



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**  
**ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**Ποιοτικός έλεγχος και ανάλυση ογκομετρικών δεδομένων  
μελετών PVT πετρελαϊκών ρευστών**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Παναγιώτης Παπανικολάου**

**Επιβλέπων: Βασίλειος Γαγάνης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2024**

---

---

---



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ**  
**ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**Ποιοτικός έλεγχος και ανάλυση ογκομετρικών δεδομένων  
μελετών PVT πετρελαϊκών ρευστών**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Παναγιώτης Παπανικολάου**

**Επιβλέπων: Βασίλειος Γαγάνης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.**

**Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις: \_\_/\_\_/2024**

**Β. Γαγάνης, Αναπληρωτής Καθηγητής: ..... (Υπογραφή)**

**Ι. Βακαλάς, Επίκουρος Καθηγητής: ..... (Υπογραφή)**

**Ε. Βουτσάς, Καθηγητής: ..... (Υπογραφή)**

**ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2024**

---



---

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε κατά τη διάρκεια του εαρινού εξαμήνου του Ακαδημαϊκού Έτους 2023-2024, στα πλαίσια του Προγράμματος Προπτυχιακών Σπουδών της Σχολής Μεταλλειολόγων – Μεταλλουργών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Η εργασία πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του κ. Βασίλειου Γαγάνη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μεταλλειολόγων – Μεταλλουργών Μηχανικών Ε.Μ.Π., με συνεξεταστές τον κ. Ιωάννη Βακαλά, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Μεταλλειολόγων – Μεταλλουργών Μηχανικών Ε.Μ.Π. και τον κ. Επαμεινώνδα Βουτσά, Καθηγητή του Τμήματος Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη μιας συστηματικής μεθοδολογίας η οποία θα χρησιμοποιηθεί με σκοπό την εφαρμογή ποιοτικού ελέγχου στα αποτελέσματα δοκιμών PVT που αναφέρονται σε μια τυπική εργαστηριακή αναφορά, και ειδικότερα στη δοκιμή διαφορικής εκτόνωσης (Differential Liberation - DL).

Στο σημείο αυτό, έχοντας ολοκληρώσει τη διπλωματική μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνησή της. Πρωτίστως, θα επιθυμούσα να εκφράσω προσωπικά τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Βασίλειο Γαγάνη ο οποίος αποτέλεσε πηγή έμπνευσης και γνώσεων, τόσο σε προπτυχιακό επίπεδο όσο και κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Θα ήθελα επομένως να τον ευχαριστήσω για την ανάθεση της εργασίας, αλλά και για την αμέριστη καθοδήγηση και ενθάρρυνση που έδειξε καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησής της. Επίσης, θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω τον Στέφανο Λεμπέση, υποψήφιο διδάκτορα του Εργαστηρίου Εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων και Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Τμήματος Μεταλλειολόγων – Μεταλλουργών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την άριστη καθοδήγηση, καθώς και για τις χρήσιμες υποδείξεις και συμβουλές του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να εκφράσω τις βαθύτατες ευχαριστίες μου στο οικογενειακό και φιλικό μου περιβάλλον, οι οποίοι με στήριξαν καθημερινά όλα αυτά τα χρόνια και πίστεψαν σε εμένα.

---

---

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει ως αντικείμενό της την ανάπτυξη μιας συστηματικής μεθοδολογίας η οποία θα χρησιμοποιηθεί με σκοπό την εφαρμογή ποιοτικού ελέγχου στις πληροφορίες και στα αποτελέσματα δοκιμών PVT που αναφέρονται σε μια τυπική εργαστηριακή αναφορά, και ειδικότερα στη δοκιμή διαφορικής εκτόνωσης (DL).

Παρόλο που η πειραματική διαδικασία των δοκιμών PVT είναι αυστηρά καθορισμένη, η ακρίβεια των μετρήσεων συχνά υποφέρει από σημαντικά σφάλματα, τα οποία με τη σειρά τους επηρεάζουν σοβαρά όλους τους επόμενους υπολογισμούς των Μηχανικών. Ο ποιοτικός έλεγχος, επομένως, στοχεύει στο να προσδιορίσει τα σφάλματα αυτά και να εντοπίσει τις αιτίες στις οποίες οφείλονται. Στην εργασία, θα δοθούν επίσης οδηγίες στους Μηχανικούς ταμιευτήρων σχετικά με την αντιμετώπιση παρόμοιων καταστάσεων και για την διασφάλιση απόκτησης αξιόπιστων δεδομένων PVT.

Ο ποιοτικός έλεγχος χωρίζεται σε 5 διαδοχικά βήματα. Αρχικά, αξιολογήθηκαν οι τιμές των ογκομετρικών ιδιοτήτων στην πίεση κορεσμού και απορρίφθηκαν τα δείγματα των οποίων οι τιμές θεωρήθηκαν αφύσικες. Στη συνέχεια, σχεδιάστηκαν οι καμπύλες των ογκομετρικών ιδιοτήτων συναρτήσει της πίεσης για ολόκληρο το πλήθος των ρευστών της βάσης δεδομένων, με σκοπό να ασκηθεί κριτική στο σχήμα και στις τιμές που παρουσίαζαν. Έπειτα, αναπτύχθηκαν εξισώσεις οι οποίες εκφράζουν τη διατήρηση της μάζας του συστήματος και εφαρμόστηκαν για την εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά τη δοκιμή διαφορικής εκτόνωσης (DL). Χρησιμοποιήθηκαν με σκοπό την εύρεση της πυκνότητας του υπολειπόμενου υγρού στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, αλλά και για να ελεγχθεί η τήρηση του ισοζυγίου μάζας μεταξύ της υγρής και της αέριας φάσης, σε κάθε βήμα πίεσης της δοκιμής. Τέλος, εξισώσεις διατήρησης της μάζας τροποποιήθηκαν καταλλήλως με σκοπό να υπολογιστούν οι συστάσεις του υγρού πετρελαίου που παραμένει στο PVT κελί σε κάθε βήμα πίεσης της δοκιμής διαφορικής εκτόνωσης και να ασκηθεί έλεγχος στις τιμές της σύστασης, αλλά και στο σχήμα των διαγραμμάτων των συντελεστών  $k$  και των διαγραμμάτων Hoffman που προκύπτουν.

---

---

## ABSTRACT

This Thesis project aims to develop a systematic methodology that will be used to apply quality control to PVT test results reported in a standard laboratory report, and in particular to the differential liberation (DL) test.

Although the experimental procedure of PVT tests is strictly defined, the accuracy of measurements often suffers from significant errors, which in turn seriously affect all subsequent calculations by Engineers. Quality control, therefore, aims to determine these errors and identify their causes. This thesis project will also include instructions to Reservoir Engineers on how to deal with similar situations and to ensure reliable PVT data is obtained.

Quality control is divided into 5 consecutive steps. Firstly, the values of the volumetric properties at saturation pressure were evaluated and the samples whose values were considered abnormal were discarded. In addition, the diagrams of volumetric properties versus pressure were plotted for the entire set of fluids in the database, in order to check the shape and values they presented. Equations expressing the mass conservation of the system were then developed and applied to draw conclusions regarding the differential expansion (DL) test. They were used in order to calculate the density of the residual liquid in atmospheric conditions, but also to check the conservation of mass balance between the liquid and gas phases, at each pressure step of the test. Finally, mass conservation equations were suitably modified to calculate the compositions of the liquid oil remaining in the PVT cell at each pressure step of the differential liberation test and to check its values, but also the calculated compositions were used to check the shape of the plots of k-values and of resulting Hoffman diagrams.

---

---

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ενεργειακή Κρίση.....	1
1.2 Πετρέλαιο και φυσικό αέριο ως πηγή ενέργειας .....	2
1.3 Σημασία των Ογκομετρικών Ιδιοτήτων.....	4
1.4 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας.....	5
1.5 Δομή Διπλωματικής Εργασίας.....	6
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ .....</b>	<b>8</b>
2.1 Προέλευση και σύσταση πετρελαϊκών ρευστών .....	8
2.2 Κατηγορίες Πετρελαϊκών Ρευστών .....	11
2.2.1 Ξηρό φυσικό αέριο (dry gas) .....	13
2.2.2 Υγρό φυσικό αέριο (Wet Gas) .....	13
2.2.3 Αέριο συμπύκνωμα (gas condensate) .....	14
2.2.4 Πτητικό πετρέλαιο (Volatile Oil).....	15
2.2.5 Μαύρο πετρέλαιο (black oil).....	16
2.3 Ογκομετρικές (PVT) Ιδιότητες των Ρευστών του Ταμιευτήρα και Πρότυπα Διαγράμματα.....	17
2.3.1 Πίεση Κορεσμού .....	18
2.3.2 Πυκνότητα ρευστού .....	18
2.3.3 Σχετικός όγκος (Relative Volume - $V_{rel}$ ).....	20
2.3.4 Συντελεστής Ισοθερμικής Συμπιεστότητας πετρελαίου (Isothermal Oil Compressibility $c_o$ ).....	21
2.3.5 Συντελεστής $R_s$ (λόγος διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο).....	22
2.3.6 Συντελεστής $B_o$ (συντελεστής μεταβολής όγκου του πετρελαίου-oil formation volume factor).....	23

---



---

2.3.7 Συντελεστής $B_g$ (συντελεστής μεταβολής όγκου του αερίου – gas formation volume factor).....	25
2.3.8 Συντελεστής απόκλισης $Z$ (Z-factor).....	25
2.3.9 Σχετική Πυκνότητα αερίου $\gamma_g$ (gas relative density).....	26
2.3.10 Πυκνότητα API (API Gravity).....	27
2.3.11 Ιξώδες ( $\mu$ ).....	28
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ PVT .....</b>	<b>29</b>
3.1 Προετοιμασία Ταμιευτήρα.....	30
3.2 Δειγματοληψία.....	30
3.2.1 Δειγματοληψία Πυθμένα (Bottom-hole Sampling) .....	31
3.2.2 Δειγματοληψία Διαχωριστή (separator sampling).....	32
3.3 Ανάλυση Σύστασης.....	33
3.3.1 Διαδικασία ανάλυσης σύστασης .....	33
3.3.2 Αέρια χρωματογραφία.....	34
3.3.3 Απόσταξη σημείου βρασμού.....	36
3.3.4 Ανασυνδυασμός συστάσεων .....	37
3.4 Εκτέλεση και Τύποι Ογκομετρικών Πειραμάτων.....	38
3.4.1 Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση υπό σταθερή σύσταση (Constant Composition Expansion, CCE).....	40
3.4.2 Διαφορική Εκτόνωση (Differential Liberation, DL).....	43
3.4.3 Εκτόνωση υπό σταθερό όγκο (Constant Volume Depletion, CVD).....	45
3.4.4 Δοκιμή Διαχωρισμού (Separator Test).....	46
3.4.5 Δοκιμή Ιξώδους (Viscosity Experiment) .....	47
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΛΕΤΗ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ PVT ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ.....</b>	<b>49</b>
4.1 Γενικές Πληροφορίες.....	49

---

---

4.2 Γενικές Πληροφορίες Ρευστών (Συνθήκες Ταμειυτήρα) .....	50
4.3 Μοριακή Σύσταση (Συνθήκες Ταμειυτήρα) .....	52
4.4 Γενικές Πληροφορίες Ρευστών (Συνθήκες Επιφάνειας) .....	53
4.5 Μοριακή Σύσταση (Συνθήκες Επιφάνειας) .....	54
4.6 Γενικές Πληροφορίες Ρευστού (DL) .....	56
4.7 Μοριακή Σύσταση (Δοκιμή Διαφορικής Εκτόνωσης).....	57
4.8 Μοντέλο Φυσικών Ιδιοτήτων .....	58
4.9 Πίνακας Εύρεσης Πειραματικής Δοκιμής (Study Type Lookup Table) .....	61
4.10 Πίνακας Εύρεσης Φυσικής Ιδιότητας (Physical Property Lookup Table) .....	61
4.11 Δεδομένα Σημείου Κορεσμού (Psat Data).....	62
4.12 Πίνακας Αναζήτησης Katz (Katz Lookup Table).....	62
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....</b>	<b>65</b>
5.1 Δημιουργία ιστογραμμάτων των φυσικών ιδιοτήτων στο σημείο φυσαλίδας.....	66
5.2 Οργάνωση δεδομένων και παρουσίαση μεθοδολογίας σχεδίασης καμπυλών για ένα ρευστό .....	76
5.3 Σχεδίαση καμπυλών για όλα τα ρευστά και τις ιδιότητες.....	78
5.4 Εφαρμογή Εξισώσεων Διατήρησης της Μάζας σε δοκιμές DL .....	89
5.4.1 Εύρεση Πυκνότητας Υπολειπόμενου Υγρού .....	90
5.4.2 Διασφάλιση Διατήρησης της Μάζας.....	96
5.5 Προσδιορισμός Συστάσεων Υπολειπόμενου Υγρού .....	100
5.5.1 Ρευστό 1 (Αυξημένης Πτητικότητας) .....	104
5.5.2 Ρευστό 2 (Αυξημένης Πτητικότητας) .....	110
5.5.3 Ρευστό 3 (Μειωμένης Πτητικότητας).....	113
5.5.4 Ρευστό 4 (Μειωμένης Πτητικότητας).....	117
<b>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>122</b>

---

---

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>125</b>
---------------------------	------------

---

---

## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Αύξηση της κατανάλωσης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ως ποσοστό του ποσού αυτού του έτους 1985 .....	2
Εικόνα 1.2: Συνεισφορά της κάθε πηγής ενέργειας .....	3
Εικόνα 2.1: Δομικοί τύποι διαφόρων ομάδων υδρογονανθράκων με έξι άτομα άνθρακα (Danesh, 1998).....	10
Εικόνα 2.2: Δομικός τύπος της ναφθαλίνης (Danesh, 1998). .....	11
Εικόνα 2.3: Διάγραμμα Φάσεων Ξηρού Φυσικού Αερίου (Σταματάκη, 2004). .....	13
Εικόνα 2.4: Διάγραμμα Φάσεων Υγρού Φυσικού Αερίου (Σταματάκη, 2004). .....	14
Εικόνα 2.5: Διάγραμμα Φάσεων Αερίου Συμπυκνώματος (Σταματάκη, 2004).....	15
Εικόνα 2.6: Διάγραμμα Φάσεων Πτητικού Πετρελαίου (Danesh, 1998). .....	16
Εικόνα 2.7: Διάγραμμα Φάσεων Μαύρου Πετρελαίου (Danesh, 1998). .....	17
Εικόνα 2.8: Πρότυπο διάγραμμα τιμών πυκνότητας συναρτήσει της πίεσης .....	19
Εικόνα 2.9: Πρότυπο διάγραμμα τιμών σχετικού όγκου συναρτήσει της πίεσης .....	21
Εικόνα 2.10: Πρότυπο διάγραμμα τιμών συμπιεστότητας πετρελαίου συναρτήσει της πίεσης .....	22
Εικόνα 2.11: Πρότυπο διάγραμμα τιμών συντελεστή $R_s$ συναρτήσει της πίεσης .....	23
Εικόνα 2.12: Πρότυπο διάγραμμα τιμών συντελεστή $B_o$ συναρτήσει της πίεσης.....	24
Εικόνα 2.13: Πρότυπο διάγραμμα τιμών συντελεστή $B_g$ συναρτήσει της πίεσης.....	25
Εικόνα 2.14: Πρότυπο διάγραμμα τιμών συντελεστή απόκλισης $Z$ συναρτήσει της πίεσης .....	26
Εικόνα 2.15: Πρότυπο διάγραμμα τιμών σχετικής πυκνότητας αερίου συναρτήσει της πίεσης .....	27
Εικόνα 3.1: Δείγματα Διαχωριστή (Ahmed, 2016). .....	33
Εικόνα 3.2: Διάταξη Αερίου Χρωματογράφου .....	34
Εικόνα 3.3: Ανάλυση δείγματος πυθμένα .....	36
Εικόνα 3.4: Αποτέλεσμα ανάλυση σύστασης με TBP (Pedersen, 2007) .....	37

---

---

Εικόνα 3.5: PVT κελί .....	39
Εικόνα 3.6: Σχηματική απεικόνιση πειράματος ισοθερμοκρασιακής εκτόνωσης σταθερής σύστασης (CCE) για πτητικό ή μαύρο πετρέλαιο (επάνω) και για αέριο συμπύκνωμα (κάτω) (Whitson, 2000).....	41
Εικόνα 3.7: Αποτελέσματα δοκιμής CCE σε δείγμα μαύρου πετρελαίου .....	42
Εικόνα 3.8: Σχηματική απεικόνιση δοκιμής διαφορικής εκτόνωσης (DL).....	44
Εικόνα 3.9: Αποτελέσματα δοκιμής διαφορικής εκτόνωσης (Pedersen, 2007). .....	45
Εικόνα 3.10: Σχηματική απεικόνιση δοκιμής εκτόνωσης υπό σταθερό όγκο (Ahmed, 2016). .....	46
Εικόνα 3.11: Γραφική Απεικόνιση της Δοκιμής Διαχωρισμού (Pedersen, 2007).....	47
Εικόνα 3.12: Ιξωδόμετρο Κυλιόμενης Σφαίρας.....	48
Εικόνα 5.1: Ιστόγραμμα των τιμών του συντελεστή $R_s$ , σε $\text{Sm}^3/\text{m}^3$ (1).....	67
Εικόνα 5.2: Ιστόγραμμα των τιμών του συντελεστή $R_s$ , $\text{Sm}^3/\text{m}^3$ (2).....	67
Εικόνα 5.3: Ιστόγραμμα των τιμών της πυκνότητας, σε $\text{kg}/\text{m}^3$ (1).....	68
Εικόνα 5.4: Ιστόγραμμα των τιμών της πυκνότητας, σε $\text{kg}/\text{m}^3$ (2).....	68
Εικόνα 5.5: Ιστόγραμμα των τιμών του συντελεστή $B_o$ , σε $\text{m}^3/\text{Sm}^3$ (1).....	69
Εικόνα 5.6: : Ιστόγραμμα των τιμών του συντελεστή $B_o$ , σε $\text{m}^3/\text{Sm}^3$ (2).....	70
Εικόνα 5.7: Ιστόγραμμα των τιμών της πυκνότητας API (1).....	71
Εικόνα 5.8: Ιστόγραμμα των τιμών της πυκνότητας API (2).....	71
Εικόνα 5.9: Διαγράμματα της πυκνότητας συναρτήσει της πίεσης, για το τυχαίο ρευστό που μελετάται .....	77
Εικόνα 5.10: Διαγράμματα του σχετικού όγκου συναρτήσει της πίεσης, για το τυχαίο ρευστό που μελετάται .....	77
Εικόνα 5.11: Διαγράμματα του συντελεστή $B_g$ συναρτήσει της πίεσης, για το τυχαίο ρευστό που μελετάται .....	78
Εικόνα 5.12: Καμπύλη πυκνότητας προβληματικού δείγματος πριν τη διόρθωση των συντελεστών, σε $\text{kg}/\text{m}^3$ .....	79

---

---

Εικόνα 5.13: Καμπύλη πυκνότητας προβληματικού δείγματος πριν τη διόρθωση των συντελεστών, σε $\text{kg/m}^3$ .....	80
Εικόνα 5.14: Καμπύλη πυκνότητας προβληματικού δείγματος μετά τη διόρθωση των συντελεστών, σε $\text{kg/m}^3$ .....	81
Εικόνα 5.15: Καμπύλη πυκνότητας προβληματικού δείγματος μετά τη διόρθωση των συντελεστών, σε $\text{kg/m}^3$ .....	81
Εικόνα 5.16: Καμπύλη του συντελεστή συμπιεστότητας ( $c_o$ ) προβληματικού δείγματος, σε $\text{MPsi}^{-1}$ .....	82
Εικόνα 5.17: Καμπύλη του συντελεστή συμπιεστότητας ( $c_o$ ) προβληματικού δείγματος, σε $\text{MPsi}^{-1}$ .....	83
Εικόνα 5.18: Καμπύλη της ειδικής πυκνότητας ( $\gamma_g$ ) του ρευστού 2, σε $\text{kg/m}^3$ .....	84
Εικόνα 5.19: Καμπύλη του συντελεστή $B_o$ του ρευστού 3, σε $\text{m}^3/\text{Sm}^3$ .....	84
Εικόνα 5.20: Καμπύλη του συντελεστή $R_s$ του ρευστού 4, σε $\text{Sm}^3/\text{Sm}^3$ .....	85
Εικόνα 5.21: Καμπύλη του συντελεστή συμπιεστότητας ( $c_o$ ) του ρευστού 5, σε $\text{MPsi}^{-1}$ ...	85
Εικόνα 5.22: Καμπύλη του συντελεστή συμπιεστότητας ( $c_o$ ) του ρευστού 6, σε $\text{MPsi}^{-1}$ ...	86
Εικόνα 5.23: Καμπύλη του συντελεστή $B_g$ του ρευστού 7, σε $\text{m}^3/\text{Sm}^3$ .....	86
Εικόνα 5.24: Καμπύλη της ειδικής πυκνότητας αερίου $\gamma_g$ του ρευστού 8, σε $\text{kg/m}^3$ .....	87
Εικόνα 5.25: Καμπύλη του συντελεστή συμπιεστότητας ( $c_o$ ) του ρευστού 9, σε $\text{MPsi}^{-1}$ ...	87
Εικόνα 5.26: Καμπύλη του συντελεστή απόκλισης $Z$ του ρευστού 11.....	88
Εικόνα 5.27: Καμπύλη της πυκνότητας του ρευστού 12, σε $\text{kg/m}^3$ .....	88
Εικόνα 5.28: Καμπύλη της πυκνότητας του ρευστού 14, σε $\text{kg/m}^3$ .....	89
Εικόνα 5.29: Σχηματική απεικόνιση της σύγκρισης των τιμών της πυκνότητας του υπολειπόμενου υγρού, $\text{kg/m}^3$ .....	<b>Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.</b>
Εικόνα 5.30: Πρότυπη συμπεριφορά των διαγραμμάτων των συντελεστών $k$ συναρτήσει της πίεσης (Whitson, 2000).....	103
Εικόνα 5.31: Συστάσεις του υπολειπόμενου υγρού του κάθε βήματος της δοκιμής DL (ρευστό 1), σε συγκέντρωση % της σύστασης του συνολικού δείγματος.....	105

---

---

Εικόνα 5.32: Διάγραμμα τιμών συντελεστών $k$ συναρτήσει της πίεσης για κάθε βήμα της δοκιμής DL (ρευστό 1) β) Πρότυπο διάγραμμα συντελεστών $k$ συναρτήσει της πίεσης στους 200°F (D. L. Katz, 1937).....	107
Εικόνα 5.33: Σύγκριση του διαγράμματος των τιμών του συντελεστή $k$ του μεθανίου συναρτήσει της πίεσης (ρευστό 1), με το πρότυπο αντίστοιχο διάγραμμα του μεθανίου για διάφορες τιμές θερμοκρασίας (NGAA, 1957).....	108
Εικόνα 5.34: Σύγκριση του διαγράμματος των τιμών του συντελεστή $k$ του εξανίου συναρτήσει της πίεσης (ρευστό 1), με το πρότυπο αντίστοιχο διάγραμμα του εξανίου για διάφορες τιμές θερμοκρασίας (NGAA, 1957).....	108
Εικόνα 5.35: Διάγραμμα Hoffman για κάθε βήμα της πίεσης της δοκιμής DL (ρευστό 1) .....	109
Εικόνα 5.36: Σύγκριση των συστάσεων για το ρευστό 1 .....	110
Εικόνα 5.37: Συστάσεις του υπολειπόμενου υγρού του κάθε βήματος της δοκιμής DL (ρευστό 2), σε συγκέντρωση % της σύστασης του συνολικού δείγματος.....	111
Εικόνα 5.38: α) Διάγραμμα τιμών συντελεστών $k$ συναρτήσει της πίεσης για κάθε βήμα της δοκιμής DL (ρευστό 2) β) Πρότυπο διάγραμμα συντελεστών $k$ συναρτήσει της πίεσης στους 250°F σε λογαριθμικό διάγραμμα των Katz και Hachmuth, από πειραματικά δεδομένα ενός πτητικού ρευστού .....	112
Εικόνα 5.39: Συστάσεις του υπολειπόμενου υγρού του κάθε βήματος της δοκιμής DL (ρευστό 3), σε συγκέντρωση % της σύστασης του συνολικού δείγματος.....	113
Εικόνα 5.40: Διάγραμμα τιμών συντελεστών $k$ συναρτήσει της πίεσης για κάθε βήμα της δοκιμής DL (ρευστό 3) β) Πρότυπο διάγραμμα συντελεστών $k$ συναρτήσει της πίεσης στους 120°F γ) Πρότυπο διάγραμμα συντελεστών $k$ συναρτήσει της πίεσης στους 200°F (D. L. Katz, 1937).....	114
Εικόνα 5.41: Σύγκριση του διαγράμματος των τιμών του συντελεστή $k$ του μεθανίου συναρτήσει της πίεσης (ρευστό 3), με το πρότυπο αντίστοιχο διάγραμμα του μεθανίου για διάφορες τιμές θερμοκρασίας (NGAA, 1957).....	115
Εικόνα 5.42: Σύγκριση του διαγράμματος των τιμών του συντελεστή $k$ του εξανίου συναρτήσει της πίεσης (ρευστό 1), με το πρότυπο αντίστοιχο διάγραμμα του εξανίου για διάφορες τιμές θερμοκρασίας (NGAA, 1957).....	115

---

---

Εικόνα 5.43: Διάγραμμα Hoffman για κάθε βήμα της πίεσης της δοκιμής DL (ρευστό 3) .....	116
Εικόνα 5.44: Σύγκριση των συστάσεων για το ρευστό 3 .....	117
Εικόνα 5.45: Συστάσεις του υπολειπόμενου υγρού του κάθε βήματος της δοκιμής DL (ρευστό 4).....	118
Εικόνα 5.46: Διάγραμμα τιμών συντελεστών k συναρτήσει της πίεσης για κάθε βήμα της δοκιμής DL (ρευστό 4) β) Πρότυπο διάγραμμα συντελεστών k συναρτήσει της πίεσης στους 120°F (D. L. Katz, 1937) γ) Πρότυπο διάγραμμα συντελεστών k συναρτήσει της πίεσης στους 200°F (D. L.....	119
Εικόνα 5.47: Σύγκριση του διαγράμματος των τιμών του συντελεστή k του εξανίου συναρτήσει της πίεσης (ρευστό 4), με το πρότυπο αντίστοιχο διάγραμμα του εξανίου για διάφορες τιμές θερμοκρασίας (NGAA, 1957).....	119
Εικόνα 5.48: Διάγραμμα Hoffman για κάθε βήμα της πίεσης της δοκιμής DL (ρευστό 4) .....	120
Εικόνα 5.49: Σύγκριση των συστάσεων για το ρευστό 4 .....	121

---



---

## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Παράδειγμα Τυπικής Σύστασης των Διαφόρων Κατηγοριών Υδρογονανθράκων .....	12
Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικές Τιμές Πυκνότητας API .....	28
Πίνακας 4.1: Γενικές Πληροφορίες .....	50
Πίνακας 4.2: Κωδικοί Τύπων Ρευστών .....	51
Πίνακας 4.3: Γενικές Πληροφορίες Ρευστών (Συνθήκες Ταμιευτήρα) .....	51
Πίνακας 4.4: Μοριακή Σύσταση (Συνθήκες Ταμιευτήρα) .....	53
Πίνακας 4.5: Κωδικοί Τύπων Μορίων Σύστασης .....	53
Πίνακας 4.6: Γενικές Πληροφορίες Ρευστών (Συνθήκες Επιφάνειας) .....	54
Πίνακας 4.7: Μοριακή Σύσταση (Συνθήκες Επιφάνειας) .....	56
Πίνακας 4.8: Γενικές Πληροφορίες Ρευστού (DL) .....	57
Πίνακας 4.9: Μοριακή Σύσταση (Δοκιμή Διαφορικής Εκτόνωσης).....	58
Πίνακας 4.10: Μοντέλο Φυσικής Ιδιότητας.....	58
Πίνακας 4.11: Κωδικοί Εξισώσεων.....	60
Πίνακας 4.12: Κωδικοί Πειραματικών Δοκιμών.....	61
Πίνακας 4.13: Κωδικοί Ογκομετρικών Ιδιοτήτων .....	62
Πίνακας 4.14: Ογκομετρικές ιδιότητες σε πίεση κορεσμού.....	62
Πίνακας 4.15: Πίνακας Αναζήτησης Katz .....	63
Πίνακας 5.1: Ποιοτικός έλεγχος των ογκομετρικών ιδιοτήτων σε πίεση κορεσμού .....	74
Πίνακας 5.2: Ποιοτικός έλεγχος των τιμών της θερμοκρασίας ταμιευτήρα .....	76
Πίνακας 5.3: Σύγκριση των τιμών της πυκνότητας του υπολειπόμενου υγρού .....	94
Πίνακας 5.4: Ποιοτικός έλεγχος σε ρευστά με μη αναμενόμενα αποτελέσματα .....	96
Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα του πρώτου πτητικού ρευστού .....	98
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα του δεύτερου πτητικού ρευστού .....	98

---

---

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα του τρίτου πτητικού ρευστού .....	98
Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα του τέταρτου πτητικού ρευστού.....	98
Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα του πρώτου ρευστού μειωμένης πτητικότητας .....	99
Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα του δεύτερου ρευστού μειωμένης πτητικότητας.....	99
Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα τρίτου ρευστού μειωμένης πτητικότητας.....	99
Πίνακας 5.12: Αποτελέσματα του τέταρτου ρευστού μειωμένης πτητικότητας.....	99

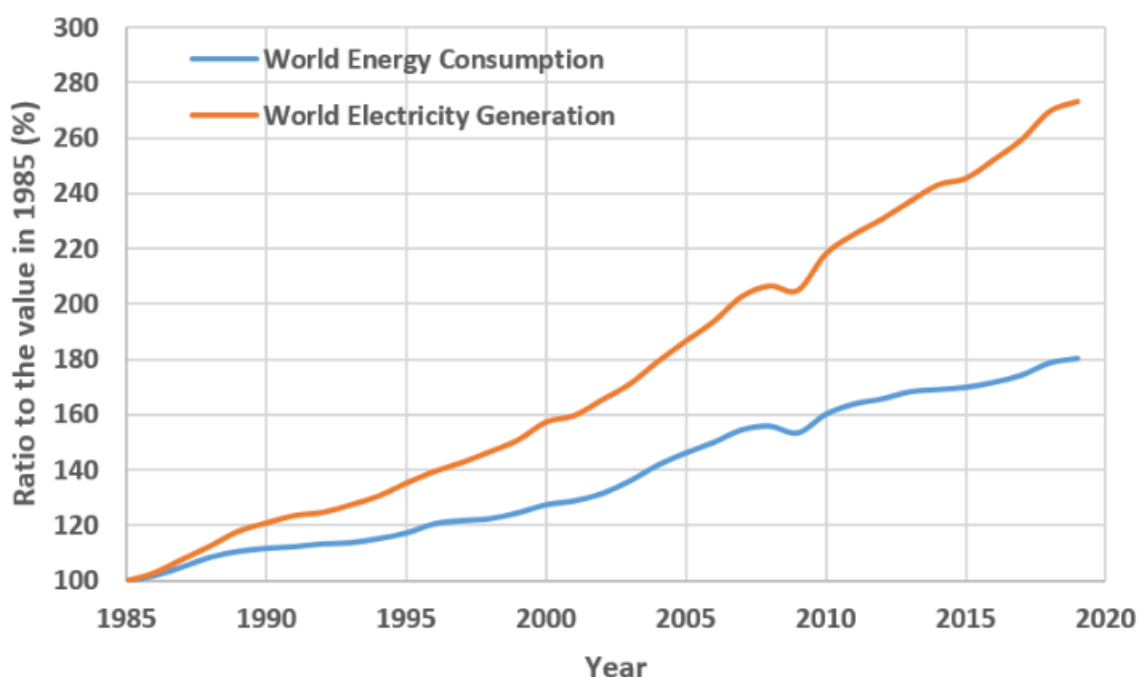
---

---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Ενεργειακή Κρίση

Ο όρος ενεργειακή κρίση, ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα της σύγχρονης εποχής, αναφέρεται στην κατάσταση στην οποία η παροχή ενέργειας δεν μπορεί να καλύψει την συνεχώς αυξανόμενη ζήτησή της. Οι παράγοντες που έχουν οδηγήσει σε αυτό το φαινόμενο είναι αρκετοί, όπως η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, οι πολιτικές αναταραχές, οι τεχνολογικές προκλήσεις, η οικονομική αστάθεια ή και οι φυσικές καταστροφές. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου παράγοντα είναι ο πόλεμος μεταξύ της Ουκρανίας και της Ρωσίας, ο οποίος έχει προκαλέσει μεγάλες αναταραχές στη συνολική εικόνα της αγοράς της ενέργειας. Ο αντίκτυπος του φαινομένου έχει διάφορες εκδηλώσεις, πολλές από τις οποίες είναι οικονομικού χαρακτήρα. Η ενεργειακή κρίση οδηγεί σε υψηλότερες τιμές πετρελαίου και άλλων ενεργειακών πόρων, γεγονός το οποίο μπορεί να προκαλέσει οικονομική ύφεση, ενώ η αβεβαιότητα στην ενεργειακή αγορά επηρεάζει τις επενδύσεις και την γενικότερη οικονομική ανάπτυξη. Ειδικότερα το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για την οικονομική σταθερότητα πολλών χωρών, αλλά και της παγκόσμιας οικονομίας σαν σύνολο. Επιπλέον, οι εκδηλώσεις του προβλήματος είναι άμεσα συνδεδεμένες και με το περιβάλλον λόγω της εξάντλησης των φυσικών πόρων, της κλιματικής αλλαγής και της ανάγκης για βιώσιμες ενεργειακές πηγές.



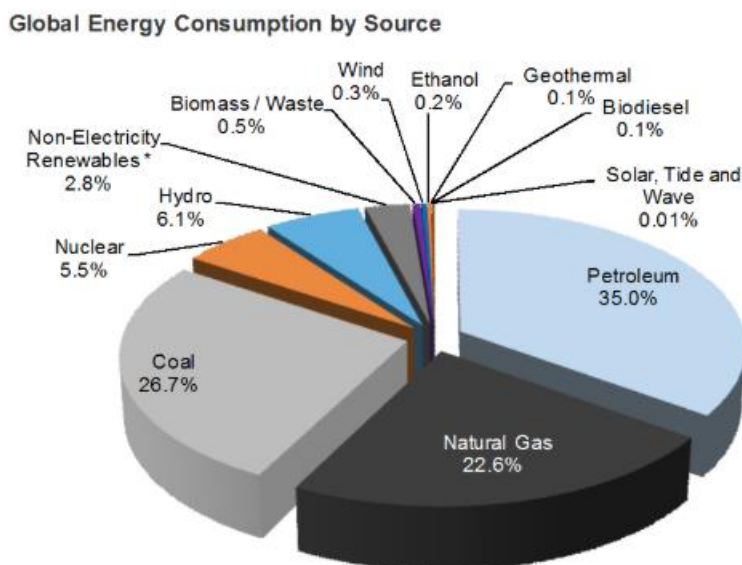
Εικόνα 1.1: Αύξηση της κατανάλωσης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ως ποσοστό του ποσού αυτού του έτους 1985

Η έρευνα για εναλλακτικές, πιο πράσινες πηγές ενέργειας, συνεχώς εξελίσσεται όμως παρόλα αυτά οι υδρογονάνθρακες παραμένουν η πιο διαδεδομένη και αποδοτική πηγή ενέργειας παγκοσμίως. Η ευελιξία τους στην μεταφορά, η δυνατότητα αποθήκευσής τους, η ευρεία χρήση τους σε διάφορες βιομηχανίες και διάφοροι άλλοι παράγοντες, τους καθιστούν, προς το παρόν, αναντικατάστατους. Ακόμη, οι τεχνολογικές πρόοδοι στην εξόρυξη και την επεξεργασία του πετρελαίου και των υποπροϊόντων του έχουν συμβάλει στην αύξηση της αποδοτικότητάς του, καθιστώντας το έναν από τους βασικούς παράγοντες για την αντιμετώπιση της ενεργειακής κρίσης που ο πλανήτης αντιμετωπίζει στην σημερινή εποχή.

## 1.2 Πετρέλαιο και φυσικό αέριο ως πηγή ενέργειας

Τα τελευταία σαράντα χρόνια τουλάχιστον, η ζήτηση και η κατανάλωση της παγκόσμιας ενέργειας αυξάνεται με γοργούς ρυθμούς. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.2, το 84% της παγκόσμιας ζήτησης για ενέργεια καλύπτεται από ορυκτά καύσιμα, και το 57.6% καλύπτεται μόνο από το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι σήμερα η σημαντικότερη πράσινη πηγή ενέργειας, η οποία όμως καλύπτει μόνο περίπου το 6% της παγκόσμιας ζήτησης. Άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική, η

ηλιακή, η βιομάζα και η γεωθερμία καλύπτουν αθροιστικά μόνο το 4% της παγκόσμιας ζήτησης.



Εικόνα 1.2: Συνεισφορά της κάθε πηγής ενέργειας

Η κάλυψη της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας σε τόσο μεγάλο βαθμό από τους υδρογονάνθρακες και γενικότερα από τα ορυκτά καύσιμα δείχνει τη δυσκολία της αλλαγής σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Όπως προαναφέρθηκε, οι υδρογονάνθρακες έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις ανανεώσιμες πηγές, όπως η ευκολία μεταφοράς τους με τις τρέχουσες υποδομές, η υψηλή αξιοπιστία και η σταθερότητα που παρουσιάζουν στην παραγωγή ενέργειας, άσχετα από τις καιρικές ή οποιεσδήποτε άλλες συνθήκες. Πέρα από τους παράγοντες αυτούς, η χρήση υδρογονανθράκων είναι και πολύ πιο οικονομική από τις ανανεώσιμες πηγές, ακόμα και αν στα έξοδα συμπεριληφθεί και το κόστος που είναι σχετικό με τις εκπομπές του CO<sub>2</sub>.

Το πιο βασικό χαρακτηριστικό, όμως, που διαθέτουν οι υδρογονάνθρακες και τους ξεχωρίζει από τις υπόλοιπες πηγές ενέργειας, είναι η αξιόπεραστη ενεργειακή τους πυκνότητα. Με τον όρο ενεργειακή πυκνότητα των υδρογονανθράκων, ορίζεται η ποσότητα ενέργειας που περιέχεται σε συγκεκριμένο όγκο πετρελαίου ή φυσικού αερίου. Η ενεργειακή του πυκνότητα είναι τόσο υψηλή που από 1 m<sup>3</sup> πετρελαίου μπορούν να παραχθούν 40-45 MJoule ενέργειας, ποσό απλησίαστο από τις υπόλοιπες πηγές. Στην

Εικόνα 1.3 αναγράφονται οι τιμές ενέργειας που παράγονται ανά κυβικό μέτρο από διάφορες πηγές ενέργειας.

Source	Joules per cubic meter
Solar	0.0000015
Geothermal	0.05
Wind at 10 mph (5m/s)	7
Tidal water	0.5–50
Human	1,000
Oil	45,000,000,000
Gasoline	10,000,000,000
Automobile occupied (5800 lbs)	40,000,000
Automobile unoccupied (5000 lbs)	40,000,000
Natural gas	40,000,000

Εικόνα 1.3: Ενεργειακή πυκνότητα της κάθε πηγής ενέργειας, σε J/m<sup>3</sup>

Ως αποτέλεσμα, σε πολλά μέρη του κόσμου, η ενεργειακή και η οικονομική ασφάλεια και σταθερότητα συνεχίζουν και βασίζονται στην εξόρυξη και την αξιοποίηση υδρογονανθράκων. Η συνεχής ανάγκη για πετρέλαιο και φυσικό αέριο υπογραμμίζει τη σημασία της συνεχούς και αποτελεσματικής παραγωγής των υδρογονανθράκων στη μοντέρνα κοινωνία. Η παραγωγή και η αξιοποίηση υδρογονανθράκων δεν εξασφαλίζει μόνο την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, αλλά ωφελεί την κοινωνία ανοίγοντας νέες θέσεις εργασίας, προχωρώντας τις τεχνολογικές καινοτομίες, αλλά και με διάφορους άλλους τρόπους.

### 1.3 Σημασία των Ογκομετρικών Ιδιοτήτων

Λόγω του φαινομένου της ενεργειακής κρίσης και της μέγιστης σημασίας του πετρελαίου στην παραγωγή ενέργειας, είναι απαραίτητη η βέλτιστη παραγωγή υδρογονανθράκων. Ο σωστός χαρακτηρισμός των πετρελαϊκών ρευστών και των ιδιοτήτων τους είναι σημαντικός για την ορθή διαχείριση ταμειυτήρων πετρελαίου και την αποδοτικότερη παραγωγή, μια και η γνώση τους είναι χρήσιμη για την αξιολόγηση των αποθεμάτων, τον προσδιορισμό της ποσότητας και της ποιότητας των παραγόμενων ρευστών, όσο και για την ανάπτυξη του βέλτιστου σχεδίου ανάκτησης αυτών (Chierici, 1995).

Για να προσδιοριστούν με ακρίβεια οι τιμές αυτών των ιδιοτήτων, πρέπει να πραγματοποιηθεί λήψη δείγματος του ρευστού του ταμειυτήρα, είτε από τον πυθμένα του

---

ταμειυτήρα είτε επιφανειακά, το οποίο θα οδηγηθεί σε κατάλληλο εργαστήριο εκτέλεσης πειραματικών δοκιμών PVT. Ο προσδιορισμός των ογκομετρικών ιδιοτήτων των ρευστών βρίσκεται στο επίκεντρο της Μηχανικής των ταμειυτήρων υδρογονανθράκων, καθώς σχετίζεται με τη συμπεριφορά των ρευστών υπό την σταδιακή ελάττωση της πίεσης, όπως συμβαίνει κατά τη διάρκεια της παραγωγής. Πράγματι, η παραγωγή των υδρογονανθράκων βασίζεται στη διαφορά πίεσης μεταξύ της μέσης πίεσης του ταμειυτήρα και της πίεσης του πυθμένα των παραγωγικών γεωτρήσεων. Η διαφορά της πίεσης κάνει δυνατή τη μετατόπιση του πετρελαίου μέσα στη σωλήνωση παραγωγής και τελικά την παραγωγή του στην επιφάνεια. Αντίθετα, η θερμοκρασία του ταμειυτήρα κατά κανόνα μένει σταθερή κατά την παραγωγή, επομένως η κύρια μεταβλητή η οποία καθορίζει τη συμπεριφορά των ρευστών κατά τη φάση της παραγωγής είναι η μεταβαλλόμενη πίεση που ασκείται στα ρευστά.

Ανακριβή PVT δεδομένα μπορούν να οδηγήσουν σε βλάβες όσον αφορά την απόδοση και την εγκυρότητα των μοντέλων EoS (καταστατικών εξισώσεων), της προσομοίωσης του ταμειυτήρα και της ανάπτυξης μοντέλων μηχανικής μάθησης, με βάση τα δεδομένα αυτά. Επίσης, θα οδηγήσει σε εσφαλμένο χαρακτηρισμό του ταμειυτήρα και των ρευστών, οδηγώντας έτσι σε ανακριβείς εκτιμήσεις αποθεμάτων, πράγμα που επηρεάζει τον οικονομικό σχεδιασμό και τις επενδυτικές αποφάσεις.

#### **1.4 Σκοπός Διπλωματικής Εργασίας**

Αν και η πειραματική ροή δοκιμών PVT είναι αυστηρά καθορισμένη, η ακρίβεια των μετρήσεων συχνά υποφέρει από σημαντικά σφάλματα, τα οποία με τη σειρά τους επηρεάζουν σοβαρά όλους τους επόμενους υπολογισμούς των Μηχανικών. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας συστηματικής μεθοδολογίας για την εφαρμογή ποιοτικού ελέγχου στις πληροφορίες και στα αποτελέσματα δοκιμών PVT που αναφέρονται σε μια τυπική εργαστηριακή αναφορά, και ειδικότερα στη δοκιμή διαφορικής εκτόνωσης (DL). Για την ανάπτυξη και την εφαρμογή της μεθοδολογίας χρησιμοποιήθηκε μια βάση δεδομένων που περιέχει δεδομένα αναλύσεων ρευστών και αποτελέσματα δοκιμών PVT τριών δεκαετιών από διάφορα πετρελαϊκά πεδία στον κόσμο.

Πρώτο βήμα του ποιοτικού ελέγχου ήταν η αξιολόγηση των τιμών των ογκομετρικών ιδιοτήτων στην πίεση κορεσμού. Οι ιδιότητες που παρουσίαζαν ακραίες τιμές είτε απορρίφθηκαν μαζί με το δείγμα, είτε βρέθηκε ο λόγος για τον οποίο παρουσίαζαν τις τιμές αυτές, με σκοπό να μη χρειαστεί να θεωρηθούν εσφαλμένες και να απορριφθούν. Το

---

επόμενο βήμα ήταν η σχεδίαση των καμπυλών των ογκομετρικών ιδιοτήτων συναρτήσει των μεταβαλλόμενων τιμών της πίεσης. Ασκήθηκε κριτική στο σχήμα των καμπυλών, συγκριτικά με το πρότυπο σχήμα που θα έπρεπε να ακολουθούν, όπως επίσης ασκήθηκε κριτική και στις τιμές που έχουν στο εύρος της πίεσης για το οποίο σχεδιάστηκε το κάθε διάγραμμα.

Στη συνέχεια, αναπτύχθηκαν εξισώσεις οι οποίες εκφράζουν τη διατήρηση της μάζας του συστήματος και εφαρμόστηκαν για την εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά τη δοκιμή διαφορικής εκτόνωσης (DL). Αρχικά, οι εξισώσεις τροποποιήθηκαν και εφαρμόστηκαν για τον υπολογισμό δεδομένων που λείπουν από την εργαστηριακή αναφορά, όπως η πυκνότητα του υπολειπόμενου πετρελαίου της δοκιμής DL. Η πυκνότητα αυτή συγκρίθηκε με την πυκνότητα του πετρελαίου που μεταφέρθηκε από το πεδίο σε κανονικές συνθήκες (Stock Tank Oil), και η οποία είναι διαθέσιμη στην αναφορά. Επιπλέον, οι εξισώσεις διατήρησης της μάζας του συστήματος εφαρμόστηκαν διακριτά σε κάθε βήμα πίεσης της δοκιμής διαφορικής εκτόνωσης, με σκοπό να ελεγχθεί εάν «κλείνει» το ισοζύγιο μάζας και αν επιβεβαιώνεται η διατήρησή της μεταξύ του υπολειπόμενου πετρελαίου και του αερίου που διαφεύγει από το σύστημα.

Τελευταίο βήμα του ποιοτικού ελέγχου ήταν η εφαρμογή εξισώσεων, οι οποίες πηγάζουν ξανά από την αρχή διατήρησης της μάζας, και η χρήση τους με σκοπό να υπολογιστεί η σύσταση του πετρελαίου που παραμένει στο PVT κελί σε κάθε βήμα πίεσης της δοκιμής διαφορικής εκτόνωσης, δεδομένο που επίσης λείπει από την εργαστηριακή αναφορά. Το συγκεκριμένο βήμα του ποιοτικού ελέγχου εφαρμόστηκε σε 4 αντιπροσωπευτικά ρευστά, σε 2 ρευστά χαμηλής και σε 2 ρευστά υψηλότερης πτητικότητας, με σκοπό να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της πτητικότητας του ρευστού και τα αποτελέσματά τους στον ποιοτικό έλεγχο. Οι συστάσεις του πετρελαίου αξιολογήθηκαν σχετικά με την «λογική» που παρουσιάζουν συγκριτικά με τις θεωρητικές μεταβολές που θα έπρεπε να ακολουθούν και με βάση αυτές σχεδιάστηκαν ορισμένα διαγράμματα (διάγραμμα Hoffman, διάγραμμα k-values), με σκοπό την επέκταση του ποιοτικού ελέγχου των συστάσεων.

## **1.5 Δομή Διπλωματικής Εργασίας**

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, αναλύονται και περιγράφονται αρχικά οι βασικές πληροφορίες σχετικά με τα πετρελαϊκά ρευστά, όσον αφορά τον σχηματισμό τους, τη



---

σύνθεσή τους και την ογκομετρική τους συμπεριφορά και στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία διεξαγωγής δοκιμών PVT. Επιπλέον, αναλύεται η διάταξη και οι πληροφορίες που λαμβάνονται από τη βάση δεδομένων πάνω στην οποία εφαρμόζονται οι τεχνικές που αναπτύσσονται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Έπειτα, περιγράφεται λεπτομερώς η διαδικασία του ποιοτικού ελέγχου, αναλύονται τα αποτελέσματά του και διεξάγονται τα απαραίτητα συμπεράσματα σχετικά με τη συμπεριφορά των ρευστών. Τέλος, παρέχονται ορισμένες οδηγίες στους Μηχανικούς ταμιευτήρων σχετικά με τον τρόπο χειρισμού αυτών των ζητημάτων και τον τρόπο διασφάλισης της αξιοπιστίας των υπολογισμών τους.

Πιο συγκεκριμένα, το Κεφάλαιο 2 αφιερώνεται στην περιγραφή του τρόπου σχηματισμού του πετρελαίου, στην ανάλυση της σύστασης του και στην ογκομετρική του συμπεριφορά. Αναλύονται οι ογκομετρικές του ιδιότητες, ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζονται και παρατίθενται τα πρότυπα διαγράμματά τους συναρτήσει της πίεσης, τα οποία θα χρειαστούν στον ποιοτικό έλεγχο. Τέλος, περιγράφονται οι διάφορες κατηγορίες υδρογονανθράκων και ο τρόπος με τον οποίο αυτές δημιουργήθηκαν.

Το Κεφάλαιο 3 στρέφεται στις ογκομετρικές δοκιμές PVT. Βασίζεται στην περιγραφή της διαδικασίας με την οποία προετοιμάζεται ένας ταμιευτήρας για τη δειγματοληψία των ρευστών, στον τρόπο με τον οποίο αναλύεται η σύστασή τους και τέλος στην περιγραφή του τρόπου διεξαγωγής της κάθε πειραματικής δοκιμής, όπως επίσης και των ιδιοτήτων που προσδιορίζονται από αυτή.

Στο Κεφάλαιο 4 παρέχεται η ανάλυση της διάταξης της βάσης δεδομένων στην οποία θα ασκηθεί ο ποιοτικός έλεγχος και θα επεξηγηθεί ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνονται πληροφορίες για τα ρευστά.

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται η διαδικασία του ποιοτικού ελέγχου. Αναλύεται ο τρόπος και η λογική με την οποία σχεδιάστηκαν τα βήματα μέσω των οποίων εφαρμόστηκε, παρατίθενται τα αποτελέσματά του και επεξηγείται η φυσική σημασία που είχαν αυτά.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 καταγράφονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τον ποιοτικό έλεγχο και παρέχονται ορισμένες οδηγίες στους Μηχανικούς ταμιευτήρων σχετικά με τον τρόπο χειρισμού αυτών των ζητημάτων και τον τρόπο διασφάλισης της αξιοπιστίας των υπολογισμών τους.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναφερθούν και θα αναλυθούν ορισμένες βασικές πληροφορίες σχετικά με τα πετρελαϊκά ρευστά, όπως είναι η προέλευση και η σύστασή τους, αλλά και η ογκομετρική συμπεριφορά που παρουσιάζουν. Επίσης, θα γίνει αναφορά στις διάφορες κατηγορίες πετρελαϊκών ρευστών, οι οποίες προκύπτουν με βάση την ογκομετρική συμπεριφορά και τις σχετικές ιδιότητές τους.

### 2.1 Προέλευση και σύσταση πετρελαϊκών ρευστών

Εδώ και χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετές θεωρίες για την ερμηνεία της προέλευσης του πετρελαίου, πολλές από τις οποίες είναι αλληλοσυγκρουόμενες. Παρόλα αυτά, η πιο ευρέως διαδεδομένη και αποδεκτή θεωρία είναι εκείνη που αποδίδει τον σχηματισμό του πετρελαίου στην αποσύνθεση ζωικών και φυτικών μικροοργανισμών (κυρίως θαλάσσιων). Οι μικροοργανισμοί αυτοί, έπειτα από τον θάνατό τους εναποτέθηκαν στον πυθμένα της θάλασσας, όπου ανακατεύτηκαν με λάσπη και άμμο. Με την πάροδο του χρόνου, μετά από διαδοχικές αποθέσεις στρωμάτων ιζημάτων, το οργανικό αυτό υλικό τάφηκε βαθύτερα. Καθώς το βάθος της ταφής αυξανόταν, το ίδιο συνέβαινε με την πίεση και τη θερμοκρασία. Οι συνθήκες αυτές με την πάροδο εκατομμυρίων χρόνων μετέτρεψαν το οργανικό υλικό στο αργό πετρέλαιο και το φυσικό αέριο που ξέρουμε σήμερα (Shallcross, 2020).

Το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο επομένως βρίσκονται παγιδευμένα μέσα σε σχηματισμούς πετρωμάτων, οι οποίοι χαρακτηρίζονται ως ταμιευτήρες. Πιο συγκεκριμένα, ως ταμιευτήρας ορίζεται μια συγκέντρωση υδρογονανθράκων σε πορώδη, περατά, ιζηματογενή πετρώματα. Η συγκέντρωση αυτή των υδρογονανθράκων, η οποία κατά το χρόνο αποκάλυψής της βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας, όσον αφορά την πίεση σε όλο τον διαθέσιμο όγκο πόρων, μερικές φορές αναφέρεται και ως «δεξαμενή». Ένα πετρελαϊκό πεδίο μπορεί να αποτελείται από διάφορους ταμιευτήρες, οι οποίοι μπορεί να βρίσκονται είτε σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης, είτε σε διαφορετικούς στρωματογραφικούς ορίζοντες (Σταματάκη, 2004).

Δεδομένου ότι το πετρέλαιο σχηματίστηκε από οργανικά υλικά, η σύστασή του αποτελείται κυρίως από μόρια υδρογονανθράκων, τα οποία γενικά χαρακτηρίζονται από τον μοριακό τύπο  $C_nH_{2n+\xi}$ . Εκτός από υδρογονάνθρακες, στη σύσταση των πετρελαϊκών ρευστών πολλές φορές περιέχονται και μόρια άλλων ενώσεων, όπως είναι το άζωτο ( $N_2$ ), το διοξείδιο του

---

άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και το υδρόθειο ( $\text{H}_2\text{S}$ ), σε πολύ μικρότερες όμως συγκεντρώσεις. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά τον σχηματισμό, βρίσκονται στη σύσταση και ορισμένα μεταλλικά στοιχεία όπως το νικέλιο (Ni), το βανάδιο (V), ο σίδηρος (Fe) και ο χαλκός (Cu) (Dandekar, 2006).

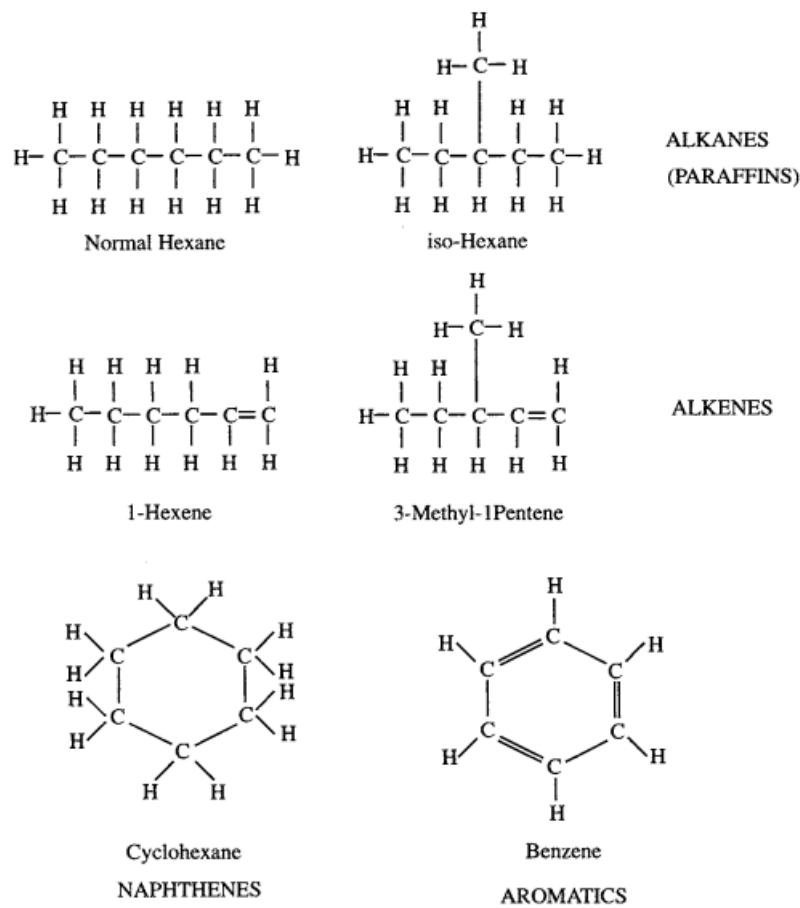
Το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) είναι ο απλούστερος υδρογονάνθρακας και το κύριο συστατικό όλων των πετρελαϊκών ρευστών γενικότερα. Η συγκέντρωση του κάθε ρευστού σε υδρογονάνθρακες αλλάζει ανάλογα με το εάν είναι υγρό ή αέριο, αλλά και ανάλογα με το πόσο βαρύ είναι το συγκεκριμένο ρευστό. Τα δείγματα υγρού πετρελαίου περιέχουν υψηλότερες συγκεντρώσεις σε βαρύτερους υδρογονάνθρακες (με υψηλότερο μοριακό βάρος) από ότι τα αέρια δείγματα, τα οποία αποτελούνται σχεδόν αποκλειστικά από μεθάνιο, αλλά και άλλους ελαφριούς υδρογονάνθρακες όπως το αιθάνιο ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), προπάνιο ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) και το βουτάνιο ( $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ).

