



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΚΡΗΤΗΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ**

**<< Αξιοποίηση εμπειρικών συσχετίσεων στη ρύθμιση καταστατικών εξισώσεων για τη περιγραφή της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς ταμειυτήρων πετρελαίου>>**

**Διπλωματική εργασία**

**ΕΛΕΝΑ ΣΔΟΥΚΟΥ**

**Εξεταστική επιτροπή :**

**Επ. Καθ. Α. Γιώτης (επιβλέπων)**

**Καθ. Ν. Πασαδάκης**

**Δρ. Δ. Μαρινάκης**

**ΧΑΝΙΑ**

**Οκτώβριος 2022**

## **Ευχαριστίες**

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στο καθηγητή μου, το κύριο Δημήτρη Μαρινάκη τόσο για την πολύτιμη καθοδήγησή του σε όλη τη πορεία της διπλωματικής εργασίας, την υπομονή και την καθοριστική συμβολή του για την πραγμάτωση αυτής, αλλά ακόμη μεγαλύτερο για τον τρόπο που με μύησε να ψάχνω και να επεξεργάζομαι επιστημονικά δεδομένα και πηγές ορθώς , αντίστοιχα προγράμματα που χρειάστηκαν για την εργασία και γενικότερα για το πώς πρέπει από εδώ και στο εξής να έχουμε μία επαγγελματική στάση απέναντι στις εξελίξεις.

Ακόμη ευχαριστώ πολύ και την κριτική επιτροπή της συνέντευξης αποτελούμενη από τον κύριο Νικόλαο Βαρότση, τον κύριο Αντρέα Γιώτη και φυσικά τον κύριο Δημήτρη Μαρινάκη, όπου μου έδωσαν την ευκαιρία να μπορώ να εκπονήσω τη διπλωματική μου εργασία στο εργαστήριό τους.

Παράλληλα ευχαριστώ πολύ τον κύριο Νικόλαο Πασαδάκη και τον κύριο Αντρέα Γιώτη για την παρουσία τους στην εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής εργασίας μου.

Τέλος ευχαριστώ πολύ τους γονείς μου για την αμέριστη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια τόσο της φοιτητικής μου πορείας όσο και των προηγούμενων ετών.

**Έλενα Σδούκου**

## Περίληψη

Για την αποτελεσματική εκμετάλλευση των ταμειυτήρων πετρελαίου είναι απαραίτητη η όσο το δυνατόν ταχύτερη και οικονομικότερη εκτίμηση των ιδιοτήτων των ρευστών του ταμειυτήρα, τόσο στην αρχική πίεση του κοιτάσματος, όσο και σε όλο το εύρος των πιέσεων που μπορεί να βρεθεί το ρευστό του ταμειυτήρα κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην εκτίμηση ορισμένων χαρακτηριστικών ιδιοτήτων του πετρελαίου, όπως είναι η πίεση φυσαλίδας ( $P_b$ ), ο ογκομετρικός συντελεστής σχηματισμού πετρελαίου ( $B_o$ ) και η αναλογία εν διαλύσει αερίου – πετρελαίου ( $R_s$ ). Με βάση αυτές τις ιδιότητες πραγματοποιήθηκε ρύθμιση στις παραμέτρους μιας κυβικής καταστατικής εξίσωσης, η οποία χρησιμοποιήθηκε εν συνεχεία στην εκτίμηση επιπλέον ιδιοτήτων που αξιοποιούνται κατά την εκμετάλλευση των ταμειυτήρων, όπως οι πυκνότητες και οι αναλογίες υγρού – αερίου στη θερμοκρασία του ταμειυτήρα και σε πιέσεις μικρότερες του σημείου φυσαλίδας. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες μετρήσεις του εργαστηρίου. Οι μετρήσεις αυτές είναι πραγματικά PVT δεδομένα μετρημένα εργαστηριακά μέσω της διαφορικής εξάτμισης. Για τη ρύθμιση και τη προσομοίωση με βάση την κυβική καταστατική εξίσωση χρησιμοποιήθηκε ένα εμπορικό πρόγραμμα προσομοίωσης tNavigator. Ως θερμοδυναμικό μοντέλο προσομοίωσης των ρευστών του ταμειυτήρα χρησιμοποιήθηκε η κυβική καταστατική εξίσωση Peng –Robinson.

Η επιλογή των κατάλληλων εμπειρικών εξισώσεων για την εκτίμηση της πίεσης φυσαλίδας, του  $B_o$  και του  $R_s$ , έγινε κατόπιν αξιολόγησης όλων των διαθέσιμων πηγών της βιβλιογραφίας, με βάση το πεδίο εφαρμογής της κάθε εξίσωσης και εκτιμώμενη ακρίβεια της πρόβλεψης.

Επιλέχτηκε ένα πλήθος εμπειρικών εξισώσεων, με σκοπό να καλύψουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο εύρος κατηγοριών πετρελαίου και αξιολογήθηκε με βάση τις μετρήσεις που είχαμε ήδη διαθέσιμες για πετρελαϊκά δείγματα. Για το πλήθος αυτό χρησιμοποιήθηκαν 26 δείγματα πετρελαίου για τα οποία υπάρχουν ήδη οι εργαστηριακές τους μετρήσεις.

Η παρούσα διπλωματική εργασία απέδειξε ότι η εξίσωση Al-Mehaideb 1997 προσεγγίζει καλύτερα την εργαστηριακή τιμή για τον ογκομετρικό συντελεστή  $B_o$ . Ως προς την πίεση φυσαλίδας η εξίσωση του Hassan 2011 δίνει την καλύτερη προσέγγιση, η εξίσωση Petrofsky & Farshad 1993 δίνει καλύτερα αποτελέσματα για τον λόγο εν διαλύσει αερίου – πετρελαίου  $R_s$ .

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες .....	
Περίληψη .....	
<b>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή .....</b>	<b>1</b>
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Περί Πετρελαίου.....	2
1.3 Δημιουργία Πετρελαίου.....	2
1.3.1 Παράγοντες δημιουργίας του πετρελαίου.....	3
1.4 Η δομή των υδρογονανθράκων.....	3
1.5 Πετρελαϊκά ρευστά του ταμιευτήρα.....	4
1.6 Ταξινόμηση των ταμιευτήρων .....	5
1.6.1 Ακατέργαστα πετρέλαια .....	5
1.6.1.1 Μαύρο Πετρέλαιο.....	5
1.6.1.2 Πτητικό Πετρέλαιο.....	6
1.6.1.3 Χαμηλής συρρίκνωσης πετρέλαιο.....	8
1.6.1.4 Ακατέργαστο πετρέλαιο στο κρίσιμο σημείο .....	9
<b>Κεφάλαιο 2 Ανάλυση PVT .....</b>	<b>11</b>
2.1 Παρατήρηση Πετρελαίου.....	11
2.1.1 Μελέτη σταθερής μάζας.....	11
2.1.2 Μελέτη διαφορικής εξάτμισης.....	12
2.1.3 Μελέτη προσδιορισμού ιξώδους υγρής φάσης ταμιευτήρα.....	14
2.1.4 Τεστ διαχωριστήρα.....	14
2.2 Μελέτη αερίων συμπυκνωμάτων.....	15
2.3 Σκοπός και αντικείμενο διπλωματικής εργασίας.....	15
<b>Κεφάλαιο 3 Καταστατικές εξισώσεις.....</b>	<b>29</b>
3.1 Καταστατική εξίσωση για ιδανικά αέρια.....	31
3.2 Καταστατική εξίσωση για πραγματικά αέρια.....	33
3.3 Κυβικές καταστατικές εξισώσεις.....	34
3.3.1 Κυβική καταστατική εξίσωση Van der Waals.....	36
3.3.2 Κυβική καταστατική εξίσωση Peng-Robinson.....	38
3.4 Ιδιότητες διφασικών συστημάτων.....	40
<b>Κεφάλαιο 4 Ρύθμιση καταστατικών εξισώσεων .....</b>	<b>41</b>
4.1 Που ωφελεί η προσομοίωση του ταμιευτήρα.....	42
4.2 Ρύθμιση καταστατικών εξισώσεων.....	44
<b>Κεφάλαιο 5 Συσχετίσεις των ιδιοτήτων του πετρελαίου .....</b>	<b>45</b>

5.1 Που ωφελεί η χρήση των συσχετίσεων PVT.....	45
5.2 Επιλογή κατάλληλων συσχετίσεων PVT.....	46
5.3 Πίεση στο σημείο φυσαλίδας.....	48
5.3.1 Συσχετίσεις για το σημείο φυσαλίδας.....	48
5.3.2 Όρια για τις παραμέτρους εισόδου για το Pb.....	51
5.4 Αναλογία αερίου- πετρελαίου (Rs).....	51
5.4.1 Συσχετίσεις για την εκτίμηση του Rs.....	52
5.4.2 Όρια για τις παραμέτρους εισόδου για το Rs.....	54
5.5 Ογκομετρικός συντελεστής (Bo).....	55
5.5.1 Συσχετίσεις για την εκτίμηση του Bo.....	55
5.5.2 Όρια για τις παραμέτρους εισόδου για το Bo.....	57
<b>Κεφάλαιο 6 Ενδεικτικά αποτελέσματα προσομοίωσης πετρελαίου .....</b>	<b>58</b>
6.1 Παρατηρήσεις για το πετρέλαιο 206.....	60
6.2 Συμπεράσματα.....	61
6.3 Συγκρίσεις αναφορικά με την ακρίβεια των ερευνητών.....	63
6.4 Συχνότητα εμφάνισης κάθε ερευνητή στο κάθε πετρέλαιο αναφορικά με την ακρίβειά του.....	67
6.5 Οι τυπικές αποκλίσεις των ερευνητών για κάθε μία από τις τρεις ιδιότητες.....	69
Βιβλιογραφία.....	72
Παράρτημα.....	74

### Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 Κύριες Ομάδες υδρογονανθράκων στου ταμιευτήρες (Danesh, 1998).....	4
Εικόνα 2 Τυπική απεικόνιση ενός ταμιευτήρα πετρελαίου (Βαρότσης, Μηχανική Ταμιευτήρων).....	4
Εικόνα 3 Μελέτη εκτόνωσης σταθερής μάζας (Βαρότσης, Μηχανική Ταμιευτήρων).....	12
Εικόνα 4 Μελέτη διαφορικής εξάτμισης (Μαρινάκης, Μηχανική Ταμιευτήρων).....	13
Εικόνα 5 Ιξωδόμετρο κυλιόμενης σφαίρας για τη μέτρησης ιξώδους υγρών σε ταμιευτήρες (Βαρότσης, Μηχανική Ταμιευτήρων).....	14
Εικόνα 6 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το Pb(psia) (Zahaby, 2012).....	18
Εικόνα 7 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το Rs(scf/stb) (Zahaby, 2012).....	18
Εικόνα 8 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το Bo(bbl/stb) (Zahaby, 2012).....	19
Εικόνα 9 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το Pb (psia), περιοχής Ohanet (Sindrouhou, 2013).....	20
Εικόνα 10 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το Pb(psia) , περιοχής HMD (Sindrouhou, 2013).....	20

Εικόνα 11 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το Pb(ψia), περιοχής Bir Berkin (Sindrouhou, 2013).....	21
Εικόνα 12 Αποκλίσεις και σφάλματα των συσχετίσεων ανάλογα με τη κάθε περιοχή όσο αφορά το Pb(ψia) (Sindrouhou, 2013).....	21
Εικόνα 13 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το Bo(bbl/stb), περιοχής Bir Berkin (Sindrouhou, 2013).....	22
Εικόνα 14 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το Bo(bbl/stb), περιοχής HMD (Sindrouhou, 2013).....	23
Εικόνα 15 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το Bo(bbl/stb), περιοχής Ohanet (Sindrouhou, 2013).....	23
Εικόνα 16 Αποκλίσεις και σφάλματα των συσχετίσεων ανάλογα με τη κάθε περιοχή όσο αφορά το Bo(bbl/stb) (Sindrouhou, 2013).....	24
Εικόνα 17 Αποκλίσεις και σφάλματα των συσχετίσεων ανάλογα με τη κάθε περιοχή όσο αφορά το Bo(bbl/stb) (Sindrouhou, 2013).....	24
Εικόνα 17 Μεταβολή συντελεστού z με την πίεση (Βαρότσης, Μηχανική Ταμιευτήρων).....	34
Εικόνα 18 Λόγος αερίου εν διαλύσει / υγρού συναρτήσει πίεσης (Βαρότσης, Μηχανική Ταμιευτήρων).....	52
Εικόνα 19 Ογκομετρικός συντελεστής σχηματισμού υγρής φάσης συναρτήσει της πίεσης (Βαρότσης, Μηχανική Ταμιευτήρων).....	

#### **Κατάλογος Πινάκων**

Πίνακας 1 Μέσες στοιχειακές συστάσεις για το πετρέλαιο (Πασαδάκης, 2015).....	2
Πίνακας 2 Πειραματικά δεδομένα των έξι πετρελαϊκών δειγμάτων (Ahmed, 2010).....	26
Πίνακας 3 Όρια για τις παραμέτρους εισόδου των συσχετίσεων για το Pb, όλων των ερευνητών (Danesh, 1998).....	51
Πίνακας 4 Όρια για τις παραμέτρους εισόδου των συσχετίσεων για το Rs, όλων των ερευνητών (Danesh, 1998).....	54
Πίνακας 5 Όρια για τις παραμέτρους εισόδου των συσχετίσεων για το Bo, όλων των ερευνητών (Danesh, 1998).....	57

#### **Κατάλογος Διαγραμμάτων**

Διάγραμμα 1 Φάκελος φάσεων για μαύρο πετρέλαιο (Ahmed, 2010).....	6
Διάγραμμα 2 Καμπύλη υγρού για μαύρο πετρέλαιο (Ahmed, 2010).....	6
Διάγραμμα 3 Φάκελος φάσεων για πτητικό πετρέλαιο (Ahmed, 2010).....	7
Διάγραμμα 4 Καμπύλη υγρού για πτητικό πετρέλαιο (Ahmed, 2010).....	8
Διάγραμμα 5 Φάκελος φάσεων για χαμηλής συρρίκνωσης πετρέλαιο (Ahmed, 2010).....	9
Διάγραμμα 6 Καμπύλη υγρού για χαμηλής συρρίκνωσης πετρέλαιο (Ahmed, 2010).....	9
Διάγραμμα 7 Φάκελος φάσεων για ακατέργαστο πετρέλαιο κοντά στο κρίσιμο σημείο (Ahmed, 2010).....	10
Διάγραμμα 8 Καμπύλη υγρού για ακατέργαστο πετρέλαιο κοντά στο κρίσιμο σημείο (Ahmed, 2010).....	10

Διάγραμμα 9 Εξιδανικευμένο διάγραμμα πίεσης – όγκου (PVT) για ένα καθαρό συστατικό (Ahmed, 2010).....	38
Διάγραμμα 10 Διάγραμμα σχέσεων όγκων ρευστών ταμιευτήρα / επιφανείας στη διφασική περιοχή (Βαρότσης, Μηχανική Ταμιευτήρων).....	41
Διάγραμμα 11 Προσομοίωση $B_o$ για το πετρέλαιο 206.....	58
Διάγραμμα 12 Προσομοίωση $R_s$ για το πετρέλαιο 206.....	59
Διάγραμμα 13 Προσομοίωση $P_b$ για το πετρέλαιο 206.....	60
Διάγραμμα 14 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 206 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	60
Διάγραμμα 15 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 206 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	61
Διάγραμμα 16 Γραφική απεικόνιση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το $B_o$ ( $bb/stb$ ).....	65
Διάγραμμα 17 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το $P_b$ ( $psia$ ).....	66
Διάγραμμα 18 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το $R_s$ ( $scf/stb$ ).....	66
Διάγραμμα 19 Απεικόνιση της συχνότητας εμφάνισης κάθε ερευνητή αναφορικά με την ακρίβεια για το $B_o$ .....	67
Διάγραμμα 20 Απεικόνιση της συχνότητας εμφάνισης κάθε ερευνητή αναφορικά με την ακρίβεια για το $P_b$ .....	68
Διάγραμμα 21 Απεικόνιση της συχνότητας εμφάνισης κάθε ερευνητή αναφορικά με την ακρίβεια για το $R_s$ .....	68
Διάγραμμα 22 Τυπικές αποκλίσεις ερευνητών σχετικά με το $P_b$ ( $bars$ ).....	69
Διάγραμμα 23 Τυπικές αποκλίσεις ερευνητών σχετικά με το $B_o$ ( $bbl/stb$ ).....	70
Διάγραμμα 24 Τυπικές αποκλίσεις ερευνητών σχετικά με το $R_s$ ( $scf/stb$ ).....	70
Διάγραμμα 25 Προσομοίωση $B_o$ για το πετρέλαιο 202.....	74
Διάγραμμα 26 Προσομοίωση $R_s$ για το πετρέλαιο 202.....	75
Διάγραμμα 27 Προσομοίωση $P_b$ για το πετρέλαιο 202.....	75
Διάγραμμα 28 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 202 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων....	76
Διάγραμμα 29 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 202 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων....	76
Διάγραμμα 30 Προσομοίωση $B_o$ για το πετρέλαιο 203.....	77
Διάγραμμα 31 Προσομοίωση $R_s$ για το πετρέλαιο 203.....	78
Διάγραμμα 32 Προσομοίωση $P_b$ για το πετρέλαιο 203 .....	79
Διάγραμμα 33 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 203 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	79
Διάγραμμα 34 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 203 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	80
Διάγραμμα 35 Προσομοίωση $B_o$ για το πετρέλαιο 204.....	80

Διάγραμμα 36 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 204.....	81
Διάγραμμα 37 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 204.....	81
Διάγραμμα 38 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 204 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	82
Διάγραμμα 39 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 204 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	82
Διάγραμμα 40 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 205.....	83
Διάγραμμα 41 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 205.....	83
Διάγραμμα 42 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 205.....	84
Διάγραμμα 43 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 205 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	84
Διάγραμμα 44 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 205 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	85
Διάγραμμα 45 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 208.....	85
Διάγραμμα 46 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 208.....	86
Διάγραμμα 47 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 208.....	86
Διάγραμμα 48 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 208 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	87
Διάγραμμα 49 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 208 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	87
Διάγραμμα 50 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 209.....	88
Διάγραμμα 51 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 209.....	88
Διάγραμμα 52 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 209.....	89
Διάγραμμα 53 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 209 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	89
Διάγραμμα 54 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 209 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	90
Διάγραμμα 55 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 227.....	90
Διάγραμμα 56 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 227.....	91
Διάγραμμα 57 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 227.....	91
Διάγραμμα 58 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 227 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	92
Διάγραμμα 59 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 227 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	92
Διάγραμμα 60 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 235.....	93
Διάγραμμα 61 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 235.....	93
Διάγραμμα 62 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 235.....	94
Διάγραμμα 63 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 235 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	94



Διάγραμμα 64 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 235 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	95
Διάγραμμα 65 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 236.....	95
Διάγραμμα 66 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 236.....	96
Διάγραμμα 67 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 236.....	96
Διάγραμμα 68 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 236 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	97
Διάγραμμα 69 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 236 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	97
Διάγραμμα 70 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 238.....	98
Διάγραμμα 71 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 238.....	98
Διάγραμμα 72 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 238.....	99
Διάγραμμα 73 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 238 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	99
Διάγραμμα 74 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 238 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	100
Διάγραμμα 75 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 240.....	100
Διάγραμμα 76 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 240.....	101
Διάγραμμα 77 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 240.....	101
Διάγραμμα 78 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 240 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	102
Διάγραμμα 79 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 240 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	102
Διάγραμμα 80 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 245.....	103
Διάγραμμα 81 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 245.....	103
Διάγραμμα 82 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 245.....	104
Διάγραμμα 83 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 245 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	104
Διάγραμμα 84 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 245 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	105
Διάγραμμα 85 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 253.....	105
Διάγραμμα 86 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 253.....	106
Διάγραμμα 87 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 253.....	106
Διάγραμμα 88 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 253 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	107
Διάγραμμα 89 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 253 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	107
Διάγραμμα 90 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 254.....	108
Διάγραμμα 91 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 254.....	109

Διάγραμμα 92 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 254.....	109
Διάγραμμα 93 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 254 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	110
Διάγραμμα 94 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 254 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	110
Διάγραμμα 95 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 255.....	111
Διάγραμμα 96 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 255.....	111
Διάγραμμα 97 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 255.....	112
Διάγραμμα 98 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 255 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	112
Διάγραμμα 99 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 255 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	113
Διάγραμμα 100 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 256.....	113
Διάγραμμα 101 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 256.....	114
Διάγραμμα 102 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 256.....	114
Διάγραμμα 103 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 256 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	115
Διάγραμμα 104 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 256 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	115
Διάγραμμα 105 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 260.....	116
Διάγραμμα 106 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 260.....	116
Διάγραμμα 107 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 260.....	117
Διάγραμμα 108 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 260 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	117
Διάγραμμα 109 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 260 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	118
Διάγραμμα 110 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 261.....	118
Διάγραμμα 111 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 261.....	119
Διάγραμμα 112 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 261.....	119
Διάγραμμα 113 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 261 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	120
Διάγραμμα 114 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 261 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	120
Διάγραμμα 115 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 262.....	121
Διάγραμμα 116 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 262.....	121
Διάγραμμα 117 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 262.....	122
Διάγραμμα 118 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 262 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	122

Διάγραμμα 119 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 262 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	123
Διάγραμμα 120 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 263.....	123
Διάγραμμα 121 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 263.....	124
Διάγραμμα 122 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 263.....	124
Διάγραμμα 123 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 263 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	125
Διάγραμμα 124 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 263 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	125
Διάγραμμα 125 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 265.....	126
Διάγραμμα 126 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 265.....	126
Διάγραμμα 127 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 265.....	127
Διάγραμμα 128 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 265 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	128
Διάγραμμα 129 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 265 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.....	128

## Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

### 1.1 Εισαγωγή

Η Μηχανική Πετρελαίου χωρίζεται στους εξής τέσσερις βασικούς τομείς:

- Μηχανική Ταμιευτήρων
- Μηχανική Γεωτρήσεων
- Μηχανική Εκμετάλλευσης

Ο στόχος της Μηχανικής Ταμιευτήρων είναι κυρίως ο χαρακτηρισμός των ρευστών των ταμιευτήρων. Η μηχανική εκμετάλλευσης ασχολείται κυρίως με τη βελτίωση της παραγωγής από κάθε φρεάτιο.

Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός πρέπει να απαντηθούν οι πιο κάτω τρεις βασικές ερωτήσεις:

- Ποια ποσότητα και είδος υδρογονανθράκων βρίσκεται εγκλωβισμένη στους πόρους του ταμιευτήρα.
- Ποιο ποσοστό της παραπάνω ποσότητας μπορεί να παραχθεί και υπό ποιο κόστος.
- Πόσο γρήγορα μπορεί να παραχθεί.

Ο προσδιορισμός των τριών αυτών μεγεθών αποτελεί την πεμπτούσια της Μηχανικής Πετρελαίου. Στην προσπάθειά του αυτή, ο μηχανικός ταμιευτήρων χρησιμοποιεί διάφορων τύπων δεδομένα, τα σημαντικότερα εκ των οποίων είναι τα εξής:

- Δεδομένα που αναφέρονται στις ιδιότητες των ρευστών του ταμιευτήρα
- Δεδομένα που αναφέρονται στις ιδιότητες του πετρώματος του ταμιευτήρα και στο μέγεθός του.
- Δεδομένα παραγωγής

Αναλυτικότερα υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου η μέτρηση και η φυσικά παρατήρηση των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων των ρευστών του ταμιευτήρα είναι αδύνατη. Επομένως κρίνεται αναγκαία η χρήση θερμοδυναμικών μοντέλων στην προσομοίωση των ρευστών του ταμιευτήρα. Ένα από τα πιο διαδεδομένα θερμοδυναμικά μοντέλα προσομοίωσης είναι οι κυβικές καταστατικές εξισώσεις, λόγω ευκολίας της χρήσης τους. Όμως για να μπορέσουν τα υπολογιστικά αυτά μοντέλα να προβλέψουν με ακρίβεια την ογκομετρική συμπεριφορά των πετρελαίων απαιτείται ρύθμιση των παραμέτρων των καταστατικών εξισώσεων. Στόχος της προσομοίωσης είναι η εκτίμηση της ποσότητας των αποθεμάτων στον ταμιευτήρα καθώς και η εκτίμηση της απόδοσης του ταμιευτήρα για διάφορα σενάρια παραγωγής.

## 1.2 Τυπική σύσταση πετρελαίου

Το πετρέλαιο αποτελείται κυρίως από ενώσεις άνθρακα και υδρογόνου (υδρογονάνθρακες), ενώ περιέχει και ενώσεις με άλλα στοιχεία, όπως άζωτο, θείο και οξυγόνο, σε χαμηλές συνήθως συγκεντρώσεις. Τα στοιχεία αυτά αναφέρονται και ως ετεροσυστατικά των ενώσεων του πετρελαίου και οι ενώσεις τους ετεροενώσεις δηλαδή τις ρητίνες ή αλλιώς (NSO). Στα ετεροσυστατικά του πετρελαίου περιλαμβάνονται και ενώσεις οι οποίες αποτελούνται επίσης από άνθρακα και υδρογόνο, αλλά στα μόρια τους είναι ενσωματωμένα άτομα στοιχείων, όπως το νικέλιο (Ni), το βανάδιο (V), το μαγνήσιο (Mg) και ο χαλκός (Cu). Τα στοιχεία αυτά είτε προέρχονται από την πρόδρομη οργανική ύλη του πετρελαίου είτε ενσωματώνονται στα μόρια των υδρογονανθράκων κατά τις διεργασίες δημιουργίας του.

Στην πλειονότητα των πετρελαίων η συγκέντρωση των υδρογονανθράκων υπερβαίνει το 70 % κατά βάρος, όμως σε βαριά ή βιοαποδομημένα πετρέλαια, ή στα βιτουμένια από τις ασφαλούχες άμμους, τα ετεροσυστατικά συμμετέχουν με ποσοστό μεγαλύτερο του 50 %. Ενδεικτικές μέσες στοιχειακές συστάσεις για το πετρέλαιο.

Στοιχείο	Πετρέλαιο (%κ.β περιεκτικότητα)
Άνθρακας	82.2-87.1
Υδρογόνο	1.7-14.7
Θείο	0.1-5.5
Άζωτο	0.1-1.5
Οξυγόνο	0.1-4.5

Πίνακας 1 Μέσες στοιχειακές συστάσεις για το πετρέλαιο (Πασαδάκης, 2015)

## 1.3 Δημιουργία πετρελαίου

Οργανικά κατάλοιπα φυτών και θαλασσίων οργανισμών διατηρήθηκαν χωρίς επαφή με το οξυγόνο μέσα σε ιζηματογενή στρώματα. Κατά το πρώτο στάδιο της μεταμόρφωσης, μικροοργανισμοί μετατρέπουν μέρος του οργανικού υλικού σε μεθάνιο. Καθώς το βάθος του στρώματος αυξάνει, αυξάνει συγχρόνως και η θερμοκρασία με αποτέλεσμα την αναστολή της μικροβιακής δραστηριότητας που αντιστοιχεί στο τέλος της διαγένεσης. Τότε πλέον, οι θερμικές μετατροπές καθίσταται σημαντικές και το κηρογόνο που σχηματίστηκε διασπάται στο πρώτο στάδιο της καταγένεσης σε μικρότερα και πλέον ελαφρύτερα μόρια τα βιτουμένια τα οποία με τη σειρά τους μετατρέπονται σε μικρότερα υγρής και αέριας φάσης.

### **1.3.1 Παράγοντες δημιουργίας του πετρελαίου**

Η δυνατότητα δημιουργίας του πετρελαίου εξαρτάται από:

- Το βάθος ταφής του σχηματισμού
- Τη θερμοκρασία του σχηματισμού
- Την ηλικία του σχηματισμού

Σε μικρά βάθη και σε θερμοκρασίες που αντιστοιχούν στη διαγένεση, το μητρικό πέτρωμα παράγει μόνο βιογενικό μεθάνιο σαν αποτέλεσμα της βακτηριακής δραστηριότητας. Ως ανώτατο θερμοκρασιακό όριο της διαγένεσης θεωρείται η τιμή των 50 -60 °C. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες, που απαντώνται σε βάθη 1-2 χιλιόμετρα, ξεκινά το πρώιμο στάδιο της καταγένεσης, η οποία, ανάλογα με το θερμοκρασιακό προφίλ της περιοχής, φτάνει μέχρι τα 3-3.5 χιλιόμετρα. Τα μητρικά πετρώματα στα βάθη αυτά φέρονται να βρίσκονται εντός του <<παραθύρου γένεσης >> του πετρελαίου και παράγουν κατά κύριο λόγο υγρούς υδρογονάνθρακες. Οι υδρογονάνθρακες που παράγονται στο στάδιο αυτό προέρχονται από αντιδράσεις στις οποίες συμμετέχουν τα γεωπολυμερή του κηρογόνου, αλλά και τα διατηρημένα από την αρχική οργανική ύλη αδιάλυτα στο νερό υπολείμματα των βιοπολυμερών, κυρίως λιπίδια. Οι αντιδράσεις αυτές συμβαίνουν υπό την επίδραση της θερμοκρασίας. (Πασαδάκης, 2015)

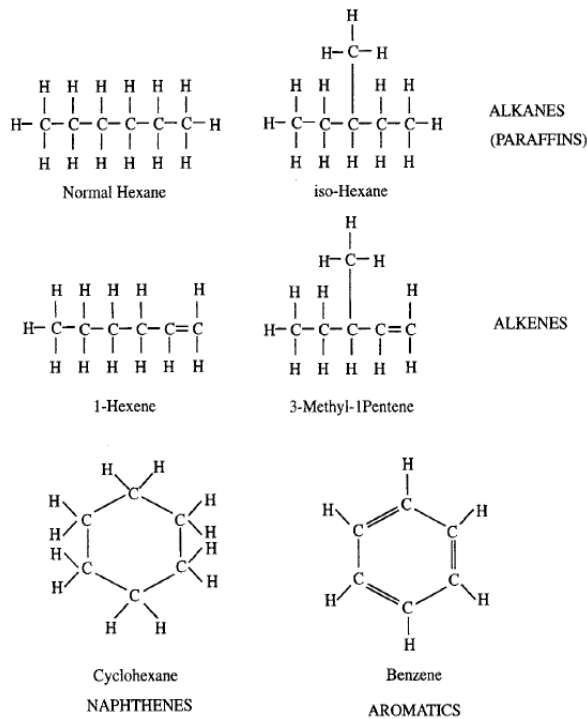
Στα πρώιμα στάδια της καταγένεσης (δηλαδή σε χαμηλές θερμοκρασίες) δημιουργούνται πετρέλαια με υψηλές τιμές πυκνότητας, πλούσια σε ετεροσυστατικά. Στις αντιδράσεις μετασχηματισμού αρχικά συμμετέχουν κηρογόνα πλούσια σε θείο ή πλούσια σε πολυμερισμένα τερπάνια (ρητίνες) από φυτικούς ιστούς, διότι διαθέτουν σχετικά ασθενέστερους δεσμούς. Η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε ελαφρύτερα (μικρότερης πυκνότητας) πετρέλαια. Η καταγένεση ολοκληρώνεται με την παραγωγή ολοένα και ελαφρύτερων υδρογονανθράκων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιγμάτων πλούσιων σε αέρια συστατικά. Στη φάση αυτή παράγεται ελαφρύ πετρέλαιο, συμπυκνώματα και υγρό αέριο. (Πασαδάκης, 2015)

### **1.4 Η δομή των υδρογονανθράκων**

Οι υδρογονάνθρακες αποτελούν ενώσεις του άνθρακα και του υδρογόνου και διακρίνονται στις παρακάτω ομόλογες σειρές:

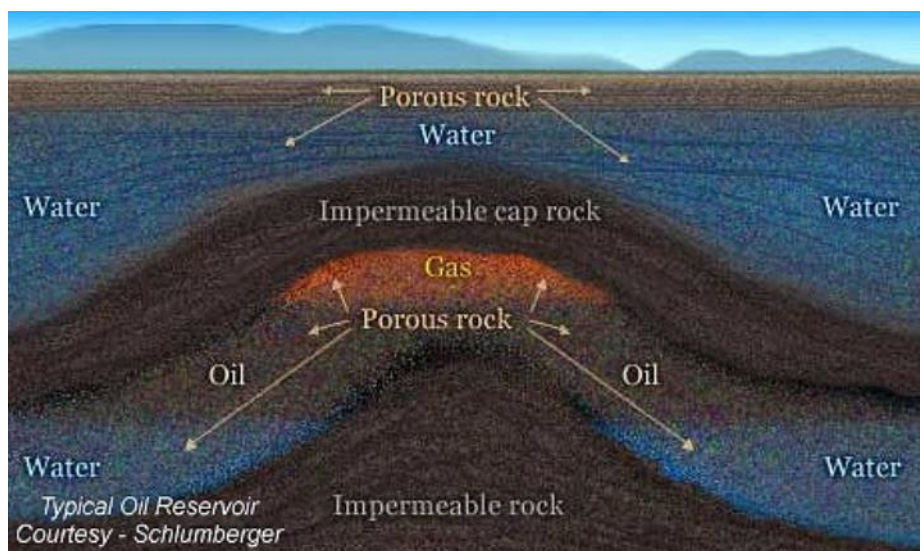
- Αλκάνια ( άκυκλοι κορεσμένοι υδρογονάνθρακες με απλούς δεσμούς μεταξύ των ατόμων άνθρακα)
- Αλκένια (άκυκλοι ακόρεστοι υδρογονάνθρακες με ένα διπλό δεσμό μεταξύ των ατόμων άνθρακα)

- Αλκίνια (άκυκλοι ακόρεστοι υδρογονάνθρακες με έναν τριπλό δεσμό μεταξύ των ατόμων άνθρακα)
- Κυκλοαλκάνια (κορεσμένος κλειστός δακτύλιος ατόμων άνθρακα)
- Αρωματικοί υδρογονάνθρακες ( βενζολικός δακτύλιος). (Πασαδάκης, 2015)



Εικόνα 1 Κύριες ομάδες υδρογονανθράκων στους ταμιευτήρες (Danesh, 1998)

### 1.5 Πετρελαϊκά ρευστά του ταμιευτήρα



Εικόνα 2 Τυπική απεικόνιση ενός ταμιευτήρα πετρελαίου (Βαρότσης, Μηχανική Ταμιευτήρων)

Σε πορώδη, περατά, ιζηματογενή πετρώματα εντοπίζονται μίγματα υδρογονανθράκων ή αλλιώς πετρελαϊκά ρευστά, τα οποία χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα μεγάλη πολυπλοκότητα. Η πολυπλοκότητα αυτή οφείλεται κυρίως στο μεγάλο αριθμό συστατικών που περιέχουν. Ήδη από τα αρχικά στάδια της παραγωγικής ζωής ενός ταμιευτήρα, ο Μηχανικός οφείλει να γνωρίζει τον τύπο του πετρελαϊκού ρευστού καθώς αυτός είναι καθοριστικής σημασίας για την ανάπτυξη ενός κοιτάσματος και την εκτίμηση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός ταμιευτήρα.

### **1.6 Ταξινόμηση των ταμιευτήρων**

Γενικά οι ταμιευτήρες ταξινομούνται με βάση τη θέση του σημείου που αντιπροσωπεύει την αρχική πίεση του ταμιευτήρα και την αρχική του θερμοκρασία σε σχέση με το διάγραμμα πίεσης – θερμοκρασίας του ρευστού του ταμιευτήρα. Έτσι προκύπτουν δύο τύποι ταμιευτήρων που είναι οι εξής:

- Ταμιευτήρες πετρελαίου ( $T_{(ταμιευτήρα)} < T_{(critical)}$  του ρευστού του ταμιευτήρα)
- Ταμιευτήρες αερίου ( $T_{(ταμιευτήρα)} > T_{(critical)}$  του ρευστού του ταμιευτήρα)

#### **1.6.1 Ακατέργαστα πετρέλαια**

Τα ακατέργαστα πετρέλαια χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- μαύρο πετρέλαιο (black oil)
- πτητικό πετρέλαιο (volatile oil)
- χαμηλής συρρίκνωσης πετρέλαιο (low – shrinkage oil)
- ακατέργαστο πετρέλαιο κοντά στο κρίσιμο σημείο (near-critical crude oil)

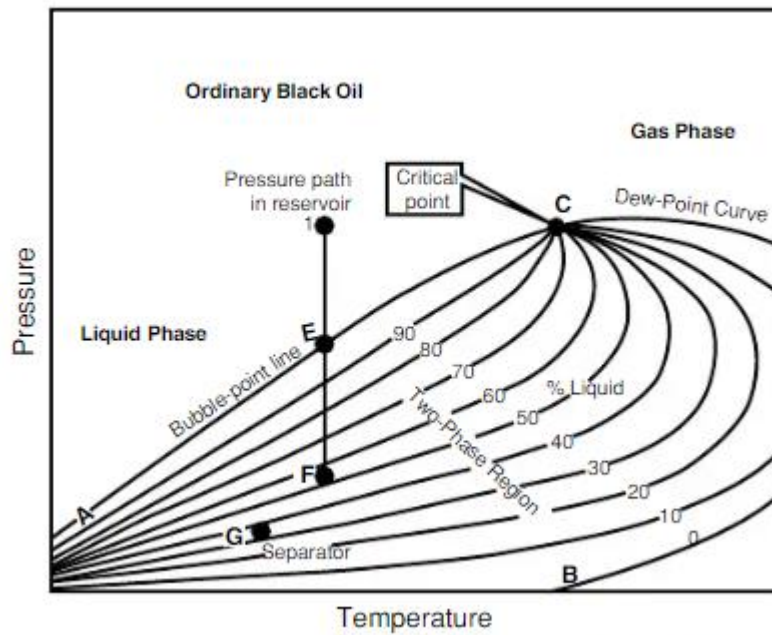
##### **1.6.1.1 Μαύρο πετρέλαιο (black oil)**

Όταν ένα πετρέλαιο είναι φτωχό σε πτητικά συστατικά τότε περιέχει σε μικρές ποσότητες αέριο εκ διαλύσεως και το σημείο φυσαλίδας του είναι χαμηλό. Ένα τέτοιο ρευστό καλείται μαύρο πετρέλαιο ή πετρέλαιο χαμηλής συρρίκνωσης. Για να επιτευχθεί σημαντικός κορεσμός σε αέριο μέσα στο κοίτασμα η πίεση πρέπει να μειωθεί σημαντικά. ( Βαρότσης , Μηχανική Ταμιευτήρων)

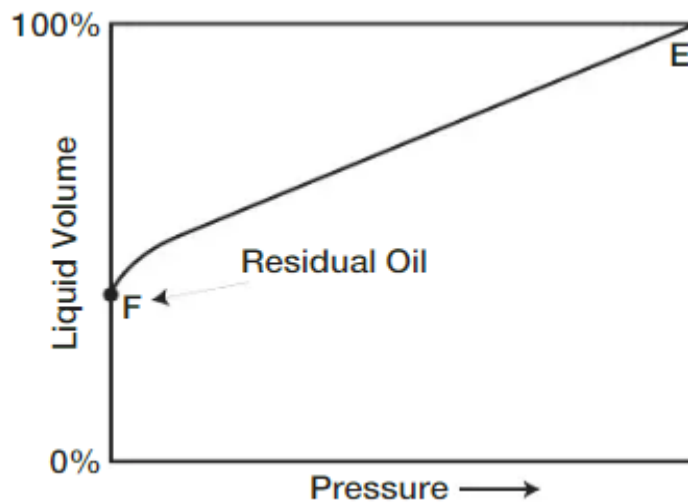
Το μαύρο πετρέλαιο χαρακτηρίζεται από:

- GOR 200-700 scf/stb
- Πυκνότητα πετρελαίου 15-40 °API (Ahmed, 2010)





Διάγραμμα 1 Φάκελος φάσεων για μαύρο πετρέλαιο (Ahmed, 2010)



Διάγραμμα 2 Καμπύλη υγρού για μαύρο πετρέλαιο (Ahmed, 2010)

#### 1.6.1.2 Πτητικό πετρέλαιο (volatile oil)

Ως πτητικό πετρέλαιο ή πετρέλαιο υψηλής συρρίκνωσης νοείται το μίγμα υδρογονανθράκων που αφενός διαθέτει σημαντική ποσότητα ελαφρών και ενδιάμεσων υδρογονανθράκων που δύνανται να εξατμισθούνε πολύ εύκολα και αφετέρου έχει κρίσιμη θερμοκρασία  $T_c$  ψηλότερη από τη θερμοκρασία που επικρατεί στον ταμιευτήρα. Στην περίπτωση αυτή η άντληση του πετρελαίου έχει ως αποτέλεσμα η πίεση κάποια στιγμή να εξισωθεί με το σημείο φουσαλίδας ( $P=P_b$ ) και

να σχηματιστεί μία αέρια φάση σε ισορροπία με την αρχική υγρή το ποσοστό της οποίας μεγαλώνει καθώς η πίεση μικραίνει.

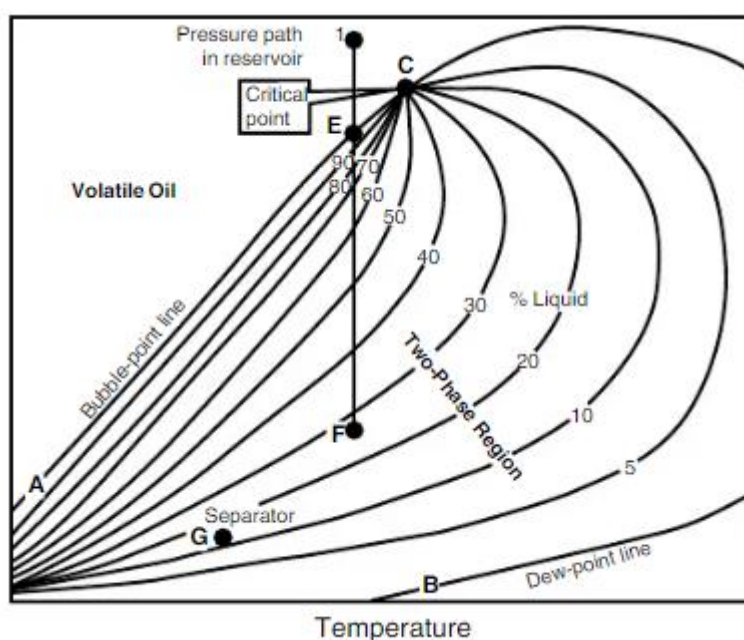
Η θερμοκρασία του ταμειυτήρα βρίσκεται κοντά στο κρίσιμο σημείο, με αποτέλεσμα η κατακόρυφος σε αυτήν που υποδηλώνει την πορεία εκμετάλλευσης να τέμνει πολλές ποιοτικές γραμμές για μικρή μεταβολή πίεσης. Το αποτέλεσμα είναι ο μεγάλος ρυθμός αύξησης του όγκου της αέριας φάσης σε σχέση με την πίεση, εντός του ταμειυτήρα.

Το ρευστό υπό πίεση με  $P > P_b$  είναι μονοφασικό υγρό και καλείται ακόρεστο διότι στις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που βρίσκεται, τυχόν διαθέσιμη επιπλέον ποσότητα αερίου θα μπορούσε να διαλυθεί σε αυτό. Αντίθετα το πετρέλαιο υπό πίεση  $P < P_b$  καλείται κορεσμένο διότι ευρισκόμενο ήδη σε διφασική ισορροπία δεν μπορεί να διαλύσει επιπλέον αέριο. Τα αντίστοιχα ισχύουν για τα ρευστά που βρίσκονται από την άλλη πλευρά του κρίσιμου σημείου. Τα δε σημεία φυσαλίδας και δρόσου είναι γνωστά επίσης και σαν πιέσεις κορεσμού.

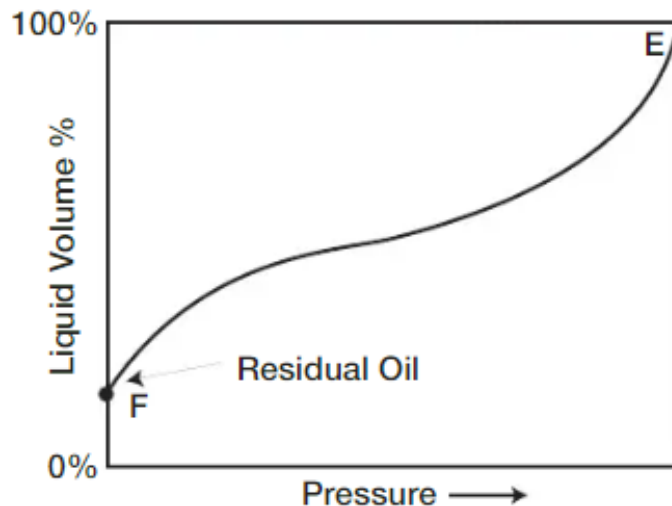
Το αέριο το οποίο ελευθερώνεται από το πετρέλαιο καλείται αέριο εκ διαλύσεως και είναι φανερό πως η ποσότητά του είναι συνάρτηση της ποσότητας των πτητικών συστατικών που περιέχονται στο αρχικό μίγμα. (Βαρότσης , Μηχανική Ταμειυτήρων)

Το πτητικό πετρέλαιο χαρακτηρίζεται από:

- $B_o$  μεγαλύτερου του 1.5 bbl/stb
- GOR μεταξύ 2000-3000 scf/stb
- Πυκνότητα πετρελαίου μεταξύ 45-55 °API (Ahmed, 2010)



Διάγραμμα 3 Φάκελος φάσεων για πτητικό πετρέλαιο (Ahmed, 2010)

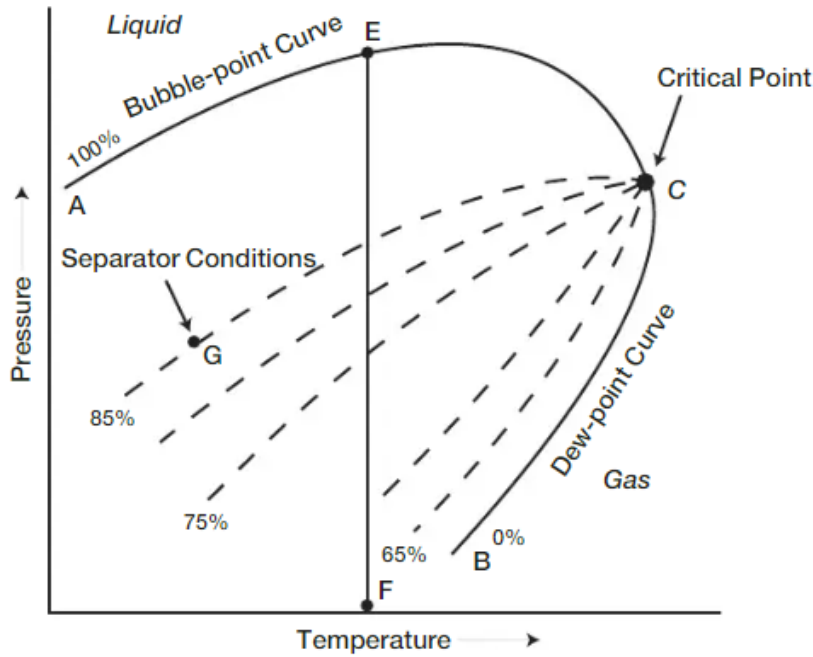


Διάγραμμα 4 Καμπύλη υγρού για πτητικό πετρέλαιο (Ahmed, 2010)

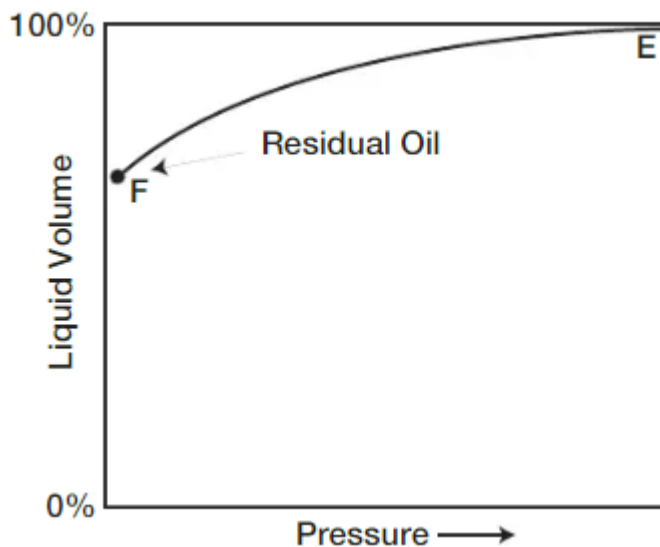
#### 1.6.1.3 Χαμηλής συρρίκνωσης πετρέλαιο (low – shrinkage oil)

Το διάγραμμα 5 είναι ένα τυπικό διάγραμμα πίεσης και θερμοκρασίας για πετρέλαιο χαμηλής συρρίκνωσης, ο λεγόμενος φάκελος φάσεων ενός πετρελαίου χαμηλής συρρίκνωσης. Το διάγραμμα 5 χαρακτηρίζεται από ποιοτικές γραμμές που συγκλίνουν στη καμπύλη του σημείου δρόσου. Η καμπύλη συρρίκνωσης υγρού όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 6, απεικονίζει τη συρρίκνωση των χαρακτηριστικών των ακατέργαστων πετρελαίων. Τα πετρέλαια χαμηλής συρρίκνωσης χαρακτηρίζονται από:

- Ογκομετρικό συντελεστή σχηματισμού πετρελαίου ( $B_o$ ) μικρότερο του 1.2 bbl/stb.
- GOR μικρότερο του 200 scf/stb.
- Πυκνότητα πετρελαίου μικρότερη του 35 °API.
- Μαύρο χρώμα (Ahmed, 2010)



Διάγραμμα 5 Φάκελος φάσεων για χαμηλής συρρίκνωσης πετρέλαιο (Ahmed, 2010)



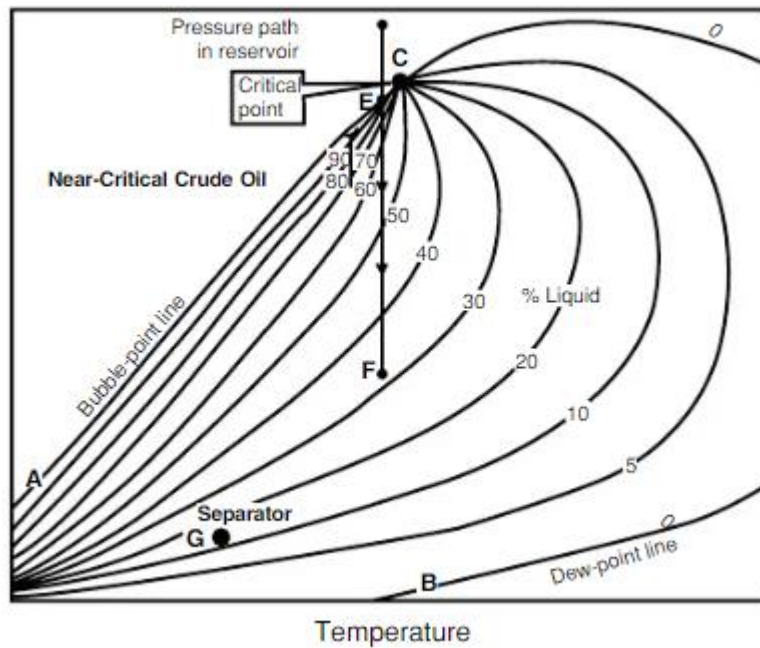
Διάγραμμα 6 Καμπύλη υγρού για χαμηλής συρρίκνωσης πετρέλαιο (Ahmed, 2010)

#### 1.6.1.4 Ακατέργαστο πετρέλαιο κοντά στο κρίσιμο σημείο (near-critical crude oil)

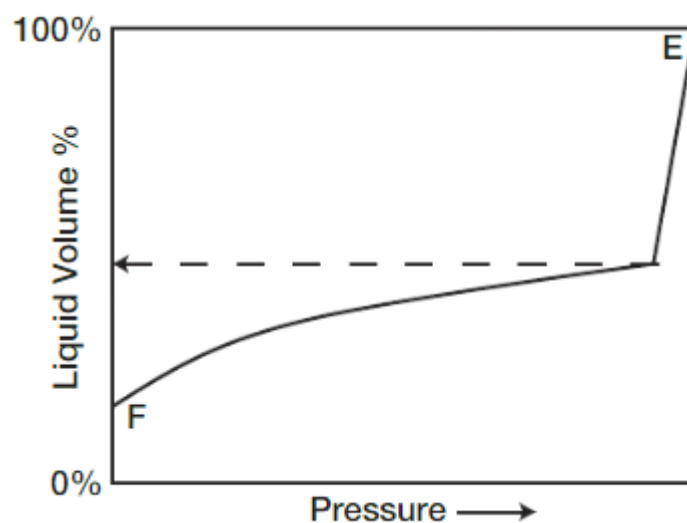
Αν η θερμοκρασία του ταμιευτήρα  $T$  είναι κοντά στη κρίσιμη θερμοκρασία  $T_c$  του συστήματος υδρογονανθράκων, όπως απεικονίζεται και στο διάγραμμα 7, τότε το μίγμα των υδρογονανθράκων χαρακτηρίζεται ως ακατέργαστο πετρέλαιο κοντά στο κρίσιμο σημείο. Επειδή όλες οι ποιοτικές γραμμές συγκλίνουν στο κρίσιμο σημείο, μία ισοθερμική πτώση πίεσης όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 7 στη γραμμή EF μπορεί να συρρικνώσει το ακατέργαστο πετρέλαιο από το 100% των όγκων των πόρων των

υδρογονανθράκων στο σημείο φυσαλίδας στο 55% ή λιγότερο σε πίεση 10-50 psia κάτω από το σημείο φυσαλίδας. Το ακατέργαστο πετρέλαιο κοντά στο κρίσιμο σημείο χαρακτηρίζεται από:

- υψηλό GOR της τάξεως των 3000scf/stb
- $B_o > 2$  bbl/stb
- Περιεκτικότητα κατά mol (C7+) 12.5-20%
- Περιεκτικότητα κατά mol C2- C6 35% ή και περισσότερο (Ahmed,2010)



Διάγραμμα 7 Φάκελος φάσεων για ακατέργαστο πετρέλαιο κοντά στο κρίσιμο σημείο (Ahmed, 2010)



Διάγραμμα 8 Καμπύλη υγρού για ακατέργαστο πετρέλαιο κοντά στο κρίσιμο σημείο (Ahmed, 2010)

## **Κεφάλαιο 2 Ανάλυση PVT**

Για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής υδρογονανθράκων από έναν ταμιευτήρα, τα ακριβή και αξιόπιστα δεδομένα για τις ογκομετρικές ιδιότητες και την ισορροπία φάσεων του ρευστού είναι απαραίτητα. Οι πληροφορίες αυτές απαιτούνται για την εκτίμηση των αποθεμάτων, το σχεδιασμό του βέλτιστου σχεδίου ανάπτυξης του ταμιευτήρα καθώς επίσης και τον καθορισμό της ποιότητας και της ποσότητας των παραγόμενων ρευστών. Κατά την παραγωγή, η πίεση των ταμιευτήρων μειώνεται σταδιακά με την άντληση των ρευστών, ενώ η θερμοκρασία θεωρείται ότι παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητη εφόσον δεν εφαρμόζονται εξειδικευμένες θερμικές τεχνικές ανάκτησης. Ως εκ τούτου, η πίεση του ταμιευτήρα αποτελεί την κύρια παράμετρο που καθορίζει τη συμπεριφορά των ρευστών, σε συνθήκες ταμιευτήρα, κατά τη διάρκεια της παραγωγής. Η μεταβολή των ογκομετρικών ιδιοτήτων και της ισορροπίας φάσεων του ρευστού κατά την κίνησή του (Σχήμα 3.1) από τον ταμιευτήρα στις γεωτρήσεις και εν τέλει στην επιφάνεια στις πρότυπες συνθήκες (60 °F, 14.7 psia) μπορεί να μελετηθεί με την ανάλυση ρουτίνας επί δείγματος των υδρογονανθράκων του ταμιευτήρα. ( Βαρότσης , Μηχανική Ταμιευτήρων)

### **2.1 Παρατήρηση πετρελαίου**

Η ανάλυση ρουτίνας υδρογονανθράκων γνωστή ως και ανάλυση PVT αποτελεί μία σειρά εργαστηριακών δοκιμών προκειμένου να χαρακτηριστεί επαρκώς το περιεχόμενο ρευστό και ειδικά κατά τα πρώτα στάδια ανάπτυξης και παραγωγής. Υπάρχουν πιο ειδικές μελέτες PVT που μπορούν να πραγματοποιηθούν σε επόμενη φάση της παραγωγής όπως κατά τη δευτερογενή και ειδικά την τριτογενή παραγωγή που αποσκοπούν στη μελέτη του ρευστού και στις δυνατότητες επαύξησης απόληψης πετρελαίου. (Βαρότσης , Μηχανική Ταμιευτήρων)

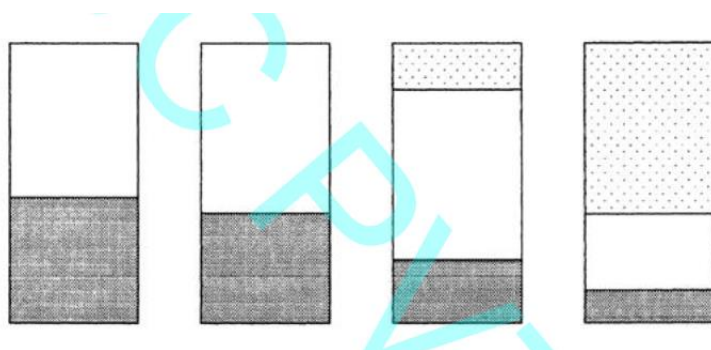
Οι βασικές μελέτες PVT για τα πετρέλαια είναι οι εξής:

- Μελέτη σταθερής μάζας
- Μελέτη διαφορικής εξάτμισης
- Μελέτη ιξώδους υγρής φάσης σαν συνάρτηση της πίεσης σε θερμοκρασία ταμιευτήρα
- Αριστοποίηση των συνθηκών διαχωρισμού

#### **2.1.1 Μελέτη σταθερής μάζας**

Κατά τη μελέτη σταθερής μάζας το δείγμα που προέρχεται από το ταμιευτήρα πετρελαίου αρχικά θερμαίνεται έως ότου φτάσει τη θερμοκρασία που επικρατεί στον

ταμειυτήρα και κατόπιν συμπιέζεται σε πίεση που είναι μεγαλύτερη από τη πίεση που επικρατεί στον ταμειυτήρα αλλά και από τη πίεση στο σημείο φυσαλίδας του ρευστού ( $P_b$ ). Εν συνεχεία το δείγμα εκτονώνεται ισοθερμοκρασιακά σε διαδοχικές μικρότερες πιέσεις υπό σταθερό όγκο όπως φαίνεται στην εικόνα 5. Όμως σε όλες τις πιέσεις ξεχωριστά πραγματοποιείται ανάδευση του δείγματος με σκοπό να επέλθει θερμοδυναμική ισορροπία. Τέλος σε κάθε μία από τις πιέσεις μετρούνται ο συνολικός όγκος του δείγματος ( $G+L$ ), η πίεση ισορροπίας, και οι αναλογίες όγκων  $G/L$ , ενώ υπολογίζονται η πίεση στο σημείο φυσαλίδας ( $P_b$ ) και ο συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπίεστικότητας ( $C_T$ ).

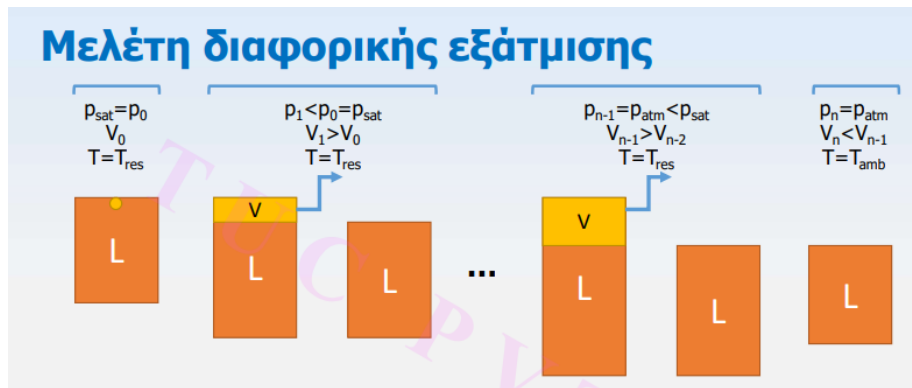


Εικόνα 3 Μελέτη εκτόνωσης σταθερής μάζας (Βαρότσης, Μηχανική Ταμειυτήρων)

### 2.1.2 Μελέτη διαφορικής εξάτμισης

Η μελέτη αυτή έχει σαν προορισμό να προσομοιώσει στο εργαστήριο τις μεταβολές στην θερμοδυναμική ισορροπία που λαμβάνουν χώρα μέσα στον ταμειυτήρα κατά τη διάρκεια της παραγωγής κάτω από το σημείο βρασμού του ρευστού, καθώς για λόγους διαφορετικής κινητικότητας η αέρια φάση συνεχώς απομακρύνεται από την υγρή φάση με την οποία έχει αποκαταστήσει προηγουμένως ισορροπία.

Κατά τη μελέτη διαφορικής εξάτμισης η πίεση είναι ίση με τη πίεση κορεσμού και η θερμοκρασία ίση με τη θερμοκρασία του ταμειυτήρα. Στη συνέχεια η πίεση μειώνεται και το ρευστό που υπάρχει μέσα στο κελί σιγά σιγά αρχίζει και εκτονώνεται. Η θερμοκρασία συνεχίζει να ισούται με τη θερμοκρασία του ταμειυτήρα. Ύστερα το παραγόμενο αέριο απομακρύνεται. Τέλος η θερμοκρασία γίνεται ίση με τη θερμοκρασία της ατμόσφαιρας και η πίεση ίση με την ατμοσφαιρική πίεση.



Εικόνα 4 Μελέτη διαφορικής εξάτμισης (Βαρότσης, Μηχανική Ταμιευτήρων)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν πειράματα εργαστηριακά PVT της διαφορικής εξάτμισης με σκοπό την ρύθμιση των μοντέλων καταστατικών εξισώσεων.

