



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
**Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-
Μεταλλουργών**
Τομέας Μεταλλευτικής
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

***ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ
ΙΞΩΔΟΥΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ***



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΡΓΕΤΑ ΓΕΩΡΓΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ : ΣΟΦΙΑ ΣΤΑΜΑΤΑΚΗ, ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-
Μεταλλουργών
Τομέας Μεταλλευτικής
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ
ΙΞΩΔΟΥΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΡΓΕΤΑ ΓΕΩΡΓΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ : ΣΟΦΙΑ ΣΤΑΜΑΤΑΚΗ, ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 01/09/2017

Σοφία Σταματάκη, καθηγήτρια ΕΜΠ, _____ (υπογραφή)

Γεώργιος Αποστολόπουλος, αναπληρωτής καθηγητής ΕΜΠ, _____ (υπογραφή)

Κωνσταντίνος Μαγουλάς, καθηγητής ΕΜΠ, _____ (υπογραφή)

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η πετρελαϊκή βιομηχανία κρύβει από πίσω της μια ολόκληρη επιστήμη, τη Μηχανική Πετρελαίων. Πρόκειται για ένα τομέα μεγάλου επιστημονικού ενδιαφέροντος που με την πάροδο των χρόνων αναπτύσσεται ταχύτατα βασιζόμενος σε τεχνολογίες αιχμής. Είναι η επιστήμη που «τρέχει» και ανοίγει το δρόμο για όλες τις υπόλοιπες καθώς τίποτε δεν λειτουργεί χωρίς ενέργεια. Το πετρέλαιο αποτελεί τη σημαντικότερη πρώτη καύσιμη ύλη και σύμφωνα με μελέτες θα κατέχει πρωταρχικό ρόλο στην ενεργειακή αλυσίδα για τουλάχιστον ακόμη 20 χρόνια.

Ο ζήλος και η αγάπη που πρέπει να έχει κάποιος για να ασχοληθεί με αυτό τον τομέα και να διαπρέψει ήταν όσα με ενέπνευσαν και μου έδωσαν ώθηση για να προχωρήσω σε αυτό το ανεξερεύνητο για εμένα μονοπάτι.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω από τα βάθη της καρδιάς μου την πολύφημη στον κλάδο κυρία Σοφία Σταματάκη, καθηγήτρια της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, για τις εικόνες που μου έδωσε μέσα από τις διαλέξεις της, για όσα μου έμαθε και για το κίνητρο που αποτέλεσε η ίδια για εμένα. Πρόκειται για μια σπουδαία Ελληνίδα επιστήμονα που δεν θα μπορούσα παρά να θαυμάσω για όσα έχει καταφέρει και μάλιστα σε ένα τομέα αυστηρά ανδροκρατούμενο στα πρώτα βήματα της. Νιώθω ιδιαίτερη τιμή που επέβλεψε την διπλωματική μου εργασία. Για την ανεκτίμητης αξίας βοήθεια της, τόσο κατά τις προπτυχιακές μου σπουδές όσο και κατά την αναζήτηση μου για μεταπτυχιακές σπουδές με ειδίκευση στη Μηχανική Πετρελαίων, εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου και την ελπίδα να την αποζημιώσω ηθικά με την επιτυχία μου. Είμαι σίγουρη ότι η κύρια Σταματάκη θα συνεχίσει να εμπνέει πολλούς ακόμη φοιτητές και να τους «κολλάει» το μικρόβιο που έχουν όσοι ασχολούνται με τον κλάδο, πάθος και όρεξη για σκληρή δουλειά!

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κυρία Κόφφα Ευαγγελία, από το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, οι οποία μου παρείχε πολύτιμη βοήθεια και στήριξη κατά τη συγγραφή της διπλωματικής αυτής εργασίας. Η κυρία Κόφφα ήταν διαρκώς στη διάθεσή μου για οποιαδήποτε απορία ή διόρθωση ακόμη και στην καρδιά του καλοκαιριού, τον Αύγουστο. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τις δύο μεγαλύτερες αδερφές μου που με στήριξαν όλα τα χρόνια των

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

σπουδών μου και που η λαχτάρα μου να τους κάνω περήφανους με έφτασε ως εδώ και θα με πάει ακόμη πιο μακριά!

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το τελευταίο (5ο) έτος φοίτησής μου στη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την αξιολόγηση διαφόρων συσχετίσεων της βιβλιογραφίας στην πρόρρηση του ιξώδους του πετρελαίου και την εφαρμογή αυτών σε κοιτάσματα του Ελλαδικού χώρου.

Αρχικά, στο Κεφάλαιο 2, γίνεται αναφορά στις αρχές που διέπουν έναν ταμιευτήρα πετρελαίου. Αναλύεται η σύνθεση των ρευστών, η ταξινόμηση τους σε διάφορους τύπους και γίνεται λόγος για την ογκομετρική συμπεριφορά των υδρογονανθράκων. Επίσης, ορίζονται οι βασικές ιδιότητες των πετρελαϊκών ρευστών.

Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται οι πειραματικές αναλύσεις με τις οποίες υπολογίζονται οι ογκομετρικές (PVT) παράμετροι καθώς επίσης και εμπειρικές συσχετίσεις για τον προσδιορισμό αυτών των παραμέτρων σε περίπτωση απουσίας πειραματικών δεδομένων. Ακολούθως, στο Κεφάλαιο 4 γίνεται ειδική αναφορά στο ιξώδες του πετρελαίου. Αναλύεται η επίδραση που έχει στην έρευνα και την παραγωγή υδρογονανθράκων, τα είδη στα οποία διακρίνεται ανάλογα με την πίεση και οι μέθοδοι εκτίμησής του (είτε εργαστηριακά είτε μέσω συσχετίσεων).

Τα Κεφάλαια 5 και 6 και 7 αποτελούν το κυρίως θέμα της διπλωματικής εργασίας. Το Κεφάλαιο 5 αναφέρεται στην χρήση εμπειρικών συσχετίσεων για την πρόρρηση του ιξώδους σε πετρελαϊκά κοιτάσματα του Ελλαδικού χώρου. Αναλύεται η επιλογή των συσχετίσεων και στη συνέχεια δίνονται θεωρητικές πληροφορίες για κάθε συσχέτιση (συμπεριλαμβάνονται μαθηματικές σχέσεις εκτίμησης, πεδία εφαρμογής κτλ.). Στο Κεφάλαιο 6, αξιολογείται η συμπεριφορά των συσχετίσεων που επιλέχθηκαν στην εκτίμηση του ιξώδους με εφαρμογή στα πετρελαϊκά μίγματα των κοιτασμάτων του ελλαδικού χώρου. Η αξιολόγηση γίνεται ξεχωριστά ανάλογα με τις συνθήκες που βρίσκεται το πετρελαϊκό μίγμα και την κατάσταση τους (dead oil, κορεσμένο πετρέλαιο και υποκορεσμένο πετρέλαιο).

Το Κεφάλαιο 7 παρουσιάζει τη βελτιστοποίηση ορισμένων συσχετίσεων με στόχο την ακριβέστερη πρόρρηση του ιξώδους τόσο στα πετρελαϊκά μίγματα του κοιτάσματος «Πρίνος» όσο και του κοιτάσματος «Δ. Κατάκολο».

Τέλος, τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρατίθενται στο όγδοο και τελευταίο Κεφάλαιο.

ABSTRACT

The object studied by this Diploma Thesis is the comparative predictive capability assessment of viscosity correlations for hydrocarbon fluids and their application in Greek oilfields.

At first, Chapter 2, presents some basic principles governing an oil reservoir. More specifically, it analyzes the composition of the fluids, their classification in various types, and the volumetric behavior of the hydrocarbons. It also defines the basic properties of petroleum fluids.

Chapter 3 presents a thorough description of the basic PVT parameters as well as PVT experiments usually performed on an oil sample, and empirical correlations used for the estimation of fluid properties in the case of absence of experimental data.

Chapter 4 deals more specifically with oil viscosity which is the subject of this Diploma Thesis. It also presents the effect of the viscosity property in the hydrocarbons exploration and production, its types as well as the estimation methods used either in the laboratory or by means of empirical correlations.

The most important part of this Thesis is presented in the following Chapters. Chapter 5 describes the empirical correlations for the estimation of oil viscosity in the Greek oilfields of Prinos and West Katakolo, including their mathematical form, their range of applicability and the selection of the correlations to be applied. Chapter 6 presents the application of the selected correlations and their performance in oil viscosity estimation in the Greek oil reservoirs in different fluid phase (dead, saturated and under saturated oil). The evaluation's procedure is strengthened with the illustration of diagrams and charts in the different oil phases.

Finally in Chapter 7, an interesting update of some correlations is given aiming to reduce the average relative error of the estimated values of viscosity. Lastly, in Chapter 8 there are comments and conclusions regarding the predictive capability of the selected viscosity correlations for the Greek hydrocarbon fluids, studied.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ.....	3
2.1 Σύνθεση πετρελαϊκού ρευστού.....	3
2.2 Βασικές αρχές ογκομετρικής συμπεριφοράς υδρογονανθράκων – Ισορροπία Φάσεων.....	4
2.3 Ταξινόμηση των πετρελαϊκών ρευστών	7
2.3.1 Εφαρμογές σε Πραγματικά Συστήματα Υδρογονανθράκων	8
2.4 Βασικές ιδιότητες πετρελαϊκών ρευστών.....	12
3. ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗ (PVT) ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ .	15
3.1 Βασικές ογκομετρικές (PVT) παράμετροι	15
3.2 Πειραματικές μετρήσεις PVT	17
3.3 Δειγματοληψία ρευστών.....	18
3.4 Ανάλυση PVT.....	19
3.5 Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση υπό σταθερή σύσταση	20
(Constant Mass Expansion CME ή Flash Expansion).....	20
3.6 Διαφορική εκτόνωση (Differential Liberation)	22
3.7 Πείραμα διαχωρισμού (Separation Test).....	23
3.8 Εμπειρικές συσχετίσεις για συστήματα πετρελαίου.....	23
4. ΙΞΩΔΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ	27
4.1 Ορισμός ιξώδους	27
4.2 Η επίδραση του ιξώδους στη συμπεριφορά των ρευστών	28
4.3 Ταξινόμηση ιξώδους πετρελαίου.....	28
4.4 Μετρήσεις ιξώδους.....	30
4.4.1 Πειραματική μέτρηση ιξώδους.....	30
4.4.2 Εμπειρική εκτίμηση ιξώδους – Χρήση συσχετίσεων	33

5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ	35
5.1 Επιλογή συσχετίσεων	35
5.2 Η συσχέτιση των Petrosky & Farshad.....	40
5.2.1 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil.....	42
5.2.2 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου	43
5.2.3 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου	43
5.4 Η συσχέτιση των Beggs & Robinson	44
5.4.1 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil.....	45
5.4.2 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου	45
5.5 Η συσχέτιση των Dindoruk & Christman	46
5.5.1 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil.....	48
5.5.2 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου	49
5.5.3 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου	50
5.6 Η συσχέτιση των Bergman & Sutton	51
5.6.1 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil.....	51
5.6.2 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου	52
5.6.3 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου	54
5.7 Η συσχέτιση των Elsharkawy & Alikhan.....	55
5.7.1 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil.....	56
5.7.2 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου	56

5.6.3 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου	57
5.8 Η συσχέτιση των Vazquez & Beggs.....	58
5.8.1 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου	59
5.9 Η συσχέτιση του Beal.....	60
5.10 Η συσχέτιση του Glaso	62
6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ	65
6.1 Εισαγωγή	65
6.2 Εκτίμηση του ιξώδους του dead oil	67
6.2.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	75
6.3 Πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου	78
6.3.1 Συσχέτιση Petrosky & Farshad	80
6.3.2 Συσχέτιση Beggs & Robinson	82
6.3.3. Συσχέτιση Bergman & Sutton	85
6.3.4 Συσχέτιση Dindoruk & Christman	88
6.3.5 Συσχέτιση Elsharkawy & Alikhan	90
6.3.6 Αξιολόγηση των συσχετίσεων για το πετρελαϊκό ρευστό του κοιτάσματος του Δυτικού Κατάκολου	93
6.3.7 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	95
6.4 Πρόρρηση ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου	100
6.4.1 Συσχέτιση Bergman & Sutton	102
6.4.3 Συσχέτιση Dindoruk & Christman	105
6.4.4 Συσχέτιση Vazquez& Beggs	107
6.4.5 Αξιολόγηση των συσχετίσεων για το πετρελαϊκό ρευστό του κοιτάσματος του Δ. Κατάκολου	110
6.4.6 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	112

7. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ.....	117
7.1 Εισαγωγή.....	117
7.2 Βελτιστοποίηση συσχέτισης Beggs & Robinson για το ιξώδες του <i>dead oil</i> ..	118
7.3 Βελτιστοποίηση της συσχέτισης Petrosky & Farshad για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου	119
7.4 Βελτιστοποίηση επιλεγμένων συσχετίσεων για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου.....	122
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	125
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	129

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1. Ογκομετρικό διάγραμμα καθαρής ένωσης (Σταματάκη, 2004).	5
Σχήμα 2.2 Διάγραμμα φάσεων για μια καθαρή ένωση (Σταματάκη, 2004).	5
Σχήμα 2.3 Διάγραμμα φάσεων πολυσυστατικού μίγματος (Σταματάκη, 2004).	7
Σχήμα 2.4. Διαγράμματα φάσεων μιγμάτων υδρογονανθράκων: (a) Ξηρό αέριο, (b) Αέριο εμπλουτισμένο με ενδιάμεσους υδρ/κες, (c) Συμπυκνώσιμο αέριο, (d) Μαύρο πετρέλαιο (Σταματάκη, 2004).	9
Σχήμα 2.5 Παραγωγή ρευστών υδρογονανθράκων (Danesh, 1998).	11
Σχήμα 3.1 Παραγωγή ρευστών υδρογονανθράκων (α) αρχική πίεση υψηλότερη της πίεσης σημείου φυσαλίδας, (β) χαμηλότερη της πίεσης σημείου φυσαλίδας (Dake, 1998).	16
Σχήμα 3.2 Διαδικασία εργαστηριακής μέτρησης ισοθερμοκρασιακής εκτόνωσης υπό σταθερή σύσταση (Constant Mass Expansion) (McCain, 1990).	20
Σχήμα 3.3 Διάγραμμα αποτελεσμάτων από την ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση (Σταματάκη, 2004).	21
Σχήμα 4.1 Εξωτερική τάση που εφαρμόζεται σε ένα μέρος ρευστού. Οι όροι στο σχήμα εμπεριέχονται στον ορισμό του ιξώδους (Pedersen, et al., 2014).	27
Σχήμα 4.2 Το ιξώδες του πετρελαίου συναρτήσει της πίεσης.	29
Σχήμα 4.3 Ιξωδόμετρο κυλιόμενης σφαίρας (www.Chandlerengineering.com).	31
Σχήμα 4.4 Ιξωδόμετρο τριχοειδούς ροής (Core Laboratories).	32
Σχήμα 4.5 Ηλεκτρομαγνητικό ιξωδόμετρο (Schlumberger).	33
Σχήμα 5.1. Ιξώδες του dead oil. (Carlton, 1946).	61
Σχήμα 5.2 Ιξώδες πετρελαίου το οποίο δεν περιέχει αέριο.	61
Σχήμα 5.3 Ιξώδες πετρελαίου που δεν περιέχει αέριο σε ατμοσφαιρική πίεση (dead oil) συναρτήσει της πυκνότητας API και της θερμοκρασίας.	63
Σχήμα 6.2 Επίδραση του παράγοντα χαρακτηρισμού Watson στο ιξώδες του dead oil σε σχέση με την πυκνότητα API (Petrowiki).	68
Σχήμα 6.3 Διάγραμμα ιξώδους dead oil σε σχέση με την πυκνότητα API του πετρελαίου σε διαφορετικές θερμοκρασίες ταμιευτήρα (Hemmati-Sarapardeh, 2014).	76

Σχήμα 6.4 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των <i>Petrosky & Farshad</i> για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του <i>dead oil</i>).....	80
Σχήμα 6.5 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των <i>Petrosky & Farshad</i> για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών B και C (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του <i>dead oil</i>).	80
Σχήμα 6.6 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των <i>Petrosky & Farshad</i> για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση B: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του <i>dead oil</i>).	81
Σχήμα 6.7 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των <i>Petrosky & Farshad</i> για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών B και C (Περίπτωση B: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του <i>dead oil</i>).....	82
Σχήμα 6.8 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των <i>Beggs & Robinson</i> για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του <i>dead oil</i>).	83
Σχήμα 6.9(α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των <i>Beggs & Robinson</i> για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του <i>dead oil</i>).	83
Σχήμα 6.10 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των <i>Beggs & Robinson</i> για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση B: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του <i>dead oil</i>).....	84
Σχήμα 6.11 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των <i>Beggs & Robinson</i> για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών B και C (Περίπτωση B: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του <i>dead oil</i>).....	85
Σχήμα 6.12: Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των <i>Bergman & Sutton</i> για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του <i>dead oil</i>).	86
Σχήμα 6.13 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των <i>Bergman & Sutton</i> για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών B και C (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του <i>dead oil</i>).	86
Σχήμα 6.14 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των <i>Bergman & Sutton</i> για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση B: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του <i>dead oil</i>).....	87

Σχήμα 6.15 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσκει της πίεσης με τη συσχέτιση των Bergman & Sutton για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών B και C (Περίπτωση B: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil).....	88
Σχήμα 6.16 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσκει της πίεσης με τη συσχέτιση των Dindoruk & Christman για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil).	88
Σχήμα 6.17 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσκει της πίεσης με τη συσχέτιση των Dindoruk & Christman για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών B και C (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil).	89
Σχήμα 6.18 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσκει της πίεσης με τη συσχέτιση των Dindoruk & Christman για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση B: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil).	90
Σχήμα 6.19 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσκει της πίεσης με τη συσχέτιση των Dindoruk & Christman για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών B και C (Περίπτωση B: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil).	90
Σχήμα 6.20 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσκει της πίεσης με τη συσχέτιση των Elsharkawy & Alikhan για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil).	91
Σχήμα 6.21 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσκει της πίεσης με τη συσχέτιση των Elsharkawy & Alikhan για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών B και C (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil).	91
Σχήμα 6.22 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσκει της πίεσης με τη συσχέτιση των Elsharkawy & Alikhan για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση B: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil).	92
Σχήμα 6.23 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσκει της πίεσης με τη συσχέτιση των Elsharkawy & Alikhan για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών B και C (Περίπτωση B: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil).....	93
Σχήμα 6.24 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσκει της πίεσης για το κορεσμένο πετρέλαιο του Δ. Κατάκολου (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil).	94
Σχήμα 6.25: Απόδοση συσχετίσεων για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου του Δ. Κατάκολου (Σύγκριση Περιπτώσεων A και B).....	95
Σχήμα 6.26 (α, β, γ, δ). Απόδοση συσχετίσεων στην πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου (Περίπτωση A και B – ΠΡΙΝΟΣ).	96

Σχήμα 6.27 Απόδοση συσχετίσεων στην πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου (Περίπτωση A και B – ΚΑΤΑΚΟΛΟ).....	97
Σχήμα 6.28 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Bergman & Sutton για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Πρίνου (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil & του κορεσμένου πετρελαίου).	103
Σχήμα 6.29 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Bergman & Sutton για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Πρίνου (Περίπτωση B: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil και εκτιμώμενης τιμής του κορεσμένου πετρελαίου).	103
Σχήμα 6.30 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Bergman & Sutton για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Πρίνου (Περίπτωση C: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil και του κορεσμένου πετρελαίου).	104
Σχήμα 6.31 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Dindoruk & Christman για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Πρίνου (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil & του κορεσμένου πετρελαίου).	105
Σχήμα 6.32 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Dindoruk & Christman για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Πρίνου (Περίπτωση B: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil και εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου).	106
Σχήμα 6.33 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Dindoruk & Christman για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Πρίνου (Περίπτωση C: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil & του κορεσμένου πετρελαίου).	106
Σχήμα 6.34 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Vazquez& Beggs για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Πρίνου (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil & του κορεσμένου πετρελαίου).	108
Σχήμα 6.35 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Vazquez& Beggs για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Πρίνου (Περίπτωση B: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil και εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου).	108

Σχήμα 6.36 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Vazquez& Beggs για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Πρίνου (Περίπτωση C: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil & του κορεσμένου πετρελαίου).....	109
Σχήμα 6.37 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Δ. Κατάκολου (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil και του κορεσμένου πετρελαίου).	110
Σχήμα 6.38 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Δ. Κατάκολου (Περίπτωση B: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil και εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου).	111
Σχήμα 6.39 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Δ. Κατάκολου (Περίπτωση C: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil και του κορεσμένου πετρελαίου)	111
Σχήμα 6.40 (α, β, γ, δ). Απόδοση συσχετίσεων στην πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου (Περίπτωση A, B και C – ΠΡΙΝΟΣ).	113
Σχήμα 6.41 Απόδοση συσχετίσεων στην πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου (Περίπτωση A, B και C– ΚΑΤΑΚΟΛΟ).	113
Σχήμα 7.1 Πρόρρηση του ιξώδους του dead oil στον Πρίνο και το Κατάκολο (Τρόπος 1: Αρχική Beggs & Robinson, Τρόπος 2:τροποποιημένη Beggs & Robinson).	119
Σχήμα 7.2 Πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου στον Πρίνο και το Δ. Κατάκολο (Περίπτωση 1: Αρχική Beggs & Robinson & αρχική Petrosky & Farshad, Περίπτωση 2: Τροποποιημένη Beggs & Robinson & αρχική Petrosky & Farshad, Περίπτωση 3: τροποποιημένη Beggs & Robinson & τροποποιημένη Petrosky & Farshad).....	120
Σχήμα 7.3 Πρόρρηση ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου για τις ζώνες του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου (Αρχική Beggs & Robinson και αρχική Petrosky & Farshad).	121
Σχήμα 7.4 Πρόρρηση ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου για τις ζώνες του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου (Τροποποιημένη Beggs & Robinson και αρχική Petrosky & Farshad).....	121
Σχήμα 7.5 Πρόρρηση ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου για τις ζώνες του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου (Τροποποιημένη Beggs & Robinson και τροποποιημένη Petrosky & Farshad).....	122
Σχήμα 7.6 Πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου στον Πρίνο και το Δ. Κατάκολο (Περίπτωση 1: Τροποποιημένη Beggs & Robinson, τροποποιημένη	

Petrosky & Farshad για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου και αρχική Bergman & Sutton για το ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου, Περίπτωση 2: Τροποποιημένη Beggs & Robinson, τροποποιημένη Petrosky & Farshad για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου και αρχική Dindoruk & Christman για το ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου).....	123
Σχήμα 7.7 Πρόρρηση ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου για τις ζώνες του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου (Τροποποιημένη Beggs & Robinson, τροποποιημένη Petrosky & Farshad για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου και αρχική Bergman & Sutton για το ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου).....	124
Σχήμα 7.8 Πρόρρηση ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου για τις ζώνες του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου (Τροποποιημένη Beggs & Robinson, τροποποιημένη Petrosky & Farshad για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου και αρχική Dindoruk & Christman για το ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου).	124

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 Τυπική σύσταση διάφορων πετρελαϊκών ρευστών.....	10
Πίνακας 5.1. Συσχετίσεις που επιλέχθηκαν για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil στον Πρίνο και στο Δ. Κατάκολο.....	36
Πίνακας 5.2. Συσχετίσεις που επιλέχθηκαν για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου στον Πρίνο και στο Δ. Κατάκολο.....	36
Πίνακας 5.3. Συσχετίσεις που επιλέχθηκαν για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου στον Πρίνο και στο Δ. Κατάκολο.....	36
Πίνακας 5.4. Αξιολόγηση δημοσιευμένων συσχετίσεων για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου(McCain, 2011).....	38
Πίνακας 5.5. Αξιολόγηση δημοσιευμένων συσχετίσεων για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου(McCain, 2011).	39
Πίνακας 5.6. Συσχετίσεις που απορρίφθηκαν για την πρόρρηση του ιξώδους του πετρελαίου στον Πρίνο και το Δ. Κατάκολο.....	40
Πίνακας 5.7. Πεδίο εφαρμογής της συσχέτισης των Petrosky & Farshad για το ιξώδες του dead oil.....	41
Πίνακας 5.8. Πεδίο εφαρμογής της συσχέτισης των Petrosky & Farshad για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου.....	41
Πίνακας 5.9. Πεδίο εφαρμογής της συσχέτισης των Petrosky & Farshad για το ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου.....	42
Πίνακας 5.10. Πεδίο εφαρμογής των συσχετίσεων των Beggs & Robinson για το ιξώδες.....	44
Πίνακας 5.11. Πεδίο εφαρμογής των συσχετίσεων των Dindoruk & Christman για το ιξώδες πετρελαίου.....	47
Πίνακας 5.12. Συντελεστές για τη συσχέτιση Dindoruk & Christman του ιξώδους του dead oil.....	48
Πίνακας 5.13. Συντελεστές για τη συσχέτιση Dindoruk & Christman του κορεσμένου πετρελαίου.....	50
Πίνακας 5.14. Συντελεστές για τη συσχέτιση Dindoruk & Christman του υποκορεσμένου πετρελαίου.....	51
Πίνακας 5.15. Πεδίο εφαρμογής της συσχέτισης των Bergman & Sutton για το ιξώδες του dead oil.....	52

Πίνακας 5.16. Πεδίο εφαρμογής της συσχέτισης των Bergman & Sutton για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου.	53
Πίνακας 5.17. Πεδίο εφαρμογής της συσχέτισης των Bergman & Sutton για το ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου.	54
Πίνακας 5.18. Πεδίο εφαρμογής της συσχέτισης των Elsharkawy & Alikhan για το ιξώδες του dead oil.	56
Πίνακας 5.19. Πεδίο εφαρμογής της συσχέτισης των Elsharkawy & Alikhan για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου.	57
Πίνακας 5.20. Πεδίο εφαρμογής της συσχέτισης των Elsharkawy & Alikhan για το ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου.	58
<i>Πίνακας 6.1 Συσχετίσεις που επιλέχθηκαν για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil στο κοίτασμα του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου.</i>	<i>70</i>
<i>Πίνακας 6.2 Αποτελέσματα εφαρμογής διαφόρων συσχετίσεων για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil στο κοίτασμα του Πρίνου.</i>	<i>71</i>
<i>Πίνακας 6.3. Αποτελέσματα εφαρμογής διαφόρων συσχετίσεων για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil στο κοίτασμα του Δ. Κατάκολου.</i>	<i>74</i>
<i>Πίνακας 6.4. Η πυκνότητα API στις ζώνες του Πρίνου και στο Δ. Κατάκολο.</i>	<i>76</i>
<i>Πίνακας 6.5. Συσχετίσεις που επιλέχθηκαν για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου.</i>	<i>78</i>
<i>Πίνακας 6.6. Αποτελέσματα εκτίμησης ιξώδους κορεσμένου πετρελαίου στα πετρελαϊκά ρευστά του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου στις Περιπτώσεις A & B.</i>	<i>79</i>
Πίνακας 6.7. Συσχετίσεις που επιλέχθηκαν για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου στον Πρίνο και το Κατάκολο.	100
<i>Πίνακας 6.8. Αποτελέσματα πρόρρησης του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου.</i>	<i>102</i>
Πίνακας 7.1 Πειραματικές και εκτιμώμενες τιμές ιξώδους του dead oil με βάση την τροποποίηση. I.	119

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βελτιστοποίηση της παραγωγής υδρογονανθράκων βασίζεται κατά μεγάλο μέρος στις ογκομετρικές (PVT) ιδιότητες, στην ισορροπία φάσεων που παρουσιάζουν τα ρευστά του ταμιευτήρα, στο χρόνο εξέλιξης της παραγωγής (πτώση πίεσης ταμιευτήρα) και βεβαίως στις αντίστοιχες μεταβολές που προκύπτουν κατά τη μεταφορά των ρευστών εντός των παραγωγικών γεωτρήσεων και τον διαχωρισμό τους στην επιφάνεια.

Το ιξώδες αποτελεί μια από τις σπουδαιότερες ιδιότητες μεταφοράς παίζοντας καθοριστικό ρόλο στη ροή του ρευστού μέσα σε διάφορα μέσα.

Το ιξώδες είναι μια ιδιότητα «κλειδί» για την προσομοίωση ταμιευτήρων πετρελαίου, το σχεδιασμό των παραγωγικών γεωτρήσεων καθώς και του εξοπλισμού τους. Ο υπολογισμός του ιξώδους είναι απαραίτητος από τα πρώτα στάδια έρευνας ενός κοιτάσματος. Η εργαστηριακή ανάλυση PVT αποτελεί την πιο αξιόπιστη διαδικασία μέτρησης του ιξώδους, απαιτεί όμως χρόνο, έχει σημαντικό κόστος και πολλές φορές μπορεί να μην είναι εφικτή ή άμεσα δυνατή η δειγματοληψία ρευστού για την υλοποίησή της, με αποτέλεσμα να επιχειρείται η εκτίμηση του ιξώδους ή και άλλων ιδιοτήτων του πετρελαϊκού μίγματος μέσω άλλων διαθέσιμων δεδομένων. Όλα τα παραπάνω έδωσαν το έναυσμα για τη δημιουργία εμπειρικών μεθόδων υπολογισμού διαφόρων πετρελαϊκών ιδιοτήτων, συμπεριλαμβανομένου και του ιξώδους, οι οποίες κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούν δεδομένα που μπορούν να εκτιμηθούν στο πεδίο. Αξίζει να αναφερθεί ότι η ανάπτυξη εμπειρικών συσχετίσεων για την πρόρρηση διαφόρων ιδιοτήτων και παραμέτρων στον πετρελαϊκό τομέα είναι βασικός ερευνητικός τομέας, που χρονολογείται πολύ πίσω στο παρελθόν.

Οι συσχετίσεις που έχουν καταγραφεί στη βιβλιογραφία για την εκτίμηση του ιξώδους είναι πολυάριθμες και καλύπτουν διάφορους τύπους υδρογονανθράκων. Διακρίνονται σε συσχετίσεις που αφορούν στην αέρια φάση των υδρογονανθράκων και σε συσχετίσεις για την υγρή φάση αυτών. Η συγκεκριμένη εργασία ασχολείται με το ιξώδες της υγρής φάσης των υδρογονανθράκων, δεδομένου ότι η πρόρρηση του ιξώδους της υγρής φάσης ενέχει πάντα πολύ μεγαλύτερο σφάλμα σε σχέση με αυτήν της αέριας φάσης.

Όλες οι συσχετίσεις πρόρρησης του ιξώδους διακρίνονται με βάση τις συνθήκες που βρίσκεται το πετρελαϊκό μίγμα εντός του ταμιευτήρα, και αναφέρονται σε κορεσμένο πετρέλαιο και ακόρεστο πετρέλαιο. Δεδομένου ότι το ιξώδες του πετρελαίου δύναται να μεταβάλλεται σημαντικά ανά δείγμα, ανά κοίτασμα και ανά περιοχή, ο συγκεκριμένος τομέας εξελίσσεται διαρκώς και προτείνονται νέα εμπειρικά μοντέλα. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν συσχετίσεις, οι οποίες διαχωρίζονται γεωγραφικά καθώς έχει παρατηρηθεί ομοιότητα στις ιδιότητες ρευστών της ίδιας προέλευσης (όμοιες γεωλογικά περιοχές).

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στη μελέτη της ικανότητας επιλεγμένων εμπειρικών συσχετίσεων στην πρόρρηση του ιξώδους πετρελαϊκών ρευστών του Ελλαδικού χώρου. Το διαρκώς αυξανόμενο ενδιαφέρον που παρουσιάζει η εκμετάλλευση υδρογονανθράκων στην Ελλάδα ήταν κίνητρο για την παρούσα εργασία.

Για την αξιολόγηση αυτή επιλέχθηκαν τα πετρελαϊκά ρευστά του Πρίνου και του Δυτικού Κατάκολου. Διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα από αναλύσεις PVT αυτών των δύο κοιτασμάτων χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της δυνατότητας των επιλεγέντων συσχετίσεων στην πρόρρηση του ιξώδους των ως άνω μιγμάτων.

Στόχος της εργασίας είναι η επιλογή και αξιολόγηση εφαρμογής εμπειρικών συσχετίσεων πρόρρησης του ιξώδους σε Ελληνικά κοιτάσματα. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε μία εκτενής βιβλιογραφική αναζήτηση εμπειρικών συσχετίσεων πρόρρησης του ιξώδους, του πεδίου εφαρμογής αυτών και της απόδοσης που αυτές παρουσιάζουν. Αξιολογείται η ικανότητα πρόρρησης τους με βάση τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα και επιλέγονται κατά περίπτωση οι καλύτερες συσχετίσεις. Στη συνέχεια, επιχειρείται η τροποποίηση κάποιων εξ αυτών, με στόχο την περαιτέρω βελτίωση της συμπεριφοράς τους και την καλύτερη προσέγγιση του ιξώδους των υπό μελέτη ρευστών.

2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

Ως ταμειυτήρας ορίζεται μια συγκέντρωση υδρογονανθράκων σε πορώδη, περατά, ιζηματογενή πετρώματα. Ένα πετρελαϊκό πεδίο μπορεί να αποτελείται από διάφορους ταμειυτήρες, οι οποίοι μπορεί να βρίσκονται είτε σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης, είτε σε διαφορετικούς στρωματογραφικούς ορίζοντες (Σταματάκη, 2004).

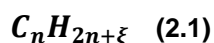
2.1 Σύνθεση πετρελαϊκού ρευστού

Υπάρχουν αρκετές θεωρίες για την δημιουργία του πετρελαίου από οργανικά υλικά οι οποίες αναφέρουν ότι η σύνθεση ενός πετρελαϊκού ρευστού εξαρτάται από το περιβάλλον απόθεσης, την γεωλογία της περιοχής, τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, τη διαδρομή που ακολούθησε από την πηγή (μητρικό πέτρωμα) έως τους γεωλογικούς σχηματισμούς και τις δομές που συγκεντρώθηκε και παγιδεύτηκε.

Ένας ταμειυτήρας δύναται να περιέχει ρευστά διαφορετικής σύνθεσης εξαιτίας της διαφορετικής χρονικής στιγμής και του περιβάλλοντος στο οποίο δημιουργήθηκε το καθένα. Σε έναν ταμειυτήρα η πίεση και η θερμοκρασία αυξάνονται με το βάθος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα και τη διαφοροποίηση της σύνθεσης του πετρελαϊκού ρευστού στις διάφορες πετρελαϊκές ζώνες.

Η σύνθεση του πετρελαίου είναι μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει όλες τις ιδιότητες του εντός του ταμειυτήρα μέχρι και τη διύλιση του. Συνήθως στα πετρελαϊκά ρευστά ανιχνεύονται καθαρές ενώσεις έως το πεντάνιο. Τα βαρύτερα συστατικά καταγράφονται σαν ομάδες με κοινό αριθμό ατόμων άνθρακα.

Τα συστατικά των υδρογονανθράκων εκφράζονται με την γενική μορφή:



όπου n : ο αριθμός των ατόμων άνθρακα

ξ : παράμετρος που ορίζει τη δομή των ενώσεων υδρογονανθράκων

Πέραν των ενώσεων υδρογονανθράκων, τα πετρελαϊκά ρευστά ενδέχεται να περιέχουν άζωτο, διοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο, θείο και ενώσεις αυτού και διάφορα άλλα μεταλλικά στοιχεία.

Το άζωτο, το υδρογόνο και το θείο εντοπίζονται σε ελαφριά και βαριά κλάσματα των πετρελαϊκών ρευστών. Μάλιστα έχουν ανακαλυφθεί αέριοι ταμιευτήρες οι οποίοι περιέχουν κυρίως N_2 , H_2S και CO_2 (όξινα αέρια). Η παρουσία ενώσεων όπως τα καρβοειδή, τα καρβένια, τα ασφαλένια και οι ρητίνες εξακριβώνεται από την υψηλή ή χαμηλή διαλυτότητα τους σε διαφορετικούς διαλύτες. Η φύση αυτών των ενώσεων μπορεί να επηρεάσει τις ιδιότητες των πετρελαϊκών ρευστών (Danesh, 1998).

2.2 Βασικές αρχές ογκομετρικής συμπεριφοράς υδρογονανθράκων – Ισορροπία Φάσεων

Τα πετρελαϊκά ρευστά αποτελούνται κυρίως από υδρογονάνθρακες. Οι υδρογονάνθρακες εντοπίζονται σε αέρια, υγρή ή στερεά φάση. Ο όρος φάση περιγράφει κάθε ομογενές και φυσικά διακριτό μέρος ενός συστήματος (McCain, 1990). Κατά τη διάρκεια της παραγωγής ενός ταμιευτήρα ο οποίος περιέχει αρχικά μια φάση, π.χ. πετρέλαιο, μπορεί, με την ελάττωση της πίεσης, μέρος των πτητικών υδρογονανθράκων να μεταφερθούν στην αέρια φάση και ως εκ τούτου να συνυπάρχουν στον ταμιευτήρα πετρέλαιο και αέριο (διφασικό σύστημα). Σε πολλές περιπτώσεις, τα πετρελαϊκά ρευστά συνυπάρχουν στον ταμιευτήρα με νερό, συνήθως αλμυρό (brine), το οποίο επηρεάζει την παραγωγική συμπεριφορά του ταμιευτήρα, όμως η επίδραση του στην ογκομετρική συμπεριφορά και στις ιδιότητες των υγρών υδρογονανθράκων είναι συνήθως αμελητέα (Danesh, 1998).

Μια φάση είναι πλήρως ορισμένη όταν έχει καθοριστεί η σύστασή της, η θερμοκρασία και η πίεση στην οποία βρίσκεται. Όλες οι εντατικές ιδιότητες για τη φάση αυτή σε δεδομένες συνθήκες είναι καθορισμένες. Οι εντατικές ιδιότητες είναι εκείνες οι οποίες δεν εξαρτώνται από την ποσότητα του υλικού (σε αντίθεση με τις εκτατικές), όπως για παράδειγμα η πυκνότητα.

Η συμπεριφορά ενός μίγματος υδρογονανθράκων σε συνθήκες ταμιευτήρα ή επιφάνειας, καθορίζεται από τη χημική του σύνθεση και την επικρατούσα πίεση και θερμοκρασία. Το γεγονός αυτό είναι σημαντικό για την ανάπτυξη και παραγωγή ενός κοιτάσματος καθώς επηρεάζει πολλές πτυχές της έρευνας και της παραγωγής πετρελαίου.

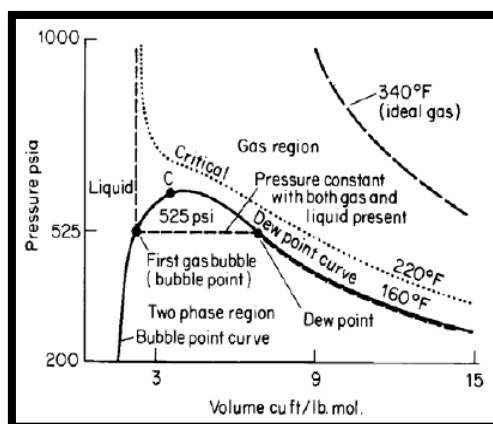
Παρόλο που ένα πετρελαϊκό μίγμα μπορεί να αποτελείται από εκατοντάδες συστατικά, οι αρχές της ογκομετρικής συμπεριφοράς αναλύονται εξετάζοντας την συμπεριφορά απλών ή πολυσυστατικών μιγμάτων τα οποία βρίσκονται σε

2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

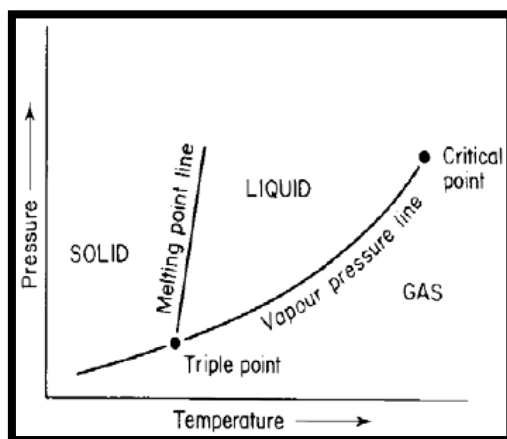
κατάσταση ισορροπίας. Τα συστήματα αυτά δεν θα υποστούν καμία αλλαγή αν αφεθούν στις υπάρχουσες συνθήκες σταθερής πίεσης και θερμοκρασίας. Ένα σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία όταν φτάνει στο χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο (Danesh, 1998).

Επειδή η παραγωγή καθορίζεται κύρια από τις θερμοφυσικές ιδιότητες και τη θερμοδυναμική συμπεριφορά των πετρελαϊκών μιγμάτων, είναι αναγκαίο να αναφερθούν κάποια θέματα που αφορούν στα παραπάνω.

Αρχικά, θεωρούμε ένα μονοσυστατικό ρευστό (καθαρή ουσία) το οποίο βρίσκεται σε υψηλή πίεση και σε θερμοκρασία μικρότερη από την κρίσιμη. Το ρευστό, επομένως, βρίσκεται στην υγρή φάση. Το διάγραμμα πίεσης-γραμμομοριακού όγκου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1 (περίπτωση προπάνιου), ενώ το διάγραμμα πίεσης-θερμοκρασίας για τη γενική περίπτωση μονοσυστατικού ρευστού παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2 (Σταματάκη, 2004).



Σχήμα 2.1. Ογκομετρικό διάγραμμα καθαρής ένωσης (Σταματάκη, 2004).



Σχήμα 2.2 Διάγραμμα φάσεων για μια καθαρή ένωση (Σταματάκη, 2004).

2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

Εάν το παραπάνω ρευστό (Σχήμα 2.1) εκτονωθεί υπό σταθερή θερμοκρασία, θα παρατηρηθεί σημαντική μεταβολή της πίεσης για αντίστοιχη μεταβολή του όγκου, καθώς η υγρή φάση (c) παρουσιάζει μικρή συμπιεστότητα.

Η συμπιεστότητα του ρευστού ορίζεται ως η σχετική μεταβολή του όγκου προς τη μεταβολή της πίεσης υπό σταθερή θερμοκρασία:

$$c = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \quad (2.2)$$

Η πλειοψηφία των υγρών έχει μικρή συμπιεστότητα η οποία, μάλιστα, θεωρείται ανεξάρτητη της πίεσης.

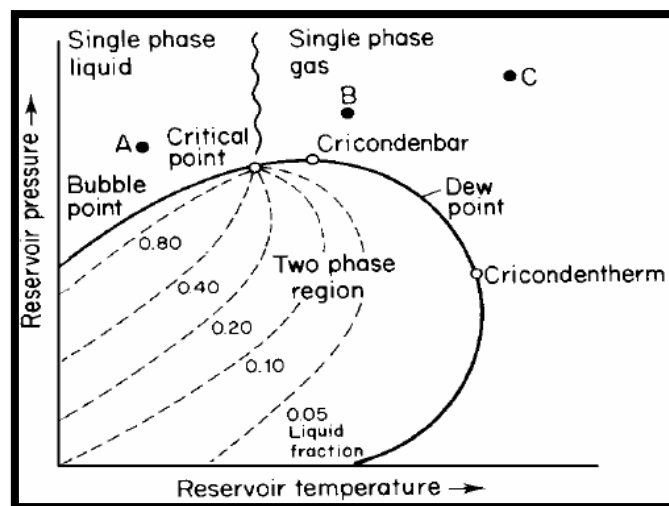
Καθώς η εκτόνωση συνεχίζεται, η πίεση μειώνεται μέχρι να σχηματιστεί μια απειροελάχιστη ποσότητα (φουσαλίδα) αερίου (bubble point). Η πίεση σε αυτό το σημείο ονομάζεται πίεση σημείου φουσαλίδας (bubble point) ή πίεση κορεσμού για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Όσο αφορά τις καθαρές ουσίες, περαιτέρω εκτόνωση γίνεται υπό σταθερή πίεση, δηλαδή την τάση ατμών για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία, ενώ η αναλογία υγρού-αερίου μεταβάλλεται συνεχώς έως ότου απομείνει μόνο μια απειροελάχιστη ποσότητα υγρού. Στο διάγραμμα φάσεων το σημείο αυτό ονομάζεται σημείο δρόσου (dew point) για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία. Από το σημείο αυτό και έπειτα η εκτόνωση λαμβάνει χώρα στην αέρια φάση και έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή αύξηση του ειδικού όγκου του αερίου.

Η συμπιεστότητα ενός τέλει αερίου είναι αντιστρόφως ανάλογη της πίεσης αφού θεωρώντας μια καθαρή ουσία ως ιδανικό αέριο, από την εξίσωση ορισμού της συμπιεστότητας και το νόμο των τέλει αερίων ($PV = nRT$) προκύπτει $c = +\frac{1}{P}$.

Το συμπέρασμα που εξάγεται από τα παραπάνω είναι πως σε κάθε ισόθερμη εκτόνωση αντιστοιχεί ένα σημείο φουσαλίδας και ένα σημείο δρόσου. Κατά αυτό τον τρόπο, μια σειρά ισόθερμων εκτονώσεων σχηματίζει μια γραμμή σημείων φουσαλίδας και μια γραμμή σημείων δρόσου οι οποίες συναντώνται σε ένα σημείο (Σχήμα 2.1). Το σημείο αυτό ονομάζεται κρίσιμο σημείο (C). Εκεί ακριβώς οι ιδιότητες των δύο φάσεων ταυτίζονται (Σταματάκη, 2004).

Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα φάσεων ενός πολυσυστατικού μίγματος:



Σχήμα 2.3 Διάγραμμα φάσεων πολυσυστατικού μίγματος (Σταματάκη, 2004).

Η συμπεριφορά αυτών των μιγμάτων διαφέρει από εκείνη των καθαρών ουσιών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, τα μίγματα που αποτελούνται από δύο ή τρία συστατικά εμφανίζουν όλα τα φαινόμενα που απαντώνται και σε πολύ πιο πολύπλοκα συστήματα. Η υγρή φάση εκτονώνεται ως το σημείο φυσαλίδας υπό σταθερή θερμοκρασία όπως ακριβώς εκτονώνεται και σε ένα καθαρό σύστημα. Εντούτοις, η εκτόνωση μέσα από την περιοχή των δύο φάσεων δεν λαμβάνει χώρα υπό σταθερή πίεση αλλά συνοδεύεται από ελάττωση της πίεσης (τάσης ατμών) καθώς οι συστάσεις της υγρής και αέριας φάσης μεταβάλλονται.

Όπως εύκολα παρατηρείται στο Σχήμα 2.3, το διάγραμμα πίεσης-θερμοκρασίας δεν αναπαριστά πλέον μία απλή γραμμή όπως στο Σχήμα 2.2, αλλά σχηματίζει ένα διάγραμμα φάσεων (**phase envelope**). Στο διάγραμμα αυτό υπάρχει μια τιμή πίεσης πάνω από την οποία δεν είναι δυνατόν να συνυπάρχουν δύο φάσεις. Η πίεση αυτή ονομάζεται **cricondenbar**, ενώ η θερμοκρασία πάνω από την οποία δεν μπορούν να συνυπάρχουν δύο φάσεις ονομάζεται **cricondentherm**. Το κρίσιμο σημείο δεν συμπίπτει με το σημείο φυσαλίδας ή το σημείο δρόσου, ούτε είναι απαραίτητα ανάμεσά τους (Σταματάκη, 2004).

2.3 Ταξινόμηση των πετρελαϊκών ρευστών

Ο Μηχανικός Πετρελαίου πρέπει να γνωρίζει τον τύπο του ρευστού από τα αρχικά στάδια ζωής του ταμειυτήρα. Ο τύπος του ρευστού είναι καθοριστικής σημασίας για το σχεδιασμό της ανάπτυξης ενός κοιτάσματος και για την εκτίμηση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός ταμειυτήρα. Η μέθοδος της υγρής δειγματοληψίας, τα είδη και τα

μεγέθη των επιφανειακών εγκαταστάσεων, οι διαδικασίες για τον υπολογισμό των αποθεμάτων πετρελαίου και αερίου, το σχέδιο παραγωγής και η τυχόν άμεση επιλογή μεθόδου ενίσχυσης της απόληψης εξαρτώνται άμεσα από τον τύπο και τη θερμοδυναμική συμπεριφορά των ρευστών που περιέχει ο ταμειυτήρας.