Ο αριθμός των διαφορετικών μορίων υδρογονανθράκων οι οποίοι περιέχονται στα πετρελαϊκά δείγματα είναι συνήθως πολύ μεγάλος, της τάξης των εκατοντάδων ή ακόμη και χιλιάδων διαφορετικών μορίων, τα οποία μπορούν να φτάσουν μέχρι και τα 200 άτομα άνθρακα. Για τον λόγο αυτό, στις περισσότερες αναλύσεις σύστασης, τα συστατικά των αναγνωρίζονται ξεχωριστά μέχρι κάποιο συγκεκριμένο μόριο (πχ το δεκάνιο  $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$ ) και έπειτα από εκεί χαρακτηρίζονται ως το κλάσμα  $\text{C}_{n+}$ , στο οποίο περιέχονται όλα τα μόρια υδρογονανθράκων τα οποία περιέχουν περισσότερα από  $n$  άτομα άνθρακα (Cameron, 2019). Όλα τα μόρια του κλάσματος  $\text{C}_{n+}$  ανήκουν σε κάποια από τις 4 ομάδες δομικών τύπων που αναγράφονται παρακάτω (Pedersen, 2007).

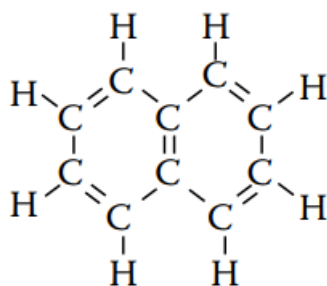
- Αλκάνια: Χαρακτηρίζονται από τον μοριακό τύπο  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$  και αποτελούν τον απλούστερο δομικό τύπο των υδρογονανθράκων. Χωρίζονται στα κανονικά αλκάνια (η δομή των οποίων σχηματίζει ευθείες αλυσίδες) και στα ισοαλκάνια (η δομή των οποίων παρουσιάζει τουλάχιστον μια διακλάδωση). Τα άτομα του άνθρακα συνδέονται μεταξύ τους, αλλά και με τα άτομα του υδρογόνου με απλούς δεσμούς, όπως φαίνεται στην Εικόνα (2.1) για το εξάνιο και το ισοεξάνιο.
- Αλκένια: Χαρακτηρίζονται από τον μοριακό τύπο  $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ . Τα άτομα του άνθρακα συνδέονται μεταξύ τους με απλούς δεσμούς, αλλά και με τουλάχιστον έναν διπλό δεσμό, όπως φαίνεται στην Εικόνα (2.1). Δεν παρατηρούνται ιδιαίτερα συχνά στη σύσταση του πετρελαίου
- Ναφθένια (ή αλλιώς κυκλοαλκάνια): Χαρακτηρίζονται από τον ίδιο τύπο με τα αλκένια, αλλά στην πλειοψηφία τους μοιάζουν περισσότερο στα αλκάνια όσον

αφορά τις χημικές τους ιδιότητες. Διαφέρουν από αυτά στο γεγονός ότι περιέχουν μια ή περισσότερες κυκλικές δομές (δακτυλίους) στη δομή τους.

- Αρωματικοί υδρογονάνθρακες: Παρομοίως με τα ναφθένια, αποτελούνται τουλάχιστον από μια κυκλική ένωση, αλλά τα άτομα άνθρακα συνδέονται μεταξύ τους με διπλούς δεσμούς. Ο πιο απλός αρωματικός υδρογονάνθρακας είναι το βενζόλιο ( $C_6H_6$ ), που παρουσιάζεται επίσης στην Εικόνα 2.1. Στα πετρελαϊκά ρευστά συχνά παρατηρούνται και συγκεντρώσεις πολυκυκλικών αρωματικών υδρογονανθράκων, όπως είναι η ναφθαλίνη ( $C_{10}H_8$ ), η μοριακή δομή της οποίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.1: Δομικοί τύποι διαφόρων ομάδων υδρογονανθράκων με έξι άτομα άνθρακα (Danesh, 1998).



Εικόνα 2.2: Δομικός τύπος της ναφθαλίνης (Danesh, 1998).

Γενικότερα, τα ρευστά που παγιδεύονται σε έναν ταμειυτήρα έχουν συχνά διαφορετικές συστάσεις μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του σχηματισμού τους σε διαφορετικές χρονικές περιόδους και σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Ως αποτέλεσμα, υπάρχουν διακυμάνσεις στη σύσταση των ρευστών του ταμειυτήρα, ανάμεσα σε ρευστά που βρίσκονται σε διαφορετικά μήκη και πλάτη. Σύμφωνα με τις βασικές αρχές της συμπεριφοράς φάσεων, θεωρείται πως τα ρευστά του ταμειυτήρα βρίσκονται σε ισορροπία λόγω της ανάμιξής τους, η οποία συμβαίνει εδώ και εκατομμύρια χρόνια. Παρόλα αυτά, τα περισσότερα παραδείγματα ταμειυτήρων παρουσιάζουν τη συμπεριφορά που αναλύθηκε παραπάνω, δηλαδή ετερογένεια στη σύνθεση. Η ετερογένεια αυτή χρειάζεται πολλά εκατομμύρια χρόνια για να εξαλειφθεί και στη διατήρηση του φαινομένου αυτού συμβάλλει η αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης συναρτήσει του βάθους του ταμειυτήρα (Burcik, 1957), (Dedini, 2019).

## 2.2 Κατηγορίες Πετρελαϊκών Ρευστών

Τα πετρελαϊκά ρευστά χωρίζονται γενικά σε 5 κατηγορίες, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω (Danesh, 1998).

- Ξηρό φυσικό αέριο (dry gas)
- Υγρό φυσικό αέριο (wet gas)
- Αέριο συμπύκνωμα (gas condensate)
- Πτητικό πετρέλαιο (volatile oil)
- Μαύρο πετρέλαιο (black oil)

Τα ρευστά των κατηγοριών του ξηρού και υγρού φυσικού αερίου, αλλά και του αερίου συμπυκνώματος θεωρούνται αέριοι υδρογονάνθρακες, ενώ τα ρευστά του πτητικού και του μαύρου πετρελαίου θεωρούνται υγροί υδρογονάνθρακες.

Η κατηγοριοποίηση αυτή γίνεται με βάση την ογκομετρική συμπεριφορά και την ισορροπία φάσεων του ρευστού μετά από μεταβολές πίεσης και θερμοκρασίας, μια και συνήθως δεν αρκεί η κατηγοριοποίησή τους απλά ως υγρών ή ως αερίων. Είναι πολύ σημαντική για την κατανόηση των χαρακτηριστικών των ταμιευτήρα, για το σχεδιασμό πλάνου παραγωγής και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης της παραγωγής.

Όπως είναι λογικό, οι διαφορετικές κατηγορίες ρευστών εμφανίζουν διαφορετική σύσταση. Μια τυπική σύσταση για τα ρευστά της κάθε κατηγορίας παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.1, όπου το κάθε συστατικό είναι μετρημένο σε γραμμομοριακή συγκέντρωση επί % όλου του δείγματος (mole %).

<b>Συστατικό</b>	<b>Ξηρό Φυσικό Αέριο</b>	<b>Υγρό Φυσικό Αέριο</b>	<b>Αέριο Συμπύκνωμα</b>	<b>Πτητικό Πετρέλαιο</b>	<b>Μαύρο Πετρέλαιο</b>
N <sub>2</sub>	-	0.3	0.31	0.12	0.21
CO <sub>2</sub>	-	1.36	1.7	2.63	0.86
C <sub>1</sub>	97	92.6	78	68.46	37.78
C <sub>2</sub>	2.06	3.04	8.62	6.11	10.67
C <sub>3</sub>	0.29	1.05	3.24	3.42	5.62
i – C <sub>4</sub>	0.15	0.24	0.56	0.91	2.77
n – C <sub>4</sub>	0.10	0.26	1.1	1.7	3.31
i – C <sub>5</sub>	0.08	0.11	0.51	0.73	2.06
n – C <sub>5</sub>	0.04	0.08	0.4	1.06	1.46
C <sub>6</sub>	0.06	0.16	0.77	2.36	4.28
C <sub>7+</sub>	0.22	0.8	4.8	15.5	30.98

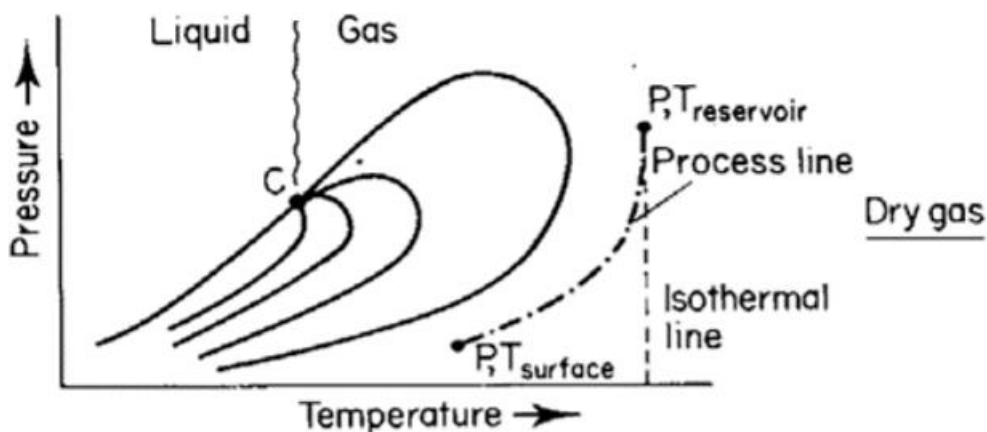
Πίνακας 2.1: Παράδειγμα Τυπικής Σύστασης των Διαφόρων Κατηγοριών Υδρογονανθράκων

Η κατηγοριοποίηση των ρευστών με βάση τα διαγράμματα φάσης τους ακολουθεί παρακάτω.

### 2.2.1 Ξηρό φυσικό αέριο (dry gas)

Σε έναν ταμιευτήρα ξηρού αερίου, η θερμοκρασία του ταμιευτήρα ( $T_{\text{reservoir}}$ ) είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία cricondentherm. Η θερμοκρασία cricondentherm είναι η μέγιστη θερμοκρασία για την ύπαρξη 2 φάσεων (πετρελαίου και φυσικού αερίου στη περίπτωση πετρελαϊκών ρευστών), για κατάλληλη τιμή πίεσης στον ταμιευτήρα. Είναι η θερμοκρασία που βρίσκεται δεξιότερα από όλες σε ένα διάγραμμα φάσεων, και για θερμοκρασίες υψηλότερες από αυτή, το ρευστό βρίσκεται σε μια φάση, στην αέρια στην προκειμένη περίπτωση.

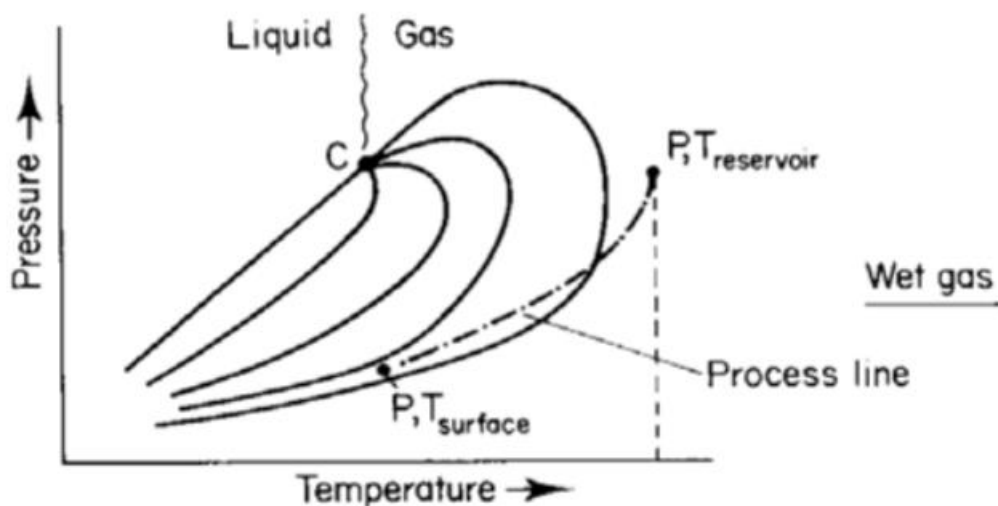
Επομένως, η πτώση της πίεσης σε έναν ταμιευτήρα ξηρού αερίου δεν θα οδηγήσει στο σχηματισμό υγρής φάσης στον ταμιευτήρα. Το ξηρό αέριο βρίσκεται σε αέρια φάση τόσο στον ταμιευτήρα όσο και στην επιφάνεια, όταν φτάσει σε αυτήν, για αυτό και ονομάζεται ξηρό αέριο. Ένα χαρακτηριστικό διάγραμμα φάσεων ξηρού, με τις μεταβολές θερμοκρασίας και πίεσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.3.



Εικόνα 2.3: Διάγραμμα Φάσεων Ξηρού Φυσικού Αερίου (Σταματάκη, 2004).

### 2.2.2 Υγρό φυσικό αέριο (Wet Gas)

Η θερμοκρασία του ταμιευτήρα στους ταμιευτήρες υγρού φυσικού αερίου η θερμοκρασία του ταμιευτήρα είναι επίσης υψηλότερη από τη θερμοκρασία cricondentherm. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4, το ρευστό σε συνθήκες ταμιευτήρα βρίσκεται σε πλήρως αέρια φάση. Ωστόσο, μετά τις μεταβολές πίεσης και θερμοκρασίας του ρευστού κατά την παραγωγή και τη μεταφορά του μέσω των γεωτρήσεων σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, σχηματίζεται και μια υγρή φάση, αφού οι επιφανειακές συνθήκες βρίσκονται εντός του φακέλου των φάσεων.



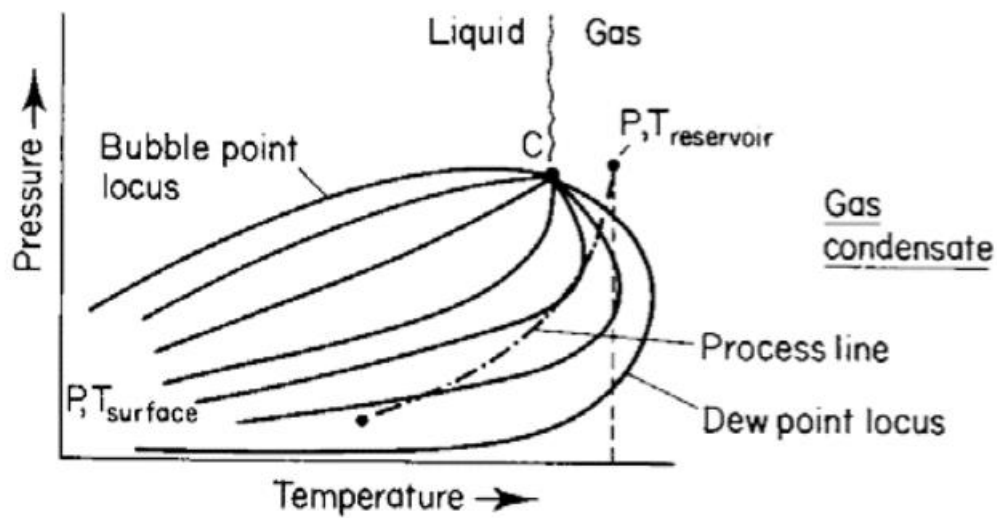
Εικόνα 2.4: Διάγραμμα Φάσεων Υγρού Φυσικού Αερίου (Σταματάκη, 2004).

### 2.2.3 Αέριο συμπύκνωμα (gas condensate)

Όπως και προηγουμένως, σε συνθήκες ταμειυτήρα, το ρευστό βρίσκεται μόνο σε αέρια φάση. Παρόλα αυτά, η θερμοκρασία του ταμειυτήρα βρίσκεται ανάμεσα στη κρίσιμη θερμοκρασία ( $T_c$ ) και τη θερμοκρασία cricondentherm. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.5, όσο η παραγωγή προχωράει και πέφτει η πίεση, σχηματίζονται 2 φάσεις στον ταμειυτήρα. Αυτό συμβαίνει επειδή κατά την πτώση της πίεσης συναντάται η καμπύλη των σημείων δρόσου, σταδιακά σχηματίζοντας έτσι την υγρή φάση λόγω συμπύκνωσης.

Εάν γινόταν να ελαττωθεί η πίεση μέχρι κάποια αρκετά χαμηλή τιμή, η υγρή φάση θα επανεξατμιζόταν. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φαινόμενο ισόθερμης οπισθοδρομικής συμπύκνωσης (retrograde condensation). Είναι αρκετά δύσκολο να συμβεί κάτι τέτοιο στην πραγματικότητα καθώς οι πιέσεις του χαμηλού (κάτω) σημείου δρόσου είναι κατά κανόνα πολύ χαμηλή για να απαντηθεί στον ταμειυτήρα.

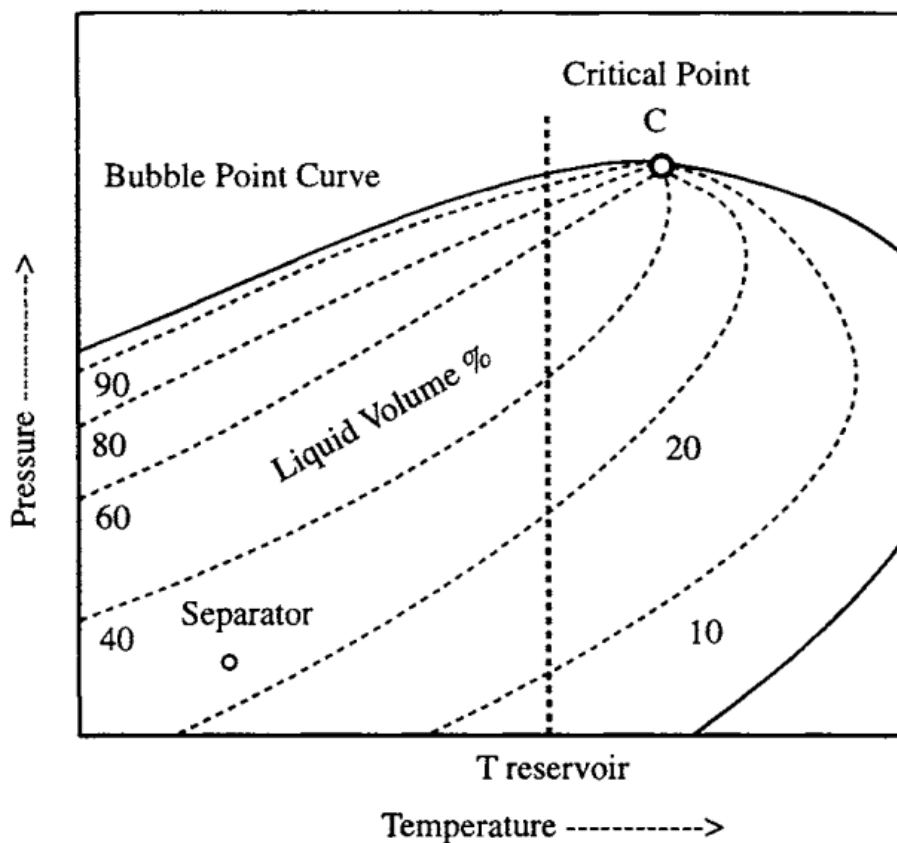




Εικόνα 2.5: Διάγραμμα Φάσεων Αερίου Συμπυκνώματος (Σταματάκη, 2004).

#### 2.2.4 Πτητικό πετρέλαιο (Volatile Oil)

Στους συγκεκριμένους ταμιευτήρες, η θερμοκρασία του ταμιευτήρα βρίσκεται κοντά στην κρίσιμη θερμοκρασία. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6, για μικρές μεταβολές της πίεσης, η κατακόρυφος η οποία απεικονίζει την ισοθερμοκρασιακή μεταβολή που συμβαίνει κατά την παραγωγή, οδηγεί σε εξάτμιση μεγάλου μέρους της ποσότητας του πετρελαίου, μόλις περάσει την καμπύλη των σημείων φυσαλίδας (bubble point curve). Λόγω της υψηλής περιεκτικότητας του πτητικού πετρελαίου σε ελαφριά συστατικά, η αέρια φάση του ρευστού σχηματίζεται με πολύ γρήγορους ρυθμούς, για μικρές μειώσεις στην πίεση.

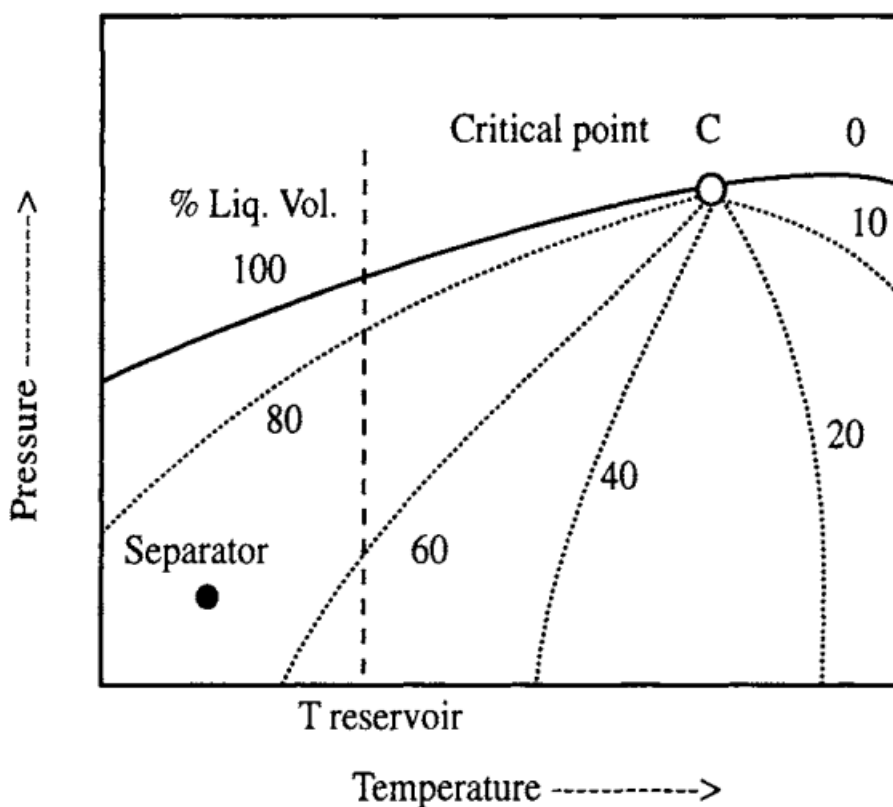


Εικόνα 2.6: Διάγραμμα Φάσεων Πητικού Πετρελαίου (Danesh, 1998).

### 2.2.5 Μαύρο πετρέλαιο (black oil)

Η συγκεκριμένη κατηγορία υδρογονανθράκων είναι και η συνηθέστερη. Η πλειοψηφία των ρευστών του ταμειυτήρα ανήκουν στα “black oils”. Η σύσταση του μαύρου πετρελαίου συνήθως από τουλάχιστον 20 moles% επτανίου και άλλων βαριών συστατικών. Το διάγραμμα φάσης του, μαζί με τις μεταβολές που συμβαίνουν κατά τη παραγωγή, παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.7.

Η θερμοκρασία στον συγκεκριμένο τύπο ταμειυτήρα απέχει αρκετά από το κρίσιμο σημείο. Η ισόθερμη εκτόνωση που συμβαίνει εντός του ταμειυτήρα κατά την παραγωγή οδηγεί στο σχηματισμό αερίου μόλις συναντηθεί το σημείο φυσαλίδας, ενώ η περαιτέρω μείωση της πίεσης οδηγεί στο σχηματισμό συνεχώς αυξανόμενων ποσοτήτων αερίου, οι οποίες όμως δεν είναι τόσο σημαντικές όσο στην περίπτωση του πητικού πετρελαίου.



Εικόνα 2.7: Διάγραμμα Φάσεων Μαύρου Πετρελαίου (Danesh, 1998).

### 2.3 Ογκομετρικές (PVT) Ιδιότητες των Ρευστών του Ταμιευτήρα και Πρότυπα Διαγράμματα

Οι PVT ιδιότητες των πετρελαϊκών ρευστών περιγράφουν την ογκομετρική συμπεριφορά του πετρελαίου συναρτήσει της θερμοκρασίας και της πίεσης. Για τον λόγο αυτό ονομάζονται και ιδιότητες PVT (Pressure-Volume-Temperature). Ουσιαστικά, οι ιδιότητες αυτές βοηθούν στη συσχέτιση του όγκου του πετρελαίου που παράγεται στην επιφάνεια με τον όγκο του πετρελαίου που βρίσκεται στον ταμιευτήρα, καθώς μια τέτοια ακριβής συσχέτιση είναι δύσκολο να επιτευχθεί με ακρίβεια και εξαρτάται από πολλές παραμέτρους (I. U. Igeke). Κατά την παραγωγή υδρογονανθράκων, λόγω της δραματικής πτώσης της πίεσης από τον ταμιευτήρα προς την επιφάνεια, πραγματοποιούνται αλλαγές φάσεων από υγρό σε αέριο ή ανάποδα, κάνοντας δύσκολο τον υπολογισμό της ποσότητας του υγρού πετρελαίου ή του φυσικού αερίου που θα παραλειφθεί στην επιφάνεια, το οποίο προφανώς είναι μείζονος οικονομικής σημασίας και επηρεάζει άμεσα το πλάνο παραγωγής και τον τρόπο διαχείρισης του ταμιευτήρα.

---

Ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων αυτών γίνεται είτε με τις κατάλληλες θεωρητικές συσχετίσεις, είτε μέσω της διεξαγωγής εργαστηριακών δοκιμών PVT, οι οποίες θα αναλυθούν στο Κεφάλαιο 3. Ο πιο έμπιστος τρόπος είναι μέσω των πειραματικών δοκιμών, αλλά επειδή η διεξαγωγή τους είναι αρκετά δαπανηρή, συχνά χρησιμοποιούνται και οι υπολογιστικές συσχετίσεις.

Οι βασικότερες PVT ιδιότητες, όπως επίσης και τα πρότυπα διαγράμματά τους συναρτήσει της πίεσης, τα οποία θα χρειαστούν στον ποιοτικό έλεγχο, θα αναλυθούν παρακάτω, κυρίως για τις κατηγορίες υγρού πετρελαίου, καθώς ο ποιοτικός έλεγχος της παρούσας εργασίας θα εκτελεστεί πάνω σε ρευστά της κατηγορίας αυτής.

### **2.3.1 Πίεση Κορεσμού**

Είναι η μέγιστη πίεση στην οποία η υγρή και η αέρια πίεση βρίσκονται σε ισορροπία. Στα ρευστά υγρού πετρελαίου η πίεση αυτή ονομάζεται πίεση σημείου φυσαλίδας (bubble point pressure). Για τιμές πίεσης μεγαλύτερες από αυτήν του σημείου φυσαλίδας, το ρευστό μπορεί να συγκρατήσει όλο το διαλυμένο αέριο που βρίσκεται μέσα του, διατηρώντας έτσι την υγρή φάση του. Καθώς η πίεση του συστήματος ελαττώνεται, όταν εκείνη αποκτήσει την τιμή του σημείου φυσαλίδας, θα παρατηρηθεί η πρώτη φυσαλίδα στο σύστημα του ρευστού, εξού και η ονομασία «πίεση σημείου φυσαλίδας». Αυτό συμβαίνει επειδή για τιμές της πίεσης χαμηλότερες από την πίεση κορεσμού, το διαλυμένο αέριο που περιέχεται στο πετρέλαιο ελευθερώνεται σταδιακά, σχηματίζοντας έτσι ξεχωριστή φάση.

Στα ρευστά φυσικού αερίου, η πίεση κορεσμού αντιστοιχεί στην πίεση του σημείου δρόσου (dew point pressure). Αντίστοιχα με τα υγρά δείγματα, για τιμές πίεσης υψηλότερες από την πίεση κορεσμού, το ρευστό παραμένει αέριο, με όλα τα υγρά συστατικά να είναι πλήρως ατμοποιημένα στο δείγμα. Καθώς η πίεση ελαττώνεται, όταν αποκτήσει την τιμή του σημείου δρόσου, εμφανίζεται η πρώτη σταγόνα υγρού στο δείγμα και με περαιτέρω ελάττωση της πίεσης, το υγρό συμπύκνωμα σχηματίζει μια ξεχωριστή φάση.

Στο σύστημα SI, μονάδα μέτρησης της πίεσης κορεσμού είναι το Pascal (Pa). Ωστόσο, οι μονάδες που χρησιμοποιούνται κατά κανόνα στο πεδίο είναι τα psi.

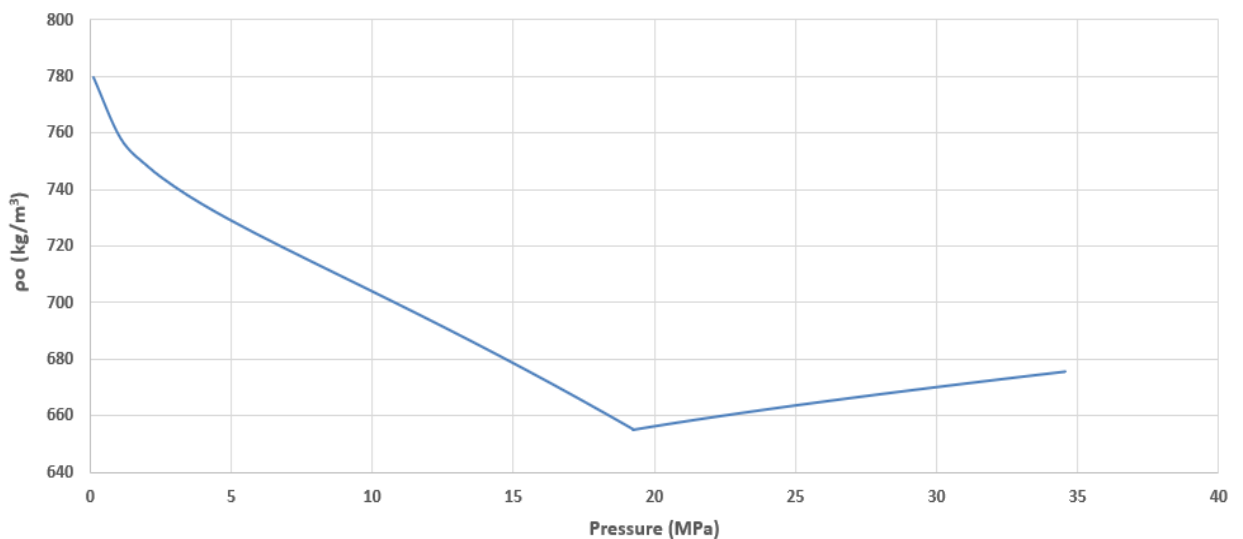
### **2.3.2 Πυκνότητα ρευστού**

Η πυκνότητα των ρευστών μεταβάλλεται ανάλογα με την πίεση. Όσον αφορά τα ρευστά υγρού πετρελαίου, όταν η πίεση βρίσκεται πάνω από την πίεση του σημείου φυσαλίδας, το

ρευστό όπως αναφέρθηκε προηγουμένως βρίσκεται μόνο στην υγρή φάση. Με περαιτέρω αύξηση της πίεσης, λόγω της συμπιεστότητας του υγρού, το ρευστό συμπιέζεται, επομένως μειώνεται ο όγκος του και τα μόρια του έρχονται πιο κοντά, αυξάνοντας έτσι την πυκνότητά του. Λόγω του γεγονότος ότι τα υγρά έχουν πολύ χαμηλές τιμές συμπιεστότητας, χρειάζεται μεγάλη αύξηση στην πίεση για να παρατηρηθεί σημαντική διαφορά στις τιμές της πυκνότητας.

Όταν η πίεση κατέχει την τιμή του σημείου φυσαλίδας, το υγρό πετρέλαιο αποκτά την χαμηλότερη δυνατή τιμή πυκνότητας, καθώς έχει εκτονωθεί αλλά κατέχει όλο τον όγκο του αερίου διαλυμένο μέσα του. Καθώς η πίεση ελαττώνεται περαιτέρω, το αέριο σταδιακά ελευθερώνεται, επομένως η πυκνότητα του ρευστού αυξάνεται σημαντικά, καθώς σε αυτό περιέχεται περισσότερο υγρό, το οποίο έχει μεγαλύτερη πυκνότητα.

Η συμπεριφορά της πυκνότητας που αναλύθηκε παραπάνω απεικονίζεται στο πρότυπο διάγραμμα της πυκνότητας συναρτήσεως της πίεσης, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.8. Μονάδα μέτρησης της πυκνότητας στο SI, όπως και στο παρακάτω διάγραμμα, είναι τα  $\text{kg/m}^3$ , ενώ στο διάγραμμα αυτό, όπως και στα υπόλοιπα που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο, η πίεση μετριέται σε MPa.



Εικόνα 2.8: Πρότυπο διάγραμμα τιμών πυκνότητας συναρτήσεως της πίεσης

---

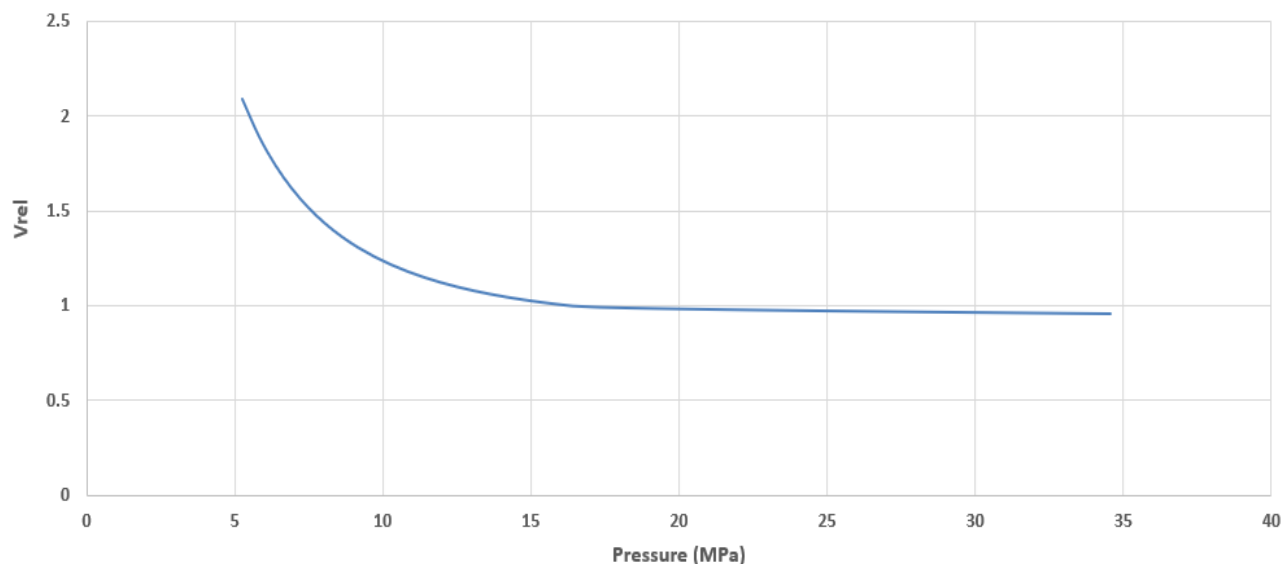
### 2.3.3 Σχετικός όγκος (Relative Volume - $V_{rel}$ )

Ο σχετικός όγκος ενός πετρελαϊκού ρευστού είναι μια τιμή που μετριέται μέσω ορισμένων πειραματικών δοκιμών, οι οποίες θα αναλυθούν στο Κεφάλαιο 3. Υπολογίζεται μέσω της Εξίσωσης 2.1, ως ο λόγος του συνολικού όγκου ενός ρευστού δείγματος ( $V_{tot}$ ) προς τον όγκο του συγκεκριμένου δείγματος σε πίεση κορεσμού ( $V_{sat}$ ) και αποτελεί συνάρτηση της πίεσης.

$$V_{rel} = \frac{V_{tot}}{V_{sat}} \quad (2.1)$$

Ο προσδιορισμός του σχετικού όγκου έχει σκοπό να ληφθούν πληροφορίες σχετικά με το πώς αλλάζει ο όγκος του ρευστού συναρτήσει της πίεσης, ενώ μέσω εκείνου μπορεί να υπολογιστεί και η συμπιεστότητα του πετρελαίου δεδομένου ότι εξαρτάται από τον σχετικό όγκο (βλέπε εξίσωση 2.2).

Στην Εικόνα 2.9, παρουσιάζεται το πρότυπο διάγραμμα του σχετικού όγκου συναρτήσει της πίεσης. Καθώς η πίεση μειώνεται, ο συνολικός όγκος του δείγματος εκτονώνεται, οπότε η τιμή του αριθμητή της εξίσωσης αυξάνεται. Ο παρονομαστής, εφόσον είναι ίσος με τον όγκο του δείγματος σε πίεση κορεσμού, μένει πάντα ίσος. Στην πίεση κορεσμού, ο συνολικός όγκος του δείγματος ισούται με τον όγκο κορεσμού, οπότε ο σχετικός όγκος πάντα ισούται με 1. Σε πολύ υψηλές πιέσεις, όπως φαίνεται στο διάγραμμα, λόγω της συμπιεστότητας του ρευστού, ο συνολικός όγκος μπορεί να γίνει μικρότερος από τον όγκο στο σημείο κορεσμού, οπότε για τον λόγο αυτό το διάγραμμα έχει τιμές κατώτερες από το 1.



Εικόνα 2.9: Πρότυπο διάγραμμα τιμών σχετικού όγκου συναρτήσει της πίεσης

### 2.3.4 Συντελεστής Ισοθερμικής Συμπιεστότητας πετρελαίου (Isothermal Oil Compressibility $c_o$ ).

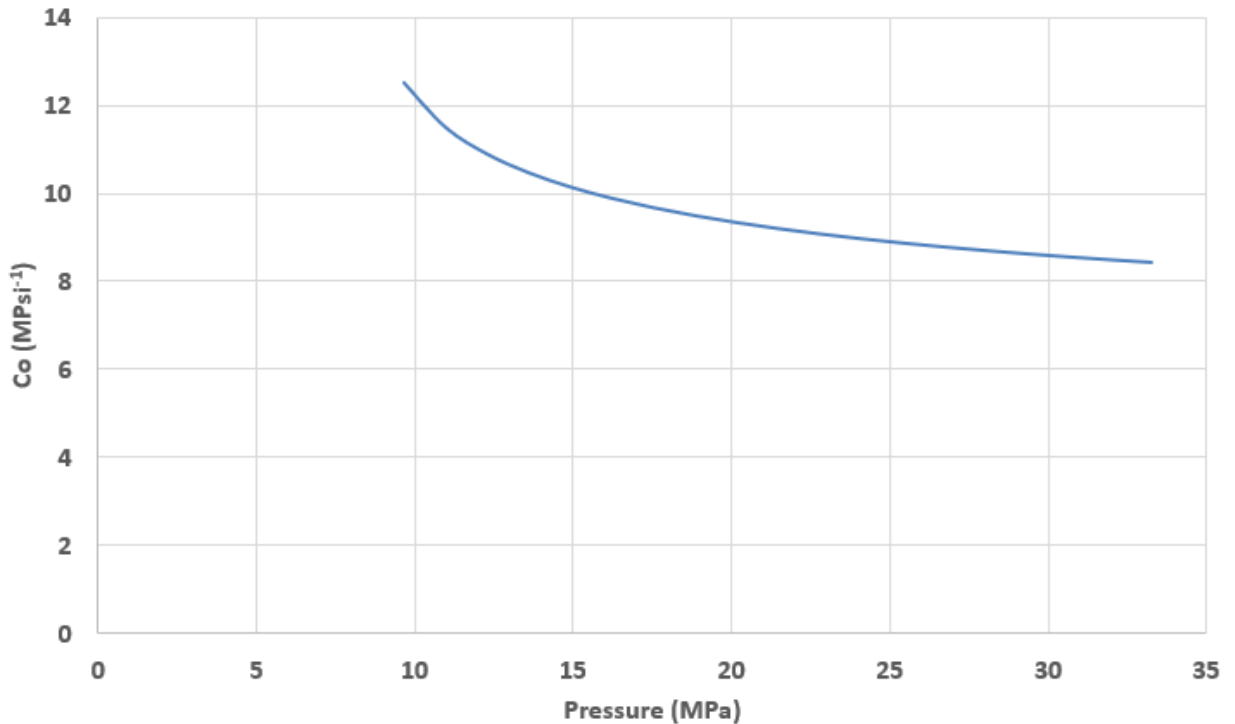
Ο συντελεστής ισοθερμικής συμπιεστότητας του πετρελαίου υπολογίζεται με σκοπό να ληφθούν πληροφορίες για την μεταβολή του υγρού όγκου συναρτήσει της πίεσης με σταθερή θερμοκρασία. Ο υπολογισμός του είναι αρκετά σημαντικός καθώς σε συνθήκες ταμειυτήρα η θερμοκρασία συνήθως παραμένει σταθερή, ενώ η πίεση μεταβάλλεται λόγω μεταβολών στη μάζα του περιεχόμενου πετρελαίου. Επομένως, ο συντελεστής ισοθερμικής συμπιεστότητας εκφράζει πως θα μεταβληθεί η πίεση του πετρελαίου σε πραγματικές συνθήκες ταμειυτήρα καθώς εξελίσσεται η παραγωγή και ποσότητες υδρογονανθράκων μετακινούνται από τον ταμειυτήρα προς την επιφάνεια. Υπολογίζεται συνήθως μέσω της Εξίσωσης (2.2), μέσω των τιμών του σχετικού όγκου.

$$c_o = - \frac{1}{V_{rel}} \cdot \left( \frac{\partial V_{rel}}{\partial P} \right)_T \quad (2.2)$$

Υψηλές τιμές του συντελεστή  $c_o$  είναι ένδειξη ελαφρού πετρελαίου, καθώς μεταβάλλεται σημαντικά ο όγκος του συναρτήσει της πίεσης, λόγω της υψηλής ποσότητας διαλυμένου αερίου, ενώ χαμηλές τιμές  $c_o$  σημαίνουν το αντίθετο. Το πρότυπο διάγραμμα του συντελεστή  $c_o$  συναρτήσει της πίεσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.10. Όπως είναι λογικό, οι τιμές του μειώνονται όσο η πίεση αυξάνεται, λόγω της σταδιακής συμπίεσης του ρευστού. Επίσης παρατηρείται πως το διάγραμμα είναι φθίνον αλλά στρέφει τα κοίλα άνω, καθώς ο συντελεστής δεν φτάνει την τιμή του 0, μια και όλα τα ρευστά είναι έστω και ελάχιστα

συμπιέσιμα. Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί πως οι τιμές του συντελεστή προσδιορίζονται μόνο για μονοφασικό ρευστό, δηλαδή για πιέσεις ανώτερες της πίεσης σημείου φυσαλίδας.

Μονάδα μέτρησης του συντελεστή  $c_o$  στο SI είναι το  $\text{Pa}^{-1}$ . Στο διάγραμμα της Εικόνας (2.10), όμως, ο συντελεστής  $c_o$  είναι μετρημένος σε  $\text{MPsi}^{-1}$ .



Εικόνα 2.10: Πρότυπο διάγραμμα τιμών συμπιεστότητας πετρελαίου συναρτήσει της πίεσης

### 2.3.5 Συντελεστής $R_s$ (λόγος διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο).

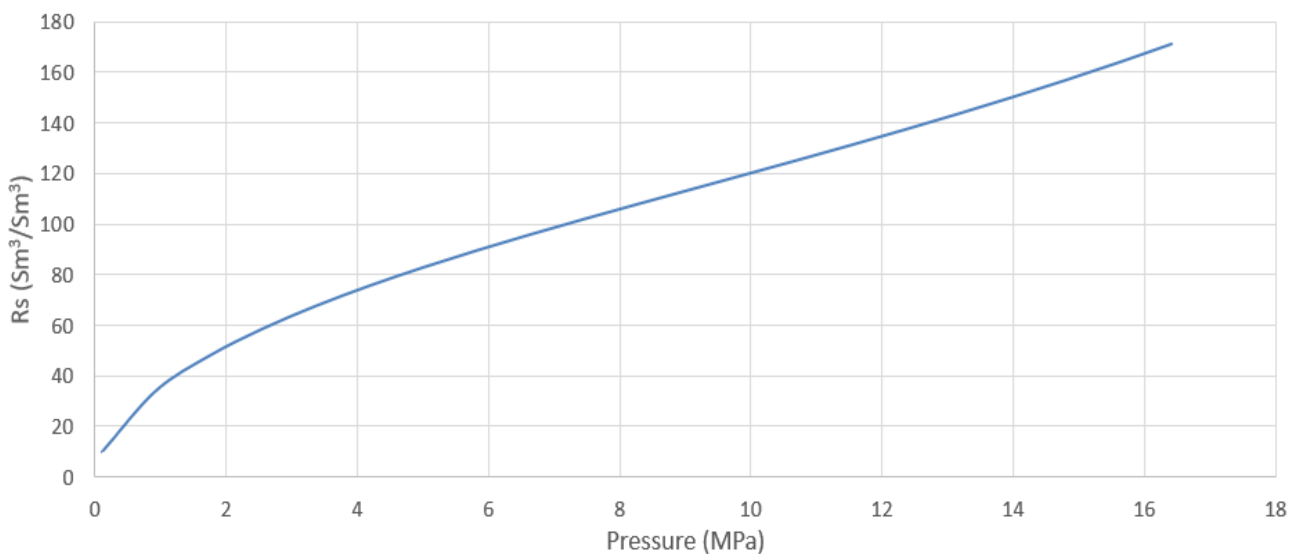
Ο συντελεστής  $R_s$  υπολογίζεται μέσω της Εξίσωσης 2.3 και ουσιαστικά ισούται με τον μέγιστο όγκο του αερίου, μετρημένου σε κανονικές συνθήκες (scf – standard cubic feet), ο οποίος μπορεί να διαλυθεί σε ένα βαρέλι πετρελαίου, πάλι μετρημένο σε κανονικές συνθήκες (stb – standard barrel), όταν αυτά μεταφερθούν σε συνθήκες ταμειυτήρα. Μετριέται σε scf/stb είτε σε  $(\text{Sm}^3/\text{Sm}^3)$  (μονάδες SI). Να σημειωθεί πως η μονάδα scf (standard cubic feet) αντιστοιχεί σε κυβικά πόδια αερίου σε συνθήκες επιφάνειας, η stb (standard barrels) αντιστοιχεί σε βαρέλια πετρελαίου σε συνθήκες επιφάνειας, ενώ ο συμβολισμός “S” σημαίνει “standard”.

$$R_s = \frac{V_{g(sc)}}{V_{o(sc)}} \quad (2.3)$$



Ουσιαστικά, ο συντελεστής  $R_s$  είναι ένας τρόπος προσδιορισμού της ποσότητας διαλυμένου αερίου που περιέχεται σε ένα πετρέλαιο. Όσο υψηλότερη τιμή  $R_s$  έχει ένα δείγμα, τόσο περισσότερο διαλυμένο αέριο περιέχει, επομένως τόσο ελαφρύτερο είναι.

Το πρότυπο διάγραμμα του συντελεστή  $R_s$  (το οποίο μετριέται σε μονάδες SI) παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.11. Όπως είναι λογικό, καθώς η πίεση μειώνεται σε τιμές μικρότερες αυτής του κορεσμού (το οποίο ισούται με 200 bar στη συγκεκριμένη περίπτωση), οι τιμές του  $R_s$  επίσης μειώνονται καθώς το διαλυμένο αέριο ελευθερώνεται από το δείγμα όλο και περισσότερο. Στην ατμοσφαιρική πίεση, η τιμή του  $R_s$  ενός δείγματος πλησιάζει το 0, μιας και δεν υπάρχει σχεδόν καθόλου αέριο διαλυμένο στο δείγμα. Όσον αφορά τιμές πίεσης υψηλότερες από εκείνη του κορεσμού, ο συντελεστής  $R_s$  παραμένει σταθερός, μιας και δεν επηρεάζεται το διαλυμένο αέριο του δείγματος.



Εικόνα 2.11: Πρότυπο διάγραμμα τιμών συντελεστή  $R_s$  συναρτήσει της πίεσης

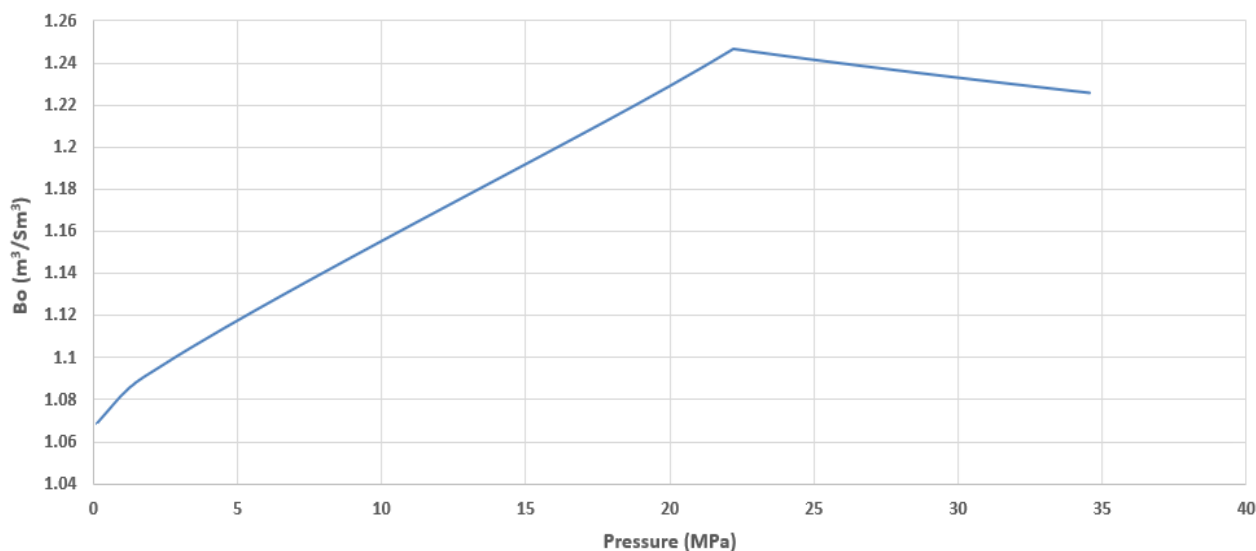
### 2.3.6 Συντελεστής $B_o$ (συντελεστής μεταβολής όγκου του πετρελαίου-oil formation volume factor).

Ο συντελεστής μεταβολής όγκου του πετρελαίου  $B_o$  ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του πετρελαίου σε συνθήκες ταμιευτήρα (Reservoir Conditions, RC), μαζί με τον όγκο του διαλυμένου αερίου σε αυτό προς τον όγκο που καταλαμβάνει η ίδια ποσότητα πετρελαίου όταν παραχθεί σε συνθήκες επιφάνειας. Υπολογίζεται, επομένως, μέσω της Εξίσωσης 2.4. Μετριέται σε rb/stb είτε σε  $\text{m}^3/\text{Sm}^3$  (μονάδες SI). Να σημειωθεί πως η μονάδα μέτρησης rb (reservoir barrels) αντιστοιχεί σε βαρέλια σε συνθήκες ταμιευτήρα.

$$B_o = \frac{V_o(RC)}{V_o(SC)} \quad (2.4)$$

Ουσιαστικά αντικατοπτρίζει πόση ποσότητα πετρελαίου θα παραλειφθεί στην επιφάνεια, σε σχέση με τον όγκο του πετρελαίου που απομαστεύεται από τον ταμιευτήρα. Είναι ύψιστης σημασίας, καθώς για οικονομικούς λόγους το ιδανικό είναι να παραλαμβάνεται όσο περισσότερο αέριο γίνεται στην επιφάνεια. Επομένως, η επιθυμητή τιμή του  $B_o$  είναι η μικρότερη δυνατή. Στην Εικόνα 2.12, παρουσιάζεται το πρότυπο διάγραμμα του συντελεστή  $B_o$  συναρτήσει της πίεσης.

Το πρότυπο διάγραμμα του συντελεστή  $B_o$ , το οποίο μετριέται σε μονάδες SI, συναρτήσει της πίεσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.12. Καθώς η πίεση μειώνεται, ενώ παράλληλα βρίσκεται πάνω από το σημείο φυσαλίδας ( $P_b$ ), παρατηρείται αύξηση των τιμών του συντελεστή, η οποία οφείλεται στην (περιορισμένη) εκτόνωση του πετρελαίου εξαιτίας της μειούμενης πίεσης. Καθώς όμως η πίεση μειώνεται, ενώ παράλληλα βρίσκεται κάτω από την πίεση του σημείου φυσαλίδας, ο συντελεστής  $B_o$  μειώνεται, επειδή το αέριο που βρίσκεται διαλυμένο στο πετρέλαιο ελευθερώνεται, μειώνοντας έτσι τον όγκο του ρευστού (τον αριθμητή της εξίσωσης).



Εικόνα 2.12: Πρότυπο διάγραμμα τιμών συντελεστή  $B_o$  συναρτήσει της πίεσης

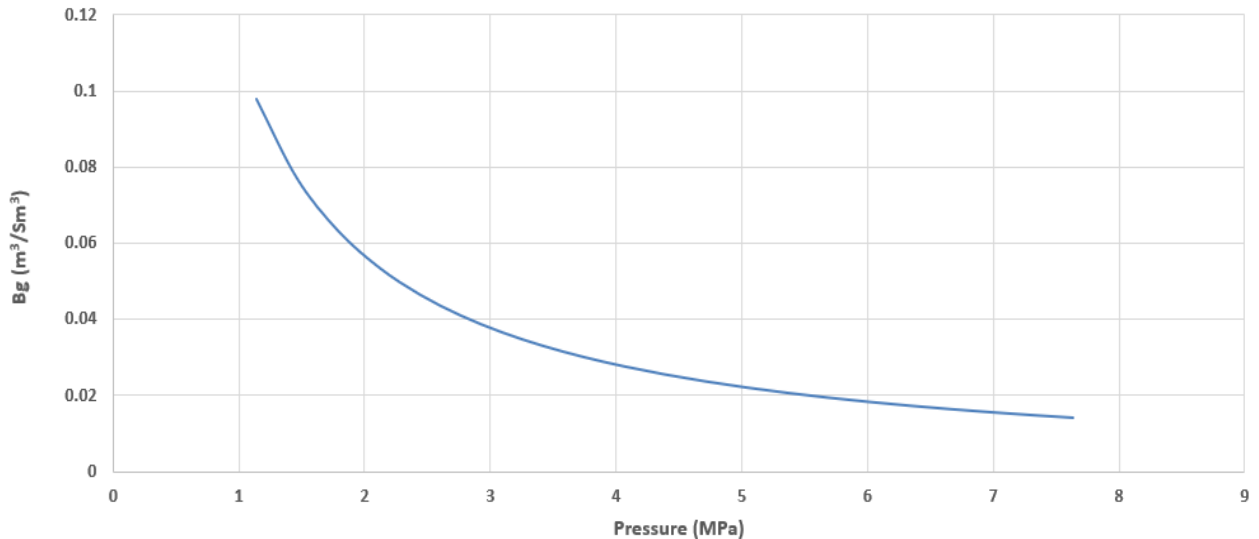
Υψηλές τιμές  $B_o$  είναι ένδειξη δείγματος ελαφριού πετρελαίου, καθώς περισσότερο αέριο ελευθερώνεται από αυτό κατά τη μεταφορά του σε συνθήκες επιφάνειας. Για πετρέλαια μέσης πτητικότητας, μια τυπική τιμή του  $B_o$  είναι 1.25 rb/stb, ενώ, όπως είναι λογικό, η τιμή

του  $B_o$  δεν μπορεί να γίνει μικρότερη από 1. Τιμές του  $B_o$  κοντά στο 1 είναι ενδείξεις πετρελαίου πολύ χαμηλής πτητικότητας.