Οι ιδιότητες οι οποίες προσδιορίζονται από το πείραμα διαφορικής εκτόνωσης είναι:

- $B_o$  (Oil Formation Volume Factor): Συντελεστής μεταβολής όγκου του πετρελαίου. Είναι ο όγκος σε βαρέλια (rb) ( $V_o$  rc) του πετρελαίου σε κάθε βήμα ως προς τον όγκο που απομένει στο τελευταίο στάδιο της διαδικασίας ( $V_o$  sc):

$$B_o = \frac{V_o \text{ rc}}{V_o \text{ sc}} \left( \frac{\text{rb}}{\text{stb}} \right)$$

- $R_s$  (Solution Gas-Oil Ratio, GOR): Λόγος διαλελυμένου αερίου προς πετρέλαιο. Είναι ο όγκος του αερίου ( $V_g$  sc) που απομακρύνεται σε κάθε στάδιο της μελέτης ως προς τον όγκο του πετρελαίου που απομένει στο τελευταίο στάδιο της διαδικασίας ( $V_o$  sc):

$$R_s = \frac{V_g \text{ sc}}{V_o \text{ sc}} \left( \frac{\text{scf}}{\text{stb}} \right)$$

- Σχετική πυκνότητα πετρελαίου (Specific Gravity of Oil,  $S_{g,\text{oil}}$ ). Ορίζεται ως ο λόγος της πυκνότητας του πετρελαίου στις συνθήκες του πειραματικού κελιού προς την πυκνότητα του νερού στους 60 °F:

$$S_{g \text{ oil}} = \frac{\rho_{\text{oil}} \text{ rc}}{\rho_{\text{water}} (60 \text{ F})}$$

- Συντελεστής συμπιεστότητας ή συντελεστής απόκλισης από την ιδανική κατάσταση (compressibility factor,  $z$ ).

$$P * V = n * Z * R * T$$

$$Z = \frac{P * V}{n * R * T}$$



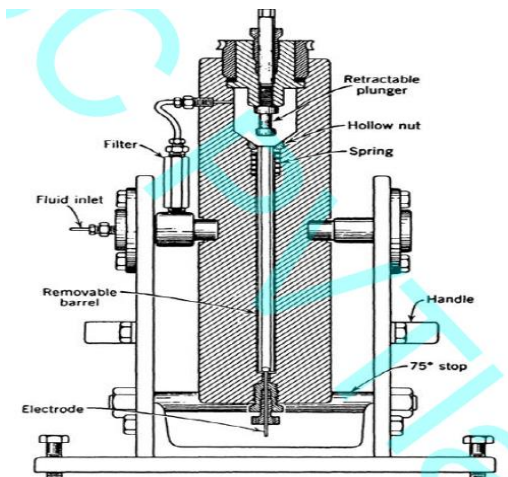
- Σχετική πυκνότητα αερίου (Specific Gravity of Gas,  $S_{g, gas}$ ). Ορίζεται ως ο λόγος της πυκνότητας του αερίου που απελευθερώνεται σε κάθε στάδιο της μελέτης ως προς την πυκνότητα του αέρα στους 60 °F:

$$S_{g, gas} = \frac{\rho_{gas} \cdot r_c}{\rho_{air} (60 F)}$$

### 2.1.3 Μελέτη προσδιορισμού ιξώδους υγρής φάσης ταμιευτήρα

Το ιξώδες των υγρών φάσεων ταμιευτήρα σε πίεση και θερμοκρασία κοιτάσματος μετρείται χρησιμοποιώντας ιξωδόμετρα κυλιόμενης σφαίρας. Η συσκευή αυτή μετρά ηλεκτρονικά το χρόνο που απαιτεί μία χαλύβδινη σφαίρα για να κυλήσει διαμέσου ενός σωλήνα πλήρους με το υγρό του οποίου το ιξώδες επιδιώκεται να μετρηθεί. Οι διαστάσεις και οι ιδιότητες της σφαίρας είναι γνωστές με ακρίβεια και με την εφαρμογή του νόμου του Stokes υπολογίζεται και το ιξώδες.

Η διάμετρος της σφαίρας και επομένως το διάκενο μεταξύ σφαίρας και τοιχωμάτων του σωλήνα καθώς επίσης και η γωνία κλίσεως του οργάνου κατά τη διάρκεια της μέτρησης, ρυθμίζονται ανάλογα με την αναμενόμενη τιμή του ιξώδους του υγρού. (Βαρότσης, Μηχανική Ταμιευτήρων)



Εικόνα 5 Ιξωδόμετρο κυλιόμενης σφαίρας για τη μέτρηση του ιξώδους υγρών σε ταμιευτήρες (Βαρότσης, Μηχανική Ταμιευτήρων)

### 2.1.4 Τεστ διαχωριστήρα

Ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα ρευστού του ταμιευτήρα υφίσταται μία αλληλουχία εκτονώσεων ίδια με αυτές που υφίσταται το ρευστό του κοιτάσματος όταν διέλθει από το σύστημα διαχωρισμού στην επιφάνεια. Ο αντικειμενικός σκοπός είναι να προσδιοριστεί ο αριθμός των διαχωριστήρων (συνήθως για τα πετρέλαια είναι ένας) καθώς και οι συνθήκες λειτουργίας τους ώστε αριστοποιηθεί η παραγωγή με το να

μειωθεί η παραγωγή αερίου και να μεγιστοποιηθεί η παραγωγή υγρού τανκ το οποίο έχει τη μεγαλύτερη εμπορική αξία.

Η θερμοκρασία διαχωρισμού επιβάλλεται στο σύστημα συνήθως από τη θερμοκρασία με την οποία το παραγόμενο υγρό φτάνει στην επιφάνεια και επομένως πρόκειται βασικά για αριστοποίηση μιας μεταβλητής, της πίεσης διαχωρισμού. Το ισοζύγιο μάζας μεταξύ των moles του αρχικού υγρού που εισέρχεται και των προϊόντων που εξέρχονται από το σύστημα, χρησιμοποιείται για το προσδιορισμό μεγεθών όπως ο ογκομετρικός συντελεστής υγρής φάσης  $B_o$ , ο συντελεστής συρρίκνωσης SF και το GOR κάθε ισοθερμοκρασιακής εκτόνωσης. (Βαρότσης , Μηχανική Ταμιευτήρων)

## **2.2 Μελέτη αερίων συμπυκνωμάτων**

Η φάση η οποία κατεξοχήν παράγεται από ένα ταμιευτήρα αερίου συμπυκνώματος είναι η αέρια καθώς η υγρή είτε παραμένει ακίνητη μέσα στους πόρους του κοιτάσματος είτε συμβάλλει κατά ένα μικρό ποσοστό στην ολική παραγωγή. Για τα αέρια συμπυκνώματα εκτελούνται οι ακόλουθες μελέτες (Βαρότσης, Μηχανική Ταμιευτήρων):

- Μελέτη σταθερής μάζας (όπως ακριβώς διεξάγεται και για τα πετρέλαια με τη διαφορά ότι εδώ μετريέται το  $p_d$ ).
- Μελέτη παραγωγής υπό σταθερό όγκο.

## **2.3 Στόχος και αντικείμενο διπλωματικής εργασίας**

Το αντικείμενο της εργασίας είναι η προσαρμογή (tuning) μίας κυβικής καταστατικής εξίσωσης (Peng-Robinson) για την προσομοίωση της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς υδρογονανθράκων σε συνθήκες ταμιευτήρα, με χρήση εμπειρικών σχέσεων. Η διαδικασία της δειγματοληψίας πετρελαϊκού ρευστού αποτελεί θεμελιώδες βήμα για την ανάπτυξη ενός κοιτάσματος καθώς η ακόλουθη εργαστηριακή ανάλυση PVT παρέχει πληθώρα πληροφοριών σχετικά με τη θερμοδυναμική συμπεριφορά του ρευστού. Δεδομένου όμως του υψηλού κόστους των εργαστηριακών μελετών αυτές περιορίζονται σε μικρό εύρος συνθηκών που. Έτσι κρίνεται αναγκαία η χρήση ενός μαθηματικού μοντέλου, το οποίο θα είναι ικανό να εκτιμά τις τιμές των απαιτούμενων πετρελαϊκών ιδιοτήτων ( $B_o$ ,  $P_b$ ,  $R_s$ ) στο σύνολο συνθηκών που αναμένεται να απαντηθούν κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης τόσο εντός του ταμιευτήρα όσο και στις σωληνώσεις των γεωτρήσεων παραγωγής. Η πιο κοινή μέθοδος είναι αυτή των κυβικών καταστατικών εξισώσεων η ακρίβεια των οποίων όταν εφαρμόζονται σε πετρελαϊκά μίγματα είναι ανεπαρκής και βελτιστοποιείται μόνο εφόσον αυτές ρυθμιστούν προκειμένου οι προβλέψεις τους να

προσαρμοστούν στα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα. Δεδομένου ότι η συγκεκριμένη διαδικασία δεν είναι εύκολη και επαφίεται κατά κύριο λόγο στην εμπειρία του χρήστη, έχουν προταθεί διάφορες προσεγγίσεις στη βιβλιογραφία, που αποσκοπούν στο να «αυτοματοποιήσουν» τη διαδικασία ρύθμισης. Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματοποιείται εφαρμογή, έλεγχος και αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας αυτών των καταστατικών εξισώσεων πάνω σε μία ποικιλία πετρελαϊκών ρευστών. Εν συνεχεία, τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας είναι απαραίτητα στον εμπλουτισμό της πετρελαϊκής βιομηχανίας και βιβλιογραφίας καθώς στόχος των Μηχανικών πετρελαίου σήμερα είναι η βελτιστοποίηση της εκμετάλλευσης των υπόγειων ταμιευτήρων υδρογονανθράκων. Αναλυτικότερα, καθώς η παραγωγή καθορίζεται από τη θερμοδυναμική συμπεριφορά των μιγμάτων υδρογονανθράκων μέσα στον ταμιευτήρα, είναι αναγκαίος και απαραίτητος ο προσδιορισμός της θερμοδυναμικής κατάστασης του πετρελαϊκού μίγματος εντός του ταμιευτήρα κάθε χρονική στιγμή και σε κάθε θέση σε οποιοσδήποτε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας βρισκόμαστε. Εφόσον η μέτρηση και η φυσική παρατήρηση της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς των μιγμάτων μέσα σε έναν ταμιευτήρα δεν είναι δυνατή απαιτείται ένας τρόπος εκτίμησής τους που δεν είναι άλλος από τη χρήση θερμοδυναμικών μοντέλων στην προσομοίωση ταμιευτήρων. Τέλος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η λεπτομερής αξιολόγηση της ποιότητας των αποτελεσμάτων των κυβικών καταστατικών εξισώσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τα αντίστοιχα πετρελαϊκά δείγματα και η παραγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το ποια από αυτές τις μεθόδους οδηγεί σε πιο αξιόπιστα θερμοδυναμικά αποτελέσματα σχετικά με τις πειραματικές μετρήσεις που προήλθαν εργαστηριακά από τη διαφορική εξάτμιση. Για το σκοπό αυτό, έγινε χρήση πραγματικών PVT δεδομένων πετρελαϊκών ρευστών και εφαρμογή ύστερα προσεγγιστικών καταστατικών εξισώσεων σε καθένα από αυτά, με την απαιτούμενη τελική ρύθμιση αυτών των καταστατικών εξισώσεων. Στη συνέχεια, έγινε αξιολόγηση του βαθμού επιτυχίας κάθε προσέγγισης με βάση την ακρίβεια των παραγόμενων μοντέλων ως προς τις πειραματικές μετρήσεις.

Το αντικείμενο της δοθείσας εργασίας έχει φυσικά αναλυθεί και επεξεργαστεί από αρκετούς επιστήμονες:

Για παράδειγμα μέσω της SPE (Society of Petroleum Engineers) που είναι μία μη κερδοσκοπική επαγγελματική ένωση με περισσότερα από 124.800 μέλη σε 134 χώρες τα οποία ασχολούνται με την εξερεύνηση και παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου, βρέθηκαν άρθρα ερευνητών που ασχολήθηκαν με τη συλλογή των καταλληλότερων PVT συσχετίσεων για κάθε μία από τις ιδιότητες του πετρελαίου. Αναλυτικότερα πραγματοποιήθηκε μία έρευνα σχετικά με τα πετρέλαια της Αιγύπτου

και με το ποια συσχέτιση PVT προσεγγίζει καλύτερα τη πειραματική τιμή του  $B_o$  και του  $R_s$ .

Αναλυτικότερα η μελέτη αυτή χρησιμοποίησε πειραματικά δεδομένα από 35 αιγυπτιακά πετρέλαια. Στη συνέχεια τα πειραματικά αυτά δεδομένα τα εισήγαγε σε έξι συσχετίσεις. Οι συσχετίσεις που χρησιμοποίησε είναι του Standing, του Al-Marhoun, του Glaso, των Petrofsky&Farshad, των Vasquez&Begg και του Dindrouk Christman. (Zahaby,2012)

Παρακάτω απεικονίζονται τα όρια των πειραματικών δεδομένων των 35 πετρελαϊκών δειγμάτων:

Πειραματικά δεδομένα	Ελάχιστο	Μέγιστο
Πυκνότητα πετρελαίου (°API)	17.2	51.28
$B_o$ (bbl/stb)	1.049	4.47365
$R_s$ (scf/stb)	8	7803
$P_b$ (psia)	49	4739
$T$ ταμιευτήρα (°F)	40	270.9

Αυτά τα πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό τόσο του  $B_o$  όσο και του  $R_s$ , χρησιμοποιώντας τις έξι συσχετίσεις.

Παρακάτω απεικονίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις συσχετίσεις καθώς και το AAE (Zahaby,2012).

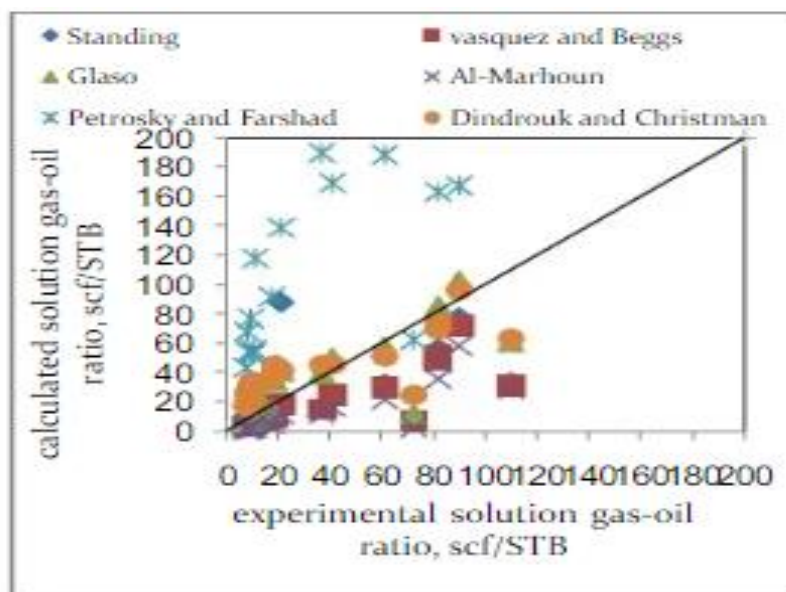
Όπου,

$$AAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{abs(πραγματικής\ τιμής - πειραματικής\ τιμής)}{πειραματική\ τιμή} * 100$$

*= μέσο απόλυτο σφάλμα*

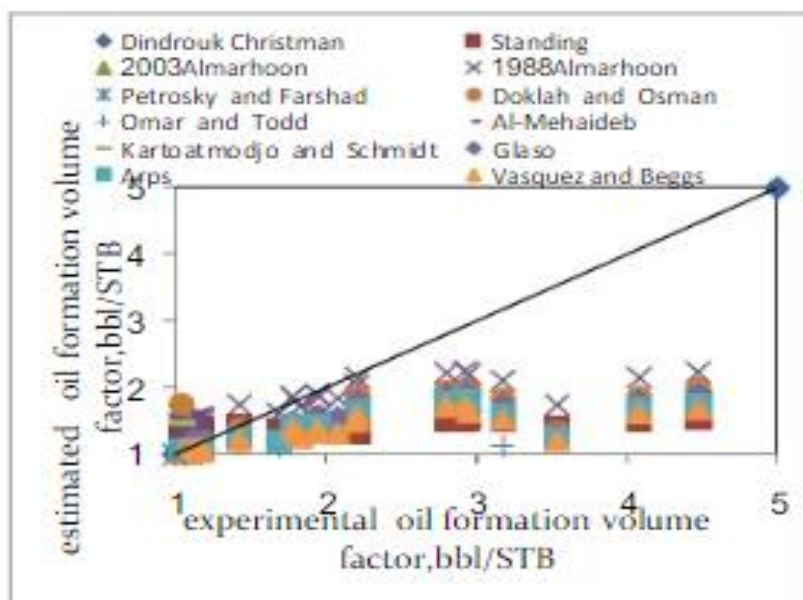
Ιδιότητα	Συσχέτιση	Περιορισμοί				AAE%
		°API	T(°F)	SGg	Rs(sc/ stb)	
Bo	Standing	16.5-63.8	100-258	0.59-0.95	20-1425	20.685
	Al-Marhoun	19.4-44.6	74-240	0.753-1.367	24-1453	23.915
	Glaso	22.3-48.1	80-280	0.65-1.28	90-2637	26.153
	Petrofsky& Farshad	16.3-45	114-288	0.5781-0.8519	217-1406	86.635
	Vasquez& Begg	15.3-59.3	75-294	0.511-1.35	0-2199	-
	Dindrouk Christman	14.7-40	117-276	0.6017-1.027	133-3050	-

Καλύτερη προσέγγιση για την ιδιότητα αερίου – πετρελαίου Rs (scf/stb) στο εύρος 0-120 scf/stb είχε ο Glaso, όπως φαίνεται και στην εικόνα 9, καθώς τα σημεία του Glaso σχεδόν ταυτίζονται με τη διαγώνιο της γραφικής παράστασης έως το Rs φτάσει τα 120 scf/stb. (Zahaby,2012)



Εικόνα 6 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το Rs(sc/STB) (Zahaby, 2012)

Καλύτερη προσέγγιση για την ιδιότητα του ογκομετρικού συντελεστή του πετρελαίου Bo (bbl/stb), στο εύρος 1-2 bbl/stb (volatile oils ) είχε ο Al-Marhoun 1988, όπως φαίνεται και στην εικόνα 10, καθώς έως τα 2 bbl/stb παρατηρείται πως τα σημεία που ανήκουν στη συσχέτιση του Al-Marhoun πέφτουν σχεδόν πάνω στη διαγώνιο γραμμή της γραφικής παράστασης. (Zahaby,2012)



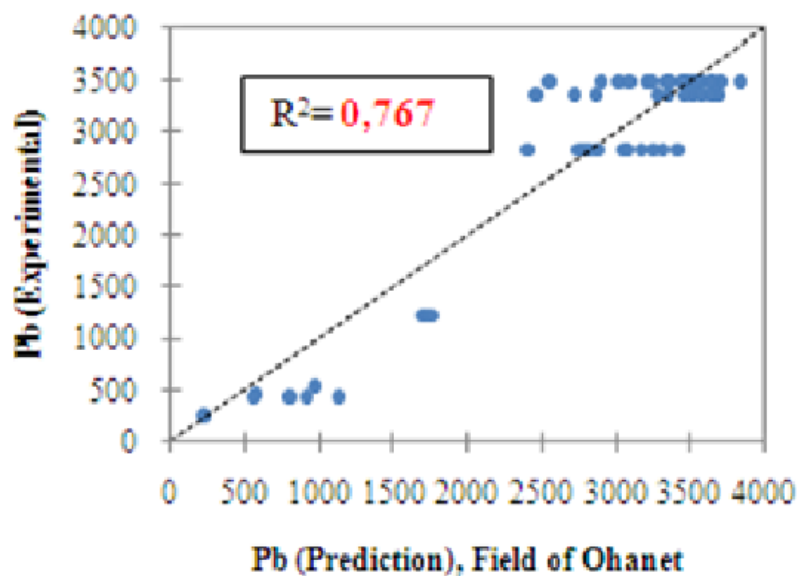
Εικόνα 7 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το Bo(bbl/stb) (Zahaby, 2012)

Ακόμη υπήρχαν και άλλοι ερευνητές που ασχολήθηκαν με το θέμα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας όπως οι Hadj Mohamed Sidrouhou & Mourad Korichi. Οι συγκεκριμένοι χρησιμοποίησαν για την έρευνά τους, 884 δείγματα πετρελαίου, τα οποία προήλθαν από 51 διαφορετικές γεωτρήσεις περιοχών της Νότιας Αλγερίας, όπως των περιοχών Bir Berkine, Hassi Messaoud και Ohanet. Ύστερα από την επεξεργασία που έκαναν στα δεδομένα μόνο 384 χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση του Pb και του Bo. (Sindrouhou, 2013)

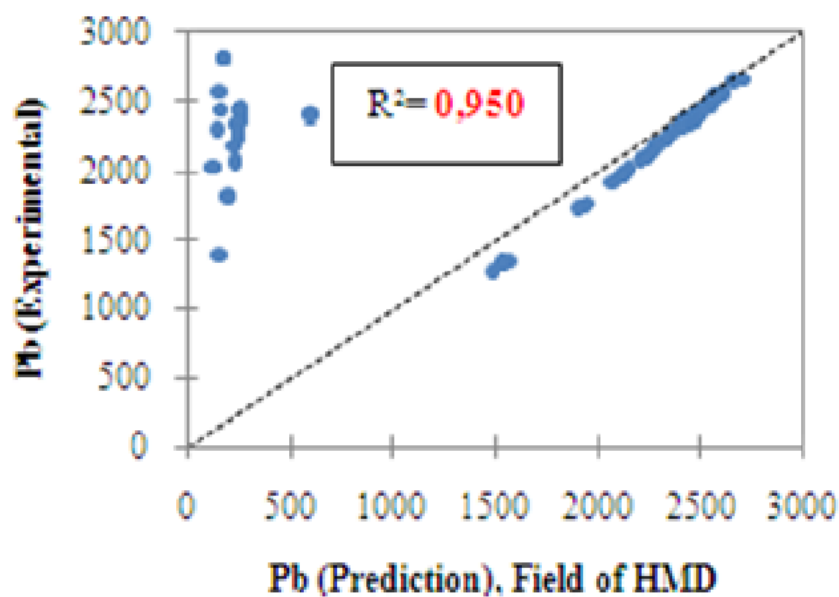
Areas	Bir Berkine	HMD	Ohanet	Total
Number of the samples	268	512	104	884
Number of the data	156	157	71	384

Οι ερευνητές εισήγαγαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

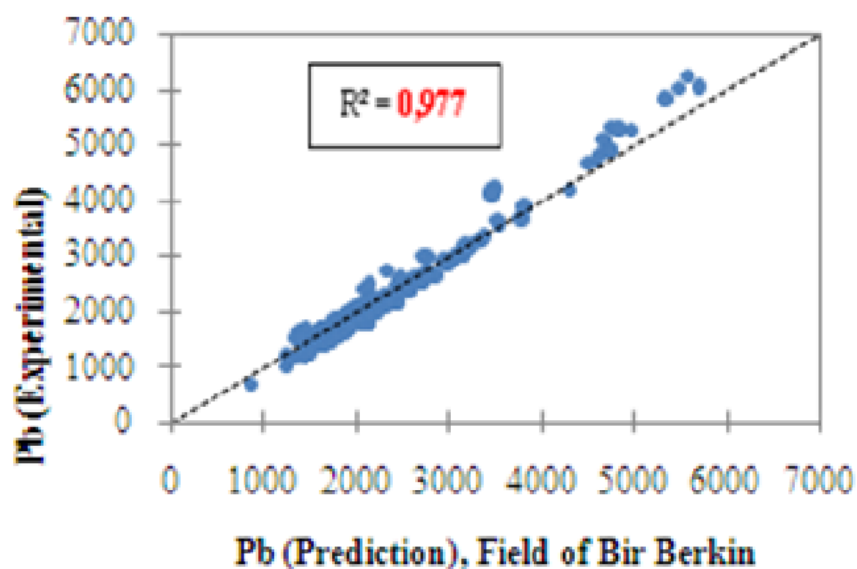
- Σχετικά με τη πίεση στο σημείο φυσαλίδας (Pb)



Εικόνα 8 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το Pb(psa) Ohanet (Sindrouhou, 2013)



Εικόνα 9 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το Pb(psa), περιοχής HMD (Sindrouhou, 2013)



Εικόνα 10 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το Pb(psia), περιοχής Bir Berkin (Sindrouhou, 2013)

Correlations	<i>Bir Birkin Field</i>			<i>HMD Field</i>			<i>Ohanet Field</i>		
	$E_a$	s	$R^2$	$E_a$	s	$R^2$	$E_a$	s	$R^2$
Standing (47)	46,35	44,35	-	25,91	38,05	-	28,39	34,08	-
Lasater (58)	45,46	42,93	-	32,49	24,71	-	18,48	07,13	-
Vasquez et Beggs (80)	47,37	49,45	-	31,02	42,06	-	30,57	36,07	-
Glaser (80)	41,25	44,66	-	32,04	42,58	-	36,34	40,72	-
Al-Marhoun (88)	31,73	26,51	-	26,50	34,68	-	19,24	24,51	-
Al-Marhoun (88) modified (This study)	20,31	26,96	0,977	-	-	-	-	-	-
Standing (47) modified (This study)	-	-	-	19,57	107,5	0,950	-	-	-
Lasater (58) modified (This study)	-	-	-	-	-	-	17,68	09,47	0,767
Neural Network Model (This study)	11,89	-	0,756	03,30	-	0,778	02,28	-	0,996

Εικόνα 11 Αποκλίσεις και σφάλματα των συσχετίσεων ανάλογα τη κάθε περιοχή όσο αφορά το Pb(psia) (Sindrouhou, 2013)



Correlations	$E_a$	s	$R^2$
Standing (47)	34,48	42,81	-
Lasater (58)	34,30	28,06	-
Vazquez et Beggs (80)	37,53	47,17	-
Glazo (80)	36,76	46,70	-
Al-Marhoun (88)	27,28	31,28	-
Al-Marhoun (88) modified (This study)	25,45	46,99	0,762
Neural Network Model (This study)	10,97	-	-

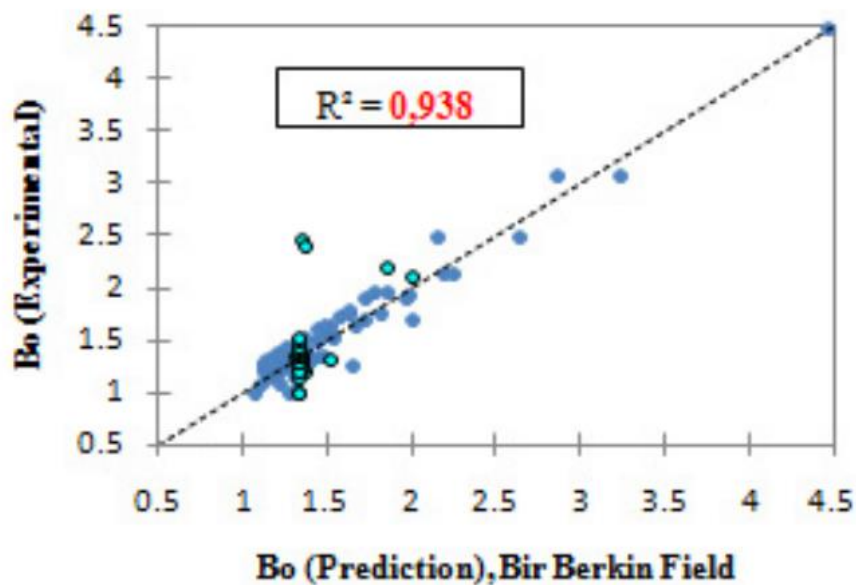
Εικόνα 12 Στατιστική ανάλυση συσχετίσεων (Sindrouhou, 2013)

Οι εικόνες 11 ,12, 13 αντιπροσωπεύουν τη σύγκριση μεταξύ του πειραματικού Pb και του εκτιμώμενου Pb, με τροποποιημένες συσχετίσεις για κάθε περιοχή και με συντελεστή συσχέτισης  $R^2=0.977$  , 0.950, 0.767, 0.762 για τις περιοχές Bir Berkine , HMD και Ohanet αντίστοιχα. (Sindrouhou, 2013)

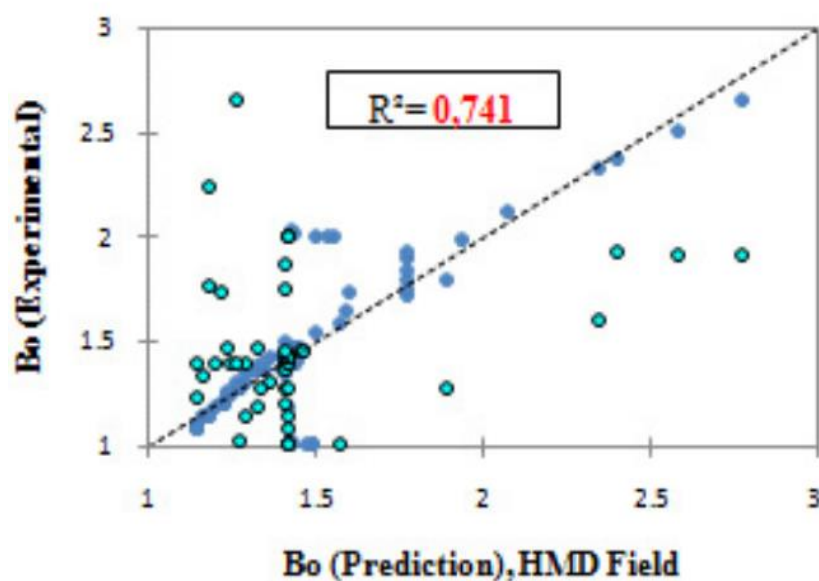
Στην εικόνα 14 βλέπουμε μία στατιστική ανάλυση των τριών περιοχών (Bir Berkine, HMD, Ohanet).

Οι εικόνες 13 και 14, αποδεικνύουν πως η συσχέτιση του Al-Marhoun έχει τα λιγότερα σφάλματα για τα δεδομένα των περιοχών Bir Berkine και για τα ομαδοποιημένα δεδομένα των τριών περιοχών, η συσχέτιση του Standing έχει τα λιγότερα σφάλματα για τα δεδομένα της περιοχής HMD και η συσχέτιση του Lasaster για τα δεδομένα της περιοχής Ohanet. Η στατιστική ανάλυση δείχνει σημαντική βελτίωση στο σφάλμα με τροποποιημένους συντελεστές και με το μοντέλο network of neuron. (Sindrouhou, 2013)

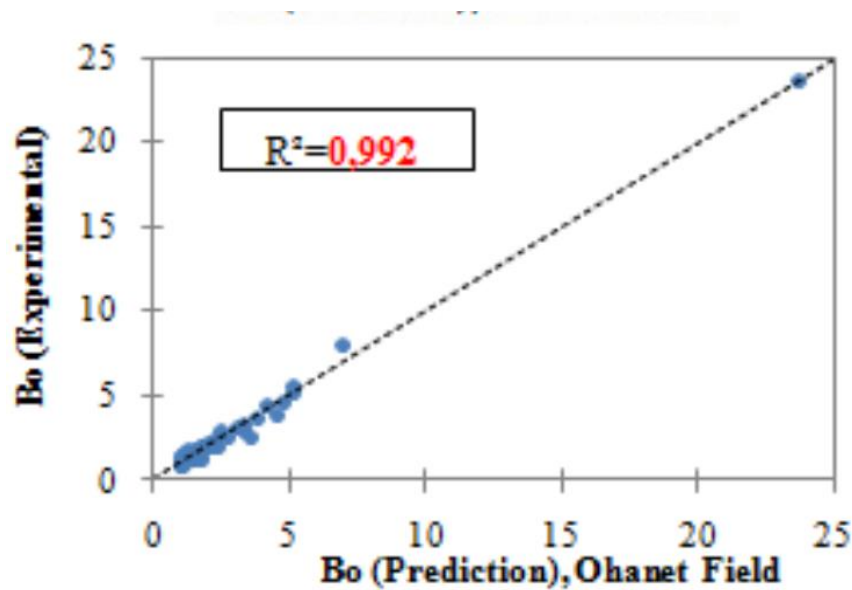
- Σχετικά με τον ογκομετρικό συντελεστή του πετρελαίου ( $B_o$ )



Εικόνα 13 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το  $B_o(bbl/stb)$ , Bir Berkin (Sindrouhou, 2013)



Εικόνα 14 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το  $B_o(bbl/stb)$ , περιοχή HMD (Sindrouhou, 2013)



Εικόνα 15 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το  $Bo(bbl/stb)$ , περιοχή Ohanet (Sindrouhou, 2013)

Correlations	<i>Bir Birkin Field</i>			<i>HMD Field</i>			<i>Ohanet Field</i>		
	$E_a$	s	$R^2$	$E_a$	s	$R^2$	$E_a$	s	$R^2$
Standing (47)	16,13	43,76	-	06,97	14,18	-	11,37	15,70	-
Vasquez et Beggs (80)	11,19	21,85	-	08,07	14,49	-	15,72	16,69	-
Glaser (80)	13,79	30,12	-	07,64	14,02	-	10,88	14,24	-
Al-Marhoun (88)	14,55	34,82	-	07,67	14,32	-	10,76	15,24	-
Al-Marhoun (92)	13,54	32,52	-	07,44	14,35	-	09,79	12,76	-
Vasquez et Beggs (80) modified (This study)	08,86	17,20	0,938	-	-	-	-	-	-
Standing (47) modified (This study)	-	-	-	06,45	13,14	0,741	-	-	-
Al-Marhoun (92) modified (This study)	-	-	-	-	-	-	08,91	12,36	0,992

Εικόνα 16 Αποκλίσεις και σφάλματα των συσχετίσεων ανάλογα τη κάθε περιοχή όσο αφορά το  $Bo(bbl/stb)$  (Sindrouhou, 2013)

Correlations	E <sub>a</sub>	s	R <sup>2</sup>
Standing (47)	11,13	29,79	-
Vazquez et Beggs (80)	11,02	18,75	-
Glaser (80)	10,80	22,13	-
Al-Marhoun (88)	10,42	23,21	-
Al-Marhoun (92)	10,23	23,05	-
Al-Marhoun (92) modified (This study)	10,09	22,33	0,841
Neural Network Model (This study)	09,26	-	-

Εικόνα 17 Στατιστική ανάλυση συσχετίσεων (Sindrouhou, 2013)

Οι εικόνες 15, 16 και 17 αντιπροσωπεύουν τη σύγκριση μεταξύ του πειραματικού Bo και του εκτιμώμενου Bo, με τροποποιημένες συσχετίσεις για κάθε περιοχή και με συντελεστή συσχέτισης  $R^2=0.938$ ,  $0.741$ ,  $0.992$ ,  $0.841$  για τις περιοχές Bir Berkine, HMD και Ohanet αντίστοιχα. (Sindrouhou, 2013)

Η στατιστική ανάλυση δείχνει σημαντική βελτίωση στο σφάλμα με τροποποιημένους συντελεστές και με το μοντέλο network of neuron. (Sindrouhou, 2013)

Οι ερευνητές συμπέραναν ότι:

- Οι συσχετίσεις που δίνουν καλύτερες προσεγγίσεις αναφορικά με το Pb είναι αυτή του Al-Marhoun για την περιοχή Bir Berkine, του Standing για τη περιοχή HMD και του Lasaster για τη περιοχή Ohanet.
- Οι συσχετίσεις που δίνουν καλύτερες προσεγγίσεις αναφορικά με το Bo είναι αυτή των Vasquez & Beggs για τη περιοχή Bir Berkine, αυτή του Standing για τη περιοχή HMD και αυτή του Al-Marhoun για την περιοχή Ohanet. Γενικά όμως όσο αφορά το Bo όλες οι συσχετίσεις έδειξαν καλές προσεγγίσεις αναφορικά με τα πειραματικά δεδομένα. (Sindrouhou, 2013)

Ένας ακόμη ερευνητής παρουσίασε στο βιβλίο του (Ahmed, 2010) ένα παράδειγμα υπολογισμού του ογκομετρικού συντελεστή Bo (scf/stb) μέσω έξι διαφορετικών συσχετίσεων. Ως μέθοδο 1 όρισε τη συσχέτιση του Standing (Ahmed,2010):

$$Bo = 0.9759 + 0.000120 * [Rs * (\frac{SGg}{SGo})^{0.5} + 1.25 * (T - 460)]^{1.2}$$

Ως μέθοδο 2 όρισε τη συσχέτιση των Vasquez&Begg (Ahmed,2010):

$$Bo = 1.0 + C1 * Rs + (T - 520) * (\frac{API}{SGg}) * (C2 + C3 * Rs)$$

Ως μέθοδο 3 όρισε τη συσχέτιση του Glaso (Ahmed,2010):

$$Bo = 1.0 + 10^A$$

Ως μέθοδο 4 όρισε τη συσχέτιση του Al-Marhoun (Ahmed,2010):

$$B_o = 0.497069 + 0.000862963 * T + 0.00182594 * F + 0.00000318099 * F^2$$

Ως μέθοδο 5 όρισε τη συσχέτιση των Petrofsky&Farshaad (Ahmed,2010):

$$B_o = 1.0113 + 7.2046 * (10^{-5}) * A$$

Ο Πίνακας 3 δείχνει τα πειραματικά δεδομένα PVT έξι ακατέργαστων πετρελαίων που χρησιμοποιήθηκαν για τη προσέγγιση του  $B_o$ . Έτσι υπολογίστηκε το  $B_o$  στη πίεση του σημείου φυσαλίδας, αυτών των έξι πετρελαϊκών δειγμάτων, μέσω των παραπάνω συσχετίσεων. Τέλος σύγκρινε τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τα πειραματικά αποτελέσματα, υπολογίζοντας ταυτόχρονα και το AAE. (Ahmed,2010)

Oil	$T$	$p_b$	$R_s$	$B_o$	$\rho_o$	$c_o$ at $p > p_b$	$p_{sep}$	$T_{sep}$	API	$\gamma_g$
1	250	2377	751	1.528	38.13	$22.14 \times 10^{-6}$ at 2689	150	60	47.1	0.851
2	220	2620	768	1.474	40.95	$18.75 \times 10^{-6}$ at 2810	100	75	40.7	0.855
3	260	2051	693	0.529	37.37	$22.69 \times 10^{-6}$ at 2526	100	72	48.6	0.911
4	237	2884	968	1.619	38.92	$21.51 \times 10^{-6}$ at 2942	60	120	40.5	0.898
5	218	3065	943	0.570	37.70	$24.16 \times 10^{-6}$ at 3273	200	60	44.2	0.781
6	180	4239	807	0.385	46.79	$11.65 \times 10^{-6}$ at 4370	85	173	27.3	0.848

Πίνακας 2 Πειραματικά δεδομένα των έξι πετρελαϊκών δειγμάτων (Ahmed,2010)

		Μέθοδος				
Πετρέλαιο	Bo (bbl/stb) πειραματικό	1	2	3	4	5
1	1.528	1.506	1.474	1.473	1.516	1.552
2	1.474	1.487	1.450	1.459	1.477	1.508
3	1.529	1.495	1.451	1.461	1.511	1.556
4	1.619	1.618	1.542	1.589	1.575	1.632
5	1.570	1.571	1.546	1.541	1.554	1.584
6	1.385	1.421	1.389	1.438	1.414	1.433
%AAE	-	1.7	2.8	2.8	1.3	1.8

Έτσι έβγαλε το συμπέρασμα ότι η καλύτερη συσχέτιση για τον υπολογισμό του Bo σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι του Al-Marhoun. (Ahmed,2010)  
Ο ίδιος ερευνητής στο βιβλίο του (Ahmed,2010) υπολόγισε την αναλογία υγρού αερίου Rs (scf/stb) έξι διαφορετικών πετρελαϊκών δειγμάτων, χρησιμοποιώντας τις συσχετίσεις του Standing, Al-Marhoun, Glaso, Petrofsky&Farshad και των Vasquez&Begg (Ahmed,2010). Τέλος σύγκρινε τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τα πειραματικά αποτελέσματα, υπολογίζοντας ταυτόχρονα και το AAE. (Ahmed,2010).

Ως μέθοδο 1 όρισε τη συσχέτιση του Standing (Ahmed,2010)

Ως μέθοδο 2 όρισε τη συσχέτιση των Vasquez&Begg (Ahmed,2010)

Ως μέθοδο 3 όρισε τη συσχέτιση του Glaso (Ahmed,2010)

Ως μέθοδο 4 όρισε τη συσχέτιση του Al-Marhoun (Ahmed,2010)

Ως μέθοδο 5 όρισε τη συσχέτιση των Petrofsky&Farshaad (Ahmed,2010)

Παρακάτω απεικονίζονται τα πειραματικά δεδομένα των έξι πετρελαϊκών δειγμάτων.

Πετρέλαιο	T (°F)	SGg	oAPI	Pb(ψia)	SGo	Rs πειραματικό
1	250	0.851	47.1	2377	38.13	751
2	220	0.855	40.7	2620	40.95	768
3	260	0.911	48.6	2051	37.37	693
4	237	0.850	40.5	5884	38.92	968
5	218	0.814	44.2	3045	37.70	943
6	180	0.834	27.3	4239	46.79	807

Παρακάτω απεικονίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις συσχετίσεις καθώς και το ΑΑΕ.

		Μέθοδος				
Πετρέλαιο	Rs(scf/stb) πειραματικό	1	2	3	4	5
1	751	838	779	737	740	772
2	768	817	733	714	792	726
3	693	774	702	686	729	758
4	968	914	820	843	1041	875
5	943	1012	947	868	845	865
6	807	998	841	842	1186	900
%AAE	-	9.7	4.9	5.8	12.4	7.84

Έτσι έβγαλε το συμπέρασμα ότι η καλύτερη συσχέτιση για τον υπολογισμό του Rs σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι των Vasquez&Begg. (Ahmed,2010)

Ο ίδιος ερευνητής στο βιβλίο του (Ahmed,2010) υπολόγισε την πίεση στο σημείο φυσαλίδας Pb (psia) έξι διαφορετικών πετρελαϊκών δειγμάτων, χρησιμοποιώντας τις συσχετίσεις του Standing, Al-Marhoun, Glaso, Petrofsky&Farshad και των Vasquez&Begg (Ahmed,2010). Τέλος σύγκρινε τα αποτελέσματα που προέκυψαν με τα πειραματικά αποτελέσματα, υπολογίζοντας ταυτόχρονα και το ΑΑΕ. (Ahmed,2010).

Ως μέθοδο 1 όρισε τη συσχέτιση του Standing (Ahmed,2010)

Ως μέθοδο 2 όρισε τη συσχέτιση των Vasquez&Begg (Ahmed,2010)

Ως μέθοδο 3 όρισε τη συσχέτιση του Glaso (Ahmed,2010)

Ως μέθοδο 4 όρισε τη συσχέτιση του Al-Marhoun (Ahmed,2010)

Ως μέθοδο 5 όρισε τη συσχέτιση των Petrofsky&Farshaad (Ahmed,2010)

Παρακάτω απεικονίζονται τα πειραματικά δεδομένα των έξι πετρελαϊκών δειγμάτων.

Πετρέλαιο	T (°F)	SGg	οAPI	Rs	SGo	Pb πειραματικό
1	250	0.851	47.1	751	38.13	2392
2	220	0.855	40.7	768	40.95	2635
3	260	0.911	48.6	693	37.37	2066
4	237	0.850	40.5	968	38.92	2899
5	218	0.814	44.2	943	37.70	3060
6	180	0.834	27.3	807	46.79	4254

Παρακάτω απεικονίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις συσχετίσεις καθώς και το ΑΑΕ.

Πετρέλαιο	Pb(ρsia) πειραματικό	Μέθοδος				
		1	2	3	4	5
1	2392	2411	2319	2431	2417	2331
2	2635	2686	2741	2797	2578	2768
3	2066	2098	2043	2083	1992	1893
4	2899	2923	3331	3240	2752	3156
5	3060	3143	3049	3269	3309	3288
6	4254	3689	4093	4125	3229	3908
%AAE	-	3.5	4.5	5.03	7.3	6.74

Έτσι έβγαλε το συμπέρασμα ότι η καλύτερη συσχέτιση για τον υπολογισμό του Pb σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι του Standing. (Ahmed,2010)

### Κεφάλαιο 3 Καταστατικές εξισώσεις

Μια καταστατική εξίσωση (Equation of State, EoS) είναι μια μαθηματική εξίσωση η οποία συσχετίζει αλγεβρικά τις τρεις βασικές θερμοδυναμικές μεταβλητές κατάστασης, δηλαδή την πίεση (P), τον όγκο (V) και τη θερμοκρασία (T) ενός ομογενούς συστήματος σε κάθε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας κι έχει τη μορφή  $f(P, V, T) = 0$ . Ονομάζεται καταστατική καθώς αποσκοπεί στην περιγραφή της κατάστασης ενός ρευστού σε δεδομένες συνθήκες. Αν και μία καταστατική εξίσωση παρέχει κυρίως ογκομετρικά δεδομένα (πυκνότητα) η κύρια συμβολή του ως εργαλείο μηχανικής είναι η σύνδεσή του με τις θερμοδυναμικές σχέσεις προβλέποντας τη συμπεριφορά των φάσεων και τις ιδιότητες των ρευστών. (Danesh, 1998)

Το κυριότερο πλεονέκτημα των καταστατικών εξισώσεων είναι ότι η ίδια εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει τη συμπεριφορά όλων των φάσεων, διασφαλίζοντας έτσι τη συνέπεια κατά την παρουσίαση των υπολογισμών ισορροπίας των φάσεων. Το πιο γνωστό και απλό παράδειγμα καταστατικής εξίσωσης είναι η εξίσωση των ιδανικών αερίων: (Ahmed, 2010):

$$p = \frac{R * T}{V}$$

Οι καταστατικές εξισώσεις αναπτύσσονται κυρίως για καθαρά συστατικά, αλλά εφαρμόζονται και σε συστήματα πολλαπλών συστατικών χρησιμοποιώντας κάποιους



κανόνες ανάμειξης για να καθορίσουν τις δικές τους παραμέτρους για τα μίγματα. Οι κανόνες ανάμειξης θεωρείται ότι περιγράφουν τις επικρατέστερες δυνάμεις μεταξύ των μορίων διαφόρων ουσιών που απαρτίζουν το μίγμα. Απλοί κανόνες ανάμειξης, όπως αυτοί που υποθέτουν ότι οι ενώσεις κατανέμονται τυχαία μέσα στο μίγμα είναι αρκετά επαρκείς για να περιγράψουν μίγματα υδρογονανθράκων που βρίσκονται σε ταμιευτήρες πετρελαίου. Ωστόσο πιο περίπλοκοι κανόνες ανάμειξης είναι απαιτούνται για την αναπαράσταση της αλληλεπίδρασης των υδρογονανθράκων και των ασύμετρων ενώσεων όπως το νερό το οποίο παρουσιάζεται στους ταμιευτήρες ή μεθανόλη που προστίθενται μερικές φορές στους ταμιευτήρες ρευστών ως αναστολέας ένυδρου άλατος. (Danesh, 1998)

Η πιο απλή και εξαιρετικά επιτυχημένη εξίσωση είναι η ημι-εμπειρική Van der Waals τύπου EOS με δύο ή τρεις παραμέτρους. Από το 1873 όταν ο Van der Waals βελτίωσε την εξίσωση των ιδανικών αερίων συμπεριλαμβάνοντας παραμέτρους που αντιπροσωπεύουν τις ελκυστικές διαμοριακές δυνάμεις. Εν συνεχεία η εξίσωση έχει αναθεωρηθεί και τροποποιηθεί από πολλούς ερευνητές. Άλλες εξισώσεις που περιέχουν πολλούς παραμέτρους έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης με αρκετή επιτυχία. (Danesh, 1998)

Σήμερα στην πετρελαϊκή βιομηχανία, γίνεται ευρεία χρήση των κυβικών καταστατικών εξισώσεων των Soave–Redlich–Kwong (SRK cEoS) και Peng–Robinson (PR cEoS), η ανάπτυξη των οποίων βασίστηκε στην κυβική καταστατική εξίσωση του van der Waals. Οι εξισώσεις αυτές χρησιμοποιούνται για πρόρρηση της ογκομετρικής συμπεριφοράς και της ισορροπίας φάσεων ενός ρευστού εφόσον έχουν προηγουμένως ρυθμιστεί με χρήση των δεδομένων που λαμβάνονται από πειραματικές μελέτες πίεσης-όγκου-θερμοκρασίας (PVT). Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι καταστατικές εξισώσεις καθώς και τα θέματα – απαιτήσεις που τίθενται από τις καταστατικές εξισώσεις προκειμένου να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα πετρελαϊκών ρευστών. (Danesh, 1998)

### 3.1 Καταστατική εξίσωση για ιδανικά αέρια

Σαν αέριο ορίζεται το ρευστό εκείνο το οποίο δεν έχει ούτε δικό του σχήμα ούτε όγκο αλλά καταλαμβάνει το σχήμα και τον όγκο του δοχείου μέσα στο οποίο περιέχεται.

Ιδανικά αέρια καλούνται τα αέρια ή μίγματα αερίων τα μόρια των οποίων πληρούν τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- Ο όγκος που καταλαμβάνουν είναι αμελητέος συγκρινόμενος με τον όγκο που καταλαμβάνει το αέριο.
- Οι διαμοριακές δυνάμεις είναι αμελητέες
- Οι συγκρούσεις μεταξύ των μορίων είναι ελαστικές με αποτέλεσμα να μην χάνεται ενέργεια εξ' αιτίας τους.

Η διατύπωση του Νόμου του Boyle έγινε από τον φυσικό Robert Boyle. Σύμφωνα με τον Νόμο του Boyle, η πίεση ορισμένης ποσότητας αερίου, του οποίου η θερμοκρασία παραμένει σταθερή, είναι αντιστρόφως ανάλογη με τον όγκο του. Η μαθηματική έκφραση του Νόμου του Boyle δίνεται παρακάτω:

$$P * V = \text{σταθερό}, \quad T = c * T$$

Έστω ένα σύστημα στο οποίο η αρχική πίεση είναι  $P_A$ , ο αρχικός ειδικός όγκος, δηλαδή ο όγκος σε  $m^3$  που καταλαμβάνει 1 kg βάρους του αερίου ή ο όγκος σε  $ft^3$  που καταλαμβάνει μία lb αυτού, είναι  $V_A$  και  $T$  είναι η θερμοκρασία του συστήματος στην αρχική κατάσταση. Αν προκληθεί ισοθερμοκρασιακή μεταβολή της πίεσης και του όγκου του σε  $P_B$  και  $V_B$ , τότε ο Νόμος του Boyle εκφράζεται με την μαθηματική σχέση:

$$\frac{P_A}{P_B} = \frac{V_B}{V_A}$$

Ο Νόμος του Boyle μπορεί να ερμηνευτεί σε μοριακό επίπεδο. Η πίεση που ασκεί ένα αέριο μέσα σε ένα δοχείο είναι αποτέλεσμα της κρούσης των μορίων στα τοιχώματα αυτού. Αν ο όγκος υποδιπλασιαστεί, τότε η πυκνότητα των μορίων διπλασιάζεται και έτσι εντός ενός ορισμένου χρονικού διαστήματος διπλασιάζεται ο αριθμός των μορίων που συγκρούονται με τα τοιχώματα. Έτσι, η μέση δύναμη που ασκείται από το αέριο, και επομένως και η πίεσή του, διπλασιάζεται. (Βαρύσης, Μηχανική Ταμιευτήρων)

Σύμφωνα με το Νόμο του Charles για ισόχωρες μεταβολές, αν ορισμένη ποσότητα ιδανικού αερίου μεταβαίνει από τη θερμοδυναμική κατάσταση A ( $P_A$ ,  $V$ ,  $T_A$ ) στη θερμοδυναμική κατάσταση B ( $P_B$ ,  $V$ ,  $T_B$ ) διατηρώντας τον όγκο του σταθερό, τότε η πίεση του αερίου αυτού είναι ανάλογη με την απόλυτη θερμοκρασία του αερίου. Η μαθηματική έκφραση του Νόμου του Charles είναι:

$$\frac{P_A}{T_A} = \frac{P_B}{T_B}$$

Τέλος, σύμφωνα με το Νόμο του Gay – Lussac που αφορά στη διαστολή υπό σταθερή πίεση, ο όγκος ορισμένης ποσότητας αερίου, όταν η πίεσή του διατηρείται σταθερή, είναι ανάλογος με την απόλυτη θερμοκρασία του:

$$\frac{V_A}{T_A} = \frac{V_B}{T_B}$$

Από το συνδυασμό των Νόμων των Αερίων, δηλαδή του Νόμου του Boyle, του Charles, και του Gay-Lussac, προκύπτει ένας ενιαίος νόμος υπό την μορφή της καταστατικής εξίσωσης ιδανικών αερίων, που αποτελεί το πιο γνωστό και απλό παράδειγμα καταστατικής εξίσωσης. Σε γενικές γραμμές, για την ανάπτυξη της καταστατικής εξίσωσης των ιδανικών αερίων έγιναν οι εξής τρεις παραδοχές:

- Ο όγκος που καταλαμβάνουν τα μόρια των ιδανικών αερίων θεωρείται αμελητέος σε σχέση με τον όγκο που καταλαμβάνει το αέριο.
- Οι διαμοριακές δυνάμεις (ελκτικές ή απωστικές) θεωρούνται αμελητέες.
- Οι συγκρούσεις μεταξύ των μορίων θεωρούνται ελαστικές με αποτέλεσμα να μην χάνεται ενέργεια εξαιτίας τους.

Η μορφή της εξίσωσης των ιδανικών αερίων εκφράζεται μέσω της σχέσης (5.5):

$$P * V = n * R * T$$

όπου,

- P: η πίεση του συστήματος σε psia
- V: ο γραμμομοριακός όγκος του αερίου σε ft<sup>3</sup>
- n: ο αριθμός των γραμμομορίων του αερίου
- R: η παγκόσμια σταθερά των αερίων, η οποία είναι ανεξάρτητη από τη φύση του αερίου, και ισούται με 10.73 psia ft<sup>3</sup> /lb-mol °R
- T: η απόλυτη θερμοκρασία του αερίου σε °R

Ένα αέριο, η θερμοδυναμική συμπεριφορά του οποίου υπακούει με ακρίβεια την καταστατική εξίσωση ιδανικών αερίων, ονομάζεται ιδανικό αέριο. (Βαρότσης , Μηχανική Ταμιευτήρων)

### 3.2 Καταστατική εξίσωση για πραγματικά αέρια

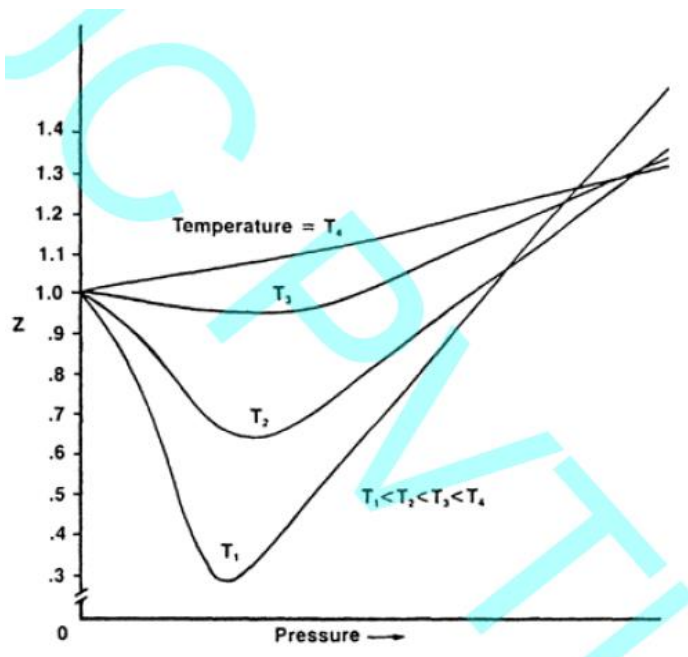
Η βιομηχανία του πετρελαίου εισήγαγε και εφαρμόζει έναν απλό διορθωτικό συντελεστή στην καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων που της επέτρεψε να επεκτείνει το πεδίο εφαρμογής της με καλά αποτελέσματα στα μίγματα αερίων υδρογονανθράκων στις συνθήκες παραγωγής.

Η καταστατική εξίσωση για τα πραγματικά αέρια παρουσιάζεται παρακάτω:

$$P * V = n * R * Z * T$$

Ο συντελεστής  $Z$  καλείται συντελεστής συμπιεστότητας ή συντελεστής υπερσυμπιεστότητας ή συντελεστής απόκλισης ή  $Z$ -συντελεστής και αφού είναι συνάρτηση της πίεσης, της θερμοκρασίας και της σύστασης πρέπει να προσδιορισθεί πειραματικά. Ορίζεται σε λόγο του πραγματικού όγκου του αερίου προς τον όγκο που θα καταλάμβανε αν το αέριο συμπεριφερόταν σαν ιδανικό υπό τις ίδιες συνθήκες. Επομένως το  $Z$  είναι αδιάστατο και εκφράζει το μέτρο της απόκλισης της συμπεριφοράς ενός πραγματικού αερίου από αυτήν του ιδανικού.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η μεταβολή του συντελεστή απόκλισης με την πίεση και την θερμοκρασία για ένα μέσης σύστασης φυσικό αέριο. Παρατηρείται πως οι ισοθερμοκρασιακές καμπύλες αρχίζουν όλες από το 1.0 (ιδανικά αέρια υπό ατμοσφαιρική πίεση), παρουσιάζουν ένα ελάχιστο στις μέσες πιέσεις πριν αρχίσουν να αυξάνουν και πάλι στις υψηλές πιέσεις προσεγγίζοντας και κατόπιν ξεπερνώντας την τιμή 1.0. Η εξήγηση που βασίζεται στην κινητική θεωρία είναι πως σε μέσες τιμές της πίεσης λόγω των αναπτυσσομένων ελκτικών δυνάμεων ο πραγματικός όγκος καθίσταται μικρότερος από τον ιδανικό. Αντίθετα στις υψηλές πιέσεις, καθώς τα μόρια έχουν προσεγγίσει πάρα πολύ το ένα το άλλο, οι απωστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται λόγω της επικάλυψης των ηλεκτρικών πεδίων των μορίων, εξουδετερώνουν τις ελκτικές δυνάμεις και η συμπεριφορά των πραγματικών αερίων επαναπροσεγγίζει την συμπεριφορά των ιδανικών αερίων. Οι τιμές που λαμβάνει ο  $Z$  συντελεστής για τα φυσικά αέρια κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 0.70-1.2. (Βαρότσης, Μηχανική Ταμειευτήρων)



Εικόνα 18 Μεταβολή συντελεστή συμπιεστότητας  $Z$  με τη πίεση (Βαρότσης, Μηχανική Ταμιευτήρων)

Ο νόμος των αντιστοίχων καταστάσεων επιβάλλει ότι αν δύο παρόμοιας φύσης αέρια βρίσκονται υπό τέτοιες συνθήκες ώστε δύο από τις εντατικές ανηγμένες ιδιότητές τους να είναι ίδιες, τότε η τρίτη ανηγμένη ιδιότητα καθώς και οι παράγωγες ανηγμένες ιδιότητές τους είναι επίσης ίδιες. Οι ανηγμένες συνθήκες για τα αέρια ενός συστατικού υπολογίζονται εύκολα, καθώς οι κρίσιμες συνθήκες των καθαρών συστατικών αποτελούν γνωστές φυσικές σταθερές.

Ο νόμος των αντιστοίχων καταστάσεων επέτρεψε την χρήση ενός και μόνο γενικευμένου διαγράμματος το οποίο εκπεφρασμένο σε ανηγμένη πίεση και ανηγμένη θερμοκρασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλα τα πραγματικά αέρια. (Βαρότσης, Μηχανική Ταμιευτήρων)

### 3.3 Κυβικές καταστατικές εξισώσεις (cubic Equations of State, cEoS)

Οι περισσότεροι υπολογισμοί των ιδιοτήτων PVT που πραγματοποιούνται για μίγματα πετρελαίου και αερίου, βασίζονται σε κυβικές καταστατικές εξισώσεις. Αυτός ο τύπος εξισώσεων χρονολογείται πριν από περισσότερα από 100 χρόνια. Εμφανίστηκε με την γνωστή εξίσωση Van der Waals, το 1873. Οι κυβικές καταστατικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στην βιομηχανία του πετρελαίου σήμερα είναι παρόμοιες με την εξίσωση Van der Waals, αλλά χρειάστηκε σχεδόν ένας αιώνας ώστε η βιομηχανία του πετρελαίου να αποδεχτεί αυτό το είδος εξίσωσης ως ένα πολύτιμο εργαλείο για τη μηχανική του πετρελαίου. Η πρώτη κυβική καταστατική εξίσωση που απέκτησε ευρεία χρήση ήταν αυτή των Redlich και Kwong το 1949. Ο Soave (1972) και οι Peng (1976) και Robinson (1978) ανέπτυξαν

περεταίρω την εξίσωση αυτή στη δεκαετία του 1970. Το 1982 οι Peneloux και Al παρουσίασε μία ιδέα μετατόπισης όγκου ώστε να βελτιωθούν οι προβλέψεις των πυκνοτήτων των υγρών των δύο προηγούμενων κυβικών καταστατικών εξισώσεων. Η αυξημένη χρήση των κυβικών καταστατικών εξισώσεων έγινε εμφανής τα τελευταία 30 χρόνια και οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη διαθεσιμότητα υπολογιστών που συμβάλλουν στην εκτέλεση πολλών ταυτοχρόνως υπολογισμών των ιδιοτήτων PVT, χρησιμοποιώντας μία καταστατική εξίσωση ως θερμοδυναμική βάση. (Pedersen-Christensen, 2007).

Μια κυβική καταστατική εξίσωση μπορεί να κάνει πρόβλεψη της συμπεριφοράς μη πολικών ή και ελαφρώς πολικών, όπως οι υδρογονάνθρακες, ενώσεων με τη χρήση δύο ή τριών ρυθμιζόμενων παραμέτρων όπως οι κρίσιμες ιδιότητες  $T_c$  και  $P_c$  και ο ακεντρικός παράγοντας  $\omega$ .

