



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

**«Ανάπτυξη μοντέλου με χρήση βάσης δεδομένων για την  
παραγωγή δεδομένων PVT σύνθετης εκτόνωσης»**

**ΚΟΥΡΑΙΑΝΣΚΗ ΗΛΙΑΣ**

Εξεταστική Επιτροπή:

Βαρότσης Νικόλαος, Καθηγητής (Επιβλέπων)

Πασαδάκης Νικόλαος, Καθηγητής

Βασίλειος Γαγάνης, Δρ.

Χανιά

Ιούλιος, 2017



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου οι οποίοι με στήριξαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου με κάθε δυνατό τρόπο, φροντίζοντας για την καλύτερη δυνατή μόρφωσή μου.

Επίσης, θα ήθελα να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στον καθηγητή του τμήματος κ. Βαρότση Νικόλαο για την καθοδήγηση του και την άριστη συνεργασία κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Ακόμα ευχαριστώ θερμά τον διδάκτορα του τμήματος κ. Γαγάνη Βασίλειο για την ανιδιοτελή προσφορά του, για τον σημαντικό χρόνο που μου αφιέρωσε και τις πολύτιμες πληροφορίες που μου μετέδωσε καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής αυτής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Πασαδάκη Νικόλαο για τη συμμετοχή του στην τριμελή εξεταστική επιτροπή και όλους όσους με τον δικό τους ξεχωριστό τρόπο έβαλαν ένα λιθαράκι για την περάτωση της εργασίας αυτής.



## **Δημοσίευση θέματος διπλωματικής εργασίας**

Τα αποτελέσματα από την παρούσα διπλωματική εργασία έγιναν αποδεκτά προς δημοσίευση στο επιστημονικό περιοδικό Journal of Petroleum Science and Engineering με τίτλο “An accurate method to generate composite PVT data for black oil simulation”.

Συγγραφείς της δημοσίευσης:

Γαγάνης Βασίλειος, Δρ.

Βαρότσης Νικόλαος, Καθηγητής

Κουρλιάνσκη Ηλίας



## Περίληψη

Η βέλτιστη διαδικασία παραγωγής των δεδομένων σύνθετης εκτόνωσης (Composite Flash Data) απασχολεί εδώ και αρκετά χρόνια τη βιομηχανία του πετρελαίου. Τα δεδομένα αυτά περιγράφουν την ογκομετρική συμπεριφορά των ρευστών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης της παραγωγής ενός ταμειυτήρα. Οι τιμές τους λαμβάνονται χρησιμοποιώντας είτε μοντέλα καταστατικών εξισώσεων (EoS Models), είτε εφαρμόζοντας σε εργαστηριακά δεδομένα PVT διορθωτικές μεθόδους οι οποίες αποτελούνται από συσχετίσεις γενικής χρήσης. Δεδομένης της εμπειρίας και του χρόνου που απαιτείται για την επίτευξη ενός κατάλληλα ρυθμισμένου μοντέλου EoS, οι διορθωτικές μέθοδοι εξακολουθούν να είναι πολύ δημοφιλείς. Τέτοιες μέθοδοι που σήμερα εφαρμόζονται στη βιομηχανία βασίζονται σε απλουστευμένες υποθέσεις και συχνά τα αποτελέσματά τους δεν επιτυγχάνουν την ακριβή αντιστοίχιση με τις καμπύλες των  $B_o$  και  $R_s$  της σύνθετης εκτόνωσης καθ' όλο το εύρος της πίεσης. Επιπλέον, αυτές οι μέθοδοι δεν επιτρέπουν τον επανυπολογισμό των δεδομένων όταν οι συνθήκες της επιλεγείσας διεργασίας διαχωρισμού τροποποιηθούν, εκτός εάν είναι ήδη διαθέσιμα τα αντίστοιχα εργαστηριακά PVT δεδομένα εκτόνωσης.

Στην παρούσα διπλωματική, παρουσιάζεται μια ακριβής υπολογιστική μέθοδος που συνδυάζει τα εργαστηριακά PVT δεδομένα εκτόνωσης διαφορικής εξάτμισης με τον διαχωρισμό των φάσεων που προκύπτουν σε κάθε πίεση και σε συνθήκες επιφάνειας. Για την ανάπτυξη της μεθόδου χρησιμοποιήθηκε μία βάση δεδομένων η οποία περιελάμβανε τα αποτελέσματα του πειράματος της εκτόνωσης και της μελέτης διαφορικής εξάτμισης μεγάλου αριθμού ρευστών από διάφορα μέρη του κόσμου. Εν συνεχεία, αναπτύχθηκε αλγόριθμος που πραγματοποιεί υπολογιστικά εκτόνωση του πετρελαίου της διαφορικής εκτόνωσης σε κάθε πίεση σε συνθήκες επιφάνειας εφαρμόζοντας ισοζύγια μάζας και χρησιμοποιώντας προσεγγιστικές μεθόδους υπολογισμού των τιμών των συντελεστών ισορροπίας (k-values). Έτσι, μπορούν να προσδιοριστούν οι συστάσεις και οι όγκοι του αερίου και του πετρελαίου στις συνθήκες διαχωριστήρα και οι αντίστοιχες συστάσεις και όγκοι του αερίου και του πετρελαίου δεξαμενής. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την μέθοδο που αναπτύχθηκε μπορούν επίσης είτε να συγκριθούν με τα διαθέσιμα δεδομένα PVT εργαστηριακής εκτόνωσης της βάσης δεδομένων είτε με αυτά από τις μετρήσεις πεδίου. Έπειτα, έχοντας διαθέσιμα τα δεδομένα της μελέτης διαφορικής εξάτμισης διαφόρων ρευστών από τη βάση δεδομένων υλοποιήθηκε αλγόριθμος υπολογισμού της σύστασής της υγρής φάσης για κάθε βήμα του πειράματος διαφορικής εξάτμισης. Αυτές ήταν και οι συστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν ως τροφοδοσία στον αλγόριθμο της εκτόνωσης, αποδίδοντας έτσι τα ζητούμενα δεδομένα σύνθετης εκτόνωσης.

Η νέα μέθοδος εφαρμόστηκε σε διάφορα ρευστά ταμειυτήρων της βάσης δεδομένων και η ακρίβεια σε αυτές τις δοκιμαστικές περιπτώσεις αποδείχθηκε ότι ήταν της τάξης του 1% με 2% για την πρόβλεψη των  $B_o$  και  $R_s$  σύνθετης εκτόνωσης αντίστοιχα καθ' όλο το εύρος της πίεσης παραγωγής. Τέλος, εφαρμόστηκαν και οι διορθωτικές μέθοδοι των εργαστηριακών δεδομένων PVT που χρησιμοποιούνται έως

και σήμερα στη βιομηχανία πετρελαίου και από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι μόνο η νέα μέθοδος ακολουθεί ικανοποιητικά τις καμπύλες των  $B_o$  και  $R_s$  της σύνθετης εκτόνωσης σε όλο το εύρος πίεσης. Συγκεκριμένα, όταν χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι των Dake και Al-Marhoun για τον υπολογισμό του  $B_o$  σε μία πίεση της τάξης των 500 psi, το σφάλμα για τον υπολογισμό των αποθεμάτων έφτανε έως 10% και 7% αντίστοιχα. Παρόμοια συμπεράσματα λήφθηκαν και για την πρόβλεψη του  $R_s$ , όπου το μέσο απόλυτο σφάλμα των μεθόδων των Dake και Al-Marhoun ήταν 6% και 14% αντίστοιχα.



# Περιεχόμενα

Περίληψη .....	7
Περιεχόμενα.....	9
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή.....</b>	<b>11</b>
1.1 Το πετρέλαιο και οι κατηγορίες κοιτασμάτων.....	11
1.2 Δειγματοληψία ρευστών ταμιευτήρων .....	12
1.2.1 Υπόγεια δειγματοληψία (BHS Samples) .....	12
1.2.2 Επιφανειακή δειγματοληψία (RSS Samples).....	13
1.3 Εργαστηριακή μελέτη ιδιοτήτων ρευστών των ταμιευτήρων.....	14
1.3.1 Μελέτες PVT πετρελαίου .....	14
1.3.2 Μελέτη αερίων συμπυκνωμάτων.....	18
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Προσομοίωση ταμιευτήρων (Reservoir Simulation) και μοντέλα μαύρων πετρελαίων (Black Oil Models).....</b>	<b>21</b>
2.1 Εισαγωγή .....	21
2.2 Περιγραφή των μοντέλων μαύρων πετρελαίων .....	21
2.3 Χρησιμότητα των μοντέλων μαύρων πετρελαίων .....	22
2.4 Εξισώσεις ροής ρευστών μοντέλων μαύρων πετρελαίων.....	23
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Δεδομένα PVT για την λειτουργία μοντέλου μαύρων πετρελαίων .....</b>	<b>27</b>
3.1 Εισαγωγή .....	27
3.2 Αναφορά απαιτούμενων δεδομένων .....	27
3.3 Διαδικασία υπολογισμού $\rho_{osc}$ , $\rho_{stg}$ .....	28
3.4 Προσδιορισμός ογκομετρικών συντελεστών $B_o$ και $B_g$ .....	28
3.4.1 Αναγκαιότητα χρήσης δεδομένων σύνθετης εκτόνωσης.....	29
3.4.2 Υπολογιστικές μέθοδοι πρόβλεψης δεδομένων σύνθετης εκτόνωσης.....	30
3.4.3 Υπολογισμός καμπύλης ιξώδους ρευστού.....	36
<b>Κεφάλαιο 4: Νέα μέθοδος παραγωγής δεδομένων σύνθετης εκτόνωσης.....</b>	<b>39</b>
4.1 Εισαγωγή .....	39
4.2 Ανάπτυξη αλγορίθμου υπολογισμού σύστασης υγρής φάσης κάθε σταδίου πίεσης της μελέτης διαφορικής εξάτμισης από τα δεδομένα της μελέτης PVT .....	40
4.3 Υλοποίηση αλγορίθμου εκτόνωσης της υγρής φάσης κάθε σταδίου πίεσης της μελέτης διαφορικής εξάτμισης.....	42
4.4 Υπολογισμός πυκνοτήτων και ογκομετρικών παραμέτρων $B_o$ , $R_s$ .....	45
4.4.1 Εκτίμηση ακρίβειας προτεινόμενου αλγορίθμου εκτόνωσης .....	47
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Εφαρμογή αναπτυχθείσας μεθόδου σε πετρέλαια ποικίλης πτητικότητας .....</b>	<b>51</b>
5.1 Εισαγωγή .....	51
5.2 Αποτελέσματα ογκομετρικών παραμέτρων μελέτης διαφορικής εξάτμισης και νέας μεθόδου.....	51

5.2.1 Τιμές ογκομετρικών παραμέτρων διαφορικής εξάτμισης .....	52
5.2.2 Τιμές ογκομετρικών παραμέτρων BOT σύνθετης εκτόνωσης που υπολογίστηκαν με τη νέα μεθόδου .....	52
5.3 Αποτελέσματα παραμέτρων BOT σύνθετης εκτόνωσης που υπολογίστηκαν με τις μεθόδους Dake και Al-Marhoun .....	54
5.3.1 Τιμές ογκομετρικών παραμέτρων BOT σύνθετης εκτόνωσης με τη μεθόδου Dake ..	54
5.3.2 Τιμές ογκομετρικών παραμέτρων BOT σύνθετης εκτόνωσης με τη μεθόδου Al-Marhoun .....	56
5.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων και ερμηνεία τους .....	57
5.4.1 Διαγράμματα ογκομετρικού συντελεστή σχηματισμού $B_o$ .....	57
5.4.2 Διαγράμματα ογκομετρικού συντελεστή σχηματισμού $R_s$ .....	61
5.4.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων και ερμηνεία τους.....	65
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία.....</b>	<b>67</b>
6.1 Συμπεράσματα.....	67
6.2 Προτάσεις για μελλοντική εργασία επί του θέματος.....	67
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>69</b>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Το πετρέλαιο και οι κατηγορίες κοιτασμάτων

Το πετρέλαιο σήμερα αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες ενεργειακές πρώτες ύλες με αποτέλεσμα την ευρύτερη επιρροή στην παγκόσμια οικονομία. Αποτελεί τον κύριο ενεργειακό πόρο κάθε βιομηχανίας λόγω της υψηλής αποδοτικότητάς του σε ενέργεια και αφετέρου λόγω της ευκολίας μεταφοράς και αποθήκευσής του. Παρόλο που έχουν εφευρεθεί αρκετές εναλλακτικές πηγές ενέργειας όπως για παράδειγμα είναι η ηλεκτρική, η ηλιακή και η γεωθερμική, ο ρόλος τους είναι δευτερεύων κυρίως για οικονομικούς λόγους αφού δεν διατίθενται σε ανταγωνιστικό κόστος.

Το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο αποτελούν σύνθετα μίγματα υδρογονανθράκων τα οποία βρίσκονται υπό υψηλή πίεση αποθηκευμένα στους ταμιευτήρες. Οι ταμιευτήρες είναι πορώδη και περατά ιζηματογενή πετρώματα τα οποία περιβάλλονται από αδιαπέρατα πετρώματα (Cap Rock) και δημιουργούν συνθήκες παγίδευσης των υδρογονανθράκων. Η παραγωγή τους στην επιφάνεια πραγματοποιείται μέσω γεωτρήσεων. Λόγω της διαφοροποίησης της σύστασης μεταξύ των διαφόρων κοιτασμάτων υδρογονανθράκων, τα κοιτάσματα χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τα ρευστά που περιλαμβάνουν οι εκάστοτε ταμιευτήρες τους. Έτσι τα κοιτάσματα υδρογονανθράκων διακρίνονται σε:

1. Κοιτάσματα υγρού φυσικού αερίου (wet gas)
2. Κοιτάσματα ξηρού φυσικού αερίου (dry gas)
3. Κοιτάσματα πτητικού πετρελαίου (volatile oil)
4. Κοιτάσματα μαύρου πετρελαίου (black oil)
5. Κοιτάσματα αερίου συμπυκνώματος (gas condensate)

Τα κοιτάσματα υγρού και ξηρού φυσικού αερίου αποτελούν μίγματα ελαφρών υδρογονανθράκων εκ των οποίων τα πρώτα σε αντίθεση με τα δεύτερα αποδίδουν συμπύκνωμα όταν κατά την παραγωγή φτάσουν σε επιφανειακές συνθήκες. Το πτητικό πετρέλαιο αποτελεί υγρό μίγμα που χαρακτηρίζεται από υψηλή περιεκτικότητα σε ενδιάμεσους αλλά και ελαφριούς υδρογονάνθρακες, οι οποίοι εύκολα εξατμίζονται όταν έρθει στην επιφάνεια. Τα κοιτάσματα μαύρου πετρελαίου είναι αντίθετα φτωχά σε ελαφριούς υδρογονάνθρακες και αποτελούν την πλειοψηφία των πετρελαϊκών κοιτασμάτων λόγω του ότι συνήθως βρίσκονται σε μικρά βάθη. Τέλος, στα κοιτάσματα των αερίων συμπυκνωμάτων παρατηρείται ροή αποκλειστικά της αέριας φάσης, μέχρις

όπου η αέρια φάση υποστεί ανάδρομη συμπίεση λόγω της πτώσης πίεσης με αποτέλεσμα την δημιουργία αερίου συμπυκνώματος υψηλής πτητικότητας.

## 1.2 Δειγματοληψία ρευστών ταμιευτήρων

Οι εργαστηριακές μελέτες ρευστών ταμιευτήρων βασίζονται στα δείγματα που λήφθηκαν κατά το τεστ παραγωγής. Η ποιότητα των δεδομένων που προκύπτει από την ανάλυσή τους προϋποθέτει, ότι η δειγματοληψία διεξάγεται με ιδιαίτερη προσοχή. Η ορθή διεξαγωγή της απαιτεί μεγάλη εμπειρία στη μηχανική πετρελαίου καθώς, αποτελεί ίσως την πιο ευαίσθητη διαδικασία κατά την διάρκεια ζωής ενός ταμιευτήρα<sup>[1]</sup>. Σκοπός της δειγματοληψίας είναι η ανάκτηση ενός μικρού όγκου ρευστού με την ίδια σύσταση και ιδιότητες με το αρχικό ρευστό που βρίσκεται σε μονοφασικές συνθήκες. Τα είδη δειγματοληψίας που υπάρχουν είναι:

- Υπόγεια δειγματοληψία στο βάθος του πηγαδιού της γεώτρησης (BHS, bottom hole sample).
- Επιφανειακή δειγματοληψία στις συνθήκες του διαχωριστήρα (RSS, recombined surface sample).

### 1.2.1 Υπόγεια δειγματοληψία (BHS Samples)

Κατά την υπόγεια δειγματοληψία γίνεται παγίδευση μικρού όγκου του ρευστού του ταμιευτήρα εντός δοχείου υψηλής πίεσης το οποίο κατέρχεται στο φρεάτιο της γεώτρησης μέσω ενός καλωδίου. Το καλώδιο είναι είτε ένα απλό συρματόσχοινο (slick line) είτε προσφέρει ηλεκτρική επικοινωνία με την επιφάνεια (Electric Line).

Ο δειγματολήπτης που χρησιμοποιείται κατά πλειοψηφία αποτελείται από δύο δοχεία τα οποία ενώνονται μέσω ενός διαφράγματος και ενός ρυθμιστή ροής (Flow Regulator). Την ρήξη του διαφράγματος αναλαμβάνει ο ενεργοποιητής (Actuator) με την βοήθεια μικρής ποσότητας εκρηκτικών, ο οποίος τοποθετείται πάνω από τον δειγματολήπτη μαζί με την μπαταρία ή τον ωρολογιακό μηχανισμό.

Η έναρξη λειτουργίας του ενεργοποιητή καθορίζεται από την επιφάνεια μέσω ηλεκτρικού καλωδίου ή μέσω ωρολογιακού μηχανισμού. Σε περίπτωση που έχει επιλεγθεί ηλεκτρικό καλώδιο, πραγματοποιείται και καταγραφή της πίεσης και θερμοκρασίας των σχηματισμών κατά την διάρκεια του τεστ, από ένα μανόμετρο και ένα θερμόμετρο τα οποία κατέρχονται μαζί με τον δειγματολήπτη. Στην περίπτωση που χρησιμοποιείται απλό συρματόσχοινο, οι επικρατούσες συνθήκες καταγράφονται σε διάγραμμα το οποίο φέρεται στην επιφάνεια στο τέλος της δειγματοληψίας.

Ο δειγματολήπτης κατέρχεται κλειστός στο φρεάτιο της γεώτρησης με ταχύτητα 100-200 ft./min και τοποθετείται απέναντι από τις διατρήσεις του σχηματισμού. Όταν ο δειγματολήπτης είναι στην θέση του, ο ενεργοποιητής προκαλεί την έκρηξη του μικρού

εκρηκτικού φορτίου το οποίο μέσω μια διατρητικής βελόνας σπάζει το διάφραγμα που απομονώνει τα δύο δοχεία. Υδραυλικό λάδι που βρίσκεται υπό πίεση της τάξεως 400-500 psia στο δοχείο δειγματοληψίας, ωθείται στο δεύτερο δοχείο λόγω του δημιουργούμενου  $\Delta p$  και της πίεσης του σχηματισμού. Ταυτοχρόνως, κινείται προς τα πάνω ελευθερώνοντας τις εισόδους ροής απ' όπου το ρευστό αρχίζει να εισέρχεται. Μόλις το δοχείο γεμίσει, ανοίγει ο θάλαμος εκτόνωσης με αποτέλεσμα ένα παρασυρόμενο από την διαφορά πίεσης μεταλλικό στέλεχος να κλείσει τις πόρτες εισόδου ρευστού απομονώνοντας το δείγμα από το περιβάλλον. Τέλος, ο δειγματολήπτης ανασύρεται στην επιφάνεια του φρέατος.

Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων λαμβάνονται περισσότερα από ένα διαδοχικά δείγματα προκειμένου να αυξηθούν οι πιθανότητες λήψης ρευστού αντιπροσωπευτικού του αρχικού.

### **1.2.2 Επιφανειακή δειγματοληψία (RSS Samples)**

Η μέθοδος της επιφανειακής δειγματοληψίας εφαρμόζεται αποκλειστικά σε κοιτάσματα αέριων συμπυκνωμάτων. Επίσης χρησιμοποιείται αντί της υπόγειας σε περίπτωση που οι εγκαταστάσεις μέσα στο φρεάτιο της γεώτρησης εμποδίζουν τον δειγματολήπτη να φθάσει στο επιθυμητό βάθος ή να ανασυρθεί στην επιφάνεια στο τέλος του τεστ. Είναι προφανές λοιπόν ότι για την λήψη αντιπροσωπευτικού δείγματος πρέπει οι εγκαταστάσεις και τα όργανα στο επίπεδο του διαχωριστήρα να είναι ακριβή. Ακόμα, τα κελία εντός των οποίων μεταφέρονται τα ρευστά πρέπει να είναι καθαρά και κενά αέρος, προκειμένου η σύσταση τους να μην αλλοιωθεί.

Η διαδικασία λήψης επιφανειακών δειγμάτων που ακολουθείται στο επίπεδο του διαχωριστήρα έχει ως εξής:

- Καθαρισμός του φρέατος της γεώτρησης με παραγωγή αφότου οι συνθήκες ροής σταθεροποιηθούν.
- Διατήρηση του ρυθμού παραγωγής μετά το πέρας του καθαρισμού για ένα διάστημα έως και 12 ώρες, με σκοπό τον ακριβή προσδιορισμό του παραγόμενου GOR.
- Ξεχωριστή λήψη δειγμάτων υγρού και αερίου από τον διαχωριστήρα.

### **1.3 Εργαστηριακή μελέτη ιδιοτήτων ρευστών των ταμιευτήρων**

Η εργαστηριακή μελέτη των δειγμάτων των ρευστών των ταμιευτήρων πραγματοποιείται σε εξειδικευμένα εργαστήρια που ανήκουν είτε στις ίδιες τις εταιρίες πετρελαίου είτε ανατίθενται εργολαβικά σε εταιρίες που προσφέρουν υπηρεσίες υψηλής τεχνολογίας. Ο εξοπλισμός αυτού του είδους των εργαστηρίων απαιτεί σημαντικές επενδύσεις και υψηλού επιπέδου εκπαίδευση του προσωπικού. Οι δύο κατηγορίες στις οποίες χωρίζεται η εργαστηριακή μελέτη των ρευστών των ταμιευτήρων είναι:

- Μελέτη πετρελαίων
- Μελέτη αερίων συμπυκνωμάτων

#### **1.3.1 Μελέτες PVT πετρελαίου**

Τα πειράματα που πραγματοποιούνται στα πετρέλαια των ταμιευτήρων είναι τα παρακάτω:

- Μελέτη σταθερής μάζας (Constant Mass Study).
- Μελέτη διαφορικής εξάτμισης (Differential Vaporization Study).
- Τεστ διαχωριστήρα (Separation Test).
- Μελέτη ιζώδους.

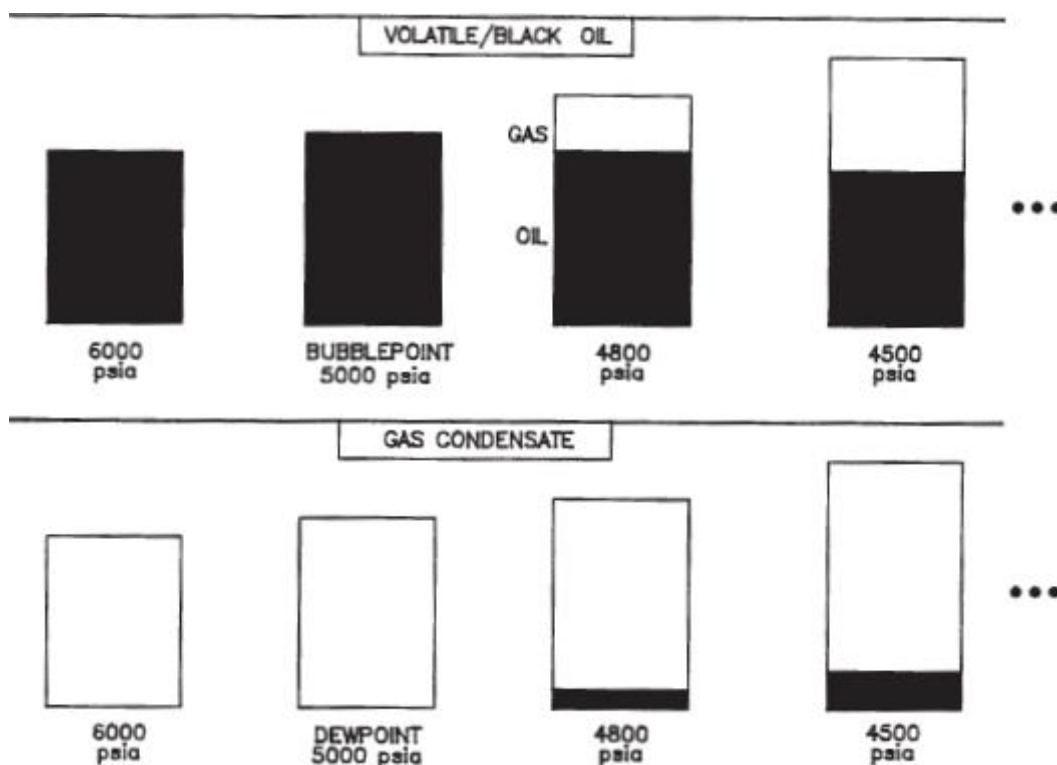
##### *1.3.1.1 Μελέτη σταθερής μάζας*

Το πείραμα σταθερής μάζας χρησιμοποιείται σε ένα δείγμα πετρελαίου για να προσδιορίσει τη πίεση κορεσμού, την διαφασική συμπεριφορά του σε πιέσεις μικρότερες της πίεσης κορεσμού και την συμπιεστότητα του διαφασικού υγρού εντός του φακέλου φάσεων, χωρίς να έχει πραγματοποιηθεί καμία απομάκρυνση αερίου ή υγρού.