2.3.1 Εφαρμογές σε Πραγματικά Συστήματα Υδρογονανθράκων

- **Συστήματα ξηρού αερίου (dry gas)**

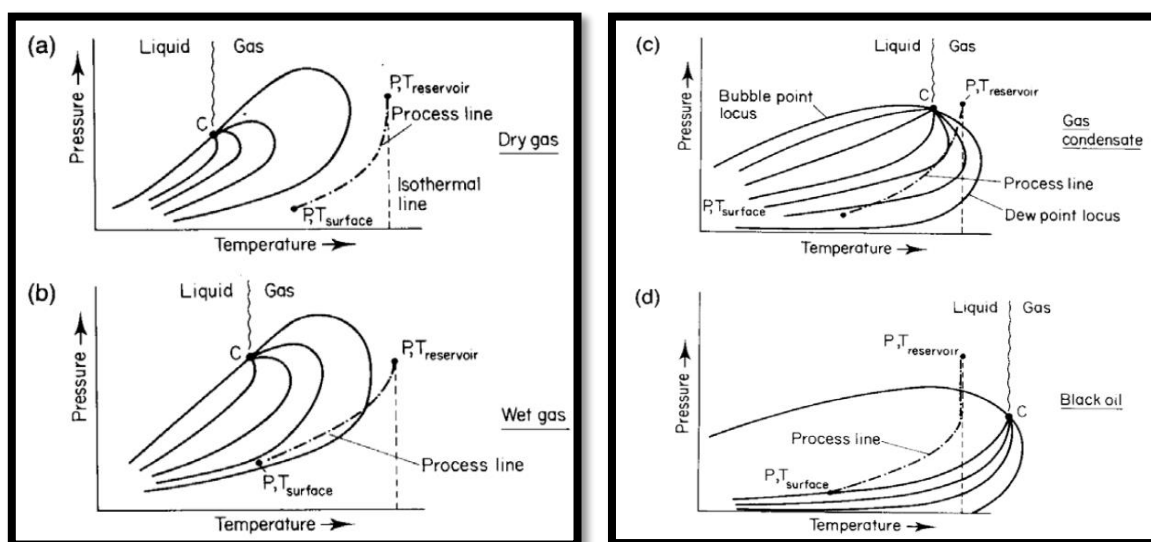
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4(a), η θερμοκρασία σε έναν ταμειυτήρα ξηρού αερίου είναι υψηλότερη της θερμοκρασίας cricondentherm (τη μέγιστη δηλαδή θερμοκρασία της περιοχής των δύο φάσεων). Κατά συνέπεια, ελάττωση της πίεσης δεν θα οδηγήσει στο σχηματισμό υγρής φάσης στον ταμειυτήρα. Το γεγονός αυτό, όμως, δεν αποκλείει την ανάκτηση κάποιας ποσότητας συμπυκνωμάτων φυσικού αερίου ως αποτέλεσμα της πτώσης της θερμοκρασίας σε σωληνώσεις μεταφοράς ή σε άλλα στάδια της επεξεργασίας του. Υπάρχουν πολύ λίγες περιπτώσεις φυσικών αερίων που δεν συμπυκνώνονται σε κανένα στάδιο της διαδικασίας παραγωγής. Κατά συνέπεια το διάγραμμα του Σχήματος 2.4(b) είναι πιο ρεαλιστικό.

- **Συστήματα Αερίων-Συμπυκνωμάτων (Gas-Condensates)**

Σε συστήματα αυτού του είδους, και λόγω της θέσης του κρίσιμου σημείου, η θερμοκρασία του ταμειυτήρα βρίσκεται μεταξύ της θερμοκρασίας cricondentherm και της κρίσιμης θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4(c). Κάτω από αυτές τις συνθήκες το σύστημα εμφανίζει το φαινόμενο της ισόθερμης παλινδρομικής συμπύκνωσης (retrograde condensation). Σε πιέσεις πάνω από την πίεση cricondenbar, το σύστημα βρίσκεται σε μια ακαθόριστη αέρια φάση. Κατά την ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση, το διάγραμμα φάσεων συναντάται στην περιοχή των σημείων δρόσου και περαιτέρω ελάττωση της πίεσης έχει ως αποτέλεσμα τον συνεχώς αυξανόμενο σχηματισμό υγρής φάσης λόγω συμπύκνωσης. Αν υπήρχε η δυνατότητα ελάττωσης της πίεσης μέχρι κάποια αρκετά χαμηλή τιμή, η υγρή φάση θα επανεξατμιζόταν. Πρακτικά όμως αυτό δεν είναι πάντα πραγματοποιήσιμο σε συστήματα ταμειυτήρων. Το φαινόμενο αυτό είναι ακριβώς το φαινόμενο της ισόθερμης παλινδρομικής συμπύκνωσης. Το ανάλογο φαινόμενο της ισοβαρούς παλινδρομικής συμπύκνωσης, αν και πραγματοποιήσιμο, δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον στην περίπτωση της μηχανικής ταμειυτήρων καθώς, όπως αναφέρθηκε, επικρατούν ουσιαστικά ισοθερμοκρασιακές συνθήκες. Σε τέτοια συστήματα, η υγρή

2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

φάση (συμπύκνωμα) που ανακτάται στην επιφάνεια προέρχεται από ρευστό που σε συνθήκες ταμειυτήρα βρίσκεται στην αέρια φάση. Αυτό ισχύει επίσης και για συστήματα πτητικού πετρελαίου (volatile oil), όπου η αέρια φάση σε ισορροπία με την υγρή φάση στον ταμειυτήρα είναι πλούσια σε συμπυκνώσιμα συστατικά (C3 έως C7+). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα μεγάλο ποσοστό του αργού πετρελαίου που προκύπτει στην επιφάνεια να προέρχεται από την αέρια φάση του ταμειυτήρα. Αντίθετα, σε συστήματα πετρελαίου, η σύσταση του αερίου το οποίο πρωτογενώς υπάρχει στον ταμειυτήρα ή δευτερογενώς προκύπτει από τη μείωση της πίεσης είναι πτωχή σε συμπυκνώσιμα συστατικά, επομένως, η παραγωγή πετρελαίου στην επιφάνεια εξαρτάται σε πολύ μικρό βαθμό από την αέρια φάση.



Σχήμα 2.4. Διαγράμματα φάσεων μιγμάτων υδρογονανθράκων: (a) Ξηρό αέριο, (b) Αέριο εμπλουτισμένο με ενδιάμεσους υδρ/κες, (c) Συμπυκνώσιμο αέριο, (d) Μαύρο πετρέλαιο (Σταματάκη, 2004).

• Συστήματα Πετρελαίου και Ελεύθερου Αερίου

Τα συστήματα αυτά σε συνθήκες ταμειυτήρα βρίσκονται μέσα στη διφασική περιοχή. Κατά συνέπεια, ένα ουσιαστικό μέρος των υγρών που παράγονται στην επιφάνεια προέρχεται από την ατμώδη φάση του ταμειυτήρα

• Συστήματα Πετρελαίου (Black Oil)

Στην περίπτωση τέτοιων συστημάτων, η θερμοκρασία ταμειυτήρα είναι πολύ χαμηλότερη από την κρίσιμη θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.4(d). Ισόθερμη εκτόνωση της υγρής φάσης οδηγεί στο σχηματισμό αερίου στο σημείο φυσαλλίδας, ενώ περαιτέρω μείωση της πίεσης οδηγεί στο σχηματισμό συνεχώς

2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

αυξανόμενων ποσοτήτων αερίου. Με την αλλαγή συνθηκών στον ταμιευτήρα λόγω παραγωγής, η σύσταση του αερίου μεταβάλλεται ελάχιστα. Η σύσταση του αερίου μεταβάλλεται σημαντικά μόνο στις standard συνθήκες. Το αέριο είναι φτωχό σε συμπυκνώσιμα συστατικά και συνεισφέρει ελάχιστα στην ποσότητα υγρού που ανακτάται τελικά στην επιφάνεια (Σταματάκη, 2004).

Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει την τυπική σύσταση διαφόρων ειδών ρευστών υδρογονανθράκων.

Πίνακας 2.1 Τυπική σύσταση διάφορων πετρελαϊκών ρευστών.

Συστατικό, mole %	Ξηρό Αέριο	Αέριο Συμπύκνωμα	Πτητικό Πετρέλαιο	Μαύρο Πετρέλαιο	Υγρό Αέριο
CO₂	0.1	2.370.29	1.82	0.02	1.41
N₂	2.07	0.31	0.24	0.34	0.25
C1	86.12	73.19	57.60	34.62	92.46
C2	5.91	7.80	7.35	4.11	3.18
C3	3.58	3.55	4.21	1.01	1.01
iC4	1.72	0.71	0.74	0.76	0.28
nC4		1.45	2.07	0.49	0.24
iC5		0.64	0.53	0.43	0.12
nC5	0.5	0.68	0.95	0.21	0.08
C6		1.09	1.92	1.16	0.14
C7+		8.21	22.57	56.40	0.82
GOR (scf/STB)		5695	1465	320	69000
OGR (STB/MMscf)	0	165	680	3125	15
γ_{API}		48.5	36,7	23,6	65
M_{7+}		184	240	274	132
γ_{7+}		0,816	0,864	0,920	0,750

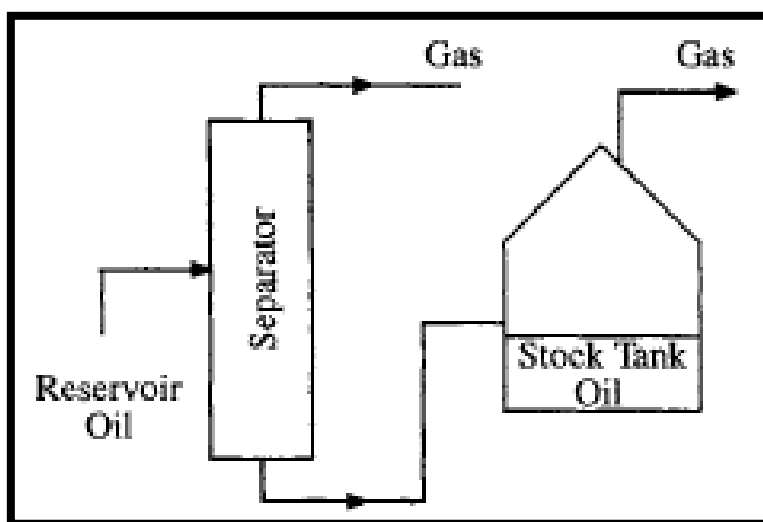
Τα πετρελαϊκά ρευστά κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με διάφορα κριτήρια. Παρόλο που η ταυτοποίηση ενός ρευστού σαν αέριο ή σαν πετρέλαιο είναι επαρκής στην πλειοψηφία των ερευνών που σχετίζονται με τις φάσεις των ρευστών, είναι πολύ

2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΤΟΥ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ

κοινή η κατηγοριοποίηση του ρευστού σύμφωνα με την ογκομετρική του συμπεριφορά στις εκάστοτε συνθήκες του ταμιευτήρα ή σε συνθήκες επιφάνειας.

Ο τύπος και η θερμοδυναμική συμπεριφορά του ρευστού ταυτοποιείται μέσω εργαστηριακής μελέτης. Επίσης, οι πληροφορίες που προκύπτουν κατά την παραγωγική φάση συνεκτιμώνται για την αξιολόγηση της κατάστασης που επικρατεί στον ταμιευτήρα και την εκτίμηση των φαινομένων σε συνάρτηση με τη μεταβολή της πίεσης.

Τα πετρελαϊκά ρευστά παράγονται, διαχωρίζονται και στη συνέχεια οι όγκοι τους μετρώνται σε συνθήκες επιφάνειας σαν stock tank (βαρέλι) πετρέλαιο (stb) και standard κυβικά μέτρα ή κυβικά πόδια αέριο σε πρότυπες συνθήκες (Θερμοκρασία 60°F (15°C) και Πίεση 1atm (14.7 psia)), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5. Οι ογκομετρικές παράμετροι καθορίζουν τη σχέση όγκων σε συνθήκες ταμιευτήρα και συνθήκες επιφάνειας. Ο λόγος του διαλυμένου αερίου στο παραγόμενο πετρέλαιο (R_s) θεωρείται ο πιο σημαντικός δείκτης για τον τύπο του ρευστού (βλέπε Ενότητα 3.1). Πρόκειται για τον όγκο του αερίου (scf) που θα διαλυθεί σε ένα stb παραγόμενου πετρελαίου όταν αυτά μεταφερθούν στις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας του ταμιευτήρα. Μια επιπλέον παράμετρος είναι η πυκνότητα του διαχωριζόμενου στην επιφάνεια πετρελαίου η οποία διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με το είδος του ρευστού. Τέλος, το χρώμα του ρευστού είναι επίσης ικανό να δείξει τον τύπο του καθώς υπάρχουν συγκεκριμένα χρωματικά όρια που απαντώνται σε κάθε τύπο.



Σχήμα 2.5 Παραγωγή ρευστών υδρογονανθράκων (Danesh, 1998).

2.4 Βασικές ιδιότητες πετρελαϊκών ρευστών

Οι φυσικές ιδιότητες μπορεί να είναι είτε εντατικές, είτε εκτατικές. Εντατικές είναι οι ιδιότητες οι οποίες είναι ανεξάρτητες από την ποσότητα του υλικού στο οποίο αναφέρονται. Η πυκνότητα, ο ειδικός όγκος και η συμπιεστικότητα αποτελούν κάποιες από αυτές. Ιδιότητες όπως ο όγκος και η μάζα είναι εκτατικές, εξαρτώνται δηλαδή από την συνολική ποσότητα του υλικού (McCain, 1990).

Θερμοκρασία (T) είναι η ιδιότητα που μετρά την μέση κινητική ενέργεια των μορίων ενός υλικού. Καθώς προστίθεται θερμότητα σε ένα υλικό, η κινητική ενέργεια των μορίων του αυξάνεται και σαν αποτέλεσμα αυξάνεται και η θερμοκρασία. Στην πετρελαϊκή βιομηχανία συνηθίζεται η θερμοκρασία να αφορά εκείνη του ταμιευτήρα η οποία κατά το στάδιο της παραγωγής θεωρείται σταθερή. Η μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιείται είναι το Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$).

Η **πίεση (P)** αντανακλά το πόσες φορές τα μόρια ενός αερίου «χτυπούν» στο δοχείο που το περιέχει. Σε περίπτωση που τα μόρια εξαναγκάζονται να μειώσουν τη μεταξύ τους απόσταση, η πίεση αυξάνεται. Στην πετρελαϊκή βιομηχανία ως μονάδα μέτρησης της πίεσης χρησιμοποιείται το *psi* ή το *psia* (ισχύει $psia = psi + 14.7$).

Το φυσικό μέγεθος **πυκνότητα** αποτελεί το βασικό χαρακτηριστικό της ύλης που εκφράζει τη μάζα του υλικού που περιέχεται σε μία μονάδα όγκου. Η πυκνότητα του πετρελαίου εκφράζεται συνήθως σε όρους ειδικής ή σχετικής πυκνότητας (Specific Gravity - SG) ως προς το νερό στους 60 $^{\circ}\text{F}$. Συγκεκριμένα:

$$SG_{60} = \frac{\rho_{oil(60F)}}{\rho_{water(60F)}} \quad (2.3)$$

Η πυκνότητα του νερού στους 60 $^{\circ}\text{F}$ είναι 62.37 lb/cf (999.1 kg/m³).

Η πιο κοινή έκφραση για την πυκνότητα του πετρελαίου είναι σε όρους πυκνότητας **API**. Χρησιμοποιείται η αντίστροφη κλίμακα που προτάθηκε από το American Petroleum Institute που ξεκινά από τους 10 $^{\circ}$ για το νερό και αυξάνει για πτητικά πετρέλαια έως τους 60-70 $^{\circ}$. Η σχέση μεταξύ της πυκνότητας **API** και της ειδικής πυκνότητας ως προς το νερό στους 60 $^{\circ}\text{C}$ (SG_{60}) είναι η ακόλουθη:

$$API = \frac{141.5}{SG_{60}} - 131.5 \quad (2.4)$$

$$SG_{60} = \frac{141.5}{API + 131.5} \quad (2.5)$$

Η **ειδική πυκνότητα** (γ_g) ενός αερίου ορίζεται ως ο λόγος της πυκνότητας του αερίου προς την πυκνότητα του ξηρού αέρα στις ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η πυκνότητα του αέρα σε πρότυπες συνθήκες είναι 0.07634 lbs/cf. Ισχύει:

$$\gamma_g = \frac{p_g}{p_{air}} \quad (2.6)$$

Δυναμικό Ιξώδες (μ) είναι η ιδιότητα εκείνη των ρευστών που αποτελεί μέτρο της αντίστασης τους στη ροή. Το δυναμικό ιξώδες του πετρελαίου και του αερίου έχει ως μονάδα μέτρησης το centipoise (cp). Το ιξώδες του πετρελαίου στον ταμειυτήρα μπορεί να θεωρηθεί ως το ιξώδες σταθεροποιημένου πετρελαίου σε κάποια πίεση αναφοράς, διορθωμένο ως προς τη θερμοκρασία και την επίδραση του διαλυμένου αερίου (Σταματάκη, 2004). Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται εκτενέστερη ανάλυση της συγκεκριμένης ιδιότητας.

3. ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗ (PVT) ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

3.1 Βασικές ογκομετρικές (PVT) παράμετροι

Στη μελέτη ταμιευτήρων πετρελαίου, από τα απλά ισοζύγια μάζας έως τις σύνθετες προσομοιώσεις, οι ιδιότητες των ρευστών και η σχέση όγκων γηγενών και παραγόμενων ρευστών είναι πάντοτε απαραίτητες για την εκτίμηση των επί τόπου αποθεμάτων και του παραγόμενου όγκου των ρευστών στην επιφάνεια. Η γνώση των μεταβολών που υφίστανται οι ογκομετρικές (PVT) παράμετροι κατά τη διάρκεια της μεταβολής της πίεσης (δηλαδή κατά την παραγωγή) είναι αναγκαία για την αξιολόγηση της απόδοσης του ταμιευτήρα και το σχεδιασμό των έργων παραγωγής.

Η σχέση μεταξύ Πίεσης–Όγκου–Θερμοκρασίας για ένα πραγματικό αέριο δίνεται από την καταστατική εξίσωση:

$$PV = nZRT \quad (3.1)$$

όπου Z ο συντελεστής απόκλισης (deviation factor) (ή συντελεστής συμπιεστότητας –compressibility factor) που εκφράζει το βαθμό απόκλισης των αερίων από την ιδανική κατάσταση.

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω εξίσωση, ο όγκος του αερίου στην επιφάνεια συσχετίζεται με τον όγκο που το αέριο καταλαμβάνει σε συνθήκες ταμιευτήρα. Ως εκ τούτου ορίζεται ο συντελεστής εκτόνωσης του αερίου E :

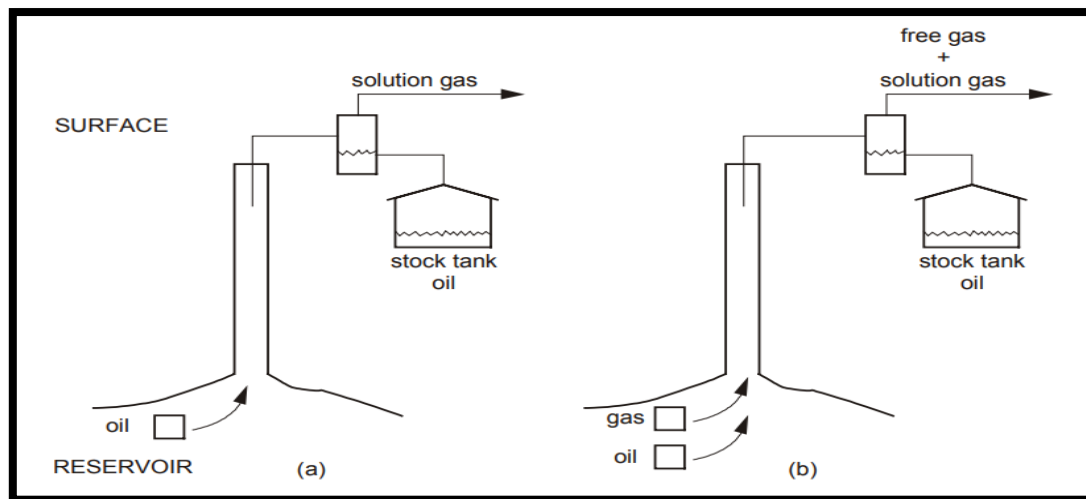
$$E = 35.37 \frac{P}{Z \cdot T} \quad (\text{scf/rcf}) \quad (3.2)$$

Οι παράμετροι P και T αντιστοιχούν στην αρχική πίεση και τη θερμοκρασία του ταμιευτήρα, είτε στις συνθήκες αυτές κάποιου ενδιαμέσου σταδίου της παραγωγής (κυρίως μεταβολή της πίεσης).

Όσο αφορά την ογκομετρική συμπεριφορά του πετρελαίου, ένας αριθμός παραμέτρων, καλούμενες και ως ογκομετρικές παράμετροι, αφού μετρηθούν στο εργαστήριο από δείγματα πετρελαίου χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν τη σχέση μεταξύ του όγκου του πετρελαίου στην επιφάνεια και του όγκου που αυτό καταλαμβάνει σε συνθήκες ταμιευτήρα (Dake, 1998).

3. ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗ (PVT) ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

Η πολυπλοκότητα της συσχέτισης του όγκου του πετρελαίου που παράγεται στην επιφάνεια με τον ισοδύναμο όγκο σε συνθήκες ταμιευτήρα, γίνεται αντιληπτή από τα Σχήματα 3.1 (α), (β):



Σχήμα 3.1 Παραγωγή ρευστών υδρογονανθράκων (α) αρχική πίεση υψηλότερη της πίεσης σημείου φυσαλίδας, (β) χαμηλότερη της πίεσης σημείου φυσαλίδας (Dake, 1998).

Για πιέσεις υψηλότερες της πίεσης του σημείου φυσαλίδας, στον ταμιευτήρα υπάρχει μόνο μια φάση, υγρό πετρέλαιο. Κατά την παραγωγή του υποκορεσμένου αυτού πετρελαίου στην επιφάνεια, μια ποσότητα αερίου διαχωρίζεται από αυτό και ο όγκος του εξαρτάται από τις συνθήκες διαχωρισμού στην επιφάνεια. Η συσχέτιση των όγκων πετρελαίου και αερίου που παράγονται στην επιφάνεια με τον όγκο που καταλάμβαναν σε συνθήκες ταμιευτήρα είναι απλή, δεδομένου ότι στον ταμιευτήρα όλο το παραγόμενο αέριο θα πρέπει να ήταν διαλυμένο στο πετρέλαιο.

Αντιθέτως, για πιέσεις χαμηλότερες του σημείου φυσαλίδας, στον ταμιευτήρα απαντώνται δύο φάσεις, κορεσμένο πετρέλαιο και ελεύθερο αέριο. Ελεύθερο ονομάζεται το αέριο που έχει ήδη διαφύγει από το πετρέλαιο. Στην παραγωγική φάση, επιπλέον αέριο απελευθερώνεται από το πετρέλαιο με αποτέλεσμα το αέριο, που παράγεται στην επιφάνεια, να αποτελείται από δύο μέρη:

- Αέριο που βρισκόταν ελεύθερο στον ταμιευτήρα
- Αέριο που απελευθερώθηκε από το πετρέλαιο κατά τη διάρκεια της παραγωγής

Τα δύο αυτά μέρη αερίου δεν δύνανται να διακριθούν στην επιφάνεια. Ως εκ τούτου είναι αδύνατος ο προσδιορισμός των ποσοτήτων ελεύθερου και διαλυμένου αερίου στον ταμιευτήρα.

Οι παρακάτω βασικές ογκομετρικές παράμετροι χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της συσχέτισης του όγκου των παραγόμενων στην επιφάνεια ρευστών με τον όγκο που απολαμβάνεται από τον ταμιευτήρα:

- ***Rs***: Λόγος διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο (Solution Gas-Oil Ratio): Είναι ο όγκος του αερίου (scf) που θα διαλυθεί σε ένα STB (Stock Tank Barrel) πετρελαίου όταν αυτά μεταφερθούν στις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας του ταμιευτήρα. Μετράται σε scf/STB.
- ***Bo***: Συντελεστής μεταβολής όγκου του πετρελαίου (Oil Formation Volume Factor): Είναι ο όγκος σε βαρέλια (reservoir barrels-rb) που καταλαμβάνει μέσα στον ταμιευτήρα ένα stb πετρελαίου μαζί με το αέριο που είναι διαλυμένο σε αυτό. Μετράται σε rb/STB.
- ***Bg***: Συντελεστής μεταβολής όγκου του αερίου (Gas Formation Volume Factor): Είναι ο όγκος σε βαρέλια (rb) που ένα scf αερίου καταλαμβάνει σαν ελεύθερο αέριο μέσα στον ταμιευτήρα. Μετράται σε rb/scf.

Και οι τρεις αυτές παράμετροι είναι συναρτήσεις της πίεσης, δεδομένου ότι η θερμοκρασία του ταμιευτήρα θεωρείται πρακτικά σταθερή (δεν ισχύει απόλυτα αυτό) κατά τη διάρκεια της παραγωγής (Dake, 1998), (Σταματάκη, 2004).

3.2 Πειραματικές μετρήσεις PVT

Τα ακριβή και αξιόπιστα δεδομένα για την ισορροπία φάσεων και την ογκομετρική συμπεριφορά ενός ταμιευτήρα πετρελαίου είναι απαραίτητα στοιχεία για τον κατάλληλο χειρισμό του. Οι πληροφορίες αυτές απαιτούνται στην εκτίμηση των αποθεμάτων, στο σχεδιασμό του καλύτερου σχεδίου ανάπτυξης καθώς επίσης και στον καθορισμό της ποσότητας και της ποιότητας των παραγόμενων ρευστών. Οι περισσότεροι ταμιευτήρες παράγουν με τη μέθοδο της φυσικής εξάντλησης, κατά την οποία η πίεση τους μειώνεται σταδιακά με την απόληψη των ρευστών. Η θερμοκρασία στον ταμιευτήρα παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητη. Για αυτό το λόγο, η πίεση του ταμιευτήρα αποτελεί τη βασική παράμετρο που καθορίζει τη συμπεριφορά των ρευστών, σε συνθήκες ταμιευτήρα, κατά τη διάρκεια της παραγωγής. Ως εκ τούτου, πραγματοποιούνται σειρά πειραματικών μετρήσεων οι οποίες προσομοιώνουν τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στον ταμιευτήρα και προσδιορίζουν τις μεταβολές που προκύπτουν στις φάσεις των εμπειριεχόμενων ρευστών καθώς και στις θερμοφυσικές ιδιότητες αυτών. Οι μετρήσεις αυτές

3. ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗ (PVT) ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

ονομάζονται μετρήσεις PVT (Pressure-Volume-Temperature) καθώς δίνουν έμφαση στα ογκομετρικά δεδομένα υπό μεταβαλλόμενη πίεση και θερμοκρασία πειραματικών μετρήσεων τα οποία χρησιμοποιούνται για δείγματα υδρογονανθράκων:

Οι PVT πειραματικές διαδικασίες είναι οι ακόλουθες:

- Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση υπό σταθερή πίεση (constant mass expansion)
- Διαφορική εκτόνωση (differential liberation)
- Διαχωρισμός στην επιφάνεια (separator test)
- Εκτόπιση υπό σταθερό όγκο (constant volume depletion)

Πέραν αυτών οι οποίες θεωρούνται ως οι κλασικές, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν και ειδικότερα πειράματα τα οποία παρέχουν στοιχεία και δεδομένα για την εφαρμογή νέων σχεδίων παραγωγής για την επαύξηση της απόληψης του πετρελαίου, όπως για παράδειγμα η εισπίεση αερίου, ή πολυμερών κλπ.

3.3 Δειγματοληψία ρευστών

Η απόκτηση ενός αντιπροσωπευτικού δείγματος από το ρευστό του ταμιευτήρα κρίνεται απαραίτητη για την εργαστηριακή μελέτη. Για την εξασφάλιση αυτού του δείγματος απαιτείται προσοχή τόσο στις συνθήκες που επικρατούν στην γεώτρηση όσο και στην τεχνική που θα εφαρμοσθεί για τη λήψη του.

Τα δείγματα μπορούν να αποκτηθούν με δύο τρόπους. Στην πρώτη περίπτωση η γεώτρηση είναι κλειστή και το δείγμα λαμβάνεται από τον πυθμένα της. Αυτό το δείγμα ονομάζεται **bottom-hole sample**.

Στην δεύτερη περίπτωση, αφού ελέγχεται προσεκτικά η παραγωγή, λαμβάνονται δείγματα αερίου και πετρελαίου από το διαχωριστή. Αυτά ονομάζονται **separator samples**. Στη συνέχεια ακολουθεί η επανασύνθεση του αερίου και του πετρελαίου έτσι ώστε να αποκτηθεί ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα του πετρελαϊκού ρευστού (McCain, 1990).

Το πρόβλημα που παρουσιάζεται, ανεξάρτητα από την τεχνική που θα χρησιμοποιηθεί, είναι το κατά πόσον η αναλογία αερίου-πετρελαίου στο δείγμα αντιστοιχεί στην πραγματική τους αναλογία στον ταμιευτήρα.

Κατά την πρώτη μέθοδο, ένα δείγμα είναι αντιπροσωπευτικό αν η δειγματοληψία γίνει όταν η πίεση ροής στον πυθμένα της γεώτρησης είναι υψηλότερη από την πίεση σημείου φυσαλίδας. Επίσης, ένα δείγμα θεωρείται αντιπροσωπευτικό αν δεν υπάρχουν διαρροές κατά τη δειγματοληψία ή κατά τη μεταφορά του από το δοχείο δειγματοληψίας στην πειραματική διάταξη. Ως εκ τούτου, είναι αναγκαίο να λαμβάνονται πολλαπλά δείγματα, να αξιολογούνται και στη συνέχεια να επιλέγεται το καλύτερο.

Η μέθοδος της επανασύνθεσης αερίου και πετρελαίου είναι λιγότερο ακριβής από την προηγούμενη (bottom-hole samples). Εντούτοις, ο ισχυρισμός αυτός δεν ισχύει πάντα στην περίπτωση των αερίων συμπυκνωμάτων. Το βασικό πρόβλημα κατά τη λήψη δειγμάτων αερίου και υγρού από τον διαχωριστή είναι η εκτίμηση της αναλογίας με την οποία θα πρέπει να ανασυνδυαστούν για να προκύψει ρευστό με σύσταση όμοια με αυτό του ταμιευτήρα. Η επανασύνθεση θεωρείται έγκυρη στην περίπτωση που η γεώτρηση παράγει με σταθεροποιημένη ροή, η πίεση στον πυθμένα είναι υψηλότερη της πίεσης σημείου φυσαλίδας και ο λόγος αερίου-πετρελαίου στον διαχωριστή είναι σταθερός για διάστημα αρκετών ωρών πριν από τη λήψη του δείγματος. Δεδομένου ότι ο λόγος αερίου-πετρελαίου που μετράται είναι συνήθως λανθασμένος και σε ορισμένες περιπτώσεις παρουσιάζει διακυμάνσεις πριν τη δειγματοληψία, η μέθοδος της επανασύνθεσης είναι αμφισβητούμενης εγκυρότητας (Σταματάκη, 2004).

3.4 Ανάλυση PVT

Η ανάλυση PVT εμπεριέχει μια βασική και αναπόφευκτη ασυνέπεια. Οι μεταβολές στην πίεση, τη θερμοκρασία και τη σύσταση που υφίσταται ένα διφασικό μίγμα κατά τη ροή του από τον ταμιευτήρα έως στην επιφάνεια σε κανονικές συνθήκες είναι ουσιαστικά άγνωστες. Επομένως, η διαδικασία αυτή δεν δύναται να ακολουθηθεί ούτε και να αναπαραχθεί στο εργαστήριο. Εξαίρεση αποτελεί η διεργασία της εκτόνωσης υπό σταθερή σύσταση (constant mass expansion ή flash expansion) και της διαφορικής εκτόνωσης (differential liberation).

Η παραπάνω ασυνέπεια δεν επηρεάζει σημαντικά τα συστήματα που περιέχουν διαλυμένο αέριο. Σε αυτή την περίπτωση, οι υπολογισμοί των ιδιοτήτων του συστήματος υπόκεινται μόνο στη συνήθη αβεβαιότητα των πειραματικών μετρήσεων. Για τα πτητικά πετρέλαια ή αέρια-συμπυκνώματα είναι αναγκαία η

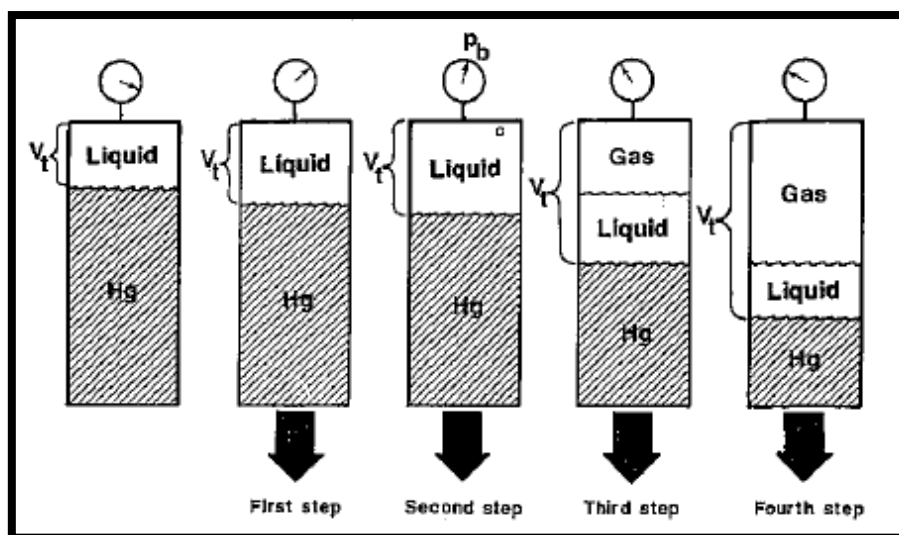
προσομοίωση των διεργασιών των πειραμάτων, για να διαπιστωθεί η θερμοδυναμική συνέπεια των αποτελεσμάτων (Σταματάκη, 2004).

3.5 Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση υπό σταθερή σύσταση (Constant Mass Expansion CME ή Flash Expansion)

Τα πειράματα ισοθερμοκρασιακής εκτόνωσης υπό σταθερή πίεση λαμβάνουν χώρα σε δείγματα αέριων συμπυκνωμάτων και μαύρου πετρελαίου ώστε να προσεγγίσουν την σχέση πίεσης–όγκου σε αυτά τα συστήματα υδρογονανθράκων. Η μέτρηση πραγματοποιείται για τον υπολογισμό των παραμέτρων που ακολουθούν (Ahmed, 2000):

- Πίεση κορεσμού (σημείο φυσαλίδας ή σημείο δρόσου)
- Συμπιεστότητα
- Συντελεστής συμπιεστότητας αέριας φάσης
- Συνολικός όγκος υδρογονανθράκων

Αντιπροσωπευτικό δείγμα του ρευστού από τον ταμιευτήρα τοποθετείται σε ένα πειραματικό κελί υψηλών πιέσεων. Η πίεση προσαρμόζεται σε μία τιμή ίση ή υψηλότερη από την αρχική πίεση του ταμιευτήρα ενώ η θερμοκρασία ταυτίζεται με τη θερμοκρασία του ταμιευτήρα. Η πίεση μειώνεται σταδιακά με την εκτόνωση του ρευστού. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται στο Σχήμα 3.2 που ακολουθεί:



Σχήμα 3.2 Διαδικασία εργαστηριακής μέτρησης ισοθερμοκρασιακής εκτόνωσης υπό σταθερή σύσταση (Constant Mass Expansion) (McCain, 1990).

3. ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗ (PVT) ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

Το πειραματικό κελί αναδεύεται συχνά για να εξασφαλιστεί ότι το περιεχόμενο του βρίσκεται σε ισορροπία. Δεν αφαιρείται από το κελί αέριο ή υγρό κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας επομένως η σύσταση του ρευστού παραμένει σταθερή (McCain, 1990).

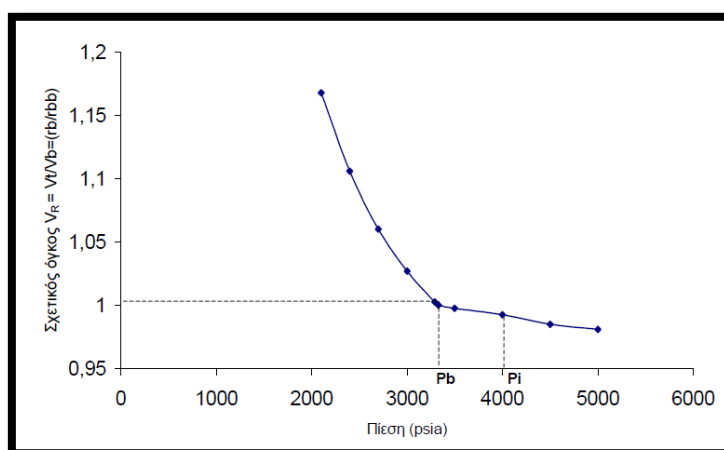
Σε κάθε βήμα μείωσης της πίεσης καταγράφεται ο όγκος που καταλαμβάνει το ρευστό στο πειραματικό κελί. Όταν η πίεση του κελιού γίνει ίση με την πίεση σημείου φυσαλίδας, αέριο ελευθερώνεται από το υγρό και παρατηρείται σημαντική αύξηση της συμπιεστότητας του συστήματος. Από το σημείο αυτό και μετά, μικρές μεταβολές πίεσης έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλες μεταβολές όγκου του συστήματος. Το πείραμα συνεχίζεται έως ότου το ρευστό που εκτονώνεται να καταλάβει όλο τον όγκο του πειραματικού κελιού.

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής μέτρησης, ο όγκος του κορεσμένου πετρελαίου στο σημείο φυσαλίδας (V_b) αποτελεί τη βασική μονάδα όγκου αναφοράς. Συνήθως τα δεδομένα απεικονίζονται με χρήση του σχετικού όγκου V_R που ορίζεται ως:

$$V_R = \frac{V_t}{V_b} \quad (3.3)$$

όπου V_t = ο όγκος του ρευστού σε μια οποιαδήποτε πίεση.

Ο όγκος στην αρχική πίεση P_i συμβολίζεται με V_{Ri} . Το διάγραμμα όγκου-πίεσης χρησιμοποιείται για την εύρεση της πίεσης σημείου φυσαλίδας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3:



Σχήμα 3.3 Διάγραμμα αποτελεσμάτων από την ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση (Σταματάκη, 2004).

Από το διάγραμμα αυτό είναι δυνατό να υπολογιστεί η συμπιεστότητα της υγρής φάσης σε πιέσεις υψηλότερες του σημείου φυσαλίδας και σε θερμοκρασία ταμιευτήρα, από την παρακάτω σχέση:

$$C_o = \frac{1-V_{Ri}}{V_{Ri} \cdot \Delta P} \quad (3.4)$$

όπου V_{Ri} : ο όγκος στην αρχική πίεση P_i

3.6 Διαφορική εκτόνωση (Differential Liberation)

Κατά τη διεργασία της διαφορικής εκτόνωσης, το σύστημα εκτονώνεται σταδιακά ξεκινώντας από πίεση μεγαλύτερη ή ίση της πίεσης σημείου φυσαλίδας ενώ η θερμοκρασία αντιστοιχεί στην θερμοκρασία του ταμιευτήρα. Το αέριο που ελευθερώνεται σε κάθε στάδιο απομακρύνεται από το πειραματικό κελί υπό σταθερή πίεση και εκτονώνεται σε πρότυπες συνθήκες όπου μετράται ο όγκος του.

Τα πειραματικά δεδομένα που αποκτώνται από την συγκεκριμένη μέτρηση είναι τα εξής:

- Ποσότητα αερίου που είναι διαλυμένο στο πετρέλαιο
- Μεταβολή του όγκου του πετρελαίου συναρτήσει της πίεσης
- Σύσταση του αερίου που απελευθερώνεται, συντελεστής συμπιεστότητας του αερίου και ειδική πυκνότητα του αερίου
- Πυκνότητα του υπολειπόμενου πετρελαίου συναρτήσει της πίεσης

Γενικά, θεωρείται ότι η διαφορική εκτόνωση περιγράφει ικανοποιητικά τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στον ταμιευτήρα με τη σταδιακή μείωση της πίεσής του και την ισορροπία φάσεων εντός αυτού. Η μέτρηση διεξάγεται σε δείγματα πετρελαίου. Περιλαμβάνει την τοποθέτηση του υγρού δείγματος σε ένα πειραματικό κελί στο οποίο η πίεση είναι ίση με την πίεση στο σημείο φυσαλίδας και η θερμοκρασία είναι ίση με τη θερμοκρασία του ταμιευτήρα. Πιο αναλυτικά, κατά τη διάρκεια της μέτρησης, η πίεση μειώνεται σταδιακά. Το αέριο που απελευθερώνεται αφαιρείται από το κελί και μετράται ο όγκος του σε πρότυπες συνθήκες. Ο όγκος του υπολειπόμενου πετρελαίου (V_L) μετράται σε κάθε στάδιο μείωσης της πίεσης. Η σύσταση του υπολειπόμενου αερίου υφίσταται διαρκώς μεταβολές καθώς γίνεται σταδιακά βαρύτερο ως προς τα συστατικά του.

Η παραπάνω διαδικασία συνεχίζεται σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης όπου ο όγκος του υπολειπόμενου πετρελαίου μετράται και μετατρέπεται στον όγκο που αντιστοιχεί στους 60 °F (V_{sc}) (Ahmed, 2000).

3.7 Πείραμα διαχωρισμού (Separation Test)

Σε ένα πείραμα διαχωρισμού, πραγματοποιείται η εκτόνωση του ρευστού που περιέχει ο ταμιευτήρας από την πίεση σημείου φυσαλίδας έως τις πρότυπες συνθήκες. Η εκτόνωση γίνεται σταδιακά και κάθε ενδιάμεσο στάδιο αντιστοιχεί σε πιθανές συνθήκες λειτουργίας ενός διαχωριστή ή σειράς διαχωριστών.

Ο συντελεστής συρρίκνωσης c_{bf} , είναι ο όγκος του σταθεροποιημένου πετρελαίου που προκύπτει από κάθε διαχωρισμό (υπό διαφορετικές συνθήκες πίεσης ή και θερμοκρασίας) προς τον όγκο του πετρελαίου στο σημείο φυσαλίδας (stb/rbb), όπως υποδηλώνεται από τον δείκτη b . Η παράμετρος Rsi_f είναι ο αρχικός λόγος διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο για τις αντίστοιχες συνθήκες διαχωρισμού (scf/stb). Ο δείκτης f εκφράζει ότι ο διαχωρισμός πραγματοποιείται με απλή εκτόνωση (flash). Όλα τα πειράματα διαχωρισμού, ανεξάρτητα από τον αριθμό των σταδίων που περιλαμβάνουν, περιγράφονται ως απλές εκτονώσεις, παρόλο που ο διαχωρισμός σε στάδια ομοιάζει περισσότερο με διαφορική εκτόνωση.

Με την χρήση ενός πειράματος διαχωρισμού είναι δυνατός ο προσδιορισμός των βέλτιστων (optimum) συνθηκών διαχωρισμού. Προφανώς πρόκειται για τις συνθήκες εκείνες που επιτυγχάνουν τη μέγιστη απόληψη υγρού (πετρελαίου) στην επιφάνεια (μεγιστοποίηση του c_{bf} , ελαχιστοποίηση του Rsi_f) (Σταματάκη, 2004).

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι τα πειραματικά δεδομένα των ως άνω εργαστηριακών διεργασιών και κυρίως της διαφορικής εκτόνωσης, χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον προσδιορισμό των ογκομετρικών παραμέτρων B_o , R_s και B_g , καθώς και των θερμοφυσικών ιδιοτήτων των ρευστών σε μεταβαλλόμενες συνθήκες πίεσης ή και θερμοκρασίας.

3.8 Εμπειρικές συσχετίσεις για συστήματα πετρελαίου

Όπως αναφέρεται παραπάνω, οι πειραματικές αναλύσεις PVT αποτελούν την πιο χρήσιμη και αξιόπιστη μέθοδο στην πετρελαϊκή βιομηχανία για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων, της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς και των ογκομετρικών παραμέτρων του ρευστού που εμπεριέχει ο ταμιευτήρας. Τα πειράματα αυτά είναι

ένα εξαιρετικό εργαλείο για το Μηχανικό Πετρελαίου. Παρ' όλα αυτά, το κόστος τους είναι αρκετά υψηλό. Ακόμη και στην περίπτωση που υπάρχουν διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις διαφόρων ιδιοτήτων από αναλύσεις PVT, αυτές συνήθως έχουν πραγματοποιηθεί σε ισόθερμες συνθήκες και συνήθως στην ισόθερμη που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του ταμιευτήρα. Το γεγονός αυτό δεν δίνει την εικόνα της συμπεριφοράς της κάθε ιδιότητας σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας.

Ως εκ τούτου, πολλοί ερευνητές κατέφυγαν στην δημιουργία συσχετίσεων για την εκτίμηση διαφόρων ιδιοτήτων των πετρελαϊκών ρευστών σε περιπτώσεις απουσίας πειραματικών δεδομένων αλλά και καλύτερης αποτύπωσης των ιδιοτήτων αυτών σε σχέση με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η ακρίβεια των εμπειρικών συσχετίσεων είναι συχνά περιορισμένη λόγω της ποικίλης και πολυσυστατικής σύστασης των πετρελαϊκών ρευστών καθώς και της αδυναμίας περιγραφής αυτών με απλές παραμέτρους όπως πυκνότητα αερίου, πετρελαίου ή λόγου διαλελυμένου αερίου προς πετρέλαιο, οι οποίες επηρεάζονται από τη διαδικασία διαχωρισμού αερίου και πετρελαίου.

Η ανάπτυξη συσχετίσεων για την πρόβλεψη ιδιοτήτων των ρευστών του ταμιευτήρα είναι και θα συνεχίσει να είναι ένας πολύ ενδιαφέρον ερευνητικός τομέας. Οι πιο συνηθισμένες ιδιότητες-παραμέτροι που εκτιμώνται από συσχετίσεις είναι το σημείο φυσαλίδας, η διαλυτότητα του αερίου, οι συντελεστές μεταβολής του όγκου του πετρελαίου και του αερίου (B_o, B_g), η πυκνότητα, η συμπιεστότητα καθώς επίσης και το ιξώδες. Η αξιοπιστία τους εξαρτάται από το εύρος των δεδομένων βάσει των οποίων έχουν αναπτυχθεί (Hemmati-Sarapardeh, et al., 2014).

Οι συσχετίσεις διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία, και η πλέον κοινή, περιλαμβάνει τις συσχετίσεις εκείνες που θεωρούν ότι το ρευστό του ταμιευτήρα αντιστοιχεί σε τρία βασικά μέρη (πετρέλαιο, αέριο και νερό) και κυρίως βασίζονται στα βασικά δεδομένα του πεδίου, όπως θερμοκρασία ταμιευτήρα, σημείο κορεσμού, πυκνότητα API, και λόγος διαλελυμένου αερίου προς πετρέλαιο. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις συσχετίσεις εκείνες οι οποίες χρησιμοποιούν την πλήρη σύσταση του πετρελαϊκού ρευστού ώστε να εκτιμηθούν οι ιδιότητες του. Η αξιοπιστία αυτών των σχέσεων εξαρτάται άμεσα από τα χαρακτηριστικά του πετρελαϊκού μίγματος. Αν το μίγμα ανήκει σε μια από τις τυπικές κατηγορίες (π.χ.

3. ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗ (PVT) ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

Black oil) και τα χαρακτηριστικά του είναι μέσα στο εύρος των τιμών των χαρακτηριστικών των μιγμάτων της βάσης δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της συσχέτισης, τότε αναμένεται ικανοποιητική ακρίβεια στις εκτιμώμενες τιμές.

Στη βιβλιογραφία έχει καταγραφεί μεγάλος αριθμός συσχετίσεων. Λόγω της περιορισμένης ακρίβειας που παρουσιάζουν υπάρχει μία τάση συγκέντρωσης δεδομένων πετρελαϊκών ρευστών ανά τις διάφορες περιοχές/ χώρες όπου πιθανά τα χαρακτηριστικά τους να είναι παρόμοια για την ανάπτυξη ή τροποποίηση υπάρχοντων συσχετίσεων ώστε να αποδώσουν κατά το βέλτιστο τρόπο τις ιδιότητες των ρευστών αυτών. Επίσης καταγράφεται μία τάση ανάπτυξης και συσχετίσεων με χρήση του γενετικού προγραμματισμού. Το αποτέλεσμα μιας τέτοιας διεργασίας είναι υπολογιστικά προγράμματα τα οποία έχουν εξαιρετικές αποδόσεις σε προκαθορισμένα καθήκοντα (Abedini, et al., 2012) (Aboali, et al., 2014).

Τέλος αναφέρεται ότι ενώ καταγράφεται ένα μεγάλος αριθμός συσχετίσεων και παρά το γεγονός ότι ορισμένες έχουν αναγνωρισθεί περισσότερο από άλλες (δηλαδή αναφέρονται εκτενώς στη βιβλιογραφία), δεν υπάρχει μια ενιαία βάση σύμφωνα με την οποία να αξιολογούνται οι καλύτερες και ακριβέστερες συσχετίσεις.

4. ΙΞΩΔΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

4.1 Ορισμός ιξώδους

Η λέξη ιξώδες προέρχεται από τη λέξη ιξός (τη γνωστή κολλώδη ουσία που περιβάλλει κάποιους καρπούς) και σημαίνει το κολλώδες. Το δυναμικό ιξώδες (dynamic viscosity) το οποίο κυρίως μας ενδιαφέρει στην πετρελαϊκή βιομηχανία, είναι ίσως η πιο χαρακτηριστική ιδιότητα ρεολογικής συμπεριφοράς ενός ρευστού ή ημίρρευστου προϊόντος. Η φυσική του έννοια είναι η αντίσταση των ρευστών στη ροή. Αποτελεί, δηλαδή, το μέγεθος της εσωτερικής τριβής των μορίων των ρευστών. Το δυναμικό ιξώδες (μ) συνήθως χαρακτηρίζεται ως μέγεθος αντίστροφο του ποιοτικού μεγέθους της ρευστότητας ($\mu = 1/\rho$).