Κρίσιμες συνθήκες ενός ρευστού ονομάζονται οι συνθήκες εκείνες στις οποίες η υγρή και η αέρια φάση έχουν ίδιες θερμοδυναμικές ιδιότητες και σύσταση. Στο κρίσιμο σημείο τα όρια των φάσεων εξαφανίζονται. Οι κρίσιμες ιδιότητες για τα καθαρά συστατικά είναι γνωστές ενώ για τα μίγματα υπολογίζονται μέσω συσχετίσεων. Ως  $P_c$  συμβολίζεται η κρίσιμη πίεση και ως  $T_c$  η κρίσιμη θερμοκρασία. (Pitzer, 1955)

Οι κρίσιμες ιδιότητες ( $P_c$ ,  $T_c$ ,  $V_c$ ) και ο ακεντρικός παράγοντας  $\omega$  αποτελούν τρεις απαραίτητες παραμέτρους προσδιορισμού των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων καθαρών συστατικών και είναι εξίσου απαραίτητες για τη χρήση των σύγχρονων κυβικών καταστατικών εξισώσεων. Ο ακεντρικός παράγοντας προτάθηκε από τον Pitzer 1995 ως η τρίτη παράμετρος της διπαραμετρικής αρχής των αντιστοίχων καταστάσεων. Θεωρήθηκε απαραίτητη η χρήση του ακεντρικού παράγοντα διότι η διαμοριακή δύναμη σε σύνθετα μόρια είναι το άθροισμα των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των διαφόρων τμημάτων των μορίων και όχι μόνο των κέντρων τους. Έτσι ο ακεντρικός παράγοντας αποτελεί μέτρο της ακεντρικότητας των μορίων (δηλαδή της μη σφαιρικότητας) των διαφόρων ουσιών και επηρεάζεται από την πολικότητα τους. Για σφαιρικά μόρια το  $\omega$  είναι σχεδόν ίσο με το μηδέν ενώ για μη σφαιρικά μόρια παίρνει τιμές άνω του μηδενός, ενώ μόνο τα απολύτως μη σφαιρικά μόρια προσεγγίζουν τη μονάδα. Ο ακεντρικός παράγοντας από το Pitzer 1955 ορίζεται (Pitzer, 1955)

:

$$\omega = -\log(Pr) - 1$$

Όπου  $Pr = \frac{P_v}{P_c}$  η ανηγμένη τάση ατμών, στην ανηγμένη θερμοκρασία  $T_r=0.7$

Παρακάτω αναπτύσσονται συνοπτικά η καταστατική εξίσωση van der Waals, η οποία αποτέλεσε την πρώτη κυβική καταστατική εξίσωση, και οι καταστατικές εξισώσεις Soave-Redlich-Kwong (SRK) και Peng-Robinson (PR), οι οποίες χρησιμοποιούνται

κατά κόρον στην πετρελαϊκή βιομηχανία και αποτέλεσαν και βασικό εργαλείο της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα επιλέχτηκε στη δοθείσα διπλωματική εργασία η Peng-Robinson (PR).

### 3.3.1 Κυβική καταστατική εξίσωση van der Waals

Σε υψηλότερες πιέσεις η καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων δεν ισχύει. Τα μόρια πλησιάζουν αρκετά το ένα το άλλο, οι ελκτικές δυνάμεις αρχίζουν να αναπτύσσονται και ο λόγος  $\frac{p \cdot V_m}{R \cdot T}$  αρχίζει να αποκλίνει από τη μονάδα. Οι αποκλίσεις εμφανίζονται πιο σημαντικές όσο πιο πολύ οι συνθήκες πλησιάζουν την καμπύλη κορεσμού στο διάγραμμα p-V. Πολλές απόπειρες έγιναν να διατυπωθεί μία γενική εξίσωση για τα πραγματικά αέρια είτε χρησιμοποιώντας την κινητική θεωρία των αερίων για τον υπολογισμό των διαμοριακών δυνάμεων είτε επιδιώκοντας να εκφρασθούνε πιστά με αλγεβρικό τρόπο πειραματικά δεδομένα. Η κινητική θεωρία μας ερμηνεύει πως στα πραγματικά αέρια η πραγματική πίεση του αερίου είναι μεγαλύτερη της πίεσης που το αέριο εξασκεί στα τοιχώματα του δοχείου εντός του οποίου περιέχεται κατά μίαν εσωτερική πίεση π. Τούτο οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε μόριο που πλησιάζει τα τοιχώματα καταφτάνει με ταχύτητα κατά τι μειωμένη λόγω των ελκτικών δυνάμεων τις οποίες υφίσταται από τα γειτονικά του μόρια. Επιπλέον, στα πραγματικά αέρια ο όγκος τον οποίο δύναται να καταλάβουν τα μόρια τους (σύνολος) καθίσταται σημαντικός με συνέπεια ο όγκος που είναι διαθέσιμος για τη συμπίεση των αερίων να μικραίνει (αποδεικνύεται όπως ο σύνολος είναι τετραπλάσιος του καθαυτού όγκου των μορίων εν στάση).

Η καταστατική εξίσωση van der Waals δίνεται από τη σχέση:

$$P = \frac{R \cdot T}{V - b} - \frac{a}{V^2}$$

όπου,

- P: η πίεση του συστήματος σε psia
- T: η θερμοκρασία του συστήματος σε °R
- R: η παγκόσμια σταθερά των αερίων που ισούται με 10.73 psia ft<sup>3</sup> /lb-mol °R
- V: ο γραμμομοριακός όγκος σε ft<sup>3</sup>
- a: η παράμετρος έλξης σε psia × ft<sup>6</sup>
- b: η παράμετρος άπωσης σε ft<sup>3</sup>

Η καταστατική εξίσωση van der Waals εκφράζει τον όγκο του συστήματος κατάλληλα όταν:

- Η πίεση είναι χαμηλή, οπότε ο όγκος της αέριας φάσης είναι μεγάλος σχετικά με τον όγκο των μορίων και οι δύο όροι b και a/V<sup>2</sup> γίνονται αμελητέοι.

- Η πίεση είναι υψηλή, οπότε ο όγκος της αέριας φάσης είναι πολύ μικρός και πλησιάζει το  $b$ .

Η καταστατική εξίσωση του van der Waals, όπως άλλωστε και όλες οι κυβικές καταστατικές εξισώσεις που αναφέρονται στην παρούσα εργασία, μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με τη γενική σχέση (5.8):

$$P = \text{Ράπωσης} - \text{Ρέλξης}$$

Ο όρος  $\frac{R*T}{V-b}$  αντιπροσωπεύει τον όρο της πίεσης λόγω άπωσης και είναι ίδιος και για τις τρεις κυβικές καταστατικές εξισώσεις που αναφέρονται στην παρούσα εργασία, ενώ ο όρος  $\frac{a}{V^2}$  αντιπροσωπεύει τον όρο της πίεσης λόγω έλξης και εξηγεί την μη ιδανική συμπεριφορά του ρευστού. Τέλος, το  $V - b$  είναι το διάστημα μεταξύ των μορίων.

Οι κυβικές μαθηματικές μορφές της εξίσωσης vdW, λύνοντας ως προς  $V$  και  $z$ , είναι:

$$V^3 - \left(b + \frac{R * T}{P}\right) * V^2 + \left(\frac{a}{P}\right) * V - \frac{a * b}{P} = 0$$

$$Z^3 - (1 + B) * Z^2 + A * Z - A * B = 0$$

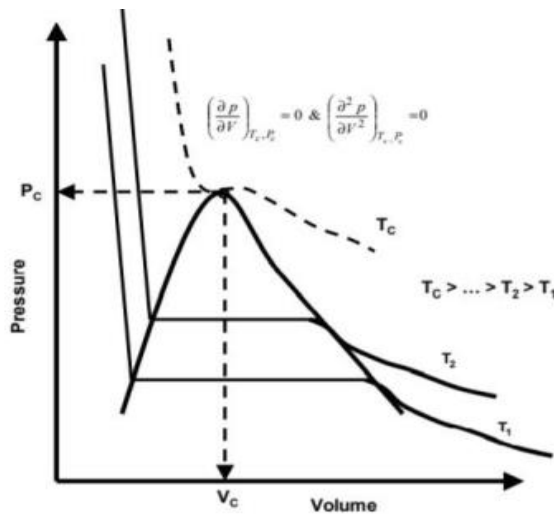
Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι η σχέση (5.10) προκύπτει από την επίλυση της καταστατικής εξίσωσης των πραγματικών αερίων ως προς  $Z$  και την αντικατάστασή του στη σχέση (5.9). Οι συντελεστές  $A$  και  $B$  που χρησιμοποιήθηκαν για την απλοποίηση της σχέσης (5.9) ορίζονται από τις σχέσεις (5.11) και (5.12).

$$A = \frac{a * P}{(R * T)^2}$$

$$B = \frac{b * P}{R * T}$$

Ο van der Waals τόνισε πως για να προσδιοριστούν οι παράμετροι  $a$  και  $b$  πρέπει να είναι γνωστές οι κρίσιμες συνθήκες των συστατικών του ρευστού (κρίσιμη πίεση, κρίσιμη θερμοκρασία), αφοτου παρατήρησε ότι η κρίσιμη ισόθερμη καμπύλη εμφανίζει οριζόντια εφαπτομένη και ταυτόχρονα έχει σημείο καμπής στο κρίσιμο σημείο όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.1. (Βαρότσης, Μηχανική Ταμιευτήρων)





Διάγραμμα 9 Εξιθανικευμένο διάγραμμα Πίεσης-Όγκου (PVT) για ένα καθαρό συστατικό (Ahmed, 2010)

Στο κρίσιμο σημείο ισχύουν οι κλασικές συνθήκες του σημείου καμπής της πίεσης ως προς τον όγκο. Επιβάλλοντας την ισότητα (5.13) των παραγώγων, ο van der Waals προσδιόρισε τις παραμέτρους  $a$  και  $b$  χρησιμοποιώντας τις κρίσιμες ιδιότητες κάθε συστατικού.

$$\left(\frac{dP}{dV}\right)_{T_c} = \left(\frac{d^2P}{dV^2}\right)_{T_c} = 0$$

$$\left(\frac{dP}{dV}\right)_{T_c} = \frac{-R^*T_c}{(V_c-b)^2} + \frac{2*a}{V_c^3}$$

$$\left(\frac{d^2P}{dV^2}\right)_{T_c} = \frac{2*R^*T_c}{(V_c-b)^3} + \frac{6*a}{V_c^4}$$

Οι συντελεστές  $a$  και  $b$  για κάθε συστατικό μετά την επίλυση των σχέσεων (5.14) και (5.15) δίνονται από τις σχέσεις:

$$ac = \Omega a * R * T_c * V_c, \text{ όπου } \Omega a = 0.421875$$

$$bc = \Omega b * V_c, \text{ όπου } \Omega b = 0.125$$

### 3.3.2 Κυβική καταστατική εξίσωση Peng-Robinson (PR EOS)

Οι Peng και Robinson (αρχικά το 1976) διεξήγαγαν μια περιεκτική μελέτη για την αξιολόγηση της χρήσης της καταστατικής εξίσωσης Soave-Redlich-Kwong για την εκτίμηση της συμπεριφοράς φυσικώς παραγόμενων συστημάτων υδρογονανθράκων. Επεξήγησαν την ανάγκη για αναβάθμιση της ικανότητας της καταστατικής εξίσωσης SRK στην εκτίμηση των πυκνοτήτων των υγρών και άλλων ιδιοτήτων, κυρίως στην περιοχή του κρίσιμου σημείου. Η καταστατική εξίσωση PR φαίνεται στην παρακάτω σχέση (Zohuri, 2017):

$$P = \frac{R * T}{V - b} - \frac{aa(T)}{V * (v + b) + b * (V - b)}$$

Όπου,

$$a = 0.45724 * \frac{R^2 * T_c^2}{P_c},$$

$$b = 0.07780 * \frac{R * T_c}{P_c}$$

Το  $a(T)$  είναι αδιάστατη παράμετρος και ορίζεται στην παρακάτω σχέση (ίδια με την αντίστοιχη της καταστατικής εξίσωσης SRK, αφού οι Peng και Robinson υιοθέτησαν την προσέγγιση του Soave), όπου  $T_r$  η ανηγμένη θερμοκρασία ( $T_r = T/T_c$ ).

$$\alpha(T) = [1 + m * (1 - \sqrt{T_r})]^2$$

Οι Peng και Robinson έθεσαν τη παρακάτω για τον προσδιορισμό της διορθωτικής παραμέτρου  $m$  για τη θερμοκρασία, η οποία είναι συσχετισμένη με τον ακεντρικό παράγοντα  $\omega$ .

$$m = 0.37464 + 1.54226 * \omega + 0.26992 * \omega^2$$

Το 1978, οι μελετητές, πρότειναν μια τροποποίηση της παραμέτρου  $m$ , η οποία συνίσταται για χρήση σε βαριά συστατικά, με ακεντρικό παράγοντα  $\omega > 0,49$ , όπως φαίνεται στη παρακάτω σχέση.

$$m = 0.379642 + 1.48503 * \omega - 0.1644 * \omega^2 + 0.016667 * \omega^3$$

Λύνοντας την καταστατική εξίσωση Peng-Robinson στις κρίσιμες συνθήκες, παρέχει καθολικό-γενικό συντελεστή συμπιεστότητας  $Z_c = 0,3074$ , ο οποίος παραμένει αρκετά μεγάλος για πετρελαϊκά ρευστά (για παράδειγμα οι συντελεστές συμπιεστότητας για τα C1-C10 n-παραφινικούς υδρογονάνθρακες εκτιμάται στο εύρος 0,247-0,288). Σε απλή μορφή η καταστατική Peng-Robinson στις κρίσιμες συνθήκες γράφεται όπως φαίνεται στη παρακάτω εξίσωση:

$$P_c * V_c = 0.3074 * R * T_c$$

Η κυβική μαθηματική μορφή της εξίσωσης, λύνοντας ως προς  $Z$  είναι η εξής:

$$Z^3 - (1 - B) * Z^2 + (A - 3 * B^2 - 2 * B) * Z - (A * B - B^2 - B^3) = 0$$

Όπου,

$$A = \frac{a * P}{R^2 * T^2}$$

$$B = \frac{b * P}{R * T}$$

Τα χαρακτηριστικά της Peng-Robinson είναι :

- Ισχύει για μη πολικά υγρά και αέρια.
- Προβλέπει με μεγάλη ακρίβεια τους όγκους υγρών και αερίων καθώς και τις τάσεις ατμών.
- Μπορεί να εφαρμοστεί στην περιοχή του κρίσιμου σημείου.
- Εκφράζει την αρχή των αντιστοίχων καταστάσεων με τρεις παραμέτρους ( $P_r$ ,  $T_r$ ,  $\omega$ ).
- Παρέχει επιτυχή συσχέτιση και πρόβλεψη της ισορροπίας φάσεων σε μη πολικά συστήματα.
- Παρέχει μεγαλύτερη ακρίβεια στην πρόβλεψη των όγκων των υγρών.
- Προτιμάται από τους μηχανικούς πετρελαίου.

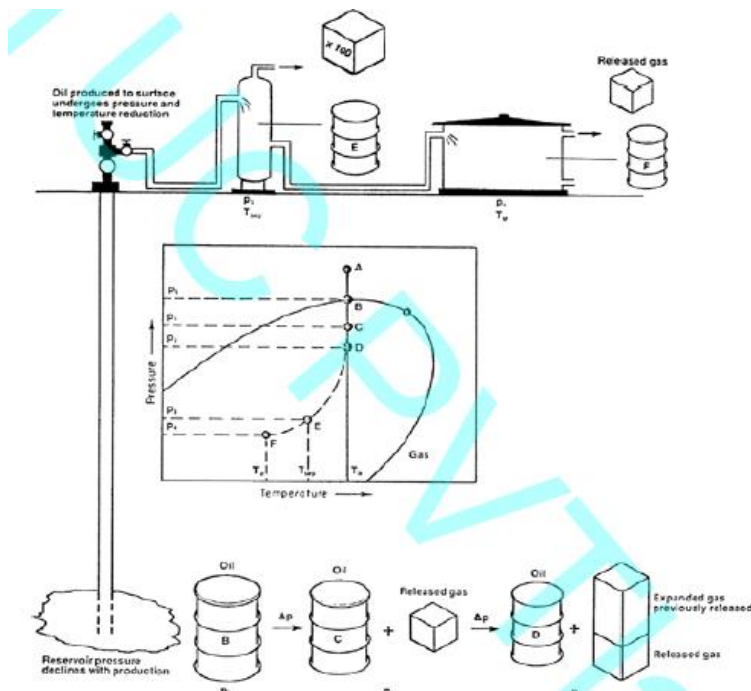
Η καταστατική των Peng – Robinson, παρουσιάζει ελαφρώς καλύτερη συμπεριφορά κοντά στο κρίσιμο σημείο και υπολογίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια την πυκνότητα των ρευστών, σε σχέση με την καταστατική SRK.

### **3.4 Ιδιότητες διφασικών συστημάτων**

Στις περισσότερες περιπτώσεις τα ρευστά των ταμειυτήρων στις συνθήκες παραγωγής και άντλησης βρίσκονται σε κατάσταση διφασικής ισορροπίας. Το σημείο δηλαδή που συμβολίζει στο διάγραμμα  $p$ - $T$  τις συνθήκες βρίσκεται εντός του φακέλου φάσεων. Ο ποσοτικός προσδιορισμός της περιλαμβάνει τον υπολογισμό των ολικών μοριακών κλασμάτων κάθε φάσης καθώς και τον προσδιορισμό της σύστασης του αερίου και του υγρού.

Από την στιγμή που η αέρια φάση έχει σχηματιστεί, καθώς η πίεση έχει πέσει κάτω από το σημείο φυσαλίδας, κάθε περαιτέρω πτώση της πίεσης θα έχει σαν αποτέλεσμα (1) ολοένα και περισσότερα μόρια υδρογονανθράκων να μεταφέρονται από την υγρή στην αέρια φάση και (2) η αέρια φάση που είχε σχηματιστεί προηγουμένως σε ψηλότερες πιέσεις να εκτονώνεται. Καθώς τα αέρια είναι συμπιεσίμα, ο συνδυασμός των δύο ανωτέρω παραγόντων συμβάλλει σε μία διαρκή αύξηση του όγκου τους. Απεναντίας, η υγρή φάση ολοένα και συρρικνώνεται λόγω της αφαίμαξης που της προκαλεί η συνεχιζόμενη απομάκρυνση μορίων που υπερκαλύπτει κατά πολύ την μικρή διαστολή της που οφείλεται στην μικρή συμπιεστότητα των υγρών.

Το κλασσικό σενάριο εκμετάλλευσης ενός ταμειυτήρα υδρογονανθράκων προϋποθέτει την παραγωγή του ρευστού του κοιτάσματος διαμέσου ενός διαχωριστήρα για να διαχωριστεί το τελικό προϊόν που είναι το αργό πετρέλαιο (tank oil ή STO) από το αέριο του. (Βαρότσης, Μηχανική Ταμειυτήρων)



Διάγραμμα 10 Διάγραμμα σχέσεων όγκων ρευστών ταμιευτήρα/επιφανείας στη διφασική περιοχή (Βαρύτητας, Μηχανική Ταμιευτήρων)

#### Κεφάλαιο 4 Ρύθμιση καταστατικών εξισώσεων

Οι καταστατικές εξισώσεις χρησιμοποιούνται ευρέως στην πρόβλεψη συμπεριφοράς των φάσεων. Οι καταστατικές εξισώσεις (EOS) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υπολογισμούς ισορροπίας φάσης ειδικά για μίγματα βαρέων υδρογονανθράκων. Όμως η πρόβλεψη με τη χρήση καταστατικών εξισώσεων δεν είναι ακριβής. Για παράδειγμα τα σφάλματα στον κορεσμό είναι 10% ή 5% σε πυκνότητα (σύμφωνα με τους ερευνητές Whitson and Brule, 2000). Ακόμη οι καταστατικές εξισώσεις προβλέπουν τόσο τη πίεση στο σημείο φυσαλίδας όσο και τη πίεση στο σημείο δρόσου του ρευστού, σε συνθήκες ταμιευτήρα. Η κακή ικανότητα στη πρόβλεψη των ιδιοτήτων από καταστατικές εξισώσεις έγκειται είτε σε σφάλματα κατά το προσδιορισμό των ιδιοτήτων του βαρέως κλάσματος είτε σε ανεπαρκή στοιχεία σχετικά με το βαρύ κλάσμα. Μερικές φορές μπορεί να οφείλεται και στην λανθασμένη χρήση του συντελεστή δυαδικής αλληλεπίδρασης. (Bahadori, 2017)

Οι εργαστηριακές μελέτες είναι απαραίτητες καθώς δείχνουν την πραγματική συμπεριφορά του δείγματος του ταμιευτήρα. Όμως, παρουσιάζουν και αρκετά μειονεκτήματα. Οι μελέτες αυτές απαιτούν αρκετό χρόνο για ένα μόνο δείγμα. Επίσης απαιτούν μεγάλη ποσότητα δείγματος η οποία δεν είναι πάντα διαθέσιμη. Η μελέτη γίνεται για ένα συγκεκριμένο δείγμα ρευστού, από συγκεκριμένο σημείο του ταμιευτήρα και σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Για την ολοκληρωμένη εικόνα του ταμιευτήρα θα ήταν απαραίτητη η μελέτη δειγμάτων ρευστών από όλα τα σημεία του ταμιευτήρα και καθόλη την διάρκεια της παραγωγής, κάτι τέτοιο όμως είναι αδύνατο.

Λόγω των αδυναμιών που παρουσιάζουν οι εργαστηριακές μελέτες, αναπτύχθηκαν αριθμητικά υπολογιστικά μοντέλα τα οποία προσομοιώνουν τις συνθήκες που επικρατούν σε ένα ταμειυτήρα και περιγράφουν με ακρίβεια την ογκομετρική συμπεριφορά των φάσεων μέσα σε αυτόν. Πρόκειται για αλγόριθμους προσομοίωσης (κώδικες) οι οποίοι χρησιμοποιούν καταστατικές εξισώσεις (Equation Of State, EOS) που περιγράφουν τη θερμοδυναμική συμπεριφορά του ρευστού. Το δυσκολότερο μέρος της προσομοίωσης είναι η ρύθμιση των παραμέτρων που περιέχουν οι καταστατικές εξισώσεις. Οι παράμετροι αυτές ρυθμίζονται έτσι ώστε οι τελικές εξισώσεις να πλησιάζουν την πραγματική συμπεριφορά των ρευστών. Τα πλεονεκτήματα της προσομοίωσης είναι ότι δίνει άμεσα αποτελέσματα σε διάφορα μεγέθη (όπως πυκνότητα και συντελεστή ισοθερμοκρασιακής συμπίεστικότητας), και σε οποιοδήποτε στάδιο της παραγωγής ενώ έχει την δυνατότητα να προβλέπει την συμπεριφορά των ρευστών ακόμα και σε σημεία που βρίσκονται μακριά από την γεώτρηση εν αντιθέσει με τις εργαστηριακές μελέτες. Με την εξέλιξη των εξισώσεων αυτών, είναι πλέον δυνατή η προσομοίωση της πολύπλοκης διαδικασίας της εκμετάλλευσης του ταμειυτήρα και η πρόβλεψη της εξέλιξης της με το χρόνο κάτω από διαφορετικά πιθανά σενάρια εκμετάλλευσης.

#### **4.1 Που ωφελεί η προσομοίωση ενός ταμειυτήρα;**

Είναι κοινός τόπος ότι, ένα σύστημα ταμειυτήρα-ρευστών είναι ιδιαίτερα περίπλοκο. Προκειμένου να είναι δυνατόν να εξεταστούν διαφορετικά σενάρια παραγωγής, είναι αναγκαία η επαρκής περιγραφή και προσέγγιση του συστήματος με τέτοιο τρόπο που να μπορεί να αξιοποιηθεί το πλήθος μετρήσεων και πληροφοριών που έχουν αποκτηθεί.

Ως εκ τούτου, δύναται να προσφέρει απαντήσεις σε πολλά ερωτήματα σχεδιασμού και βελτιστοποίησης εκμετάλλευσης ταμειυτήρων.

Η προσομοίωση του ταμειυτήρα πετρελαίου στοχεύει στην ανάπτυξη και λειτουργία ενός μοντέλου το οποίο προσεγγίζει την πραγματική συμπεριφορά του σχηματισμού κατά τη διάρκεια της ροής. Τα μοντέλα προσομοίωσης αποτελούν την πλέον πολύπλοκη αλλά ολοκληρωμένη εκτίμηση της κατάστασης που επικρατεί στο εσωτερικό του ταμειυτήρα τόσο πριν όσο και κατά τη διάρκεια της παραγωγής. Σκοπός της προσομοίωσης είναι να εκτιμήσει την ποσότητα των αποθεμάτων αλλά και την απόδοση του ταμειυτήρα κάτω από διάφορα σενάρια παραγωγής. Τα σενάρια αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν δύο διαφορετικές θέσεις διατρήσεων και γεωτρήσεων, έλεγχο του ρυθμού παραγωγής, καθώς και εφαρμογή μηχανισμών δευτερογενούς ή τριτογενούς παραγωγής. (Rafiqul, 2016)

Παράλληλα η ακρίβειά της προσομοίωσης ενός ταμιευτήρα πετρελαίου βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην ακρίβεια της εκτίμησης του συντελεστή απόκλισης. Ο συντελεστής απόκλισης  $Z$  σχετίζεται με τον προσδιορισμό του όγκου του ρευστού και κατά συνέπεια με την πυκνότητα του. Η εισαγωγή του στην καταστατική εξίσωση, επιτρέπει την επέκταση του πεδίου εφαρμογής της και σε μείγματα αερίων υδρογονανθράκων, δίνοντας καλά αποτελέσματα.

Από τα θερμοδυναμικά μοντέλα προσομοίωσης ταμιευτήρων, οι κυβικές καταστατικές εξισώσεις (cubic Equations of State) είναι οι πιο διαδεδομένες στη βιομηχανία πετρελαίου, εξαιτίας της ευκολίας χρήσης τους και της ακρίβειάς που παρουσιάζουν στους υπολογισμούς της ισορροπίας των φάσεων.

Οι καταστατικές εξισώσεις περιλαμβάνουν ένα σύνολο παραμέτρων από τα οποία εξαρτάται η προβλεπόμενη συμπεριφορά των επιμέρους συστατικών των ρευστών. Οι τιμές αυτές δεν είναι πάντα γνωστές με ακρίβεια, δεδομένου ότι λόγω της πολυπλοκότητάς τους τα πετρελαϊκά ρευστά περιγράφονται με χρήση ψευδόςυστατικών τα οποία με τη σειρά τους είναι μείγματα, οι παράμετροι των οποίων είναι γνωστές μόνο προσεγγιστικά (όπως π.χ. το μοριακό βάρος του βαρέως κλάσματος). Επομένως, για να μπορέσουν τα υπολογιστικά μοντέλα να προβλέψουν την ογκομετρική συμπεριφορά των πετρελαίων με ακρίβεια, απαιτείται η ρύθμιση (tuning) των παραμέτρων των καταστατικών εξισώσεων. Η ρύθμιση αυτή, αποτελεί μια διαδικασία κατά την οποία μεταβάλλονται οι χαρακτηριστικές θερμοδυναμικές ιδιότητες των συστατικών της εξίσωσης, προκειμένου οι τιμές που προβλέπει η εξίσωση για συγκεκριμένες ιδιότητες των συστατικών να πλησιάζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις τιμές που έχουν προσδιοριστεί εργαστηριακά για τις ίδιες ιδιότητες. (Danesh, 1998)

Έτσι, καθίσταται απαραίτητη η εκπόνηση εργαστηριακών μετρήσεων για τον προσδιορισμό των PVT ιδιοτήτων, ώστε αυτές να μπορούν στη συνέχεια να συγκριθούν με τις τιμές που προκύπτουν από τις καταστατικές εξισώσεις και οι τελευταίες να ρυθμιστούν κατάλληλα ώστε οι τιμές που προβλέπουν να συμπίπτουν με τις τιμές που έχουν προσδιοριστεί εργαστηριακά.

Η ρύθμιση των παραμέτρων των εξισώσεων είναι πολύ σημαντική καθώς μέσω αυτών μπορούν να πραγματοποιηθούν όλοι οι υπολογισμοί των σύνθετων PVT ιδιοτήτων σε όλα τα στάδια προσομοίωσης και εκμετάλλευσης του ταμιευτήρα. Όσο πιο καλά ρυθμισμένη είναι η καταστατική εξίσωση, τόσο ακριβείς θα είναι και οι προβλέψεις που θα δώσει.

#### 4.2 Ρύθμιση καταστατικών εξισώσεων

Για την προσαρμογή μιας καταστατικής εξίσωσης σε ένα συγκεκριμένο πολυσυστατικό σύστημα απαιτείται να λαμβάνονται υπόψιν οι εγγενείς αδυναμίες που η ίδια φέρει αλλά και ο κατάλληλος χαρακτηρισμός των συστατικών των μιγμάτων υδρογονανθράκων, ειδικά στην περίπτωση των μιγμάτων που περιέχουν βαρείς υδρογονάνθρακες λόγω των ασαφειών που χαρακτηρίζουν τόσο τις κρίσιμες ιδιότητες των βαρέων κλασμάτων και των ομαδοποιημένων συστατικών. Είναι επίσης απαραίτητος ο προσδιορισμός των δυαδικών συντελεστών αλληλεπίδρασης (binary interaction parameters, BIPS),  $k_{ij}$  που εκφράζουν τις πιθανές αλληλεπιδράσεις σε κάθε ζεύγος συστατικών του μίγματος και οι οποίοι υπεισέρχονται στον υπολογισμό του ελκτικού όρου μέσω των κανόνων ανάμιξης. (Danesh, 1998)

Ρύθμιση (tuning) ενός μοντέλου καθίσταται η διαδικασία παλινδρόμησης μέσω της οποίας μεταβάλλονται οι παράμετροι των καταστατικών εξισώσεων με σκοπό οι τιμές που υπολογίζονται να έρθουν στην καλύτερη δυνατή συμφωνία με τις πειραματικές τιμές.

Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα περίπλοκη ενώ παράλληλα απαιτείται προσεκτικός έλεγχος της φυσικής έννοιας των τιμών που αποδίδονται σε κάθε ρυθμιζόμενη παράμετρο. (Danesh, 1998)

Συνήθως, για τη ρύθμιση των καταστατικών εξισώσεων χρησιμοποιούνται δεδομένα τα οποία έχουν αποκτηθεί από πειραματικές μελέτες πίεσης-όγκου-θερμοκρασίας (PVT). Τα συνηθέστερα δεδομένα που αξιοποιούνται είναι:

- Η πίεση σημείου κορεσμού: η πίεση σημείου φυσαλίδας (bubble point pressure,  $P_b$ ) για πετρέλαια ή η πίεση σημείου δρόσου (dew point pressure,  $P_d$ ) για αέρια συμπυκνώματα.
- Δεδομένα που προκύπτουν από τη διεξαγωγή του πειράματος ισοθερμοκρασιακής εκτόνωσης υπό σταθερή σύσταση (Constant Composition Expansion, CCE).
- Δεδομένα που προκύπτουν από τη διεξαγωγή του πειράματος διαφορικής εκτόνωσης (Differential Liberation, DLE).
- Δεδομένα που προκύπτουν από τη δοκιμή διαχωρισμού (Separator Test)

Στη συγκεκριμένη εργασία για την επίτευξη της ρύθμισης των καταστατικών εξισώσεων χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τη διαφορική εξάτμιση.

Σε μια κυβική καταστατική εξίσωση υπάρχουν αρκετές παράμετροι διαθέσιμες προς ρύθμιση. Παρακάτω αναφέρονται οι συνηθέστερες παράμετροι που επιλέγονται:

- Οι κρίσιμες ιδιότητες  $T_c$ ,  $P_c$  των μη επακριβώς ορισμένων συστατικών.
- Ο ακεντρικός παράγοντας  $\omega$  των μη επακριβώς ορισμένων συστατικών.

- Οι δυαδικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης

Ο δυαδικός συντελεστής αλληλεπίδρασης (Binary Interaction Parameter ή BIP) ή παράμετρος αλληλεπίδρασης συστατικού –συστατικού  $k_{ij}$  εξαρτάται από τη σύσταση, την πίεση και τη θερμοκρασία. Αποτελεί έναν εμπειρικά προσδιορισμένο συντελεστή διόρθωσης που σχεδιάστηκε για να χαρακτηρίσει ένα δυαδικό σύστημα ενός συστατικού  $i$  ενός συστατικού  $j$  μέσα σε ένα μίγμα. Οι δυαδικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης στην ουσία χρησιμοποιούνται για να μοντελοποιήσουν τη διαμοριακή αλληλεπίδραση. Εξαρτώνται από τη διαφορά του μεγέθους των μορίων των συστατικών ενός δυαδικού συστήματος. Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στα συστατικά υδρογονανθράκων αυξάνεται όσο αυξάνει η σχετική διαφορά ανάμεσα στα μοριακά τους βάρη. Ζεύγη όμοιων υδρογονανθράκων ( $C1/C1$ ) έχουν δυαδικό συντελεστή αλληλεπίδρασης ίσο με το μηδέν. Τα υπόλοιπα ζεύγη υδρογονανθράκων που δεν είναι όμοια έχουν συντελεστή αλληλεπίδρασης διαφορετικό από το μηδέν. (Nagy, 1982)

Στη συγκεκριμένη εργασία ρυθμίστηκαν η παράμετρος της κρίσιμης πίεσης, η παράμετρος της κρίσιμης θερμοκρασίας και η παράμετρος μετατόπισης όγκου γνωστή ως volume shift parameter ( $V_s$ ) ή volume translation. Μία σύγκριση μεταξύ του προβλεπόμενου μοριακού όγκου του υγρού και των πειραματικών δεδομένων των καθαρών συστατικών δείχνει γενικά μία συστηματική απόκλιση. Αυτή η απόκλιση είναι περίπου σταθερή σε ένα μεγάλο εύρος πίεσης μακριά από το κρίσιμο σημείο. Αυτή η απόκλιση καλείται volume shift parameter ( $V_s$ ) ή παράμετρος μετατόπισης όγκου. Η παράμετρος μετατόπισης όγκου μπορεί λύσει την αδυναμία στις ογκομετρικές προβλέψεις μοριακού υγρού από δύο σταθερές EOS. (Danesh, 1998).

## Κεφάλαιο 5 Συσχετίσεις των ιδιοτήτων του πετρελαίου

### 5.1 Που ωφελεί η χρήση των συσχετίσεων PVT;

Ιδανικά οι ιδιότητες PVT μετρώνται πειραματικά στο εργαστήριο. Όταν όμως τέτοιες άμεσες μετρήσεις δεν είναι διαθέσιμες, χρησιμοποιούνται συχνά συσχετίσεις PVT από τη βιβλιογραφία.

Πολλοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών PVT και δεδομένα πεδίου για την ανάπτυξη συσχετίσεων που στοχεύουν στην εκτίμηση των ιδιοτήτων των ρευστών των ταμιευτήρων. Οι κυρίες ιδιότητες που προσδιορίζονται από τις εμπειρικές συσχετίσεις είναι η πίεση στο σημείο φυσαλίδας, η πυκνότητα, το ιξώδες, ο ογκομετρικός συντελεστής σχηματισμού πετρελαίου, ο λόγος του αερίου εν διαλύσει. (Danesh, 1998)



Οι συσχετίσεις μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- Εκείνες που θεωρούν το πετρέλαιο, το αέριο και το νερό σε τρία ψευδοσυστατικά και χειρίζονται ένα ταμιευτήρα ρευστών ως μία σύνθεση αυτών των ψευδοσυστατικών.
- Η δεύτερη κατηγορία αποτελείται από εκείνες τις συσχετίσεις που θεωρούν ότι το πετρέλαιο αποτελείται από τα κανονικά συστατικά, τα ψευδοσυστατικά και το βαρύ κλάσμα. Παράδειγμα ενός κανονικού συστατικού είναι το εξάνιο (C6), ενός ψευδοσυστατικού το ψευδοεξάνιο και ενός βαρύ κλάσματος το C12+ αν έχει παραπάνω από 12 άτομα άνθρακα. (Danesh , 1998)

Η πρώτη κατηγορία συσχετίσεων είναι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη.

Οι συσχετίσεις αυτές καθίσταται σημαντικές καθώς, ελλείψει πειραματικά μετρούμενων ιδιοτήτων των ρευστών του ταμιευτήρα, οι φυσικές ιδιότητες πρέπει να εκτιμηθούν από συσχετίσεις.

Προκειμένου να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα αυτής της εργασίας δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στους περιορισμούς των παραμέτρων εισόδου κάθε συσχέτισης όπως αναφέρονται στη βιβλιογραφία για τις εμπειρικές συσχετίσεις PVT.

## **5.2 Επιλογή των κατάλληλων συσχετίσεων PVT**

Ο ακριβής προσδιορισμός των ιδιοτήτων PVT του αργού πετρελαίου είναι απαραίτητος για την επίλυση πολλών προβλημάτων της μηχανικής πετρελαίου. Ένας μεγάλος αριθμός συσχετίσεων PVT για το πετρέλαιο υπάρχει στη βιβλιογραφία για το πετρέλαιο και υπάρχουν επίσης πολυάριθμες μελέτες με δεδομένα που ευνοούν τη μία συσχέτιση έναντι της άλλης. Βέβαια όταν υπάρχει έλλειψη στα πειραματικά δεδομένα, είναι συχνά δύσκολο να επιλεγεί ποια συσχέτιση θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των διαφορετικών ιδιοτήτων PVT. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί με την ανάπτυξη ενός έμπειρου συστήματος που ελέγχει τις παραμέτρους εισόδου (πχ παραμέτρους δεξαμενής) σε σχέση με τα έγκυρα εύρη δεδομένων εισόδου για διαφορετικές συσχετίσεις και στη συνέχεια, προτείνεται ποιες συσχετίσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συγκεκριμένες παραμέτρους εισόδου. Πολλοί συσχετισμοί για την εκτίμηση των ιδιοτήτων PVT του αργού πετρελαίου έχουν δημοσιευτεί τα τελευταία 50 χρόνια. Οι περισσότερες από αυτές τις συσχετίσεις αποδίδουν εύλογα ακριβή αποτελέσματα όταν εφαρμόζονται στους αρχικούς περιορισμούς. (Zahaby. Al, 2012)

Ένα πρόγραμμα προσομοίωσης υπολογιστή για μοντέλο συσχετίσεων PVT πετρελαίου γράφτηκε σε μια γλώσσα προγραμματισμού για την πρόβλεψη όλων των ιδιοτήτων σε ένα ευρύ φάσμα δεδομένων εισόδου. Προκειμένου να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα αυτής της εργασίας δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στους περιορισμούς

των παραμέτρων εισόδου (P, °API, T, SGg) κάθε συσχέτισης όπως αναφέρονται και στους πίνακες 3,4 και 5 αντίστοιχα. Σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται οι πιο δημοφιλείς συσχετίσεις μαύρου πετρελαίου που αναπτύχθηκαν κατά την περίοδο από το 1947 έως το 2010. Τα όρια των παραμέτρων εισόδου των συσχετίσεων αυτών όπως αναλύεται και παρακάτω πρέπει να εντάσσονται στα όρια των πειραματικών δεδομένων της διαφορικής εξάτμισης.

Ο Standing, το 1947 χρησιμοποίησε συνολικά 105 σημεία δεδομένων σε 22 διαφορετικά αργά πετρέλαια από την Καλιφόρνια για να αναπτύξει τις συσχετίσεις του. (Ahmed, 2010)

Οι Vasquez και Beggs, το 1989 ανέπτυξαν συσχετίσεις για την αναλογία αερίου προς το πετρέλαιο του διαλύματος και τον παράγοντα όγκου σχηματισμού χρησιμοποιώντας 6004 σημεία δεδομένων. (Ahmed, 2010)

Ο Glasso, το 1980 χρησιμοποίησε δεδομένα από 45 δείγματα πετρελαίου κυρίως από την περιοχή της Βόρειας Θάλασσας για να αναπτύξει τους συσχετισμούς του. (Ahmed, 2010)

Ο Al-Marhoun, το 1988 χρησιμοποίησε δεδομένα 160 σημείων φυσαλίδας σε 69 δείγματα ακατέργαστου της Μέσης Ανατολής για να αναπτύξει μια συσχέτιση πίεσης σημείου φυσαλίδας. (Ahmed, 2010)

Ο Petrosky-Farshad, το 1995 χρησιμοποίησαν δεδομένα για υγρά από ταμιευτήρες στον Δυτικό Καναδά, την Αφρική και το Τέξας-Λουιζιάνα, αντίστοιχα να αναπτύξουν διάφορους συσχετισμούς. (Ahmed, 2010)

Μάλλον διαφορετικοί συσχετισμοί ήταν πιο ακριβείς σε ορισμένα εύρη δεδομένων ενώ άλλοι ήταν πιο ακριβείς σε άλλα εύρη. (Ahmed, 2010)

Στη συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκαν οι παρακάτω συσχετίσεις για κάθε ιδιότητα καθώς συγκρίθηκαν τα εύρη εφαρμογής των συσχετίσεων σε ιδιότητες όπως το Pb, Bo, SGg, SGo, T, Rs και τα αντίστοιχα των πειραματικών δεδομένων, με αποτέλεσμα να επιλεχθούν οι παρακάτω ερευνητές με τις αντίστοιχες συσχετίσεις τους.

Για παράδειγμα όσο αφορά τον ογκομετρικό συντελεστή υγρού πετρελαίου (Bo) επιλέχθηκαν οι συσχετίσεις του Standing, Al-Marhoun 1988, Vawqez & Beggs, Petrofsky 1990 και Al-Mehaideb 1997, καθώς οι τιμές των δεδομένων μας εντάσσονται στα όρια εφαρμογής των παραπάνω συσχετίσεων, τα οποία φαίνονται στους πίνακες 3, 4, 5 αντίστοιχα. Σχετικά με την αναλογία υγρού αερίου Rs επιλέχθηκαν οι συσχετίσεις του Petrofsky 1993, Mac&Elbat 1992, Standing 1947, Maz&Ash 2007 και Khameh&Ebra 2009 καθώς οι τιμές των δεδομένων μας εντάσσονται στα όρια εφαρμογής των παραπάνω συσχετίσεων, τα οποία φαίνονται στους πίνακες 3, 4, 5 αντίστοιχα. Τέλος η πίεση στο σημείο φυσαλίδας Pb υπολογίσθηκε από τις συσχετίσεις του Hassan 2011, Standing 1947, Elam 1957 και

Al-Marhoun 1998, καθώς οι τιμές των δεδομένων μας εντάσσονται στα όρια εφαρμογής των παραπάνω συσχετίσεων, τα οποία φαίνονται στους πίνακες 3 , 4, 5 αντίστοιχα. Αναλυτικότερα οι τιμές της θερμοκρασίας των δειγμάτων όπως και οι τιμές του αερίου εν διαλύσει και της σχετικής πυκνότητας του αερίου όσο και η πίεση εντάσσονται στα εύρη εφαρμογής των συσχετίσεων που επιλέχθηκαν. Αυτός λοιπόν είναι ο τρόπος επιλογής των συσχετίσεων σε αυτήν την εργασία. Αντίστοιχα επιλέχθηκαν και οι συσχετίσεις για τις άλλες δύο ιδιότητες του πετρελαίου, το  $P_b$  και το  $R_s$ .

### 5.3 Πίεση στο σημείο φυσαλίδας ( $P_{bp}$ )

Η πίεση στο σημείο φυσαλίδας είναι γνωστή και ως πίεση σε μία αναφορική θερμοκρασία  $T$ , όπου η πρώτη φυσαλίδα ελευθερώνεται από την ρευστή φάση. Η αναφερόμενη  $T$ , είναι συνήθως η  $T$ , που επικρατεί στο ταμειυτήρα, αλλά γενικά οποιαδήποτε θερμοκρασία  $T$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Η  $P_{bp}$  είναι συνάρτηση της  $T$  και αλλάζοντας την αναφερόμενη  $T$ , θα αλλάζει και η  $P_{bp}$ . (Βαρότσης, Μηχανική Ταμειυτήρων)

#### 5.3.1 Συσχετίσεις για το σημείο φυσαλίδας

→ Ο Al-Marhoun το 1988 δημοσίευσε μία συσχέτιση με σκοπό την εκτίμηση του σημείου φυσαλίδας ( $P_b$ ). (Lake, 2007)

$$P_b = \frac{5.38088 * 10^{-3} * R_s^{0.715082} * SGo^{3.1437} * (T + 459.67)^{1.32657}}{SGg^{1.87784}}$$

όπου,

- $R_s$  = αναλογία αερίου – πετρελαίου (scf/stb)
- $SGg$  = ειδική πυκνότητα αερίου αναφορικά με τον αέρα
- $T$  = θερμοκρασία φρεατίου ( $^{\circ}R$ )
- $P_b$  = η πίεση στο σημείο φυσαλίδας (psia)
- $SGo$  = ειδική πυκνότητα πετρελαίου, αναφορικά με το νερό

→ Ο Elam το 1957 δημοσίευσε μία συσχέτιση με σκοπό την εκτίμηση του σημείου φυσαλίδας ( $P_b$ ). (Lake, 2007)

$$P_b = \left( \frac{R_s^{0.702}}{SGg^{0.514}} \right) * e^{0.003481 - 0.0282 * API + 3.58}$$

όπου,

- $R_s$  = αναλογία αερίου – πετρελαίου (scf/stb)
- $SGg$  = ειδική πυκνότητα αερίου αναφορικά με τον αέρα

- $P_b$  = η πίεση στο σημείο φυσαλίδας (psia)
  - API = βαρύτητα API = ένα αντίστροφο μέτρο της πυκνότητας ενός πετρελαιοειδούς υγρού σε σχέση με αυτή του νερού, γνωστό και ως ειδικό βάρος.
- Ο Standing το 1947 δημοσίευσε μία συσχέτιση με σκοπό την εκτίμηση του σημείου φυσαλίδας ( $P_b$ ) για πιέσεις μεγαλύτερες και από τα 1000 psia. Η συσχέτιση βασίστηκε σε 105 πειραματικά δεδομένα από πετρέλαια της Καλιφόρνιας. Τα εύρη των κλιμάκων για τα δεδομένα που δέχεται η εξίσωση είναι τα εξής (Lake, 2007) :

- |                   |                      |
|-------------------|----------------------|
| • $P_b$ (psia)    | 130 to 7000 (psia)   |
| • $T$ (F)         | 100 to 258 (F)       |
| • $R_s$ (scf/stb) | 20 to 1425 (scf/stb) |
| • $SG_g$ (air=1)  | 0.59 to 0.95         |
| • API             | 16.5 to 63.8         |

$$P_b = 18.2 * \left( \left( \frac{R_s}{SG_g} \right)^{0.83} * 10^{((0.00091*T - 0.0125*API) - 1.4)} \right)$$

όπου,

- $R_s$  = αναλογία αερίου – πετρελαίου (scf/stb)
  - $SG_g$  = ειδική πυκνότητα αερίου αναφορικά με τον αέρα
  - $P_b$  = η πίεση στο σημείο φυσαλίδας (MPa)
  - API = βαρύτητα API = ένα αντίστροφο μέτρο της πυκνότητας ενός πετρελαιοειδούς υγρού σε σχέση με αυτή του νερού, γνωστό και ως ειδικό βάρος
  - $T$  = θερμοκρασία φρεατίου (°F)
- Ο Hassan το 2011 δημοσίευσε μία συσχέτιση με σκοπό την εκτίμηση του σημείου φυσαλίδας ( $P_b$ ). (Lake, 2007)

$$P_b = 18.2 * \left( \left( \left( \frac{R_s}{SG_g} \right)^{0.83} * 10^{0.00091*T - 0.0125*API} + 2.2 \right) \right)$$

όπου,

- $R_s$  = αναλογία αερίου – πετρελαίου (scf/stb)
- $SG_g$  = ειδική πυκνότητα αερίου αναφορικά με τον αέρα
- $P_b$  = η πίεση στο σημείο φυσαλίδας (MPa)

- API = βαρύτητα API = ένα αντίστροφο μέτρο της πυκνότητας ενός πετρελαιοειδούς υγρού σε σχέση με αυτή του νερού, γνωστό και ως ειδικό βάρος.
- T = θερμοκρασία φρεατίου (oF)
- **Al-Marhoun (1988)**, αναπτύχθηκε μία εμπειρική σχέση με σκοπό τον υπολογισμό της πίεσης στο σημείο φυσαλίδας από μίγματα πετρελαίου και αερίου. Η σχέση αυτή βασίστηκε σε ένα σύνολο 160 εμπειρικών προσδιορισμένων δεδομένων, 69 διαφορετικών ακατέργαστων αργών πετρελαίων από πεδία πετρελαίου της Μέσης Ανατολής. Η συσχέτιση παρουσιάστηκε και σε νομόγραμμα και σε εξίσωση. Οι σταθερές αυτής της σχέσης ανακαλύφθηκαν από μία γραμμική ανάλυση (παλινδρομική ) για τη προτεινόμενη συσχέτιση. Το μέσο σφάλμα είναι 0.88% και η απόκλιση 1.18%. Το εύρος των δεδομένων είναι :
- **Al-Marhoun (1992)**, δημοσίευσε μία άλλη συσχέτιση μένα νέο γραμμικό μοντέλο για το προσδιορισμό του πετρελαίου σε  $P_{bp}$  για μίγματα αερίου – πετρελαίου. Ένα σύνολο 4012 εμπειρικών ανακτηθέντων δεδομένων, 700 διαφορετικών ακατέργαστων μιγμάτων πετρελαίου – αερίου, από όλο τον κόσμο, αλλά κυρίως από πετρέλαια της Μέσης Ανατολής και της Νότιας Αμερικής. Το απόλυτο μέσο σφάλμα είναι 0.57% και η απόκλιση 0.679%. Το εύρος των δεδομένων είναι:

### 5.3.2 Όρια για τις παραμέτρους εισόδου των συσχετίσεων για το Pb

Ιδιότητα	Συσχέτιση	Pb (psia)	SGo (°API)	SGg	T (°F)	Rs (scf/stb)
<b>Pb</b>	Standing	130-7000	16.5-63.8	0.59-0.95	100-258	20-1425
	Petrofsky&Farshad	1574-6523	16.3-45	0.5781-0.8519	114-288	217-1406
	Al-Marhoun	130-3573	19.4-44.6	0.752-1.367	74-240	26-1602
	Glaser	22.3-48.1	22.3-48.1	0.65-1.28	80-280	90-2637
	Khameh&Ebra		33.4-124	0.554-0.858	100-306	83-1708
	Vasquez&Beggs	15-6055	15.3-59.3	0.51-1.35	75-294	0-2199

Πίνακας 3 Όρια για τις παραμέτρους εισόδου των συσχετίσεων για το Pb, όλων των ερευνητών (Danesh, 1998)

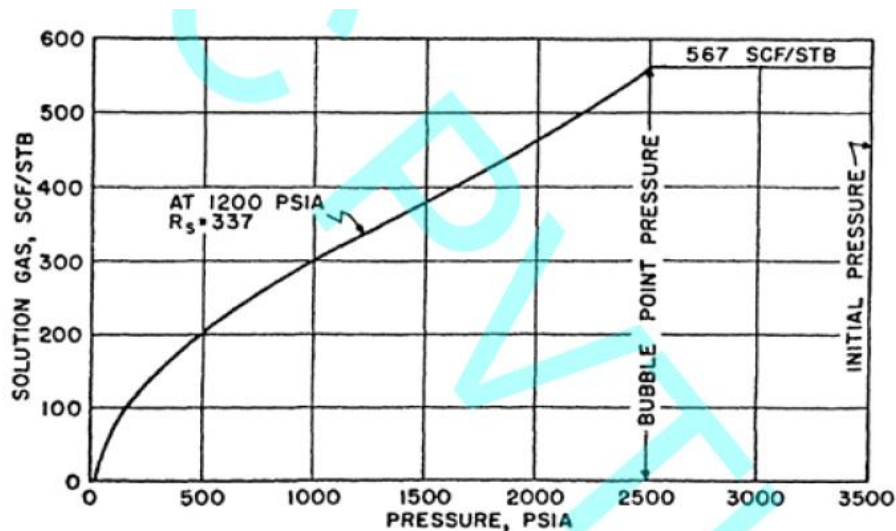
### 5.4 αναλογία αερίου – πετρελαίου (R<sub>s</sub>)

Σαν λόγος αερίου εν διαλύσει/ πετρελαίου R<sub>s</sub> σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, ορίζεται το κλάσμα το οποίο έχει αριθμητή τον ολικό όγκο του αερίου που παραμένει διαλελυμένο στο πετρέλαιο στις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, υπολογισμένο στις κανονικές συνθήκες, δια τον όγκο του υγρού το οποίο θα απομείνει όταν το πετρέλαιο θα παραχθεί σε συνθήκες επιφανείας (STO). Η τιμή του R<sub>s</sub> δίνει το μέτρο της πτητικότητας ενός πετρελαίου. Όταν η πίεση είναι ανώτερη του σημείου κορεσμού το R<sub>s</sub> είναι σταθερό γιατί σε ένα ακόρεστο κοίτασμα όλο το αέριο παραμένει εν διαλύσει. Κάτω του σημείου βρασμού η ποσότητα του αερίου που παραμένει εν διαλύσει μειούται σταθερά καθώς το ποσοστό εξάτμισης βαίνει αυξανόμενο.

$$R_s = \frac{V_{g\ sc}}{V_{o\ sc}} \left( \frac{\text{scf}}{\text{stb}} \right)$$

Οι μονάδες του είναι scf/stb.

Όσο αυξάνεται η πίεση, όλο και περισσότερο αέριο περνάει στην υγρή φάση. Η πίεση όπου η υγρή φάση, δεν μπορεί να κρατηθεί πλέον είναι η πίεση του σημείου φυσαλίδας P<sub>b</sub>. Η P<sub>b</sub> και το R<sub>s</sub> είναι στενά συνδεδεμένα. (Βαρότητας, Μηχανική Ταμειωτήρων)



Εικόνα 19 Λόγος αερίου εν διαλύσει/ υγρού συναρτήσει της πίεσης (Βαρότσης, Μηχανική Ταμιευτήρων)

#### 5.4.1 Συσχετίσεις για την εκτίμηση του $R_s$

- Οι Khamseh & Ebrahimiyan το 2009 δημοσίευσαν μία συσχέτιση για την εκτίμηση της αναλογίας υγρού – αερίου ( $R_s$ ). (Lake, 2007)

$$R_s = 0.0103 * (P_b^{1.014}) * (SGg^{0.719}) * (T^{-0.223}) * (API^{1.182})$$

όπου,

- $R_s$  = αναλογία αερίου – πετρελαίου (scf/stb)
- $SGg$  = ειδική πυκνότητα αερίου αναφορικά με τον αέρα
- $T$  = θερμοκρασία φρεατίου ( $^{\circ}F$ )
- $P_b$  = η πίεση στο σημείο φυσαλίδας (psia)
- $API$  = βαρύτητα  $API$  = ένα αντίστροφο μέτρο της πυκνότητας ενός πετρελαιοκού υγρού σε σχέση με αυτή του νερού, γνωστό και ως ειδικό βάρος
- Οι Mac & Elbat το 1992 δημοσίευσαν μία συσχέτιση για την εκτίμηση της αναλογίας υγρού – αερίου ( $R_s$ ). (Lake, 2007)

$$R_s = \left( 0.0049 * \left( \frac{P_b}{k} \right) + 4.7927 \right)^{1.9606}$$

όπου,

- $R_s$  = αναλογία αερίου – πετρελαίου (scf/stb)
- $P_b$  = η πίεση στο σημείο φυσαλίδας (psia)

$$k = e^{0.00077 \cdot T - 0.0097 \cdot API - 0.4003 \cdot SGg}$$

- API = βαρύτητα API = ένα αντίστροφο μέτρο της πυκνότητας ενός πετρελαιοκού υγρού σε σχέση με αυτή του νερού, γνωστό και ως ειδικό βάρος.
- T = θερμοκρασία φρεατίου (°F)
- Οι Maz & Ash το 2007 δημοσίευσαν μία συσχέτιση για την εκτίμηση της αναλογίας υγρού – αερίου (Rs). (Lake, 2007)

$$Rs = 994.3718 * SGg^{2.113367} * Pb^{1.45558} * SGo^{-5.48944} * (T + 460)^{-1.90488}$$

όπου,

- Rs = αναλογία αερίου – πετρελαίου (scf/stb)
- SGg = ειδική πυκνότητα αερίου αναφορικά με τον αέρα
- T = θερμοκρασία φρεατίου (°F)
- Pb = η πίεση στο σημείο φυσαλίδας (psia)
- API = βαρύτητα API = ένα αντίστροφο μέτρο της πυκνότητας ενός πετρελαιοκού υγρού σε σχέση με αυτή του νερού, γνωστό και ως ειδικό βάρος
- SGo = ειδική πυκνότητα πετρελαίου, αναφορικά με το νερό
- Standing το 1947 δημοσίευσε μία συσχέτιση για την εκτίμηση της αναλογίας υγρού – αερίου (Rs). (Lake, 2007)

$$Rs = 30.7343 * 10^{-3} * SGg * Pb^{1.2048} * e^{-2.5245 \cdot 10^{-3} \cdot T + 34.677 \cdot 10^{-3} \cdot API}$$

όπου,

- Rs = αναλογία αερίου – πετρελαίου (scf/stb)
- SGg = ειδική πυκνότητα αερίου αναφορικά με τον αέρα
- T = θερμοκρασία φρεατίου (°F)
- Pb = η πίεση στο σημείο φυσαλίδας (psia)
- API = βαρύτητα API = ένα αντίστροφο μέτρο της πυκνότητας ενός πετρελαιοκού υγρού σε σχέση με αυτή του νερού, γνωστό και ως ειδικό βάρος
- Petrofsky το 1993 δημοσίευσε μία συσχέτιση για την εκτίμηση της αναλογίας υγρού – αερίου (Rs). (Lake, 2007)

$$Rs = \left( \left( \left( \frac{Pb}{112.727} \right) + 12.34 \right) * SGg^{0.8439} * 10^x \right)^{1.73184}$$



όπου,

- $R_s$  = αναλογία αερίου – πετρελαίου (scf/stb)
- $SG_g$  = ειδική πυκνότητα αερίου αναφορικά με τον αέρα
- $T$  = θερμοκρασία φρεατίου ( $^{\circ}R$ )
- $P_b$  = η πίεση στο σημείο φυσαλίδας (psia)

$$x = 7.916 * 10^{-4} * API^{1.541} - 4.561 * 10^{-5} * (T - 460)^{1.3911}$$

- $API$  = βαρύτητα  $API$  = ένα αντίστροφο μέτρο της πυκνότητας ενός πετρελαιοειδούς υγρού σε σχέση με αυτή του νερού, γνωστό και ως ειδικό βάρος

#### 5.4.2 Όρια για τις παραμέτρους εισόδου των εξισώσεων για το Rs

Ιδιότητα	Συσχέτιση	Pb (psia)	SGo	SGg	T(F)	Rs(sc/ftb)
Rs	Standing	130-7000	16.5-63.8	0.59-0.95	100-258	20-1425
	Petro&Farshad	1574-6523	16.3-45	0.5781-0.8519	114-288	217-1406
	Al-Marhoun	130-3573	19.4-44.6	0.752-1.367	74-240	26-1602
	Glaser	160-7142	22.3-48.1	0.65-1.276	80-280	22.3-48.1
	Khameh&Ebrahimian	160-7142	33.4-124	0.554-0.858	100-306	83-1708

Πίνακας 4 Όρια για τις παραμέτρους εισόδου των συσχετίσεων για το Rs, όλων των ερευνητών (Danesh, 1998)

#### 5.5 Ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου (B<sub>o</sub>)

Σαν ογκομετρικός συντελεστής σχηματισμού υγρής φάσεως ορίζεται ο λόγος του όγκου που ένα υγρό μίγμα (συμπεριλαμβανομένου και των αερίων που περιλαμβάνει εν διαλύσει) καταλαμβάνει στις συνθήκες του σχηματισμού προς τον όγκο του υγρού που θα απομείνει αφού το μίγμα ισορροπήσει σε κανονικές συνθήκες στην επιφάνεια( τα εν διαλύσει αέρια έχουν απελευθερωθεί). Ο συντελεστής αυτός συμβολίζεται με B<sub>o</sub> ή FVF και λαμβάνει πάντοτε τιμές μεγαλύτερες από τη μονάδα. Ένα B<sub>o</sub> ερμηνεύεται ως εξής: Αν B<sub>o</sub> = 1.310 σε συνθήκες ταμειυτήρα, σημαίνει πως για κάθε 1.310 bbl=βαρέλια σε πίεση και θερμοκρασία του κοιτάσματος ένα βαρέλι, δηλαδή μόνο το 76.3 % του αρχικού ρευστού θα φτάσει στο tank (δεξαμενή).

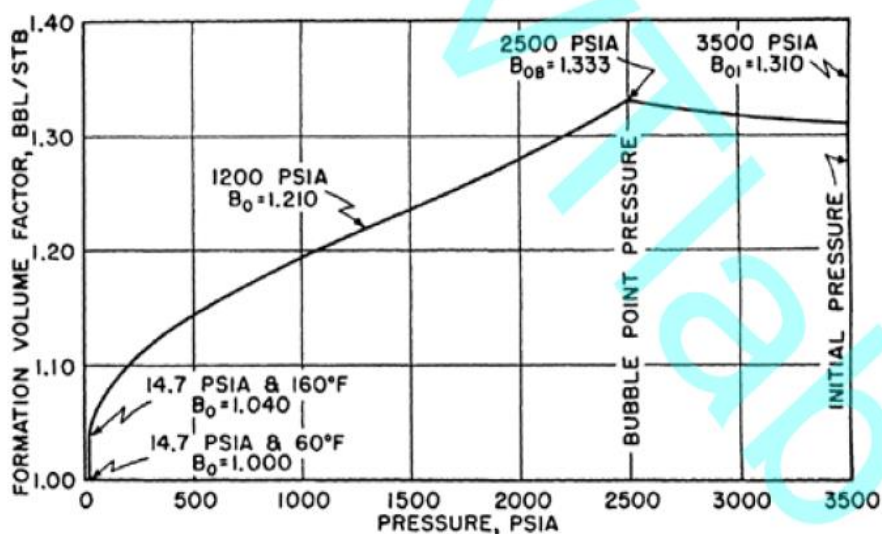
Όσο αυξάνεται η πίεση, όλο και περισσότερο αέριο πηγαίνει στην υγρή φάση, αυξάνοντας έτσι το B<sub>o</sub>. Μόλις επιτευχθεί το σημείο φυσαλίδας, δεν μπορεί να διαλυθεί άλλο αέριο και το B<sub>o</sub> αρχίζει να έχει μία σταδιακή μείωση καθώς το ρευστό συμπιέζεται.