Δείγμα πετρελαίου τοποθετείται σε κελί υψηλής πίεσης όπου θερμαίνεται στην θερμοκρασία του ταμιευτήρα. Η θερμοκρασία παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια του πειράματος. Αρχικά το δείγμα συμπιέζεται στην αρχική πίεση του ταμιευτήρα εξασφαλίζοντας ότι το ρευστό είναι μονοφασικό. Στην συνέχεια η πίεση μειώνεται σταδιακά μέχρι το σημείο βρασμού του.

Η ίδια διαδικασία πτώσης πίεσης συνεχίζεται και κάτω από το σημείο κορεσμού όπου σε κάθε βήμα πτώσης πίεσης έχουμε ανακίνηση του κελιού και συνεπώς ανάδευση του ρευστού που αποσκοπεί στην αποφυγή του φαινομένου του υπερκορεσμού. Η ανακίνηση του κελιού σε κάθε βήμα πτώσης πίεσης στοχεύει στον ακριβέστερο προσδιορισμό της πίεσης κορεσμού καθώς και στον καλύτερο διαχωρισμό των δύο φάσεων. Στο τελευταίο στάδιο η τιμή της πίεσης είναι χαμηλότερη από αυτή

που θα επικρατεί στον ταμιευτήρα όταν σταματήσει η παραγωγή. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μία σχηματική αναπαράσταση της μελέτης σταθερής μάζας για πετρέλαια και αέρια συμπυκνώματα.



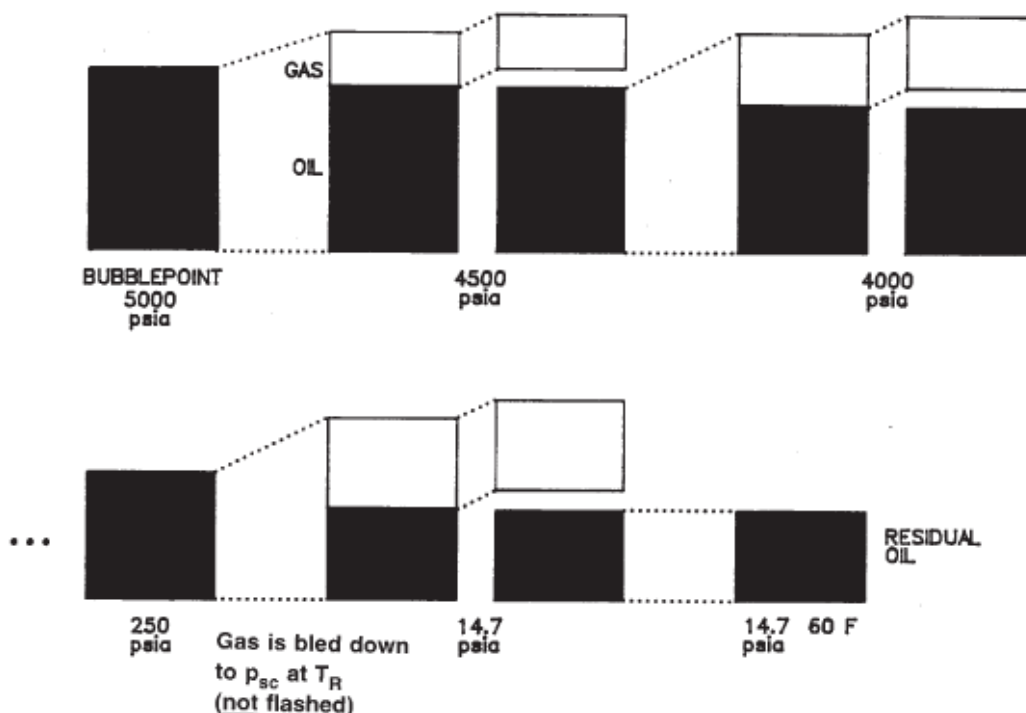
Σχήμα 1: Διαδικασία μελέτης σταθερής μάζας για πετρέλαια και αέρια συμπυκνώματα

### 1.3.1.2 Μελέτης διαφορικής εξάτμισης

Το πείραμα της διαφορικής εξάτμισης έχει σαν σκοπό να προσομοιώσει στο εργαστήριο την διαδικασία εξάντλησης που θα λάβει χώρα μέσα στον ταμιευτήρα κατά την διάρκεια της παραγωγής κάτω από το σημείο βρασμού του ρευστού, αφού η αέρια φάση παρόλο της ισορροπίας που βρίσκεται με την υγρή, λόγω της διαφορετικής κινητικότητας της απομακρύνεται συνεχώς από αυτή.

Δείγμα πετρελαίου που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη σταθερής μάζας επανασυμπιέζεται στην αρχική πίεση και φέρεται σε θερμοκρασία ταμιευτήρα η οποία μένει σταθερή κατά την διάρκεια του πειράματος. Ακολουθείται συνεχής ανατάραξη του υγρού έως ότου το αέριο επαναδιαλυθεί πλήρως στο υγρό. Η πίεση μειώνεται μέχρι το ρευστό να φτάσει στην πίεση κορεσμού του. Στη συνέχεια επιλέγονται τα στάδια πτώσης πίεσης, από την πίεση κορεσμού έως την ατμοσφαιρική (συνήθως λαμβάνονται 6-10 στάδια). Σε κάθε βήμα πτώσης πίεσης ακολουθείται η ίδια διαδικασία αρχίζοντας από το σημείο βρασμού.

Η πίεση μειώνεται στη επιθυμητή και το κελί στο οποίο βρίσκεται το ρευστό ανακινείται μέχρις ότου εξασφαλιστεί η θερμοδυναμική ισορροπία. Στη συνέχεια αφαιρείται όλο το αέριο υπό σταθερή πίεση και γίνεται μέτρηση του όγκου, των moles και της σχετικής πυκνότητάς του. Η σύσταση του αερίου προσδιορίζεται εργαστηριακά μέσω αερίου χρωματογράφου. Τέλος, μετριέται ο όγκος του πετρελαίου μετά την αφαίρεση του αερίου. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως την ατμοσφαιρική πίεση όπου και μετριέται ο όγκος και η πυκνότητα του υπολειμματικού πετρελαίου σε συνθήκες επιφάνειας<sup>[9]</sup>.



Σχήμα 2: Διαδικασία μελέτης διαφορικής εξάτμισης

### 1.3.1.3 Τεστ διαχωριστήρα

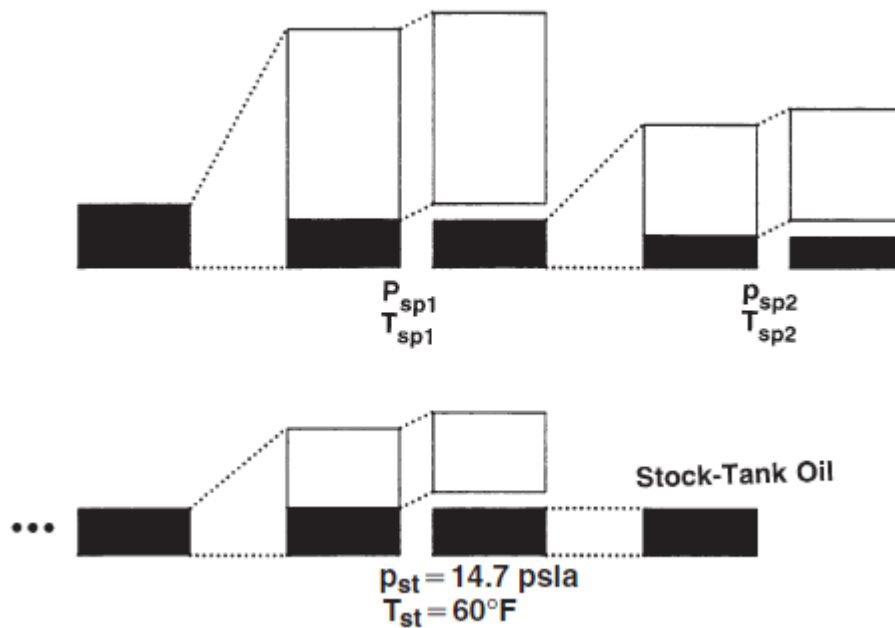
Στόχος του τεστ διαχωριστήρα είναι να προσδιορισθούν οι συνθήκες λειτουργίας του ώστε να βελτιστοποιηθεί η παραγωγή, με το να μειωθεί η παραγωγή αερίου και να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή υγρού στις ατμοσφαιρικές συνθήκες (Tank). Αυτό πραγματοποιείται βάζοντας ένα αντιπροσωπευτικό ρευστό του ταμιευτήρα να υφισταθεί μία αλληλουχία εκτονώσεων ίδια με αυτές που υφίστανται στο ρευστό του κοιτάσματος.

Η θερμοκρασία του διαχωριστήρα συνήθως επιβάλλεται στο σύστημα από αυτή με την οποία το παραγόμενο ρευστό φτάνει στην επιφάνεια. Στο στάδιο αυτό, αφαιρείται όλο το αέριο και σημειώνεται ο όγκος του καθώς και ο όγκος του υγρού στις συνθήκες του διαχωριστήρα. Το ισοζύγιο μάζας των moles μεταξύ του ρευστού του ταμιευτήρα και αυτού που εξέρχεται από τον διαχωριστήρα χρησιμοποιείται για τον



προσδιορισμό μεγεθών όπως ογκομετρικός συντελεστής υγρής φάσης  $B_o^{sep}$ , ο συντελεστής συρρίκνωσης  $SF$  και το  $GOR^{sep}$ . Τέλος, εάν ζητηθεί, η σύσταση του αερίου μπορεί να δοθεί μέσω ανάλυσης σε αέριο χρωματογράφο.

Είναι επίσης συχνό φαινόμενο να χρησιμοποιούνται περισσότεροι του ενός διαχωριστήρες (συνήθως για τα πετρέλαια είναι ένας), κάτι που αποσκοπεί περαιτέρω βελτίωση της παραγωγής. Σε αυτή την περίπτωση, το πετρέλαιο που απομένει μετά την αφαίρεση του αερίου στο στάδιο του πρώτου διαχωριστήρα φέρεται στις συνθήκες του επόμενου. Το αέριο αφαιρείται, ποσοτικοποιείται κατά moles και μετριέται η σχετική του πυκνότητα. Ο όγκος του πετρελαίου σημειώνεται και η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου παρέλθει εκτόνωση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες.



Σχήμα 3: Διαδικασία τεστ διαχωριστήρα

#### 1.3.1.4 Μελέτη ιξώδους

Το ιξώδες της υγρής φάσης ενός πετρελαϊκού δείγματος σε συνθήκες ταμιευτήρα, μετριέται χρησιμοποιώντας ιξωδόμετρα κυλιόμενης σφαίρας. Η συσκευή μετράει ηλεκτρονικά το χρόνο που απαιτεί μια χαλύβδινη σφαίρα για να κυλίσει διαμέσου ενός σωλήνα ο οποίος είναι γεμάτος με το υγρό του οποίου το ιξώδες επιδιώκεται να μετρηθεί. Οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά της σφαίρα είναι γνωστά και με εφαρμογή του νόμου του Stokes υπολογίζεται το ιξώδες.

### 1.3.2 Μελέτη αερίων συμπεκνωμάτων

Τα πειράματα που πραγματοποιούνται στα αέρια συμπεκνώματα είναι τα εξής:

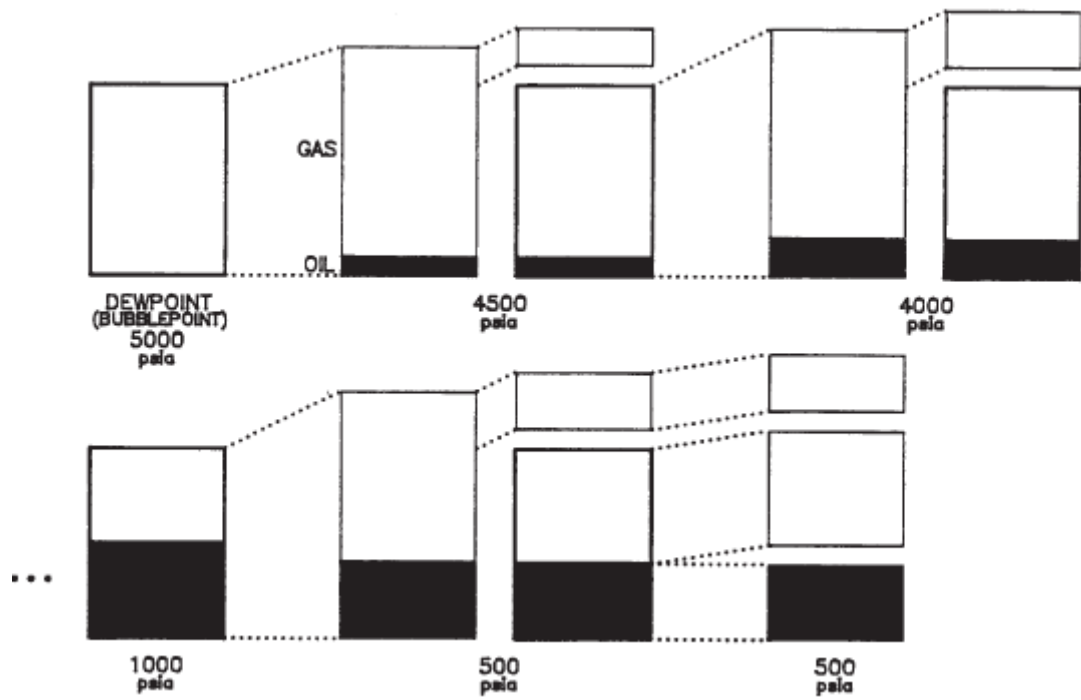
- Μελέτη σταθερής μάζας, όπως ακριβώς περιεγράφηκε παραπάνω.
- Μελέτη σταθερού όγκου (Constant Volume Study).

#### 1.3.2.1 Μελέτη σταθερού όγκου

Στόχος της μελέτης σταθερού όγκου είναι η εργαστηριακή προσομοίωση της παραγωγής από έναν ταμιευτήρα κατά την οποία ο όγκος του συστήματος παραμένει σταθερός.

Αρχικά μετριέται το σημείο δρόσου (Dew Point) καθώς και ο όγκος που καταλαμβάνει το δείγμα του ταμιευτήρα στο σημείο κορεσμού του. Σε αντίθεση με τη μελέτη σταθερής μάζας το διάγραμμα  $p$ - $V$  δεν μπορεί να αποδώσει το σημείο κορεσμού ως το σημείο της απότομης μεταβολής της συμπιεστότητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αέρια συμπιεστότητα κυριαρχεί στην μελέτη σταθερού όγκου και συνεπώς στο διάγραμμα αποκρύπτει την συμπιεστότητα της υγρής φάσης. Λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η χρήση διαφανούς κελιού με αντοχή σε υψηλές πιέσεις το οποίο καθιστά δυνατή την οπτική παρατήρηση σχηματισμού της πρώτης σταγόνας υγρού, που αντιστοιχεί στο σημείο δρόσου.

Με την ίδια λογική όπως και στην μελέτη της διαφορικής εξάτμισης, επιλέγεται στην συνέχεια ένας αριθμός σταδίων πτώσης πίεσης, όπου η τιμή της πίεσης στο τελευταίο στάδιο είναι χαμηλότερη από την πίεση εγκατάλειψης του ταμιευτήρα. Σε κάθε στάδιο ο όγκος του συστήματος πρέπει να επανέλθει στην τιμή που είχε στο σημείο δρόσου και για αυτό ο όγκος της αέριας φάσης εκτοπίζεται ισοβαρώς. Το αέριο που απομακρύνθηκε μετριέται τόσο σε συνθήκες ταμιευτήρα όσο και σε κανονικές συνθήκες. Η σύσταση του αερίου πραγματοποιείται εργαστηριακά με την βοήθεια χρωματογράφου. Τέλος υπολογίζεται ο λόγος του όγκου του συμπεκνώματος προς τον όγκο του κατελάμβανε το σύστημα στο σημείο κορεσμού του.



Σχήμα 4: Διαδικασία μελέτης σταθερού όγκου



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ (Reservoir Simulation) ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΑ ΜΑΥΡΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΩΝ (Black Oil Models)

#### 2.1 Εισαγωγή

Η μελέτη της παραγωγής κάθε ταμιευτήρα υδρογονανθράκων μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με μεθόδους προσομοίωσης (Reservoir Simulator), είτε με μεθόδους ισοζυγίου μάζας. Πλεονέκτημα ενός λογισμικού προσομοίωσης της παραγωγής ενός ταμιευτήρα είναι ότι πέρα από την δυνατότητα πραγματοποίησης υπολογισμών ισοζυγίων μάζας μπορεί να προσομοιάσει την ροή σε τρεις χωρικές διαστάσεις, ανάλογα με την αρχιτεκτονική του εκάστοτε ταμιευτήρα. Για την εφαρμογή και των δύο μεθόδων απαιτούνται οι PVT ιδιότητες των ρευστών του συστήματος οι οποίες περιγράφουν την ογκομετρική συμπεριφορά τους με την πίεση και την θερμοκρασία. Δηλαδή, την επίπτωση που έχει η πίεση στον όγκο των ρευστών καθώς αυτά κινούνται μέσα στον ταμιευτήρα. Συγκεκριμένα οι ιδιότητες των ρευστών είναι αυτές που έχουν τον καίριο ρόλο σε εφαρμογές της μηχανικής πετρελαίου καθώς εμπλέκονται σε όλα τα είδη υπολογισμών, όπως εκτίμηση ανακτήσιμων αποθεμάτων και ροής εντός του ταμιευτήρα. Οι τιμές των ιδιοτήτων αυτών λαμβάνονται είτε με μοντέλα καταστατικών εξισώσεων (Compositional EoS Models), είτε μέσω μοντέλων μαύρων πετρελαίων (Black Oil Models). Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται ο υπολογισμός των ιδιοτήτων μέσω μοντέλων μαύρων πετρελαίων. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί ποια είναι η χρησιμότητα των μοντέλων μαύρων πετρελαίων και πως αυτά εφαρμόζονται στα προγράμματα προσομοίωσης ταμιευτήρων.

#### 2.2 Περιγραφή των μοντέλων μαύρων πετρελαίων

Τα μοντέλα μαύρων πετρελαίων είναι μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης ταμιευτήρων και οι διαφορικές εξισώσεις από τις οποίες διέπονται είναι εκπεφρασμένες ως προς κάθε μία από τις 3 φάσεις που ρέουν στο πορώδες μέσο. Χαρακτηριστικό στα μοντέλα αυτά είναι ότι το πετρέλαιο θεωρείται ως ένα μίγμα δύο φάσεων και καθεμία από τις δυο φάσεις είναι ένα μίγμα συγκεκριμένων συστατικών με συγκεκριμένες ιδιότητες, οι οποίες είναι συναρτήσεις της πίεσης και της θερμοκρασίας. Τα δεδομένα για τη δημιουργία των BOT (Black Oil Tables) λαμβάνονται από συνδυασμό των δεδομένων των μελετών εξάντλησης (Depletion Studies), δηλαδή την μελέτη διαφορικής εξάτμισης (Differential Vaporization) ή την μελέτη σταθερού όγκου (Constant Volume Depletion) με διεργασίες επιφανειακού διαχωρισμού. Εν συνεχεία,

τα BOT θα χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη και την λύση των διαφορικών εξισώσεων των μοντέλων μαύρων πετρελαίων.

Από τις μελέτες εξάντλησης, η μελέτη διαφορικής εξάτμισης θεωρείται ότι περιγράφει καλύτερα την αλλαγή των συστάσεων εντός του ταμιευτήρα υποθέτοντας ότι το απελευθερωμένο αέριο κινείται γρήγορα και διαχωρίζεται άμεσα από τη ρευστή φάση, λόγω της υψηλότερης κινητικότητας του. Για ρευστά υψηλής πτητικότητας ή συμπυκνώματα αερίων η μελέτη σταθερού όγκου έχει θεωρηθεί ως η καταλληλότερη μέθοδος εξάντλησης καθώς υποθέτει ότι το παραγόμενο συμπύκνωμα παραμένει ακίνητο όσο ο κορεσμός του παραμένει χαμηλότερος από τον αντίστοιχο στις κρίσιμες συνθήκες. Η επιλογή του πειράματος εξάντλησης γίνεται ανάλογα με την πτητικότητα του δείγματος. Σε πετρελαία με ογκομετρικό συντελεστή σχηματισμού υγρής φάσης (Formation Volume Factor,  $B_o$ ) μέχρι 2,5 χρησιμοποιείται συνήθως η μελέτη διαφορικής εξάτμισης, ενώ για μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή προτιμάται η μελέτη σταθερού όγκου.

## 2.3 Χρησιμότητα των μοντέλων μαύρων πετρελαίων

Η επιλογή χρήσης ενός μοντέλου μαύρου πετρελαίου έναντι ενός μοντέλου πλήρους σύστασης με χρήση καταστατικών εξισώσεων σε ένα λογισμικό προσομοίωσης της παραγωγής οφείλεται στην εξοικονόμηση χρόνου κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης και την ευκολία χρήσης του. Η προσομοίωση ταμιευτήρων χρησιμοποιώντας μοντέλα καταστατικών εξισώσεων είναι μια περίπλοκη διαδικασία και η κατάλληλη ρύθμιση τους απαιτεί ειδικευμένο και έμπειρο προσωπικό, σε αντίθεση με τα μοντέλα μαύρων πετρελαίων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν από κάθε μηχανικό πετρελαίου. Επίσης, οι εξισώσεις από τις οποίες διέπεται ένα μοντέλο καταστατικών εξισώσεων προϋποθέτουν για την επίλυσή τους, την ύπαρξη επιπλέον δεδομένων από αυτά που χρειάζεται ένα μοντέλο μαύρων πετρελαίων.

Υπάρχουν όμως και κάποιες περιπτώσεις που καθίσταται αναγκαία η χρήση μοντέλων πλήρους σύστασης με χρήση καταστατικών εξισώσεων για την προσομοίωση της παραγωγής. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι αναγκαία η ακριβής περιγραφή της περίπλοκης συμπεριφοράς των φάσεων του ρευστού. Τέτοια ρευστά συναντιόνται κατά την παραγωγή με έγχυση κάποιου αερίου του οποίου η σύσταση δεν έχει συνάφεια με αυτή του πετρελαίου, όπως για παράδειγμα το διοξείδιο του άνθρακα. Επιπρόσθετα, άλλες αντίστοιχες περιπτώσεις που έχει αποδειχθεί πως είναι αδύνατη η χρήση μοντέλου μαύρων πετρελαίων για την προσομοίωση της παραγωγής, είναι κατά την παραγωγή αερίων συμπυκνωμάτων και ρευστών κοντά στις κρίσιμες συνθήκες τους (Near Critical Oils).

## 2.4 Εξισώσεις ροής ρευστών μοντέλων μαύρων πετρελαίων

Τα μοντέλα μαύρων πετρελαίων, λύνουν εξισώσεις ροής στις τρεις διαστάσεις του χώρου για συστήματα τριών φάσεων δηλαδή συστήματα πετρελαίου, αερίου και νερού, οι ιδιότητες των οποίων εξαρτώνται από την πίεση και τη θερμοκρασία. Οι εξισώσεις που διέπουν την ροή κάθε φάσης σε ένα τέτοιο σύστημα καθορίζονται, προσδιορίζοντας τις ροές και τις συγκεντρώσεις από τις εξισώσεις διατήρησης μάζας, για καθεμία από τις τρεις φάσεις <sup>[13]</sup>.

Έτσι, εύκολα αποδεικνύεται ότι καθένα από τα τρία συστατικά, πετρέλαιο, αέριο και νερό, ικανοποιεί μια εξίσωση διατήρησης μάζας (Mass Continuity Equation) της μορφής

$$-\frac{\partial J_x}{\partial x} - \frac{\partial J_y}{\partial y} - \frac{\partial J_z}{\partial z} - q = \frac{\partial C_l}{\partial t} \quad (1)$$

όπου με  $J$  συμβολίζεται η ροή κατά μάζα κάθε συστατικού στις τρεις διευθύνσεις x,y,z. Ο όρος  $q$  δείχνει εάν στο συγκεκριμένο σημείο πραγματοποιείται παραγωγή ή έγχυση. Στην περίπτωση παραγωγής έχουμε  $q>0$ , αλλιώς σε περίπτωση έγχυσης  $q<0$ . Τέλος, με  $C_l$  συμβολίζεται η αλλαγή του κορεσμού της φάσης  $l$  (πετρέλαιο, αέριο, νερό).