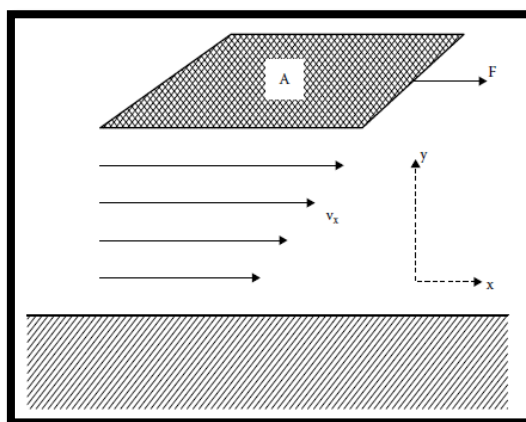
Η εξωτερική δύναμη (τάση) που εφαρμόζεται σε ένα ρευστό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, δημιουργεί την κίνηση των μορίων στο τμήμα του ρευστού που επηρεάζεται. Τα κινούμενα μόρια αλληλεπιδρούν με τα γειτονικά τους, τα οποία αρχίζουν επίσης να κινούνται, με μικρότερη ταχύτητα. Το δυναμικό ή απόλυτο ιξώδες (μ) ορίζεται ως εξής:

$$\mu = \frac{\tau_{xy}}{\frac{\partial v_x}{\partial y}} \quad (4.1)$$

όπου τ_{xy} = η ασκούμενη διατμητική τάση (F/A)

v_x = η ταχύτητα του ρευστού στον άξονα x

$\frac{\partial v_x}{\partial y}$ = ο ρυθμός διατμητικής τάσης



Σχήμα 4.1 Εξωτερική τάση που εφαρμόζεται σε ένα μέρος ρευστού. Οι όροι στο σχήμα εμπεριέχονται στον ορισμό του ιξώδους (Pedersen, et al., 2014).

4. ΙΞΩΔΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

Αν το ιξώδες είναι ανεξάρτητο της διατμητικής τάσης, το ρευστό θεωρείται Νευτωνικό. Τα ψευδοπλαστικά και διασταλτικά ρευστά εμφανίζουν μια μη γραμμική σχέση ανάμεσα στο ρυθμό διάτμησης και τη διατμητική τάση. Το ιξώδες ενός ψευδοπλαστικού ρευστού μειώνεται με την αύξηση της διατμητικής τάσης, ενώ το αντίθετο συμβαίνει σε ένα διασταλτικό ρευστό.

Η μονάδα μέτρησης του ιξώδους στο SI είναι το $N \text{ sec}/m^2$. Συνδέεται με άλλες ευρέως χρησιμοποιούμενες μονάδες ιξώδους όπως παρουσιάζεται:

$$1 N \frac{\text{sec}}{m^2} = \frac{1kg}{m \text{ sec}} = 1 Pa \text{ sec} = 1000 mPa \text{ sec} = 1000 \text{ centipoise}(cp)$$

Το κινηματικό ιξώδες είναι ο λόγος του δυναμικού ιξώδους προς την πυκνότητα. Είναι χρήσιμο σε ορισμένους υπολογισμούς και αναλύσεις. Η μονάδα του κινηματικού ιξώδους είναι το $1 cm^2/sec$ ή Stoke (Pedersen, 1984).

Οι συσχετίσεις που παρουσιάζονται στην παρούσα μελέτη για την πρόρρηση του ιξώδους εφαρμόζονται σε Νευτωνικά ρευστά.

4.2 Η επίδραση του ιξώδους στη συμπεριφορά των ρευστών

Το ιξώδες του πετρελαίου αποτελεί μια σημαντική φυσική ιδιότητα η οποία ελέγχει και επηρεάζει τη ροή του μέσα από το δίκτυο των πόρων και τις σωληνώσεις. Το ιξώδες του πετρελαίου καθορίζεται αυστηρά από τη θερμοκρασία, την πίεση, την πυκνότητα του ρευστού, καθώς και τη διαλυτότητα του αερίου εντός αυτού (Ahmed, 2000). Φυσικά, η σύσταση είναι η ιδιότητα που έχει την πιο καθοριστική σημασία για το ιξώδες των ρευστών υδρογονανθράκων.

4.3 Ταξινόμηση ιξώδους πετρελαίου

Όπως αναφέρεται στην Ενότητα 4.2, το ιξώδες του πετρελαίου επηρεάζεται από την πίεση και τη θερμοκρασία. Αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται μείωση του ιξώδους ενώ μείωση της πίεσης συνεπάγεται επίσης μείωση του ιξώδους. Επιπλέον παράμετρος η οποία επηρεάζει το ιξώδες του πετρελαίου είναι η ποσότητα του διαλυμένου αερίου σε αυτό. Η μείωση της ποσότητας του διαλυμένου αερίου έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ιξώδους.

Ως εκ τούτου, ανάλογα με την πίεση και τη θερμοκρασία, το ιξώδες του πετρελαίου διακρίνεται σε:

4. ΙΞΩΔΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

- **Ιξώδες dead oil**

Το ιξώδες του dead oil ορίζεται ως το ιξώδες του πετρελαίου το οποίο βρίσκεται σε επαρκώς χαμηλή πίεση (14.7 psia) και σε θερμοκρασία ταμιευτήρα και το οποίο δεν περιέχει διαλυμένο αέριο.

- **Ιξώδες κορεσμένου πετρελαίου**

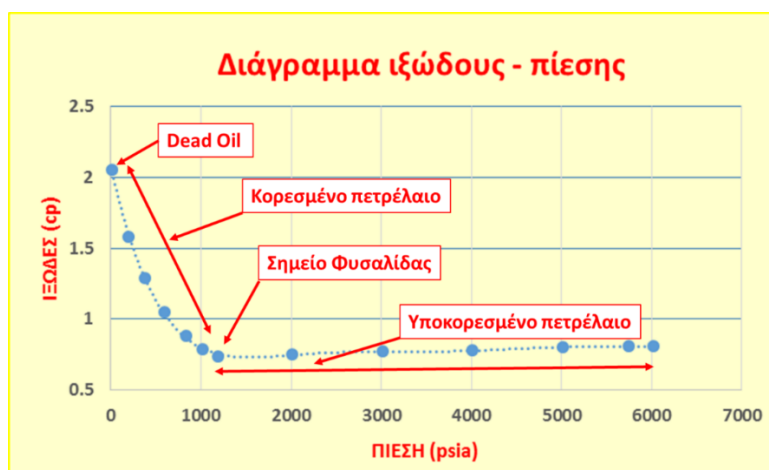
Το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου ορίζεται ως το ιξώδες του πετρελαίου το οποίο βρίσκεται σε πίεση ίση ή χαμηλότερη του σημείου φυσαλίδας και σε θερμοκρασία ίση με τη θερμοκρασία του ταμιευτήρα.

- **Ιξώδες υποκορεσμένου πετρελαίου**

Το ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου ορίζεται ως το ιξώδες του πετρελαίου το οποίο βρίσκεται σε πίεση υψηλότερη του σημείου φυσαλίδας και σε θερμοκρασία ίση με τη θερμοκρασία του ταμιευτήρα (Ahmed, 2000).

Το ιξώδες ενός ρευστού συνδέεται άμεσα με τον τύπο και το μέγεθος των μορίων που το απαρτίζουν. Οι παραλλαγές του ιξώδους ανάλογα με την μοριακή δομή δεν είναι γνωστές με ακρίβεια. Παρ' όλα αυτά, θεωρείται ότι το ιξώδες των ρευστών που ανήκουν σε ομόλογες σειρές ποικίλλει με φυσιολογικό τρόπο όπως οι περισσότερες φυσικές ιδιότητες. Για παράδειγμα, οι παραφινικοί υδρογονάνθρακες επιδεικνύουν μια φυσιολογική αύξηση του ιξώδους καθώς το μέγεθος και η πολυπλοκότητα των μορίων τους αυξάνουν (McCain, 1990).

Το Σχήμα 4.2 παρουσιάζει την μεταβολή του ιξώδους ανάλογα με την πίεση, υπό σταθερή θερμοκρασία:



Σχήμα 4.2 Το ιξώδες του πετρελαίου συναρτήσεως της πίεσης.

Σε πιέσεις πάνω από το σημείο φυσαλίδας, το ιξώδες του πετρελαίου μειώνεται καθώς μειώνεται και η πίεση. Σε χαμηλότερες πιέσεις τα μόρια είναι πιο απομακρυσμένα μεταξύ τους με αποτέλεσμα να διευκολύνεται η κίνηση τους. Κάτω από το σημείο φυσαλίδας, καθώς μειώνεται η πίεση, η σύσταση του ρευστού μεταβάλλεται. Αυτή η διαρκώς μεταβαλλόμενη σύσταση του ρευστού προκαλεί αύξηση στο ιξώδες.

Κατά τη διάρκεια της παραγωγής ενός ταμιευτήρα που εμπεριέχει ένα τυπικό πετρέλαιο (black oil), η παραγωγή ελαττώνεται όχι μόνο εξαιτίας της μείωσης της πίεσης αλλά και λόγω της αύξησης του ιξώδους του πετρελαίου. Ο δεκαπλασιασμός του ιξώδους μεταξύ του σημείου φυσαλίδας και χαμηλότερων πιέσεων δεν είναι σπάνιο φαινόμενο (McCain, 1990).

4.4 Μετρήσεις ιξώδους

Συνήθως, το ιξώδες του πετρελαίου μετράται κατά τη διεξαγωγή των εργαστηριακών αναλύσεων PVT και ειδικότερα κατά το πείραμα της διαφορικής εκτόνωσης. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται στα ίδια επίπεδα πίεσης με το αντίστοιχο πείραμα διαφορικής εκτόνωσης και σε θερμοκρασία ταμιευτήρα. Για τη μέτρηση χρησιμοποιούνται ιξωδόμετρα (μίας φάσης) τα οποία είναι δυνατό να λειτουργήσουν σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες που αντιστοιχούν σε ένα πετρελαϊκό ταμιευτήρα. Κατά τη διεργασία αυτή, ουσιαστικά, δημιουργείται ένα κλειστό κύκλωμα όπου λαμβάνεται υγρό από το κελί της διαφορικής εκτόνωσης, μετράται το ιξώδες του (διατηρώντας ίδιες συνθήκες) και στη συνέχεια το υγρό επανεισάγεται στο κελί ώστε να διατηρείται σταθερή η μάζα της υγρής φάσης σε κάθε στάδιο της διαφορικής εκτόνωσης.

Σε περίπτωση που δεν μπορούν να εκτελεστούν μετρήσεις ιξώδους ταυτόχρονα με την πραγματοποίηση του πειράματος DLE, χρησιμοποιούνται ανεξάρτητα ιξωδόμετρα μιας φάσης τα οποία λειτουργούν σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες ανάλογες αυτών που συναντώνται σε ταμιευτήρες πετρελαίου.

4.4.1 Πειραματική μέτρηση ιξώδους

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την ανεξάρτητη μέτρηση του ιξώδους μπορεί να είναι το ιξωδόμετρο κυλιόμενης σφαίρας, το ιξωδόμετρο τριχοειδούς ροής ή το ηλεκτρομαγνητικό ιξωδόμετρο. Η αξιοπιστία των τιμών του ιξώδους που

υπολογίζονται με αυτό τον τρόπο εξαρτάται από τη διεργασία βαθμονόμησης των οργάνων και φυσικά την ορθή χρήση τους.

- **Ιξωδόμετρο κυλιόμενης σφαίρας (Rolling Ball Viscometer)**

Το όργανο αυτό (Σχήμα 4.3) μπορεί να μετρήσει τιμές ιξώδους σε συνθήκες ταμειυτήρα. Αρχή της λειτουργίας του είναι η μέτρηση του χρόνου που απαιτείται για να πέσει μια μεταλλική σφαίρα μέσω του υγρού δείγματος (πετρελαίου) το οποίο τοποθετείται στο θάλαμο του οργάνου. Αυτή η απλή αλλά αποτελεσματική προσέγγιση είναι η πιο αξιόπιστη για τις μετρήσεις υψηλής πίεσης που απαιτούνται για την προσομοίωση των ταμειυτήρων πετρελαίου ειδικά όταν συνδυαστεί με δειγματοληψία σε υψηλές πιέσεις και επίσης με χρήση αντλιών υψηλής πίεσης.

Το συγκεκριμένο όργανο είναι απλό στη χρήση του. Το υπό πίεση δείγμα (πετρέλαιο) εγχύεται στον θάλαμο δοκιμής και ένα μαγνητικό σωληνοειδές κρατά μια χαλύβδινη σφαίρα στην κορυφή της διαδρομής του. Όταν απελευθερωθεί η σφαίρα και κυλάει μέσα στο δείγμα, ξεκινάει αυτόματα ένας ψηφιακός χρονοδιακόπτης υψηλής ακρίβειας. Όταν η σφαίρα φτάσει στο τέλος της διαδρομής της, ο χρονοδιακόπτης διακόπτεται αυτόματα παρέχοντας μια ακριβή μέτρηση του χρόνου πτώσης. Οι τιμές ιξώδους στη συνέχεια λαμβάνονται με συσχέτιση του χρόνου πτώσης και της διαμέτρου της σφαίρας με καμπύλες υγρών με γνωστά ιξώδη και πυκνότητες (υγρά αναφοράς).



Σχήμα 4.3 Ιξωδόμετρο κυλιόμενης σφαίρας (www.Chandlerengineering.com).

- **Ιξωδόμετρο τριχοειδούς ροής (Capillary Viscometer)**

Η μέτρηση της αντίστασης στη ροή από έναν τριχοειδή σωλήνα είναι ίσως η πιο διαδεδομένη και η πιο ακριβής, επί του παρόντος, από όλες τις μεθοδολογίες μέτρησης του ιξώδους που έχουν χρησιμοποιηθεί. Στα ιξωδόμετρα με τριχοειδή σωλήνα γίνεται μέτρηση της πίεσης που πρέπει να εξασκείται στο υγρό, ώστε αυτό να διέρχεται από τριχοειδή σωλήνα συγκεκριμένης διαμέτρου και μήκους με ορισμένη ταχύτητα. Παλαιότερα επικρατούσε η άποψη ότι κατά τη μέτρηση του ιξώδους με κάποια από τις μεθόδους τριχοειδούς ροής, ο συντελεστής ιξώδους υπολογίζεται απευθείας από το νόμο του Poiseuille, που μια διατύπωση του είναι:

$$n = [\pi r^4 (p_2 - p_1) t] / (8l V_0) \quad (4.2)$$

όπου r : η ακτίνα του τριχοειδούς,

p_2, p_1 : οι πιέσεις στα δύο άκρα του τριχοειδούς,

t : ο χρόνος εκροής

V_0 : ο όγκος που εκρέει σε χρόνο t και

l : το μήκος του τριχοειδούς σωλήνα.

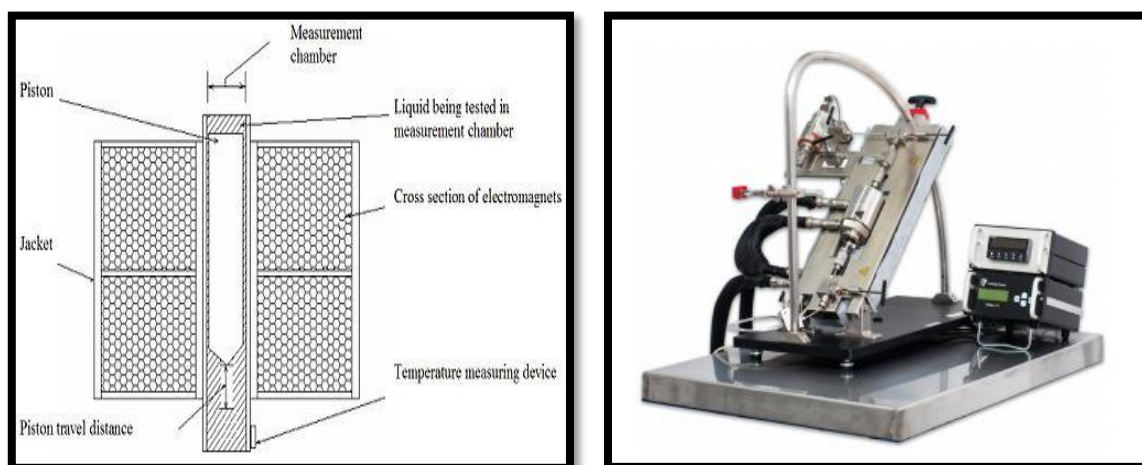
Η αρχή λειτουργίας αυτών των ιξωδομέτρων συνίσταται στη μέτρηση του χρόνου t , που απαιτείται ώστε ορισμένος όγκος V υγρού να εκρεύσει δια ενός τριχοειδούς μήκους L και ακτίνας r .



Σχήμα 4.4 Ιξωδόμετρο τριχοειδούς ροής (Core Laboratories).

- **Ιξωδόμετρο ταλάντωσης ή Ηλεκτρομαγνητικό ιξωδόμετρο (Oscillation or Electromagnetic viscometer)**

Το ιξωδόμετρο ταλάντωσης αναφέρεται και ως ηλεκτρομαγνητικό ιξωδόμετρο ή ιξωδόμετρο EMV και επινοήθηκε στο Cambridge Viscosity (Formally Cambridge Applied Systems) το 1986. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση του ιξώδους και αερίων δειγμάτων. Το σύστημα (Σχήμα 4.5) περιλαμβάνει το θάλαμο μέτρησης (measurement chamber) και ένα μαγνητικώς επηρεαζόμενο έμβολο (magnetically influenced piston). Λαμβάνονται μετρήσεις όταν ένα δείγμα (πετρελαίου ή αερίου) εισάγεται για πρώτη φορά στον θερμικώς ελεγχόμενο θάλαμο μέτρησης όπου βρίσκεται το έμβολο. Μια ηλεκτρονική διάταξη θέτει το έμβολο σε ταλάντωση εντός του θαλάμου μέτρησης υπό ελεγχόμενο μαγνητικό πεδίο. Το υγρό ή το αέριο δείγμα υποβάλλεται σε διατμητική τάση λόγω της διαδρομής του εμβόλου και το ιξώδες προσδιορίζεται μετρώντας το χρόνο διαδρομής του εμβόλου. Οι παράμετροι κατασκευής για το δακτυλιοειδές διάστημα μεταξύ του εμβόλου και του θαλάμου μέτρησης, η ισχύς του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και η απόσταση διαδρομής του εμβόλου χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του ιξώδους σύμφωνα με το Νόμο του Newton για το ιξώδες.



Σχήμα 4.5 Ηλεκτρομαγνητικό ιξωδόμετρο (Schlumberger).

4.4.2 Εμπειρική εκτίμηση ιξώδους – Χρήση συσχετίσεων

Όπως αναφέρεται παραπάνω, σε περιπτώσεις απουσίας πειραματικών δεδομένων οι ιδιότητες των πετρελαϊκών ρευστών εκτιμώνται από εμπειρικές συσχετίσεις.

Οι συσχετίσεις για την εκτίμηση του ιξώδους διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. (Naseri, et al., 2005) Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει εκείνες που χρησιμοποιούν

παραμέτρους οι οποίες είναι διαθέσιμες από το πεδίο, όπως για παράδειγμα η πυκνότητα API, η θερμοκρασία του ταμιευτήρα, το σημείο φυσαλίδας και η παράμετρος R_s . Οι Beggs & Robinson, Petrosky & Farshad και Khan ανέπτυξαν συσχετίσεις συναρτήσεων των παραπάνω παραμέτρων. Η δεύτερη κατηγορία αφορά τις συσχετίσεις οι οποίες χρησιμοποιούν μεγαλύτερο αριθμό παραμέτρων, όπως η σύσταση του πετρελαϊκού ρευστού, η μοριακή του μάζα κτλ. Οι συσχετίσεις των Lohrenz et al. (Lohrenz, et al., 1964) και Pedersen et al. (Pedersen, et al., 1984) είναι οι πιο διαδεδομένες που εφαρμόζονται στην πλειοψηφία των εμπορικών προσομοιωτών ενός ταμιευτήρα υδρογονανθράκων. Οι συσχετίσεις της κατηγορίας αυτής εκτιμούν το ιξώδες συναρτήσεων της πίεσης, της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα, της σύστασης του μίγματος, των ψευδοκρίσιμων ιδιοτήτων του μίγματος αλλά και του ιξώδους μια ουσίας αναφοράς που χρησιμοποιείται στη συσχέτιση της Pedersen. Αποτελούν συσχετίσεις που έχουν πολύπλοκη μαθηματική μορφή και για το λόγο αυτό συναντώνται κατά κύριο λόγο σε προσομοιωτές ογκομετρικής συμπεριφοράς και πρόρρησης ιδιοτήτων πετρελαϊκών ρευστών.

Στην παρούσα εργασία, επιλέγεται η μελέτη συσχετίσεων που ανήκουν στην πρώτη κατηγορία καθώς στόχος είναι η εκτίμηση συσχετίσεων με κοινές παραμέτρους οι οποίες είναι διαθέσιμες με μικρότερο κόστος σε σχέση, παραδείγματος χάρη, με την πλήρη σύσταση ενός ρευστού για την οποία απαιτούνται πιο δαπανηρές μελέτες. Επιπλέον, η κατηγορία αυτή προσφέρει το πλεονέκτημα της έγκαιρης πρόρρησης του ιξώδους και της αποφυγής χρήσης πολυσύνθετων μεταβλητών.

Οι συσχετίσεις αυτές ταξινομούνται, ανάλογα με τις συνθήκες που βρίσκεται το πετρελαϊκό μίγμα σε:

- Συσχετίσεις για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil
- Συσχετίσεις για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου
- Συσχετίσεις για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου

5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

5.1 Επιλογή συσχετίσεων

Σε αυτό το στάδιο αναλύονται οι συσχετίσεις που επιλέχθηκαν για την πρόρρηση του ιξώδους των πετρελαϊκών ρευστών του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου. Αρχικά, βασικό κριτήριο επιλογής υπήρξαν αναφορές στην βιβλιογραφία για την καλύτερη απόδοση ορισμένων συσχετίσεων. Μάλιστα, ο McCain (McCain, et al., 2011) πραγματοποίησε μια εκτενή μελέτη τέτοιων συσχετίσεων και τα αποτελέσματά του υπήρξαν πλούσια πηγή πληροφοριών για την παρούσα εργασία. Η μελέτη του επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση συσχετίσεων που προτείνονται στην πετρελαϊκή βιβλιογραφία για διάφορες ιδιότητες του πετρελαϊκού ρευστού συμπεριλαμβανομένου του ιξώδους. Ιδιαίτερη βάση δόθηκε στις συσχετίσεις που χρησιμοποιούν τα συνήθως διαθέσιμα δεδομένα πεδίου ενώ δοκιμάστηκαν σε ένα μεγάλο εύρος πειραματικών δεδομένων που συγκεντρώθηκαν από διάφορα έργα, καλύπτοντας ένα σημαντικό τμήμα των συνθηκών και των ιδιοτήτων που συναντώνται συνήθως στην πράξη.

Το δευτερεύον κριτήριο αφορούσε το εύρος της βάσης δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε στην εκάστοτε συσχέτιση για τη δημιουργία της. Όλες οι συσχετίσεις επιλέχθηκαν με την προϋπόθεση ότι τα χαρακτηριστικά που είναι διαθέσιμα για τα πετρελαϊκά ρευστά του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου βρίσκονται εντός του πεδίου εφαρμογής της κάθε συσχέτισης.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η πλειοψηφία των συσχετίσεων που επιλέχθηκαν αναφέρονται εκτενώς στην πετρελαϊκή βιβλιογραφία και χρησιμοποιούνται πολλές φορές σαν σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση νέων συσχετίσεων που δημοσιεύονται.

Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4, η εκτίμηση του ιξώδους αναφέρεται σε συγκεκριμένες συνθήκες του πετρελαϊκού μίγματος (dead oil, κορεσμένο πετρέλαιο και υποκορεσμένο πετρέλαιο) σύμφωνα με τους ορισμούς που έχουν δοθεί στην Ενότητα 4.3 της εργασίας αυτής. Με ανάλογο τρόπο κατηγοριοποιούνται και οι

5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

συσχετίσεις που χρησιμοποιήθηκαν. Ως εκ τούτου, οι συσχετίσεις που επιλέχθηκαν για κάθε κατηγορία ιξώδους αποτυπώνονται στους Πίνακες 5.1-5.3.

Πίνακας 5.1. Συσχετίσεις που επιλέχθηκαν για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil στον Πρίνο και στο Δ. Κατάκολο.

Petrosky & Farshad (Petrosky, et al., 1995)
Beggs & Robinson (Beggs, et al., 1975)
Bergman & Sutton (Bergman, et al., 2007)
Dindoruk & Christman (Dindoruk, et al., 2004)
Esharkawy & Alikhan (Elsharkawy, et al., 1999)
Beal (Standing, 1981)
Glaso (Glaso, 1980)

Πίνακας 5.2. Συσχετίσεις που επιλέχθηκαν για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου στον Πρίνο και στο Δ. Κατάκολο.

Petrosky & Farshad (Petrosky, et al., 1995)
Beggs & Robinson (Beggs, et al., 1975)
Bergman & Sutton (Bergman, et al., 2007)
Dindoruk & Christman (Dindoruk, et al., 2004)
Esharkawy & Alikhan (Elsharkawy, et al., 1999)

Πίνακας 5.3. Συσχετίσεις που επιλέχθηκαν για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου στον Πρίνο και στο Δ. Κατάκολο.

Bergman & Sutton (Bergman, et al., 2006)
Dindoruk & Christman (Dindoruk, et al., 2004)
Vazquez & Beggs (Vazquez, et al., 1980)

Ο McCain αξιολόγησε την απόδοση 18 συσχετίσεων που εκτιμούν το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου χρησιμοποιώντας 184 μελέτες πετρελαϊκών ρευστών από διάφορες περιοχές ανά τον κόσμο. Στην περίπτωση του υποκορεσμένου αξιολόγησε 15 συσχετίσεις βάσει 186 μελετών πετρελαϊκών ρευστών από διάφορες περιοχές. Από τα αποτελέσματα έγινε φανερό ότι ορισμένες υπερτερούν. Οι Πίνακες 5.4 και 5.5 παρουσιάζουν το μέσο σχετικό καθώς και το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα των συσχετίσεων που ελέγχθηκαν από τον McCain και αποτέλεσαν σημαντικό βοήθημα στην επιλογή συσχετίσεων για την παρούσα διπλωματική εργασία (οι συσχετίσεις που επιλέχθηκαν τονίζονται με έντονη γραμματοσειρά).

Αρχικά, ελέγχθηκε η δυνατότητα εφαρμογής των πρώτων σε σειρά συσχετίσεων οι οποίες είναι πιο ακριβείς. Από τον Πίνακα 5.4 για το κορεσμένο πετρέλαιο επιλέγονται για εφαρμογή οι δύο πρώτες συσχετίσεις, των Beggs & Robinson και των Dindoruk & Christman. Η επόμενη συσχέτιση, των Ng & Egbogah, ουσιαστικά αποτελεί τροποποίηση εκείνης των Beggs & Robinson όμως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί λόγω έλλειψης απαιτούμενων πειραματικών δεδομένων (Pour point

5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Temperature). Στη συνέχεια, αναφέρεται η συσχέτιση των Petrosky & Farshad που επιλέγεται κανονικά για εφαρμογή στον Πρίνο και το Δ. Κατάκολο.

Σε αυτό το στάδιο, γίνεται μετάβαση στον Πίνακα 5.5 ο οποίος περιέχει συσχετίσεις για την εκτίμηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου. Για αυτή την κατηγορία επιλέγονται οι συσχετίσεις των Bergman & Sutton, Dindoruk & Christman και Vazquez & Beggs οι οποίες αναδεικνύονται σύμφωνα με τον McCain ως πιο αξιόπιστες σε σύγκριση με τις υπόλοιπες και το εύρος της βάσης δεδομένων τους επιτρέπει τη εφαρμογή τους στα πετρελαϊκά ρευστά του Ελλαδικού χώρου.

Το γεγονός ότι η συσχέτιση των Bergman & Sutton επιλέχθηκε από τον Πίνακα 5.5, σε συνδυασμό με την πρόσφατη χρονολογία δημοσίευσής της (2007), αποτέλεσε βασικό κίνητρο για την εφαρμογή της επιπλέον για την εκτίμηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου. Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατή η αξιολόγηση της συσχέτισης σε ένα μεγάλο εύρος πιέσεων το οποίο δεν περιορίζεται από το σημείο φυσαλίδας.

Η πέμπτη και τελευταία συσχέτιση που επιλέγεται για το κορεσμένο πετρέλαιο είναι των Elsharkawy & Alikhan. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.6, οι συσχετίσεις που παρατίθενται από τον McCain πριν από τη συγκεκριμένη είτε αδυνατούν να χρησιμοποιηθούν λόγω ασυμφωνίας του εύρους της βάσης δεδομένων τους με τα ρευστά που μελετώνται στο πλαίσιο αυτής της εργασίας είτε έχουν δημοσιευτεί παλαιότερα.

5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Πίνακας 5.4. Αξιολόγηση δημοσιευμένων συσχετίσεων για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου (McCain, 2011).

Συσχέτιση	ARE %	AARE%
Beggs & Robinson (Beggs, et al., 1975)	-5.63	27.60
Dindoruk & Christman (Dindoruk, et al., 2004)	-9.18	29.90
Ng-Egbogah with Beggs & Robinson (Egbogah, et al., 1990)	2.86	30.50
Petrosky & Farshad (Petrosky, et al., 1995)	2.47	31.15
Elsharkawy-Gharbi (Elsharkawy, et al., 2001)	-7.43	31.63
Almehaideb (Almehaideb, 1997)	7.39	34.36
Hanafy et al. (Hanafy, et al., 1997)	10.06	34.78
Kartoatmodjo-Schmidt (Kartoatmodjo, et al., 1991)	-7.62	35.69
Al-Khafaji et al. (Al-Khafaji, et al., 1987)	-7.63	35.70
Bergman (Whitson, et al., 2000)	13.46	36.44
Abu-Khasmin-Al-Marhoun (Abu-Khamsin, et al., 1991)	18.99	40.04
Elsharkawy-Alikhan (Elsharkawy, et al., 1999)	21.46	40.45
Bergman-Sutton (Bergman, et al., 2007)	21.12	40.81
Standing (Standing, 1981)	-8.13	41.60
Aziz et al. (Aziz, et al., 1972)	-41.10	44.06
Naseri et al. (Naseri, et al., 2005)	15.41	45.04
Khan et al. (Khan, et al., 1987)	-67.28	68.55
Labedi (Labedi, 1992)	58.37	83.65

5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Πίνακας 5.5. Αξιολόγηση δημοσιευμένων συσχετίσεων για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου (McCain, 2011).

Συσχέτιση	ARE %	AARE%
Petrosky & Farshad (Petrosky, et al., 1995)	-18.40	32.89
Bergman-Sutton (Bergman, et al., 2006)	-18.58	32.99
Dindoruk & Christman (Dindoruk, et al., 2004)	-17.20	34.69
Vazquez-Beggs (Vazquez, et al., 1980)	-13.61	35.09
De Ghetto et al. (Ghetto, et al., 1994)	-11.52	35.87
Hanafy et al. (Hanafy, et al., 1997)	-6.27	36.34
Almehaideb (Almehaideb, 1997)	10.32	36.75
Elsharkawy-Alikhan (Elsharkawy, et al., 1999)	3.96	37.86
Elsharkawy-Gharbi (Elsharkawy, et al., 2001)	-11.80	40.09
Kartoatmodjo-Schmidt (Kartoatmodjo, et al., 1991)	-21.60	41.82
Khan et al. (Khan, et al., 1987)	0.77	44.49
Abdul-Majeed et al. (Abdul-Majeed, et al., 1990)	1.34	45.89
Standing (Standing, 1981)	-17.15	55.09
Al-Khafaji et al. (Al-Khafaji, et al., 1987)	46.21	76.95
Labedi (Labedi, 1992)	53.79	87.81

Τέλος, για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil αποφασίστηκε η χρήση των αντίστοιχων συσχετίσεων που χρησιμοποιούνται για το κορεσμένο πετρέλαιο και το υποκορεσμένο ούτως ώστε να αξιολογείται μια συσχέτιση πολύπλευρα και στη βάση αυτών που προτείνουν οι ίδιοι οι ερευνητές για την εκτίμησή του. Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι οι επιπλέον συσχετίσεις για την εκτίμηση του ιξώδους του dead oil, δηλαδή η συσχέτιση του Beal (Standing, 1981) και του Glaso (Glaso, 1980) επιλέχθηκαν διότι μαζί με την συσχέτιση Beggs & Robinson (Beggs & Robinson, 1975) θεωρούνται ως οι πιο ακριβείς και αξιόπιστες (Ahmed, 2000). Ο Πίνακας 5.6 παρουσιάζει τις συσχετίσεις οι οποίες απορρίφθηκαν δεδομένου ότι οι τιμές των ιδιοτήτων (παραμέτρων που παρουσιάζονται στη δεύτερη στήλη του πίνακα) των ρευστών του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου είναι εκτός του πεδίου εφαρμογής των συσχετίσεων:

5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Πίνακας 5.6. Συσχετίσεις που απορρίφθηκαν για την πρόρρηση του ιξώδους του πετρελαίου στον Πρίνο και το Δ. Κατάκολο.

Συσχετίσεις	Παράμετροι που καθιστούν αδύνατη την εφαρμογή των συσχετίσεων
Khan (Khan, et al., 1987)	T, N_2, H_2S
De Ghetto (Ghetto, et al., 1995)	API
Elsharkawy-Gharbi (Elsharkawy, et al., 2001)	T
Almehaideb (Almehaideb, 1997)	API, T
Petrosky & Farshad (Petrosky, et al., 1995)	rb (σχετικά με τη συσχέτιση ιξώδους για υποκορεσμένο πετρέλαιο)
Elsharkawy & Alikhan (Elsharkawy, et al., 1999)	rb (σχετικά με τη συσχέτιση ιξώδους για υποκορεσμένο πετρέλαιο)

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί το θεωρητικό μέρος που υποστηρίζει την κάθε μία από τις συσχετίσεις που αναφέρονται στους παραπάνω πίνακες και οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη.

5.2 Η συσχέτιση των Petrosky & Farshad

Το 1984, οι ερευνητές Sutton και Farshad (Sutton, et al., 1984) αξιολόγησαν την ακρίβεια διαφόρων δημοσιευμένων συσχετίσεων σε κοιτάσματα που προέρχονταν από τον Κόλπο του Μεξικού. Στην έρευνα τους χρησιμοποίησαν συνολικά 31 διαφορετικά δείγματα αργού πετρελαίου από την περιοχή της Louisiana και του Texas. Τα σφάλματα που εντόπισαν ήταν αρκετά μεγάλα. Για το λόγο αυτό, το 1990, ο Petrosky (Petrosky, et al., 1990) προχώρησε στην παρουσίαση μιας ανασκόπησης των παραπάνω συσχετίσεων και ενίσχυσε τα αποτελέσματα των ερευνητών Sutton και Farshad (Sutton, et al., 1984) με τη χρήση μιας ανεξάρτητης βάσης δεδομένων, η οποία περιείχε 126 εργαστηριακές αναλύσεις PVT.

Το αποτέλεσμα αυτής της εργασίας που βασίστηκε σε μη γραμμική ανάλυση πολλαπλής παλινδρόμησης (nonlinear multiple regression analysis) ήταν η δημιουργία τριών νέων συσχετίσεων για αργό πετρέλαιο με προέλευση από το Μεξικό. Οι συσχετίσεις αυτές αφορούν την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil, του κορεσμένου πετρελαίου και του υποκορεσμένου πετρελαίου.

Τα υγρά δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από υπεράκτιους ταμιευτήρες στο Texas και την Louisiana.

5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Στους τρεις Πίνακες 5.7-5.9 που ακολουθούν παρουσιάζεται το εύρος (ελάχιστο, μέγιστο) των παραμέτρων που αφορούν στα δείγματα αυτά και πρακτικά είναι το πεδίο εφαρμογής των νέων συσχετίσεων:

Πίνακας 5.7. Πεδίο εφαρμογής της συσχέτισης των *Petrosky & Farshad* για το ιξώδες του *dead oil*.

Σύνολο σημείων	Ιδιότητα PVT	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
118	Ιξώδες <i>dead oil</i> (cp)	0.73	10.25
118	Θερμοκρασία ταμειυτήρα (°F)	114	288
118	Πυκνότητα (°API)	25.40	46.10
118	CO ₂ (Mole %)	0.04	5.29
118	N ₂ (Mole %)	0.00	2.38

Πίνακας 5.8. Πεδίο εφαρμογής της συσχέτισης των *Petrosky & Farshad* για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου.

Σύνολο σημείων	Ιδιότητα PVT	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
864	Ιξώδες κορεσμένου πετρελαίου (cp)	0.21	7.40
864	Ιξώδες <i>dead oil</i> (cp)	0.725	11.69
864	Gas Oil Ratio (scf/STB)	21	1885
88	CO ₂ (Mole %)	0.00	3.72
88	N ₂ (Mole %)	0.00	0.79

5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Πίνακας 5.9. Πεδίο εφαρμογής της συσχέτισης των Petrosky & Farshad για το ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου.

Σύνολο σημείων	Ιδιότητα PVT	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
404	Ιξώδες υποκορεσμένου πετρελαίου (cp)	0.22	4.09
404	Πίεση πάνω από το σημείο φυσαλίδας (psia)	1600	10250
404	Σημείο φυσαλίδας (psia)	1574	9552
404	Ιξώδες στο σημείο φυσαλίδας (cp)	0.21	3.55
126	CO ₂ (Mole %)	0.00	5.29
126	N ₂ (Mole %)	0.00	2.38

5.2.1 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil

Η μαθηματική σχέση που δημιουργήθηκε για την πρόρρηση του ιξώδους του deal oil για τα πετρελαϊκά μίγματα του Κόλπου του Μεξικού βασίζεται στην παρακάτω γενική έκφραση, η οποία συσχετίζει το ιξώδες με την πυκνότητα API και τη θερμοκρασία του ταμειυτήρα:

$$\mu_{od} = f(^{\circ}API, T)$$

όπου **API**: πυκνότητα API του πετρελαίου ($^{\circ}API$)

T: θερμοκρασία ταμειυτήρα ($^{\circ}F$)

Η τελική σχέση που αναπτύχθηκε για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil (μ_{od}) είναι ως εξής:

$$\mu_{od} = 2.3511 \times 10^7 \cdot T^{-2.10255} \cdot [\log^{\circ}API]^X \quad (5.1)$$

όπου $X = 4.59388 \cdot (\log T) - 22.8279$

API: πυκνότητα API του πετρελαίου ($^{\circ}API$)

T : θερμοκρασία ταμειυτήρα ($^{\circ}F$)

Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η συσχέτιση αυτή εκτιμά το ιξώδες του dead oil με απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα AARE=12.4%.

5.2.2 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου

Η συσχέτιση που δημιουργήθηκε για την πρόρρηση του ιξώδους κορεσμένων πετρελαϊκών δειγμάτων βασίζεται στην παρακάτω γενική έκφραση η οποία συσχετίζει το ιξώδες με το συντελεστή R_s και το ιξώδες του dead oil:

$$\mu_{ob} = f(\mu_{od}, R_s)$$

όπου μ_{od} : ιξώδες του deal oil (cp)

R_s : λόγος διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο (scf/STB)

Η τελική σχέση που αναπτύχθηκε για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου (μ_{ob}) είναι ως εξής:

$$\mu_{ob} = A \cdot (\mu_{od})^B \quad (5.2)$$

όπου $A = 0.1651 + 0.6165 \cdot 10^{-6.0866 \times 10^{-4} \cdot R_s}$

$B = 0.5131 + 0.5109 \cdot 10^{-1.1831 \times 10^{-3} \cdot R_s}$

μ_{od} : ιξώδες του deal oil (cp)

R_s : λόγος διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο (scf/STB)

Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η συσχέτιση αυτή εκτιμά το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου με απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα AARE=14.47%.

5.2.3 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου

Η συσχέτιση που δημιουργήθηκε για την πρόρρηση του ιξώδους υποκορεσμένων πετρελαϊκών δειγμάτων βασίζεται στην παρακάτω γενική έκφραση η οποία συσχετίζει το ιξώδες αυτό με το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου, την πίεση κορεσμού –bubble point- και την πίεση του ταμιευτήρα:

$$\mu_o = f(\mu_{ob}, P_b, P)$$

Η τελική σχέση που αναπτύχθηκε για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου (μ_o) είναι ως εξής:

$$\mu_o = \mu_{ob} + 1.3449 \times 10^{-3} (p - p_b) \cdot 10^A \quad (5.3)$$

$$\text{όπου } A = -1.0146 + 1.3322 \cdot \log(\mu ob) - 0.4876[\log(\mu ob)]^2 - 1.15036[\log(\mu ob)]^3$$

μob : Ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου (cp)

pb : πίεση στο σημείο φουσαλίδας (psia)

p : πίεση ταμειυτήρα (psia)

Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η συσχέτιση αυτή εκτιμά το ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου με απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα AARE=2.91%. Το θεωρητικό υπόβαθρο της συγκεκριμένης συσχέτισης παρατίθεται για λόγους ενιαίας μελέτης της έρευνας των Petrosky & Farshad ανεξάρτητα από το γεγονός ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί στα υπό εξέταση ρευστά λόγω ασυμφωνίας του πεδίου εφαρμογής της με τις ιδιότητες των ρευστών αυτών.

5.4 Η συσχέτιση των Beggs & Robinson

Οι ερευνητές Beggs και Robinson (Beggs, και συν., 1975) δημιούργησαν μια βάση δεδομένων και με αυτήν μελέτησαν την ακρίβεια πρόρρησης ορισμένων συσχετίσεων. Συγκεκριμένα, εφάρμοσαν τη συσχέτιση του Beal (Standing, 1981) για dead oil και των Chew & Connally (Standing, 1981) για κορεσμένο πετρέλαιο αλλά παρατήρησαν σημαντικό σφάλμα και μεγάλη διασπορά στα αποτελέσματα. Χρησιμοποίησαν τελικά αυτή τη βάση δεδομένων για να αναπτύξουν νέες εμπειρικές συσχετίσεις για την πρόρρηση του ιξώδους για dead oil καθώς και για κορεσμένο πετρέλαιο. Ο πίνακας 5.10 περιγράφει το εύρος των τιμών ορισμένων βασικών παραμέτρων για τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ανάπτυξη των συσχετίσεων:

Πίνακας 5.10. Πεδίο εφαρμογής των συσχετίσεων των Beggs & Robinson για το ιξώδες.

Μεταβλητή	Εύρος τιμών
Rs (scf/STB)	20 έως 2070
Πυκνότητα Πετρελαίου (° API)	16 έως 58
Πίεση ταμειυτήρα (psig)	0 έως 5250
Θερμοκρασία ταμειυτήρα (°F)	70 έως 295
Αριθμός πετρελαϊκών συστημάτων = 600	
Αριθμός παρατηρήσεων (observations) σε dead oil = 460	
Αριθμός παρατηρήσεων (observations) σε κορεσμένο πετρέλαιο = 2073	

5.4.1 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil

Η μαθηματική συσχέτιση που εκτιμά το ιξώδες του dead oil αναπτύχθηκε με την δημιουργία του διαγράμματος $\log_{10}(T)$ ως προς το $\log_{10}(\log_{10}(\mu od + 1))$ σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Από τα διαγράμματα προέκυψε σειρά ευθειών σταθερής κλίσης και από την ανάλυσή τους διαπιστώθηκε ότι κάθε μία από αυτές τις ευθείες αφορά σε πετρελαϊκά μίγματα συγκεκριμένης πυκνότητας API. Η σχέση που ανέπτυξαν οι δύο ερευνητές είναι η εξής:

$$\mu od = 10^X - 1 \quad (5.4)$$

όπου $X = y T^{-1.163}$

$$y = 10^Z$$

$$Z = 3.0324 - 0.02023 \gamma o$$

γo : πυκνότητα API του πετρελαίου ($^{\circ}API$)

Οι ερευνητές παρουσιάζουν την απόδοση της συσχέτισής τους με βάση τα δεδομένα που χρησιμοποίησαν για την ανάπτυξη αυτής ως μέσο απόλυτο σφάλμα το οποίο είναι -0.64% σε σχέση με την συσχέτιση του Beal που χρησιμοποίησαν για σύγκριση (-19.64%) και με βάση 93 περιπτώσεις με δεδομένα dead oil όπου τα ποσοστά αντίστοιχα ήταν 114.27% και 378.46%. Στο άρθρο των Elsharkawy & Alikhan καταγράφεται ότι μέσο απόλυτο σφάλμα για τη συσχέτιση των Beggs & Robinson είναι 13.5%.

5.4.2 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου

Οι ερευνητές διόρθωσαν το ιξώδες του dead oil στην περίπτωση ύπαρξης διαλυμένου αερίου εντός του πετρελαίου εκμεταλλευόμενοι το γεγονός ότι υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ των $\log_{10}\mu od$ και $\log_{10}(\mu ob)$ για μια συγκεκριμένη τιμή της παραμέτρου Rs. Το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου εκτιμάται από την παρακάτω σχέση:

$$\mu ob = A \mu od^B \quad (5.5)$$

όπου $A = 10.715 (Rs + 100)^{-0.515}$

$$B = 5.44 (Rs + 150)^{-0.338}$$

μod : Ιξώδες του deal oil (cp)

5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Rs: λόγος διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο (scf/STB)

mob: Ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου (cp)

Η δημιουργία των παραπάνω συσχετίσεων αγνοεί την εξάρτηση του ιξώδους του πετρελαίου από την σύσταση του, άρα και από την πυκνότητα, αν και όπως είναι γνωστό πετρελαϊκά συστήματα διαφόρων συστάσεων μπορούν να έχουν την ίδια πυκνότητα. Εντούτοις, οι σχέσεις που προτείνουν οι ερευνητές είναι εύκολες στην χρήση και ακριβείς για μεγάλο εύρος τιμών πυκνότητας, θερμοκρασίας και ποσότητας διαλυμένου αερίου σε ένα πετρελαϊκό σύστημα. Η απόδοση της συσχέτισής τους βάσει των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξή της εκφράζεται ως μέσο σφάλμα και είναι -1.83% και την συγκρίνουν με την αντίστοιχη των Chew & Connally, η οποία παρουσιάζει αντίστοιχο σφάλμα 25.35%.

5.5 Η συσχέτιση των Dindoruk & Christman

Οι ερευνητές Dindoruk και Christman (Dindoruk, et al., 2004) μετά από εκτενή μελέτη ανέπτυξαν νέες εμπειρικές συσχετίσεις εκτίμησης διαφόρων παραμέτρων PVT για πετρελαϊκά κοιτάσματα από τον Κόλπο του Μεξικού. Οι συσχετίσεις αυτές αφορούν στην εκτίμηση των παρακάτω παραμέτρων:

- Πίεση κορεσμού -Σημείο φυσαλίδας
- Λόγος διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο στο σημείο φυσαλίδας (R_s at bubble point)
- Συντελεστής μεταβολής του όγκου του πετρελαίου (B_o)
- Συμπιεστότητα υποκορεσμένου πετρελαίου
- Ιξώδες του dead oil
- Ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου
- Ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου

Η βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε περιέχει περισσότερες από 100 εργαστηριακές αναλύσεις PVT. Ο Πίνακας 5.11 παρουσιάζει το εύρος των τιμών των παραμέτρων των ρευστών που χρησιμοποιήθηκαν.

Αρχικά μελέτησαν δύο παλαιότερες σχέσεις, του Standing (Standing, 1981) και των Petrosky και Farshad, και παρατήρησαν την αδυναμία τους να προσδιορίσουν με

5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

ακρίβεια τις παραμέτρους και τις ιδιότητες που περιγράφουν τα πετρελαϊκά ρευστά του Κόλπου του Μεξικού.

Για τη δημιουργία των καταλληλότερων συσχετίσεων οι οποίες θα καλύπτουν όλα τα διαθέσιμα δεδομένα, εξετάστηκε ένας μεγάλος αριθμός μαθηματικών εκφράσεων και οι συνδυασμοί τους. Κατά την ανάπτυξη τους δεν έγινε προσπάθεια προσαρμογής του εύρους των δεδομένων με σκοπό τη μείωση του σφάλματος. Αντίθετα, οι ερευνητές Petrosky και Farshad μείωσαν το εύρος της βάσης δεδομένων για να αποκτήσουν την καλύτερη και ακριβέστερη πρόρρηση τιμών. Κατά τη διάρκεια κάθε δοκιμής, οι μαθηματικές σχέσεις μεταβάλλονταν ανάλογα με την ποιότητα της συσχέτισης και το σφάλμα της. Για καθεμία, οι ερευνητές Dindoruk και Christman σχεδίασαν διάγραμμα σχετικού σφάλματος με τις παραμέτρους εισαγωγής και συνδυασμούς αυτών. Εάν το σφάλμα επιδείκνυε σύνδεση με μια παράμετρο τότε προσέθεταν και άλλους όρους στην συσχέτιση. Οι τελικές σχέσεις επιλέχθηκαν με βάση τη φυσική συμπεριφορά των ρευστών και σύμφωνα με τα συστατικά τους. Η ανάπτυξη των συσχετίσεων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του εργαλείου Solver που είναι ενσωματωμένο στο πρόγραμμα Excel της Microsoft.

Πίνακας 5.11. Πεδίο εφαρμογής των συσχετίσεων των Dindoruk & Christman για το ιξώδες πετρελαίου.