Το B<sub>o</sub> μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί ο όγκος ενός βαρελιού πετρελαίου που διαμένει σε μία επιφάνεια που επικρατούν συνθήκες φρεατίου (περιλαμβάνοντας τον όγκο του διαλελυμένου αερίου) και χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση. (Βαρότσης, Μηχανική Ταμειυτήρων)

$$q_o = Q_o * B_o$$

όπου,

- q<sub>o</sub> = ογκομετρική παροχή πετρελαίου σε συνθήκες φρεατίου (downhole), με μονάδες (bbl/d ή m<sup>3</sup>/d)
- Q<sub>o</sub> = ογκομετρική παροχή πετρελαίου σε κανονικές συνθήκες, με μονάδες (stb/d ή sm<sup>3</sup>/d)
- B<sub>o</sub> = ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου , (bbl/stb ή m<sup>3</sup>/sm<sup>3</sup>)



Εικόνα 20 Ογκομετρικός συντελεστής σχηματισμού υγρής φάσης συναρτήσει της πίεσης (Βαρότσης, Μηχανική Ταμειυτήρων)

#### 5.5.1 Συσχετίσεις για την εκτίμηση του $B_o$

- Ο Standing δημοσίευσε το 1947 μία συσχέτιση, χρησιμοποιώντας 105 δεδομένα από 22 διαφορετικά δείγματα ακατέργαστου ή αργού πετρελαίου από την Καλιφόρνια, με σκοπό την ανάπτυξη της δικής του συσχέτισης. Η σχέση αυτή είναι η παλαιότερη, η απλούστερη και η πιο σύνηθες χρησιμοποιημένη συσχέτιση που υπάρχει.

Αρχικά ο Standing παρήγαγε μία γραφική συσχέτιση και μετά εξέφρασε το γράφημα σε μία εξίσωση, για την εκτίμηση του  $B_o$ . Η συσχέτισή του είναι η ακόλουθη (Lake, 2007):

$$B_o = 0.972 + 1.47 \cdot 10^{-4} \cdot (R_s \cdot \left(\frac{SGg}{SGo}\right)^{0.5} + 1.125 \cdot T)^{1.175}$$

όπου,

- $B_o$  = ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου, (bbl/stb)
- $R_s$  = αναλογία αερίου – πετρελαίου (scf/stb)
- $SGg$  = ειδική πυκνότητα αερίου αναφορικά με τον αέρα
- $SGo$  = ειδική πυκνότητα πετρελαίου, αναφορικά με το νερό
- $T$  = θερμοκρασία φρεατίου (°F)
- Ο Al-Marhoun δημοσίευσε το 1988 μία συσχέτιση για την εκτίμηση του ογκομετρικού συντελεστή πετρελαίου ( $B_o$ ). (Lake, 2007)

$$Bo = 0.497069 + 0.000862963 * (T + 460) + 0.001182594 \\ * (Rs^{0.74239} * SGg^{0.323294} * SGo^{-1.20204}) + 0.00000318099 \\ * (Rs^{0.74239} * SGg^{0.323294} * SGo^{-1.20204})^2$$

όπου,

- Bo = ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου , (bbl/stb)
- Rs = αναλογία αερίου – πετρελαίου (scf/stb)
- SGg = ειδική πυκνότητα αερίου αναφορικά με τον αέρα
- SGo = ειδική πυκνότητα πετρελαίου, αναφορικά με το νερό
- T = θερμοκρασία φρεατίου (oF)

- Ο Al-Marhoun δημοσίευσε το 1992 μία συσχέτιση για την εκτίμηση του ογκομετρικού συντελεστή πετρελαίου (Bo). (Lake, 2007)

$$Bo = 1 + 0.000177342 * Rs + 0.000220163 * Rs * \left( \frac{SGg}{SGo} \right) + 0.00000429258 \\ * Rs * (1 - SGo) * (T - 60) + 0.000528707 * (T - 60)$$

όπου,

- Bo = ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου , (bbl/stb)
- Rs = αναλογία αερίου – πετρελαίου (scf/stb)
- SGg = ειδική πυκνότητα αερίου αναφορικά με τον αέρα
- SGo = ειδική πυκνότητα πετρελαίου, αναφορικά με το νερό
- T = θερμοκρασία φρεατίου (oF)

- Οι Vasquez&Beggs δημοσίευσαν μία συσχέτιση για την εκτίμηση του ογκομετρικού συντελεστή πετρελαίου (Bo). (Lake, 2007)

$$Bo = 1 + 0.0004677 * Rs + 1.751 * 10^{-5} * \left( \left( \frac{SGo}{SGg} \right) * (T - 60) \right) - 1.8106 * 10^{-8} \\ * \left( Rs * \left( \frac{SGo}{SGg} \right) * (T - 60) \right) \\ + 0.000528707 * (T - 60)$$

όπου,

- Bo = ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου , (bbl/stb)
- Rs = αναλογία αερίου – πετρελαίου (scf/stb)
- SGg = ειδική πυκνότητα αερίου αναφορικά με τον αέρα
- SGo = ειδική πυκνότητα πετρελαίου, αναφορικά με το νερό
- T = θερμοκρασία φρεατίου (oF)

- Ο Al Meh το 1997 δημοσίευσαν μία συσχέτιση για την εκτίμηση του ογκομετρικού συντελεστή πετρελαίου (Bo). (Lake, 2007)

$$Bo = 1.122 + 0.00000141 * Rs * \left( \frac{T}{SGo} \right)^2$$

όπου,

- Bo = ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου , (bbl/stb)
  - Rs = αναλογία αερίου – πετρελαίου (scf/stb)
  - SGo = ειδική πυκνότητα πετρελαίου, αναφορικά με το νερό
  - T = θερμοκρασία φρεατίου (oF)
- Ο Petrofsky το 1990 δημοσίευσαν μία συσχέτιση για την εκτίμηση του ογκομετρικού συντελεστή πετρελαίου (Bo). (Lake, 2007)

$$Bo = 1.0113 + 7.2046 * 10^{-5} * \left( \left( \frac{Rs^{0.3738} * SGg^{0.2914}}{SGo^{0.6265}} + 0.24626 * T^{0.5371} \right)^{3.0936} \right)$$

όπου,

- Bo = ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου , (bbl/stb)
- Rs = αναλογία αερίου – πετρελαίου (scf/stb)
- SGg = ειδική πυκνότητα αερίου αναφορικά με τον αέρα
- SGo = ειδική πυκνότητα πετρελαίου, αναφορικά με το νερό
- T = θερμοκρασία φρεατίου (oF)

### 5.5.2 Όρια των παραμέτρων εισόδου κάθε εξίσωσης για το Bo

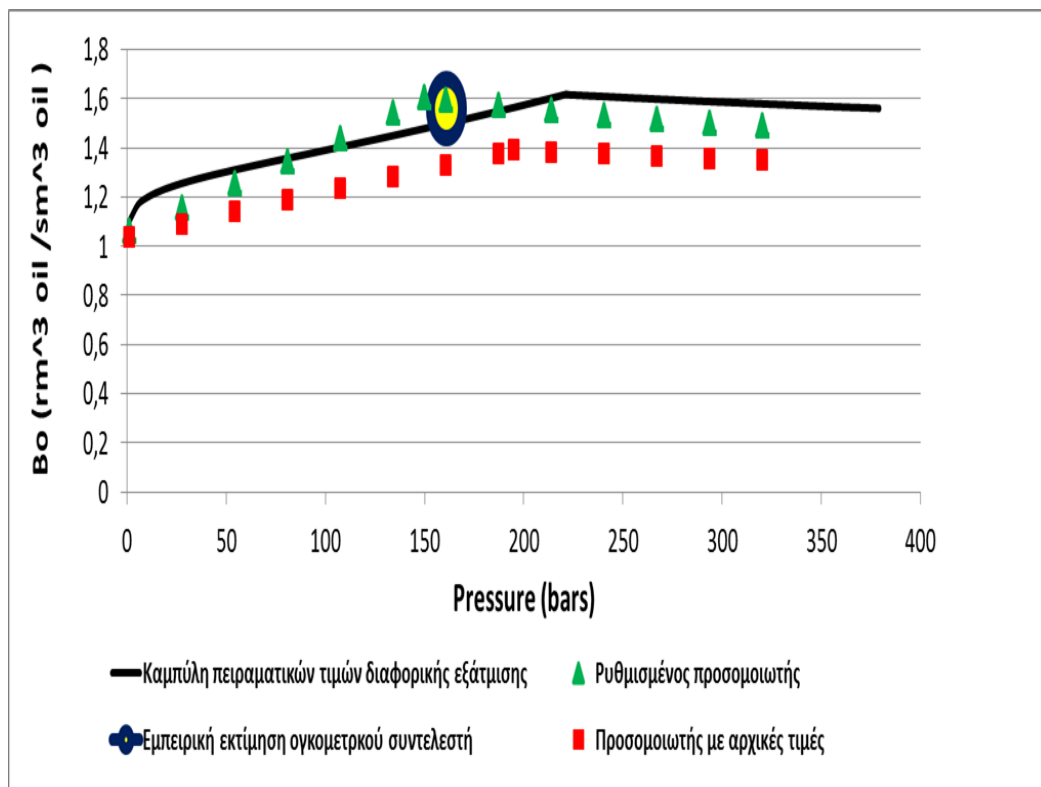
Ιδιότητα	Συσχέτιση	SGo (API)	SGg	T (F)	Rs (scf/stb)	Bo(bbl/stb)
<b>Bo</b>	Standing	16.5-63.8	0.59-0.95	100-258	20-1425	1.024-2.15
	Petro&Farshad	16.3-45	0.5781-0.8519	114-288	217-1406	1.1178-1.6229
	Al-Marhoun	19.4-44.6	0.753-1.367	74-240	24-1453	1.032-2.588)
	Glasso	22.3-48.1	0.65-1.28	80-280	90-2637	1.032-2.588
	Vasquez&Beggs	15.3-59.3	0.511-1.35	75-294	0-2199	1.032-2.588
	Al-Mehaideb	30.9-48.6	0.75-1.12	190-306	128-3871	1.032-2.588

Πίνακας 5 Όρια για τις παραμέτρους εισόδου των συσχετίσεων για το Bo, όλων των ερευνητών (Danesh, 1998)

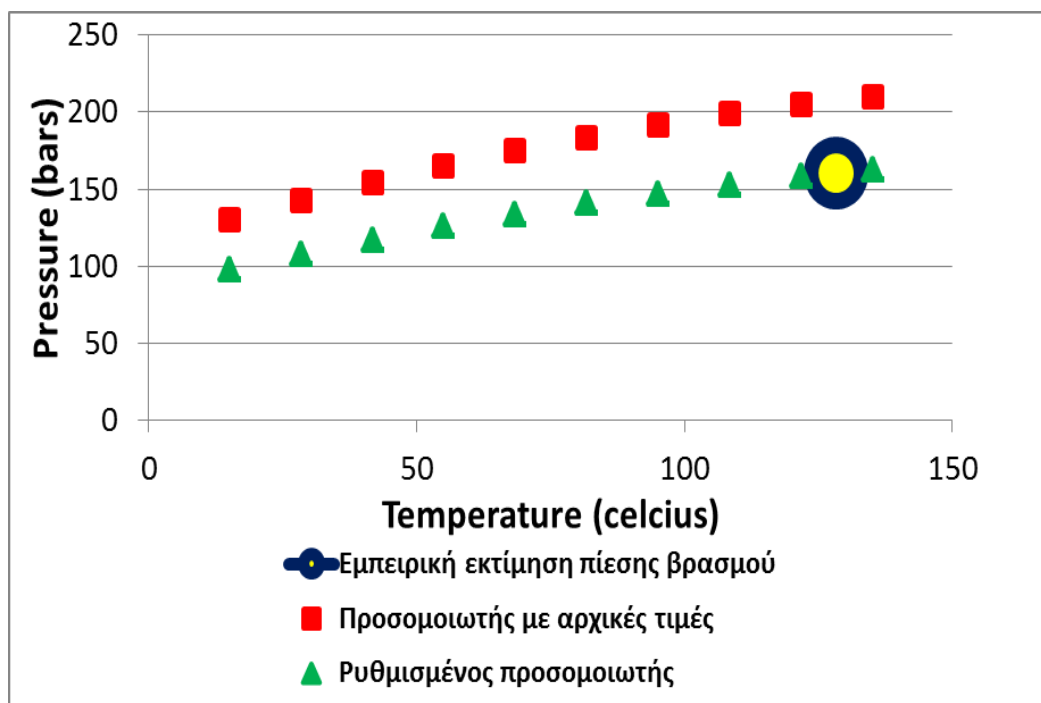
### Κεφάλαιο 6 Ενδεικτικά αποτελέσματα προσομοίωσης πετρελαίου

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα πετρελαίου που φαίνεται η προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε τόσο για τον ογκομετρικό συντελεστή του πετρελαίου (Bo) όσο και για τη πίεση στο σημείο φουσαλίδας (Pb) , την αναλογία υγρού- αερίου (Rs) και το φάκελο φάσεων είναι το πετρέλαιο 206. Γενικά χρησιμοποιούνται κωδικοί στα πετρελαϊκά δείγματα που χρησιμοποιήσαμε για αυτό και το 206 η παρακάτω τα

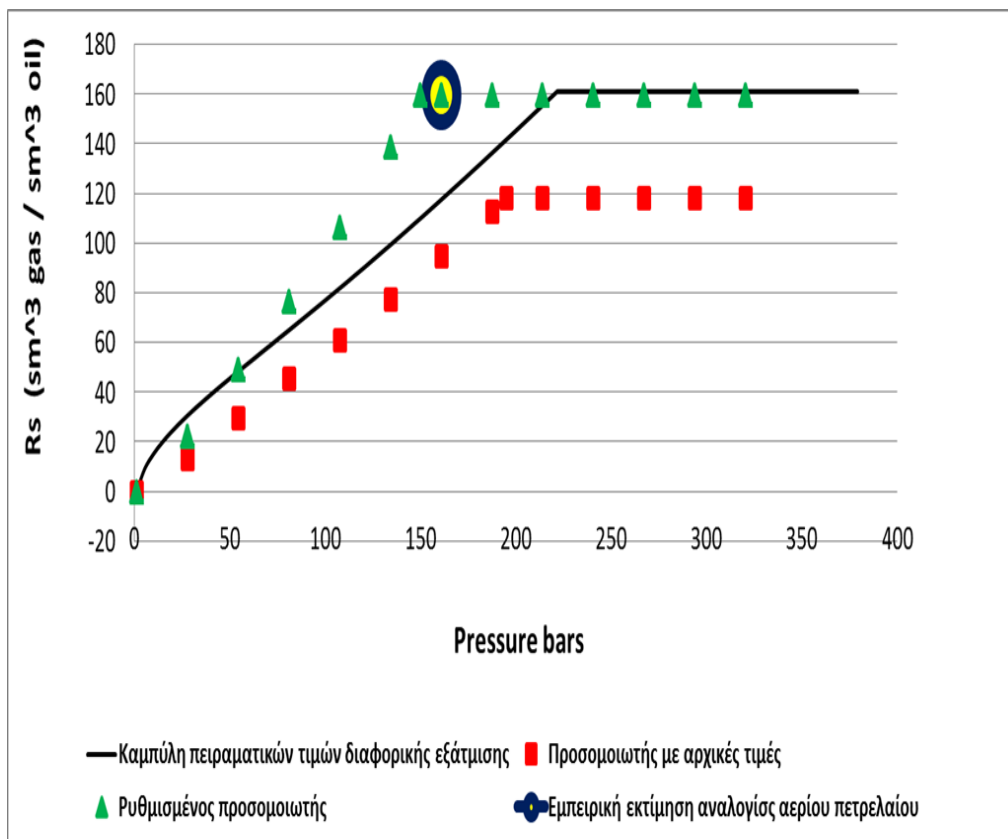
πετρέλαια 203, 227 και τα υπόλοιπα. Ο κάθε κωδικός από αυτά τα πετρέλαια έχει μία συγκεκριμένη σύσταση.



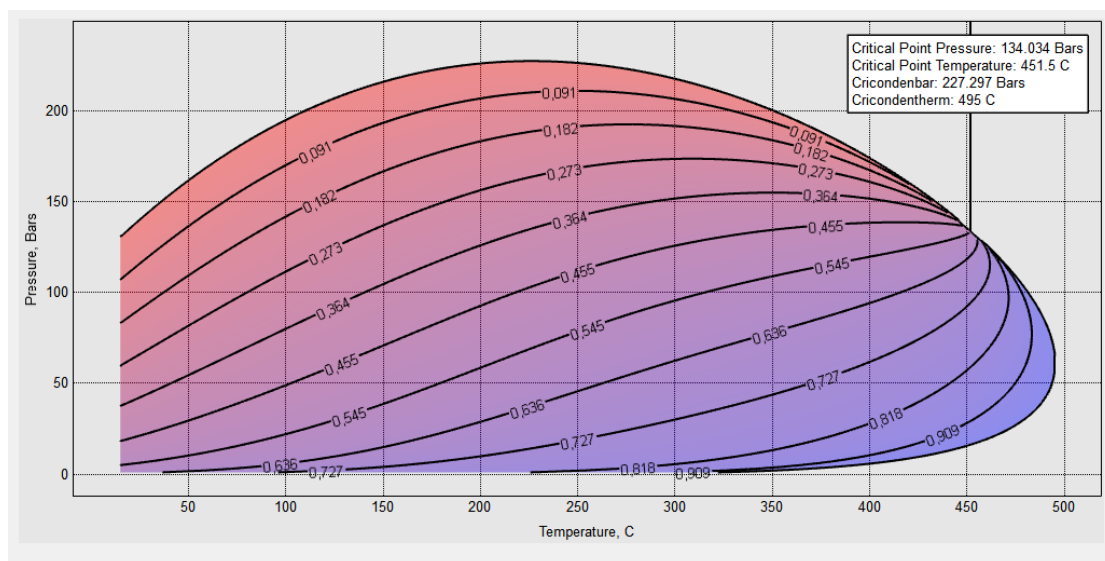
Διάγραμμα 11 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 206



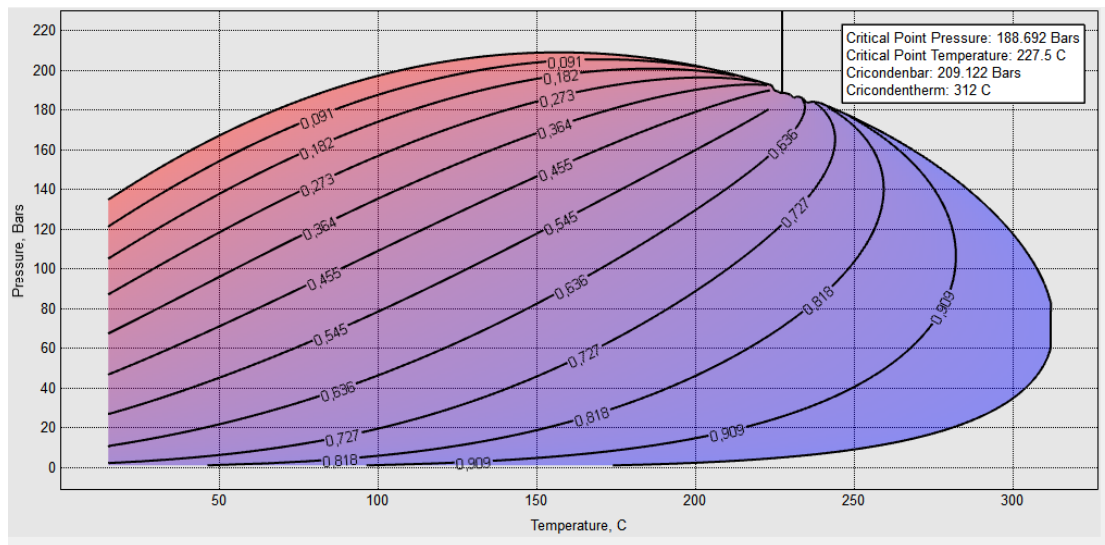
Διάγραμμα 12 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 206



Διάγραμμα 13 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 206



Διάγραμμα 14 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 206 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων



Διάγραμμα 15 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 206 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων

### 6.1 Παρατηρήσεις για το πετρέλαιο 206

Παρατηρείται λοιπόν, πως η προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε ήταν απαραίτητη, καθώς τα στοιχεία μετά τη ρύθμιση προσεγγίζουν καλύτερα τη καμπύλη της διαφορικής εξάτμισης και το σημείο της πίεσης φυσαλίδας προσεγγίζεται ακριβώς από τη προσομοιωμένη καμπύλη στα διαγράμματα της πίεσης. Αυτό το συμπέρασμα που άγεται ισχύει τόσο για το διάγραμμα του ογκομετρικού συντελεστή ( $B_o$ ), όσο και για τα διαγράμματα της αναλογίας αερίου- πετρελαίου ( $R_s$ ) και πίεσεως ( $P$ ) αντίστοιχα.

### 6.2 Συμπεράσματα

- Όσο αφορά τα πετρέλαια **202**, **205**, **206**, **208**, **209**, **227**, **253**, **254**, παρατηρείται πως η προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε ήταν απαραίτητη, καθώς τα στοιχεία μετά τη ρύθμιση προσεγγίζουν καλύτερα τη καμπύλη της διαφορικής εξάτμισης και το σημείο της πίεσης φυσαλίδας προσεγγίζεται ακριβώς από τη προσομοιωμένη καμπύλη στα διαγράμματα της πίεσης. Αυτό το συμπέρασμα που άγεται ισχύει τόσο για το διάγραμμα του ογκομετρικού συντελεστή ( $B_o$ ), όσο και για τα διαγράμματα της αναλογίας αερίου- πετρελαίου ( $R_s$ ) και πίεσεως ( $P$ ) αντίστοιχα.
- Αναφορικά με τα πετρέλαια **203** και **204** αντίστοιχα, παρατηρείται πως για την ιδιότητα του ογκομετρικού συντελεστή ( $B_o$ ) η ρύθμιση των παραμέτρων δεν χρειαζόταν καθώς η καμπύλη της διαφορικής εξάτμισης προσεγγίζει τις τιμές πριν τη ρύθμισή τους. Αντίθετα οι προσομοιωμένες τιμές ξεφεύγουν της πορείας της καμπύλης της διαφορικής εξάτμισης. Σχετικά με το διάγραμμα της αναλογίας αερίου – πετρελαίου ( $R_s$ ) η καμπύλη της διαφορικής εξάτμισης



βρίσκεται κάπου στη μέση από εκείνη των ρυθμισμένων τιμών και εκείνη των αρρύθμιστων. Επομένως η προσομοίωση δεν έδωσε ικανοποιητικό αποτέλεσμα για αυτή την ιδιότητα του πετρελαίου. Όσο αφορά το διάγραμμα της πίεσεως τόσο η καμπύλη των ρυθμισμένων όσο και εκείνη των αρρύθμιστων σχεδόν αλληλοκαλύπτονται και το σημείο της πίεσης φυσαλίδας (Pb) της εκτίμησης του ερευνητή βρίσκεται πάνω σε αυτές τις καμπύλες. Έτσι το σημείο φυσαλίδας μπορούσε να συμπεριληφθεί και από τη καμπύλη δίχως τη προσομοίωση.

- Σχετικά με τα πετρέλαια **235, 236, 238** η ρύθμιση που πραγματοποιήθηκε στα διαγράμματα του ογκομετρικού συντελεστή (Bo) και της πίεσεως (P) αντίστοιχα δεν επέφερε κάποια διαφορά, καθώς η καμπύλη των αρρύθμιστων σημείων όσο και εκείνη των ρυθμισμένων είναι σχεδόν η μία πάνω στην άλλη και τα σημεία της διαφορικής εξάτμισης προσεγγίζουν συνεπώς και τις δύο καμπύλες, όπως και το σημείο της πίεσης φυσαλίδας (Pb) προσεγγίζεται και από την ρυθμισμένη και από την αρρύθμιστη καμπύλη. Αντίθετα με τα διαγράμματα της αναλογίας αερίου – πετρελαίου (Rs) αυτών των πετρελαίων, όπου υπάρχει διαφορά καθώς τα ρυθμισμένα σημεία προσεγγίζουν καλύτερα εκείνα της διαφορικής εξάτμισης σε σχέση με τα αρρύθμιστα.
- Αναφορικά με το πετρέλαιο **240** άγεται το συμπέρασμα πως τόσο τα σημεία πριν της προσομοίωσης όσο και αυτά μετά της προσομοίωσης σχεδόν ταυτίζονται και για τα τρία διαγράμματα (Bo, Rs, P). Ακόμη στο διάγραμμα της πίεσης το σημείο φυσαλίδας προσεγγίζεται και από τις δύο καμπύλες.
- Σχετικά με το πετρέλαιο **245** η ρύθμιση που πραγματοποιήθηκε στα διαγράμματα του ογκομετρικού συντελεστή (Bo) και της πίεσεως (P) αντίστοιχα δεν επέφερε κάποια διαφορά, καθώς η καμπύλη των αρρύθμιστων σημείων όσο και εκείνη των ρυθμισμένων είναι σχεδόν η μία πάνω στην άλλη και τα σημεία της διαφορικής εξάτμισης προσεγγίζουν συνεπώς και τις δύο καμπύλες, όπως και το σημείο της πίεσης φυσαλίδας (Pb) προσεγγίζεται και από την ρυθμισμένη και από την αρρύθμιστη καμπύλη. Ωστόσο αισθητή διαφορά παρουσιάζεται στο διάγραμμα αναλογίας αερίου – πετρελαίου (Rs) όπου τα στοιχεία μετά την προσομοίωση προσεγγίζουν καλύτερα τη καμπύλη της διαφορικής εξάτμισης. Άρα η ρύθμιση χρειαζόταν στη συγκεκριμένη περίπτωση.
- Στο πετρέλαιο **255** η προσομοίωση κρίθηκε απαραίτητη όσο αφορά τα διαγράμματα της αναλογίας αερίου – πετρελαίου (Rs) και εκείνο της πίεσεως, καθώς προσεγγίζει καλύτερα τα σημεία της διαφορικής εξάτμισης και βρίσκει ακριβώς το σημείο φυσαλίδας στο διάγραμμα της πίεσεως (P). Αντιθέτως με

το διάγραμμα του ογκομετρικού συντελεστή ( $B_o$ ), που η ρυθμισμένη και η αρρύθμιστη καμπύλη σχεδόν ταυτίζονται, άρα η προσομοίωση δεν χρειαζόταν στη συγκεκριμένη περίπτωση καθώς τα αρρύθμιστα σημεία προσέγγιζαν ικανοποιητικά τη καμπύλη διαφορικής εξάτμισης.

- Στο πετρέλαιο **256** παρόλο που δεν παρατηρείται μεγάλη διαφορά στα ρυθμισμένα σημεία και στα αρρύθμιστα, αναφορικά με τα διαγράμματα του ογκομετρικού συντελεστή ( $B_o$ ) και εκείνο της πίεσως ( $P$ ), φαίνεται ότι η προσομοίωση χρειαζότανε καθώς η ρυθμισμένη καμπύλη προσεγγίζει καλύτερα τη καμπύλη της διαφορικής εξάτμισης και το σημείο φουσαλίδας αντίστοιχα από τη ρυθμισμένη καμπύλη. Αντιθέτως στο διάγραμμα αναλογίας αερίου – πετρελαίου η καμπύλη της διαφορικής εξάτμισης βρίσκεται σχεδόν ενδιάμεσα από την προσομοιωμένη καμπύλη και την αρρύθμιστη. Συνεπώς δεν εξάγεται κάποιο θετικό πόρισμα από αυτήν την προσομοίωση.
- Τόσο στο πετρέλαιο **260** όσο και στο πετρέλαιο **261** η ρύθμιση που πραγματοποιήθηκε στα διαγράμματα του ογκομετρικού συντελεστή ( $B_o$ ), της πίεσως ( $P$ ) και της αναλογίας αερίου – πετρελαίου ( $R_s$ ) αντίστοιχα δεν επέφερε κάποια διαφορά, καθώς η καμπύλη των αρρύθμιστων σημείων όσο και εκείνη των ρυθμισμένων είναι σχεδόν η μία πάνω στην άλλη και τα σημεία της διαφορικής εξάτμισης προσεγγίζουν συνεπώς και τις δύο καμπύλες, όπως και το σημείο της πίεσης φουσαλίδας ( $P_b$ ) προσεγγίζεται και από την ρυθμισμένη και από την αρρύθμιστη καμπύλη.
- Αναφορικά με το πετρέλαιο **262** στο διάγραμμα του ογκομετρικού συντελεστή ( $B_o$ ), η ρυθμισμένη και η αρρύθμιστη καμπύλη σχεδόν ταυτίζονται, άρα η προσομοίωση δεν χρειαζόταν στη συγκεκριμένη περίπτωση καθώς τα αρρύθμιστα σημεία προσέγγιζαν ικανοποιητικά τη καμπύλη διαφορικής εξάτμισης. Όμως, στο διάγραμμα αναλογίας αερίου – πετρελαίου ( $R_s$ ) παρόλο που δεν παρατηρείται μεγάλη διαφορά στα ρυθμισμένα σημεία και στα αρρύθμιστα, φαίνεται ότι η προσομοίωση χρειαζότανε καθώς η ρυθμισμένη καμπύλη προσεγγίζει καλύτερα τη καμπύλη της διαφορικής εξάτμισης. Έπειτα το σημείο φουσαλίδας στο διάγραμμα της πίεσως ( $P$ ) βρίσκεται ακριβώς πάνω στη ρυθμισμένη καμπύλη, επομένως η προσομοίωση πέτυχε.
- Εν συνεχεία στο πετρέλαιο **263** στο διάγραμμα του ογκομετρικού συντελεστή ( $B_o$ ), η ρυθμισμένη και η αρρύθμιστη καμπύλη σχεδόν ταυτίζονται, άρα η προσομοίωση δεν χρειαζόταν στη συγκεκριμένη περίπτωση καθώς τα αρρύθμιστα σημεία προσέγγιζαν ικανοποιητικά τη καμπύλη διαφορικής εξάτμισης. Αντίθετα στο διάγραμμα αναλογίας αερίου – πετρελαίου ( $R_s$ ) η

καμπύλη της διαφορικής εξάτμισης προσεγγίζεται μόνο από τη ρυθμισμένη καμπύλη, άρα εδώ η προσομοίωση χρειαζόταν. Κάτι αντίστοιχο δεν συνέβει στο διάγραμμα της πίεσης (P) όπου η ρυθμισμένη και η αρρύθμιστη καμπύλη ταυτίζονται σχεδόν αλλά δεν προσέγγισε καμία από τις δύο το σημείο φυσαλίδας. Άρα στη συγκεκριμένη περίπτωση η προσομοίωση δεν έφερε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

- Τέλος το πετρέλαιο **265** και συγκεκριμένα τα διαγράμματα του ογκομετρικού συντελεστή (Bo) και της αναλογίας αερίου – πετρελαίου (Rs) αντίστοιχα παρατηρείται πως παρόλο που δεν υφίσταται μεγάλη διαφορά στα ρυθμισμένα σημεία και στα αρρύθμιστα, διαπιστώνεται ότι η προσομοίωση χρειαζότανε καθώς η ρυθμισμένη καμπύλη προσεγγίζει καλύτερα τη καμπύλη της διαφορικής εξάτμισης. Στο διάγραμμα της πίεσης (P) η προσομοίωση δεν ήταν απαραίτητη καθώς η ρυθμισμένη και η αρρύθμιστη καμπύλη σχεδόν ταυτίζονται και η αρρύθμιστη καμπύλη προσεγγίζει ακριβώς το σημείο φυσαλίδας.

### **6.3 Συγκρίσεις αναφορικά με την ακρίβεια των ερευνητών**

Όσο αφορά τον τρόπο της τελικής επιλογής της εξίσωσης του ερευνητή καθίσταται γνωστό πως επιλέχθηκε για κάθε ιδιότητα του πετρελαίου εκείνος ο ερευνητής του οποίου η τιμή είναι πιο κοντά στην πειραματική τιμή της κάθε ιδιότητας (Bo, Pb, Rs) του πετρελαίου

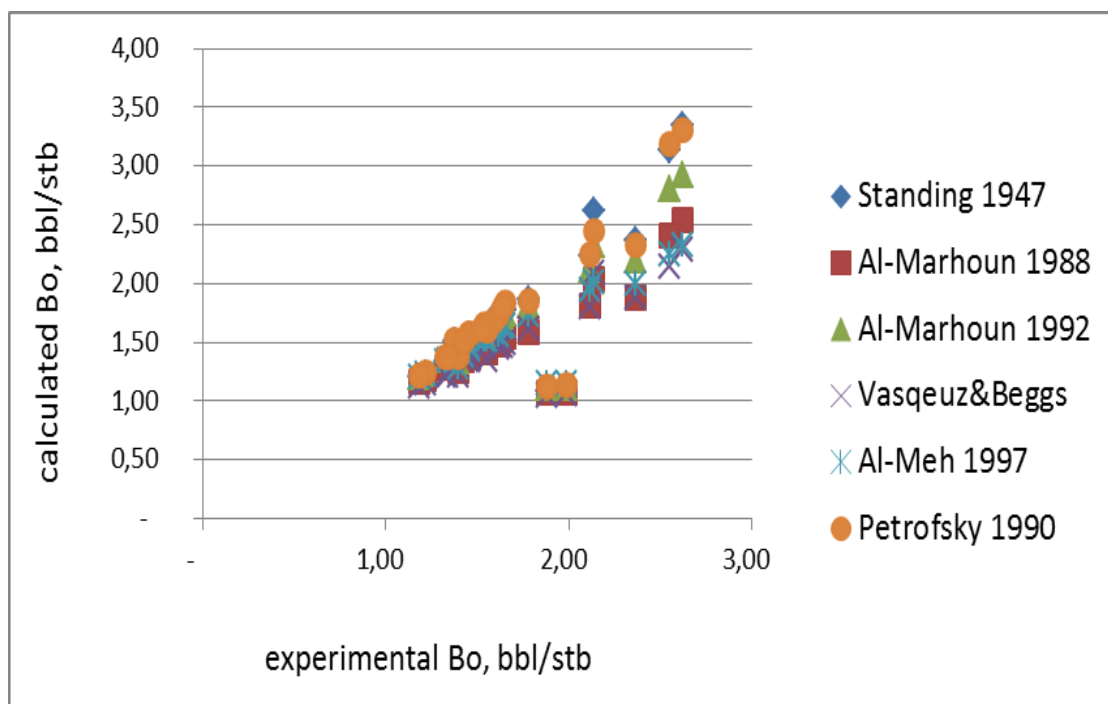
Αναλυτικά για κάθε πετρέλαιο και ιδιότητα επιλέχθηκαν οι παρακάτω ερευνητές:

- Oil 202, Bo( Al –Mehaideb 1947), Pb (Hassan 2011), Rs (Mac-Elbat 1992)
- Oil 203, Bo (Al-Mehaideb 1947), Pb (Hassan 2011), Rs (KhomehchiEbrahimian 2009)
- Oil 204 , Bo (Al-Mehaideb 1947),Pb (Hassan 2011), Rs (KhomehchiEbrahimian 2009)
- Oil 205, Bo (Al –Marhoun 1988), Pb (Al-Marhoun 1988), Rs (Mazandarani&Asghari 2007)
- Oil 206, Bo (Al-Marhoun 1992), Pb (Hassan 2011), Rs (KhomehchiEbrahimian 2009)
- Oil 208, Bo (Al-Marhoun 1988), Pb (Al-Marhoun 1988), Rs (Mazandarani&Asghari 2007)
- Oil 209, Bo (Al-Marhoun 1992), Pb (Al-Marhoun 1988), Rs (Mac- Elbat 1992)
- Oil 227, Bo (Al-Marhoun 1992), Pb (Al-Marhoun 1988) , Rs ( Standing 1947)

- Oil 235, Bo (Al-Mehaideb 1947), Pb (Hassan 2011), Rs (KhamsehchiEbrahimian 2009)
- Oil 236, Bo (Al-Mehaideb 1947), Pb (Hassan 2011), Rs (KhamsehchiEbrahimian 2009)
- Oil 238, Bo (Vasquez & Beggs), Pb (Al-Marhoun 1988), Rs (Standing 1947)
- Oil 240, Bo (Al-Mehaideb 1947), Pb (Hassan 2011), Rs (Standing 1947)
- Oil 245, Bo (Al-Marhoun 1988), Pb (Hassan 2011), Rs (Standing 1947)
- Oil 252, Bo (Petrofsky 1990), Pb (Hassan 2011), Rs (Mazandarani&Asghari 2007)
- Oil 253, Bo (Al-Mehaideb 1947), Pb (Hassan 2011), Rs (Mazandarani&Asghari 2007)
- Oil 254, Bo (Petrofsky 1990), Pb (Al-Marhoun 1988), Rs (Mazandarani&Asghari 2007)
- Oil 255, Bo (Standing 1947), Pb (Al-Marhoun 1988), Rs (Mazandarani&Asghari 2007)
- Oil 256 , Bo (Al-Mehaideb 1997), Pb (Hassan 2011), Rs (Petro & Farshad 1996)
- Oil 260, Bo (Al-Mehaideb 1997), Pb (Hassan 2011), Rs (Mac-Elbat 1992)
- Oil 261, Bo (Al-Mehaideb 1997), Pb (Hassan 2011), Rs (KhamsehchiEbrahimian 2009)
- Oil 262, Bo (Al-Mehaideb 1997), Pb (Hassan 2011), Rs (KhamsehchiEbrahimian 2009)
- Oil 263, Bo (Al-Mehaideb 1997), Pb (Hassan 2011), Rs (KhamsehchiEbrahimian 2009)
- Oil 264, Bo (Al-Mehaideb 1997), Pb (Hassan 2011), Rs (KhamsehchiEbrahimian 2009)
- Oil 265, Bo (Al-Mehaideb 1997), Pb (Hassan 2011), Rs (Standing 1947)

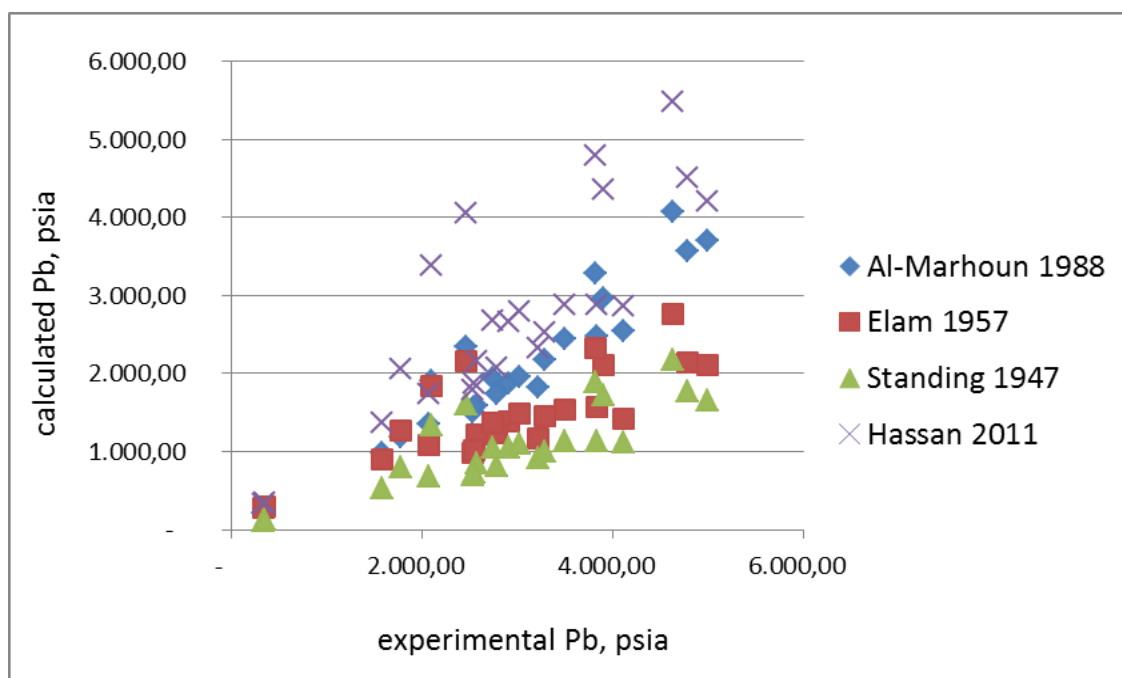
Παρατηρείται πως:

- Για τον υπολογισμό του ογκομετρικού συντελεστή **(Bo)** καλύτερη απόδοση σχετικά με την πειραματική τιμή έχει η εξίσωση του **Al-Mehaideb 1997**.



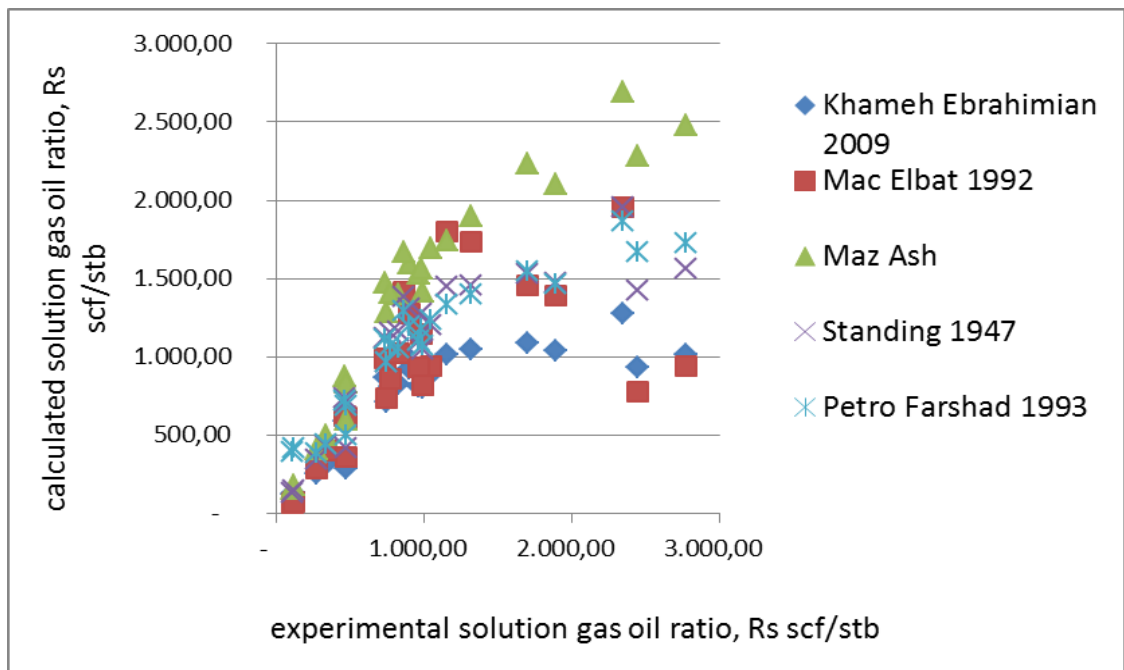
Διάγραμμα 16 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το  $Bo(bbl/stb)$

Για τον υπολογισμό της πίεσης βρασμού (**Pb**) καλύτερη απόδοση σχετικά με την πειραματική τιμή έχει η εξίσωση του **Hassan 2011**.



Διάγραμμα 17 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το  $Pb(psia)$

- Για τον υπολογισμό της αναλογίας αερίου – πετρελαίου ( $R_s$ ) καλύτερη απόδοση σχετικά με την πειραματική τιμή έχει η εξίσωση του Petrofsky & Farshad 1993 .

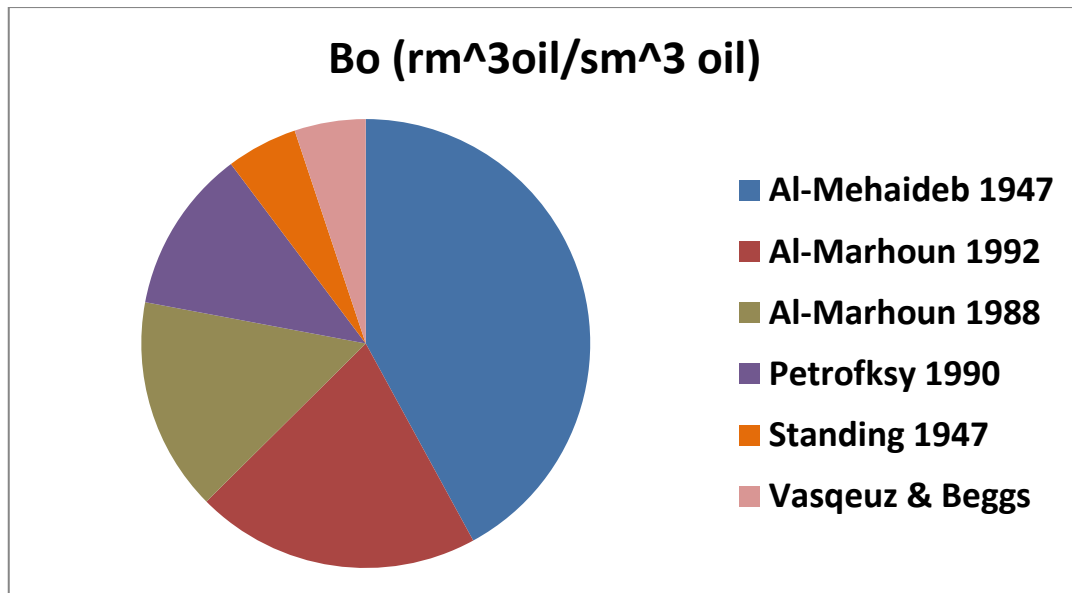


Διάγραμμα 18 Γραφική παράσταση μεταξύ εκτιμώμενων και πειραματικών δεδομένων για το  $R_s$ (scf/stb)

#### 6.4 Συχνότητα εμφάνισης κάθε ερευνητή στο κάθε πετρέλαιο αναφορικά με την ακρίβειά του.

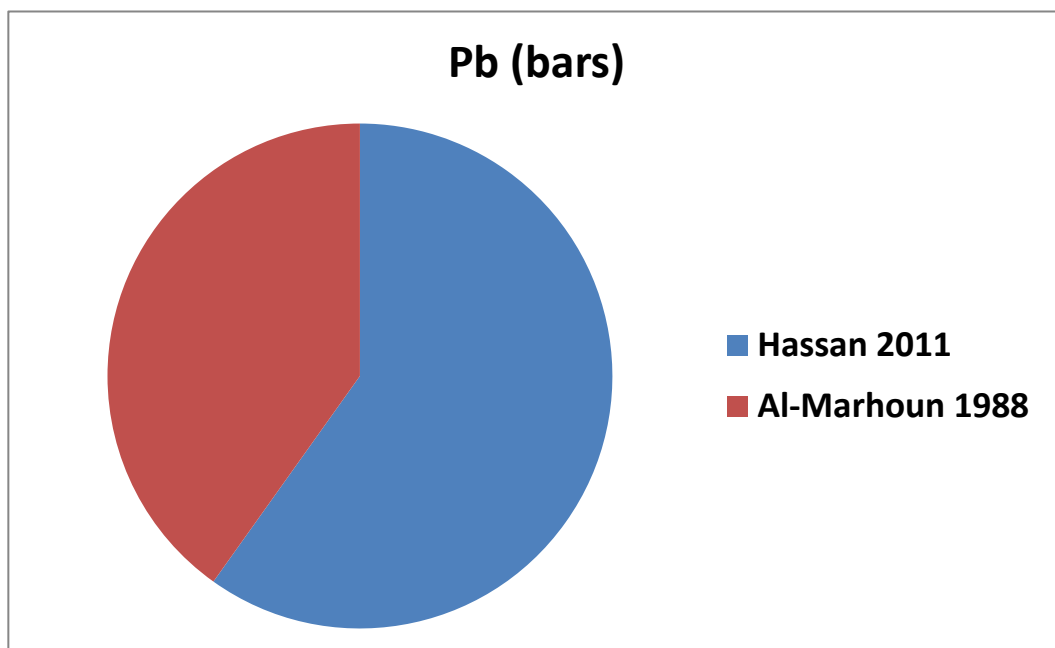
Αναλυτικότερα στα παρακάτω διαγράμματα παρατηρούμε τη συχνότητα εμφάνισης του κάθε ερευνητή σχετικά με το πόσες φορές έχει προσεγγίσει καλύτερα τις αντίστοιχες τιμές των ιδιοτήτων του κάθε πετρελαίου.

- Παρατηρούμε λοιπόν πως όσο αφορά τον ογκομετρικό συντελεστή σχηματισμού του πετρελαίου ( $B_o$ ) περισσότερες φορές έχει προσεγγίσει καλύτερα τη πειραματική τιμή ο Al-Mehaideb (1947) και λιγότερες φορές οι Vasquez & Beggs.



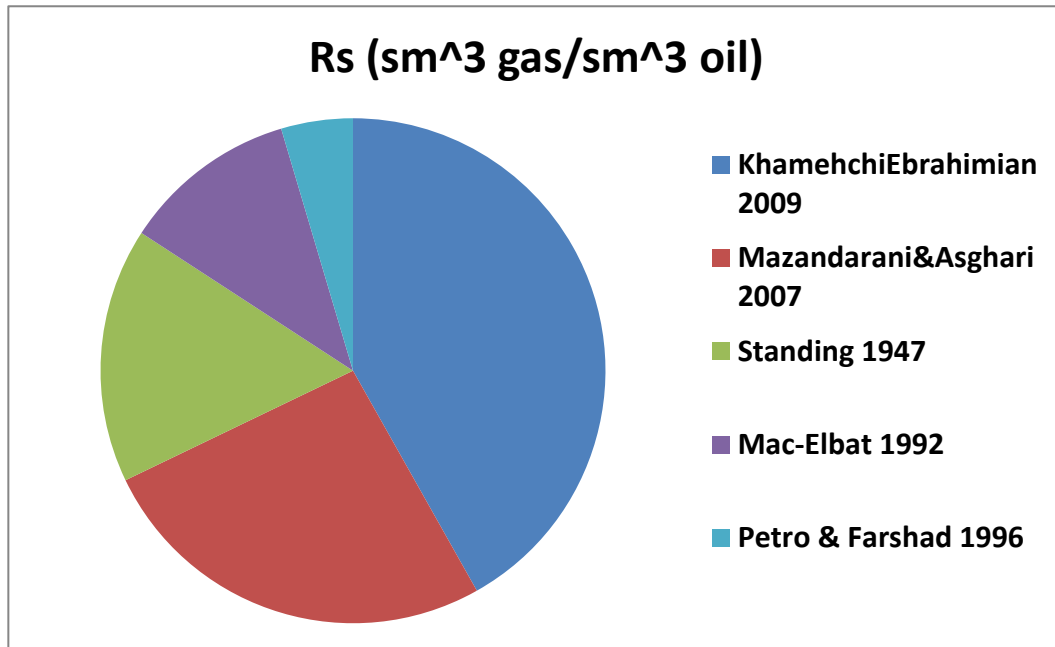
Διάγραμμα 19 Απεικόνιση της συσχρότητας εμφάνισης κάθε ερευνητή αναφορικά με την ακρίβεια για το Bo

- Αναφορικά με τη πίεση στο σημείο φυσαλίδας (Pb) πιο πολλές φορές έχει έρθει πιο κοντά στη πειραματική τιμή ο Hassan 2011 και λιγότερες ο Al-Marhoun 1988. Υπήρχαν και άλλοι ερευνητές αλλά δεν κατάφεραν να προσεγγίσουν τη πειραματική τιμή καλύτερα από τους Hassan και Al-Marhoun αντίστοιχα.



Διάγραμμα 20 Απεικόνιση της συχνότητας εμφάνισης κάθε ερευνητή αναφορικά με την ακρίβεια για το Pb

- Σχετικά με την αναλογία αερίου – πετρελαίου ( $R_s$ ) περισσότερες φορές έχει προσεγγίσει καλύτερα ο KhomehchiEbrahimian (2009), τη πειραματική τιμή και λιγότερες φορές ο Petro & Farshad (1996).

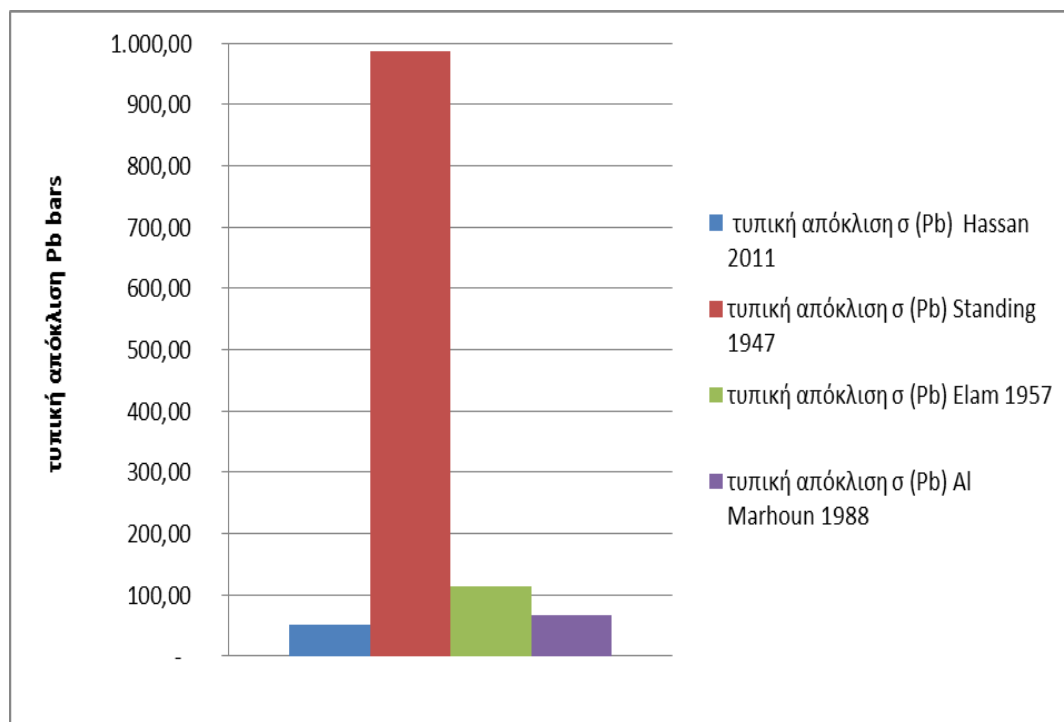


Διάγραμμα 21 Απεικόνιση της συχνότητας εμφάνισης κάθε ερευνητή αναφορικά με την ακρίβεια για το  $R_s$

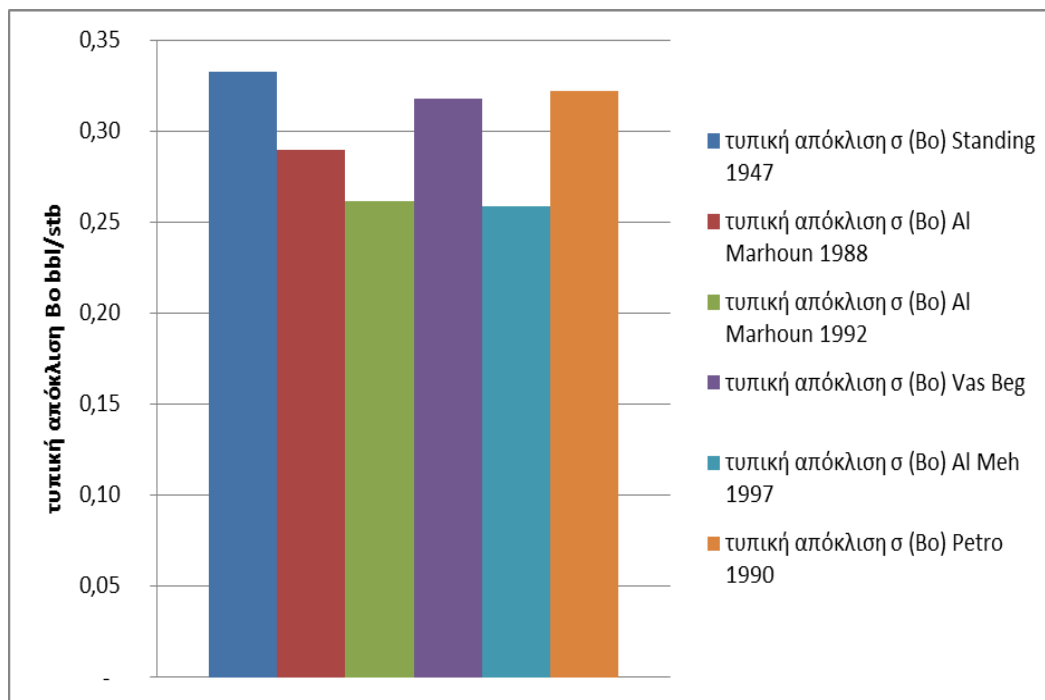


### 6.5 Οι τυπικές αποκλίσεις των ερευνητών για κάθε μία από τις 3 ιδιότητες

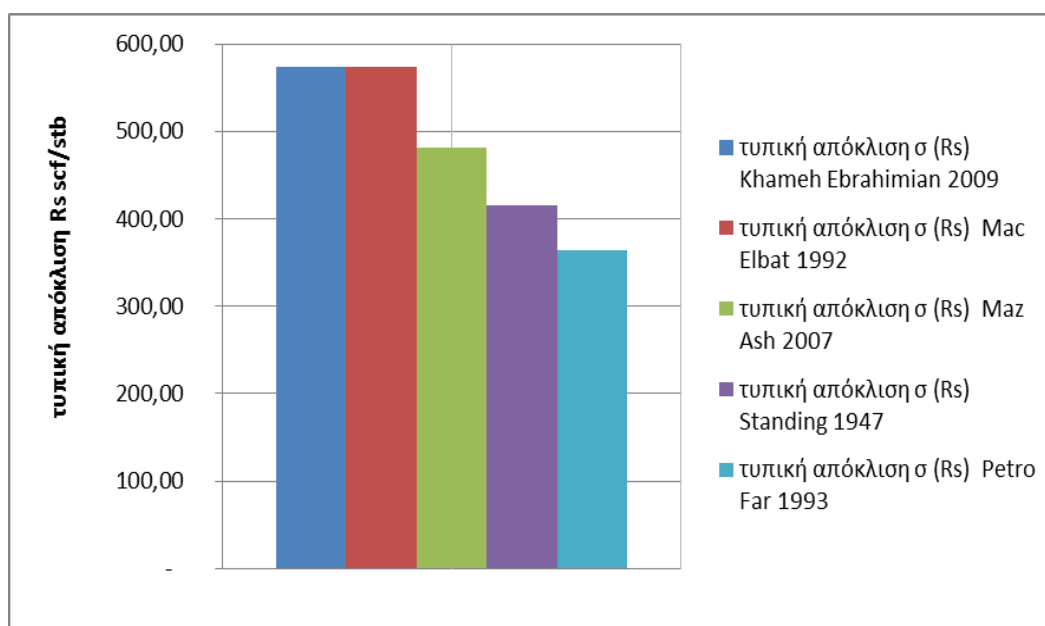
Οι τυπικές αποκλίσεις των ερευνητών αναφορικά με τη πίεση στο σημείο φυσαλίδας (Pb), τον ογκομετρικό συντελεστή του πετρελαίου (Bo) καθώς και της αναλογίας αερίου-πετρελαίου (Rs) απεικονίζονται στα παρακάτω διαγράμματα:



Διάγραμμα 22 Τυπικές αποκλίσεις ερευνητών σχετικά με το Pb(bars)



Διάγραμμα 23 Τυπικές αποκλίσεις ερευνητών σχετικά με το Bo(bbl/stb)



Διάγραμμα 24 Τυπικές αποκλίσεις ερευνητών σχετικά με το Rs(scf/stb)

- Για τον υπολογισμό του ογκομετρικού συντελεστή (**Bo**) καλύτερη απόδοση σχετικά με την πειραματική τιμή έχει η εξίσωση του **Al-Mehaideb 1997**, καθώς έχει μικρότερη τυπική απόκλιση σε σχέση με τους υπόλοιπους ερευνητές.
- Για τον υπολογισμό της πίεσης βρασμού (**Pb**) καλύτερη απόδοση σχετικά με την πειραματική τιμή έχει η εξίσωση του **Hassan 2011**, καθώς έχει μικρότερη τυπική απόκλιση σε σχέση με τους άλλους ερευνητές.

- Για τον υπολογισμό της αναλογίας αερίου – πετρελαίου ( $R_s$ ) καλύτερη απόδοση σχετικά με την πειραματική τιμή έχει η εξίσωση του Petrofsky & Farshad 1993, επειδή η τυπική του απόκλιση είναι η πιο μικρή συναρτήσει των υπολοίπων.