Η ροή ως προς μία δεδομένη κατεύθυνση μπορεί να γραφτεί ως η πυκνότητα του ρευστού πολλαπλασιασμένη με την ταχύτητα στη συγκεκριμένη κατεύθυνση.

$$\mathbf{J}_o = \frac{\rho_{osc}}{B_o} \mathbf{v}_o \quad (2)$$

$$\mathbf{J}_w = \frac{\rho_{wsc}}{B_w} \mathbf{v}_w \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_g = \frac{\rho_{gsc}}{B_g} \mathbf{v}_g + \frac{R_{so}\rho_{gsc}}{B_o} \mathbf{v}_o + \frac{R_{sw}\rho_{gsc}}{B_w} \mathbf{v}_w \quad (4)$$

όπου οι δείκτες o,g,w υποδηλώνουν το πετρέλαιο, αέριο, και νερό, αντίστοιχα. Με  $R_{so}$  και  $R_{sw}$  συμβολίζονται οι διαλυτότητες του αερίου στο πετρέλαιο και στο νερό αντίστοιχα. Τέλος με  $B_o$ ,  $B_g$ , και  $B_w$  συμβολίζονται οι ογκομετρικοί συντελεστές σχηματισμού των τριών φάσεων. Ο δείκτης sc υποδηλώνει κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που αυτό κατά σύμβαση μεταφράζεται σε 60° F και 14.7 psia.

Η ταχύτητα εκφράζεται από το νόμο του Darcy και δίνεται από την εξίσωση,

$$\mathbf{v}_l = -K\lambda_l \frac{\partial}{\partial x} \left[ P_l - \frac{\rho_l g z}{144 g_c} \right] \quad (5)$$

όπου με  $g$  συμβολίζεται η επιτάχυνση της βαρύτητας, και ο όρος  $g_c$  ισούται με 32.174 ft/s<sup>2</sup>. Ακολούθως, οι πυκνότητες μπορούν να γραφτούν συναρτήσει των ογκομετρικών συντελεστών παραγωγής και των διαλυτοτήτων του αερίου με τις εξής εξισώσεις

$$\rho_o = \frac{1}{B_o} [\rho_{osc} + R_{so} \rho_{gsc}] \quad (6)$$

$$\rho_w = \frac{1}{B_w} [\rho_{wsc} + R_{sw} \rho_{gsc}] \quad (7)$$

$$\rho_g = \frac{\rho_{gsc}}{B_g} \quad (8)$$

Πέρα από τις ροές, χρειάζονται και οι κορεσμοί κάθε φάσης, οι οποίες δίνονται από τις εξισώσεις

$$C_o = \phi \rho_{osc} S_o / B_o \quad (9)$$

$$C_w = \phi \rho_{wsc} S_w / B_w \quad (10)$$

$$C_g = \phi \rho_{gsc} \left[ \frac{S_g}{B_g} + R_{so} \frac{S_o}{B_o} + R_{sw} \frac{S_w}{B_w} \right] \quad (11)$$

όπου  $\phi$  είναι το πορώδες, και  $S_l$  ο βαθμός κορεσμού της φάσης  $l$ . Οι βαθμοί κορεσμού ικανοποιούν την συνθήκη

$$S_o + S_w + S_g = 1 \quad (12)$$

Έτσι, συνδυάζοντας τις εξισώσεις (1) έως (4) και (9) έως (11) και θεωρώντας ότι οι πυκνότητες παραμένουν σταθερές σε ατμοσφαιρικές συνθήκες δίνονται οι εξισώσεις διατήρησης μάζας για κάθε φάση:

Για το νερό,

$$-\left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v_{xw}}{B_w} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{v_{yw}}{B_w} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v_{zw}}{B_w} \right) \right] - \frac{q_w}{\rho_{wsc}} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \phi \frac{S_w}{B_w} \right) \quad (13)$$

Για το πετρέλαιο,

$$-\left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v_{xo}}{B_o} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{v_{yo}}{B_o} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v_{zo}}{B_o} \right) \right] - \frac{q_o}{\rho_{osc}} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \phi \frac{S_o}{B_o} \right) \quad (14)$$



Για το αέριο,

$$\begin{aligned}
& -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v_{xg}}{B_g} + \frac{R_{so}}{B_o} v_{xo} + \frac{R_{sw}}{B_w} v_{xw} \right) \\
& -\frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{v_{yg}}{B_g} + \frac{R_{so}}{B_o} v_{yo} + \frac{R_{sw}}{B_w} v_{yw} \right) \\
& -\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v_{zg}}{B_g} + \frac{R_{so}}{B_o} v_{zo} + \frac{R_{sw}}{B_w} v_{zw} \right) \\
& -\frac{q_g}{\rho_{gsc}} = \frac{\partial}{\partial t} \left[ \phi \left( \frac{S_g}{B_g} + R_{so} \frac{S_o}{B_o} + R_{sw} \frac{S_w}{B_w} \right) \right]
\end{aligned} \tag{15}$$

Οι παραπάνω διαφορικές εξισώσεις διατήρησης μάζας είναι εκπεφρασμένες ως προς απλά ογκομετρικά μεγέθη τα οποία μπορούν να προσδιοριστούν είτε πειραματικά, είτε υπολογιστικά. Σε συνδυασμό με τις υπολογιζόμενες ταχύτητες από τον νόμο του Darcy (5), προκύπτουν τρεις διαφορικές εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν πλήρως το πρόβλημα της ροής πολυφασικών ρευστών μέσα σε πορώδες μέσο. Επομένως στο επόμενο κεφάλαιο θα αναφερθούν οι εργαστηριακές και υπολογιστικές μέθοδοι υπολογισμού των ογκομετρικών μεγεθών που περιλαμβάνονται στις παραπάνω εξισώσεις.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΔΕΔΟΜΕΝΑ PVT ΓΙΑ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΜΑΥΡΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΩΝ

#### 3.1 Εισαγωγή

Έχοντας αναλύσει τις εξισώσεις ροής που θα χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της παραγωγής ενός ταμιευτήρα με μοντέλα μαύρων πετρελαίων στο προηγούμενο κεφάλαιο, μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι για την επίλυση τους είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των PVT παραμέτρων. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, σκοπός σε αυτό το κεφάλαιο είναι να αναφερθούν οι πειραματικοί και υπολογιστικοί τρόποι προσδιορισμού τους που εφαρμόζονται μέχρι σήμερα.

#### 3.2 Αναφορά απαιτούμενων δεδομένων

Από τις εξισώσεις ροής του πετρελαίου και του αερίου είναι φανερό ότι είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των πυκνοτήτων τους σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, οι οποίες συμβολίζονται με  $\rho_{osc}$  και  $\rho_{stg}$ , όπου ο δείκτης sc (Stock Tank) υποδηλώνει τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν στη δεξαμενή πετρελαίου.

Επίσης δύο ακόμα άγνωστοι είναι οι τιμές των  $B_o$  και  $B_g$ . Οι τιμές τους συνήθως δίνεται υπό μορφή καμπύλης στις αναφορές των πειραμάτων εξάντλησης, όπου σε κάθε τιμή πίεσης αντιστοιχεί μια τιμή των  $B_o$  και  $B_g$ .

Τέλος, η εξίσωση της ταχύτητας του Darcy σε κάθε κατεύθυνση περιέχει τον όρο  $\lambda_l$  που εκφράζει την σχετική κινητικότητα η οποία ισούται με τον λόγο σχετικής διαπερατότητας  $k_{rl}^{[11]}$  προς το ιξώδες  $\mu_l$ , δηλαδή:

$$\lambda_l = k_{rl} / \mu_l \quad (16)$$

Από την παραπάνω εξίσωση παρατηρείται ότι είναι επίσης αναγκαίος ο προσδιορισμός του ιξώδους κάθε ρευστού.

Έτσι, εφόσον υπολογισθούν τα παραπάνω άγνωστα δεδομένα είναι δυνατή η επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου μαύρων πετρελαίων και συνεπώς η εφαρμογή του σε πρόγραμμα προσομοίωσης παραγωγής ταμιευτήρα υδρογονανθράκων. Να σημειωθεί ότι για την επίλυση των εξισώσεων όλοι οι παράμετροι είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν σε κάθε πίεση που μελλοντικά θα λάβει ο ταμιευτήρας παραγωγής.

### 3.3 Διαδικασία υπολογισμού $\rho_{osc}$ , $\rho_{stg}$ .

Για τον προσδιορισμό της πυκνότητας του αερίου και του πετρελαίου σε ατμοσφαιρικές συνθήκες πραγματοποιείται στο εργαστήριο το πείραμα της διαχωριστήρα (Flash). Κατά την πειραματική διαδικασία ένα ρευστό εκτονώνεται από τις συνθήκες του ταμιευτήρα απευθείας στις ατμοσφαιρικές. Συνήθως όμως η ομάδα παραγωγής αποφασίζει να ακολουθηθεί μια διεργασία όπου περιλαμβάνει διαχωριστήρα (Separator). Τότε και εργαστηριακά πριν την εκτόνωση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες πραγματοποιείται μια ενδιάμεση εκτόνωση στις ίδιες συνθήκες λειτουργίας του διαχωριστήρα που έχουν οριστεί και εν συνεχεία το υγρό του διαχωριστήρα εκτονώνεται στις ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Θα ήταν να λάθος να χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς η τιμή της πυκνότητας του αερίου και του πετρελαίου από το τελευταίο στάδιο της μελέτης διαφορικής εξάτμισης καθότι η διαδικασία διαχωρισμού που ακολουθείται στο πείραμα διαφέρει σημαντικά από αυτή που συμβαίνει πραγματικά κατά τη μεταφορά των παραγομένων ρευστών από την γεώτρηση προς τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Το ρευστό που έχει απομείνει στο τέλος του πειράματος αποκαλείται υπολειμματικό πετρέλαιο (Residual Oil) καθότι έχει προέλθει από την σταδιακή αφαίρεση ολόκληρης της ποσότητας του εκκλύμενου αερίου σε κάθε βήμα πτώσης πίεσης του πειράματος υπό την υψηλή θερμοκρασία του ταμιευτήρα. Αυτό έχει και ως αποτέλεσμα η σύσταση του υπολειμματικού πετρελαίου να διαφέρει σημαντικά από αυτή του πετρελαίου από το πείραμα διαχωριστήρα.

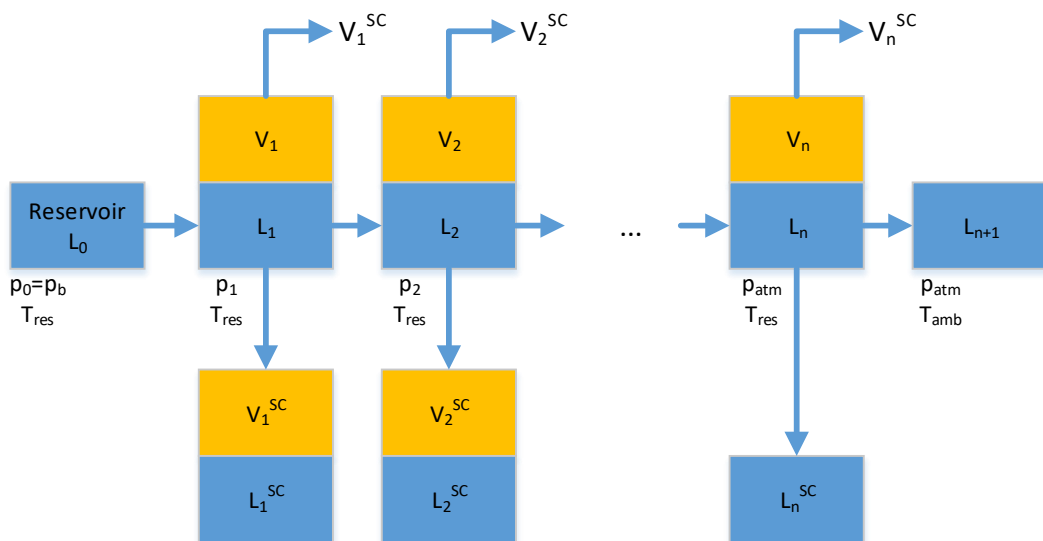
### 3.4 Προσδιορισμός ογκομετρικών συντελεστών $B_o$ και $B_g$

Ένα πολύ σημαντικό βήμα στους υπολογισμούς στη Μηχανική Ταμιευτήρων είναι η μετατροπή των παραμέτρων PVT της μελέτης της διαφορικής εξάτμισης έτσι ώστε να συμπεριλαμβάνουν την επίδραση των συνθηκών διαχωρισμού που επικρατούν στην επιφάνεια. Σε κάθε βήμα πτώσης πίεσης του πειράματος προκύπτει μία τιμή των  $B_o$  και  $B_g$  και  $R_s$  ξεκινώντας από πίεση μεγαλύτερη της πίεσης κορεσμού και τελική πίεση, την ατμοσφαιρική. Στο παρελθόν αλλά και σε πολλές περιπτώσεις σήμερα, πολλοί μηχανικοί χρησιμοποιούν απευθείας τις τιμές των  $B_o$ ,  $B_g$  και  $R_s$  από το πείραμα της διαφορικής εξάτμισης σε μετατροπές όγκων μεταξύ των συνθηκών του ταμιευτήρα και των συνθηκών επιφανείας. Είναι όμως προφανές, ότι τα μεγέθη αυτά υπολογίστηκαν με βάση ένα ρευστό σε ατμοσφαιρική πίεση το οποίο ήταν αποτέλεσμα πολλαπλών, διαδοχικών εξατμίσεων που πραγματοποιήθηκαν στην θερμοκρασία του ταμιευτήρα και όχι στην θερμοκρασία της επιφανείας. Επίσης, η διαδικασία που ακολουθείται κατά την μελέτη διαφορικής εξάτμισης έχει ως αποτέλεσμα την εντατικότερη εξάτμιση των πτητικών συστατικών του ρευστού σε σχέση με αυτή που συμβαίνει κατά την παραγωγή. Συνεπώς, τα  $B_o$ ,  $B_g$  και  $R_s$  που προκύπτουν από την μελέτη της διαφορικής εξάτμισης έχουν σε κάθε περίπτωση υψηλότερες τιμές από τις αντίστοιχες που υπολογίστηκαν κατά το τεστ διαχωριστήρα. Να σημειωθεί ότι η παρούσα εργασία

ασχολείται αποκλειστικά με δείγματα στα οποία εφαρμόζεται η μελέτη διαφορικής εξάτμισης και όχι με αυτά που λόγω της υψηλής πτητικότητας τους επιλέγεται η μελέτη σταθερού όγκου.

### 3.4.1 Αναγκαιότητα χρήσης δεδομένων σύνθετης εκτόνωσης

Για την παραγωγή των κατάλληλων δεδομένων για τους υπολογισμούς όγκων, πρέπει να ακολουθηθεί στο εργαστήριο μια μελέτη που να περιγράφει καλύτερα την διαδικασία εκτόνωσης που υφίσταται κάθε ρευστό, όταν από τον ταμιευτήρα εκτονώνεται σε συνθήκες επιφάνειας (Separator Train). Μια πειραματική διάταξη που επιλύει το πρόβλημα αυτό προτάθηκε από τον Dodson<sup>[3]</sup>, όπου ουσιαστικά πρόκειται για μία σειρά πειραμάτων εκτόνωσης του αρχικού ρευστού του ταμιευτήρα, καθώς επίσης και αυτών που προκύπτουν σε κάθε βήμα πίεσης. Τα ρευστά αυτά δημιουργήθηκαν είτε σε χαμηλότερες πιέσεις από αυτή της πίεσης κορεσμού, είτε σε ατμοσφαιρικές συνθήκες. Έτσι, το αρχικό ρευστό του ταμιευτήρα σύστασης  $L_0$  εκτονώνεται πρώτα μέσω μιας διαδικασίας διαφορικής εξάτμισης υπό σταθερή θερμοκρασία  $T_{res}$  στις συνθήκες πίεσης  $p_i$  του πρώτου βήματος και διαχωρίζεται σε κάθε βήμα στη υγρή φάση με σύσταση  $L_i$  και στην αέρια με σύσταση  $V_i$  (όπου  $i=1, \dots, n$ ). Το παραγόμενο ρευστό  $L_i$  εκτονώνεται σε περαιτέρω βήματα πίεσης, ώσπου οι συνθήκες του τελευταίου βήματος να αντιστοιχούν στις ατμοσφαιρικές. Εν συνεχεία, το παραγόμενο υγρό από κάθε βήμα πίεσης εκτονώνεται σε ατμοσφαιρικές συνθήκες είτε απευθείας, είτε δια μέσω μιας σειράς διαχωριστήρων κάθε ένας εκ των οποίων λειτουργεί σε γνωστές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Είναι λοιπόν σαφές, ότι η μελέτης της σύνθετης εκτόνωσης (Composite Flash) αποτελεί μια διαδικασία που ανάγεται σε ένα σύνολο απλών εκτονώσεων σε γνωστές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας



Σχήμα 5: Πειραματική διαδικασία σύνθετης εκτόνωσης

Αυτή η πειραματική διαδικασία στην πράξη δεν έχει εφαρμοστεί σχεδόν ποτέ καθότι:

- Είναι απαραίτητη η χρήση νέου δείγματος σε κάθε στάδιο πίεσης αφού μετά από την εκτόνωση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες το δείγμα αχρηστεύεται.
- Το κόστος ενός τέτοιου πειράματος θα ήταν πολύ υψηλό.
- Οι συνθήκες διαχωρισμού τυχαίνει να αλλάζουν κατά την διάρκεια παραγωγής καθώς μπορεί να μην είναι και γνωστές την στιγμή ανάθεσης της PVT μελέτης.

### 3.4.2 Υπολογιστικές μέθοδοι πρόβλεψης δεδομένων σύνθετης εκτόνωσης

Η αναγκαιότητα χρήσης δεδομένων σύνθετης εκτόνωσης στα μοντέλα μαύρων πετρελαίων σε συνδυασμό με την αδυναμία διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας του Dodson, οδήγησαν στην υλοποίηση υπολογιστικών μοντέλων πρόβλεψης των τιμών τους. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων σήμερα για την παραγωγή των δεδομένων σύνθετης εκτόνωσης είναι οι εξής:

- Διορθωτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούν ως βάση τα δεδομένα της διαφορικής εξάτμισης και τα μετατρέπουν σε δεδομένα σύνθετης εκτόνωσης (Dake, Al-Marhoun).
- Συσχετίσεις (Correlations) τα οποία χρησιμοποιούν δεδομένα που λαμβάνονται σε ατμοσφαιρικές συνθήκες ( $GOR$ ,  $\gamma_o$ ,  $\gamma_g$ ) και παράγουν τις καμπύλες των δεδομένων σύνθετης εκτόνωσης (De Ghetto, Vasquez-Beggs) αλλά μόνο για το αρχικό ρευστό σε συνθήκες κορεσμού.
- Μοντέλα καταστατικών εξισώσεων (EoS models) τα οποία προσδιορίζουν υπολογιστικά τις μεταβολές που θα υποστεί ένα ρευστό μετά από μια διαδικασία διαφορικής εξάτμισης (Liu-Williams)<sup>[16]</sup>.

#### 3.4.2.1 Διορθωτική μέθοδος κατά Dake

Ο Dake, ήταν ο πρώτος που δημιούργησε μια μέθοδο διόρθωσης των αποτελεσμάτων της διαφορικής εξάτμισης, λαμβάνοντας υπόψη του τις ατμοσφαιρικές συνθήκες διαχωρισμού<sup>[2]</sup>.

Για την υλοποίηση της μεθόδου ο Dake έκανε τις εξής παραδοχές:

1. Ο όγκος αερίου σε κανονικές που παραμένει εν διαλύσει σε συνθήκες ταμειυτήρα και θα παραχθεί κατά την παραγωγή του ρευστού στον διαχωριστήρα μετά από μια εκτόνωση, είναι η διαφορά μεταξύ του πραγματικού  $R_{sbf}$  και του  $R_{sd}$  διορθωμένο κατά τον συντελεστή συρρίκνωσης του ρευστού.
2. Η σχέση μεταξύ του συντελεστή σχηματισμού του πετρελαίου στην πίεση φυσαλίδας από ένα πείραμα διαχωριστήρα ( $B_{obf}$ ) και του αντίστοιχου από την

μελέτη διαφορικής εξάτμισης ( $B_{obd}$ ) παραμένει σταθερή καθ' όλο το εύρος πίεσης.

Με βάση την πρώτη παραδοχή του Dake προκύπτει ότι η διορθωμένη τιμή του  $R_s$  για πιέσεις χαμηλότερες από την πίεση κορεσμού δίνεται από την εξίσωση :

$$R_s = R_{sbf} - (R_{sbd} - R_{sd})(B_{obf} / B_{obd}) \quad (17)$$

όπου,

$R_s$  = λόγος αερίου εν διαλύσει πετρελαίου, διορθωμένος με βάση τις συνθήκες διαχωριστήρα.

$R_{sbf}$  = λόγος αερίου εν διαλύσει πετρελαίου στην πίεση κορεσμού κατά το τεστ διαχωριστήρα.

$R_{sbd}$  = λόγος αερίου εν διαλύσει πετρελαίου στην πίεση κορεσμού κατά την μελέτη διαφορικής εξάτμισης.

$R_{sd}$  = λόγος αερίου εν διαλύσει πετρελαίου στα στάδια πίεσης της διαφορικής εξάτμισης.

$B_{obf}$  = ογκομετρικός συντελεστής σχηματισμού του πετρελαίου στην πίεση κορεσμού κατά το τεστ διαχωριστήρα.

$B_{obd}$  = ογκομετρικός συντελεστής σχηματισμού του πετρελαίου στην πίεση κορεσμού κατά την μελέτη διαφορικής εξάτμισης.

Σύμφωνα με τον παραπάνω τύπο η διορθωμένη τιμή του  $R_s$  σε πιέσεις μεγαλύτερες της πίεσης κορεσμού είναι ίση με την τιμή του  $R_s$  στην πίεση κορεσμού που σημειώθηκε κατά το τεστ διαχωριστήρα. Δηλαδή ισχύει:

$$R_s = R_{sbf}$$

σε πιέσεις  $p < p_b$

Επίσης, η δεύτερη παραδοχή δηλώνει ότι η διορθωμένη τιμή του ογκομετρικού συντελεστή σχηματισμού της υγρής φάσης σε πιέσεις μικρότερες από την πίεση κορεσμού, προέρχεται από διόρθωση κατά ένα σταθερό συντελεστή. Υπό μορφή εξίσωσης ισχύει:

$$B_o = B_{od}(B_{obf} / B_{obd}) \quad (18)$$

σε πιέσεις  $p < p_b$

όπου,

$B_{od}$  = ογκομετρικός συντελεστής σχηματισμού της υγρής φάσης κατά την μελέτη διαφορικής εξάτμισης

$B_o$  = ογκομετρικός συντελεστής σχηματισμού της υγρής φάσης, διορθωμένος με βάση τις συνθήκες διαχωριστήρα.

Είναι ευνόητο λοιπόν από τον τύπο, ότι η διορθωμένη τιμή του  $B_o$  κατά Dake στην πίεση κορεσμού θα είναι ίδια με την τιμή του  $B_o$  κατά το τεστ διαχωρισμού, στην ίδια πίεση. Συνεπώς ισχύει:

$$B_o = B_{obf}$$

όταν για την πίεση ισχύει  $p=p_b$

Μετά από εφαρμογή της μεθόδου του Dake, παρατηρήθηκε ότι η μέθοδος χαρακτηρίζεται από τα εξής μειονεκτήματα:

1. Η διορθωμένη τιμή του  $R_s$  κατά Dake, δίνει συχνά αρνητικές τιμές σε χαμηλές πιέσεις. Επίσης, όσο περισσότερο πτητικό είναι ένα ρευστό τόσο η πίεση στην οποία σημειώνονται τα πρώτα αρνητικά αποτελέσματα αυξάνεται. Αυτό είναι αναμφίβολα το αποτέλεσμα της αγνόησης της απαιτούμενης διόρθωσης στις σχετικές πυκνότητες του αερίου και του πετρελαίου. Η σχετική πυκνότητα του αερίου στη μελέτη διαφορικής εξάτμισης αυξάνεται με την μειούμενη πίεση. Για το πετρέλαιο, η τιμή της σχετικής πυκνότητας από το πείραμα διαχωριστήρα διαφέρει από την αυτή της μελέτης διαφορικής εξάτμισης.

Σε κάθε περίπτωση πρέπει να ισχύει

$$R_s \geq 0$$

2. Ο διορθωμένος ογκομετρικός συντελεστής σχηματισμού σε χαμηλές πιέσεις παίρνει τιμές μικρότερες της μονάδας, κάτι που δεν συμβαδίζει με την πραγματικότητα. Για να παρακάμψει αυτό το πρόβλημα, περιόρισε την εφαρμογή της διορθωτικής μεθόδου σε πιέσει μεγαλύτερες των 500 psia. Αυτό δεν αποτελεί λύση στο πρόβλημα καθότι οι τιμές του  $B_o$  πρέπει πάντοτε να επαληθεύονται από τον εξής περιορισμό:

$$B_o \geq 1$$

3. Χρησιμοποιώντας τις τιμές των διορθωμένων PVT παραμέτρων, παρατηρήθηκε ότι η σχετική πυκνότητα στην πίεση κορεσμού δεν αντιστοιχεί σε αυτή του πειράματος διαχωριστήρα στην πίεση κορεσμού. Αυτό οφείλεται στην παράβλεψη της διόρθωσης των σχετικών πυκνοτήτων αερίου και υγρού σε ατμοσφαιρικές συνθήκες.