Σύνολο σημείων	Ιδιότητα PVT	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
95	Ιξώδες dead oil (cp)	0.89	62.63
95	Θερμοκρασία ταμιευτήρα (°F)	121	276
95	Πυκνότητα (°API)	17.40	40
95	pb (psi)	926	12230
95	R_{spb} (scf/STB)	133	3050
95	$p - pb$ (psi)	202	10140
95	Ιξώδες κορεσμένου πετρελαίου (cp)	0.16	8.70
95	Ιξώδες υποκορεσμένου πετρελαίου (cp)	0.21	10.60

Αποκλειστικά για τις συσχετίσεις του ιξώδους, οι συγγραφείς αναφέρουν ότι το ιξώδες του dead oil χρησιμοποιείται σαν παράμετρος εισαγωγής στη συσχέτιση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου και αυτό με την σειρά του εισάγεται στη

5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

συσχέτιση ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου. Παρόλα αυτά, η αναφορά τους δεν διευκρινίζει την προέλευση αυτών των τιμών και δεν γίνεται αντιληπτό αν, λόγω χάριν, το κορεσμένο ιξώδες που θα χρησιμοποιηθεί στη συσχέτιση ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου είναι από πειραματικά δεδομένα ή μια τιμή που προκύπτει από τη σχετική συσχέτιση.

5.5.1 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil

Η μαθηματική σχέση που δημιουργήθηκε για την πρόρρηση του ιξώδους του deal oil συσχετίζει το ιξώδες με την πυκνότητα API και τη θερμοκρασία του ταμιευτήρα:

$$\mu_{od} = \frac{a_3 T^{a_4} [\log(API)]^A}{a_5 p_{pb}^{a_6} + a_7 R_{s_{pb}}^{a_8}} \quad (5.6)$$

όπου $A = \alpha_1 \log(T) + \alpha_2$

API: πυκνότητα API του πετρελαίου ($^{\circ}API$)

T: θερμοκρασία ταμιευτήρα ($^{\circ}F$)

μ_{od} : Ιξώδες του deal oil (cp)

$R_{s_{pb}}$: λόγος διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο στο σημείο φουσαλίδας (scf/STB)

p_{pb} : πίεση στο σημείο φουσαλίδας (psia)

Ο Πίνακας 5.12 περιέχει τους αριθμητικούς συντελεστές της συσχέτισης:

Πίνακας 5.12. Συντελεστές για τη συσχέτιση Dindoruk & Christman του ιξώδους του dead oil.

Συντελεστής	Τιμή
a1	14.505357625
a2	-44.868655416
a3	$9.36579 \cdot 10^9$
a4	-4.194017808
a5	$-3.1461171 \cdot 10^{-9}$
a6	1.517652716
a7	0.010433654
a8	-0.000776880

Πέραν της πυκνότητας API και της θερμοκρασίας η προτεινόμενη συσχέτιση περιλαμβάνει δυο επιπλέον παραμέτρους, την πίεση στο σημείο φουσαλίδας (**p_{pb}**) και

5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

το λόγο διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο στο σημείο φουσαλίδας (Rs_{pb}) του αρχικού πετρελαϊκού δείγματος. Η συγκεκριμένη προσέγγιση γίνεται στην προσπάθεια να ληφθεί υπόψη ο τύπος του πετρελαίου διότι η ίδια ποσότητα διαλυμένου αερίου είναι ικανή να προκαλέσει διαφορετικά επίπεδα τιμών πίεσης κορεσμού στην περίπτωση παραφινικών ή αρωματικών πετρελαίων. Οι ερευνητές πετυχαίνουν την πρόρρηση κάποιων πληροφοριών για το είδος του πετρελαίου χωρίς να χρειάζονται επιπλέον δεδομένα. Σύμφωνα με όσα αναφέρουν το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (%AARE) της προτεινόμενης σχέσης στην πρόρρηση του ιξώδους του deal oil είναι της τάξης του 12.62%. Πραγματοποίησαν τη σύγκριση της απόδοσης της συσχέτισής τους σε σχέση με των Petrosky & Farshad και του Standing οι οποίοι παρουσίασαν απόλυτα μέσο σχετικά σφάλματα 15.49% και 20.96% αντίστοιχα. Οι ερευνητές αναφέρουν συμπερασματικά ότι λαμβάνοντας υπόψη το εύρος των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν και τη φύση του dead oil, το οποίο είναι εξαιρετικά δύσκολο να εκτιμηθεί μέσω συσχετίσεων, το αποτέλεσμα της συσχέτισής τους θεωρείται πολύ καλό σε σύγκριση με τις λοιπές συσχετίσεις που εξετάστηκαν.

5.5.2 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου

Η πρόρρηση του ιξώδους όταν το πετρέλαιο είναι κορεσμένο απαιτεί τη χρήση του ιξώδους του dead oil σαν παράμετρο εισαγωγής. Η αρχική προσέγγιση από τους Chew & Connally (Chew, et al., 1959) η οποία συνέδεε το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου και του dead oil χρησιμοποιείται και από τους Dindoruk & Christman. Η ακόλουθη έκφραση προτάθηκε με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα:

$$\mu_{ob} = A(\mu_{od})^B \quad (5.7)$$

$$\text{όπου } A = \frac{a_1}{\exp(a_2Rs)} + \frac{a_3Rs^{a_4}}{\exp(a_5Rs)}$$

$$B = \frac{a_6}{\exp(a_7Rs)} + \frac{a_8Rs^{a_9}}{\exp(a_{10}Rs)}$$

μ_{od} : Ιξώδες του deal oil (cp)

Rs : λόγος διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο (scf/STB)

μ_{ob} : Ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου (cp)

Στον Πίνακα 5.13 δίδονται οι αριθμητικοί συντελεστές της συσχέτισης:

5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Πίνακας 5.13. Συντελεστές για τη συσχέτιση Dindoruk & Christman του κορεσμένου πετρελαίου.

Συντελεστής συσχέτισης	Τιμή συντελεστή
a1	1.00
a2	$4.740729 \cdot 10^{-4}$
a3	$-1.023451 \cdot 10^{-2}$
a4	$6.600358 \cdot 10^{-1}$
a5	$1.075080 \cdot 10^{-3}$
a6	1.00
a7	$-2.191172 \cdot 10^{-5}$
a8	$-1.660981 \cdot 10^{-2}$
a9	$4.233179 \cdot 10^{-1}$
a10	$-2.273945 \cdot 10^{-4}$

Σύμφωνα με όσα αναφέρουν το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (AARE) της προτεινόμενης σχέσης στην πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου είναι της τάξης του 13.20%. Οι αντίστοιχες συσχετίσεις των Petrosky & Farshad και του Standing παρουσίασαν σφάλματα 17.60 και 28.20%, αντίστοιχα.

5.5.3 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου

Η σχέση η οποία εκτιμά το ιξώδες του πετρελαίου το οποίο περιέχει διαλυμένο αέριο αλλά δεν είναι κορεσμένο είναι η εξής:

$$\mu_o = \mu_{ob} + a_6(p - pb)10^4 \quad (5.8)$$

όπου $A = \alpha_1 + \alpha_2 \log(\mu_{ob}) + \alpha_3 \log(Rs) + \alpha_4 \mu_{ob} \log(Rs) + \alpha_5(p - pb)$

μ_{ob} : Ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου (cp)

μ_o : Ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου (cp)

Rs : λόγος διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο στο σημείο φουσαλίδας (scf/STB)

pb : πίεση στο σημείο φουσαλίδας (psia)

p : πίεση ταμιευτήρα (psia)

Στον Πίνακα 5.14 δίδονται οι αριθμητικοί συντελεστές της συσχέτισης:

5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Πίνακας 5.14. Συντελεστές για τη συσχέτιση Dindoruk & Christman του υποκορεσμένου πετρελαίου.

Συντελεστής	Τιμή
a1	0.776644115
a2	0.987658646
a3	-0.190564677
a4	0.009147711
a5	-0.000019111
a6	0.000063340

Σύμφωνα με όσα αναφέρουν το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (AARE) της προτεινόμενης σχέσης στην πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου είναι 5.99%, έναντι του 8.90% και 6.88% των Petrosky & Farshad και του Standing, αντίστοιχα, με τους οποίους πραγματοποιούν σύγκριση των αποτελεσμάτων.

5.6 Η συσχέτιση των Bergman & Sutton

Οι ερευνητές Bergman & Sutton, εργαζόμενοι στις εταιρίες BP America και Marathon Oil Company αντίστοιχα, ανέπτυξαν μια σειρά εμπειρικών συσχετίσεων για την πρόρρηση του ιξώδους του πετρελαίου. Συγκεκριμένα, το 2006 (Bergman, et al., 2006) παρουσίασαν τη συσχέτιση για το ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου και ένα χρόνο αργότερα, το 2007, ανέπτυξαν δύο ακόμη συσχετίσεις, μία για το ιξώδες του dead oil και μία δεύτερη για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου, ολοκληρώνοντας αυτή τη μελέτη. Εντούτοις, δεν βρέθηκε αναφορά των ερευνητών που να προτείνει να χρησιμοποιείται η μία συσχέτιση ως παράμετρος εισόδου για την άλλη συσχέτιση.

5.6.1 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil

Για τη διερεύνηση της ακρίβειας διαφόρων δημοσιευμένων συσχετίσεων και τη δυνατότητα ανάπτυξης μιας νέας και βελτιωμένης σχέσης, οι ερευνητές δημιούργησαν ευρεία βάση δεδομένων. Συνολικά 9837 μετρήσεις ιξώδους από 3047 υγρά δείγματα βρίσκονται στη βάση δεδομένων τους, η οποία αφορά σε δείγματα από τους βασικά παραγωγικά κοιτάσματα ανά τον κόσμο. Για πολλά από τα δείγματα που συμπεριλαμβάνονται πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ιξώδους σε διάφορες θερμοκρασίες, το οποίο είναι σημαντικό για την επαλήθευση των μετρήσεων και την απόδοση της συμπεριφοράς του ιξώδους στις διάφορες συνθήκες.

5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Στον Πίνακα 5.15 παρουσιάζεται το εύρος του πεδίου εφαρμογής της συσχέτισης για το ιξώδες του dead oil:

Πίνακας 5.15. Πεδίο εφαρμογής της συσχέτισης των Bergman & Sutton για το ιξώδες του dead oil.

Ιδιότητα	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
Πυκνότητα πετρελαίου, ($^{\circ}API$)	0.45	135.90
Παράγοντας Watson (Kw)	10.80	14.25
Density (at temperature) (g/cc)	0.39	1.06
Ιξώδες του dead oil (cp)	0.06	$1.36 \cdot 10^{12}$
Θερμοκρασία ταμιευτήρα ($^{\circ}F$)	-40	500

Ο Bergman (Whitson, et al., 2000) υπέδειξε ότι η τιμή του ιξώδους του dead oil μπορεί να συσχετιστεί γραμμικά με τη θερμοκρασία χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$\ln[\ln(\mu_{od} + 1)] = A + B \ln(T + 310) \quad (5.9)$$

$$\text{όπου } A = 22.33 - 0.194 \gamma_{API} + 0.00033\gamma_{API}^2$$

$$B = -3.20 + 0.0185 \gamma_{API}$$

γ_{API} : πυκνότητα API του πετρελαίου ($^{\circ}API$)

μ_{od} : Ιξώδες του deal oil (cp)

Στη συνέχεια, με την βοήθεια του ερευνητή Sutton διευκρινίστηκε πως οι αριθμητικοί συντελεστές 310 και 1 είναι δυνατόν να ποικίλλουν κατά τη διάρκεια μιας μη γραμμικής παλινδρόμησης ώστε να επιτυγχάνεται μείωση του σφάλματος της πρόβλεψης της παραπάνω σχέσης. Μάλιστα ο Sutton πρότεινε τη διαφοροποίηση αυτών των συντελεστών (δημιουργώντας τη συσχέτιση Bergman & Sutton) σε 302.7 και 0.974 αντίστοιχα. Σύμφωνα με όσα αναφέρουν οι συγγραφείς, το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (%AARE) της συσχέτισης του Bergman ήταν 0.93% και των Bergman & Sutton, 0.84%. Σύμφωνα με τους ερευνητές οι συσχετίσεις αυτές συμπεριφέρονται παρόμοια ως προς τα σφάλματα που παρουσιάζουν.

5.6.2 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου

Για την αξιολόγηση διαφόρων δημοσιευμένων συσχετίσεων για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου από αέριο πετρελαίου, οι ερευνητές το 2007 δημιούργησαν μια βάση δεδομένων που αποτελείται από 1849 πετρελαϊκά δείγματα και 12474 πειραματικά σημεία που προήλθαν από διάφορες πηγές ανά τον κόσμο. Στα

5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

δεδομένα αυτά στηρίχτηκε και η ανάπτυξη μιας νέας βελτιωμένης συσχέτισης, ενώ το εύρος των τιμών των παραμέτρων που καλύπτει η συσχέτιση αυτή δίδεται στο Πίνακα 5.16:

Πίνακας 5.16. Πεδίο εφαρμογής της συσχέτισης των Bergman & Sutton για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου.

Ιδιότητα	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
Πυκνότητα πετρελαίου ($^{\circ}API$)	6	61.70
R_s (scf/STB)	3	6525
Ιξώδες Saturated Oil (cp)	0.05	3285
Πίεση (psia)	30	9649
Διοξείδιο άνθρακα (mole %)	0	50.60
Αζωτο (mole %)	0	46.60
Υδροθείο (mole %)	0	33.50
Πυκνότητα αερίου	0.55	2.41
Θερμοκρασία ($^{\circ}F$)	63	342
Πίεση κορεσμού (psia)	66	10300
Παράγοντας Watson Kw	10.98	12.48
Ιξώδες dead oil (cp)	0.21	3285

Διάφορες δημοσιευμένες συσχέτισεις χρησιμοποιούν την προσέγγιση των Chew & Connally (Chew, et al., 1959) σαν βασική μορφή. Η ίδια σχέση επιλέχθηκε και εδώ και η συσχέτιση που προέκυψε είναι η εξής:

$$\mu_{ob} = A \mu_{od}^B \quad (5.10)$$

$$\text{όπου } A = \frac{1}{1 + \left(\frac{RS}{a_1}\right)^{a_2}}$$

$$B = a^3 + \frac{(1-a_3)}{1 + \left(\frac{RS}{a_4}\right)^{a_5}}$$

$$a_1 = 344.198 \quad a_2 = 0.855344$$

$$a_3 = 0.382323 \quad a_4 = 567.953$$

$$a_5 = 0.819326$$

μ_{od} : Ιξώδες του deal oil (cp)

μ_{ob} : Ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου (cp)

Σύμφωνα με τους ερευνητές οι συντελεστές a_1 - a_5 πήραν την τελική τους μορφή τον Απρίλιο του 2009.

Η ανάπτυξη των σχέσεων των συντελεστών A και B έγινε με τη χρήση του TableCurve, το οποίο αποτελεί ένα λογισμικό πακέτο για γραμμική και μη γραμμική

5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

προσαρμογή καμπυλών με τη χρήση των διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων. Σύμφωνα με όσα αναφέρουν οι συγγραφείς, το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (%AARE) της προτεινόμενης σχέσης στην πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου είναι 12.40%.

Η συγκεκριμένη συσχέτιση αναφέρεται εδώ και αξιολογείται δεδομένου ότι αποτελεί τη μοναδική συσχέτιση που εμπεριέχει στο πεδίο εφαρμογής της όρια περιεχόμενου υδρόθειου στη σύσταση του πετρελαϊκού μίγματος. Το συγκεκριμένο όριο είναι πολύ σημαντικό λόγω της σημαντικής σύστασης σε υδρόθειο των πετρελαϊκών ρευστών που εξετάζονται. Αναφέρεται ότι η ζώνη A1 του Πρίνου διαθέτει ποσοστό της τάξης του 40% mole σε υδρόθειο το οποίο είναι υψηλότερο του πάνω ορίου της συσχέτισης. Τα λοιπά ρευστά είναι εντός των ορίων.

5.6.3 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου

Σε αυτή την περίπτωση, δημιουργήθηκε μια νέα βάση δεδομένων που αποτελείται από 1399 πετρελαϊκά δείγματα και 10248 πειραματικά σημεία για την αξιολόγηση των υφιστάμενων συσχετίσεων αλλά και την ανάπτυξη νέας βελτιωμένης συσχέτισης. Το εύρος των τιμών των παραμέτρων που καλύπτει η συσχέτιση αυτή δίνεται στο Πίνακα 5.17:

Πίνακας 5.17. Πεδίο εφαρμογής της συσχέτισης των Bergman & Sutton για το ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου.

Ιδιότητα	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
Πυκνότητα πετρελαίου ($^{\circ}API$)	6	61.20
R_s (scf/STB)	0	4630.60
Ιξώδες κορεσμένου πετρελαίου (cp)	0.07	24180
Πίεση (psia)	115	25015
Pressure differential (psia)	9	25000
Ιξώδες dead oil (cp)	0.20	14200
Ιξώδες στην πίεση κορεσμού (cp)	0.06	14200
Θερμοκρασία ($^{\circ}F$)	32	425
Πίεση κορεσμού (psia)	14.50	11195

Η προτεινόμενη συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου είναι η εξής:

$$\mu_o = \mu_{ob} e^{a(p-pb)^b} \quad (5.11)$$

$$\alpha = 6.5698 \times 10^{-7} \ln(\mu ob)^2 - 1.48211 \times 10^{-5} \ln(\mu ob) + 2.27877 \times 10^{-4}$$

$$\beta = 2,24623 \times 10^{-2} \ln(\mu ob) + 0.873204$$

μob : Ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου (cp)

μo : Ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου (cp)

p_b : πίεση στο σημείο φουσαλίδας (psia)

p : πίεση ταμειυτήρα (psia)

Η αρχική μορφή της συσχέτισης βασίζεται στη συσχέτιση του Barus το 1893, ενώ οι συντελεστές α και β , δημιουργήθηκαν από τους Bergman & Sutton με τη χρήση μίας ρουτίνας μη γραμμικής παλινδρόμησης. Σύμφωνα με όσα αναφέρουν οι συγγραφείς, το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (%AARE) της προτεινόμενης σχέσης στην πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου είναι κατηγοριοποιημένο ως εξής: 3.88% για το σύνολο της βάσης δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε, της τάξης του 3-4% για σημείο φουσαλίδας περισσότερο και λιγότερο από 50 psia, 3.64% για θερμοκρασίες πάνω από 100°F και 5.56% για μικρότερες θερμοκρασίες, περίπου 3% για ιξώδες στην πίεση φουσαλίδας 0-5cp, περίπου 6.5% για ιξώδες στην πίεση φουσαλίδας μεγαλύτερο από 5cp και τέλος 7.71% για pressure differential (δηλαδή P-Pb) μεταξύ 10000-25000 psi .

5.7 Η συσχέτιση των Elsharkawy & Alikhan

Η αδυναμία αρκετών συσχετίσεων από τη βιβλιογραφία (όπως για παράδειγμα εκείνης των Beggs & Robinson (Beggs, et al., 1975)) να εκτιμήσουν το ιξώδες σε πετρελαϊκά ρευστά με προέλευση από τη Μέση Ανατολή οδήγησε τους Elsharkawy & Alikhan (Elsharkawy, et al., 1999) στην ανάπτυξη νέων συσχετίσεων. Οι συσχετίσεις αυτές εφαρμόζονται για τον προσδιορισμό του ιξώδους του dead oil, του κορεσμένου πετρελαίου και του υποκορεσμένου πετρελαίου. Για την ανάπτυξη των συσχετίσεων χρησιμοποιήθηκαν ως δείγματα αρκετά πετρελαϊκά ρευστά από τη Μέση Ανατολή. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα PVT από 254 δείγματα πετρελαϊκών ρευστών. Τα δεδομένα αφορούν σε μετρήσεις του λόγου του διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο (R_s) και του ιξώδους του πετρελαίου σε διάφορες πιέσεις πάνω και κάτω από το σημείο φουσαλίδας σε θερμοκρασία ταμειυτήρα.

5.7.1 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil

Ελέγχθηκαν αρκετές μαθηματικές σχέσεις στην προσπάθεια συσχέτισης του ιξώδους του dead oil (μ_{od}) με την πυκνότητα του πετρελαίου και τη θερμοκρασία του ταμιευτήρα (T). Τα καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν με την παρακάτω έκφραση από ανάλυση παλινδρόμησης :

$$\mu_{od} = \{10^X - 1\} \quad (5.12)$$

όπου $X = 10^y$

$$\text{και } y = 2.16294 - 0.02525 \cdot API - 0.68875 \cdot \log_{10}(T)$$

API : πυκνότητα API του πετρελαίου ($^{\circ}API$)

T : θερμοκρασία ταμιευτήρα ($^{\circ}F$)

μ_{od} : Ιξώδες του deal oil (cp)

Σύμφωνα με όσα αναφέρουν το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (%AARE) της προτεινόμενης σχέσης στην πρόρρηση του ιξώδους του dead oil είναι 19.2% σε σύγκριση με τη συσχέτιση των Beggs & Robinson που χρησιμοποιούν και παρουσιάζει αντίστοιχο σφάλμα 21.2%. Ο Πίνακας 5.18 παρουσιάζει το εύρος των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της συσχέτισης:

Πίνακας 5.18. Πεδίο εφαρμογής της συσχέτισης των Elsharkawy & Alikhan για το ιξώδες του dead oil.

Ιδιότητα	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
Πυκνότητα πετρελαίου, ($^{\circ}API$)	19.90	48
Θερμοκρασία ταμιευτήρα ($^{\circ}F$)	100	300
Ιξώδες του dead oil (cp)	0.60	33.70

5.7.2 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου

Για τη δημιουργία της συγκεκριμένης συσχέτισης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ανάλυσης παλινδρόμησης (regression analysis). Τα καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν από το παρακάτω εμπειρικό μοντέλο:

$$\mu_{ob} = A(\mu_{od})^B \quad (5.13)$$

$$\text{όπου } A = 1241.932 (Rs + 641.026)^{-1.12410}$$

$$\text{και } B = 1768.841 (Rs + 1180.335)^{-1.06622}$$

μ_{od} : Ιξώδες του deal oil (cp)

5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

R_s : λόγος διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο (scf/STB)

μ_{ob} : Ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου (cp)

Σύμφωνα με όσα αναφέρουν το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (%AARE) της προτεινόμενης σχέσης στην πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου είναι 18.6% ενώ γίνεται σύγκριση με τη συσχέτιση των Beggs & Robinson η οποία παρουσιάζει αντίστοιχο σφάλμα 21.8%.

Ο Πίνακας 5.19 παρουσιάζει το εύρος των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της συσχέτισης:

Πίνακας 5.19. Πεδίο εφαρμογής της συσχέτισης των Elsharkawy & Alikhan για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου.

Ιδιότητα	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
Πίεση στο σημείο φυσαλίδας (psi)	100	3700
R_s (scf/STB)	10	3600
Ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου (cp)	0.05	20.89

5.6.3 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου

Δεδομένου ότι δεν υπάρχει διαλυμένο αέριο στο πετρέλαιο πάνω από το σημείο φυσαλίδας, η πίεση αποτελεί τη βασική μεταβλητή που επηρεάζει την μεταβολή του ιξώδους. Αρκετές από τις υπάρχουσες συσχετίσεις στη βιβλιογραφία δημιουργήθηκαν από την ανάγκη συσχέτισης του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου με εκείνο του κορεσμένου και την διαφορά (pressure differential) $p - p_b$, καθώς παρατηρήθηκε ότι τα διαγράμματα ($\mu_o - \mu_{ob}$) συναρτήσεως του $p - p_b$ αποτελούν ευθείες γραμμές ανάλογα με την προέλευση των δειγμάτων. Οι κλίσεις των ευθειών αυτών φάνηκε ότι είναι συνάρτηση του ιξώδους του dead oil, του κορεσμένου πετρελαίου και της πίεσης φυσαλίδας.

Η παρακάτω σχέση απέδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα ύστερα από ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis):

$$\mu_o = \mu_{ob} + 10^{-2.0771}(p - p_b)(\mu_{od}^{1.19279}\mu_{ob}^{-0.40712}\mu_{ob}^{0.7941}) \quad (5.14)$$

5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

όπου ***μob***: Ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου (cp)

μo: Ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου (cp)

pb: πίεση στο σημείο φυσαλίδας (psia)

p: πίεση ταμιευτήρα (psia)

μod: Ιξώδες του deal oil (cp)

Σύμφωνα με όσα αναφέρουν το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (%AARE) της προτεινόμενης σχέσης στην πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου είναι 4.9% σε σχέση με τη συσχέτιση των Labedi και Vazquez & Beggs που χρησιμοποιούν για σύγκριση και παρουσιάζουν αντίστοιχα σφάλματα 7.5% και 11.4%, αντίστοιχα. Ο Πίνακας 5.20 παρουσιάζει το εύρος των τιμών των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της συσχέτισης:

Πίνακας 5.20. Πεδίο εφαρμογής της συσχέτισης των Elsharkawy & Alikhan για το ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου.

Ιδιότητα	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή
Πίεση πάνω από το σημείο φυσαλίδας (psi)	1287	10000
Ιξώδες υποκορεσμένου πετρελαίου (cp)	0.20	5.70

5.8 Η συσχέτιση των Vazquez & Beggs

Ο σκοπός της έρευνας των Vazquez & Beggs (Vazquez, et al., 1980) ήταν η ανάπτυξη βελτιωμένων εμπειρικών συσχετίσεων που θα αναπλήρωναν τις ήδη υπάρχουσες. Πολλές από αυτές τις συσχετίσεις αναπτύχθηκαν βασιζόμενες σε μικρό πεδίο εφαρμογής. Δεδομένου ότι χρησιμοποιούνταν και πέραν της εμβέλειας του εύρους αυτών των δεδομένων, υπήρξε η ανάγκη δημιουργίας μιας νέας ευρείας βάσης δεδομένων.

Η παρούσα μελέτη ολοκληρώθηκε με την συγκέντρωση περισσότερων από 600 εργαστηριακών αναλύσεων PVT, οι οποίες προήλθαν από όλο τον κόσμο. Τα δεδομένα περιλάμβαναν μεγάλο εύρος τιμών για την πίεση, τη θερμοκρασία ταμιευτήρα και διάφορες ιδιότητες, καλύπτοντας πάνω από 6000 μετρήσεις ***Rs***, ***Bo*** και ***μo*** (ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου) σε διάφορες πιέσεις. Στη συνέχεια, η ανάπτυξη των συσχετίσεων τους πραγματοποιήθηκε με ανάλυση παλινδρόμησης.

5.8.1 Συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου

Η εμπειρική συσχέτιση που αναπτύχθηκε για την πρόρρηση του ιξώδους πετρελαϊκών δειγμάτων πάνω από την πίεση κορεσμού είναι συνάρτηση της πίεσης, της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα, της πυκνότητας του πετρελαίου καθώς και της πυκνότητας του αερίου. Καθώς η πίεση αυξάνεται σε ένα υποκορεσμένο πετρέλαιο, το ιξώδες του επίσης αυξάνεται. Το ιξώδες σε πιέσεις πάνω από το σημείο φυσαλίδας εκφράζεται ως συνάρτηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου, της πίεσης και του σημείου φυσαλίδας. Οι ερευνητές προτείνουν τη χρήση της συσχέτισης των Beggs & Robinson (Beggs, και συν., 1975) για την εκτίμηση της τιμής μ_{ob} και τη χρήση της σαν μεταβλητή εισαγωγής. Η συσχέτιση που δημιουργήθηκε ακολουθεί παρακάτω και η οποία διαφοροποιείται σε σχέση με τις λοιπές συσχετίσεις δεδομένου ότι συμπεριλαμβάνει το λόγο της πίεσης προς την πίεση φυσαλίδας:

$$\mu_o = \mu_{ob}(p/p_b)^m \quad (5.15)$$

όπου $m = C_1 p^{C_2} \exp(C_3 + C_4 p)$

και $C_1 = 2.6$

$C_2 = 1.187$

$C_3 = -11.513$

$C_4 = -8.98 \times 10^{-5}$

μ_{ob} : Ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου (cp)

μ_o : Ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου (cp)

p_b : πίεση στο σημείο φυσαλίδας (psia)

p : πίεση ταμιευτήρα (psia)

Στο άρθρο τους δεν καταγράφεται ποσοστό σφάλματος που παρουσιάζει η συσχέτιση τους στην πρόρρηση του ιξώδους. Αναφορά υπάρχει στο άρθρο των Elsharkawy & Alikhan ως μέσο σχετικό σφάλμα, το οποίο είναι -7.5%.

5.9 Η συσχέτιση του Beal

Το 1946, ο Carlton Beal (Carlton, 1946) παρουσίασε έναν αριθμό χρήσιμων διαγραμμάτων για την μετατροπή διάφορων μονάδων μέτρησης του ιξώδους σε centipoises (cp). Επιπλέον, το άρθρο που δημοσίευσε περιλάμβανε γραφήματα για την εκτίμηση του ιξώδους του αέρα, του νερού, του φυσικού αερίου καθώς και του πετρελαίου, όπου αυτό ήταν εφικτό.

Τα διαγράμματα των συσχετίσεων που δημιουργήθηκαν για την εκτίμηση του ιξώδους του πετρελαίου και της διαλυτότητάς του σε πίεση και θερμοκρασία πεδίου προέκυψαν από τη μελέτη 953 πετρελαϊκών δειγμάτων με προέλευση τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και κυρίως την Καλιφόρνια.

Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι το ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου σε διάφορες συνθήκες ταμειυτήρα μπορεί να προβλεφθεί με μέση απόκλιση 24.2% ενώ το ιξώδες του κορεσμένου με απόκλιση 2.7%.

Εξαιτίας της μεγάλης ποικιλίας στη σύνθεση διαφόρων πετρελαϊκών ρευστών, η εκτίμηση του ιξώδους με τη χρήση απλών συσχετίσεων δεν είναι εξαιρετικά ακριβής. Η πυκνότητα του πετρελαίου και η θερμοκρασία αποτελούν τους πιο κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζουν το ιξώδες. Ο Johnston (Johnston, 1941) και ο Sherborne (Johnston, et al., 1943) δημιούργησαν ένα διάγραμμα (Σχήμα 5.1) ιξώδους (στους 100°F) – πυκνότητας *API*. Η συσχέτιση αυτή εμπεριέχει, εν μέρει, αποτελέσματα του Trostel (Trostel, 1940) ο οποίος παρουσίασε μια σχέση ανάμεσα στην πυκνότητα *API* και το ιξώδες (στους 100°F) πάνω από 200 δειγμάτων πετρελαίου με προέλευση την Καλιφόρνια.

Για την εκτίμηση του ιξώδους του πετρελαίου το οποίο δεν περιέχει αέριο, ο Beal πρότεινε τη χρήση ενός διαγράμματος (Σχήμα 5.2) που λειτουργεί συναρτήσει της πυκνότητας *API* του ρευστού και της θερμοκρασίας του ταμειυτήρα.

Πέραν της γραφικής εκτίμησης του ιξώδους, ο Standing (Standing, 1981) πρότεινε τη μαθηματική σχέση που προκύπτει από τα Σχήματα 5.1 και 5.2. Ως εκ τούτου, για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil αναπτύχθηκε η εξής σχέση:

$$\mu_{od} = \left(0.32 + \frac{1.8(10^7)}{API^{4.53}}\right) \left(\frac{360}{T+200}\right)^\alpha \quad (5.16)$$

όπου $\alpha = 10^{(0.43 + \frac{8.33}{API})}$

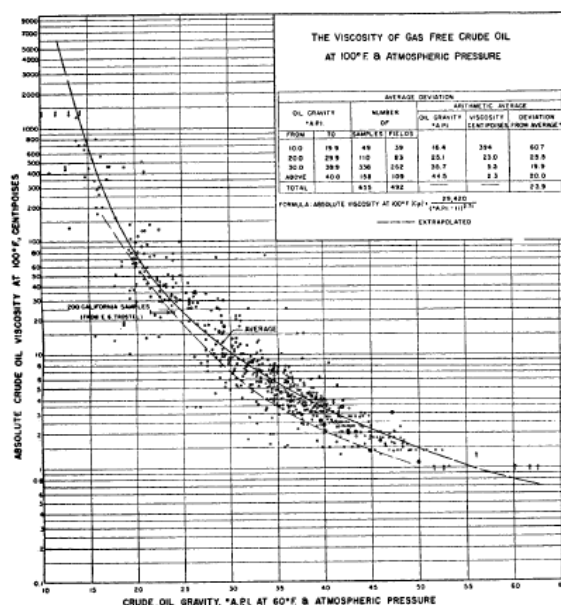
5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

API: πυκνότητα API του πετρελαίου ($^{\circ}API$)

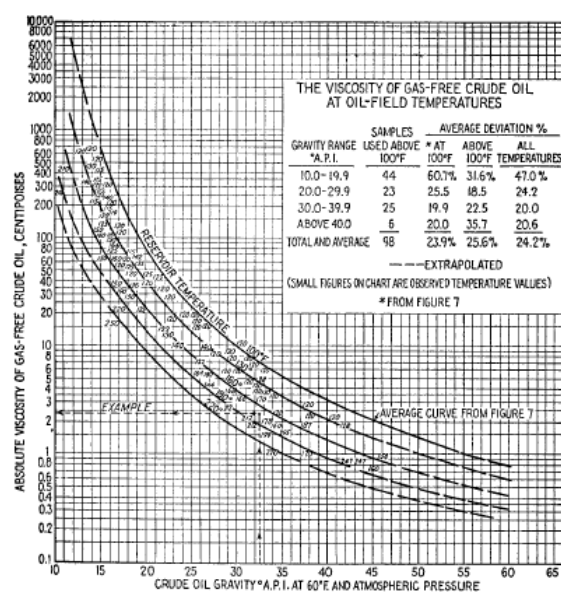
T : θερμοκρασία ταμιευτήρα ($^{\circ}F$)

μ_{od} : Ιξώδες του deal oil (cp)

Η προτεινόμενη συσχέτιση εκτιμά το ιξώδες με ικανοποιητική ακρίβεια. Δεδομένου ότι η πυκνότητα των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν σαν βάση δεδομένων κυμαίνεται μεταξύ 15-55 $^{\circ}API$, εξαιρώντας εκείνα με τη χαμηλότερη πυκνότητα ενισχύεται η αξιοπιστία των εκτιμήσεων.



Σχήμα 5.1. Ιξώδες του dead oil. (Carlton, 1946)



Σχήμα 5.2 Ιξώδες πετρελαίου το οποίο δεν περιέχει αέριο.

5.10 Η συσχέτιση του Glaso

Οι εμπειρικές συσχετίσεις πρόρρησης των ογκομετρικών παραμέτρων PVT χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην τεχνολογία μηχανικής πετρελαίων. Η μεγάλη διακύμανση των παραμέτρων αυτών οδήγησε τον ερευνητή Glaso (Glaso, 1980) στην ανάπτυξη τριών συσχετίσεων (p_b, B_{ob}, B_t). Για τη δημιουργία τους χρησιμοποιήθηκαν έξι δείγματα πετρελαϊκών ρευστών με προέλευση τη Βόρεια Θάλασσα. Για αυτά τα δείγματα έγινε ανάλυση PVT και μέτρηση του ιξώδους σε διάφορες θερμοκρασίες και πιέσεις. Στο συγκεκριμένο άρθρο του Glaso, σε μια απόπειρα διόρθωσης της πυκνότητας API ως προς ποσοστό των παραφινών που διαθέτει το δείγμα, προτείνεται μια συσχέτιση για το ιξώδες του dead oil, η οποία, σύμφωνα με τον Ahmed (Ahmed, 2000), αξιολογείται εντός των τριών καλύτερων και ακριβέστερων για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil. Η συσχέτιση έχει την εξής μορφή:

$$\mu_{od} = c(\log \gamma_{API})^d \quad (5.17)$$

όπου $c = 3.141(10^{10})(T)^{-3.444}$

$$d = 10.313(\log T) - 36.447$$

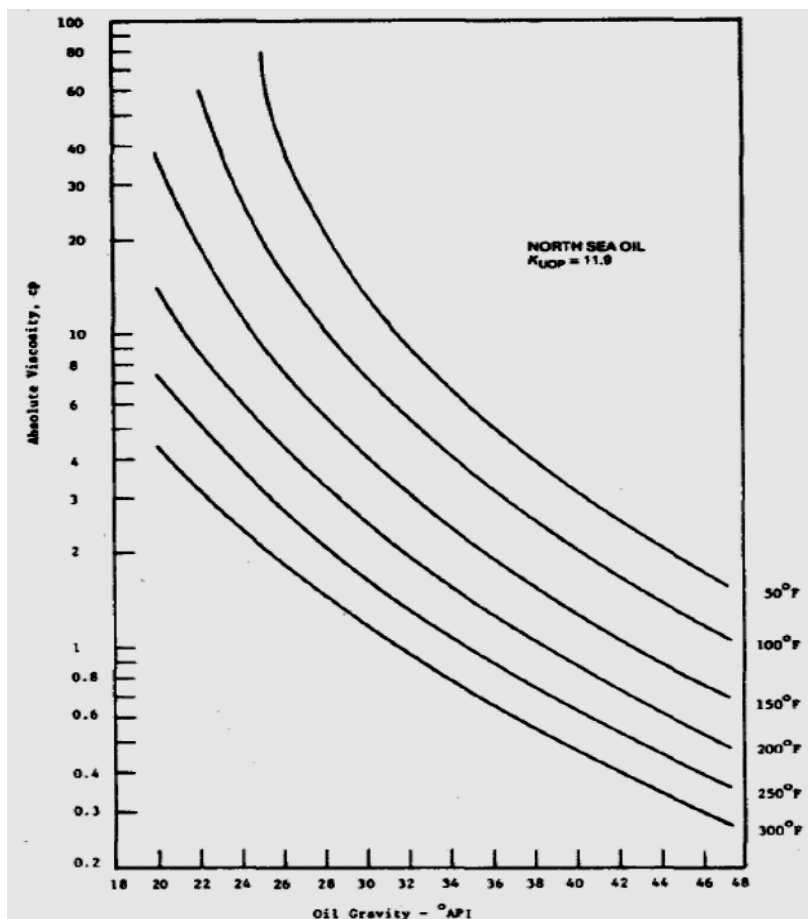
γ_{API} : πυκνότητα API του πετρελαίου ($^{\circ}API$)

T : θερμοκρασία ταμιευτήρα ($^{\circ}F$)

μ_{od} : Ιξώδες του deal oil (cp)

5. ΧΡΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Η μαθηματική σχέση προέκυψε από ένα διάγραμμα το οποίο παρουσιάζει την σύνδεση ανάμεσα στο ιξώδες του dead oil, την πυκνότητα API και τη θερμοκρασία του ταμειυτήρα (κυμαίνεται μεταξύ 50-300°F) και το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3 Ιξώδες πετρελαίου που δεν περιέχει αέριο σε ατμοσφαιρική πίεση (dead oil) συναρτήσει της πυκνότητας API και της θερμοκρασίας.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

6.1 Εισαγωγή

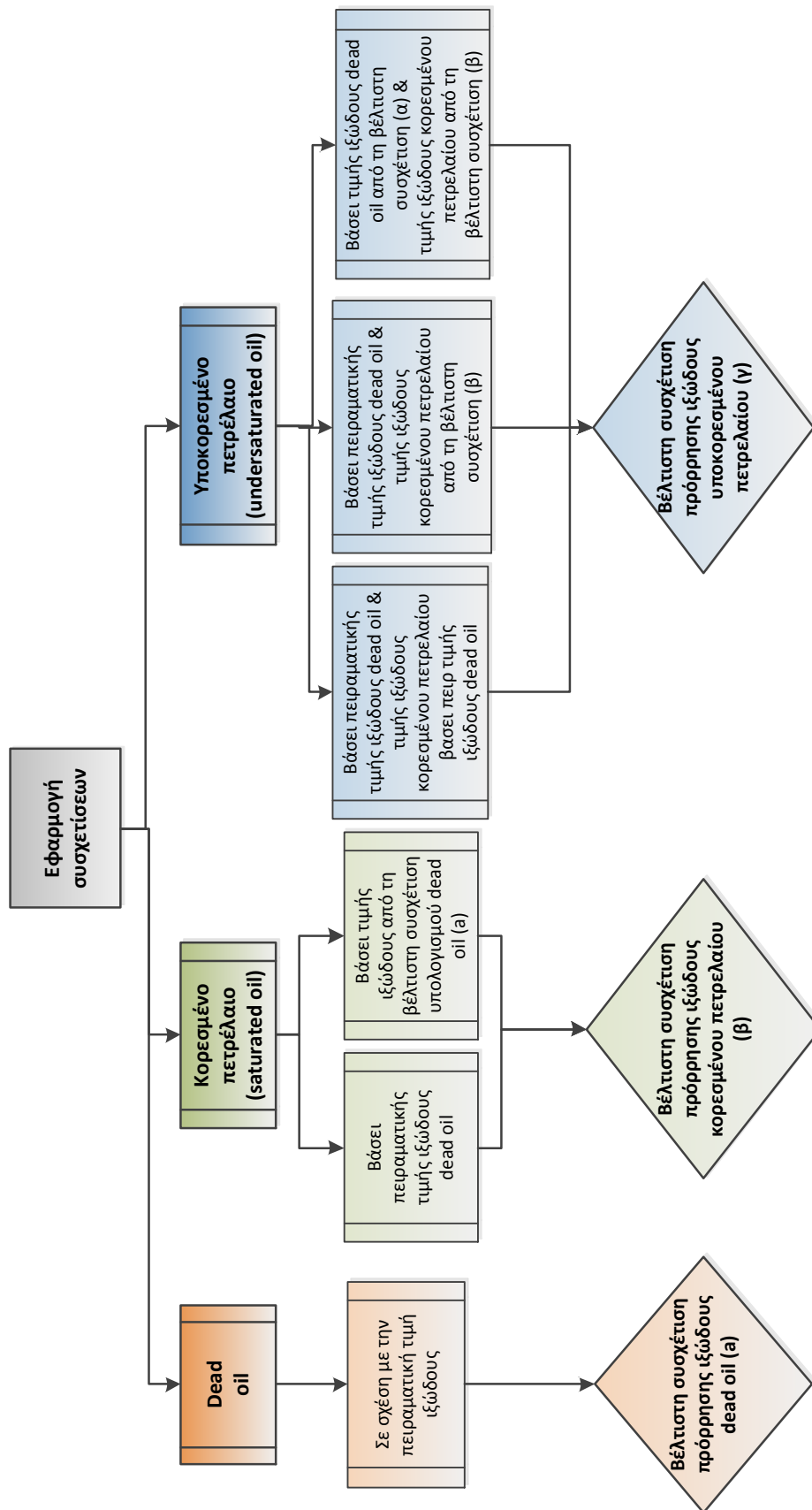
Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάστηκαν οι συσχετίσεις που επιλέχθηκαν να εφαρμοστούν στα πετρελαϊκά ρευστά του ελλαδικού χώρου για να αξιολογηθεί η ικανότητα τους σχετικά με την πρόρρηση του ιξώδους των ρευστών αυτών. Δεδομένου ότι όλες οι συσχετίσεις, είτε οι επιλεγείσες είτε και οι υπόλοιπες, είναι προσαρμοσμένες στην εκτίμηση του ιξώδους του dead oil, του κορεσμένου και του υποκορεσμένου πετρελαίου με διαφορετικές εκφράσεις σε κάθε περίπτωση, η διερεύνηση της συμπεριφοράς τους εξετάζεται στη βάση των συνθηκών που βρίσκεται το πετρελαϊκό μίγμα ώστε να ταυτίζεται με την ανωτέρω κατηγοριοποίηση. Όπως θα παρατηρηθεί και στη συνέχεια, οι συσχετίσεις που συμπεριφέρονται με ακρίβεια σε κάποια από τις παραπάνω περιπτώσεις δεν είναι απαραίτητο να συμπεριφέρονται ανάλογα και στις άλλες δύο.

Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζονται τα εναλλακτικά σενάρια που εξετάστηκαν στην κάθε κατηγορία πετρελαϊκού ρευστού, δηλαδή για κορεσμένο ή υποκορεσμένο ρευστό καθώς και για τη μοναδική περίπτωση του dead oil, το οποίο υπεισέρχεται ως παράμετρος στις λοιπές περιπτώσεις (κορεσμένου και υποκορεσμένου πετρελαίου).

Για τη σύγκριση των πειραματικών τιμών με εκείνες που εκτιμώνται από τις συσχετίσεις, η αξιολόγηση βασίζεται στο μέσο σχετικό σφάλμα. Σε συμφωνία με τον αντίστοιχο τρόπο ορισμού του στη σχετική βιβλιογραφία και για λόγους ενιαίας σύγκρισης ορίζεται ως εξής:

$$\%ARE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_{calculated} - y_{experimental}}{y_{experimental}}$$

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ



Σχήμα 6.1: Μεθοδολογία αξιολόγησης των συσχετίσεων πρόρρησης του ιξώδους ανά φάση πετρελαϊκού ρευστού (dead oil, κορεσμένο και υποκορεσμένο πετρέλαιο).

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Ως μέσο σχετικό σφάλμα (%ARE) ορίζεται ο αριθμητικός μέσος του συνόλου των σχετικών σφαλμάτων (McCain, 1990). Το σχετικό σφάλμα στην παρούσα εργασία υπολογίζεται από το ποσοστιαίο άθροισμα των λόγων των διαφορών της πειραματικής τιμής του ιξώδους της εκάστοτε συσχέτισης και της αντίστοιχης εκτιμώμενης τιμής προς την ίδια πειραματική τιμή του ιξώδους δια το πλήθος n των τιμών.

Επιπλέον, χρησιμοποιείται το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα το οποίο υπολογίζεται από την μαθηματική έκφραση:

$$\%AARE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{\text{calculated}} - y_{\text{experimental}}}{y_{\text{experimental}}} \right|$$

Σύμφωνα με τον McCain (McCain, 1990), ένας μικρό ποσοστό %ARE υποδεικνύει ότι οι τιμές που εκτιμά μια συσχέτιση είναι ακριβείς. Όσο αφορά στο %AARE, ένα χαμηλό ποσοστό υποδηλώνει μια καλή συσχέτιση η οποία έχει βασιστεί σε ποιοτικά δεδομένα. Αντίθετα, ένα υψηλό ποσοστό για το AARE είναι δείγμα για την χαμηλή ποιότητα της συσχέτισης (ελλείψεις στην προτεινόμενη μαθηματική έκφραση). Γενικότερα, τα υψηλά ποσοστά AARE υποδηλώνουν τη χρήση δεδομένων χαμηλής ποιότητας.

6.2 Εκτίμηση του ιξώδους του dead oil

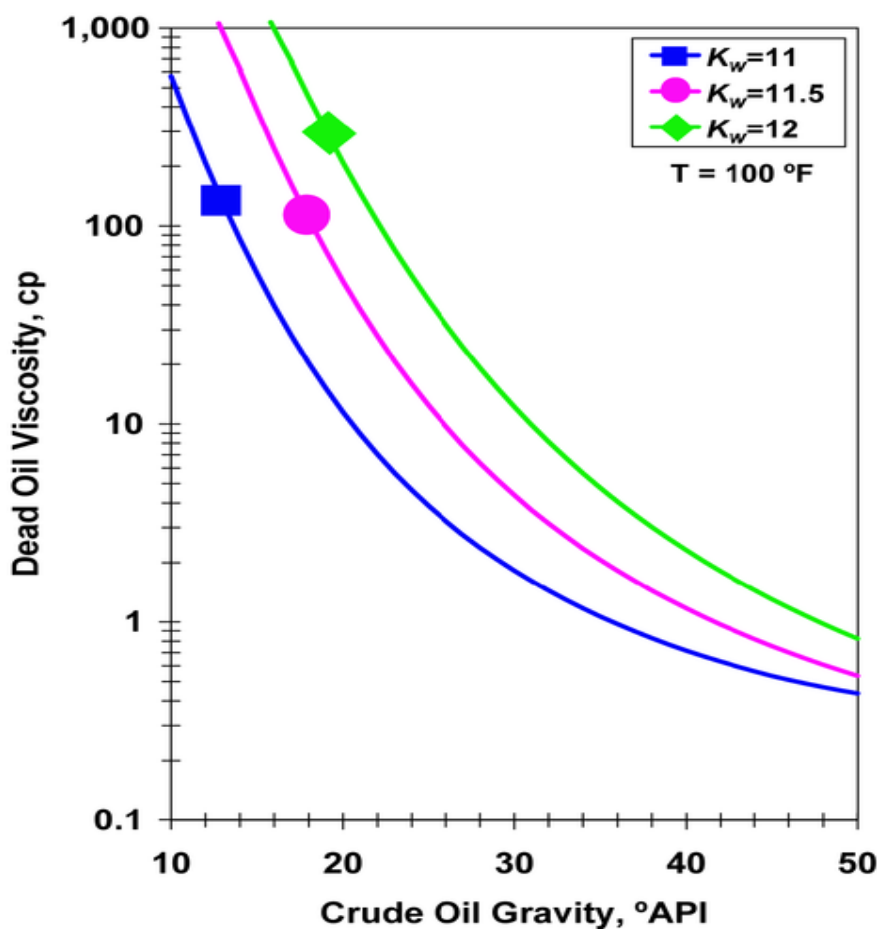
Το ιξώδες του dead oil, όπως ορίστηκε στο Κεφάλαιο 4, είναι το ιξώδες του πετρελαίου σε ατμοσφαιρική πρακτικά πίεση και στη θερμοκρασία του ταμιευτήρα. Σε αυτές τις συνθήκες θεωρείται ότι δεν υπάρχει πλέον διαλυμένο αέριο σε αυτό.