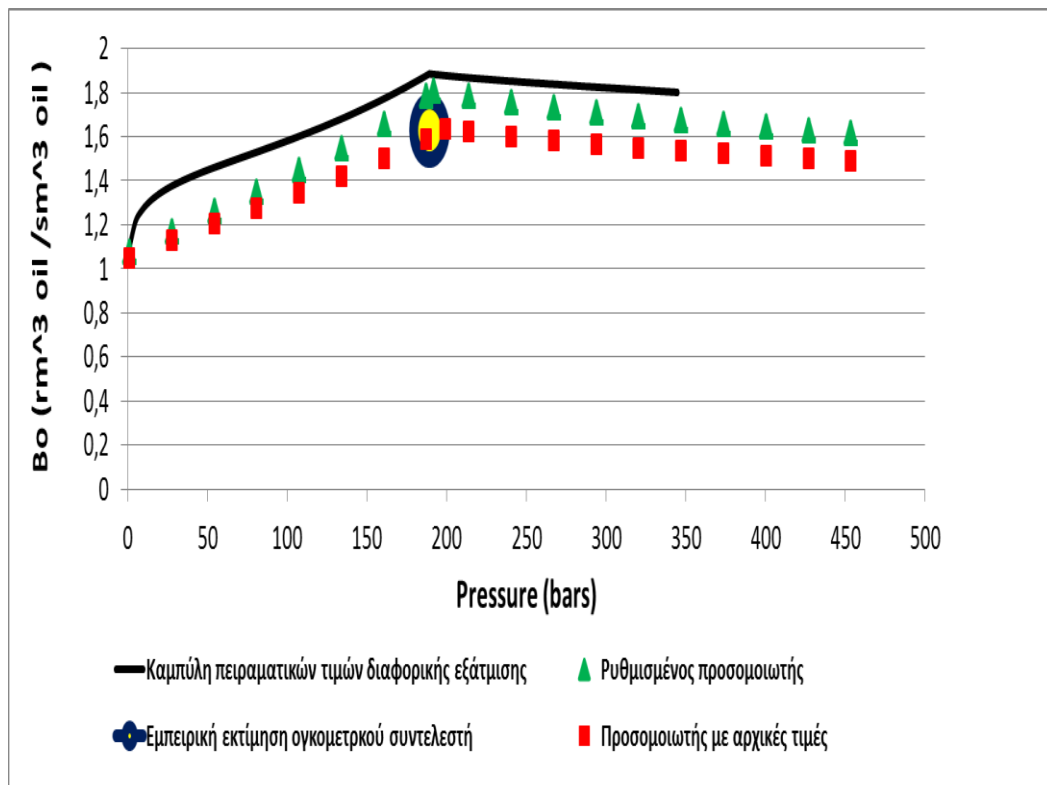
### **Βιβλιογραφία.**

- Βαρότσης, Ν. (2014), Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Μηχανική Ταμειυτήρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Πασαδάκης, Ν. (2015), Εκδόσεις Τζιόλα. Γεωχημεία Πετρελαίου.
- Ahmed, T. (2010). Reservoir Engineering Handbook. Retrieved from Academia.edu:  
[https://www.academia.edu/31374842/Reservoir\\_Engineering\\_Handbook\\_2010\\_Tarek\\_Ahmed\\_pdf](https://www.academia.edu/31374842/Reservoir_Engineering_Handbook_2010_Tarek_Ahmed_pdf)
- Bahadori, A. (2017). Fluid Phase Behavior for Conventional and Unconventional Oil and Gas Reservoirs.
- Christensen, P. Pedersen, K. (2007). Phase Behavior of Petroleum Reservoir fluids.
- Danesh, A. (1998). PVT and Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids. Elsevier.
- Lake, Larry. W (2007), Petroleum Engineering Handbook. Beggs, H. Dale. Oil System Correlations. Retrieved from Academia.edu:  
[https://www.academia.edu/7868141/Oil\\_System\\_Correlations](https://www.academia.edu/7868141/Oil_System_Correlations). This paper presented called chapter 22.
- M. Rafiqul Islam. S.H. Moussavizadegan, S. Mustafiz. J.H. Abou-Kassem (2016). Advanced Petroleum Reservoir Simulation, (2<sup>nd</sup> ed.) United States, Scrivener Publishing LLC.
- Nagy. Z. and Shirkovskiy, A.I., (1982). Mathematical Simulation of Natural Gas Condensation Processes Using the Peng-Robinson Equation of State, paper SPE 10982.
- Pitzer, K.S et al., (1995). The Volumetric and Thermodynamic Properties of Fluids, II. Compressibility Factor, Vapor Pressure and Entropy of Vaporization. J. Amer. Chem. Soc.
- Sindrouhou. H. Mohammed. (2013). Empirical and Correlative Study of PVT Properties of Algerian Oils. Energy Procedia Journal, 738-745. Retrieved from sciencedirect:  
[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213011727?ref=pdf\\_download&fr=RR-2&rr=741db7210a2b6f59](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213011727?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=741db7210a2b6f59)
- Whitson. C.H., (1983). Characterizing Hydrocarbon Plus Fractions, Trans., SPEJ, AIME.

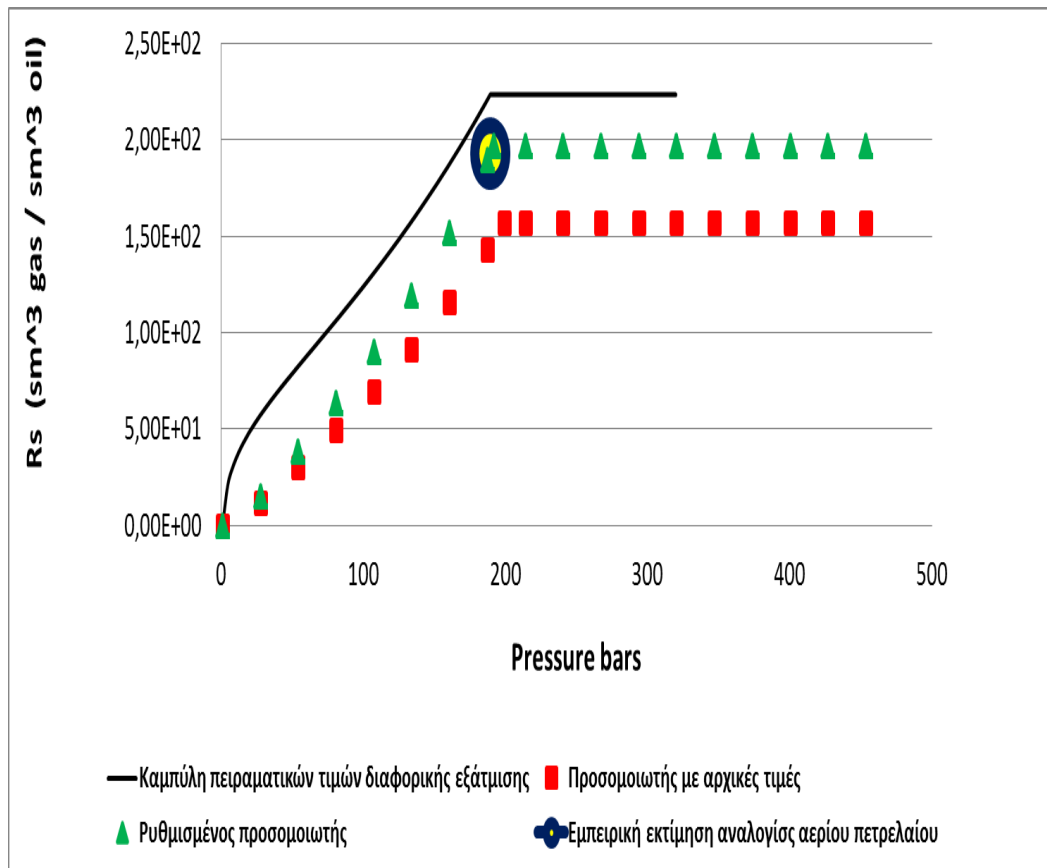
- Zahaby, Al. Ahmed, T. Banbi, El et al. (2012). Guidelines for Selecting Appropriate PVT Correlations for Black Oils. This paper presented at the North Africa Technical Conference and Exhibition, Cairo, Egypt. Society of Petroleum Engineers Journal. Retrieved from one Petro: <https://onepetro.org/SPENATC/proceedings-abstract/12NATC/All-12NATC/SPE-150650-MS/159207>
- Zohuri, B. (2017) Physics of Cryogenics. Properties of Pure Substances. Retrieved from sciencedirect: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/peng-robinson-equation-of-state>

## Παράρτημα

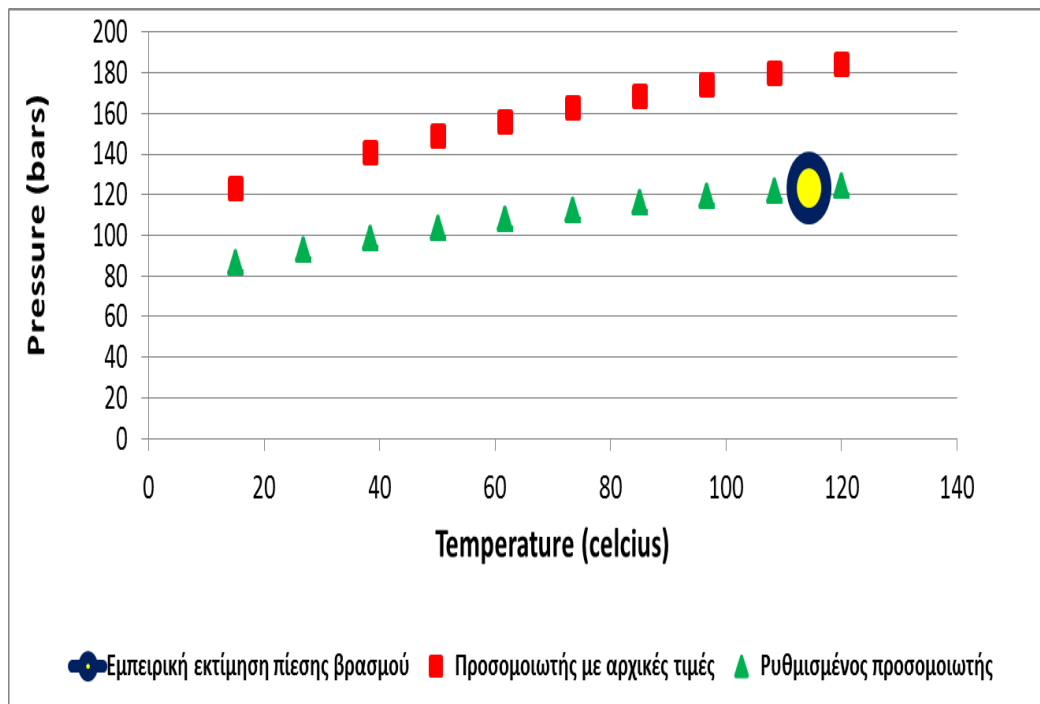
### Oil 202



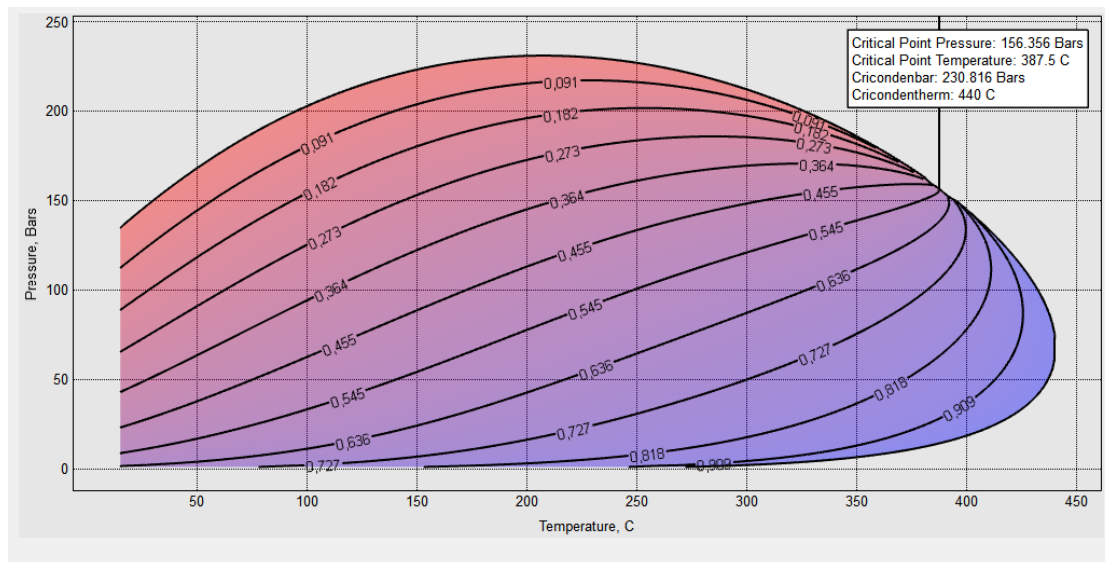
Διάγραμμα 25 Προσομοίωση  $B_o$  για το πετρέλαιο 202



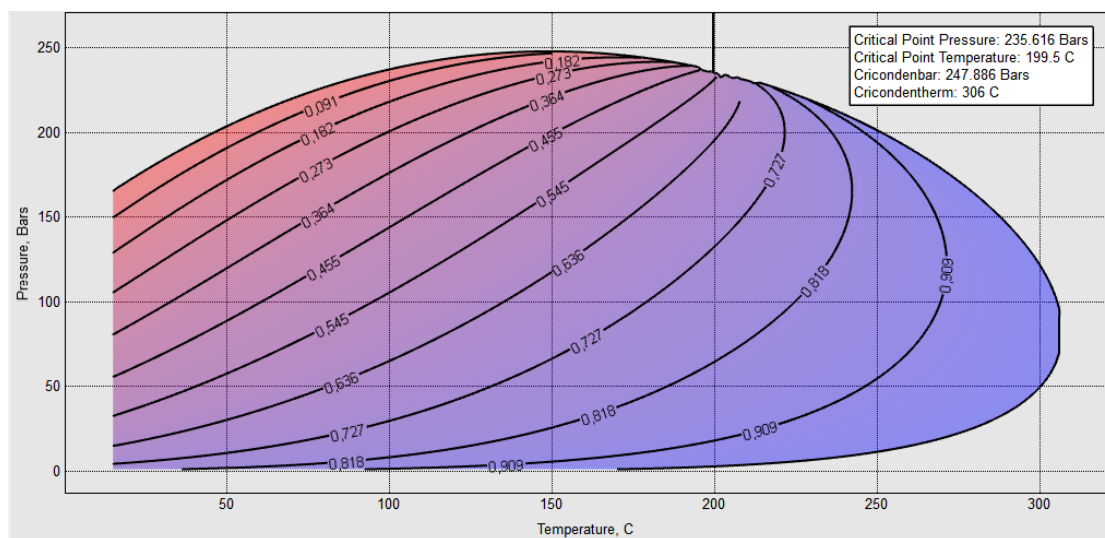
Διάγραμμα 26 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 202



Διάγραμμα 27 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 202

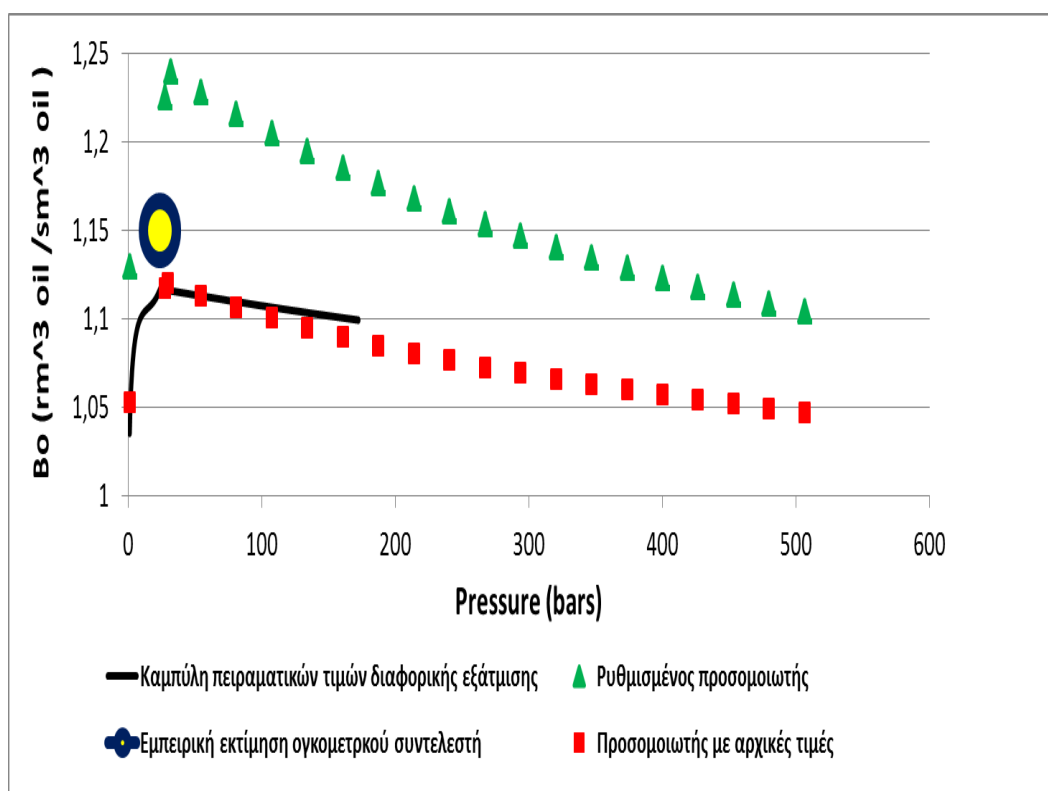


Διάγραμμα 28 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 202 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων

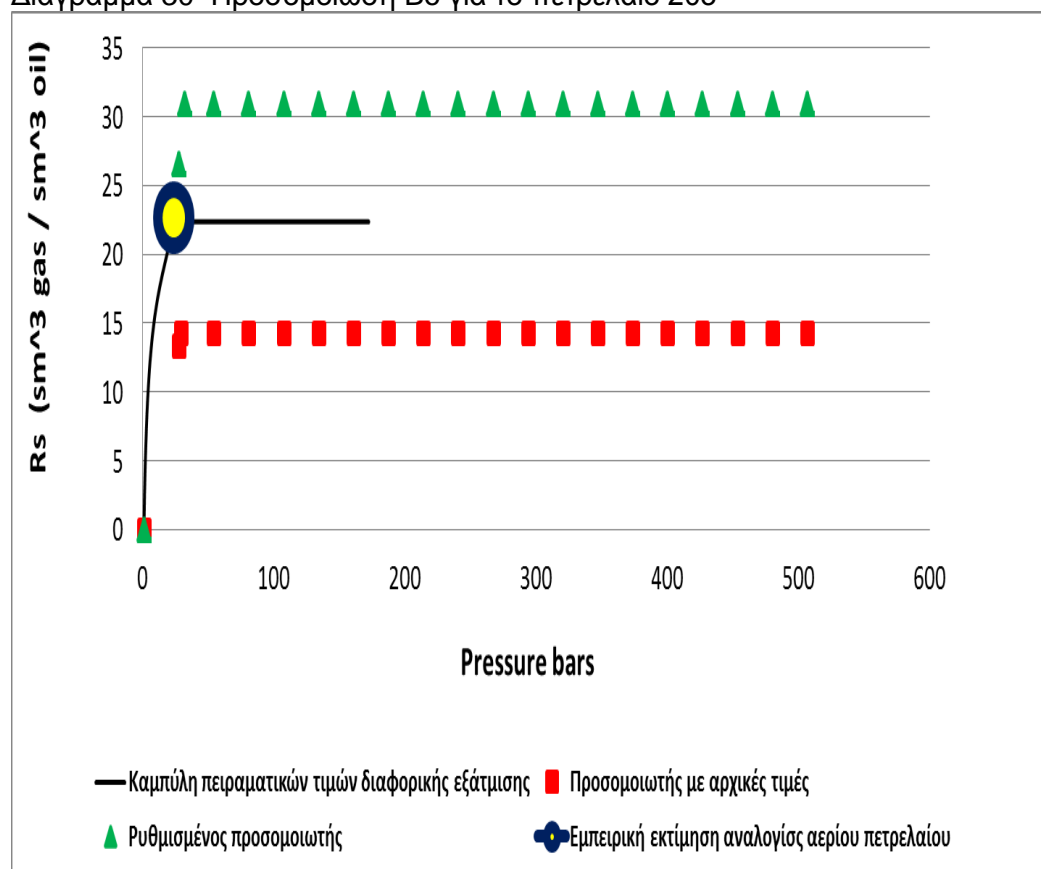


Διάγραμμα 29 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 202 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων

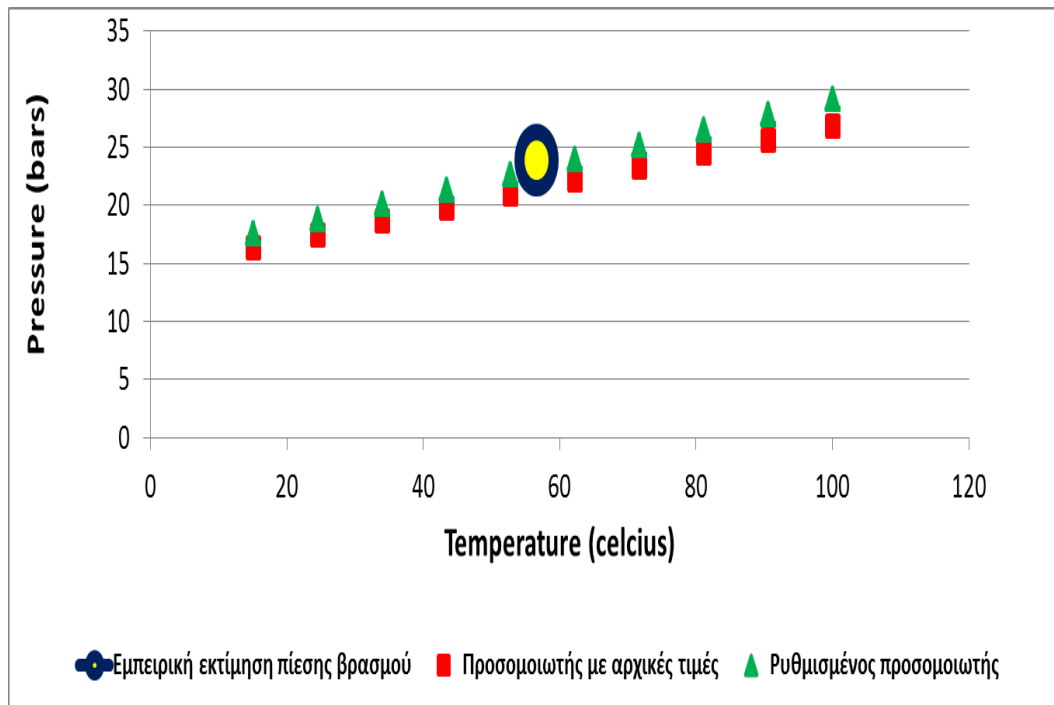




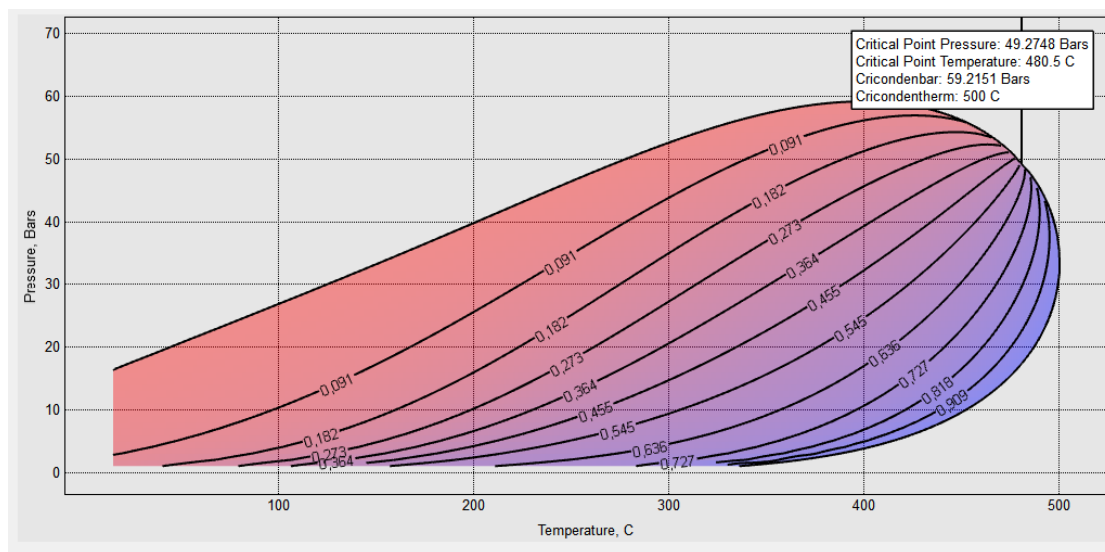
Διάγραμμα 30 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 203



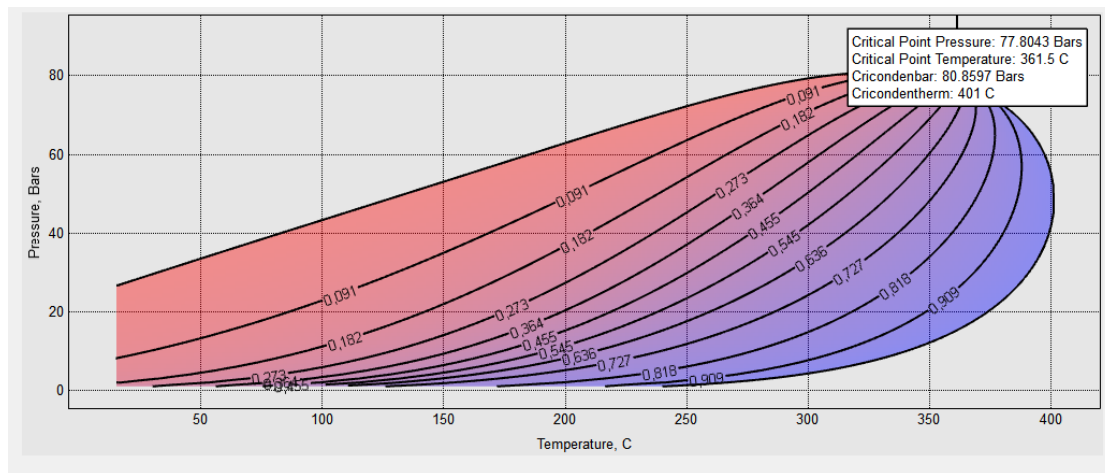
Διάγραμμα 31 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 203



Διάγραμμα 32 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 203

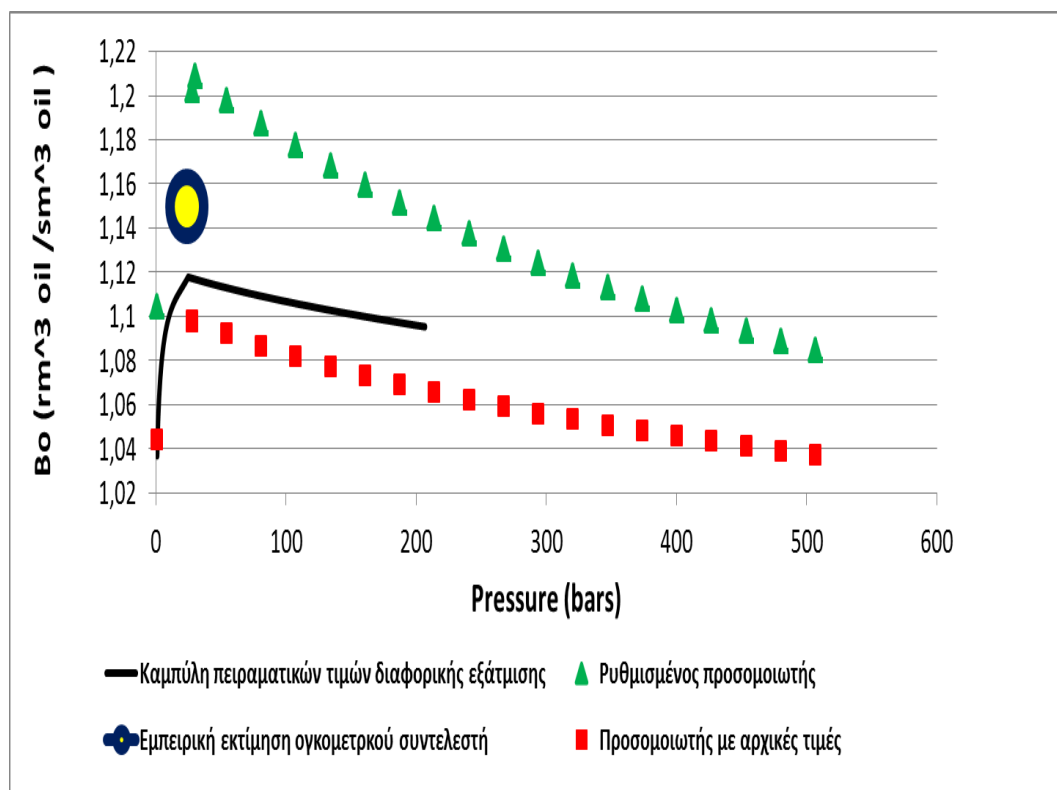


Διάγραμμα 33 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 203 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων

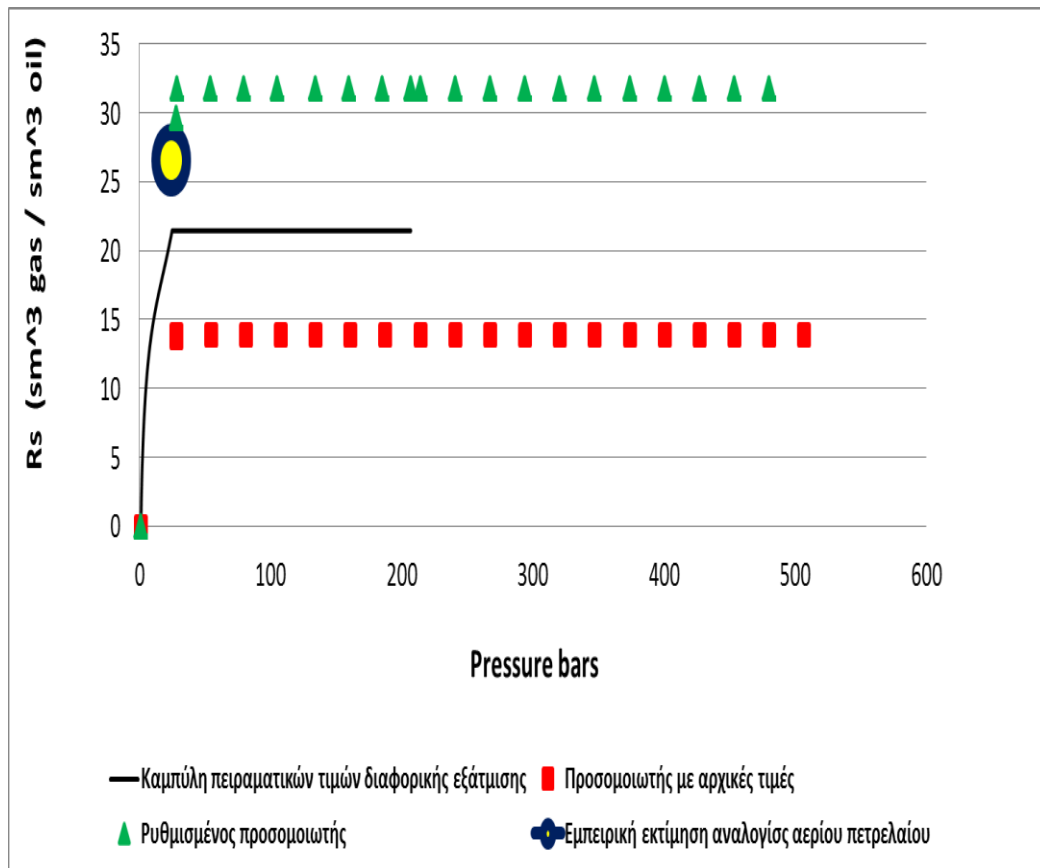


Διάγραμμα 34 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 203 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων

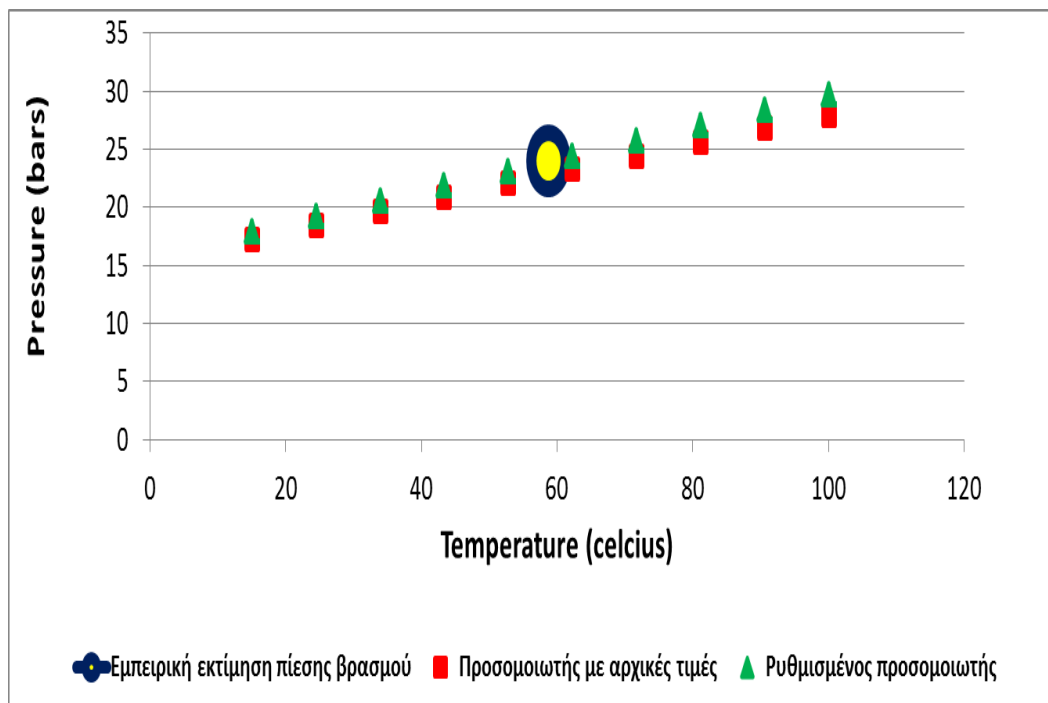
#### Oil 204



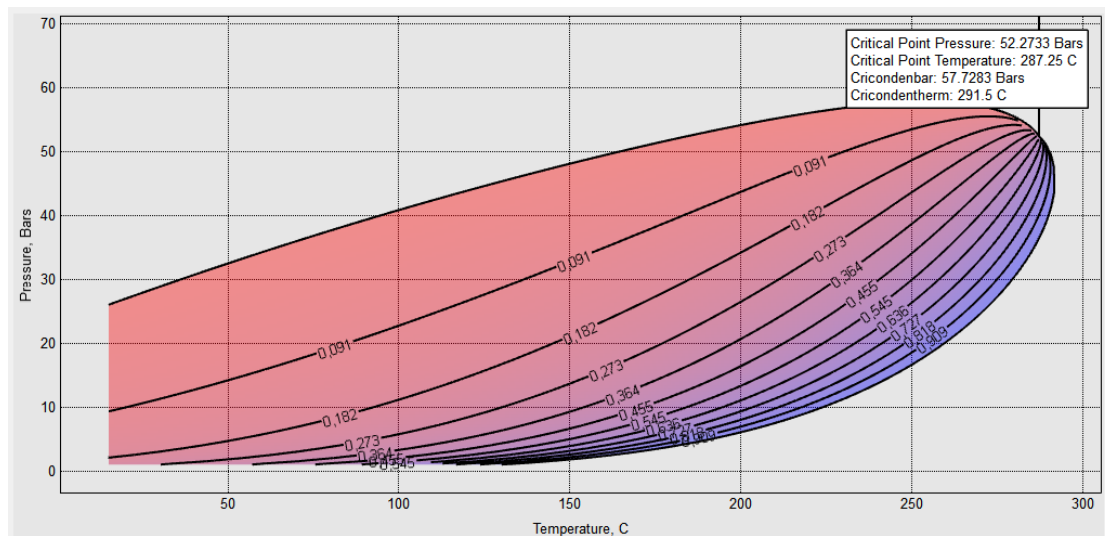
Διάγραμμα 35 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 203



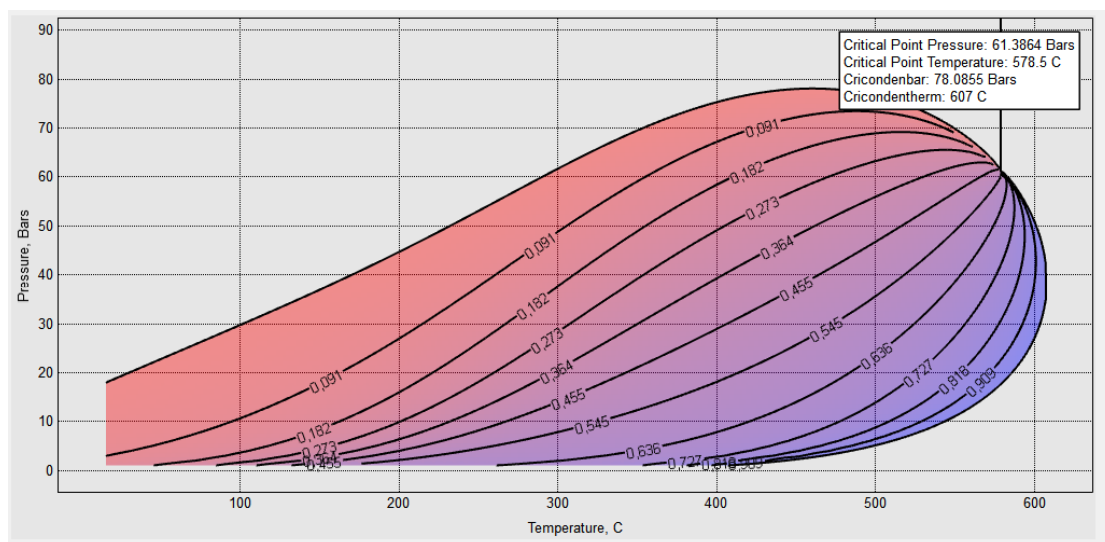
Διάγραμμα 36 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 203



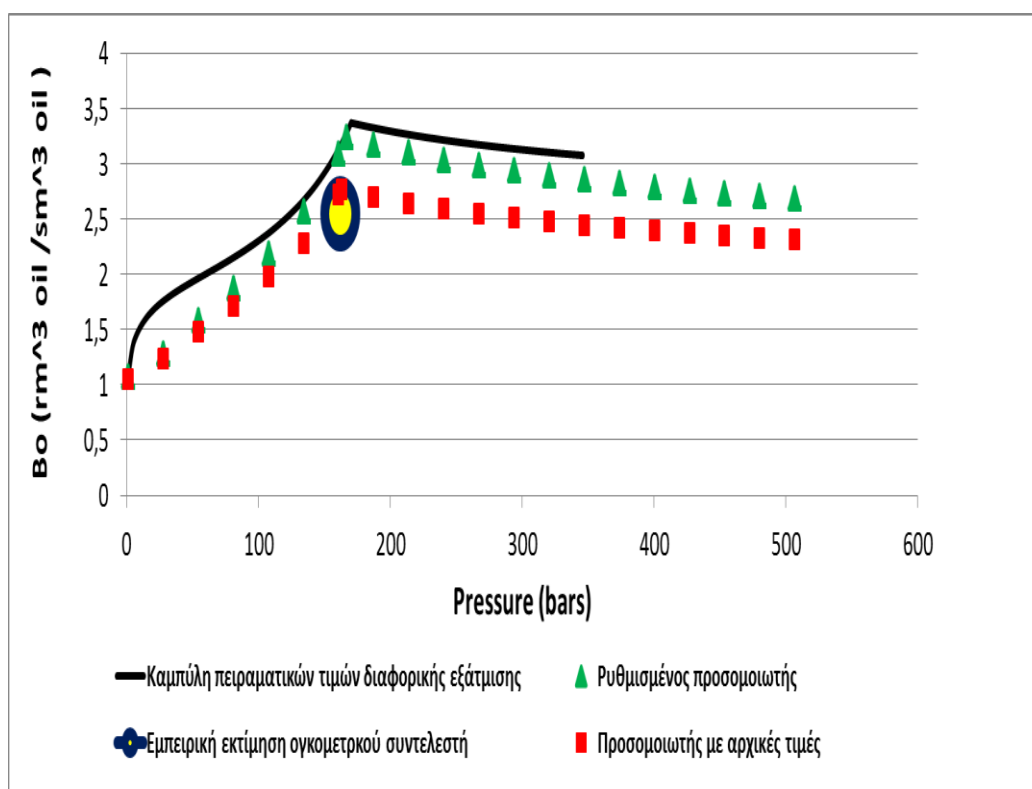
Διάγραμμα 37 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 203



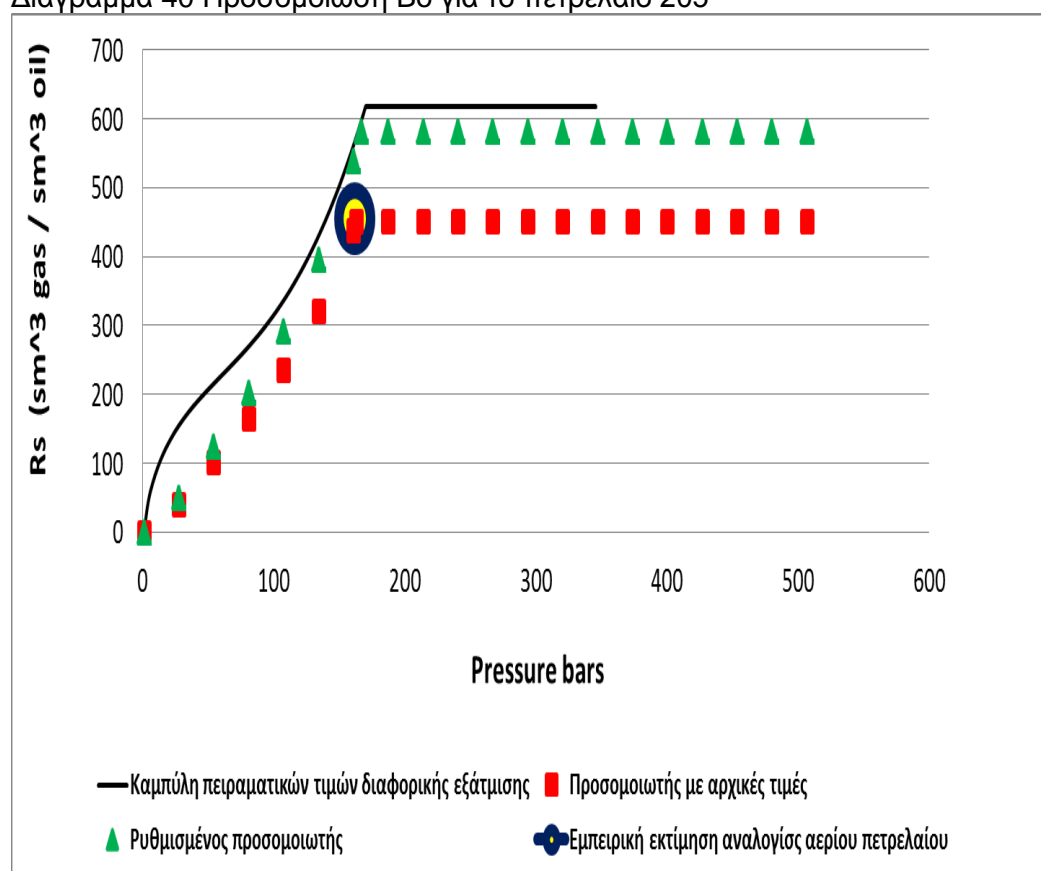
Διάγραμμα 38 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 203 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων



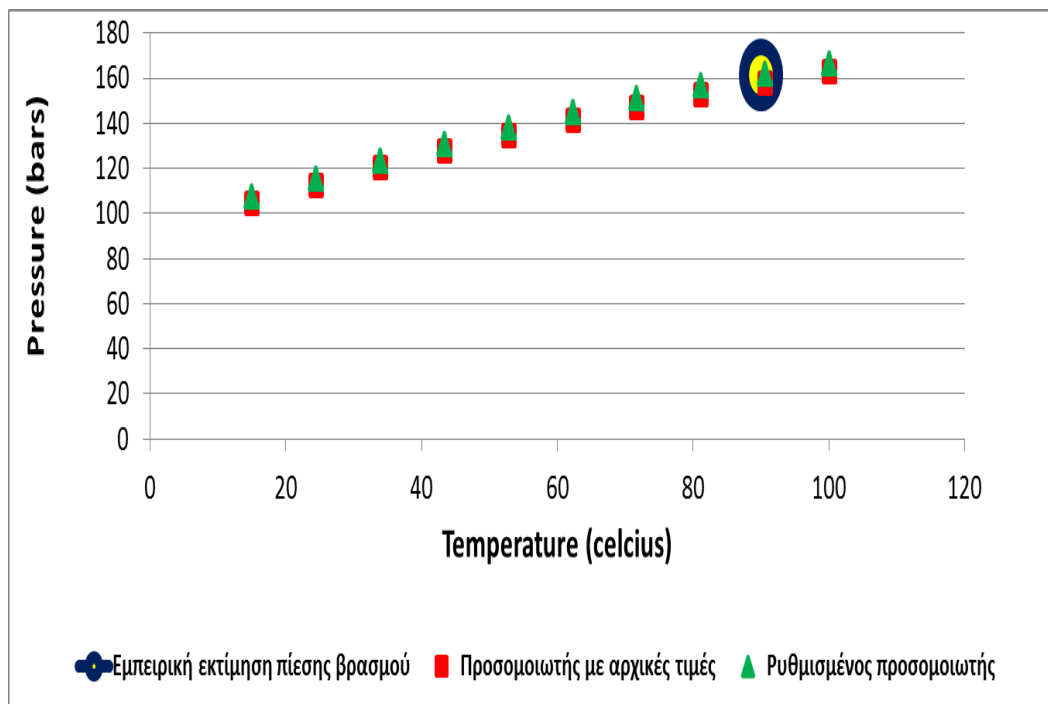
Διάγραμμα 39 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 203 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων



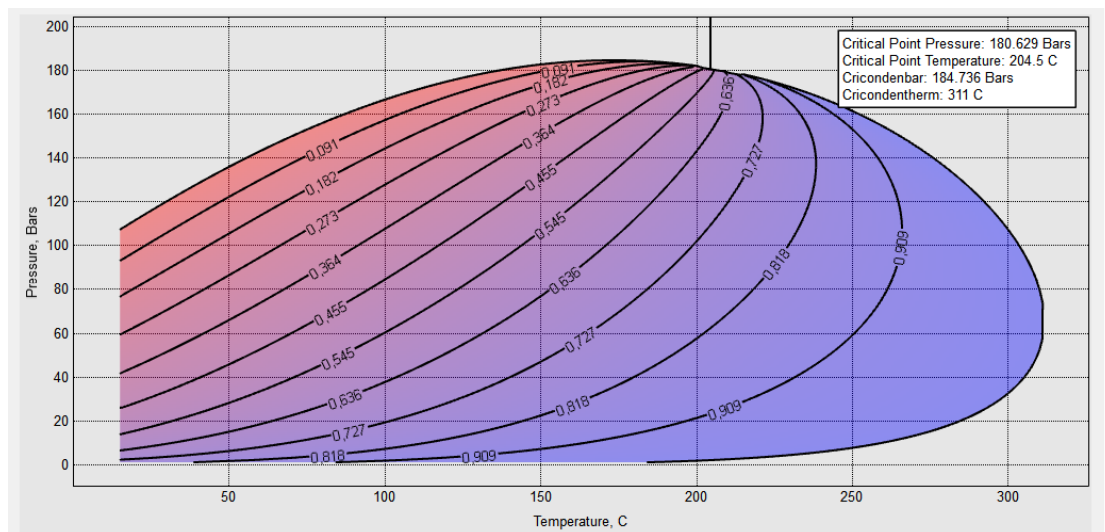
Διάγραμμα 40 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 205



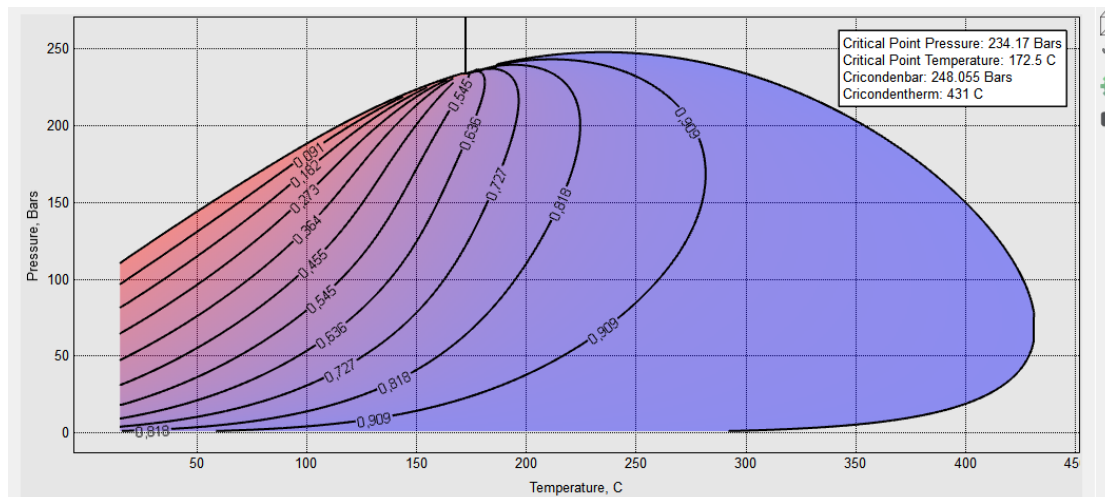
Διάγραμμα 41 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 205



Διάγραμμα 42 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 205

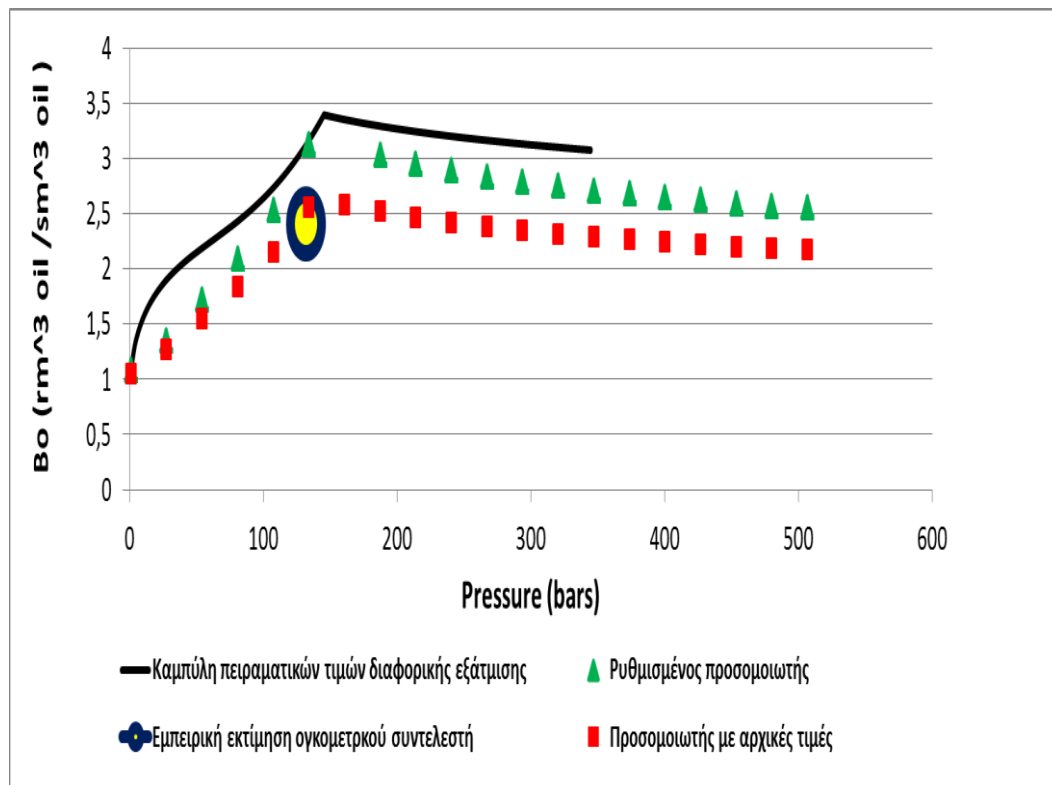


Διάγραμμα 43 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 205 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων



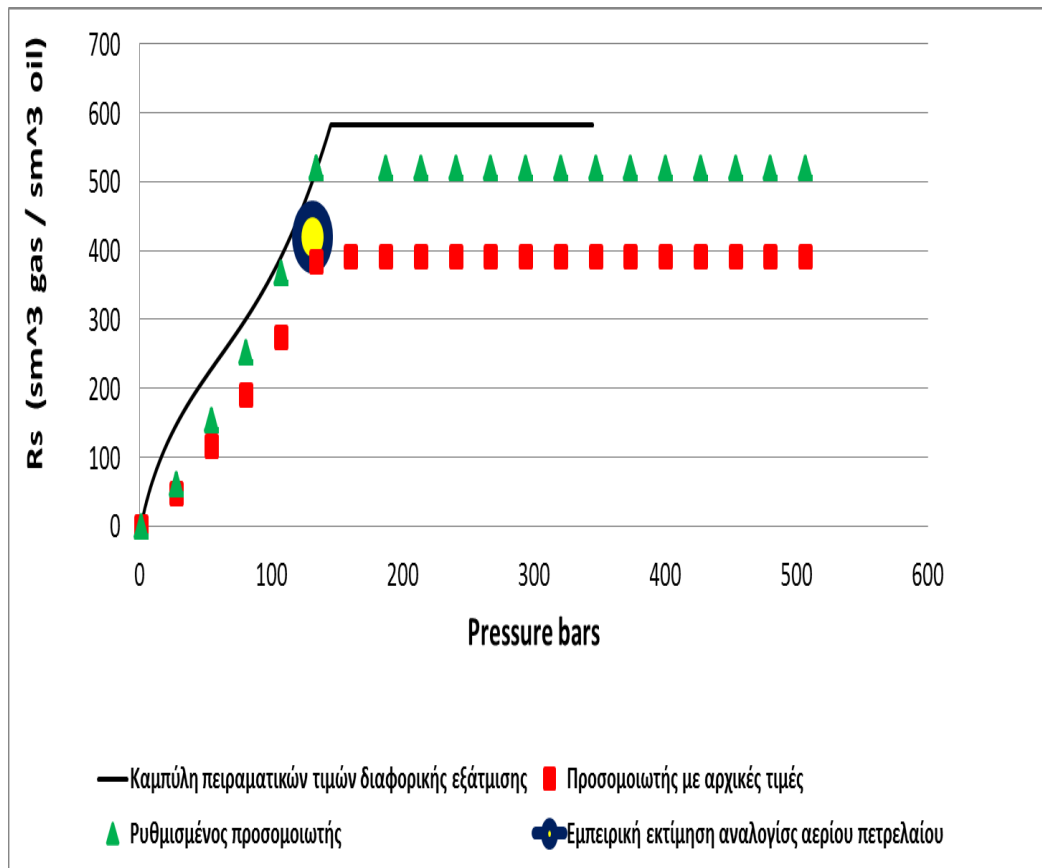
Διάγραμμα 44 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 205 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων

Oil 208

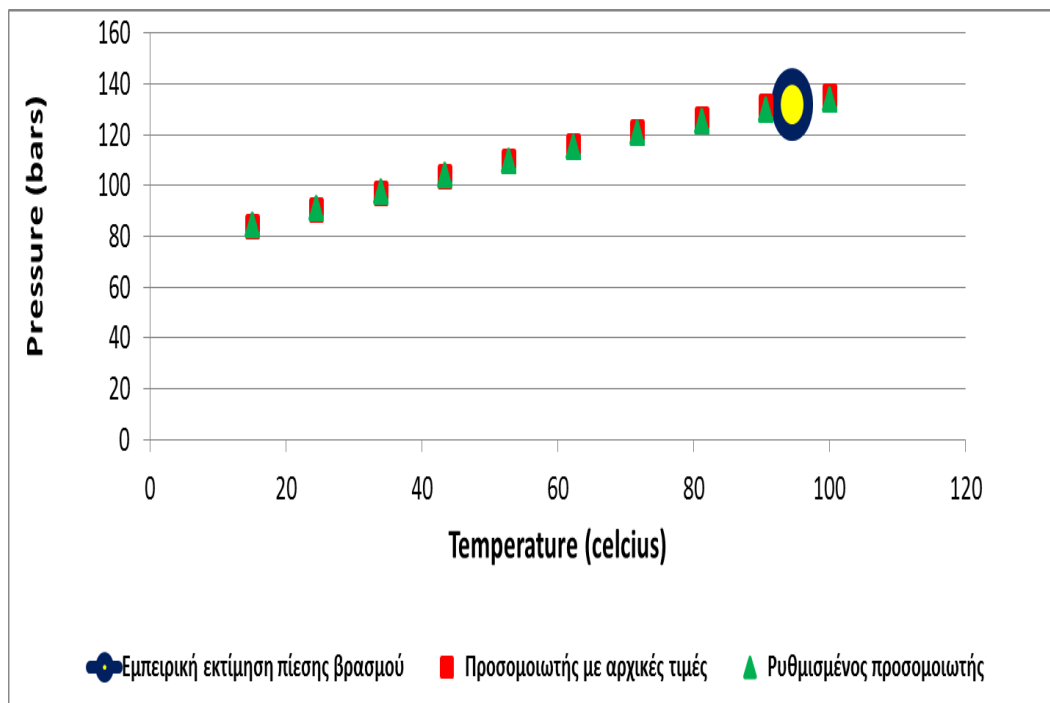


Διάγραμμα 45 Προσομοίωση  $B_o$  για το πετρέλαιο 208

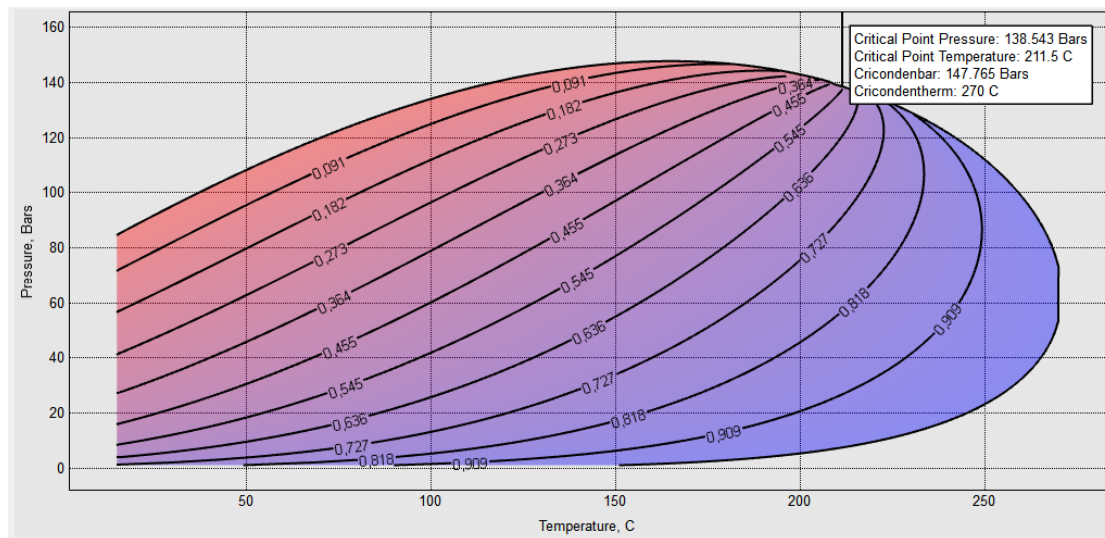




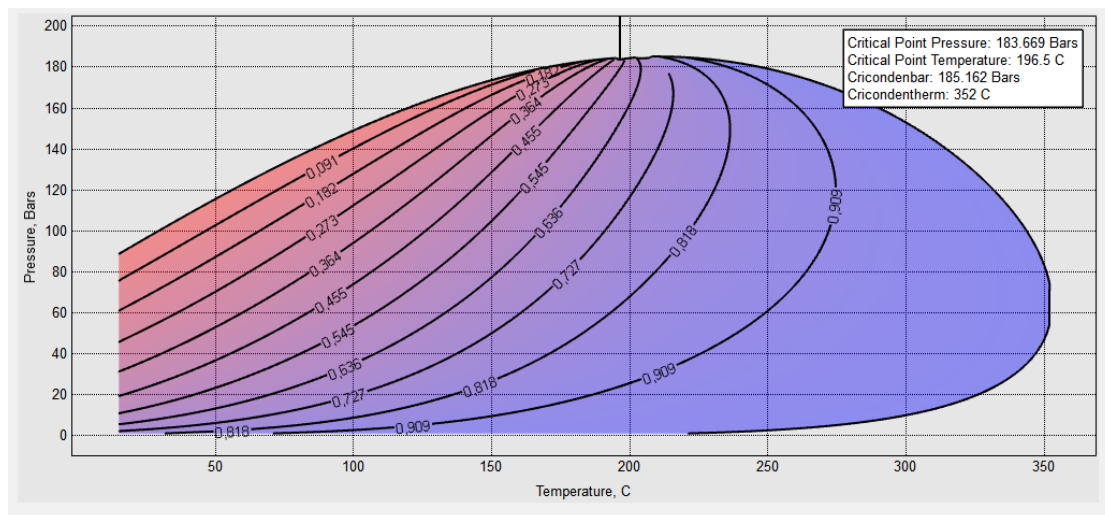
Διάγραμμα 46 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 208



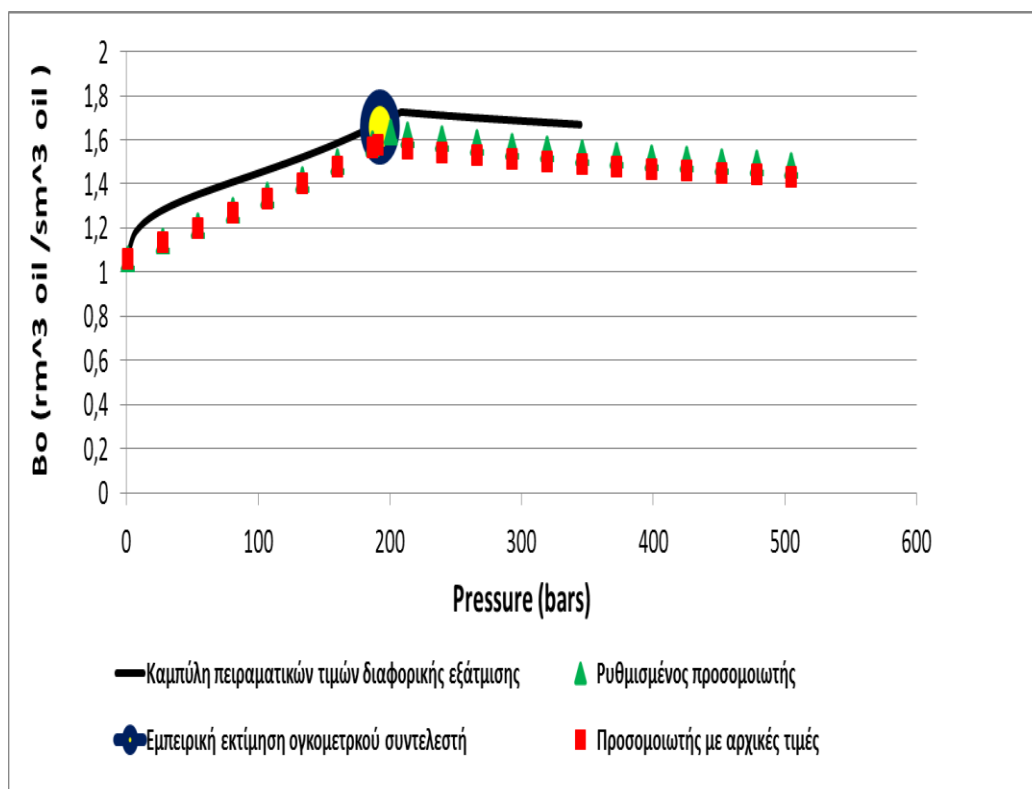
Διάγραμμα 47 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 208