### 3.4.2.2 Διορθωτική μέθοδος κατά Al-Marhoun

Ο Al-Marhoun αργότερα πρότεινε μια νέα μέθοδο διόρθωσης των δεδομένων της διαφορικής εξάτμισης η οποία εξασφαλίζει ότι οι PVT παράμετροι δεν παίρνουν μη επιτρεπτές τιμές όπως στην περίπτωση της μεθόδου του Dake<sup>[5]</sup>. Η νέα μέθοδος βασίζεται στις εξής παραδοχές:

1. Οι τιμές των αποτελεσμάτων της μεθόδου διαφορικής εξάτμισης στην πίεση κορεσμού, διορθώνονται στις τιμές που λαμβάνονται στην ίδια πίεση κατά το τεστ διαχωρισμού. Οι παράμετροι PVT που διορθώνονται περιλαμβάνουν το λόγο αερίου εν διαλύσει πετρελαίου  $R_s$ , τον ογκομετρικό συντελεστή σχηματισμού της υγρής φάσης  $B_o$  και τις σχετικές πυκνότητες υγρού και αερίου.
2. Στο τελευταίο στάδιο πίεσης της διαφορικής εξάτμισης από το οποίο γίνεται εκτόνωση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, δεν επιβάλλεται καμία διόρθωση γιατί θεωρείται εκτόνωση αντίστοιχη με αυτή του τεστ διαχωρισμού.
3. Όλες οι τιμές των παραμέτρων που αντιστοιχούν σε πιέσεις του εύρους μεταξύ της πίεσης κορεσμού και της ατμοσφαιρικής διορθώνονται αναλογικά. Αυτό φαίνεται από τους παρακάτω τύπους όπου:

Η τιμή του διορθωμένου λόγου αερίου εν διαλύσει πετρελαίου δίνεται από την εξίσωση:

$$R_{si} = R_{sdi} (R_{sbf} / R_{sbd}) \quad (19)$$

σε πιέσεις  $p < p_b$

Η διορθωμένη τιμή του ογκομετρικού συντελεστή σχηματισμού της υγρής φάσης δίνεται από την εξίσωση

$$B_{oi} = B_{obf} + c_i (B_{odn} - B_{obf}) \quad (20)$$

όπου,

$$c_i = (B_{obd} - B_{odi}) / (B_{obd} - B_{odn}) \quad (21)$$

σε πιέσεις  $p < p_b$

Η διορθωμένη τιμή της σχετικής πυκνότητας του αερίου δίνεται από την εξίσωση

$$\gamma_{gi} = \gamma_{gfi} + d_i (\gamma_{gd_{n-1}} - \gamma_{gfi}) \quad (22)$$

Όπου,

$$d_i = (\gamma_{gd_1} - \gamma_{gd_i}) / (\gamma_{gd_1} - \gamma_{gd_{n-1}}) \quad (23)$$

σε πιέσεις  $p < p_b$  και  $\gamma_{gd_{n-1}}$  είναι η σχετική πυκνότητα του αερίου στην χαμηλότερη πίεση όπου ο λόγος αερίου εν διαλύσει πετρελαίου δεν ισούται με μηδέν.

Η διορθωμένη τιμή της σχετικής πυκνότητας του υγρού δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις

$$\gamma_{oi} = \gamma_{of} + c_i(\gamma_{od} - \gamma_{of}) \quad (24)$$

$$\gamma_{apii} = 141.5 / \gamma_{oi} - 131.5 \quad (25)$$

Από την εφαρμογή της μεθόδου Al-Marhoun παρατηρήθηκε ότι η μέθοδος δεν μπορεί να προσεγγίσει με ακρίβεια την καμπύλη των δεδομένων σύνθετης εκτόνωσης σε ρευστά υψηλής πτητικότητας. Οι αποκλίσεις από την πραγματική καμπύλη δεδομένων σύνθετης εκτόνωσης είναι σημαντικές καθ' όλο το εύρος πίεσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μέθοδος περιορίζεται, προσπαθώντας να τροποποιήσει την καμπύλη δεδομένων σύνθετης εκτόνωσης της μεθόδου του Dake ενώ ταυτόχρονα να διατηρήσει το σχήμα της.

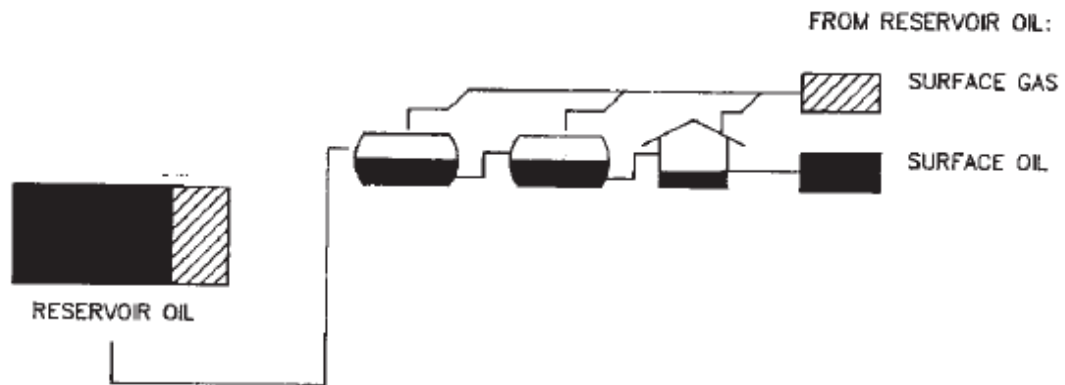
#### 3.4.2.3 Πρόβλεψη δεδομένων σύνθετης εκτόνωσης με συσχετίσεις

Η χρήση συσχετίσεων για την πρόβλεψη των δεδομένων σύνθετης εκτόνωσης πραγματοποιείται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων πριν την έναρξη της παραγωγής. Αυτό σημαίνει ότι δεν έχει διεξαχθεί μέχρι τότε κανένα από τα εργαστηριακά πειράματα εξάντλησης και συνεπώς τα μόνα δεδομένα που είναι διαθέσιμα είναι από τεστ της γεώτρησης του ταμιευτήρα (Well Test). Κατά το τεστ αυτό, γίνεται μέτρηση της παραγωγής της γεώτρησης του ταμιευτήρα. Η εφαρμογή των συσχετίσεων πραγματοποιείται επίσης και στην περίπτωση που η παραγωγή έχει ξεκινήσει αλλά τα αποτελέσματα των PVT δεδομένων των πειραμάτων εξάντλησης δεν ήταν αντιπροσωπευτικά.

Τα βασικά δεδομένα PVT που υπολογίζονται από τα δεδομένα παραγωγής και χρησιμοποιούνται στις συσχετίσεις είναι ο λόγος αερίου εν διαλύσει πετρελαίου ( $GOR$ ) και οι σχετικές πυκνότητες του αερίου και του πετρελαίου  $\gamma_g$  και  $\gamma_o$  αντίστοιχα καθώς και η θερμοκρασία του <sup>[17]</sup>. Η μέθοδος πρόβλεψης των απαιτούμενων PVT τιμών με συσχετίσεις πραγματοποιείται συνήθως μέσω των εξισώσεων των Vazquez-Beggs<sup>[15]</sup> και του De Ghetto<sup>[14]</sup>. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι η αξιοπιστία αυτών των εξισώσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά του ρευστού του ταμιευτήρα. Έχει αποδειχθεί ότι όσο τα ρευστά έχουν χαρακτηριστικά κοινά με αυτά που έχει η πλειοψηφία των πετρελαϊκών ρευστών από τα οποία προέκυψαν, τόσο περισσότερο αναμένεται οι εξισώσεις να έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια.

Παρ' όλα αυτά, είναι σαφές ότι τα αποτελέσματα των εξισώσεων αυτών δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται σε υπολογισμούς των μοντέλων μαύρων πετρελαίων, αλλά απλά αποτελούν μία πρώτη προσέγγιση των απαιτούμενων παραμέτρων. Οι εξισώσεις

αυτές εμφανίζουν σημαντικές αποκλίσεις και ειδικά σε πτητικά πετρέλαια ή σε πετρέλαια κοντά στο κρίσιμο σημείο τους (Near Critical Oils) λόγω της έντονης εξάρτησης των ιδιοτήτων των τελευταίων από τη σύσταση. Αυτό συνεπώς έχει ως αποτέλεσμα, όταν διαφέρει η σύσταση ενός πετρελαίου από αυτή από την οποία χαρακτηρίζεται η πλειοψηφία των δειγμάτων, τόσο τα αποτελέσματα των συσχετίσεων θα διαφέρουν από τις πραγματικές τιμές των παραμέτρων σύνθετης εκτόνωσης τους.



Σχήμα 6: Αναπαράσταση διαδικασίας παραγωγής ενός ταμειυτήρα

#### 3.4.2.4 Μοντέλα καταστατικών εξισώσεων (EoS Models)

Ένας ακόμα τρόπος πρόβλεψης των ζητούμενων δεδομένων είναι με χρήση μοντέλου καταστατικών εξισώσεων (Equation of State Model), που και αποτελεί την ως επί των πλείστον συνιστώμενη επιλογή. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί ένα κατάλληλα ρυθμισμένο μοντέλο ώστε να προσομοιώσει την διαδικασία σύνθετης εκτόνωσης. Παρόλο που οι υπολογισμοί που απαιτούνται δεν είναι υπολογιστικά δύσκολοι, η ακρίβειά τους μπορεί να αμφισβητηθεί ανάλογα με την ορθότητα ή μη της ρύθμισης του μοντέλου.

Πέραν από τη χρήση δεδομένων διαφορικής εξάτμισης για την προσομοίωση της μεθόδου σύνθετης εκτόνωσης, τα μοντέλα καταστατικών εξισώσεων μπορούν αφού ρυθμιστούν κατάλληλα, να χρησιμοποιήσουν τα δεδομένα από οποιαδήποτε μελέτη εξάντλησης ώστε να προσομοιώσουν την μελέτη σύνθετης εκτόνωσης. Έχει παρατηρηθεί πως ανεξάρτητα από ποια από τις μελέτες εξάντλησης λαμβάνονται τα απαραίτητα δεδομένα, τα αποτελέσματα της μελέτης σύνθετης εκτόνωσης, θα είναι παραπλήσια. Όταν για έναν αριθμό ρευστών πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της μελέτης σύνθετης εκτόνωσης για κάθε μελέτη εξάντλησης, τότε τα ακριβέστερα αποτελέσματα σε σχέση με αυτά που λήφθηκαν κατά την παραγωγή, φάνηκε να αποδίδονται όταν για την προσομοίωση χρησιμοποιούνται τα δεδομένα της μελέτης σταθερής μάζας. Η σύνθετη μελέτη σταθερής μάζας (Composite Constant Composition Expansion, CCCE) σε αναλογία με τις μελέτες της διαφορικής εξάτμισης και σταθερού όγκου, παράγει σε κάθε βήμα πίεσης υγρή και αέρια φάση σε ισορροπία. Στην περίπτωση που αυτές οι συστάσεις ισορροπίας ήταν γνωστές, τότε θα μπορούσε επίσης

να πραγματοποιηθεί υπολογιστική εκτόνωση μέσα από συνθήκες διαχωρισμού στην επιφάνεια. Επειδή ακριβώς όμως το συγκεκριμένο πείραμα εκτελείται υπό τον περιορισμό της σταθερής μάζας δεν λαμβάνεται ποτέ δείγμα από καμία από τις δύο συστάσεις σε ισορροπία κι επομένως δεν μπορεί να μετρηθεί πειραματικά η σύστασή τους. Ως αποτέλεσμα, η μελέτη της σύνθετης σταθερής μάζας δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με τις μεθόδους που ακολουθούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία, αλλά μόνο με χρήση καταστατικού μοντέλου.

### 3.4.3 Υπολογισμός καμπύλης ιξώδους ρευστού

Για την προσομοίωση της παραγωγής ενός ταμιευτήρα με μοντέλο μαύρων πετρελαίων είναι επίσης απαραίτητος ο προσδιορισμός του ιξώδους του πετρελαίου. Πέρα από τον πειραματικό προσδιορισμό του έχουν αναπτυχθεί και υπολογιστικές μέθοδοι που εφαρμόζονται ανάλογα με το αν είναι γνωστή η σύστασή του ή όχι. Οι τυπικές τιμές του ιξώδους για τα πετρελαϊκά δείγματα κυμαίνονται από 0.1 cp για αυτά κοντά στο κρίσιμο σημείο τους, ενώ για το αργό πετρέλαιο μπορεί να ξεπεράσουν και τα 100 cp. Κάθε κλασσική μελέτη PVT περιλαμβάνει και μελέτη ιξώδους κατά την οποία ακολουθείται η ίδια διαδικασία με την μελέτη διαφορικής εξάτμισης, μόνο που σε κάθε βήμα πίεσης μετριέται το ιξώδες του υγρού. Όταν τέτοιες μελέτες δεν είναι διαθέσιμες τότε χρησιμοποιούνται συσχετίσεις, με τις οποίες προσδιορίζεται και το ιξώδες του αερίου. Οι περισσότερες από αυτές έχουν τις ίδιες απαιτήσεις σε δεδομένα εισόδου με αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω για τους ογκομετρικούς συντελεστές σχηματισμού. Επίσης, υπάρχουν και πιο σύνθετες που εξαρτώνται από τη σύσταση του ρευστού.

Ο προσδιορισμός του ιξώδους ενός ρευστού όταν δεν είναι γνωστή η σύσταση του δείγματος, περιλαμβάνει:

1. Προσδιορισμό ιξώδους του πετρελαίου τανκ σε ατμοσφαιρικές συνθήκες (Stock Tank Oil Viscosity).
2. Προσδιορισμό του ιξώδους του ρευστού στην πίεση κορεσμού του (Bubblepoint Oil Viscosity).
3. Προσδιορισμό ιξώδους του ακόρεστου πετρελαίου (Undersaturated Oil Viscosity).
4. Προσδιορισμό του ιξώδους σε ενδιάμεσες πιέσεις.

Για την πρώτη περίπτωση του υπολογισμού του ιξώδους του πετρελαίου σε ατμοσφαιρικές συνθήκες χρησιμοποιείται συνήθως η εξίσωση του Standing,

$$\mu_{oD} = \left( 0.32 + \frac{1.8 \times 10^7}{\gamma_{API}^{4.53}} \right) \left( \frac{360}{T + 200} \right)^A \quad (26)$$

όπου

$$A = 10^{[0.43 + (8.33/\gamma_{API})]} \quad (27)$$

Το ιξώδες του πετρελαίου τανκ σε ατμοσφαιρικές συνθήκες είναι από τις πιο αναξιόπιστες ιδιότητες για να προβλεφθεί μέσω συσχετίσεων. Αυτό είναι απόρροια της επίδρασης που έχει στην τιμή του ιξώδους το είδος των υδρογονανθράκων (είδος παραφινών, αρωματικών υδρογονανθράκων) που περιλαμβάνει το πετρέλαιο, καθώς της ποσότητας των ασφαλτενίων.

Η προσέγγιση της τιμής του ιξώδους του πετρελαίου στην πίεση κορεσμού που χρησιμοποιείται συνήθως δίνεται μέσω της εξίσωσης των Chew-Connally<sup>[10]</sup>. Η προσέγγιση αυτή του ιξώδους του κορεσμένου πετρελαίου γίνεται συσχετίζοντας το ιξώδες του πετρελαίου στις ατμοσφαιρικές συνθήκες με το λόγο αερίου εν διαλύσει πετρελαίου  $R_s$  μέσω της εξίσωσης.

$$\mu_{ob} = A_1 (\mu_{oD})^{A_2} \quad (28)$$

Οι τιμές των  $A_1$  και  $A_2$  δίνονται στην βιβλιογραφία από πολλούς μελετητές όπως, Standing, Beggs-Robinson, Bergman κλπ. και παρόλο που μεταξύ τους διαφέρουν, οι περισσότερες αποδίδουν παρόμοια αποτελέσματα. Ωστόσο η απλούστερη μορφή τους δίνεται από τους Beggs-Robinson, όπου:

$$A_1 = 10.715 (R_s + 100)^{-0.515} \quad (29)$$

και

$$A_2 = 5.44 (R_s + 150)^{-0.338} \quad (30)$$

Για τον προσδιορισμό του ιξώδους του ακόρεστου πετρελαίου χρησιμοποιείται η εξίσωση των Vasquez-Beggs που έχει την μορφή

$$\mu_o = \mu_{ob} (p / p_b)^A \quad (31)$$

όπου,

$$A = 2.6 p^{1.187} \exp[-11.513 - (8.98 \times 10^{-5})] \quad (32)$$

Επίσης, ένας εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού είναι μέσω της εξίσωσης των Abul-Majeed, όπου:

$$\mu_o = \mu_{ob} + 10^{[A - 5.2106 + 1.11 \log(p - p_b)]} \quad (33)$$

όπου,

$$A = 1.9311 - 0.89941(\ln R_s) - 0.001194\gamma_{API}^2 + 0.0092545\gamma_{API}(\ln R_s) \quad (34)$$

Τέλος, ο προσδιορισμός του ιξώδους σε ενδιάμεσες πιέσεις, γίνεται μέσω παρεμβολής, χρησιμοποιώντας τις τιμές του ιξώδους στην πίεση κορεσμού, στην ατμοσφαιρική πίεση, καθώς και την τιμή του ιξώδους του ακόρεστου πετρελαίου.

Στην περίπτωση που είναι γνωστή η σύσταση ενός δείγματος, τότε για τον υπολογισμό του ιξώδους του χρησιμοποιείται η μέθοδος των Lorenz, Bray και Clark [18], η οποία είναι πιο σύνθετη από της παραπάνω αλλά ακριβέστερη. Η επιθυμητή ακρίβεια για τα ιξώδη αερίου και πετρελαίου που απαιτείται στους υπολογισμούς της μηχανικής ταμιευτήρων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ακριβείς προβλέψεις τις πυκνότητας.

**ΝΕΑ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΡΥΤ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ  
ΣΥΝΘΕΤΗΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ**

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μίας υπολογιστικής μεθόδου ακριβής προσέγγισης των PVT δεδομένων σύνθετης εκτόνωσης. Αυτό για να επιτευχθεί χρησιμοποιήθηκε μία βάση δεδομένων με ρευστά από όλο τον κόσμο για τα οποία είχε εφαρμοστεί η μελέτη διαφορικής εξάτμισης και το πείραμα διαχωριστήρα. Ουσιαστικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι εκμεταλλεύεται και χρησιμοποιεί ιδιότητες οι οποίες έχουν ήδη μετρηθεί κατά την εργαστηριακή μελέτη της διαφορικής εξάτμισης. Τέτοιες ιδιότητες είναι για παράδειγμα η πυκνότητα του πετρελαίου σε συνθήκες ταμιευτήρα  $\rho_{orf}$  και αυτή της υγρής φάσης από κάθε βήμα πίεσης του πειράματος διαφορικής εξάτμισης, οι οποίες μπορούν ληφθούν απευθείας από την καμπύλη της πυκνότητας που περιλαμβάνεται στην αναφορά της μελέτης.

The diagram illustrates a multi-stage vaporization process. It starts with a **Reservoir** ( $L_0$ ) at pressure  $p_0 = p_b$  and temperature  $T_{res}$ . The reservoir feeds into a series of stages ( $L_1, L_2, \dots, L_n, L_{n+1}$ ). Each stage consists of a liquid layer ( $L_n$ ) and a vapor layer ( $V_n$ ). The vapor from stage  $n$  is  $V_n^{SC}$ . The liquid in stage  $n$  is at pressure  $p_n = p_{atm}$  and temperature  $T_{res}$ . The liquid in stage  $n+1$  is at pressure  $p_{n+1} = p_{atm}$  and temperature  $T_{amb}$ .

Προκειμένου όμως να υλοποιηθεί η διαδικασία σύνθετης εκτόνωσης πρέπει η υγρή φάση  $L_i$  από κάθε βήμα πίεσης του πειράματος να εκτονωθεί σε ατμοσφαιρικές συνθήκες μέσω της επιλεγείσας διαδρομής διαχωρισμού. Σε περίπτωση χρήσης

ενδιάμεσου διαχωριστήρα, μπορεί προηγουμένως να πραγματοποιηθεί εκτόνωση στις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης που έχουν επιλεχθεί. Να σημειωθεί, ότι η σύσταση της υγρής φάσης  $L_i$  σε κάθε βήμα πίεσης είναι άγνωστη. Όμως, η διαδικασία της διαφορικής εξάτμισης αποτελεί τυποποιημένο πείραμα το οποίο περιλαμβάνεται σε μια πλήρη εργαστηριακή ανάλυση PVT κάθε πετρελαϊκού ρευστού κι επομένως έχουν προσδιοριστεί πειραματικά οι συστάσεις ισορροπίας της αέριας φάσης σε κάθε βήμα πίεσης. Έτσι, πραγματοποιώντας υπολογισμούς ισοζυγίου μάζας, μπορούν να προσδιοριστούν και οι συστάσεις ισορροπίας της υγρής φάσης.

Πίνακας 1: Τρόπος παρουσίασης αποτελεσμάτων μελέτης διαφορικής εξάτμισης

Differential Vaporization							
Pressure (psig)	Solution GOR (scf/bbl <sup>*</sup> )	Relative Oil Volume (RB/bbl <sup>*</sup> )	Relative Total Volume (RB/bbl <sup>*</sup> )	Oil Density (g/cm <sup>3</sup> )	Deviation Factor Z	Gas FVF (RB/bbl <sup>*</sup> )	Incremental Gas Gravity
2,620	854	1.600	1.600	0.6562			
2,350	763	1.554	1.665	0.6655	0.846	0.00685	0.825
2,100	684	1.515	1.748	0.6731	0.851	0.00771	0.818
1,850	612	1.479	1.859	0.6808	0.859	0.00882	0.797
1,600	544	1.445	2.016	0.6889	0.872	0.01034	0.791
1,350	479	1.412	2.244	0.6969	0.887	0.01245	0.794
1,110	416	1.382	2.593	0.7044	0.903	0.01552	0.809
850	354	1.351	3.169	0.7121	0.922	0.02042	0.831
600	292	1.320	4.254	0.7198	0.941	0.02931	0.881
350	223	1.283	6.975	0.7291	0.965	0.05065	0.988
159	157	1.244	14.693	0.7382	0.984	0.10834	1.213
0	0	1.075		0.7892			2.039
		1.000**					

## 4.2 Ανάπτυξη αλγορίθμου υπολογισμού σύστασης υγρής φάσης κάθε σταδίου πίεσης της μελέτης διαφορικής εξάτμισης από τα δεδομένα της μελέτης PVT

Ας θεωρηθεί μια μελέτης διαφορικής εξάτμισης όπου το ρευστό του ταμιευτήρα εκτονώνεται υπό σταθερή θερμοκρασία από την πίεση κορεσμού του στην ατμοσφαιρική σε  $n_{DV}$  βήματα. Τότε, με  $z_o^{(n)}$ ,  $z_g^{(n)}$  συμβολίζονται οι συστάσεις του ρευστού και του αερίου αντίστοιχα σε κάθε βήμα  $n$ . Αντίστοιχα με  $\rho$ ,  $MW$ ,  $N$ ,  $m$ ,  $V$  υποδηλώνεται η πυκνότητα, το μοριακό βάρος, ο αριθμός των moles, η μάζα και ο όγκος κάθε φάσης. Έτσι, ο λόγος αερίου εν διαλύσει πετρελαίου σε κάθε βήμα ορίζεται από:

$$R_s^{(n)} = \frac{\sum_{i=n+1}^{n_{DV}} V_{sc} (V_g^{(i)})}{V_o^{(n_{DV})}} \quad (26)$$

όπου η συνάρτηση  $V_{sc}$  ισούται με τον όγκο σε κανονικές συνθήκες.