Ως παράμετρος εκτιμάται από το σύνολο της βιβλιογραφίας που εξετάστηκε ότι είναι πολύ δύσκολο να προσεγγιστεί με τη χρήση εμπειρικών συσχετίσεων. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην επίδραση της σύστασης του πετρελαίου και για το λόγο αυτό συνίσταται να συνδυάζεται με τη χρήση άλλων παραμέτρων χαρακτηρισμού του πετρελαίου, οι οποίες προσδιορίζουν κατά κύριο λόγο την περιεκτικότητά του σε παραφινικές, ναφθενικές και αρωματικές ενώσεις. Τέτοια αποτελέσματα μπορεί να ληφθούν πειραματικά με την υλοποίηση αντίστοιχων PNA (paraffinic/ naphthenic/ aromatic analysis) αναλύσεων στο πλαίσιο μιας PVT εργαστηριακής μελέτης. Ένας τέτοιος παράγοντας αποτελεί ο παράγοντας χαρακτηρισμού Watson K_w που προτάθηκε το 1933 από τους Watson & Nelson (Watson, et al., 1935) και ορίζεται ως

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

ο λόγος μεταξύ του μέσου σημείου βρασμού και της ειδικής πυκνότητας με σκοπό να δίνει μία ένδειξη της χημικής φύσης των διαφόρων κλασμάτων υδρογονανθράκων. Ως παράγοντας παρουσιάζει την τάση να διατηρείται σχετικά σταθερός για χημικά παρόμοιους υδρογονάνθρακες. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι ένας παράγοντας χαρακτηρισμού μεγαλύτερου ή ίσου του 12,5 υποδεικνύει υδρογονάνθρακα με σημαντικό ποσοστό παραφινών, ενώ χαμηλότερες τιμές υποδεικνύουν την ύπαρξη και ναφθενικών ή αρωματικών ενώσεων. Οι υδρογονάνθρακες με υψηλό ποσοστό σε αρωματικές ενώσεις παρουσιάζουν τιμές της τάξης του 10 ή μικρότερες.

Η σημασία της χημικής σύστασης στη συμπεριφορά του πετρελαίου και ειδικά σε ιδιότητες όπως του ιξώδους έχουν οδηγήσει ερευνητές στην ανάπτυξη σχέσεων (Whitson, 1983) (Riazi, 1980) που συνδέουν κατά κύριο λόγο το μοριακό βάρος και την ειδική πυκνότητα ώστε να προσδιορίζουν τον παράγοντα χαρακτηρισμού Watson.



Σχήμα 6.1 Επίδραση του παράγοντα χαρακτηρισμού Watson στο ιξώδες του dead oil σε σχέση με την πυκνότητα API (Petrowiki).

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Δύο δείγματα, λοιπόν, deal oil με ίδια πυκνότητα API και σε ίδια θερμοκρασία ταμιευτήρα T, μπορούν να έχουν ιξώδες που να διαφέρει σημαντικά (Dindoruk, et al., 2004). Η συμπεριφορά αυτή παρουσιάζεται χαρακτηριστικά και στο Σχήμα 6.2 όπου για μία δεδομένη θερμοκρασία παρουσιάζεται η μεταβολή του ιξώδους του dead oil για διαφορετικούς παράγοντες Watson. Για ίδια πυκνότητα API, δείγμα πετρελαίου με $K_w=12$ (σύσταση με μεγάλο ποσοστό παραφινών) μπορεί να παρουσιάζει 100 φορές μεγαλύτερο ιξώδες dead oil σε σχέση με το αντίστοιχο με παράγοντα $K_w=11$ (σύσταση με μεγάλο ποσοστό και σε ναφθενικές ή αρωματικές ενώσεις) (Whitson, 2000).

Λόγω της ιδιαιτερότητας του ιξώδους του dead oil όπως αναπτύχθηκε παραπάνω σε συνδυασμό με το γεγονός ότι στις περισσότερες PVT αναλύσεις (και ιδιαίτερα σε αυτές που έχουν διεξαχθεί πριν από πολλά χρόνια, όπως ισχύει και στην περίπτωση του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου) δεν υφίστανται αναλύσεις χαρακτηρισμού τύπου PNA, οι περισσότεροι ερευνητές που αναπτύσσουν εμπειρικές συσχετίσεις για την πρόρρηση του ιξώδους του πετρελαίου προτείνουν τη χρήση πειραματικών τιμών εφόσον είναι διαθέσιμες για την πρόρρηση του ιξώδους του πετρελαίου. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι αποτελεί μία παράμετρο που υπεισέρχεται σε εκτιμήσεις ιξώδους κορεσμένου πετρελαίου και κατ' επέκταση ακόρεστου πετρελαίου.

Η ανάπτυξη εμπειρικών συσχετίσεων πρόρρησης του ιξώδους ωστόσο συνδέεται κατά κύριο λόγο με την πρόβλεψη των τιμών του σε περίπτωση μη διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων. Κατά συνέπεια η πλειοψηφία των ερευνητών που δραστηριοποιούνται σε αυτό το πεδίο προτείνουν την αντίστοιχη δική τους συσχέτιση για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil ή προτείνουν κάποια άλλη ώστε να εκτιμηθεί τελικά ως παράμετρος εισαγωγής σε μία συσχέτιση πρόρρησης ιξώδους κορεσμένου ή υποκορεσμένου πετρελαίου.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, υπάρχουν διαθέσιμες πειραματικές τιμές ιξώδους του dead oil τόσο για τα διαφορετικά πετρελαϊκά ρευστά του Πρίνου όσο και για το ρευστό του Δ. Κατάκολου. Επιλέχθηκαν ωστόσο εμπειρικές συσχετίσεις (Πίνακας 6.1) για τον έλεγχο της δυνατότητας πρόρρησης των αντίστοιχων πειραματικών τιμών. Οι αναλυτικές μορφές τους παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5.

Οι συγκεκριμένες συσχετίσεις είναι εξαιρετικά δημοφιλείς ως προς την απόδοσή τους στη βιβλιογραφία. Οι μεν πέντε πρώτες συμπεριλαμβάνουν συγκεκριμένες

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

συσχετίσεις για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil στο πλαίσιο εκτίμησης του ιξώδους του κορεσμένου ή/και του υποκορεσμένου πετρελαίου, οι δε δύο τελευταίες αποτελούν εκφράσεις πρόρρησης αποκλειστικά του ιξώδους του dead oil. Αυτές οι δύο, δηλαδή η συσχέτιση του Beal (Standing, 1981) και η συσχέτιση του Glaso (Glaso, 1980), μαζί με την συσχέτιση των Beggs & Robinson (Beggs, et al., 1975), αξιολογούνται από τον Ahmed (Ahmed, 2000), ως οι τρεις καλύτερες συσχετίσεις πρόρρησης του ιξώδους του dead oil.

Πίνακας 6.1 Συσχετίσεις που επιλέχθηκαν για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil στο κοίτασμα του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου.

Petrosky & Farshad (Petrosky, et al., 1995)
Beggs & Robinson (Beggs, et al., 1975)
Bergman & Sutton (Bergman, et al., 2007)
Dindoruk & Christman (Dindoruk, et al., 2004)
Esharkawy & Alikhan (Elsharkawy, et al., 1999)
Beal (Standing, 1981) (Carlton, 1946)
Glaso (Glaso, 1980)

Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των συσχέτισεων για την εκτίμηση του ιξώδους του dead oil των πετρελαϊκών ρευστών των τεσσάρων ζωνών του κοιτάσματος του Πρίνου. Σε αυτόν συμπεριλαμβάνονται οι αντίστοιχες πειραματικές τιμές του ιξώδους του dead oil από τις αναλύσεις PVT, ενώ η απόδοση αξιολογείται με το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (% AARE), όπως ορίστηκε στην Ενότητα 6.1. Μόνο για την περίπτωση των εκτιμήσεων ωστόσο του ιξώδους του dead oil δεν αποτελεί ουσιαστικά μέσο απόλυτο σφάλμα, καθώς υπάρχει μόνο μία διαθέσιμη πειραματική τιμή.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Πίνακας 6.2 Αποτελέσματα εφαρμογής διαφόρων συσχετίσεων για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil στο κοιτάσμα του Πρίνου.

Προέλευση τιμών	Ζώνη A1		Ζώνη A2		Ζώνη B		Ζώνη C		Εύρος τιμών AARE% ανά τις ζώνες του Πρίνου
	Ιξώδες dead oil (cp)	AARE %	Ιξώδες dead oil (cp)	AARE %	Ιξώδες dead oil (cp)	AARE %	Ιξώδες dead oil (cp)	AARE %	
Πειραματική τιμή	2.05		1.67		1.30		1.39		
Petrosky & Farshad	4.02	96.10	3.17	89.82	2.68	106.15	2.78	100.00	89-107
Beggs & Robinson	2.56	24.88	2.23	33.53	2.02	55.38	2.06	48.20	24-56
Dindoruk & Christman	2.74	33.66	2.24	34.13	1.97	51.54	2.04	46.76	33-52
Bergman & Sutton	3.25	58.54	2.69	61.08	2.35	80.77	2.43	74.82	58-81
Elsharkawy and Alikhan	4.85	136.59	3.95	136.53	3.40	161.54	3.53	153.96	136-162
Beal	4.35	112.19	3.29	97.00	2.70	107.69	2.83	103.60	97-113
Glaso	3.40	65.85	2.69	61.08	2.27	74.62	2.36	69.78	61-75

Η εφαρμογή των εμπειρικών συσχετίσεων πρόρρησης του ιξώδους του dead oil στην περίπτωση των τεσσάρων ζωνών του Πρίνου, οδηγεί σε όλες τις περιπτώσεις σε υπερεκτίμηση των πειραματικών τιμών του. Παρατηρείται μάλιστα ότι στην πλειοψηφία των συσχετίσεων που εφαρμόστηκαν, τα μεγαλύτερα ποσοστά απόλυτου σφάλματος παρουσιάζονται στις ζώνες B και C, σε σχέση με τις ζώνες A1 & A2.

Την καλύτερη πρόρρηση της πειραματικής τιμής του ιξώδους του dead oil παρουσιάζουν οι συσχετίσεις των Beggs & Robinson και των Dindoruk & Christman που εμφανίζουν εύρος τιμών %AARE ανά τις ζώνες του Πρίνου, που κυμαίνεται μεταξύ 24-56% και 33-52%, αντίστοιχα.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Οι υπόλοιπες συσχετίσεις με σειρά καλύτερης πρόρρησης της πειραματικής τιμής είναι των Bergman & Sutton, του Glaso (Glaso, 1980), και των Petrosky & Farshad, με ποσοστά %AARE όπως δίνονται στον Πίνακα 6.2, ενώ οι λοιπές συσχετίσεις ξεπερνούν σε απόλυτο σφάλμα το 100% της πειραματικής τιμής.

Πιο συγκεκριμένα για την κάθε εμπειρική συσχέτιση παρατηρούνται τα εξής:

- Η συσχέτιση των Beggs & Robinson (Beggs, et al., 1975) παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση στην πρόρρηση της πειραματικής τιμής του ιξώδους dead oil με απόλυτο σφάλμα που κυμαίνεται από περίπου 24% έως 56% ανά τις ζώνες του Πρίνου.

Η συσχέτιση χρησιμοποιεί ως παραμέτρους τη θερμοκρασία του ταμιευτήρα και την πυκνότητα API του πετρελαίου. Οι συγγραφείς καταγράφουν στο άρθρο τους την απόδοση της συσχέτισης τους με μέσο σχετικό σφάλμα ARE=-0.64% ενώ βάσει τους Elsharkawy & Alikhan το %AARE είναι 13.5%. Στο άρθρο τους, δεν καταγράφονται επιπλέον στοιχεία για τη σύσταση των ρευστών που μελετήθηκαν και ως εκ τούτου δεν είναι βέβαιο εάν τα ρευστά αυτά έχουν παρόμοιες ιδιότητες ή όχι με τα αντίστοιχα του Πρίνου και κατά πόσο αυτό επηρεάζει την απόδοση της συγκεκριμένης συσχέτισης στην εκτίμηση του ιξώδους του dead oil.

- Η απόδοση της συσχέτισης των Dindoruk & Christman (Dindoruk, et al., 2004) είναι συγκρίσιμη με την απόδοση της συσχέτισης των Beggs & Robinson με ποσοστά απόλυτου σφάλματος που κυμαίνονται από περίπου 33-52% ανά τις ζώνες του Πρίνου. Σύμφωνα με όσα αναφέρουν το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (%AARE) της προτεινόμενης σχέσης στην πρόρρηση του ιξώδους του deal oil είναι 12.62%. Η συσχέτιση αυτή εμπεριέχει επιπλέον παραμέτρους οι οποίες είναι ο λόγος διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο σε πίεση ίση με το σημείο φυσαλίδας (Rs_{pb}) και η πίεση σημείου φυσαλίδας (pb). Οι παράμετροι αυτοί δίνουν σε ένα βαθμό περισσότερες πληροφορίες για το είδος του πετρελαϊκού ρευστού και ειδικά σχετικά με την ποσότητα του διαλυμένου αερίου η οποία επιδρά αρκετά σημαντικά στην εκτίμηση του ιξώδους του dead oil.
- Η χρήση της συσχέτισης των Bergman & Sutton για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil παρουσιάζει απόλυτα σφάλματα που κυμαίνονται από

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

58-81% ανά τις ζώνες του Πρίνου. Αξίζει να αναφερθεί για αυτή τη συσχέτιση η πρόταση των ερευνητών που εμπεριέχεται στο άρθρο τους ότι οι αριθμητικοί συντελεστές στην εξίσωση (5.9) μπορούν να μεταβληθούν προκειμένου να επιτευχθεί μείωση του σφάλματος και καλύτερη πρόρρηση των πειραματικών τιμών. Το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (%AARE) της προτεινόμενης σχέσης στην πρόρρηση του ιξώδους του deal oil είναι της τάξης του 0.9% σύμφωνα με το άρθρο τους.

- Η συσχέτιση του Glaso (Glaso, 1980) παρουσιάζει απόλυτα σφάλματα της τάξης του 61-75% ανά τις ζώνες του Πρίνου. Η συσχέτιση αυτή μαζί με την συσχέτιση του Beal (Standing, 1981) όπως προαναφέρθηκε θεωρούνται από τον Ahmed (Ahmed, 2000) από τις πιο αξιόπιστες και ευρέως χρησιμοποιούμενες συσχετίσεις πρόρρησης του ιξώδους του dead oil. Η συσχέτιση του Beal (Standing, 1981) στην περίπτωση του Πρίνου παρουσιάζει απόλυτα σφάλματα που κυμαίνονται από 97-113%. Τα ποσοστά απόλυτου σφάλματος και των δύο συσχετίσεων θεωρούνται πολύ σημαντικά. Αξίζει να αναφερθεί ότι η έρευνα του Glaso επικεντρώθηκε σε 6 δείγματα της Βόρειας θάλασσας ώστε να μπορέσει να αποδώσει καλύτερα το ποσοστό παραφινών στη σύσταση τους και την επίδραση που έχουν στην εκτίμηση του ιξώδους του dead oil.
- Η εφαρμογή της συσχέτισης των Petrosky & Farshad παρουσιάζει απόλυτο σφάλμα της τάξης του 89-107% ανά τις ζώνες του Πρίνου. Οι συγγραφείς καταγράφουν στο άρθρο τους απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα AARE=12.4% όμως οι υπολογισμοί εκτιμήσεις τους πραγματοποιήθηκαν σε δεδομένα από κοιτάσματα Μεξικανικής προέλευσης. Επιπλέον, αναφέρουν ότι τα πειράματά τους παρουσίασαν εξαιρετική συμφωνία μεταξύ εκτιμώμενων τιμών και πειραματικών όταν οι τιμές του ιξώδους δεν υπερβαίνουν αυτή των 3 cp. Δεδομένου ότι και τα πειραματικά δεδομένα για τα μίγματα του κοιτάσματος του Πρίνου δεν ξεπερνούν σε καμία ζώνη την τιμή των 2.1 cp, τα σφάλματα της συσχέτισης των Petrosky & Farshad θεωρούνται πολύ υψηλά.
- Τέλος η συσχέτιση των Elsharkawy & Alikhan (Elsharkawy, et al., 1999) προσεγγίζει τις πειραματικές τιμές με πολύ υψηλά απόλυτα ποσοστά που ξεπερνούν το 130% στο σύνολο των ζωνών. Το ποσοστό απόλυτου μέσου σχετικού σφάλματος (%AARE) που καταγράφουν οι συγγραφείς στο άρθρο

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

τους ισούται με 19.2%, οι οποίοι ωστόσο επικέντρωσαν την έρευνά τους σε πετρελαϊκά δείγματα της Μέσης Ανατολής

Η εφαρμογή των παραπάνω συσχετίσεων και η αξιολόγηση της απόδοσής τους πραγματοποιείται και στο κοίτασμα του Δυτικού Κατάκολου. Ο Πίνακας 6.3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της εφαρμογής των συσχετίσεων με το αντίστοιχο απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (%AARE) και την πειραματική τιμή από την ανάλυση PVT.

Πίνακας 6.3. Αποτελέσματα εφαρμογής διαφόρων συσχετίσεων για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil στο κοίτασμα του Δ. Κατάκολου.

Προέλευση τιμών	Ιξώδες του dead oil (cp)	AARE %
Ανάλυση PVT (πειραματική τιμή)	3.66	
Petrosky & Farshad	6.49	77.32
Beggs & Robinson	8.68	137.16
Dindoruk & Christman	6.78	85.25
Bergman & Sutton	8.61	135.25
Eisharkawy and Alikhan	9.04	146.99
Beal	6.84	86.89
Glaso	7.11	94.26

Όλες οι συσχετίσεις παρουσιάζουν πολύ υψηλό σφάλμα προκαλώντας σχεδόν το διπλασιασμό της πειραματικής τιμής του ιξώδους του dead oil με απόλυτα ποσοστά (%AARE) που κυμαίνονται συνολικά από 77-147%.

Στην περίπτωση του πετρελαϊκού ρευστού του Δ. Κατάκολου θα μπορούσε λόγω των υψηλών σφαλμάτων, να προταθεί η χρήση απευθείας της πειραματικής τιμής του ιξώδους του dead oil στις λοιπές συσχετίσεις πρόρρησης του ιξώδους του κορεσμένου και υποκορεσμένου πετρελαίου, όπως προτείνεται και από τους περισσότερους ερευνητές και ειδικά όταν δεν υπάρχουν περισσότερα πειραματικά δεδομένα σχετικά με τη σύσταση του πετρελαίου σε παραφινικές/ ναφθενικές/ αρωματικές ενώσεις, όπως ισχύει και στην περίπτωση του Δ. Κατάκολου.

6.2.1 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Η εφαρμογή συσχετίσεων εκτίμησης του ιξώδους του dead oil προκειμένου να ελεγχθεί η δυνατότητα πρόρρησης της πειραματικής τιμής του, η οποία είναι διαθέσιμη από εργαστηριακές αναλύσεις PVT τόσο για το κοίτασμα του Πρίνου όσο και για το κοίτασμα του Δ. Κατάκολου, οδήγησε σε υπερεκτίμηση των πειραματικών τιμών σε όλες τις περιπτώσεις.

Στην περίπτωση των τεσσάρων πετρελαϊκών ρευστών των ζωνών του Πρίνου προέκυψαν συσχετίσεις με σχετικά καλή απόδοση στην πρόρρηση των τιμών του, ενώ στην περίπτωση του Δ. Κατάκολου όλες οι συσχετίσεις παρουσίασαν πολύ υψηλά σφάλματα. Με βάση τα αποτελέσματα των Πίνακα 6.2, προκύπτει ότι οι συσχετίσεις των Beggs & Robinson και Dindoruk & Christman παρουσιάζουν συγκρίσιμη απόδοση στην εκτίμηση του ιξώδους του dead oil στον Πρίνο. Εντούτοις, η συσχέτιση των Beggs & Robinson παρουσιάζει ένα μικρό προβάδισμα λόγω του μικρότερου εύρους σφάλματος (24.88-55.38%) ανά τις ζώνες του Πρίνου από την συσχέτιση των Dindoruk & Christman (33.66%-51.54%) Επίσης, από τη μελέτη των συσχετίσεων που πραγματοποίησε ο McCain (McCain, 2011) προτείνεται η ίδια συσχέτιση ως πιο ακριβής για την εκτίμηση του ιξώδους του dead oil.

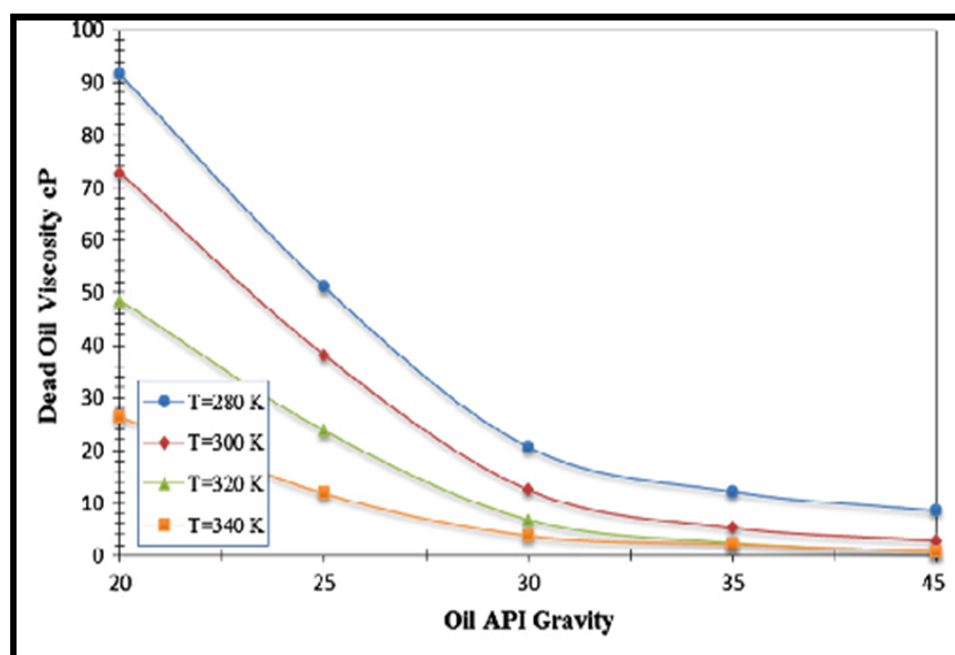
Στην περίπτωση του Πρίνου και των τεσσάρων πετρελαϊκών ρευστών του παρατηρήθηκε μία αύξηση των απόλυτων σφαλμάτων από τις ζώνες A1 και A2 προς τις ζώνες C και B οι οποίες βρίσκονται και σε μεγαλύτερο βάθος. Οι ζώνες αυτές βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία (245°F) και παρουσιάζουν τιμές πυκνότητας API όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4. Στην περίπτωση του Δ. Κατάκολου η θερμοκρασία είναι 134.6°F ενώ η πυκνότητα API 27.8.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 6.2 απεικονίζεται η μεταβολή του ιξώδους του dead oil σε σχέση με την πυκνότητα API του πετρελαίου για διάφορες θερμοκρασίες ταμειυτήρα:

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Πίνακας 6.4. Η πυκνότητα API στις ζώνες του Πρίνου και στο Δ. Κατάκολο.

Ζώνη Κοιτάσματος Πρίνου	Πυκνότητα API ($^{\circ}$ API)
A1	25.3
A2	27
B	28.3
C	28
Δ. Κατάκολο	27.8



Σχήμα 6.2 Διάγραμμα ιξώδους dead oil σε σχέση με την πυκνότητα API του πετρελαίου σε διαφορετικές θερμοκρασίες ταμιευτήρα (Hemmati-Sarapardeh, 2014).

Γενική παρατήρηση σύμφωνα με το διάγραμμα αποτελεί το γεγονός ότι το ιξώδες του dead oil μειώνεται με την αύξηση της πυκνότητας API. Αυτό ισχύει και στην περίπτωση των πειραματικών τιμών του ιξώδους του dead oil ανά τις ζώνες του Πρίνου όπου σε σειρά μειούμενης τιμής dead oil παρατηρείται ότι:

- Στη ζώνη A1 με API 25.3 το ιξώδες του dead oil είναι 2.05
- Στη ζώνη A2 με API 27 το ιξώδες του dead oil είναι 1.67
- Στη ζώνη C με API 28 το ιξώδες του dead oil είναι 1.39
- Στη ζώνη B με API 28.3 το ιξώδες του dead oil είναι 1.30

Στην περίπτωση επίσης του Πρίνου η θερμοκρασία είναι 245 $^{\circ}$ F (ή 391.5 K) η οποία αποτελεί γενικά υψηλή τιμή θερμοκρασίας. Από το διάγραμμα του Σχήματος 6.2 για τέτοια τάξη θερμοκρασίας, οι τιμές του ιξώδους αναμένονται να είναι πολύ χαμηλές.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Η αύξηση των απόλυτων σφαλμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή σχεδόν της πλειοψηφίας των συσχετίσεων από τις ζώνες A1 και A2 προς τις ζώνες C και B όπου αυξάνεται το API, αναδεικνύει την ανάγκη προσδιορισμού της σύστασης του πετρελαίου σε παραφινικές/ ναφθενικές/ αρωματικές ενώσεις, που επηρεάζει σημαντικά το ιξώδες του dead oil.

Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται η πολύ σημαντική επίδραση της θερμοκρασίας ιδιαίτερα στις περιοχές API μεταξύ 20 -30 όπου εντάσσονται όλα τα πετρελαϊκά ρευστά που εξετάστηκαν. Παρατηρείται γενικά ότι μία αύξηση της θερμοκρασίας από 280 K σε 340 K (ή 44.33 °F σε 152 °F) η τιμή του ιξώδους του dead oil μπορεί να μειωθεί από περίπου 92 cp σε 25 cp (για API 20) και αντίστοιχα από περίπου 28 cp σε 5 cp, αντίστοιχα (για API 30).

Η διαφορά της θερμοκρασίας των ταμειυτήρων του Πρίνου (245 °F ή 391.5 K) και του Δ. Κατάκολου (134.6 °F ή 330.15 K) δικαιολογεί τη διαφορά του πειραματικού ιξώδους του dead oil που παρουσιάζουν. Συγκεκριμένα στο Δ. Κατάκολο η τιμή του είναι 3.66 cp (με API 27.8) ενώ συγκριτικά με τη ζώνη C του Πρίνου που έχει API 28, η τιμή του είναι 1.39 cp, σχεδόν τρεις φορές μικρότερη του Δ. Κατάκολου. Αξίζει να αναφερθεί συγκριτικά για τα δύο κοιτάσματα ότι βάσει της ανάλυσης PVT που διατίθεται και για τα δύο κοιτάσματα, το ποσοστό του βαρέος κλάσματος (C₇₊) που συμμετέχει στη σύστασή τους είναι παρόμοιου ποσοστού (της τάξης του 35%) χωρίς επιπλέον πληροφορίες για τη φύση του.

Με βάση τα παραπάνω επιβεβαιώνεται ότι η παράμετρος του ιξώδους του dead oil είναι πολύ ευαίσθητη και θα πρέπει να συνοδεύεται από περισσότερα πειραματικά στοιχεία σύστασης για το ρευστό.

Αν και οι πειραματικές τιμές του ιξώδους του dead oil για το πετρελαϊκό ρευστό του κοιτάσματος του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου είναι διαθέσιμη, οι τιμές που προβλέπει η συσχέτιση των Beggs & Robinson θα χρησιμοποιηθούν σαν παράμετροι εισαγωγής σε όλες τις συσχετίσεις οι οποίες θα εφαρμοστούν για το κορεσμένο πετρέλαιο. Πιο αναλυτικά, θα ακολουθηθούν δύο διαδικασίες για την εκτίμηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου. Η πρώτη είναι η εφαρμογή κάθε συσχέτισης με χρήση πειραματικών τιμών για την παράμετρο ιξώδους του dead oil ενώ η δεύτερη είναι η εφαρμογή κάθε συσχέτισης με χρήση εκτιμωμένων τιμών για

το ιξώδες του dead oil, όπως αυτές προκύπτουν από τη συσχέτιση των Beggs & Robinson (Beggs, και συν., 1975).

6.3 Πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου

Όπως αναφέρεται στο Κεφάλαιο 5, για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου, επιλέχθηκαν να εφαρμοστούν οι κάτωθι συσχετίσεις στα πετρελαϊκά ρευστά του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου:

Πίνακας 6.5. Συσχετίσεις που επιλέχθηκαν για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου.

Petrosky & Farshad (Petrosky, et al., 1995)
Beggs & Robinson (Beggs, et al., 1975)
Bergman & Sutton (Bergman, et al., 2007)
Dindoruk & Christman (Dindoruk, et al., 2004)
Esharkawy & Alikhan (Elsharkawy, et al., 1999)

Οι περισσότερες συσχετίσεις εκφράζουν το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου ως συνάρτηση του ιξώδους του dead oil (μ_{od}) και του λόγου του διαλυμένου αερίου προς το πετρέλαιο (R_s). Επισημαίνεται ότι για την παράμετρο του λόγου του διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο (R_s), όπου αυτή υπεισέρχεται ως παράμετρος στις συσχετίσεις, χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση, οι πειραματικές τιμές της που διατίθενται από την εργαστηριακή ανάλυση PVT των ρευστών και συγκεκριμένα από το πείραμα DLE που έχει διενεργηθεί στο πλαίσιο αυτής.

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκαν δύο περιπτώσεις για την εκτίμηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου στις ζώνες του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου στη βάση των προαναφερθέντων συσχετίσεων:

- A.** Εφαρμογή κάθε συσχέτισης με χρήση των πειραματικών τιμών του ιξώδους του dead oil (Περίπτωση Α).
- B.** Εφαρμογή κάθε συσχέτισης με χρήση εκτιμώμενων τιμών για το ιξώδες του dead oil, όπως αυτές προκύπτουν από τη συσχέτιση των Beggs & Robinson (Beggs, και συν., 1975) που έχει προκριθεί με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 6.2 της εργασίας (Περίπτωση Β).

Στον Πίνακα 6.6. παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα ως απόλυτα μέσα σχετικά σφάλματα (%AARE) για τις δύο περιπτώσεις που μελετήθηκαν.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Πίνακας 6.6. Αποτελέσματα εκτίμησης ιξώδους κορεσμένου πετρελαίου στα πετρελαϊκά ρευστά του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου στις Περιπτώσεις A & B.

Συσχετίσεις	ΠΡΙΝΟΣ				ΚΑΤΑΚΟΛΟ %AARE	Προέλευση Ιξώδους του dead oil	
	Ζώνη A1 %AARE	Ζώνη A2 %AARE	Ζώνη B %AARE	Ζώνη C %AARE		Πειραματική Ανάλυση PVT (Περίπτωση A)	Συσχέτιση Beggs & Robinson (Περίπτωση B)
Petrosky & Farshad	34.43	23.24	25.66	28.73	11.29	✓	
	24.58	8.06	1.39	9.42	68.2		✓
Beggs & Robinson	44.19	33.75	36.12	38.22	18.54	✓	
	36.39	21.62	16.76	22.77	35.45		✓
Bergman & Sutton	37.88	28.09	31.62	34.33	11.22	✓	
	27.58	12.34	6.9	14.37	73.25		✓
Dindoruk & Christman	35.57	26	29.9	32.84	6.7	✓	
	24.32	8.97	3.02	11.31	85.62		✓
Eisharkawy & Alikhan	37.57	26.8	28.33	32.02	11.19	✓	
	28.49	12.92	5.53	14.42	48.2		✓

Βασική παρατήρηση επί των αποτελεσμάτων του Πίνακα 6.6 είναι ότι η χρήση της τιμής του ιξώδους του dead oil που προέκυψε με τη συσχέτιση των Beggs & Robinson (Beggs, et al., 1975) σαν παράμετρος εισαγωγής για την εκτίμηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου (Περίπτωση B) έχει σαν αποτέλεσμα τη βελτίωση του απόλυτου μέσου σχετικού σφάλματος (%AARE) στην πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου του Πρίνου.

Ο λόγος για αυτή τη συμπεριφορά πιθανόν κρύβεται πίσω από τη δομή της συσχέτισης του κορεσμένου πετρελαίου η οποία είναι βασική και κοινή σε όλες τις συσχετίσεις του Πίνακα 6.4 : $\mu_{ob} = A(\mu_{od})^B$

Τα στοιχεία που διαφοροποιούνται κάθε φορά είναι οι συντελεστές A και B. Η θέση της τιμής του μ_{od} είναι σταθερή και είναι στη βάση μιας δύναμης. Όταν η βάση

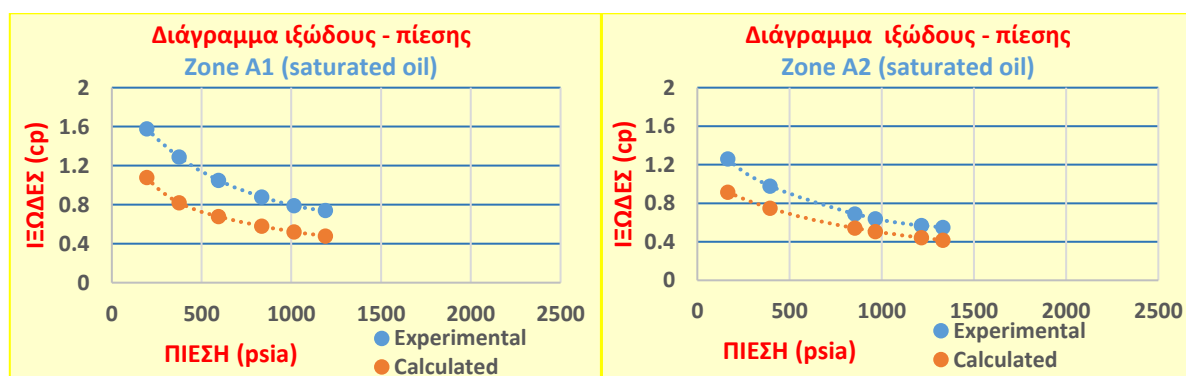
6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

μεγαλώνει τότε και το μ_{ob} μεγαλώνει συνολικά. Δεδομένου ότι οι τιμές του ιξώδους του dead oil που προκύπτουν από την συσχέτιση των Beggs & Robinson είναι μεγαλύτερες της αντίστοιχης πειραματικής, είναι αναμενόμενο να δίδουν καλύτερα αποτελέσματα όταν όλες οι συσχετίσεις για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου υποεκτιμούν τις τιμές του ιξώδους του. Φυσικά, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις τιμές του dead oil εμπεριέχουν το σφάλμα αυτών των τιμών (24%-56% ανά τις ζώνες του Πρίνου).

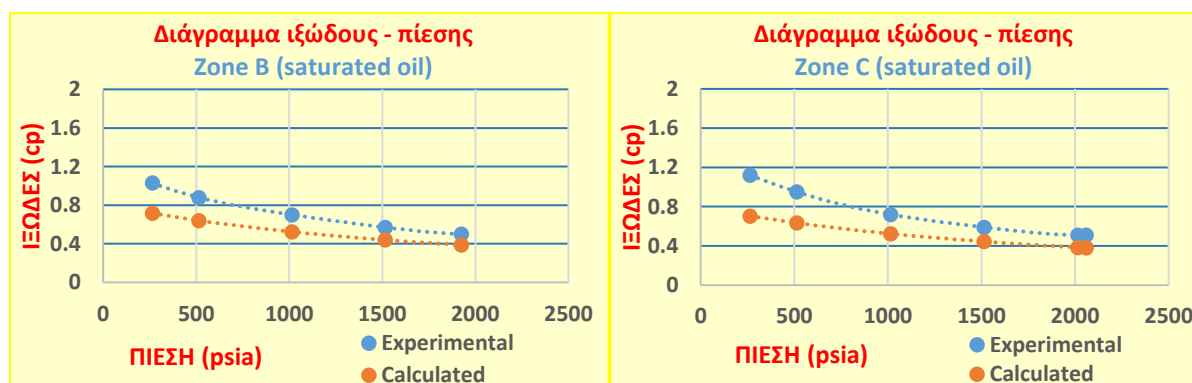
6.3.1 Συσχέτιση Petrosky & Farshad

Στα Σχήματα 6.4 (α, β)-6.5 (α, β) που ακολουθούν παρουσιάζεται η απόδοση της συσχέτισης στις τέσσερις ζώνες πετρελαϊκών ρευστών του Πρίνου για κάθε περίπτωση που μελετήθηκε.

Περίπτωση A (χρήση πειραματικής τιμής του ιξώδους του dead oil)



Σχήμα 6.3 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Petrosky & Farshad για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil).



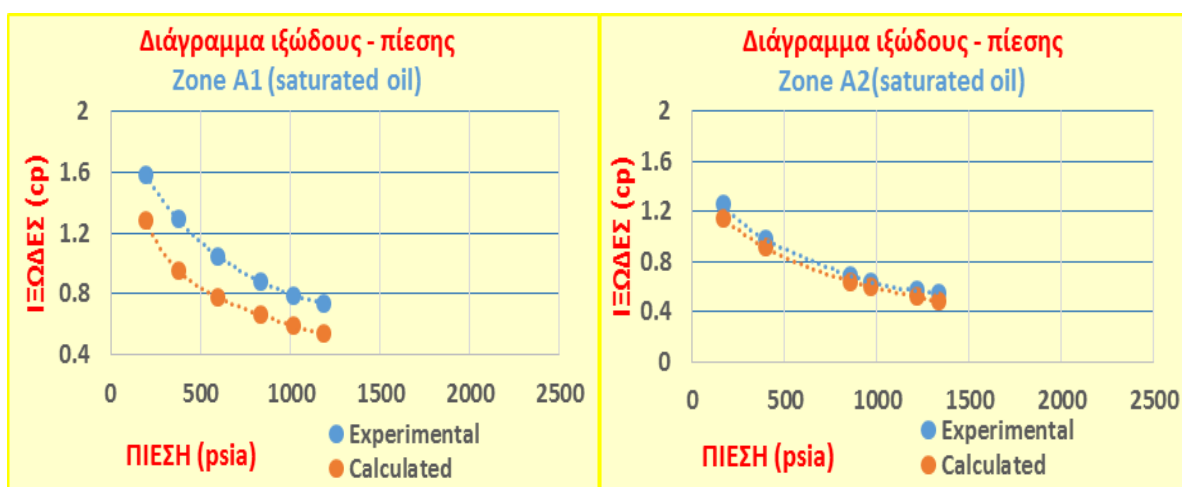
Σχήμα 6.4 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Petrosky & Farshad για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών B και C (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil).

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Η συσχέτιση των Petrosky & Farshad με τη χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil παρουσιάζει μία καλή ικανότητα στην πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου συναρτήσεως της πίεσης. Ιδιαίτερα στις ζώνες A2, B και C το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα δεν υπερβαίνει το 29%. Η αύξηση της τιμής του ιξώδους με τη μείωση της πίεσης εκφράζεται ομαλά και με συνεπή τρόπο. Για λόγους σύγκρισης αναφέρεται ότι το αντίστοιχο %AARE που καταγράφουν οι συγγραφείς είναι 14.47%.

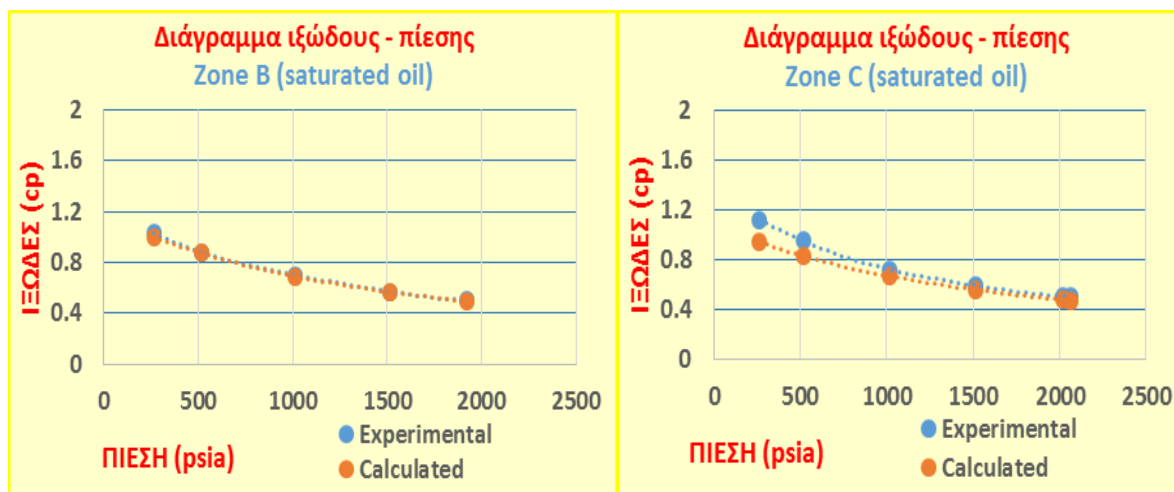
Η μεγαλύτερη απόκλιση εμφανίζεται στις τιμές του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου της ζώνης A1 όπου, στην περίπτωση αυτή, το ιξώδες είναι αρκετά πιο υψηλό και η κλίση της μεταβολής πιο έντονη, λόγω της χαμηλής τιμής σημείου φουσαλίδας που είναι 1189.7psia. Αναφέρεται ότι η ζώνη A1 παρουσιάζει API 25.3 ενώ στο πεδίο εφαρμογής της συσχέτισης το κάτω όριο είναι 25.4 API, μια πολύ μικρή διαφορά που αναφέρεται αλλά εκτιμάται ότι δεν μπορεί να έχει τόσο μεγάλη επίδραση στα τελικά αποτελέσματα.

Περίπτωση Β (χρήση εκτιμώμενης τιμής του ιξώδους του dead oil)



Σχήμα 6.5 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσεως της πίεσης με τη συσχέτιση των Petrosky & Farshad για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση Β: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil).

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ



Σχήμα 6.6 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Petrosky & Farshad για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών B και C (Περίπτωση B: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil).

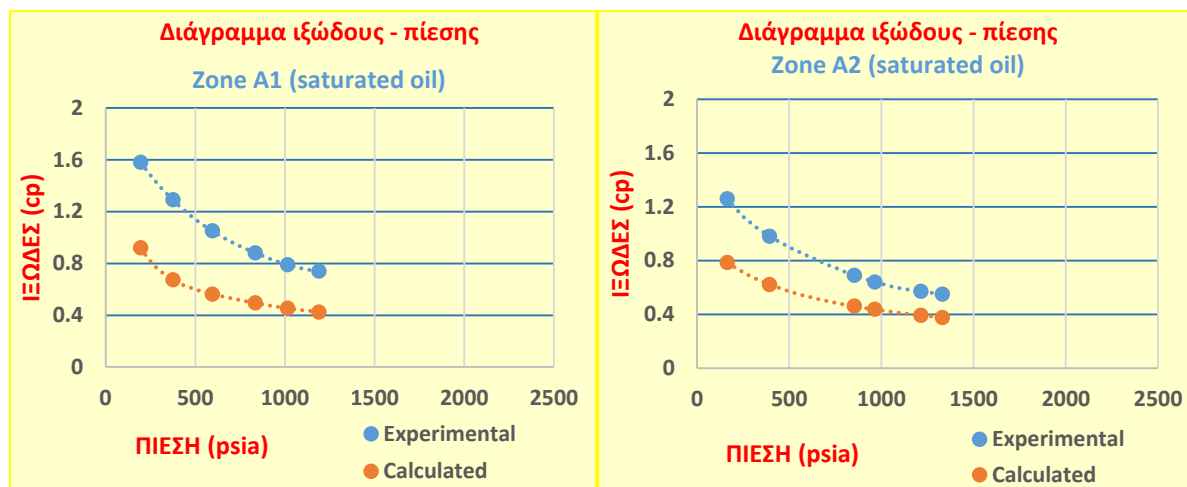
Όταν η συσχέτιση των Petrosky & Farshad εφαρμόζεται για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου και έχει σαν παράμετρο εισαγωγής το ιξώδες του dead oil που προέκυψε από την συσχέτιση των Beggs & Robinson, εμφανίζει απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (AARE %) το οποίο δεν ξεπερνά το 25%. Αυτό το ποσοστό είναι εξαιρετικά μειωμένο σε σχέση με εκείνο που προκύπτει από τη χρήση της πειραματικής τιμής ιξώδους του dead oil. Συγκεκριμένα, στη ζώνη B το σφάλμα δεν ξεπερνά το 1.4%. Η ζώνη αυτή έχει την υψηλότερη πυκνότητα (28,3 °API) και όπως είναι γνωστό καθώς αυξάνεται η πυκνότητα ενός ρευστού αυξάνεται και το ιξώδες του. Συνεπώς, στην συγκεκριμένη ζώνη η υποεκτίμηση των τιμών που παρατηρείται από τη χρήση της συσχέτισης εξαλείφεται όσο αυξάνονται οι εκτιμώμενες τιμές.

6.3.2 Συσχέτιση Beggs & Robinson

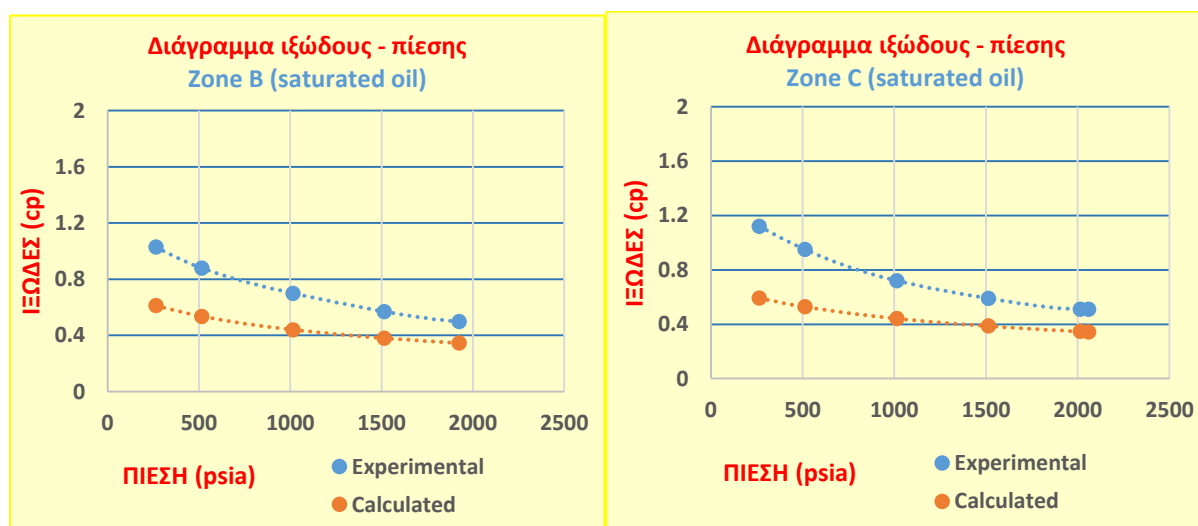
Στα Σχήματα 6.8 (α, β)-6.9 (α, β) που ακολουθούν παρουσιάζεται η απόδοση της συσχέτισης στις τέσσερις ζώνες πετρελαϊκών ρευστών του Πρίνου για κάθε περίπτωση που μελετήθηκε.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Περίπτωση Α (χρήση πειραματικής τιμής του ιξώδους του dead oil)



Σχήμα 6.7 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Beggs & Robinson για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση Α: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil).



Σχήμα 6.8(α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Beggs & Robinson για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση Α: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil).

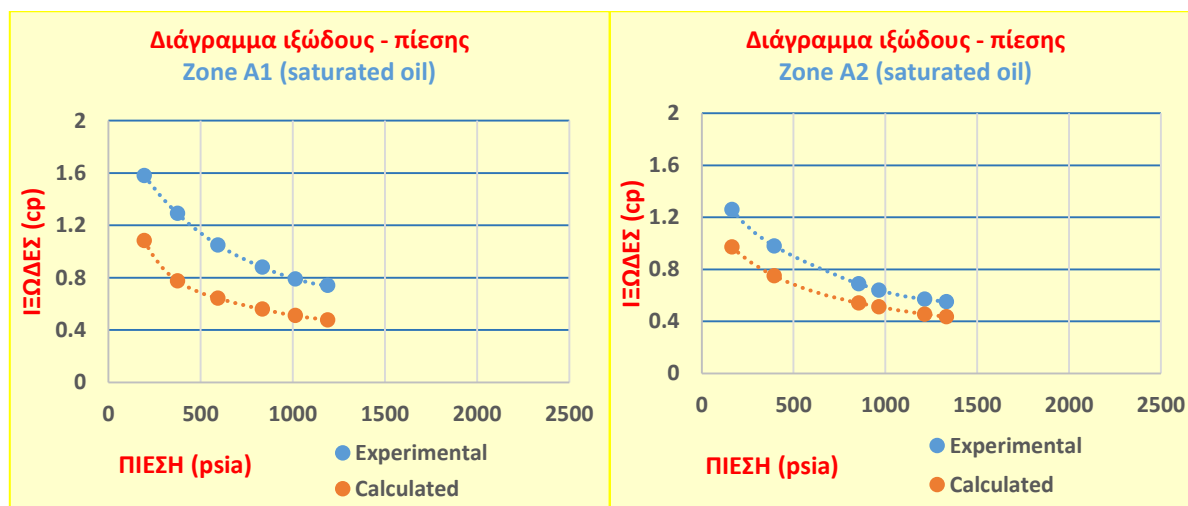
Η συσχέτιση των Beggs & Robinson με τη χρήση της πειραματικής τιμής του dead oil παρουσιάζει μέτρια ικανότητα στην πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου. Το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (AARE %) που προκύπτει για το ιξώδες κυμαίνεται μεταξύ 36% και 45%. Τα ποσοστά αυτά είναι υψηλότερα από τα αντίστοιχα της συσχέτισης των Petrosky & Farshad οι οποίοι, μάλιστα, αναφέρουν στο άρθρο τους ότι η συσχέτιση των Beggs & Robinson υποεκτιμά το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου. Συγκρίνοντας τις δύο συσχετίσεις γίνεται αντιληπτό ότι η βασική μορφή της συσχέτισης ($\mu_{ob} = A(\mu_{od})^B$) (εξισώσεις (5.2) και (5.5)) είναι

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

κοινή. Οι συντελεστές όμως A και B διαφοροποιούνται και μάλιστα σημαντικά δεδομένου ότι η κύρια παράμετρος που εμπεριέχουν είναι ο λόγος διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο (R_s) η οποία σε κάθε συσχέτιση λαμβάνει άλλη θέση. Συγκεκριμένα, στη συσχέτιση των Petrosky & Farshad το R_s έχει τοποθετηθεί σαν δύναμη με βάση το δέκα.. Με τον τρόπο αυτό, οι συντελεστές A και B είναι μικρότεροι για την συσχέτιση των Beggs & Robinson έχοντας σαν αποτέλεσμα χαμηλότερες τιμές για το ιξώδες που είναι ήδη υποεκτιμημένο.