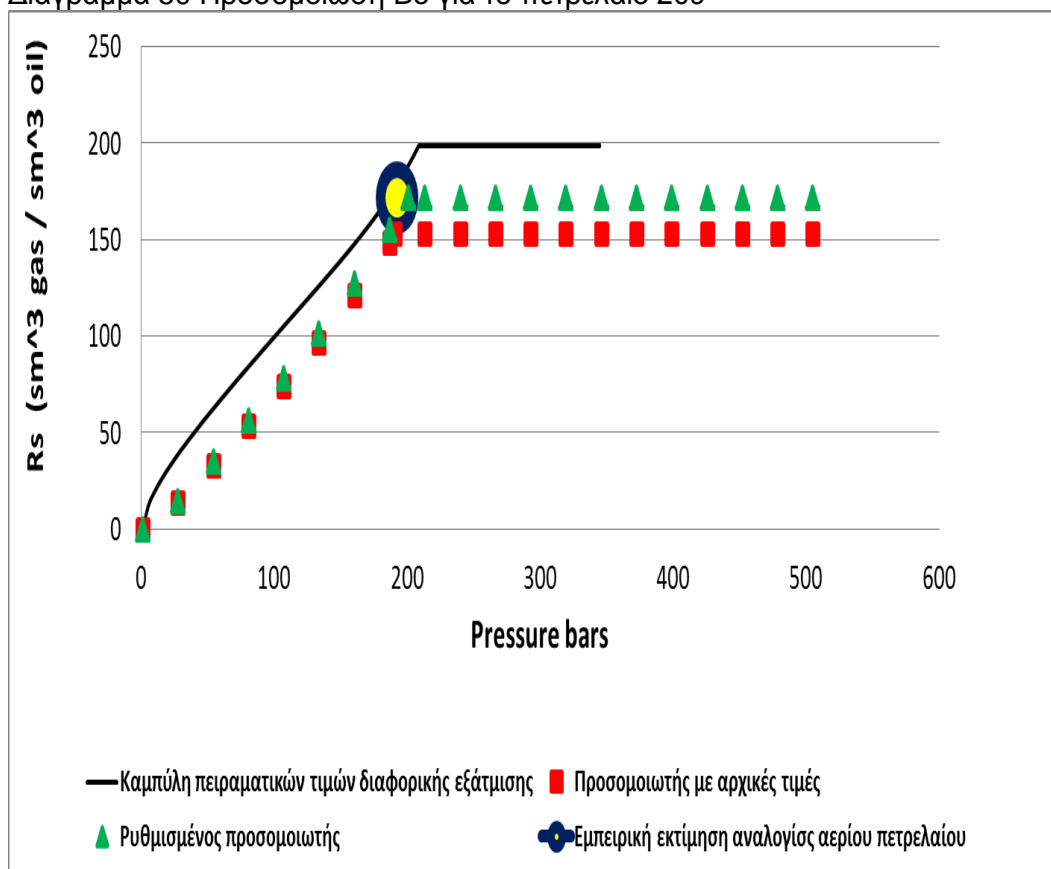
Διάγραμμα 48 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 208 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων



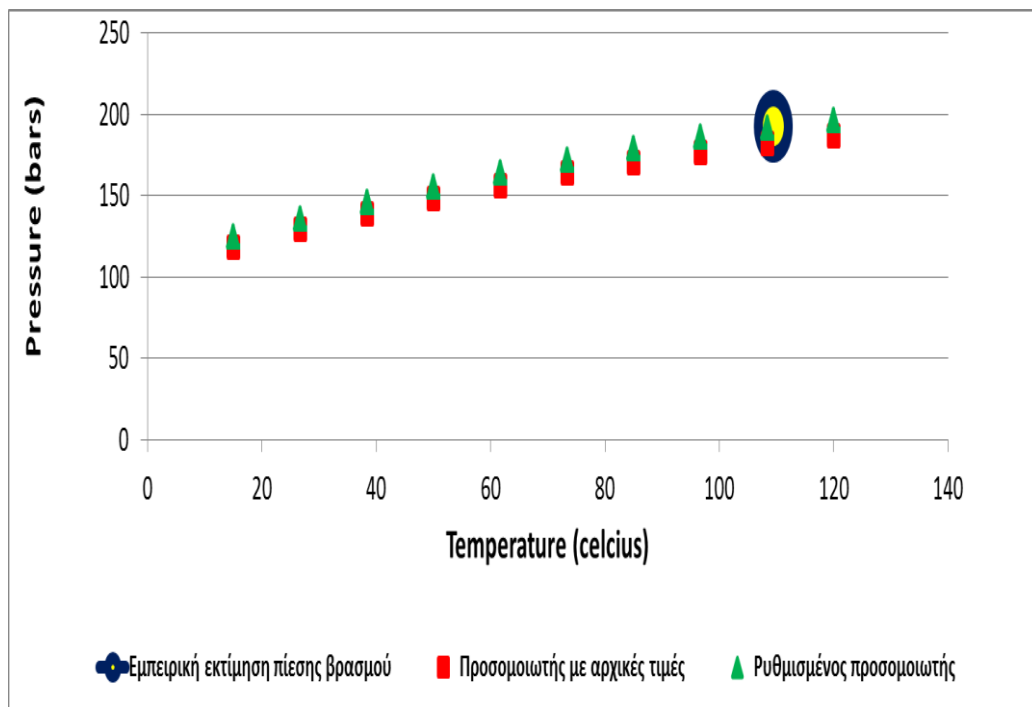
Διάγραμμα 49 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 208 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων



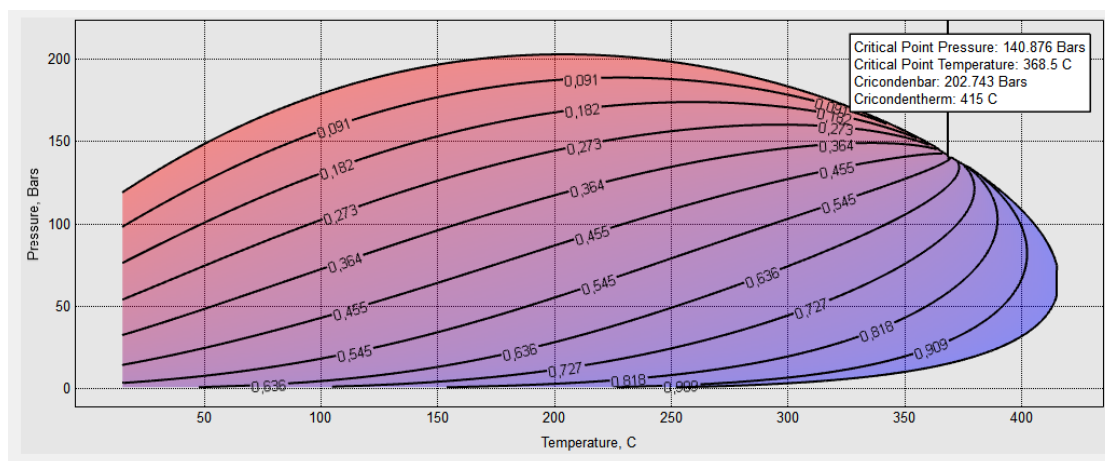
Διάγραμμα 50 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 209



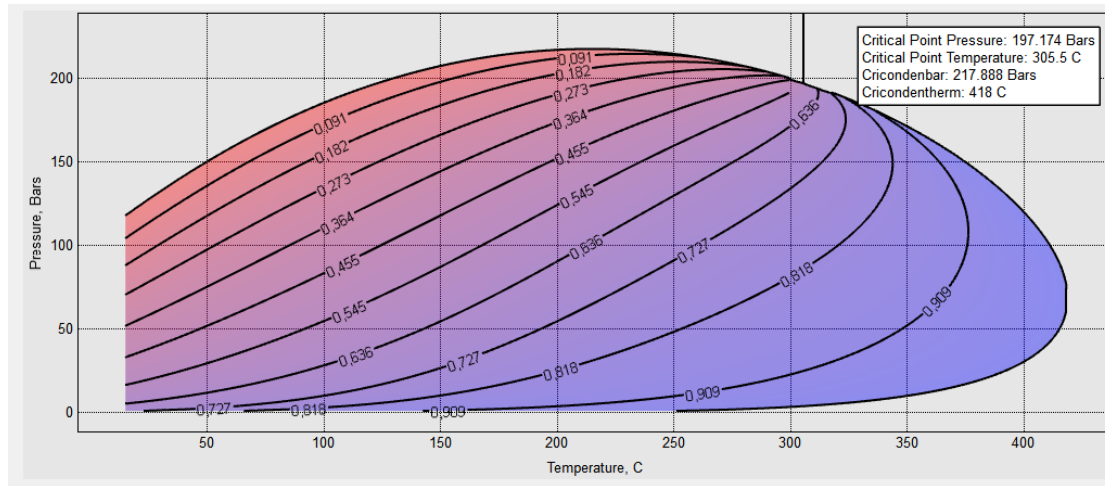
Διάγραμμα 51 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 209



Διάγραμμα 52 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 209

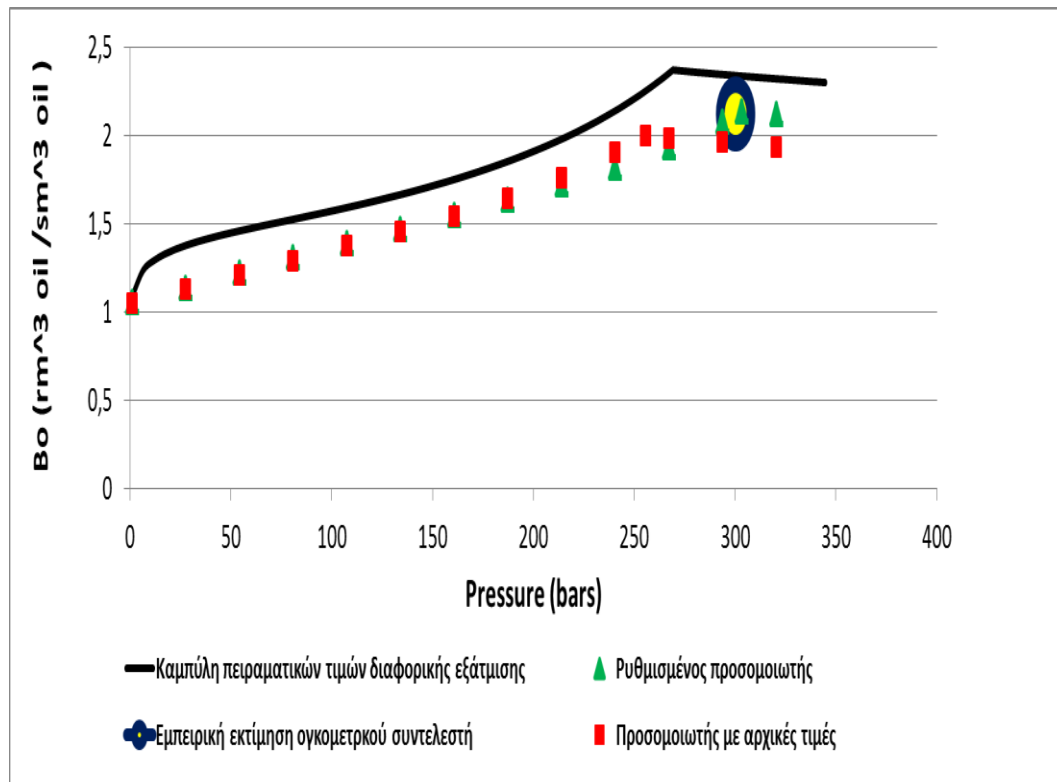


Διάγραμμα 53 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 209 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων

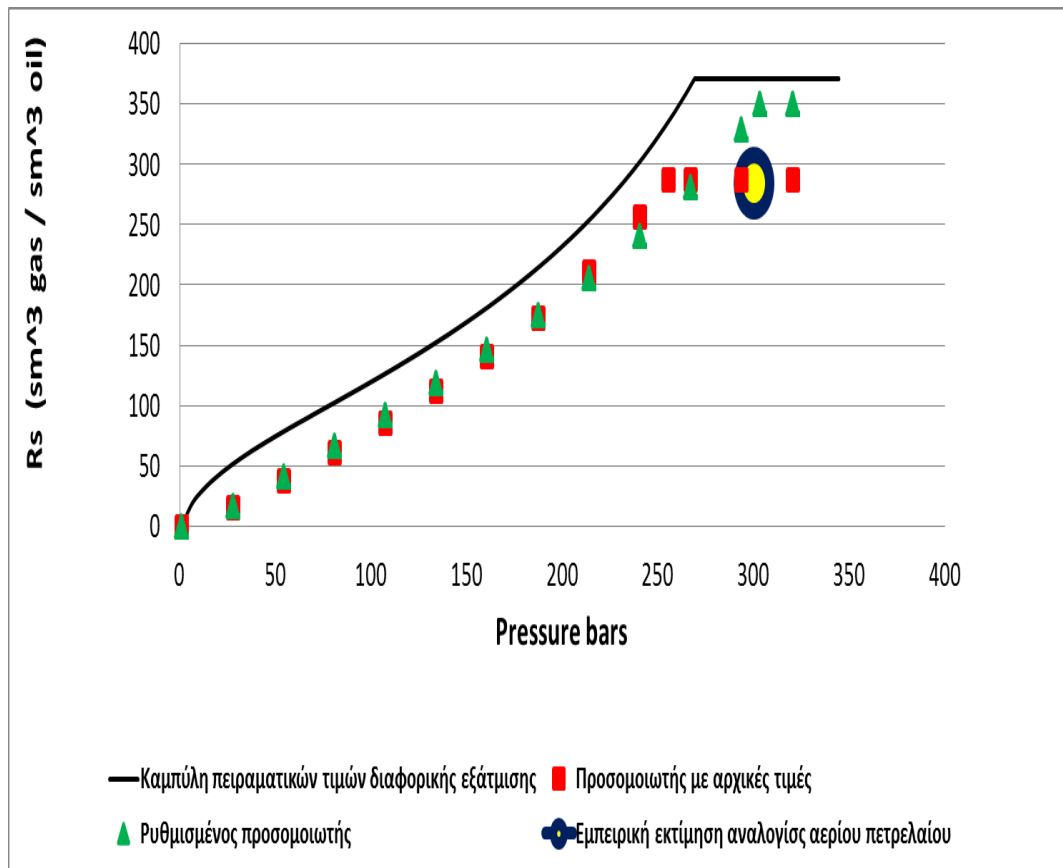


Διάγραμμα 54 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 209 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων

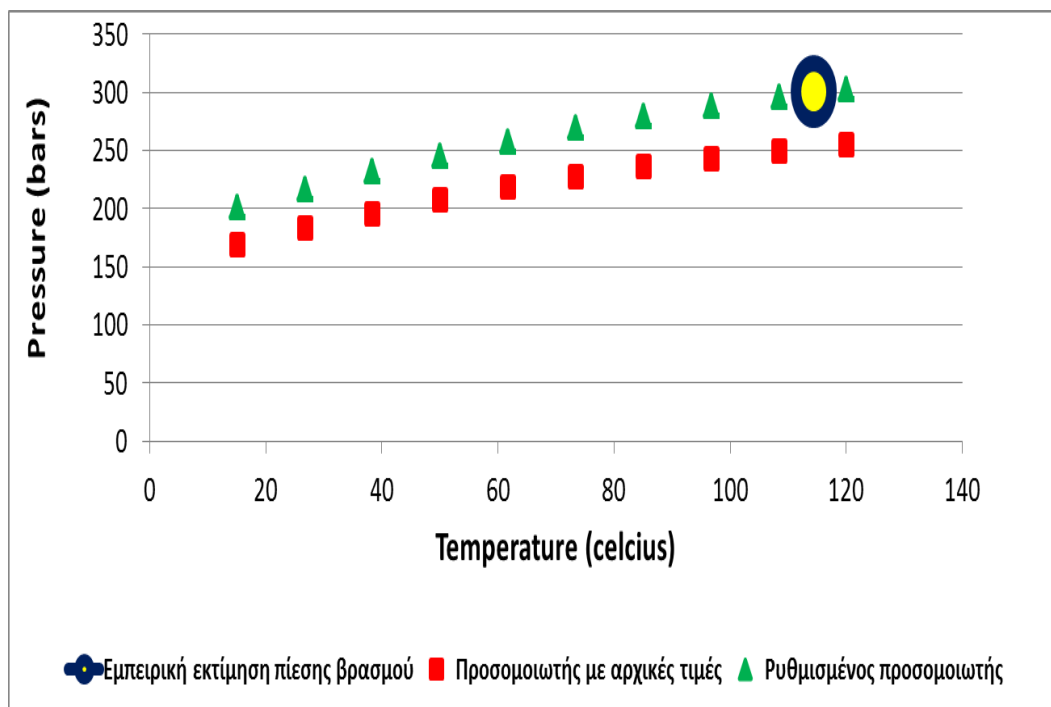
Oil 227



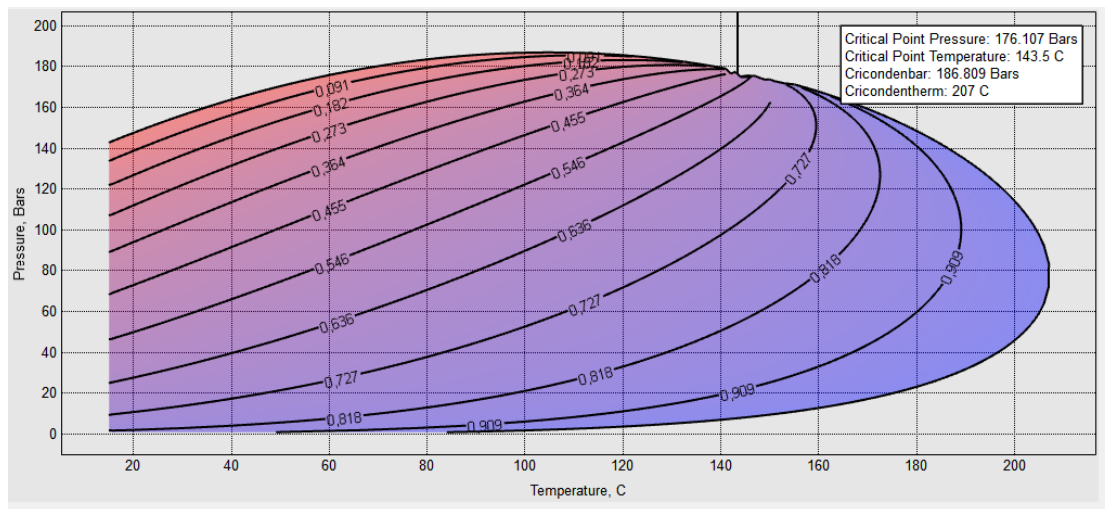
Διάγραμμα 55 Προσομοίωση  $B_o$  για το πετρέλαιο 227



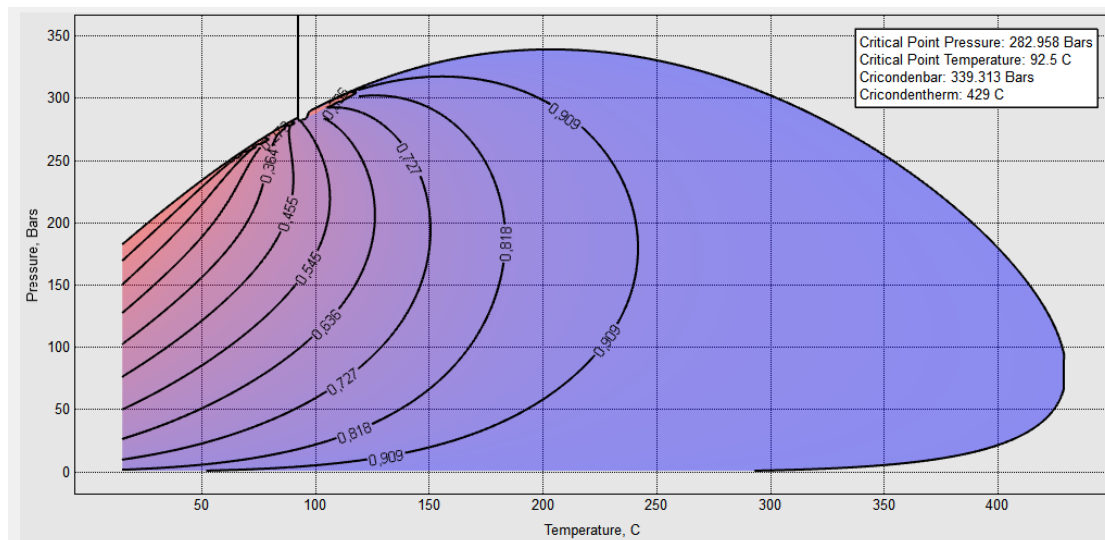
Διάγραμμα 56 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 227



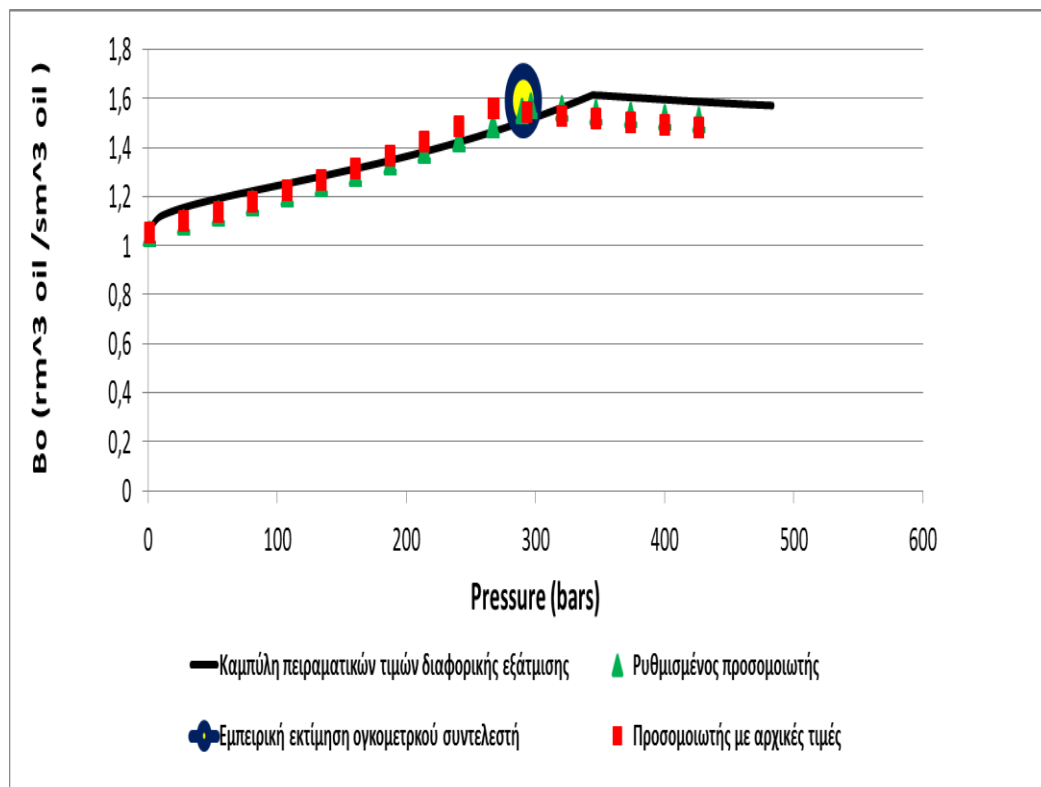
Διάγραμμα 57 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 227



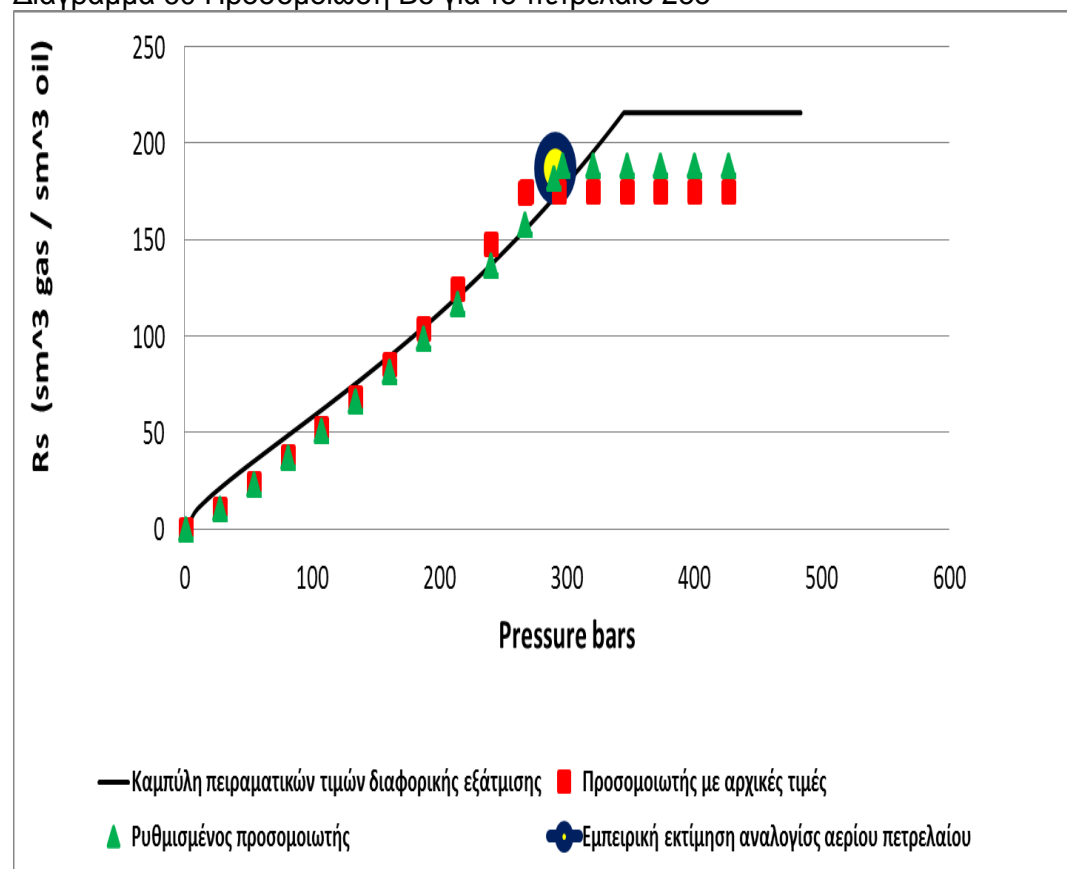
Διάγραμμα 58 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 227 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων



Διάγραμμα 59 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων

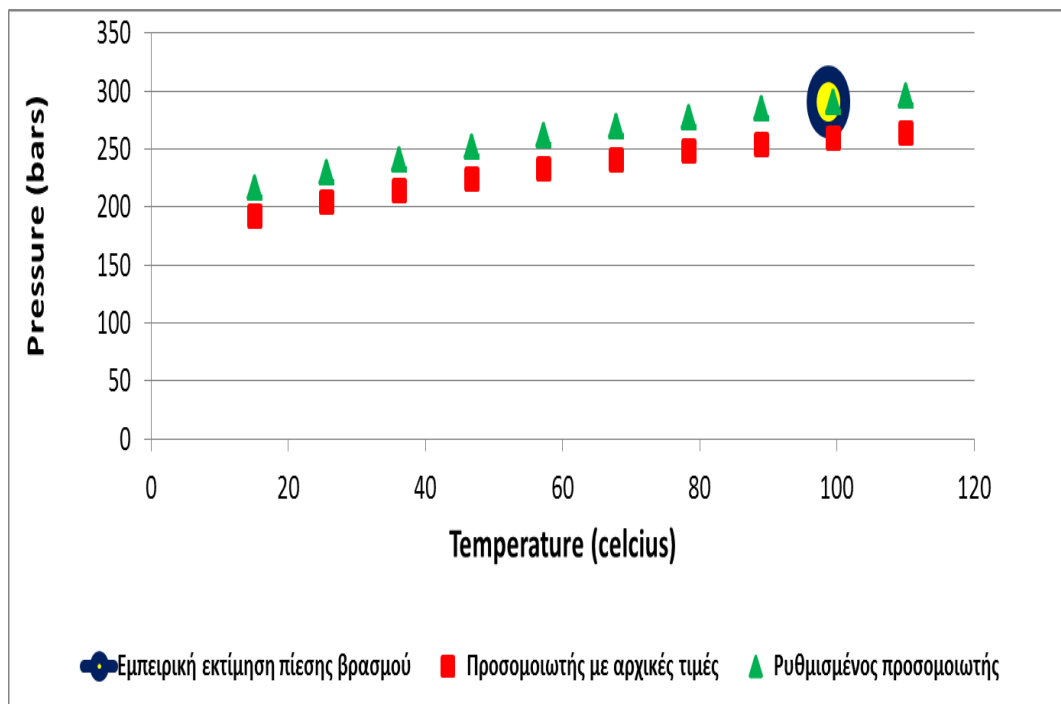


Διάγραμμα 60 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 235

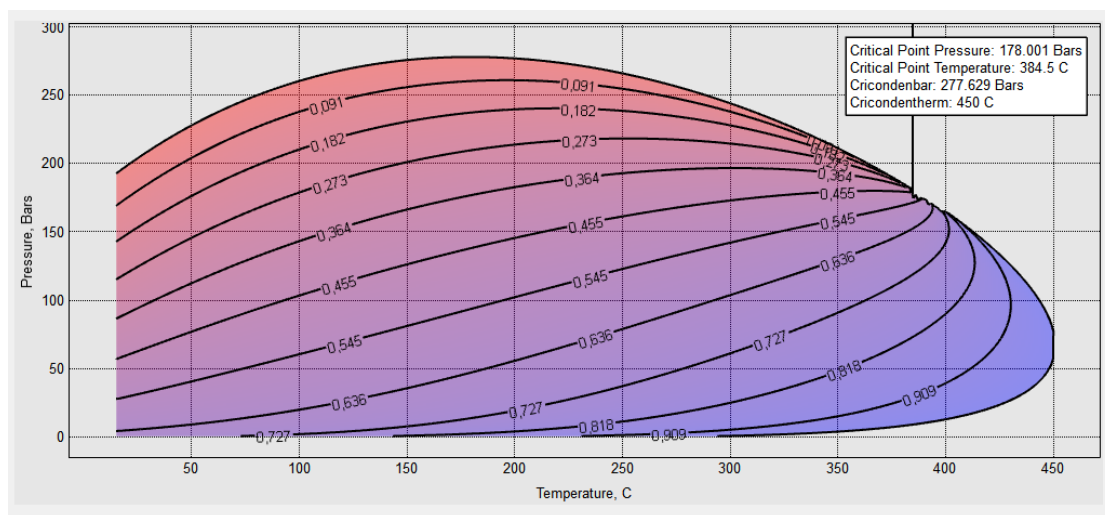


Διάγραμμα 61 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 235

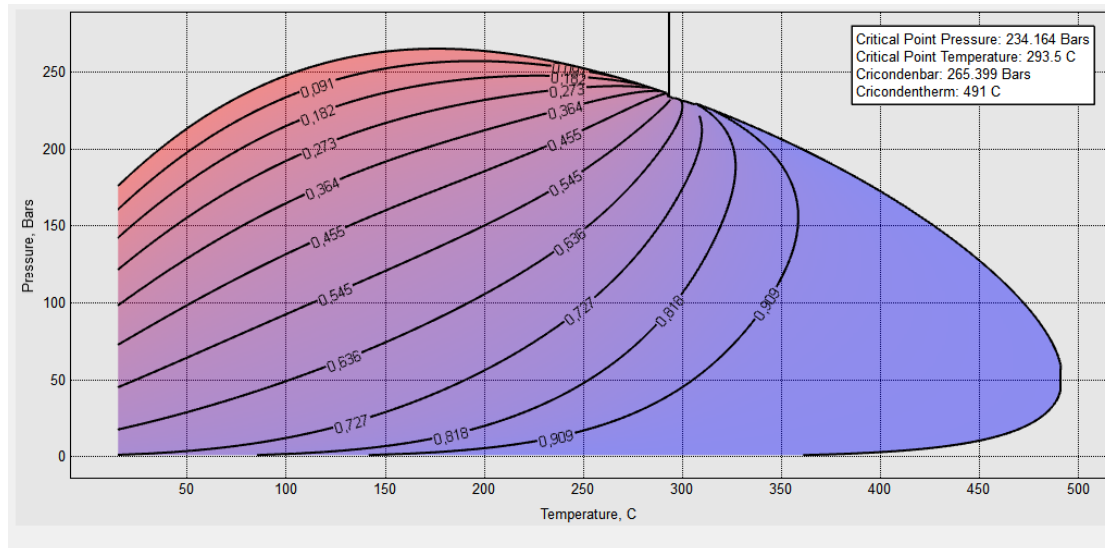




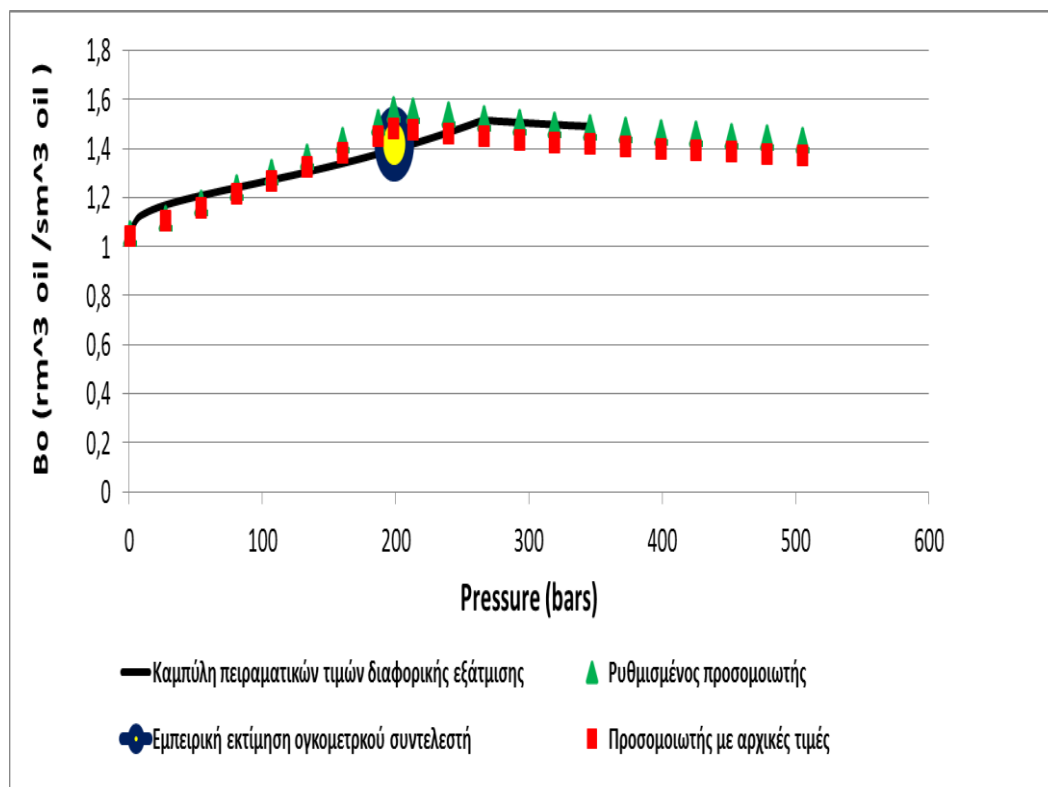
Διάγραμμα 62 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 235



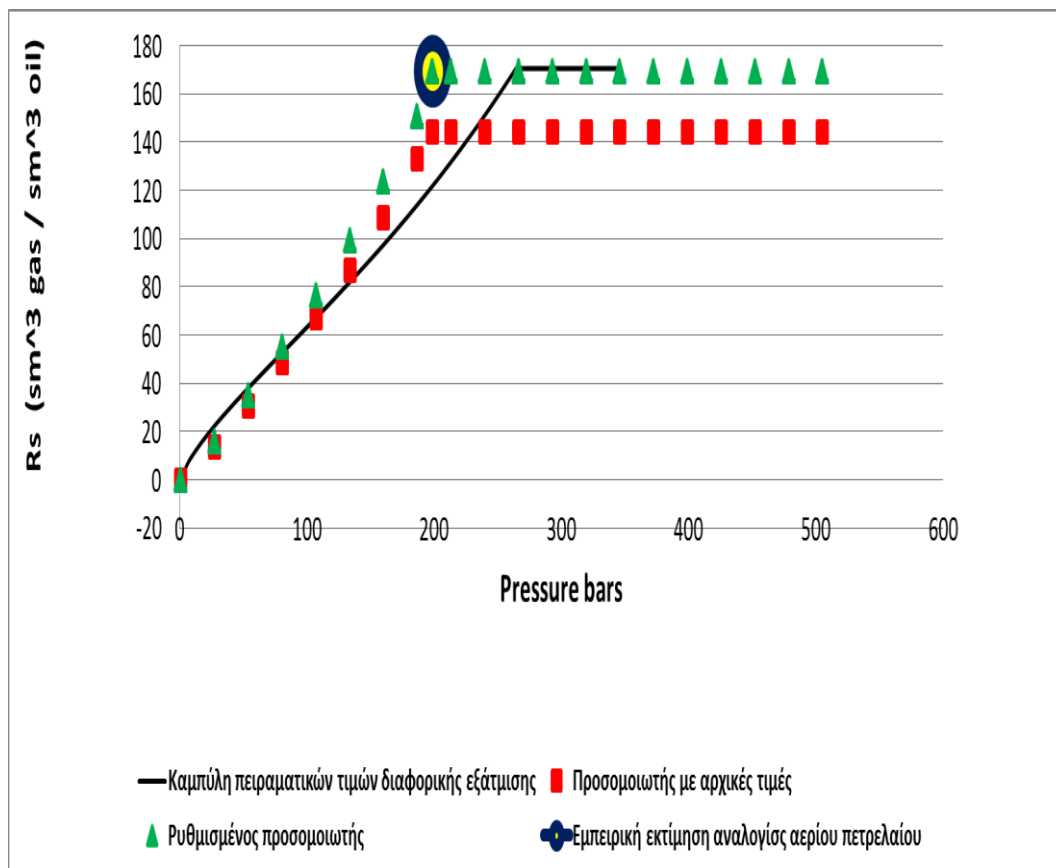
Διάγραμμα 63 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 235 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων



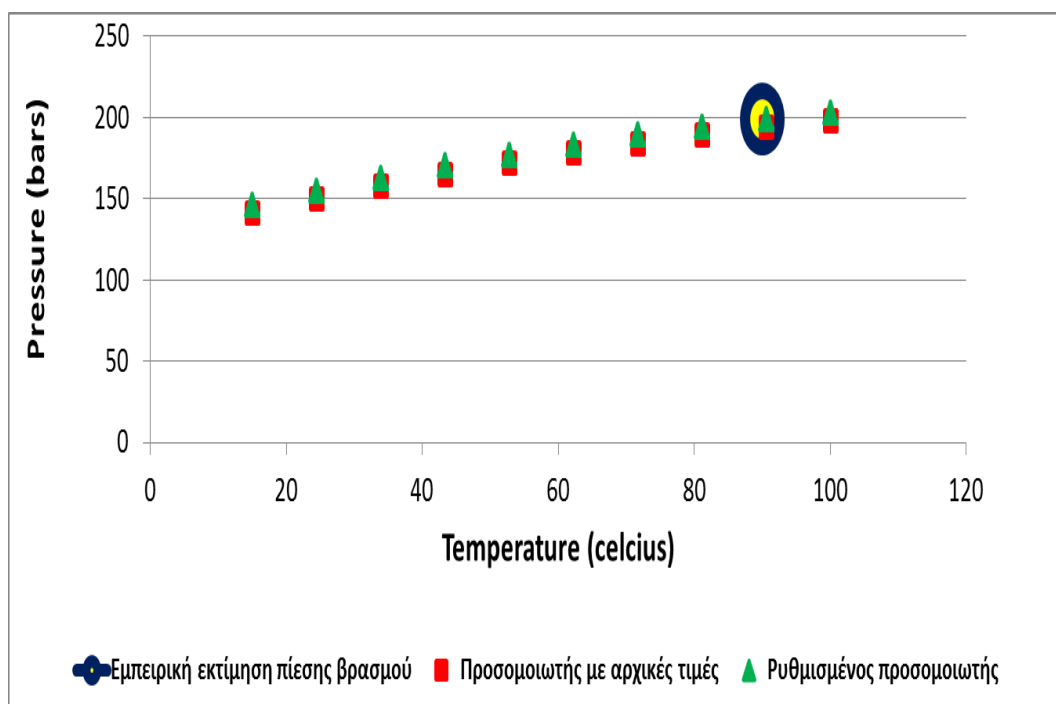
Διάγραμμα 64 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων Oil 236



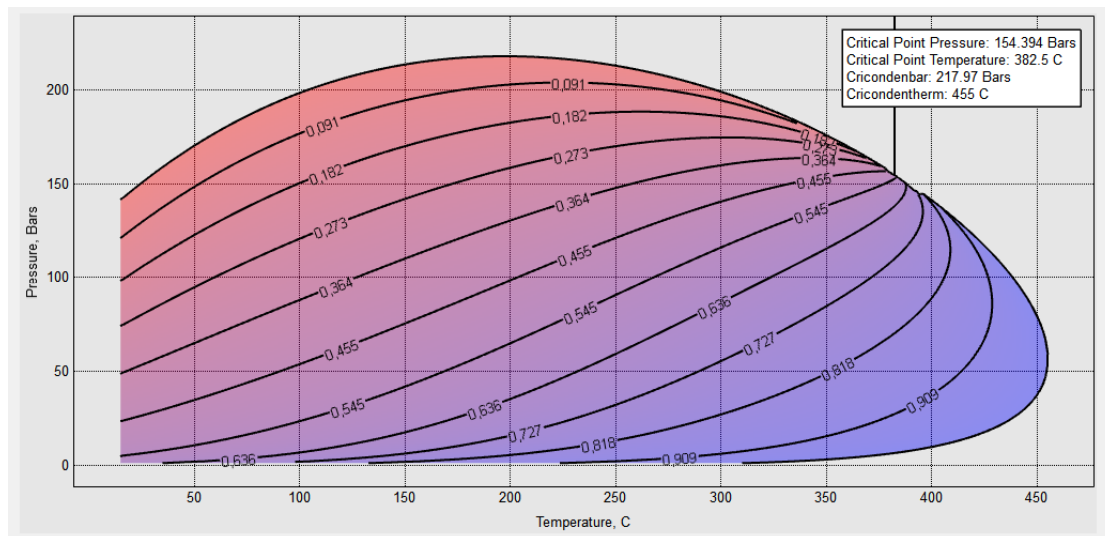
Διάγραμμα 65 Προσμοίωση Bo για το πετρέλαιο 236



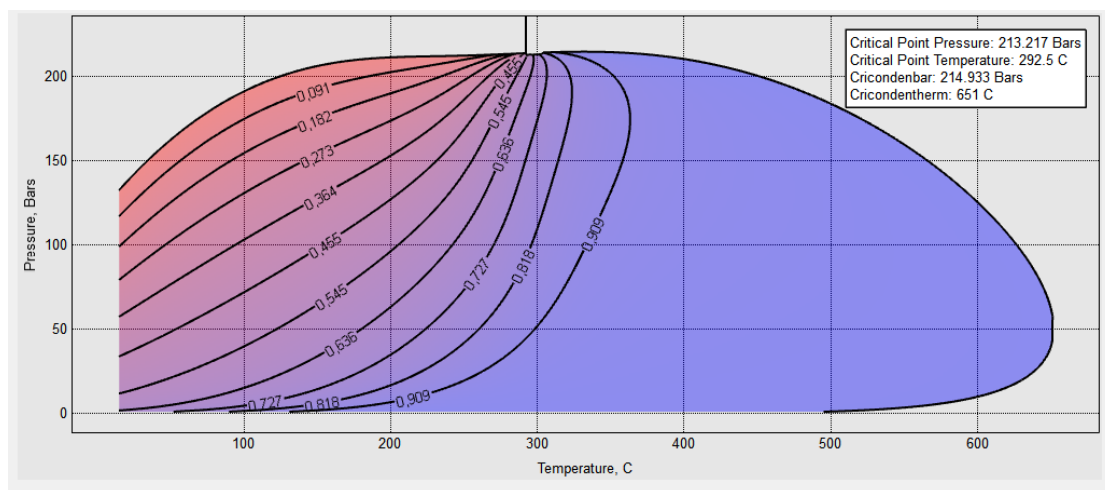
Διάγραμμα 66 Προσμοίωση Rs για το πετρέλαιο 236



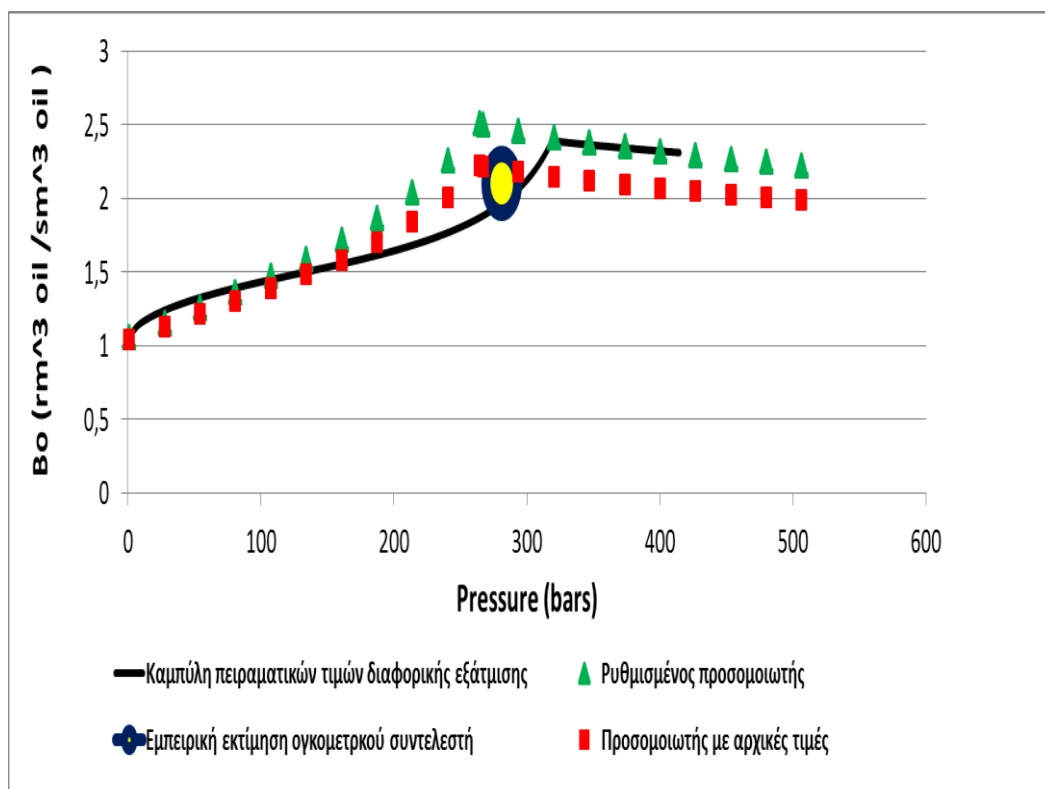
Διάγραμμα 67 Προσμοίωση Pb για το πετρέλαιο 236



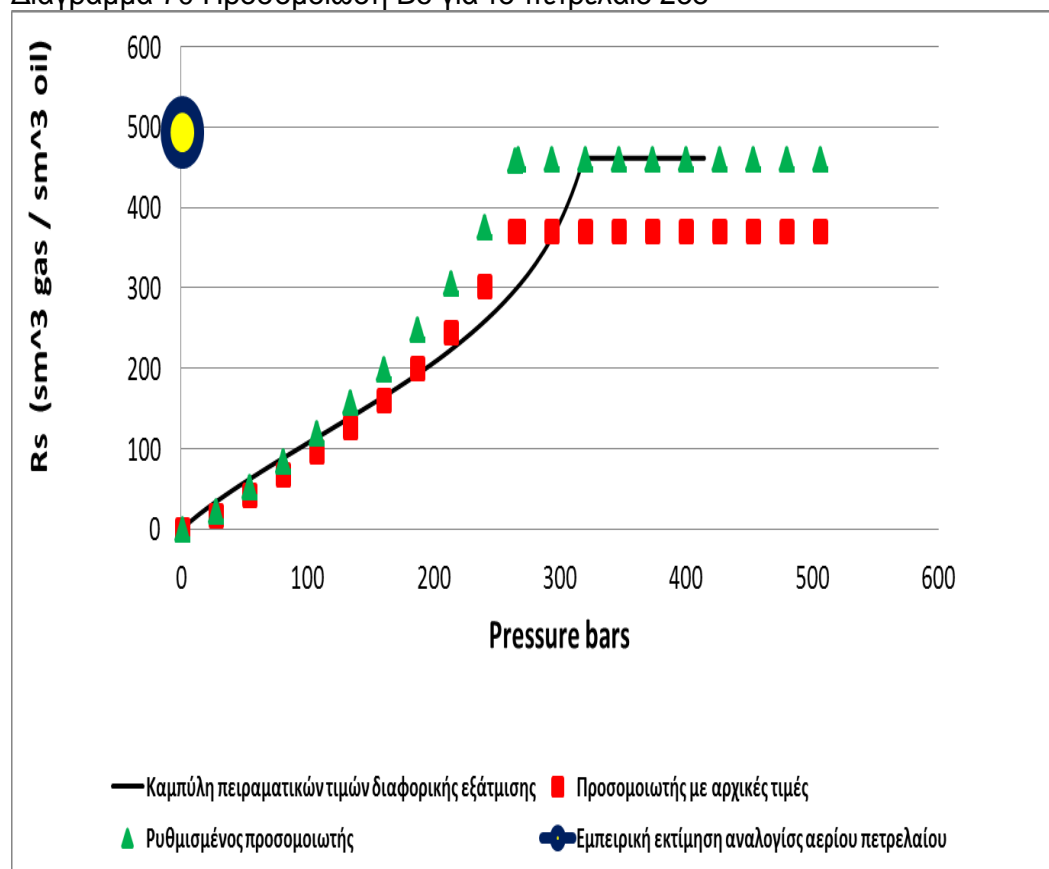
Διάγραμμα 68 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 236 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων



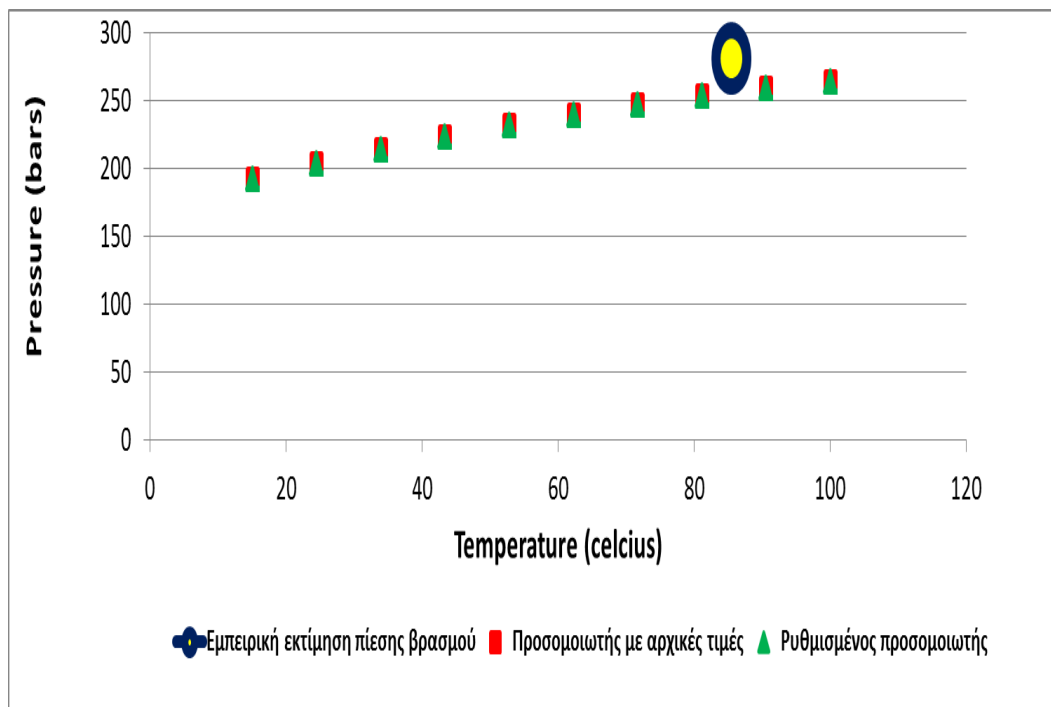
Διάγραμμα 69 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 236 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων



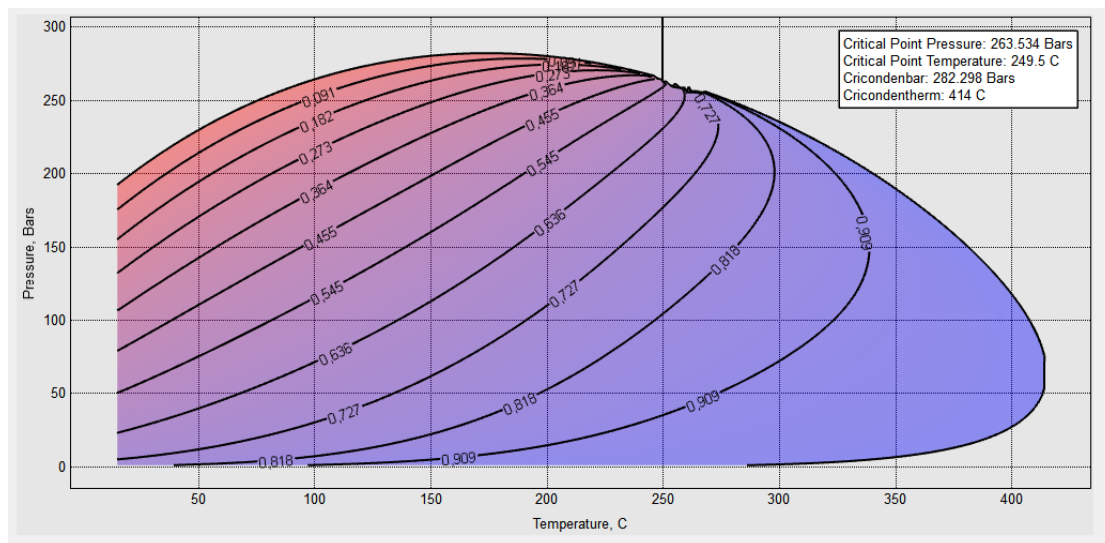
Διάγραμμα 70 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 238



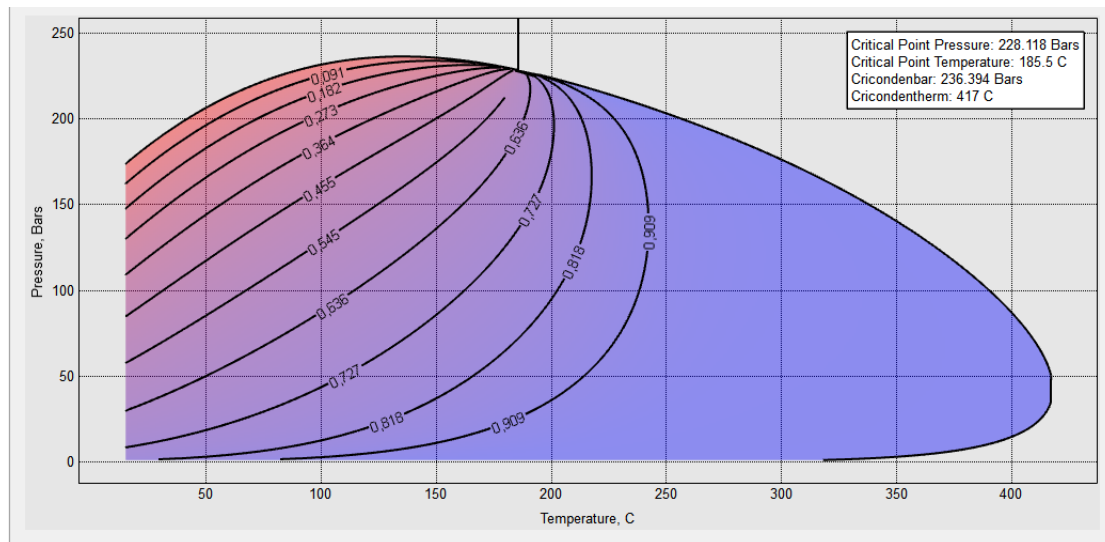
Διάγραμμα 71 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 238



Διάγραμμα 72 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 238

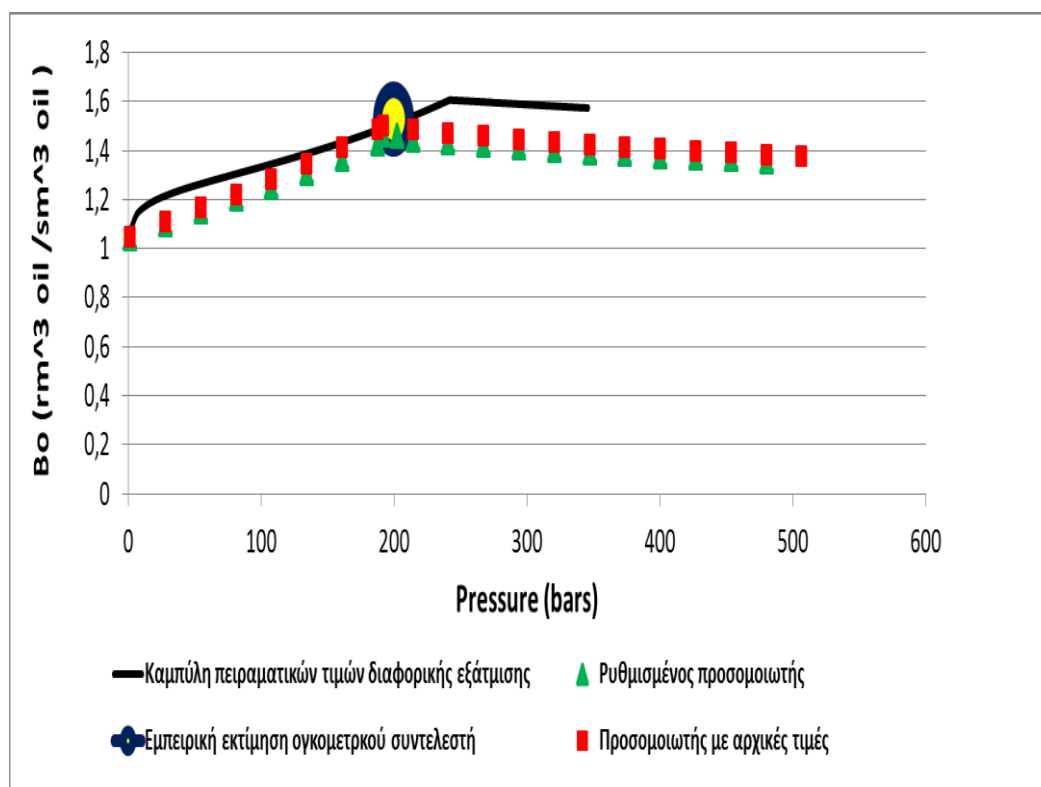


Διάγραμμα 73 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 238 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων

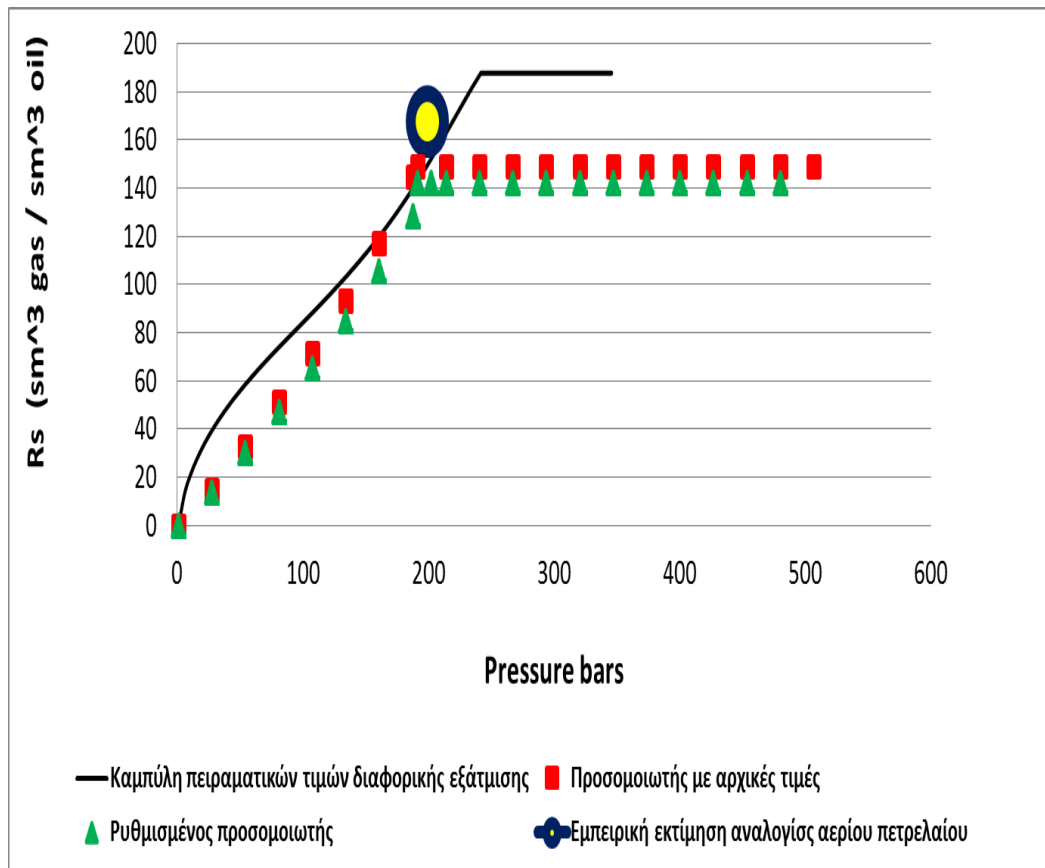


Διάγραμμα 74 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 238 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων

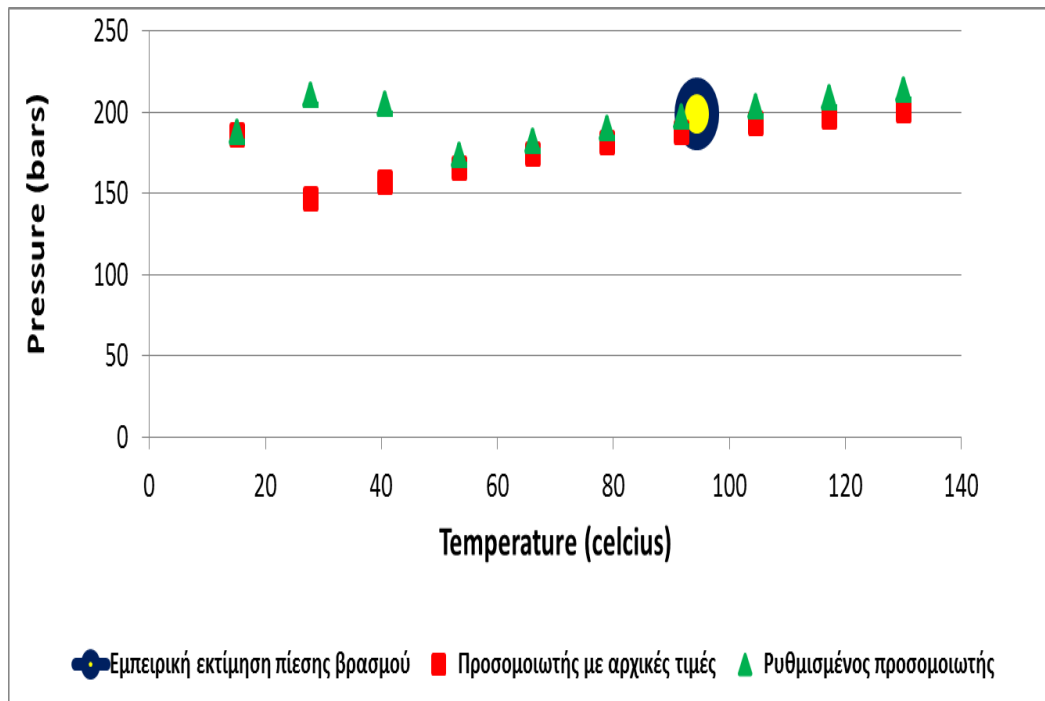
Oil 240



Διάγραμμα 75 Προσομοίωση  $B_o$  για το πετρέλαιο 240

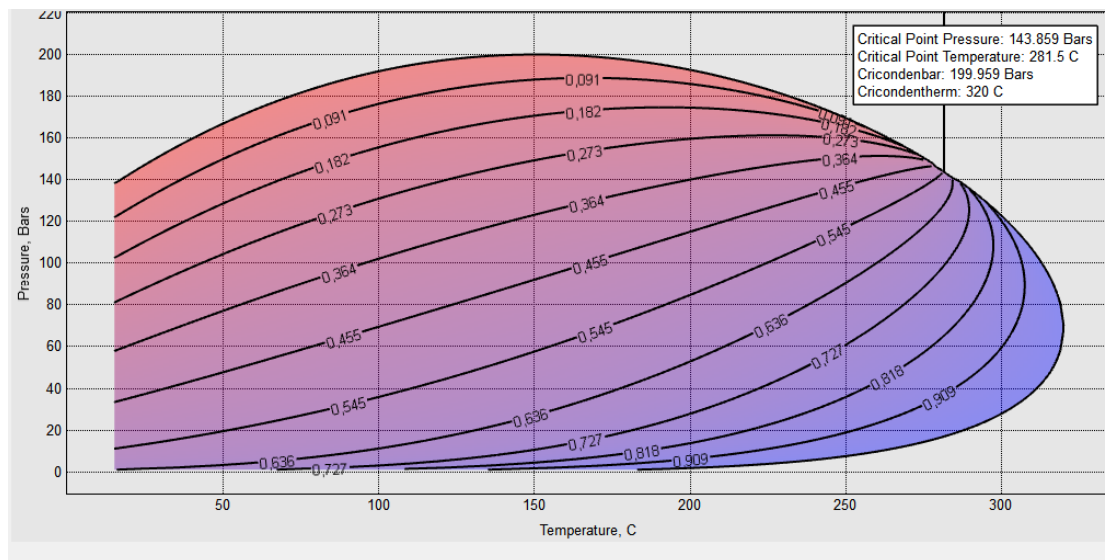


Διάγραμμα 76 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 240

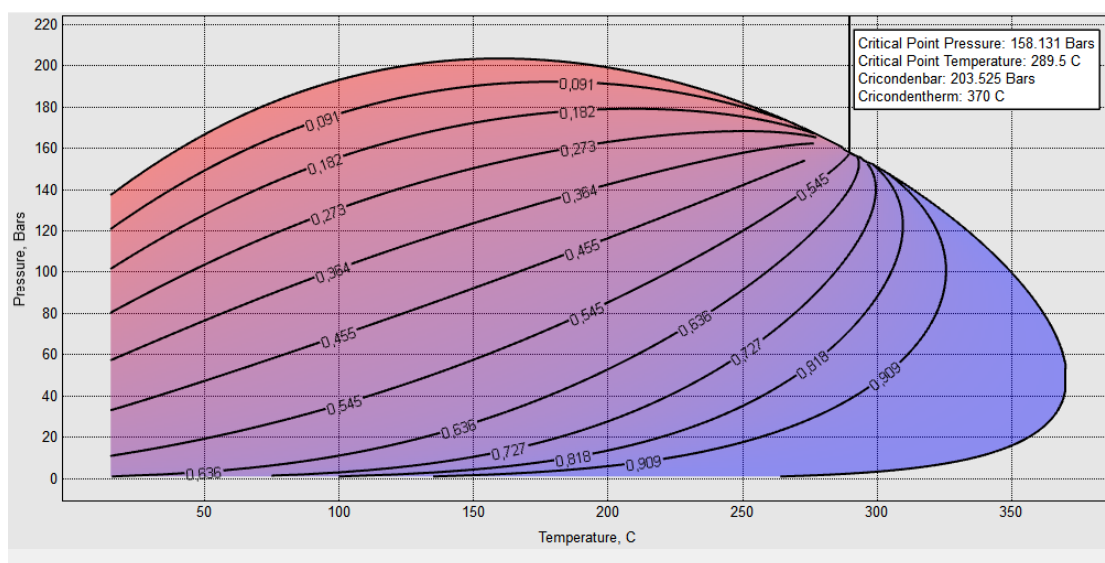


Διάγραμμα 77 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 240

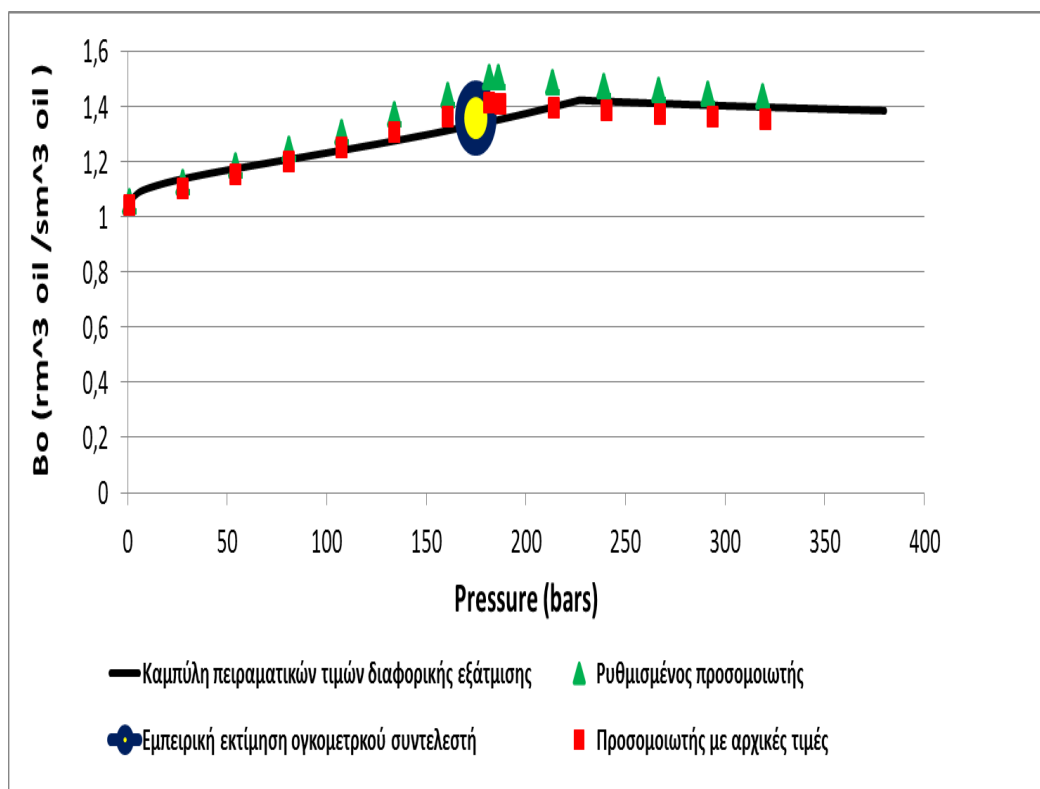




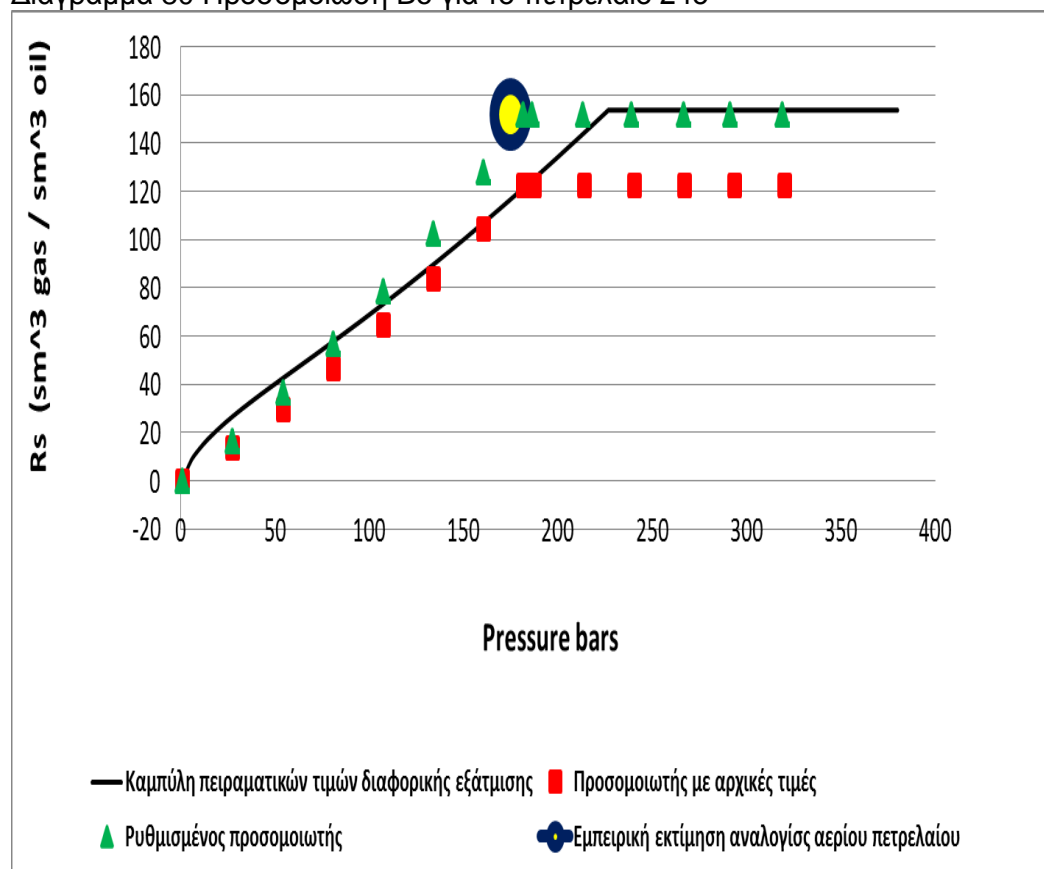
Διάγραμμα 78 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 240 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων



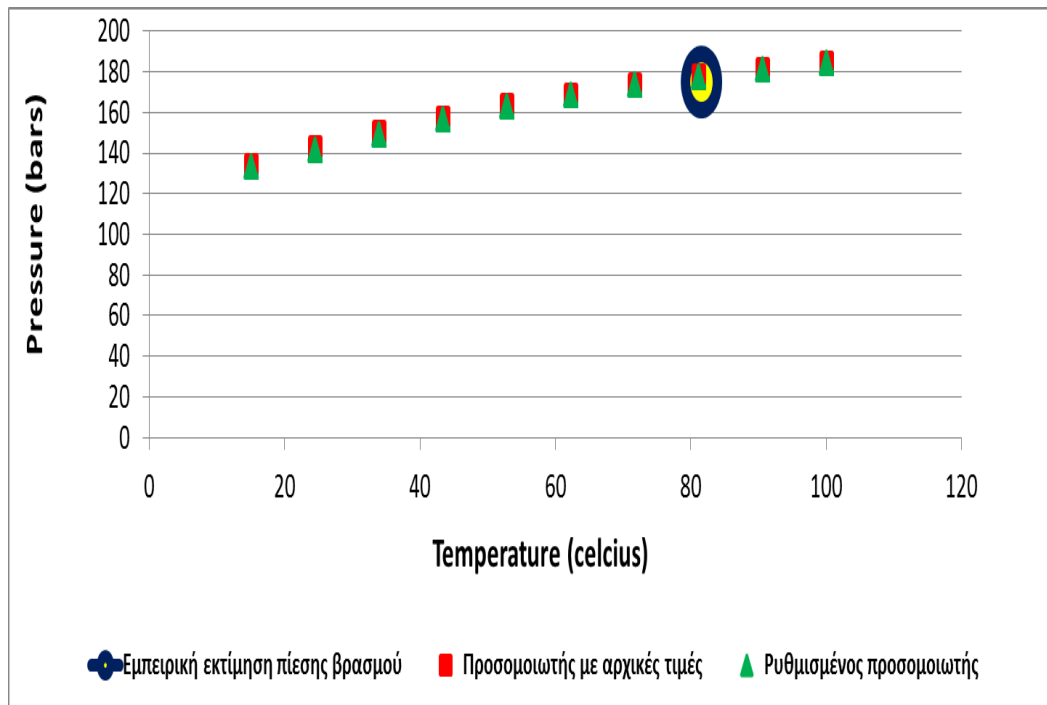
Διάγραμμα 79 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 240 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων



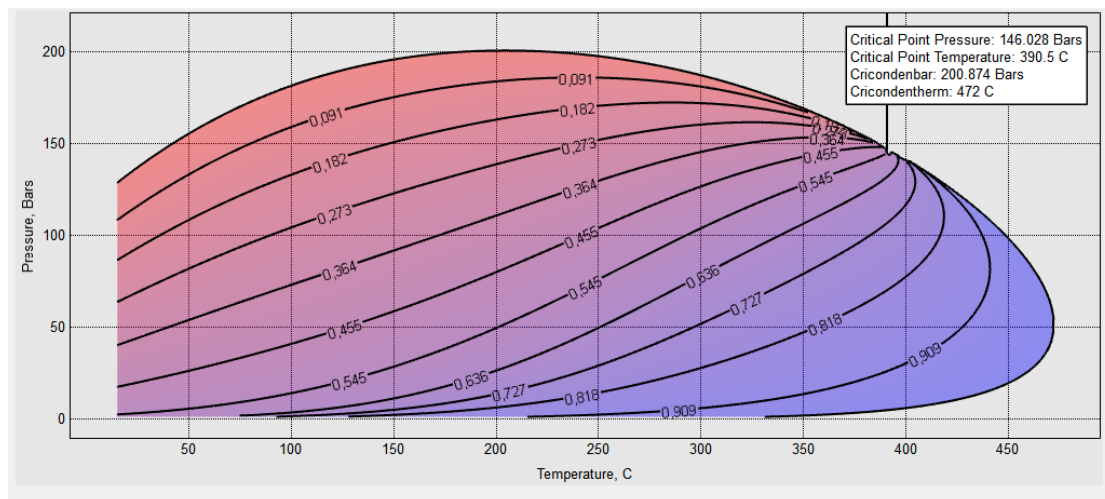
Διάγραμμα 80 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 245



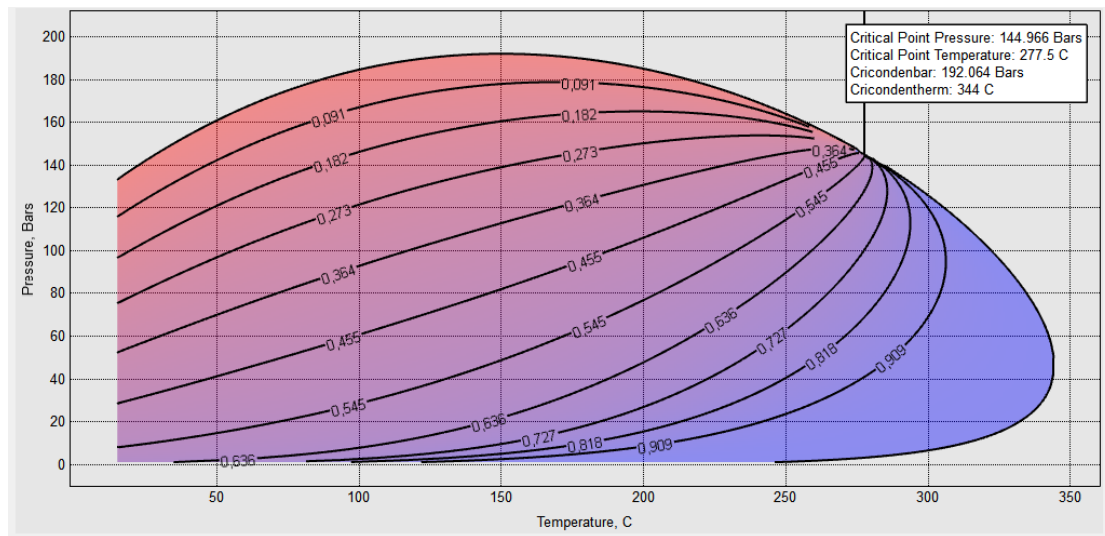
Διάγραμμα 81 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 245



Διάγραμμα 82 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 245

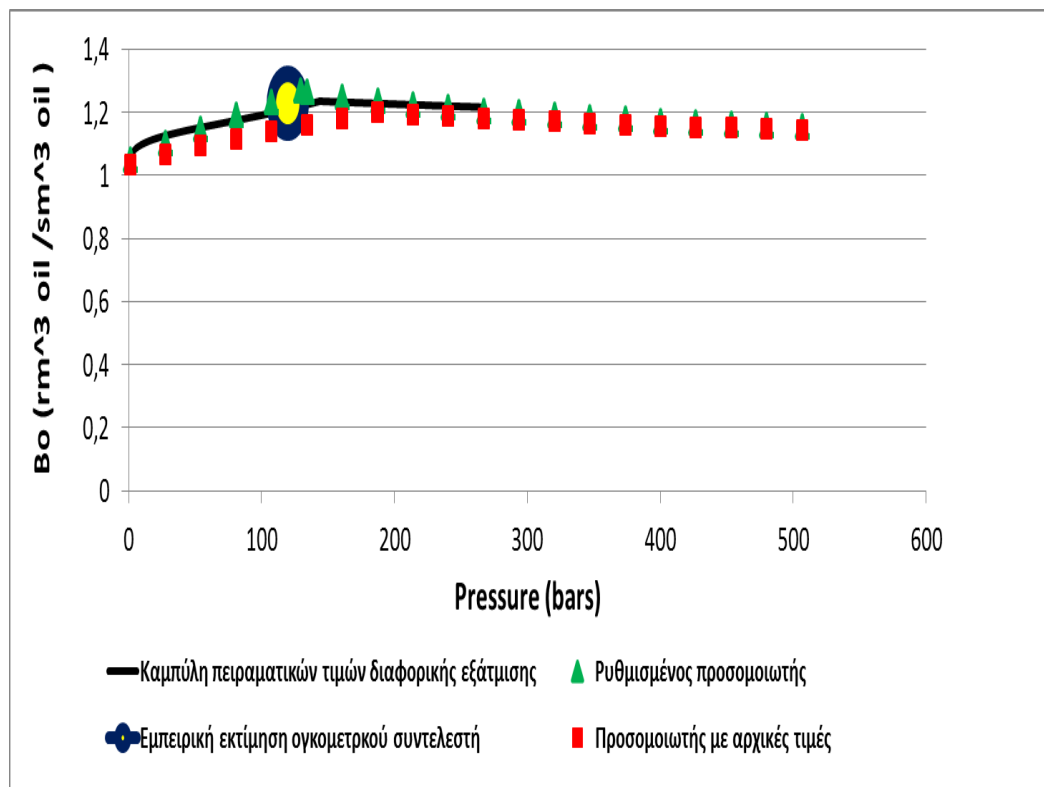


Διάγραμμα 83 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 245 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων

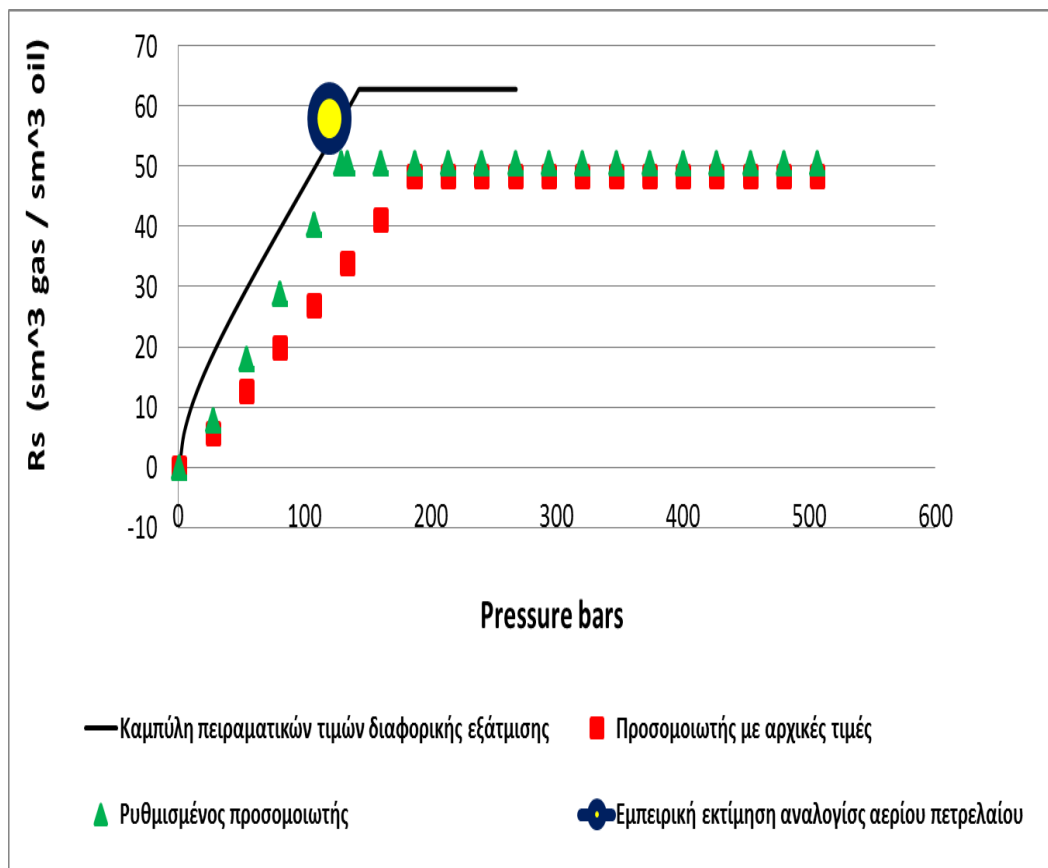


Διάγραμμα 84 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 245 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων

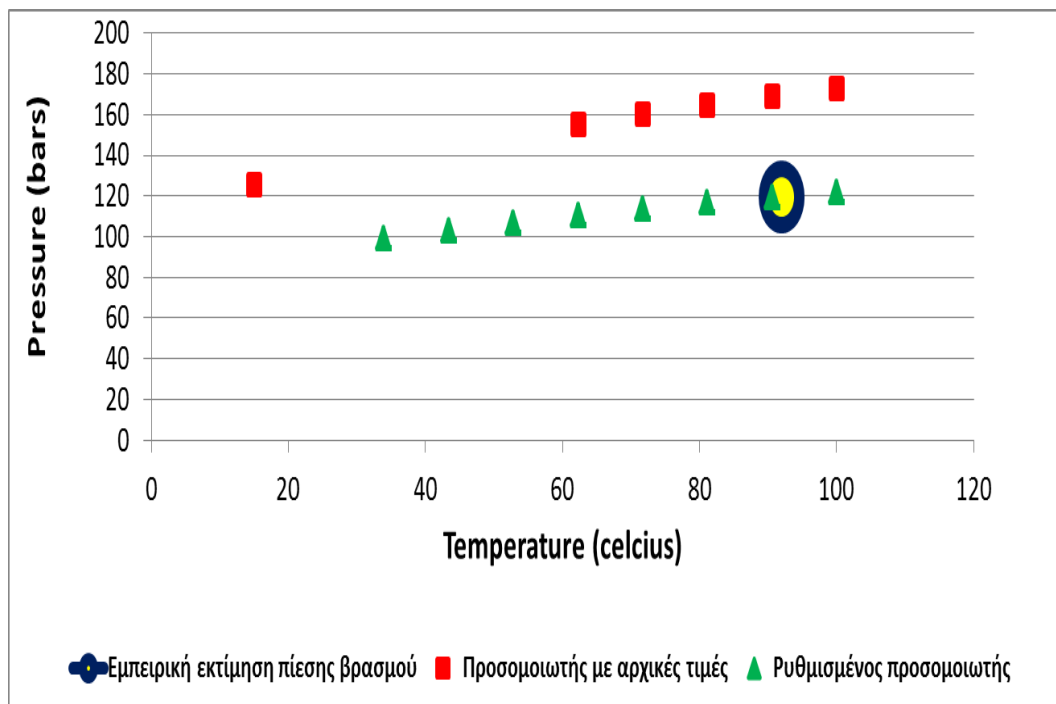
## Oil 253



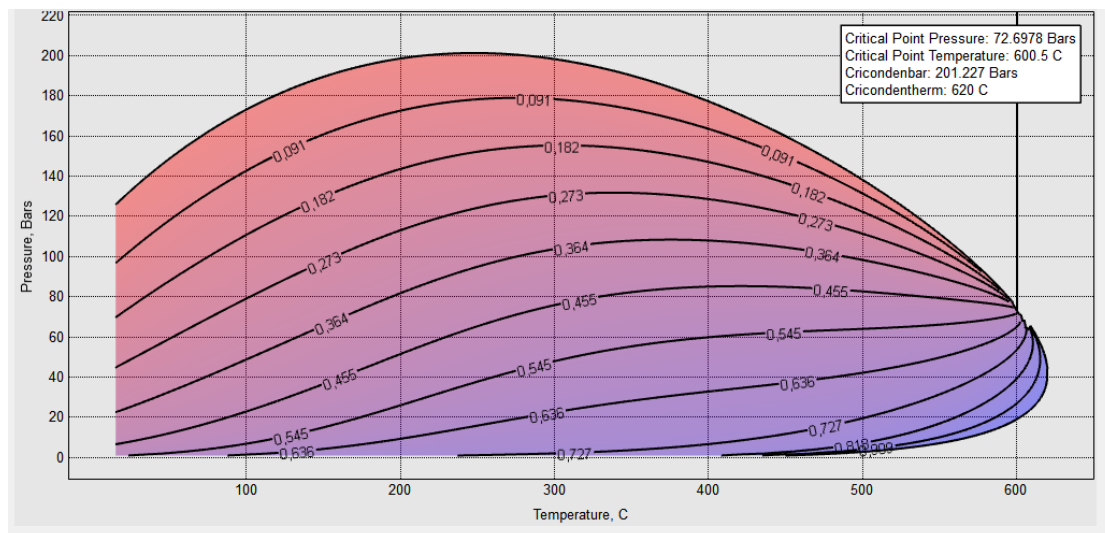
Διάγραμμα 85 Προσομοίωση Βο για το πετρέλαιο 253



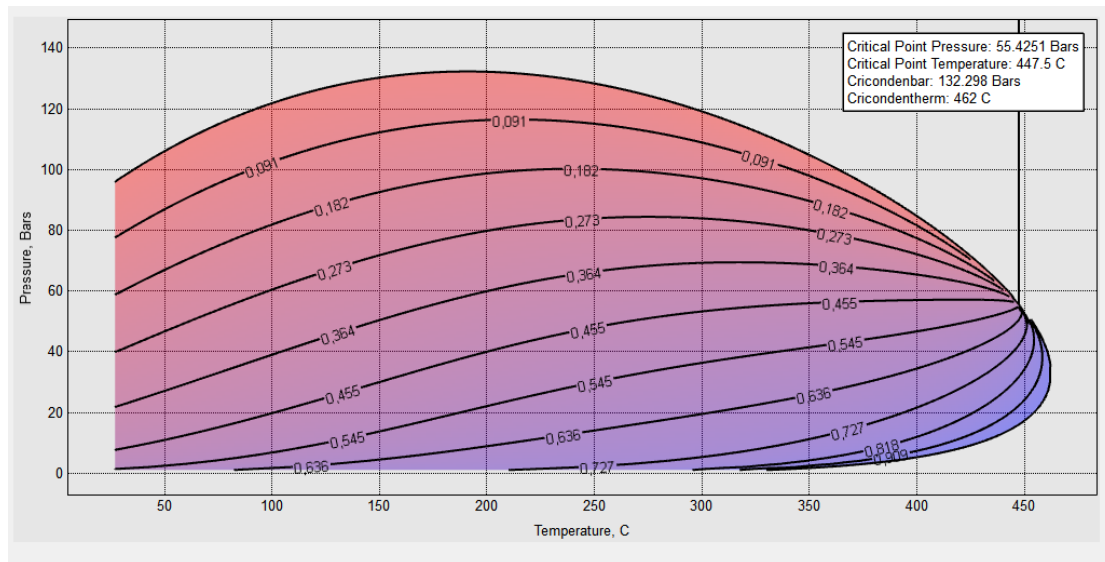
Διάγραμμα 86 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 253



Διάγραμμα 87 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 253

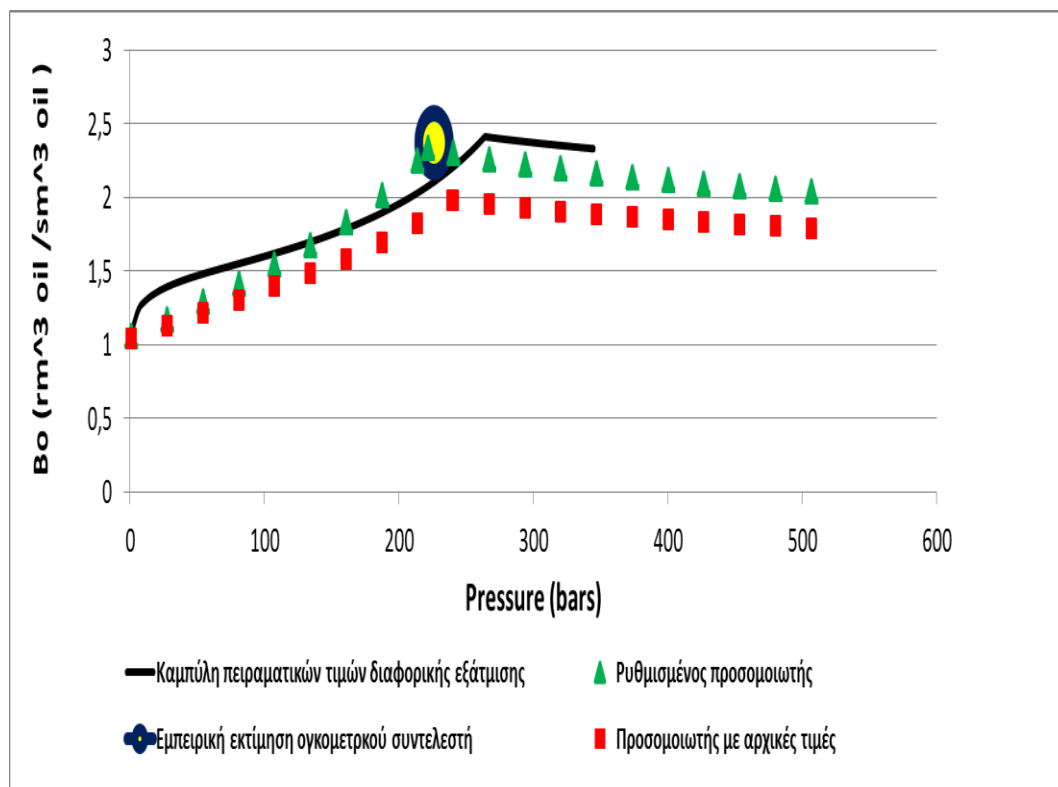


Διάγραμμα 88 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 253 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων

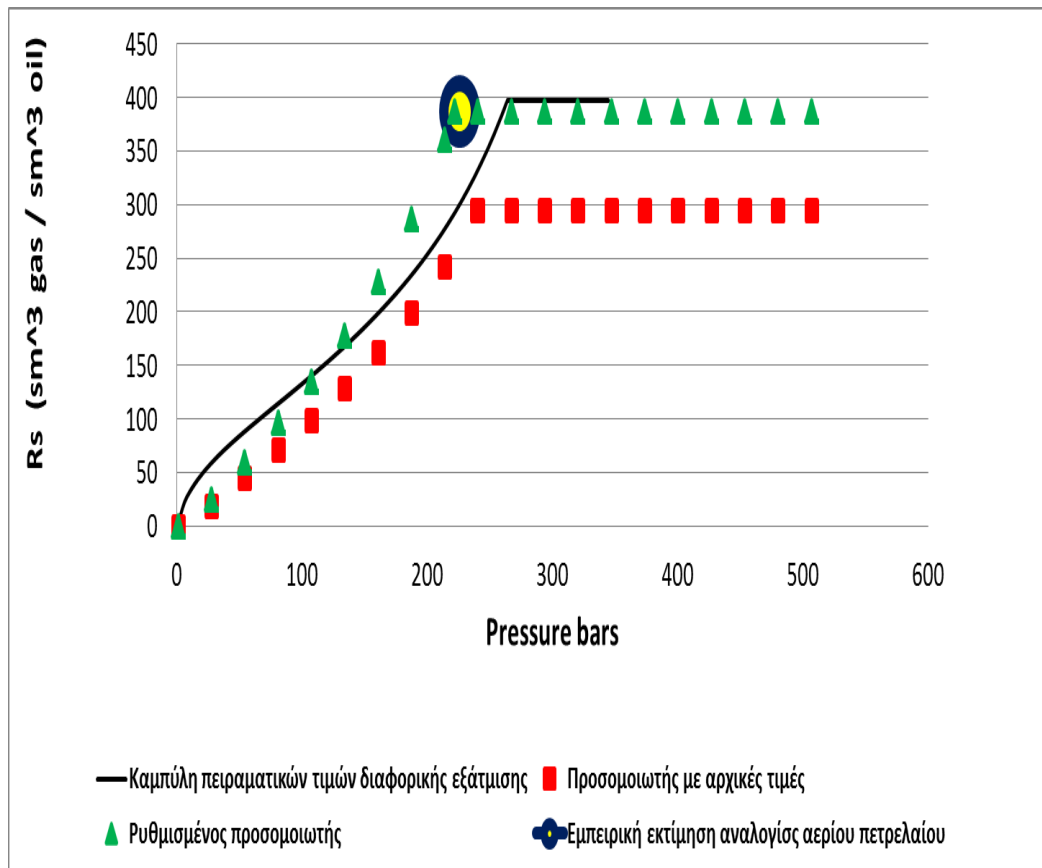


Διάγραμμα 89 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 253 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων

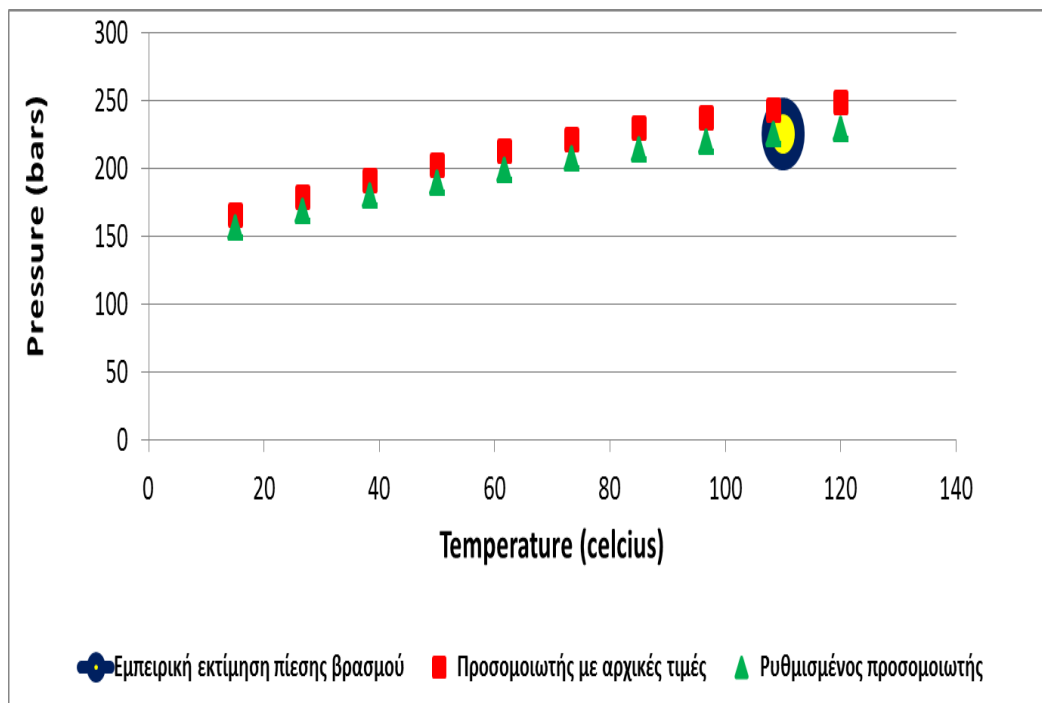
## Oil 254



Διάγραμμα 90 Προσομοίωση  $B_o$  για το πετρέλαιο 254

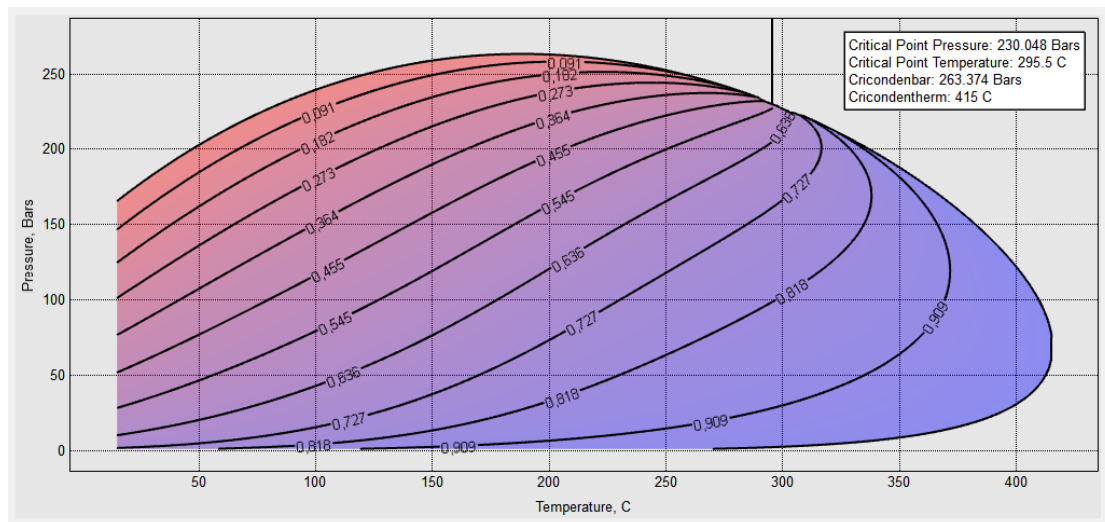


Διάγραμμα 91 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 254

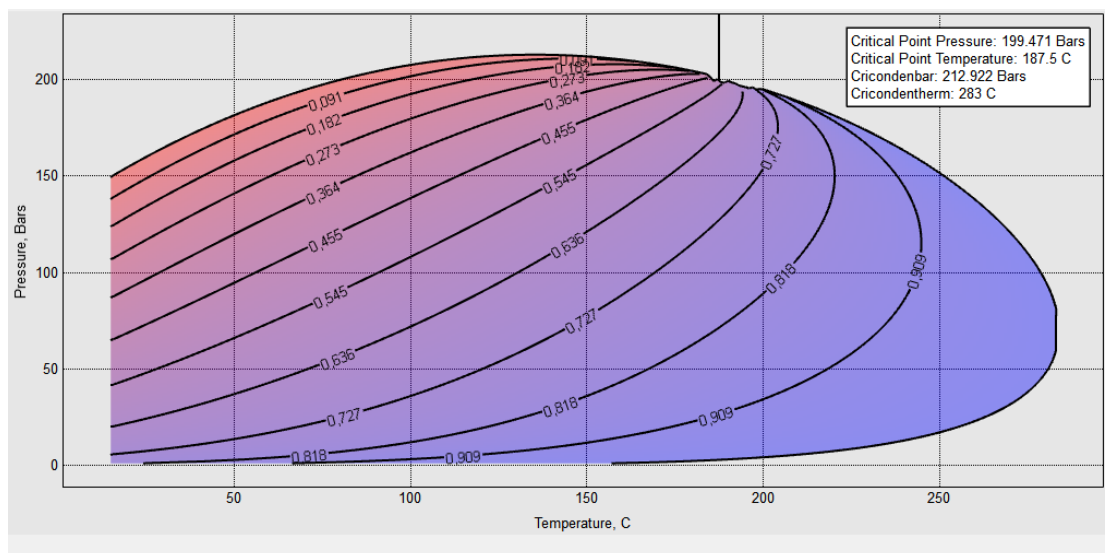


Διάγραμμα 92 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 254



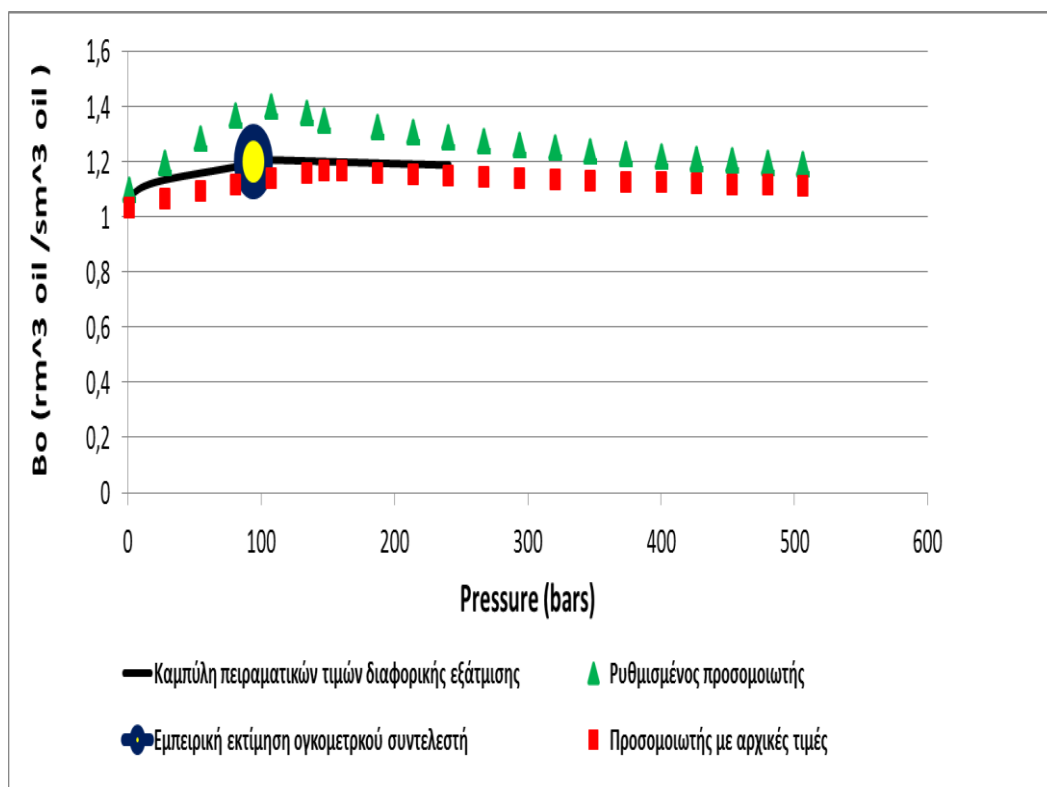


Διάγραμμα 93 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 254 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων

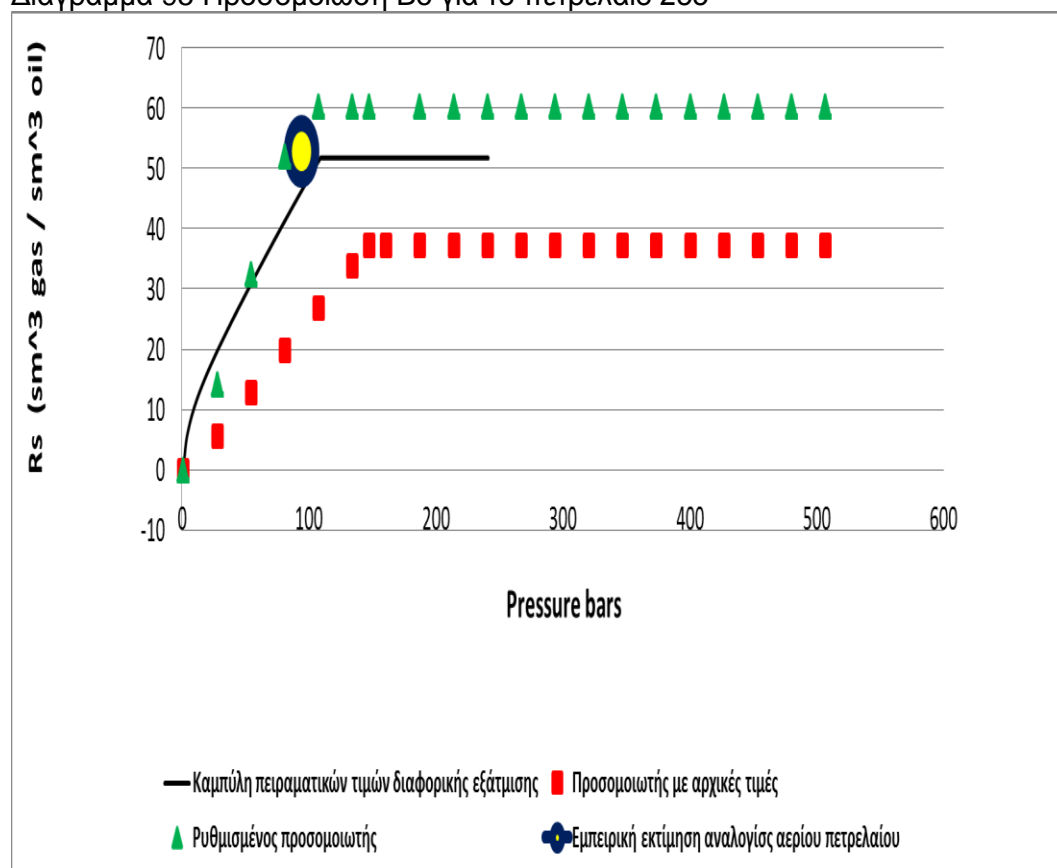


Διάγραμμα 94 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 254 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων

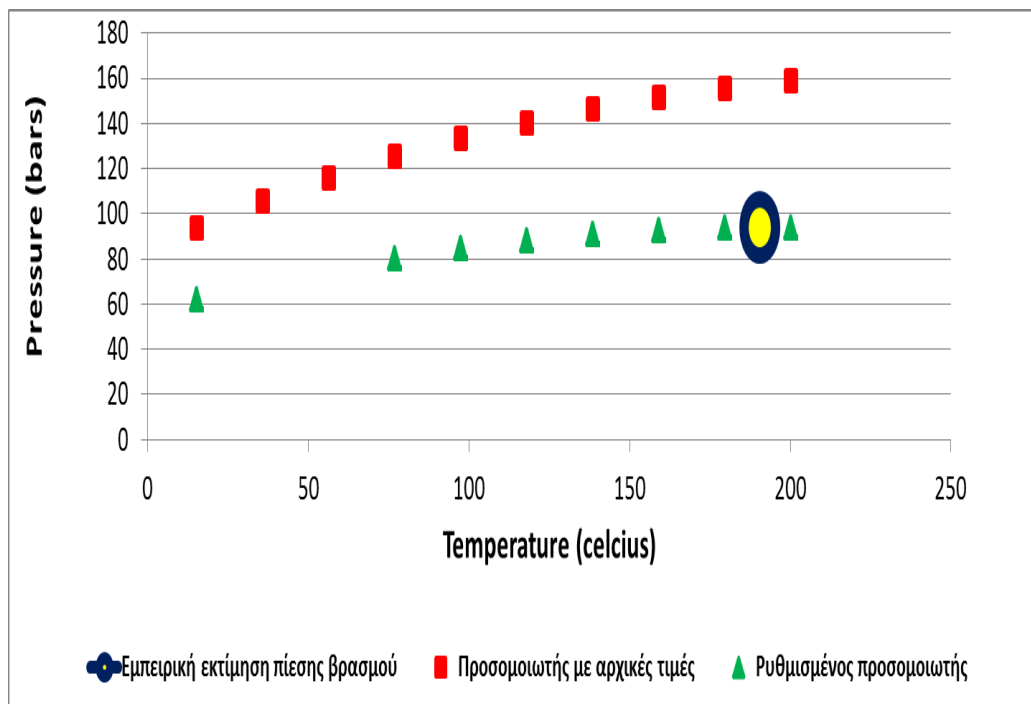
## Oil 255



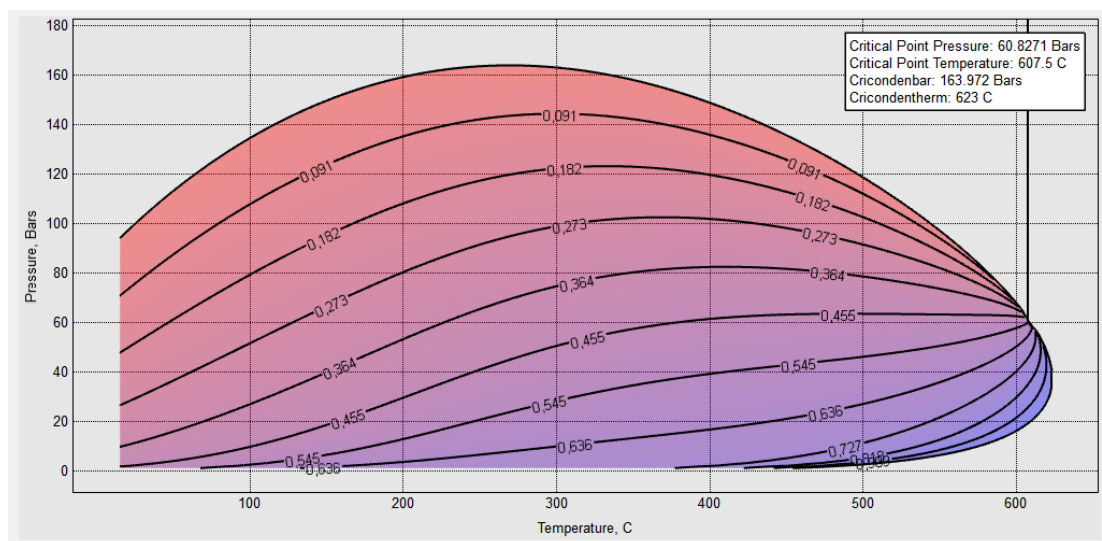
Διάγραμμα 95 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 255



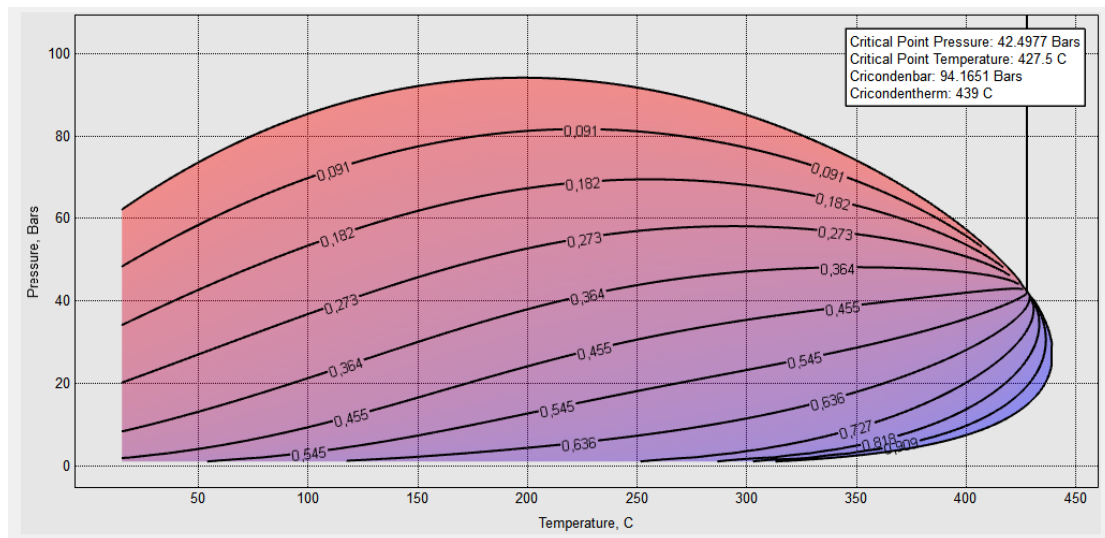
Διάγραμμα 96 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 255



Διάγραμμα 97 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 255

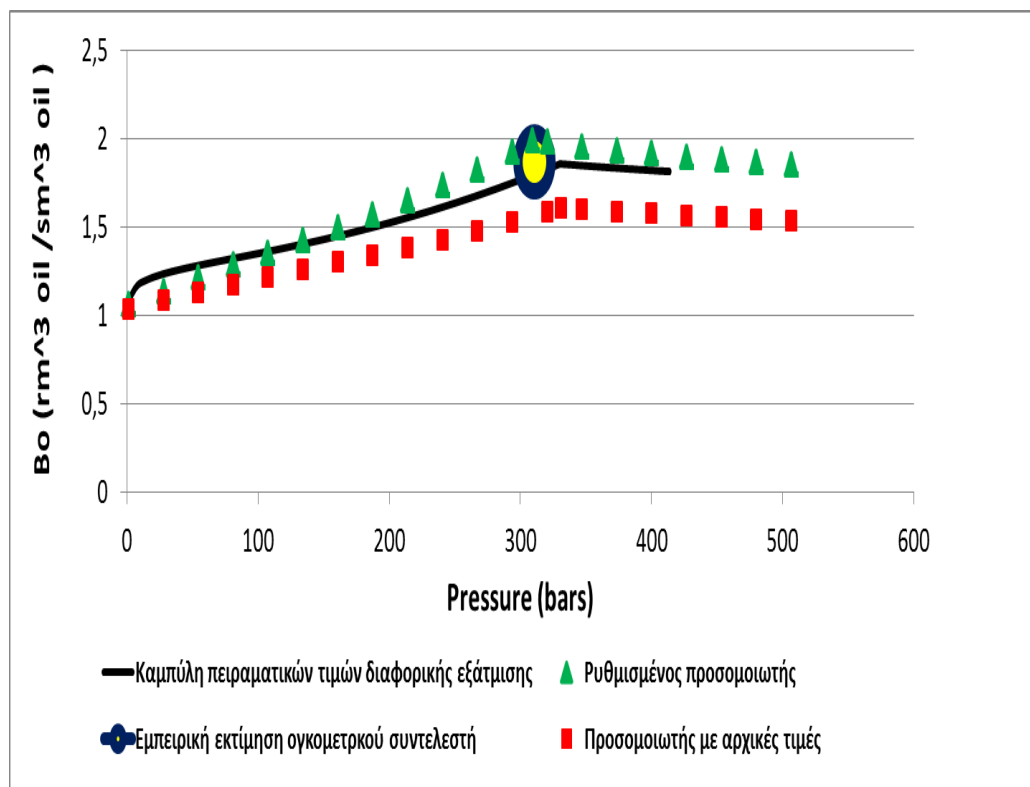


Διάγραμμα 98 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 255 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων

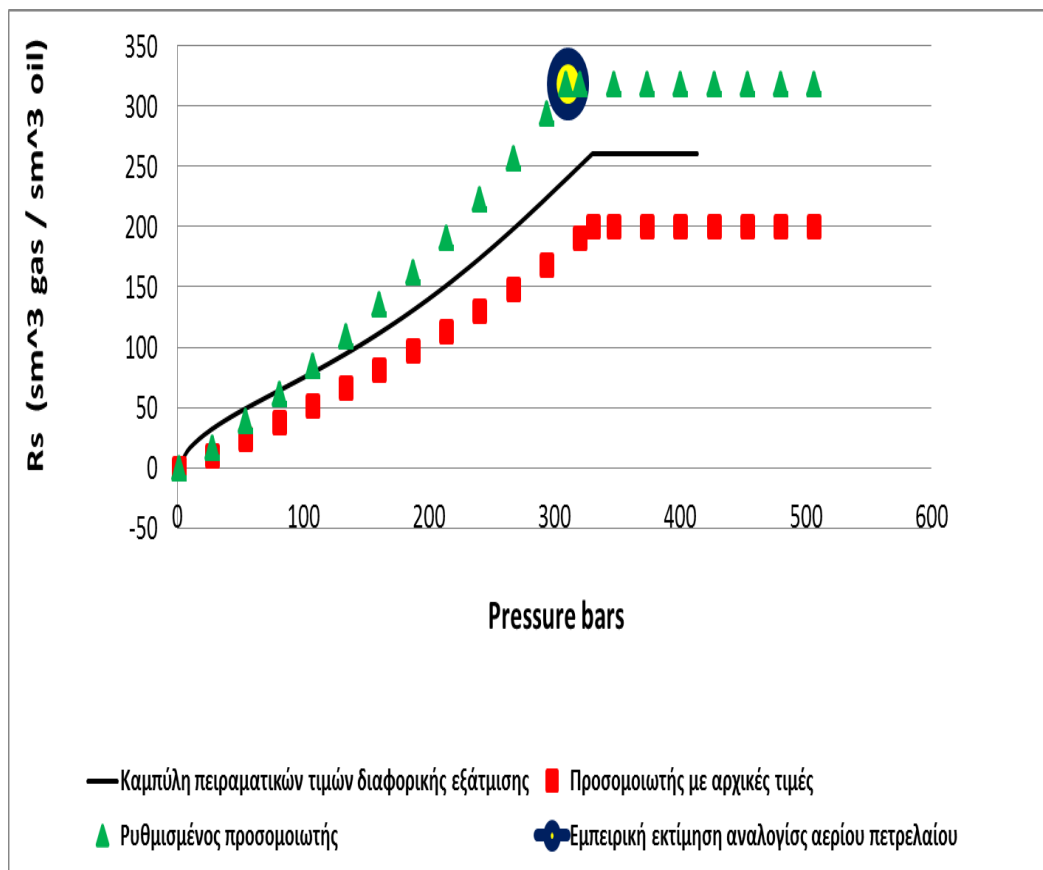


Διάγραμμα 99 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 255 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων

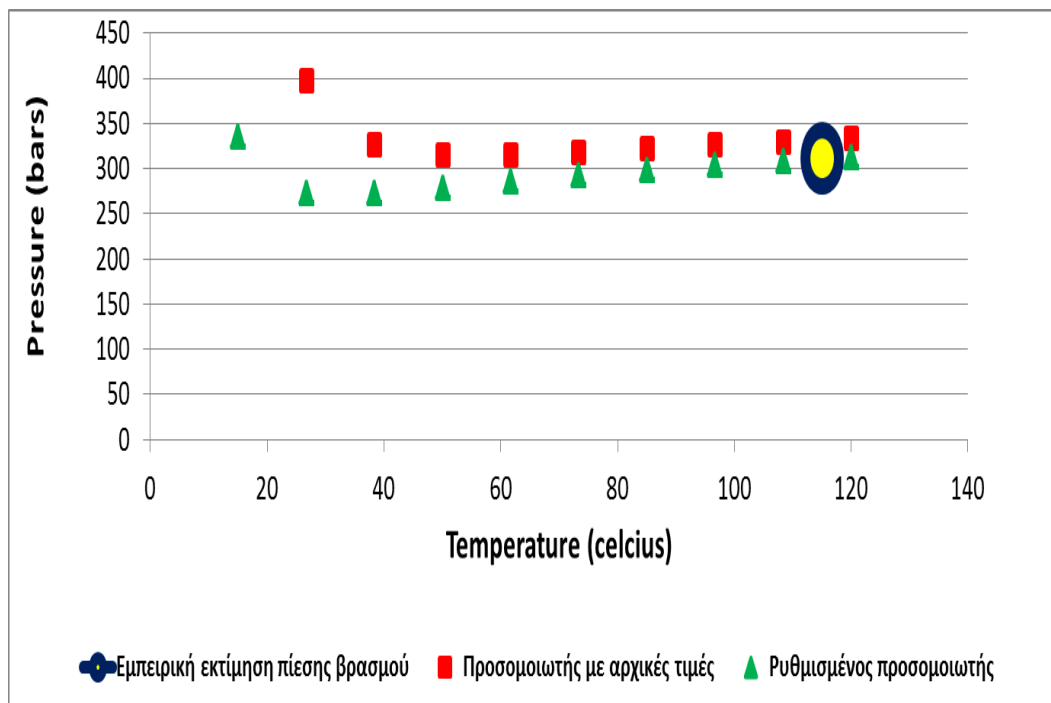
#### Oil 256



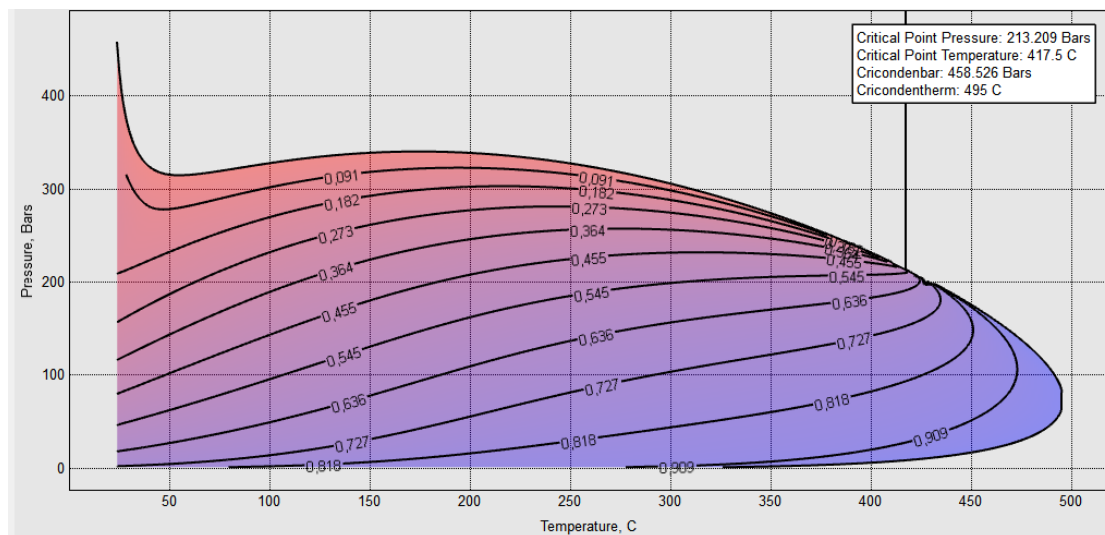
Διάγραμμα 100 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 256