Η διαφορά των λόγων αερίου εν διαλύσει πετρελαίου μεταξύ διαδοχικών βημάτων  $n-1$  και  $n$  δίνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} R_s^{(n-1)} - R_s^{(n)} &= \frac{\sum_{i=n}^{n_{DV}} V_{sc} (V_g^{(i)})}{V_o^{(n_{DV})}} - \frac{\sum_{i=n+1}^{n_{DV}} V_{sc} (V_g^{(i)})}{V_o^{(n_{DV})}} \\ &= \frac{V_{sc} (V_g^{(n)})}{V_o^{(n_{DV})}} = \frac{N_g^{(n)}}{V_o^{(n_{DV})}} \frac{RT_{sc}}{P_{sc}} \end{aligned} \quad (27)$$

Το μοριακό κλάσμα του αερίου στο βήμα  $n$  ισούται με:

$$n_g^{(n)} = \frac{N_g^{(n)}}{N_o^{(n)} + N_g^{(n)}} \Rightarrow \frac{N_g^{(n)}}{N_g^{(n)}} = \frac{n_g^{(n)}}{1 - n_g^{(n)}} \quad (28)$$

Ο όγκος του υπολειμματικού πετρελαίου συνδέεται με τον όγκο σε συνθήκες ταμιευτήρα μέσω του  $B_o$ :

$$V_o^{(n_{DV})} = \frac{V_o^{(n)}}{B_o^{(n_{DV})}} \quad (29)$$

και ο όγκος σε συνθήκες ταμιευτήρα εκφράζεται μέσω της πυκνότητας:

$$V_o^{(n)} = \frac{m_o^{(n)}}{\rho_o^{(n)}} = \frac{N_o^{(n)} MW_o^{(n)}}{\rho_o^{(n)}} \quad (30)$$

Η σύσταση της υγρής φάσης  $z_o^{(n)}$  λαμβάνεται μέσω υπολογισμών διατήρησης μάζας ως εξής:

$$z_o^{(n-1)} = (1 - n_g^{(n)}) z_o^{(n)} + n_g^{(n)} z_g^{(n)} \Rightarrow z_o^{(n)} = \frac{z_o^{(n-1)} - n_g^{(n)} z_g^{(n)}}{1 - n_g^{(n)}} \quad (31)$$

και το μοριακό της βάρος μπορεί να εκφραστεί ως μια συνάρτηση της σύστασής της

$$\begin{aligned} MW_o^{(n-1)} &= (1 - n_g^{(n)}) MW_o^{(n)} + n_g^{(n)} \sum_i z_{g_i}^{(n)} MW_i \Rightarrow \\ MW_o^{(n)} &= \frac{MW_o^{(n-1)} - n_g^{(n)} \sum_i z_{g_i}^{(n)} MW_i}{(1 - n_g^{(n)})} \end{aligned} \quad (32)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (28) έως (32) στην εξίσωση (27) προκύπτει:

$$n_g^{(n)} = \frac{P_{sc}}{RT_{sc}} \frac{(R_s^{(n-1)} - R_s^{(n)}) MW_o^{(n-1)}}{B_o^{(n)} \rho_o^{(n)} + (R_s^{(n-1)} - R_s^{(n)}) \sum_i z_{g_i}^{(n)} MW_i} \quad (33)$$

Θεωρώντας  $n=0$  τότε για το αρχικό ρευστό στις συνθήκες κορεσμού του, ο όρος  $MW_o^{(0)}$  αντιστοιχεί στο μοριακό βάρος του ρευστού σε συνθήκες ταμιευτήρα. Η

εξίσωση (33) μπορεί να εφαρμοστεί διαδοχικά για  $n=1,...,n_{DV}-1$ . Κάθε φορά το υπολογισμένο μοριακό κλάσμα πρέπει να υιοθετηθεί στην εξίσωση (31) για τον υπολογισμό της σύστασης της υγρής φάσης. Σε κάθε βήμα οι τρέχουσες τιμές των  $B_o^{(n)}$ ,  $R_s^{(n)}$ ,  $\rho_o^{(n)}$  καθώς και η σύσταση του απελευθερωμένου αερίου  $z_g^{(n)}$  μπορούν ληφθούν απευθείας από την αναφορά PVT. Τέλος, να σημειωθεί ότι συστάσεις από το βήμα  $n = n_{DV} - 1$  στο  $n = n_{DV}$  δεν μεταβάλλονται καθότι δεν απελευθερώνεται επιπλέον αέριο.

Προτού γίνει η εφαρμογή του παραπάνω αλγόριθμου υπολογισμού των συστάσεων της υγρής φάσης της μελέτης διαφορικής εξάτμισης, πρέπει να επιβεβαιωθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων του. Από βάση δεδομένων επιλέχθηκε ένα ρευστό για το οποίο υπήρχε διαθέσιμο ρυθμισμένο μοντέλο καταστατικών εξισώσεων με το οποίο μπορούσαν να υπολογιστούν οι συστάσεις της υγρής φάσης σε κάθε βήμα πίεσης της διαφορικής εξάτμισης. Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε υπολογισμός των ίδιων συστάσεων της υγρής φάσης για κάθε βήμα πίεσης για το ίδιο ρευστό, όμως αυτή τη φορά μέσω όμως του νέας μεθόδου.

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων των συστάσεων από τις δύο μεθόδους που εφαρμόστηκαν, παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα ήταν σχεδόν ταυτόσημα και συνεπώς ο παραπάνω αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί με ασφάλεια.

#### 4.3 Υλοποίηση αλγορίθμου εκτόνωσης της υγρής φάσης κάθε σταδίου πίεσης της μελέτης διαφορικής εξάτμισης

Αφού αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος υπολογισμού της σύστασης της υγρής φάσης για κάθε βήμα της μελέτης διαφορικής εξάτμισης, στόχος τώρα είναι η εκτόνωση αυτών των συστάσεων μέσα από οποιοδήποτε συνδυασμό διαχωριστήρων μέχρι τις συνθήκες τανκ. Αυτό αμέσως καθιστά αναγκαία την επίλυση του προβλήματος ισορροπίας φάσεων μετά από κάθε εκτόνωση και συνεπώς τη γνώση των χαρακτηριστικών τιμών των συντελεστών ισορροπίας (k-values).

Τα k-values μετά από κάθε εκτόνωση σε οποιεσδήποτε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, ορίζονται ως το πηλίκο της μοριακής συγκέντρωσης του συστατικού στην αέρια φάση προς την αντίστοιχη στην υγρή. Είναι συναρτήσεις της πίεσης, της θερμοκρασίας και της σύστασης και ως εκ τούτου εξαρτώνται από τις συνθήκες διαχωρισμού και την σύσταση του ρευστού. Σχετίζονται με την θερμοδυναμική ισορροπία των συστάσεων των φάσεων μέσω της εξίσωσης

$$k_i = y_i / x_i \quad (34)$$

όπου το  $k_i$  υποδηλώνει την τιμή του συντελεστή ισορροπίας κάθε συστατικού  $i$  και τα  $y_i$ ,  $x_i$  τα ποσοστά των μοριακών συστάσεων του κάθε συστατικού στην αέρια και υγρή φάση αντίστοιχα.

Ωστόσο, για χαμηλές τιμές πίεσης και θερμοκρασίας, όπως στην περίπτωση των επιφανειακών διαχωριστήρων, η εξάρτηση από τη σύσταση είναι μηδαμινή και μπορεί να αγνοηθεί. Ως αποτέλεσμα, είναι δυνατός ο υπολογισμός τους μέσω συναρτήσεων της πίεσης και θερμοκρασίας. Υπάρχουν αρκετοί μέθοδοι υπολογισμού των k-values στην βιβλιογραφία, αλλά για την παρούσα μελέτη επιλέχθηκε η εξίσωση του Wilson. Η εξίσωση του Wilson παρέχει εκτίμηση των k-values και διατυπώνεται ως εξής:

$$k_i = \frac{\exp\left(5.37(1+\omega_i)\left(1-\frac{1}{T_{ri}}\right)\right)}{P_{ri}} \quad (35)$$

όπου με  $p_{ri}$  και  $T_{ri}$  συμβολίζονται οι ανηγμένες τιμές πίεσης και θερμοκρασίας αντίστοιχα. Με  $\omega_i$  συμβολίζεται ο ακεντρικός παράγοντας όπως αυτός έχει οριστεί από τον Pitzer.

Οι τιμές αυτών των παραμέτρων για τα συστατικά N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, iC<sub>4</sub>, nC<sub>4</sub>, iC<sub>5</sub>, nC<sub>5</sub> είναι γνωστές. Για τα ψευδοσυστατικά από το ψευδο-C<sub>6</sub> έως και το ψευδο-C<sub>n-1</sub>, έχουν προταθεί μέσες τιμές από τον Katz<sup>[4]</sup> και συνεπώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας. Παρ' όλα αυτά, το βαρύ κλάσμα του δείγματος απαιτεί την χρήση εξισώσεων για την πρόβλεψη των κρίσιμων ιδιοτήτων του. Σε αυτή την εργασία προτείνεται η χρήση της μεθόδου του Twu<sup>[7]</sup>, η οποία όμως για να εφαρμοστεί χρειάζεται την πυκνότητα και το μοριακό βάρος του βαρέος κλάσματος. Τα δεδομένα αυτά είναι γνωστά και έχουν μετρηθεί κατά την μελέτη διαφορικής εξάτμισης.

Οι Whitson και Torp πρότειναν μια τροποποίηση της μεθόδου του Wilson η οποία χρησιμοποιεί μία μόνο παράμετρο, την πίεση σύγκλισης  $p_k$  για τον χαρακτηρισμό της σύστασης ενός μίγματος<sup>[8]</sup>. Μέσω αυτής της τροποποίησής αποδίδονται τιμές των k-values ίσες με την μονάδα σε πιέσεις ίσες με την πίεση σύγκλισης, ενώ αναπαράγονται οι τιμές του Wilson στις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Η τροποποίησή τους δίνεται από την εξίσωση:

$$k_i = \left(\frac{p_{ci}}{p_k}\right)^{A_{i-1}} \frac{\exp\left(5.37(1+\omega_i)\left(1-\frac{1}{T_{ri}}\right)\right)}{P_{ri}} \quad (36)$$

όπου

$$A_i = 1 - \left(\frac{p}{p_k}\right)^{A_2} \quad (37)$$

Έτσι, σε ατμοσφαιρικές συνθήκες θα ισχύει  $p=p_{sc}$ , συνεπώς το  $A_i$  θα τείνει στο 1 και η εξίσωση (36) γίνεται όμοια με την εξίσωση (35). Αντίστοιχα, σε πίεση ίση με την πίεση σύγκλισης το  $A_i$  θα τείνει στο 0 και ως αποτέλεσμα το  $k_i$  θα τείνει στο 1. Πρέπει όμως να σημειωθεί πως έχει αναφερθεί ότι η παραπάνω τροποποίηση της εξίσωσης του Wilson έχει οδηγήσει περιστασιακά σε μη ρεαλιστικές τιμές με αποτέλεσμα την αποφυγή σύγκλισης σε υπολογισμούς συμπεριφοράς φάσεων.

Παρόλο που μπορούν να εφαρμοστούν και άλλες μέθοδοι υπολογισμού των τιμών των k-values, η χρήση της μεθόδου του Wilson προτείνεται για αρκετούς λόγους. Καταρχήν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια αφού οι εκτονώσεις για τις οποίες θα χρησιμοποιηθεί, είναι σε χαμηλές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (συνθήκες διαχωρισμού στην επιφάνεια). Επιπλέον, η ανακρίβεια στους υπολογισμούς εφαρμόζοντας την διόρθωση των Whitson και Torp, αποφεύγεται. Τέλος, η μέθοδος του Wilson εκμεταλλεύεται πλήρως την λεπτομερή περιγραφή της σύστασης ενός ρευστού που παρέχεται από τους σημερινούς χρωματογράφους, σε αντίθεση με τον περιορισμό στη χρήση του κλάσματος  $C_{7+}$  που χρησιμοποιούν άλλες μέθοδοι.

Η διαδικασία της εκτόνωσης της υγρής φάσης κάθε βήματος πίεσης της μελέτης διαφορικής εξάτμισης μέχρι τις συνθήκες τανκ, περιλαμβάνει την εκτόνωση ρευστού αρχικής σύστασης  $z_0$  μέσα από μια σειρά  $n_s$  διαχωριστήρων όπου ο τελευταίος διαχωριστήρας λειτουργεί σε ατμοσφαιρικές συνθήκες. Έτσι, σε κάθε διαχωριστήρα  $j$ , με το  $j$  να παίρνει τιμές από  $1 \leq j \leq n_s$  οι συστάσεις της υγρής και αέριας φάσης συμβολίζονται με  $x_{s_i}^{(j)}$  και  $y_{s_i}^{(j)}$  αντίστοιχα. Η υγρή φάση μετά την εκτόνωση σε κάθε διαχωριστήρα αποτελεί την τροφοδοσία για τον επόμενο, πράγμα που σημαίνει πως  $z_s^{(j)} = x_s^{(j-1)}$ .

Προκειμένου να ικανοποιούνται οι συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας και διατήρησης μάζας κατά τη χρήση των k-values που υπολογίσθηκαν προηγουμένως, το μοριακό κλάσμα της αέριας φάσης  $n_g^{(j)}$  πρέπει να επαληθεύει την εξίσωση των Rachford-Rice <sup>[12]</sup>, η οποία έχει την μορφή

$$\sum_{i=1}^{n_c} \frac{z_{s_i}^{(j)} (k_i^{(j)} - 1)}{1 + n_g^{(j)} (k_i^{(j)} - 1)} = 0 \quad (38)$$

όπου  $n_c$  είναι το σύνολο των συστατικών του δείγματος.

Λύνοντας την εξίσωση (34) και σε συνδυασμό με την εξίσωση (38), οι συστάσεις της υγρής και αέριας φάσης σε κάθε διαχωριστήρα μέχρι και τις συνθήκες τανκ μπορούν να υπολογιστούν ως εξής:

$$x_{s_i}^{(j)} = \frac{z_{s_i}^{(j)}}{1 + n_g^{(j)} (k_i^{(j)} - 1)} \quad (39)$$

$$y_{s_i}^{(j)} = k_i^{(j)} x_{s_i}^{(j)} \quad (40)$$

#### 4.4 Υπολογισμός πυκνοτήτων και ογκομετρικών παραμέτρων $B_o$ , $R_s$

Αφού υλοποιήθηκε αλγόριθμος εκτόνωσης της υγρής φάσης κάθε σταδίου πίεσης της μελέτης διαφορικής εξάτμισης πίεσης, κατέστη είναι εφικτός ο προσδιορισμός των απαιτούμενων ογκομετρικών παραμέτρων για τα μοντέλα BOT.

Ο αριθμός των moles του πετρελαίου και του αερίου αντίστοιχα κατά την εκτόνωση της υγρής φάσης της μελέτης διαφορικής εξάτμισης στο διαχωριστήρα  $j$  δίνεται από τις εξισώσεις:

$$N_o^{(j)} = (1 - n_g^{(1)})(1 - n_g^{(2)}) \dots (1 - n_g^{(j-1)})(1 - n_g^{(j)}) \quad (41)$$

$$N_g^{(j)} = (1 - n_g^{(1)})(1 - n_g^{(2)}) \dots (1 - n_g^{(j-1)})n_g^{(j)} \quad (42)$$

Ο όγκος του διαλελυμένου αερίου του ίδιου ρευστού μπορεί να υπολογιστεί από τον νόμο των ιδανικών αερίων:

$$V_{dg} = \frac{RT_{sc}}{P_{sc}} \sum_{j=1}^{n_s} N_g^{(j)} \quad (43)$$

Ο όγκος του πετρελαίου στις συνθήκες ταμειντήρα δίνεται από την εξίσωση:

$$V_{orf} = \frac{m_{orf}}{\rho_{orf}} = \frac{MW_{orf}}{\rho_{orf}} = \frac{\sum_{i=1}^{n_c} z_{s_i} MW_{orf_i}}{\rho_{orf}} \quad (44)$$

Ο όγκος του πετρελαίου που προκύπτει μετά από την εκτόνωση της υγρής φάσης της μελέτης διαφορικής εξάτμισης σε ατμοσφαιρικές συνθήκες δίνεται από την εξίσωση:

$$V_{osc} = \frac{m_{osc}}{\rho_{osc}} = \frac{N_o^{(j)} MW_{osc}}{\rho_{osc}} = \frac{(1 - n_g^{(1)}) \dots (1 - n_g^{(j)}) \sum_{i=1}^{n_c} z_{s_i} MW_{osc_i}}{\rho_{osc}} \quad (45)$$

Έτσι ο ογκομετρικός συντελεστής σχηματισμού της υγρής φάσης  $B_o$  ορίζεται με τον εξής τρόπο:

$$B_o = \frac{V_{orf}}{V_{osc}} \quad (46)$$

ενώ, ο λόγος αερίου εν διαλύσει πετρελαίου  $R_s$ :

$$R_s = \frac{V_{dg}}{V_{osc}} \quad (47)$$

Από τις εξισώσεις (44) και (45) είναι ξεκάθαρο ότι οι πυκνότητες που εμπλέκονται στους υπολογισμούς είναι αυτές της πυκνότητας της υγρής φάσης κάθε βήματος της μελέτης διαφορικής εξάτμισης και αυτής του πετρελαίου τανκ. Η τιμή της πρώτης μπορεί απευθείας να ληφθεί από την καμπύλη της πυκνότητας του πειράματος της διαφορικής εξάτμισης που περιλαμβάνεται στην αναφορά του εργαστηρίου (lab

report). Για την πυκνότητα του πετρελαίου τανκ  $\rho_{osc}$  στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιείται η μέθοδος του Standing, όπου περιγράφεται ως εξής<sup>[6]</sup>:

Υπολογισμός μάζας κάθε συστατικού  $i$  του πετρελαίου τανκ:

$$m_i = x_i MW_i \quad (48)$$

Υπολογισμός όγκου  $V_{c_{3+}}$  :

$$V_{c_{3+}} = \sum_{i=C_3}^{C_{7+}} \frac{m_i}{\rho_i} \quad (49)$$

Υπολογισμός πυκνότητας  $\rho_{c_{2+}}$  :

$$\rho_{c_{2+}} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (50)$$

Όπου  $a = 0,3167V_{c_{3+}}$ ,  $b = m_{c_2} - 0,3167m_{c_2} + V_{c_{3+}}$  και  $c = -15,3m_{c_2}$

Υπολογισμός όγκου  $V_{c_{2+}}$  :

$$V_{c_{2+}} = V_{c_{3+}} + \frac{m_{c_2}}{\rho_{c_2}} \quad (51)$$

Υπολογισμός πυκνότητας ψευδό-ρευστού  $\rho_{po}$  :

$$\rho_{po} = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2} \quad (52)$$

Όπου  $\alpha = 0,45V_{c_{2+}}$ ,  $\beta = m_{c_1} - 0,45m_{c_1} + 0,312V_{c_{2+}}$  και  $\gamma = -0,312m_{c_{1+}}$

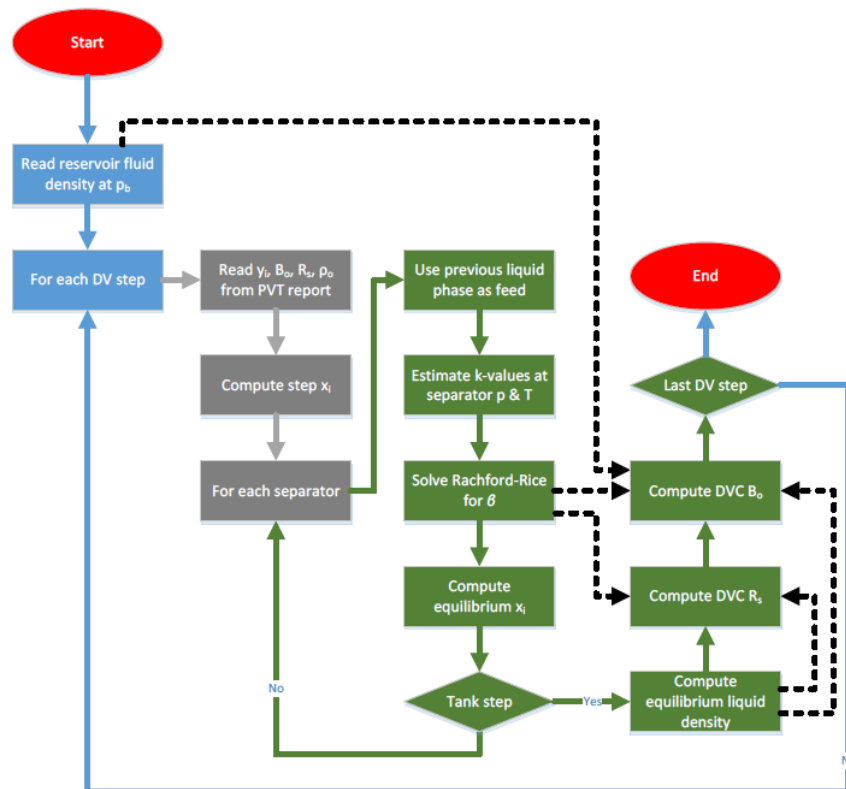
Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω παραμέτρους υπολογίζεται η πυκνότητα του πετρελαίου τανκ σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\rho_{osc} = \rho_{po} + \Delta\rho_p + \Delta\rho_T \quad (53)$$

όπου  $\Delta\rho_p$  και  $\Delta\rho_T$  οι διορθώσεις της για την θερμοκρασία και την πίεση αντίστοιχα.

Έτσι, είναι πια φανερό ότι όλα τα δεδομένα για τον υπολογισμό των ογκομετρικών παραμέτρων  $B_o$ ,  $R_s$  είναι διαθέσιμα είτε από τις μετρήσεις κατά την μελέτη διαφορικής εξάτμισης, είτε από προσδιορισμό μέσω της παραπάνω μεθόδου.

Ως αποτέλεσμα υλοποιήθηκε μια υπολογιστική διαδικασία που αφού προσδιορίσει τη σύσταση του υγρού κάθε σταδίου της διαφορικής εξάτμισης, πραγματοποιεί εκτόνωση μέσα από οποιοδήποτε συνδυασμό διαχωριστήρων, αποδίδοντας τις ογκομετρικές παραμέτρους σύνθετης εκτόνωσης.



Σχήμα 8: Διάγραμμα ροής της νέας μεθόδου που αναπτύχθηκε

#### 4.4.1 Εκτίμηση ακρίβειας προτεινόμενου αλγορίθμου εκτόνωσης

Πριν ακόμα εφαρμοστεί ο αλγόριθμος εκτόνωσης που αναπτύχθηκε στις μελέτες διαφορικής εξάτμισης για την πρόβλεψη των δεδομένων σύνθετης εκτόνωσης, καθίσταται αναγκαία η εκτίμηση της ακρίβειάς που επιτυγχάνει. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη γιατί πρέπει να ελεγχθεί η επίδραση που έχουν τα αποτελέσματα των υπολογιστικών διαδικασιών που περιλαμβάνονται στον αλγόριθμο, στην τελική τιμή των ογκομετρικών παραμέτρων  $B_o$  και  $R_s$  που θα περιληφθούν στα BOT.

Για να πραγματοποιηθεί αυτός ο έλεγχος χρησιμοποιήθηκε μια βάση δεδομένων η οποία περιελάμβανε διάφορα πετρελαϊκά ρευστά με τις συστάσεις τους, την θερμοκρασία ταμειυτήρα καθώς και την πίεση κορεσμού τους. Από αυτά, επιλέχθηκαν δείγματα των οποίων το βαρύ κλάσμα ήταν τουλάχιστον  $C_{12+}$ . Δείγματα με πιο εκτεταμένη χημική σύσταση μετατράπηκαν υπολογιστικά σε αναλύσεις με βαρύ κλάσμα  $C_{12+}$  ώστε να μπορούν χρησιμοποιηθούν στον αλγόριθμο. Στη συνέχεια, επιλέχθηκαν δείγματα για τα οποία είχε πραγματοποιηθεί εργαστηριακά ένα πείραμα διαχωριστήρα. Για αυτά τα δείγματα, χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα του πειράματος διαχωριστήρα υπολογίστηκαν οι ογκομετρικές παράμετροι  $B_o$  και  $R_s$  σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$B_o = \frac{V_{orf}}{V_{osc}} = \frac{\frac{MW_{orf}}{\rho_{orf}}}{\frac{N_o^{(j)} MW_{osc}}{\rho_{osc}}} = \frac{1}{(n_{osc} n_{os}) \frac{MW_{orf}}{MW_{osc}} \frac{\rho_{osc}}{\rho_{orf}}} \quad (53)$$

και

$$R_s = \frac{V_{dg}}{V_{osc}} = \frac{\frac{RT_{sc}}{p_{sc}} N_g^{(j)}}{N_o^{(j)} \frac{MW_{osc}}{\rho_{osc}}} = \frac{(n_{os} n_{gsc} + n_{gs}) 23.69}{n_{os} n_{osc} \frac{MW_{osc}}{\rho_{osc}}} \quad (54)$$

Αφού λήφθηκαν τα απαιτούμενα δεδομένα από τα αποτελέσματα του τεστ διαχωριστήρα για την εφαρμογή του αλγορίθμου, υπολογίστηκαν για κάθε ρευστό οι αντίστοιχες ογκομετρικές παράμετροι, μέσω των εξισώσεων (46) και (47).

Για να προσδιοριστεί η ακρίβεια της μεθόδου υπολογίστηκε το απόλυτο σχετικό σφάλμα για το  $B_o$  και το απόλυτο σφάλμα για το  $R_s$ , μεταξύ των αποτελεσμάτων της νέας μεθόδου και των εργαστηριακών δεδομένων. Το μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα που προέκυψε για το  $B_o$  για πάνω από 450 πετρέλαια ήταν της τάξης του 3%. Αντίστοιχα, το μέσο απόλυτο σφάλμα για το  $R_s$  ήταν της τάξης του 5%. Καθ' όλη την υπολογιστική διαδικασία της μεθόδου δεν παρατηρήθηκαν σε καμία περίπτωση τιμές του  $B_o$  μικρότερες της μονάδας ή τιμές του  $R_s$  μικρότερες του 0, γεγονός που επιβεβαιώνει επιπλέον την θεωρητική συνέπεια των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν.

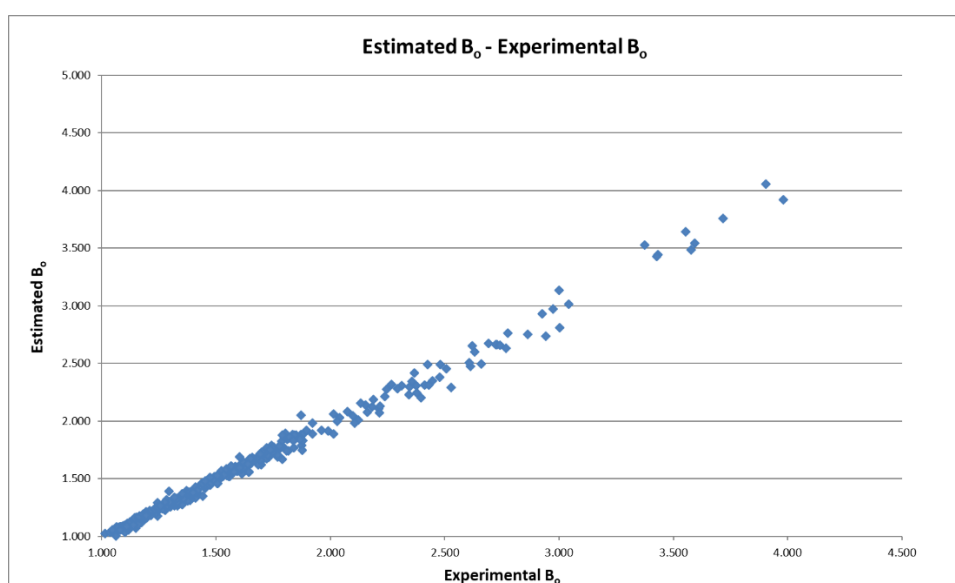
Πίνακας 2: Αποτελέσματα διαφόρων ρευστών για την εκτίμηση της ακρίβειας της νέας μεθόδου

Fluid	P <sub>o</sub> Pressure (psi)	B <sub>o</sub> Experimental	B <sub>o</sub> Estimated	R <sub>s</sub> Experimental (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	R <sub>s</sub> Estimated (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
86MEL043	4780	2.864	2.754	454.70	427.68
86MEL066	1067	1.105	1.055	33.29	29.46
87MEL002	1741	1.148	1.073	52.02	45.95
87MEL007	190	1.079	1.081	5.02	3.68
87MEL019	3305	1.331	1.267	105.70	97.26
88MEL004	2940	1.370	1.398	108.07	109.34
88MEL006	1489	1.250	1.227	58.24	54.04
88MEL018	2300	1.245	1.177	71.95	64.97
88MEL027	3153	1.410	1.331	99.53	89.77
88MEL057	480	1.165	1.148	20.82	13.34

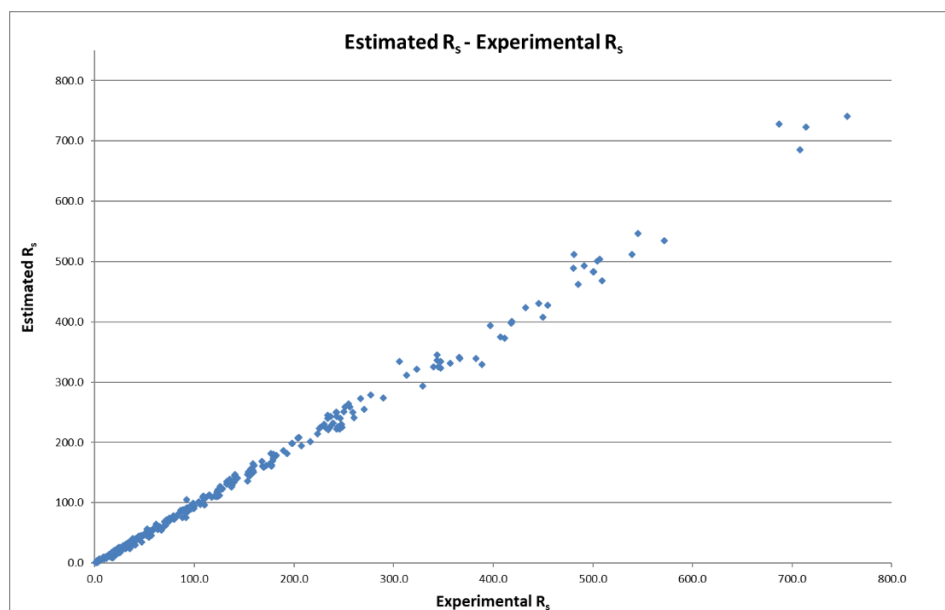


Πίνακας 3: Μέγιστες τιμές απόλυτου σχετικού σφάλματος  $B_o$  και απόλυτου σφάλματος  $R_s$

		$B_o$ Maximum Absolute Relative Error (%)	$B_o$ Experimental	$B_o$ Estimated	$P_o$ Pressure (psi)
Fluid	L108	8.7	1.853	2.051	6356
		$R_s$ Maximum Absolute Error ( $m^3$ )	$R_s$ Experimental ( $m^3/m^3$ )	$R_s$ Estimated ( $m^3/m^3$ )	$P_o$ Pressure (psi)
Fluid	98FRL049	40.7	687.0	727.6	4295



Σχήμα 9: Συγκριτικό διάγραμμα διαγωνίου  $B_o$  νέου αλγορίθμου εκτόνωσης και πειραματικών δεδομένων



Σχήμα 10: Συγκριτικό διάγραμμα διαγωνίου  $R_s$  νέου αλγορίθμου εκτόνωσης και πειραματικών δεδομένων

Παρατηρώντας τα παραπάνω συγκριτικά διαγράμματα για το  $B_o$  και το  $R_s$  μεταξύ των αποτελεσμάτων της νέας μεθόδου και των πειραματικών δεδομένων, είναι προφανές ότι σε κάθε περίπτωση κατανέμονται πολύ κοντά στη νοητή διαγώνιο του σχήματος. Αυτό πρακτικά σημαίνει, ότι η νέα μέθοδος επιτυγχάνει να προσεγγίσει με ακρίβεια τις τιμές των ογκομετρικών παραμέτρων που υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του πειράματος διαχωριστήρα κάθε ρευστού της βάσης δεδομένων. Συνεπώς, η νέα υπολογιστική μέθοδος εκτόνωσης μπορεί να εφαρμοστεί με ασφάλεια σε μελέτες διαφορικής εξάτμισης για την πρόβλεψη των ζητούμενων δεδομένων σύνθετης εκτόνωσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΑΝΑΠΤΥΧΘΕΙΣΑΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΕ ΠΕΤΡΕΛΑΙΑ ΠΟΙΚΙΛΗΣ ΠΤΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

#### 5.1 Εισαγωγή

Αφού ολοκληρώθηκε η ανάπτυξη της νέας μεθόδου υπολογισμού των ογκομετρικών παραμέτρων σύνθετης εκτόνωσης, ακολουθήσε η εφαρμογή της σε 8 πετρέλαια τα οποία επιλέχθηκαν έτσι ώστε να καλύπτουν ένα μεγάλο φάσμα της πτητικότητας των πετρελαίων. Συγκεκριμένα το  $B_o$  τους κυμαινόταν από 1.09 έως και 2.21. Η επιλογή των πετρελαίων έγινε μέσω της βάσης δεδομένων στην οποία περιέχονταν δείγματα για τα οποία είχε πραγματοποιηθεί η μελέτης διαφορικής εξάτμισης.

Έτσι, για καθένα από τα πετρέλαια υπολογίστηκαν οι καμπύλες των ογκομετρικών παραμέτρων  $B_o$  και  $R_s$  χρησιμοποιώντας την νέα μέθοδο καθώς και τις διορθωτικές μεθόδους των Dake και Al-Marhoun. Στην συνέχεια, τα αποτελέσματα από κάθε πετρέλαιο τοποθετήθηκαν σε διαγράμματα μαζί με τα αποτελέσματα της μελέτης διαφορικής εξάτμισης ώστε να μπορεί να γίνει εύκολα ο σχολιασμός τους.

#### 5.2 Αποτελέσματα ογκομετρικών παραμέτρων μελέτης διαφορικής εξάτμισης και νέας μεθόδου

Από τη βάση δεδομένων κατεγράφησαν οι τιμές της πίεσης κάθε βήματος της μελέτης διαφορικής εξάτμισης καθώς και η πίεση κορεσμού του κάθε δείγματος. Όπως είναι φανερό από τον παρακάτω πίνακα για τα πετρέλαια που επιλέχθηκαν είχε εφαρμοστεί η μελέτης διαφορικής εξάτμισης πραγματοποιώντας έξι βήματα πτώσης πίεσης, με τον έκτο βήμα να αντιστοιχεί σε συνθήκες επιφάνειας.

Πίνακας 4: Τιμές πίεσης κορεσμού και διαφορικής εξάτμισης

DV Step & $P_b$ Pressure (MPa)								
Fluid	1	2	3	4	5	6	7	8
Pres. @ $P_b$ (Mpa)	23.82	11.59	13.33	19.72	29.48	24.50	13.31	13.79
STEP 1	22.17	9.65	11.82	18.72	26.99	23.20	11.99	12.17
STEP 2	17.34	7.58	9.41	14.93	20.79	18.03	9.76	9.70
STEP 3	12.51	5.52	7.00	10.79	14.58	12.86	7.83	6.79
STEP 4	7.69	3.45	4.59	7.00	8.38	7.69	6.26	3.99
STEP 5	2.86	1.38	2.17	3.55	3.55	2.86	2.86	1.37
STEP 6 (Tank)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10

### 5.2.1 Τιμές ογκομετρικών παραμέτρων διαφορικής εξάτμισης

Εν συνεχεία, χρησιμοποιώντας της καμπύλες των ογκομετρικών παραμέτρων  $B_o$ ,  $R_s$ , οι οποίες δίνονται στις αναφορές των μελετών διαφορικής εξάτμισης της βάσης δεδομένων, υπολογίσθηκαν με παρεμβολή οι τιμές τους σε κάθε βήμα πίεσης της μελέτης.

Για το  $B_o$  (όγκος πετρελαίου σε συνθήκες ταμιευτήρα/ όγκος πετρελαίου σε ατμοσφαιρικές συνθήκες),

Πίνακας 5: Τιμές  $B_o$  μελέτης διαφορικής εξάτμισης

DV $B_o$ (vol/vol)								
Fluid	1	2	3	4	5	6	7	8
DV $B_o$ @ $P_b$	2.213	1.276	1.381	1.479	1.652	1.755	1.095	1.215
STEP 1	2.063	1.254	1.352	1.451	1.600	1.704	1.086	1.198
STEP 2	1.800	1.231	1.309	1.359	1.479	1.550	1.073	1.175
STEP 3	1.619	1.206	1.270	1.280	1.374	1.430	1.062	1.151
STEP 4	1.467	1.179	1.233	1.219	1.281	1.329	1.054	1.128
STEP 5	1.314	1.140	1.191	1.163	1.209	1.232	1.038	1.098
STEP 6 (Tank)	1.074	1.072	1.065	1.071	1.066	1.064	1.024	1.052

και για το  $R_s$  ( $m^3/m^3$ ),

Πίνακας 6: Τιμές  $R_s$  μελέτης διαφορικής εξάτμισης

DV $R_s$ ( $m^3/m^3$ )								
Fluid	1	2	3	4	5	6	7	8
DV $R_s$ @ $P_b$	353.3	63.6	105.3	154.7	231.7	242.0	35.6	59.9
STEP 1	309.3	54.2	94.8	146.1	208.4	224.3	32.3	53.8
STEP 2	223.3	44.9	78.8	114.7	159.2	162.6	26.6	44.5
STEP 3	161.5	35.5	63.6	83.3	118.6	113.0	21.3	33.5
STEP 4	111.2	25.0	48.7	56.9	79.1	72.4	17.0	22.7
STEP 5	62.1	12.3	31.9	34.2	40.3	36.4	7.5	11.2
STEP 6 (Tank)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

### 5.2.2 Τιμές ογκομετρικών παραμέτρων BOT σύνθετης εκτόνωσης που υπολογίσθηκαν με τη νέα μεθόδου

Εξάγοντας από την βάση δεδομένων τα απαραίτητα δεδομένα, υπολογίσθηκαν οι συστάσεις της υγρής φάσης σε κάθε βήμα πίεσης της μελέτης διαφορικής εξάτμισης οι

οποίες μέσω της νέα μεθόδου απέδωσαν τα δεδομένα σύνθετης εκτόνωσης. Έτσι για τους ογκομετρικούς συντελεστές προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Για το  $B_o$  σύνθετης εκτόνωσης,

Πίνακας 7: Τιμές composite  $B_o$  νέας μεθόδου

Composite DV $B_o$ (vol/vol)								
Fluid	1	2	3	4	5	6	7	8
Sep. Pres. (MPa)	2.5	1.3	1.8	0.5	0.4	1	BHS	BHS
Comp. $B_o$ @ Pb	1.887	1.245	1.275	1.412	1.533	1.597	1.081	1.209
STEP 1	1.776	1.223	1.248	1.389	1.483	1.554	1.073	1.191
STEP 2	1.570	1.200	1.210	1.306	1.364	1.416	1.061	1.165
STEP 3	1.422	1.177	1.176	1.231	1.263	1.307	1.052	1.136
STEP 4	1.295	1.151	1.144	1.174	1.170	1.217	1.045	1.108
STEP 5	1.173	1.100	1.092	1.128	1.095	1.113	1.030	1.072
STEP 6 (Tank)	1.074	1.072	1.065	1.071	1.066	1.064	1.024	1.052

Μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι στον παραπάνω πίνακα, για τα δείγματα RSS αναφέρονται και οι τιμές πίεσης στις οποίες πραγματοποιείται η επιφανειακή εκτόνωση στον διαχωριστήρα (Separator, Tank). Αυτή η τιμή πίεσης είναι ενδεικτική καθώς αποτελεί την πίεση στην οποία πραγματοποιήθηκε το πείραμα διαχωριστήρα και συνεπώς μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με τις ανάγκες σε κάθε περίπτωση.

Αντίστοιχα για το  $R_s$  σύνθετης εκτόνωσης,

Πίνακας 8: Τιμές composite  $R_s$  νέας μεθόδου

Composite $R_s$ ( $m^3/m^3$ )								
Fluid	1	2	3	4	5	6	7	8
Sep. Pres. (MPa)	2.5	1.3	1.8	0.5	0.4	1	BHS	BHS
$R_s$ Comp. @ Pb	293.1	55.4	79.2	141.8	199.0	201.0	34.3	60.3
STEP 1	259.9	46.2	69.8	133.8	177.3	185.4	32.5	53.9
STEP 2	191.4	37.0	55.5	104.6	130.4	130.3	28.9	44.0
STEP 3	140.2	27.8	41.9	75.3	91.1	85.4	25.5	32.2
STEP 4	97.7	17.8	28.6	50.6	52.9	48.5	22.4	20.1
STEP 5	57.6	8.0	14.3	29.7	15.9	16.9	14.9	7.4
STEP 6 (Tank)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

### 5.3 Αποτελέσματα παραμέτρων BOT σύνθετης εκτόνωσης που υπολογίστηκαν με τις μεθόδους Dake και Al-Marhoun

Η νέα μέθοδος υπολογισμού των παραμέτρων σύνθετης εκτόνωσης ανήκει ουσιαστικά στην κατηγορία των διορθωτικών μεθόδων, παρόλο που ταυτοχρόνως εκμεταλλεύεται και τα πλεονεκτήματα των EoS μοντέλων, πραγματοποιώντας με ακρίβεια ισοζύγια μάζας. Σκόπιμο είναι λοιπόν η σύγκριση των αποτελεσμάτων της νέας μεθόδου με τα αντίστοιχα των υπαρχουσών μεθόδων, δηλαδή των μεθόδων Dake και Al-Marhoun. Να σημειωθεί πως έχουν αναπτυχθεί και άλλες μέθοδοι αλλά αυτές των Dake και Al-Marhoun είναι που είχαν την μεγαλύτερη απήχηση και χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία του πετρελαίου ακόμη και σήμερα.

Έχοντας αναλύσει σε προηγούμενο κεφάλαιο τις υπολογιστικές διαδικασίες που ανέπτυξαν οι δύο ανωτέρω μελετητές, υπολογίστηκαν με βάση αυτές οι παράμετροι σύνθετοι εκτόνωσης  $B_o$  και  $R_s$  των 8 πετρελαίων που επιλέχθηκαν και για τις δύο μεθόδους.

#### 5.3.1 Τιμές ογκομετρικών παραμέτρων BOT σύνθετης εκτόνωσης με τη μέθοδο Dake

Το  $B_o$  σύνθετης εκτόνωσης της μεθόδου του Dake,

Πίνακας 9: Τιμές composite  $B_o$  μεθόδου Dake

Dake Composite $B_o$ (vol/vol)								
Fluid	1	2	3	4	5	6	7	8
$B_{obf}$	1.887	1.245	1.275	1.412	1.533	1.597	1.081	1.209
$B_{obd}$	2.213	1.276	1.381	1.479	1.652	1.755	1.095	1.215
Comp. $B_o$ @ $P_b$	1.887	1.245	1.275	1.412	1.533	1.597	1.081	1.209
STEP 1	1.759	1.224	1.248	1.385	1.484	1.551	1.072	1.192
STEP 2	1.535	1.201	1.208	1.297	1.373	1.410	1.059	1.170
STEP 3	1.380	1.177	1.172	1.222	1.275	1.301	1.049	1.145
STEP 4	1.251	1.150	1.138	1.164	1.189	1.210	1.041	1.122
STEP 5	1.121	1.113	1.099	1.110	1.122	1.121	1.025	1.093
STEP 6 (Tank)	0.916	1.046	0.983	1.022	0.989	0.968	1.011	1.047

και αντίστοιχα το  $R_s$  σύνθετης εκτόνωσης,

Πίνακας 10: Τιμές composite  $R_s$  μεθόδου Dake

Dake Composite $R_s$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )								
Fluid	1	2	3	4	5	6	7	8
$R_{sbf}$	293.1	55.4	79.2	141.8	199.0	201.0	34.3	60.3
$R_{sbd}$	353.3	63.6	105.3	154.7	231.7	242.0	35.6	59.9
$R_s$ Comp. @ $P_b$	293.1	55.4	79.2	141.8	199.0	201.0	34.3	60.3
STEP 1	255.6	46.3	69.5	133.5	177.3	184.9	31.1	54.3
STEP 2	182.3	37.2	54.8	103.6	131.7	128.7	25.4	45.0
STEP 3	129.5	28.0	40.7	73.5	94.0	83.6	20.3	34.1
STEP 4	86.7	17.8	26.9	48.3	57.4	46.7	16.0	23.3
STEP 5	44.8	5.3	11.5	26.7	21.3	13.9	6.6	11.9
STEP 6 (Tank)	-8.2	-6.6	-18.0	-5.9	-16.0	-19.2	-0.8	0.7

Απαραίτητο δεδομένο για την εφαρμογή της διορθωτικής μεθόδου κατά Dake είναι οι τιμές των ογκομετρικών παραμέτρων  $B_o$  και  $R_s$  στην πίεση κορεσμού από τη μελέτη διαφορικής εξάτμισης. Οι τιμές αυτών των παραμέτρων είναι πάντοτε γνωστές από την αναφορά της μελέτης και συμβολίζονται με  $R_{sbd}$  και  $B_{obd}$ . Επιπλέον, απαραίτητες είναι και οι τιμές των ογκομετρικών παραμέτρων  $B_o$  και  $R_s$  από το πείραμα διαχωριστήρα στο ρευστό του σημείου φυσαλίδας, οι οποίες είναι επίσης γνωστές από την αναφορά του πειράματος και συμβολίζονται με  $R_{sbf}$  και  $B_{obf}$ .

### 5.3.2 Τιμές ογκομετρικών παραμέτρων BOT σύνθετης εκτόνωσης με τη μεθόδου Al-Marhoun

Το  $B_o$  σύνθετης εκτόνωσης της μεθόδου του Al-Marhoun,

Πίνακας 11: Τιμές composite  $B_o$  μεθόδου Al-Marhoun

Al-Marhoun Composite $B_o$ (vol/vol)								
Fluid	1	2	3	4	5	6	7	8
$B_{obf}$	1.887	1.245	1.275	1.412	1.533	1.597	1.081	1.209
$B_{obd}$	2.213	1.276	1.381	1.479	1.652	1.755	1.095	1.215
Comp. $B_o @ P_b$	1.887	1.245	1.275	1.412	1.533	1.597	1.081	1.209
STEP 1	1.780	1.227	1.255	1.388	1.491	1.558	1.074	1.193
STEP 2	1.592	1.207	1.227	1.312	1.395	1.439	1.063	1.171
STEP 3	1.463	1.186	1.201	1.246	1.311	1.346	1.055	1.147
STEP 4	1.354	1.162	1.177	1.195	1.238	1.269	1.048	1.125
STEP 5	1.246	1.130	1.148	1.148	1.180	1.194	1.035	1.097
STEP 6 (Tank)	1.074	1.072	1.065	1.071	1.066	1.064	1.024	1.052

και αντίστοιχα για το  $R_s$  σύνθετης εκτόνωσης,

Πίνακας 12: Τιμές composite  $R_s$  μεθόδου Al-Marhoun

Al-Marhoun Comp. $R_s$ ( $m^3/m^3$ )								
Fluid	1	2	3	4	5	6	7	8
$R_{sbf}$	293.1	55.4	79.2	141.8	199.0	201.0	34.3	60.3
$R_{sbd}$	353.3	63.6	105.3	154.7	231.7	242.0	35.6	59.9
Rs Comp. @ $P_b$	293.1	55.4	79.2	141.8	199.0	201.0	34.3	60.3
STEP 1	256.6	47.3	71.3	133.8	179.0	186.3	31.2	54.2
STEP 2	185.3	39.1	59.3	105.1	136.7	135.0	25.6	44.8
STEP 3	134.0	30.9	47.9	76.3	101.8	93.9	20.6	33.8
STEP 4	92.3	21.8	36.6	52.1	67.9	60.1	16.4	22.9
STEP 5	51.5	10.7	24.0	31.4	34.6	30.2	7.2	11.3
STEP 6 (Tank)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

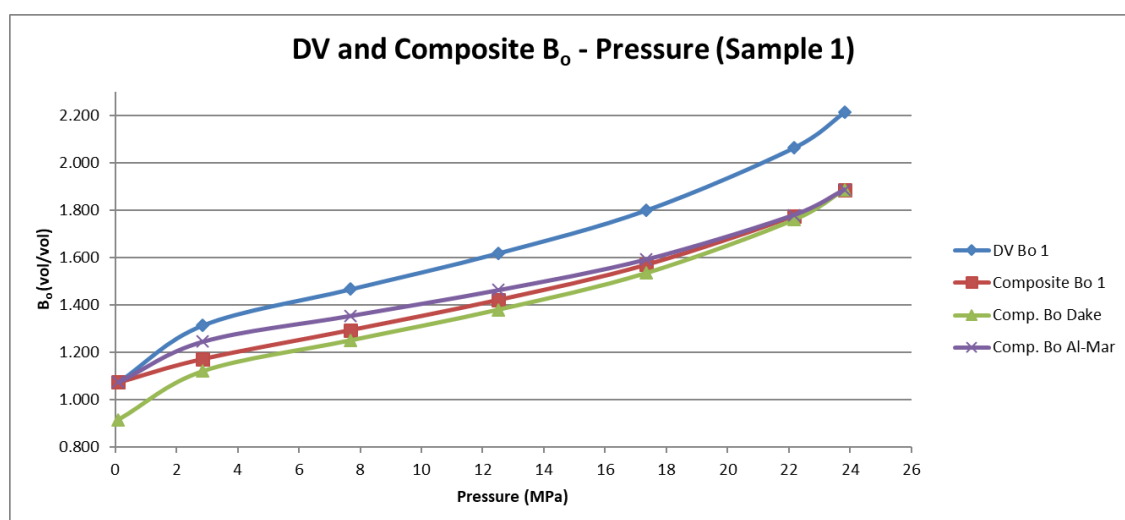
Όπως και η διορθωτική μέθοδος κατά Dake, έτσι και αυτή του Al-Marhoun, για να εφαρμοστεί, απαιτεί τις τιμές των παραμέτρων  $R_{sbd}$  και  $B_{obd}$  οι οποίες λαμβάνονται πάλι από την αναφορά της μελέτης διαφορικής εξάτμισης και τις τιμές των παραμέτρων  $R_{sbf}$  και  $B_{obf}$  που λαμβάνονται από την αναφορά του πειράματος διαχωριστήρα



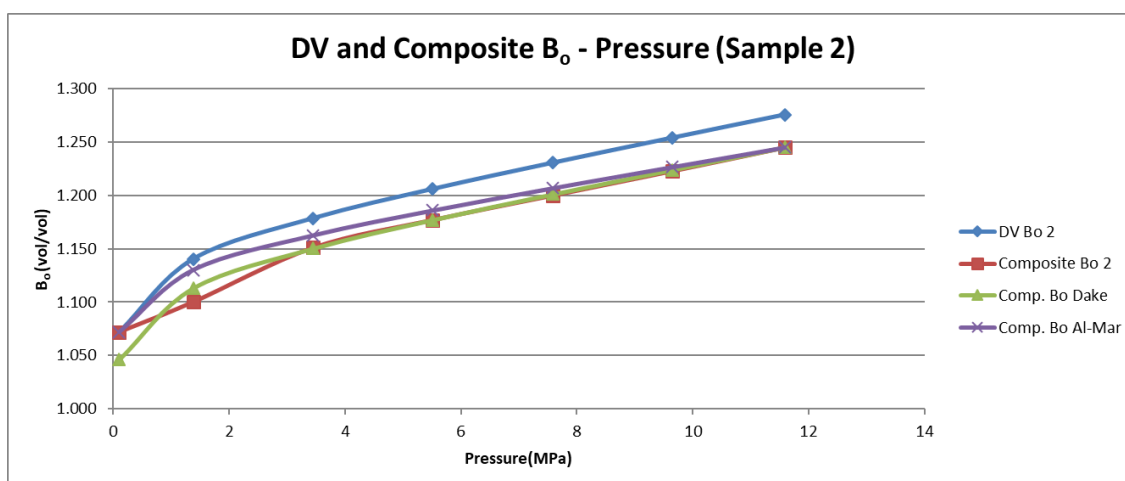
## 5.4 Σύγκριση των αποτελεσμάτων και ερμηνεία τους

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της νέας μεθόδου, των διορθωτικών μεθόδων Duke και Al-Marhoun και της μελέτης διαφορικής εξάτμισης, δημιουργήθηκαν διαγράμματα με τις τιμές των ογκομετρικών παραμέτρων  $B_o$  και  $R_s$  υπό μορφή καμπύλων. Στην συνέχεια, ακολουθείται ο σχολιασμός τους καθώς και η σύγκριση μεταξύ των εφαρμοσμένων μεθόδων.

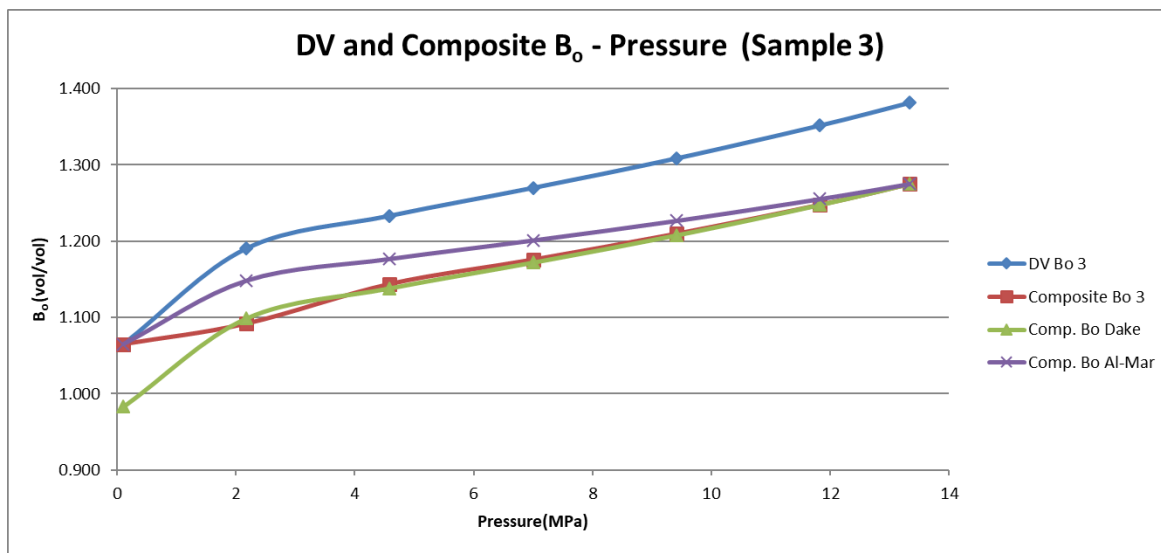
### 5.4.1 Διαγράμματα ογκομετρικού συντελεστή σχηματισμού $B_o$



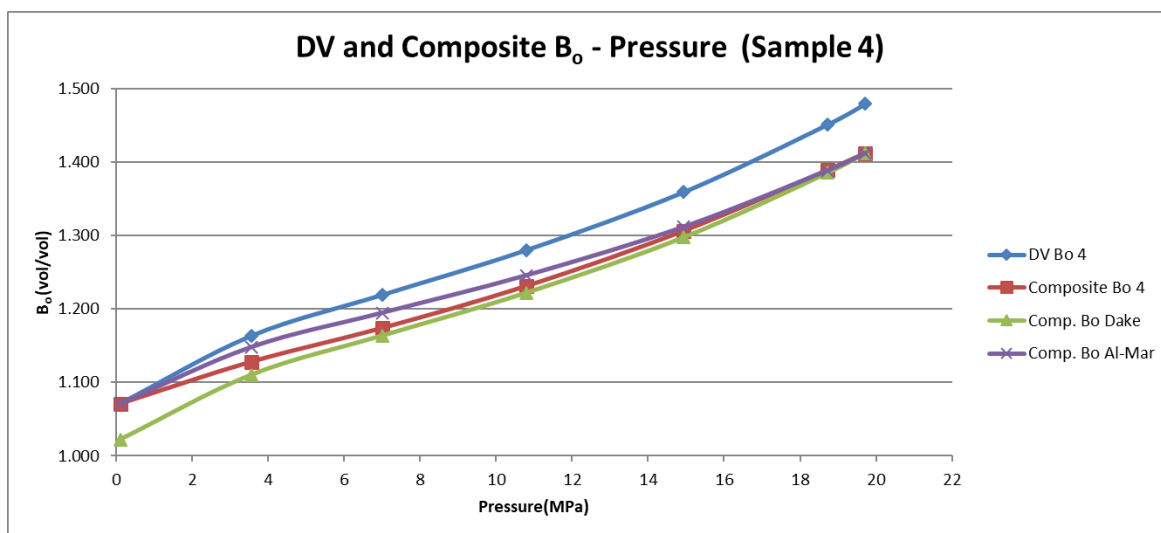
Σχήμα 11: Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $B_o$  δείγματος 1



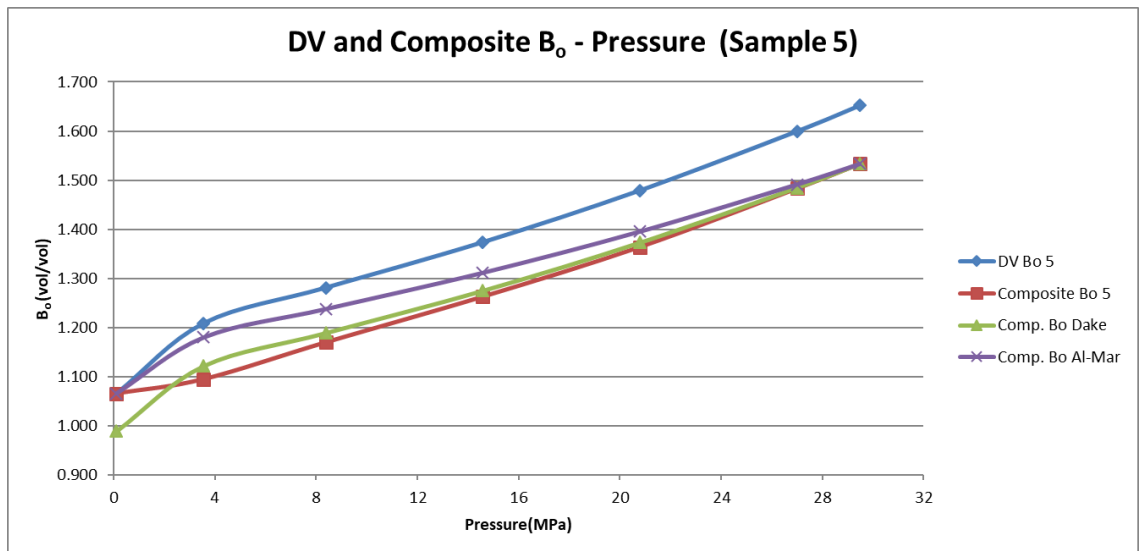
Σχήμα 12: Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $B_o$  δείγματος 2



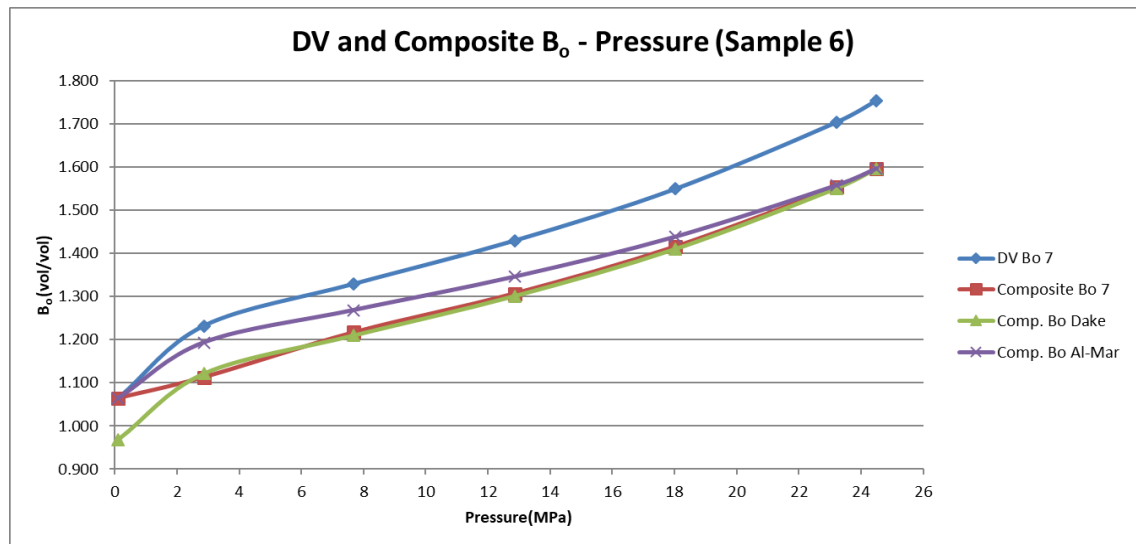
Σχήμα 13: Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $B_o$  δείγματος 3



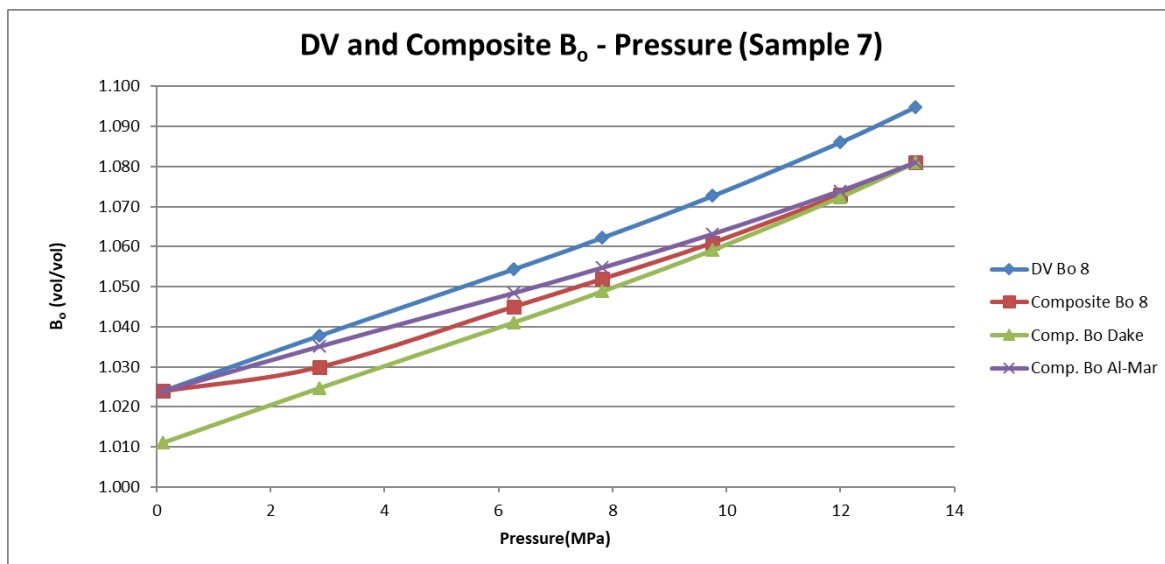
Σχήμα 14: Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $B_o$  δείγματος 4



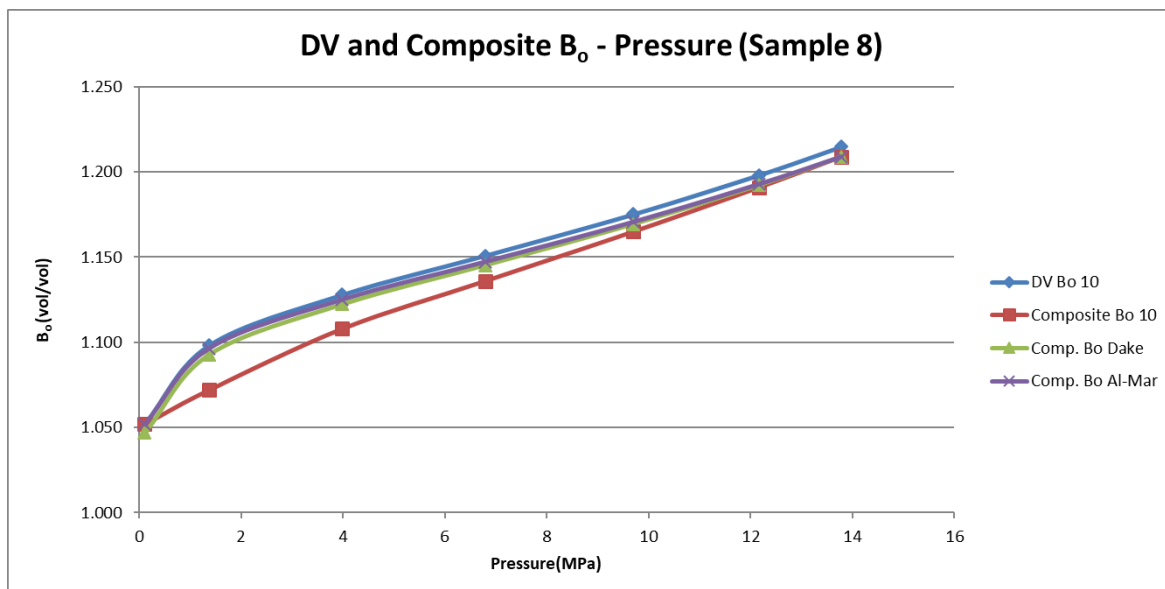
Σχήμα 15: Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $B_0$  δείγματος 5



Σχήμα 16: Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $B_0$  δείγματος 6

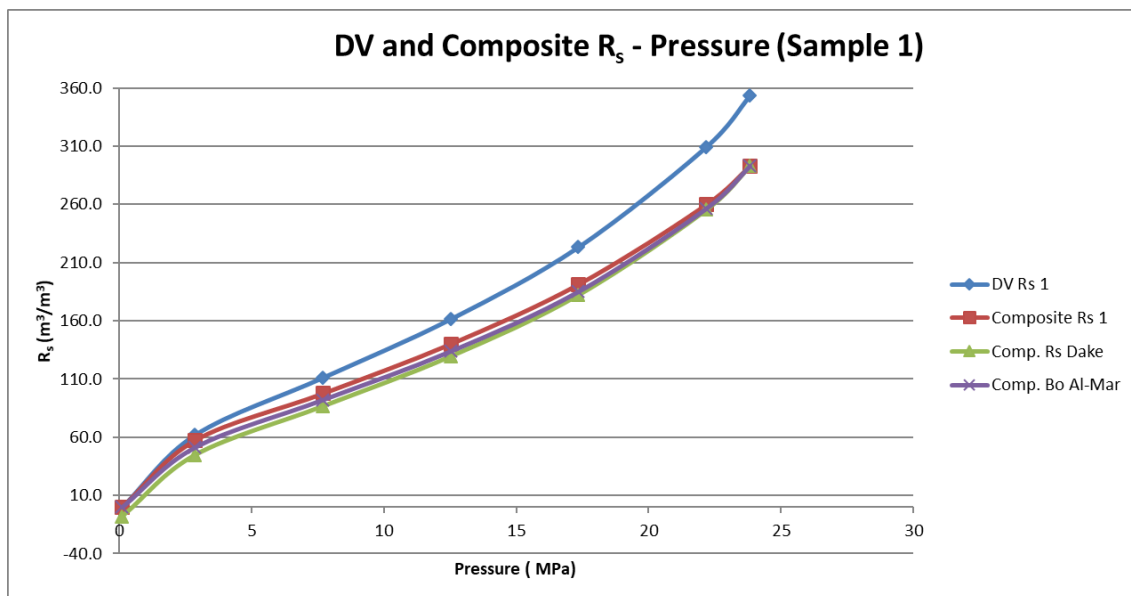


Σχήμα 17: Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $B_o$  δείγματος 7

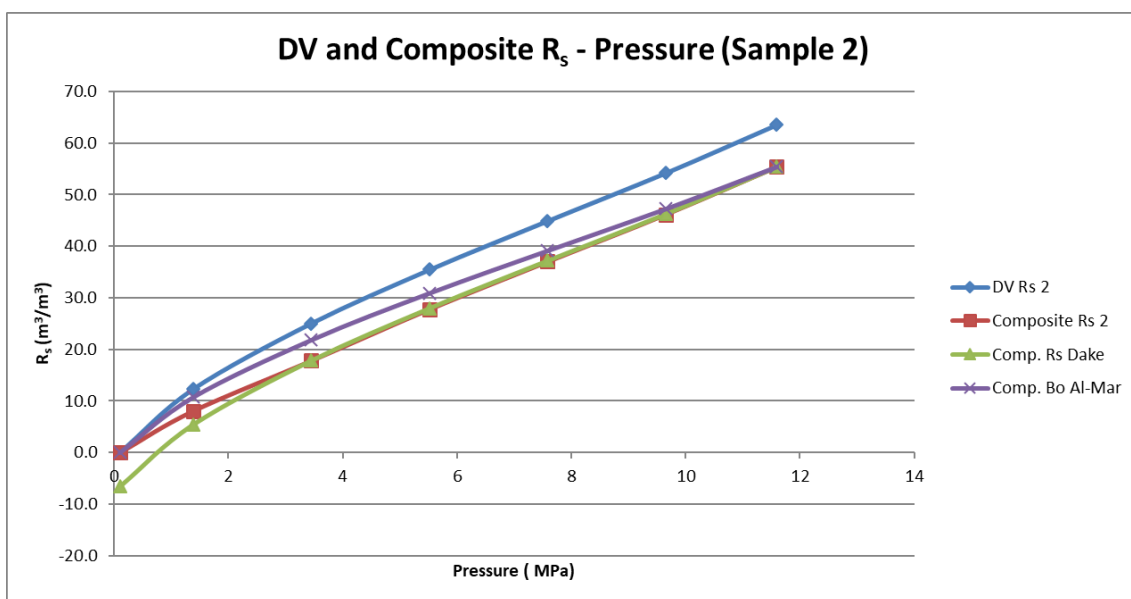


Σχήμα 18: Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $B_o$  δείγματος 8

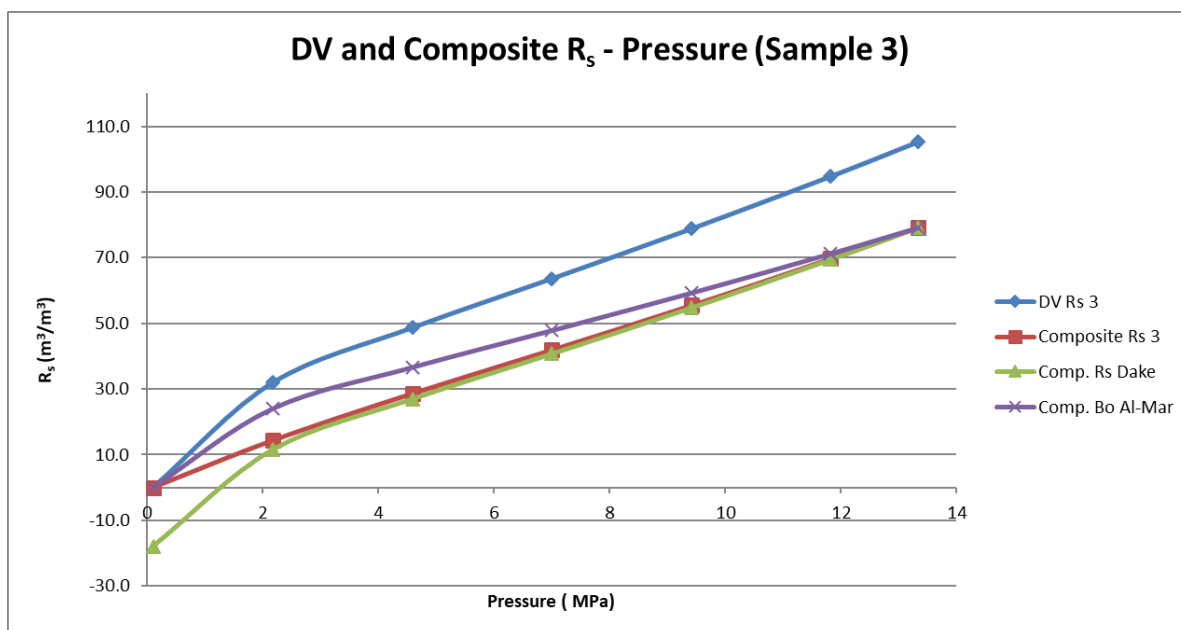
### 5.4.2 Διαγράμματα ογκομετρικού συντελεστή σχηματισμού $R_s$



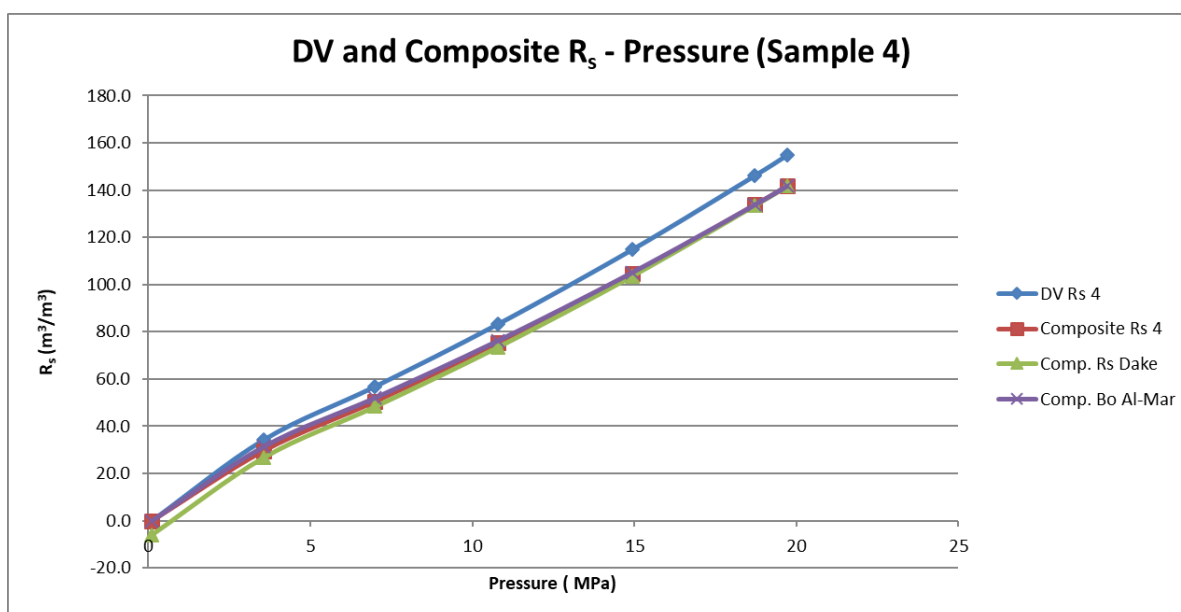
Σχήμα 19: Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $R_s$  δείγματος 1



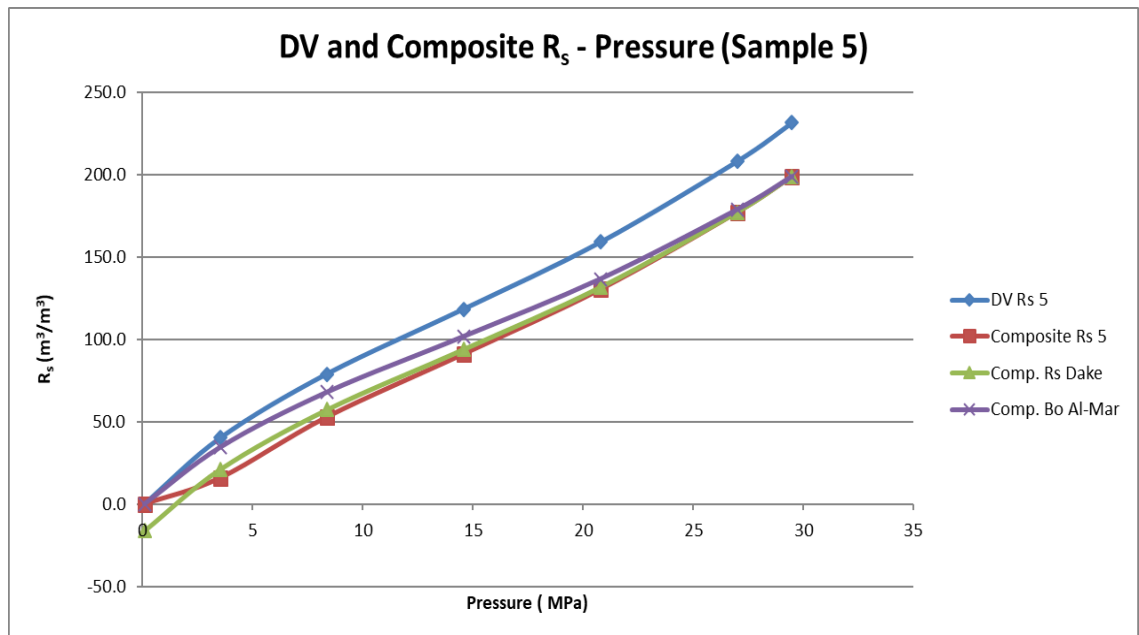
Σχήμα 20: Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $R_s$  δείγματος 2