### 2.3.7 Συντελεστής $B_g$ (συντελεστής μεταβολής όγκου του αερίου – gas formation volume factor).

Ο συντελεστής μεταβολής όγκου του αερίου  $B_g$  ισούται με τον όγκο του αερίου που έχει ελευθερωθεί από το ρευστό συνθήκες ταμιευτήρα, προς τον όγκο του αερίου του ίδιου ρευστού που παραλαμβάνεται σε συνθήκες επιφάνειας. Υπολογίζεται με την εξίσωση 2.5. Η μονάδα μέτρησης του στο SI είναι  $m^3/Sm^3$ , ενώ συχνά μετριέται και σε rb/stb. Ουσιαστικά, η γνώση του συντελεστή  $B_g$  βοηθάει στην κατανόηση της ποσότητας αερίου που θα παραλειφθεί στην επιφάνεια, βοηθώντας έτσι στη δημιουργία των πλάνων εκμετάλλευσης. Το πρότυπο διάγραμμα του συντελεστή  $B_g$ , το οποίο μετριέται σε μονάδες SI συναρτήσει της πίεσης, παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.13.

$$B_g = \frac{V_g(RC)}{V_g(SC)} \quad (2.5)$$



Εικόνα 2.13: Πρότυπο διάγραμμα τιμών συντελεστή  $B_g$  συναρτήσει της πίεσης

### 2.3.8 Συντελεστής απόκλισης $Z$ (Z-factor).

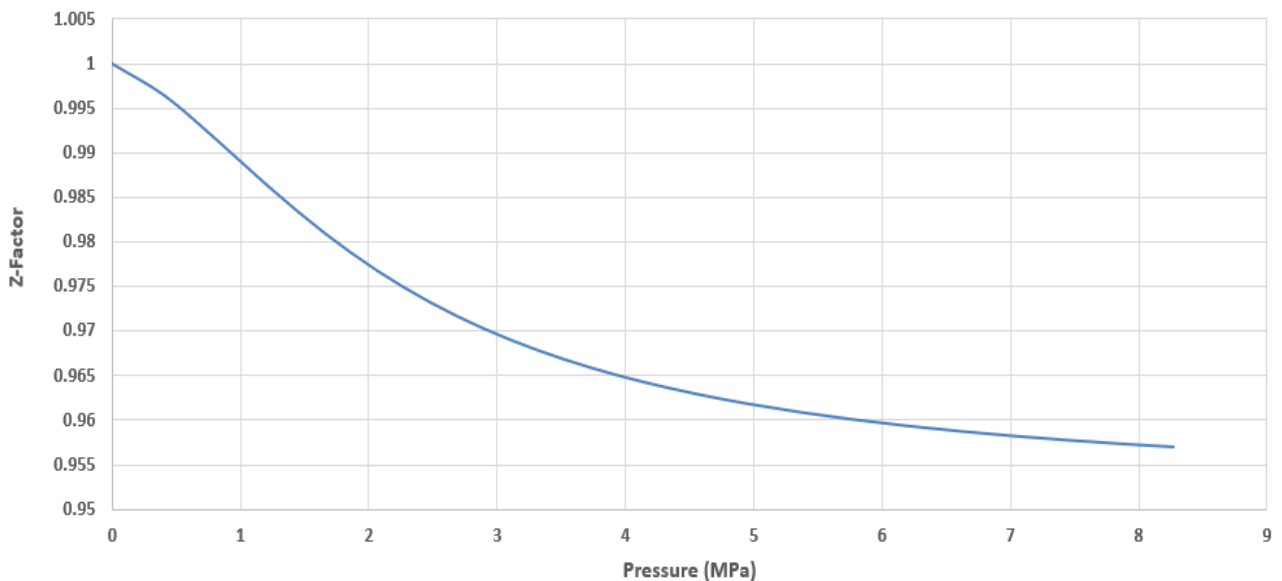
Ο συντελεστής απόκλισης  $Z$  εκφράζει το βαθμό απόκλισης του αερίου από την ιδανική κατάσταση. Σύμφωνα με τον νόμο των τέλειων αερίων, ισχύει η Εξίσωση 2.6.

$$PV = nRT \quad (2.6)$$

Για πραγματικά όμως αέρια και για μεγάλες πιέσεις, ο νόμος αυτός δεν είναι ακριβής. Η συμπεριφορά των πραγματικών αέριων εκφράζεται από την Εξίσωση 2.7, όπου  $Z$  ο συντελεστής απόκλισης.

$$PV = nZRT \quad (2.7)$$

Το πρότυπο διάγραμμα του συντελεστή απόκλισης  $Z$  συναρτήσει της πίεσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.14. Για πιέσεις κοντά στην ατμοσφαιρική, τα αέρια συμπεριφέρονται ως ιδανικά, οπότε ο συντελεστής πλησιάζει την τιμή 1. Όσο η πίεση αυξάνεται, μεταβάλλονται περισσότερο οι τιμές του συντελεστή και το αέριο έχει μεγαλύτερη απόκλιση από την ιδανική συμπεριφορά.



Εικόνα 2.14: Πρότυπο διάγραμμα τιμών συντελεστή απόκλισης  $Z$  συναρτήσει της πίεσης

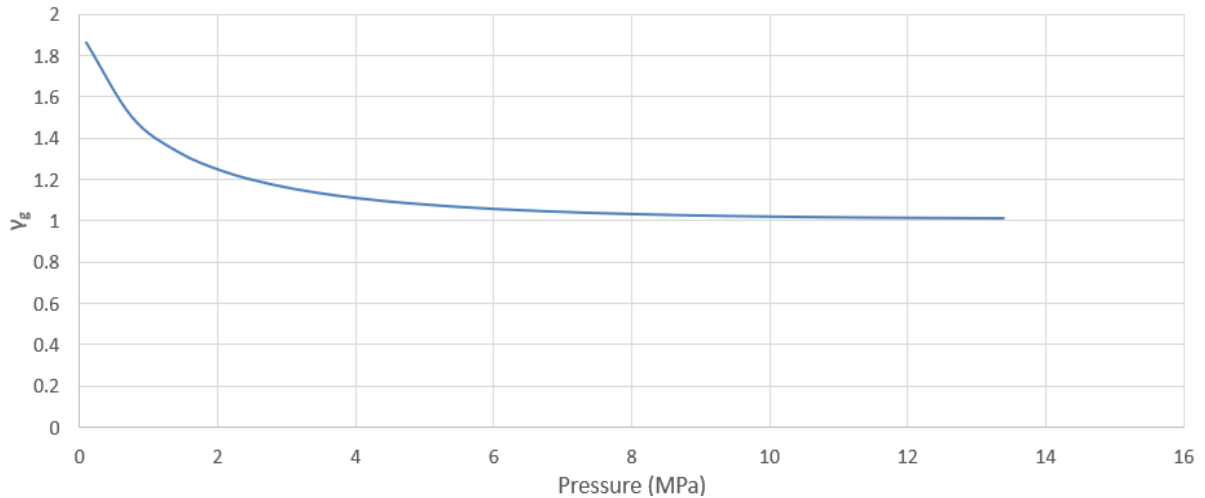
### 2.3.9 Σχετική Πυκνότητα αερίου $\gamma_g$ (gas relative density).

Η σχετική πυκνότητα αερίου  $\gamma_g$  ορίζεται ως ο λόγος της πυκνότητας του αερίου σε επιφανειακές συνθήκες ως προς αυτή του αέρα στις ίδιες συνθήκες. Υπολογίζεται μέσω της Εξίσωσης 2.8, ως ο λόγος του μοριακού βάρους του αερίου σε συγκεκριμένη πίεση προς το μοριακό βάρος του αέρα σε κανονικές συνθήκες (ίσο με 28.96 g/mol).

$$\gamma_g = \frac{MW_g}{MW_{air}} \quad (2.8)$$

Στην Εικόνα 2.15, παρουσιάζεται το πρότυπο διάγραμμα της σχετικής πυκνότητας αερίου συναρτήσει της πίεσης. Όσο η πίεση μειώνεται, η σχετική πυκνότητα αυξάνεται, επειδή τα

βαρύτερα αέρια στοιχεία που ελευθερώνονται από το δείγμα αργότερα (στις χαμηλότερες πιέσεις), έχουν μεγαλύτερο μοριακό βάρος. Όπως είναι λογικό, η σχετική πυκνότητα μετριέται για τιμές της πίεσης μικρότερες από την πίεση σημείου φυσαλίδας.



Εικόνα 2.15: Πρότυπο διάγραμμα τιμών σχετικής πυκνότητας αερίου συναρτήσει της πίεσης

### 2.3.10 Πυκνότητα API (API Gravity).

Η πυκνότητα API υπολογίζεται μέσω της Εξίσωσης 2.9. Ως  $\gamma_g$  συμβολίζεται η σχετική πυκνότητα του πετρελαίου προς το νερό στους 60°F, η οποία υπολογίζεται με τη σειρά της με την Εξίσωση 2.10 ως τον λόγο της πυκνότητας του πετρελαίου στους 60°F προς την πυκνότητα του νερού στους 60°F. Είναι μια ένδειξη της πτητικότητας του πετρελαίου. Μεγαλύτερες τιμές API είναι ένδειξη ελαφρύτερου πετρελαίου, ενώ χαμηλότερες τιμές είναι ένδειξη βαρύτερου πετρελαίου.

$$API = \frac{141.5}{\gamma_{g_{60}}} - 131.5 \quad (2.9)$$

$$\gamma_{g_{60}} = \frac{\rho_{oil(60F)}}{\rho_{water(60F)}} \quad (2.10)$$

Γενικά, η συσχέτιση των τιμών της πυκνότητας API με την πτητικότητα των πετρελαϊκών ρευστών παρουσιάζεται στον πίνακα:

Ρευστό	Πυκνότητα API
Βαρύ Πετρέλαιο (Heavy Oil)	<20
Μαύρο Πετρέλαιο (Black Oil)	30-45

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικές Τιμές Πυκνότητας API

Σημαντικό είναι να σημειωθεί πως δεν υπάρχει ρευστό με πυκνότητα API μικρότερη του 10, καθώς η ελάχιστη τιμή της σχετικής πυκνότητας  $\gamma_g$  ισούται με 1.

### 2.3.11 Ιξώδες ( $\mu$ )

Η φυσική έννοια του ιξώδους αντιστοιχεί στην αντίσταση που παρουσιάζουν τα πετρελαϊκά ρευστά στη ροή. Αποτελεί, δηλαδή, το μέγεθος της εσωτερικής τριβής των μορίων των ρευστών. Γενικά, μια μεγαλύτερη τιμή ιξώδους είναι ένδειξη βαρύτερου πετρελαίου, ενώ μια μικρότερη τιμή ιξώδους είναι ένδειξη ελαφρύτερου.

Μονάδα μέτρησης του ιξώδους στο SI είναι το  $\text{N}\cdot\text{sec}/\text{m}^2$ .

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ PVT

Όπως προαναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, οι πειραματικές δοκιμές PVT στη Μηχανική Πετρελαίων είναι ο πιο αξιόπιστος τρόπος με τον οποίο μπορούν να προσδιοριστούν οι ογκομετρικές (PVT) ιδιότητες των ρευστών, και επομένως να κατανοηθεί η ογκομετρική συμπεριφορά του ρευστού, συναρτήσει των μεταβαλλόμενων τιμών της πίεσης και της θερμοκρασίας. Έτσι, ο Μηχανικός μπορεί να προσομοιώσει με ακρίβεια τον ταμιευτήρα και να εφαρμόσει τις κατάλληλες καταστατικές εξισώσεις, να εκτιμήσει την ποσότητα του παραγόμενου πετρελαίου στην επιφάνεια, να αποφασίσει εάν είναι απαραίτητη η διεξαγωγή τεχνικών ενισχυμένης ανάκτησης πετρελαίου (EOR) και γενικότερα να αναπτύξει το κατάλληλο πλάνο παραγωγής.

Οι δοκιμές PVT διεξάγονται από τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Γρήγορα έγινε αισθητή η σημασία τους στη Μηχανική των ταμιευτήρων, όταν κατανοήθηκε ότι η συμπεριφορά των ρευστών του ταμιευτήρα συναρτήσει της πίεσης και της θερμοκρασίας επηρεάζει σημαντικά την πίεση του ταμιευτήρα, και επομένως την ικανότητά του να παράγει πετρέλαιο, αλλά και τον όγκο και την ποιότητα των παραγόμενων ρευστών. Κατά την παραγωγή πετρελαίου, η επικρατούσα θερμοκρασία, δηλαδή η θερμοκρασία του ταμιευτήρα, συνήθως μένει σταθερή, ενώ η πίεση μεταβάλλεται δραματικά κατά τη μεταφορά του πετρελαίου προς την επιφάνεια. Για τον λόγο αυτό, κατά την εκτέλεση των συγκεκριμένων δοκιμών, το δείγμα το οποίο μελετάται έχει σταθερή θερμοκρασία σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής (ίση με τη θερμοκρασία ταμιευτήρα), ενώ η πίεση του μειώνεται σταδιακά (σε βήματα). Κατά τον τρόπο αυτό προσομοιώνεται η διαδικασία της παραγωγής στο εργαστήριο, χωρίς όμως απόλυτη ακρίβεια, μιας και η ακριβής πορεία που ακολουθεί το ρευστό κατά την παραγωγή είναι ουσιαστικά άγνωστη (R. Di Primio, 1998). Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών συνήθως συνδυάζονται, με σκοπό να εξαχθούν τα απαιτούμενα δεδομένα για την ογκομετρική συμπεριφορά των ρευστών κατά την παραγωγή και για τον προσδιορισμό των PVT ιδιοτήτων των ρευστών που θα την έκαναν πιο κατανοητή.

Για την διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών, χρειάζεται πρώτα να ολοκληρωθεί η προετοιμασία του ταμιευτήρα (well conditioning), η δειγματοληψία των ρευστών και η ανάλυση της σύστασής τους. Τα 3 αυτά βήματα θα αναλυθούν στη συνέχεια με περισσότερες λεπτομέρειες.

---

### 3.1 Προετοιμασία Ταμιευτήρα

Η κατάλληλη προετοιμασία του ταμιευτήρα πριν τη δειγματοληψία είναι απαραίτητη για τη λήψη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων, δηλαδή δειγμάτων των οποίων η σύσταση και οι ογκομετρικές ιδιότητες ταιριάζουν με τα χαρακτηριστικά αυτά του ρευστού του ταμιευτήρα. Εκτελείται μέσω των παρακάτω βημάτων :

- Ο ταμιευτήρας πρέπει αρχικά, μέχρι τη στιγμή της δειγματοληψίας, να έχει ήδη παραγάγει αρκετή ποσότητα πετρελαίου έτσι ώστε να έχουν αφαιρεθεί από αυτόν τα διατρητικά υγρά, τα οξέα ή οποιοδήποτε άλλο υγρό έχει αναμιχθεί μέσα σε αυτόν από τις φάσεις της διάνοιξης και ολοκλήρωσης της γεώτρησης. Η ύπαρξη τέτοιων ρευστών στον ταμιευτήρα θα επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα των δοκιμών.
- Έπειτα από την αρχική φάση του καθαρισμού από τα μολυσματικά αυτά ρευστά, ο ρυθμός παραγωγής της γεώτρησης μειώνεται, συνήθως στη μισή τιμή του αρχικού ρυθμού παραγωγής. Ο ταμιευτήρας πρέπει να παράγει στο ρυθμό αυτό για τουλάχιστον 24 ώρες και στην περίπτωση βαριού πετρελαίου μπορεί να χρειαστεί να παράγει μέχρι 48 ώρες, έτσι ώστε να σταθεροποιηθούν οι διάφορες παράμετροι που επιβλέπονται.
- Επιπλέον, η πτώση της πίεσης στον ταμιευτήρα λόγω της παραγωγής (pressure drawdown) πρέπει να παραμείνει αρκετά χαμηλή για αρκετές ημέρες, έτσι ώστε να μη πέσει η τιμή της πίεσής του κάτω από την πίεση του σημείου φυσαλίδας. Σε περίπτωση που η πίεση του ταμιευτήρα πέσει σε ανεπιθύμητα επίπεδα, ακολουθεί μια περίοδος διακοπής της λειτουργίας διάρκειας 1-3 ημερών, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πτώση πίεσης και να αυξηθεί η πίεση του ταμιευτήρα πάνω από την πίεση του σημείου φυσαλίδας, υγροποιώντας έτσι το αέριο που έχει ελευθερωθεί.
- Τέλος, κατά τη περίοδο της μειωμένης παραγωγής, ο ταμιευτήρας πρέπει να βρίσκεται υπό στενή παρακολούθηση, έτσι ώστε να παρατηρηθεί τότε έχει επιτευχθεί η σταθεροποίηση των τιμών της πίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης, του ρυθμού παραγωγής και του λόγου αερίου/υγρού του παραγόμενου στην επιφάνεια ρευστού για τον ανάλογο αριθμό ημερών (με μια απόκλιση μέχρι περίπου 2%). Ουσιαστικά, μόλις γίνει η σταθεροποίηση των παραγόντων αυτών, ενώ έχει διασφαλισθεί η απομάκρυνση των ρυπογόνων ρευστών από τον ταμιευτήρα και η μειωμένη πτώση της πίεσής του, ολοκληρώνεται η φάση της προετοιμασίας.

### 3.2 Δειγματοληψία

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 3.1, κύριος στόχος της δειγματοληψίας είναι η λήψη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων. Για να γίνει αυτό, είναι αναγκαίο να διασφαλισθεί η τήρηση ορισμένων καταστάσεων κατά τη δειγματοληψία, οι οποίες είναι οι εξής (N. R. Nagarajan, 2006).



- 
- Η αποφυγή ύπαρξης μολυσματικών ρευστών στον ταμιευτήρα, πράγμα που αποφεύγεται μέσω της προετοιμασίας, η οποία αναλύθηκε στην Ενότητα 3.1
  - Η αποφυγή διφασικής ροής στον ταμιευτήρα, η οποία συμβαίνει όταν η πίεσή του είναι χαμηλότερη από την πίεση του σημείου φυσαλίδας. Η συγκεκριμένη κατάσταση αποφεύγεται επίσης μέσω της κατάλληλης προετοιμασίας
  - Η λήψη επαρκούς ποσότητας (όγκου) ρευστού
  - Η διατήρηση των αρχικών ιδιοτήτων που έχουν τα ρευστά του ταμιευτήρα

Γενικότερα, υπάρχουν 2 είδη δειγματοληψίας, η δειγματοληψία από τον πυθμένα της γεώτρησης (bottom-hole sampling) και η δειγματοληψία από το διαχωριστή (separator sampling). Το πρώτο είδος δειγματοληψίας είναι αρκετά πιο αξιόπιστο όσον αφορά τη λήψη αντιπροσωπευτικών δειγμάτων, όμως συχνά προτιμάται η λήψη δειγμάτων από τον διαχωριστή, για λόγους πρακτικότητας, οικονομίας και ασφάλειας, μια και τα δείγματα λαμβάνονται με ευκολία σε συνθήκες επιφάνειας.

### **3.2.1 Δειγματοληψία Πυθμένα (Bottom-hole Sampling)**

Η δειγματοληψία από τον πυθμένα γίνεται όταν η γεώτρηση είναι κλειστή, μέσω ειδικών εργαλείων, όπως το Repeat Formation Testing (RFT) της Schlumberger, το οποίο κατεβαίνει μέσα στη γεώτρηση και λειτουργεί στο βάθος του ταμιευτήρα μέσω ενός συστήματος καλωδίων. Αφού κατεβεί στην κορυφή της ζώνης παραγωγής, ο θάλαμος του δοχείου ανοίγει μέσω ενός υδραυλικού συστήματος ή μέσω ενός ηλεκτρικού σήματος που στέλνεται από την επιφάνεια. Καθώς ανοίγει ο θάλαμος, εισέρχεται το αργό πετρέλαιο σε πολύ αργούς ρυθμούς και με σταθερή πίεση, έτσι ώστε να αποφευχθεί η απελευθέρωση του περιεχόμενου αερίου. Στη συνέχεια, ένα έμβολο κλείνει τον θάλαμο και το δείγμα ανέρχεται στην επιφάνεια (Ahmed, 2016).

Απαραίτητο είναι η δειγματοληψία να γίνει όταν η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης είναι υψηλότερη από την πίεση σημείου φυσαλίδας. Επιπλέον, αναγκαίο είναι να μην υπάρξουν διαρροές κατά τη δειγματοληψία ή κατά τη μεταφορά του από το δοχείο δειγματοληψίας στην πειραματική διάταξη.

Για την επιβεβαίωση της αντιπροσωπευτικότητας των δειγμάτων, συνήθως συλλέγονται πολυάριθμα δείγματα, των οποίων εκτιμάται η συνέπεια, μέσω του προσδιορισμού της πίεσης κορεσμού τους σε επιφανειακές συνθήκες. Δείγματα των οποίων τα σημεία φυσαλίδας έχουν απόκλιση μικρότερη του 2% μεταξύ τους θεωρούνται αντιπροσωπευτικά και μπορούν να σταλούν στο εργαστήριο PVT. Τουλάχιστον 3 δείγματα όγκου περίπου 600

---

cm<sup>3</sup> πρέπει να ληφθούν, έτσι ώστε να βεβαιωθεί ότι 1 από αυτά είναι αντιπροσωπευτικό (Σταματάκη, 2004).

Το συγκεκριμένο είδος δειγματοληψίας είναι το πιο αξιόπιστο και για τον λόγο αυτό προτείνεται για όλα τα είδη ταμιευτήρων. Ορισμένες φορές, όμως, αποφεύγεται εξαιτίας του υψηλού κόστους και της ανάγκης για υψηλά εξειδικευμένο προσωπικό, μιας και είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει την κάθοδο εργαλείων στις δύσκολες και τις περίπλοκες συνθήκες που επικρατούν στους ταμιευτήρες.

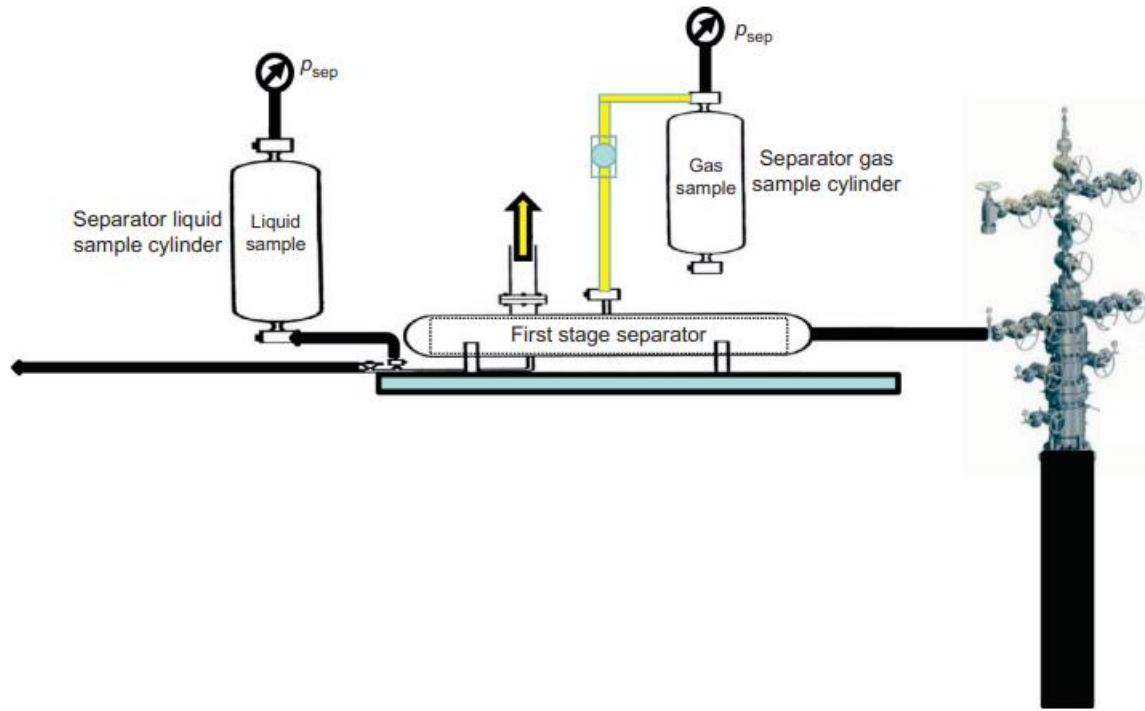
### **3.2.2 Δειγματοληψία Διαχωριστή (separator sampling)**

Η δειγματοληψία από τον διαχωριστή είναι συχνά η μόνη διαθέσιμη μέθοδος. Κατά τη διαδικασία αυτή, λαμβάνονται παραγόμενα δείγματα αερίου και υγρού τα οποία ρέουν από τον διαχωριστή της επιφάνειας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1. Έπειτα από τη συλλογή των δειγμάτων, αυτά ανασυντίθενται στις κατάλληλες αναλογίες για να δημιουργήσουν ένα ρευστό όμοιο με αυτό του ταμιευτήρα.

Η μέθοδος της επανασύνθεσης αερίου και πετρελαίου είναι αμφισβητούμενης εγκυρότητας. Το βασικό πρόβλημα κατά τη λήψη δειγμάτων αερίου και υγρού από τον διαχωριστή είναι η εκτίμηση της αναλογίας με την οποία θα πρέπει να ανασυνδυαστούν για να προκύψει ρευστό με σύσταση όμοια με αυτό του ταμιευτήρα. Η επανασύνθεση θεωρείται έγκυρη στην περίπτωση που η γεώτρηση παράγει με σταθεροποιημένη ροή, η πίεση στον πυθμένα είναι υψηλότερη της πίεσης σημείου φυσαλίδας και ο λόγος αερίου πετρελαίου στον διαχωριστή είναι σταθερός για διάστημα αρκετών ωρών πριν από τη λήψη του δείγματος. Για την επιβεβαίωση της αντιπροσωπευτικότητάς τους, συνήθως συνιστάται η λήψη 2 αερίων δειγμάτων όγκου τουλάχιστον ίσο με 20 lt και 2 υγρών δειγμάτων όγκου τουλάχιστον ίσο με 500 cm<sup>3</sup> (Ahmed, 2016), (Danesh, 1998).

Παρόλο που η δειγματοληψία από τον διαχωριστή θεωρείται λιγότερο έγκυρη, η εφαρμογή της έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Αρχικά, μπορούν με χαμηλό σχετικά κόστος να ληφθούν μεγάλοι όγκοι αερίων και υγρών δειγμάτων, χωρίς τη διακοπή της παραγωγής, όπως συμβαίνει στη δειγματοληψία από τον πυθμένα, καθιστώντας τη μια πιο οικονομική μέθοδο. Επίσης, οι συνθήκες παραγωγής του ταμιευτήρα είναι ευκολότερο να χαρακτηριστούν ως σταθερές και κάτι τέτοιο δεν χρειάζεται να διαρκέσει αρκετές ημέρες, παρά μόνο κάποιες ώρες πριν από τη δειγματοληψία. Τέλος, τονίζεται ξανά πως η διαδικασία λήψης δειγμάτων

είναι πολύ πιο απλή, μιας και γίνεται σε συνθήκες επιφάνειας, χωρίς την ανάγκη λήψης δειγμάτων από τις άγνωστες και περίπλοκες συνθήκες του ταμειυτήρα.



Εικόνα 3.1: Δείγματα Διαχωριστή (Ahmed, 2016).

### 3.3 Ανάλυση Σύστασης

#### 3.3.1 Διαδικασία ανάλυσης σύστασης

Το επόμενο βήμα μετά τη λήψη των δειγμάτων είναι η ανάλυση της σύστασής τους. Η γνώση των συστάσεων είναι αρκετά σημαντική για διάφορους λόγους, όπως για την γνώση του είδους του πετρελαίου που περιέχεται στον ταμειυτήρα, για να προβλεφθεί με εγκυρότητα η συμπεριφορά των φάσεων, για να χρησιμοποιηθεί στις θεωρητικές συσχετίσεις ογκομετρικών ιδιοτήτων κ.α. Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 2.1, τα πετρελαϊκά ρευστά περιέχουν χιλιάδες διαφορετικά συστατικά υδρογονανθράκων, των οποίων τα μοριακά βάρη κυμαίνονται από 16 g/mol (το μοριακό βάρος του μεθανίου, το οποίο είναι το απλούστερο συστατικό), μέχρι μοριακά βάρη τα οποία ισούνται με τετραψήφιους αριθμούς.

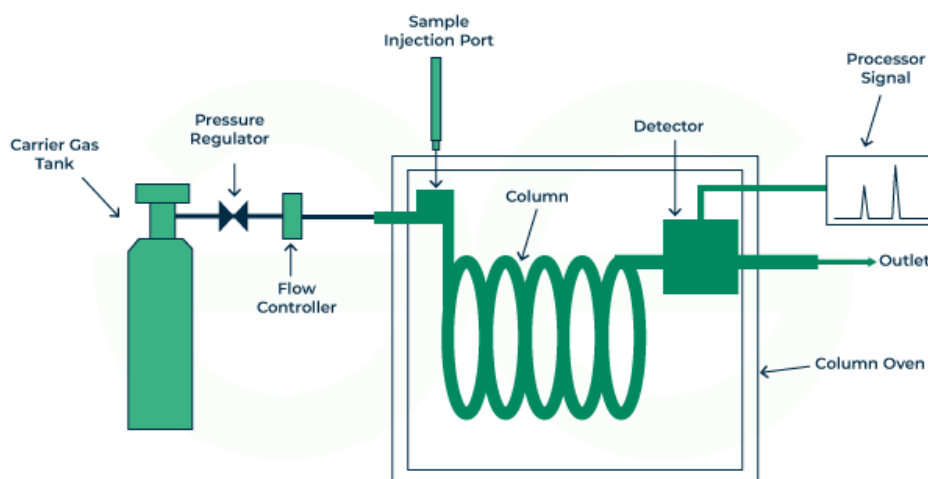
Με σκοπό να εκτελεσθεί η ανάλυση της σύστασης, πρέπει αρχικά τα δείγματα να βρεθούν σε συνθήκες επιφάνειας (14.7 psia & 60°F). Όσον αφορά τα δείγματα από τον πυθμένα,

αυτά πρέπει να ψυχθούν και να εκτονωθούν στις επιφανειακές συνθήκες. Καθώς τα δείγματα είναι μονοφασικά σε συνθήκες ταμειυτήρα, όταν εκτονωθούν συνθήκες επιφάνειας βρίσκονται σε 2 φάσεις, η κάθε μια από τις οποίες αναλύεται ξεχωριστά. Όσον αφορά τα δείγματα του διαχωριστή, εκείνα βρίσκονται ήδη σε συνθήκες επιφάνειας ή σε συνθήκες κοντά σε αυτές, οπότε ορισμένες φορές δεν χρειάζεται κάποια ανάλογη διαδικασία. Τις περισσότερες φορές, όμως, τα δείγματα αυτά βρίσκονται σε πίεση 70 bar και θερμοκρασία 50°C, οπότε κατά τη μεταφορά τους σε κανονικές συνθήκες δημιουργείται μια επιπλέον φάση αερίου (από τη μεταφορά του υγρού δείγματος στις κανονικές συνθήκες).

Υπάρχουν 2 κύριες μέθοδοι ανάλυσης της σύστασης, η αέρια χρωματογραφία (Gas chromatography - GC) και η απόσταξη του πραγματικού σημείου βρασμού (True boiling point distillation – TBP).

### 3.3.2 Αέρια χρωματογραφία

Η ανάλυση της σύστασης με την τεχνική της αέριας χρωματογραφίας είναι ειδικά προσαρμοσμένη για την ανάλυση αέριων δειγμάτων, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι δεν χρησιμοποιείται και για την ανάλυση των συστατικών της υγρής φάσης. Η ανάλυση εκτελείται με τον αέριο χρωματογράφο, μηχάνημα το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2: Διάταξη Αερίου Χρωματογράφου

Το δείγμα που είναι έτοιμο να αναλυθεί εισέρχεται στον αέριο χρωματογράφο μέσω του σημείου εισόδου (injection port). Το σημείο εισόδου έχει αυξημένη θερμοκρασία (μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία βρασμού των συστατικών), έτσι ώστε να εξατμιστούν

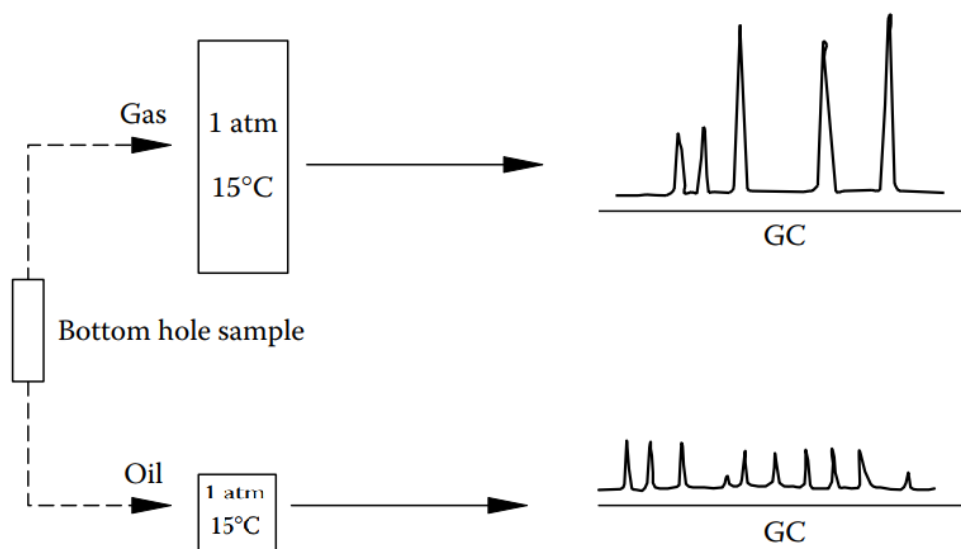
---

πλήρως τα συστατικά του δείγματος. Ένα φέρον αέριο (συνήθως ήλιο) ρέει μέσα στη σημείο όπου εισέρχεται το δείγμα και μετατοπίζει τα αέρια συστατικά του δείγματος σε έναν τριχοειδή σωλήνα (column). Μέσα στον σωλήνα συμβαίνει ο διαχωρισμός των συστατικών, καθώς αυτός είναι πληρωμένος στο εσωτερικό του με ένα προσροφητικό υλικό (στάσιμη φάση), το οποίο έχει την ικανότητα να συγκρατήσει και να απελευθερώσει τα συστατικά μετά από την πάροδο συγκεκριμένου χρόνου. Τα διάφορα συστατικά ταξιδεύουν μέσα από τη «στάσιμη φάση» σε διαφορετικές ταχύτητες, εξαναγκάζοντάς τα να διαχωριστούν. Επομένως, καθώς εξέρχονται από τον τριχοειδή σωλήνα και οδεύουν προς την έξοδο (outlet), οι διαφορετικές ταχύτητες εξόδου τους καταγράφονται από τον ανιχνευτή (detector), ο οποίος με τη σειρά του προωθεί τα αποτελέσματα σε ένα μηχάνημα εγγραφής (recorder). Αποτέλεσμα είναι, ένα γράφημα που αποκαλείται αεριοχρωματογράφημα, η μορφή του οποίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.3. Κάθε κορυφή του γραφήματος αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο συστατικό και η επιφάνεια κάτω από την κάθε κορυφή είναι ανάλογη της μάζας  $w_i$  κάθε συστατικού και χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το μοριακό κλάσμα του. Ο προσδιορισμός του μοριακού κλάσματος των συστατικών του δείγματος γίνεται μετά από σύγκριση με πρότυπες ουσίες.

Το μοριακό κλάσμα,  $z_i$ , ενός συστατικού  $i$  σε ένα μίγμα  $N$ -συστατικών υπολογίζεται μέσω της Εξίσωσης 3.1.:

$$z_i = \frac{\frac{w_i}{M_i}}{\sum_{j=1}^N \frac{w_j}{M_j}} \quad (3.1)$$

Όπου το  $w_i$  αναφέρεται στο βάρος του συστατικού, το  $M_j$  αναφέρεται στο μοριακό βάρος του συστατικού, ενώ τα  $i$  και  $j$  αναφέρονται σε ξεχωριστά συστατικά.



Εικόνα 3.3: Ανάλυση δείγματος πυθμένα

### 3.3.3 Απόσταξη σημείου βρασμού

Η τεχνική της απόσταξης του σημείου βρασμού (TBP) χρησιμοποιείται σε ρευστά υγρού πετρελαίου και διαχωρίζει τα συστατικά του ανάλογα με τα σημεία βρασμού τους. Το κάθε σημείο διαχωρισμού των στοιχείων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4, είναι αρκετό για να υπολογιστεί η πυκνότητα και το μοριακό βάρος της κάθε ομάδας ρευστών. Η συγκεκριμένη τεχνική δεν χρησιμοποιείται συχνά, αλλά μόνο όταν υπάρχει ανάγκη για τον ακριβή προσδιορισμό των βαρύτερων συστατικών ενός ρευστού. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4, ο προσδιορισμός των συστατικών ενός μίγματος μπορεί να φτάσει και σε συστατικά υδρογονανθράκων με 45 άτομα άνθρακα ( $C_{45}$ ), σε αντίθεση με την τεχνική της αέριας χρωματογραφίας, η οποία συνήθως σταματά την ανάλυση νωρίτερα. Η αβεβαιότητα για τον χαρακτηρισμό του μοριακού βάρους του κάθε συστατικού που ανήκει σε μια ομάδα υδρογονανθράκων (πχ  $C_{15}$ ) είναι περίπου 2%, ενώ φτάνει σε 5% για το βαρύ κλάσμα (πχ  $C_{45+}$ ).

Carbon Number	Boiling Range (°C)	"Average" Boiling Point (°C)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Molecular Weight
C <sub>6</sub>	36.5–69.2	63.9	0.685	84
C <sub>7</sub>	69.2–98.9	91.9	0.722	96
C <sub>8</sub>	98.9–126.1	116.7	0.745	107
C <sub>9</sub>	126.1–151.3	142.2	0.764	121
C <sub>10</sub>	151.3–174.6	165.8	0.778	134
C <sub>11</sub>	174.6–196.4	187.2	0.789	147
C <sub>12</sub>	196.4–216.8	208.3	0.800	161
C <sub>13</sub>	216.8–235.9	227.2	0.811	175
C <sub>14</sub>	235.9–253.9	246.4	0.822	190
C <sub>15</sub>	253.9–271.1	266	0.832	206
C <sub>16</sub>	271.1–287.3	283	0.839	222
C <sub>17</sub>	287–303	300	0.847	237
C <sub>18</sub>	303–317	313	0.852	251
C <sub>19</sub>	317–331	325	0.857	263
C <sub>20</sub>	331–344	338	0.862	275
C <sub>21</sub>	344–357	351	0.867	291
C <sub>22</sub>	357–369	363	0.872	305
C <sub>23</sub>	369–381	375	0.877	318
C <sub>24</sub>	381–392	386	0.881	331
C <sub>25</sub>	392–402	397	0.885	345
C <sub>26</sub>	402–413	408	0.889	359
C <sub>27</sub>	413–423	419	0.893	374
C <sub>28</sub>	423–432	429	0.896	388
C <sub>29</sub>	432–441	438	0.899	402
C <sub>30</sub>	441–450	446	0.902	416
C <sub>31</sub>	450–459	455	0.906	430
C <sub>32</sub>	459–468	463	0.909	444
C <sub>33</sub>	468–476	471	0.912	458
C <sub>34</sub>	476–483	478	0.914	472
C <sub>35</sub>	483–491	486	0.917	486
C <sub>36</sub>	—	493	0.919	500
C <sub>37</sub>	—	500	0.922	514
C <sub>38</sub>	—	508	0.924	528
C <sub>39</sub>	—	515	0.926	542
C <sub>40</sub>	—	522	0.928	556
C <sub>41</sub>	—	528	0.930	570
C <sub>42</sub>	—	534	0.931	584
C <sub>43</sub>	—	540	0.933	598
C <sub>44</sub>	—	547	0.935	612
C <sub>45</sub>	—	553	0.937	626

Εικόνα 3.4: Αποτέλεσμα ανάλυση σύστασης με TBP (Pedersen, 2007)

### 3.3.4 Ανασυνδυασμός συστάσεων

Ανάλογα με την τεχνική δειγματοληψίας του ρευστού (εάν το δείγμα έχει ληφθεί από τον πυθμένα ή από τον διαχωριστή), λαμβάνονται διαφορετικές συστάσεις, οι οποίες πρέπει να ανασυνδυαστούν για να αναπαρασταθεί το ρευστό του ταμιευτήρα. Ειδικότερα, εάν το δείγμα προέρχεται από τον πυθμένα, αρχικά βρίσκεται σε μια φάση. Για την ανάλυση της σύστασής του, όμως, πρέπει να μεταφερθεί σε κανονικές συνθήκες, όπου θα απαρτίζεται από μια υγρή και μια αέρια φάση συγκεκριμένου όγκου, των οποίων οι συστάσεις θα

---

προσδιοριστούν ξεχωριστά. Το μοριακό κλάσμα ενός συγκεκριμένου συστατικού  $i$  στο δείγμα του ταμιευτήρα, υπολογίζεται από την Εξίσωση 3.2:

$$Z_i = \frac{y_i \cdot \text{Mole gas} + x_i \cdot \text{Mole oil}}{\text{Mole reservoir fluid}} \quad (3.2)$$

Όπου  $y_i$  είναι το μοριακό κλάσμα του κάθε συστατικού στην αέρια φάση σε κανονικές συνθήκες, ενώ  $x_i$  το μοριακό κλάσμα στην υγρή φάση σε κανονικές συνθήκες.

Εάν το δείγμα προέρχεται από τον διαχωριστή, βρίσκεται σε πίεση και θερμοκρασία ανώτερες των κανονικών, ενώ λαμβάνονται 2 δείγματα, αερίου και υγρού αντίστοιχα. Κατά την περαιτέρω μεταφορά του υγρού του διαχωριστή σε κανονικές συνθήκες, λαμβάνονται 2 ρευστά, υγρό και αέριο σε κανονικές συνθήκες, με αποτέλεσμα να συγκεντρώνονται συνολικά τρία διαφορετικά δείγματα. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνεται δείγμα αέριας φάσης από τη μεταφορά του αερίου του διαχωριστή σε κανονικές συνθήκες, αέριο δείγμα από τη μεταφορά του υγρού πετρελαίου του διαχωριστή σε κανονικές συνθήκες και υγρό δείγμα από τη μεταφορά του υγρού πετρελαίου του διαχωριστή σε κανονικές συνθήκες. Ο τελικός ανασυνδυασμός της σύστασης επιτυγχάνεται με την Εξίσωση 3.3:

$$Z_i = \frac{y_i \cdot (\text{Mole separator gas} + x_i) \cdot \text{Mole separator oil}}{\text{Mole separator fluid}} \quad (3.3)$$

### 3.4 Εκτέλεση και Τύποι Ογκομετρικών Πειραμάτων

Η πραγματοποίηση των ογκομετρικών PVT πειραμάτων γίνεται σε ειδικές διατάξεις, οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλές προδιαγραφές και έχουν αποκτήσει αυστηρές πιστοποιήσεις, έτσι ώστε τα αποτελέσματα που παράγονται από τη διεξαγωγή των εργαστηριακών δοκιμών να χαρακτηρίζονται από μεγάλη ακρίβεια και να γίνονται αποδεκτά από την πετρελαϊκή βιομηχανία.

Η συσκευή στην οποία εισέρχεται το δείγμα και πραγματοποιούνται τα PVT πειράματα ονομάζεται PVT κελί (PVT cell) και η διάταξή της παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.5. Κατά τη διεξαγωγή των δοκιμών, η θερμοκρασία του κελιού συνήθως παραμένει σταθερή και ίση με τη θερμοκρασία του ταμιευτήρα, ενώ η πίεση μεταβάλλεται σταδιακά. Η μεταβολή της πίεσης γίνεται με μεταβολή του όγκου του κελιού, η οποία με τη σειρά της επιτυγχάνεται με την προσθήκη ή αφαίρεση νερού ή άλλων υγρών από το δοχείο του κελιού. Παλαιότερα, στα κελιά χρησιμοποιούταν για το λόγο αυτό υδράργυρος, όμως σήμερα στις περισσότερες χώρες έχει καταργηθεί η χρήση του για περιβαλλοντικούς λόγους και πλέον χρησιμοποιείται



---

νερό. Με τη χρήση νερού είναι δυνατόν να επιτευχθούν λειτουργικές τιμές πίεσης και θερμοκρασίας που αγγίζουν τα 25,000 psi και 200 °C, αντίστοιχα (R.H. Jacoby, 1967). Όπως προαναφέρθηκε, η διαδικασία αυτή συχνά προσομοιάζει τη διαδικασία της παραγωγής, κατά την οποία η θερμοκρασία μένει σταθερή και περίπου ίση με τη θερμοκρασία του ταμιευτήρα, ενώ η πίεση μειώνεται σταδιακά. Σε πολλές PVT δοκιμές, η αρχική πίεση του κελιού έχει αρκετά υψηλή τιμή, μεγαλύτερη από εκείνη του σημείου φυσαλίδας και υψηλότερη από την αρχική πίεση του ταμιευτήρα, και μέσω της εκτόνωσης του όγκου του κελιού, η πίεση πέφτει σταδιακά (ανά βήματα), ενώ καταγράφονται οι επιθυμητές μεταβολές που συμβαίνουν στο δείγμα. Η διαδικασία αυτή δεν είναι κάθε φορά η ίδια. Υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις ανάλογα με την κάθε δοκιμή και τις ιδιότητες που επιδιώκεται να προσδιοριστούν από αυτή.

Στις επόμενες ενότητες θα παρουσιαστούν οι κυριότερες εργαστηριακές δοκιμές που εκτελούνται στα πετρελαϊκά ρευστά.



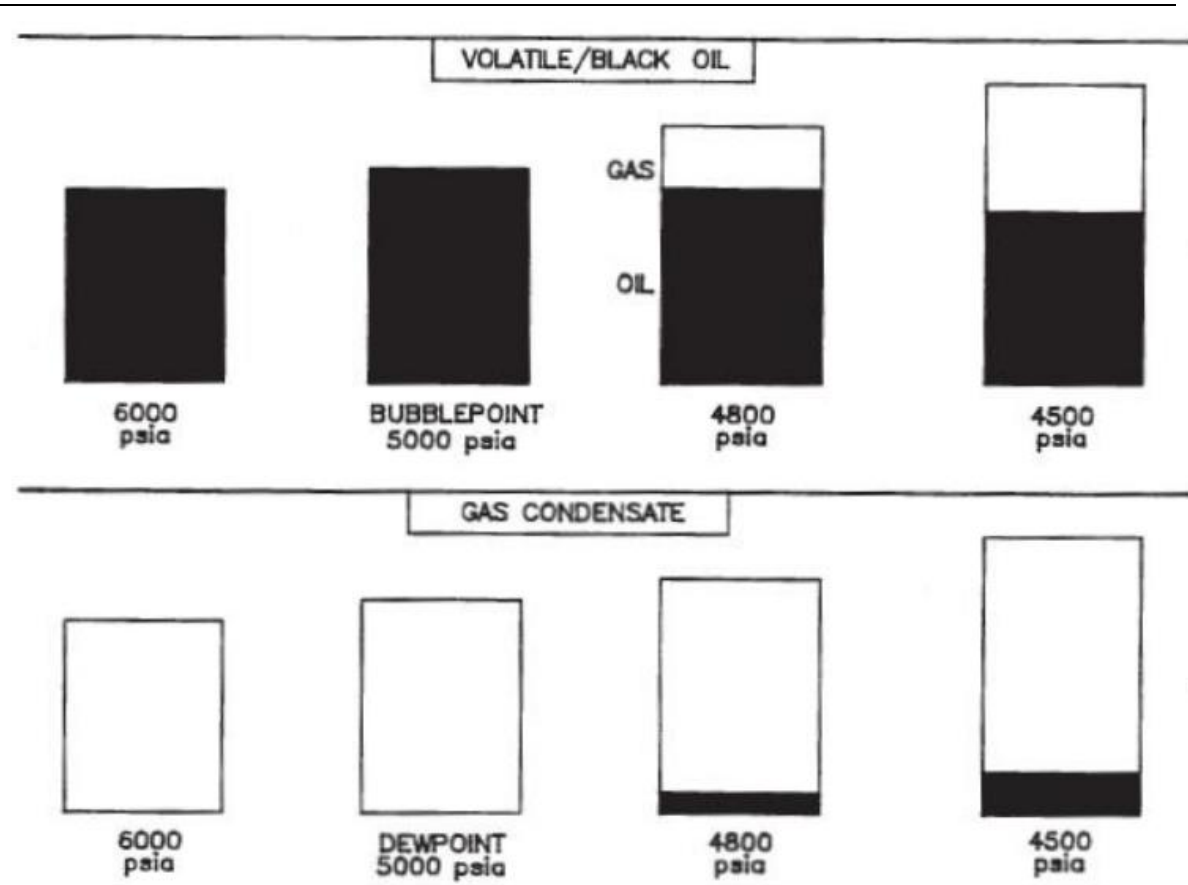
Εικόνα 3.5: PVT κελί

---

### 3.4.1 Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση υπό σταθερή σύσταση (Constant Composition Expansion, CCE)

Η δοκιμή αυτή μπορεί να γίνει τόσο σε δείγματα υγρού πετρελαίου (σε πτητικό ή μαύρο πετρέλαιο), όσο και σε δείγματα αερίων συμπυκνωμάτων. Κατά τη δοκιμή, μια σταθερή ποσότητα από τα δείγμα μεταφέρεται στο κελί υψηλής πίεσης, η θερμοκρασία του οποίου διατηρείται σταθερή κατά την διάρκεια της δοκιμής και συνήθως ίση με τη θερμοκρασία του ταμιευτήρα. Ο όγκος του κελιού γενικά ποικίλλει, αλλά συνήθως δεν ξεπερνά τα 400 cm<sup>3</sup>. Για να διατηρηθεί το δείγμα σε μια μόνο φάση, η πίεση του κελιού, όπως και προαναφέρθηκε, είναι αρχικά αρκετά υψηλή και σημαντικά υψηλότερη από την αρχική πίεση του ταμιευτήρα, και φυσικά υψηλότερη από την πίεση του σημείου κορεσμού του δείγματος (Pedersen, 2007).

Στη συνέχεια, ο αρχικός όγκος του δείγματος καταγράφεται και ξεκινάει η σταδιακή μείωση της πίεσης του κελιού μέσω εκτόνωσης του όγκου του, η οποία γίνεται με έμβολο, μέχρι η πίεση αυτή να φτάσει περίπου τα 700-1,500 psi. Σε κάθε στάδιο μείωσης της πίεσης, καταγράφεται ο όγκος του συστήματος, ο όγκος των επιμέρους φάσεων και η πίεση του κελιού. Επίσης, προσδιορίζεται η πίεση κορεσμού, η πίεση δηλαδή κατά την οποία εμφανίζεται η νέα φάση. Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, στα υγρά δείγματα η πίεση αυτή εντοπίζεται μόλις εμφανιστεί η πρώτη φυσαλίδα αερίου, ενώ στα αέρια δείγματα εντοπίζεται μόλις εμφανιστεί η πρώτη σταγόνα υγρού.



Εικόνα 3.6: Σχηματική απεικόνιση πειράματος ισοθερμοκρασιακής εκτόνωσης σταθερής σύστασης (CCE) για πτητικό ή μαύρο πετρέλαιο (επάνω) και για αέριο συμπύκνωμα (κάτω) (Whitson, 2000).

Σε κάθε βήμα πίεσης (περίπου 5-200 psi τη φορά), το δείγμα αναδεύεται μέσω της περιστροφής του κελιού. Αυτό γίνεται για να αποφευχθεί το φαινόμενο του υπερκορεσμού (supersaturation), κατά το οποίο το δείγμα μένει σε μια φάση, ενώ κανονικά θα έπρεπε να βρίσκεται σε δύο. Το φαινόμενο αυτό συνήθως παρατηρείται στα 50-100 psi κάτω από την πίεση του σημείου φυσαλίδας και εμποδίζει τον ακριβή προσδιορισμό του σημείου φυσαλίδας (Whitson, 2000).

Ουσιαστικά, σκοπός του συγκεκριμένου πειράματος είναι, όσον αφορά τα δείγματα υγρού πετρελαίου, να προσδιοριστούν οι εξής ογκομετρικές ιδιότητες (Ahmed, 2016):

- Η πίεση του σημείου κορεσμού (bubble point)
- Ο σχετικός όγκος (relative volume), ο οποίος ισούται με τον λόγο του συνολικού όγκου που καταλαμβάνει το δείγμα, σε κάθε στάδιο πίεσης, προς τον όγκο που καταλαμβάνει το κορεσμένο πετρέλαιο στην πίεση του σημείου φυσαλίδας.

$$\text{Επομένως, } V_R = \frac{V_{\text{total}}}{V_{\text{sat}}}$$

- Η συμπιεστότητα της υγρής φάσης, σε πιέσεις υψηλότερες του σημείου φυσαλίδας και στη θερμοκρασία του κελιού (θερμοκρασία ταμιευτήρα), η οποία υπολογίζεται μέσω του σχετικού όγκου εφαρμόζοντας αριθμητικά (όχι αναλυτικά) την παρακάτω σχέση:

$$c_o = -\frac{1}{V_R} \cdot \frac{\partial V_R}{\partial P}$$

- Ο συντελεστής Y (Y-factor), στην διφασική περιοχή, δηλαδή στις μικρότερες πιέσεις από την πίεση του σημείου φυσαλίδας. Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται για την διόρθωση αποκλίσεων στις τιμές του συνολικού όγκου του δείγματος, σε πιέσεις μικρότερες από αυτή του σημείου φυσαλίδας, όταν οι συνθήκες του ταμιευτήρα διαφέρουν από αυτές του εργαστηρίου.

$$Y - \text{factor} = \frac{\frac{P_{\text{sat}} - P}{P}}{\frac{V_{\text{tot}} - V_{\text{sat}}}{V_{\text{sat}}}}$$

- Ο συντελεστής μεταβολής του όγκου του πετρελαίου,  $B_o$ , σε πιέσεις πάνω από εκείνη του σημείου φυσαλίδας.

Τα αποτελέσματα μιας δοκιμής CCE παρουσιάζονται στην παρακάτω Εικόνα:

### Results of Constant-Mass Expansion Experiment at 97.5°C for the Oil Mixture with the Composition Shown in Table 3.7

Pressure (bar)	Relative Volume ( $V/V^{\text{sat}}$ )	Compressibility (1/bar)	Y-Factor
351.4	0.9765	0.000185	—
323.2	0.9721	0.000200	—
301.5	0.9762	0.000211	—
275.9	0.9818	0.000225	—
250.1	0.9874	0.000238	—
226.1	0.9933	0.000249	—
205.9	0.9986	0.000260	—
200.0 <sup>a</sup>	1.0000	0.000263	—
197.3	1.0043	—	3.07
189.3	1.0189	—	3.01
183.3	1.0313	—	2.95
165.0	1.0776	—	2.80
131.2	1.2136	—	2.51
108.3	1.3715	—	2.31
85.3	1.6343	—	2.11
55.6	2.3562	—	1.86

<sup>a</sup> Saturation point.

Εικόνα 3.7: Αποτελέσματα δοκιμής CCE σε δείγμα μαύρου πετρελαίου

Όσον αφορά τα δείγματα συμπυκνωμένου αερίου, με το πείραμα CCE προσδιορίζεται ο σχετικός όγκος, ο συντελεστής απόκλισης Z (σε πιέσεις μεγαλύτερες ή ίσες από αυτή του σημείου δρόσου) και ο συντελεστής μεταβολής του όγκου του υγρού-αερίου (wet-gas)  $B_{wg}$ ,

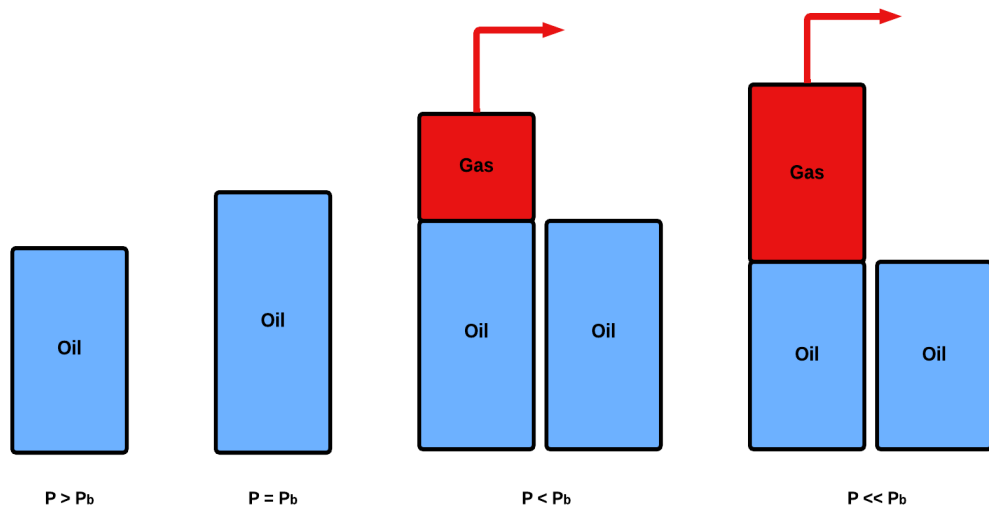
---

ο οποίος υπολογίζεται σε πιέσεις μικρότερες ή ίσες με την πίεση του σημείου δρόσου (Whitson, 2000).

### 3.4.2 Διαφορική Εκτόνωση (Differential Liberation, DL)

Η συγκεκριμένη δοκιμή έχει σχεδιαστεί για να προσομοιώνει τη διαδικασία άντλησης μαύρου ή πτητικού πετρελαίου από τον ταμιευτήρα, προσεγγίζοντας στενά τη διαδικασία διαχωρισμού αερίου-υγρού που συμβαίνει εντός του συστήματος των υδρογονανθράκων, λόγω της σταδιακής πτώσης της πίεσης του ταμιευτήρα σε τιμές χαμηλότερες από την πίεση κορεσμού. Όπως έχει προαναφερθεί, καθώς αντλείται πετρέλαιο από τον ταμιευτήρα, η πίεσή του πέφτει σταδιακά, και μόλις φτάσει σε τιμές χαμηλότερες από την πίεση κορεσμού, ξεκινάει η απελευθέρωση του αερίου και η δημιουργία της αέριας φάσης η οποία κινείται πολύ ταχύτερα από το υγρό προς τις γεωτρήσεις παραγωγής. Οπότε, η συγκεκριμένη δοκιμή μιμείται τη διαδικασία αυτή στο εργαστήριο, αφήνοντας σε κάθε βήμα ελάττωσης της πίεσης μια ποσότητα αερίου να εκτονωθεί από το κελί, όπως γίνεται στον ταμιευτήρα όταν σχηματίζεται η αέρια φάση (McGain, 2010).

Στην Εικόνα 3.8 παρουσιάζεται μια σχηματική απεικόνιση της δοκιμής διαφορικής εκτόνωσης. Το πείραμα ξεκινά με το δείγμα να βρίσκεται στο κελί σε μια φάση και σε υψηλή πίεση, υψηλότερη από το σημείο κορεσμού και σε θερμοκρασία ταμιευτήρα. Στη συνέχεια, η πίεση μειώνεται μέχρι να φτάσει την πίεση του σημείου φυσαλίδας, και ο όγκος του πετρελαίου ( $V_{o, sat}$ ) καταγράφεται. Στη συνέχεια, σε πιέσεις χαμηλότερες του σημείου κορεσμού, η πίεση ξεκινά να μειώνεται ανά βήματα, απελευθερώνοντας έτσι μια ποσότητα αερίου σε κάθε βήμα. Η ποσότητα του αερίου αυτού διαφεύγει από το δείγμα μέσω μιας βαλβίδας, και προσδιορίζεται ο όγκος ( $\Delta V_g$ ), τα moles ( $\Delta N_g$ ) και η σχετική βαρύτητά του ( $\gamma_g$ ) σε κανονικές συνθήκες. Επιπλέον, προσδιορίζεται σε κάθε βήμα ο όγκος του ρευστού ( $V_{o, i}$ ) που παραμένει στο κελί. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι η πίεση να φτάσει την ατμοσφαιρική. Τέλος, το κελί ψύχεται στους 60°F, όπου προσδιορίζεται ο όγκος του υπολειπόμενου πετρελαίου ( $V_{o, res}$ ) (Dake, 1983).



Εικόνα 3.8: Σχηματική απεικόνιση δοκιμής διαφορικής εκτόνωσης (DL)

Μέσω των πληροφοριών που λήφθηκαν από τη δοκιμή, προσδιορίζονται οι εξής PVT ιδιότητες (Whitson, 2000):

- Ο συντελεστής  $B_o$ , ως ο λόγος του όγκου του εναπομείναντος πετρελαίου στο κάθε βήμα πίεσης ( $V_{o,i}$ ) προς τον όγκο του πετρελαίου σε κανονικές συνθήκες ( $V_{o,res}$ ).
- Ο συντελεστής  $R_s$ , ως ο λόγος του συνολικού όγκου του αερίου που απελευθερώθηκε κατά τη δοκιμή προς τον όγκο του εναπομείναντος αερίου σε κανονικές συνθήκες ( $V_{o,res}$ ).
- Η πυκνότητα του πετρελαίου  $\rho_o$  στις συνθήκες του κελιού.
- Ο συντελεστής  $B_g$ , ως ο λόγος του αερίου στις συνθήκες πίεσης του κελιού προς τον όγκο της ίδιας ποσότητας αερίου σε κανονικές συνθήκες
- Ο συντελεστής απόκλισης  $Z$  του αερίου, που προσδιορίζεται στο απελευθερωμένο αέριο σε συνθήκες κελιού.
- Η σχετική πυκνότητα του αερίου, ως ο λόγος του μοριακού βάρους του προς το μοριακό βάρος του αέρα.

Τα αποτελέσματα μιας τυπικής δοκιμής διαφορικής εκτόνωσης παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.9:

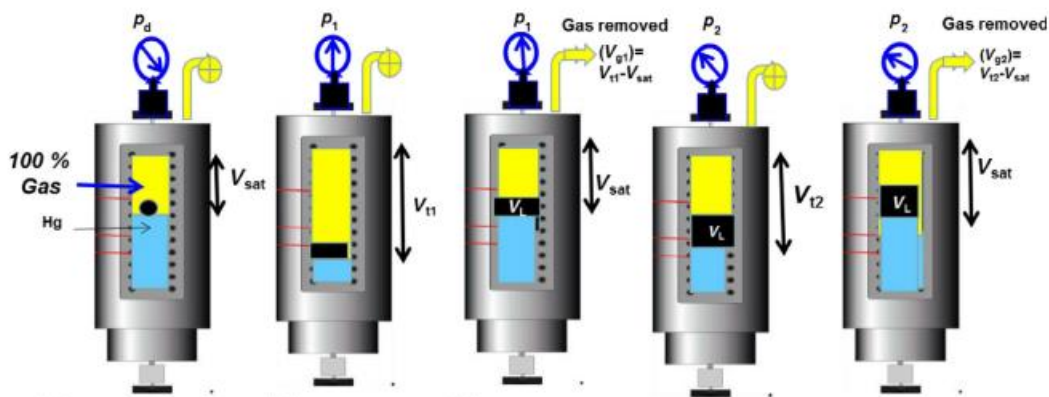
Pressure (bar)	$B_o$ (m <sup>3</sup> /Sm <sup>3</sup> )	$R_s$ (m <sup>3</sup> /Sm <sup>3</sup> )	Oil Density (g/cm <sup>3</sup> )	$B_g$ (m <sup>3</sup> /Sm <sup>3</sup> )	Z-Factor Gas	Gas Gravity (air = 1)
351.4	1.653	198.3	0.670	—	—	—
323.2	1.662	198.3	0.667	—	—	—
301.5	1.669	198.3	0.664	—	—	—
275.9	1.679	198.3	0.660	—	—	—
250.1	1.688	198.3	0.656	—	—	—
226.1	1.699	198.3	0.652	—	—	—
205.9	1.708	198.3	0.649	—	—	—
200.0 <sup>a</sup>	1.710	198.3	0.645	—	—	—
179.1	1.648	176.2	0.656	0.00610	0.844	0.791
154.6	1.588	154.3	0.668	0.00713	0.851	0.779
132.1	1.534	134.5	0.679	0.00839	0.857	0.764
109.0	1.483	115.5	0.691	0.01030	0.868	0.758
78.6	1.413	91.7	0.706	0.01440	0.882	0.772
53.6	1.367	72.8	0.719	0.02150	0.901	0.805
22.0	1.288	46.1	0.739	0.05280	0.933	0.953
1.0	1.077	0.0	0.778	—	—	2.022
1.01, 15°C	1.000	0.0	0.838	—	—	—

<sup>a</sup> Saturation point.

Εικόνα 3.9: Αποτελέσματα δοκιμής διαφορικής εκτόνωσης (Pedersen, 2007).

### 3.4.3 Εκτόνωση υπό σταθερό όγκο (Constant Volume Depletion, CVD)

Το πείραμα εκτόνωσης υπό σταθερό όγκο είναι κάπως παρόμοιο με το πείραμα διαφορικής εκτόνωσης. Χρησιμοποιείται κυρίως σε αέρια συμπυκνώματα (gas condensates) και μερικές φορές σε πολύ πτητικά πετρέλαια (volatile oils). Η δοκιμή αυτή διεξάγεται με μια σειρά εκτονώσεων σε βήματα πίεσης, τις οποίες ακολουθεί απομάκρυνση του απελευθερωμένου αερίου μέσω μιας βαλβίδας που τοποθετείται στην κορυφή του κελιού. Η απομάκρυνση του αερίου γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε ο συνολικός όγκος του ρευστού πετρελαίου στο πειραματικό κελί να παραμένει σταθερός στο τέλος κάθε σταδίου εκτόνωσης και ίσος με αυτόν στην πίεση κορεσμού ( $V_{sat}$ ). Το αέριο που απομακρύνεται σε κάθε στάδιο πίεσης (καθώς η πίεση αποκτά τιμές χαμηλότερες από την πίεση κορεσμού) συλλέγεται και προσδιορίζεται η σύσταση, ο όγκος και ο συντελεστής συμπίεστικότητας αυτού. Επίσης, σε κάθε στάδιο προσδιορίζεται ο όγκος του υγρού συμπυκνώματος εντός του κελιού αλλά και στο τελικό στάδιο, από το οποίο οδηγείται περαιτέρω σε ανάλυση σύστασης, πυκνότητα και ιξώδους. Η διαδικασία αυτή εκτελείται μέχρι ο όγκος του κελιού να φτάσει επαρκώς χαμηλή τιμή, το οποίο συνήθως επιτυγχάνεται σε 5-6 βήματα πίεσης (Danesh, 1998). Στην Εικόνα 3.10 παρουσιάζεται μια σχηματική απεικόνιση της δοκιμής εκτόνωσης υπό σταθερό όγκο .



Εικόνα 3.10: Σχηματική απεικόνιση δοκιμής εκτόνωσης υπό σταθερό όγκο (Ahmed, 2016).

Μέσω της εκτόνωσης υπό σταθερό όγκο προσδιορίζονται επιπλέον τα παρακάτω μεγέθη (Whitson, 2000):

- Ο όγκος υγρής φάσης (liquid volume or liquid dropout), ο οποίος υπολογίζεται μέσω της Εξίσωσης και αποτελεί το ποσοστό του όγκου του υγρού ( $V_L$ ) σε σχέση με τον όγκο του υγρού στο σημείο δρόσου ( $V_i$ )

$$S_L = \frac{V_L}{V_i} \cdot 100\%$$

- Ο συντελεστής απόκλισης  $Z$  του αερίου
- Ο συντελεστής απόκλισης  $Z$  των 2 φάσεων (Two-phase  $Z$ -factor), ο οποίος ποσοτικοποιεί την απόκλιση του συστήματος αερίου-υγρού από τις ιδανικές συνθήκες

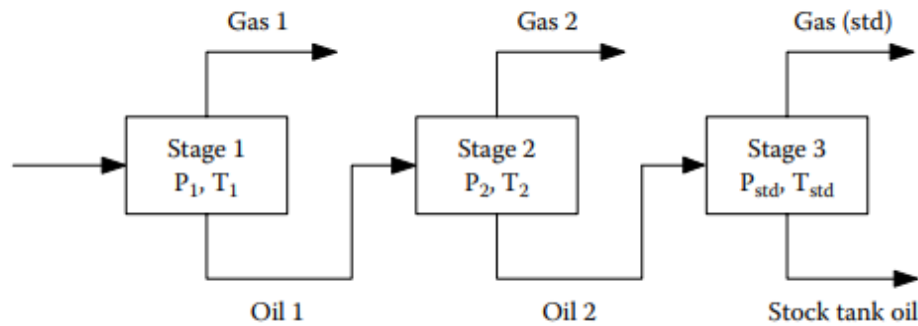
### 3.4.4 Δοκιμή Διαχωρισμού (Separator Test)

Πρωταρχικός στόχος της δοκιμής διαχωρισμού είναι η εκτίμηση των ογκομετρικών μεταβολών που θα υποστεί το πετρελαϊκό ρευστό καθώς περνά από τα διάφορα στάδια διαχωρισμού για να καταλήξει στη δεξαμενή αποθήκευσης (stock tank). Οι μεταβολές αυτές επηρεάζονται από τον αριθμό των διαχωριστών και από τις συνθήκες λειτουργίας αυτών (Ahmed, 2016). Επομένως, ουσιαστικός στόχος της δοκιμής διαχωρισμού είναι ο προσδιορισμός των απαιτούμενων σταδίων διαχωρισμού του πετρελαϊκού ρευστού, αλλά και ο προσδιορισμός των απαιτούμενων συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας λειτουργίας των διαχωριστών αυτών με σκοπό τη βελτιστοποίηση της παραγωγής. Η βελτιστοποίηση της παραγωγής επιτυγχάνεται όταν παράγεται η μεγαλύτερη δυνατή ποσότητα υγρού πετρελαίου από το δείγμα που εισέρχεται στον διαχωριστή, με την ελάχιστη δυνατή ποσότητα φυσικού αερίου, καθώς το υγρό πετρέλαιο έχει μεγαλύτερη χρηματική αξία.

Όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 3.11, κατά τη δοκιμή αυτή το δείγμα βρίσκεται αρχικά σε κλειστό κελί και σε συνθήκες κορεσμού, στις οποίες μετρείται ο όγκος του. Το δείγμα, στη συνέχεια εκτονώνεται και ψύχεται έτσι ώστε να βρεθεί στις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας του πρώτου διαχωριστή. Μόλις το δείγμα βρεθεί στις συνθήκες αυτές, απελευθερώνεται όλο το αέριο που διέφυγε από το δείγμα και η ποσότητα του



εναπομείναντος υγρού εκτονώνεται και ψύχεται περαιτέρω, έτσι ώστε να αποκτήσει τις συνθήκες του δεύτερου διαχωριστή. Στη συνέχεια, ακολουθεί η ίδια διαδικασία για όσα στάδια διαχωρισμού χρειαστούν (συνήθως 2-3), μέχρι το δείγμα να βρεθεί σε συνθήκες περιβάλλοντος. Κατά τη διαδικασία αυτή προσδιορίζεται τόσο ο όγκος του εναπομείναντος υγρού σε κάθε βήμα διαχωρισμού, όσο και ο όγκος το μοριακό βάρος και ορισμένες φορές η σύσταση του αερίου που απελευθερώνεται (Whitson, 2000).



Εικόνα 3.11: Γραφική Απεικόνιση της Δοκιμής Διαχωρισμού (Pedersen, 2007).

Μέσω της δοκιμής διαχωρισμού υπολογίζονται επιπλέον τα παρακάτω μεγέθη (Pedersen, 2007):

- Ο συντελεστής Αερίου-Υγρού του Διαχωριστή (Separator Gas-Oil Ratio), ο οποίος ισούται με τον όγκο του απελευθερωμένου αερίου στο συγκεκριμένο στάδιο διαχωρισμού προς τον όγκο του υπολειπόμενου υγρού στις συνθήκες ταμιευτήρα.
- Η Ειδική Πυκνότητα Αερίου ( $\gamma_g$ )
- Ο Συντελεστής Μεταβολής Όγκου του Πετρελαίου,  $B_o$
- Ο Συντελεστής  $R_s$  (Solution Gas-Oil Ratio)
- Η Ειδική πυκνότητα του υπολειπόμενου υγρού σε συνθήκες επιφάνειας ( $\gamma_o$ ), η οποία ισούται με την πυκνότητα του υγρού προς την πυκνότητα του νερού και μέσω αυτής γίνεται ο υπολογισμός της πυκνότητας API

### 3.4.5 Δοκιμή Ιξώδους (Viscosity Experiment)

Ο σκοπός της δοκιμής ιξώδους, όπως είναι λογικό, είναι ο προσδιορισμός των τιμών του ιξώδους του πετρελαϊκού ρευστού, για σταθερή θερμοκρασία και για μειούμενη πίεση. Η μέτρηση του ιξώδους γίνεται με συγκεκριμένο εξοπλισμό, όπως με το ιξωδόμετρο κυλιόμενης σφαίρας rolling ball viscometer), το ιξωδόμετρο τριχοειδούς ροής ή το ηλεκτρομαγνητικό ιξωδόμετρο. Στις περισσότερες περιπτώσεις, όμως, γίνεται με το ιξωδόμετρο κυλιόμενης σφαίρας, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.12.

Η τιμή του ιξώδους σχετίζεται με τον χρόνο που απαιτείται για την σφαίρα, η οποία είναι συγκεκριμένης διαμέτρου και βάρους, να βυθιστεί από τη κορυφή έως τον πυθμένα του

---

κελιού στο οποίο βρίσκεται το πετρελαϊκό ρευστό (Pedersen, 2007). Το όργανο αυτό είναι αρκετά απλό στη χρήση του. Κατά τη δοκιμή, αρχικά ένα μαγνητικό σωληνοειδές κρατά τη χαλύβδινη σφαίρα στη κορυφή του κελιού. Όταν ξεκινήσει η δοκιμή και απελευθερωθεί η σφαίρα, η μέτρηση του απαιτούμενου χρόνου γίνεται με ένα χρονοδιακόπτη υψηλής ακρίβειας, του οποίου η λειτουργία διακόπτεται αυτόματα μόλις η σφαίρα φτάσει στον πυθμένα. Η λήψη των τιμών του ιξώδους γίνεται μέσω συσχέτισης του απαιτούμενου αυτού χρόνου με καμπύλες υγρών με γνωστά ιξώδη και πυκνότητες, τα οποία ουσιαστικά είναι υγρά αναφοράς.



Εικόνα 3.12: Ιξωδόμετρο Κυλιόμενης Σφαίρας

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΛΕΤΗ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΡΥΤ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΚΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η βάση δεδομένων στην οποία περιέχονται οι πειραματικά μετρούμενες ογκομετρικές ιδιότητες των πετρελαϊκών ρευστών, πάνω στις οποίες έγινε ο ποιοτικός έλεγχος και η διεξαγωγή των αποτελεσμάτων της εργασίας. Πρόκειται για βάση δεδομένων η οποία διαθέτει αναλύσεις για ρευστά που ελήφθησαν σε χρονικό βάθος 3 δεκαετιών από διάφορα πεδία στον κόσμο και περιέχει, εκτός από τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών, και άλλες πληροφορίες για τα ρευστά τα οποία αναλύθηκαν. Αποτελείται από 12 φύλλα στο λογισμικό Excel, στο καθένα από τα οποία αναγράφονται διαφορετικές πληροφορίες για το κάθε δείγμα. Στο πρώτο φύλλο αναγράφονται ορισμένες γενικές πληροφορίες για το σύνολο των ρευστών, όπως η φάση στην οποία βρίσκονται, η θερμοκρασία και η πίεσή τους. Στα φύλλα 2-7 αναγράφονται ορισμένες βασικές πληροφορίες για διάφορες κατηγορίες ρευστών, όπως για παράδειγμα ο τρόπος δειγματοληψίας τους, αλλά και οι πληροφορίες σχετικά με την σύστασή τους. Τα ρευστά αυτά βρίσκονται είτε σε συνθήκες ταμειυτήρα, είτε σε συνθήκες επιφάνειας, είτε είναι ρευστά στα οποία έχει εκτελεστεί η δοκιμή διαφορικής εκτόνωσης. Στο 8<sup>ο</sup>, 9<sup>ο</sup> και 10<sup>ο</sup> φύλλο της βάσης δεδομένων αναγράφονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για τον υπολογισμό των ογκομετρικών ιδιοτήτων συναρτήσει της πίεσης. Τέλος, στο 11<sup>ο</sup> φύλλο αναγράφονται οι τιμές των κύριων ιδιοτήτων σε πίεση κορεσμού, ενώ στο 12<sup>ο</sup> και τελευταίο φύλλο αναγράφονται οι τιμές ορισμένων θερμοδυναμικών ιδιοτήτων των βασικών στοιχείων των υδρογονανθράκων, όπως είναι η θερμοκρασία βρασμού τους. Στο κεφάλαιο αυτό, επομένως, θα αναλυθούν λεπτομερώς οι πληροφορίες που περιέχονται στο κάθε σχετικό φύλλο της βάσης δεδομένων.

### 4.1 Γενικές Πληροφορίες

Στο πρώτο φύλλο, αναφέρονται διάφορες γενικές πληροφορίες για το σύνολο των δειγμάτων. Η βάση αποτελείται συνολικά από 1,020 δείγματα υδρογονανθράκων, το καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από έναν διαφορετικό αριθμό, όπως φαίνεται στη στήλη Α του Πίνακα 4.1. Στις γενικές πληροφορίες, αναγράφεται αρχικά, στη στήλη Β, η φάση του κάθε ρευστού, δηλαδή εάν είναι υγρό ή αέριο. Ο ποιοτικός έλεγχος, ο οποίος θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 5, αφορά μόνο τα δείγματα υγρού πετρελαίου. Επίσης, αναγράφεται και η αρχική

πίεση του δείγματος σε MPa (στήλη C), δηλαδή η πίεση την οποία είχε το κάθε δείγμα κατά τη δειγματοληψία. Σε διαφορετική στήλη περιέχεται η θερμοκρασία του δείγματος (στήλη D) και ο συντελεστής θερμικής διαστολής (στήλη E). Τέλος, στη στήλη F, αναγράφεται και η πίεση κορεσμού του κάθε δείγματος, η οποία όπως προαναφέρθηκε είναι η πίεση του σημείου φυσαλίδας όσον αφορά τα υγρά δείγματα και η πίεση του σημείου δρόσου όσον αφορά τα αέρια δείγματα.

A	B	C	D	E	F
1	TRUE	23.4		0.000760108	21.33717728
2	TRUE	2.2	355.9		
3	TRUE	13.1	337.0	0.001008941	12.47741413
4	TRUE	11.9	339.2	0.000735776	11.54662228
5	TRUE	22.8	424.8	0.000764467	2.804069996
6	TRUE	26.5	368.7	0.000905911	8.361244202
7	FALSE	36.8	412.0	0.000649713	18.88953781
8	TRUE	22.5	376.4	0.001167	16.40742493

Πίνακας 4.1: Γενικές Πληροφορίες

## 4.2 Γενικές Πληροφορίες Ρευστών (Συνθήκες Ταμιευτήρα)

Στο συγκεκριμένο φύλλο αναγράφονται οι ιδιότητες των ρευστών σε συνθήκες ταμιευτήρα. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.3, στη στήλη B αναφέρεται ο τύπος της δειγματοληψίας του κάθε δείγματος. Ο κωδικός RSS αναφέρεται σε ανασυνδυασμένα δείγματα διαχωριστή (Recombined Separator Samples), ενώ οι υπόλοιποι κωδικοί αναφέρονται σε δειγματοληψία πυθμένα. Στη στήλη D, το κάθε ρευστό χαρακτηρίζεται με “TRUE” ή “FALSE”, ανάλογα με το αν προέρχεται από δειγματοληψία ταμιευτήρα ή διαχωριστή αντίστοιχα. Για το λόγο αυτό, οι κωδικοί RSS χαρακτηρίζονται με FALSE, ενώ οι υπόλοιποι με TRUE. Στη στήλη C σημειώνεται ο κωδικός του τύπου του ρευστού το οποίο αφορούν οι πληροφορίες. Οι συγκεκριμένοι κωδικοί κυμαίνονται από το 1 έως το 10 και αποκωδικοποιούνται με βάση τον Πίνακα 4.2:

Κωδικός	Τύπος Ρευστού
1	FLASHED LIQUID FROM BHS OR RSS (ΥΓΡΟ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΕ ΑΠΟ ΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ)

2	FLASHED GAS FROM BHS OR RSS (ΑΕΡΙΟ ΠΟΥ ΠΡΟΕΚΥΨΕ ΑΠΟ ΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ)
3	RESERVOIR FLUID (ΡΕΥΣΤΟ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ)
4	STOCK TANK LIQUID (ΥΓΡΟ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ)
5	STOCK TANK GAS (ΑΕΡΙΟ ΣΕ ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ)
6	SEPARATOR LIQUID (ΥΓΡΟ ΑΠΟ ΤΟΝ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΗ)
7	SEPARATOR GAS (ΑΕΡΙΟ ΑΠΟ ΤΟΝ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΗ)
8	DIFFERENTIAL VAPORISATION GAS (ΑΕΡΙΟ ΠΟΥ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΝΕΤΑΙ ΣΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ)
9	DEPLETION STUDY (ΔΕΙΓΜΑ ΣΤΟ ΟΠΟΙΟ ΕΚΤΕΛΕΙΤΑΙ ΔΟΚΙΜΗ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ ΥΠΟ ΣΤΑΘΕΡΟ ΟΓΚΟ)
10	SEPARATOR SERIES (ΔΕΙΓΜΑ ΣΤΟ ΟΠΟΙΟ ΕΚΤΕΛΕΙΤΑΙ ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ)

Πίνακας 4.2: Κωδικοί Τύπων Ρευστών

A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	RSS	3	FALSE	7	1	0.229983717	0.229983717	0.143485755
2	RSS	3	FALSE	7	1	0.227262363	0.227262363	0.105619185
3	8008/323	3	TRUE	7	1	0.418406487	0.418406487	0.352136701
4	8008/319	3	TRUE	7	1	0.395790875	0.395790875	0.339981884
5	RSS	3	FALSE	7	1	0.189283624	0.189283624	0.148385569
6	RSS	3	FALSE	7	1	0.216981366	0.216981366	0.11182031
7	RSS	3	FALSE	7	1	0.195431739	0.195431739	0.140231878
8	RSS	3	FALSE	7	1	0.343339086	0.343339086	0.223230973
9	9204/3	3	TRUE	7	1	0.169843182	0.169843182	0.144250482
10	RSS	3	FALSE	7	1	0.287445933	0.287445933	0.201000199
11	20524/10	3	TRUE	7	1	0.279639661	0.279639661	0.204484493
12	15821/39	3	TRUE	7	1	0.22288321	0.22288321	0.093409665
13	RSS	3	FALSE	12	1	0.11638353	0.204628721	0.02235944
14	RSS	3	FALSE	7	1	0.251868069	0.251868069	0.118185267
15	8008 N 59	3	TRUE	7	1	0.229673058	0.229673058	0.123326369
16	8008N08	3	TRUE	7	1	0.223639056	0.223639056	0.130173966
17	459 N 4	3	TRUE	12	1	0.235340506	0.349803686	0.085998237
18	9209/152	3	TRUE	12	1	0.227608338	0.305430621	0.119132891

Πίνακας 4.3: Γενικές Πληροφορίες Ρευστών (Συνθήκες Ταμειυτήρα)

Εφόσον το συγκεκριμένο φύλλο ασχολείται μόνο με ρευστά που βρίσκονται ή έχουν ανασυνδυαστεί σε συνθήκες ταμιευτήρα, όλα έχουν τον κωδικό 3. Στη συνέχεια, στη στήλη Ε αναγράφεται ο αριθμός “n” για το κάθε ρευστό, δηλαδή ο αριθμός των ατόμων άνθρακα του βαριού κλάσματος για τον οποίο ισχύει ο προσδιορισμός της μοριακής μάζας στη στήλη Η. Για παράδειγμα, όσον αφορά το ρευστό με αριθμό 13, το οποίο έχει  $n = 12$ , στη στήλη Η προσδιορίζεται το μοριακό βάρος του κλάσματος  $C_{12+}$ . Στη στήλη G αναγράφεται το μοριακό βάρος για τα μοριακά κλάσματα  $C_{7+}$  όλων των ρευστών, ενώ στη στήλη I αναγράφεται το μοριακό βάρος του κάθε ρευστού ξεχωριστά.

### 4.3 Μοριακή Σύσταση (Συνθήκες Ταμιευτήρα)

Στο επόμενο φύλλο της βάσης δεδομένων (“Molecular Composition (RF)”), αναγράφονται οι απαραίτητες πληροφορίες για την σύσταση των ρευστών, τα οποία βρίσκονται σε συνθήκες ταμιευτήρα (δηλαδή των ίδιων ρευστών που αναλύθηκαν στην Ενότητα 4.2). Η διαθέσιμη αυτή σύσταση θα χρησιμοποιηθεί στο Κεφάλαιο 5 με σκοπό να υπολογιστούν οι συστάσεις του εναπομείναντος υγρού στα βήματα της δοκιμής διαχωρισμού.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.4, στον οποίο παρουσιάζεται η σύσταση ενός τυχαίου ρευστού με κωδικό 1, για τα ρευστά της βάσης αναγράφεται κωδικοποιημένος ο τύπος του κάθε μορίου στη στήλη Β, ενώ η συγκέντρωση του καθενός αναφέρεται στη στήλη C. Η συγκέντρωση του κάθε μορίου είναι εκφρασμένη σε μοριακό κλάσμα επί του συνόλου της σύστασης του ρευστού. Προφανώς, το άθροισμα των συγκεντρώσεων όλων των μορίων ενός ρευστού πρέπει να ισούται με το 100. Στον Πίνακα 4.5, αναγράφονται οι τύποι των διαφόρων μορίων που αντιστοιχούν στον κάθε κωδικό. Στις συγκεντρώσεις της βάσης δεδομένων υπάρχουν και τύποι μορίων με κωδικό μεγαλύτερο από 12 (και μικρότερο από 999). Η ταξινόμηση των τύπων των μορίων πέρα από τον κωδικό 12 γίνεται αρκετά εύκολα. Για κάθε αύξηση του αριθμού του κωδικού, το μόριο στο οποίο αντιστοιχεί έχει ένα επιπλέον άτομο άνθρακα στον τύπο του. Έτσι, ο κωδικός 13 αντιστοιχεί στον τύπο  $C_7H_{16}$ , ο κωδικός 14 στον τύπο  $C_8H_{18}$  κ.ο.κ.

A	B	C
1	2	0.639999986
1	3	0.25
1	5	18.43000031
1	6	3.529999971
1	7	7.320000172

1	8	2.109999895
1	9	5.019999981
1	10	1.870000005
1	11	2.640000105
1	12	3.690000057
1	999	54.5

Πίνακας 4.4: Μοριακή Σύσταση (Συνθήκες Ταμειυτήρα)

Κωδικός	Τύπος Μορίου
1	O <sub>2</sub>
2	N <sub>2</sub>
3	CO <sub>2</sub>
4	H <sub>2</sub> S
5	CH <sub>4</sub>
6	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
7	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>
8	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
9	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
10	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
11	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
12	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
999	C <sub>n+</sub>

Πίνακας 4.5: Κωδικοί Τύπων Μορίων Σύστασης

#### 4.4 Γενικές Πληροφορίες Ρευστών (Συνθήκες Επιφάνειας)

Παρομοίως με την Ενότητα 4.2, το συγκεκριμένο φύλλο αναφέρει τις ίδιες ιδιότητες των ρευστών, αυτή τη φορά όμως για τα ρευστά που έχουν μεταφερθεί σε συνθήκες επιφάνειας. Για τον λόγο αυτό, στο συγκεκριμένο φύλλο αναλύονται ρευστά με κωδικούς 1, 2, 4, 6 και 7. Η σημασία του κάθε κωδικού βρίσκεται στον Πίνακα 4.2, όπως έχει προαναφερθεί. Ως “stock tank” χαρακτηρίζεται η δεξαμενή αποθήκευσης των ρευστών όπου αυτά θα μεταφερθούν σε συνθήκες επιφάνειας. Οπότε, ένα ρευστό που βρίσκεται σε συνθήκες

ταμειυτήρα, θα εκτονωθεί σε υγρή (Stock Tank Liquid ) και σε αέρια (Stock Tank Gas) φάση, επομένως θα καταλήξει σε “Stock Tank Liquid” και σε “Stock Tank Gas”, όταν μεταφερθεί στις συνθήκες επιφάνειας. Στον Πίνακα 4.6, παρουσιάζονται οι γενικές ιδιότητες των ρευστών με κωδικό 1, δηλαδή του υγρού ενός δείγματος πυθμένα η διαχωριστή που έχει μεταφερθεί σε κανονικές συνθήκες (“FLASHED LIQUID FROM BHS OR RSS” – Πίνακας 4.2).

A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	FL	1	TRUE	7	0.8420514	0.4189059	0.4189059	0.4119854
2	FL	1	TRUE	7	0.8518049	0.3964446	0.3964446	0.3929146
3	FL	1	TRUE	7	0.8364778	0.1698506	0.1698506	0.169005
4	FL	1	TRUE	7	0.7977959	0.2800207	0.2800207	0.2474984
5	FL	1	TRUE	7	0.3727428	0.2243085	0.2243085	0.2028084
6	FL	1	TRUE	7	0.5150101	0.2307471	0.2307471	0.2093006
7	FL	1	TRUE	7	0.5779707	0.2242388	0.2242388	0.2003176
8	FL	1	TRUE	12	0.3170328	0.2354065	0.3498037	0.2180777
9	FL	1	TRUE	12	0.5026864	0.228469	0.3054306	0.2140528
10	FL	1	TRUE	7	0.5364217	0.3385255	0.3385255	0.3119517
11	FL	1	TRUE	7	0.4898475	0.3392865	0.3392865	0.3122237
12	FL	1	TRUE	7	0.7524069	0.3592809	0.3592809	0.341169
13	FL	1	TRUE	7	0.9622132	0.2963434	0.2963434	0.2774732
14	FL	1	TRUE	11	0.4956237	0.2379834	0.2990954	0.2372849
15	FL	1	TRUE	20	0.784848	0.2542256	0.6351258	0.2340792
16	FL	1	TRUE	12	0.5817574	0.2673883	0.3632429	0.2601523
17	FL	1	TRUE	12	0.8693569	0.2604253	0.370237	0.2533506
18	FL	1	TRUE	12	0.2131886	0.2669354	0.3283097	0.2616063
19	RFR01	1	TRUE	30	0.1571673	0.1587883	0.6056075	0.1519665

Πίνακας 4.6: Γενικές Πληροφορίες Ρευστών (Συνθήκες Επιφάνειας)

#### 4.5 Μοριακή Σύσταση (Συνθήκες Επιφάνειας)

Στο συγκεκριμένο φύλλο αναφέρεται η μοριακή σύσταση των ρευστών που έχουν μεταφερθεί σε συνθήκες επιφάνειας. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.7 για ένα τυχαίο δείγμα με κωδικό 1, στη στήλη B με τους κωδικούς των ρευστών αναγράφονται οι κωδικοί 1, 4, 5, 6 και 7, όπως γίνεται και στο φύλλο των γενικών πληροφοριών των ρευστών επιφάνειας (Ενότητα 4.4). Επομένως, η σύσταση προσδιορίζεται για κάθε μια από τις κατηγορίες ρευστών του δείγματος 1.



<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
1	3	2	0.64
1	3	3	0.25
1	3	5	18.43
1	3	6	3.53
1	3	7	7.32
1	3	8	2.11
1	3	9	5.02
1	3	10	1.87
1	3	11	2.64
1	3	12	3.69
1	3	999	54.5
1	4	3	0.01
1	4	5	0.04
1	4	6	0.15
1	4	7	1.18
1	4	8	0.68
1	4	9	2.21
1	4	10	1.55
1	4	11	2.62
1	4	12	5.01
1	4	999	86.55
1	5	2	0.3
1	5	3	0.6
1	5	5	32.81
1	5	6	10.74
1	5	7	24
1	5	8	6.43
1	5	9	14.17
1	5	10	3.55
1	5	11	3.94
1	5	12	2.18
1	5	999	1.28
1	6	2	0.08
1	6	3	0.17
1	6	5	8.9
1	6	6	3.01
1	6	7	7.34
1	6	8	2.24
1	6	9	5.44
1	6	10	2.09
1	6	11	2.98

1	6	12	4.25
1	6	999	63.5
1	7	2	4.01
1	7	3	0.77
1	7	5	75.8
1	7	6	6.66
1	7	7	7.23
1	7	8	1.32
1	7	9	2.49
1	7	10	0.54
1	7	11	0.6
1	7	12	0.35
1	7	999	0.23

Πίνακας 4.7: Μοριακή Σύσταση (Συνθήκες Επιφάνειας)

#### 4.6 Γενικές Πληροφορίες Ρευστού (DL)

Στο συγκεκριμένο φύλλο, η διάταξη του οποίου παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.8, αναγράφονται οι απαραίτητες πληροφορίες των ρευστών όσον αφορά τη δοκιμή διαφορικής εκτόνωσης (DL) που εκτελέστηκε σε αυτά.

Στη στήλη B αναγράφεται ο τύπος του ρευστού στο οποίο εκτελέστηκε η δοκιμή. Εάν το ρευστό έχει ληφθεί από την κεφαλή της γεώτρησης (Wellhead), αναγράφεται κωδικός με τα αρχικά γράμματα “WH”, εάν έχει ληφθεί από το διαχωριστή (Recombined Separator Sample), αναγράφεται ο κωδικός “RSS”, ενώ εάν έχει ληφθεί από τον πυθμένα της γεώτρησης (Bottom-Hole) αναγράφεται κωδικός με τα αρχικά γράμματα “BH”.

Στη συνέχεια, στη στήλη C αναγράφεται ο κωδικός των ρευστών. Όπως προαναφέρθηκε στον Πίνακα 4.2, ο κωδικός 8 ανήκει στο αέριο της δοκιμής διαφορικής εκτόνωσης. Επομένως, οι στήλες E-H του συγκεκριμένου φύλλου αναφέρονται στις ιδιότητες του αερίου που απελευθερώνεται σε κάθε βήμα της δοκιμής. Πρόκειται για τις ίδιες ιδιότητες που αναγράφονται στις στήλες E-H στον Πίνακα 4.6 και 4.3.

Τέλος, οι στήλες I και K αναφέρονται στο κάθε βήμα πίεσης της δοκιμής και στην πίεση που επικρατεί στο κελί αντίστοιχα, ενώ η στήλη J αναφέρεται στη θερμοκρασία που επικρατεί στο κελί. Οπότε, για παράδειγμα, στη γραμμή 5 αναγράφονται τα χαρακτηριστικά του αερίου που απελευθερώνεται στο 4<sup>ο</sup> βήμα της δοκιμής διαφορικής εκτόνωσης του δείγματος με αριθμό 5, στο οποίο βήμα επικρατεί πίεση ίση με 10.44 MPa και θερμοκρασία 340.9 °K.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	WHS01	8	FALSE	12	0.097616		0.0420778	1	342.0	0.10
2	RSS01	8	FALSE	7	0.0982917	0.0982917	0.0206099	1	340.9	21.47
3	RSS01	8	FALSE	7	0.0985745	0.0985745	0.0201257	2	340.9	18.71
4	RSS01	8	FALSE	7	0.0976923	0.0976923	0.0197249	3	340.9	14.58
5	RSS01	8	FALSE	7	0.098037	0.098037	0.0195618	4	340.9	10.44
6	RSS01	8	FALSE	7	0.0978333	0.0978333	0.0203954	5	340.9	5.27
7	RSS01	8	FALSE	7	0.10315	0.10315	0.035648	6	340.9	0.10
8	RSS02	8	FALSE	7	0.133456	0.133456	0.031818	1	387.5	25.64
9	RSS02	8	FALSE	7	0.128814	0.128814	0.0293709	2	387.5	23.54
10	RSS02	8	FALSE	7	0.120143	0.120143	0.0268661	3	387.5	19.40
11	RSS02	8	FALSE	7	0.111226	0.111226	0.0257623	4	387.5	15.27
12	RSS02	8	FALSE	7	0.100125	0.100125	0.0253964	5	387.5	11.13
13	RSS02	8	FALSE	7	0.100889	0.100889	0.0269477	6	387.5	6.99
14	RSS02	8	FALSE	7	0.0996667	0.0996667	0.0301563	7	387.5	3.55
15	RSS02	8	FALSE	7	0.10978	0.10978	0.0491938	8	387.5	0.10

Πίνακας 4.8: Γενικές Πληροφορίες Ρευστού (DL)

#### 4.7 Μοριακή Σύσταση (Δοκιμή Διαφορικής Εκτόνωσης)

Στο συγκεκριμένο φύλλο, το οποίο είναι και το τελευταίο που αφορά τις μοριακές συστάσεις, αναγράφεται η μοριακή σύσταση του απελευθερωμένου αερίου του κάθε βήματος της δοκιμής διαφορικής εκτόνωσης. Οι συστάσεις των αερίων αυτών θα χρησιμοποιηθούν επίσης στο Κεφάλαιο 5 με σκοπό την εύρεση και τον ποιοτικό έλεγχο των συστάσεων του εναπομείναντος υγρού στα επιμέρους βήματα της δοκιμής διαχωρισμού. Στον Πίνακα 4.9, παρουσιάζεται για παράδειγμα η σύσταση του αερίου που απελευθερώθηκε μετά από το πρώτο βήμα πίεσης στη δοκιμή διαφορικής εκτόνωσης του δείγματος με κωδικό 1. Όπως επίσης φαίνεται στον πίνακα, η πίεση του κελιού στο βήμα αυτό, ισούταν με 16.5819 MPa (η πίεση κορεσμού του δείγματος ισούται με περίπου 20MPa, όπως αναγράφεται στο φύλλο των γενικών πληροφοριών. Η αναζήτηση του τύπου των μορίων της σύστασης γίνεται, όπως και τις προηγούμενες φορές, μέσω του Πίνακα 4.2.

A	B	C	D	E	F	G
1	8	2	3.7	1	385.928	16.5819
1	8	3	1.98	1	385.928	16.5819
1	8	5	82.74	1	385.928	16.5819
1	8	6	5.35	1	385.928	16.5819
1	8	7	2.76	1	385.928	16.5819

1	8	8	0.56	1	385.928	16.5819
1	8	9	1.17	1	385.928	16.5819
1	8	10	0.37	1	385.928	16.5819
1	8	11	0.46	1	385.928	16.5819
1	8	12	0.42	1	385.928	16.5819
1	8	13	0.31	1	385.928	16.5819
1	8	14	0.17	1	385.928	16.5819
1	8	15	0.01	1	385.928	16.5819

Πίνακας 4.9: Μοριακή Σύσταση (Δοκιμή Διαφορικής Εκτόνωσης)

#### 4.8 Μοντέλο Φυσικών Ιδιοτήτων

Το συγκεκριμένο φύλλο είναι το σημαντικότερο για την εργασία, μιας και σε αυτό περιέχονται οι περισσότερες πληροφορίες που χρειάζονται για τον ποιοτικό έλεγχο. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτό περιέχονται οι απαραίτητοι συντελεστές, οι οποίοι σε συνδυασμό με τις κατάλληλες εξισώσεις θα χρησιμοποιηθούν με σκοπό τον προσδιορισμό των τιμών της κάθε ογκομετρικής ιδιότητας η οποία μετρήθηκε από την αντίστοιχη δοκιμή. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.10, αποτελείται από 16 στήλες, καθεμία από τις οποίες παρέχει διαφορετικές πληροφορίες.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	1	14	2.55	8.36	8	0.828757942	1.783724666							1	8.36
1	1	14	8.36	34.57	6	1	0.833842635	-						1	8.36
1	3	5	0.10	7.63	3	-	8.125190735	1.846785069						1	8.36
1	3	6	0.10	7.63	4	1.453432441	0.014380379	1.876179576	-2.60134387	13.03698921				1	8.36
1	3	6	0.10	7.63	4	0.006386351	0.014380379	-	0.006386351		0.600000024	1	5	0.001	8.36
1	3	7	1.14	7.63	2	0.019360878	-	0.006330948	1.621818781	111.0878906				0.988807023	8.36
1	3	12	0.10	8.36	4	1.068832874	0.11935582	0.118316375	-		0.100000001	1	3	1.000450492	8.36
1	3	12	8.36	34.57	6	1.302541137	0.833842635	-	0.003963861					1.000450492	8.36
1	3	15	0.10	8.36	4	0.792827427	-	-	-3.86245E-05		0.100000001	1	30	1000	8.36
1	3	15	8.36	34.57	7	1.377045393	0.833842635	0.033758707	0.032837626					1000	8.36
1	3	20	0.10	8.36	4	0	113.6650848	-	1.707836866					1000	8.36
1	3	20	0.10	8.36	4	0	113.6650848	265.8144226	-		0.100000001	1	3	0.180205271	8.36
1	3	25	0.10	7.63	2	-0.75770694	9.535638809	1	10.50986576					1	8.36
1	5	24	0.10	8.36	4	1.833067775	-	1.745355129	-		0.600000024	1	3	0.001	8.36

Πίνακας 4.10: Μοντέλο Φυσικής Ιδιότητας

Πιο συγκεκριμένα, στην στήλη A αναγράφεται ο αριθμός του δείγματος το οποίο μελετάται, ενώ στην στήλη B αναγράφεται ο κωδικός της συγκεκριμένης δοκιμής η οποία εκτελέστηκε. Οι κωδικοί της στήλης B είναι συνολικά 5 και αποκωδικοποιούνται σε άλλο φύλλο της

---

βάσης δεδομένων (Ενότητα 4.9). Στο μοντέλο της φυσικής ιδιότητας, όμως, αναγράφονται οι 3 από τους 5 κωδικούς, μιας και στο σύνολο των ρευστών εκτελέστηκαν οι 3 από τους 5 τύπους δοκιμών, οι οποίοι έχουν τους εξής κωδικούς:

- Κωδικός 1: Δοκιμή CCE
- Κωδικός 3: Δοκιμή DL
- Κωδικός 5: Δοκιμή Viscosity

Εν συνεχεία, στη στήλη C αναγράφονται οι κωδικοί της κάθε ογκομετρικής ιδιότητας η οποία υπολογίζεται κάθε φορά, με τον συγκεκριμένο τύπο δοκιμής. Όπως και προηγουμένως, οι κωδικοί αυτοί επίσης αναφέρονται σε διαφορετικό φύλλο της βάσης, το οποίο θα αναλυθεί στην Ενότητα 4.10. Από τους 26 κωδικούς και τις 26 διαφορετικές ιδιότητες που υπάρχουν αντίστοιχα, στο μοντέλο φυσικής ιδιότητας υπάρχουν οι 11, οι οποίες και μετρούνται με τις πειραματικές δοκιμές στο σύνολο των ρευστών. Οι κωδικοί τους μεταφράζονται ως εξής:

- Κωδικός 5: Ειδική Πυκνότητα Αερίου ( $\gamma_g$ )
- Κωδικός 6: Ιξώδες Αερίου ( $\mu_g$ )
- Κωδικός 7: Συντελεστής  $B_g$
- Κωδικός 11: Υγρή Φάση (Oil Phase). Η συγκεκριμένη ιδιότητα μετριέται μέσω της δοκιμής CCE και αφορά μόνο αέρια δείγματα, επομένως δεν θα ληφθεί υπόψιν στον ποιοτικό έλεγχο.
- Κωδικός 12: Συντελεστής  $B_o$ .
- Κωδικός 14: Σχετικός όγκος.
- Κωδικός 15: Πυκνότητα Υγρού του Ταμιευτήρα ( $\rho_o$ ).
- Κωδικός 16: Παλινδρομικό Υγρό Απόθεμα (Retrograde Liquid Deposit). Η ιδιότητα αυτή μετριέται επίσης μέσω της δοκιμής CCE και αφορά μόνο αέρια δείγματα, επομένως δεν θα ληφθεί υπόψιν στον ποιοτικό έλεγχο.
- Κωδικός 20: Συντελεστής  $R_s$
- Κωδικός 24: Ιξώδες ( $\mu$ )
- Κωδικός 25: Συντελεστής Απόκλισης  $Z$

Στις στήλες D, E αναγράφονται οι τιμές της πίεσης στις οποίες εκτελέστηκε η κάθε δοκιμή. Στην στήλη E, αναγράφεται η τιμή  $P_{max}$ , δηλαδή η τιμή της πίεσης η οποία επικρατούσε στο κελί κατά το ξεκίνημα της κάθε δοκιμής, ενώ στη στήλη D αναγράφεται η τιμή  $P_{min}$ , δηλαδή η τελική τιμή της πίεσης η οποία επικρατούσε στο κελί μετά την κάθε εκτόνωση, οπότε η τιμή της πίεσης στο τέλος της κάθε δοκιμής. Ορισμένες από τις ιδιότητες (Συντελεστής  $B_o$ , Πυκνότητα και Σχετικός Όγκος) υπολογίζονται τόσο για πιέσεις υψηλότερες όσο και για χαμηλότερες από την πίεση του σημείου φυσαλίδας. Για τον λόγο αυτό υπάρχουν 2 εύρη

πιέσεων για την κάθε δοκιμή που υπολογίζει τις ιδιότητες αυτές. Το πρώτο εύρος ξεκινά από την αρχική πίεση  $P_{\max}$  και καταλήγει στην πίεση του σημείου φυσαλίδας και το δεύτερο εύρος ξεκινά από την πίεση του σημείου φυσαλίδας και καταλήγει στην ατμοσφαιρική πίεση. Οι πιέσεις αυτές ορισμένες φορές χωρίζονται σε 2 εύρη επειδή οι περισσότερες ιδιότητες υπολογίζεται με διαφορετικές εξισώσεις, μια για πιέσεις μεγαλύτερες και μια για πιέσεις μικρότερες της πίεσης κορεσμού.

Στη στήλη F αναγράφεται ο κωδικός της κάθε εξίσωσης. Οι εξισώσεις, μαζί με τους κωδικούς τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.11:

Κωδικός	Εξίσωση
1	$y = ax + b$
2	$y = \frac{ax^2 + bx + c}{dx + 1}$
3	$y = \frac{ax^2 + bx + c}{dx^2 + ex + 1}$
4	$y = a + bx^i + cx^j + dx^k$
5	$y = a + bx^i + cx^{3i} + dx^{6i} + ex^{9i}$
6	$y = \alpha - 10^{(b * \log(x - 1) + c)}$
7	$y = \frac{1}{\alpha - 10^{(b * \log(x - 1) + c)}}$
8	$y = 1 + \frac{1 - x}{x(ax + b)}$

Πίνακας 4.11: Κωδικοί Εξισώσεων

Όπου  $y$  είναι η φυσική ιδιότητα που υπολογίζεται, ενώ το  $x$  υπολογίζεται από την Εξίσωση 4.1.

$$x = \frac{p}{p_{ref}} \quad (4.1)$$

Στην Εξίσωση 4.1,  $p$  είναι η πίεση για την οποία υπολογίζεται η ιδιότητα και  $p_{ref}$  είναι η πίεση φυσαλίδας του κάθε ρευστού (αναγράφεται στον πίνακα της στήλης P). Οι υπόλοιποι συντελεστές των εξισώσεων (a-k) αναγράφονται για κάθε ρευστό στις υπόλοιπες στήλες του φύλλου (G-N). Τέλος, στη στήλη O αναγράφεται ο συντελεστής μετατροπής της κάθε ιδιότητας που υπολογίζεται από την εξίσωση, σε μονάδες SI.

#### 4.9 Πίνακας Εύρεσης Πειραματικής Δοκιμής (Study Type Lookup Table)

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.9, στο συγκεκριμένο φύλλο αποκωδικοποιούνται τα είδη των πειραματικών δοκιμών που εκτελέστηκαν στα δείγματα.

<b>A</b>	<b>B</b>
1	ΔΟΚΙΜΗ ΙΣΟΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ ΥΠΟ ΣΤΑΘΕΡΗ ΣΥΣΤΑΣΗ
2	ΔΟΚΙΜΗ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ ΥΠΟ ΣΤΑΘΕΡΟ ΟΓΚΟ
3	ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΕΚΤΟΝΩΣΗΣ
4	ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΗ
5	ΔΟΚΙΜΗ ΙΞΩΔΟΥΣ

Πίνακας 4.12: Κωδικοί Πειραματικών Δοκιμών

#### 4.10 Πίνακας Εύρεσης Φυσικής Ιδιότητας (Physical Property Lookup Table)

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.13, στο συγκεκριμένο φύλλο αποκωδικοποιούνται ορισμένα από τα είδη των φυσικών ιδιοτήτων, για τον προσδιορισμό των οποίων εκτελέστηκαν οι πειραματικές δοκιμές PVT.

<b>A</b>	<b>B</b>
4	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΓΡΟΥ
5	ΕΙΔΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΑΕΡΙΟΥ
6	ΙΞΩΔΕΣ ΑΕΡΙΟΥ
7	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ $B_g$
11	ΥΓΡΗ ΦΑΣΗ
12	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ $B_o$
13	ΕΙΔΙΚΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ
14	ΣΧΕΤΙΚΟΣ ΟΓΚΟΣ
15	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ
20	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ $R_s$

21	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ GOR
22	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ TANK
23	ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ GOR
24	ΙΞΩΔΕΣ
25	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ Z

Πίνακας 4.13: Κωδικοί Ογκομετρικών Ιδιοτήτων

#### 4.11 Δεδομένα Σημείου Κορεσμού (Psat Data)

Στο φύλλο αυτό αναγράφονται οι τιμές ορισμένων ιδιοτήτων των ρευστών στην πίεση κορεσμού ( $P_{sat}$ ). Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.14, το φύλλο αποτελείται από 4 στήλες, στις οποίες αναγράφεται ο αριθμός του ρευστού, το είδος της δοκιμής, ποια ιδιότητα προσδιορίστηκε από αυτή και η τιμή της συγκεκριμένης ιδιότητας στο σημείο κορεσμού αντίστοιχα. Το είδος της δοκιμής και της ιδιότητας αποκωδικοποιείται με τη βοήθεια των φύλλων που αναφέρθηκαν στις Ενότητες 4.9 και 4.10. Για παράδειγμα, η τιμή του συντελεστή  $B_o$  (κωδικός φυσικής ιδιότητας 12) του ρευστού με αριθμό 1 είναι  $1.669 \text{ m}^3/\text{Sm}^3$ . Οι τιμές αυτές μπορούν να προσδιοριστούν και με τη λύση της κατάλληλης εξίσωσης της ιδιότητας (φύλλο “Physical Property Model”) για την πίεση κορεσμού.

A	B	C	D
1	1	16	0.753102541
1	3	6	1.44411E-05
1	3	7	0.014367574
1	3	12	1.303128004
1	3	15	726.1925049
1	3	20	66.68044281
1	3	25	0.856560647
1	5	14	1
1	5	24	0.000650385

Πίνακας 4.14: Ογκομετρικές ιδιότητες σε πίεση κορεσμού

#### 4.12 Πίνακας Αναζήτησης Katz (Katz Lookup Table)

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.15, στο τελευταίο φύλλο της βάσης δεδομένων παρέχεται ένας πίνακας για την εύρεση ορισμένων ιδιοτήτων για τα κύρια συστατικά των υδρογονανθράκων. Πιο συγκεκριμένα, από τις στήλες του πίνακα, μπορούν να προσδιοριστούν οι εξής ιδιότητες:



- Στήλη B: Το μοριακό βάρος (molar mass) της κάθε χημικής ένωσης, σε μονάδες SI (kg/mol)
- Στήλη C: Η υγρή πυκνότητα (liquid density) της κάθε χημικής ένωσης, σε μονάδες SI (kg/m<sup>3</sup>)
- Στήλη D: Η κρίσιμη πίεση (critical pressure - P<sub>c</sub>), η μέγιστη πίεση δηλαδή, στην οποία μπορούν να συνυπάρξουν 2 φάσεις ενός ρευστού (υγρή και αέρια)
- Στήλη E: Η κρίσιμη θερμοκρασία (critical temperature – T<sub>c</sub>), η μέγιστη θερμοκρασία στην οποία μπορούν να συνυπάρξουν 2 φάσεις ενός ρευστού (υγρή και αέρια). Όταν η θερμοκρασία και η πίεση ενός ρευστού υπερβούν τις κρίσιμες τιμές τους, το ρευστό βρίσκεται σε μια νέα φάση, την υπερκρίσιμη, στην οποία δεν εκδηλώνει συμπεριφορά αερίου, ούτε συμπεριφορά υγρού.
- Στήλη F: Η θερμοκρασία βρασμού (T<sub>b</sub>) της κάθε ένωσης
- Στήλη G: Ο ακεντρικός παράγοντας (omega – acentric factor) της κάθε ένωσης. Ο παράγοντας αυτός ποσοτικοποιεί την απόκλιση του σχήματος του κάθε μορίου από το σχήμα της σφαίρας.

A	B	C	D	E	F	G
O <sub>2</sub>	0.031998999	0	5.039999962	154.6000061	90.19999695	0.025
N <sub>2</sub>	0.028013	0	3.390000105	126.1999969	77.40000153	0.039000001
CO <sub>2</sub>	0.044009998	0	7.380000114	304.1000061	194.6000061	0.238999993
H <sub>2</sub> S	0.034079999	0	8.93999958	373.2000122	213.5	0.081
CH <sub>4</sub>	0.016043	300	4.599999905	190.3999939	111.5999985	0.011
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.030069999	356	4.880000114	305.3999939	184.6000061	0.098999999
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.044096999	508	4.25	369.7999878	231.1000061	0.152999997
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.058123998	567	3.650000095	408.2000122	261.3999939	0.182999998
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.058123998	586	3.799999952	425.2000122	272.7000122	0.199000001
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.072150998	625	3.390000105	460.3999939	301	0.226999998
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.072150998	631	3.369999886	469.7000122	309.2000122	0.250999987
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0.083999999	690	3.329999924	512.7999878	337.2000122	0.25
C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	0.096000001	727	3.119999886	547.2000122	365.6000061	0.280000001
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	0.107000001	749	2.890000105	575.5999756	390	0.312000006
C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	0.120999999	768	2.640000105	602.7999878	415.6000061	0.347999999
C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	0.134000003	782	2.420000076	626.7000122	439.3999939	0.384999999
C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	0.147	793	2.240000001	647.7999878	460.6000061	0.419
C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	0.160999998	804	2.079999924	668.2999878	481.7000122	0.453999996
C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	0.174999997	815	1.970000029	686.7000122	500.6000061	0.483999997
C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	0.189999998	826	1.860000014	705.5999756	520	0.515999973
C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	0.206	836	1.759999999	724.4000244	539.4000244	0.550000012
C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	0.222000003	843	1.659999967	740	556.7000122	0.582000017

Πίνακας 4.15: Πίνακας Αναζήτησης Katz



---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μιας συστηματικής μεθοδολογίας για την εφαρμογή ποιοτικού ελέγχου στα αποτελέσματα δοκιμών PVT που αναγράφονται σε μια τυπική εργαστηριακή αναφορά. Ο ποιοτικός έλεγχος που εφαρμόστηκε στη βάση δεδομένων αποτελείται από 5 διαδοχικά βήματα και αφορά μόνο τα υγρά ρευστά πετρελαίου που περιέχονται σε αυτή.

Αρχικά, μελετήθηκε ενδελεχώς η διαθέσιμη βάση δεδομένων των δοκιμών PVT και δημιουργήθηκαν ιστογράμματα, με σκοπό να μελετηθεί η κατανομή των τιμών ορισμένων χαρακτηριστικών ογκομετρικών ιδιοτήτων στην πίεση κορεσμού τους. Η κατανομή αυτή έγινε για τις τιμές του συντελεστή διαλυτότητας  $R_s$ , του ογκομετρικού συντελεστή  $B_o$ , της πυκνότητας του πετρελαίου και της πυκνότητας API, με σκοπό να χαρακτηριστούν τα ρευστά της βάσης δεδομένων (σχετικά με το είδος και την πτητικότητα τους) και να απορριφθούν ρευστά που παρουσιάζουν μη φυσιολογικές τιμές στις συγκεκριμένες ιδιότητες.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός των καμπυλών των ιδιοτήτων ενός μόνο αντιπροσωπευτικού ρευστού συναρτήσει της πίεσης, με σκοπό να κατανοηθεί καλύτερα το βασικό αντικείμενο του ποιοτικού ελέγχου και έπειτα να προχωρήσει η εφαρμογή του συγκεκριμένου βήματος σε ολόκληρο το πλήθος των ρευστών με μεγαλύτερη ευκολία. Επομένως, τρίτο βήμα του ποιοτικού ελέγχου ήταν η άσκηση κριτικής πάνω στα σχήματα και τις τιμές των καμπυλών των ογκομετρικών ιδιοτήτων όλων των ρευστών.

Έπειτα, ακολούθησε η εφαρμογή εξισώσεων διατήρησης της μάζας στη δοκιμή διαφορικής εκτόνωσης που εκτελέστηκε στα ρευστά. Σκοπός του συγκεκριμένου βήματος ήταν να προσδιοριστεί η πυκνότητα των εναπομεινάντων υγρών (η οποία λείπει από την εργαστηριακή αναφορά) και να ασκηθεί ποιοτικός έλεγχος στις τιμές τους, όπως επίσης να ελεγχθεί εάν η διατήρηση της μάζας ικανοποιείται μεταξύ της υγρής και της αέριας φάσης των δειγμάτων.

Τέλος, εξισώσεις που επίσης βασίζονται στη διατήρηση της μάζας εφαρμόστηκαν σε τέσσερα αντιπροσωπευτικά δείγματα από τη βάση δεδομένων, με σκοπό να προσδιοριστεί η σύσταση των εναπομεινάντων υγρών της δοκιμής διαφορικής εκτόνωσης, και να ασκηθεί

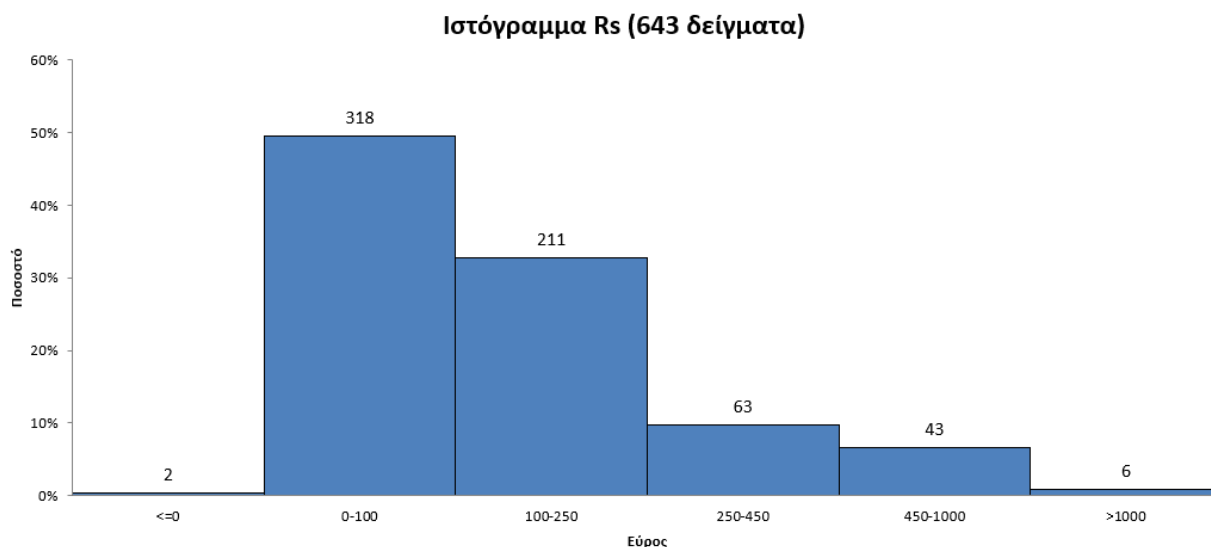
---

έλεγχος στις τιμές που ακολουθούν, αλλά και στο εάν ικανοποιούν ορισμένα άλλα κριτήρια, τα οποία θα αναλυθούν στην αντίστοιχη ενότητα. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για το κάθε βήμα, καθώς και τα αποτελέσματα που λήφθηκαν παρουσιάζονται λεπτομερώς στις ακόλουθες ενότητες.

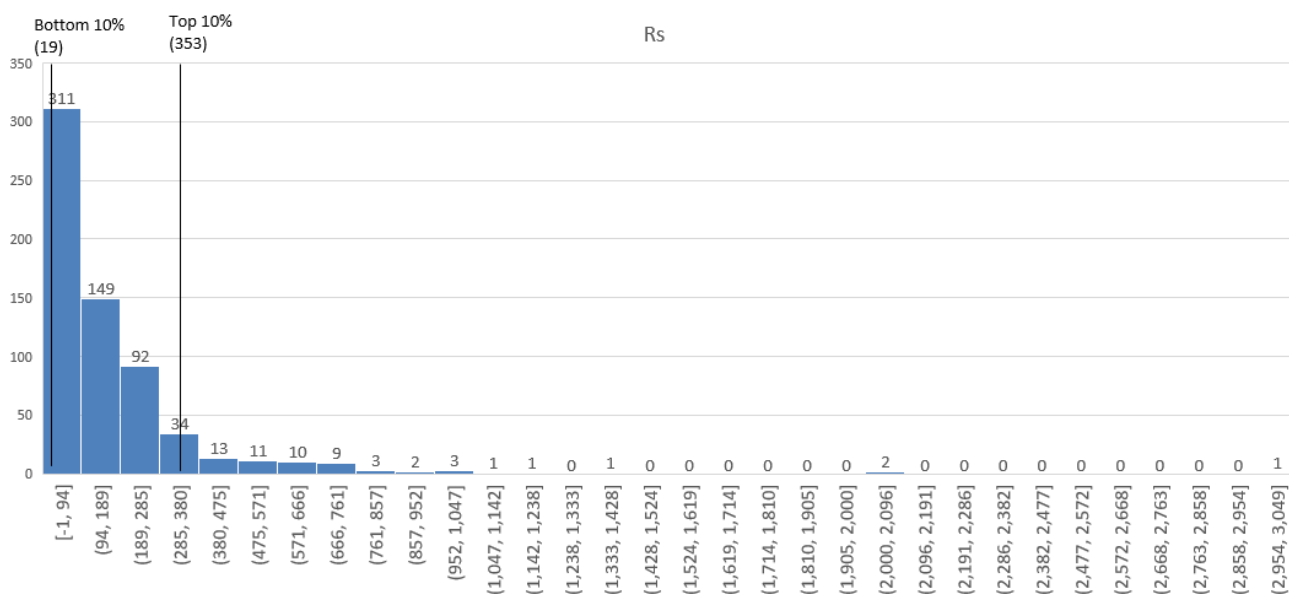
### 5.1 Δημιουργία ιστογραμμάτων των φυσικών ιδιοτήτων στο σημείο φυσαλίδας

Πρώτο βήμα του ποιοτικού ελέγχου ήταν η δημιουργία ιστογραμμάτων για ιδιότητες όπως το  $B_o$ , το  $R_s$ , η πυκνότητα και η πυκνότητα API. Στόχος της δημιουργίας των ιστογραμμάτων ήταν η κατανομή των ρευστών της βάσης δεδομένων σε κατηγορίες ανάλογα με την πτητικότητα τους, και η άσκηση κριτικής στις τιμές ορισμένων δειγμάτων, όταν αυτές φαίνονται αρχικά εσφαλμένες. Οι τιμές του  $B_o$ , του  $R_s$  και της πυκνότητας πάρθηκαν από το φύλλο της Εικόνας 4.11, οπότε είναι οι αντίστοιχες τιμές των ιδιοτήτων αυτών στο σημείο φυσαλίδας. Για το ιστόγραμμα της πυκνότητας API, οι τιμές της πυκνότητας του πετρελαίου σε συνθήκες επιφάνειας πάρθηκαν από το φύλλο της Εικόνας 4.4 και με βάση αυτές υπολογίστηκε η πυκνότητα API μέσω της Εξίσωσης 2.9.

Όπως προαναφέρθηκε, από τα ιστογράμματα μπορεί καταρχάς να γίνει αντιληπτό από τι είδους ρευστά αποτελείται η βάση δεδομένων. Από το ιστόγραμμα του συντελεστή  $R_s$  (Εικόνα 5.1 και 5.2), αρχικά, γίνεται κατανοητό πως η βάση αποτελείται κατά μείζονα λόγο από ρευστά τα οποία ανήκουν στην κατηγορία του μαύρου πετρελαίου, με  $R_s < 500 \text{ Sm}^3/\text{m}^3$  (περίπου 600 από τα 643 δείγματα), ενώ υπάρχουν και ορισμένα ρευστά (περίπου 35) υψηλότερης πτητικότητας, με  $500 < R_s < 1000 \text{ Sm}^3/\text{m}^3$ . Τέλος, υπάρχουν ελάχιστα ρευστά των οποίων η τιμή του  $R_s$  είναι είτε υπερβολικά υψηλή (6 ρευστά με  $R_s > 1000 \text{ Sm}^3/\text{m}^3$ ), οπότε και είναι πολύ ελαφριά, και 2 ρευστά υπερβολικά χαμηλό  $R_s$  (το ένα με  $R_s < 0$ , πιθανότατα από σφάλμα και ένα ρευστό με  $R_s = 0$ ).



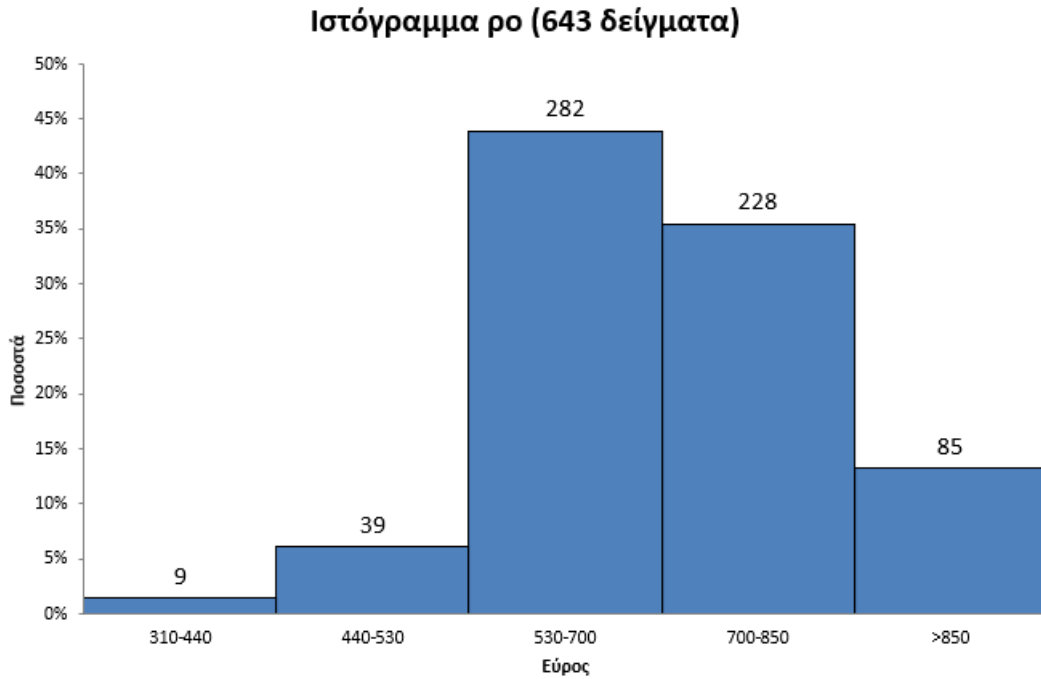
Εικόνα 5.1: Ιστόγραμμα των τιμών του συντελεστή  $R_s$ , σε  $\text{Sm}^3/\text{m}^3$  (1)



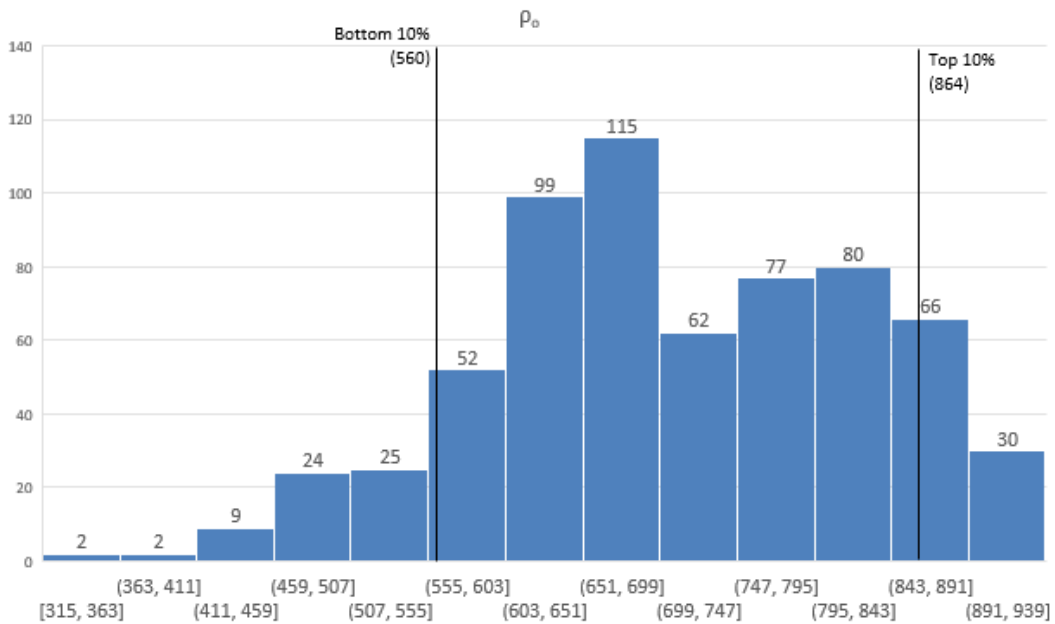
Εικόνα 5.2: Ιστόγραμμα των τιμών του συντελεστή  $R_s$ ,  $\text{Sm}^3/\text{m}^3$  (2)

Την εικόνα αυτή επιβεβαιώνει και η κατανομή των τιμών της πυκνότητας, η οποία παρουσιάζεται στις Εικόνες 5.3 και 5.4, με την πλειοψηφία των ρευστών (560 ρευστά) να έχουν τιμές οι οποίες κυμαίνονται από  $550\text{-}900 \text{ kg/m}^3$ , χαρακτηριστικές τιμές πυκνότητας για ρευστά μαύρου πετρελαίου. Ορισμένα δείγματα, περίπου 25, έχουν πυκνότητα  $>900 \text{ kg/m}^3$ , οπότε είναι μειωμένης πτητικότητας. Περίπου 50 ρευστά έχουν πυκνότητες που κυμαίνονται από 460 μέχρι  $550 \text{ kg/m}^3$ , οπότε είναι ιδιαίτερα πτητικά ρευστά, ενώ 13 ρευστά έχουν υπερβολικά χαμηλή πυκνότητα ( $<460 \text{ kg/m}^3$ ), που προέκυψε είτε από σφάλμα, είτε

πρόκειται για εξαιρετικά πτητικά ρευστά, πράγμα το οποίο θα διερευνηθεί στη συνέχεια μαζί με τα ρευστά που παρουσιάζουν πολύ υψηλές τιμές όσον αφορά τον συντελεστή  $R_s$ .



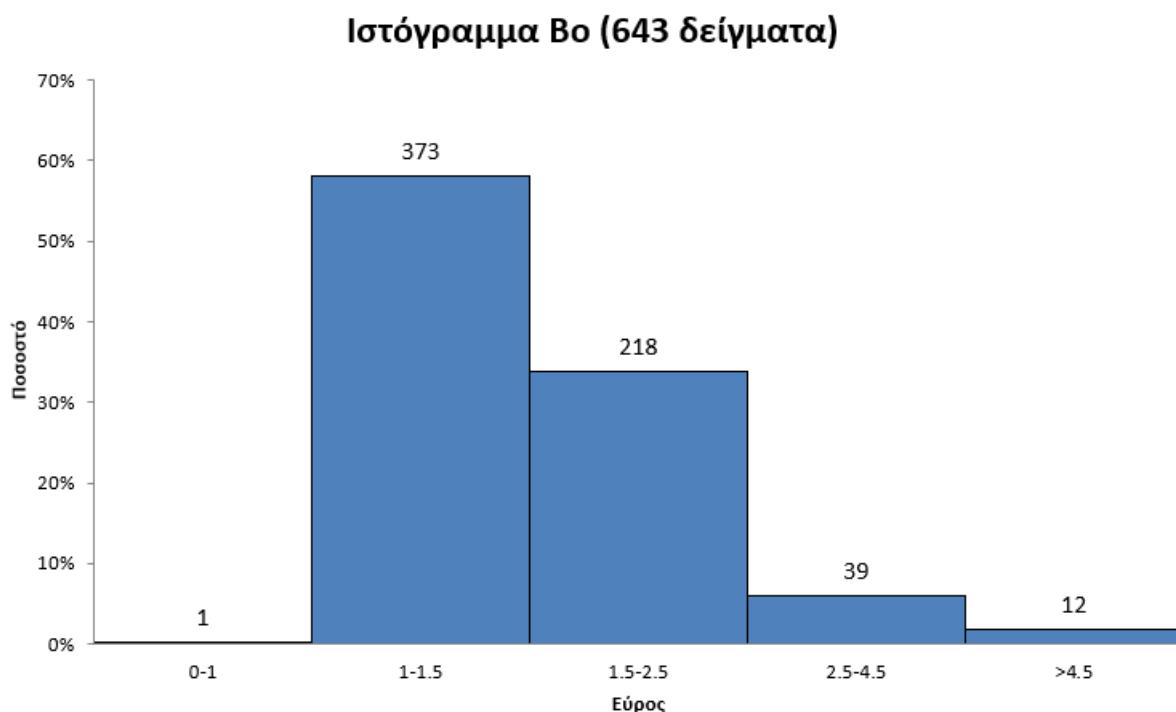
Εικόνα 5.3: Ιστόγραμμα των τιμών της πυκνότητας, σε  $\text{kg/m}^3$  (1)



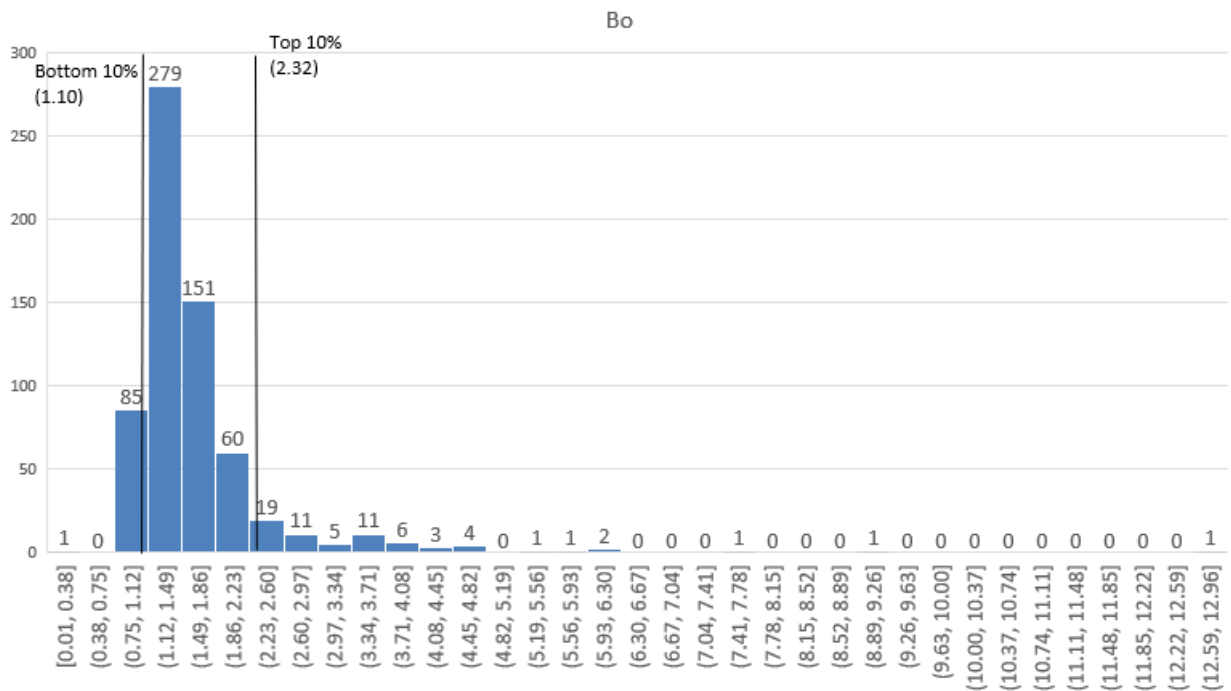
Εικόνα 5.4: Ιστόγραμμα των τιμών της πυκνότητας, σε  $\text{kg/m}^3$  (2)

Από το ιστόγραμμα του  $B_o$  (Εικόνες 5.5 και 5.6) επιβεβαιώνεται περαιτέρω η εικόνα αυτή. Η πλειοψηφία των δειγμάτων (περίπου 520) έχει τιμή  $B_o$  που κυμαίνεται από 1.1-2,2

$\text{m}^3/\text{Sm}^3$ , χαρακτηριστικές τιμές των ρευστών μαύρου πετρελαίου. Περίπου 55 ρευστά έχουν  $B_o < 1.1 \text{ m}^3/\text{Sm}^3$ , οπότε είναι μειωμένης πτητικότητας ή οι τιμές τους προέκυψαν από σφάλματα. Περίπου 34 ρευστά έχουν τιμές  $B_o$  που κυμαίνονται από 2.2 μέχρι  $3 \text{ m}^3/\text{Sm}^3$ , οπότε ανήκουν σε κατηγορίες ιδιαίτερα πτητικού πετρελαίου, ενώ 30 ρευστά έχουν ιδιαίτερα υψηλές τιμές  $B_o (>3)$ , οπότε είτε αποτελούνται από εξαιρετικά πτητικό πετρέλαιο, είτε πρόκειται για σφάλματα.



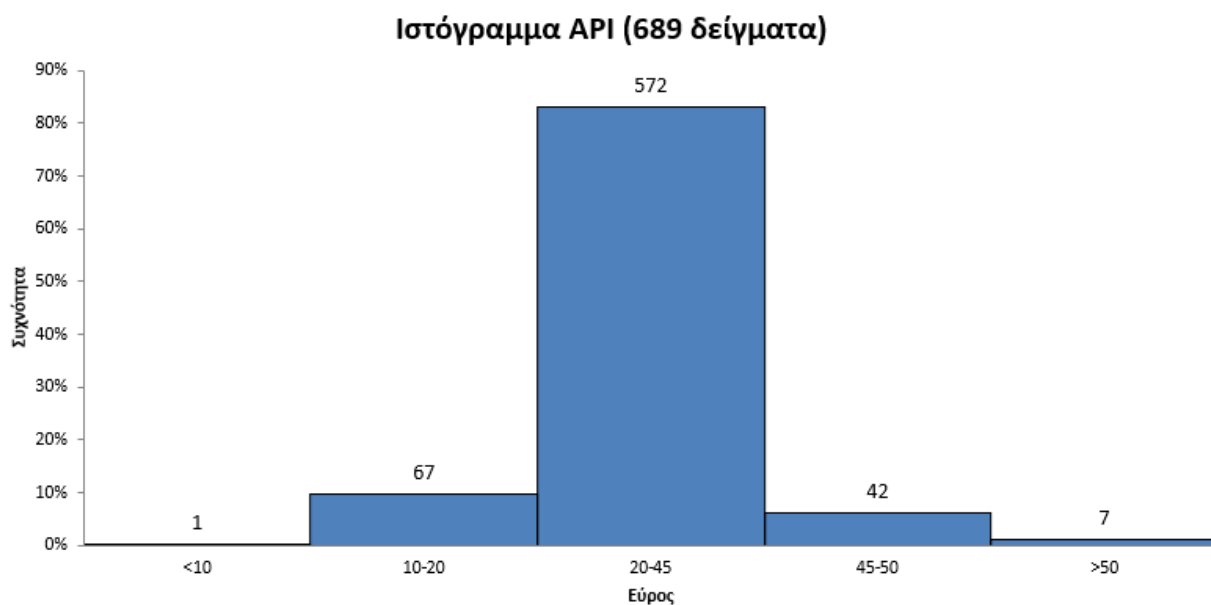
Εικόνα 5.5: Ιστόγραμμα των τιμών του συντελεστή  $B_o$ , σε  $\text{m}^3/\text{Sm}^3$  (1)



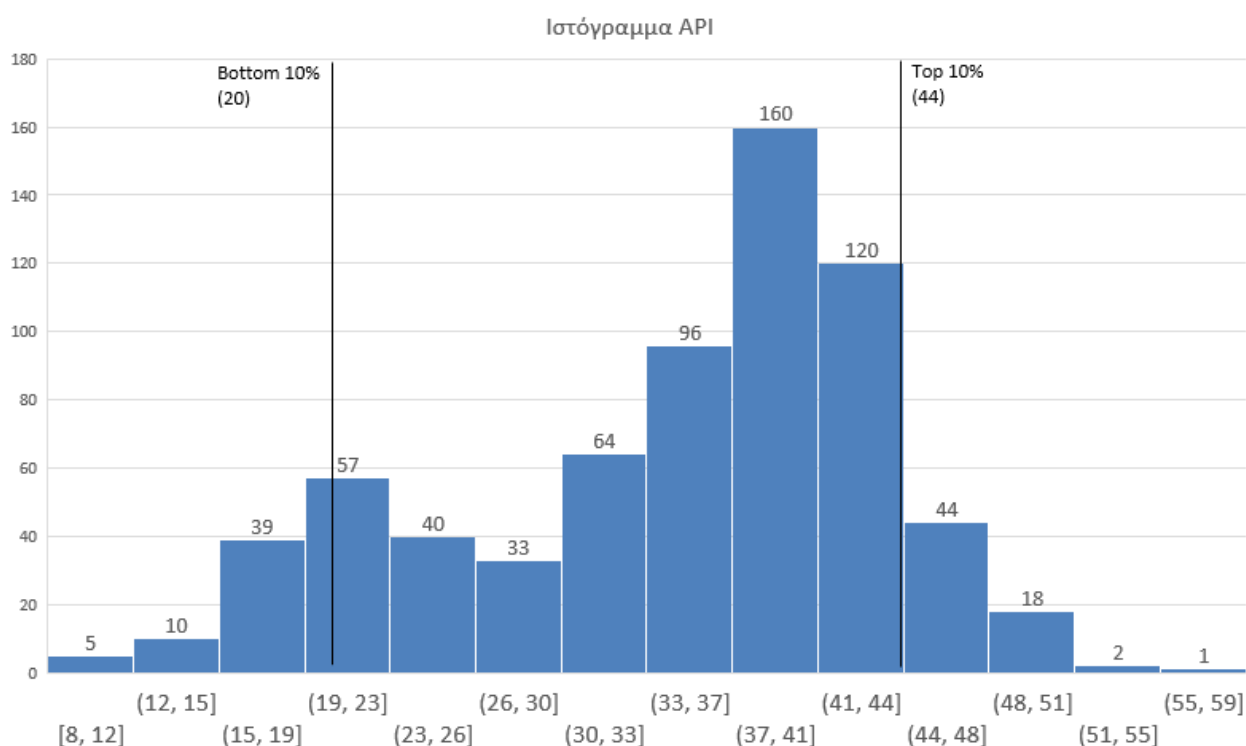
Εικόνα 5.6: : Ιστόγραμμα των τιμών του συντελεστή  $B_o$ , σε  $m^3/Sm^3$  (2)

Τέλος, η εικόνα αυτή επιβεβαιώνεται και από το ιστόγραμμα της πυκνότητας API (Εικόνες 5.7 και 5.8), στο οποίο παρατηρείται πως η πλειοψηφία των δειγμάτων ανήκει στην κατηγορία του μαύρου πετρελαίου, με 571 δείγματα να έχουν πυκνότητα API ανάμεσα στο 10 και στο 20, ενώ υπάρχουν 49 δείγματα πιο ελαφριού πετρελαίου (>45 API), πολλά από τα οποία ανήκουν στην κατηγορία του πτητικού πετρελαίου. Επιπλέον, 62 ρευστά έχουν πυκνότητα API ανάμεσα στις τιμές 10 και 20, οπότε τα ρευστά αυτά είναι πολύ μειωμένης πτητικότητας. Τέλος, υπάρχει ένα ρευστό με τιμή  $API < 10$ , το οποίο και απορρίπτεται μιας και δεν είναι δυνατόν ένα υγρό πετρέλαιο να έχει πυκνότητα  $API < 10$  (Ενότητα 2.3.10). Από τις τιμές του ιστογράμματος του API, μπορούμε επίσης να αποκλείσουμε 2 δείγματα, τα οποία έχουν  $API < 10$ . Εφόσον  $API = \frac{141.5}{\gamma_o} - 131.5$ , όπου  $\gamma_o$  είναι η ειδική πυκνότητα του πετρελαίου, και αφού η μέγιστη ειδική πυκνότητα του πετρελαίου μπορεί να είναι ίση με 1, το API μπορεί να ισούται το ελάχιστο με 10. Άρα το δείγμα που έχει API 8.1, απορρίπτεται.





Εικόνα 5.7: Ιστόγραμμα των τιμών της πυκνότητας API (1)



Εικόνα 5.8: Ιστόγραμμα των τιμών της πυκνότητας API (2)

Συμπερασματικά, μέσω των ιστογραμμάτων γίνεται κατανοητό πως η βάση δεδομένων αποτελείται κατά μείζονα λόγο από ρευστά μαύρου πετρελαίου (περίπου 80-85% του συνόλου), ενώ υπάρχουν ορισμένα ρευστά τα οποία είναι ιδιαίτερα πτητικά (5-10% του

---

συνόλου) και ορισμένα ρευστά τα οποία είναι πολύ μειωμένης πτητικότητας (επίσης 5-10% του συνόλου).

Στη συνέχεια, κρίθηκε απαραίτητη η αξιολόγηση των δειγμάτων που παρουσιάζουν ακραίες τιμές ιδιοτήτων, προκειμένου να εξακριβωθεί η αξιοπιστία τους. Η κριτική αυτή έγινε συγκρίνοντας τις τιμές των συντελεστών  $B_0$  και  $R_s$ , της πυκνότητας αλλά και του ιξώδους του κάθε δείγματος, και θα γίνουν οι ανάλογες παρατηρήσεις. Για παράδειγμα, μπορεί η τιμή του συντελεστή  $B_0$  ενός δείγματος να είναι υπερβολικά χαμηλή, αλλά η επίσης χαμηλή τιμή  $R_s$  και η υψηλή τιμή πυκνότητας και ιξώδους να κάνουν φανερό ότι πρόκειται για δείγμα πετρελαίου πολύ μειωμένης πτητικότητας και πως η τιμή αυτή δεν είναι αποτέλεσμα σφάλματος. Αντιθέτως, είναι πιθανό ορισμένες από τις ιδιότητες να έχουν τιμές οι οποίες δεν είναι αποδεκτές, με αποτέλεσμα το δείγμα να θεωρηθεί μη αποδεκτό. Οι παρατηρήσεις που διεξάχθηκαν από τον συγκεκριμένο ελέγχου παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1, όπου οι τιμές οι οποίες αναγράφονται με έντονη γραμματοσειρά είναι ο λόγος για τον οποίο ασκείται ο έλεγχος του συγκεκριμένου ρευστού.

<b>Ρευστό</b>	<b>B<sub>0</sub></b> (m <sup>3</sup> /Sm <sup>3</sup> )	<b>R<sub>s</sub></b> (Sm <sup>3</sup> /Sm <sup>3</sup> )	<b>ρ<sub>0</sub></b> (kg/m <sup>3</sup> )	<b>μ</b> (Pa·s)	<b>Παρατηρήσεις</b>
1	12.7	<b>3048</b>	<b>400</b>	0.00031	Δείγμα πολύ ελαφριού πετρελαίου
2	9.22	<b>2017</b>	<b>369</b>	-	Δείγμα πολύ ελαφριού πετρελαίου
3	7.69	<b>2010</b>	<b>426</b>	0.00045	Δείγμα πολύ ελαφριού πετρελαίου
4	<b>779</b>	15.85	779	0.0013	Η τιμή του B <sub>0</sub> έχει αντικατασταθεί με την τιμή της πυκνότητας, μη αποδεκτό δείγμα
5	6.14	<b>1090</b>	314	-	Δείγμα πολύ ελαφριού πετρελαίου
6	-	-	-	<b>0</b>	Εσφαλμένη τιμή ιξώδους, μη αποδεκτό δείγμα
7	-	-	<b>357</b>	-	Πιθανότατα είναι δείγμα πολύ ελαφριού πετρελαίου
8	4.56	744	<b>415</b>	0.00015	Δείγμα πολύ ελαφριού πετρελαίου
9	5.42	987	<b>417</b>	0.000066	Δείγμα πολύ ελαφριού πετρελαίου
10	4.81	880	<b>431</b>	0.00018	Δείγμα πολύ ελαφριού πετρελαίου
11	3.96	689	<b>442</b>	0.00016	Δείγμα πολύ ελαφριού πετρελαίου
12	6.01	1344	<b>445</b>	0.00012	Δείγμα πολύ ελαφριού πετρελαίου
13	5.69	1181	<b>446</b>	0.00015	Δείγμα πολύ ελαφριού πετρελαίου
14	3.84	512	<b>454</b>	0.00013	Δείγμα πολύ ελαφριού πετρελαίου
15	0.007	<b>-1.37</b>	420	0.0000478	Αρνητική τιμή R <sub>s</sub> και τιμή B <sub>0</sub> που πλησιάζει το 0, αδύνατα και τα 2, οπότε μη αποδεκτό δείγμα.
16	<b>1.06</b>	<b>0</b>	901	0.030	Τιμή R <sub>s</sub> ίση με το 0 στο σημείο φυσαλίδας, μη αποδεκτό δείγμα
17	1.04	<b>0.56</b>	917	0.035	Δείγμα πετρελαίου πολύ μειωμένης πτητικότητας

18	1.05	<b>0.65</b>	865	0.011	Δείγμα πετρελαίου πολύ μειωμένης πτητικότητας
19	1.05	<b>0.66</b>	818	0.0027	Δείγμα πετρελαίου πολύ μειωμένης πτητικότητας
20	1.04	<b>0.76</b>	882	0.082	Δείγμα πετρελαίου πολύ μειωμένης πτητικότητας
21	1.05	<b>0.84</b>	838	0.015	Δείγμα πετρελαίου πολύ μειωμένης πτητικότητας
22	1.06	<b>0.92</b>	805	0.0022	Δείγμα πετρελαίου πολύ μειωμένης πτητικότητας
23	1.06	<b>0.99</b>	809	0.0027	Δείγμα πετρελαίου πολύ μειωμένης πτητικότητας
24	<b>4.1</b>	855	505	0.0010	Δείγμα πολύ ελαφριού πετρελαίου
25	<b>4.16</b>	917	467	0.00028	Δείγμα πολύ ελαφριού πετρελαίου
26	<b>4.17</b>	819	463	0.017	Δείγμα πολύ ελαφριού πετρελαίου
27	<b>4.5</b>	986	469	0.00013	Δείγμα πολύ ελαφριού πετρελαίου
28	<b>4.6</b>	970	469	0.0001	Δείγμα πολύ ελαφριού πετρελαίου

Πίνακας 5.1: Ποιοτικός έλεγχος των ογκομετρικών ιδιοτήτων σε πίεση κορεσμού

Επομένως, μετά την ανάλυση, συμπεραίνεται πως τα δείγματα που παρουσιάζουν τις ακραίες τιμές στα ιστογράμματα των διαφόρων ιδιοτήτων, κατά την πλειονότητα δεν αποτελούν μη αποδεκτά δείγματα. Αντιθέτως, είναι δείγματα είτε υπερβολικά χαμηλής είτε υπερβολικά υψηλής πτητικότητας, μιας και οι τιμές όλων των ιδιοτήτων στο σημείο φουσαλίδας συμφωνούν με τη θεώρηση αυτή.

Ποιοτικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε επίσης με βάση τις τιμές της θερμοκρασίας των δειγμάτων στις συνθήκες ταμειντήρα (όσον αφορά τα δείγματα που λήφθηκαν από αυτόν). Υπάρχει ένας αριθμός δειγμάτων των οποίων η θερμοκρασία είναι πολύ χαμηλή. Τα δείγματα αυτά, στα οποία θα ασκηθεί κριτική, παρουσιάζονται μαζί με τις παρατηρήσεις τους στον Πίνακα 5.2.

<b>Ρευστό</b>	<b>Θερμοκρασία Ταμιευτήρα (K)</b>	<b>Πίεση σε συνθήκες ταμιευτήρα (MPa)</b>	<b>Παρατηρήσεις</b>
1	255	-	Απορριπτέο δείγμα, πολύ χαμηλή θερμοκρασία
2	255	-	Απορριπτέο δείγμα, πολύ χαμηλή θερμοκρασία
3	255	-	Απορριπτέο δείγμα, πολύ χαμηλή θερμοκρασία
4	255	-	Απορριπτέο δείγμα, πολύ χαμηλή θερμοκρασία
5	255	-	Απορριπτέο δείγμα, πολύ χαμηλή θερμοκρασία
6	273	-	Απορριπτέο δείγμα, πολύ χαμηλή θερμοκρασία
7	303	4	Το δείγμα βρίσκεται πολύ κοντά στην επιφάνεια, που εξηγεί την χαμηλή θερμοκρασία και το οποίο επιβεβαιώνεται από την πολύ χαμηλή τιμή της πίεσης στον ταμιευτήρα
8	303	5	Βλέπε ρευστό 7
9	303	9	Βλέπε ρευστό 7
10	303	9	Βλέπε ρευστό 7
11	311	5	Βλέπε ρευστό 7
12	311	5	Βλέπε ρευστό 7
13	311	4.9	Βλέπε ρευστό 7
14	311	5.5	Βλέπε ρευστό 7
15	311	18	Βλέπε ρευστό 7

16	312	6	Βλέπε ρευστό 7
----	-----	---	----------------

Πίνακας 5.2: Ποιοτικός έλεγχος των τιμών της θερμοκρασίας ταμιευτήρα

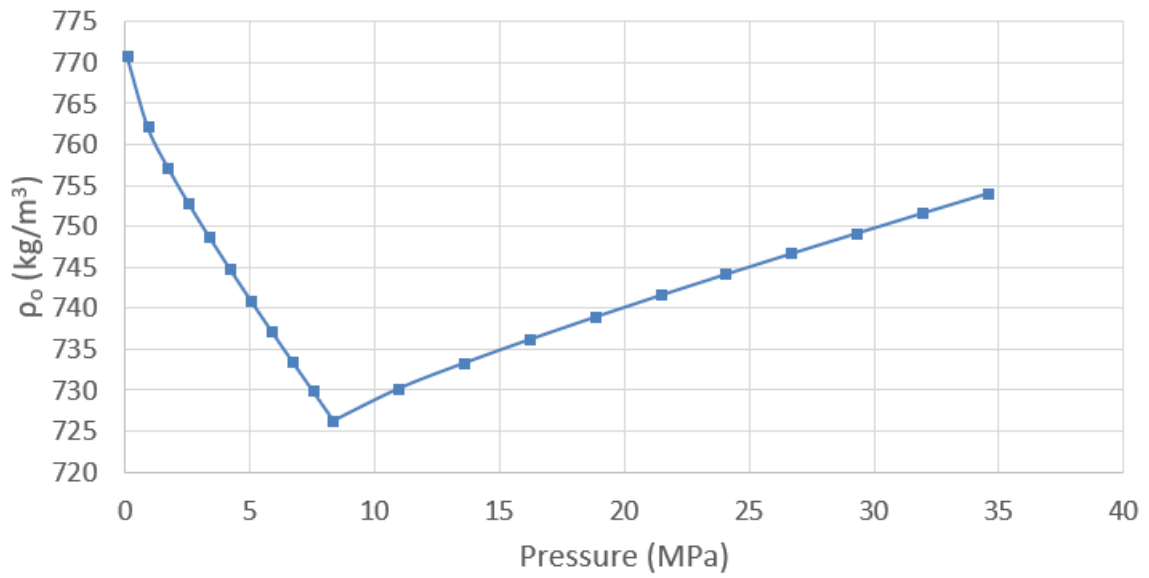
## 5.2 Οργάνωση δεδομένων και παρουσίαση μεθοδολογίας σχεδίασης καμπυλών για ένα ρευστό

Επόμενο βήμα του ποιοτικού ελέγχου ήταν η συγκέντρωση και η οργάνωση όλων των δεδομένων, αλλά και η σχεδίαση όλων των καμπυλών, για ένα μόνο ρευστό της βάσης δεδομένων. Σκοπός του συγκεκριμένου βήματος, όπως προαναφέρθηκε, ήταν η καλύτερη κατανόηση του αντικειμένου της εργασίας και συγκεκριμένα ο πειραματισμός με στόχο την κατανόηση του τρόπου σχεδιασμού και κριτικής του σχήματος των καμπυλών των ογκομετρικών ιδιοτήτων, το οποίο στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε και στα υπόλοιπα δείγματα της βάσης δεδομένων.

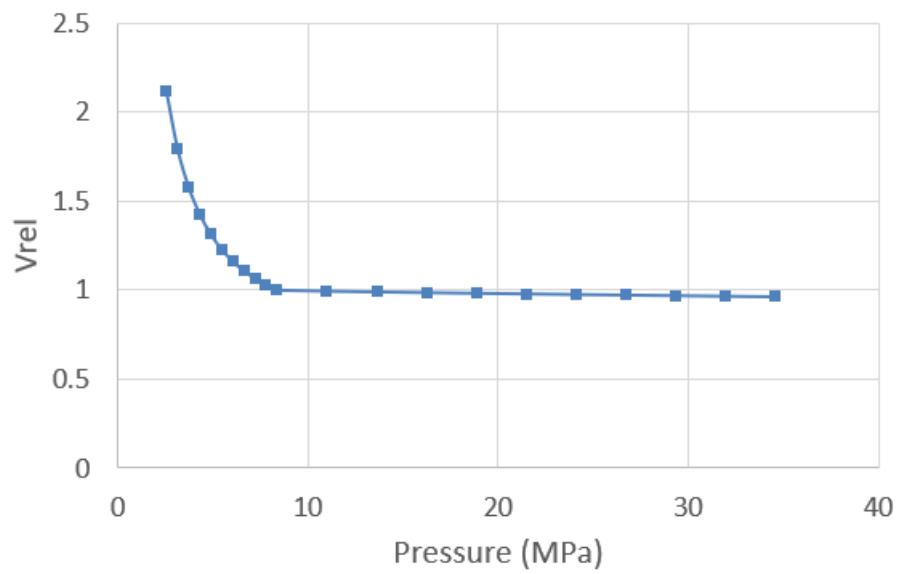
Η διαδικασία αυτή έγινε για το τυχαίο δείγμα, σε ξεχωριστό φύλλο του Excel, όπου μεταφέρθηκαν δεδομένα όπως οι γενικές πληροφορίες του ρευστού, η ανάλυση της σύστασής του και το μοντέλο φυσικής ιδιότητας, με βάση το οποίο σχεδιάστηκαν οι καμπύλες των ογκομετρικών ιδιοτήτων. Επομένως, στη συνέχεια, στο φύλλο αυτό σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα κάθε ογκομετρικής ιδιότητας του δείγματος συναρτήσει της πίεσης, ορισμένα από τα οποία παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.9-5.11. Για την κάθε εξίσωση (από τις εξισώσεις της 1-8 του Πίνακα 4.11) που χρησιμοποιείται, το εύρος της πίεσης επιμερίστηκε σε 10 τιμές, για τις οποίες επιλύθηκε η κάθε εξίσωση και προσδιορίστηκε η ανάλογη ιδιότητα. Επίσης, έγινε ο υπολογισμός και σχεδιασμός της καμπύλης της συμπεστότητας του υγρού δείγματος, για πιέσεις πάνω από αυτή του σημείου φυσαλίδας, με τη χρήση της Εξίσωσης 2.2. Τέλος, έγιναν 2 έλεγχοι συνέπειας (consistency checks) για τον συντελεστή  $B_o$  και για την πυκνότητα  $\rho_o$ . Μέσω αυτών, ελέγχθηκε αν ισχύουν οι εξισώσεις της πυκνότητας και του συντελεστή  $B_o$ , για τιμές την πίεσης  $P > P_b$ , δηλαδή για πιέσεις μεγαλύτερες του σημείου φυσαλίδας. Οι έλεγχοι αυτοί έγιναν με την εφαρμογή των Εξισώσεων 5.1 και 5.2, οι τιμές των οποίων θεωρητικά έπρεπε να είναι ίσες με τις τιμές των  $B_o$  και  $\rho_o$  αντίστοιχα, στο εύρος των πιέσεων που αναφέρθηκε.

$$B_o(P) = B_o(P_b) \cdot V_{rel}(P) \quad (5.1)$$

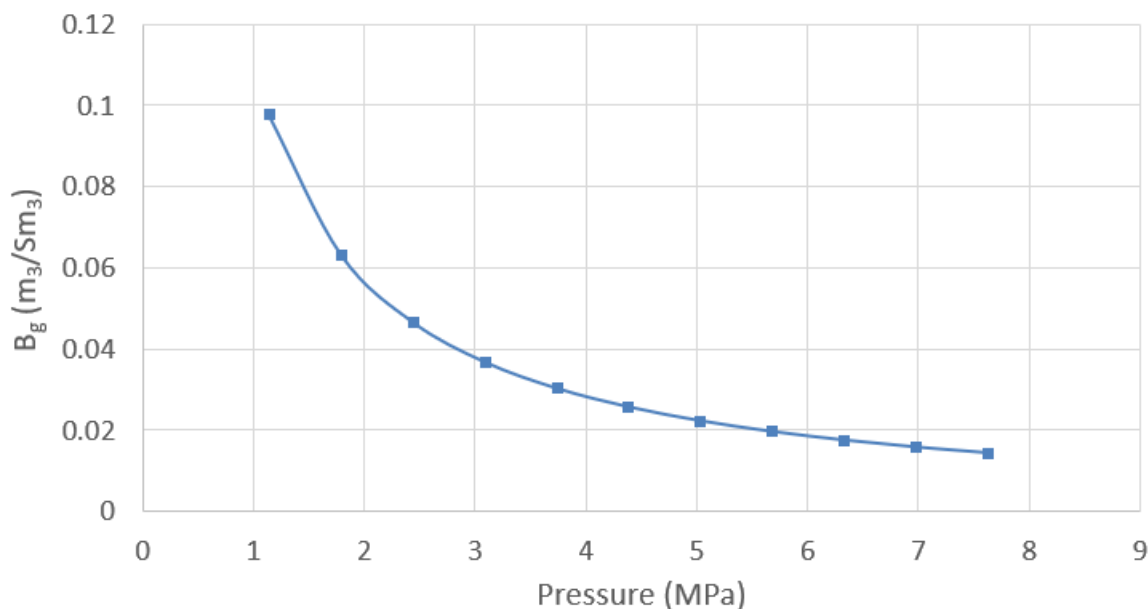
$$\rho_o(P) = \rho_o(P_b) / V_{rel}(P) \quad (5.2)$$



Εικόνα 5.9: Διαγράμματα της πυκνότητας συναρτήσει της πίεσης, για το τυχαίο ρευστό που μελετάται



Εικόνα 5.10: Διαγράμματα του σχετικού όγκου συναρτήσει της πίεσης, για το τυχαίο ρευστό που μελετάται



Εικόνα 5.11: Διαγράμματα του συντελεστή  $B_g$  συναρτήσει της πίεσης, για το τυχαίο ρευστό που μελετάται

Το σχήμα και οι τιμές των διαγραμμάτων φαίνονται λογικά για όλες τις ιδιότητες, συγκριτικά με τα πρότυπα διαγράμματα των ιδιοτήτων που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 2. Επίσης, τα αποτελέσματα των 2 ελέγχων συνέπειας (consistency checks) επαληθεύονται, επομένως η σχεδίαση των καμπυλών μπορεί να προχωρήσει παρακάτω σε ολόκληρη τη βάση δεδομένων.

### 5.3 Σχεδίαση καμπυλών για όλα τα ρευστά και τις ιδιότητες

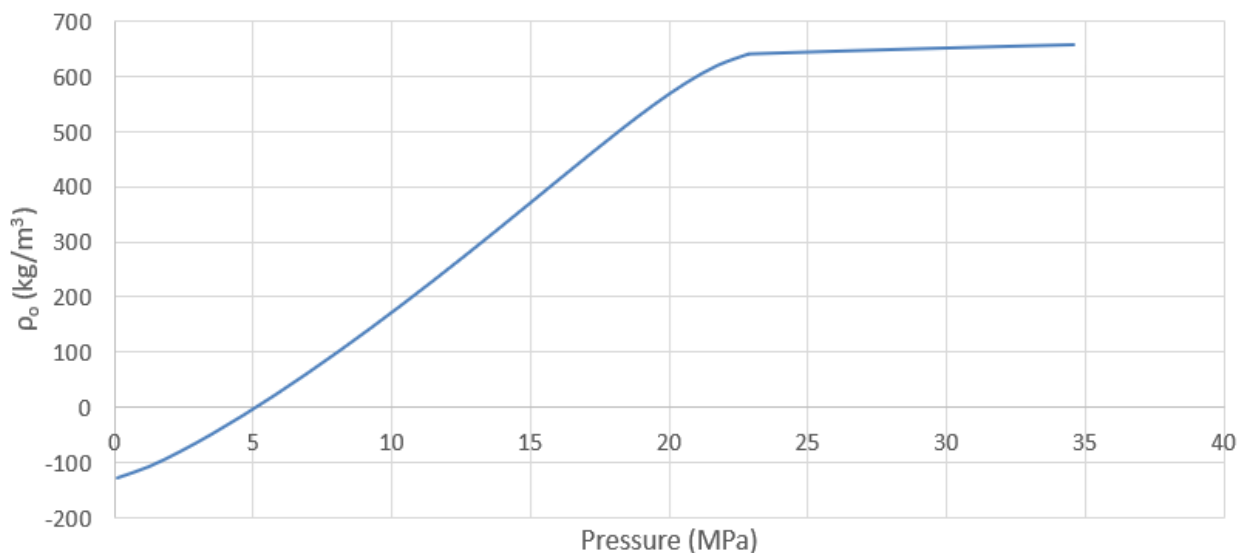
Επόμενος στόχος ήταν η εκτέλεση του περασμένου βήματος για όλο το πλήθος των ρευστών της βάσης δεδομένων, έτσι ώστε να ασκηθεί κριτική στο σύνολό τους. Πιο συγκεκριμένα, οι καμπύλες των συντελεστών  $B_o$ ,  $B_g$ ,  $R_s$ , όπως επίσης και του σχετικού όγκου ( $V_{rel}$ ), της πυκνότητας ( $\rho_o$ ), της σχετικής πυκνότητας του αερίου ( $\gamma_g$ ), του συντελεστή απόκλισης  $Z$  και της συμπιεστότητας ( $c_o$ ) σχεδιάστηκαν συναρτήσει της πίεσης για όλα τα ρευστά και έπειτα ασκήθηκε κριτική στο σχήμα και τις τιμές τους, συγκριτικά με τα πρότυπα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2. Επίσης, εκτελέστηκαν για το κάθε ρευστό και οι 2 έλεγχοι συνέπειας (“consistency checks”), μέσω των εξισώσεων για τον συντελεστή  $B_o$  και για την πυκνότητα  $\rho_o$ .

Ο σχεδιασμός των καμπυλών έγινε ξανά με τη χρήση των κατάλληλων εξισώσεων για την κάθε ιδιότητα, η οποία προσδιορίζεται για το εύρος πίεσης της κάθε δοκιμής PVT. Το εύρος

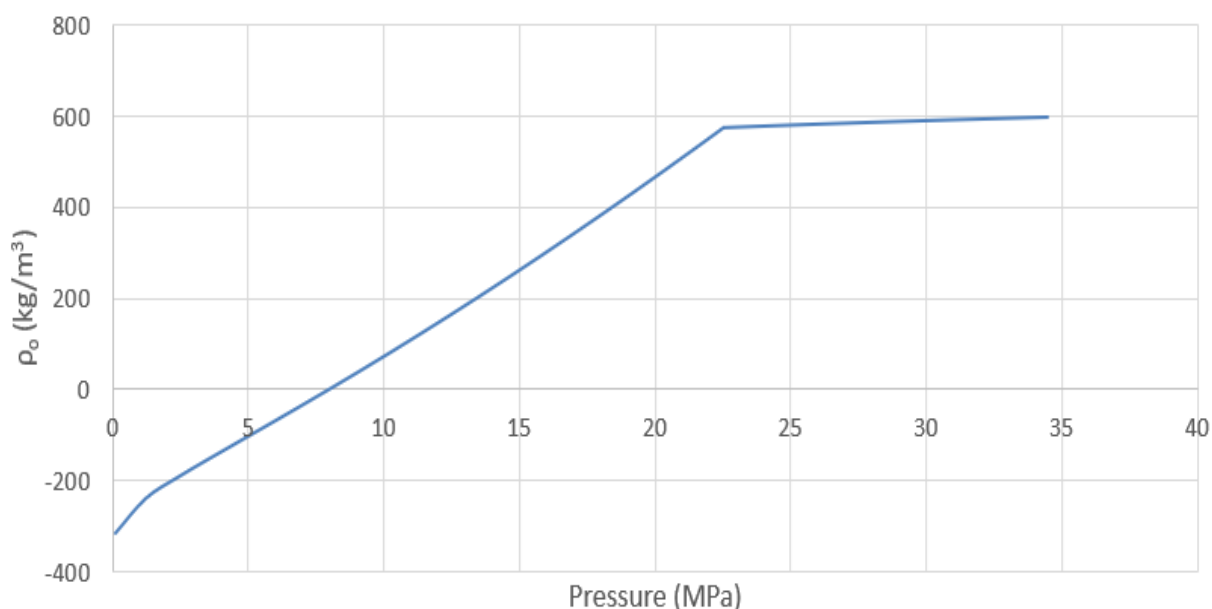


της πίεσης για το οποίο προσδιορίζεται η κάθε ιδιότητα χωρίσθηκε σε 10 σημεία, τα οποία απεικονίστηκαν στο διάγραμμα και μέσω αυτών σχεδιάστηκε η κάθε καμπύλη. Ακόμη, για κάθε επιλεγμένη ιδιότητα και ρευστό αναγράφεται και η τιμή της ιδιότητας αυτής στο σημείο φουσαλίδας, όπως αυτή λαμβάνεται από μια ανεξάρτητη πηγή, το φύλλο “F(Psat)”. Η σύγκριση των δύο είχε σκοπό να επιβεβαιωθεί πως η δηλωθείσα τιμή στην πίεση κορεσμού είναι ίση με την τιμή που υπολογίσθηκε μέσω των εξισώσεων και να επιβεβαιωθεί περαιτέρω πως δεν έχει γίνει κάποιο λάθος στον σχεδιασμό της καμπύλης.

Κατά τον σχεδιασμό των καμπυλών, παρατηρήθηκε πως σε μια σειρά ρευστών παράγονταν αφύσικες διφασικές καμπύλες των συντελεστών  $B_o$  και  $R_s$ , αλλά και της πυκνότητας  $\rho_o$ . Παρατηρήθηκε επίσης ότι η αλλαγή αυτή είχε συμβεί μόνο στις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται η εξίσωση 4 του Πίνακα 4.3 για τον υπολογισμό ιδιοτήτων. Στις Εικόνες 5.12 και 5.13 φαίνονται χαρακτηριστικά οι καμπύλες της πυκνότητας δύο χαρακτηριστικών παραδειγμάτων ρευστών, το σχήμα των οποίων προφανώς δεν ακολουθεί αυτό του πρότυπου διαγράμματος (Εικόνα 2.8) και είναι επίσης παρόμοιο στα 2 αυτά ρευστά.

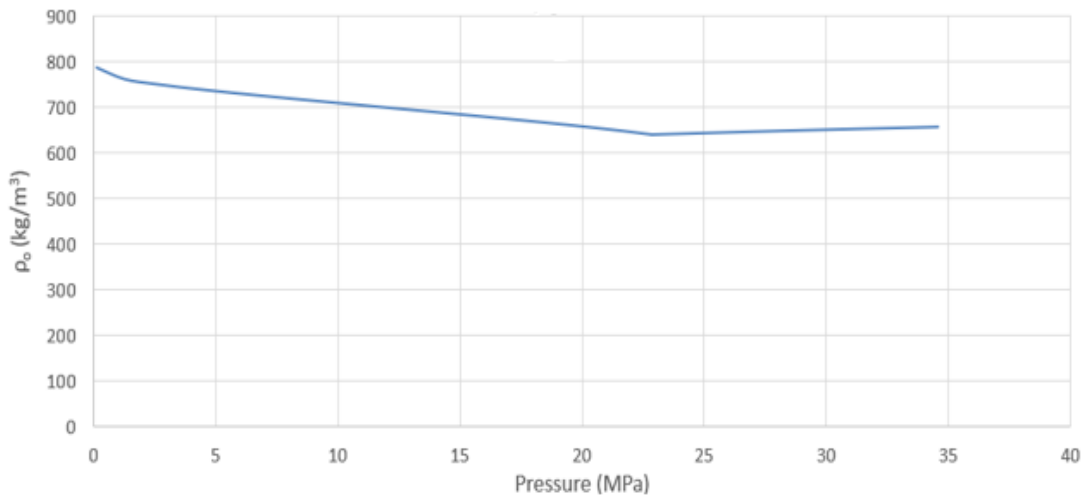


Εικόνα 5.12: Καμπύλη πυκνότητας προβληματικού δείγματος πριν τη διόρθωση των συντελεστών, σε kg/m<sup>3</sup>

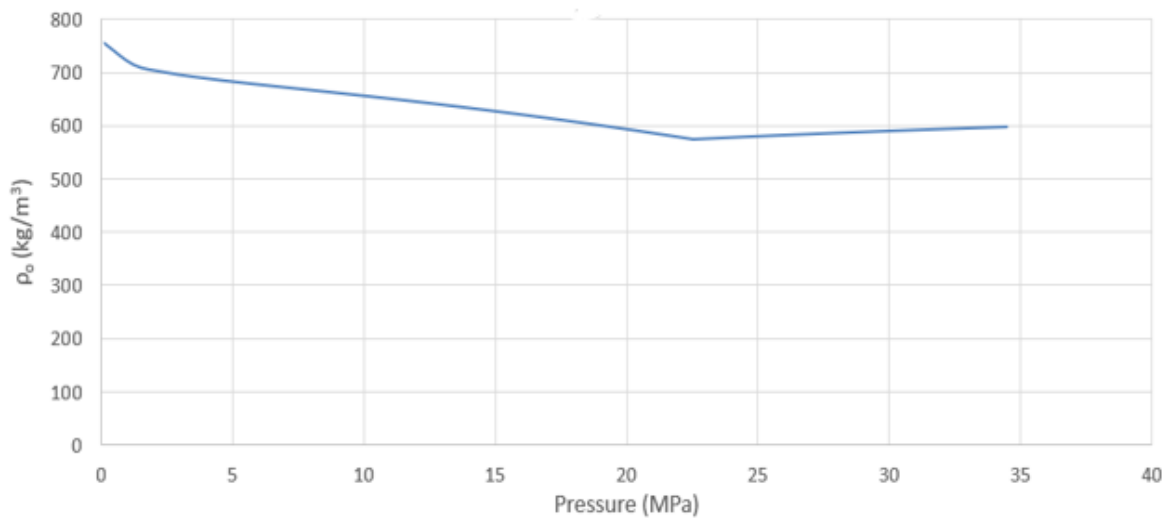


Εικόνα 5.13: Καμπύλη πυκνότητας προβληματικού δείγματος πριν τη διόρθωση των συντελεστών, σε kg/m<sup>3</sup>

Μετά από τις απαραίτητες δοκιμές, έγινε αντιληπτό ότι απαιτούνταν η αντιστροφή των συντελεστών έτσι ώστε να προκύψουν σωστά τα απαραίτητα διαγράμματα, και συγκεκριμένα των συντελεστών a,b,c,d και i,j,k της εξίσωσης τύπου 4 (Πίνακας 4.3). Έπειτα από τις δοκιμές αυτές, αναγνωρίστηκε πως στον πίνακα του μοντέλου φυσικών ιδιοτήτων (Ενότητα 4.8), η σωστή σειρά των συντελεστών a,b,c,d είναι d,c,b,a και των συντελεστών i,j,k, είναι η k,j,i. Έπειτα από την αλλαγή αυτή, τα διαγράμματα των ιδιοτήτων άλλαξαν πλήρως και απέκτησαν τη σωστή τους μορφή, για όλα τα δείγματα για τα οποία παρουσιάζονταν το συγκεκριμένο πρόβλημα. Στις Εικόνες 5.14 και 5.15 φαίνονται οι καμπύλες της πυκνότητας των μέχρι πρότινος προβληματικών ρευστών, μετά τη διόρθωση των συντελεστών.



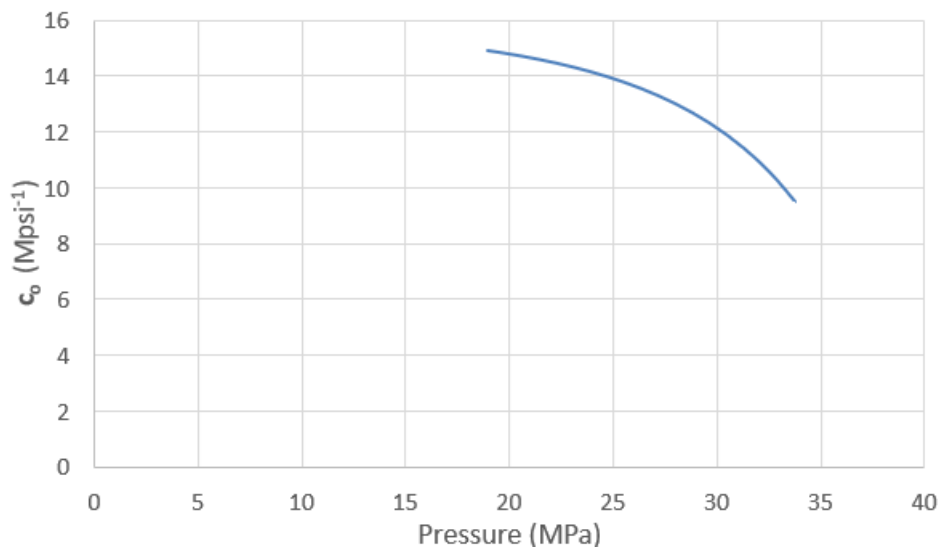
Εικόνα 5.14: Καμπύλη πυκνότητας προβληματικού δείγματος μετά τη διόρθωση των συντελεστών, σε kg/m<sup>3</sup>



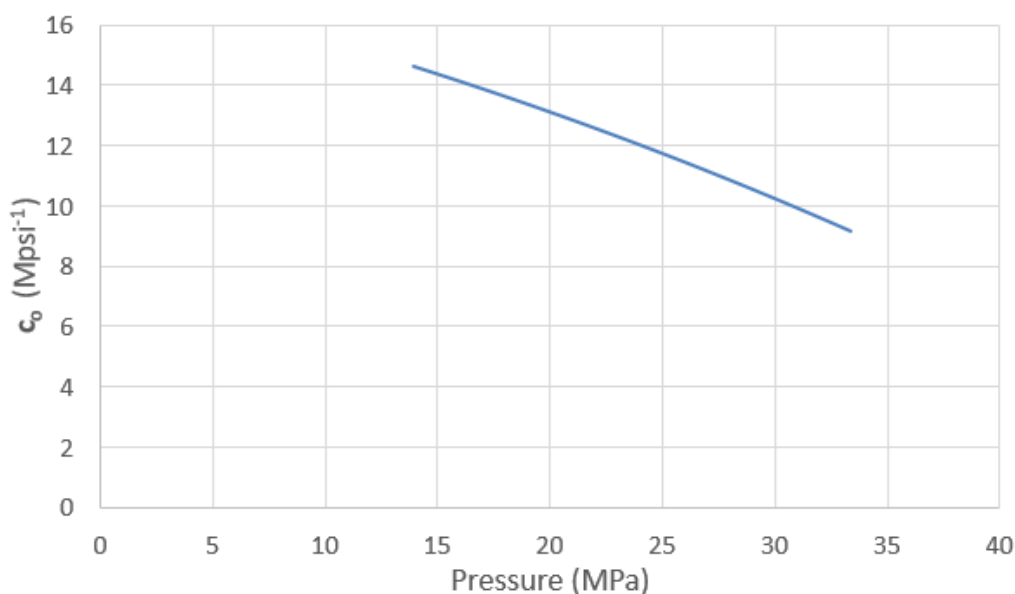
Εικόνα 5.15: Καμπύλη πυκνότητας προβληματικού δείγματος μετά τη διόρθωση των συντελεστών, σε kg/m<sup>3</sup>

Έπειτα από το απαραίτητο αυτό βήμα, έγινε ο οπτικός έλεγχος του σχήματος των καμπυλών των ιδιοτήτων, αλλά και ένας οπτικός έλεγχος των τιμών τους, όπως και των τιμών των consistency checks που προαναφέρθηκαν, για όλα τα δείγματα της βάσης δεδομένων. Όπως είναι λογικό, οι καμπύλες της πλειοψηφίας των δειγμάτων είχαν τα αναμενόμενα σχήματα, τα οποία ταίριαζαν σχηματικά με τα πρότυπα του Κεφαλαίου 2 και βρισκόνταν μέσα στα αναμενόμενα εύρη τιμών.

Στη συνέχεια παρατηρήθηκαν ορισμένες ιδιαιτερότητες στις καμπύλες του συντελεστή συμπίεστικότητας ( $c_o$ ), πολλές από τις οποίες δεν ακολουθούσαν το πρότυπο σχήμα (Εικόνα 2.10). Στις Εικόνες 5.16 και 5.17 φαίνεται χαρακτηριστικά το σχήμα των καμπυλών δύο δειγμάτων οι οποίες, όπως και οι καμπύλες πολλών ακόμη δειγμάτων, δεν έχουν το αναμενόμενο σχήμα, όμως τα δείγματα αυτά δεν θεωρούνται μη αποδεκτά. Ο λόγος για τον οποίο τα δείγματα παραμένουν δεκτά είναι αρχικά επειδή οι τιμές της συμπίεστικότητας στο SI είναι της τάξης του  $10^{-3} \text{ Pa}^{-1}$ , οπότε είναι αρκετά πιθανό μικρά σφάλματα που έχουν συμβεί στο 4<sup>ο</sup> ή 5<sup>ο</sup> δεκαδικό της τιμής να έχουν οδηγήσει στη διαστρέβλωση του σχήματος των καμπυλών, ενώ επίσης οι τιμές του συντελεστή συμπίεστικότητας δεν επηρεάζουν τον ποιοτικό έλεγχο των υπολοίπων διαγραμμάτων, ούτε χρησιμοποιούνται για τον ποιοτικό έλεγχο που θα γίνει στις επόμενες ενότητες, επομένως η απόρριψη των συγκεκριμένων δειγμάτων δεν κρίνεται απαραίτητη εφόσον και η απόκλισή τους από το αναμενόμενο σχήμα δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική.



Εικόνα 5.16: Καμπύλη του συντελεστή συμπίεστικότητας ( $c_o$ ) προβληματικού δείγματος, σε MPsi<sup>-1</sup>



Εικόνα 5.17: Καμπύλη του συντελεστή συμπίεστικότητας ( $c_0$ ) προβληματικού δείγματος, σε MPsi<sup>-1</sup>

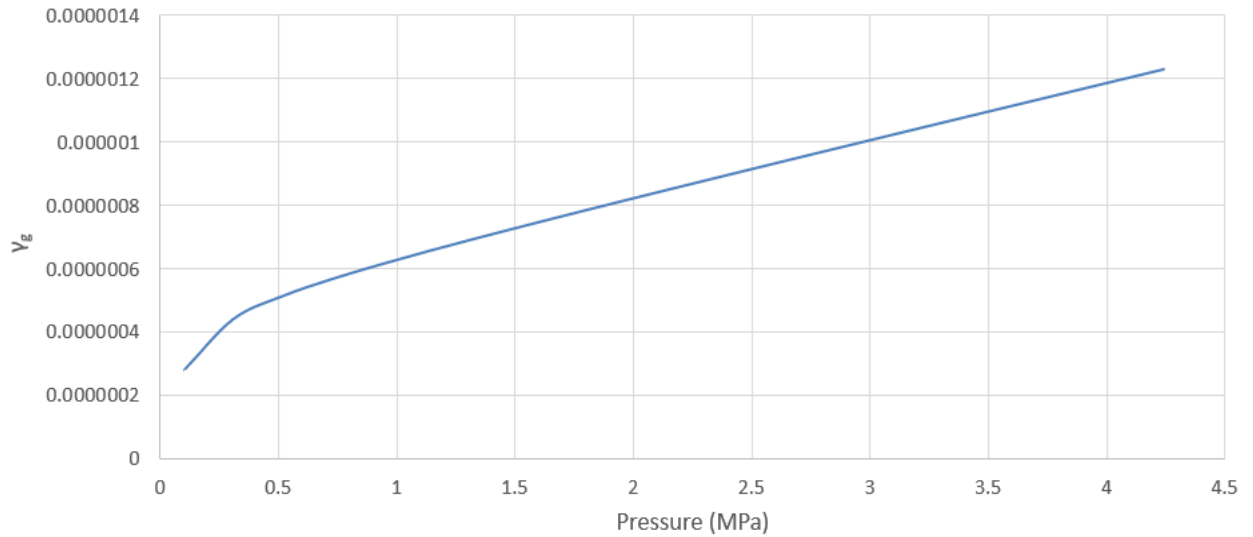
Παρόλο που οι καμπύλες των περισσότερων δειγμάτων παρουσίασαν τα αναμενόμενα σχήματα, παρατηρήθηκε ένας σημαντικός αριθμός δειγμάτων, τα οποία εμφάνισαν ιδιαιτερότητες στις καμπύλες τους και μετά από περαιτέρω ανάλυση χαρακτηρίστηκαν ως αποδεκτά ή μη αποδεκτά δείγματα αναλόγως. Η ανάλυση αυτή χρειάστηκε να ασκηθεί στα παρακάτω ρευστά και έδωσε τα εξής αποτελέσματα:

- Ρευστό 1

Απορρίπτεται. Οι συντελεστές των τιμών του σχετικού όγκου ισούνται με 0, οπότε είναι αδύνατος ο σχεδιασμός της καμπύλης αυτού και της συμπίεστικότητας.

- Ρευστό 2

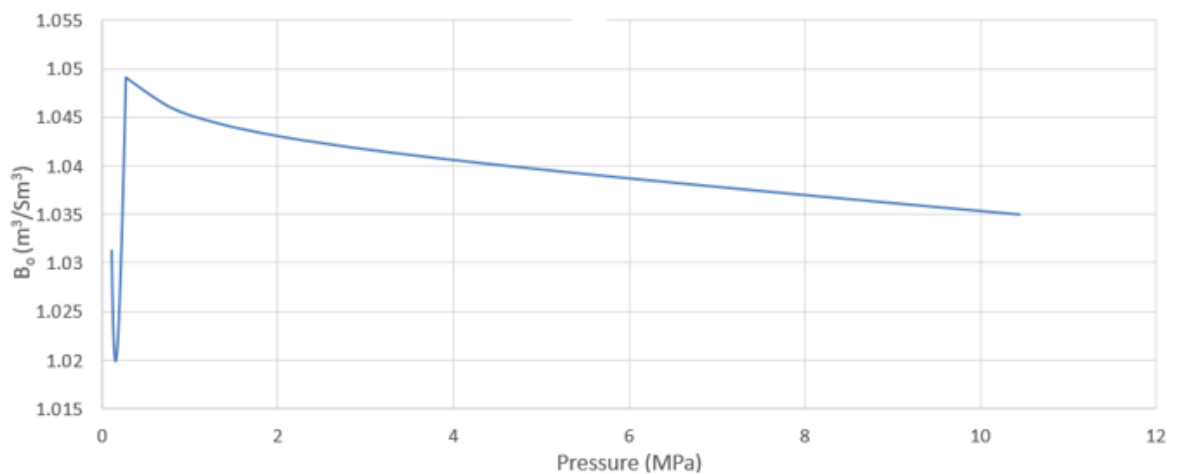
Απορρίπτεται. Η καμπύλη της ειδικής πυκνότητας ( $\gamma_g$ ), η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.18, είναι γνησίως φθίνουσα καθώς η πίεση μειώνεται και οι τιμές της κυμαίνονται από  $2 \cdot 10^7$  έως  $14 \cdot 10^7$ , το οποίο είναι αδύνατο. Επομένως, απορρίπτεται και λόγω του σχήματος της καμπύλης, αλλά και λόγω των τιμών της ειδικής πυκνότητας.



Εικόνα 5.18: Καμπύλη της ειδικής πυκνότητας ( $\gamma_g$ ) του ρευστού 2, σε  $\text{kg/m}^3$

- Ρευστό 3

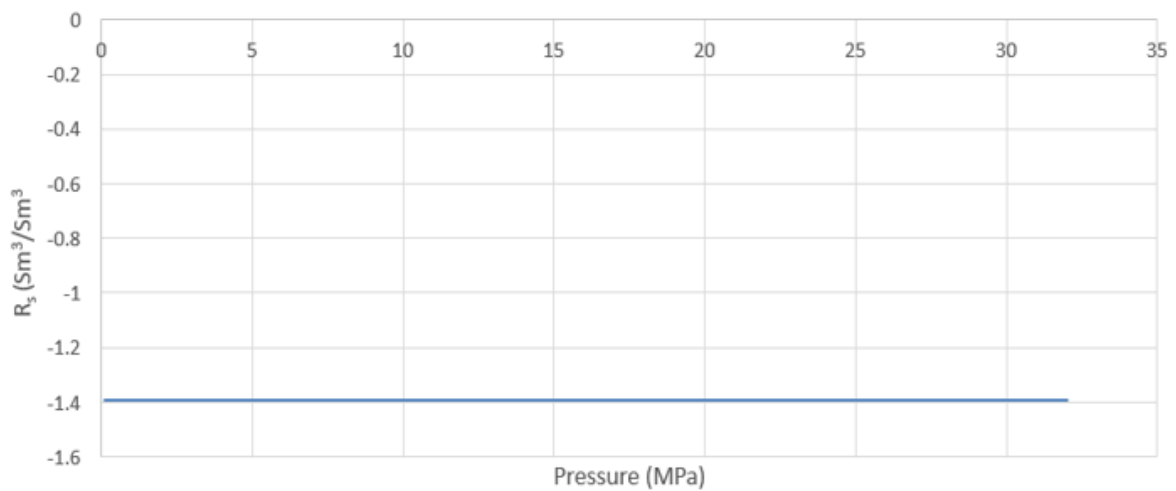
Απορρίπτεται. Κατά την μείωση της πίεσης κοντά στις ατμοσφαιρικές τιμές, η καμπύλη του  $B_o$  (Εικόνα 5.19) γίνεται αύξουσα. Επίσης, η καμπύλη του συντελεστή  $B_g$  είναι γνησίως φθίνουσα κατά την μείωση της πίεσης σε τιμές κοντά στην ατμοσφαιρική. Και οι 2 συμπεριφορές είναι αντίθετες από τις αναμενόμενες, όπως αναλύεται στο Κεφάλαιο 2.



Εικόνα 5.19: Καμπύλη του συντελεστή  $B_o$  του ρευστού 3, σε  $\text{m}^3/\text{Sm}^3$

- Ρευστό 4

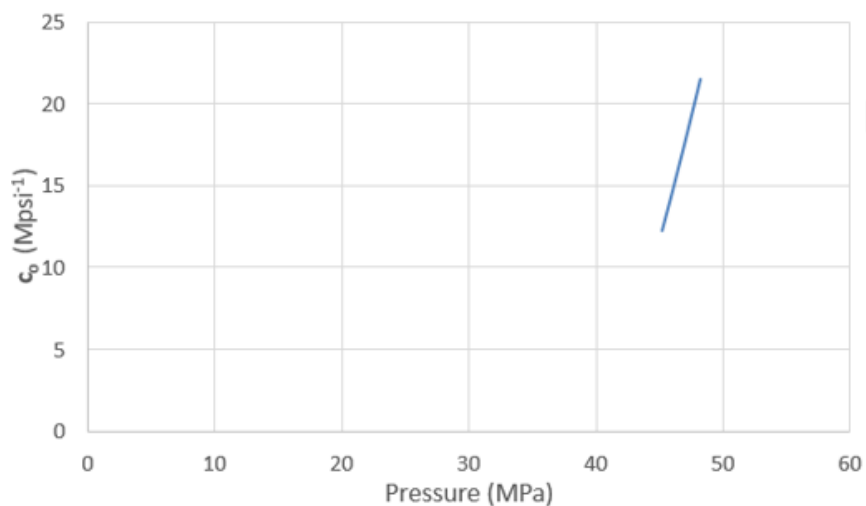
Απορρίπτεται. Η καμπύλη του συντελεστή  $R_s$  είναι για όλο το εύρος των πιέσεων σταθερή και με αρνητικές τιμές (Εικόνα 5.20).



Εικόνα 5.20: Καμπύλη του συντελεστή  $R_s$  του ρευστού 4, σε  $Sm^3/Sm^3$

- Ρευστό 5

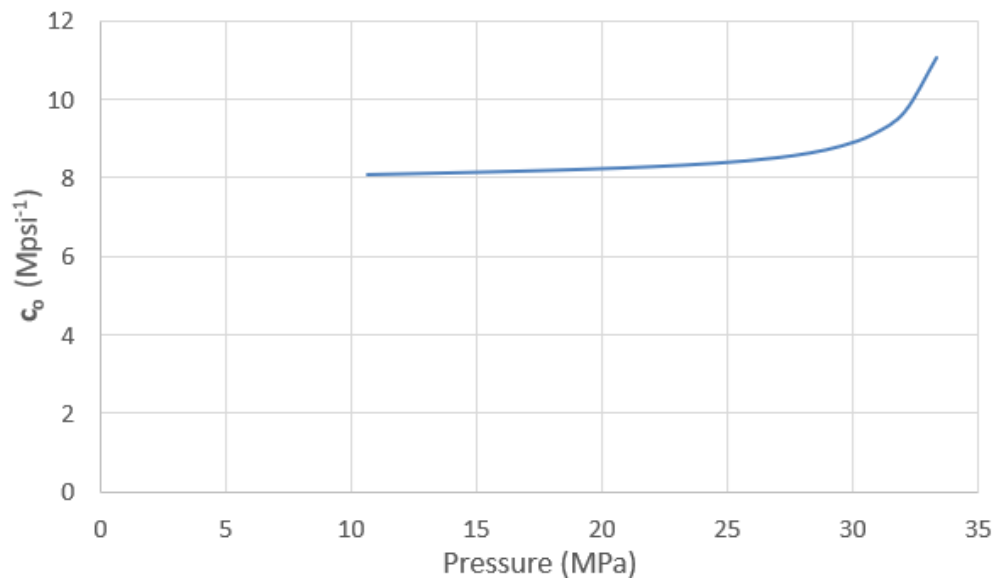
Απορρίπτεται. Οι καμπύλες του σχετικού όγκου και της συμπιεστότητας έχουν σχεδόν κατακόρυφο σχήμα, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.21 για τον συντελεστή συμπιεστότητας. Προηγουμένως αναφέρθηκε πως ορισμένες αποκλίσεις στα διαγράμματα της συμπιεστότητας θεωρούνται αποδεκτές, όμως σε περιπτώσεις όπως αυτή, που η απόκλιση είναι προφανώς πολύ μεγάλη από το πρότυπο σχήμα, χρειάζεται να απορριφθεί το δείγμα, καθώς δεν πρόκειται για περίπτωση μικρής κλίμακας διαγράμματος.



Εικόνα 5.21: Καμπύλη του συντελεστή συμπιεστότητας ( $c_p$ ) του ρευστού 5, σε  $Mpsi^{-1}$

- Ρευστό 6

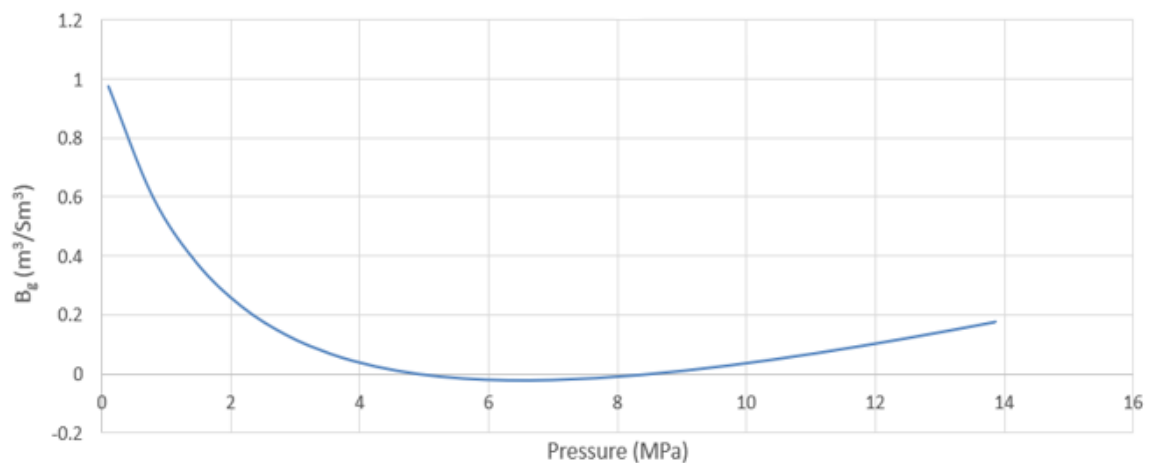
Απορρίπτεται. Η καμπύλη της συμπιεστότητας είναι αύξουσα για αυξανόμενες τιμές πίεσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.22.



Εικόνα 5.22: Καμπύλη του συντελεστή συμπιεστότητας ( $c_o$ ) του ρευστού 6, σε Mpsi<sup>-1</sup>

- Ρευστό 7

Απορρίπτεται. Η καμπύλη του συντελεστή  $B_g$  (Εικόνα 5.23) αποκτά αρνητικές τιμές για ορισμένα εύρη πιέσεων. Επίσης, η καμπύλη του συντελεστή  $Z$  παρουσιάζει μια ανεξήγητη απότομη πτώση περίπου στα μέσα της, για τιμές πίεσης 8-10 MPa.

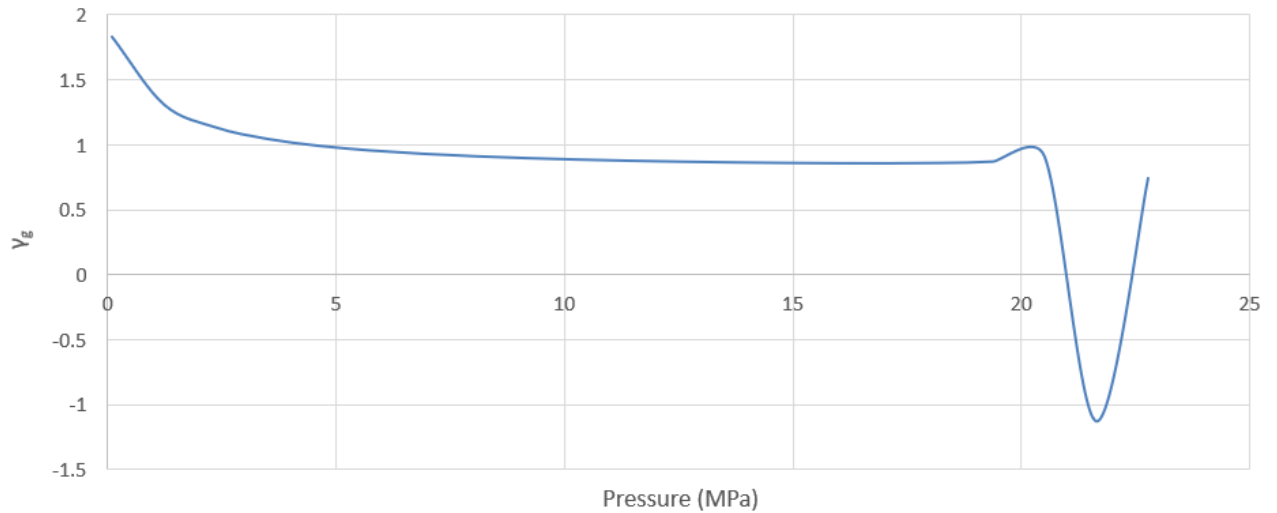


Εικόνα 5.23: Καμπύλη του συντελεστή  $B_g$  του ρευστού 7, σε m<sup>3</sup>/Sm<sup>3</sup>

- Ρευστό 8



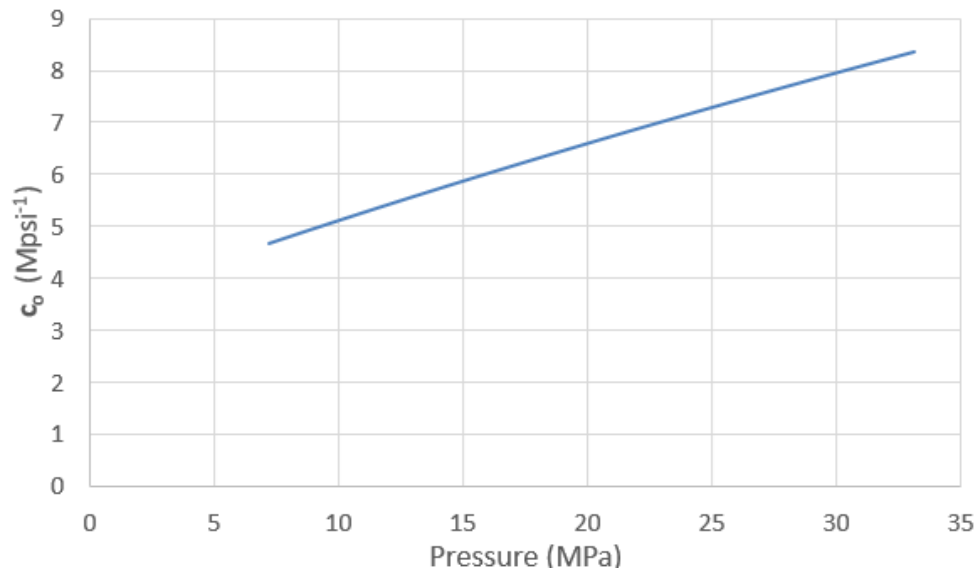
Απορρίπτεται. Η καμπύλη της ειδικής πυκνότητας αερίου  $\gamma_g$  παρουσιάζει αρνητικές τιμές όσο η πίεση αυξάνεται, Εικόνα 5.24.



Εικόνα 5.24: Καμπύλη της ειδικής πυκνότητας αερίου  $\gamma_g$  του ρευστού 8, σε  $\text{kg/m}^3$

- Ρευστό 9

Απορρίπτεται. Η καμπύλη του συντελεστή συμπιεστότητας είναι ευθεία και γνησίως αύξουσα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.25.



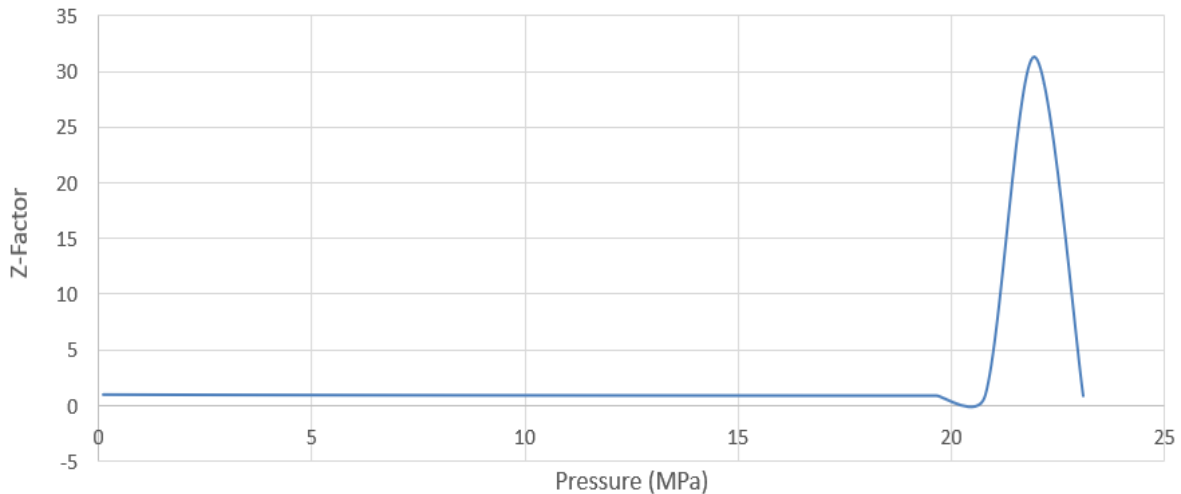
Εικόνα 5.25: Καμπύλη του συντελεστή συμπιεστότητας ( $c_0$ ) του ρευστού 9, σε  $\text{Mpsi}^{-1}$

- Ρευστό 10

Απορρίπτεται. Η καμπύλη της ειδικής πυκνότητας αερίου ( $\gamma_g$ ) αποκτά αρνητικές τιμές για υψηλές τιμές πίεσης, ομοίως με το ρευστό 8.

- Ρευστό 11

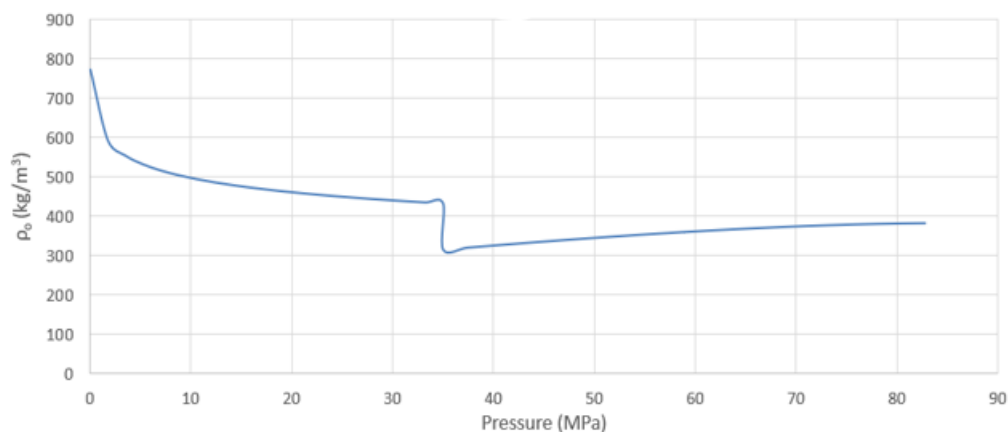
Απορρίπτεται. Η καμπύλη του συντελεστή απόκλισης  $Z$  δεν συμβαδίζει καθόλου με το αναμενόμενο σχήμα (Ενότητα 2.3.8), όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.26.



Εικόνα 5.26: Καμπύλη του συντελεστή απόκλισης  $Z$  του ρευστού 11

- Ρευστό 12

Απορρίπτεται. Η μονοφασική με την διφασική καμπύλη της πυκνότητας δεν τέμνονται στο σημείο φυσαλίδας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.27. Η διφασική καμπύλη δίνει πυκνότητα ίση με  $316 \text{ kg/m}^3$  στο σημείο φυσαλίδας, ενώ η μονοφασική  $433 \text{ kg/m}^3$ .



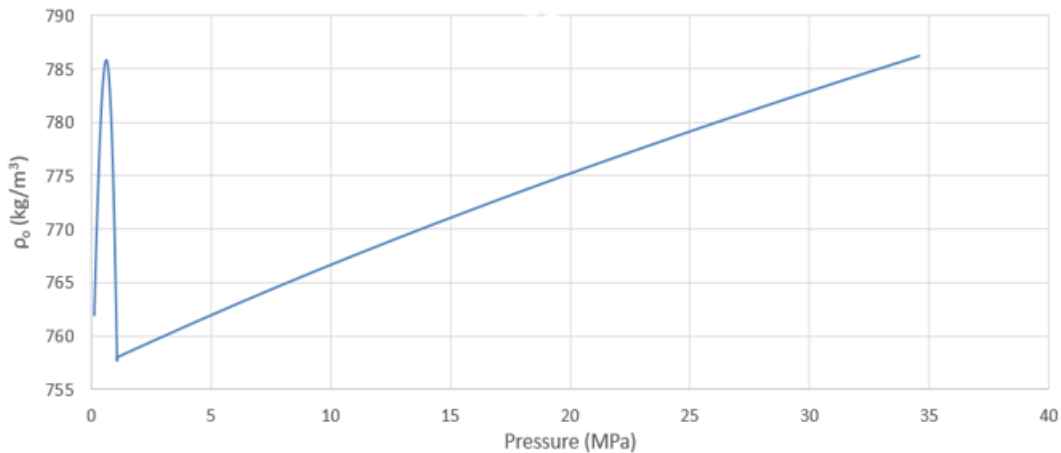
Εικόνα 5.27: Καμπύλη της πυκνότητας του ρευστού 12, σε  $\text{kg/m}^3$

- Ρευστό 13

Απορρίπτεται. Η καμπύλη της ειδικής πυκνότητας αερίου αποκτά αρνητικές τιμές για υψηλές τιμές πίεσης, ομοίως με τα δείγματα 8 και 10.

- Ρευστό 14

Απορρίπτεται. Η καμπύλη της πυκνότητας (Εικόνα 5.28) γίνεται φθίνουσα για μειούμενες τιμές πίεσης κοντά στην ατμόσφαιρα, ενώ η καμπύλη του συντελεστή  $B_0$  γίνεται αντίστοιχα αύξουσα για ορισμένες τιμές πίεσης.



Εικόνα 5.28: Καμπύλη της πυκνότητας του ρευστού 14, σε kg/m<sup>3</sup>

#### 5.4 Εφαρμογή Εξισώσεων Διατήρησης της Μάζας σε δοκιμές DL

Για την εφαρμογή ποιοτικού ελέγχου στα αποτελέσματα των δοκιμών διαφορική εκτόνωσης, χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις διατήρησης της μάζας, οι οποίες τροποποιήθηκαν καταλλήλως σε 2 στάδια έτσι ώστε να εξετασθεί η εγκυρότητα της πυκνότητας του υπολειπόμενου υγρού και η συνοχή της αρχής διατήρησης της μάζας μεταξύ της υγρής και της αέριας φάσης κατά τη διάρκεια των δοκιμών.

Σε πρώτο στάδιο, οι εξισώσεις διατήρησης της μάζας κάνουν δυνατό τον υπολογισμό της πυκνότητας του εναπομείναντος υγρού (residual oil density) στις ατμοσφαιρικές συνθήκες της δοκιμής διαφορικής εκτόνωσης, η οποία πυκνότητα δεν αναγράφεται στις εργαστηριακές αναφορές. Έπειτα από τον προσδιορισμό των τιμών της πυκνότητας, αυτές συγκρίθηκαν με ανάλογες τιμές της πυκνότητας που είναι διαθέσιμες στη βάση δεδομένων. Οι διαθέσιμες τιμές είναι οι τιμές της πυκνότητας του εναπομείναντος υγρού, το οποίο προέκυψε κατά τη διάρκεια της άμεσης εκτόνωσής του σε κανονικές συνθήκες (Stock tank oil). Θεωρητικά, το εναπομείναν ρευστό που προέκυψε από τις δοκιμές διαφορικής εκτόνωσης προέκυψε μετά την απελευθέρωση μεγαλύτερων ποσοτήτων αερίου καθώς η εκτόνωση στις κανονικές συνθήκες έγινε σταδιακά, μέσω πολλαπλών βημάτων και σε υψηλή τιμή της θερμοκρασίας (θερμοκρασία ταμιευτήρα). Επομένως, συγκριτικά με τις

---

τιμές της πυκνότητας των υγρών τανκ σε κανονικές συνθήκες που είναι διαθέσιμες στην βάση δεδομένων, αναμένεται οι υπολογισμένες τιμές να είναι μεγαλύτερες. Επίσης, η διαφορά αυτή μεταξύ των 2 πυκνοτήτων αναμένεται να είναι μεγαλύτερη όσον αφορά τα ελαφρύτερα πετρελαϊκά ρευστά, μιας και εκείνα περιέχουν περισσότερο αέριο το οποίο θα ελευθερωθεί με την δοκιμή.

Στο δεύτερο στάδιο, εφαρμόστηκε η εξίσωση διατήρησης μάζας μεταξύ διαδοχικών βημάτων πίεσης της δοκιμής DL κατά την οποία αναμένεται τα 2 μέλη της εξίσωσης να είναι ίσα μεταξύ τους σε όλα τα βήματα της δοκιμής, διασφαλίζοντας έτσι την αρχή διατήρησης της μάζας μεταξύ του απελευθερωμένου αερίου και του εναπομείναντος υγρού (C. A. Garcia, 2007).

Στις Ενότητες 5.4.1 και 5.4.2 θα αναλυθούν λεπτομερώς οι μετασχηματισμοί που εκτελέστηκαν στις εξισώσεις και τα αποτελέσματα που έδωσε η εφαρμογή τους στα ρευστά.

#### 5.4.1 Εύρεση Πυκνότητας Υπολειπόμενου Υγρού

Όπως προαναφέρθηκε, αρχικός σκοπός της χρήσης εξισώσεων διατήρησης της μάζας ήταν ο προσδιορισμός της πυκνότητας του υπολειπόμενου υγρού της δοκιμής διαφορικής εκτόνωσης σε συνθήκες επιφάνειας, οι τιμές της οποίας δεν είναι διαθέσιμες στην εργαστηριακή αναφορά. Για να γίνει αυτό, καταστρώθηκε αρχικά η εξίσωση διατήρησης της μάζας, Εξίσωση 5.3. Σύμφωνα με την εξίσωση αυτή, η συνολική μάζα του δείγματος στο σημείο φυσαλίδας ( $m_{o,b}$ ) ισούται με το άθροισμα των μαζών της συνολικής ποσότητας αερίου που διέφυγε κατά τη δοκιμή ( $\sum_{i=1}^n m_{g,i}$ ) και της μάζας του εναπομείναντος ρευστού στο τέλος της δοκιμής ( $m_{o, res}$ ), του ρευστού δηλαδή του οποίου επιχειρείται να προσδιοριστεί η πυκνότητα. Η Εξίσωση 5.3, επομένως, μελετά τη διατήρηση της μάζας κατά τη διάρκεια ολόκληρης της δοκιμής DL (από το σημείο φυσαλίδας μέχρι τις συνθήκες επιφάνειας). Στόχος ήταν να τροποποιηθούν κατάλληλα οι εξισώσεις, έτσι ώστε να εμφανιστεί ο όρος της υπολειπόμενης πυκνότητας και να αντικατασταθούν οι όροι των μαζών από όρους ογκομετρικών ιδιοτήτων, μια και αυτοί είναι διαθέσιμοι στη βάση δεδομένων.

$$m_{o,b} = \sum_{i=1}^n m_{g,i} + m_{o,res} \quad (5.3)$$

Με στόχο την τροποποίηση της αρχικής εξίσωσης και την απομάκρυνση των δύσκολων στη διαχείριση όρων μαζών, χρησιμοποιήθηκαν οι Εξισώσεις 5.4, 5.5 και 5.6, όπου  $\rho_{o,b}$  και  $V_{o,b}$  είναι η πυκνότητα και ο όγκος του δείγματος στην πίεση φυσαλίδας, ενώ οι όροι  $N_{g,i}$  και  $MW_{g,i}$  αντιπροσωπεύουν τον αριθμό moles και το μοριακό βάρος της αέριας φάσης η οποία απελευθερώθηκε στο βήμα πίεσης  $i$ . Επίσης, οι όροι  $\rho_{o,res}$  και  $V_{o,res}$  αντιπροσωπεύουν την πυκνότητα και τον όγκο του εναπομείναντος αερίου.

$$m_{o,b} = \rho_{o,b}V_{o,b} \quad (5.4)$$

$$m_{g,i} = N_{g,i}MW_{g,i} \quad (5.5)$$

$$m_{o,res} = \rho_{o,res}V_{o,res} \quad (5.6)$$

Αντικαθιστώντας τους όρους των μαζών της Εξίσωσης 5.3 με τη βοήθεια των Εξισώσεων 5.4, 5.5 και 5.6, προκύπτει η Εξίσωση 5.7.

$$\rho_{o,b}V_{o,b} = \sum_{i=1}^n N_{g,i}MW_{g,i} + \rho_{o,res}V_{o,res} \quad (5.7)$$

Στη συνέχεια, αναγκαίο είναι να απλοποιηθούν οι όροι  $V_{o,b}$ ,  $N_{g,i}$  και  $MW_{g,i}$ . Αυτό επιτυγχάνεται μέσω των Εξισώσεων 5.8, 5.9 και 5.10 αντίστοιχα, όπου  $B_{o,b}$  είναι ο συντελεστής  $B_o$  στην πίεση κορεσμού,  $V_{g,i}^{SC}$  είναι ο όγκος του αερίου που παραλαμβάνεται στο βήμα πίεσης  $i$  της δοκιμής και σε συνθήκες επιφάνειας, ενώ  $V_m^{SC}$  είναι ο μοριακός όγκος του αερίου σε συνθήκες επιφάνειας. Επιπλέον, ο όρος  $R_{s,i}$  αντιπροσωπεύει τον συντελεστή  $R_s$  στο βήμα πίεσης  $i$  της δοκιμής, ενώ ο όρος  $\gamma_{g,i}$  αναφέρεται στη σχετική πυκνότητα του αερίου του βήματος πίεσης  $i$ .

$$V_{o,b} = B_{o,b}V_{o,res} \quad (5.8)$$

$$N_g = \frac{V_{g,i}^{SC}}{V_m^{SC}} = \frac{(R_{s,i-1} - R_{s,i})}{V_m^{SC}}V_{o,res} \quad (5.9)$$

$$MW_{g,i} = \gamma_{g,i}MW_{air} \quad (5.10)$$

Απλοποιώντας την έκφραση που προέκυψε από την τελευταία αντικατάσταση, και λύνοντάς την ως προς την πυκνότητα του υπολειπόμενου πετρελαίου ( $\rho_{o,res}$ ), λήφθηκε η τελική εξίσωση, Εξίσωση 5.11 η οποία εμπεριέχει αποκλειστικά όρους PVT.

$$\rho_{o,res} = \rho_{o,b} B_{o,b} - \sum_{i=1}^n (R_{s,i-1} - R_{s,i}) \frac{\gamma_{g,i} MW_{air}}{V_m^{SC}} \quad (5.11)$$

Η Εξίσωση 5.11 εφαρμόστηκε σε ολόκληρο το πλήθος των ρευστών, στα οποία εκτελέστηκε η δοκιμή διαφορικής εκτόνωσης. Η πυκνότητα του εναπομείναντος αερίου παρουσίαζε, στη συντριπτική πλειοψηφία, μεγαλύτερες τιμές από αυτές της πυκνότητας των υγρών τανκ που παρήχθησαν με απευθείας εκτόνωση στις κανονικές συνθήκες. Επίσης, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, η διαφορά αυτή ήταν αρκετά μεγαλύτερη όσον αφορά τα ρευστά πτητικού πετρελαίου, ενώ διαπιστώθηκε ελάχιστη έως και μηδαμινή όσον αφορά τα δείγματα ρευστών πετρελαίου με μειωμένη πτητικότητα. Στον Πίνακα 5.3 και αντίστοιχα στο διάγραμμα της Εικόνας 5.29, παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών των πυκνοτήτων 50 τυχαίων ρευστών από τη βάση δεδομένων, όλα από τα οποία ακολουθούν την αναμενόμενη συμπεριφορά. Ως “ρ (res)” χαρακτηρίζεται η πυκνότητα η οποία προσδιορίστηκε μέσω της Εξίσωσης 5.11, ενώ ως “Fluid Density (STO)” χαρακτηρίζεται η πυκνότητα των υγρών τανκ που είναι διαθέσιμη στην εργαστηριακή αναφορά. Όπως γίνεται σχηματικά αντιληπτό από την Εικόνα 5.29, οι τιμές της πυκνότητας που υπολογίστηκε είναι μεγαλύτερες από τις τιμές που ήταν διαθέσιμες στην βάση.

Ρευστό	ρ (res), σε kg/m <sup>3</sup>	Fluid Density (STO)
1	885.8	843.5
2	853.0	807.6
3	872.6	870.1
4	923.2	888.6
5	868.9	852.0
6	877.2	866.6
7	842.7	840.3
8	855.8	855.1
9	919.1	915.5

---

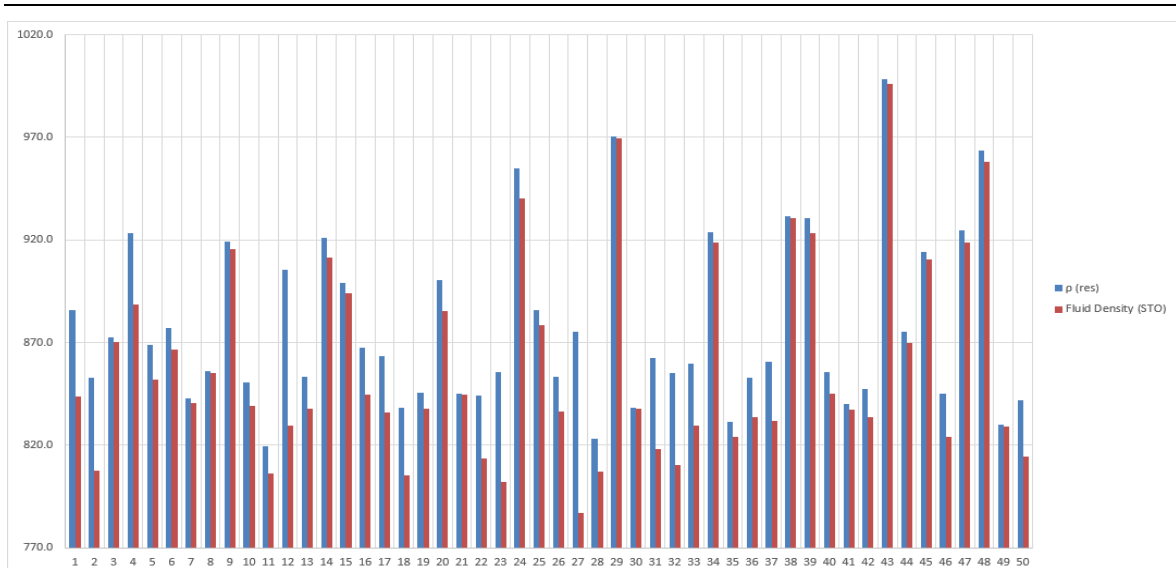
10	850.8	839.0
11	819.2	806.0
12	905.5	829.3
13	853.4	837.9
14	920.9	911.4
15	898.9	894.0
16	867.3	844.7
17	863.2	836.0
18	838.4	805.5
19	845.3	837.9
20	900.2	885.3
21	845.1	844.8
22	844.1	813.4
23	855.7	802.1
24	954.9	940.0
25	885.9	878.5
26	853.3	836.2
27	875.5	787.1
28	822.9	807.1
29	970.4	969.7
30	838.3	837.9
31	862.6	818.1
32	855.0	810.1
33	859.5	829.7

---

34	923.6	918.9
35	831.4	823.9
36	852.7	833.5
37	860.5	831.7
38	931.7	930.6
39	930.7	923.5
40	855.7	845.2
41	839.8	837.5
42	847.2	833.8
43	998.2	995.9
44	875.2	869.6
45	914.3	910.5
46	845.1	824.0
47	924.6	918.6
48	963.4	958.1
49	830.1	828.9
50	842.1	814.5

Πίνακας 5.3: Σύγκριση των τιμών της πυκνότητας του υπολειπόμενου υγρού





Εικόνα 5.29: Σχηματική απεικόνιση της σύγκρισης των τιμών της πυκνότητας του υπολειπόμενου υγρού,  $\text{kg/m}^3$

Παρόλα αυτά, υπήρξαν ορισμένα ρευστά των οποίων οι υπολογισμένες υπολειπόμενες πυκνότητες εκτιμώνται ως μη ρεαλιστικές. Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται τα συγκεκριμένα ρευστά, οι τιμές της πυκνότητας οι οποίες προσδιορίστηκαν και οι παρατηρήσεις που έγιναν πάνω σε αυτές.

Ρευστό	$\rho$ (res) σε $\text{kg/m}^3$	Παρατηρήσεις
1	-425,804.23	Μη ρεαλιστική τιμή πυκνότητας, το δείγμα απορρίπτεται
2	-1,102,285.23	Μη ρεαλιστική τιμή πυκνότητας, το δείγμα απορρίπτεται
3	2,632.72	Υπερβολικά υψηλή τιμή πυκνότητας. Οφείλεται στην υψηλή πτητικότητα του δείγματος, λόγω της οποίας παρουσιάζονται σημαντικά σφάλματα. Το δείγμα απορρίπτεται
4	2,721.88	Ομοίως με το ρευστό 3
5	2,631.45	Ομοίως με το ρευστό 3
6	606,976.26	Μη ρεαλιστική τιμή πυκνότητας, το δείγμα απορρίπτεται

7	808.23	Είναι μικρότερη από τη πυκνότητα του ρευστού που μεταφέρθηκε σε κανονικές συνθήκες χωρίς τη δοκιμή DL (833.1 kg/m <sup>3</sup> )
8	829.49	Ομοίως με το ρευστό 7. Η τιμή της πυκνότητας που λαμβάνεται από τη βάση δεδομένων είναι 844.4 kg/m <sup>3</sup>
9	806.81	Ομοίως με το ρευστό 7. Η τιμή της πυκνότητας που λαμβάνεται από τη βάση δεδομένων είναι 823 kg/m <sup>3</sup>
10	819.73	Ομοίως με το ρευστό 7. Η τιμή της πυκνότητας που λαμβάνεται από τη βάση δεδομένων είναι 845.9 kg/m <sup>3</sup>
11	796.33	Ομοίως με το ρευστό 7. Η τιμή της πυκνότητας που λαμβάνεται από τη βάση δεδομένων είναι 816.65 kg/m <sup>3</sup>

Πίνακας 5.4: Ποιοτικός έλεγχος σε ρευστά με μη αναμενόμενα αποτελέσματα

#### 5.4.2 Διασφάλιση Διατήρησης της Μάζας

Η διαδικασία ανάπτυξης της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας ανά βήμα της δοκιμής διαφορικής εκτόνωσης παρουσιάζει μεγάλη ομοιότητα με τη διαδικασία η οποία αναλύθηκε στην Ενότητα 5.4.1. Η βασική διαφορά, όμως, μεταξύ των 2 διαδικασιών έγκειται στο εύρος πίεσης της ανάλυσης. Οι εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα εξέτασαν το ισοζύγιο μάζας από την πίεση του σημείου φυσαλίδας έως τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, ενώ στην περίπτωση που αναλύεται σε αυτή την παράγραφο εξετάζεται το ισοζύγιο μάζας για κάθε βήμα της πίεσης της δοκιμής DL μεμονωμένα.

Όπως και στην προηγούμενη ενότητα, η ίδια αρχική εξίσωση μεταβάλλεται κατάλληλα, και μέσω των απαιτούμενων μετατροπών λαμβάνεται η τελική εξίσωση, τα 2 μέλη της οποίας πρέπει να είναι ίσα ή τουλάχιστον πολύ κοντά μεταξύ τους σε κάθε βήμα της δοκιμής DL, έτσι ώστε να ισχύσει η διατήρηση της μάζας μεταξύ της υγρής και της αέριας φάσης.

Επομένως, η Εξίσωση 5.3 μεταβλήθηκε αρχικά στην Εξίσωση 5.12, η οποία όπως προαναφέρθηκε εφαρμόστηκε σε κάθε ξεχωριστό βήμα πίεσης της δοκιμής. Η Εξίσωση 5.12 δείχνει πως η μάζα του υγρού πετρελαίου σε κάθε βήμα “i” ισούται με το άθροισμα των

μαζών του υπολειπόμενου υγρού και του αερίου που απελευθερώνεται στο επόμενο βήμα ελάττωσης της πίεσης “i+1”.

$$m_{o,i} = m_{o,i+1} + m_{g,i+1} \quad (5.12)$$

Εφαρμόζοντας παρόμοιους μετασχηματισμούς με αυτούς της Ενότητας 5.4.1, λήφθηκε η τελική εξίσωση, Εξίσωση 5.13.

$$\rho_{o,i}B_{o,i} = (R_{s,i} - R_{s,i+1}) \frac{\gamma_{g,i}MW_{air}}{V_m^{SC}} + \rho_{o,i+1}B_{o,i+1} \quad (5.13)$$

Επομένως, εφαρμόζοντας την Εξίσωση 5.13 στα ρευστά, αναμένεται τα 2 μέλη της να είναι ίσα ή σχεδόν ίσα μεταξύ τους.

Έπειτα από την εφαρμογή της εξίσωσης σε ολόκληρο το πλήθος των ρευστών, προέκυψαν ποικίλα συμπεράσματα. Αρχικά, παρατηρήθηκε πως για την πλειοψηφία των ρευστών, οι μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ των 2 μελών της εξίσωσης συμβαίνουν στο τελευταίο βήμα της δοκιμής διαφορικής εκτόνωσης (στο βήμα της πίεσης όπου αυτή αποκτά την ατμοσφαιρική τιμή). Επίσης, παρατηρήθηκε πως τα δείγματα πτητικού πετρελαίου παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερα σφάλματα από τα δείγματα πετρελαίου μειωμένης πτητικότητας, τα οποία γενικά ακολουθούν την εκτιμώμενη συμπεριφορά και τα σφάλματα τους είναι ελάχιστα.

Στους Πίνακες 5.5-5.8, δίνονται τα αποτελέσματα του ποιοτικού ελέγχου που παρουσίασαν 8 αντιπροσωπευτικά ρευστά από τη βάση δεδομένων, 4 εκ των οποίων παρουσιάζουν μεγάλη πτητικότητα, και 4 τα οποία παρουσιάζουν μειωμένη πτητικότητα. Στην αριστερή στήλη του κάθε πίνακα αναγράφεται το εύρος των τιμών της πίεσης του κάθε βήματος, στις 2 μεσαίες στήλες αναγράφεται το αριστερό και το δεξί μέλος των αποτελεσμάτων της Εξίσωσης 5.13, ενώ στη δεξιά στήλη αναγράφεται η (%) απόκλιση των 2 μελών της εξίσωσης.

Στους Πίνακες 5.5-5.8, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των 4 δειγμάτων πτητικού πετρελαίου.

Βήμα Πίεσης (MPa)	$\rho_{o,i}B_{o,i}$	$(R_{s,i} - R_{s,i+1}) \frac{\gamma_{g,i}MW_{air}}{V_m^{SC}} + \rho_{o,i+1}B_{o,i+1}$	Απόκλιση (%)
----------------------	---------------------	---	--------------

20.3 - 18.0	1,167.16	1,168.86	0.15%
18.0 - 15.3	1,138.87	1,139.46	0.05%
15.3 - 11.8	1,105.74	1,105.21	0.05%
11.8 - 8.4	1,067.50	1,066.45	0.10%
8.4 - 4.2	1,031.92	1,028.87	0.30%
4.2 - 0.1	986.65	921.64	6.81%

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα του πρώτου πτητικού ρευστού

Βήμα Πίεσης (MPa)	$\rho_{o,i}B_{o,i}$	$(R_{s,i} - R_{s,i+1}) \frac{\gamma_{g,i} MW_{air}}{V_m^{SC}} + \rho_{o,i+1} B_{o,i+1}$	Απόκλιση (%)
17.2 - 14.6	1,221.98	1,214.81	0.59%
14.6 - 11.8	1,174.41	1,170.66	0.32%
11.8 - 9.8	1,126.21	1,124.63	0.14%
9.8 - 7.0	1,091.90	1,092.50	0.06%
7.0 - 3.6	1,048.36	1,052.74	0.42%
3.6 - 0.1	994.56	936.88	5.97%

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα του δεύτερου πτητικού ρευστού

Βήμα Πίεσης (MPa)	$\rho_{o,i}B_{o,i}$	$(R_{s,i} - R_{s,i+1}) \frac{\gamma_{g,i} MW_{air}}{V_m^{SC}} + \rho_{o,i+1} B_{o,i+1}$	Απόκλιση (%)
25.2 - 20.6	1,287.25	1,293.95	0.52%
20.6 - 16.4	1,198.79	1,200.60	0.15%
16.4 - 12.5	1,136.07	1,138.25	0.19%
12.5 - 8.3	1,093.03	1,094.68	0.15%
8.3 - 4.2	1,055.24	1,049.07	0.59%
4.2 - 0.1	1,008.87	918.29	9.40%

Πίνακας 5.7: Αποτελέσματα του τρίτου πτητικού ρευστού

Βήμα Πίεσης (MPa)	$\rho_{o,i}B_{o,i}$	$(R_{s,i} - R_{s,i+1}) \frac{\gamma_{g,i} MW_{air}}{V_m^{SC}} + \rho_{o,i+1} B_{o,i+1}$	Απόκλιση (%)
17.8 - 15.6	1,173.69	1,169.30	0.37%
15.6 - 12.9	1,143.85	1,144.32	0.04%
12.9 - 9.0	1,110.62	1,110.79	0.02%
9.0 - 6.3	1,072.69	1,072.59	0.01%
6.3 - 3.6	1,047.26	1,043.55	0.36%
3.6 - 0.1	1,015.62	910.86	10.88%

Πίνακας 5.8: Αποτελέσματα του τέταρτου πτητικού ρευστού

Στους Πίνακες 5.9-5.12, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των 4 δειγμάτων πετρελαίου μειωμένης πτητικότητας.

Βήμα Πίεσης (MPa)	$\rho_{o,i}B_{o,i}$	$(R_{s,i} - R_{s,i+1}) \frac{\gamma_{g,i} MW_{air}}{V_m^{SC}} + \rho_{o,i+1} B_{o,i+1}$	Απόκλιση (%)
2.8 - 2.4	882.32	881.41	0.10%
2.4 - 2.0	880.82	879.98	0.10%
2.0 - 1.5	879.17	878.75	0.05%

1.5 - 0.9	877.51	878.19	0.08%
0.9 - 0.5	876.64	877.96	0.15%
0.5 - 0.1	876.37	874.13	0.26%

Πίνακας 5.9: Αποτελέσματα του πρώτου ρευστού μειωμένης πτητικότητας

Βήμα Πίεσης (MPa)	$\rho_{o,i}B_{o,i}$	$(R_{s,i} - R_{s,i+1}) \frac{\gamma_{g,i} MW_{air}}{V_m^{SC}} + \rho_{o,i+1} B_{o,i+1}$	Απόκλιση (%)
12.5 - 11.1	969.41	969.31	0.01%
11.1 - 9.0	965.72	965.69	0.00%
9.0 - 7.0	960.99	961.36	0.04%
7.0 - 4.9	956.75	956.95	0.02%
4.9 - 2.5	952.23	951.45	0.08%
2.5 - 0.1	945.65	944.48	0.12%

Πίνακας 5.10: Αποτελέσματα του δεύτερου ρευστού μειωμένης πτητικότητας

Βήμα Πίεσης (MPa)	$\rho_{o,i}B_{o,i}$	$(R_{s,i} - R_{s,i+1}) \frac{\gamma_{g,i} MW_{air}}{V_m^{SC}} + \rho_{o,i+1} B_{o,i+1}$	Απόκλιση (%)
8.9 - 7.7	968.29	968.33	0.00%
7.7 - 6.3	966.41	966.43	0.00%
6.3 - 4.9	964.03	964.05	0.00%
4.9 - 3.6	961.53	961.57	0.00%
3.6 - 2.2	958.99	959.00	0.00%
2.2 - 0.1	956.45	956.38	0.01%

Πίνακας 5.11: Αποτελέσματα τρίτου ρευστού μειωμένης πτητικότητας

Βήμα Πίεσης (MPa)	$\rho_{o,i}B_{o,i}$	$(R_{s,i} - R_{s,i+1}) \frac{\gamma_{g,i} MW_{air}}{V_m^{SC}} + \rho_{o,i+1} B_{o,i+1}$	Απόκλιση (%)
6.2 - 5.3	931.69	932.22	0.06%
5.3 - 4.2	930.71	931.00	0.03%
4.2 - 3.2	929.23	929.20	0.00%
3.2 - 2.2	927.23	926.87	0.04%
2.2 - 1.1	924.60	923.90	0.07%
1.1 - 0.1	921.04	920.56	0.05%

Πίνακας 5.12: Αποτελέσματα του τέταρτου ρευστού μειωμένης πτητικότητας

Από τα αποτελέσματα των παραπάνω ρευστών επιβεβαιώνεται η αρχική παρατήρηση. Φαίνεται χαρακτηριστικά πως οι αποκλίσεις που παρατηρούνται στο τελευταίο βήμα είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις αποκλίσεις που παρατηρούνται στα προηγούμενα βήματα πίεσης του κάθε ρευστού. Επίσης, γίνεται αντιληπτή η διαφορά στις αποκλίσεις μεταξύ των πτητικών και μη ρευστών, με την πλειοψηφία των ρευστών μειωμένης πτητικότητας να παρουσιάζει αποκλίσεις <1% σε όλα τα βήματα πίεσης.

Τα δύο ρευστά τα οποία παρουσίασαν απολύτως μη λογικές τιμές στο συγκεκριμένο βήμα του ποιοτικού ελέγχου ταυτίζονται με εκείνα που είχαν απορριφθεί στο προηγούμενο βήμα

---

(Πίνακας 5.4), πράγμα που δείχνει πως τα ρευστά που απορρίπτονται παρουσιάζουν σφάλματα σε πολλά βήματα του ποιοτικού ελέγχου.

### 5.5 Προσδιορισμός Συστάσεων Υπολειπόμενου Υγρού

Στο τελευταίο βήμα του ποιοτικού ελέγχου, εφαρμόστηκε η χρήση εξισώσεων διατήρησης της μάζας, με σκοπό τον υπολογισμό της σύστασης του εναπομείναντος υγρού σε κάθε βήμα της δοκιμής DL, μια πληροφορία που λείπει από την εργαστηριακή αναφορά. Οι συστάσεις των ρευστών σε συνθήκες ταμιευτήρα (Ενότητα 4.3), αλλά και οι συστάσεις των απελευθερωμένων αερίων σε κάθε βήμα των δοκιμών διαφορικής εκτόνωσης (Ενότητα 4.7) είναι διαθέσιμες στη βάση δεδομένων και θα χρησιμοποιηθούν στις εξισώσεις. Το συγκεκριμένο βήμα θα εφαρμοστεί σε 4 αντιπροσωπευτικά ρευστά, 2 από τα οποία είναι ρευστά πτητικού πετρελαίου, ενώ τα άλλα 2 είναι ρευστά βαρύτερης σύστασης.

Αφού προσδιορίστηκαν οι συστάσεις του εναπομείναντος πετρελαίου κάθε ρευστού, απεικονίσθηκαν σε διάγραμμα για κάθε βήμα πίεσης της δοκιμής DL. Μέσω του διαγράμματος αυτού παρατηρήθηκαν οι αλλαγές στη σύνθεση του κάθε ρευστού συναρτήσει των μεταβολών της πίεσης και αναλύθηκε κάθε τυχόν απόκλιση από την αναμενόμενη συμπεριφορά. Υπό κανονικές συνθήκες, λόγω της απελευθέρωσης αερίου, καθώς η πίεση φθίνει, τα ελαφριά συστατικά υδρογονανθράκων αναμένεται να παρουσιάσουν σταδιακή μείωση στις συγκεντρώσεις τους, ενώ τα βαρύτερα υγρά συστατικά θα πρέπει να παρουσιάσουν σταδιακή αύξηση. Όταν η πίεση φτάσει την ατμοσφαιρική τιμή, η συγκέντρωση του μεθανίου και των άλλων ελαφριών συστατικών αναμένεται να αποκτήσει τιμές πολύ κοντά στο μηδέν.

Επιπλέον, η σύσταση του εναπομείναντος υγρού της δοκιμής DL στις συνθήκες επιφάνειας συγκρίθηκε με την σύσταση του υγρού δείγματος που έχει μεταφερθεί σε κανονικές συνθήκες (πετρέλαιο τανκ), και η οποία σύσταση είναι διαθέσιμη στη βάση δεδομένων. Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 5.4, αναμένεται το εναπομείναν υγρό της δοκιμής να είναι βαρύτερο από το υγρό που μεταφέρθηκε στις συνθήκες επιφάνειας, οπότε θεωρητικά θα έπρεπε να έχει υψηλότερη συγκέντρωση βαριών συστατικών και χαμηλότερη συγκέντρωση ελαφριών συστατικών.

Ομοίως με τη προηγούμενη προσέγγιση, ο μετασχηματισμός των εξισώσεων ξεκίνησε με την Εξίσωση 5.14, η οποία βασίζεται επίσης στην αρχή διατήρησης της μάζας. Η εξίσωση

αυτή δηλώνει πως τα συνολικά moles του κάθε συστατικού “j” στο ρευστό ισούνται με το άθροισμα των moles του συστατικού στην αέρια φάση που απελευθερώνεται ( $N_{g,i+1}^j$ ) και των moles που περιέχονται στο υπολειπόμενο υγρό του κάθε βήματος ( $N_{o,i+1}^j$ ). Μέσω μια σειράς μετασχηματισμών, σχηματίστηκε ξανά η τελική εξίσωση.

$$N_{o,i}^j = N_{g,i+1}^j + N_{o,i+1}^j \quad (5.14)$$

Οι γραμμομοριακές εκφράσεις μπορούν να αναδιατυπωθούν ως το γινόμενο του συνολικού αριθμού γραμμομορίων ενός δείγματος, πολλαπλασιαζόμενο με το μοριακό κλάσμα του συστατικού j ( $x_{i+1}^j$  στην υγρή και  $y_{i+1}^j$  στην αέρια φάση αντίστοιχα).

$$N_{o,i}x_i^j = N_{g,i+1}y_{i+1}^j + N_{o,i+1}x_{i+1}^j \quad (5.15)$$

Στη συνέχεια, τα moles συστατικών της υγρής φάσης αντικαταστήθηκαν μέσω της Εξίσωσης 5.16. Το αποτέλεσμα της αντικατάστασης αυτής παρουσιάζεται στην Εξίσωση 5.17.

$$n = \frac{m}{MW} = \frac{\rho V}{MW} \quad (5.16)$$

$$\frac{\rho_{o,i}V_{o,i}}{MW_{o,i}}x_i^j = N_{g,i+1}y_{i+1}^j + \frac{\rho_{o,i+1}V_{o,i+1}}{MW_{o,i+1}}x_{i+1}^j \quad (5.17)$$

Το μοριακό βάρος του πετρελαίου σε κάθε βήμα πίεσης ( $MW_{o,i}$ ) μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας το άθροισμα των συγκεντρώσεών του με τα επιμέρους μοριακά βάρη τους. Το μοριακό βάρος του πετρελαίου, όμως, του επόμενου βήματος ( $MW_{o,i+1}$ ) δεν μπορεί να υπολογιστεί με τον ίδιο τρόπο, επομένως θα πρέπει να υπολογιστεί με την Εξίσωση 5.18.

$$MW_{o,i+1} = \frac{B_{o,i+1}\rho_{o,i+1}}{\frac{B_{o,i}\rho_{o,i}}{MW_{o,i}} - \frac{R_{s,i} - R_{s,i+1}}{V_m^{SC}}} \quad (5.18)$$

Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας παρόμοιους μετασχηματισμούς με αυτούς της Ενότητας 5.4, προέκυψε η Εξίσωση 5.19.

$$\frac{\rho_{o,i}B_{o,i}}{MW_{o,i}}x_i^j = \frac{R_{s,i} - R_{s,i+1}}{V_m^{SC}}y_{i+1}^j + \frac{\rho_{o,i+1}B_{o,i+1}}{MW_{o,i+1}}x_{i+1}^j \quad (5.19)$$

Επιλύοντας την Εξίσωση 5.19 ως προς  $x_{i+1}^j$  και έπειτα απλοποιώντας την εξίσωση που προκύπτει, δημιουργήθηκε η τελική έκφραση, η Εξίσωση 5.21.

$$x_{i+1}^j = \frac{\frac{\rho_{o,i}B_{o,i}}{MW_{o,i}}}{\frac{\rho_{o,i+1}B_{o,i+1}}{MW_{o,i+1}}} x_i^j - \frac{\frac{R_{s,i} - R_{s,i+1}}{V_m^{SC}}}{\frac{\rho_{o,i+1}B_{o,i+1}}{MW_{o,i+1}}} y_{i+1}^j \Rightarrow \quad (5.20)$$

$$x_{i+1}^j = Ax_i^j - By_{i+1}^j \quad (5.21)$$

$$\text{Όπου } A = \frac{\frac{\rho_{o,i}B_{o,i}}{MW_{o,i}}}{\frac{\rho_{o,i+1}B_{o,i+1}}{MW_{o,i+1}}} \text{ and } B = \frac{\frac{R_{s,i} - R_{s,i+1}}{V_m^{SC}}}{\frac{\rho_{o,i+1}B_{o,i+1}}{MW_{o,i+1}}}.$$

Επιλύοντας την Εξίσωση 5.21 ως προς  $x_{i+1}^j$ , για κάθε βήμα πίεσης της δοκιμής και για κάθε συστατικό της αρχική σύστασης, προσδιορίστηκε τελικά η σύσταση του υπολειπόμενου πετρελαίου, στην οποία θα ασκηθεί ο ποιοτικός έλεγχος.

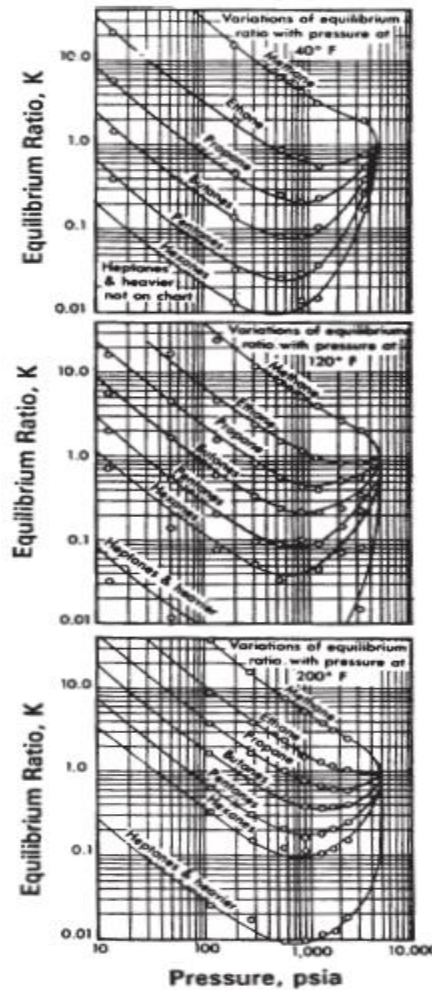
Ο ποιοτικός έλεγχος των συστάσεων δεν περιορίζεται μόνο στον σχεδιασμό των καμπυλών τους, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Το επόμενο βήμα του ποιοτικού τους ελέγχου περιλαμβάνει τον υπολογισμό των συντελεστών ισορροπίας  $k$  ( $k$ -values) για κάθε συστατικό του μίγματος σε κάθε βήμα της πίεσης. Οι συντελεστές ισορροπίας, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν τις σταθερές ισορροπίας μεμονωμένων συστατικών μεταξύ της υγρής και της αέριας φάσης, υπολογίζονται μέσω της Εξίσωσης 5.22 (Whitson, 2000) (Kanakaki, 2024), (W. D. McGain Jr, 2010). Στη συγκεκριμένη εξίσωση, το  $k_i^j$  αντιπροσωπεύει τον συντελεστή ισορροπίας  $k$  του συστατικού “ $j$ ” στο βήμα πίεσης “ $i$ ”. Τα  $y_i^j$  και  $x_i^j$  αντιπροσωπεύουν το μοριακό κλάσμα του συστατικού “ $j$ ” στην αέρια και την υγρή φάση αντίστοιχα.

$$k_i^j = \frac{y_i^j}{x_i^j} \quad (5.22)$$

Έπειτα από τον υπολογισμό των συντελεστών  $k$ , σχεδιάστηκαν διαγράμματα, τα οποία απεικονίζουν τις τιμές τους για κάθε συστατικό, συναρτήσει της πίεσης. Σύμφωνα με τον Whitson, οι τιμές των συντελεστών  $k$  στο διάγραμμα αναμένεται να συγκλίνουν σε ένα κοινό σημείο, μόλις η πίεση φτάσει στην τιμή της πίεσης σύγκλισης (convergence pressure). Στην Εικόνα 5.30 παρουσιάζονται πρότυπα διαγράμματα των συντελεστών  $k$  συναρτήσει



της πίεσης, τα οποία και θα συγκριθούν με τα διαγράμματα που θα προκύψουν για τα 4 αντιπροσωπευτικά ρευστά της βάσης δεδομένων.



Εικόνα 5.30: Πρότυπη συμπεριφορά των διαγραμμάτων των συντελεστών  $k$  συναρτήσει της πίεσης (Whitson, 2000)

Το τελευταίο βήμα της αξιολόγησης των συστάσεων περιλαμβάνει τη σχεδίαση διαγραμμάτων του  $\log(k_i^j p)$  για κάθε βήμα της πίεσης, συναρτήσει των τιμών του συντελεστή  $F_i$ . Το  $\log(k_i^j p)$  εκφράζει τις λογαριθμικές τιμές του συντελεστή ισορροπίας  $k$ , πολλαπλασιασμένου με την τιμή πίεσης του κάθε βήματος της δοκιμής, ενώ ο συντελεστής  $F_i$  υπολογίζεται με την Εξίσωση, και οι τιμές του παραμένουν σταθερές στο κάθε βήμα πίεσης της δοκιμής ενός ρευστού, μιας και οι παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται μένουν σταθερές. Στην Εξίσωση 5.23, οι παράμετροι  $T_{bj}$  και  $T_{cj}$  εκπροσωπούν τη θερμοκρασία

---

βρασμού και την κρίσιμη θερμοκρασία του συστατικού “j” αντίστοιχα, ενώ η παράμετρος T εκπροσωπεί τη θερμοκρασία του ταμιευτήρα.

$$F_i = \frac{\frac{1}{T_{bi}} - \frac{1}{T}}{\frac{1}{T_{bi}} - \frac{1}{T_{ci}}} \quad (5.23)$$

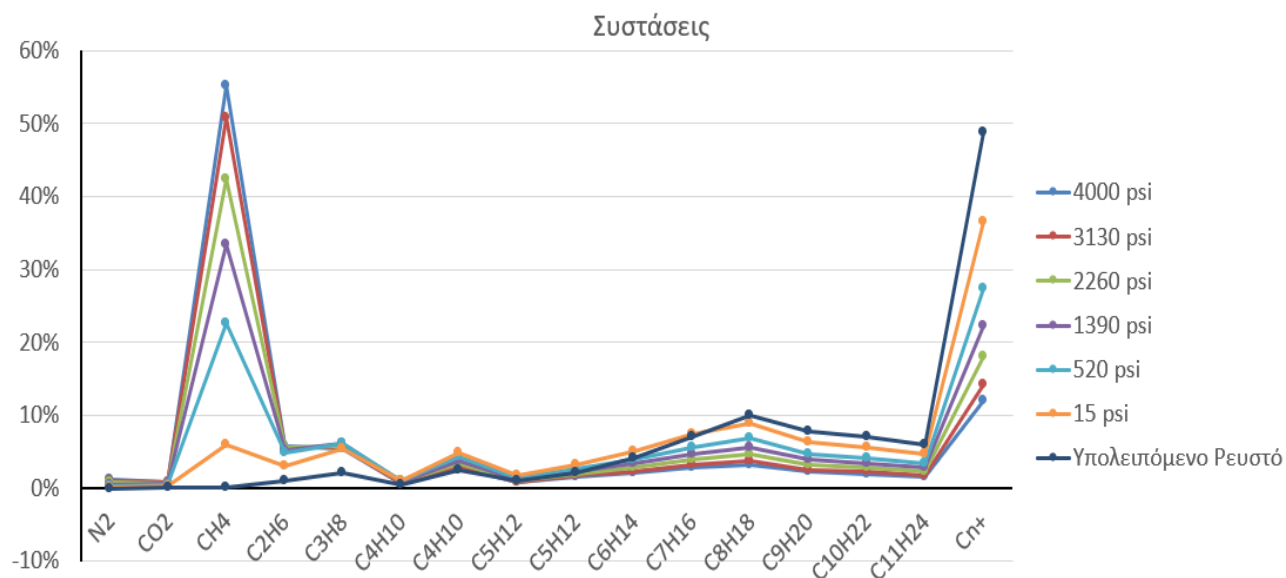
Σύμφωνα με τον Hoffman (Whitson, 2000), όσον αφορά τα συστατικά υδρογονανθράκων C<sub>1</sub>-C<sub>6</sub>, το διάγραμμα του  $\log(k_i^j p)$  συναρτήσει του συντελεστή  $F_i$  θα πρέπει να αποδοθεί ως ευθεία γραμμή για όλες τις τιμές πίεσης. Επίσης, οι τιμές του  $\log(k_i^j p)$  θα πρέπει να είναι υψηλότερες όσον αφορά τα ελαφρύτερα συστατικά, επειδή αυτά βρίσκονται σε υψηλότερες συγκεντρώσεις στην αέρια φάση κι επομένως έχουν μεγάλες τιμές k.

Τα διαγράμματα αυτά σχεδιάστηκαν αρχικά για κάθε ρευστό ξεχωριστά, για τα βήματα πίεσής του. Όπως προαναφέρθηκε, αναμένεται το σχήμα τους να είναι ευθεία γραμμή, ενώ παράλληλα οι τιμές του  $\log(k_i^j p)$  των υψηλότερων συστατικών να είναι μικρότερες από των ελαφρύτερων συστατικών. Επιπλέον, σχεδιάστηκε ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα, το οποίο θα απεικονίζει όλες τις τιμές των  $\log(k_i^j p)$  όλων των συστατικών για όλα τα βήματα πίεσης, συναρτήσει του συντελεστή  $F_i$ . Σύμφωνα με τον Hoffman, οι τιμές του  $\log(k_i^j p)$  αναμένεται να συγκλίνουν σε ένα κοινό σημείο, για αυξανόμενες τιμές του συντελεστή  $F_i$  (Whitson, 2000), (Hoffman A.E., 1953).

Στις Ενότητες 5.5.1-5.5.4 θα αναλυθούν τα αποτελέσματα του ποιοτικού ελέγχου των συστάσεων στα 4 αντιπροσωπευτικά ρευστά.

### 5.5.1 Ρευστό 1 (Αυξημένης Πτητικότητας)

Το αποτέλεσμα της μεταβολής των συστάσεων του πρώτου ρευστού που αναλύθηκε, παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.31. Η αρχική σύσταση του ρευστού (4,000 psi) αντιστοιχεί στη σύστασή του στις συνθήκες ταμιευτήρα.



Εικόνα 5.31: Συστάσεις του υπολειπόμενου υγρού του κάθε βήματος της δοκιμής DL (ρευστό 1), σε συγκέντρωση % της σύστασης του συνολικού δείγματος

Όπως ήταν αναμενόμενο, με κάθε βήμα ελάττωσης της πίεσης, η σύσταση του ρευστού βαραίνει. Τα ελαφριά συστατικά του ρευστού, και ειδικά το μεθάνιο, απελευθερώνονται και μειώνεται σταδιακά η συγκέντρωσή τους, ενώ όταν η πίεση αποκτήσει την ατμοσφαιρική τιμή, η συγκέντρωση του μεθανίου γίνεται πρακτικά ίση με το 0. Επιπλέον, καθώς η πίεση ελαττώνεται, τα βαρύτερα συστατικά, και ειδικά το κλάσμα  $C_{n+}$  παρουσιάζουν σημαντική αύξηση στις συγκεντρώσεις τους. Επομένως, παρόλο που το συγκεκριμένο ρευστό ανήκει στην κατηγορία πτητικού πετρελαίου, η συμπεριφορά των συστάσεών του ακολουθεί τη θεωρητικά αναμενόμενη συμπεριφορά.

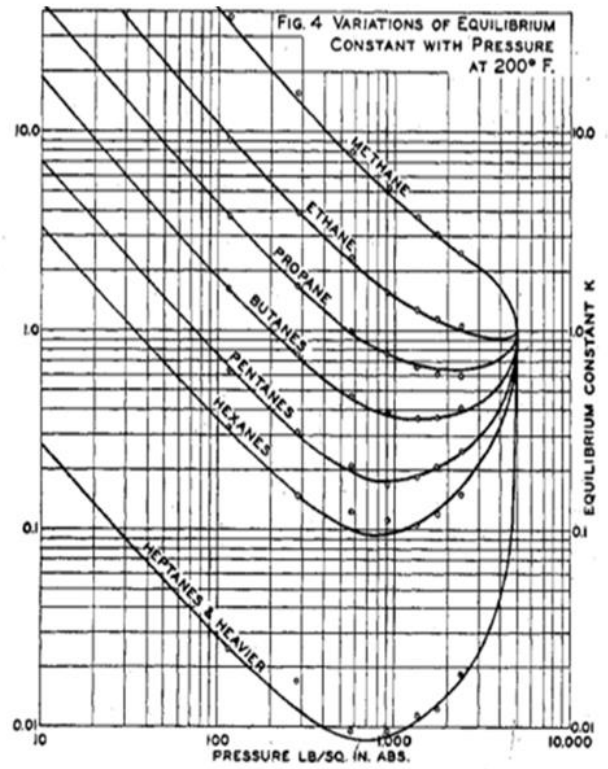
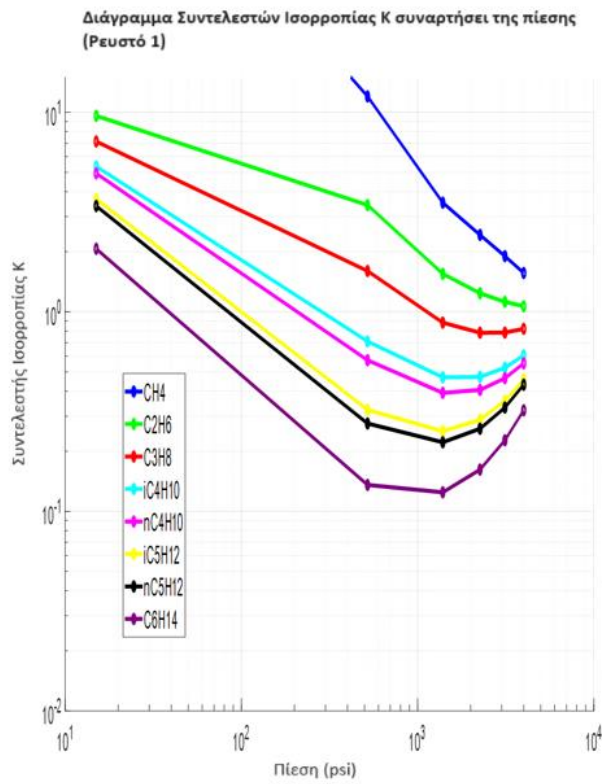
Στη συνέχεια, ακολουθεί η σχεδίαση των συντελεστών ισορροπίας  $k$  για κάθε συστατικό του ρευστού, συναρτήσεως των τιμών της πίεσης. Στην Εικόνα 5.32, γίνεται η σύγκριση του διαγράμματος των τιμών αυτών του ρευστού 1, σε θερμοκρασία 223.3 °F με το πρότυπο διάγραμμα των συντελεστών  $k$  συναρτήσεως της πίεσης στους 200°F, όπως προέκυψε από τους Katz και Hachmuth μέσω πειραματικών δεδομένων. Είναι αναμενόμενο να υπάρξουν ορισμένες διαφορές μεταξύ των 2 διαγραμμάτων, μια και οι τιμές των συντελεστών  $k$  εξαρτώνται από την συγκεκριμένη σύσταση του κάθε ρευστού, και όχι μόνο από το συστατικό, τη θερμοκρασία και την πίεση. Επομένως, μέσω της σύγκρισης αναζητείται μια σχετική ταύτιση του σχήματος των διαγραμμάτων. Οι τιμές των συντελεστών  $k$  στο διάγραμμα της Εικόνας 5.32α ταιριάζουν με αυτές του διαγράμματος της Εικόνας 5.32β, και

---

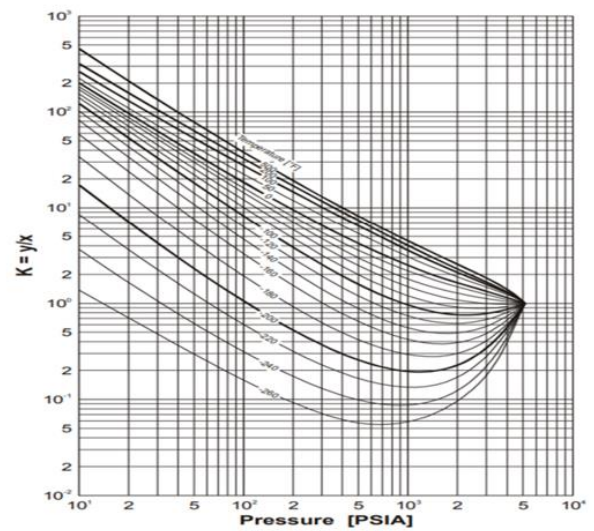
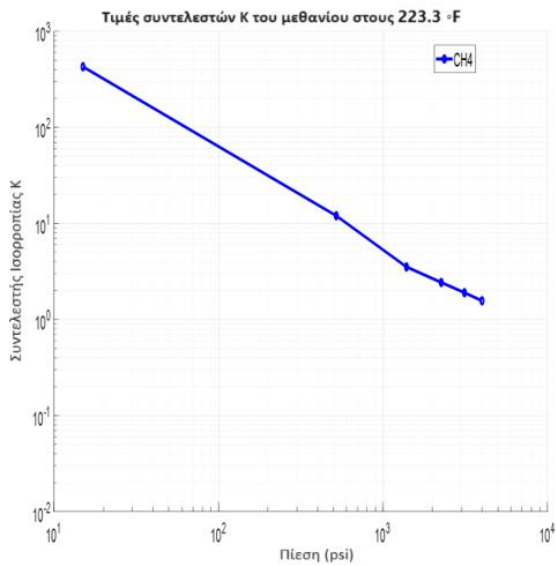
συγκλίνουν περίπου στα 5,000 psi (πίεση σύγκλισης), όπως συμβαίνει περίπου και στο πρότυπο διάγραμμα.

Μια απόκλιση των ελαφριών συστατικών (έως το προπάνιο) μπορεί να φανεί από το 4<sup>ο</sup> βήμα (1,390 psi) και μετά, ενώ τα υπόλοιπα συστατικά και ιδιαίτερα το εξάνιο, συμπεριφέρονται με τρόπο που μοιάζει πολύ με τη συμπεριφορά των πρότυπων διαγραμμάτων. Αυτό γίνεται σαφές στις Εικόνες 5.33 και 5.34, όπου συγκρίνονται απευθείας τα διαγράμματα του μεθανίου και του εξανίου στους 223.3 °F, με τα αντιπροσωπευτικά τους διαγράμματα. Το διάγραμμα του μεθανίου παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση συγκριτικά με το πρότυπό του διάγραμμα, από το 1<sup>ο</sup> μέχρι το 5<sup>ο</sup> βήμα πίεσης (520 psi). Αντιθέτως, το διάγραμμα του εξανίου ταιριάζει σχεδόν απόλυτα με το πρότυπό του διάγραμμα.

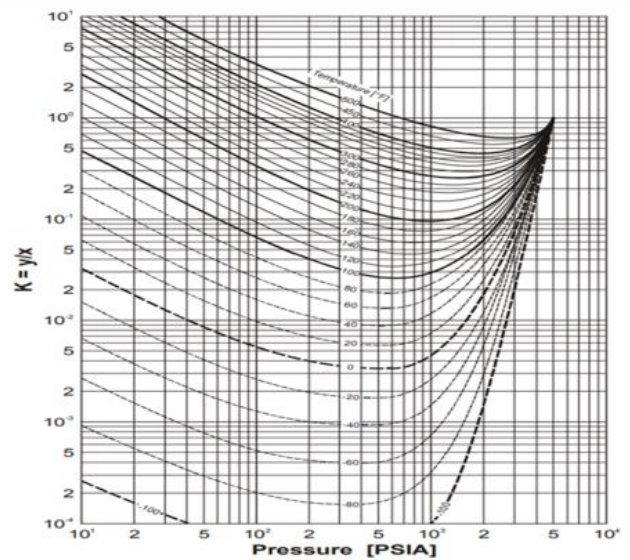
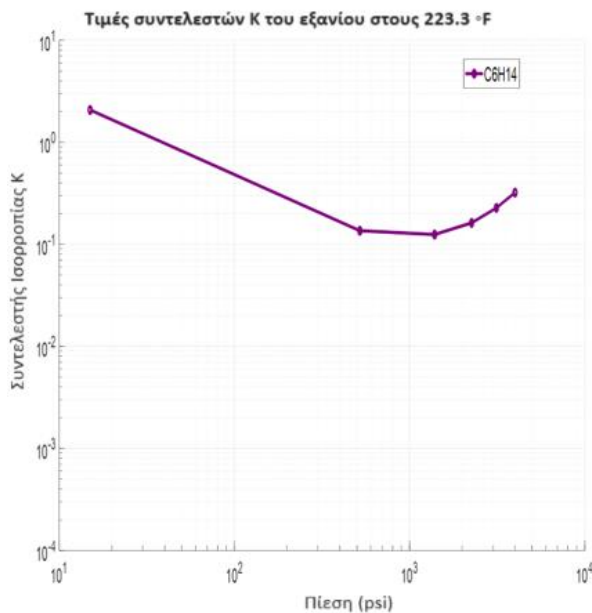
Συνοψίζοντας, το συνολικό σχήμα των καμπυλών συναρτήσεως της πίεσης είναι πλήρως ρεαλιστικό και οι αποκλίσεις που παρουσιάζονται πρέπει να αποδοθούν στη συγκεκριμένη σύσταση του ρευστού. Παρόλο που τα ελαφρύτερα συστατικά παρουσιάζουν μεγαλύτερες αποκλίσεις σε σχέση με τα βαρύτερα, επισημαίνοντας ότι η διάδοση των σφαλμάτων αυξάνεται με κάθε βήμα ελάττωσης της πίεσης, σαν σύνολο το διάγραμμα των συντελεστών  $k$  ακολουθεί την αναμενόμενη συμπεριφορά.



Εικόνα 5.32: Διάγραμμα τιμών συντελεστών k συναρτήσει της πίεσης για κάθε βήμα της δοκιμής DL (ρευστό 1) β) Πρότυπο διάγραμμα συντελεστών k συναρτήσει της πίεσης στους 200°F (D. L. Katz, 1937)

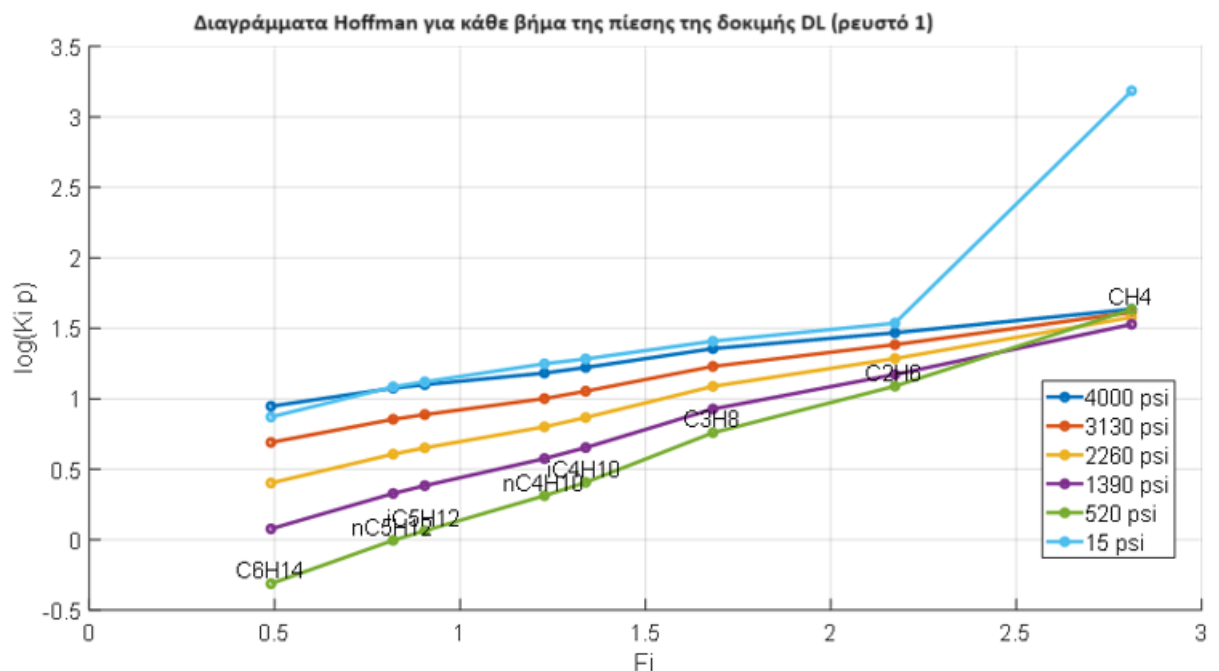


Εικόνα 5.33: Σύγκριση του διαγράμματος των τιμών του συντελεστή  $k$  του μεθανίου συναρτήσει της πίεσης (ρευστό 1), με το πρότυπο αντίστοιχο διάγραμμα του μεθανίου για διάφορες τιμές θερμοκρασίας (NGAA, 1957)



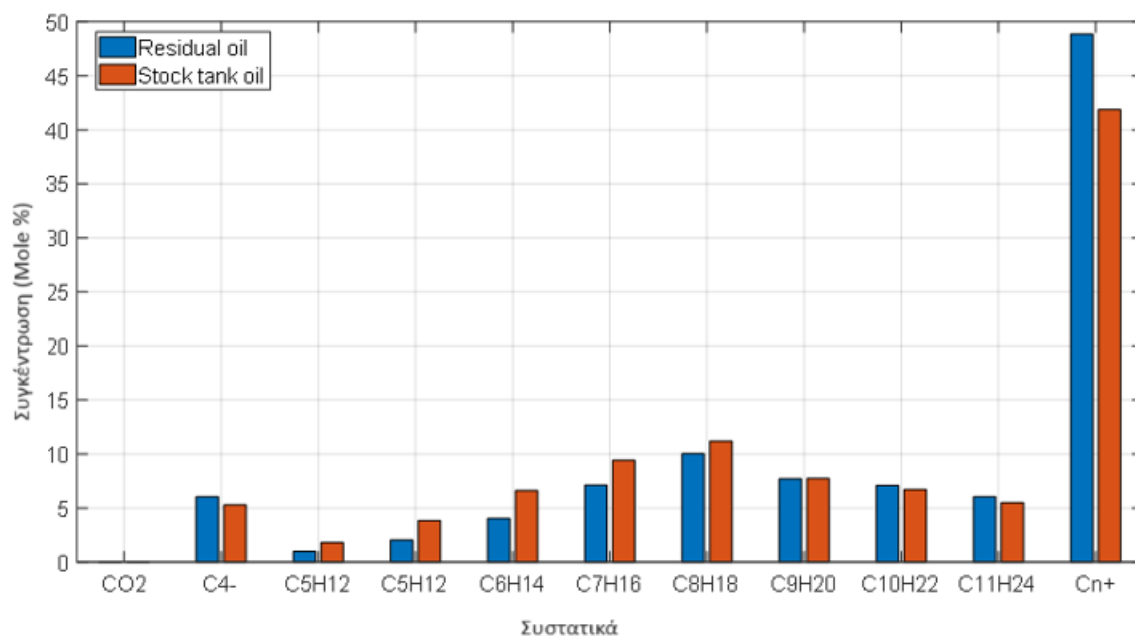
Εικόνα 5.34: Σύγκριση του διαγράμματος των τιμών του συντελεστή  $k$  του εξανίου συναρτήσει της πίεσης (ρευστό 1), με το πρότυπο αντίστοιχο διάγραμμα του εξανίου για διάφορες τιμές θερμοκρασίας (NGAA, 1957)

Έπειτα, με βάση τις τιμές του συντελεστή  $k$ , σχεδιάστηκαν και τα διαγράμματα Hoffman (Εικόνα 5.35), τα οποία αναμένεται να ακολουθήσουν τη συμπεριφορά που εξηγήθηκε προηγουμένως (Ενότητα 5.5). Σε γενικές γραμμές, τα διαγράμματα έχουν το σχήμα ευθείων γραμμών και συγκλίνουν σε ένα συγκεκριμένο σημείο, όπως συμβαίνει και με τα διαγράμματα των συντελεστών  $k$  στο σημείο σύγκλισης. Μια απόκλιση παρατηρήθηκε πάλι στο τελευταίο βήμα της δοκιμής DL (το οποίο οδηγεί στις ατμοσφαιρικές συνθήκες), επιβεβαιώνοντας περαιτέρω τον συγκεκριμένο ισχυρισμό που δόθηκε στις προηγούμενες ενότητες του ποιοτικού ελέγχου. Για να διερευνηθεί περαιτέρω η συμπεριφορά αυτή, στην Εικόνα 5.36 έγινε η σύγκριση της σύστασης του υπολειπόμενου υγρού στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, το οποίο υπολογίστηκε με την Εξίσωση 5.21, με τη σύσταση του υπολειπόμενου ρευστού που ήταν διαθέσιμο στη βάση δεδομένων. Θεωρητικά, στην Εικόνα 5.36, πρέπει η σύσταση του υπολειπόμενου πετρελαίου (residual oil) να είναι βαρύτερη από τη σύσταση του πετρελαίου τανκ (Stock tank oil), που γενικά επιβεβαιώνεται, με εξαίρεση το μοριακό κλάσμα  $C_4$ .



Εικόνα 5.35: Διάγραμμα Hoffman για κάθε βήμα της πίεσης της δοκιμής DL (ρευστό 1)





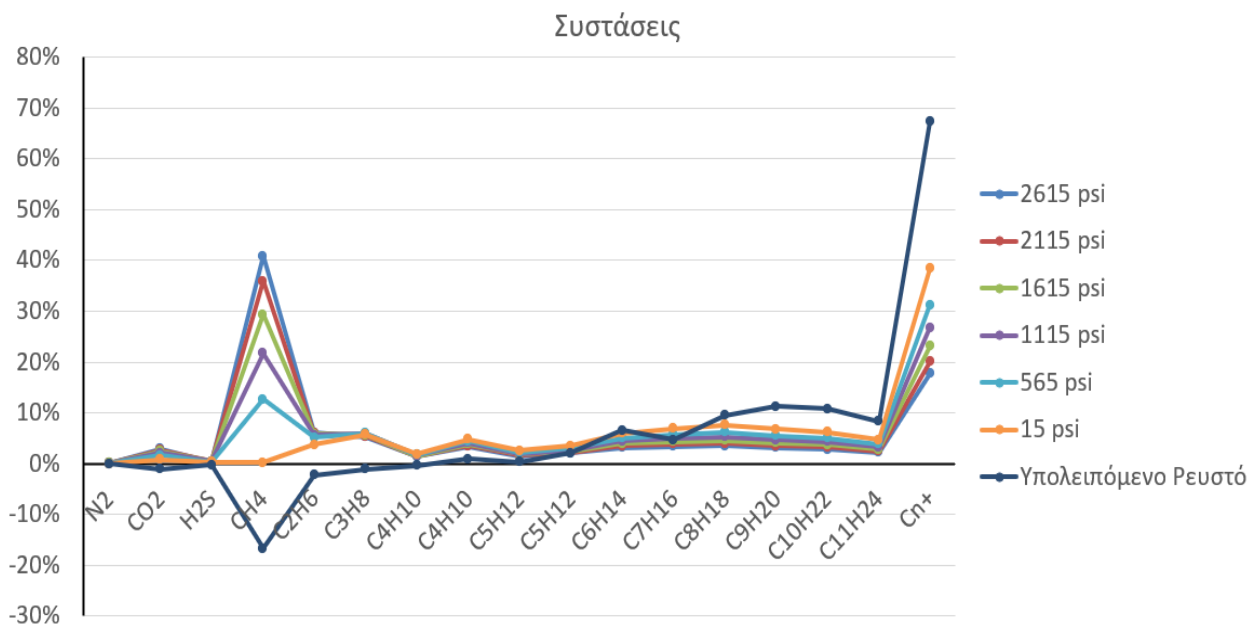
Εικόνα 5.36: Σύγκριση των συστάσεων για το ρευστό 1

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα του ποιοτικού ελέγχου για το συγκεκριμένο ρευστό πτητικού πετρελαίου θεωρούνται αποδεκτά για τα πρώτα βήματα της δοκιμής διαφορικής εκτόνωσης. Θα πρέπει να δίνεται κάθε φορά προσοχή στην ερμηνεία των τελικών βημάτων, καθώς υπήρξαν ορισμένες αποκλίσεις στα διαγράμματα των συντελεστών  $k$ , στα διαγράμματα Hoffman και στη σύγκριση των 2 συστάσεων. Το γεγονός αυτό συμβαίνει καθώς όσο περισσότερα είναι τα βήματα της δοκιμής DL (επομένως όσο πιο πτητικό είναι το ρευστό), τόσα περισσότερα σφάλματα συσσωρεύονται, τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητα αποτελέσματα.

### 5.5.2 Ρευστό 2 (Αυξημένης Πτητικότητας)

Παρόμοια διαδικασία με εκείνη της Ενότητας 5.5.1 εκτελέστηκε σε νέο ρευστό, επίσης αυξημένης πτητικότητας. Αρχικά, σχεδιάστηκε πάλι το διάγραμμα μεταβολής των συστάσεων ανά βήμα πίεσης της δοκιμής DL, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.37.



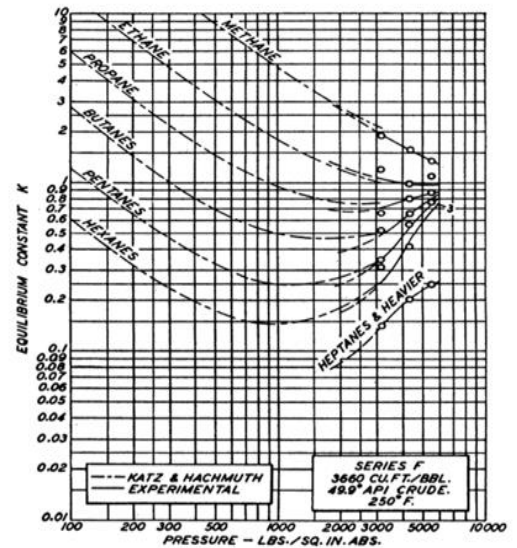
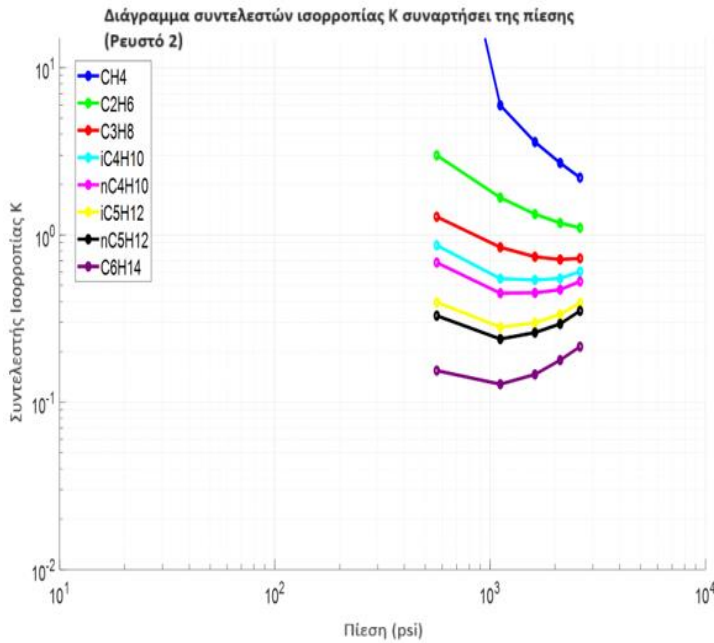


Εικόνα 5.37: Συστάσεις του υπολειπόμενου υγρού του κάθε βήματος της δοκιμής DL (ρευστό 2), σε συγκέντρωση % της σύστασης του συνολικού δείγματος

Μέχρι το 4<sup>ο</sup> βήμα της δοκιμής (565 psi), η σύσταση του ρευστού ακολουθεί την αναμενόμενη συμπεριφορά (οι συγκεντρώσεις των ελαφριών συστατικών μειώνονται, ενώ των βαρύτερων συστατικών αυξάνονται). Στο 5<sup>ο</sup> βήμα της δοκιμής, όμως, η συγκέντρωση του μεθανίου γίνεται πρακτικά ίση με 0, ενώ στις ατμοσφαιρικές συνθήκες αποκτά αρνητική τιμή, κάτι που φυσικά δεν είναι ρεαλιστικό. Αρνητικές τιμές παρουσιάζουν και οι συγκεντρώσεις του αιθανίου, του προπανίου και του βουτανίου στην ατμόσφαιρα. Επίσης, στο τελευταίο βήμα, η σύσταση του C<sub>7</sub> μειώνεται, ενώ θα έπρεπε να συνεχίσει να αυξάνεται, και αποκτά τιμή μικρότερη από εκείνη που είχε στο 3<sup>ο</sup> βήμα (1,115 psia). Αντιθέτως με το προηγούμενο δείγμα, τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου ρευστού παρουσιάζουν σοβαρά προβλήματα.

Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε το διάγραμμα των συντελεστών k συναρτήσει της πίεσης, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.38, μαζί με το πρότυπο διάγραμμα των συντελεστών k σε θερμοκρασία 250°F. Τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν προηγουμένως μετά το 4<sup>ο</sup> βήμα πίεσης της δοκιμής επιβεβαιώνονται περαιτέρω στην Εικόνα 5.38. Η καμπύλη του μεθανίου παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση συγκριτικά με την πρότυπη καμπύλη του. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί πως οι συντελεστές k του τελευταίου βήματος της πίεσης δεν έχουν σχεδιαστεί καθόλου, μιας και το μεθάνιο, το αιθάνιο, το προπάνιο και το βουτάνιο

παρουσιάζουν αρνητικές τιμές στη συγκέντρωσή τους. Η συμπεριφορά του διαγράμματος μέχρι το 4<sup>ο</sup> βήμα της δοκιμής ταιριάζει με τη συμπεριφορά του πρότυπου διαγράμματος, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνει πως τα δεδομένα που λαμβάνονται από τα πρώτα βήματα της δοκιμής διαφορικής εκτόνωσης είναι γενικά πιο αξιόπιστα.

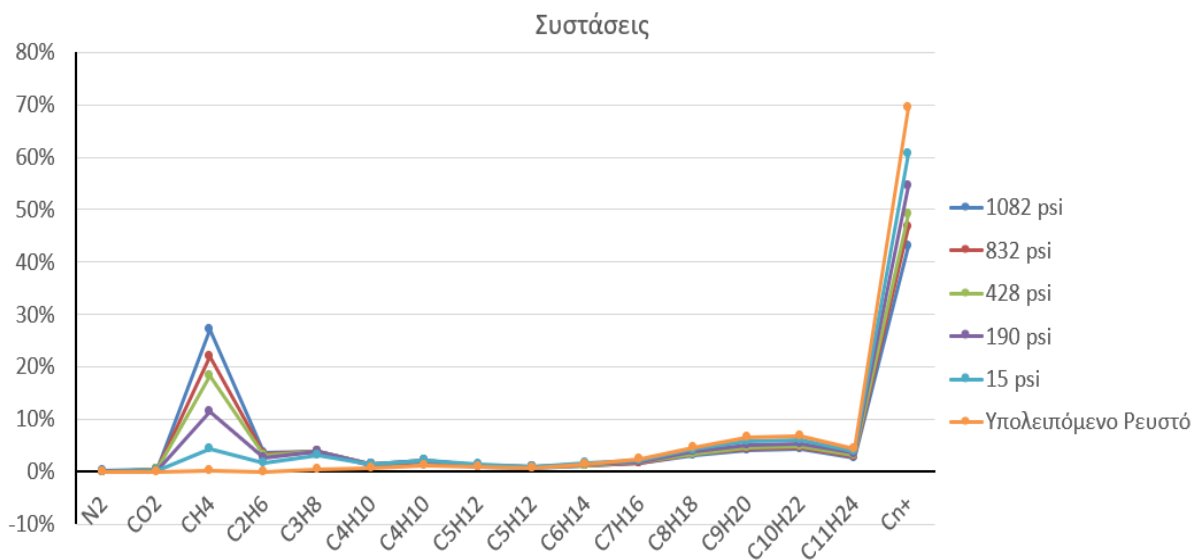


Εικόνα 5.38: α) Διάγραμμα τιμών συντελεστών  $k$  συναρτήσει της πίεσης για κάθε βήμα της δοκιμής DL (ρευστό 2) β) Πρότυπο διάγραμμα συντελεστών  $k$  συναρτήσει της πίεσης στους 250°F σε λογαριθμικό διάγραμμα των Katz και Hachmuth, από πειραματικά δεδομένα ενός πτητικού ρευστού

Συμπερασματικά, αντιθέτως με το ρευστό 1, τα δεδομένα του συγκεκριμένου δείγματος μπορούν να είναι αξιόπιστα μόνο μέχρι το 4<sup>ο</sup> βήμα της δοκιμής, καθώς σε πιέσεις μικρότερες από τα 1,115 psi παρουσιάζουν σοβαρά σφάλματα συγκριτικά με την αναμενόμενη συμπεριφορά. Οι αρνητικές τιμές των ελαφριών συστατικών σε συνθήκες ατμόσφαιρας, σε συνδυασμό με τα προβλήματα που δημιουργούν στη σχεδίαση διαγραμμάτων συντελεστών  $k$  και διαγραμμάτων Hoffman, οδηγούν στο συμπέρασμα πως τα αποτελέσματα του ρευστού 2 είναι μη ρεαλιστικά.

### 5.5.3 Ρευστό 3 (Μειωμένης Πτητικότητας)

Στη συνέχεια, σκοπός ήταν να ασκηθεί ο ποιοτικός έλεγχος στα 2 ρευστά μειωμένης πτητικότητας. Στο πρώτο από αυτά ασκήθηκαν 5 βήματα πίεσης στη δοκιμή διαφορικής εκτόνωσης, και το διάγραμμα των μεταβολών των συστάσεων του παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.39.

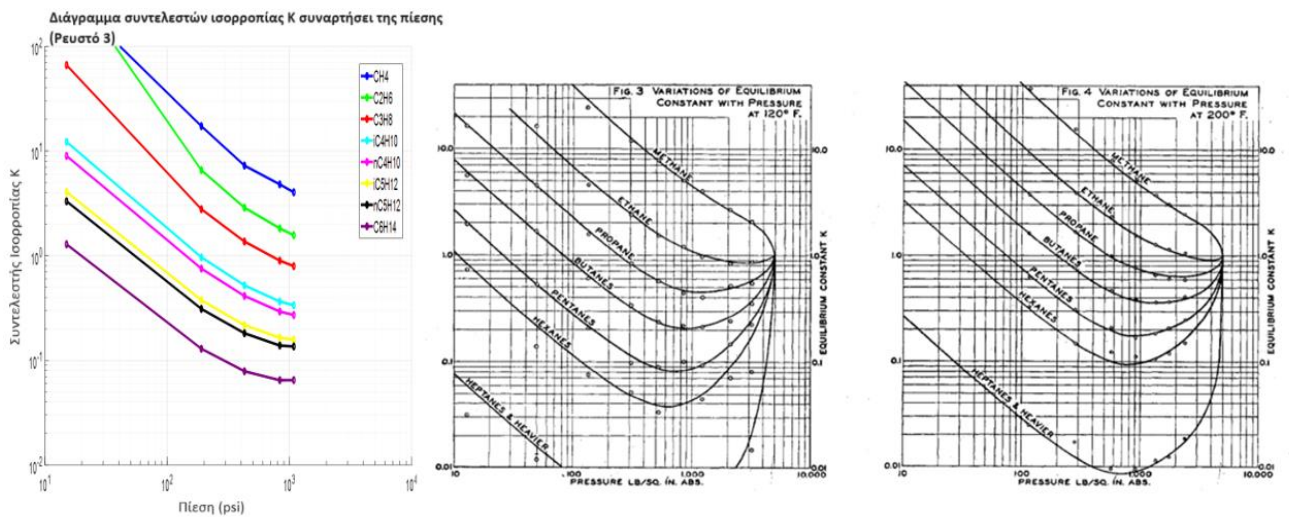


Εικόνα 5.39: Συστάσεις του υπολειπόμενου υγρού του κάθε βήματος της δοκιμής DL (ρευστό 3), σε συγκέντρωση % της σύστασης του συνολικού δείγματος

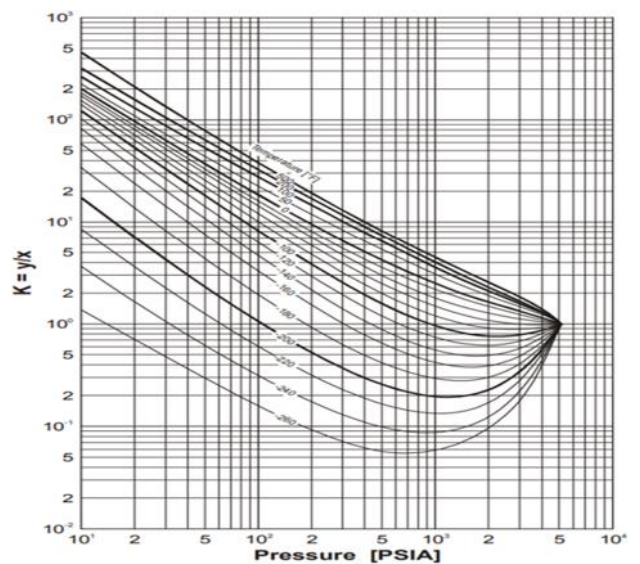
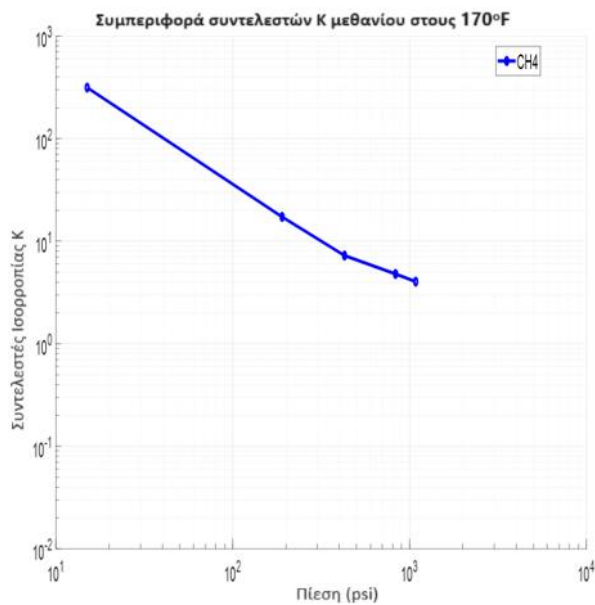
Όπως φαίνεται στην εικόνα, οι συστάσεις του δείγματος ακολουθούν τις αναμενόμενες μεταβολές, ενώ η συμπεριφορά τους παρουσιάζει μεγάλη ομοιότητα με τη συμπεριφορά που είχαν οι συστάσεις στην Ενότητα 5.5.1. Οι συγκεντρώσεις των ελαφριών συστατικών μειώνονται σταδιακά και προσεγγίζουν το 0 στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, ενώ οι συγκεντρώσεις των βαρύτερων συστατικών συνεχώς αυξάνονται.

Στη συνέχεια, σχεδιάστηκε το διάγραμμα των συντελεστών ισορροπίας  $k$  συναρτήσει της πίεσης στους 170°F για κάθε συστατικό, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.40. Στις Εικόνες 5.40α και 5.40β, παρουσιάζονται τα πρότυπα διαγράμματα των συντελεστών  $k$  για 120°F και 200°F αντίστοιχα, σύμφωνα με τους Katz και Hachmuth (D. L. Katz, 1937). Η σύγκριση των διαγραμμάτων δείχνει πως το διάγραμμα της Εικόνας 140α παρουσιάζει συμπεριφορά που πέφτει ανάμεσα σε εκείνες των 2 πρότυπων διαγραμμάτων, με εξαίρεση το συστατικό C<sub>2</sub>, το οποίο παρουσιάζει μια απόκλιση στο τελευταίο βήμα της δοκιμής. Μια

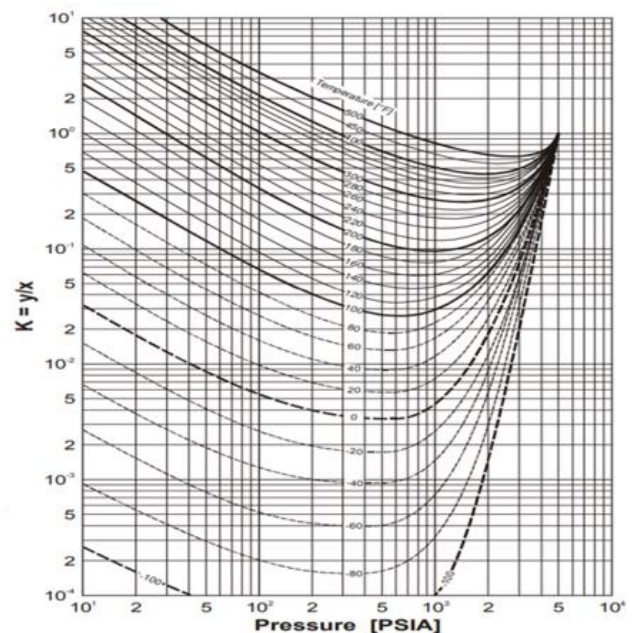
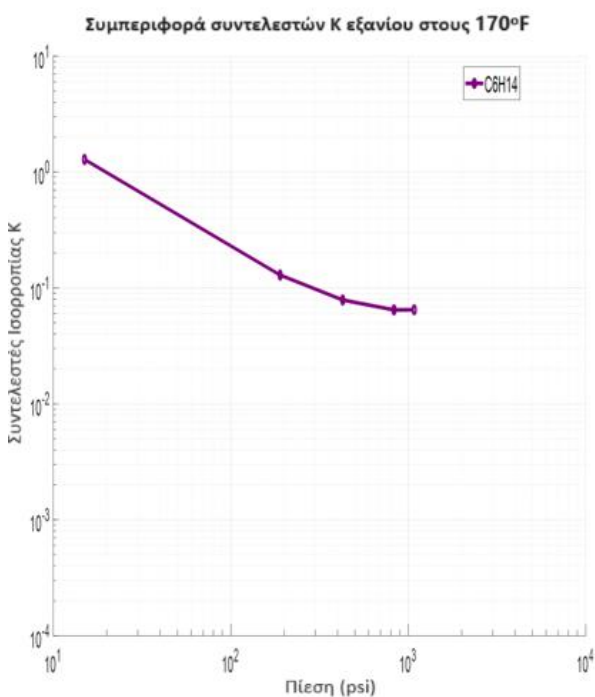
στενότερη σύγκριση του διαγράμματος του μεθανίου ( $C_1$ ) της Εικόνας 5.40, με το πρότυπο διάγραμμα του μεθανίου όπως προτείνει το NGAA, παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.41 (NGAA, 1957). Η σύγκριση αυτή επιβεβαιώνει πως η συμπεριφορά του μεθανίου στους 170°F πέφτει ανάμεσα στη συμπεριφορά του στους 100°F και 200°F, τουλάχιστον μέχρι το 4ο βήμα της πίεσης (190 psi). Η ίδια διαδικασία αναπαράγεται και για το εξάνιο, στην Εικόνα 5.42. Η συμπεριφορά του εξανίου ταυτίζεται σχεδόν ολοκληρωτικά με την πρότυπη συμπεριφορά του στους 170°F. Η συμπεριφορά του ρευστού συνεχίζει να παρουσιάζει ομοιότητες με τη συμπεριφορά του ρευστού 1 (Ενότητα 5.5.1), και δείχνει πως οι αποκλίσεις είναι μεγαλύτερες για πιέσεις κοντά στην ατμοσφαιρική και ιδιαίτερα για τα ελαφρύτερα συστατικά. Παρόλα αυτά, η ομοιότητα της συμπεριφοράς του ρευστού 3 με τις πρότυπες συμπεριφορές είναι κοντινότερη από ότι η συμπεριφορά του ρευστού 1, γεγονός που αποδίδεται στην πτητικότητα των ρευστών. Το ρευστό 3 είναι μειωμένης πτητικότητας, επομένως οι πιέσεις της δοκιμής DL είναι πιο μακριά από τις κρίσιμες τιμές, μειώνοντας έτσι την επίδραση των συστάσεων.



Εικόνα 5.40: Διάγραμμα τιμών συντελεστών  $k$  συναρτήσει της πίεσης για κάθε βήμα της δοκιμής DL (ρευστό 3) β) Πρότυπο διάγραμμα συντελεστών  $k$  συναρτήσει της πίεσης στους 120°F γ) Πρότυπο διάγραμμα συντελεστών  $k$  συναρτήσει της πίεσης στους 200°F (D. L. Katz, 1937)



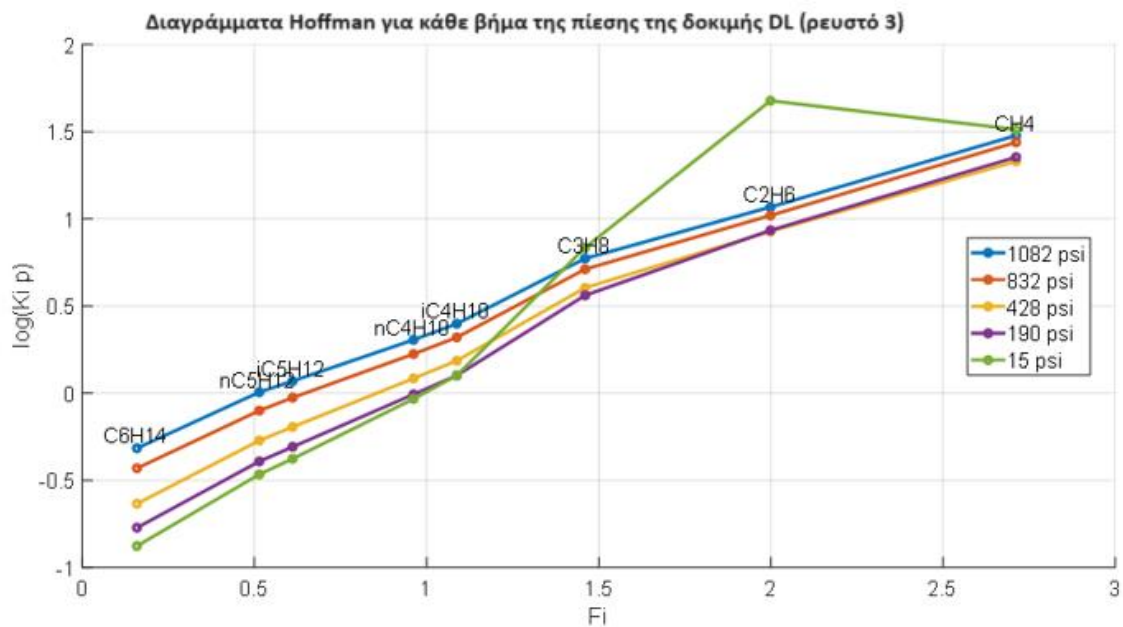
Εικόνα 5.41: Σύγκριση του διαγράμματος των τιμών του συντελεστή  $k$  του μεθανίου συναρτήσει της πίεσης (ρευστό 3), με το πρότυπο αντίστοιχο διάγραμμα του μεθανίου για διάφορες τιμές θερμοκρασίας (NGAA, 1957)



Εικόνα 5.42: Σύγκριση του διαγράμματος των τιμών του συντελεστή  $k$  του εξανίου συναρτήσει της πίεσης (ρευστό 1), με το πρότυπο αντίστοιχο διάγραμμα του εξανίου για διάφορες τιμές θερμοκρασίας (NGAA, 1957)

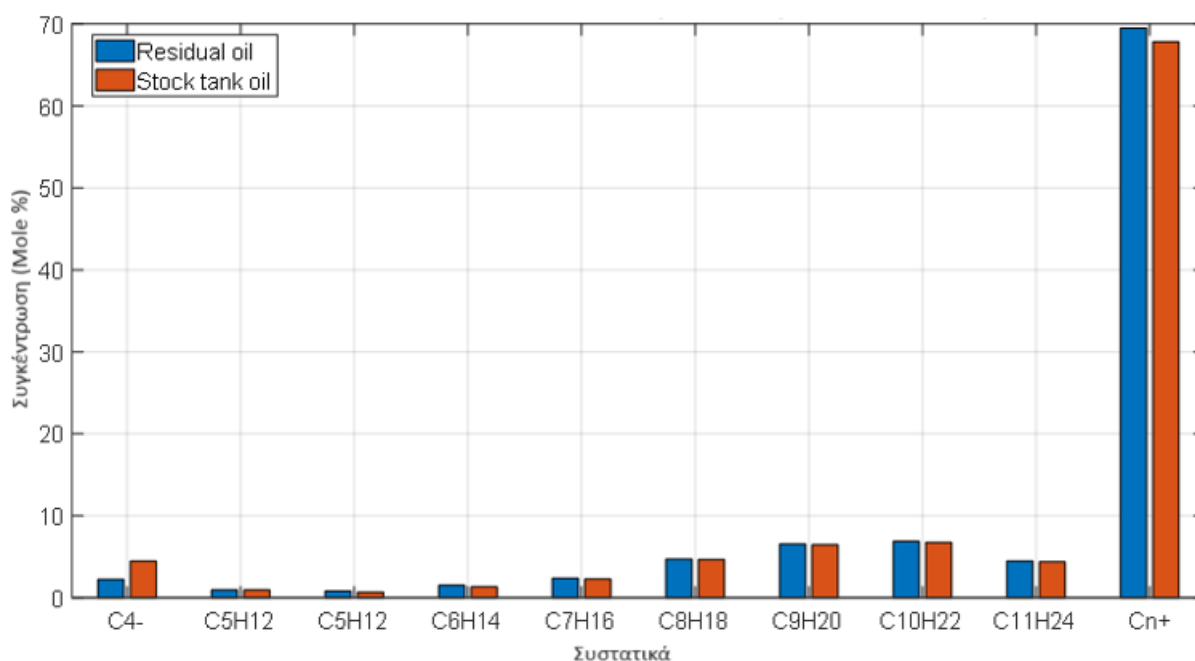


Η παρατήρηση των διαγραμμάτων Hoffman (Εικόνα 5.43) αποκάλυψε ξανά πως οι συστάσεις που υπολογίστηκαν είναι γενικά αξιόπιστες μόνο όσον αφορά τα πρώτα βήματα της δοκιμής DL και είναι αρκετά αμφισβητούμενες όσον αφορά το τελευταίο βήμα της δοκιμής. Ωστόσο, σε αντίθεση με τα διαγράμματα Hoffman του ρευστού 1, στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα διαγράμματα συγκλίνουν στο μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), συμβαδίζοντας έτσι με την πρότυπη συμπεριφορά του Hoffman.



Εικόνα 5.43: Διάγραμμα Hoffman για κάθε βήμα της πίεσης της δοκιμής DL (ρευστό 3)

Τέλος, όπως και στην Ενότητα 5.5.1, έγινε η σύγκριση της σύστασης του υπολειπόμενου υγρού στις ατμοσφαιρικές συνθήκες, το οποίο υπολογίστηκε με την Εξίσωση 5.21, με τη σύσταση του πετρελαίου τανκ που ήταν διαθέσιμο στη βάση δεδομένων, πράγμα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.44. Η σύγκριση των συστάσεων ακολουθεί την αναμενόμενη συμπεριφορά, μιας και η σύσταση του υπολειπόμενου ρευστού μετά τη δοκιμή διαφορικής εκτόνωσης (residual oil) είναι βαρύτερη από τη σύσταση του πετρελαίου τανκ που μεταφέρθηκε στις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης επιβεβαιώνει περαιτέρω πως τα ρευστά μειωμένης πηκτικότητας γενικά παρουσιάζουν μικρότερα σφάλματα, λόγω των λιγότερων βημάτων πίεσης στη δοκιμή διαφορικής εκτόνωσης και του λιγότερου αερίου που απελευθερώνεται.

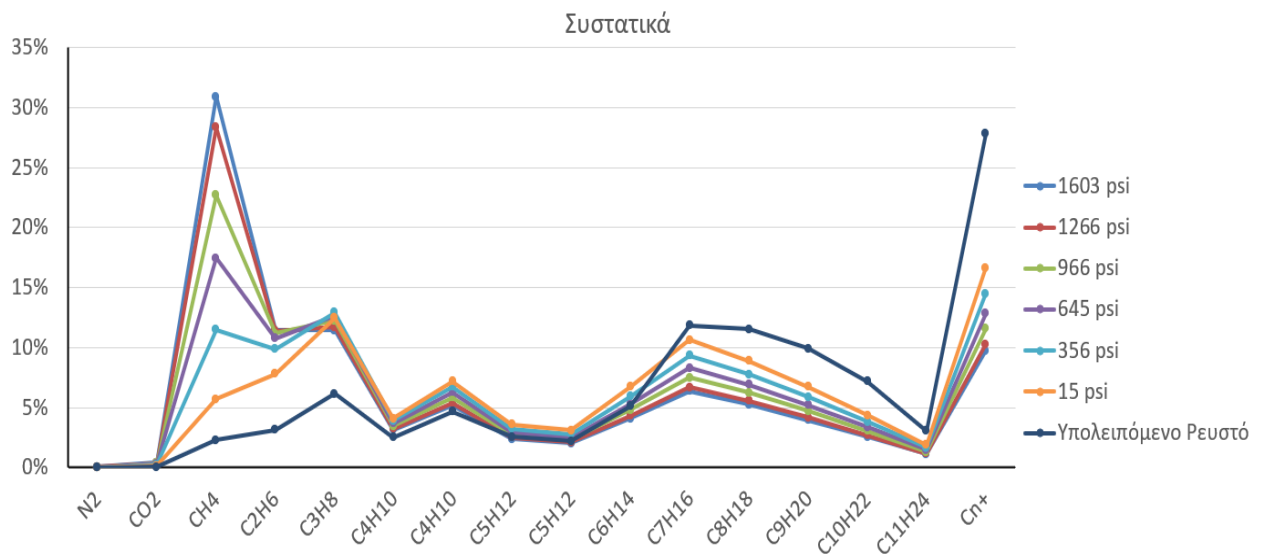


Εικόνα 5.44: Σύγκριση των συστάσεων για το ρευστό 3

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα του ποιοτικού ελέγχου όσον αφορά το ρευστό 3, το οποίο είναι μειωμένης πτητικότητας, είναι γενικά αποδεκτά και πιο έμπιστα από εκείνα των πτητικών ρευστών στις προηγούμενες ενότητες. Και πάλι, όμως, χρειάζεται προσοχή μιας και παρουσιάζονται ορισμένα σφάλματα στο τελευταίο βήμα της πίεσης, όσον αφορά τα διαγράμματα των συντελεστών  $k$  και τα διαγράμματα Hoffman.

#### 5.5.4 Ρευστό 4 (Μειωμένης Πτητικότητας)

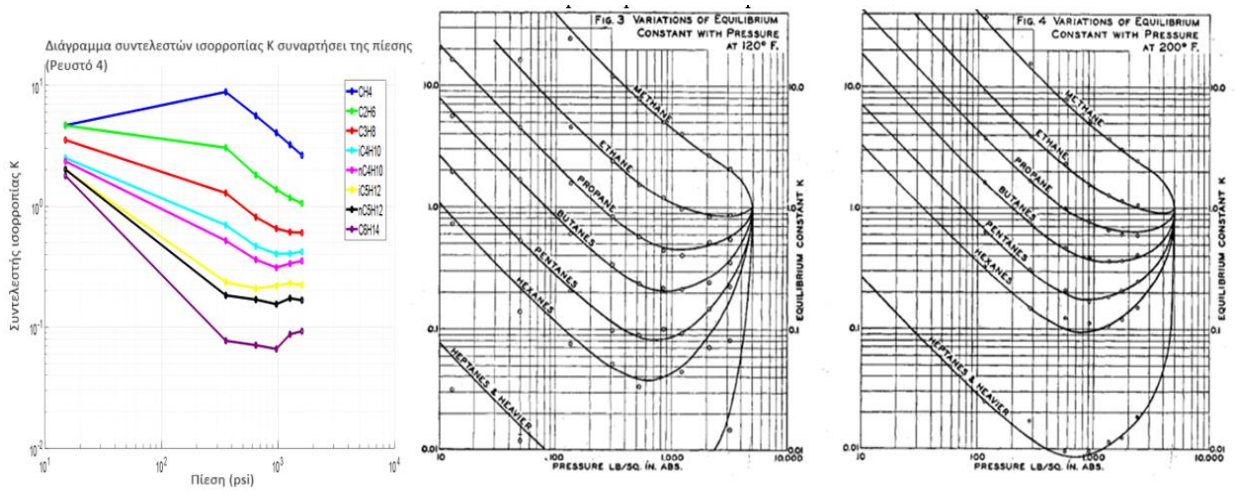
Τέλος, ο ποιοτικός έλεγχος εφαρμόστηκε και σε ένα ακόμη ρευστό μειωμένης πτητικότητας, το ρευστό 4. Το διάγραμμα μεταβολής των συστάσεων του παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.45. Όπως ήταν αναμενόμενο, η σύστασή του «βαραίνει» όσο μειώνεται η πίεση, οπότε αρχικά το ρευστό φαίνεται να μην παρουσιάζει κάποιο σφάλμα στον συγκεκριμένο τομέα.



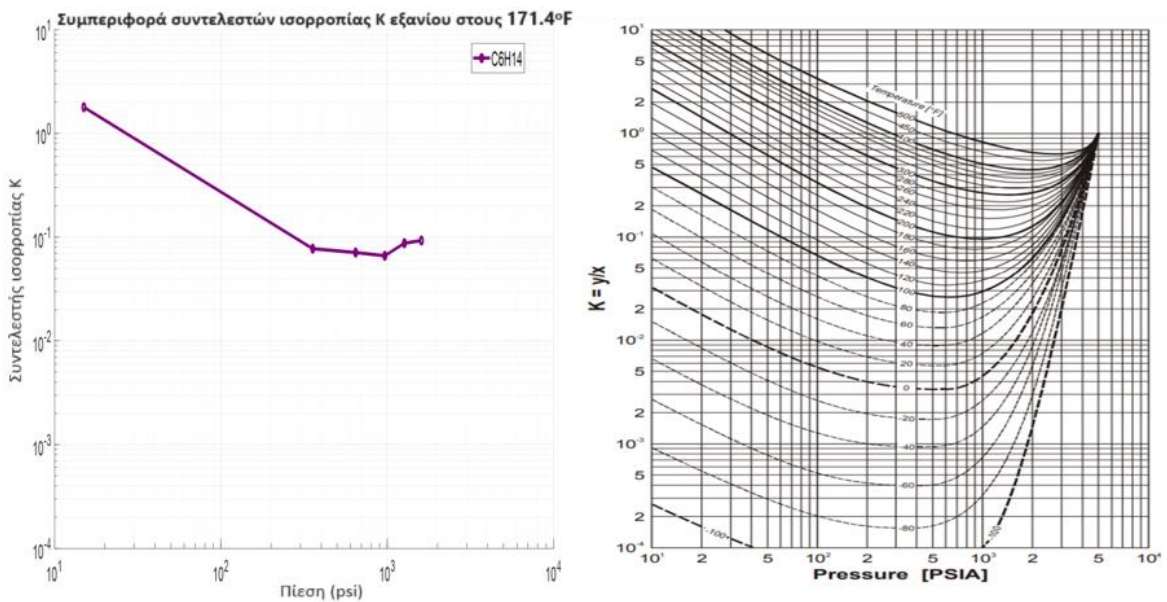
Εικόνα 5.45: Συστάσεις του υπολειπόμενου υγρού του κάθε βήματος της δοκιμής DL (ρευστό 4)

Στη συνέχεια, όπως και προηγουμένως, ακολουθεί η σχεδίαση των διαγραμμάτων των συντελεστών ισορροπίας  $k$  συναρτήσει της πίεσης, και η σύγκρισή τους με αντίστοιχα πρότυπα διαγράμματα σε θερμοκρασίες 120°F και 200°F αντίστοιχα (Εικόνα 5.46). Όπως είναι φανερό, η πρότυπη συμπεριφορά ακολουθείται μέχρι το 5<sup>ο</sup> βήμα της δοκιμής (356 psi), ενώ το τελευταίο βήμα παρουσιάζει σημαντικά σφάλματα, με όλους του συντελεστές ισορροπίας, εκτός του εξανίου, να αποκλίνουν από την πρότυπη συμπεριφορά. Μια λεπτομερέστερη σύγκριση του εξανίου με την πρότυπη συμπεριφορά του για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας (Εικόνα 5.47) φανερώνει πως και εκείνο ακολουθεί την πρότυπη συμπεριφορά μέχρι το 5<sup>ο</sup> βήμα, αλλά όχι στο τελευταίο.





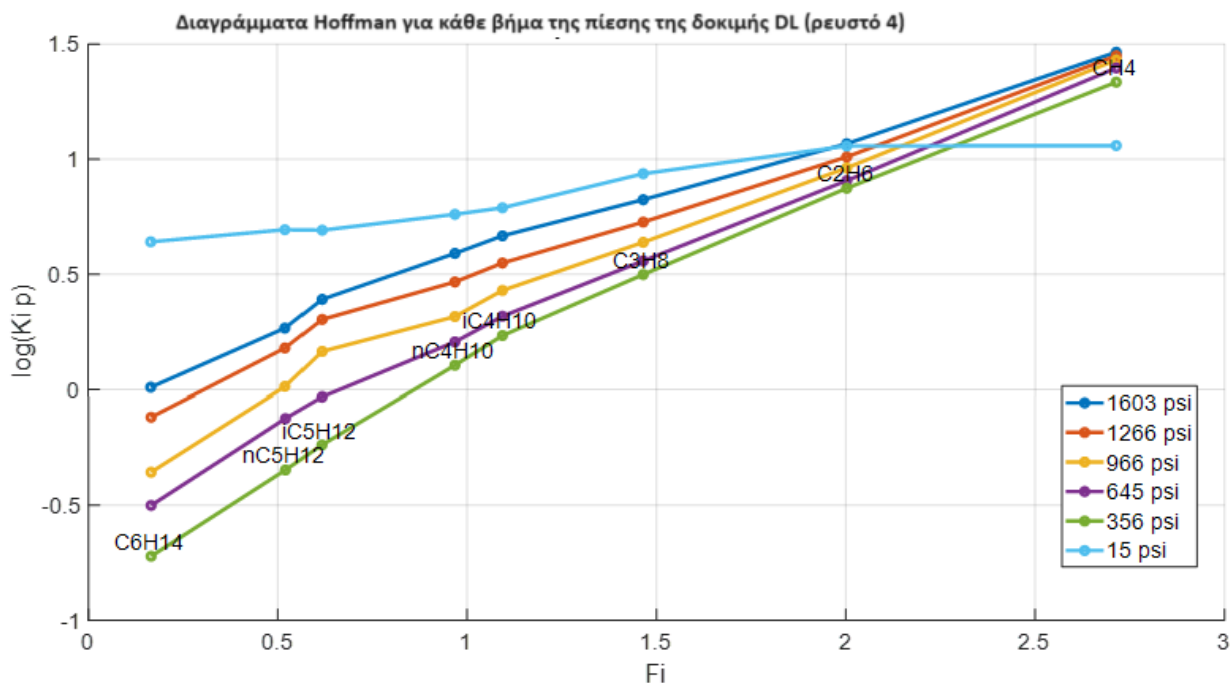
Εικόνα 5.46: Διάγραμμα τιμών συντελεστών k συναρτήσει της πίεσης για κάθε βήμα της δοκιμής DL (ρευστό 4) β) Πρότυπο διάγραμμα συντελεστών k συναρτήσει της πίεσης στους 120°F (D. L. Katz, 1937) γ) Πρότυπο διάγραμμα συντελεστών k συναρτήσει της πίεσης στους 200°F (D. L.



Εικόνα 5.47: Σύγκριση του διαγράμματος των τιμών του συντελεστή k του εξανίου συναρτήσει της πίεσης (ρευστό 4), με το πρότυπο αντίστοιχο διάγραμμα του εξανίου για διάφορες τιμές θερμοκρασίας (NGAA, 1957)

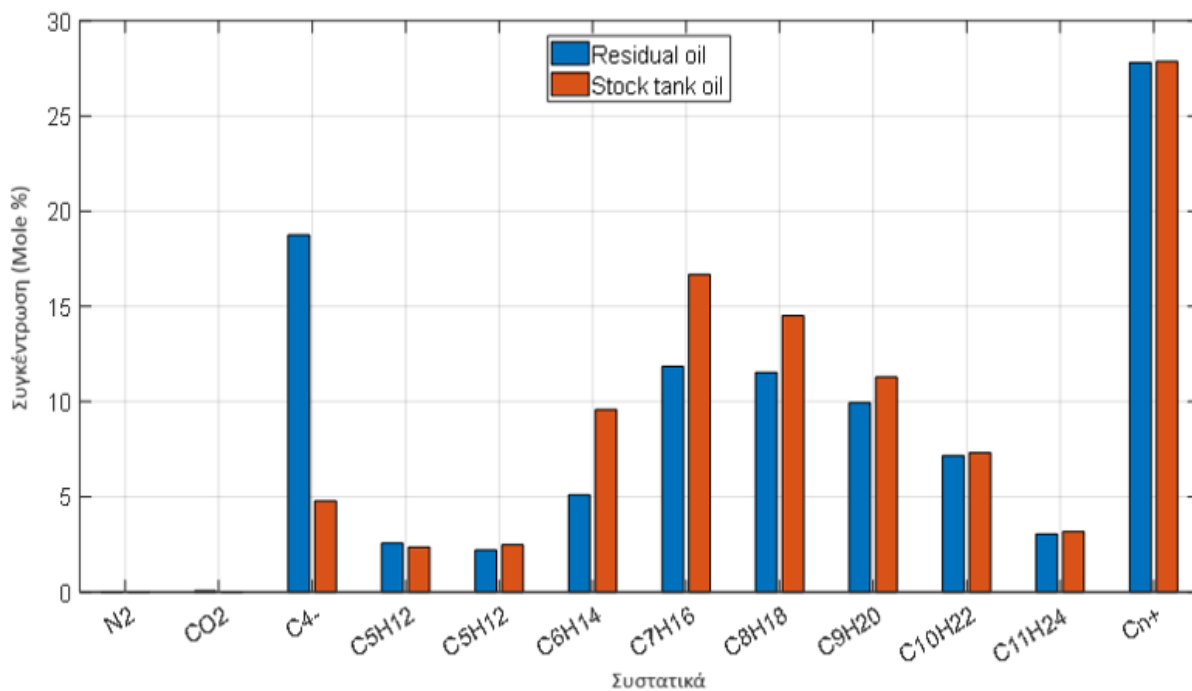
Οι ανεπιθύμητες τιμές των συντελεστών ισορροπίας k έχουν επίδραση και στα διαγράμματα Hoffman. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.48, τα διαγράμματα Hoffman παρουσιάζουν την

τυπική συμπεριφορά μέχρι το 5<sup>ο</sup> βήμα πίεσης, ενώ υπάρχουν σημαντικά προβλήματα όσον αφορά το τελευταίο βήμα. Παρόλα αυτά, το διάγραμμα Hoffman του τελευταίου βήματος, ακόμα και αν δεν συγκλίνει στο C<sub>1</sub>, είναι ευθεία, επομένως παρουσιάζει το πρότυπο σχήμα που θα έπρεπε να έχει.



Εικόνα 5.48: Διάγραμμα Hoffman για κάθε βήμα της πίεσης της δοκιμής DL (ρευστό 4)

Τέλος, έγινε η σύγκριση μεταξύ των 2 συστάσεων και ως αποτέλεσμα αναδείχθηκαν επιπρόσθετα προβλήματα. Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 5.49, παρόλο που οι συγκεντρώσεις των βαριών κλασμάτων (C<sub>n+</sub>) είναι πρακτικά ίσες, τα υπόλοιπα βαριά συστατικά έχουν μεγαλύτερες συγκεντρώσεις στο ρευστό που μεταφέρθηκε στις συνθήκες επιφάνειας. Επίσης, το κλάσμα των ελαφριών συστατικών (C<sub>4-</sub>) έχει πολύ μεγαλύτερη συγκέντρωση στο υπολειπόμενο ρευστό της δοκιμής DL. Επομένως, το υπολειπόμενο ρευστό της δοκιμής παρουσιάζει πολύ ελαφρύτερη σύσταση, που δεν θα έπρεπε να συμβεί.



Εικόνα 5.49: Σύγκριση των συστάσεων για το ρευστό 4

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα του ρευστού 4, παρόλο που είναι πιο αξιόπιστα από εκείνα του ρευστού 2, στο οποίο βρέθηκε αρνητική συγκέντρωση μεθανίου, παρουσιάζουν και πάλι πολύ μεγάλα σφάλματα. Η σύσταση του εναπομείναντος υγρού από τη δοκιμή DL έπρεπε να είναι βαρύτερη από τη σύσταση που ήταν διαθέσιμη στη βάση δεδομένων, το οποίο σε συνδυασμό με τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν στον σχεδιασμό των καμπυλών του συντελεστή  $k$ , φανερώνουν πως τα ρευστά μειωμένης πητικότητας, παρόλο που παρουσιάζουν γενικά καλύτερα αποτελέσματα, θέλουν επίσης προσοχή μιας και μπορεί να κρύβουν σημαντικά σφάλματα.

---

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έχοντας φτάσει πλέον στην ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πρέπει να γίνει μία σύνοψη των βασικών συμπερασμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή του ποιοτικού ελέγχου στα ρευστά της τυπικής εργαστηριακής αναφοράς ενός εργαστηρίου PVT. Μέσω της διαδικασίας αυτής κατανοήθηκε πλήρως πως είναι η δομή μιας τυπικής βάσης δεδομένων πετρελαϊκών ρευστών και μέσω των συγκεκριμένων βημάτων του ποιοτικού ελέγχου αναπτύχθηκε η κατάλληλη μεθοδολογία με την οποία έγινε δυνατή η αξιολόγηση της αξιοπιστίας του μεγάλου πλήθους ρευστών και πληροφοριών που περιέχονται μέσα στη βάση δεδομένων. Η πειραματική ροή με την οποία εφαρμόζονται οι δοκιμές PVT είναι γενικά αυστηρώς καθορισμένη, όμως η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, όπως αποδείχτηκε, συχνά υποφέρει από σημαντικά σφάλματα.

Αρχικά, μέσω του πρώτου βήματος του ποιοτικού ελέγχου, των ιστογραμμάτων, απορρίφθηκαν αυτομάτως 11 δείγματα, λόγω των τιμών που παρουσίαζαν σε ορισμένες ιδιότητες και χωρίς καν να χρειαστεί να περάσουν από κάποιου άλλου είδους έλεγχο. Το γεγονός αυτό δείχνει πως υπάρχουν σημαντικά σφάλματα στα δεδομένα, τα οποία είναι εύκολα προσδιορίσιμα. Στη συνέχεια, κατά τη προσπάθεια σχεδίασης των διαγραμμάτων, εντοπίστηκε η εσφαλμένη αντιστροφή των συντελεστών που είχε συμβεί στα δεδομένα των εξισώσεων ορισμένων σημαντικών ογκομετρικών ιδιοτήτων (του συντελεστή  $B_o$ , της πυκνότητας και του συντελεστή  $R_s$ ). Το σφάλμα αυτό επηρέαζε περίπου 690 ρευστά, δηλαδή την πλειοψηφία της βάσης δεδομένων, και έκανε αδύνατο τον υπολογισμό και τη σχεδίαση των διαγραμμάτων των πιο σημαντικών ογκομετρικών ιδιοτήτων. Αφού διορθώθηκε το συγκεκριμένο πρόβλημα, παρατηρήθηκαν σημαντικά σφάλματα στα διαγράμματα του συντελεστή συμπιεστότητας ( $c_o$ ) που επίσης αφορούσαν ένα σημαντικό κομμάτι των ρευστών της βάσης δεδομένων (περίπου 130 ρευστά). Τα σφάλματα αυτά προσπεράστηκαν λόγω του ότι δεν επηρέαζαν το υπόλοιπο κομμάτι του ποιοτικού ελέγχου, όμως το γεγονός αυτό δεν σημαίνει πως τα σφάλματα δεν υπήρχαν. Τέλος, μετά τον έλεγχο των διαγραμμάτων όλων των ιδιοτήτων απορρίφθηκαν επιπλέον 14 δείγματα εξαιτίας των καμπυλών τους ή εξαιτίας των τιμών των ογκομετρικών ιδιοτήτων που παρουσιάζονταν στις καμπύλες αυτές.

Στη συνέχεια, ο ποιοτικός έλεγχος προχώρησε στον υπολογισμό της πυκνότητας του υπολειπόμενου ρευστού της δοκιμής DL για κάθε βήμα στο οποίο εκτελέστηκε η δοκιμή

---

αυτή. Τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου ελέγχου ήταν καλύτερα από το αναμενόμενο, όμως επίσης απορρίφθηκαν 5 δείγματα εξαιτίας των τιμών της πυκνότητας που παρουσίασαν. Επιπρόσθετα, ο ποιοτικός έλεγχος της διατήρησης της μάζας στη δοκιμή DL έδειξε πως τα ρευστά μεγαλύτερης πτητικότητας παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερα σφάλματα από τα ρευστά μειωμένης πτητικότητας, οι αποκλίσεις των οποίων στην αρχή διατήρησης της μάζας ήταν ελάχιστες. Συνολικά λοιπόν, απορρίφθηκαν απευθείας 29 δείγματα από τα περίπου 650 που ελέγχθηκαν, τα οποία δεν θα μπορούσαν να θεωρηθούν αποδεκτά κάτω από καμία περίπτωση, μιας και παρουσίαζαν σημαντικά προβλήματα όσον αφορά τις ογκομετρικές τους ιδιότητες.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε ποιοτικός έλεγχος όσον αφορά τον υπολογισμό και την κριτική των συστάσεων των εναπομεινάντων ρευστών της δοκιμής DL, ενώ επίσης έγινε ο σχεδιασμός των διαγραμμάτων των συντελεστών  $k$  και των διαγραμμάτων Hoffman. Τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου ελέγχου έδειξαν πως τα περισσότερα προβλήματα παρουσιάζονται στο τελευταίο βήμα της δοκιμής DL και κυρίως στα πτητικά ρευστά. Τα αποτελέσματα των ρευστών μειωμένης πτητικότητας, αν και πιο αξιόπιστα, παρουσίαζαν και εκείνα προβλήματα στο τελευταίο βήμα της δοκιμής, οπότε χρειάζεται επίσης προσοχή στην χρήση των αποτελεσμάτων αυτών.

Τα προβλήματα αυτά υπογραμμίζουν την ανάγκη για εκτεταμένες διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου (QC) που πρέπει να πραγματοποιείται σε κάθε βήμα της δοκιμής DL και στη βάση δεδομένων γενικότερα. Η ανάγκη για αυστηρό QC είναι ακόμη πιο έντονη κατά την ενασχόληση με πτητικά ρευστά, λόγω των πολύ ανασφαλών αποτελεσμάτων. Οι Μηχανικοί πρέπει να πραγματοποιούν διεξοδικούς ελέγχους και να επικυρώνουν τα αποτελέσματά τους μέσω διασταύρωσης με άλλα δεδομένα PVT ή ακόμη και με ιστορικά δεδομένα του ίδιου ταμιευτήρα και πεδίου, εάν είναι διαθέσιμα, για να διασφαλίσουν αυξημένη ακρίβεια. Σε περίπτωση που εντοπιστούν αποκλίσεις, οι Μηχανικοί θα μπορούσαν να εξετάσουν το ενδεχόμενο εφαρμογής διορθώσεων στα επηρεαζόμενα δεδομένα ή ακόμη και επανάληψη του πειράματος PVT. Οι διορθώσεις μπορούν να εφαρμοστούν μαθηματικά για να εκτιμηθεί η ελάχιστη δυνατή τροποποίηση που απαιτείται να εφαρμοστεί στα δεδομένα των πετρελαϊκών ρευστών έτσι ώστε τα στοιχεία της βάσης δεδομένων να γίνουν έμπιστα ως προς την χρήση. Εάν τα σφάλματα είναι αρκετά σοβαρά και δεν μπορούν να διορθωθούν με την εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων, κρίνεται απαραίτητη η επανάληψη των πειραματικών δοκιμών PVT. Εφαρμόζοντας τα μέτρα αυτά, οι Μηχανικοί μπορούν να

---

βελτιώσουν την αξιοπιστία των μοντέλων ρευστών τους και των προσομοιώσεων των ταμειωτήρων, κάτι που με τη σειρά του μπορεί να οδηγήσει σε πιο πληρέστερες και ασφαλέστερες αποφάσεις διαχείρισης πεδίου.

---

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Chierici, G. L. (1995). Principles of Petroleum Reservoir Engineering. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
2. Dandekar, A.Y. Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties; CRC Press: Boca Raton, 2006; ISBN 978-0-429-12498-3.
3. Guan, D.; Qu, A.; Gao, P.; Fan, Q.; Li, Q.; Zhang, L.; Zhao, J.; Song, Y.; Yang, L. Improved Temperature Distribution upon Varying Gas Producing Channel in Gas Hydrate Reservoir: Insights from the Joule-Thomson Effect. *Applied Energy* 2023, 348, 121542, doi:10.1016/j.apenergy.2023.121542.
4. Primio, R.D.; Dieckmann, V.; Mills, N. PVT and Phase Behaviour Analysis in Petroleum Exploration. *Organic Geochemistry* 1998, 29, 207.
5. Economides, M.J.; Hill, A.D.; Ehlig-Economides, C.; Zhu, D. Petroleum Production Systems; 2. ed.; Prentice Hall: Upper Sad-dle River, NJ, 2013; ISBN 978-0-13-703158-0.
6. K S Pedersen Aage Fredenslund P Thomassen Properties of Oils and Natural Gases | PDF | Petroleum | Gases Available online: <https://www.scribd.com/document/339329455/K-S-Pedersen-Aage-Fredenslund-P-Thomassen-Properties-of-Oils-and-Natural-Gases> (accessed on 7 June 2024).
7. Burcik, E. J. (1957). Properties of Petroleum Reservoir Fluids. Wiley.
8. Cameron, J. (2019). Petroleum Reservoir Engineering. Syrawood Publishing House .
9. Petroleum Reservoir Engineering; Dedini, M., Ed.; CALLISTO REFERENCE, 2019; ISBN 978-1-64116-093-3.
10. Dodson, C.R.; Goodwill, D.; Mayer, E.H. Application of Laboratory PVT Data to Reservoir Engineering Problems. *Journal of Petroleum Technology* 1953, 5, 287–298, doi:10.2118/953287-G.
11. Ahmed, T. Equations of State and PVT Analysis. *Equations of State and PVT Analysis* 2013, 1–553.
12. Gaganis, V.; Kourlianski, E.; Varotsis, N. An Accurate Method to Generate Composite PVT Data for Black Oil Simulation. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 2017, 157, 1–13, doi:10.1016/j.petrol.2017.07.006.
13. Carstensen, C.-M.; Kanstad, S.K. Modifying the Gas-Oil Ratio and Water Cut of a PVT Lookup Table Using Correlations for Fluid Volatility. *Chemical Engineering Research and Design* 2024, 205, 188–206, doi:10.1016/j.cherd.2024.03.036.
14. Kanakaki, E.M.; Gaganis, V. Automated Equations of State Tuning Workflow Using Global Optimization and Physical Con-straints. *Liquids* 2024, 4, 261–277, doi:10.3390/liquids4010012.
15. Wei, Y.S.; Sadus, R.J. Equations of State for the Calculation of Fluid-phase Equilibria. *AIChE Journal* 2000, 46, 169–196, doi:10.1002/aic.690460119.

- 
16. Laing, L.; Shirai, S.; Rosli, K.; Talabi, O.; Fawzi, N. Comprehensive PVT Data Review, Fluid Characterization and Grouping Study for Block X in Sarawak, Malaysia.; March 18 2022.
  17. Angulo, R. EOS Workflows Uncertainties and Implications in Reservoir Modeling.; September 17 2019.
  18. Hendraningrat, L.; Salleh, I.K. Applied Novel Quality Check Method for PVT Data with High Impurities Using Various Samples from Malaysian Fields.; OnePetro, December 9 2021.
  19. Terry, R.E.; Rogers, J.B.; Craft, B.C. Applied Petroleum Reservoir Engineering; Third edition.; Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, 2015; ISBN 978-0-13-315558-7.
  20. Paredes, J.; Perez, R.; Larez, C. Screening Criteria And Methodology For Quality Check And PVT Selection For Reservoir Studies. Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition 2014, 2, 1561–1580, doi:10.2118/170695-MS.
  21. Bilal, Y.; Hays, W.; Sissel, M. Compositional Uncertainties in Laboratory PVT Data.; October 31 2022.
  22. Baker, R.O.; Regier, C.; Sinclair, R. PVT Error Analysis for Material Balance Calculations.; OnePetro, June 10 2003.
  23. Lawrence, J.J.; Gupta, D.K. Quality Assessment And Consistency Evaluation Of Hydrocarbon PVT Data. In Proceedings of the All Days; IPTC: Doha, Qatar, December 7 2009; p. IPTC-13784-MS.
  24. Ragab, A.; Mansour, E.M. Investigating the Impact of PVT Analysis Errors on Material Balance Calculations for Oil Reservoirs. Petroleum and Coal 2021, Volume 62, 2020, 1272–1278.
  25. Jacoby, R.H.; Yarborough, L. PVT Measurements on Petroleum Reservoir Fluids and Their Uses. Industrial & Engineering Chemistry 1967, 59, doi:10.1021/ie50694a010.
  26. Hazim, N.; Bageri, M.; Kinawy, M. Investigating the Effect of Input Data Uncertainties in Material Balance Calculations for Hydrocarbon Reservoirs. Journal of Industrial and Intelligent Information 2014, 2, doi:10.12720/jiii.2.4.289-296.
  27. Garcia, C.A.; Villa, J.R. Pressure and PVT Uncertainty in Material Balance Calculations.; OnePetro, April 15 2007.
  28. Samnioti, A.; Kanakaki, E.M.; Koffa, E.; Dimitrellou, I.; Tomos, C.; Kiomourtzi, P.; Gaganis, V.; Stamataki, S. Wellbore and Reservoir Thermodynamic Appraisal in Acid Gas Injection for EOR Operations. Energies 2023, 16, 2392, doi:10.3390/en16052392.
  29. Nagarajan, N.R.; Honarpour, M.M.; Sampath, K. Reservoir Fluid Sampling and Characterization—Key to Efficient Reservoir Management.; OnePetro, November 5 2006.
  30. Seyyedattar, M.; Zendehboudi, S.; Butt, S. Technical and Non-Technical Challenges of Development of Offshore Petroleum Reservoirs: Characterization and Production. Nat Resour Res 2020, 29, 2147–2189, doi:10.1007/s11053-019-09549-7.



- 
31. Ojo, K.P.; Tiab, D.; Osisanya, S.O. Dynamic Material Balance Equation and Solution Technique Using Production and PVT Data.; OnePetro, June 8 2004.
  32. Potsch, K.; Toplack, P.; Gumpenberger, T. A Review and Extension of Existing Consistency Tests for PVT Data From a Laboratory. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering* 2017, 20, 269–284, doi:10.2118/183640-PA.
  33. Fotias, S.P.; Gaganis, V. Workflow for Predicting Undersaturated Oil Viscosity Using Machine Learning. *Results in Engineering* 2023, 20, 101502, doi:10.1016/j.rineng.2023.101502.
  34. Samnioti, A.; Kanakaki, E.M.; Fotias, S.P.; Gaganis, V. Rapid Hydrate Formation Conditions Prediction in Acid Gas Streams. *Fluids* 2023, 8, 226, doi:10.3390/fluids8080226.
  35. Samnioti, A.; Gaganis, V. Applications of Machine Learning in Subsurface Reservoir Simulation—A Review—Part I. *Energies* 2023, 16, 6079, doi:10.3390/en16166079.
  36. Samnioti, A.; Gaganis, V. Applications of Machine Learning in Subsurface Reservoir Simulation—A Review—Part II. *Energies* 2023, 16, 6727, doi:10.3390/en16186727.
  37. Imo-Jack, O.; Emelle, C. An Analytical Approach to Consistency Checks of Experimental PVT Data.; OnePetro, August 5 2013.
  38. Hashemi, S.M.H.; Monfaredi, K.; Sedaee, B. An Inclusive Consistency Check Procedure for Quality Control Methods of the Black Oil Laboratory Data. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology* 2020, 10, 2153–2173, doi:10.1007/s13202-020-00869-6.
  39. Ireke, I.; Ikpeka, P. Impact of PVT Correlations on Reserve Estimation: Reliability and Qualitative Analysis.; July 31 2017.
  40. Ezekwe, N. *Petroleum Reservoir Engineering Practice*; Prentice Hall, 2011; ISBN 978-0-13-715283-4.
  41. Standing, M.B. *Volumetric and Phase Behavior of Oil Field Hydrocarbon Systems*; Society of Petroleum Engineers, 1951;
  42. Al-Marhoun, M.A. Adjustment of Differential Liberation Data to Separator Conditions. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering* 2003, 6, 142–146, doi:10.2118/84684-PA.
  43. Danesh, A. (1998). *PVT and Phase Behaviour of Petroleum Reservoir Problems*. Elsevier Science & Technology Books .
  44. James W. Amyx, D. M. (1960). *Petroleum Reservoir Engineering Physical Properties*. US: McGraw-Hill.
  45. Pedersen, K.S.; Christensen, P.L.; Shaikh, J.A. *Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids*; 2nd ed.; CRC Press: Boca Raton, 2014; ISBN 978-0-429-11030-6.
  46. Moses, P.L. Engineering Applications of Phase Behavior of Crude Oil and Condensate Systems (Includes Associated Papers 16046, 16177, 16390, 16440, 19214 and 19893 ). *Journal of Petroleum Technology* 1986, 38, 715–723, doi:10.2118/15835-PA.
  47. *Petroleum Reservoir Fluid Property Correlations Book* William D. McCain Jr. | John P. Spivey | Christopher P. Lenn ISBN: 9781593701871;

- 
48. Dake, L. P. (1983). *Fundamentals of Reservoir Engineering*. The Netherlands: ELSEVIER.
  49. Whitson, C.H.; Brulé, M.R. *Phase Behavior*; Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME, Society of Petroleum Engineers, 2000; ISBN 978-1-55563-087-4.
  50. Kanakaki, E.M.; Samnioti, A.; Gaganis, V. Enhancement of Machine-Learning-Based Flash Calculations near Criticality Using a Resampling Approach. *Computation* 2024, 12, 10, doi:10.3390/computation12010010.
  51. Hoffman, A.E.; Crump, J.S.; Hocott, C.R. Equilibrium Constants for a Gas-Condensate System. *Journal of Petroleum Technology* 1953, 5, 1–10, doi:10.2118/219-G.
  52. Katz, D.L.; Hachmuth, K.H. Vaporization Equilibrium Constants in a Crude Oil–Natural Gas System. *Ind. Eng. Chem.* 1937, 29, 1072–1077, doi:10.1021/ie50333a022.
  53. *Equilibrium Ratio Data Book*; NGAA: Tulsa, Oklahoma, 1957;
  54. Standing, M.B.; Katz, D.L. Vapor-Liquid Equilibria of Natural Gas-Crude Oil Systems. *Transactions of the AIME* 1944, 155, 232–245, doi:10.2118/944232-G.