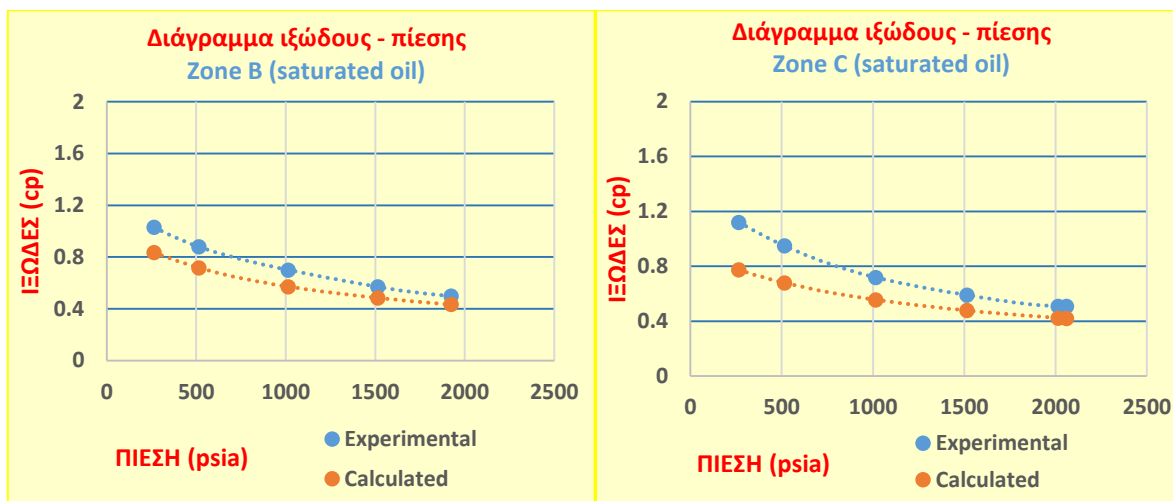
Οι διαφορές που παρατηρούνται στα διαγράμματα 6.8(α, β) και 6.9(α, β) δεν είναι αρκετά εμφανείς, γεγονός που αποδεικνύεται και από την μικρή απόκλιση που παρουσιάζει το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα των τιμών από ζώνη σε ζώνη. Η συσχέτιση αποδίδει καλύτερα στη ζώνη A2 του κοιτάσματος του Πρίνου με σφάλμα %AARE της τάξης του 34%.

Περίπτωση Β (χρήση εκτιμώμενης τιμής του ιξώδους του dead oil)



Σχήμα 6.9 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Beggs & Robinson για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση Β: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil).

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ



Σχήμα 6.10 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Beggs & Robinson για κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών B και C (Περίπτωση B: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil).

Μελετώντας την απόδοση της συσχέτισης των Beggs & Robinson για κορεσμένο πετρελαϊκό ρευστό σε συνδυασμό με την αντίστοιχη συσχέτιση για dead oil, είναι φανερό ότι η εναλλακτική αυτή είναι βελτιωμένη ως ένα βαθμό και παρουσιάζει απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (%AARE) το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 16% και 37%.

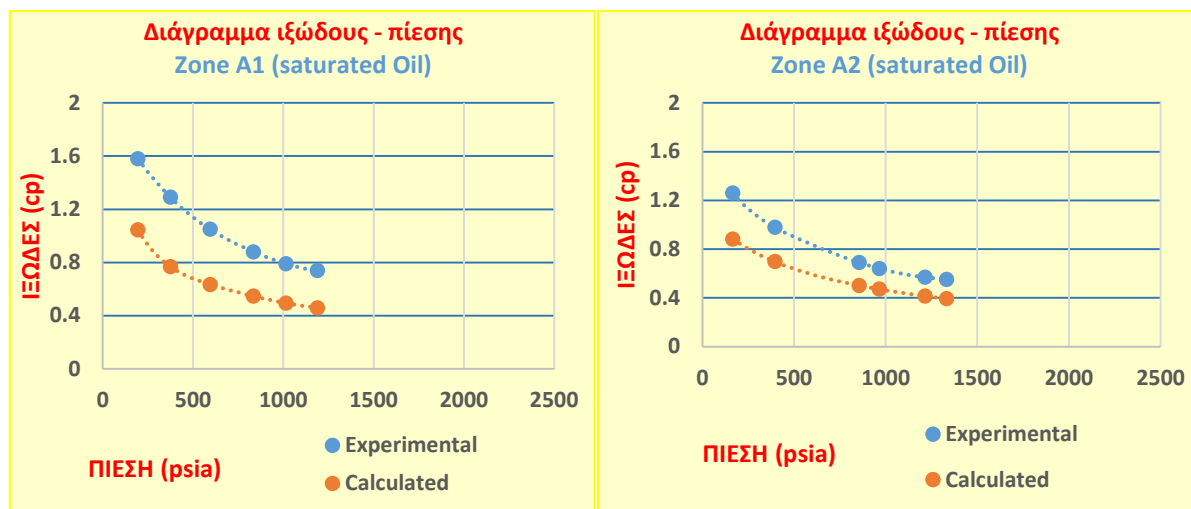
6.3.3. Συσχέτιση Bergman & Sutton

Πριν την αξιολόγηση της συσχέτισης αυτής στην πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου, αναφέρεται ότι η συσχέτιση των Bergman & Sutton (Bergman, et al., 2007) έχει ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό σε σχέση με τις υπόλοιπες που εφαρμόζονται στην εργασία αυτή. Αυτό εντοπίζεται στο εύρος των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν από τους ερευνητές. Πρόκειται για το ποσοστό συγκέντρωσης υδρόθειου (H_2S) στα πετρελαϊκά ρευστά που μελετήθηκαν για την ανάπτυξη της συσχέτισης. Το κοίτασμα του Πρίνου παρουσιάζει υψηλές συγκεντρώσεις σε υδρόθειο (H_2S). Δεδομένου ότι για να αναπτυχθεί η συγκεκριμένη συσχέτιση έχουν χρησιμοποιηθεί παρόμοιου τύπου (όξινα) ρευστά, αξίζει να ελεγχθεί και να αξιολογηθεί η απόδοσή της παρά το γεγονός ότι στα πετρελαϊκά ρευστά που εφαρμόζεται στην παρούσα μελέτη, η ζώνη A1 μόνο του Πρίνου τίθεται εκτός πεδίου εφαρμογής της συσχέτισης, καθώς το πάνω όριο που θέτει είναι 33.3% mole, ενώ η ζώνη A1 διαθέτει περίπου 40%.

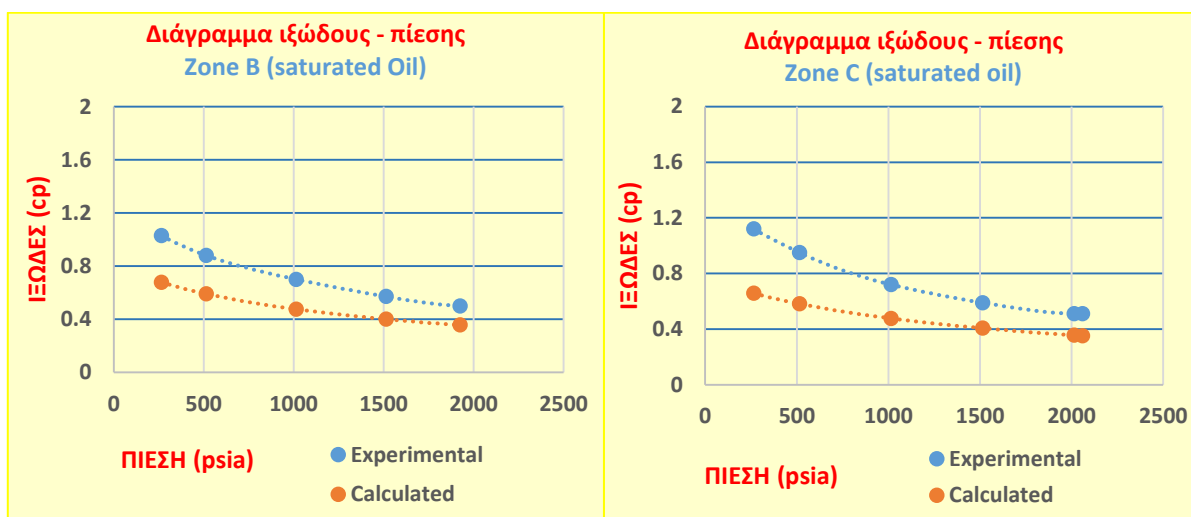
Στα Σχήματα 6.12 (α, β)-6.13 (α, β) που ακολουθούν παρουσιάζεται η απόδοση της συσχέτισης στις τέσσερις ζώνες πετρελαϊκών ρευστών του Πρίνου για κάθε περίπτωση που μελετήθηκε.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Περίπτωση Α (χρήση πειραματικής τιμής του ιξώδους του dead oil)



Σχήμα 6.11: Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Bergman & Sutton για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil).



Σχήμα 6.12 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Bergman & Sutton για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών B και C (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil).

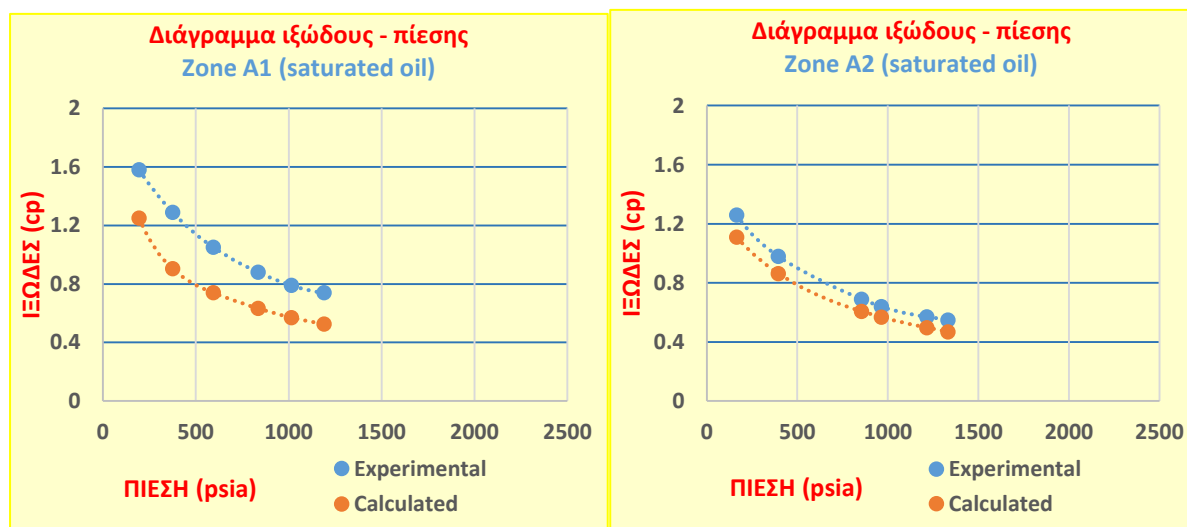
Το ποσοστό που παρουσιάζει το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (%AARE) των εκτιμώμενων τιμών κυμαίνεται μεταξύ 28% και 38% ανά τις ζώνες του Πρίνου. Είναι χαμηλότερο σε σύγκριση με εκείνο της συσχέτισης των Beggs & Robinson και υψηλότερο από εκείνο της συσχέτισης των Petrosky & Farshad. Για λόγους σύγκρισης αναφέρεται ότι συγγραφείς καταγράφουν %AARE 12.4% στο άρθρο τους.

Η σχέση που χρησιμοποιείται είναι και σε αυτή την περίπτωση η ίδια $[\mu_{ob} = A(\mu_{od})^B]$ (εξίσωση (5.7)) με διαφοροποίηση της θέσης του λόγου διαλυμένου αερίου

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

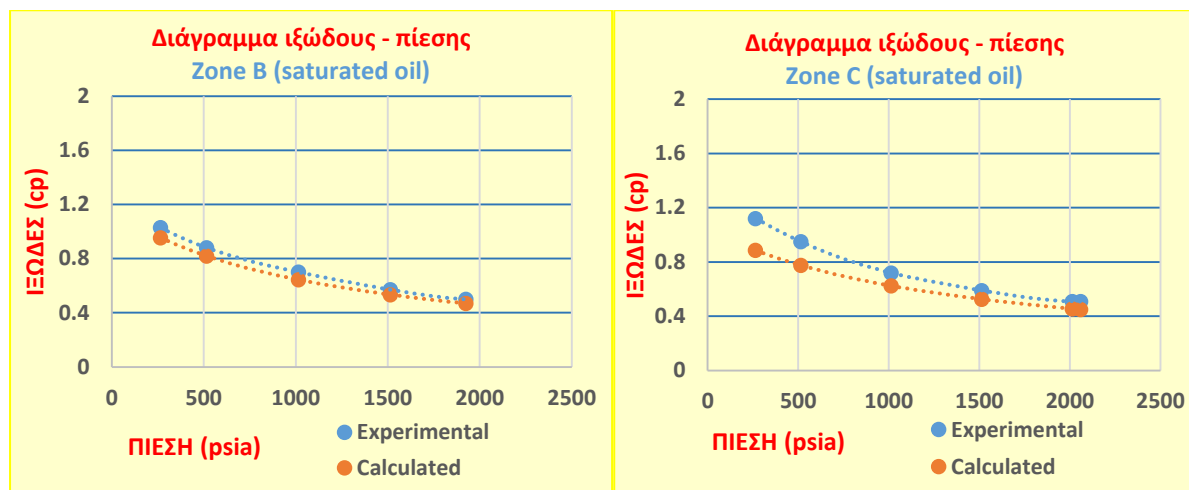
προς πετρέλαιο (R_s) στους συντελεστές. Οι Bergman & Sutton τοποθετούν το R_s στον παρονομαστή των A και B προσδίδοντάς τους με αυτόν τον τρόπο χαμηλότερες τιμές για το A και υψηλότερες για το B (σε σύγκριση με τις τιμές των Petrosky & Farshad). Η ζώνη A1 παρουσιάζει το υψηλότερο σφάλμα διότι προαναφέρθηκε είναι εκτός πεδίου εφαρμογής της συσχέτισης αναφορικά με τη συγκέντρωση σε υδρόθειο. Επιπρόσθετα, οι Chew & Connally (Standing, 1981), δημιουργοί της σχέσης $\mu_{ob} = A(\mu_{od})^B$, κάνουν λόγο για μείωση της αξιοπιστίας της όταν το εύρος της τιμής του R_s μεγαλώνει και ξεπερνά τα 1000 scf/STB. Από τον ισχυρισμό αυτό δικαιολογείται πλήρως η μεγάλη διαφορά του σφάλματος στη ζώνη του Πρίνου C καθώς το R_s σε αυτή την περιοχή του κοιτάσματος εμφανίζει τις πιο υψηλές τιμές. Τα διαγράμματα 6.12(α, β) και 6.13(α, β) δείχνουν ότι η συγκεκριμένη συσχέτιση υποεκτιμά τις τιμές του ιξώδους και αποδίδει καλύτερα στην ζώνη A2.

Περίπτωση B (χρήση εκτιμώμενης τιμής του ιξώδους του dead oil)



Σχήμα 6.13 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Bergman & Sutton για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση B: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil).

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ



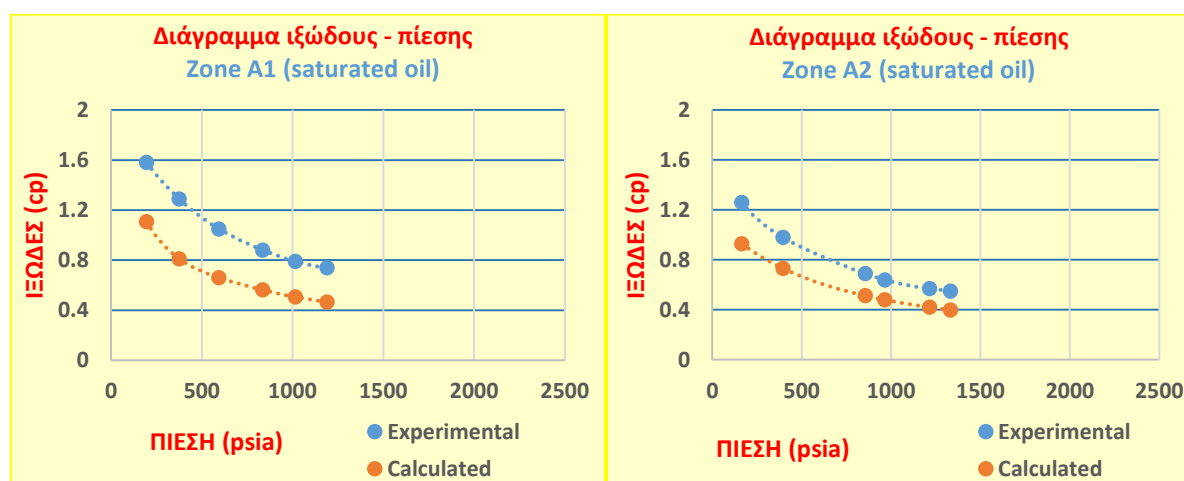
Σχήμα 6.14 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Bergman & Sutton για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών B και C (Περίπτωση B: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil).

Σύμφωνα με τα Σχήματα 6.13 και 6.14, η χρήση της συσχέτισης των Beggs & Robinson για το dead oil συνδυαστικά με τη συσχέτιση των Bergman & Sutton για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου μειώνει κατά πολύ το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (%AARE) των τιμών του ιξώδους το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 6% και 28%.

6.3.4 Συσχέτιση Dindoruk & Christman

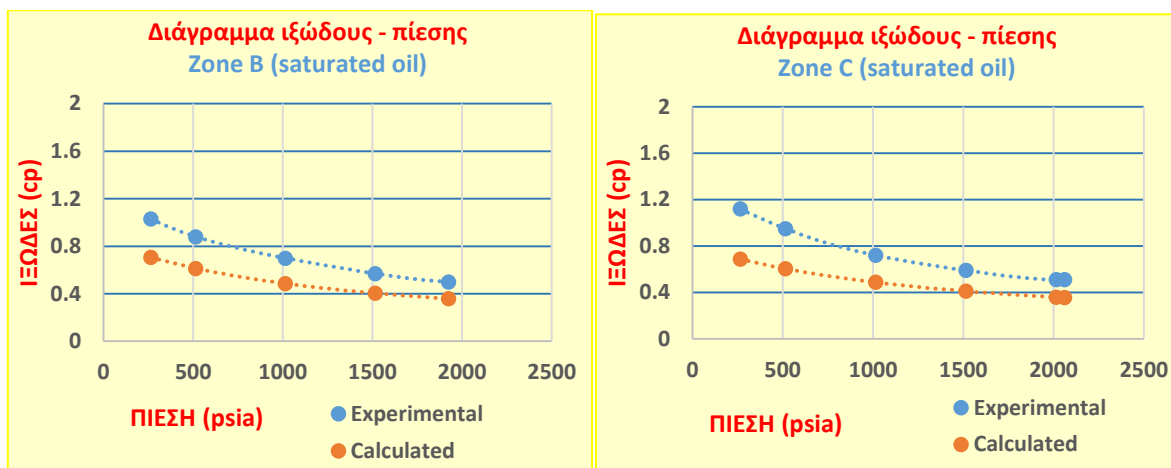
Στα Σχήματα 6.16 (α, β)-6.17 (α, β) που ακολουθούν παρουσιάζεται η απόδοση της συσχέτισης στις τέσσερις ζώνες πετρελαϊκών ρευστών του Πρίνου για κάθε περίπτωση που μελετήθηκε.

Περίπτωση A (χρήση πειραματικής τιμής του ιξώδους του dead oil)



Σχήμα 6.15 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Dindoruk & Christman για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil).

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ



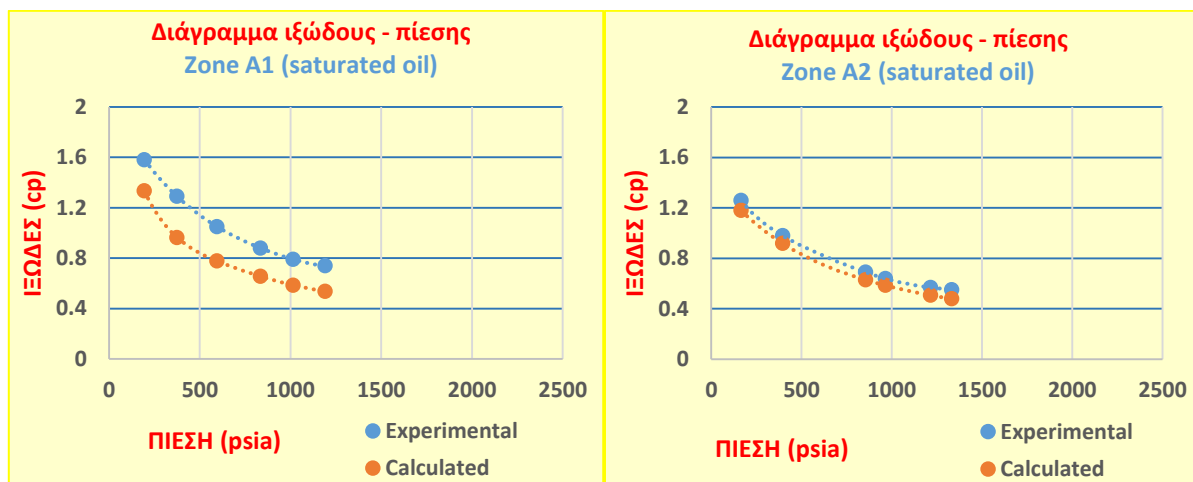
Σχήμα 6.16 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Dindoruk & Christman για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών B και C (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil).

Η συσχέτιση των Dindoruk & Christman με τη χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil, που εκτιμήθηκε από τη συσχέτιση Beggs & Robinson, παρουσιάζει σχετικά καλή ικανότητα στην πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου συναρτήσει της πίεσης. Ιδιαίτερα στις ζώνες A2 και B το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (%AARE) δεν υπερβαίνει το 30%. Η αύξηση της τιμής του ιξώδους με τη μείωση της πίεσης εκφράζεται ομαλά. Το αντίστοιχο σφάλμα που καταγράφουν οι ερευνητές είναι 13.2% (%AARE).

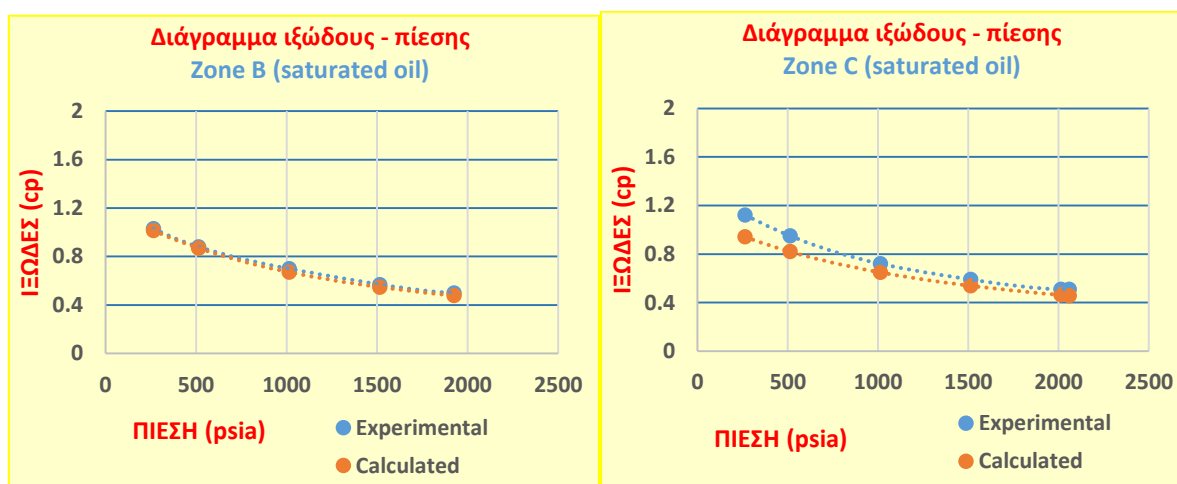
Η απόδοση της συγκεκριμένης συσχέτισης πλησιάζει αρκετά την απόδοση της σχέσης των Petrosky & Farshad. Οι Dindoruk & Christman παρουσιάζουν μια πιο σύνθετη συσχέτιση με αρκετά περίπλοκους συντελεστές A και B για τη μαθηματική έκφραση $\mu_{ob} = A(\mu_{od})^B$ (εξίσωση (5.10)). Η παράμετρος του λόγου του διαλυμένου αερίου προς το πετρέλαιο (R_s) τοποθετείται τόσο στον αριθμητή όσο και στον παρονομαστή των συντελεστών οδηγώντας κατά αυτόν τον τρόπο σε μικρότερες τιμές για το A και μεγαλύτερες για το B. Επίσης, καταγράφεται ότι το εύρος των τιμών του R_s που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της συσχέτισης των Dindoruk & Christman είναι μεγαλύτερο (133-3050 scf/STB) σε σχέση με εκείνο που χρησιμοποίησαν οι ερευνητές Petrosky & Farshad για τη δημιουργία της συσχέτισής τους (21-1885 scf/STB).

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Περίπτωση Β (χρήση εκτιμώμενης τιμής του ιξώδους του dead oil)



Σχήμα 6.17 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Dindoruk & Christman για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση Β: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil).



Σχήμα 6.18 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Dindoruk & Christman για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών B και C (Περίπτωση Β: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil).

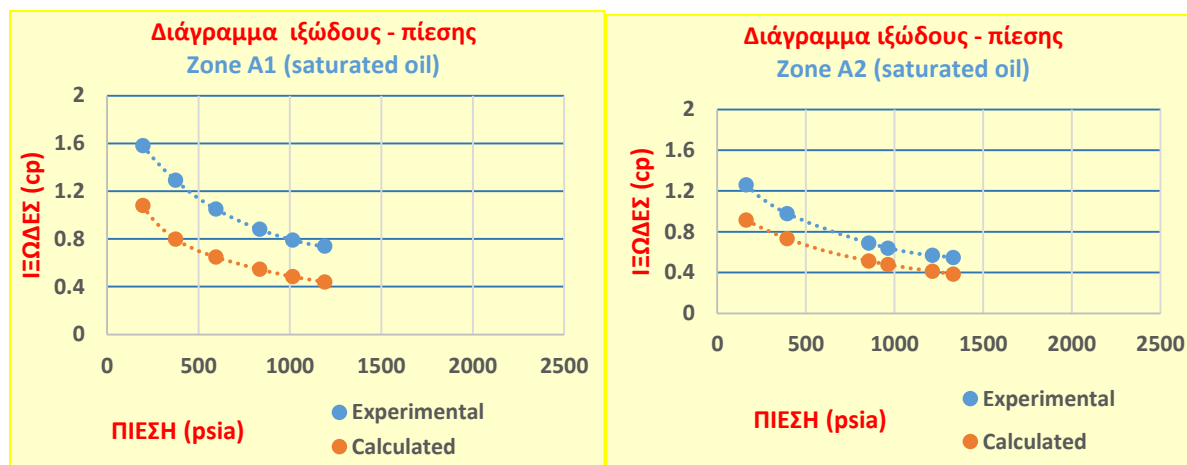
Το εύρος του απόλυτου μέσου σχετικού σφάλματος (%AARE) των νέων τιμών του κορεσμένου πετρελαίου μειώνεται σημαντικά (κυμαίνεται μεταξύ 3%-25%). Παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με την συσχέτιση των Petrosky & Farshad.

6.3.5 Συσχέτιση Elsharkawy & Alikhan

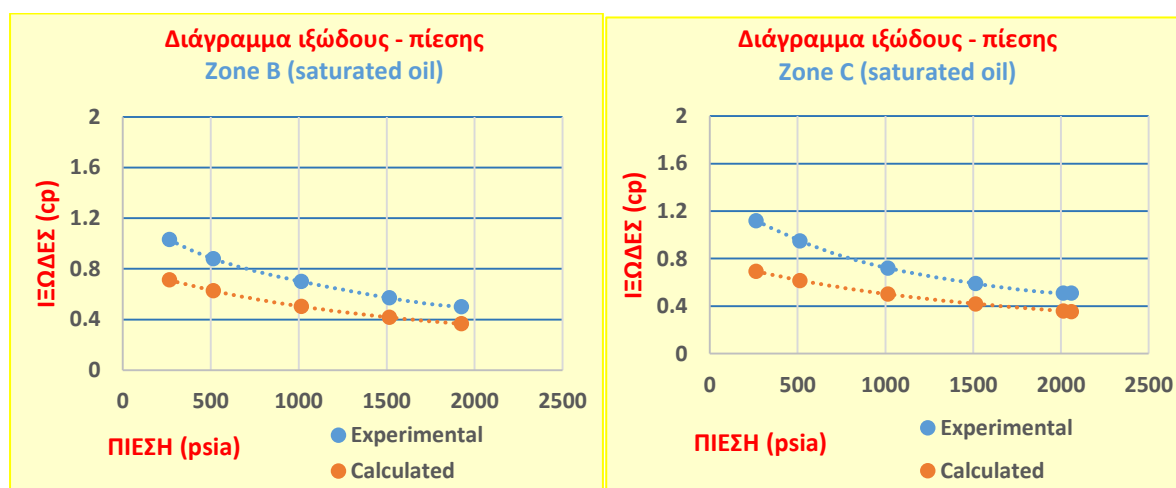
Στα Σχήματα 6.20 (α, β)-6.21 (α, β) που ακολουθούν παρουσιάζεται η απόδοση της συσχέτισης στις τέσσερις ζώνες πετρελαϊκών ρευστών του Πρίνου για κάθε περίπτωση που μελετήθηκε.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Περίπτωση Α (χρήση πειραματικής τιμής του ιξώδους του dead oil)



Σχήμα 6.19 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Elsharkawy & Alikhan για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση Α: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil).



Σχήμα 6.20 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Elsharkawy & Alikhan για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών B και C (Περίπτωση Α: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil).

Στη συσχέτιση των Elsharkawy & Alikhan (Elsharkawy, et al., 1999) με τη χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil, η αύξηση της τιμής του ιξώδους με τη μείωση της πίεσης εκφράζεται ομαλά. Η συσχέτιση εκτιμά το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου συναρτήσει της πίεσης με απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (% AARE) που κυμαίνεται μεταξύ 26% και 38%. Σε όλες τις ζώνες οι τιμές του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου υποεκτιμώνται από τη συσχέτιση. Το σφάλμα (%AARE) που καταγράφουν οι ερευνητές είναι 18.7%.

Η συσχέτιση των Elsharkawy & Alikhan έχει ακριβώς την ίδια μορφή με την συσχέτιση των Beggs & Robinson με μοναδική διαφορά τις τιμές των σταθερών

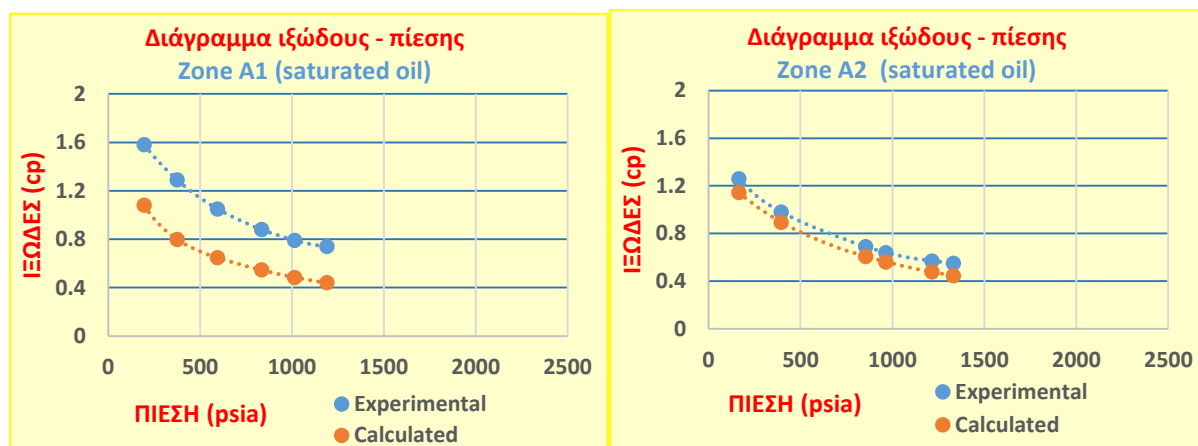
6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

αριθμών στους συντελεστές A και B. Οι Elsharkawy & Alikhan προτείνουν τη σχέση με αρκετά πιο αυξημένους αριθμητικούς συντελεστές. Εντούτοις, αυτό δεν επηρεάζει σημαντικά την τελική τους τιμή στην βασική σχέση $\mu_{ob} = A(\mu_{od})^B$ (εξίσωση (5.13)), όπου φαίνεται να είναι περίπου όμοια και στις δύο συσχετίσεις.

Όσο αφορά τις διαφορές στο απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα ανάμεσα στις επιμέρους ζώνες, η ζώνη A1 εμφανίζει δικαιολογημένα το υψηλότερο ποσοστό σφάλματος δεδομένου ότι, σύμφωνα με τους Elsharkawy & Alikhan, παρατηρείται μεγάλη μείωση στο ιξώδες για ρευστά με χαμηλή πυκνότητα API και χαμηλές τιμές στο λόγο διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο (R_s).

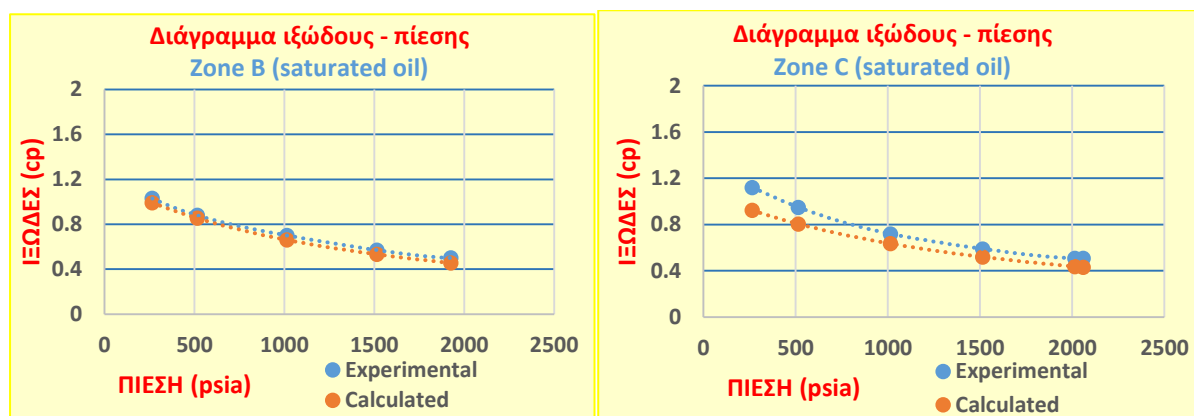
Όπως όλες οι συσχετίσεις που επιλέχθηκαν και αξιολογήθηκαν, έτσι και η συγκεκριμένη υποεκτιμά τις τιμές του πειραματικού ιξώδους. Όπως αναφέρουν οι Elsharkawy & Alikhan, το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου μειώνεται με την αύξηση του λόγου του διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο (R_s) και του ιξώδους του dead oil. Ως εκ τούτου, δικαιολογείται εν μέρει (δεν λαμβάνεται υπόψιν το R_s) η μεγάλη απόκλιση των εκτιμώμενων τιμών στη ζώνη A1, όπου το ιξώδες του dead oil ισούται με 2.05 cp. Η συσχέτιση αποδίδει καλύτερα στη ζώνη A2.

Περίπτωση Β (χρήση εκτιμώμενης τιμής του ιξώδους του dead oil)



Σχήμα 6.21 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσεως της πίεσης με τη συσχέτιση των Elsharkawy & Alikhan για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών A1 και A2 (Περίπτωση Β: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil).

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ



Σχήμα 6.22 (α, β). Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Elsharkawy & Alikhan για το κορεσμένο πετρέλαιο των ζωνών B και C (Περίπτωση B: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil).

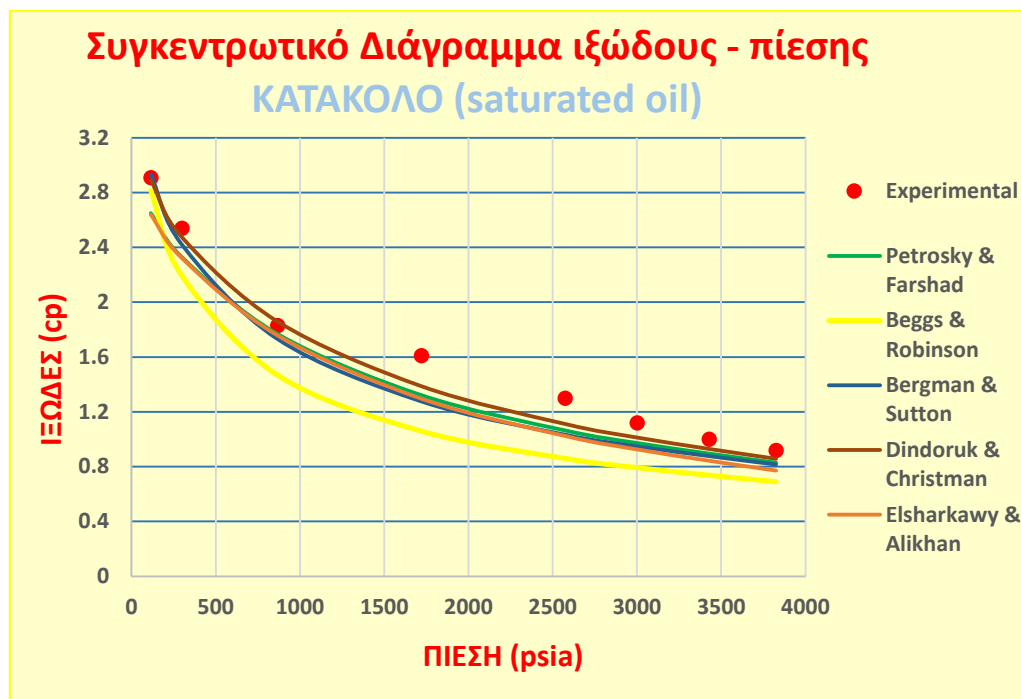
Από τα Σχήματα 6.22 και 6.23, παρατηρείται βελτίωση της απόδοσης της συσχέτισης με τη χρήση εκτιμώμενων τιμών για το ιξώδες του dead oil. Το εύρος του απόλυτου μέσου σχετικού σφάλματος (%AARE) κυμαίνεται μεταξύ 7% και 26%. Η συσχέτιση εμφανίζει μεγαλύτερη ικανότητα πρόρρησης του ιξώδους στη ζώνη B.

6.3.6 Αξιολόγηση των συσχετίσεων για το πετρελαϊκό ρευστό του κοιτάσματος του Δυτικού Κατάκολου

Όπως αναφέρεται στην Ενότητα 6.2 (Πίνακας 6.3), οι συσχετίσεις που εκτιμούν το ιξώδες του dead oil για το πετρελαϊκό ρευστό του Δ. Κατάκολου παρουσιάζουν πολύ υψηλά σφάλματα (%AARE) τα οποία σε όλες τις περιπτώσεις ξεπερνούν το 78%. Συνεπώς, είναι λογικό ότι στη παρούσα μελέτη αξιολόγησης συσχετίσεων για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου, στις οποίες υπεισέρχεται ως παράμετρος η τιμή του ιξώδους του dead oil, η Περίπτωση A, που χρησιμοποιεί πειραματικές τιμές ιξώδους dead oil να εμφανίζει μικρότερα ποσοστά σφάλματος σε σχέση με την Περίπτωση B όπου χρησιμοποιούνται εκτιμώμενες τιμές ιξώδους dead oil.

Περίπτωση A (χρήση πειραματικής τιμής του ιξώδους του dead oil)

Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.5, οι συσχετίσεις που εκτιμούν το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου σε αυτό το κοίτασμα αποδίδουν πολύ ικανοποιητικά με την πειραματική τιμή του ιξώδους του dead oil. Συγκεκριμένα, το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (%AARE) στην περίπτωση αυτή δεν ξεπερνά το 19%.



Σχήμα 6.23 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης για το κορεσμένο πετρέλαιο του Δ. Κατάκολου (Περίπτωση Α: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil).

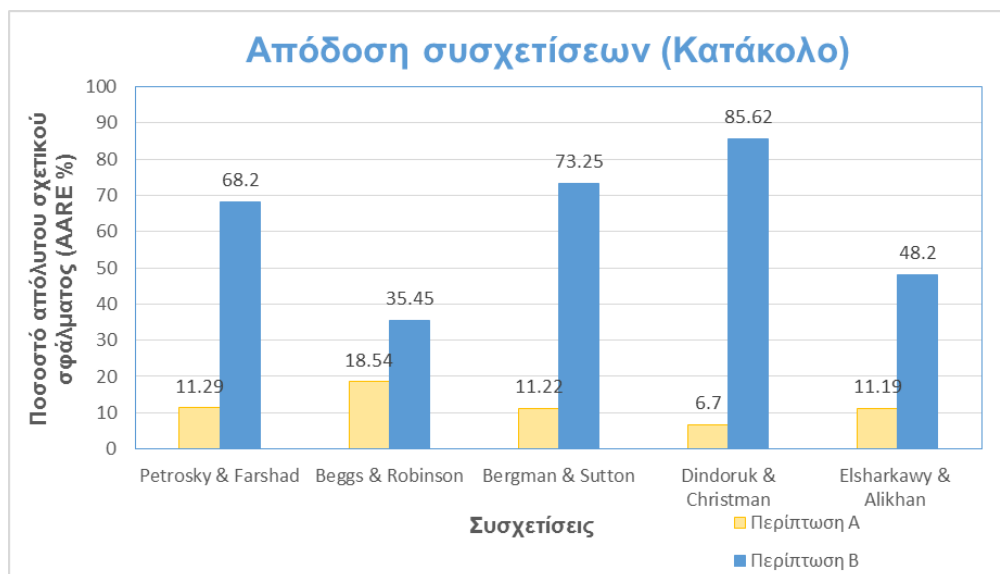
Σύμφωνα με το Σχήμα 6.24 που παρουσιάζει την πρόρρηση του ιξώδους συναρτήσει της πίεσης για το κορεσμένο πετρέλαιο του Δ. Κατάκολου, η συσχέτιση που αποδίδει καλύτερα είναι των Dindoruk & Christman με απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα 6.7%.

Οι λοιπές συσχετίσεις των Petrosky & Farshad, Bergman & Sutton και Elsharkawy & Alikhan επίσης έχουν πολύ καλή απόδοση με συγκρίσιμα ποσοστά μέσου απόλυτου σφάλματος της τάξης του 11% σε όλες τις περιπτώσεις. Αξίζει να αναφερθεί ότι τα %AARE που παρουσιάζουν οι συσχετίσεις στην περίπτωση αυτή είναι μικρότερα και από τα ποσοστά που καταγράφουν οι ερευνητές στα άρθρα τους, όπως στο Κεφάλαιο 5.

Σύμφωνα με την Ενότητα 5.5, η μορφή της συσχέτισης και η θέση του λόγου διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο (R_s) στον αριθμητή και τον παρονομαστή των συντελεστών A και B της εξίσωσης (5.7) επηρεάζει τις τελικές τιμές τους. Συγκεκριμένα, οι συντελεστές A και B είναι μεγαλύτεροι για την συσχέτιση των Dindoruk & Christman σε σχέση με τις υπόλοιπες συσχετίσεις (ο B πάντοτε). Το γεγονός αυτό επηρεάζει την τιμή του ιξώδους. Δεδομένης της υποεκτίμησης του ιξώδους από όλες τις συσχετίσεις, η μεγαλύτερη τιμή που αποδίδει η συσχέτιση των Dindoruk & Christman (Dindoruk, et al., 2004) ελαχιστοποιεί το σφάλμα

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Περίπτωση Β (χρήση εκτιμώμενης τιμής του ιξώδους του dead oil)



Σχήμα 6.24: Απόδοση συσχετίσεων για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου του Δ. Κατάκολου (Σύγκριση Περιπτώσεων Α και Β)

Σύμφωνα με το Σχήμα 6.25, οι συσχετίσεις που εκτιμούν το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου σε αυτό το κοίτασμα δεν αποδίδουν εξίσου καλά με τη χρήση της εκτιμώμενης τιμής του ιξώδους του dead oil. Συγκεκριμένα, το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (% AARE) στην περίπτωση αυτή κυμαίνεται μεταξύ 35-86%. Η συμπεριφορά αυτή αιτιολογείται από τη μεγάλη απόκλιση που παρουσιάζει η εκτιμώμενη τιμή του ιξώδους του dead oil που εκτιμήθηκε από τη συσχέτιση Beggs and Robinson. Στις εξισώσεις (5.2), (5.5), (5.7), (5.10) και (5.13) παρατηρείται ότι όσο μεγαλώνει η τιμή του ιξώδους του dead oil τόσο μεγαλώνει το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου. Συνεπώς, για την περίπτωση Β όπου το ιξώδες του dead oil αυξάνεται κατά 137.16%, οι τιμές που προκύπτουν για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου είναι υπερεκτιμημένες σε πολύ μεγάλο βαθμό και εύλογα παρουσιάζουν σφάλματα (%AARE) που φτάνουν το 80%.

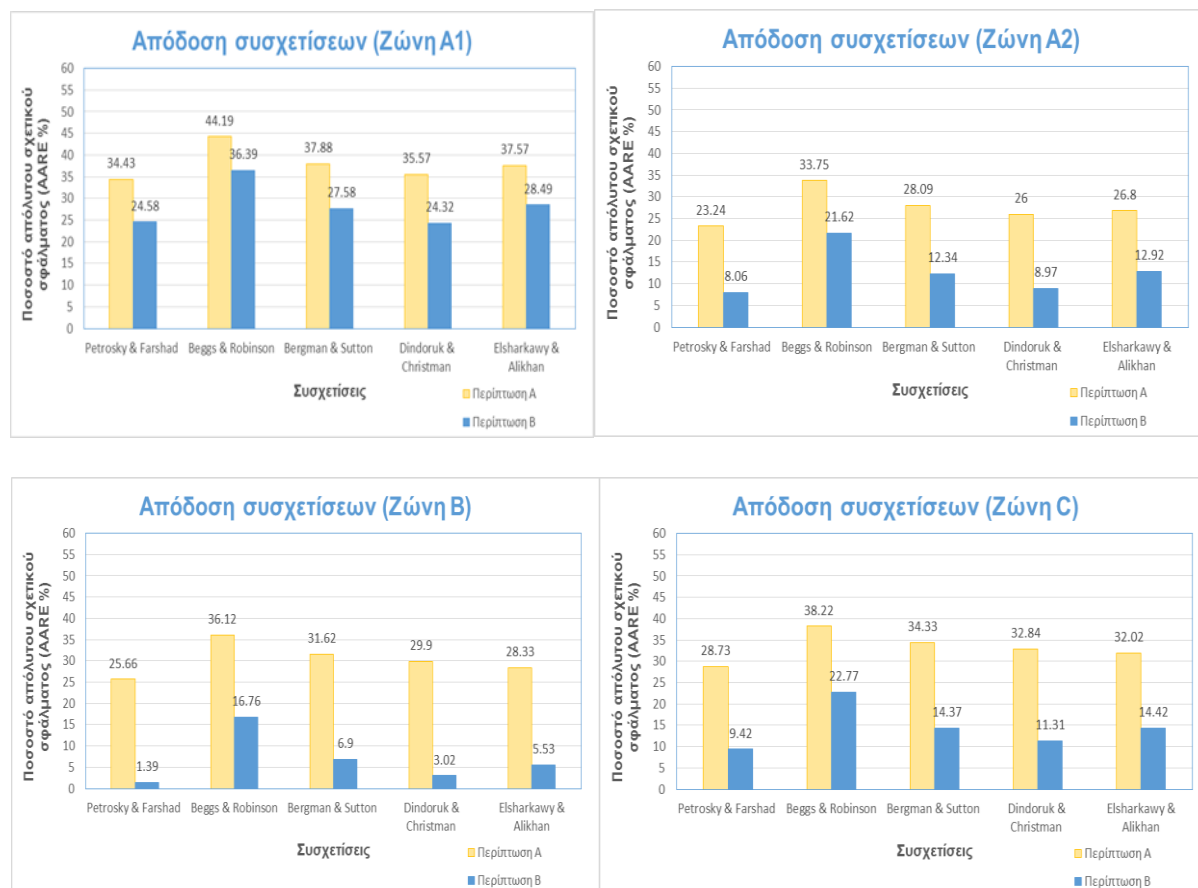
6.3.7 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Η πλειοψηφία των συσχετίσεων για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου είναι συναρτήσεις του ιξώδους του dead oil και του λόγου του διαλυμένου αερίου προς το πετρέλαιο (R_s). Οι συσχετίσεις που ελέγχθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία έχουν την ίδια βασική μορφή ($\mu_{ob} = A \cdot (\mu_{od})^B$). Φυσικά, στην εκάστοτε συσχέτιση διαφοροποιούνται οι συντελεστές A και B. Όπως αναφέρεται

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

στην Ενότητα 6.3, η αξιολόγηση είχε δύο διαφορετικές προσεγγίσεις (Περιπτώσεις A και B).

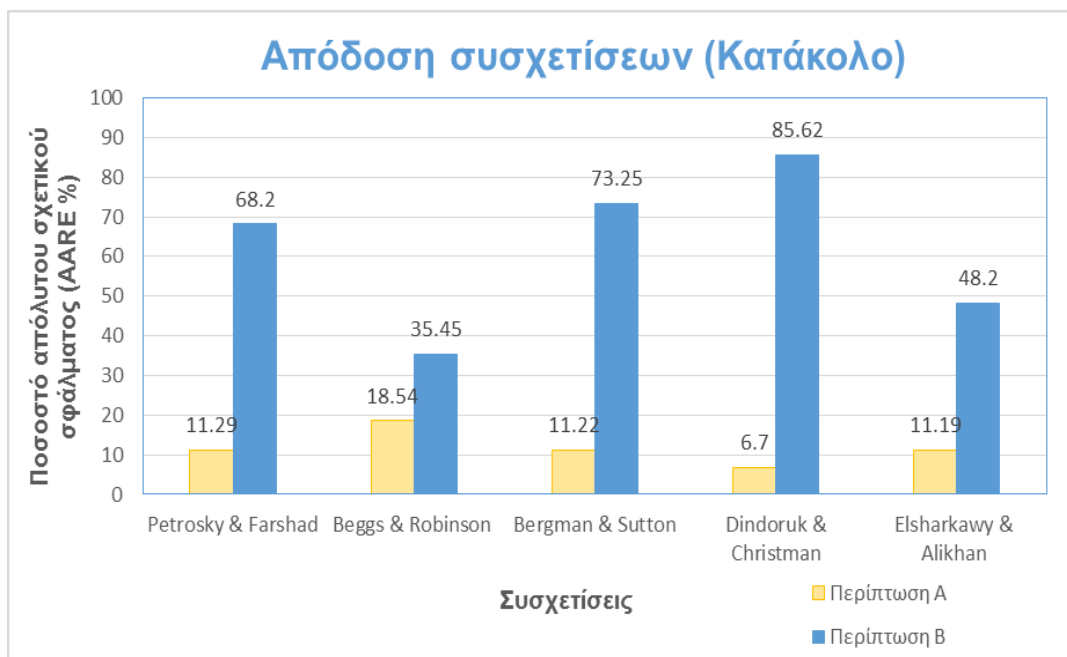
Στο Σχήμα 6.26 (α, β, γ, δ) παρουσιάζεται η απόδοση των συσχετίσεων που εφαρμόστηκαν για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου στον Πρίνο. Αντίστοιχα, το Σχήμα 6.27 παρουσιάζει την απόδοση των συσχετίσεων στο Δ. Κατάκολο.



Σχήμα 6.25 (α, β, γ, δ). Απόδοση συσχετίσεων στην πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου (Περίπτωση A και B – ΠΡΙΝΟΣ).

Επισημαίνεται ειδικά για το Σχήμα 6.26 (α) και όπως αναφέρεται στην Ενότητα 6.3.3, ότι η ζώνη A1 μόνο του Πρίνου τίθεται εκτός πεδίου εφαρμογής της συσχέτισης των Bergman % Sutton αλλά παρόλα αυτά η απόδοσή της ελέγχεται και αξιολογείται συνολικά λόγω της ιδιαίτερης φύσης του πεδίου εφαρμογής της.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ



Σχήμα 6.26 Απόδοση συσχετίσεων στην πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου (Περίπτωση A και B – ΚΑΤΑΚΟΛΟ).

Τα βασικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την μελέτη της Περίπτωσης A είναι τα εξής:

- Όλες οι συσχετίσεις ανεξαιρέτως παρουσιάζουν χαμηλότερο απόλυτο ποσοστό σχετικού σφάλματος για την ζώνη A2 (Σχήματα 6.2(β), 6.6(β), 6.8(β), 6.12(β), 6.16(β)). Δεδομένου ότι από τη σύγκριση της πυκνότητας API, του βάθους, του σημείου φυσαλίδας και της συγκέντρωσης σε άζωτο, διοξείδιο του άνθρακα και υδρόθειο όλων των ζωνών δεν αιτιολογείται η καλύτερη απόδοση στην ζώνη A2, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η ανάλυση σύστασης (PNA) είναι απαραίτητη για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.
- Όλες οι συσχετίσεις παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά επιδεικνύοντας σφάλματα τα οποία δεν αποκλίνουν πολύ μεταξύ τους. Μάλιστα, παρατηρείται σε όλες η ίδια σειρά αύξησης σφάλματος ανά τις ζώνες η οποία είναι: A2→B→C→A1.
- Η συσχέτιση η οποία προσεγγίζει καλύτερα το πετρελαϊκό ρευστό του Πρίνου είναι των Petrosky & Farshad με ποσοστά σφάλματος %AARE τα οποία κυμαίνονται μεταξύ 23.24% - 34.43%.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

- Το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου στο πετρελαϊκό ρευστό του Δ. Κατάκολου εκτιμάται ακριβέστερα από τη συσχέτιση Dindoruk & Christman (Dindoruk, et al., 2004).
- Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τα αποτελέσματα της εφαρμογής των συσχετίσεων που επιλέχθηκαν στα κοιτάσματα του Ελλαδικού χώρου πλησιάζουν αρκετά τις αναφορές του McCain (McCain, και συν., 2011) στον Πίνακα 5.4. Συγκεκριμένα, για την συσχέτιση των Petrosky & Farshad που επιλέγεται στον Πρίνο, ο McCain αναφέρει AARE=31.15% έναντι 34.43% που ήταν το μέγιστο στην ζώνη A1 του Πρίνου.

Τα βασικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την μελέτη της Περίπτωσης B είναι τα εξής:

- Όλες οι συσχετίσεις, ανεξαιρέτως, απέδωσαν με περισσότερη ακρίβεια στην πρόρρηση του ιξώδους κάνοντας χρήση των εκτιμώμενων τιμών του ιξώδους του dead oil.
- Η ζώνη που εμφανίζει το ελάχιστο σφάλμα στο σύνολο των συσχετίσεων είναι η B και αυτό αιτιολογείται παρακάτω. Η συσχέτιση των Beggs & Robinson υπερεκτιμά τις τιμές του ιξώδους του dead oil με αποτέλεσμα η βασική μορφή που έχει η συσχέτιση για το κορεσμένο ιξώδες [$\mu_{ob} = A \cdot (\mu_{od})^B$] να επηρεάζει τα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, αφού η βάση μ_{od} μεγαλώνει και όλοι οι άλλοι συντελεστές παραμένουν ίδιοι, η τελική τιμή του μ_{ob} αυξάνεται. Με την προϋπόθεση ότι οι συσχετίσεις που ελέγχθηκαν για το κορεσμένο ιξώδες με εισαγωγή του πειραματικού ιξώδους του dead oil υποεκτιμούσαν τις πειραματικές τιμές από την ανάλυση PVT, εξάγεται το συμπέρασμα ότι, εύλογα, τα νέα ποσοστά θα είναι μικρότερα και δεν θα υποβιβάζουν σε τέτοιο βαθμό τις μετρήσεις. Ο λόγος που η εκτιμώμενη τιμή για τη ζώνη B προσεγγίζει τόσο καλά την πειραματική τιμή είναι ότι το σφάλμα της συσχέτισης για το dead oil έχει το μεγαλύτερο σφάλμα σε αυτή τη ζώνη (άρα προκύπτουν μεγαλύτερες τιμές για το μ_{ob}). Κατά τον ίδιο τρόπο, το μεγαλύτερο σφάλμα εντοπίζεται στην ζώνη A1.
- Σημαντικότερο ρόλο έχει η πυκνότητα API για την οποία παρατηρήθηκε ότι όσο μικρότερη είναι, τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του ιξώδους του dead oil που εκτιμά η συσχέτιση των Beggs & Robinson (Beggs, και συν., 1975). Συνεπώς, ερμηνεύεται το γεγονός ότι η ζώνη A2 έχει καλύτερη απόδοση σε σχέση με τη ζώνη C (η ζώνη A2 παρουσιάζει χαμηλότερη πυκνότητα άρα μεγαλύτερο ιξώδες

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

dead oil και συνεπώς μικρότερη υποεκτίμηση για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου).

- Η συσχέτιση που επιλέγεται είναι για ακόμη μία φορά εκείνη των Petrosky & Farshad για την περίπτωση του Πρίνου. Με τη χρήση της συσχέτισης των Beggs & Robinson (Beggs, και συν., 1975) έχει επιτευχθεί σχεδόν άριστη συμφωνία των πειραματικών δεδομένων του κοιτάσματος του Πρίνου σε σύγκριση με τις τιμές που εκτιμήθηκαν μέσω της συσχέτισης. Το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα κυμαίνεται μεταξύ 1% - 10% στις ζώνες A2, B και C και για την ζώνη A1 ισούται με 25%.
- Όσο αφορά στο ρευστό του Δ. Κατάκολου, η Περίπτωση B παρουσιάζει εμφανώς μικρότερη αδυναμία στην πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου γεγονός που αιτιολογείται σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην Ενότητα 6.2 σχετικά με το Σχήμα 6.3.

Ως συγκεντρωτικά αποτελέσματα από τη μελέτη και των δύο περιπτώσεων προκύπτουν τα εξής:

Οι καμπύλες στα διαγράμματα του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου σε σχέση με την πίεση εμφανίζουν διαφορές ανά ζώνη πετρελαϊκού ρευστού στην περίπτωση του Πρίνου και στην περίπτωση του Δ. Κατάκολου. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην πίεση κορεσμού του κάθε ρευστού που σε κάποιες περιπτώσεις είναι πολύ χαμηλή (π.χ. ζώνη A1 Πρίνου με $P_b = 1189.7$ psia μέχρι τη ζώνη C με $P_b = 2059.7$ psia) και πιο υψηλή όπως στο Δ. Κατάκολο ($P_b = 3825.9$ psia). Παρατηρούνται λοιπόν καμπύλες μεγαλύτερης κλίσης (απότομης αύξησης του ιξώδους), όπως στην περίπτωση της ζώνης A1 και A2 του Πρίνου σε σχέση με τις περισσότερο ομαλές των λοιπών, κατά την πτώση πίεσης από την πίεση κορεσμού μέχρι την ατμοσφαιρική.

Σύμφωνα με την παραπάνω αξιολόγηση, η συσχέτιση που προτείνεται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου τόσο για τα ρευστά του Πρίνου όσο και για το ρευστό του Δ. Κατάκολου είναι των Petrosky & Farshad.

Επίσης και η συσχέτιση των Dindoruk & Christman φαίνεται να αποδίδει αρκετά καλά σε κάθε περίπτωση.

6.4 Πρόρρηση ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου

Στην υποενότητα αυτή εξετάζεται η εφαρμογή συσχετίσεων για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου των πετρελαϊκών ρευστών του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου.

Στην περιοχή των πιέσεων πάνω από την πίεση κορεσμού, το ιξώδες του πετρελαίου μειώνεται με την μείωση της πίεσης. Καθώς δεν υπάρχει διαλυμένο αέριο στο πετρελαϊκό ρευστό, η πίεση (κορεσμού ή ταμειυτήρα) αποτελεί την κύρια παράμετρο που επηρεάζει την εκτίμηση του ιξώδους. Σημαντική επίδραση επίσης έχει το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου (R_s), το οποίο εισάγεται σαν δεδομένο στις συσχετίσεις πρόρρησης του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου καθώς επίσης και ο λόγος του διαλυμένου αερίου προς το πετρέλαιο (σύμβολο), όταν εισάγεται σαν δεδομένο στις παραπάνω συσχετίσεις.

Οι συσχετίσεις οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για εφαρμογή και αξιολόγηση στα πετρελαϊκά ρευστά του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.7.

Πίνακας 6.7. Συσχετίσεις που επιλέχθηκαν για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου στον Πρίνο και το Κατάκολο.

Bergman & Sutton (Bergman, et al., 2006)
Dindoruk & Christman (Dindoruk, et al., 2004)
Vazquez & Beggs (Vazquez, et al., 1980)

Οι συσχετίσεις πρόρρησης του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου, χρησιμοποιούν ως δεδομένο εισαγωγής το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου (μ_{ob}) και εμμέσως το ιξώδες του dead oil (μ_{od}). Σε αυτή τη κατηγορία πετρελαϊκής φάσης, οι δημιουργοί των συσχετίσεων δε διευκρινίζουν σαφώς αν το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου αποτελεί πειραματική τιμή ή εκτιμώμενη μέσω κάποιας συσχέτισης. Επισημαίνεται ότι για την παράμετρο του λόγου του διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο (R_s), όπου αυτή υπεισέρχεται ως παράμετρος στις συσχετίσεις, χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση, οι πειραματικές τιμές της που διατίθενται από την εργαστηριακή ανάλυση PVT των ρευστών και συγκεκριμένα από το πείραμα DLE που έχει διενεργηθεί στο πλαίσιο αυτής.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ελέγχθηκαν τρεις εναλλακτικές περιπτώσεις για την εκτίμηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου στη βάση των προαναφερθέντων συσχετίσεων:

- A.** Εφαρμογή κάθε συσχέτισης με χρήση πειραματικών τιμών για τις παραμέτρους του ιξώδους του dead oil και του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου (Περίπτωση A).
- B.** Εφαρμογή κάθε συσχέτισης με χρήση πειραματικών τιμών για το ιξώδες του dead oil και εκτιμώμενων τιμών για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου, όπως αυτές προκύπτουν από τη συσχέτιση των Petrosky & Farshad (Petrosky, και συν., 1995) που προκρίθηκε στην αξιολόγηση του κορεσμένου πετρελαίου της Ενότητας 6.3 (Περίπτωση B).
- C.** Εφαρμογή κάθε συσχέτισης με χρήση εκτιμωμένων τιμών για το ιξώδες του dead oil, όπως αυτές προκύπτουν από τη συσχέτιση των Beggs & Robinson (Beggs, και συν., 1975) (που προκρίθηκε στην αξιολόγηση του ιξώδους του dead oil της ενότητας 6.2), και το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου, όπως αυτές προκύπτουν από τη συσχέτιση των Petrosky & Farshad (Petrosky, και συν., 1995) που προκρίθηκε στην αξιολόγηση του κορεσμένου πετρελαίου της Ενότητας 6.3 (Περίπτωση C).

Στον Πίνακα 6.8. συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των συσχετίσεων του Πίνακα 6.7 για την κάθε ως άνω περίπτωση εκτίμησης του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Πίνακας 6.8. Αποτελέσματα πρόρρησης του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου.

Συσχετίσεις	ΠΡΙΝΟΣ				ΚΑΤΑΚΟΛΟ AARE %	Προέλευση ιξώδους (πειραματική ή εκτιμώμενη)	
	Ζώνη A1 AARE %	Ζώνη A2 AARE %	Ζώνη B AARE %	Ζώνη C AARE %		Dead oil	Κορεσμένο πετρέλαιο
Bergman & Sutton	20.38	9.59	8.96	14.55	2.55	Ανάλυση PVT	Ανάλυση PVT
	22.91	17.2	15.96	15.14	12.23	Ανάλυση PVT	Petrosky & Farshad
	12.6	3.98	7.8	7.33	45.73	Beggs & Robinson	Petrosky & Farshad
Dindoruk & Christman	20.51	10.37	10.45	15.9	2.08	Ανάλυση PVT	Ανάλυση PVT
	11.05	5.46	6.35	10.78	11.78	Ανάλυση PVT	Petrosky & Farshad
	13.3	8.12	10.26	14.37	46.35	Beggs & Robinson	Petrosky & Farshad
Vazquez & Beggs	53.63	32.49	20.93	26.83	2.91	Ανάλυση PVT	Ανάλυση PVT
	18.38	16.55	11.42	11.62	12.50	Ανάλυση PVT	Petrosky & Farshad
	22.61	22.76	19.72	18.02	44.90	Beggs & Robinson	Petrosky & Farshad

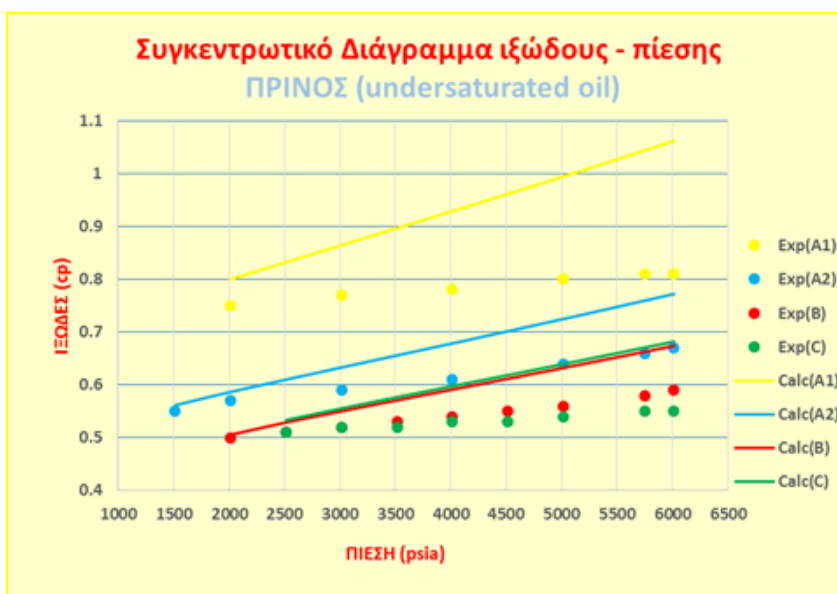
Στις παρακάτω ενότητες παρουσιάζεται η απόδοση της κάθε συσχέτισης που χρησιμοποιήθηκε για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου για κάθε περίπτωση, όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω.

6.4.1 Συσχέτιση Bergman & Sutton

Στα Σχήματα 6.27-6.29 που ακολουθούν παρουσιάζεται η απόδοση της συσχέτισης στις τέσσερις ζώνες πετρελαϊκών ρευστών του Πρίνου για κάθε περίπτωση που μελετήθηκε.

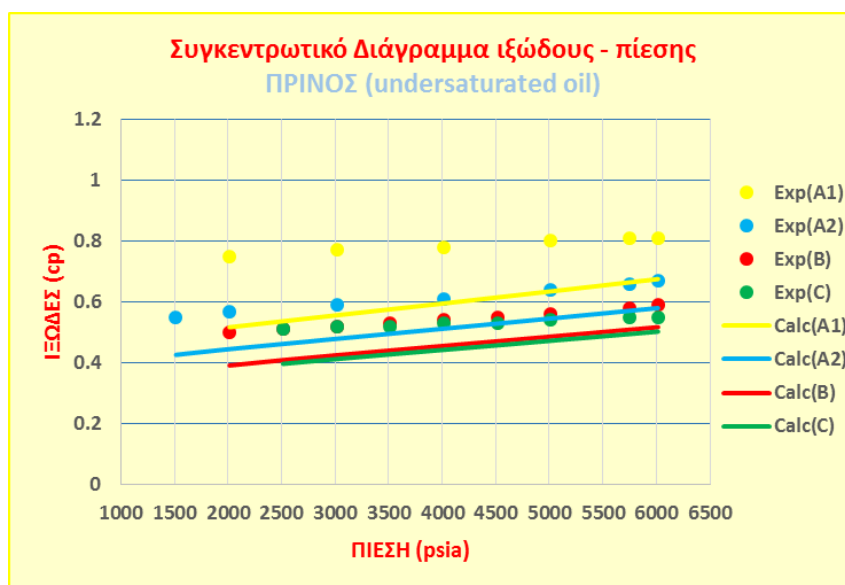
6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Περίπτωση Α (χρήση πειραματικής τιμής του ιξώδους του dead oil και του κορεσμένου πετρελαίου)



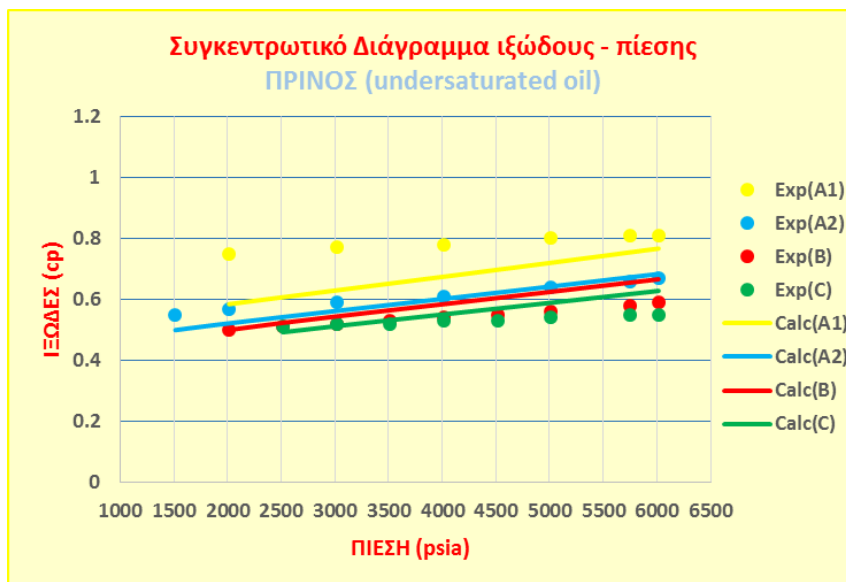
Σχήμα 6.27 Πρόρρησηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Bergman & Sutton για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Πρίνου (Περίπτωση Α: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil & του κορεσμένου πετρελαίου).

Περίπτωση Β (χρήση πειραματικής τιμής του ιξώδους του dead oil και εκτιμώμενης τιμής ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου)



Σχήμα 6.28 Πρόρρησηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Bergman & Sutton για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Πρίνου (Περίπτωση Β: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil και εκτιμώμενης τιμής του κορεσμένου πετρελαίου).

Περίπτωση C (χρήση εκτιμώμενης τιμής του ιξώδους του dead oil και του κορεσμένου πετρελαίου)



Σχήμα 6.29 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Bergman & Sutton για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Πρίνου (Περίπτωση C: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil και του κορεσμένου πετρελαίου).

Η συσχέτιση Bergman & Sutton παρουσιάζει σχετικά καλή ικανότητα στην πρόρρηση των τιμών του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται, με ένα εύρος σφαλμάτων (%AARE) που κυμαίνεται συνολικά από 4-23%. Αναφέρεται ότι οι συγγραφείς παρουσιάζουν %AARE της συσχέτισής τους, 3.64% για θερμοκρασίες άνω των 100°F.

Από τις τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, η περίπτωση C (κατά την οποία γίνεται χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil και του κορεσμένου πετρελαίου από τις συσχετίσεις που είχαν προκριθεί στην αντίστοιχη μελέτη), παρουσιάζει τα χαμηλότερα ποσοστά απόλυτου μέσου σχετικού σφάλματος (%AARE) που κυμαίνονται μεταξύ 7% και 13%.

Ξεκινώντας από την Περίπτωση A παρατηρείται ότι η συσχέτιση των Bergman & Sutton προσεγγίζει ικανοποιητικά (ελαφρώς υπερεκτιμημένα) τις πειραματικές τιμές του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου του Πρίνου ενώ η αδυναμία της φαίνεται να εντοπίζεται στις υψηλότερες πιέσεις (Σχήμα 6.27). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι βάσει της μαθηματικής έκφρασης που έχει (εξίσωση 5.11) όσο αυξάνεται

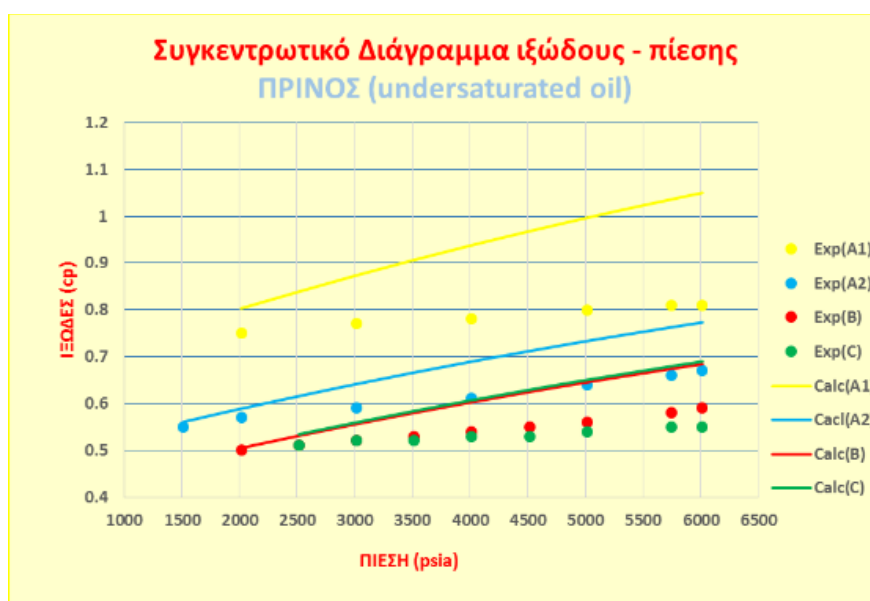
6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

η πίεση p , ο όρος $(p - p_b)$ (pressure differential) που αποτελεί εκθέτη (με βάση το e) οδηγεί τελικά σε εκτιμήσεις μεγαλύτερων τιμών ιξώδους. Η χρήση της εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου βάσει των Petrosky & Farshad που εφαρμόζεται στην Περίπτωση Β διορθώνει αυτή την αδυναμία των Bergman & Sutton στις υψηλές πιέσεις ενώ οδηγεί σε ελαφρώς υποεκτιμημένες τιμές ιξώδους σε όλες τις ζώνες (Σχήμα 6.28) με μια επιμέρους αύξηση των σφαλμάτων. Η χρήση τελικά και των δύο εκτιμώμενων τιμών (ιξώδους dead oil & ιξώδους κορεσμένου πετρελαίου) της Περίπτωσης C, επιδρά σε αυτή τη συμπεριφορά επιφέροντας χαμηλότερα ποσοστά σφαλμάτων σε όλες τις ζώνες του Πρίνου.

6.4.3 Συσχέτιση Dindoruk & Christman

Στα Σχήματα 6.31-6.33 που ακολουθούν παρουσιάζεται η απόδοση της συσχέτισης στις τέσσερις ζώνες πετρελαϊκών ρευστών του Πρίνου για κάθε περίπτωση που μελετήθηκε.

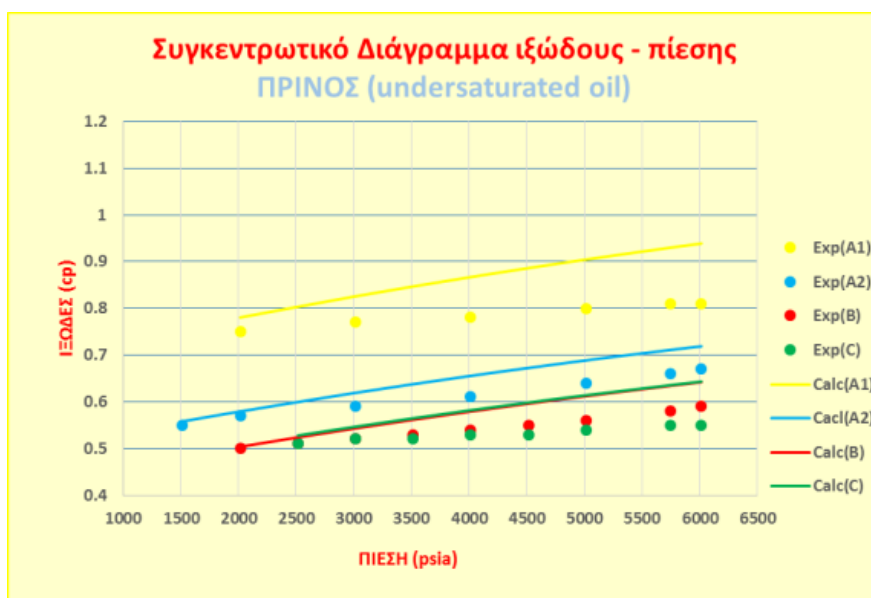
Περίπτωση A (χρήση πειραματικής τιμής του ιξώδους του dead oil και του κορεσμένου πετρελαίου)



Σχήμα 6.30 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Dindoruk & Christman για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Πρίνου (Περίπτωση A: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil & του κορεσμένου πετρελαίου).

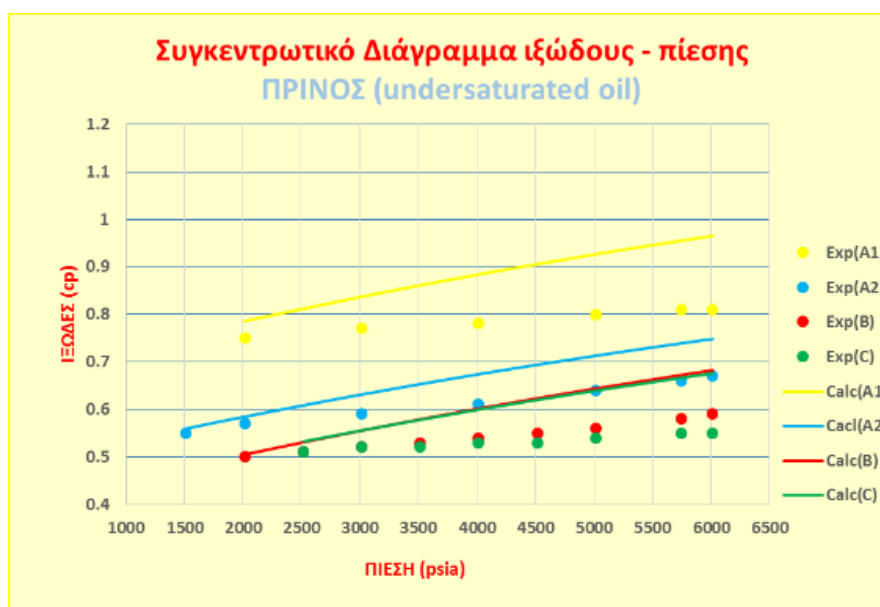
6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Περίπτωση Β (χρήση πειραματικής τιμής του ιξώδους του dead oil και εκτιμώμενης τιμής ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου)



Σχήμα 6.31 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Dindoruk & Christman για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Πρίνου (Περίπτωση Β: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil και εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου).

Περίπτωση C (χρήση εκτιμώμενης τιμής του ιξώδους του dead oil και του κορεσμένου πετρελαίου)



Σχήμα 6.32 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Dindoruk & Christman για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Πρίνου (Περίπτωση C: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil & του κορεσμένου πετρελαίου).

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Η συσχέτιση αυτή διαφέρει από την προηγούμενη των Bergman & Sutton καθώς εμπεριέχει και την παράμετρο του λόγου διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο (R_s).

Η συσχέτιση των Dindoruk & Christman παρουσιάζει επίσης καλή ικανότητα στην εκτίμηση των τιμών του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται, με ένα εύρος σφαλμάτων (%AARE) που κυμαίνεται συνολικά από 5.5 -21%. Οι συγγραφείς παρουσιάζουν %AARE της συσχέτισής τους, 5,99%. Επίσης σε όλες τις περιπτώσεις η συσχέτιση αυτή προκαλεί υπερεκτίμηση των πειραματικών τιμών του ιξώδους και παρουσιάζει αδυναμία στις υψηλές πιέσεις.

Από τις τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, η περίπτωση B (κατά την οποία γίνεται χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil και της εκτιμώμενης για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου από τις συσχετίσεις που είχαν προκριθεί στην αντίστοιχη μελέτη), παρουσιάζει ένα ελαφρύ προβάδισμα ως προς τα ποσοστά απόλυτου μέσου σχετικού σφάλματος (%AARE) που κυμαίνονται μεταξύ 5,46% και 11.05% ανά τις ζώνες του Πρίνου.

Η πιο έντονη αδυναμία της συσχέτισης στις υψηλές πιέσεις που εντοπίζεται στην Περίπτωση A (Σχήμα 6.31), μειώνεται ως προς τα ποσοστά σφάλματος με τη χρήση της εκτιμώμενης τιμής ιξώδους για το κορεσμένο πετρέλαιο στην Περίπτωση B (Σχήμα 6.32), ενώ η χρήση και των δύο εκτιμώμενων τιμών ιξώδους για dead oil και κορεσμένου πετρελαίου της Περίπτωσης C (Σχήμα 6.33) προσθέτει λίγο επιπλέον σφάλμα ανά τις ζώνες στο σφάλμα της Περίπτωσης B.

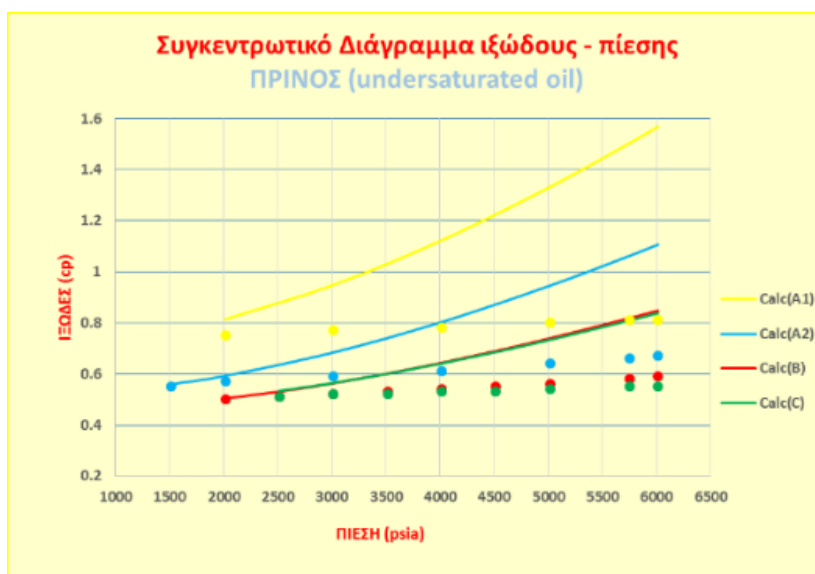
Το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (%AARE) των επιμέρους περιπτώσεων κυμαίνεται μεταξύ 10-21% για την Περίπτωση A, 5-11% για την Περίπτωση B και 8-15% για την Περίπτωση C.

6.4.4 Συσχέτιση Vazquez& Beggs

Στα Σχήματα 6.33-6.35 που ακολουθούν παρουσιάζεται η απόδοση της συσχέτισης στις τέσσερις ζώνες πετρελαϊκών ρευστών του Πρίνου για κάθε περίπτωση που μελετήθηκε.

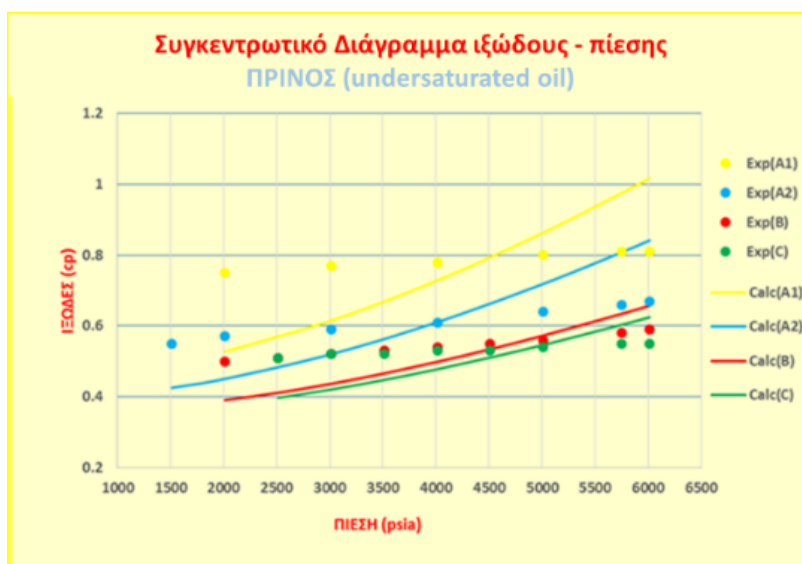
6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Περίπτωση Α (χρήση πειραματικής τιμής του ιξώδους του dead oil και του κορεσμένου πετρελαίου)



Σχήμα 6.33 Πρόρρησηση ιξώδους συναρτήσεσι της πίεσης με τη συσχέτιση των Vazquez& Beggs για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Πρίνου (Περίπτωση Α: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil & του κορεσμένου πετρελαίου).

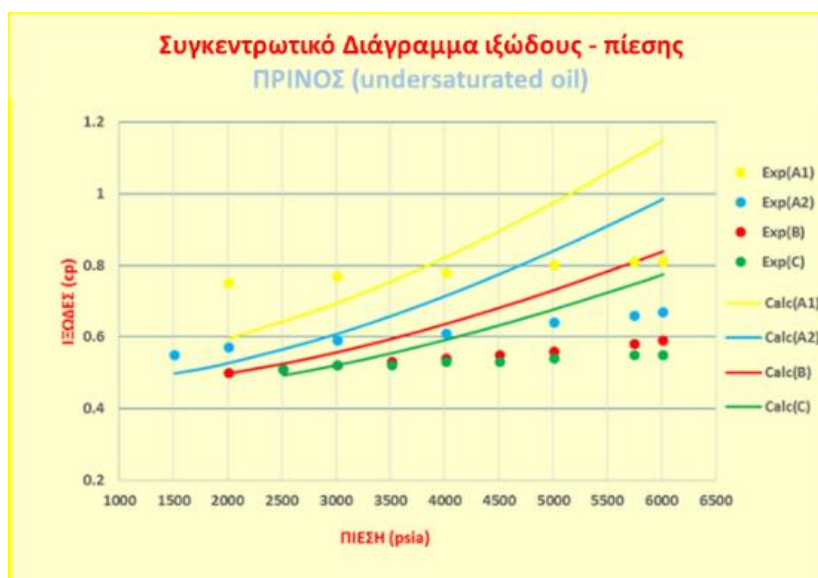
Περίπτωση Β (χρήση πειραματικής τιμής του ιξώδους του dead oil και εκτιμώμενης τιμής ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου)



Σχήμα 6.34 Πρόρρησηση ιξώδους συναρτήσεσι της πίεσης με τη συσχέτιση των Vazquez& Beggs για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Πρίνου (Περίπτωση Β: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil και εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου).

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Περίπτωση C (χρήση εκτιμώμενης τιμής του ιξώδους του dead oil και του κορεσμένου πετρελαίου)



Σχήμα 6.35 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσει της πίεσης με τη συσχέτιση των Vazquez & Beggs για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Πρίνου (Περίπτωση C: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil & του κορεσμένου πετρελαίου).

Οι Vazquez & Beggs (Vazquez, και συν., 1980) προτείνουν μια συσχέτιση που διαφοροποιείται στη μαθηματική της έκφραση σε σχέση με τις υπόλοιπες που προαναφέρθηκαν καθώς ενσωματώνουν σε αυτή τον όρο του λόγου της πίεσης προς την πίεση φυσαλίδας (p/p_b) έναντι του όρου της διαφοράς της πίεσης με την πίεση φυσαλίδας ($p - p_b$) των λοιπών. Σύμφωνα με τους Bergman & Sutton οι συσχετίσεις που χρησιμοποιούν τον όρο (p/p_b) έναντι του όρου ($p - p_b$) τείνουν να παρουσιάζουν υψηλότερα ποσοστά σφάλματος.

Η συσχέτιση των Vazquez & Beggs παρουσιάζει ελαφρώς χαμηλότερη ικανότητα από τις προηγούμενες συσχετίσεις που εξετάστηκαν στην εκτίμηση των τιμών του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάζονται, με ένα εύρος σφαλμάτων (%AARE) που κυμαίνεται συνολικά από 11-54%. Οι συγγραφείς δυστυχώς δεν περιλαμβάνουν αντίστοιχο %AARE της συσχέτισής τους, ενώ καταγράφεται το μέσο σχετικό σφάλμα του -7.5% της συσχέτισης αυτής στο άρθρο των Elsharkawy & Alikhan.

Από τις τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, η περίπτωση B (κατά την οποία γίνεται χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil και εκτιμώμενης για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου από τις συσχετίσεις που είχαν προκριθεί στην

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

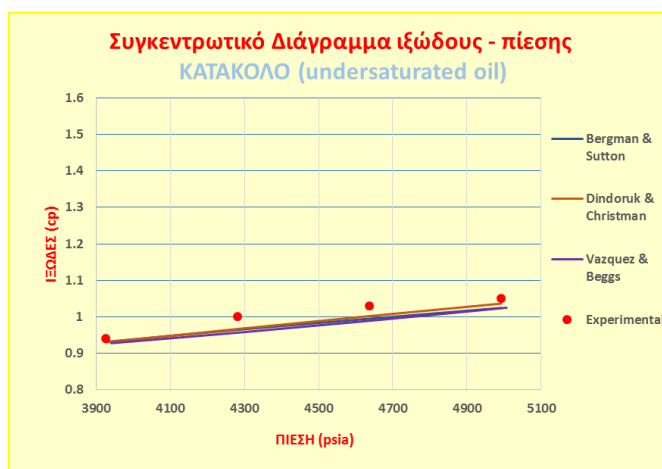
αντίστοιχη μελέτη), παρουσιάζει προβάδισμα ως προς τα ποσοστά απόλυτου μέσου σχετικού σφάλματος (%AARE) που κυμαίνονται μεταξύ 11,42% και 18.38% ανά τις ζώνες του Πρίνου.

Η μορφή της καμπύλης που προκύπτει από την εφαρμογή της συσχέτισης σε όλες τις Περιπτώσεις αποκλίνει από την σχετικά ομαλή (σχεδόν γραμμική) μείωση των πειραματικών τιμών του ιξώδους με τη μείωση της πίεσης. Έτσι λοιπόν στην Περίπτωση Α όπου παρατηρούνται απόλυτα μέσα σχετικά σφάλματα της τάξης των 20.93-53.63% ανά τις ζώνες του Πρίνου, η συσχέτιση αποκλίνει σημαντικά από τις μέσες προς τις υψηλές πιέσεις. Η ίδια συμπεριφορά ακολουθείται και στις λοιπές Περιπτώσεις όπου τα σφάλματα είναι μειωμένα σε σχέση με την Περίπτωση Α όπου πρακτικά η καμπύλη μετακινείται ουσιαστικά πιο χαμηλά, εκτιμώντας με περισσότερη ακρίβεια το ιξώδες των μέσων πιέσεων και αποκλίνοντας στις χαμηλές και υψηλές πιέσεις. Στην Περίπτωση C, η απόκλιση αυτή είναι λιγότερη έντονη στις χαμηλές πιέσεις.

6.4.5 Αξιολόγηση των συσχέτισεων για το πετρελαϊκό ρευστό του κοιτάσματος του Δ. Κατάκολου

Στα Σχήματα 6.37-6.39 που ακολουθούν παρουσιάζεται η απόδοση των συσχέτισεων στο πετρελαϊκό ρευστό του Δ. Κατάκολου για κάθε περίπτωση που μελετήθηκε.

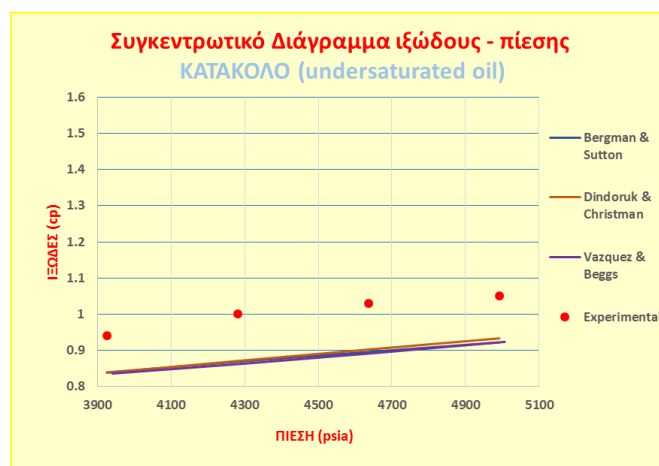
Περίπτωση Α (χρήση πειραματικής τιμής του ιξώδους του dead oil και του κορεσμένου πετρελαίου)



Σχήμα 6.36 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσεως της πίεσης για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Δ. Κατάκολου (Περίπτωση Α: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil και του κορεσμένου πετρελαίου).

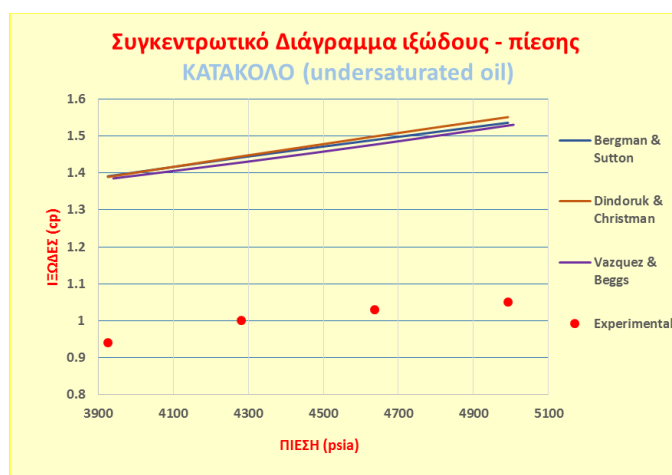
6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Περίπτωση Β (χρήση πειραματικής τιμής του ιξώδους του dead oil και εκτιμώμενης τιμής ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου)



Σχήμα 6.37 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσεως της πίεσης για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Δ. Κατάκολου (Περίπτωση Β: χρήση πειραματικής τιμής για το ιξώδες του dead oil και εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου).

Περίπτωση C (χρήση εκτιμώμενης τιμής του ιξώδους του dead oil και του κορεσμένου πετρελαίου)



Σχήμα 6.38 Πρόρρηση ιξώδους συναρτήσεως της πίεσης για το υποκορεσμένο πετρέλαιο του Δ. Κατάκολου (Περίπτωση C: χρήση εκτιμώμενης τιμής για το ιξώδες του dead oil και του κορεσμένου πετρελαίου)

Όλες οι συσχετίσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση του Δ. Κατάκολου στην Περίπτωση Α παρουσιάζουν μία πολύ καλή ικανότητα πρόρρησης του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου (Σχήμα 6.37), καθώς τα απόλυτα μέσα σχετικά σφάλματα που παρουσιάζουν κυμαίνονται μεταξύ 2-3%. Όλες οι συσχετίσεις προκαλούν μία ελαφριά υποεκτίμηση των πειραματικών τιμών του.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ

Στην περίπτωση της συσχέτισης των Bergman & Sutton, το %AARE που επιτυγχάνεται είναι 2.55% όταν οι ερευνητές παρουσιάζουν αντίστοιχη τιμή 5.56%, στην περίπτωση των Dindoruk & Christman, επιτυγχάνεται ποσοστό 2.08%, έναντι του 5.99% που παρουσιάζουν στο άρθρο τους, ενώ στην περίπτωση των Vasquez & Beggs, που αποτελεί όπως έχει προαναφερθεί πιο ιδιαίτερη έκφραση, το ποσοστό αυτό είναι 2.91%.

Στην περίπτωση του Δ. Κατάκολου, η χρήση εκτιμώμενων τιμών για το ιξώδες του dead oil ή/και του κορεσμένου πετρελαίου, στις συσχετίσεις εκτίμησης του υποκορεσμένου πετρελαίου χειροτερεύει σταδιακά την πρόρρηση των πειραματικών τιμών του.

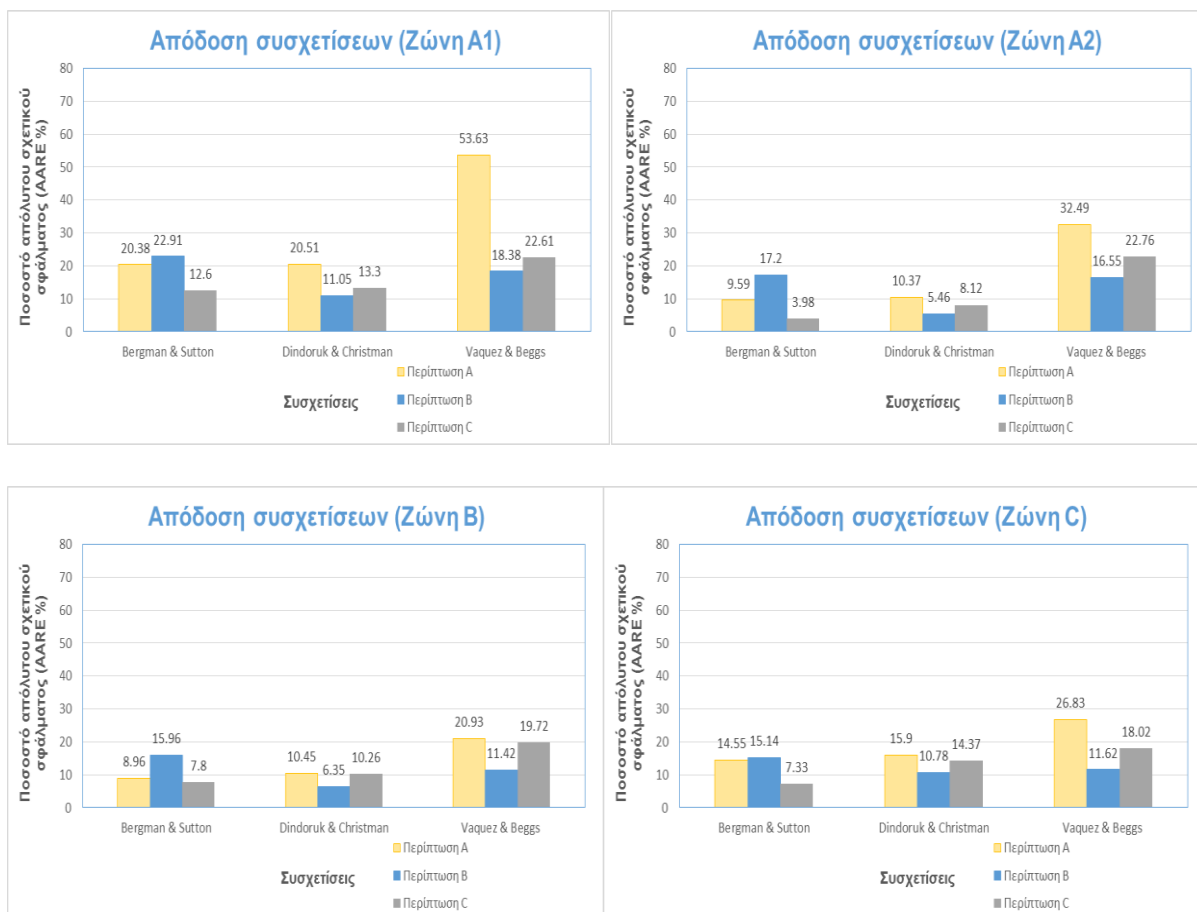
Στην Περίπτωση Β ωστόσο (Σχήμα 6.37), όπου οι συσχετίσεις που εκτιμούν το ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου χρησιμοποιούν την εκτιμώμενη τιμή ιξώδους για το κορεσμένο πετρέλαιο, επιτυγχάνουν μία καλή πρόρρηση των πειραματικών τιμών, με αύξηση των αντίστοιχων σφαλμάτων από 2.55% σε 12.23% για τους Bergman & Sutton, από 2.08% σε 11.78% για τους Dindoruk & Christman και από 2.91% σε 12.50% για τους Vasquez & Beggs.

Στην Περίπτωση C δε, όπου εισάγεται και εκτιμώμενη τιμή για το ιξώδες του dead oil βάσει της συσχέτισης Beggs & Robinson, τα σφάλματα αυτά αυξάνονται σημαντικά και κυμαίνονται μεταξύ 44-47% για τις συσχετίσεις που μελετώνται. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη δεδομένου ότι και στη μελέτη αντίστοιχων συσχετίσεων για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil της ενότητας 6.2, όλες οι συσχετίσεις παρουσίαζαν σημαντικά σφάλματα για την περίπτωση του Δ. Κατάκολου.

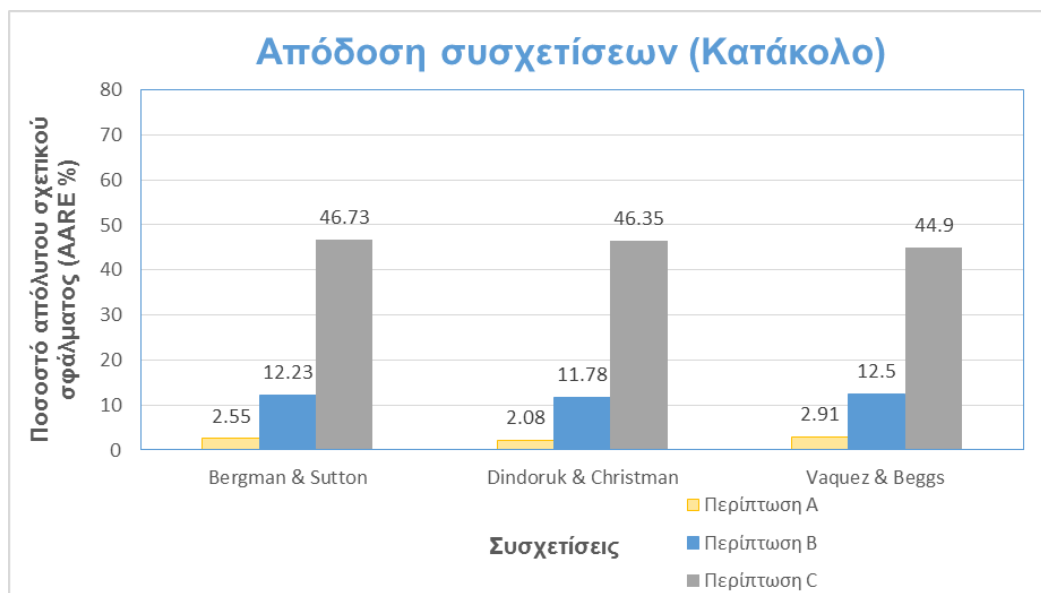
6.4.6 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Όπως αναφέρεται στην Ενότητα 6.4, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκαν τρεις περιπτώσεις για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου. Στο Σχήμα 6.39 (α, β, γ, δ) παρουσιάζεται η απόδοση των συσχετίσεων που εφαρμόστηκαν για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου στις επιμέρους ζώνες του Πρίνου. Αντίστοιχα το Σχήμα 6.40 παρουσιάζει την απόδοση των συσχετίσεων για το πετρελαϊκό ρευστό του Δ. Κατάκολου.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΛΛΑΔΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ



Σχήμα 6.39 (α, β, γ, δ). Απόδοση συσχετίσεων στην πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου (Περίπτωση A, B και C – ΠΡΙΝΟΣ).



Σχήμα 6.40 Απόδοση συσχετίσεων στην πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου (Περίπτωση A, B και C– ΚΑΤΑΚΟΛΟ).

Τα βασικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την μελέτη της Περίπτωσης Α είναι τα εξής:

- Παρά το γεγονός ότι η απόδοση όλων των συσχέτισεων (με εξαίρεση την Vazquez & Beggs (Vazquez, et al., 1980)) ήταν συγκρίσιμη, η συσχέτιση Bergman & Sutton καταφέρνει να προσεγγίσει καλύτερα τις πειραματικές τιμές του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου στον Πρίνο με % AARE στις ζώνες A2, B και C το οποίο δεν ξεπερνά το 15%. Τα ποσοστά αυτά είναι πλήρως αποδεκτά καθώς ακόμη και ο McCain στο σχετικό του βιβλίο αναφέρει υψηλότερο ποσοστό AARE (32.99%) για αυτή τη συσχέτιση τοποθετώντας την δεύτερη σε σειρά αξιοπιστίας (Πίνακας 5.5). Ταυτόχρονα, η συσχέτιση των Dindoruk & Christman είναι ανταγωνιστική καθώς έχει εξίσου χαμηλά ποσοστά %AARE που κυμαίνονται από 10.37-20.51%.
- Όλες οι συσχέτισεις υπερεκτιμούν τις πειραματικές τιμές του ιξώδους και παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μια σειρά αύξησης τους σφάλματος ανά τις ζώνες: B→A2→C→A1, επιδεικνύοντας αδυναμία στην πρόρρηση του ιξώδους στην ζώνη A1 του Πρίνου.
- Η απόδοση των συσχέτισεων στο πετρελαϊκό ρευστό του Δ. Κατάκολου χαρακτηρίζεται εξαιρετική καθώς τα σφάλματα (AARE) δεν ξεπερνούν το 3%. Μάλιστα, η συσχέτιση των Dindoruk & Christman παρουσιάζει ένα ελαφρύ προβάδισμα έναντι της επίσης πολύ καλής απόδοσης της συσχέτισης των Bergman & Sutton με απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα μόλις 2.08 και 2.55%, αντίστοιχα.

Τα βασικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την μελέτη της Περίπτωσης Β είναι τα εξής:

- Η χρήση των εκτιμώμενων τιμών του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου από τη συσχέτιση των Petrosky & Farshad (Petrosky & Farshad, Viscosity Correlations for Gulf of Mexico Crude Oils, 1995) στον Πρίνο δεν έχει τα ίδια αποτελέσματα για το σύνολο των συσχέτισεων υποκορεσμένου ιξώδους που ελέγχθηκαν. Συγκεκριμένα, με τη συσχέτιση Bergman & Sutton (Bergman & Sutton,

Undersaturated Oil Viscosity Correlation for Adverse Conditions , 2006) τα σφάλματα εκτίμησης του ιξώδους αυξάνονται ενώ η απόδοση των συσχετίσεων Dindoruk & Christman (Dindoruk & Christman, 2004) και Vazquez& Beggs (Vazquez & Beggs, 1980) βελτιώνεται σημαντικά.

- Η συσχέτιση που προκρίνεται στην Περίπτωση Β για τα πετρελαϊκά ρευστά του Πρίνου είναι των Dindoruk & Christman με απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα το οποίο έχει εύρος 5-11%.
- Η απόδοση των συσχετίσεων στο Δ. Κατάκολο παρουσιάζει ύφεση καθώς το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα αυξάνεται σε όλες τις συσχετίσεις φτάνοντας το 12%. Η συσχέτιση των Dindoruk & Christman εμφανίζει μικρό προβάδισμα με σφάλμα AARE=11.78% αλλά στην περίπτωση αυτή όλες οι μελετούμενες συσχετίσεις είναι πρακτικά ισοδύναμες.

Τα βασικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την μελέτη της Περίπτωσης C είναι τα εξής:

- Η Περίπτωση C δεν παρουσιάζει την ίδια επίδραση στο σύνολο των συσχετίσεων υποκορεσμένου ιξώδους που ελέγχθηκαν. Συγκεκριμένα, στη συσχέτιση Bergman & Sutton (Bergman & Sutton, Undersaturated Oil Viscosity Correlation for Adverse Conditions, 2006) τα σφάλματα εκτίμησης του ιξώδους μειώνονται και η απόδοση της βελτιώνεται αισθητά σε σύγκριση με την περίπτωση Β. Αντίθετα, η απόδοση των συσχετίσεων Dindoruk & Christman (Dindoruk & Christman, 2004) και Vazquez& Beggs (Vazquez & Beggs, 1980) μειώνεται.
- Η συσχέτιση η οποία προκρίνεται για το πετρελαϊκό ρευστό του Πρίνου είναι των Bergman & Sutton με απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα το που κυμαίνεται ανά τις ζώνες του μεταξύ 3.98-12.6%.

7. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ

7.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε παρέμβαση στις μαθηματικές εκφράσεις τριών συσχετίσεων με στόχο την βελτίωση της απόδοσης τους και την ακριβέστερη εκτίμηση του ιξώδους του πετρελαίου τόσο για το κοίτασμα του Πρίνου όσο και για το Κατάκολο. Οι τροποποιημένες συσχετίσεις που προτείνονται παρακάτω δύνανται να αποτελέσουν χρήσιμο εργαλείο για την πρόρρηση του ιξώδους σε περιπτώσεις έλλειψης πειραματικών δεδομένων.

Κατά αντιστοιχία με την κατηγοριοποίηση του ιξώδους που αναφέρεται στην Ενότητα 4.3 και την μεθοδολογία αξιολόγησης που ακολουθήθηκε στο Κεφάλαιο 6, επιχειρείται η τροποποίηση μίας συσχέτισης για κάθε κατηγορία ιξώδους: dead oil, κορεσμένο πετρέλαιο και υποκορεσμένο πετρέλαιο. Συγκεκριμένα, για το dead oil επιλέγεται η συσχέτιση Beggs & Robinson που προκρίθηκε βάσει των όσων έχουν αναφερθεί στην Ενότητα 6.2. Όσο αφορά στο κορεσμένο πετρέλαιο, επιλέγεται αντίστοιχα η συσχέτιση των Petrosky & Farshad που παρουσίασε τα μικρότερα σφάλματα στην εκτίμηση του ιξώδους. Για δε το υποκορεσμένο πετρέλαιο επιλέγονται οι συσχετίσεις των Bergman & Sutton και των Dindoruk & Christman, ανεξάρτητα της καλής συμπεριφοράς τους, σε μια προσπάθεια περαιτέρω βελτίωσής της.

Οι παρεμβάσεις/τροποποιήσεις των ως άνω μαθηματικών εκφράσεων έγιναν με τη βοήθεια του Solver και με στόχο την ελαχιστοποίηση του απόλυτου μέσου σχετικού σφάλματος (%AARE). Το Solver αποτελεί μέρος μιας λίστας εντολών και έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει μια βέλτιστη τιμή (μέγιστη, ελάχιστη ή ένα συγκεκριμένο αριθμό) η οποία εξυπηρετεί το χρήστη. Ο χρήστης έχοντας δημιουργήσει μια φόρμουλα σε ένα κελί (το οποίο ονομάζεται objective cell) εισάγει τις μεταβλητές (variables) που επιθυμεί να ορίσει έτσι ώστε το συγκεκριμένο κελί να πάρει τη βέλτιστη τιμή. Επιπρόσθετα, υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής περιορισμών ή ορίων (constraints or limits) είτε στις τιμές των μεταβλητών είτε σε άλλα κελιά που επηρεάζουν τον υπολογισμό της αρχικής φόρμουλας. Όλα τα παραπάνω σχηματίζουν ένα μοντέλο Solver. Ο Solver χρησιμοποιεί μια ποικιλία μεθόδων, από τον γραμμικό προγραμματισμό και τη μη γραμμική βελτιστοποίηση μέχρι τους γενετικούς και εξελικτικούς αλγόριθμους, για την εξεύρεση λύσεων.

7.2 Βελτιστοποίηση συσχέτισης Beggs & Robinson για το ιξώδες του *dead oil*

Στη συσχέτιση των Beggs & Robinson η τροποποίηση αφορούσε στην εξίσωση του συντελεστή X ο οποίος εμπεριέχει την επίδραση της θερμοκρασίας στον προσδιορισμό του ιξώδους του *dead oil*.

Σύμφωνα με την Ενότητα 5.4.1, η αρχική σχέση που αναπτύχθηκε από τους Beggs & Robinson για την πρόρρηση του ιξώδους του *dead oil* είναι ως εξής:

$$\mu_{od} = 10^X - 1 \quad (7.1)$$

όπου $X = y T^{-1.163}$

$$y = 10^Z$$

$$Z = 3.0324 - 0.02023 \gamma_o$$

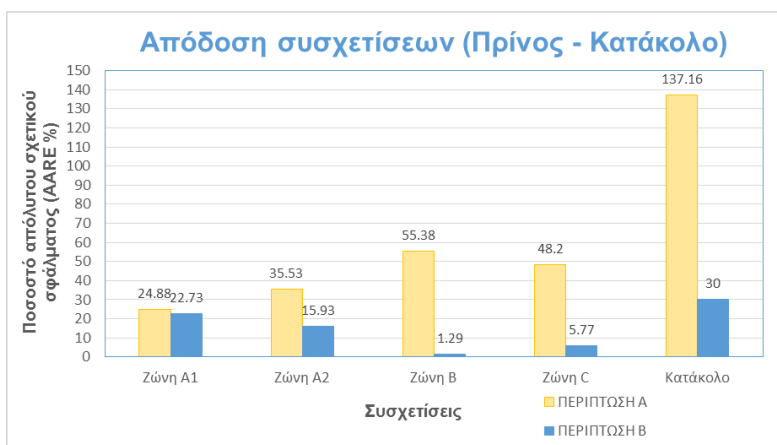
γ_o : πυκνότητα API του πετρελαίου ($^{\circ}API$)

Με βάση τη διαδικασία που αναφέρθηκε παραπάνω, η τροποποιημένη έκφραση για το συντελεστή X που προτείνεται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει ως ακολούθως:

$$X = y T^{-1.22}$$

Οι εκφράσεις για τους συντελεστές y και Z παραμένουν ως είχαν στην αρχική συσχέτιση των Beggs & Robinson. Η τροποποίηση αυτή μειώνει σημαντικά το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (%AARE) για το ιξώδες όπως χαρακτηριστικά παρουσιάζεται το Σχήμα 7.1 συγκριτικά με τα αρχικά αποτελέσματα, καθώς και στον Πίνακα 7.1 όπου παρουσιάζονται συγκεκριμένα οι πειραματικές τιμές και οι προορημένες με την τροποποιημένη συσχέτιση των Beggs & Robinson.

7. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ



Σχήμα 7.1 Πρόρρηση του ιξώδους του dead oil στον Πρίνο και το Κατάκολο (Τρόπος 1: Αρχική Beggs & Robinson, Τρόπος 2: τροποποιημένη Beggs & Robinson).

Πίνακας 7.1 Πειραματικές και εκτιμώμενες τιμές ιξώδους του dead oil με βάση την τροποποίηση. I

Πειραματικές τιμές ιξώδους του dead oil	Εκτιμώμενες τιμές ιξώδους του dead oil
Ζώνη A1= 2.05 cp	Ζώνη A1= 1.58 cp
Ζώνη A2= 1.67 cp	Ζώνη A2= 1.4 cp
Ζώνη B= 1.3 cp	Ζώνη B= 1.28 cp
Ζώνη C= 1.39 cp	Ζώνη C= 1.31 cp
Δ. Κατάκολο= 3.66 cp	Δ. Κατάκολο= 4.76 cp

Η ικανότητα της τροποποιημένης συσχέτισης να προσεγγίσει το ιξώδες του dead oil είναι εμφανώς βελτιωμένη τόσο για τα ρευστά του Πρίνου όσο και για το ρευστό του Δ. Κατάκολου επιτυγχάνοντας την εξομάλυνση της πολύ μεγάλης διαφοράς των αρχικών τιμών πρόρρησης του ιξώδους δεδομένης της σημαντικής διαφοράς στη θερμοκρασία του ταμιευτήρα στις δύο περιπτώσεις.

7.3 Βελτιστοποίηση της συσχέτισης Petrosky & Farshad για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου

Για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου επιλέχθηκε η συσχέτιση των Petrosky & Farshad δεδομένου της καλύτερης συμπεριφοράς της (Ενότητα 6.3).

Σύμφωνα με την Ενότητα 5.3.2, η αρχική σχέση των Petrosky & Farshad για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου είναι η ακόλουθη:

$$\mu_{ob} = A \cdot (\mu_{od})^B \quad (7.2)$$

$$\text{όπου } A = 0.1651 + 0.6165 \cdot 10^{-6.0866 \times 10^{-4} \cdot R_s}$$

$$B = 0.5131 + 0.5109 \cdot 10^{-1.1831 \times 10^{-3} \cdot R_s}$$

7. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ

mod: Ιξώδες του deal oil (cp)

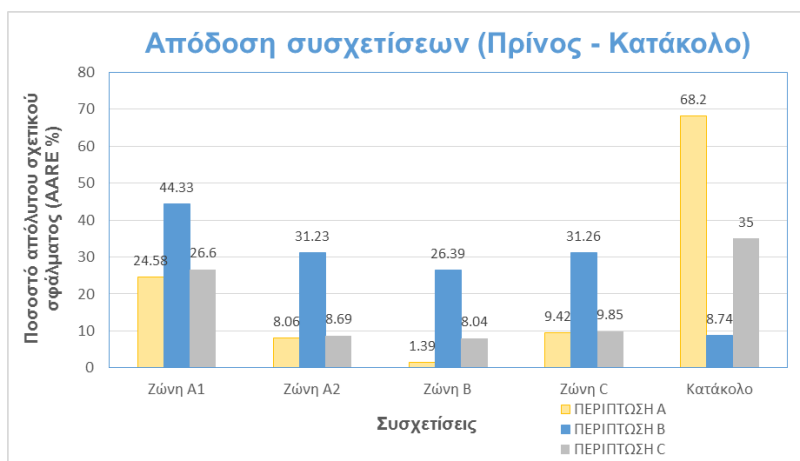
Rs: λόγος διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο (scf/STB)

Η τροποποίηση αφορούσε στην εξίσωση του συντελεστή A και η νέα σχέση έχει ως ακολούθως:

$$A' = 0.29682 + 0.6165 \cdot 10^{-6.0866 \times 10^{-4} \cdot Rs}$$

Ο νέος συντελεστής A' μειώνει σημαντικά το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (% AARE) των τιμών του ιξώδους όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.2 όπου δίδονται συγκριτικά αποτελέσματα για τις εξής περιπτώσεις:

1. Αρχική συσχέτιση των Beggs & Robinson για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil και αρχική συσχέτιση των Petrosky & Farshad για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου.
2. Τροποποιημένη συσχέτιση των Beggs & Robinson για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil και αρχική συσχέτιση των Petrosky & Farshad για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου.
3. Τροποποιημένη συσχέτιση των Beggs & Robinson για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil και τροποποιημένη συσχέτιση των Petrosky & Farshad για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου.

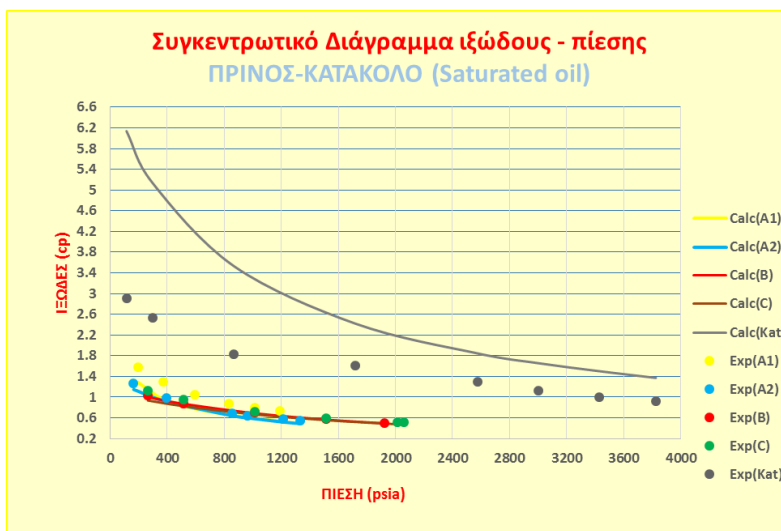


Σχήμα 7.2 Πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου στον Πρίνο και το Δ. Κατάκολο (Περίπτωση 1: Αρχική Beggs & Robinson & αρχική Petrosky & Farshad, Περίπτωση 2: Τροποποιημένη Beggs & Robinson & αρχική Petrosky & Farshad, Περίπτωση 3: τροποποιημένη Beggs & Robinson & τροποποιημένη Petrosky & Farshad).

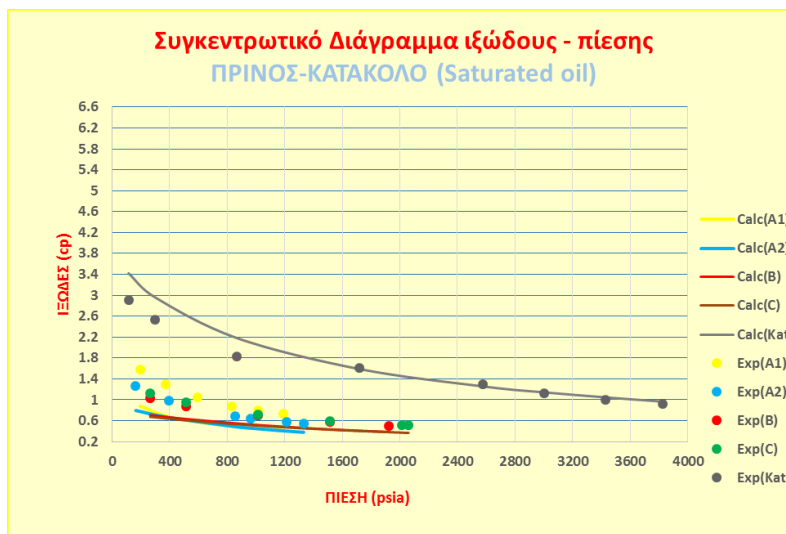
Η βελτίωση συνολικά των αποτελεσμάτων είναι εμφανής με τη συνδυασμένη χρήση των τροποποιημένων/βελτιστοποιημένων συσχετίσεων των Beggs & Robinson για το ιξώδες του dead oil και των Petrosky & Farshad για το ιξώδες του κορεσμένου

7. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ

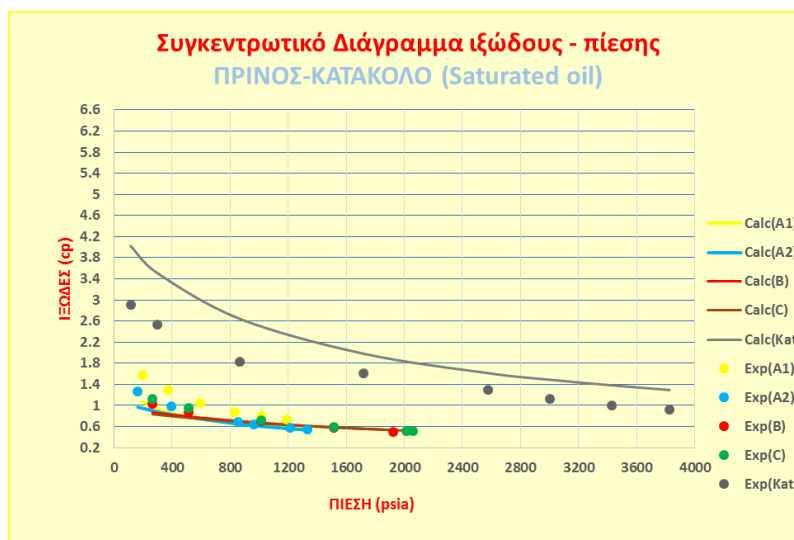
πετρελαίου. Ωστόσο παρατηρείται μία σχετικά μικρή αδυναμία της τροποποιημένης συσχέτισης στην πρόρρηση των τιμών του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου σε πολύ χαμηλές πιέσεις όπως γίνεται σαφές από τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στα Σχήματα 7.3, 7.4 και 7.5:



Σχήμα 7.3 Πρόρρηση ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου για τις ζώνες του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου (Αρχική Beggs & Robinson και αρχική Petrosky & Farshad).



Σχήμα 7.4 Πρόρρηση ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου για τις ζώνες του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου (Τροποποιημένη Beggs & Robinson και αρχική Petrosky & Farshad).



Σχήμα 7.5 Πρόρρηση ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου για τις ζώνες του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου (Τροποποιημένη Beggs & Robinson και τροποποιημένη Petrosky & Farshad).

7.4 Βελτιστοποίηση επιλεγμένων συσχετίσεων για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου

Για την περίπτωση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου επιλέχθηκαν προς βελτίωση οι συσχετίσεις των Bergman & Sutton και Dindoruk & Christman σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.8. Για κάθε μία από αυτές χρησιμοποιήθηκε η τροποποιημένη συσχέτιση των Beggs & Robinson για το ιξώδες του dead oil καθώς και η τροποποιημένη συσχέτιση των Petrosky & Farshad για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου δεδομένου ότι όλες οι συσχετίσεις για το ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου έχουν ως δεδομένο εισαγωγής τις τιμές των ως άνω παραμέτρων.

Ακολουθήθηκε διαδικασία ανάλογη με αυτή που αναφέρεται στην ενότητα 7.3 για την βελτιστοποίηση/τροποποίηση στις μαθηματικές εκφράσεις συντελεστών των συσχετίσεων αυτών οι οποίοι όμως δεν έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα. Οι τροποποιήσεις και των δύο συσχετίσεων επέφεραν μείωση του απόλυτου μέσου σχετικού σφάλματος (%AARE) για το ιξώδες του Δ. Κατάκολου αλλά επηρέαζαν αρνητικά τα σφάλματα στο ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου για όλες τις ζώνες του Πρίνου.

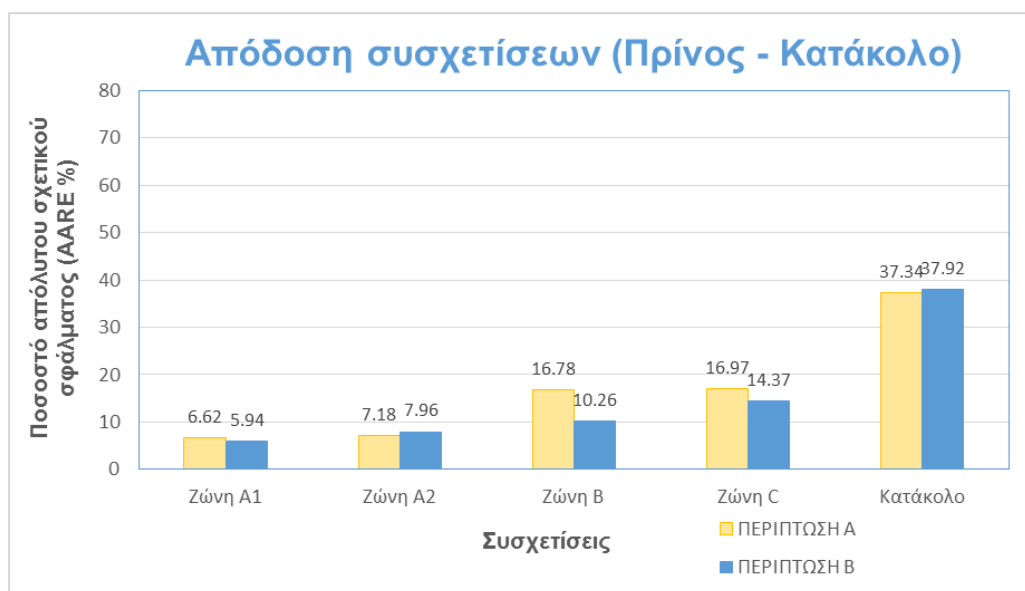
Ως εκ τούτου, επιλέχθηκε η εφαρμογή των αρχικών εκφράσεων των συσχετίσεων αυτών για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου σε

7. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ

συνδυασμό με τις τροποποιημένες συσχετίσεις των Beggs & Robinson για το ιξώδες του dead oil και των Petrosky & Farshad για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου και τη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Στο Σχήμα 7.6 δίδονται συγκριτικά αποτελέσματα στη βάση του % AARE για τις παρακάτω περιπτώσεις από όπου γίνεται σαφές ένα προβάδισμα της συσχέτισης των Dindoruk & Christman:

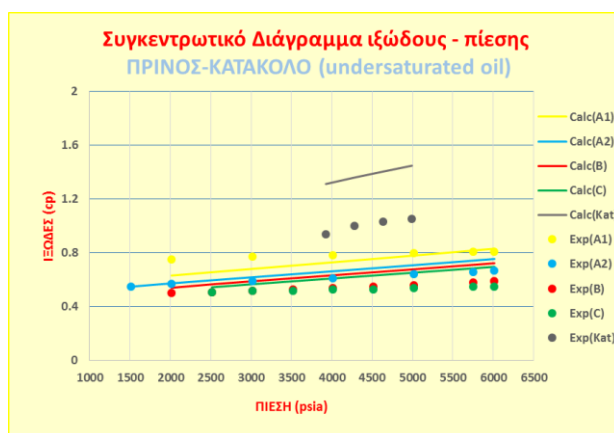
1. Τροποποιημένη συσχέτιση των Beggs & Robinson για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil, τροποποιημένη συσχέτιση των Petrosky & Farshad για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου και αρχική συσχέτιση των Bergman & Sutton για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου.
2. Τροποποιημένη συσχέτιση των Beggs & Robinson για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil, τροποποιημένη συσχέτιση των Petrosky & Farshad για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου και αρχική συσχέτιση των Dindoruk & Christman για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου.



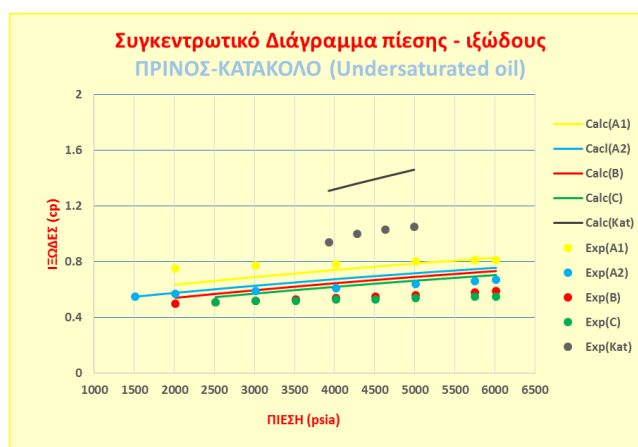
Σχήμα 7.6 Πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου στον Πρίνο και το Δ. Κατάκολο (Περίπτωση 1: Τροποποιημένη Beggs & Robinson, τροποποιημένη Petrosky & Farshad για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου και αρχική Bergman & Sutton για το ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου, Περίπτωση 2: Τροποποιημένη Beggs & Robinson, τροποποιημένη Petrosky & Farshad για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου και αρχική Dindoruk & Christman για το ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου).

7. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ

Τα Σχήματα 7.7 και 7.8 που ακολουθούν παρουσιάζουν διαγράμματα ιξώδους πίεσης για την πρόρρηση του ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου στα ρευστά του Πρίνου και το ρευστό του Δ. Κατάκολου.



Σχήμα 7.7 Πρόρρηση ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου για τις ζώνες του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου (Τροποποιημένη Beggs & Robinson, τροποποιημένη Petrosky & Farshad για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου και αρχική Bergman & Sutton για το ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου).



Σχήμα 7.8 Πρόρρηση ιξώδους του υποκορεσμένου πετρελαίου για τις ζώνες του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου (Τροποποιημένη Beggs & Robinson, τροποποιημένη Petrosky & Farshad για το ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου και αρχική Dindoruk & Christman για το ιξώδες του υποκορεσμένου πετρελαίου).

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η γνώση των τιμών του ιξώδους του πετρελαίου είναι σημαντική για την πετρελαϊκή βιομηχανία. Το ιξώδες είναι μία από τις παραμέτρους που επηρεάζουν την έρευνα και την ανάπτυξη ενός ταμιευτήρα υδρογονανθράκων.

Η χρήση εμπειρικών συσχετίσεων για την πρόρρηση των τιμών του ιξώδους αποτελεί χρήσιμη εναλλακτική σε περιπτώσεις έλλειψης πειραματικών δεδομένων (πειραματικές αναλύσεις PVT).

Η πρόρρηση των τιμών του ιξώδους μέσω συσχετίσεων απαιτεί προσοχή. Κάθε συσχέτιση έχει δημιουργηθεί για συγκεκριμένους τύπους ρευστών και σε εύρος τιμών ιδιοτήτων τους και η εφαρμογή της σε άλλα είδη ή εκτός του αντίστοιχου εύρους μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα.

Αποτελεί ένα πεδίο με σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον σε επίπεδο ανάπτυξης & μαθηματικής βελτιστοποίησης των συσχετίσεων, ενώ ιδιαίτερο ενδιαφέρον υπάρχει και στην ανάπτυξη συσχετίσεων που θα αποδίδουν τη συμπεριφορά ομαδοποιημένων ρευστών ανά περιοχές παρόμοιου γεωλογικού περιβάλλοντος ή/και ιδιοτήτων.

Με την ολοκλήρωση της αξιολόγησης των συσχετίσεων οι οποίες εφαρμόστηκαν στα πετρελαϊκά ρευστού του Πρίνου και του Δ. Κατάκολου έγινε σαφές ότι κάθε πετρελαϊκό μίγμα απαιτεί ιδιαίτερη προσέγγιση και παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με την συσχέτιση που χρησιμοποιείται.

Οι συσχετίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την πρόρρηση του ιξώδους και τα αποτελέσματά τους κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τις συνθήκες που βρίσκεται το πετρελαϊκό μίγμα:

- **Ιξώδες dead oil:**
 - Οι συσχετίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil απέδειξαν πόσο ευαίσθητη είναι η ιδιότητα αυτή και ότι προσεγγίζεται πολύ δύσκολα μέσω εμπειρικών συσχετίσεων. Η πλειοψηφία των συσχετίσεων που εξετάστηκαν παρουσίασε υψηλά σφάλματα με υψηλότερα στην περίπτωση του πετρελαίου του Δ. Κατάκολου.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Με βάση τα αποτελέσματα της αξιολόγησης προκρίνεται η συσχέτιση των Beggs & Robinson, ως εκείνη που παρουσιάζει πρακτικά καλύτερη συμπεριφορά στο σύνολο των εξεταζόμενων πετρελαϊκών ρευστών.
- **Ιξώδες κορεσμένου πετρελαίου:**
 - Όλες οι συσχετίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου παρουσιάζουν ανάλογη και γενικά καλή συμπεριφορά δεδομένου ότι έχουν κοινή βάση ως προς τη μαθηματική έκφραση που διέπει το ιξώδες αυτό. Το απόλυτο μέσο σχετικό σφάλμα (%AARE) ήταν περίπου 30%.
 - Το ιξώδες του dead oil παίζει σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά αυτών των συσχετίσεων δεδομένου ότι αποτελεί παράμετρο εισαγωγής σε αυτές. Η χρήση της συσχέτισης των Beggs & Robinson για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil, έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση των αποτελεσμάτων όλων των συσχετίσεων.
 - Με βάση τα αποτελέσματα της αξιολόγησης προκρίνεται η συσχέτιση των Petrosky & Farshad για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου σε συνδυασμό με αυτή των Beggs & Robinson για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil (ελλείπει αντίστοιχων πειραματικών δεδομένων).
- **Ιξώδες υποκορεσμένου πετρελαίου:**
 - Με βάση τα αποτελέσματα των συσχετίσεων που εξετάστηκαν προκρίνονται οι συσχετίσεις των Bergman & Sutton και των Dindoruk & Christman. Σε αυτές η τιμή του ιξώδους σε κάθε πίεση είναι συνάρτηση της διαφοράς της πίεσης που αναφέρεται η τιμή αυτή από την τιμή της πίεσης κορεσμού P-Pb - pressure differential.
 - Προτείνεται η εφαρμογή των ως άνω προτεινόμενων συσχετίσεων σε συνδυασμό με τη χρήση της συσχέτισης των Petrosky & Farshad για την πρόρρηση του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου και βεβαίως μέσω αυτής τη χρήση της συσχέτισης των Beggs & Robinson για την πρόρρηση του ιξώδους του dead oil σε περίπτωση έλλειψης πειραματικών δεδομένων. Επισημαίνεται ότι εάν υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα τόσο για το ιξώδες του dead oil όσο και για το

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ιξώδες του κορεσμένου πετρελαίου η συμπεριφορά των συσχετίσεων αυτών βελτιώνεται σημαντικά.

Η προσπάθεια που καταβλήθηκε σε πρώτη φάση και στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας για τη τροποποίηση των προαναφερθέντων συσχετίσεων με στόχο τη βελτίωση των αποτελεσμάτων στο σύνολο των εξεταζόμενων ρευστών (ενιαία προσέγγιση για το ιξώδες των πετρελαϊκών μιγμάτων του ελλαδικού χώρου) απέδωσε με ενθαρρυντικά αποτελέσματα

Επισημαίνεται ότι η παλαιότητα των διαθέσιμων πειραματικών PVT δεδομένων δημιουργεί μια σχετική ανασφάλεια αναφορικά με τη συμπεριφορά των συσχετίσεων που εξετάστηκαν.

Η διπλωματική εργασία αυτή αποτελεί σε αυτή τη φάση την αφετηρία για τη μελέτη του ιξώδους των πετρελαίων του ελλαδικού χώρου. Είναι σαφές ότι αν είναι διαθέσιμα αφενός επικαιροποιημένα πειραματικά δεδομένα και αφετέρου νέα πετρελαϊκά ρευστά που θα προκύψουν από νέες ανακαλύψεις κοιτασμάτων πετρελαίου στην Ελληνική επικράτεια θα δώσουν την δυνατότητα για τη δημιουργία μιας ακριβούς και πληρέστερης βάσης δεδομένων ώστε να υπάρξει περαιτέρω διερεύνηση του προβλήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[Ηλεκτρονικό] // Chandler Engineering. - <http://www.chandlerengineering.com/Products/Reservoir%20Analysis/Model1602.aspx>.

Abdul-Majeed, Kattan και Salman New Correlation for Estimating the Viscosity of Undersaturated Crude Oils [Επιθεώρηση] // Journal of Canadian Petroleum Technology. - 1990.

Abedini Reza και Mosayebi Amir Determination of petroleum property using artificial intelligence tools [Επιθεώρηση]. - [s.l.] : Journal of Petroleum and Gas Engineering, 2012.

Abooli Danial και Khomehchi Ahsan Estimation of dynamic viscosity of natural gas based on genetic programming methodology [Επιθεώρηση]. - Tehran : Elsevier , 2014.

Abu-Khamsin και Al-Marhoun Development of a New Correlation Bubblepoint Oil Viscosity [Επιθεώρηση] // Arabian Journal for Science & Engineering . - 1991.

Ahmed Tarek RESERVOIR ENGINEERING HANDBOOK Second Edition [Βιβλίο]. - [s.l.] : Gulf Professional Publishing, 2000.

Ahmed Tarek RESERVOIR ENGINEERING HANDBOOK Second Edition [Βιβλίο]. - [s.l.] : Gulf Professional Publishing .

Al-Khafaji, Abdul-Majeed και Hassoon Viscosity Correlation for Dead, Live and Undersaturated Crude Oils [Επιθεώρηση] // Journal of Petroleum and Gas Exploration Research. - 1987.

Almehaideb R.A Improved PVT Correlations for UAE Crude Oils [Βιβλίο]. - Bahrain : Society of Petroleum Engineering , 1997.

Aziz, Govier και Forarasi Pressure Drop in Wells Producing Oil & Gas [Επιθεώρηση] // Journal of Canadian Petroleum Technology. - 1972.

Beggs H. D. και Robinson J. R. Estimating the Viscosity of Crude Oil Systems [Επιθεώρηση] // Journal of Petroleum Technology . - 1975.

Bergman David και Sutton Robert A Consistent and Accurate Dead - Oil - Viscosity Method [Βιβλίο]. - [s.l.] : Society of Petroleum Engineers , 2007.

Bergman David και Sutton Robert An Update to Viscosity Correlations for Gas-Saturated Crude Oils [Βιβλίο]. - [s.l.] : Society of Petroleum Engineers , 2007.

Bergman David και Sutton Robert Undersaturated Oil Viscosity Correlation for Adverse Conditions [Βιβλίο]. - [s.l.] : Society of Petroleum Engineers, 2006.

Carlton Beal The Viscosity of Air, Water, Natural Gas, Crude Oil and Its Associated Gases at Oil Field Temperature and Pressure [Βιβλίο]. - Los Angeles : [s.n.], 1946.

Chew J.N και Connally C.A A viscosity Correlation for Gas-Saturated Crude Oils [Βιβλίο]. - [s.l.] : AIME , 1959.

Dake L.P fundamentals of reservoir [Βιβλίο]. - Amsterdam : ELSEVIER , 1998.

Danesh Ali Pvt and Phase Behaviour of Petroleum Reservoir Fluids [Βιβλίο]. - [s.l.] : Elsevier Science & Technology Books , 1998.

Dindoruk και Christman PVT Properties and Viscosity Correlations for Gulf of Mexico Oils [Επιθεώρηση] // SPE Reservoir Evaluation & Engineering. - December 2004.

Egbogah Emmanuel και Ng Jack An improved temperature-viscosity correlation for crude oil systems [Επιθεώρηση] // Petroleum Science Engineering . - 1990. - σσ. 197-200.

Elsharkawy A.M και Gharbi Comparing Classical and Neural Regression Techniques in Modeling Crude Oil Viscosity [Επιθεώρηση] // Advances in Engineering Software and Workstations . - 2001.

Elsharkawy A.M. και Alikhan A.A Models for predicting the viscosity of Middle East crude oils [Άρθρο] // FUEL. - June 1999.

Ghetto De [και συν.] Pressure-Volume-Temperature Correlations for Heavy and Extra Heavy Oils [Βιβλίο]. - [s.l.] : Society of Petroleum Engineers , 1995.

Ghetto De, Paone και Villa Reliability Analysis on PVT Correlations [Βιβλίο]. - [s.l.] : Society of Petroleum Engineers , 1994.

Glaso Generalized Pressure - Volume - Temperature Correlations [Άρθρο] // Journal of Petroleum Technology . - May 1980.

Hanafy και al et A NEW APPROACH FOR PREDICTING THE CRUDE OIL PROPERTIES [Βιβλίο]. - Oklahoma : Society of Petroleum Engineering , 1997.

Hemmati-Sarapardeh [και συν.] Reservoir oil viscosity determination using a rigorous approach [Βιβλίο]. - [s.l.] : Elsevier, 2014.

Hemmati-Sarapardeh [και συν.] Toward reservoir oil viscosity correlation [Επιθεώρηση] // Chemical Engineering Science . - 2013.

Hemmati-Sarapardeh, Khishvand και Naseri Toward reservoir oil viscosity correlation [Επιθεώρηση] // Chemical Engineering Science . - 2012.

Johnston Core Analysis Interpretation [Βιβλίο]. - [s.l.] : American Petroleum Institution, 1941.

Johnston και Sherborne Permeability as Related to Productivity [Βιβλίο]. - [s.l.] : American Petroleum Institution , 1943.

Kartoatmodjo και Schmidt New Correlations for Crude Oil Physical Properties [Βιβλίο]. - [s.l.] : Society of Petroleum Engineering , 1991.

Kennedy Little and Calculating the viscosity of hydrocarbon systems with pressure temperature and composition [Επιθεώρηση] // Society of Petroleum Engineers. - 1968.

Khan S.A. [και συν.] Viscosity correlations for Saudi Arabian Crude Oils [Βιβλίο]. - Manama : Society of Petroleum Engineers , 1987.

Labedi R. Improved Correlations for Predicting the Viscosity of Light Crudes [Επιθεώρηση] // Journal of Petroleum Science and Engineering . - 1992.

Little και Kennedy A Correlation of the Viscosity of Hydrocarbon Systems With Pressure, Temperature and Composition [Βιβλίο]. - [s.l.] : Society of Petroleum Engineers , 1968.

Lohrenz J και al et Calculating Viscosities of Reservoir Fluids from Their Compositions [Επιθεώρηση] // Journal of Petroleum Technology . - 1964.

McCain William D. και al et Petroleum Reservoir Fluid Property CORRELATIONS [Βιβλίο]. - Tulsa : Penn Well Corporation , 2011.

McCain William THE PROPERTIES OF PETROLEUM FLUIDS SECOND EDITION [Βιβλίο]. - Tulsa : PennWell Books, 1990.

Naseri A. και al et A correlation approach for prediction of crude oil viscosities [Επιθεώρηση] // Journal of Petroleum Science and Engineering . - [s.l.] : J. Pet. Sci. Eng. 47, 2005.

Pedersen K. και al et Viscosity of Crude Oils [Επιθεώρηση] // Chemilal Engineering Science. - 1984.

Pedersen, Christensen και Shaikh Phase Behaviour of Petroleum Reservoir Fluids [Βιβλίο]. - [s.l.] : CRC Press , 2014.

Petrosky και Farshad PVT Correlations for Gulf of Mexico Crude Oils [Βιβλίο]. - Lafayette : University of Southwestern Louisiana, 1990.

Petrosky και Farshad Viscosity Correlations for Gulf of Mexico Crude Oils [Επιθεώρηση] // SPE. - Oklahoma : Society of Petroleum Engineers, 1995.

Petrowiki Oil Viscosity [Ηλεκτρονικό] // Petrowiki . - http://petrowiki.org/Oil_viscosity#cite_note-r23-23.

Riazi M.R. and Daubert, T.E. Simplify Property Predictions [Επιθεώρηση]. - [s.l.] : Hydrocarbon Processing, 1980. - Τόμ. 115.

Standing M.B Volumetric and Phase Behavior of Oil Hydrocarbon Systems [Βιβλίο]. - Dallas : Society of Petroleum Engineers of AIME , 1981.

Sutton R. P. και Farshad F. F. Evaluation of Empirically Derived PVT Properties for Gulf of Mexico Crude Oils [Συνέδριο] // Annual Technical Conference and Exhibition . - Houston : Society of Petroleum Engineers, 1984.

TECHNOLOGIES VINCI Laboratory and field instruments for Petroleum Industry [Ηλεκτρονικό]. - <http://www.vinci-technologies.com/>.

Trostel Production Gas Oil Ratio as Function of the Distribution of Hydrocarbons in the Underground Reservoir [Βιβλίο]. - [s.l.] : Master's Thesis, U.S.C , 1940.

Vazquez M.E. και Beggs H.D Correlation for Fluid Physical Property Prediction [Επιθεώρηση] // Journal of Petroleum Technology. - 1980.

Watson K.m., Nelson E.F. και Murphy Characterization of Petroleum Fractions [Επιθεώρηση] // Industrial and Engineering Chemistry . - 1935.

Whitson C.H. Characterizing Hydrocarbon Plus Fractions [Επιθεώρηση]. - [s.l.] : SPEJ, 1983. - Τόμ. 683.

Whitson C.H. και Brule M.R. Phase Behavior [Βιβλίο]. - Richardson : Society of Petroleum Engineers, 2000.

Σταματάκη Σοφία Μηχανική Πετρελαίων [Βιβλίο]. - Αθήνα : Εκδόσεις ΕΜΠ, 2004.