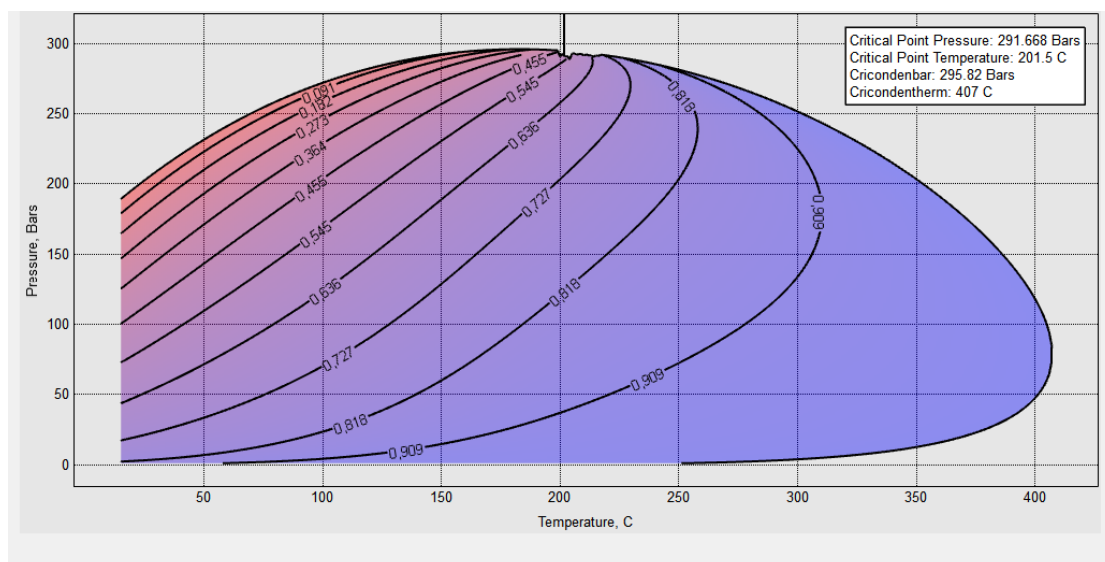
Διάγραμμα 101 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 256



Διάγραμμα 102 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 256

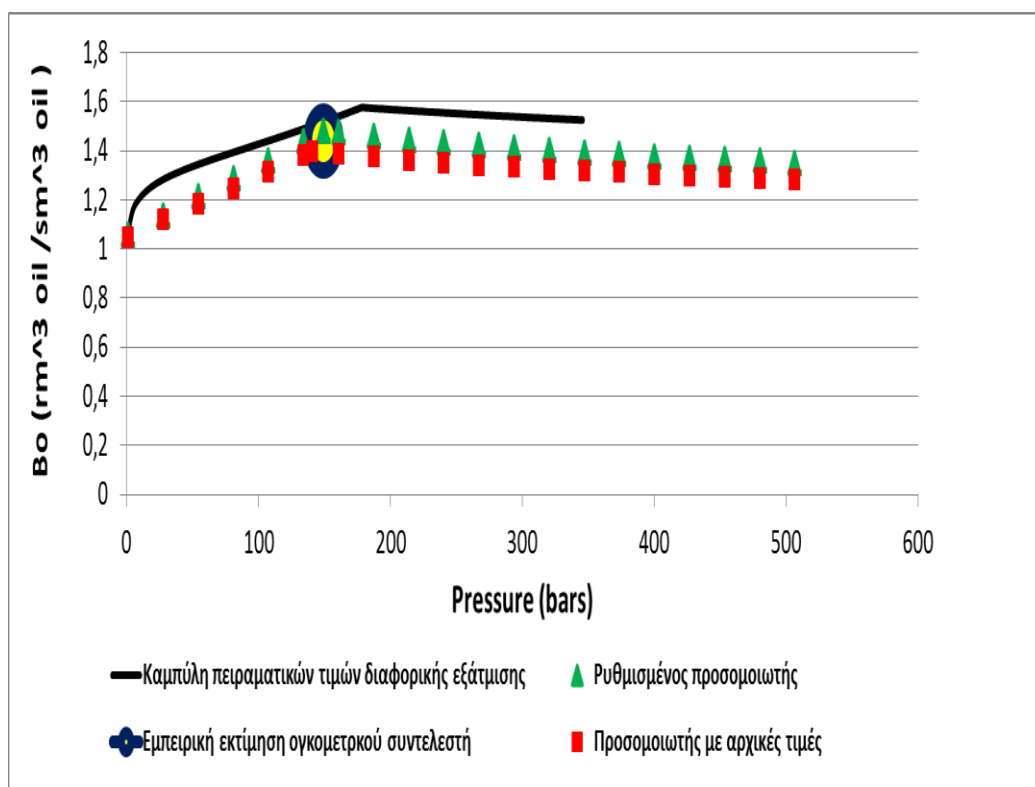


Διάγραμμα 103 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 256 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων

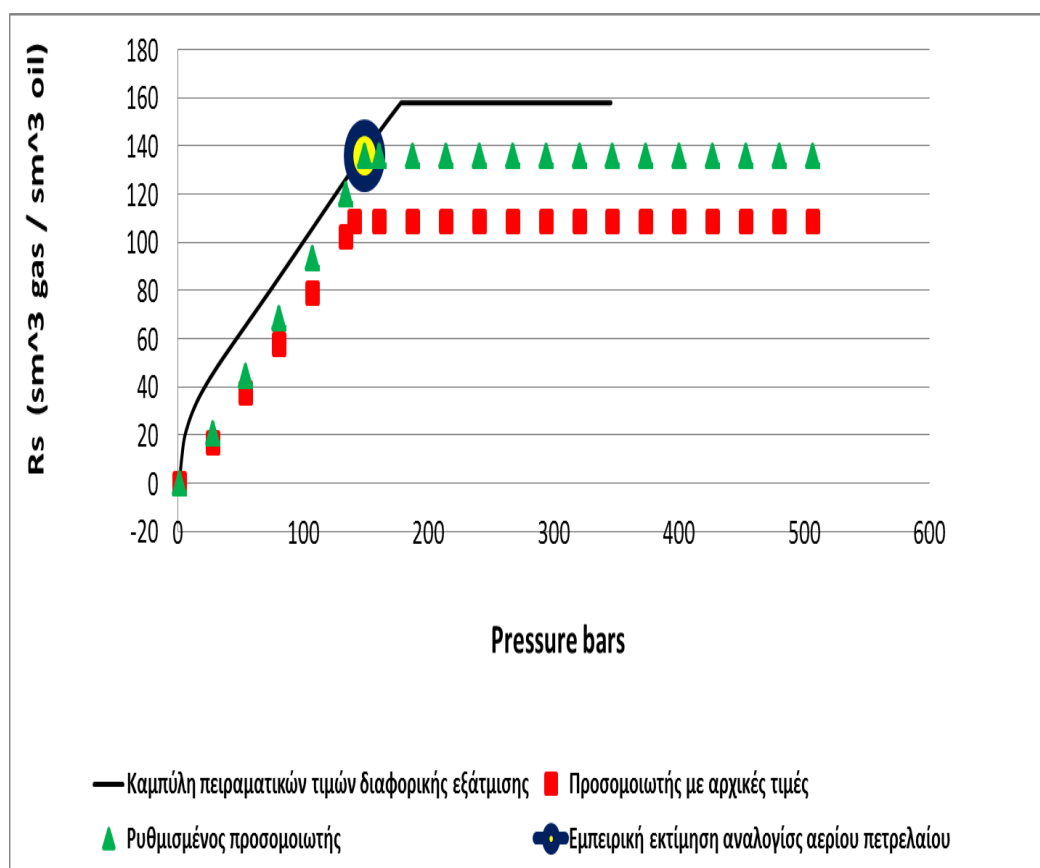


Διάγραμμα 104 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 256 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων

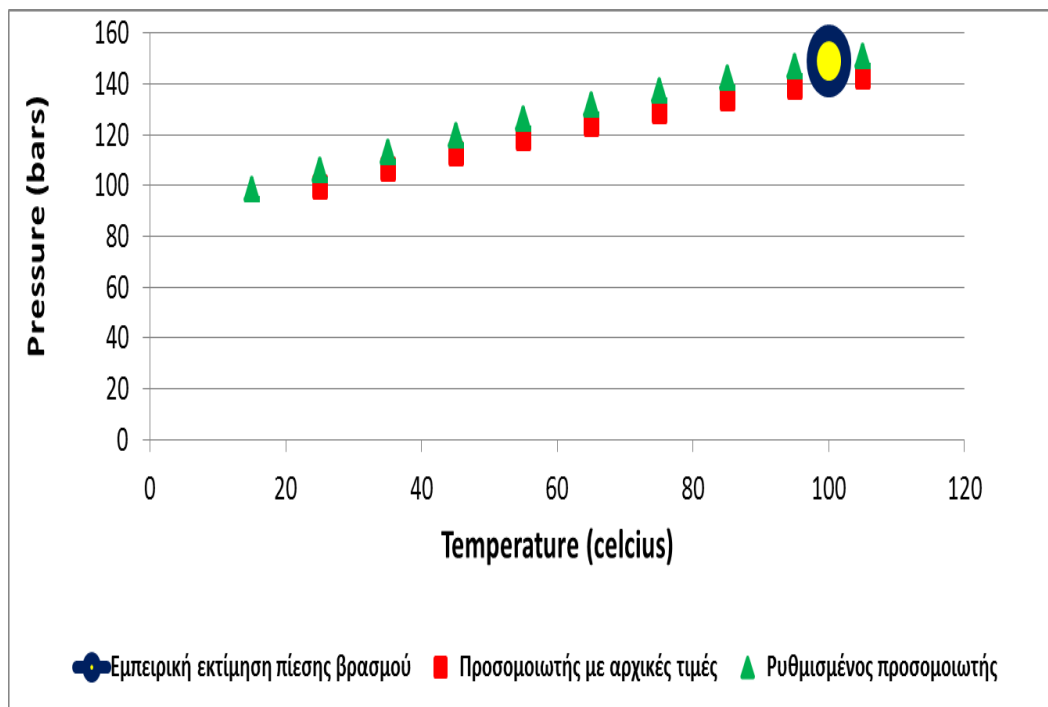
## Oil 260



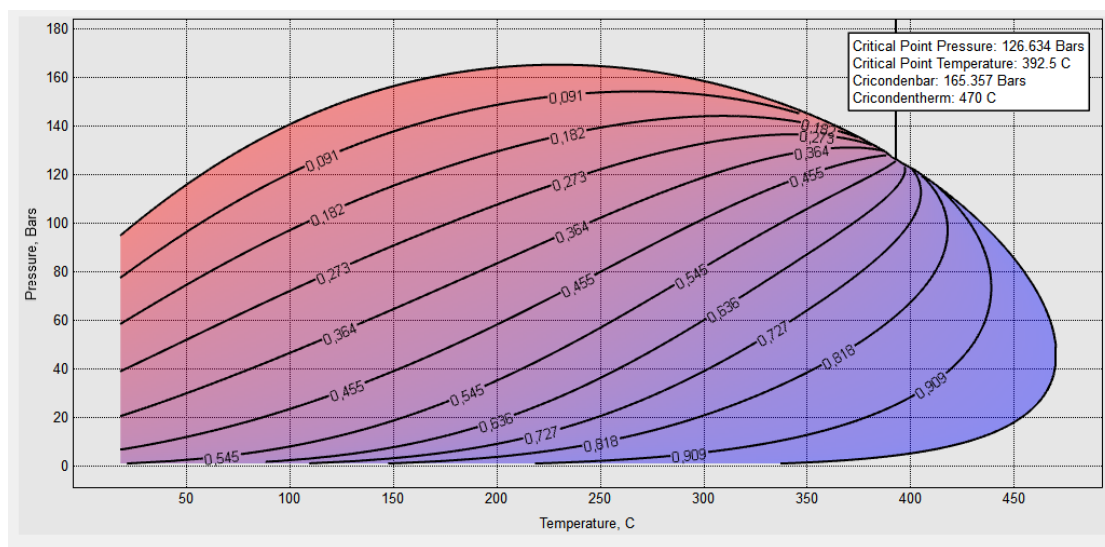
Διάγραμμα 105 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 260



Διάγραμμα 106 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 260

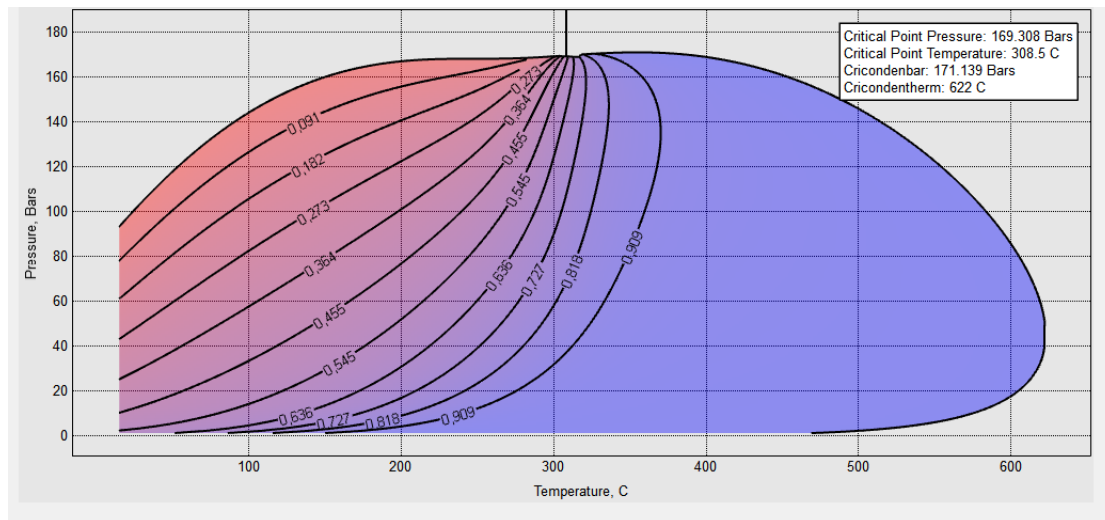


Διάγραμμα 107 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 260



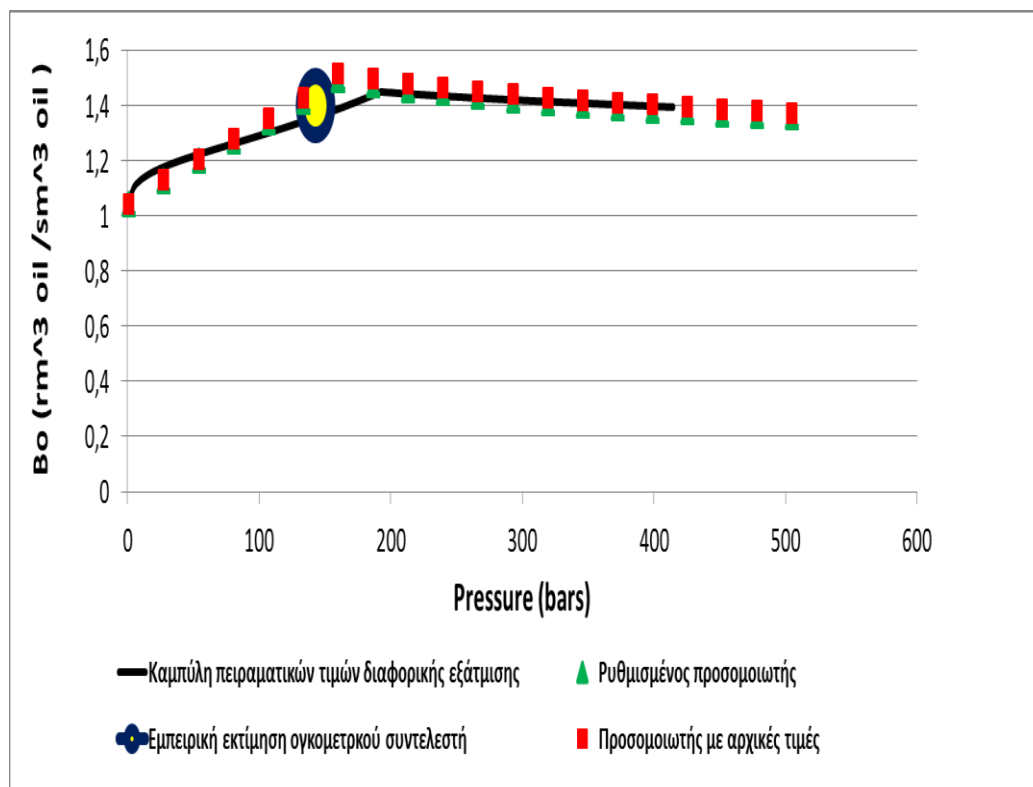
Διάγραμμα 108 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 260 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων



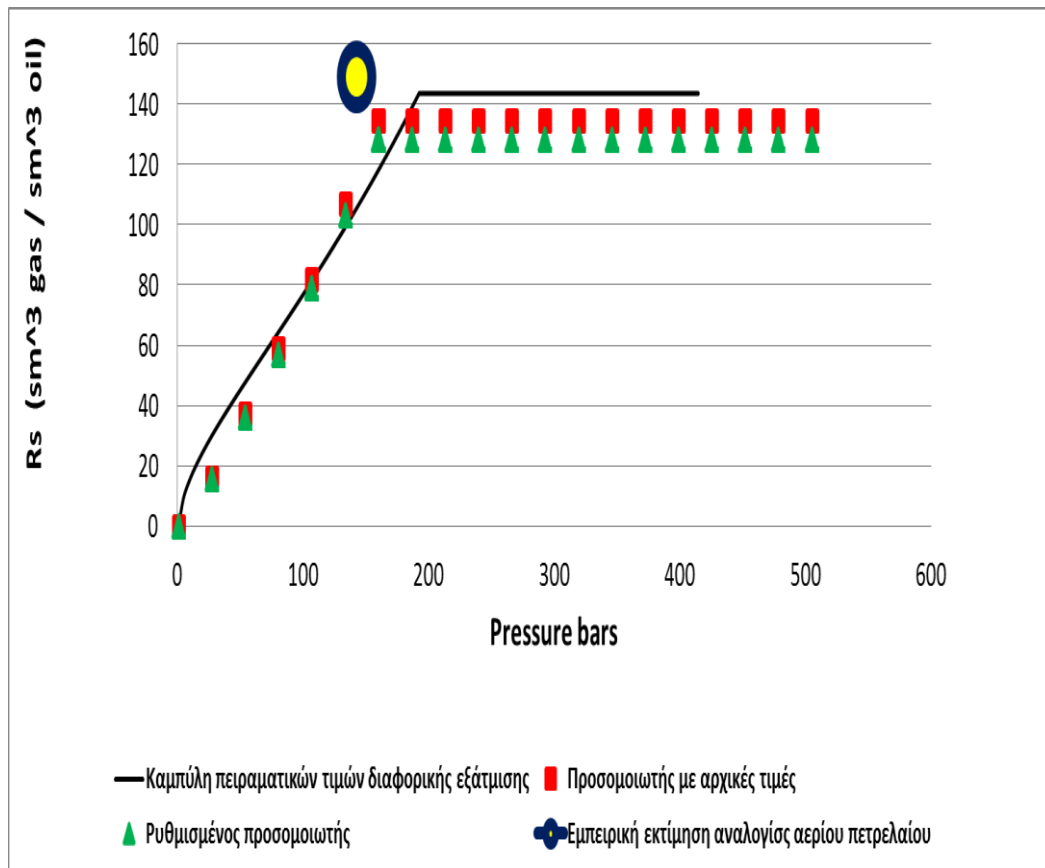


Διάγραμμα 109 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 260 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων

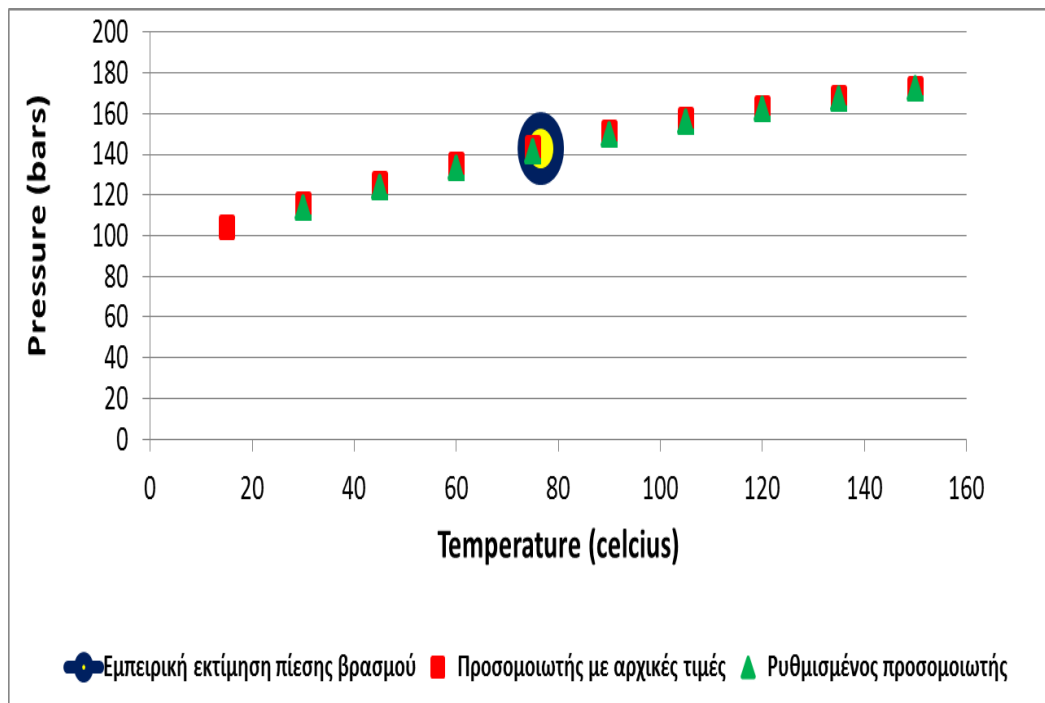
### Oil 261



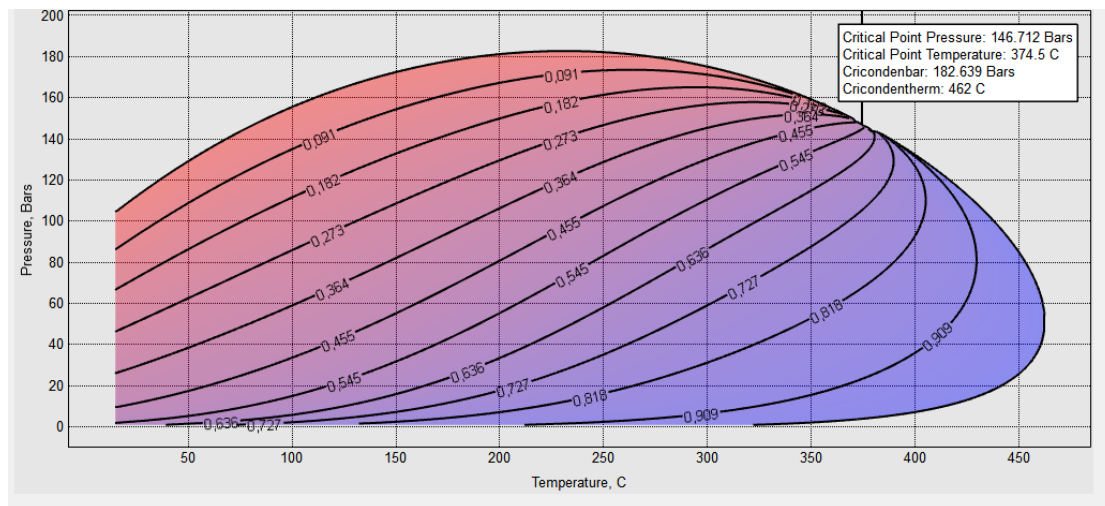
Διάγραμμα 110 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 261



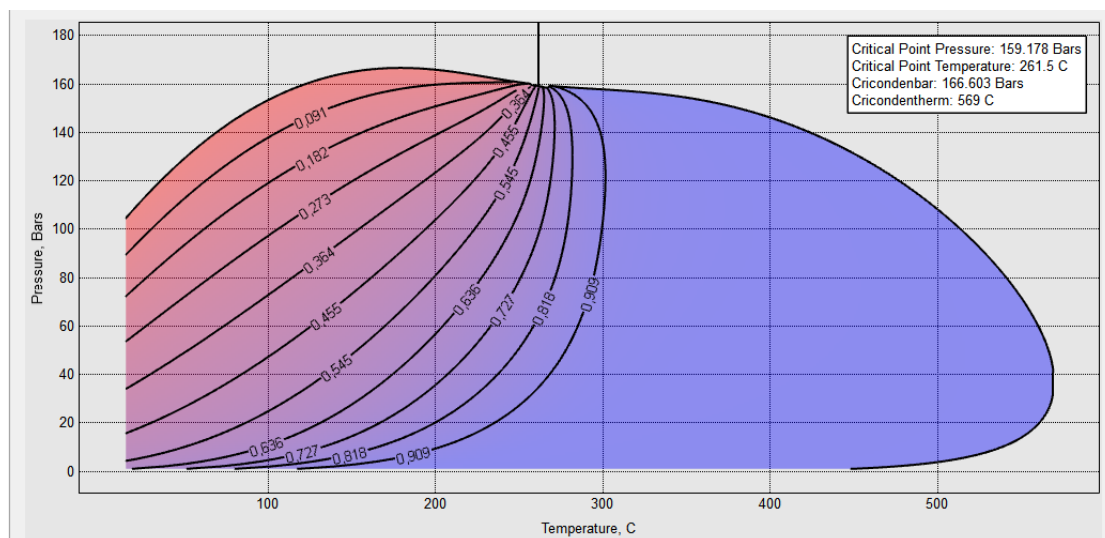
Διάγραμμα 111 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 261



Διάγραμμα 112 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 261

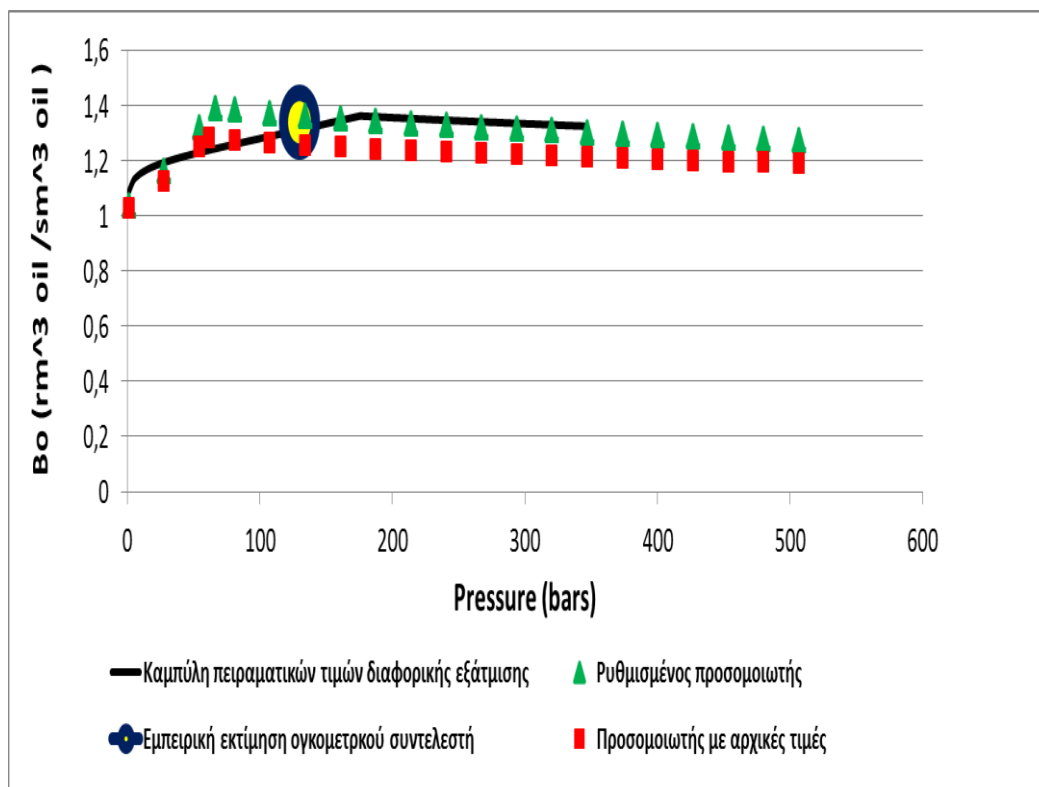


Διάγραμμα 113 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 261 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων

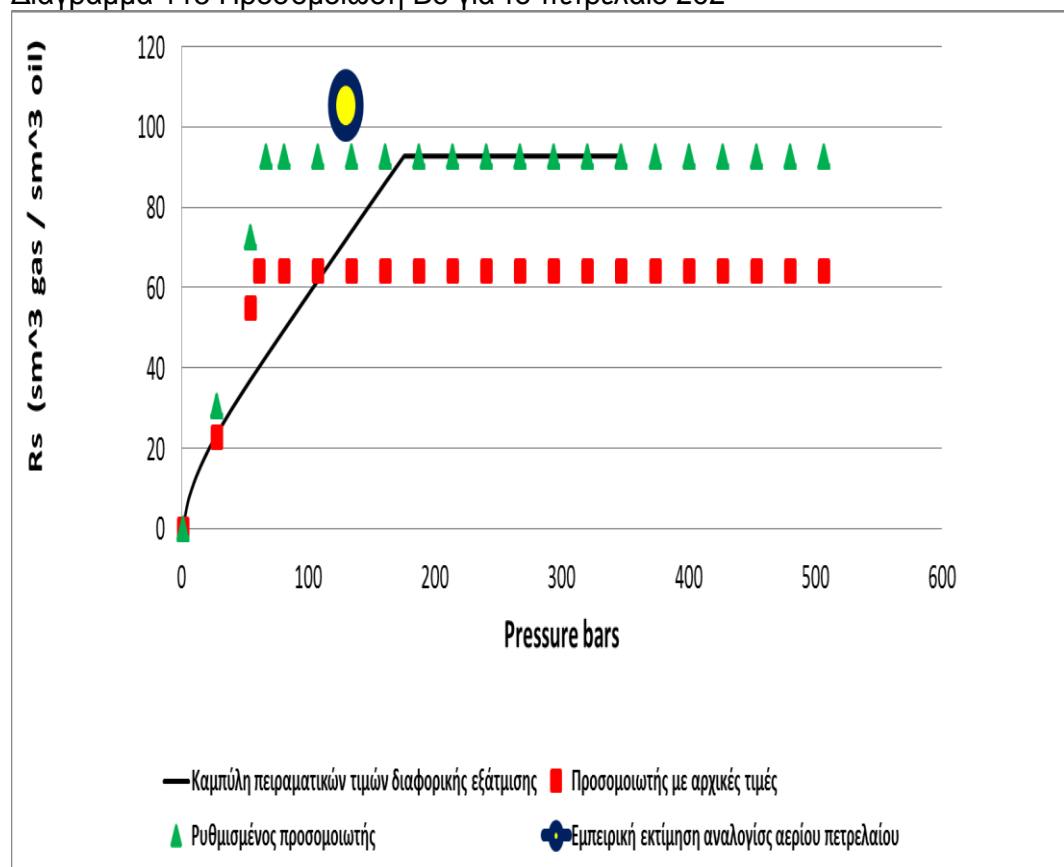


Διάγραμμα 114 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 261 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων

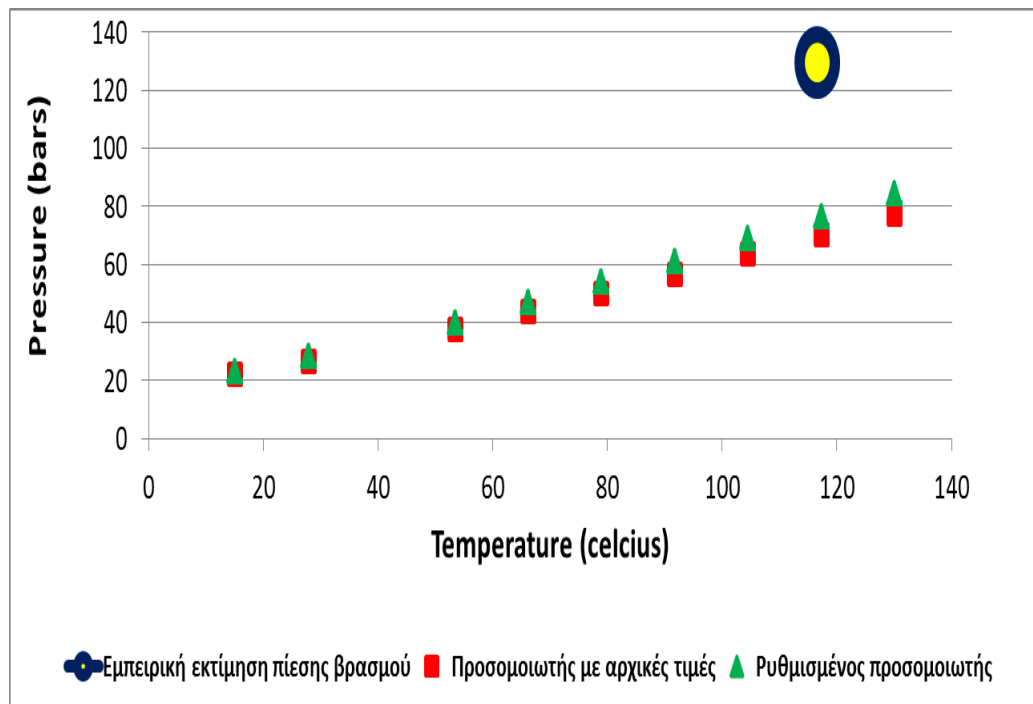
## Oil 262



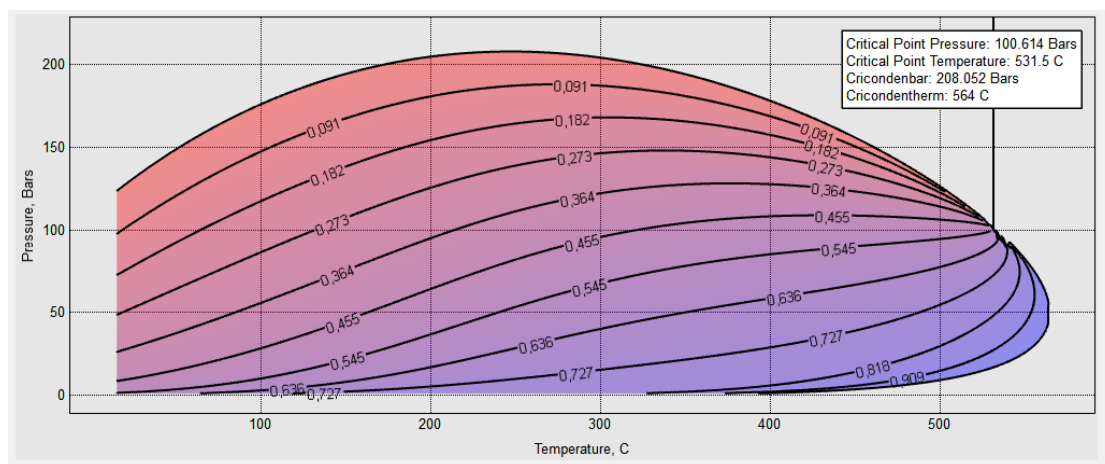
Διάγραμμα 115 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 262



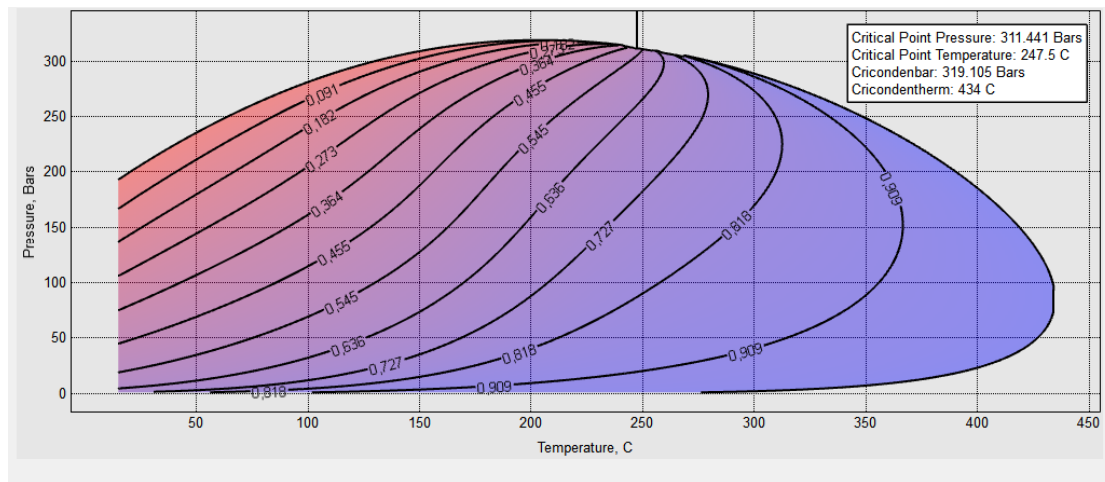
Διάγραμμα 116 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 262



Διάγραμμα 117 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 262

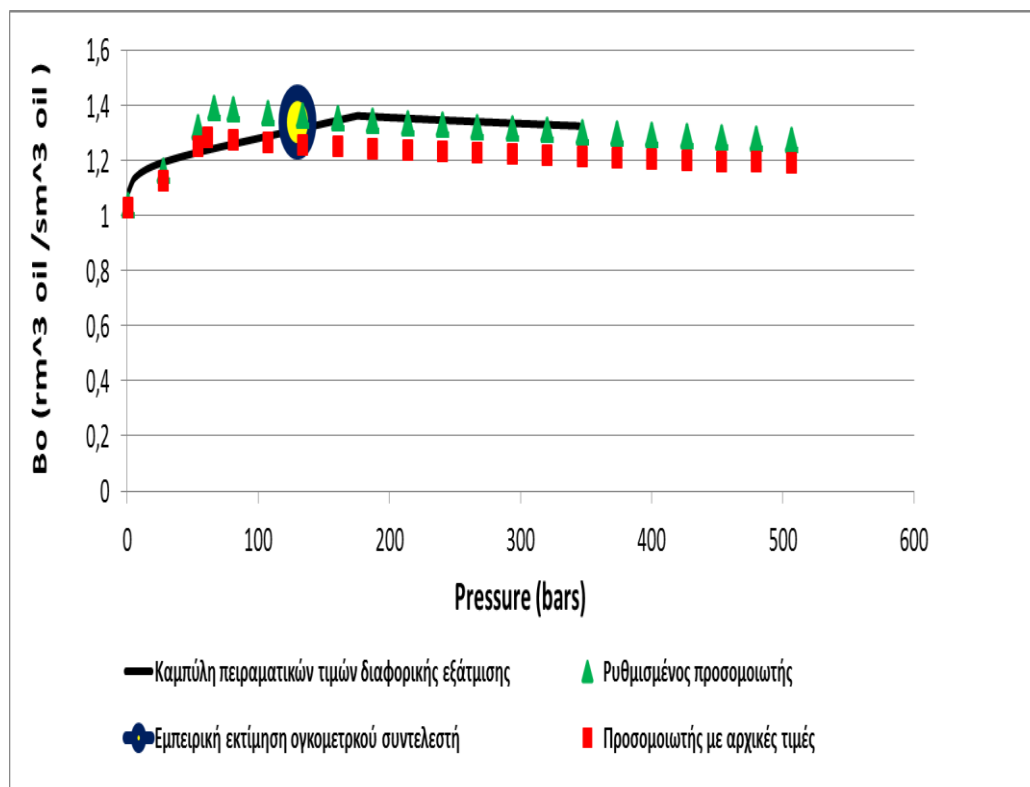


Διάγραμμα 118 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 262 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων

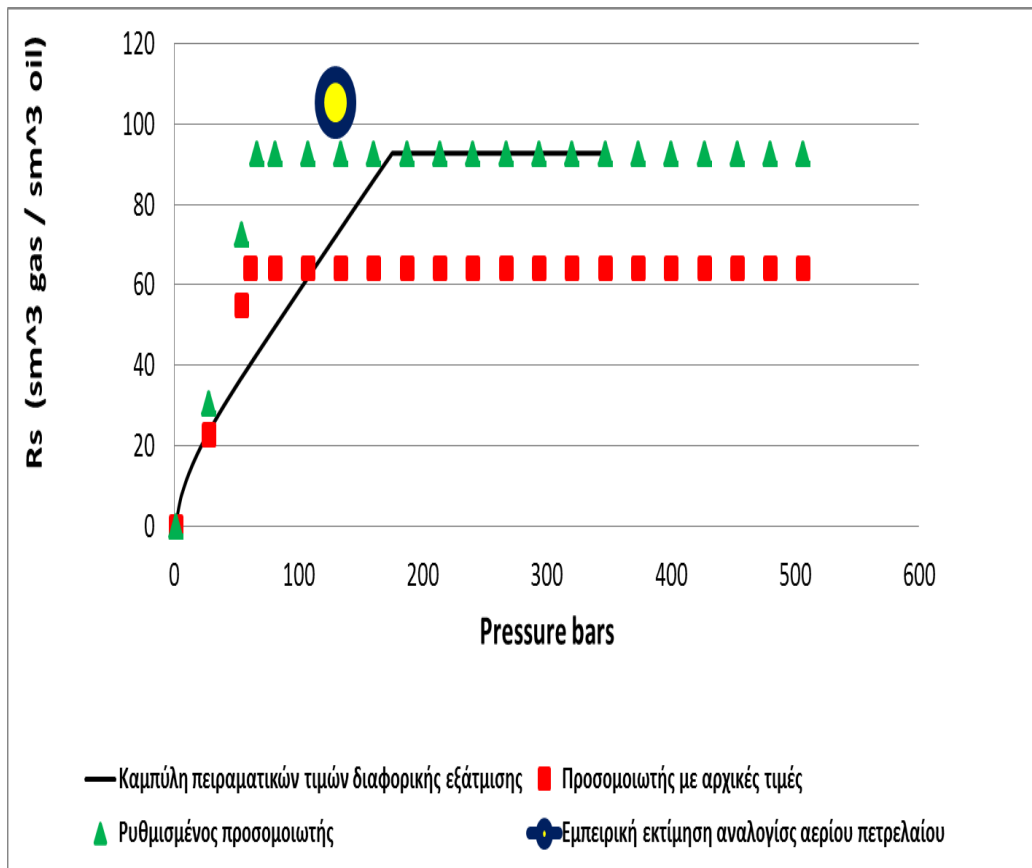


Διάγραμμα 119 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 262 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων

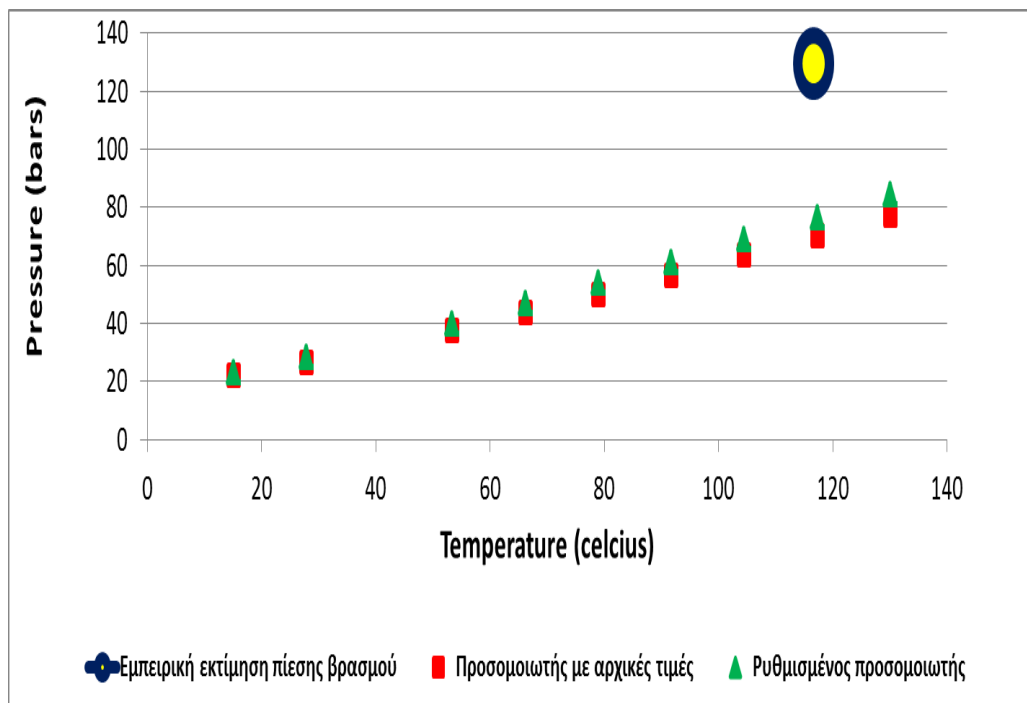
### Oil 263



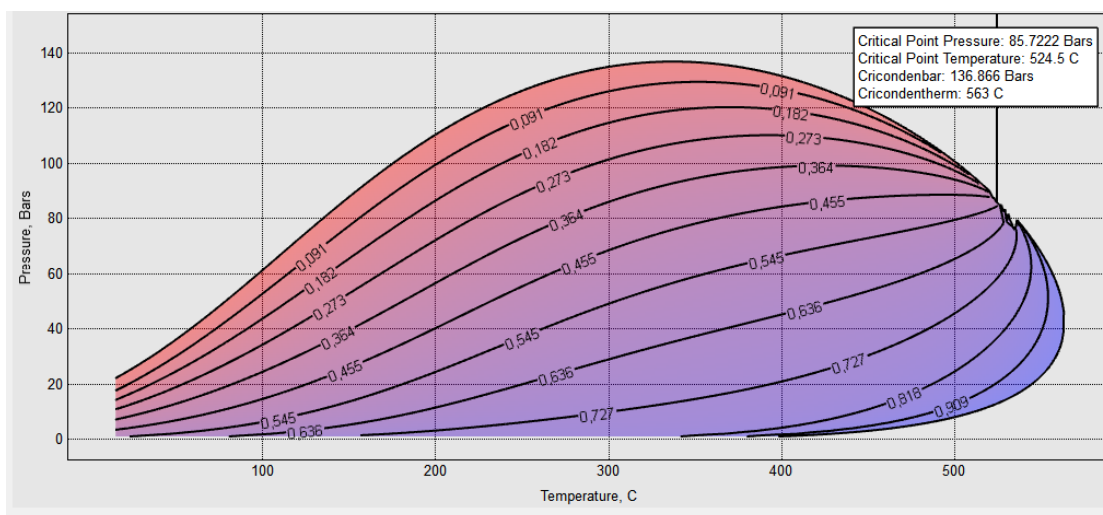
Διάγραμμα 120 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 263



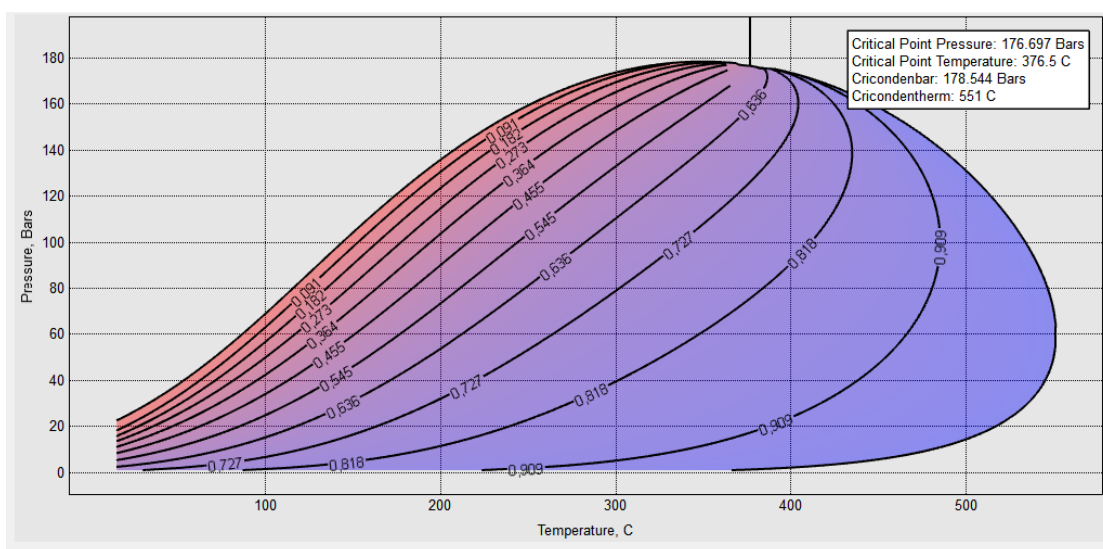
Διάγραμμα 121 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 263



Διάγραμμα 122 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 263



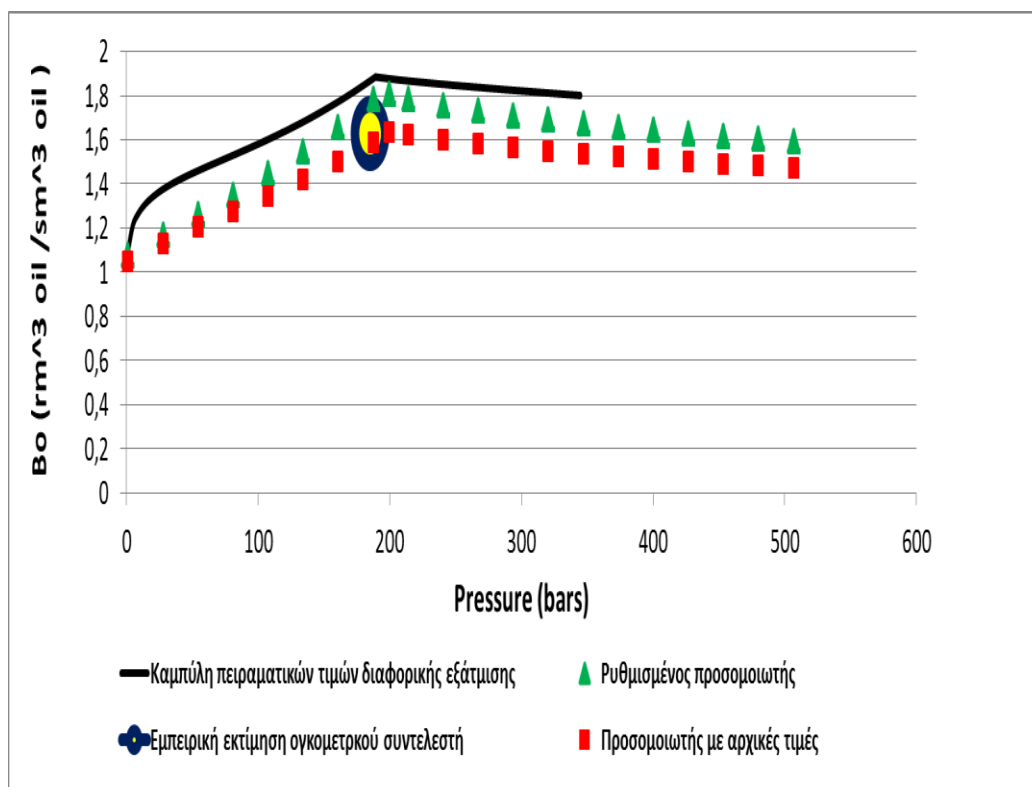
Διάγραμμα 123 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 263 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων



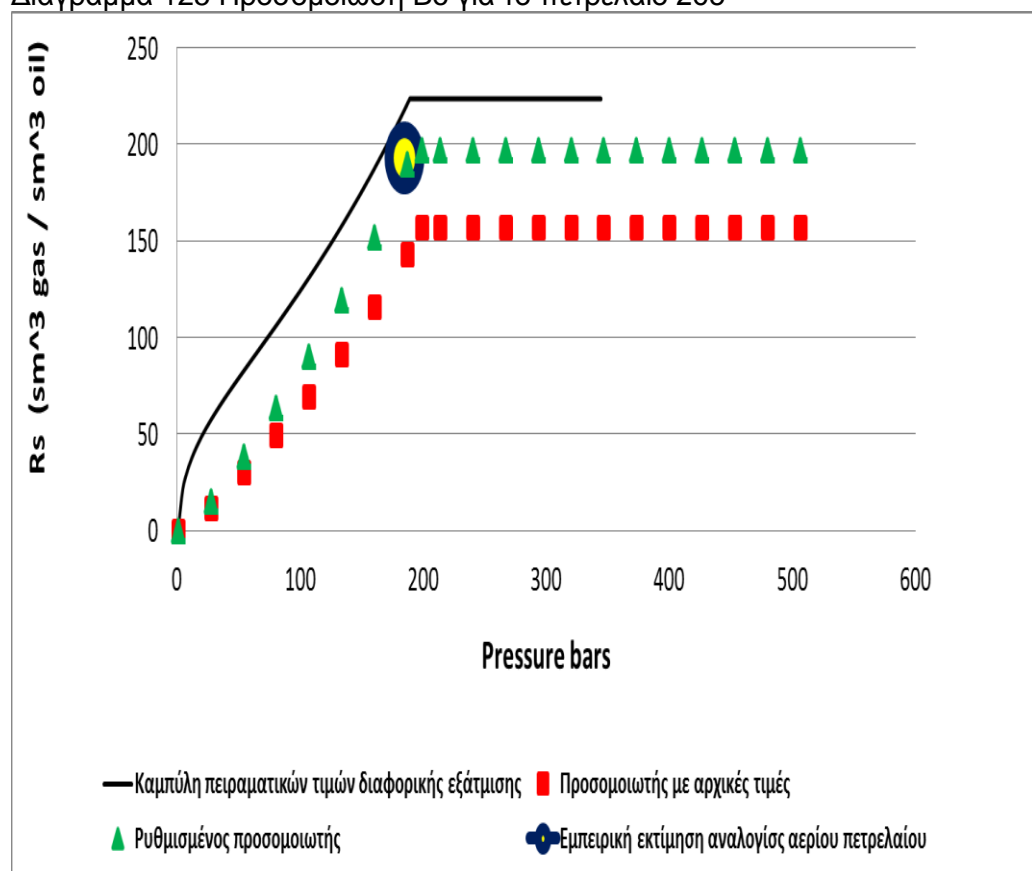
Διάγραμμα 124 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 263 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων



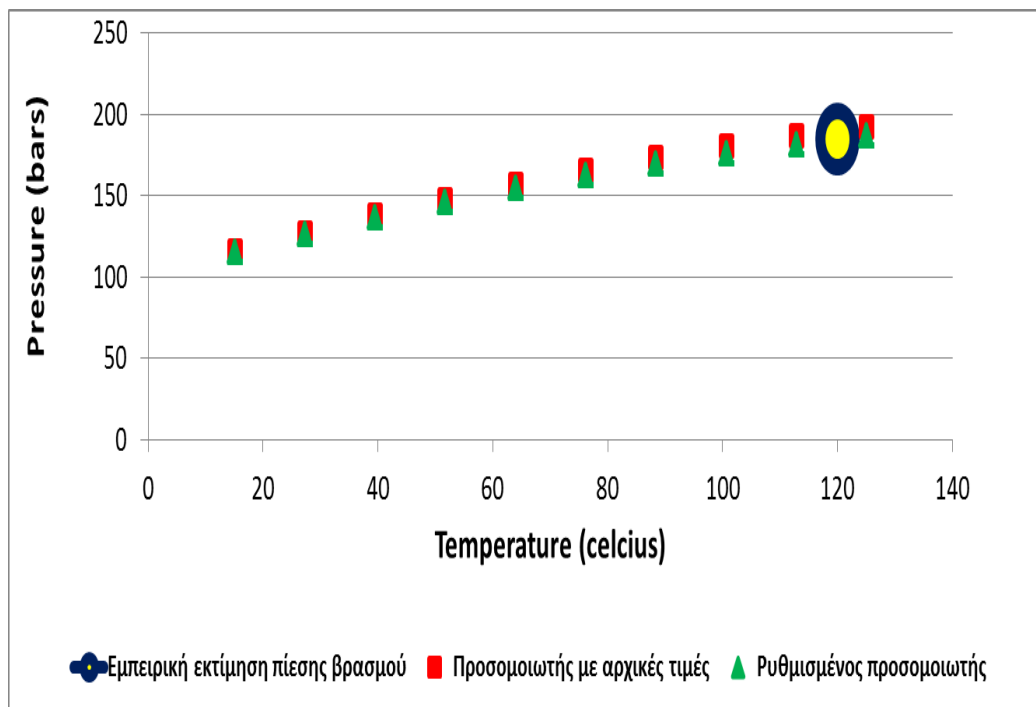
## Oil 265



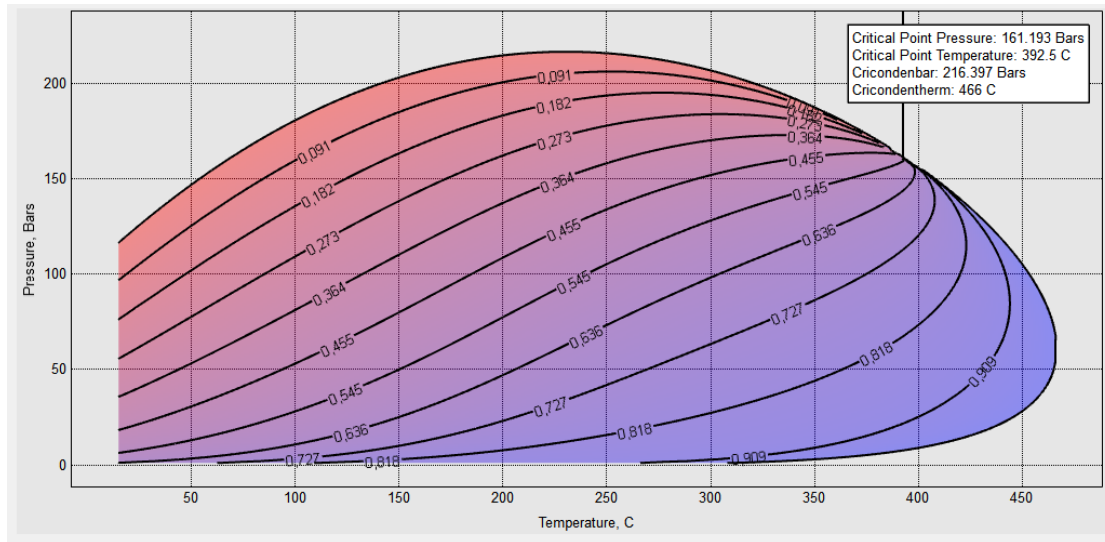
Διάγραμμα 125 Προσομοίωση Bo για το πετρέλαιο 265



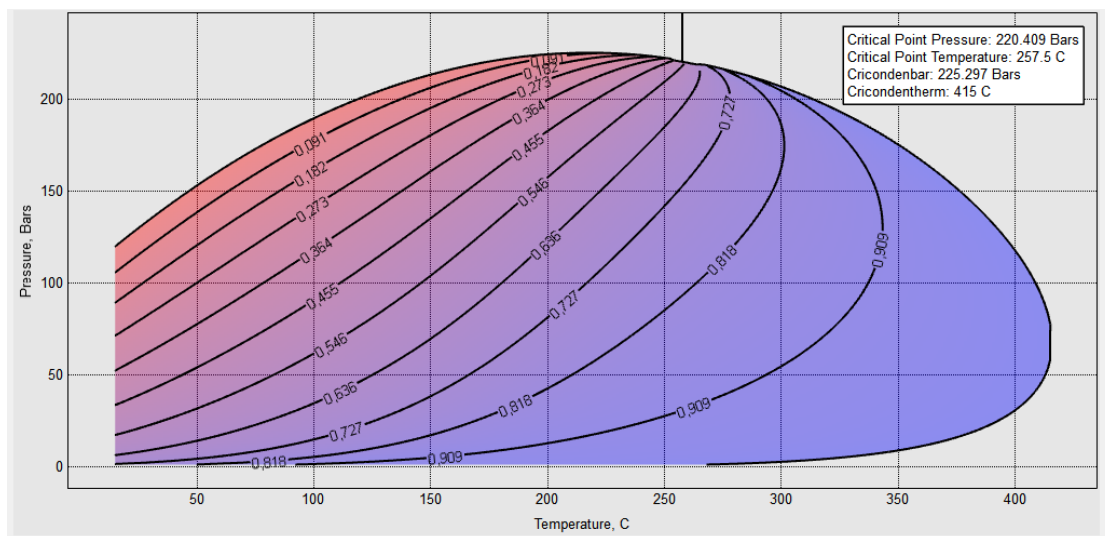
Διάγραμμα 126 Προσομοίωση Rs για το πετρέλαιο 265



Διάγραμμα 127 Προσομοίωση Pb για το πετρέλαιο 265



Διάγραμμα 128 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 265 πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων



Διάγραμμα 129 Φάκελος φάσεων του πετρελαίου 265 μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων