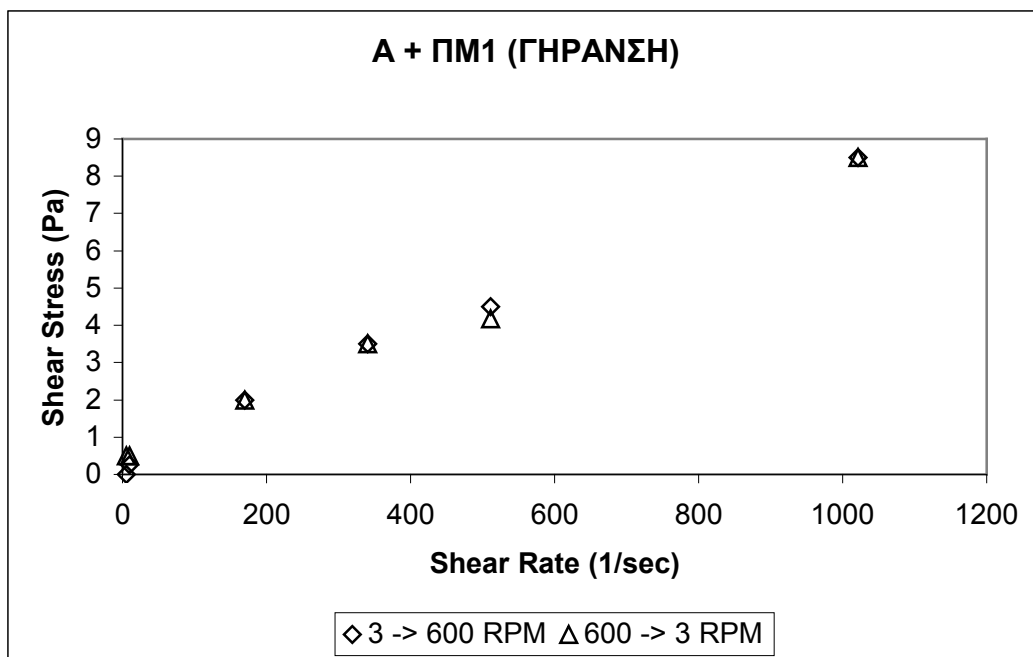
Σχήμα 7.40. Θιζοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% I2, γήρανση



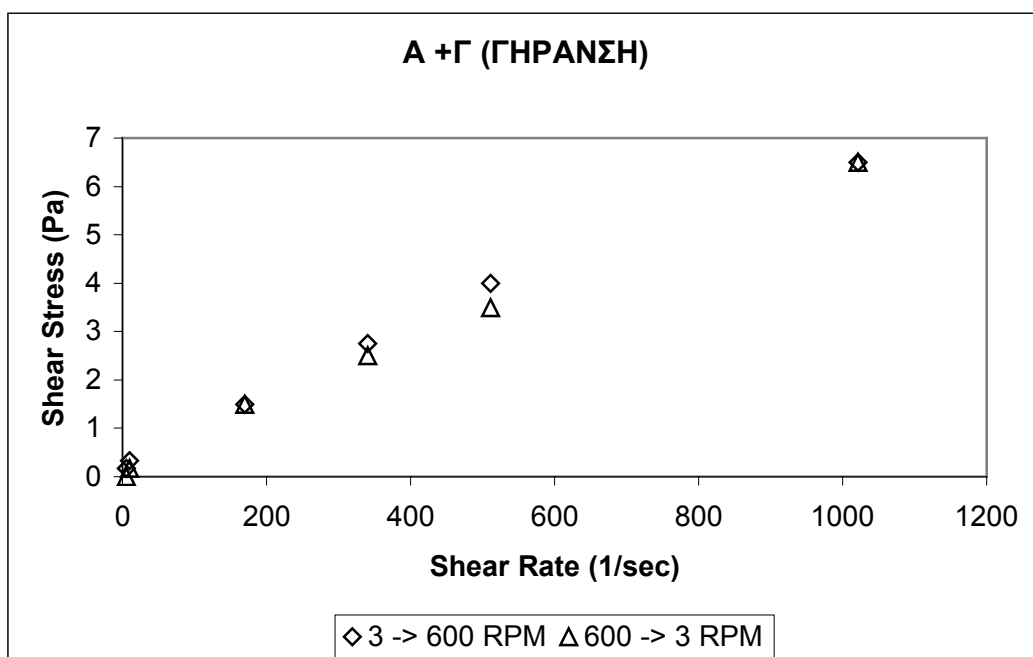
Σχήμα 7.41. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΠΠ1, γήρανση



Σχήμα 7.42. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3%, γήρανση



Σχήμα 7.43. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% ΠΜ1, γήρανση

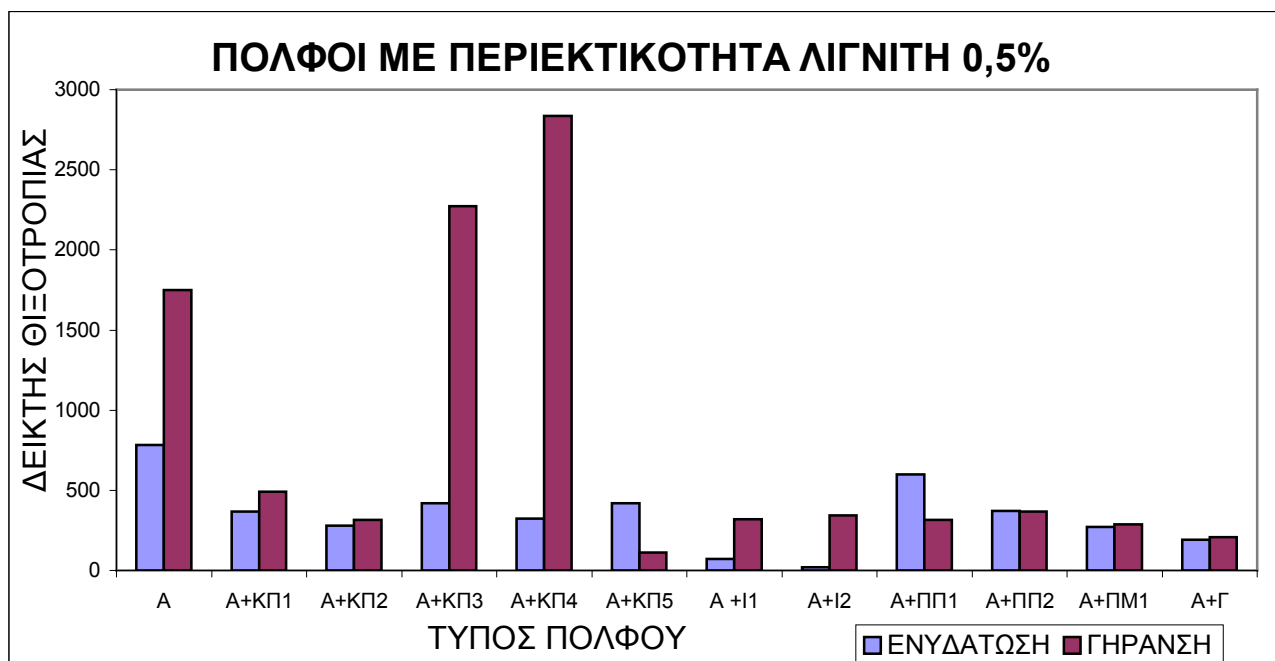


Σχήμα 7.44. Θιξοτροπική καμπύλη πολφού βάσης και 3% Γ, γήρανση

7.3. ΔΕΙΚΤΗΣ ΘΙΞΟΤΡΟΠΙΑΣ

| ΤΥΠΟΣ ΠΟΛΦΟΥ | ΔΕΙΚΤΗΣ | ΘΙΞΟΤΡΟΠΙΑΣ |
|--------------|-----------|-------------|
| 0,5% | ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ | ΓΗΡΑΝΣΗ |
| A | 781 | 1748 |
| A+ΚΠ1 | 366 | 493 |
| A+ΚΠ2 | 280 | 314 |
| A+ΚΠ3 | 421 | 2272 |
| A+ΚΠ4 | 325 | 2837 |
| A+ΚΠ5 | 418 | 113 |
| A +I1 | 72 | 320 |
| A+I2 | 19 | 345 |
| A+ΠΠ1 | 600 | 314 |
| A+ΠΠ2 | 373 | 368 |
| A+ΠΜ1 | 272 | 287 |
| A+Γ | 190 | 206 |

Πίνακας 7.1. Δείκτης θιξοτροπίας για πολφούς με προσθήκη 0,5% λιγνίτη



Σχήμα 7.45. Σύγκριση δείκτη θιξοτροπίας σε πολφούς με προσθήκη 0,5 % για ωρίμανση με ενυδάτωση και θερμική γήρανση.

| ΤΥΠΟΣ ΠΟΛΦΟΥ | ΔΕΙΚΤΗΣ | ΘΙΞΟΤΡΟΠΙΑΣ |
|--------------|-----------|-------------|
| 3% | ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ | ΓΗΡΑΝΣΗ |
| A | 781 | 1748 |
| A+ΚΠ1 | 72 | 128 |
| A+ΚΠ2 | 138 | 316 |
| A+ΚΠ3 | 135 | 630 |
| A+ΚΠ4 | 437 | 598 |
| A+ΚΠ5 | 107 | 171 |
| A +I1 | 130 | 243 |
| A+I2 | 278 | 145 |
| A+ΠΠ1 | 310 | 350 |
| A+ΠΠ2 | 53 | 405 |
| A+ΠΜ1 | 41 | 90 |
| A+Γ | 187 | 202 |

Πίνακας 7.2. Δείκτης θιξοτροπίας για πολφούς με προσθήκη 3% λιγνίτη



Σχήμα 7.46. Σύγκριση δείκτη θιξοτροπίας σε πολφούς με προσθήκη 3 % για ωρίμανση με ενυδάτωση και θερμική γήρανση.

Παρατηρούμε ότι στα περισσότερα δείγματα που ωρίμασαν με θερμική γήρανση, σημειώνεται αύξηση του δείκτη θιξοτροπίας σε σχέση με αυτά που ωρίμασαν με ενυδάτωση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

ΙΟΝΤΟΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που λάβαμε παρουσιάζονται στον πίνακα 8.1.:

| ΔΕΙΓΜΑ | CEC (meq/100g) |
|---------------|------------------------|
| ΚΠ1 | 64.0 |
| ΚΠ2 | 57.3 |
| ΚΠ3 | 43.2 |
| ΚΠ4 | 27.3 |
| ΚΠ5 | 67.4 |
| Ι1 | 81.7 |
| Ι2 | 80.6 |
| ΠΠ1 | 101.2 |
| ΠΠ2 | 96.3 |
| ΠΜ1 | 102.2 |

Πίνακας 8.1. Αποτελέσματα ιοντοεναλλακτικής ικανότητας

Από τη μέτρηση της ιοντοεναλλακτικής ικανότητας παρατηρούμε ότι την υψηλότερη τιμή παρουσιάζει το δείγμα ΠΜ1 που προέρχεται από την Πελοπόννησο, ενώ την χαμηλότερη τιμή παρουσιάζει το δείγμα ΚΠ4 που προέρχεται από την Κρήτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

9.1.ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη μελέτη των ρεολογικών ιδιοτήτων φαίνεται ότι η προσθήκη λιγνίτη στους πολφούς γεωτρήσεων έχει θετικά αποτελέσματα. Στα περισσότερα δείγματα παρατηρήθηκε βελτίωση των ρεολογικών ιδιοτήτων μετά από προσθήκη λιγνίτη σε ποσοστό 3%, ενώ ακόμη και προσθήκη λιγνίτη σε ποσοστό 0,5% βελτιώνει τις ρεολογικές ιδιότητες των πολφών.

Τα αποτελέσματα που παρατηρήθηκαν είναι τα εξής:

- Η επίδραση του εμπορικού λιγνίτη στις ρεολογικές ιδιότητες, είναι συγκρίσιμη με αυτή των ελληνικών λιγνιτών

Από τα δείγματα της Κρήτης καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζει ο λιγνίτης ΚΠ5, από τα δείγματα των Ιωαννίνων καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζει ο λιγνίτης Ι1 ενώ από τα δείγματα της Πελοποννήσου καλύτερη συμπεριφορά παρουσιάζει ο λιγνίτης ΠΠ1

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 9.1.

| ΩΡΙΜΑΝΣΗ ΜΕ ΘΕΡΜΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ 3% | |
|----------------------------------|--|
| 95%-100% | A+Γ, A+Ι1, A+ΚΠ5, A+ΚΠ2, A+ΠΠ1, A+ΠΠ2, A+Ι2, A+ΠΜ1, A+ΚΠ1, A+ΚΠ3 |
| 90-95% | A+ΚΠ4 |
| ΩΡΙΜΑΝΣΗ ΜΕ ΘΕΡΜΙΚΗ ΓΗΡΑΝΣΗ 0,5% | |
| >85% | A+Γ, A+ΠΜ1, A+ΚΠ2, A+ΚΠ1 |
| 80-85% | A+Ι2, A+Ι1, A+ΠΠ1 |
| 70-80% | A+ΠΠ2, A+ΚΠ5 |
| 50-60% | A+ΚΠ3, A+ΚΠ4 |
| ΩΡΙΜΑΝΣΗ ΜΕ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ 3% | |
| 95-100% | A+Γ, A+ΠΜ1, A+ΠΠ2, A+ΚΠ5, A+Ι1, A+ΚΠ2, A+ΚΠ3, A+Ι2 A+ΠΠ1, A+Ι2 |
| 80-90% | A+ΚΠ1, A+ΚΠ4 |
| | |
| ΩΡΙΜΑΝΣΗ ΜΕ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ 0,5% | |
| >90% | A+Γ, A+Ι2, A+Ι1 |
| 85-90% | A+ΠΠ1, A+ΠΜ1, A+ΚΠ2, A+ΠΠ2 |
| 80-85% | A+ΚΠ5, A+ΚΠ1, A+ΚΠ3 |
| 70-80% | A+ΚΠ4 |

Πίνακας 9.1. Βελτίωση τάσης διολίσθησης

- οι μικρές τιμές τάσης διολίσθησης που επιτυγχάνονται κατά την προσθήκη λιγνίτη σε σύγκριση με τον πολφό βάσης, δείχνουν ότι οι πολφοί, όταν μείνουν ακίνητοι στη διατρητική στήλη, δεν δημιουργούν πηκτώματα και επομένως μπορούν πιο εύκολα να επανακυκλοφορήσουν στο φρέαρ.
- Το γεγονός ότι οι ρεολογικές ιδιότητες των πολφών ενισχύονται σε περίπτωση θερμικής γήρανσης, δείχνει ότι ο λιγνίτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σαν πρόσθετο σε γεωτρήσεις υψηλών θερμοκρασιών και μεγάλου βάθους.
- Ο δείκτης θιξοτροπίας των πολφών στους οποίους έχει προστεθεί λιγνίτης, παρουσιάζει μείωση εν συγκρίσει με αυτόν του πολφού βάσης. Πιο συγκεκριμένα ο πολφός βάσης κάτω από συνθήκες θερμικής γήρανσης σχεδόν στερεοποιείται, γεγονός που δεν είναι επιθυμητό. Αντίθετα, οι χαμηλοί δείκτες θιξοτροπίας των πολφών στους οποίους έχει προστεθεί λιγνίτης, δείχνουν ότι οι πολφοί μπορούν να κυκλοφορούν στο φρέαρ με μικρή κατανάλωση ισχύος.
- Από σύγκριση των αποτελεσμάτων της ρεολογίας και της ιοντοεναλλακτικής ικανότητας παρατηρήθηκε ότι τα δείγματα που έχουν υψηλή ιοντοεναλλακτική ικανότητα, παρουσιάζουν συγκριτικά με τα υπόλοιπα και τις καλύτερες ρεολογικές ιδιότητες.

9.2. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Τα θετικά αποτελέσματα που λάβαμε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας είναι μια καλή αρχή για περαιτέρω μελέτη των ρεολογικών ιδιοτήτων των πολφών γεωτρήσεων με τη προσθήκη ελληνικού λιγνίτη. Πολύ χρήσιμη θα ήταν η σύγκριση των ρεολογικών ιδιοτήτων με τα αποτελέσματα των πειραμάτων της ικανότητας διήθησης.

Στους πολφούς που εξετάστηκαν και στις δύο συνθήκες ωρίμανσης και βελτίωσαν πολύ τις διηθητικές και ρεολογικές ιδιότητες, προτείνεται περαιτέρω εργαστηριακή διερεύνηση, στην οποία θα εξετάζεται η επίδραση των επιμέρους συστατικών των λιγνιτών στις ρεολογικές ιδιότητες. Πιο συγκεκριμένα προσοχή θα πρέπει να δοθεί στα δείγματα που προέρχονται από τα Ιωάννινα. Τα δείγματα αυτά παρουσίασαν καλύτερες ιδιότητες σε σύγκριση με τον εμπορικό λιγνίτη.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής βιβλιογραφία

1. American Petroleum Institute Specifications 13A, 1993, Specification for drilling fluid materials.
2. American Petroleum Institute Specifications 13I, 2000, Recommended practice standard procedure for laboratory testing drilling fluids.
3. American Petroleum Institute, 2003, API Spec 13B-1 - Recommended practice for field testing water based drilling fluids.
4. Christidis G. / Scott P. / Marcopoulos Th. (1995) «**Clays and clay minerals**», pp 63-77, Volume 43, No 1
5. Chilingarian G.V. and Vorabutr P. «**Drilling and drilling fluids**», Amsterdam, 1980
6. Fan Instrument Company (1995) «**High temperature Aging Cell**» Houston, U.S.A.
7. Gray G, Darley H, «**Composition and properties of oil well drilling fluids**», Texas, 1980
8. Grim R.E. and Guven N. (1978) «**Bentonites**», Elsevier Scientific Publishing Company, Amstredam.
9. Lefond S.J. (1983) «**Industrial Minerals And Rocks**» pp.585-643 volume 1, difth edition, New York.
10. Luckham F., Sylvia Rossi Paul «**The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions**», London 1999
11. Mc Cauley R.A. «**Reology**», Piscataway, U.S.A.
12. Morgan D.J. «**Testing bentonites for drilling muds**», Malaysia 1990

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Βάμβουκα Δ. «Εξευγενισμός Γαιανθράκων», Σημειώσεις παραδόσεων
2. Δάβη Ε. «Πετρολογία», Αθήνα 1991
3. Κελεσίδης, Β., «Τεχνική γεωτρήσεων», Σημειώσεις παραδόσεων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2001.
4. Κελεσίδης Β. «Μέτρηση του ιξώδους νευτώνειου ρευστού- επίδραση της αύξησης στο ιξώδες Νευτώνειου ρευστού», Σημειώσεις εργαστηρίου, Χανιά
5. Κελεσίδης Β. «Τεχνική Γεωτρήσεων –Πρώτο εργαστήριο» Σημειώσεις εργαστηρίου, Χανιά 2004
6. Κωστάκης Γ. «Εισαγωγή στην Αξιολόγηση Βιομηχανικών Ορυκτών», Σημειώσεις παραδόσεων, Χανιά 1994
7. Μιχαλάκης Α. «Χρήση ελληνικού λιγνίτη για την ρύθμιση των ρεολογικών και διηθητικών χαρακτηριστικών των πολφών γεωτρήσεων», Μεταπτυχιακή διατριβή, Χανιά 2004.
8. Παπανικολάου Κ. «Άτλαντας ελληνικών γαιανθράκων, ανθρακοπετρογραφικοί παράμετροι ποιότητας –Βιοδείκτες», Αθήνα, 2001
9. Παπανικολάου Κ. «Κοιτασματολογία Ενεργειακών Πόρων», Χανιά 2004
10. Πεταβρατζή Ε. «Μελέτη Κοιτάσματος Μπεντονίτη Πολυκάνθου (Κύπρου)» Διπλωματική εργασία, Χανιά, Απρίλιος 2000.
11. Πολυτεχνείο Κρήτης, «2^η Έκθεση προόδου προς Ι.Γ.Μ.Ε.» , Χανιά 2004
12. Χρηστίδης Γ. «Κοιτασματολογία II», Σημειώσεις παραδόσεων ,Χανιά

Πηγές Internet

www.ima-na.org

www.canadian clay.com

www.sandb.gr

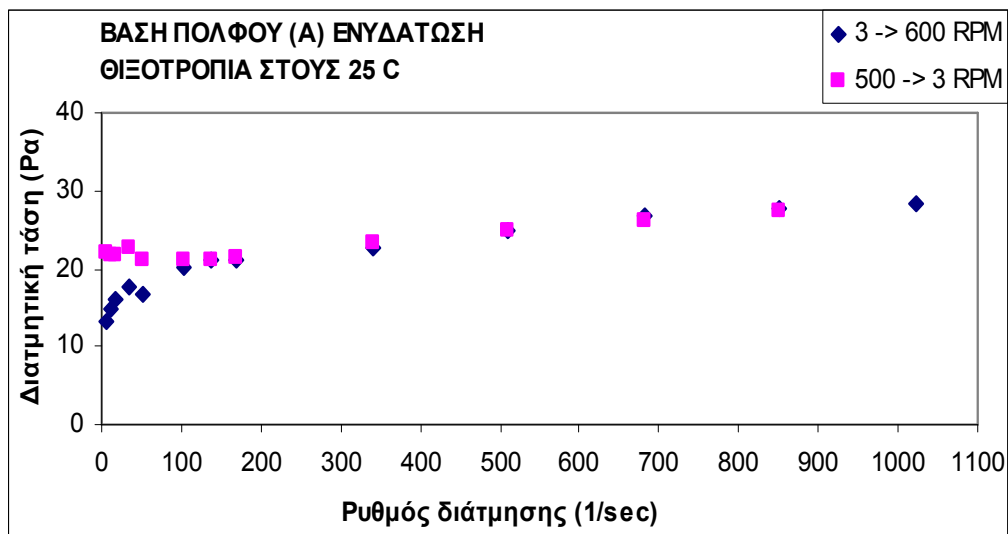
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΠΟΛΦΟΥ ΒΑΣΗΣ

Α ΩΡΙΜΑΝΣΗ

Πλαστικό ιξώδες, PV (cP): 5,00

Τάση διολίσθησης (yield point) (Pa):83.54

Δύναμη γέλης (gel strength) 10sec / 10 min(lbs/100 ft²): 38.0 / 58.0

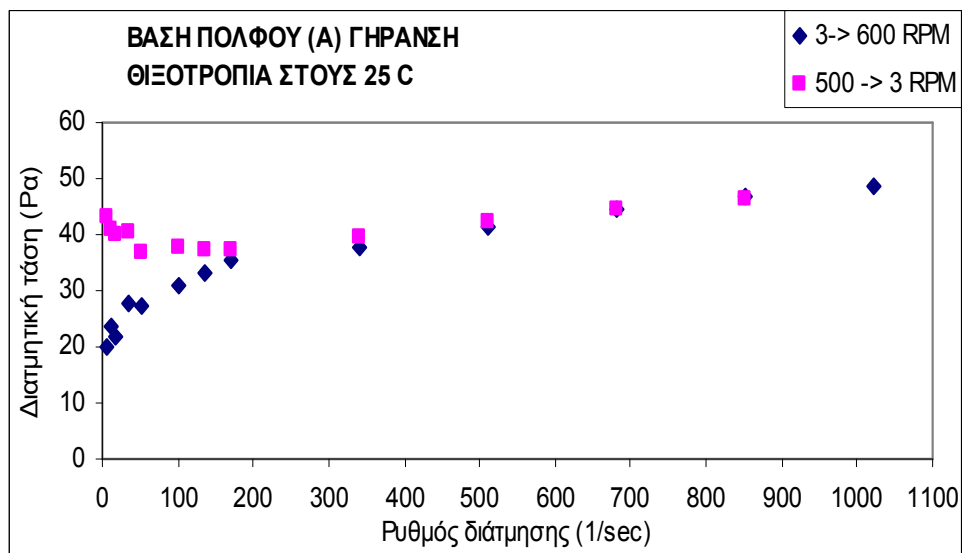


Β ΓΗΡΑΝΣΗ

Πλαστικό ιξώδες, PV (cP): 6,50

Τάση διολίσθησης (yield point) (Pa): 203,63

Δύναμη γέλης (gel strength) 10sec / 10 min(lbs/100 ft²): 65.0 / 77.0



ΡΕΟΛΟΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΛΦΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

| ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΛΙΓΝΙΤΗ ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ: 0,50 % κ.ό. | | ΑΥΞΗΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (0 → 600 rpm) | | |
|--|--------------------------------------|---|--------------------------------------|----------------|
| 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 + ΚΠ1 | 3,101 | 0,029 | 0,837 | 0,096 |
| A + ΚΠ2 | 2,624 | 0,092 | 0,682 | 0,097 |
| A + ΚΠ3 | 3,394 | 0,169 | 0,580 | 0,996 |
| A + ΚΠ4 | 5,964 | 0,174 | 0,572 | 0,996 |
| A + ΚΠ5 | 2,546 | 0,242 | 0,544 | 0,999 |
| A + Ι1 | 1,198 | 0,056 | 0,748 | 0,998 |
| A + Ι2 | 0,448 | 0,088 | 0,686 | 0,921 |
| A + ΠΠ1 | 0,874 | 0,174 | 0,606 | 0,999 |
| A + ΠΠ2 | 1,474 | 0,147 | 0,624 | 0,963 |
| A + ΠΜ1 | 1,680 | 0,082 | 0,689 | 0,956 |
| A + Γ | 0,098 | 0,073 | 0,666 | 0,999 |

| ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΛΙΓΝΙΤΗ ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ: 0,50 % κ.ό. | | ΜΕΙΩΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (600 → 0 rpm) | | |
|--|--------------------------------------|---|--------------------------------------|----------------|
| 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 + ΚΠ1 | 1,941 | 0,144 | 0,627 | 0,999 |
| A + ΚΠ2 | 3,111 | 0,036 | 0,809 | 0,998 |
| A + ΚΠ3 | 4,028 | 0,066 | 0,701 | 0,993 |
| A + ΚΠ4 | 6,745 | 0,053 | 0,728 | 0,996 |
| A + ΚΠ5 | 4,517 | 0,018 | 0,884 | 0,996 |
| A + Ι1 | 0,528 | 0,141 | 0,620 | 0,998 |
| A + Ι2 | 0,071 | 0,138 | 0,625 | 0,985 |
| A + ΠΠ1 | 1,722 | 0,054 | 0,763 | 0,988 |
| A + ΠΠ2 | 2,332 | 0,039 | 0,802 | 0,996 |
| A + ΠΜ1 | 2,126 | 0,032 | 0,818 | 0,996 |
| A + Γ | 0,137 | 0,100 | 0,621 | 0,998 |

| ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΛΙΓΝΙΤΗ ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ: 0,50 % κ.ό. | ΜΕΙΩΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (0 → 600 rpm) | | | |
|--|--|---|--------------------------------------|----------------|
| ΓΗΡΑΝΣΗ | 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 + ΚΠ1 | 5,663 | 0,145 | 0,686 | 0,999 |
| A + ΚΠ2 | 4,465 | 0,341 | 0,565 | 0,988 |
| A + ΚΠ3 | 17,878 | 2,453 | 0,259 | 0,991 |
| A + ΚΠ4 | 4,727 | 1,466 | 0,083 | 0,995 |
| A + ΚΠ5 | 9,892 | 0,177 | 0,595 | 0,968 |
| A + Ι1 | 7,875 | 0,298 | 0,568 | 0,995 |
| A + Ι2 | 4,128 | 0,731 | 0,484 | 0,997 |
| A + ΠΠ1 | 9,905 | 0,247 | 0,586 | 0,998 |
| A + ΠΠ2 | 9,428 | 0,326 | 0,582 | 0,994 |
| A + ΠΜ1 | 4,737 | 0,125 | 0,694 | 0,992 |
| A + Γ | 0,091 | 0,026 | 0,795 | 0,996 |

| ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΛΙΓΝΙΤΗ ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ: 0,50 % κ.ό. | ΜΕΙΩΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (600 → 0 rpm) | | | |
|--|---------------------------------------|---|--------------------------------------|----------------|
| ΓΗΡΑΝΣΗ | 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 + ΚΠ1 | 3,850 | 0,492 | 0,526 | 0,998 |
| A + ΚΠ2 | 6,33 | 0,182 | 0,641 | 0,958 |
| A + ΚΠ3 | 19,892 | 0,113 | 0,681 | 0,982 |
| A + ΚΠ4 | 20,957 | 0,021 | 0,881 | 0,995 |
| A + ΚΠ5 | 9,565 | 0,257 | 0,546 | 0,997 |
| A + Ι1 | 5,045 | 0,674 | 0,475 | 0,994 |
| A + Ι2 | 7,057 | 0,207 | 0,643 | 0,998 |
| A + ΠΠ1 | 8,014 | 0,332 | 0,561 | 0,997 |
| A + ΠΠ2 | 11,298 | 0,112 | 0,717 | 0,998 |
| A + ΠΜ1 | 2,882 | 0,390 | 0,547 | 0,996 |
| A+Γ | 0,143 | 0,013 | 0,893 | 0,998 |

| ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΛΙΓΝΙΤΗ ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ: 3 % κ.ό. | | ΑΥΞΗΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (0 → 600 rpm) | | |
|--|--------------------------------------|---|--------------------------------------|----------------|
| 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 + ΚΠ1 | 0,082 | 0,023 | 0,816 | 0,999 |
| A + ΚΠ2 | 0,083 | 0,023 | 0,816 | 0,998 |
| A + ΚΠ3 | 0,007 | 0,046 | 0,716 | 0,999 |
| A + ΚΠ4 | 1,677 | 0,020 | 0,869 | 0,996 |
| A + ΚΠ5 | 0,092 | 0,047 | 0,758 | 0,999 |
| A + Ι1 | 0,018 | 0,039 | 0,813 | 0,998 |
| A + Ι2 | 0,261 | 0,098 | 0,642 | 0,996 |
| A + ΠΠ1 | 0,221 | 0,049 | 0,743 | 0,999 |
| A + ΠΠ2 | 0,071 | 0,027 | 0,827 | 0,998 |
| A + ΠΜ1 | 0,238 | 0,015 | 0,904 | 0,997 |
| A+Γ | 0,519 | 0,002 | 1,388 | 0,992 |

| ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΛΙΓΝΙΤΗ ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ: 3 % κ.ό. | | ΜΕΙΩΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (600 → 0 rpm) | | |
|---|--------------------------------------|---|--------------------------------------|----------------|
| ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ | ΤΑΣΗ ΔΙΟΛΙΣΘΗΣΗΣ τ_y (Pa) | ΟΔΗΓΟΣ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ (K) (Pa.s ⁿ) | ΟΔΗΓΟΣ ΡΟΪΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ (n) | R ² |
| A | | | | |
| A + ΚΠ1 | 21,498 | 2,150 | 1,354 | 0,976 |
| A + ΚΠ2 | 0,146 | 0,013 | 0,893 | 0,997 |
| A + ΚΠ3 | 0,086 | 0,029 | 0,782 | 0,999 |
| A + ΚΠ4 | 1,063 | 0,111 | 0,635 | 0,999 |
| A + ΚΠ5 | 0,236 | 0,031 | 0,816 | 0,987 |
| A + Ι1 | 0,124 | 0,200 | 0,548 | 0,999 |
| A + Ι2 | 0,355 | 0,059 | 0,708 | 0,993 |
| A + ΠΠ1 | 0,234 | 0,022 | 0,852 | 0,995 |
| A + ΠΠ2 | 0,381 | 0,015 | 0,904 | 0,998 |
| A + ΠΜ1 | 0,242 | 0,017 | 0,878 | 0,994 |
| A+Γ | 0,483 | 0,002 | 1,091 | 0,999 |

| ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΛΙΓΝΙΤΗ ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ: 3 % κ.ό. | | ΑΥΞΗΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (0 → 600 rpm) | | |
|--|--------------------------------------|---|--------------------------------------|----------------|
| ΓΗΡΑΝΣΗ | 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 + ΚΠ1 | 0,256 | 0,054 | 0,756 | 0,999 |
| A + ΚΠ2 | 0,068 | 0,053 | 0,755 | 0,998 |
| A + ΚΠ3 | 1,662 | 0,140 | 0,678 | 0,999 |
| A + ΚΠ4 | 4,891 | 0,092 | 0,755 | 0,998 |
| A + ΚΠ5 | 0,181 | 0,040 | 0,807 | 0,992 |
| A + Ι1 | 0,261 | 0,097 | 0,642 | 0,996 |
| A + Ι2 | 0,398 | 0,021 | 0,882 | 0,998 |
| A + ΠΠ1 | 0,210 | 0,059 | 0,730 | 0,902 |
| A + ΠΠ2 | 2,425 | 0,037 | 0,806 | 0,998 |
| A + ΠΜ1 | 0,105 | 0,023 | 0,853 | 0,985 |
| A+Γ | 0,907 | 0,026 | 0,795 | 0,998 |

| ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΛΙΓΝΙΤΗ ΣΤΟΝ ΠΟΛΦΟ: 3 % κ.ό. | | ΜΕΙΩΣΗ ΡΥΘΜΟΥ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (600 → 0 rpm) | | |
|---|--------------------------------------|---|--------------------------------------|----------------|
| ΓΗΡΑΝΣΗ | 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 + ΚΠ1 | 0,607 | 0,031 | 0,832 | 0,998 |
| A + ΚΠ2 | 0,242 | 0,022 | 0,878 | 0,999 |
| A + ΚΠ3 | 0,114 | 0,561 | 0,492 | 0,997 |
| A + ΚΠ4 | 1,239 | 0,629 | 0,508 | 0,998 |
| A + ΚΠ5 | 0,387 | 0,079 | 0,774 | 0,996 |
| A + Ι1 | 0,355 | 0,059 | 0,708 | 0,993 |
| A + Ι2 | 0,469 | 0,0144 | 0,935 | 0,996 |
| A + ΠΠ1 | 0,531 | 0,0174 | 0,902 | 0,995 |
| A + ΠΠ2 | 1,417 | 0,168 | 0,605 | 0,998 |
| A + ΠΜ1 | 0,472 | 0,010 | 0,963 | 0,997 |
| A+Γ | 0,275 | 0,009 | 0,928 | 0,999 |