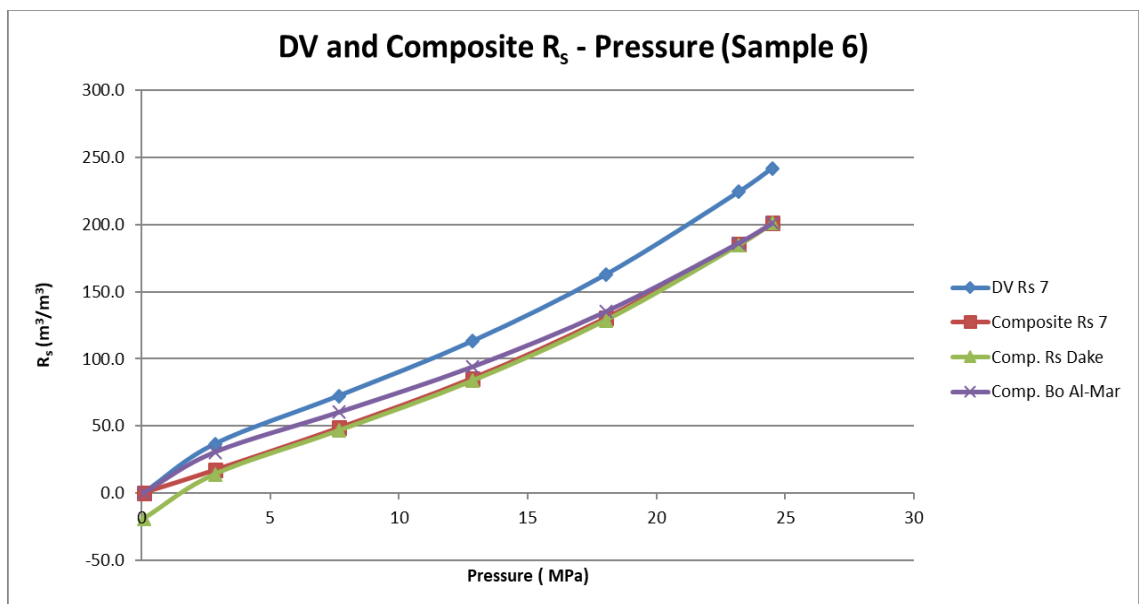
Σχήμα 21: Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $R_s$  δείγματος 3



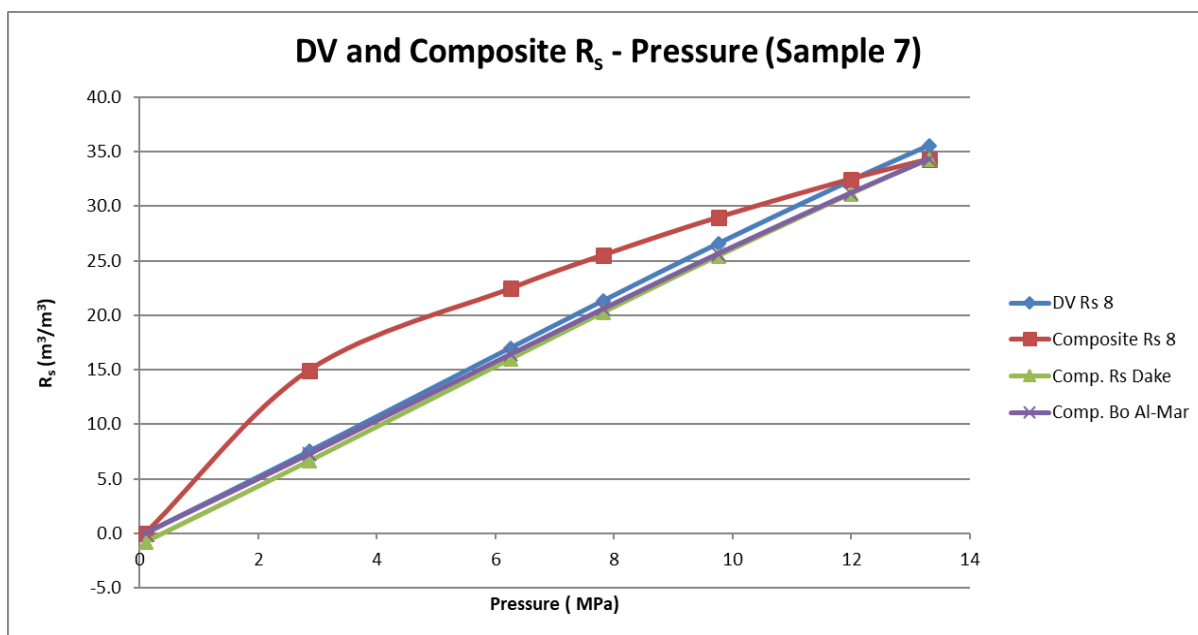
Σχήμα 22: Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $R_s$  δείγματος 4



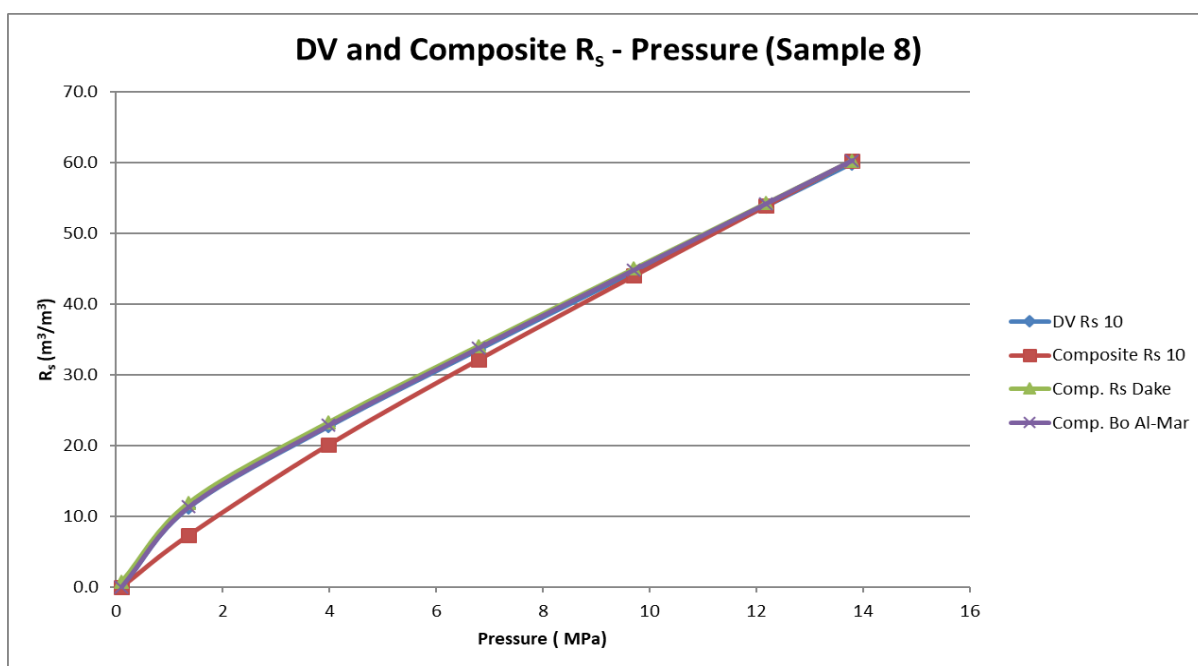
Σχήμα 23: Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $R_s$  δείγματος 5



Σχήμα 24: Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $R_s$  δείγματος 6



Σχήμα 25: Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $R_s$  δείγματος 7



Σχήμα 26: Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $R_s$  δείγματος 8



### 5.4.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων και ερμηνεία τους

Όπως ήταν αναμενόμενο, για την πλειοψηφία των πετρελαίων, η μελέτη διαφορικής εξάτμισης απέδιδε σε κάθε πίεση μεγαλύτερες τιμές για τις ογκομετρικές παραμέτρους σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Αυτό οφείλεται στο ότι τα δείγματα κατά τη μελέτη διαφορικής εξάτμισης υπόκεινται σε μια διαδικασία μείωσης της πίεσης που δεν αντιστοιχεί σε αυτή που γίνεται στην πραγματικότητα όταν το ρευστό μεταφέρεται από τον ταμιευτήρα στην επιφάνεια. Η μελέτη αυτή έχει ως αποτέλεσμα την εντατική εκτόνωση του ρευστού σε κάθε βήμα και συνεπώς τη μεγαλύτερη απόδοση όγκου αερίου. Ως αποτέλεσμα τα  $B_o$  που αποδίδει η μέθοδος είναι μεγαλύτερα αλλά μη ρεαλιστικά.

Ακόμη, από τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται πως για τον ογκομετρικό συντελεστή σχηματισμού  $B_o$ , η διορθωτική μέθοδος κατά Dake σε κάποιες περιπτώσεις αποδίδει τιμές μικρότερες της μονάδας σε χαμηλές πιέσεις. Επίσης, φαίνεται ότι όσο πιο αυξημένη είναι η πτητικότητα του πετρελαίου τόσο μεγαλύτερη είναι η πίεση στην οποία η μέθοδος ξεκινάει να αποδίδει  $B_o$  μικρότερα της μονάδας. Αυτό έχει αποδειχθεί κάνοντας προσομοίωση με μοντέλα καταστατικών εξισώσεων στα οποία φάνηκε ότι όσο αυξάνεται η πτητικότητα των δειγμάτων, τα  $B_o$  των συστάσεων που απαντώνται στον ταμιευτήρα αποκλίνουν των αντιστοίχων της μεθόδου του Dake. Ομοίως, όσο αυξάνεται η πτητικότητα τόσο υψηλότερες είναι οι πιέσεις στις οποίες ο λόγος αερίου εν διαλύσει πετρελαίου  $R_s$  λαμβάνει αρνητικές. Οι τιμές  $B_o$  μικρότερης της μονάδας οφείλονται στο γεγονός ότι η μόνο διαφορά που επιβάλλεται στην μέθοδο του Dake όταν αλλάζουν οι συνθήκες διαχωριστήρα είναι αναλογική αφού αλλάζει μόνο ο πολλαπλασιαστής της διορθωτικής εξίσωσής του. Ουσιαστικά το σχήμα της  $B_o$  καμπύλης παραμένει το ίδιο πάντοτε και απλά πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή κλίμακας. Ωστόσο, οι αρνητικές τιμές του  $R_s$  σε χαμηλές πιέσεις είναι αποτέλεσμα της πρώτης παραδοχής του Dake σύμφωνα με την οποία ανέπτυξε την εξίσωση υπολογισμού του.

Οι καμπύλες  $B_o$  και  $R_s$  της μεθόδου του Al-Marhoun φαίνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις αποφεύγουν τις μη επιτρεπτές τιμές που σε χαμηλές πιέσεις αποδίδει η μέθοδος κατά Dake. Αυτό είναι αποτέλεσμα του ότι η ανάπτυξη της μεθόδου έγινε έτσι ώστε με μαθηματικό τρόπο να διορθώνονται οι καμπύλες των παραμέτρων του Dake, προσπαθώντας ταυτόχρονα να διατηρηθεί το σχήμα τους. Για να επιτευχθεί αυτό, σε ατμοσφαιρικές πιέσεις η μέθοδος Al-Marhoun είναι ανεπτυγμένη έτσι ώστε να αποδίδει  $B_o$  με τιμή ίδια με την μελέτη διαφορικής εξάτμισης. Έτσι και στη πίεση κορεσμού η τιμή του  $B_o$  και των δύο μεθόδων ισούται με αυτή του πειράματος διαχωριστήρα. Αντιστοίχως για το  $R_s$  στη πίεση κορεσμού, οι δύο μέθοδοι αποδίδουν τιμή ίση με αυτή του πειράματος διαχωρισμού επιφάνειας. Όμως, σε ατμοσφαιρικές πιέσεις η εξίσωση του  $R_s$  της μεθόδου του Al-Marhoun είναι ανεπτυγμένη έτσι ώστε πάντοτε να αποδίδει  $R_s$  ίσο με ο μηδέν. Παρ' όλα αυτά, σε όλες τις περιπτώσεις παρουσιάζονται σημαντικές αποκλίσεις από τις πραγματικές καμπύλες σύνθετης εκτόνωσης λόγω των περιορισμών που επιβάλλονται από της παραδοχές που έγιναν κατά την δημιουργία της κάθε μεθόδου. Συνεπώς, για δείγματα με αυξημένη πτητικότητα η μέθοδος Al-Marhoun

αδυνατεί να προσεγγίσει με ακρίβεια την πραγματική καμπύλη δεδομένων σύνθετης εκτόνωσης των ογκομετρικών παραμέτρων  $B_o$  και  $R_s$ .

Αντίθετα, η νέα μέθοδος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας αναπαριστά επακριβώς την πειραματική διαδικασία σύνθετης εκτόνωσης χρησιμοποιώντας θερμοδυναμικούς υπολογισμούς ακριβείας που ικανοποιούν τις συνθήκες διατήρησης μάζας και θερμοδυναμικής ισορροπίας μεταξύ των δύο φάσεων του πετρελαίου. Έτσι, σε κάθε περίπτωση τα αποτελέσματα των ογκομετρικών συντελεστών είναι αντιπροσωπευτικά της πραγματικής καμπύλης σύνθετης εκτόνωσης ανεξάρτητα από την πτητικότητα των δειγμάτων. Επίσης, η εγκυρότητα της νέας μεθόδου έγκειται στο ότι τα αποτελέσματα της αναμένονταν να βρίσκονται κοντά σε αυτά του Dake και ειδικά σε υψηλές πιέσεις, κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται από τα παραπάνω διαγράμματα. Αυτό είναι απόρροια των παραδοχών της μεθόδου του Dake οι οποίες σε αντίθεση με την αποκλειστικά μαθηματική διόρθωση της μεθόδου του Al-Marhoun, περιλαμβάνουν χρήση θερμοδυναμικής θεωρίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

#### 6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε μια νέα μέθοδος η οποία χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της μελέτης διαφορικής εξάτμισης της αναφοράς PVT, υπολογίζει με ακρίβεια τις καμπύλες των  $B_o$  και  $R_s$  σύνθετης εκτόνωσης. Αρχικά, αναπτύχθηκε αλγόριθμος υπολογισμού της σύστασης της υγρής φάσης κάθε βήματος πίεσης της μελέτης διαφορικής εξάτμισης, αφού οι συστάσεις αυτές αποτελούν την τροφοδοσία για την εκτόνωση σε συνθήκες επιφάνειας μέσα από οποιονδήποτε συνδυασμό διαχωριστήρων. Για τον υπολογισμό των k-values μετά από κάθε εκτόνωση εφαρμόστηκε η απλή μέθοδος του Wilson. Έτσι, μετά μπορούσαν να υπολογιστούν οι συστάσεις ισορροπίας επιλύοντας την εξίσωση των Rachford-Rice. Τέλος, για τον υπολογισμό των ζητούμενων ογκομετρικών παραμέτρων ήταν αναγκαίος ο προσδιορισμός της πυκνότητας της υγρής φάσης κάθε βήματος πίεσης της μελέτης διαφορικής εξάτμισης και αυτής του πετρελαίου τανκ. Η τιμή της πρώτης μπορεί να υπολογιστεί με παρεμβολή από την καμπύλη πυκνότητας που περιλαμβάνεται στην αναφορά της μελέτης. Όσο για την πυκνότητα του πετρελαίου τανκ εφαρμόστηκε η υπολογιστική μέθοδος του Standing.

Από την εφαρμογή της νέας μεθόδου παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα των ογκομετρικών συντελεστών που αποδίδει είναι πάντοτε αντιπροσωπευτικά της πραγματικής καμπύλης σύνθετης εκτόνωσης, σε αντίθεση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των διορθωτικών μεθόδων που εφαρμόζονται σήμερα. Επίσης, σε κάθε περίπτωση, η νέα μέθοδος δεν παρουσιάζει μη επιτρεπτές τιμές για τους ογκομετρικούς συντελεστές ( $B_o < 1$ ,  $R_s < 0$ ). Στην περίπτωση τροποποίησης των συνθηκών διαχωρισμού η νέα μέθοδος προσφέρει την δυνατότητα της άμεσης και ακριβούς ρύθμισης των παραγόμενων δεδομένων. Έτσι, επιτυγχάνεται ο υπολογισμός των πινάκων BOT με ακρίβεια και συνεπώς βελτιώνεται σημαντικά η απόδοση των προσομοιώσεων της παραγωγής με μοντέλα μαύρων πετρελαίων καθιστώντας τα μία ακόμα πιο ελκυστική επιλογή.

#### 6.2 Προτάσεις για μελλοντική εργασία επί του θέματος

Όπως ειπώθηκε και προηγουμένως σε ρευστά υδρογονανθράκων που χαρακτηρίζονται από υψηλή πτητικότητα, όπως τα συμπυκνώματα αερίων, αντί της μελέτης διαφορικής

εξάτμισης εφαρμόζεται η μελέτη σταθερού όγκου. Η προσομοίωση ταμιευτήρων τέτοιων δειγμάτων με μοντέλα EoS έδειξε ότι σε αυτή την περίπτωση η κατάλληλη καμπύλη που πρέπει να υιοθετηθεί στα μοντέλα μαύρων πετρελαίων είναι της σύνθετης μελέτης σταθερού όγκου (Composite Constant Volume Depletion, CCVD). Έτσι, για τους υπολογισμούς καθίσταται απαραίτητη η ανάπτυξη μίας αντίστοιχης υπολογιστικής διαδικασίας όπως αυτής που παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Αναπτύσσοντας αυτή τη μέθοδο, αυτομάτως καλύπτεται όλο το φάσμα της πτητικότητας των δειγμάτων με τα οποία θα μπορούν να δουλέψουν οι μηχανικοί πετρελαίου και να παραγάγουν τις κατάλληλες ογκομετρικές παραμέτρους.

Η ίδια προσέγγιση με την παραπάνω μέθοδο μπορεί να εφαρμοστεί για την υπολογιστική υλοποίηση της σύνθετης μελέτης σταθερού όγκου, αφού σε κάθε βήμα πίεσης του πειράματος υπολογίζονται με αέριο χρωματογράφο οι συστάσεις του αερίου. Έτσι, μπορούν και να υπολογιστούν οι συστάσεις τροφοδοσίας για την εκτόνωση σε ατμοσφαιρικές συνθήκες. Για τις τιμές των k-values μπορεί επίσης να εφαρμοστεί επίσης η μέθοδος του Wilson, αφού πάλι οι εκτονώσεις γίνονται σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας διαχωριστήρα.

Ακολούθως, οι συστάσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε μία υπολογιστική διαδικασία εκτόνωσης αντίστοιχη με την αυτή που παρουσιάστηκε παραπάνω, αποδίδοντας τις ογκομετρικές παραμέτρους της σύνθετης μελέτης σταθερού όγκου.

## Βιβλιογραφία

- [1] Βαρότσης Ν. (2014), “Μηχανική ταμειωτήρων”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [2] Dake, L. P., 1983. Fundamentals of Reservoir Engineering. Elsevier, The Netherlands.
- [3] Dodson, C. R., Goodwill, D., Mayer, E. H., 1953. Application of laboratory PVT data to reservoir engineering problems. Petroleum Transactions AIME, 198, 287–298.
- [4] Katz, D.L., Firoozabadi, A., 1978. Predicting phase behavior of condensate/crude-oil systems using methane interaction coefficients. Journal of Petroleum Technology, November 1978, 1649-1655.
- [5] Al Marhoun, M. A., 2003. Adjustment of differential liberation data to separator conditions. SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 6 (3), 142–146.
- [6] Standing, M.B., Katz, D.L., 1942. Density of crude oils saturated with natural gas. Petroleum Transactions AIME 146, 159-165.
- [7] Twu, C.H., 1984. An internally consistent correlation for predicting the critical properties and molecular weights of petroleum and coal-tar liquids. Fluid Phase Equilibria, 16, 137-150.
- [8] Whitson, C.H., Torp, S.B., 1983. Evaluating constant volume depletion data. Journal of Petroleum Technology, March 1983, 610-620.
- [9] Whitson, C., Brule, M., 2000. Phase behavior. SPE monograph. Richardson, Texas, US.
- [10] [www.petrowiki.org/Calculating\\_PVT\\_properties](http://www.petrowiki.org/Calculating_PVT_properties).
- [11] [www.en.wikipedia.org/wiki/Relative\\_permeability](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Relative_permeability).
- [12] Rachford, H.H., Rice, J.D., 1952. Procedure for use of electronic digital computers in calculating flash vaporization hydrocarbon equilibrium. Petroleum Transactions AIME, 195, 327-328.
- [13] John R. Fanchi, 2005. Principles of Applied Reservoir Simulation.
- [14] Ghetto de, G. Paone F., Villa M., 1994. Reliability analysis on PVT correlations. European Petroleum Conference, London, UK, October 25-27. SPE paper 28904.
- [15] [www.fekete.com/SAN/TheoryAndEquations/WellTestTheoryEquations/Vasquez\\_and\\_Beggs.html](http://www.fekete.com/SAN/TheoryAndEquations/WellTestTheoryEquations/Vasquez_and_Beggs.html)

- [16] Lulu Liu, John M. Williams, 2015. Modelling Reservoir Depletion Processes to Obtain Representative Oil Formation Volume Factors. SPE paper 175680.
- [17] Danesh, A., 1998. PVT and phase behavior of petroleum reservoir fluids. Elsevier, The Netherlands.
- [18] [www.petrowiki.org/Oil\\_viscosity](http://www.petrowiki.org/Oil_viscosity)

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

**Σχήμα 1:** Διαδικασία μελέτης σταθερής μάζας για πετρέλαια και αέρια συμπυκνώματα

**Σχήμα 2:** Διαδικασία μελέτης διαφορικής εξάτμισης

**Σχήμα 3:** Διαδικασία τεστ διαχωριστήρα

**Σχήμα 4:** Διαδικασία μελέτης σταθερού όγκου

**Σχήμα 5:** Πειραματική διαδικασία σύνθετης εκτόνωσης

**Σχήμα 6:** Αναπαράσταση διαδικασίας παραγωγής ενός ταμιευτήρα

**Σχήμα 7:** Πειραματική διαδικασία διαφορικής εξάτμισης

**Σχήμα 8:** Διάγραμμα ροής της νέας μεθόδου που αναπτύχθηκε

**Σχήμα 9:** Συγκριτικό διάγραμμα διαγωνίου  $B_o$  νέου αλγορίθμου εκτόνωσης και πειραματικών δεδομένων

**Σχήμα 10:** Συγκριτικό διάγραμμα διαγωνίου  $R_s$  νέου αλγορίθμου εκτόνωσης και πειραματικών δεδομένων

**Σχήμα 11:** Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $B_o$  δείγματος 1

**Σχήμα 12:** Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $B_o$  δείγματος 2

**Σχήμα 13:** Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $B_o$  δείγματος 3

**Σχήμα 14:** Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $B_o$  δείγματος 4

**Σχήμα 15:** Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $B_o$  δείγματος 5

**Σχήμα 16:** Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $B_o$  δείγματος 6

**Σχήμα 17:** Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $B_o$  δείγματος 7

**Σχήμα 18:** Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $B_o$  δείγματος 8

**Σχήμα 19:** Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $R_s$  δείγματος 1

**Σχήμα 20:** Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $R_s$  δείγματος 2

**Σχήμα 21:** Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $R_s$  δείγματος 3

**Σχήμα 22:** Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $R_s$  δείγματος 4

**Σχήμα 23:** Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $R_s$  δείγματος 5

**Σχήμα 24:** Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $R_s$  δείγματος 6

**Σχήμα 25:** Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $R_s$  δείγματος 7

**Σχήμα 26:** Αποτελέσματα ογκομετρικού συντελεστή  $R_s$  δείγματος 8



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

**Πίνακας 1:** Τρόπος παρουσίασης αποτελεσμάτων μελέτης διαφορικής εξάτμισης

**Πίνακας 2:** Αποτελέσματα διαφόρων ρευστών για την εκτίμηση της ακρίβειας της νέας μεθόδου

**Πίνακας 3:** Μέγιστες τιμές απόλυτου σχετικού σφάλματος  $B_o$  και απόλυτου σφάλματος  $R_s$

**Πίνακας 4:** Τιμές πίεσης κορεσμού και διαφορικής εξάτμισης

**Πίνακας 5:** Τιμές  $B_o$  μελέτης διαφορικής εξάτμισης

**Πίνακας 6:** Τιμές  $R_s$  μελέτης διαφορικής εξάτμισης

**Πίνακας 7:** Τιμές composite  $B_o$  νέας μεθόδου

**Πίνακας 8:** Τιμές composite  $R_s$  νέας μεθόδου

**Πίνακας 9:** Τιμές composite  $B_o$  μεθόδου Dake

**Πίνακας 10:** Τιμές composite  $R_s$  μεθόδου Dake

**Πίνακας 11:** Τιμές composite  $B_o$  μεθόδου Al-Marhoun **Πίνακας 12:** Τιμές composite  $R_s$  μεθόδου Al-Marhoun

